

**Ein neues Verfahren zur automatischen Kalibrierung zwischen
Manipulator und 2D Laserscanner ohne Kalibriertarget unter
Berücksichtigung von Messfehlern**

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

(abgekürzt Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von M. Sc. Jan Alberts
geboren am 20.03.1987 in Hildesheim

2022

Referent: Prof. Dr.-Ing. Bernardo Wagner
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Matthias Müller

Tag der Promotion: 16.06.2022

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Systems Engineering, Fachgebiet Echtzeitsysteme (RTS) an der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

Ich bedanke mich bei meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernardo Wagner für die Betreuung und Unterstützung meiner Promotion. Dem Leiter des Lehrstuhl für Regelungstechnik Prof. Dr.-Ing. Matthias Müller danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Weiterhin bedanke ich mich herzlich bei meinen ehemaligen Kollegen und Kolleginnen des RTS und ZDT bzw. DEI. Die fachlichen Gespräche haben mir in meiner Forschung weiter geholfen und die vielen ausgedruckten Kalibriertargets und Sensorhalter aus dem 3D Drucker haben meine Forschung erst möglich gemacht. Die Institutsausflüge und die vielen persönlichen Gespräche und Mittagsrunden haben immer große Freude bereitet. Insbesondere bedanke ich mich bei Christian Wieghardt und Raphael Voges für die Hinweise für die finale Fassung.

Meiner Familie und meinen Freunden danke ich für die Unterstützung und den Rückhalt während der gesamten Zeit. Ohne Euch hätte ich das nicht schaffen können. Ihr seid spitze!

Kurzfassung

Damit mobile oder feststehende Manipulatoren die Messdaten von Laserscannern nutzen können, um die Bewegung des Manipulators zu planen, müssen die Systeme mit einer extrinsischen Kalibrierung in einen geometrischen Kontext zueinander gesetzt werden. Da die Systeme im industriellen Umfeld oder im Einsatz vor Ort Einflüssen wie Vibrationen oder Stößen ausgesetzt sind, können die beiden Teilsysteme zueinander verschoben und rotiert werden. Dies verändert die kinematische Struktur des Gesamtsystems und kann zu einer eingeschränkten Funktion oder Kollisionen führen. Um die Einsatzfähigkeit wiederherzustellen, muss die kinematische Struktur mit einer extrinsischen Kalibrierung neu parametrisiert werden. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und Benutzerfreundlichkeit sollten die Systeme ihre Aufgaben weitestgehend autonom oder teilautonom verrichten. Die Fähigkeit einer automatischen Kalibrierung ohne zusätzlich anzubringende Sensorik oder mitzuführende Kalibriertargets ist erforderlich, um dauerhaft zuverlässig und robust mit der Umgebung interagieren und die geforderte Funktion ausführen zu können.

Bisherige Verfahren zur extrinsischen Kalibrierung zwischen 2D Laserscanner und Manipulator verwenden komplexe und große Kalibriertargets oder eine mitzuführende Kamera. Die automatische Kalibrierung anhand des Manipulators selbst ist bisher nicht möglich. Dieses Problem wird in dieser Arbeit für Manipulatoren mit zylinderförmigen Gliedern oder Werkzeugen erstmals gelöst und untersucht.

Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz basiert darauf die kinematische Kette des Manipulators entlang einer Achse zu verlängern und den Schnittpunkt mit der Messebene des Laserscanners zu bestimmen. Mehrere Messposen führen schließlich dazu, dass die Transformationskette zwischen Manipulator und Laserscanner mit einer Kleinste-Quadrate Optimierung geschlossen werden kann und sich die gesuchte Transformation zwischen Manipulator-Basis und Laserscanner ergibt. Dieses Vorgehen ermöglicht es kleine, mitführbare, zylinderförmige Kalibriertargets, zylinderförmige Werkzeuge oder den Manipulator selbst zur Kalibrierung zu verwenden. Der Ansatz wird außerdem dahingehend erweitert, dass die Messfehler berücksichtigt werden können. So wird die Genauigkeit der Kalibrierung verbessert.

Zur Bewertung des Ansatzes wird dieser in simulierten und realen Experimenten untersucht. Die gewonnenen Kalibrierparameter werden mit einem externen, hoch präzisen optischen Referenzsystem evaluiert. Im Vergleich mit einem aktuellen Verfahren konnten der translatorische und rotatorische Fehler der Kalibrierparameter zwischen 44% und 92% verringert werden.

Schlagworte:

Mobiler Manipulator, Extrinsische Kalibrierung, Manipulator, 2D Laserscanner, Fehlermodelle, Rekalibrierung, Automatische Kalibrierung

Abstract

In order for mobile or fixed manipulators to use the measured data from the laser scanner to plan the movement of the manipulator, the systems must be set in a geometric context to each other using extrinsic calibration. As the systems are exposed to influences such as vibrations or shocks in industrial environments or on-site applications, the two subsystems can be translated and rotated relative to each other. This changes the kinematic structure of the overall system and can lead to impaired function or even collisions. To restore functionality, the kinematic structure must be reparameterized using the extrinsic calibration. For reasons of economy efficiency and user-friendliness, the systems should perform their tasks as autonomously or semi-autonomously as possible. To interact permanently reliable and robust with the environment and to perform the required function the ability of an automatic calibration without additional sensors or calibration targets to be carried along is required.

Previous methods for extrinsic calibration between 2D laser scanner and manipulator use complex and large calibration targets or a carried along camera. Automatic calibration based on the manipulator itself has not been possible so far. This problem is solved for manipulators with cylindrical links for the first time in the present work.

The approach presented in this work is based on extending the kinematic chain of the manipulator along an axis and determining the intersection Point with the measurement plane of the laser scanner. Several measurement poses finally lead to the closure of the transformation chain between manipulator and laser scanner using a weighted least-squared optimization, resulting in the required transformation between manipulator base and laser scanner. This approach allows small, cylindrical calibration targets, cylindrical tools or the manipulator itself to be used for calibration. The approach is also extended to consider measurement errors. This improves the accuracy of the calibration procedure and provides an estimate of the accuracy achieved.

In order to evaluate the developed approach, it is investigated in simulative and real experiments. The calibration parameters obtained are evaluated with an external, high-precision optical reference system. Compared to a state-of-the-art calibration process the translational and rotational error of the estimated calibration parameters was reduced in several real experiments in a range between 44% and 92%.

Keywords:

mobile manipulator, extrinsic calibration, manipulator, 2D laserscanner, error models, recalibration, automatic calibration

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-------------|
| Abbildungsverzeichnis | xi |
| Tabellenverzeichnis | xvii |
| Abkürzungsverzeichnis | xix |
| Symbolverzeichnis | xxi |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Einführung und Motivation | 1 |
| 1.2 Problemstellung und Randbedingungen | 2 |
| 1.3 Lösungsansatz | 4 |
| 1.4 Struktur der Arbeit | 8 |
| 2 Stand der Technik | 9 |
| 2.1 Modellierung | 10 |
| 2.1.1 Modellierung geometrischer Beziehungen | 10 |
| 2.1.2 Modellierung der seriellen Kinematik | 11 |
| 2.1.3 Modellierung des Laserscanners | 13 |
| 2.2 Kalibrierung | 14 |
| 2.2.1 Extrinsische Kalibrierung | 14 |
| 2.2.2 Genauigkeit | 15 |
| 2.2.3 Kalibrierung mobiler Manipulatoren | 16 |
| 2.3 Kalibrierung zwischen Manipulator und Laserscanner | 17 |
| 2.3.1 Funktionsprinzipien | 17 |
| 2.3.2 Manuelle Kalibrierung | 18 |
| 2.3.3 Kalibrierung mittels Kamera | 19 |
| 2.3.4 Kalibrierung mittels gegriffenem Kalibriertarget | 21 |
| 2.4 Detektierung Zylinderförmiger Objekte im Laserscan | 26 |
| 2.5 Sensorfehler | 28 |
| 2.5.1 Fehlermodelle | 29 |
| 2.5.2 Fehleranalyse des seriellen Manipulators und Fehlermodell des Universal Robot UR5 | 30 |
| 2.5.3 Fehleranalyse des Laserscanner | 32 |
| 2.5.4 Kalibrierung unter Berücksichtigung des Messfehlers | 33 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.5.5 | Kalibrierung von Hokuyo Laserscannern unter Berücksichtigung des Messfehlers | 34 |
| 2.5.6 | Wahl des Fehlermodells für diese Arbeit | 36 |
| 2.6 | Bezug zur Arbeit | 36 |
| 3 | Detektierung des Kalibriertargets | 41 |
| 3.1 | Datenverarbeitung und Fehlermodell des Laserscanners | 42 |
| 3.1.1 | Modellierung des Laserscanners | 42 |
| 3.1.2 | Kantenschuss-Filter | 43 |
| 3.1.3 | Definition des Fehlermodells des Laserscanners | 44 |
| 3.2 | Detektierung des Zylinders im Laserscan | 44 |
| 3.2.1 | Modellierung des Querschnitts | 45 |
| 3.2.2 | Identifikation systematischer Fehler | 45 |
| 3.2.3 | Ellipsenfitting zur Detektierung des Kalibriertargets | 48 |
| 3.3 | Zusammenfassung | 51 |
| 4 | Kalibrierung ohne Berücksichtigung der Messfehler | 53 |
| 4.1 | Transformationskettenschluss mittels verlängerter Achse des Manipulators | 53 |
| 4.1.1 | Das Funktionsprinzip | 54 |
| 4.1.2 | Modellierung der Transformationskette | 54 |
| 4.1.3 | Verdrehung des Kalibriertargets | 56 |
| 4.2 | Definition des Optimierungsproblems | 57 |
| 4.3 | Kalibrierung ohne Kalibriertarget | 59 |
| 4.4 | Zusammenfassung | 60 |
| 5 | Kalibrierung unter Berücksichtigung der Messfehler | 61 |
| 5.1 | Modellierung der Unsicherheiten der Teilsysteme | 62 |
| 5.1.1 | Unsicherheit des Manipulators und Projektion auf die Ebene des Laserscanners | 62 |
| 5.1.2 | Unsicherheit des Laserscanners | 65 |
| 5.1.3 | Resultierende Gesamtunsicherheit | 66 |
| 5.2 | Kalibrierung | 67 |
| 5.2.1 | Funktionsprinzip | 68 |
| 5.2.2 | Definition der Optimierungsprobleme | 68 |
| 5.2.3 | Finaler Algorithmus | 69 |
| 5.3 | Zusammenfassung | 70 |
| 6 | Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse | 71 |
| 6.1 | Aufbau | 71 |
| 6.1.1 | Laserscanner | 71 |
| 6.1.2 | Manipulator | 72 |
| 6.1.3 | Referenzsystem | 72 |
| 6.1.4 | Rahmenbedingungen der Versuchsumgebung | 73 |
| 6.1.5 | Ausgewertete Metriken | 73 |
| 6.2 | Identifikation des Fehlermodells des Laserscanners | 76 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.2.1 | Einfluss von Farbe und Material auf die Messung des Laserscanners . . . | 76 |
| 6.2.2 | Verteilung des Messfehlers | 79 |
| 6.3 | Detektierung des Kalibriertargets | 84 |
| 6.3.1 | Simulation - Detektierung anhand von Kreis- und Ellipsen-Ausschnitten | 85 |
| 6.3.2 | Reale Experimente - Genauigkeit der Detektierung und Fehlereinflüsse . | 96 |
| 6.4 | Kalibrierung ohne Berücksichtigung der Messfehler | 102 |
| 6.4.1 | Untersuchung des Stand der Forschung | 102 |
| 6.4.2 | Simulative Kalibrierung | 106 |
| 6.4.3 | Reale Kalibrierung mit der Constant-Distance-Methode | 109 |
| 6.5 | Kalibrierung unter Berücksichtigung der Messfehler | 115 |
| 6.5.1 | Simulative Kalibrierung | 115 |
| 6.5.2 | Reale Kalibrierung mit Ellipsenfitting | 121 |
| 6.6 | Kalibrierung mit dem Manipulator selbst | 127 |
| 7 | Bewertung und Ausblick | 133 |
| 7.1 | Bewertung | 133 |
| 7.2 | Ausblick | 144 |
| 8 | Zusammenfassung | 147 |
| | Literaturverzeichnis | 151 |
| | Liste der Veröffentlichungen | 159 |
| | Liste der betreuten Arbeiten | 161 |
| | Selbstständigkeitserklärung | 163 |
| | Über den Autor | 165 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Kalibrierverfahren zwischen einem 2D Laserscanner und einem Manipulator aus [AAR14]. | 4 |
| 1.2 | Kalibrier-Setting des vorgestellten Ansatzes aus Manipulator, Laserscanner und Kalibriertarget. | 6 |
| 2.1 | Schemazeichnung eines seriellen Manipulators, den Koordinatensystemen der Gelenkachsen und der kinematischen Verkettung von der Basis zum Endeffektor. | 12 |
| 2.2 | Koordinatensystem des TCP mit gegriffenem Zylinderförmigen Kalibriertarget. | 13 |
| 2.3 | Funktionsprinzip des Laserscanners [OYB09] | 14 |
| 2.4 | Zwei dimensionaler Raum des Laserscans in Polar- und kartesischen Koordinaten \mathcal{P} und \mathcal{X} | 14 |
| 2.5 | Wiederholgenauigkeit und Absolutgenauigkeit nach DIN EN ISO 9283 [LIT]. | 15 |
| 2.6 | Manuelle Kalibrierung zwischen Laserscanner und Manipulator | 18 |
| 2.7 | Kalibrierung zwischen Manipulator und rotierendem 2D Laserscanner mit Intensitätsmessung mittels Kamera [Pra14]. | 20 |
| 2.8 | Schematische Darstellung des Verfahrens aus [HC11] und [HC12] zur Kalibrierung zwischen Manipulator, Kamera und einer Ebene. | 21 |
| 2.9 | Setting des Kalibrierverfahrens mittels kugelförmigen Kalibriertarget für einen 3D Laserscanner [Li08] | 22 |
| 2.10 | Aufbau des Kalibrierverfahrens mittels planarem Kalibriertarget und einem 2D Laserscanner auf einer Laufschiene [Hei+14] | 23 |
| 2.11 | Sogenannter Vielfüßer als Kalibriertarget für die Kalibrierung mit einem einzigen 2D Laserscan [AF07]. | 25 |
| 2.12 | Kalibriertarget und Setting für die Kalibrierung mittels gegriffenem, komplexen, planaren Kalibriertarget. | 26 |
| 2.13 | Constant Distance Methode zur Bestimmung des Mittelpunktes eines Kreises anhand der Messung eines Laserscanners [Tam+10]. | 28 |
| 2.14 | Schematische Darstellung der Fehlmessung durch einen sogenannten Kantenschuss. [San+11] | 33 |
| 2.15 | Kalibrierung mehrerer 2D Laserscanner anhand von Ebenen unter Berücksichtigung des Messfehlers [FGA15]. | 35 |
| 2.16 | Kalibrierung zweier 2D Laserscanner anhand von Kanten unter Berücksichtigung des Messfehlers [FAG15] | 35 |

| | | |
|-----|--|----|
| 3.1 | Messpunkte des Laserscans und deren Modellierung. Einzelne Messpunkt (schwarz), Menge aller Messpunkte (blau umrandet), Menge der Messpunkte des Kalibriertargets (orange umrandet) und geschätzte Symmetrieachse des Kalibriertargets (Violet). | 43 |
| 3.2 | Schematische Darstellung des Kalibriertarget-Querschnitts in der 2D Laserebene: senkrechter Eintrittswinkel und verringerter Eintrittswinkel. | 45 |
| 3.3 | 2D Querschnitt des zylinderförmigen Kalibriertargets. Eingezeichnet ist der arithmetische Mittelwert eines Halbkreises (grau) und die entsprechende durchmesserabhängige Korrektur zum Mittelpunkt (schwarz). | 46 |
| 3.4 | Schematische Darstellung des Kalibriertarget-Längsschnitt in der 2D Laserebene mit dem Eintrittswinkel δ | 46 |
| 3.5 | Funktionaler Zusammenhang zwischen der Länge der Hauptachse und dem Durchmesser in Abhängigkeit vom Eintrittswinkel | 47 |
| 3.6 | Laserscan des Kalibriertargets (orangene Punkte) und des idealen elliptischen Querschnitts. Einzelne Messung $[x_L^j, y_L^j]$, resultierende Ellipse mit der Nebenachse a , der Hauptachse b , der Rotation θ und dem Mittelpunkt $[x_L^I, y_L^I]$. In Anlehnung an [CL16]. | 50 |
| 4.1 | Schematische Darstellung des Kalibrier-Settings, Koordinatensysteme und Transformationskette zwischen Laserscanner, Endeffektor und Kalibriertarget. Das Kalibriertarget wird in Form seiner Symmetrieachse dargestellt. | 54 |
| 4.2 | Zylinderförmiges Kalibriertarget, Ursprungspunkte der dazugehörigen Koordinatensysteme und Schnittpunkt mit der Ebene des Laserscanners entlang der Symmetrieachse. | 55 |
| 4.3 | Vom Endeffektor gegriffenes Kalibriertarget und Koordinatensystem des TCP \mathcal{F}_E . Es ist zu sehen, dass die Rotation lediglich um die y -Achse mit dem Winkel γ_{rot} stattfinden kann. | 57 |
| 4.4 | Schematische Darstellung der Glieder des Universal Robot UR5 [Tek+18]. | 59 |
| 5.1 | Schematische Darstellung des Kalibrier-Settings und des Fehlers durch die Gelenkmessung des Manipulators. Die wahre Konfiguration (durchgezogene Verbindung) führt zu dem wahren Schnittpunkt \mathcal{X}_L^I , wohingegen die gemessene Konfiguration (gestrichelte Verbindung) den Schnittpunkt ${}^Q\mathcal{X}_L^I$ ergibt. Die Koordinatensysteme $\mathcal{F}_L, \mathcal{F}_B$ sowie die Transformation zwischen ihnen $\mathcal{H}_L^B(\tilde{\Psi})$ bleiben unverändert. | 63 |
| 5.2 | Schematische Darstellung der Detektierung des Kalibriertargets und Bestimmung der Kovarianz der Detektierung Σ_{CT} . Die einzelnen Messpunkte des Laserscanners haben einen Messfehler σ_L . Das zugrundeliegende Modell der Ellipse und die Verwendung des MLE führen dazu, dass sich die resultierende Kovarianzmatrix des detektierten Mittelpunktes Σ_{CT} bestimmen lässt (siehe Kapitel 3). | 66 |

| | | |
|------|--|----|
| 5.3 | Schematische Darstellung des Kalibrier-Settings und der Fehler durch die Gelenkmessung des Manipulators und der Detektierung mit dem Laserscanner. Die reale Konfiguration (durchgezogene Verbindung) führt zu dem Schnittpunkt \mathcal{X}_L^I , wohingegen die gemessene Konfiguration (gestrichelte Verbindung) den Schnittpunkt ${}^Q\mathcal{X}_L^I$ ergibt. Die Detektierung mit dem Laserscanner führt zu ${}^{CT}\mathcal{X}_L^I$. Eingetragen sind außerdem die sich ergebenden Konfidenzintervalle Σ_{CT} , Σ_Q und das definierte Konfidenzintervall aus der Summer der beiden $\Sigma_{Q,CT}$. Die Koordinatensysteme \mathcal{F}_L , \mathcal{F}_B sowie die Transformation zwischen ihnen $\mathcal{H}_L^B(\tilde{\Psi})$ bleiben unverändert. | 67 |
| 6.1 | Abbildung des verwendeten Laserscanners Hokuyo UST-10LX-H01. | 72 |
| 6.2 | Abbildung des verwendeten Manipulators UR5 von Universal Robots. | 73 |
| 6.3 | Abbildung des eingesetzten Tracking Systems zur bestimmung der Referenzkalibrierung. | 74 |
| 6.4 | Vom End-Effektor gegriffenes Kalibriertarget mit Papierummantelung. | 76 |
| 6.5 | Verteilungen der Messfehler bei unterschiedlichen Farben sowie ohne Beschichtung des Kalibriertargets. Aufgetragen sind die Anzahl der Messpunkt über der dazugehörigen Genauigkeit. | 77 |
| 6.6 | Vergleich der Messpunkte mit und ohne Ummantelung beim Messen des Roboterarms mit dem Laserscanner. Aufgetragen sind die Anzahl der Messpunkte über der dazugehörigen Distanz zum Laserscanner. | 78 |
| 6.7 | Kumulierte Verteilung des Messfehlers über alle Parametervariationen. Aufgetragen sind die Anzahl der Messpunkte über der dazugehörigen Genauigkeit. | 80 |
| 6.8 | Verteilung des Messfehlers bei einem Eintrittswinkel von 0° und verschiedenen Entfernungen und Messwinkeln zum Laserscanner. | 81 |
| 6.9 | Verteilung des Messfehlers bei einem Eintrittswinkel von 0° und verschiedenen Entfernungen und Messwinkeln zum Laserscanner. | 82 |
| 6.10 | Rotation der Haupt- und Nebenachse des Laserstrahl entlang der Messwinkel. Vom Hersteller Hokuyo bereitgestellte Grafik. | 83 |
| 6.11 | Vergleich der Detektierungsfehler der drei Detektierungsmethoden CDM, FGEE und MLE für Messungen von Kreisen ohne Messunsicherheit in der Simulation. | 86 |
| 6.12 | Distanzen der geschätzten Mittelpunkte zum idealen Mittelpunkt der verschiedenen Detektierungsmethoden für unterschiedliche Abstände zum Laserscanner. | 88 |
| 6.13 | Beispielhafte Detektierung des Kreises anhand fehlerbehafteter Messpunkte mit den unterschiedlichen Verfahren CDM, FGEE und MLE. | 89 |
| 6.14 | Beispielhafte Darstellung zweier simulierter Ellipsen mit den zugehörigen fehlerbehafteten Messpunkten nach Anwendung des Kantenschussfilters | 92 |
| 6.15 | Mittlerer Fehler der Detektierungen von Kreisen und Ellipsen Entlang der X-Achse bei steigender Anzahl an Messpunkten | 93 |
| 6.16 | Mittlerer Fehler der Detektierungen von Kreisen und Ellipsen Entlang der Y-Achse bei steigender Anzahl an Messpunkten | 94 |
| 6.17 | Geschätzte und tatsächliche Standardabweichungen der Detektierungen von Kreisen und Ellipsen entlang der X- und Y-Achse | 95 |
| 6.18 | Messungen mit und ohne Kantenschüsse vor dem Kalibriertarget | 98 |

| | | |
|------|--|-----|
| 6.19 | Histogramm der Abweichungen zum Mittelpunkt über alle Parametervariationen für die Verfahren CDM, MLE und FGEE. | 101 |
| 6.20 | Aufbau des realen Experiments der Kalibrierung nach [AAR14] mit dem selbst erstellten Kalibriertarget, dem Manipulator Universal Robots UR5 und dem Laserscanner Hokuyo UST-10LX-H01. | 103 |
| 6.21 | Verwendetes Kalibriertarget des realen Experiments der Kalibrierung nach [AAR14]. | 104 |
| 6.22 | Messpunkte und extrahierte Merkmale des realen Experiments in kartesischen Koordinaten. | 105 |
| 6.23 | Messpunkte des Kalibriertargets beider Konfigurationen in Polarkoordinaten. | 105 |
| 6.24 | Exemplarische Kalibriertrajektorie des End-Effektors für die simulativen Experimente. Dargestellt werden die Positionen des End-Effektors während der Kalibrier-Trajektorie, die Position der Manipulator-Basis und die Position des Laserscanners. Die senkrechten Linien stellen nicht das Kalibriertarget dar, sondern veranschaulichen die Höhe der Position des Endeffektors. | 107 |
| 6.25 | Vom Endeffektor gegriffenes Kalibriertarget und Koordinatensystem des TCP \mathcal{F}_E . | 110 |
| 6.26 | Detektierung der Symmetrie-Achse anhand der Constant-Distance-Methode für die nahe und ferne Kalibriertrajektorie. | 111 |
| 6.27 | Absoluter Fehler der bestimmten Position der Symmetrie-Achse mit der Constant-Distance-Methode für die beiden Trajektorien nah und fern vom Laserscanner. | 112 |
| 6.28 | Detektierung der Symmetrie-Achse anhand der Constant-Distance-Methode für die kombinierte Trajektorie. | 114 |
| 6.29 | Statistische Auswertung des vorzeichenbehafteten Fehlers der Kalibrierung in der Simulation. Dargestellt wird der Mittelwert und die Standardabweichung des Fehlers der einzelnen Achsen unter und ohne Berücksichtigung der Messfehler über der Anzahl der zugehörigen Messposen der Kalibriertrajektorie. | 117 |
| 6.30 | Statistische Auswertung des absoluten Fehlers der Kalibrierung in der Simulation. Dargestellt wird der Mittelwert und die Standardabweichung der Norm des Fehlers unter und ohne Berücksichtigung der Messfehler über der Anzahl der zugehörigen Messposen der Kalibriertrajektorie. | 118 |
| 6.31 | Statistische Auswertung des absoluten Fehlers der Kalibrierung in der Simulation. Dargestellt wird der Mittelwert und die Standardabweichung des Fehlers der einzelnen Achsen unter und ohne Berücksichtigung der Messfehler über der Anzahl der zugehörigen Messposen der Kalibriertrajektorie. | 119 |
| 6.32 | Statistische Auswertung der geschätzten Standardabweichung der Parameter. Dargestellt wird der geschätzte Wert der Standardabweichung und der tatsächliche Wert für den translatorischen und rotatorischen Anteil der Transformation. | 120 |
| 6.33 | Vom End-Effektor gegriffenes Kalibriertarget. | 122 |
| 6.34 | Detektierung der Symmetrie-Achse anhand des Ellipsenfitting für zwei Kalibriertrajektorien. Dargestellt werden die detektierten Schnittpunkte der Symmetrie-Achse als auch die detektierten Schnittpunkte des Referenzsystems | 123 |
| 6.35 | Fehler des ermittelten Abstands zum Kalibriertarget entlang der Kalibriertrajektorie. | 124 |

| | | |
|------|---|-----|
| 6.36 | 3-Sigma Schätzung der Standardabweichung und tatsächlicher Fehler der Detektierung entlang der Trajektorie. | 126 |
| 6.37 | Reales Setting der Kalibrierung unter Nutzung des Manipulators selbst als Kalibriertarget. | 128 |
| 6.38 | Detektierung der Symmetrie-Achse anhand des Ellipsenfitting für die Kalibreirtrajektorie. Dargestellt werden die detektierten Schnittpunkte der Symmetrie-Achse als auch die detektierten Schnittpunkte des Referenzsystems mit und ohne der Papier-Beschichtung. | 129 |
| 6.39 | Fehler des ermittelten Abstands zum Kalibriertarget entlang der Kalibriertrajektorie mit und ohne Papier-Beschichtung. | 130 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|------|--|-----|
| 6.1 | Mittelwerte und Standardabweichungen der Messfehler bei unterschiedlichen Farben sowie ohne Beschichtung des Kalibriertargets. | 77 |
| 6.2 | Parametervariation der Experimente zur Ermittlung der Genauigkeit des Laserscanners | 79 |
| 6.3 | Stochastischer Fehler der Detektierung der Kreis- und Ellipsenmittelpunkte für das CDM, FGEE und MLE. | 90 |
| 6.4 | Mittlerer Fehler der Detektierung des Mittelpunktes mit und ohne Kantenschussfilter. | 97 |
| 6.5 | Statistische Auswertung der Detektiergenauigkeit für die unterschiedlichen Parametervariationen unter Nutzung des Kantenschussfilters bei einem Messwinkel von 0° . Dargestellt werden der mittlere Fehler, die Standardabweichung des Fehlers und der prozentuale Anteil der Ausreißer. | 99 |
| 6.6 | Statistische Auswertung der Detektiergenauigkeit für die unterschiedlichen Parametervariationen unter Nutzung des Kantenschussfilters bei einem Messwinkel von 90° . Dargestellt werden der mittlere Fehler, die Standardabweichung des Fehlers und der prozentuale Anteil der Ausreißer. | 99 |
| 6.7 | Analyse der Genauigkeit des realen Experiments mit Kalibriertarget vorgestellt von [AAR14]. Fehler entlang der translatorischen und rotatorischen Achsen . . | 103 |
| 6.8 | Ergebnisse des simulierten Experiments ohne Messfehler. | 107 |
| 6.9 | Ergebnisse der simulativen Experimente: Statistische Evaluierung der translatorischen und rotatorischen vorzeichenbehafteten Fehler bezüglich des Laserscanner Koordinatensystems. | 108 |
| 6.10 | Ergebnisse der simulativen Experimente: Statistische Evaluierung der translatorischen und rotatorischen absoluten Fehler bezüglich des Laserscanner Koordinatensystems. | 108 |
| 6.11 | Analyse der Genauigkeit der realen Experimente mit Kalibriertarget und Constant-Distance-Methode. Fehler entlang der translatorischen und rotatorischen Achsen. | 113 |
| 6.12 | Analyse der Genauigkeit der realen Experimente mit Kalibriertarget und Constant-Distance-Methode. Fehler entlang der translatorischen und rotatorischen Achsen. | 114 |
| 6.13 | Analyse der Genauigkeit der realen Experimente mit Kalibriertarget und Ellipsen Fitting ohne Berücksichtigung der Messungenauigkeiten. Fehler entlang der translatorischen und rotatorischen Achsen. | 124 |

| | | |
|------|---|-----|
| 6.14 | Analyse der Genauigkeit der realen Experimente mit Kalibriertarget und Ellipsen Fitting unter Berücksichtigung der Messungenauigkeiten. Fehler entlang der translatorischen und rotatorischen Achsen. | 125 |
| 6.15 | Analyse der geschätzten Unsicherheit der realen Experimente mit Kalibriertarget und Ellipsen Fitting unter Berücksichtigung der Messungenauigkeiten. . . . | 125 |
| 6.16 | Genauigkeit mit und ohne Papier-Beschichtung: Analyse der Genauigkeit der realen Experimente ohne Kalibriertarget. Dargestellt werden die Fehler entlang der translatorischen und rotatorischen Achsen für die Kalibrierung mit Berücksichtigung der Messungenauigkeiten. | 131 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-------------|------------------------------------|
| MLE | Maximum Likelihood Estimation |
| FGEE | Fast Guaranteed Ellipse Estimation |
| CDM | Constant Distance Method |
| TCP | Tool Center Point |
| UR | Universal Robot |

Symbolverzeichnis

Dieses Symbolverzeichnis mit den folgenden aufgeführten Formelzeichen listet lediglich die zum Verständnis der Arbeit wichtigsten Notationen auf. Selten verwendete Symbole, Zeichen und eventuelle Mehrdeutigkeiten werden explizit im Text erläutert.

Transformationen und Koordinatensysteme

| | |
|----------------------|--|
| \mathcal{F}_A | Koordinatensystem A |
| \mathcal{H}_A^B | Konstante homogene Transformation von Koordinatensystem \mathcal{F}_A zu \mathcal{F}_B |
| $\mathcal{H}_A^B(q)$ | Homogene Transformation von Koordinatensystem \mathcal{F}_A zu \mathcal{F}_B für Konfiguration q |

Wahrscheinlichkeitstheorie

| | |
|----------------------------|--|
| $p(\cdot)$ | Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion |
| $L(\vartheta)$ | Likelihood bezüglich gesuchter Parameter ϑ |
| $\mathcal{N}(\mu, \Sigma)$ | Normalverteilung |
| μ | Mittelwert |
| Σ | Kovarianzmatrix |
| σ | Standardabweichung |

Laserscanner

| | |
|----------------------------|--|
| ${}_{i,t}\mathcal{X}_L(q)$ | Messpunkt i zum Zeitpunkt t für Konfiguration q in kartesischen Koordinaten |
| $\mathcal{X}_L(q)$ | Menge aller Messpunkte für Konfiguration q in kartesischen Koordinaten |
| $\mathcal{X}_L^j(q)$ | Messpunkte j , die ausschließlich zum Kalibriertarget gehören, für Konfiguration q in kartesischen Koordinaten |
| \mathcal{X}_L^I | Wahrer Schnittpunkt zwischen Kalibriertarget und Laserscanner bezogen auf das Laserscanner Koordinatensystem |

${}^Q\mathcal{X}_L^I$ Fehlerbehafteter, geschätzter Schnittpunkt zwischen Kalibriertarget und Laserscanner bezogen auf das Laserscanner Koordinatensystem

Manipulator

B Index des Basis-Koordinatensystems
 E Index des Endeffektor-Koordinatensystems
 Q Menge aller Konfigurationen
 q Eingenommene Konfiguration

Kalibriertarget

d_c Durchmesser des Kalibriertargets
 d_{he} Hauptachse des Querschnitts des Kalibriertargets
 δ Eintrittswinkel zwischen Ebene des Laserscanners und Kalibriertarget
 \mathcal{F}_{G_0} Ursprungs koordinatensystem des Kalibriertargets
 \mathcal{F}_{G_I} Schnittpunkt zwischen Kalibriertarget und Laserscanner bezogen auf das Ursprungs koordinatensystem des Kalibriertargets

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Einführung und Motivation

Mobile Roboter haben Einzug in den Haushalt gefunden und werden auch im industriellen Umfeld vermehrt eingesetzt. Probleme wie die autonome Navigation in unbekanntem Gelände konnten für spezifische, statische Umgebungen robust gelöst werden, sodass sich ganze Wirtschaftszweige gebildet haben, um derartige Systeme zu vertreiben. Beispielhaft seien Saugroboter wie der Vorwerk Kobold, der iRobot Roomba oder Rasenmäroboter wie der Robomow genannt. Im industriellen Kontext werden mobile Systeme hauptsächlich in der Intralogistik zum Transport von Waren eingesetzt. So existieren automatisierte Transportsysteme wie der KARIS PRO oder fahrerlose Gabelstapler wie der iGo neo.

Mit dem erhöhten Einsatz mobiler Systeme steigt das Interesse und die Forschungsarbeit an mobilen Manipulatoren. Diese erweitern die Möglichkeiten der mobilen Plattformen durch den Einsatz eines Manipulators (in der folgenden Arbeit ist mit dem Begriff Manipulator ausschließlich der Knickarmroboter gemeint). Die Manipulation oder Interaktion mit der Umwelt wird realisierbar und es zeichnen sich viele Anwendungen in den Bereichen Industrie, Logistik, Search & Rescue ab.

Die Kombination aus Manipulator und mobiler Plattform erhöht die Komplexität des Systems. Zum Einen muss die Umgebung zur Lokalisierung und zum Identifizieren von Interaktionsmöglichkeiten erfasst werden. Zum Anderen müssen diese Daten genutzt werden können, um die Bewegungen des Manipulators zielgerichtet zu koordinieren. So werden die Messungen der wahrnehmenden Sensoren genutzt, um zum Einen Kollisionen mit der Umgebung zu vermeiden und zum Anderen, um Objekte zu detektieren und Greifbewegungen zu planen. Um dies zu erreichen müssen die verschiedenen Teilsysteme in einen geometrischen Kontext zueinander gesetzt werden. Diese Problemstellung ist unter dem Begriff *extrinsische Kalibrierung* bekannt.

Der 2D Laserscanner ist ein etablierter Sensor in der modernen Robotik. In der mobilen Robotik dient er der robusten Lokalisierung und Detektierung von Hindernissen. In strukturierten Umgebungen wird er zudem eingesetzt, um Greifbewegungen des Manipulators zu planen. Dies gilt sowohl für den Einsatz auf mobilen Manipulatoren als auch für den Einsatz von Manipu-

latoren und Laserscannern in Fertigungsanlagen.

Für jedes Robotik System, das einen Laserscanner und einen Manipulator enthält, müssen diese zwei Systeme zueinander kalibriert werden. Diese Kalibrierung findet in einem sogenannten Kalibrierprozess statt. Je nach Applikation und Einsatzgebiet ergeben sich dabei unterschiedliche Anforderungen an die erforderliche Genauigkeit der Kalibrierung und die Flexibilität oder Automatisierbarkeit des Kalibrierprozess.

Durch den dauerhaften Einsatz an einem Fließband kann beispielsweise der Laserscanner durch Vibrationen oder Reinigungsarbeiten verschoben werden. Eine erneute Kalibrierung ist erforderlich und motiviert einen automatischen oder teilautomatischen Kalibrierprozess. Gleiche Randbedingungen gelten für den Einsatz auf einem mobilen Manipulator. Vibrationen oder Erschütterungen im Einsatz können die Teilsysteme zueinander verschieben und eine automatische Kalibrierung ohne personellen Eingriff erfordern.

Weiterhin ist jede Messung mit einem Messfehler behaftet. Diese können die erzielte Genauigkeit der Kalibrierung verschlechtern. Werden die zugrundeliegenden Messfehler allerdings modelliert und im Kalibrierverfahren berücksichtigt, können diese die Genauigkeit verbessern.

In dieser Arbeit soll aus dieser Motivation heraus ein neues Verfahren zur automatischen Kalibrierung zwischen Manipulator und 2D Laserscanner unter Berücksichtigung von Messfehlern untersucht werden.

1.2 Problemstellung und Randbedingungen

Im Rahmen der Untersuchungen dieser Arbeit wurden drei verschiedene Klassen von Problemstellungen für Kalibrierverfahren zwischen Manipulator und 2D Laserscanner identifiziert. Diese drei Klassen sollen im Folgenden vorgestellt werden, um Anforderungen definieren zu können und im Verlauf der Arbeit die selbst entwickelten Verfahren als auch den aktuellen Stand der Technik in deren Kontext zu setzen. Die drei identifizierten Klassen werden definiert als: *Initiale Kalibrierung*, *Rekalibrierung* und *Flexible Kalibrierung*.

Initiale Kalibrierung

Die *Initiale Kalibrierung* beschreibt den Prozess der Kalibrierung bei erstmaliger Inbetriebnahme. Das neu aufgesetzte System bestehend aus Laserscanner und Manipulator wird erstmals in einen geometrischen Kontext zueinander gesetzt. Diese Kalibrierung findet Verwendung für Mobile Manipulatoren mit einem 2D Laserscanner als auch für Arbeitsstationen bestehend aus 2D Laserscanner und Manipulator.

Für die initiale Kalibrierung gelten Anforderungen bezüglich der Genauigkeit, der Kompetenzen verfügbarer Bediener und der verfügbaren Kalibrierumgebung. Die initiale Kalibrierung eines Mobilen Manipulators muss nicht zwingend automatisiert durchgeführt werden können. Ein Kalibrierprozess ohne zusätzlich anzubringende Sensorik oder erforderliches hoch qualifiziertes

Personal kann jedoch die Kosten der Inbetriebnahme senken.

Rekalibrierung

Der Einsatz von Robotik Systemen im industriellen Umfeld als auch in Search & Rescue Szenarien geht mit Verschleiß, Erschütterungen und Vibrationen einher. Diese führen zu einer Verschiebung oder Rotation der Sensoren. Die *Rekalibrierung* beschreibt die erneute Kalibrierung, welche aufgrund von mechanischen Erschütterungen und einer Verschiebung der Teilkomponenten erforderlich werden kann. Sie wird auch erforderlich, sofern Systemkomponenten ausgetauscht oder beabsichtigt verschoben werden.

Für die Rekalibrierung ergeben sich neben Anforderungen bezüglich der Genauigkeit weitere Anforderungen bezüglich der verfügbaren Ressourcen. Eine im laufenden Einsatz benötigte Rekalibrierung erfordert einen voll automatisierten Kalibrierprozess in beliebiger Umgebung. Eine durch Personal durchgeführte halbautomatisierte Rekalibrierung hingegen erfordert den Einsatz möglichst einfacher Mittel und den Verzicht zusätzlich anzubringender Sensorik.

Flexible Kalibrierung

Die *Flexible Kalibrierung* meint die relative Lokalisierung verschiedener Robotik Systeme zueinander im laufenden Betrieb. Hierfür ergeben sich mehrere mögliche Szenarien:

- Zwei mobile Manipulatoren mit Laserscannern lokalisieren sich zueinander.
- Eine mobile Plattform mit einem Laserscanner lokalisiert sich zu einer Arbeitsstation mit einem Manipulator.
- Ein mobiler Manipulator lokalisiert sich zu einer Arbeitsstation mit einem Laserscanner.

Für die *Flexible Kalibrierung* ergeben sich insbesondere Anforderungen an die Automatisierbarkeit. Die flexible Kalibrierung muss voll automatisierbar im Einsatz zur Laufzeit durchgeführt werden können.

Die identifizierten Problemstellungen unterscheiden sich im Wesentlichen bezüglich ihrer Automatisierbarkeit. Die Anforderungen an die erzielte Genauigkeit ergeben sich aus dem Zweck der Kalibrierung und den verwendeten Komponenten.

In dieser Arbeit soll ein Verfahren entwickelt werden, das für die *Rekalibrierung* geeignet ist. Hieraus werden folgende Randbedingungen abgeleitet:

- Es sollen keine zusätzlichen Sensoren außer der zu kalibrierenden Teilsysteme selbst eingesetzt werden.
- Das Verfahren soll sich zur automatischen Kalibrierung eignen.
- Mögliche Kalibriertargets müssen mitführbar sein.

Kalibrierumgebung

Mobile Manipulatoren werden in natürlichen Umgebungen eingesetzt. Unter diese Umgebungen fallen strukturierte Innenbereiche und unstrukturierte Außenbereiche. Für das Kalibrierverfahren ist es erforderlich das Kalibriertarget im Laserscan zu detektieren. Für diese Arbeit wird

die Annahme getroffen, dass der Messbereich des Laserscanners, in dem das Kalibriertarget geführt wird, bekannt ist und dieser Bereich ausschließlich Messungen des Kalibriertargets enthält.

1.3 Lösungsansatz

Um einen Laserscanner und einen Manipulator zueinander kalibrieren zu können, muss die Bewegung oder Stellung des Manipulators mit den zugehörigen Messungen des Laserscanners in Bezug gebracht werden. Hierfür können sogenannte Kalibriertargets verwendet werden. Diese werden vom Endeffektor gegriffen und vom Laserscanner detektiert. Aktuelle Verfahren ermitteln aus dem Querschnitt der entstehenden Messung des Laserscanners die Orientierung des Kalibriertargets. Da die zugehörige Stellung des Manipulators bekannt ist, lässt sich die Transformationskette schließen und die gesuchte Transformation zwischen Laserscanner und Manipulator ermitteln.

Die Nutzung eines Kalibriertargets zur Kalibrierung statt zusätzlicher Sensorik führt dazu, dass eben diese Sensorik nicht zusätzlich angeschafft und angebracht oder vom Roboter mitgeführt werden muss. Hierdurch eignet sich das Verfahren für die Rekalibrierung. Zudem entfällt die zusätzlich erforderliche Hand-Auge Kalibrierung zur Bestimmung der Transformation zwischen zusätzlichem Sensor und Endeffektor.

Da die aktuellen Verfahren darauf basieren die Orientierung des Kalibriertargets zu bestimmen, muss diese aus dem gemessenen Querschnitt des Laserscanners hervorgehen. Um dies mit hoher Genauigkeit zu erreichen sind komplexe Geometrien und große geometrische Dimensionen erforderlich. Weiterhin wird die Problemstellung in aktuellen Verfahren nicht als Optimierungsproblem formuliert. Dadurch können sich konfigurationsabhängige Messfehler stärker auswirken und die Genauigkeit der Kalibrierung verschlechtern. In Abbildung 1.1 wird beispielhaft das aktuelle Verfahren von [AAR14] dargestellt.

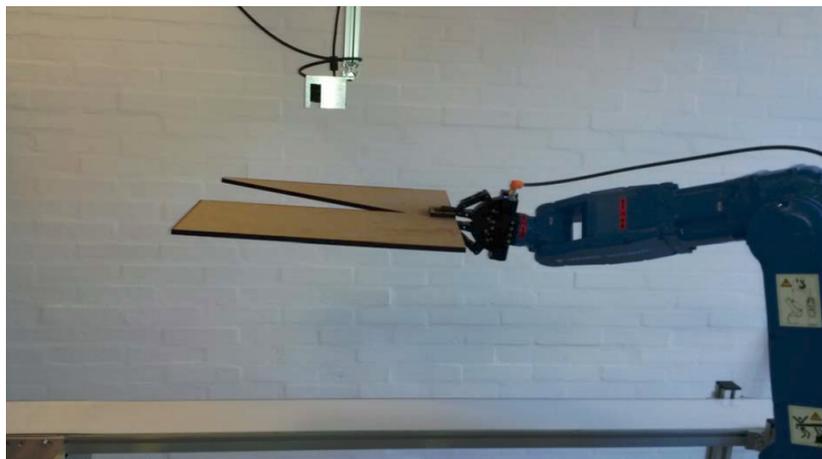


Abbildung 1.1: Kalibrierverfahren zwischen einem 2D Laserscanner und einem Manipulator aus [AAR14].

Funktionsprinzip

Das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren soll auf der Verwendung von Kalibriertargets basieren. Dabei sollen jedoch zylindrische Kalibriertargets verwendet werden. Die Achse des Manipulators wird anhand der Symmetrie-Achse des Kalibriertargets verlängert und im Laserscanner detektiert. Es werden Messungen unterschiedlicher Konfigurationen aufgenommen und schließlich in einem Optimierungsproblem der Fehler der sich ergebenden Transformationskette zwischen Laserscanner, Manipulator und Symmetrie-Achse des Kalibriertargets minimiert. Abbildung 1.2 zeigt das reale Setting und die sich ergebene Transformationskette in einer schematischen Darstellung. Die Formulierung als Optimierungsproblem führt dazu, dass der Fehlereinfluss einzelner Messungen verringert wird.

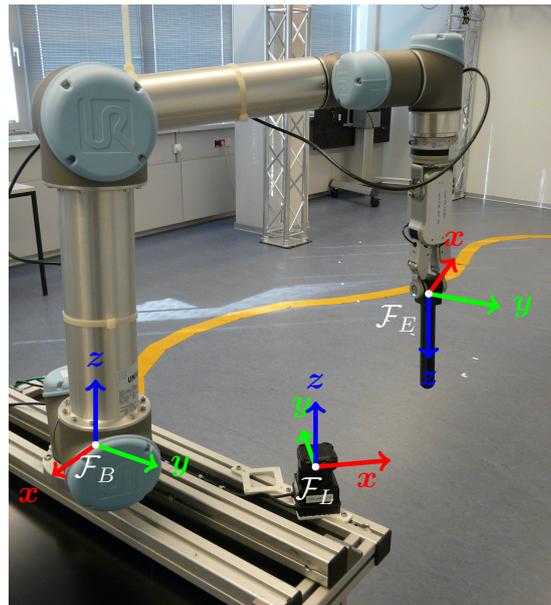
Während bei der Nutzung komplexer Kalibriertargets die Informationen in der detektierten Lage und Orientierung weniger Messungen des Kalibriertargets enthalten sind, ist der Informationsgehalt im vorgestellten Verfahren über beliebig viele Konfigurationen verteilt. Dies führt dazu, dass die Genauigkeit der Kalibrierung durch die Wahl der Kalibriertrajektorie beeinflusst wird. Da die Bestimmung des Schnittpunktes ausreicht, können zylinderförmige Objekte als Kalibriertarget genutzt werden. So ergibt sich bei zylindrischen Manipulator-Gliedern die Möglichkeit den Manipulator selbst zur Kalibrierung zu nutzen. Gleiches gilt, sofern zylinderförmige Werkzeuge, wie zum Beispiel Sauggreifer oder Bohrköpfe, am Endeffektor angebracht sind. Mitführbare zylinderförmige Kalibriertargets können ebenfalls für die Kalibrierung genutzt werden. Außerdem mindert dies die Fehleranfälligkeit der Detektierung, weil die Symmetrieachse eines Zylinders anhand einer Menge von Messpunkten bestimmt wird und sich der Einfluss einzelner Messpunkte verringert.

Diese Arbeit untersucht die sich ergebene Genauigkeit des neuen Ansatzes. Weiterhin wird erstmals untersucht, inwiefern es möglich ist die Transformation zwischen Manipulator und 2D Laserscanner ohne anzubringendes Kalibriertarget mit dem Manipulator selbst zu bestimmen.

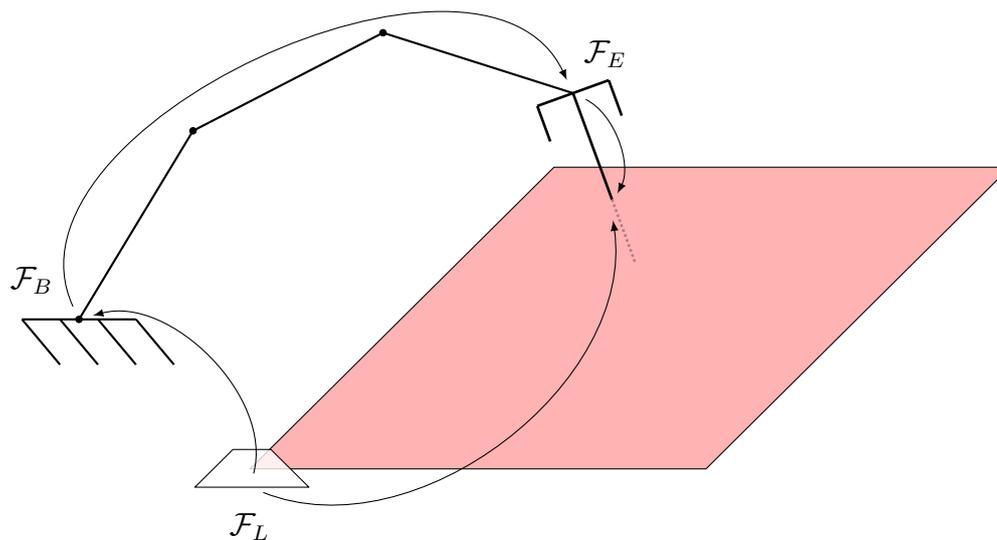
Erweiterung zur Nutzung der Messunsicherheiten

Um die Unsicherheit des Manipulators und der Messungen des Laserscanners berücksichtigen zu können, wird das Optimierungsproblem schließlich erweitert. In einer gewichteten Optimierung werden die Unsicherheiten in Form der zugehörigen Kovarianzmatrizen berücksichtigt mit dem Ziel die Genauigkeit der Kalibrierung zu verbessern. Hierbei wird sowohl die Unsicherheit des Manipulators als auch des Laserscanners berücksichtigt. Es unterscheidet sich zu den aktuellen Verfahren insofern, dass die Fehlerfortpflanzung entlang der zu bestimmenden Transformation selbst ebenfalls berücksichtigt wird.

Diese Arbeit untersucht die Berücksichtigung der entstehenden Messfehler aller Teilsysteme in einer höheren Modellierungstiefe als aktuelle Verfahren. Weiterhin wird für die Kalibrierung zwischen Manipulator und Laserscanner erstmals ein Ansatz untersucht, der die Fehlerfortpflanzung entlang der zu ermittelnden Parameter selbst berücksichtigt.



(a) Reale Darstellung mit Koordinatensystemen.



(b) Schematische Darstellung mit Koordinatensystemen und Transformationskette. Das Kalibriertarget wird in Form seiner Symmetrieachse dargestellt.

Abbildung 1.2: Kalibrier-Setting des vorgestellten Ansatzes aus Manipulator, Laserscanner und Kalibriertarget.

Bestimmung des Schnittpunktes

Um den Schnittpunkt der verlängerten Achse des Manipulators für die Kalibrierung nutzen zu können, muss dieser zunächst detektiert werden. In dieser Arbeit wird der Ansatz gewählt von einer zylinderförmigen Geometrie auszugehen und den Schnittpunkt der Symmetrie-Achse zu ermitteln. Für zylinderförmige Objekte ergibt sich ein ellipsenförmiger Querschnitt durch die Messung des 2D Laserscanners, wobei die Funktionsweise des Laserscanners nur einen Teilausschnitt erkennen kann, sogenannte Kantenschüsse fehlerhafte Messpunkte erzeugen und die

Detektierung insgesamt erschwert wird.

Für diese Arbeit ergibt sich der besondere Umstand, dass der Durchmesser der genutzten Achse beziehungsweise des Kalibriertargets bekannt ist. In einem vorhandenen Verfahren wird diese Information erstmals genutzt. Es soll untersucht werden, inwiefern die Nutzung dieser bekannten Information die Detektiergenauigkeit beeinflusst. Außerdem wird dieses Verfahren dahingehend erweitert, dass die Unsicherheit der Messpunkte berücksichtigt und die resultierende Unsicherheit der detektierten Position geschätzt werden kann. Die Genauigkeit der Schätzung der Unsicherheit soll ebenfalls untersucht werden.

Praktische Vorteile durch den vorgestellten Ansatz

Durch die Nutzung eines zylindrischen Kalibriertargets ergeben sich auch einige praktische Vorteile. Zum einen können die zylindrischen Kalibriertargets unter einfachen Mitteln hergestellt werden. Zum Anderen können einfache Objekte wie zylinderförmige Stifte für die Kalibrierung genutzt werden. Ein weiterer interessanter Vorteil ist, dass viele Manipulatoren aus zylinderförmigen Gliedmaßen bestehen. Als Beispiele seien hier die Manipulatoren der Firma Universal Robots oder der Manipulator von Yuanda Robotics genannt. Für diese Manipulatoren ist es nicht erforderlich ein Kalibriertarget einzuspannen, da der Manipulator selbst unter bestimmten Voraussetzungen zur Kalibrierung genutzt werden kann. Der Ansatz zylinderförmiger Kalibriertargets ermöglicht für derartige Manipulatoren erstmals ohne Kalibriertarget den Manipulator mit einem 2D Laserscanner zu kalibrieren. Gleiches gilt für den Einsatz zylinderförmiger Werkzeuge, wie zum Beispiel Sauggreifer oder Bohrköpfe, die erstmals als Kalibriertarget verwendet werden können. Zwar wird in dieser Arbeit ausschließlich das zylindrische Kalibriertarget untersucht, jedoch eignen sich auch andere Geometrien, sofern die Symmetrie-Achse detektiert werden kann.

Zielsetzung

Das Hauptziel dieser Arbeit ist zu untersuchen, ob die Kalibrierung zwischen einem Manipulator und einem 2D Laserscanner ohne zusätzliche Hilfsmittel möglich ist und ob die erreichbare Genauigkeit existierenden Kalibriertarget basierten Verfahren entspricht.

Der vorgestellte Ansatz wurde iterativ weiter entwickelt und untersucht. Insgesamt wurden folgende Ziele definiert, die dazu dienen den Rahmen dieser Arbeit zu stecken und das Verfahren im Nachhinein zu bewerten:

- (Z₁) Das vorgestellte Verfahren soll unter Nutzung eines zylindrischen Kalibriertargets validiert und die Charakteristik und resultierende Genauigkeit untersucht werden.
- (Z₂) Der entwickelte Ansatz soll um ein Fehlermodell der Teilsysteme erweitert und die Verbesserung der Genauigkeit der Kalibrierung untersucht werden.
- (Z₃) Der entwickelte Ansatzes soll auf einer realen Plattform unter Nutzung verfügbarer Komponenten eingesetzt und einem aktuellen vergleichbaren Verfahren gegenübergestellt werden.

- (Z₄) Es soll nachgewiesen werden, ob und wie die genannte Kalibrierung für Manipulatoren mit zylindrischen Werkzeugen oder Gliedern möglich ist, ohne zusätzliche Sensorik oder Kalibriertargets zu nutzen.

1.4 Struktur der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist wie folgt gegliedert:

Im anschließenden Kapitel 2 wird die grundlegende Modellierung kinematischer Ketten und Laserscanner eingeführt. Es wird ein Überblick der Verfahren zur Kalibrierung zwischen Manipulator und Laserscanner gegeben, die Detektierung zylinderförmiger Objekte im Laserscan dargestellt und die Sensorfehler der Teilsysteme diskutiert. Der Stand der Technik endet mit einer Eingliederung und Abgrenzung der vorgestellten Arbeit.

Der eigene Ansatz zur Detektierung zylindrischer Objekte wird in Kapitel 3 dargelegt. Der sich ergebene Querschnitt wird modelliert, geeignete Verfahren identifiziert und schließlich ein vorhandenes Verfahren an die Anforderungen und Gegebenheiten dieser Arbeit angepasst und erweitert. Hierbei wird insbesondere berücksichtigt, dass der Durchmesser des gegebenen Kalibriertargets beziehungsweise des Manipulatorgliedes bekannt und als zusätzliche Information zur Detektierung genutzt werden kann. Außerdem ist die Unsicherheit des detektierten Schnittpunktes anhand der zugrundeliegenden Fehler der Messpunkte zu schätzen.

In Kapitel 4 wird die Kalibrierung anhand der verlängerten Achse des Manipulators im Detail vorgestellt und modelliert. Das Optimierungsproblem wird definiert und schließlich die Kalibrierung ohne Kalibriertarget mit dem Manipulator selbst dargelegt.

Der vorgestellte Ansatz wird schließlich in Kapitel 5 so erweitert, dass die Fehler der Teilkomponenten die einzelnen Messposen gewichten können. Weiterhin wird die Fehlerfortpflanzung entlang der gesuchten Transformation selbst untersucht und der auf die Ebene des Laserscanners projizierte Fehler modelliert. Der finale Algorithmus, der alle Fehleranteile berücksichtigt, wird abschließend vorgestellt.

Die Untersuchungen des vorgestellten Ansatzes erfolgen in Kapitel 6. Diese finden in simulierten und realen Experimenten statt.

Der Ansatz wird in Kapitel 7 bewertet und in Kapitel 8 wird die vorliegende Arbeit abschließend zusammengefasst.

Kapitel 2

Stand der Technik

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik. Zunächst wird die grundlegende Modellierung von seriellen Kinematiken und Laserscannern eingeführt. Schließlich wird die extrinsische Kalibrierung im Kontext der Robotik dargelegt und die Problemstellung beschrieben. Darauf aufbauend werden aktuelle Verfahren zur extrinsischen Kalibrierung zwischen Manipulator und Laserscanner vorgestellt, in den Kontext dieser Arbeit gestellt und bewertet. Da der vorgestellte Ansatz darauf basiert den Schnittpunkt einer zylinderförmigen Achse oder eines zylinderförmigen Kalbriertargets im Laserscan zu detektieren werden schließlich aktuelle Verfahren mit diesem Zweck gegenübergestellt und diskutiert. Sie werden bezüglich ihrer Anwendbarkeit für die vorgestellte Problemstellung und die gesetzten Ziele dieser Arbeit bewertet. Als nächstes werden Fehlermodelle von Sensoren eingeführt und das probabilistische Fehlermodell für diese Arbeit begründet. Anschließend werden insbesondere Fehler des seriellen Manipulators und des Laserscanners vorgestellt. Abschließend wird gezeigt, wie probabilistische Fehlermodelle im Rahmen einer Optimierung zur Kalibrierung berücksichtigt werden können und sich die erzielte Genauigkeit im Nachhinein schätzen lässt.

2.1 Modellierung

Um die Teilsysteme Laserscanner und Manipulator in einen geometrischen Kontext zueinander zu setzen, müssen diese mathematisch beschrieben werden können. Das folgende Kapitel gibt eine kurze Übersicht der in dieser Arbeit verwendeten Beschreibung. Zunächst wird auf die Modellierung geometrischer Beziehungen eingegangen. Darauf aufbauend wird die kinematische Kette eines seriellen Manipulators modelliert und abschließend wird die Modellierung des Laserscanners betrachtet.

2.1.1 Modellierung geometrischer Beziehungen

Bei der extrinsischen Kalibrierung (auch kinematische Kalibrierung) werden die Teilsysteme eines Robotik Systems in einen geometrischen Kontext zueinander gesetzt, wie zum Beispiel die geometrische Verschiebung und Rotation zwischen Laserscanner und Manipulator. So zielt die extrinsische Kalibrierung darauf ab verschiedene Teilsysteme als Einheit verwenden zu können [SK16].

Für jedes Teilsystem i wird zunächst ein Koordinatensystem \mathcal{F}_i definiert. Um die Systeme in einen geometrischen Kontext zu setzen ist es erforderlich die Transformationen T (Verschiebungen und Rotationen) zwischen den Koordinatensystemen \mathcal{F}_i im \mathbb{R}^3 zu bestimmen. Formal ausgedrückt ist es Ziel der extrinsischen Kalibrierung die Transformation $T_\tau^{b:a} \in \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ zwischen den Koordinatensystemen \mathcal{F}_a und \mathcal{F}_b anhand der Parameter τ zu bestimmen.

Für den 3 dimensionalen realen Raum \mathbb{R}^3 ergeben sich sechs zu bestimmende Parameter. Die Verschiebung entlang der drei Koordinatenachsen lässt sich mit t_x, t_y, t_z beschreiben und die Orientierung lässt sich minimal als Menge von drei Rotationen um die Koordinatenachsen repräsentieren: Rotation um die x-Achse φ , um die y-Achse ϑ und um die z-Achse ψ . Aus den 27 möglichen Mengen von jeweils drei aufeinanderfolgenden Rotationen erzeugen 12 eine eindeutige Beschreibung der Orientierung - die sogenannten Euler-Winkel [Sic+08]. Weitere Repräsentationsformen der Orientierung sind zum Beispiel die sogenannten Quaternionen [Ham44], die Screw-Parameter [Fre67] oder die Modifizierten Rodriguez Parameter [Wie62]. Diese werden in dieser Arbeit jedoch nicht verwendet und aus diesem Grund nicht weiter vorgestellt. In dieser Arbeit werden ausschließlich die XYZ-Euler-Winkel verwendet, welche eine Rotation um die x-, die y- und schließlich um die z-Achse beschreiben.

Eine nicht-minimale Repräsentation einer Transformation ist die als Matrix ausgedrückte homogene Transformationsmatrix $\mathcal{H} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$. Diese besteht im Allgemeinen aus einer Rotationsmatrix $R \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, einem Translationsvektor $P \in \mathbb{R}^{1 \times 3}$ und einem Streckungsfaktor $\epsilon \in \mathbb{R}$:

$$\mathcal{H} = \begin{bmatrix} R & P \\ 0 & \epsilon \end{bmatrix}$$

Die Transformation zwischen zwei Koordinatensystemen \mathcal{F}_a und \mathcal{F}_b lässt sich als homogene Transformationsmatrix \mathcal{H}_a^b mit der Rotationsmatrix R_a^b , dem Translationsvektor P_a^b und mit

$\epsilon = 1$ beschreiben. Unter Verwendung der ZYX-Euler Winkel für die Orientierung lässt sich die homogene Transformationsmatrix ausdrücken als:

$$\mathcal{H}(\tau) = \begin{bmatrix} c_\varphi c_\vartheta c_\psi - s_\varphi s_\psi & -c_\varphi c_\vartheta c_\psi - s_\varphi s_\psi & c_\varphi s_\vartheta & t_x \\ s_\varphi c_\vartheta c_\psi + c_\varphi s_\psi & -s_\varphi c_\vartheta c_\psi + c_\varphi s_\psi & s_\varphi s_\vartheta & t_y \\ -s_\vartheta c_\psi & s_\vartheta s_\psi & c_\vartheta & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Konventionell werden hierbei $\cos(i)$ und $\sin(i)$ mit c_i und s_i substituiert.

Die homogene Transformationsmatrix bietet den Vorteil, dass kinematische Aneinanderreihungen von Transformationen als Sequenz homogener Transformationen zwischen den Koordinatensystemen beschrieben werden können: $\mathcal{H}_0^2 = \mathcal{H}_0^1 \cdot \mathcal{H}_1^2$.

2.1.2 Modellierung der seriellen Kinematik

Ein serieller Manipulator besteht aus einer Basis, den Manipulatorverbindungen, den rotatorischen oder translatorischen Antrieben zwischen diesen und einem Endeffektor. Die Antriebe bewegen die jeweils nächste Manipulatorverbindung, sodass die gesamte kinematische Kette den Endeffektor im Raum bewegt. Der Endeffektor wiederum kann die Umwelt durch zugreifen oder Bearbeitung mit einem eingesetzten Werkzeug beeinflussen [SK16]. Das kinematische Modell beschreibt die geometrische Beziehung zwischen den Manipulatorverbindungen [SAG97].

Nach der Denavit-Hartenberg-Konvention wird pro Manipulatorverbindung ein Koordinatensystem zur Beschreibung dessen Position und Orientierung in die zugehörige Gelenkachse gelegt [HD55]. Die Verschiebung dieser Koordinatensysteme zueinander kann durch einen minimalen Satz von vier Parametern aus Translationen und Rotationen bestimmt werden. Nach der klassischen Denavit-Hartenberg-Konvention wird die statische Basis als Koordinatenframe \mathcal{F}_1 definiert. Die sogenannte modifizierte Denavit-Hartenberg-Konvention (MDH) hingegen definiert die Basis als \mathcal{F}_0 . Auf der Denavit-Hartenberg-Konvention basierende Modelle weisen eine Singularität bei aufeinanderfolgenden parallelen Gelenkachsen auf. [Hay83] führte deswegen die Hayati-Konvention ein, welche einen Parameter der Denavit-Hartenberg-Konvention ersetzt und die Singularität vermeidet. Üblicherweise wird eine Kombination verschiedener Konventionen verwendet [SS87; VW86].

Weitere Möglichkeiten die Kinematische Kette zu modellieren sind die Repräsentation als Liniendarstellung oder Exponentialabbildung. Die Liniendarstellung geht auf [Rob] zurück und wurde in [ZR92; ZRH92] zum sogenannten Complete and Parametrically Continuous Modell (CPC) entwickelt. Die Exponentialabbildung Product-of-Exponentials (POE) basierend auf bestimmten Integralen von Exponentialfunktionen wurde von [PO94] eingeführt. [He+10] stellte schließlich eine explizite Form vor und [Yan+14] erweiterte diesen Ansatz auf einen minimalen Parametersatz. Für den in dieser Arbeit genutzten Manipulator UR5 existieren präzise kinematische Modelle auf Basis der MDH-Parameter, welche für die weitere Arbeit genutzt werden sollen.

Die Transformationen zwischen den Gelenkachsen basierend auf der modifizierten Denavit-Hartenberg-Konvention werden schließlich als Homogene Transformationsmatrizen beschrieben. So lässt sich die Kinematik als Verkettung der Transformationen zwischen den Koordinatensystemen aller Gelenkachsen \mathcal{F}_i repräsentieren, wobei $i \in F$ und F der Menge aller existierenden Koordinatensysteme $F_0 \dots F_N$ entspricht. Die gesamte kinematische Kette lässt sich so als Verkettung homogener Transformationen zwischen diesen Koordinatensystemen ausdrücken und zu einer Transformation zwischen Basis-Frame \mathcal{F}_0 und Endeffektor-Frame \mathcal{F}_N zusammenfassen:

$$\mathcal{H}_0^N(c) = \prod_{i=1}^N \mathcal{H}_{i-1}^i(c)$$

Die Konfiguration des Manipulators $q \in Q$ definiert die Stellung der Gelenke. Hierbei entspricht Q der Menge aller möglichen Konfigurationen. Die Stellung des Manipulators wird durch die Konfiguration eindeutig bestimmt. Abbildung 2.1 veranschaulicht die kinematische Kette eines seriellen Manipulators mit ausschließlich rotatorischen Gelenken. Die Koordinatensysteme von Basis und Endeffektor des Manipulators werden folgend der Konvention nach als \mathcal{F}_B und \mathcal{F}_E bezeichnet. Die Transformation zwischen dem Koordinatensystem der Manipulator-Basis \mathcal{F}_B und dem Endeffektor \mathcal{F}_E über die verschiedenen Gelenke wird als Funktion der Konfiguration q zu einer Transformation $\mathcal{H}_B^E(q)$ zusammengefasst.

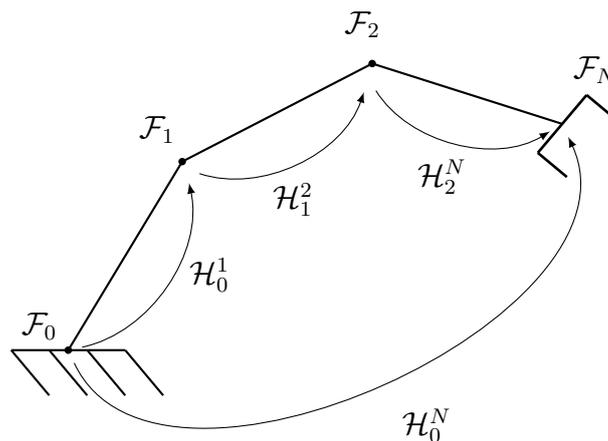


Abbildung 2.1: Schemazeichnung eines seriellen Manipulators, den Koordinatensystemen der Gelenkachsen und der kinematischen Verkettung von der Basis zum Endeffektor.

Es ergibt sich eine weitere Transformation vom Endeffektor zum Tool Center Point (TCP). Dies ist das Koordinatensystem des befestigten Greifers oder Werkzeugs, welches bestimmt wo der Greifer oder das Werkzeug ansetzen. Die Transformation vom Endeffektor zum TCP wird konventionell so definiert, dass die Z-Achse in Greif- oder Werkzeugrichtung zeigt (siehe Abbildung 2.2). Diese Konvention wird auch in dieser Arbeit verwendet.

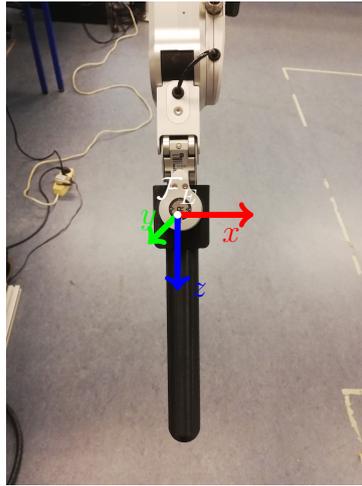


Abbildung 2.2: Koordinatensystem des TCP mit gegriffenem Zylinderförmigen Kalibriertarget.

2.1.3 Modellierung des Laserscanners

Es gibt verschiedene Sensoren, um die Umgebungsinformationen zu erhalten, mathematisch abzubilden und eine Lokalisierung, Planung oder Regelung der Bewegung durchzuführen. Bezüglich der Kartierung, Lokalisierung aber auch Hinderniserkennung ist der Laserscanner von großer Bedeutung für die mobile Robotik und somit auch für Mobile Manipulatoren von großem Interesse [SNS11].

Laserscanner arbeiten nach dem Time-of-Flight Prinzip und nutzen hierfür die Pulslaufzeitmessung oder die Phasendifferenzmessung. Bei der Pulslaufzeitmessung wird ein Laserimpuls ausgesendet, von der Umgebung reflektiert und das entstehende rückfallende Echo gemessen. Die Zeit zwischen Aussenden des Laserimpuls und Einfall des Echos wird bestimmt und aufgrund der konstanten Lichtgeschwindigkeit kann die Entfernung des reflektierenden Objekts berechnet werden. Bei der Phasendifferenzmessung wird die Entfernung aus der Phasenverschiebung zwischen ausgesandtem Lasersignal und Signal des Echos bestimmt. Die Wellenlänge des Lasersignals bestimmt wesentlich die Genauigkeit und den Eindeutigkeitsbereich der Messung [LW11].

Steht der Laserstrahl an einem festen Ort ist es möglich ein 1-dimensionales Abbild in Richtung des Laserstrahls zu erzeugen - der Abstand zwischen Laserscanner und Objekt entlang des Laserstrahls. Wird der Laserstrahl allerdings um die horizontale und vertikale Achse rotiert, können auch 2-dimensionale bzw. 3-dimensionale Modelle der Umgebung erzeugt werden [WW03]. Abbildung 2.3 stellt das Funktionsprinzip grafisch dar.

Aufgrund der Rotation und Abstandsmessung ergibt sich für den 2D Laserscanner ein topologisch korrektes Koordinatensystem in Form von Polarkoordinaten (Abstand und Winkel) $\mathcal{P}(r, \varphi) \in \mathbb{R}_0^+ \times \mathbb{R}$, auf dem die Umgebung des Laserscanners abgebildet wird. Diese Abbildung lässt sich in ein kartesisches Koordinatensystem transformieren $\mathcal{X}(x, y) \in \mathbb{R}^2$ [YB02] (siehe Abbildung 2.4).

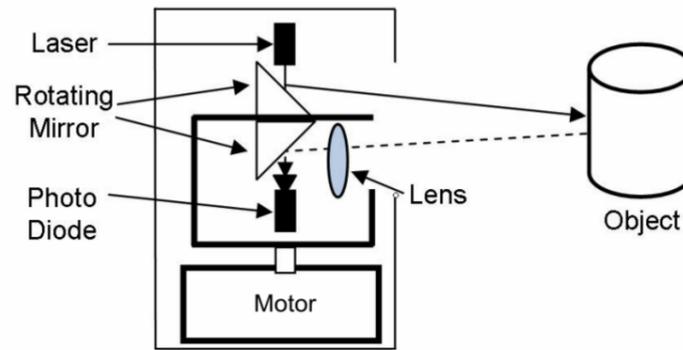
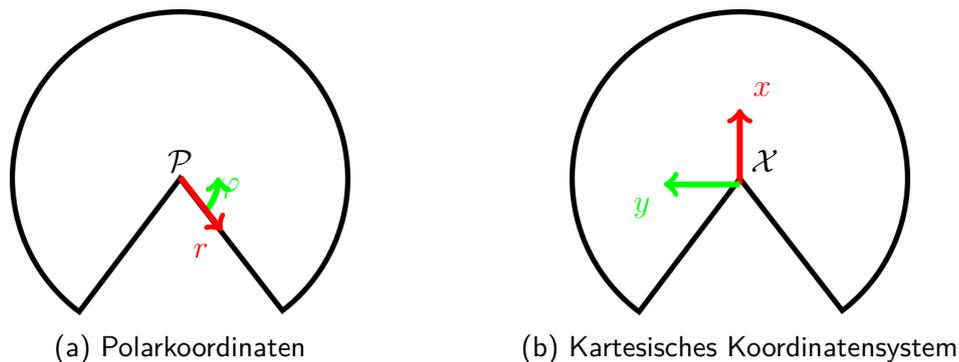


Abbildung 2.3: Funktionsprinzip des Laserscanners [OYB09]

Abbildung 2.4: Zwei dimensionaler Raum des Laserscans in Polar- und kartesischen Koordinaten \mathcal{P} und \mathcal{X} .

Neben dem zeitlichen Unterschied zwischen Aussenden des Laserstrahls und Echo gibt es Laserscanner, welche zusätzlich die Intensität des Echos bestimmen. Diese hängt im Wesentlichen von den Reflexionseigenschaften des reflektierenden Materials, so wie des Einfallswinkels und der Entfernung ab [Kaa+10; Kaa+11; KKL08]. Jedem Messpunkt kann ein Intensitätswert zugeordnet werden, welcher Rückschluss auf Objekteigenschaften oder die Zuverlässigkeit der Messung geben kann.

2.2 Kalibrierung

In diesem Kapitel wird die Kalibrierung im Kontext der Robotik eingeführt. Zunächst wird die extrinsische Kalibrierung definiert. Schließlich werden Verfahren zur Identifikation der zu bestimmenden Parameter vorgestellt und abschließend wird die Anforderung bezüglich der Genauigkeit basierend auf dem aktuellen Trend der Technik und dieser Arbeit begründet.

2.2.1 Extrinsische Kalibrierung

Der Zweck eines Robotik Systems ist in jeder Applikation die Ausführung einer bestimmten Aufgabe. Im Gegensatz zu reiner Software interagiert das Robotik System allerdings mit der physikalischen Umwelt.

Damit eine übergeordnete Steuerung (Software) diese Interaktion initiieren und kontrollie-

ren kann, sind Modelle der Umwelt als auch des Robotik Systems selbst erforderlich. Diese Modelle bilden das Verhalten der Realität eingeschränkt ab und ermöglichen so die zielgerichtete Interaktion. In diesem Kontext ist zwischen dynamischen und kinematischen Modellen zu unterscheiden. Dynamische Modelle beschreiben das dynamische Verhalten unter Krafteinwirkung anhand von Masse- und Verbindungseigenschaften der Teilkomponenten. Kinematische Modelle hingegen beziehen sich ausschließlich auf eine Beschreibung anhand von Geschwindigkeit und Position der Teilkomponenten ohne Berücksichtigung der Krafteinwirkung [Sic+08].

Unter einer Identifikation wird der Prozess verstanden die zugrundeliegenden Modelle zu bestimmen. Bei der extrinsischen Kalibrierung handelt es sich wiederum um die Identifikation der Parameter, welche die geometrischen Beziehungen zwischen den Teilkomponenten beschreiben [HKG16].

Die extrinsische Kalibrierung wird eingesetzt, um die erforderlichen Parameter erstmals zu bestimmen oder bereits bestimmte Parameter zu aktualisieren und so die Genauigkeit des Systems zu verbessern [HKG16]. In diesem Kapitel werden die erforderlichen Teilschritte und nötigen Definitionen näher beschrieben und der aktuelle Stand der Forschung dargelegt.

2.2.2 Genauigkeit

Die [DIN99] unterscheidet bezüglich der Genauigkeit zwischen Absolutgenauigkeit und Wiederholgenauigkeit. Der Unterschied wird in Abbildung 2.5 anhand von unterschiedlichen Verteilungen von Messpunkten dargestellt. Während sich die Wiederholgenauigkeit auf die Streubreite einer Messung bezieht, bezieht sich die Absolutgenauigkeit auf die mittlere Abweichung vom tatsächlichen Wert.

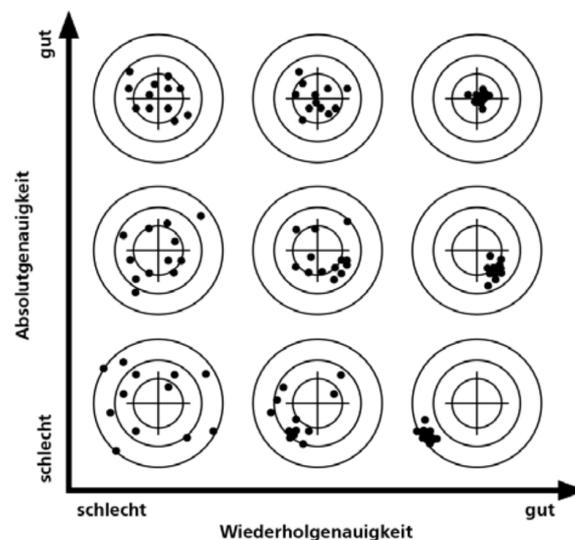


Abbildung 2.5: Wiederholgenauigkeit und Absolutgenauigkeit nach DIN EN ISO 9283 [LIT].

Sofern bei Manipulatoren in sogenannten Teach-In Verfahren die geforderten Konfigurationen gespeichert und im Nachhinein wiederholt angefahren werden, ist eine hohe Wiederholgenauigkeit ausreichend. Werden die anzufahrenden Posen jedoch bezüglich Koordinatensystemen

von anderen Teilkomponenten (z.B. Laserscanner) zur Laufzeit ermittelt oder Offline programmiert, ist eine hohe Absolutgenauigkeit gefordert - sowohl für die Messung der Pose des Endeffektors, als auch für die Messung der Teilkomponente (z.B. Laserscan) und der Transformation zwischen Teilkomponente und Manipulatorbasis [Wie19]. Der Fortschritt hin zu flexibleren Werkstätten und hoch integrierten Robotiksystemen erfordert demnach eine hohe Absolutgenauigkeit aller Komponenten und Transformationen zwischen diesen.

2.2.3 Kalibrierung mobiler Manipulatoren

Mobile Manipulatoren besitzen diverse Sensoren und Aktoren, um die Umgebung wahrzunehmen und mit dieser zweckmäßig interagieren zu können. Diese müssen zueinander kalibriert werden [Kri+17]. Von besonderer Bedeutung sind bezüglich mobiler Manipulatoren die intrinsische Kalibrierung des Manipulators selbst [WW17] als auch die extrinsische Kalibrierung zwischen den exterozeptiven Sensoren zur Umgebungswahrnehmung und dem Manipulator [BHM16]. Während die intrinsische Kalibrierung Gegenstand vieler Forschungsarbeiten darstellt, gibt es für die extrinsische Kalibrierung wenige Untersuchungen [Hvi+10].

Im Zuge der sogenannten vierten industriellen Revolution [Spa+13] als auch dem steigenden Einsatz Mobiler Manipulatoren in Katastrophenszenarien [MTK16], steigt die Anforderung an die Flexibilität Mobiler Manipulatoren. Automatisierte Kalibrier-Verfahren gewinnen damit sowohl in der Forschung als auch in der Praxis an Bedeutung. Die verschiedenen Verfahren lassen sich in den erforderlichen Ressourcen für den Kalibrierprozess unterscheiden.

Nutzung eines Kalibriertargets

Eine etablierte Möglichkeiten Sensoren zueinander zu Kalibrieren ist die Verwendung sogenannter Kalibriertargets. Wird ein Kalibriertarget mit bekannter Geometrie oder bekannten Merkmalen von mehreren Sensoren gleichzeitig erfasst, können diese in einen gemeinsamen geometrischen Kontext gesetzt werden [Low85]. Diese Verfahren lassen sich für mobile Manipulatoren automatisieren, sofern das Kalibriertarget mitgeführt und vom Manipulator selbst gegriffen werden kann. Dass der Arbeitsraum des Manipulators den Messbereich des jeweiligen Sensors überschneidet ist eine zusätzliche Bedingung.

Nutzung der Umgebung

Eine weitere Möglichkeit zur Kalibrierung besteht darin die Umgebung des Mobilien Manipulators zu nutzen. So werden beispielsweise in [Son+19] mehrere Laserscanner, deren Messbereiche sich überschneiden, anhand dieser Überschneidungen zueinander kalibriert ohne dass weitere Ressourcen notwendig sind.

Nutzung der Umgebung und zusätzlicher Ressourcen

Neben der Nutzung der Umgebung, gibt es Verfahren welche die Umgebung nutzen und zusätzliche Ressourcen erfordern. [Wie19] untersucht beispielsweise ein Verfahren, welches einen zusätzlichen Projektor mit strukturiertem Licht als auch eine Kamera für die Kalibrierung erfordert. Ein auf die Umwelt projiziertes Muster wird von einer am Endeffektor angebrachten

Kamera aufgenommen. Die Aufnahme dieses Musters bei verschiedenen Konfigurationen des Manipulators wird genutzt, um den Manipulator intrinsisch zu kalibrieren.

2.3 Kalibrierung zwischen Manipulator und Laserscanner

Dieses Kapitel behandelt den Stand der Technik bezüglich Kalibrierverfahren zwischen Manipulator und Laserscanner. Zunächst werden die nach aktuellem Stand der Technik genutzten Funktionsprinzipien vorgestellt. Darauf aufbauend werden die Verfahren dieser Funktionsprinzipien vorgestellt und jeweils in den Kontext dieser Arbeit gestellt. Die Verfahren werden jeweils anhand der für diese Arbeit definierten Anforderungen bewertet und ihre Automatisierbarkeit beurteilt.

2.3.1 Funktionsprinzipien

Bezüglich der Kalibrierung zwischen Laserscanner und Manipulator können grundlegend drei Funktionsprinzipien unterschieden werden, welche in der aktuellen Forschung oder praktischen Anwendung Verwendung finden:

- Manuelle Kalibrierung
- Kalibrierung mittels zusätzlicher Kamera
- Kalibrierung mittels Kalibriertarget

Unter *Manueller Kalibrierung* wird verstanden die geometrische Beziehung durch manuelles Messen zu bestimmen. Die Koordinatensysteme des Manipulators und des Laserscanners können auf Grundlage technischer Zeichnungen mit ihren äußeren Abmessungen in Beziehung gebracht werden. Die Abstände und Orientierungen zueinander können schließlich manuell gemessen und die sechs Parameter der Transformation bestimmt werden.

Sofern die gesuchte Transformation nicht manuell ermittelt werden soll, ist es erforderlich in einem Kalibrierprozess bekannte Stellungen oder Bewegungen des Manipulators mit den zugehörigen Messungen des Laserscanners in Beziehung zu setzen. Nur so lässt sich die geometrische, statische Beziehung zwischen diesen beiden Systemen automatisiert bestimmen. Unter diese Kategorie fallen die *Kalibrierung mittels zusätzlicher Kamera* und *Kalibrierung mittels Kalibriertarget*.

Unter *Kalibrierung mittels zusätzlicher Kamera* wird dabei verstanden, dass eine am End-Effektor des Manipulators befestigte Kamera mit dem Laserscanner kalibriert wird. Diese ist entweder bereits vorhanden oder muss für die Kalibrierung angebracht werden. Aufgrund der bekannten Stellung des Manipulators und der ermittelten Transformation zwischen der Kamera und dem Laserscanner, kann schließlich die Transformation zwischen Manipulator und Laserscanner bestimmt werden.

Die *Kalibrierung mittels Kalibriertarget* nutzt dahingegen keine zusätzlichen Sensoren, sondern ausschließlich ein Kalibriertarget. Dieses wird im End-Effektor des Manipulators eingespannt oder von diesem gegriffen und vom Laserscanner detektiert. Die bekannte Stellung des Mani-



Abbildung 2.6: Manuelle Kalibrierung zwischen Laserscanner und Manipulator

pulators und die Informationen aus der Detektierung des Kalibriertargets im Laserscan geben Aufschluss über die Transformation zwischen Manipulator-Basis und Laserscanner.

2.3.2 Manuelle Kalibrierung

Die manuelle Kalibrierung versteht in diesem Kontext das manuelle Messen der Abstände und der Orientierung zwischen dem Laserscanner und der Manipulator-Basis unter Zuhilfenahme der gegebenen technischen Zeichnungen und Messmittel. Zwar wird diese Art der Kalibrierung nicht in der Forschungsgemeinde untersucht, jedoch soll sie im Rahmen dieser Arbeit bezüglich ihrer Vor- und Nachteile diskutiert werden, da sie breite praktische Anwendung findet.

Als Vorteil dieser Kalibrierung ist ihre Einfachheit und Praktikabilität zu nennen. Es werden nur wenige zusätzliche Ressourcen benötigt und Expertenwissen bezüglich der Durchführung eines speziellen Kalibrierverfahrens ist ebenfalls nicht nötig.

Allerdings weist dieses Verfahren auch einige Nachteile auf. Selbstverständlich ist es nicht automatisierbar. Somit können Mobile Manipulatoren nicht im Betrieb fernab von Personal rekalibriert werden. Die Möglichkeit einer flexiblen Kalibrierung zur Lokalisierung eines Mobilen Manipulators zu einer Bearbeitungsstation ist folglich auch nicht möglich. Bezüglich der Genauigkeit ist zu erwähnen, dass diese stets von den verwendeten Messmitteln und der Lage der Systeme zueinander abhängig ist. So lässt sich die Orientierung zwischen den Systemen manuell schwieriger bestimmen als die Translation. Zwar wurde die Einfachheit und Praktikabilität bereits als Vorteil genannt, allerdings gilt dies nur für einmalige Kalibrierungen. Systeme, die häufig rekonfiguriert werden oder vielen mechanischen Belastungen ausgesetzt sind, müssen gegebenenfalls häufig kalibriert werden. In diesen Fällen spart eine automatisierbare Kalibrierung langfristig Ressourcen.

2.3.3 Kalibrierung mittels Kamera

Eine weitere Möglichkeit einen 2D Laserscanner mit dem Manipulator zu kalibrieren ergibt sich aus der Kalibrierung zwischen einer Kamera und einem Laserscanner. Hierfür wird eine am End-Effektor befestigte Kamera benötigt. Zunächst wird die Kamera mit dem Laserscanner kalibriert. Schließlich wird die Transformation zwischen Kamera und Endeffektor in einer weiteren Kalibrierung, sogenannte Hand-Auge-Kalibrierung, ermittelt. Die Konfiguration des Manipulators ist bekannt, sodass die Transformation zwischen Manipulator-Basis und Endeffektor gegeben ist. Schließlich kann die gesuchte Transformation zwischen Laserscanner und Manipulator-Basis aus den ermittelten Transformationen bestimmt werden.

2.3.3.1 Kalibrierung mittels Kamera für 2D Laserscanner

Die Kalibrierung zwischen Laserscanner und Kamera ist in der Forschungsgemeinde bereits weitgehend untersucht worden. Während [ZP04] das wohl etablierteste Verfahren unter Nutzung eines zusätzlichen Kalibriertargets vorstellt, werden in [Fan+19; Gom+15] Verfahren genannt, welche die Umgebung zur Kalibrierung nutzen. Hierbei ist allerdings darauf hinzuweisen, dass keine beliebige Umgebung zur Kalibrierung genutzt werden kann. So ist es für das vorgestellte Verfahren in [Gom+15] erforderlich, dass in einem weiten Raum verschiedene Wände bzw. Objekte mit planaren Flächen im Messbereich der Kamera und des 2D Laserscanners vorhanden sind. Das Verfahren aus [Fan+19] erfordert eine wohl definierte Laborumgebung mit vielen Säulen im Messbereich der beiden Sensoren. [Qui+09] erwähnt die Verwendung der Kalibrierung mittels Kamera für einen mobilen Manipulator, nennt aber nicht das zugrundeliegende Kalibrierverfahren. Die verschiedenen Verfahren unterscheiden sich nicht nur in den erforderlichen weiteren Ressourcen, sondern auch in der erzielten Genauigkeit.

Als Vorteil dieser Methode ist zu nennen, dass die Kalibrierung zwischen Laserscanner und Kamera bereits weitestgehend erforscht ist. Dies gilt auch für die Hand-Auge-Kalibrierung (z.B. [Dan99; TL89]). Somit kann auf etablierte Verfahren für die Kalibrierung zurückgegriffen werden. Je nach erforderlicher Genauigkeit ist ein entsprechendes Verfahren auszuwählen.

Als Nachteil dieser Methode ist zu nennen, dass eine Kamera zwingend erforderlich ist. Diese ist am Endeffektor anzubringen und muss gegebenenfalls für die Kalibrierung angeschafft werden. Die zusätzlich benötigten Ressourcen (Kalibriertarget, Laborumgebung) schließen diese Art der Kalibrierung außerdem für die automatisierte Kalibrierung aus. Eine erforderliche vordefinierte Laborumgebung oder ein Kalibriertarget, welches in verschiedenen Orientierungen vom Laserscanner und der Kamera erfasst werden müsste, machen dies nicht möglich. Ein weiterer Nachteil ist die zusätzlich benötigte Hand-Auge-Kalibrierung. Bezüglich der Genauigkeit wird der Gesamtfehler durch eine zusätzliche Kalibrierung unweigerlich vergrößert.

2.3.3.2 Kalibrierung mittels Kamera für 3D Laserscanner mit Intensitätsmessung

In [Pra14] werden mehrere Verfahren zur vollständigen Kalibrierung des Mobilmanipulators PR2 [Cou10] genannt - unter anderem die Kalibrierung eines rotierenden 2D Laserscanners mit der Manipulator-Basis. Hierfür werden die am End-Effektor befestigte Kamera und der

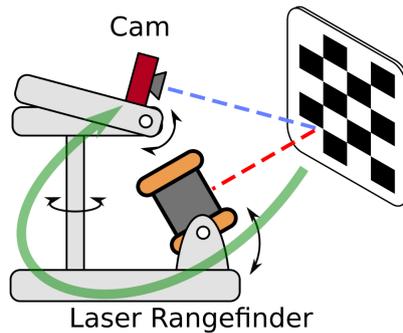


Abbildung 2.7: Kalibrierung zwischen Manipulator und rotierendem 2D Laserscanner mit Intensitätsmessung mittels Kamera [Pra14].

Laserscanner mit dem selben Schachbrett in verschiedenen Posen kalibriert. Aus den so bestimmten relativen Transformationen zwischen Laserscanner, Kamera und Schachbrett, sowie der jeweils bekannten Konfiguration des Manipulators wird schließlich die gesuchte Transformation zwischen Laserscanner und Manipulator-Basis bestimmt.

Das Funktionsprinzip des Verfahrens wird in Abbildung 2.7 dargestellt. Es unterscheidet sich insofern von den im vorherigen Kapitel vorgestellten Verfahren, dass ein 3D Laserscan (durch den rotierenden 2D Laserscanner) erforderlich ist für die Bestimmung der Transformation zwischen Schachbrett und Laserscanner. Außerdem sind Intensitätsmessungen erforderlich, um die Ecken des Schachbrettmusters im Laserscanner zu detektieren und die Lage zu bestimmen. Für die Bestimmung der Transformation wird schließlich ein Maximum Likelihood Problem definiert. Dieses berücksichtigt die Fehler des Laserscans als auch der kinematischen Kette des Manipulators. Der vom Manipulator verursachte Fehler wird mittels Jakobi-Matrix ermittelt. Dies führt allerdings dazu, dass der Fehler des End-Effektors nicht auf die Laserebene projiziert wird. Je nach Transformation zwischen Laserscanner und Manipulator können so falsche Schätzungen des Fehlers entstehen.

Das in [Pra14] vorgestellte Verfahren eignet sich für die manuelle, initiale Kalibrierung und die manuelle Rekalibrierung, sofern das zu kalibrierende System über einen rotierenden 2D Laserscanner oder 3D Laserscanner mit Intensitätsmessung verfügt. Eine automatisierte Kalibrierung ist mit diesem Verfahren nur bedingt realisierbar, da das erforderliche Schachbrett in verschiedenen Posen gemessen werden muss und dabei nicht vom Manipulator selbst gegriffen werden kann. Eine automatisierte flexible Kalibrierung oder Rekalibrierung ist nur möglich, sofern eine externe Einrichtung das Schachbrett in verschiedenen Posen hält.

2.3.3.3 Kalibrierung zwischen einer Kamera, einer Ebene und einem Manipulator mittels Laserpointer

In [HC11] wird ein Verfahren vorgestellt, welches einen Manipulator zu einer Kamera und einer Ebene kalibriert. Außerdem wird es genutzt, um die Kamera intrinsisch zu kalibrieren. In [HC12] wird dieser Ansatz zur Kalibrierung zwischen Manipulator, der Ebene und der Kamera isoliert betrachtet und untersucht.

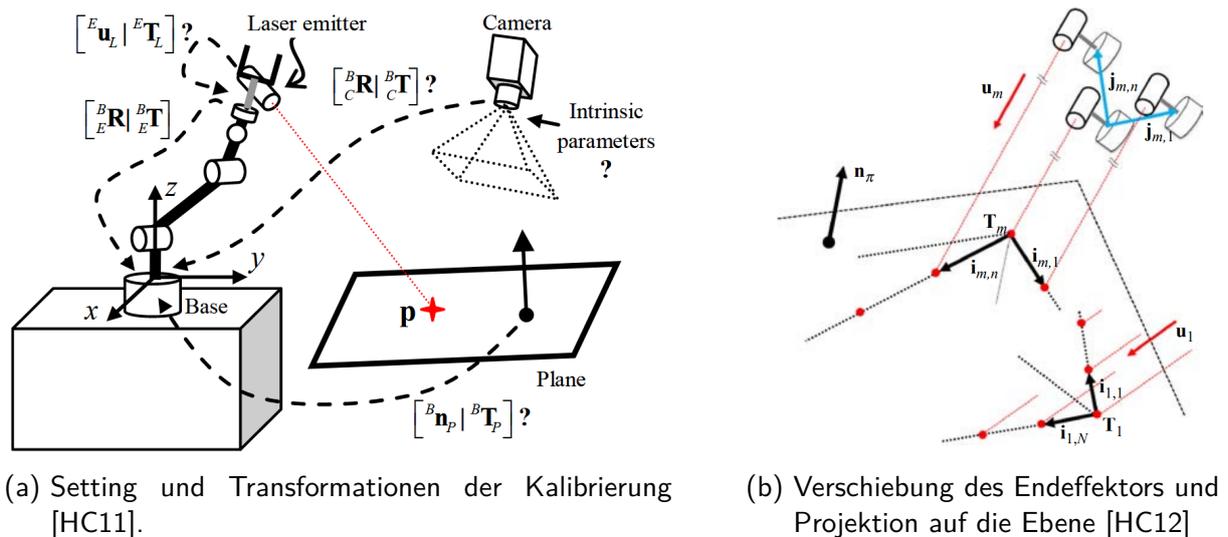


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung des Verfahrens aus [HC11] und [HC12] zur Kalibrierung zwischen Manipulator, Kamera und einer Ebene.

Das Verfahren basiert darauf mit einem Laserpointer, der am Endeffektor des Manipulators angebracht ist, einen Punkt auf eine Ebene zu projizieren. Eine externe Kamera detektiert den projizierten Punkt und anhand der bekannten Bewegung des Manipulators kann die Transformation zwischen der Ebene und dem Manipulator bestimmt werden. Abbildung 2.8 a) stellt das Setting dar.

Das Verfahren basiert darauf, dass der Endeffektor mehrere Punkte durch eine *Parallelverschiebung* anfährt. Die aus der Bewegung des Endeffektors entstehenden Vielecke werden auf die Ebene projiziert und entsprechend der gesuchten Transformation verzerrt (siehe Abbildung 2.8 b)).

Es ist denkbar dieses Verfahren anzupassen und für die Kalibrierung zwischen einem Laserscanner und einem Manipulator zu nutzen. Allerdings erfordert das Funktionsprinzip eine *Parallelverschiebung* des Endeffektors. Der Endeffektor darf während der Kalibrierung nicht rotiert werden. Aus diesem Grund ist eine Kalibrierung unter Nutzung des dritten Manipulatorglieds eines Knickarm Roboters als Kalibriertarget nicht möglich.

2.3.4 Kalibrierung mittels gegriffenem Kalibriertarget

Die Kalibrierung unterschiedlicher Systeme unter Zuhilfenahme eines Kalibriertargets geht auf [Low85] zurück. Ein Kalibriertarget, welches von den unterschiedlichen Sensoren gleichzeitig erfasst wird, kann verwendet werden, um diese in einen gemeinsamen geometrischen Kontext zu setzen. Bezogen auf die Kalibrierung zwischen Manipulator-Basis und Laserscanner bedeutet das, dass ein vom Manipulator gegriffenes Kalibriertarget mit bekannter Geometrie vom Laserscanner detektiert wird. Der sich ergebene Querschnitt des Kalibriertargets im Laserscanner und die bekannte Konfiguration des Manipulators können schließlich genutzt werden, um die gesuchte Transformation zu bestimmen. Bezüglich der Kalibrierung zwischen Laserscanner

und Manipulator-Basis wurden verschiedene Verfahren untersucht, welche dieses Prinzip mit unterschiedlichen Kalibriertargets nutzen. Diese werden in den folgenden Unterkapiteln einzeln vorgestellt und ihre Eigenschaften sowie Vor- und Nachteile insbesondere bezüglich der automatisierten Kalibrierung diskutiert.

2.3.4.1 Kugelförmiges Kalibriertarget für 3D Laserscanner

In [Li08] wird ein Verfahren vorgestellt, welches ein kugelförmiges Kalibriertarget verwendet, um einen tragbaren 3D Laserscanner mit einem Manipulator zu kalibrieren. Das kugelförmige Kalibriertarget wird am End-Effektor befestigt und in verschiedenen Konfigurationen wird der Querschnitt mit dem Laserscanner gemessen. Die einfache Geometrie der Kugel ergibt halb-kreisförmige Segmente in den verschiedenen Ebenen des 3D Laserscanners. In einem Least-Squared Verfahren wird die bekannte Geometrie der Kugel in den Laserscan gepasst und so die Position des Mittelpunkts für jede Konfiguration bestimmt.

In einem zweistufigen Verfahren wird zunächst der Rotationsanteil und schließlich der Translationsanteil der Transformation zwischen dem Laserscanner und dem Manipulator bestimmt. Hierfür werden die Kalibrierkonfigurationen des Manipulators so gewählt, dass der Rotations- und Translationsanteil unabhängig voneinander aus der Transformationskette ermittelt werden können. Schließlich werden wiederum mit einem Least-Squared Verfahren die sich ergebenden Anteile der Transformationskette zwischen Laserscanner, Manipulator und Zentrum des Kalibriertargets festgestellt. Abbildung 2.9 stellt das verwendete Setting schematisch dar.

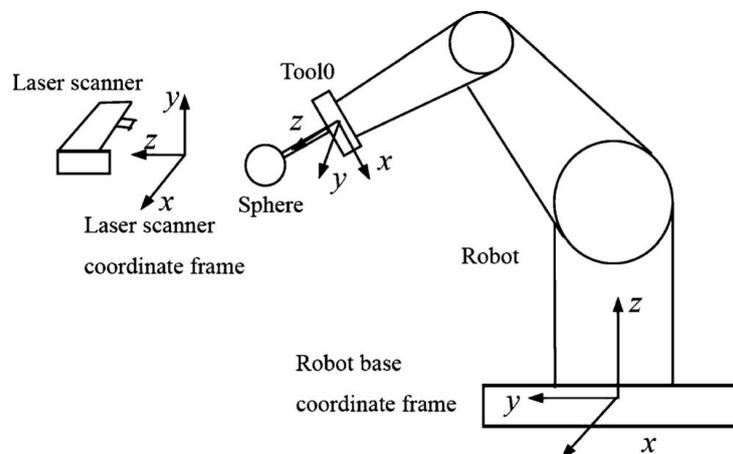


Abbildung 2.9: Setting des Kalibrierverfahrens mittels kugelförmigen Kalibriertarget für einen 3D Laserscanner [Li08]

In diesem Verfahren wird ein 3D Laserscanner verwendet und es lässt sich nicht auf einen 2D Laserscanner anwenden. Die Verwendung eines symmetrischen Kalibriertargets schafft die Möglichkeit die entstehende Transformationskette zu schließen, ohne die Orientierung des Kalibriertargets im Laserscan nutzen zu müssen. Da die Ermittlung der Orientierung nicht erforderlich ist, fallen systematische Fehler der Lasermessungen weniger stark ins Gewicht. Das Optimierungsproblem für die Detektierung des Kalibriertargets im Laserscan ist von geringer Komplexität, da lediglich die Position bestimmt werden muss. Dies verringert den Rechenauf-

wand und den resultierenden Fehler. Da es nur für den 3D Laserscanner verwendet werden kann, ist es für die gegebene Problemstellung nicht anwendbar. Da Manipulatoren keine kugelförmigen Glieder haben, ist es auch für die automatisierte Kalibrierung zwischen 3D Laserscanner und Manipulator nur bedingt einsetzbar. Der Manipulator müsste stets ein kugelförmiges Kalibriertarget angebracht haben oder für den Kalibrierprozess greifen können. Für diesen Fall wiederum verringert die Genauigkeit, mit der das Kalibriertarget gegriffen werden kann, die Genauigkeit der Kalibrierung, da sich der Mittelpunkt der Kugel entsprechend verschiebt.

2.3.4.2 Planare Fläche als Kalibriertarget für 2D Laserscanner auf Schienen

In [Hei+14] wird ein Verfahren vorgestellt, welches einen auf Schienen fahrenden 2D Laserscanner einer Bearbeitungsstation mit einem Manipulator kalibriert. Hierfür wird ein einfaches planares Kalibriertarget verwendet. Das planare Kalibriertarget wird am End-Effektor angebracht (siehe Abbildung 2.10). In verschiedenen Kalibrierkonfigurationen des Manipulators wird wiederum mit unterschiedlichen Positionen des Laserscanners entlang der Laufschiene ein 3D Modell des Kalibriertargets aus den Querschnitten erstellt. Die erzeugten 3D Modelle werden schließlich in einem iterativen Verfahren in ein Modell gepasst, welches einer Ebene mit Ursprung im Koordinatensystem des End-Effektors entspricht.



Abbildung 2.10: Aufbau des Kalibrierverfahrens mittels planarem Kalibriertarget und einem 2D Laserscanner auf einer Laufschiene [Hei+14]

Dieses Verfahren ist methodisch eine Erweiterung des von [Low85] vorgestellten Verfahren zur iterativen Parameterschätzung mittels Kalibriertarget. Mit jeder Kalibrierkonfiguration werden die Schätzparameter weiter korrigiert und konvergieren schließlich in einer optimalen Lösung. Für eine eindeutige Lösung für die gesuchte Transformation zwischen Manipulator und Laserscanner sind mindestens fünf Kalibrierkonfigurationen erforderlich. Mit weiter angefahrenen Kalibrierkonfigurationen kann der Fehler der Kalibrierung weiter verringert werden.

In diesem Verfahren wird ein 2D Laserscanner verwendet, welcher allerdings an einer Laufschiene angebracht sein muss, um ein 3D Modell des Kalibriertargets erzeugen zu können. Das

planare Kalibriertarget ist sehr simpel, was für den praktischen Einsatz generell von Vorteil ist. Dieses Verfahren kann nur in Verbindung mit einer Laufschiene für den Laserscanner verwendet werden und ist daher nur für derartige Settings verwendbar. Da Manipulatoren keine planaren Glieder haben, ist es auch für die automatisierte Kalibrierung zwischen 2D Laserscanner und Manipulator nur bedingt einsetzbar. Der Manipulator müsste stets ein planares Kalibriertarget angebracht haben oder für den Kalibrierprozess greifen können. Von Vorteil ist hierbei, dass durch die Verwendung eines planaren Kalibriertargets dessen Ursprungskoordinatensystem beliebig verschoben werden kann. Dies verringert den entstehenden Fehler der Kalibrierung, da das Kalibriertarget beliebig verschoben gegriffen werden kann. Die Verwendung der iterativen Schätzung hat zudem den Vorteil, dass die Genauigkeit der Kalibrierung mit weiteren Konfigurationen weiter verbessert werden kann.

2.3.4.3 Vielfüßer als Kalibriertarget für 2D Laserscanner

In [AF07] wird ein Verfahren untersucht, welches die sechs Parameter der Transformation zwischen einem 2D Laserscanner und einem bekannten Objekt mit einem einzigen Laserscan bestimmt. [AAR14] schlägt vor dieses Verfahren für die Kalibrierung zwischen einem Manipulator und einem Laserscanner anzuwenden. Hierfür ist das Objekt vom Manipulator zu greifen und die bekannte Stellung des Manipulators zu nutzen, um auf die Transformation zwischen Manipulator-Basis und Laserscanner schließen zu können.

Die Untersuchungen in [AF07] zielen darauf ab ein Kalibriertarget zu entwerfen, welches ermöglicht die sechs dimensionale Transformation mit einem einzigen 2D Laserscan zu bestimmen. Das mit diesen Anforderungen entworfene Kalibriertarget wird in Abbildung 2.11 dargestellt. Es ist von Pyramiden ähnlicher Gestalt, wobei die Außenwände teilweise offen gehalten wurden. So hat sich die Gestalt und der Begriff des Vielfüßers (engl.: Polypod) geprägt. Der vom Laserscanner erzeugte zwei dimensionale Querschnitt ist für jede Transformatin zwischen Objekt und Laserscanner eindeutig. Die Liniensegmente der sogenannten Beine des Kalibriertargets werden aus dem Laserscan segmentiert und extrahiert. Schließlich werden sie zugeordnet und in einem Optimierungsverfahren wird die bekannte Geometrie des Kalibriertargets in den Scan gepasst.

Das vorgestellte Verfahren bestimmt die Transformation zwischen Kalibriertarget und 2D Laserscanner mit einem einzigen Scan. Dies reduziert die Dauer und Komplexität des Kalibrierprozesses. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist allerdings die Abhängigkeit der Genauigkeit des Verfahrens von der Größe des Kalibriertargets. So wurde in [AF07] ein Kalibrierfehler von bis zu $6,1\text{ cm}$ und $1,3^\circ$ experimentell ermittelt. Hierfür wurde ein Laserscanner mit einer Auflösung von 1 cm und ein Kalibriertarget mit einer Aufliegefläche von 1 m^2 genutzt. Diese Größe schließt das vorgestellte Verfahren für eine automatisierbare Kalibrierung ohne Laborumgebung aus praktischen Gründen aus. Ein Kalibriertarget dieser Größe kann nicht vom mobilen Manipulator mitgeführt werden. Für den industriellen Betrieb wäre es möglich es vor Ort für die flexible Kalibrierung neben der Arbeitsstation zu platzieren. Doch auch für diesen Fall spricht die erforderliche Größe aus praktischen Gründen dagegen.

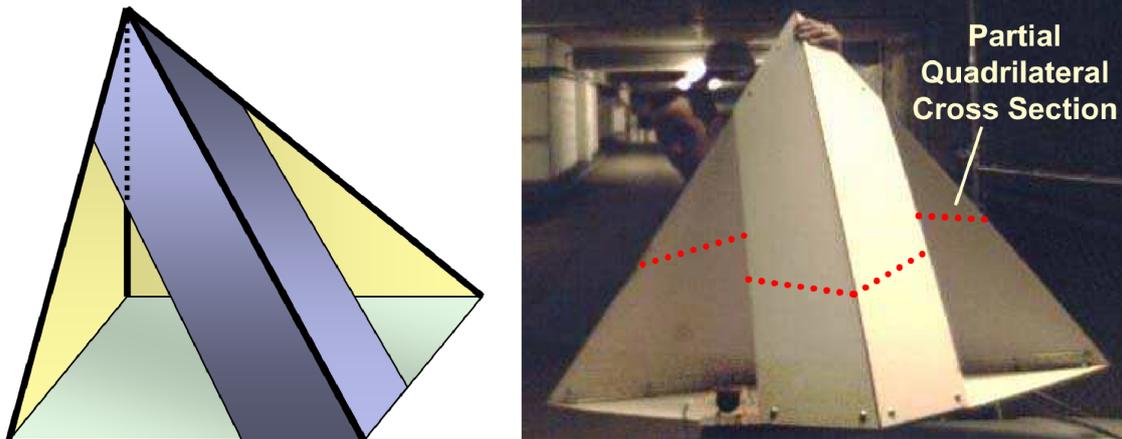


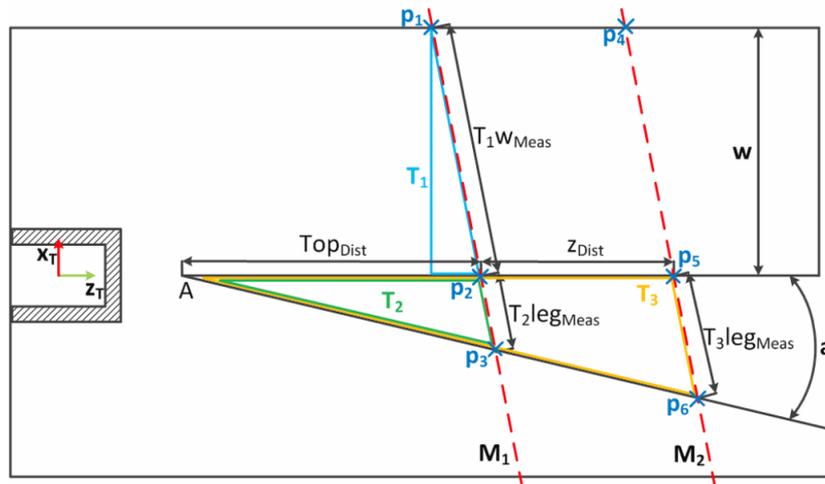
Abbildung 2.11: Sogenannter Vielfüßer als Kalibriertarget für die Kalibrierung mit einem einzigen 2D Laserscan [AF07].

2.3.4.4 Komplexe Planare Geometrie als Kalibriertarget für 2D Laserscanner

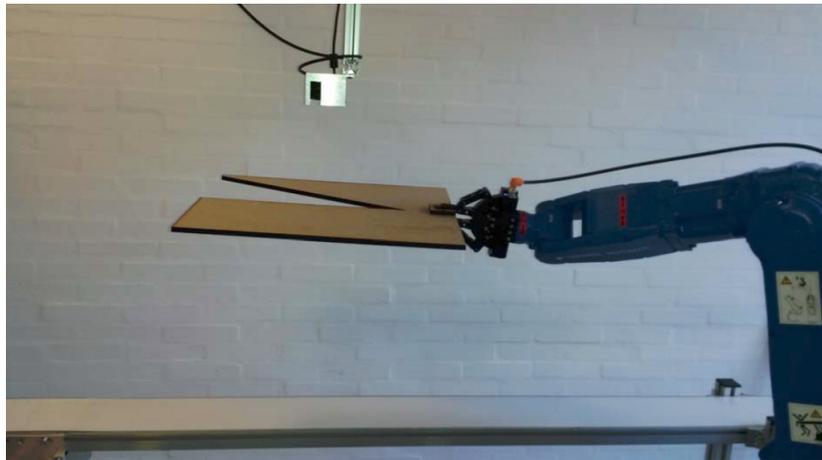
In [AAR14] wird ebenfalls eine planare Geometrie für die Kalibrierung verwendet. Im Gegensatz zu [Hei+14] oder [Pra14] ist es allerdings nicht erforderlich, dass durch eine zusätzliche Translation oder Rotation des Laserscanners ein 3D Abbild erzeugt werden kann. Die Funktionsweise ähnelt dem von [AF07] vorgestellten Verfahren. Ein Kalibriertarget komplexer aber bekannter Geometrie wird vom Laserscanner detektiert und die Orientierung und Verschiebung ermittelt. Die bekannte Konfiguration des Manipulators wird genutzt, um die Transformationskette zu schließen.

Die in [AAR14] entworfene Geometrie des Kalibriertargets ist komplexer als die einer einfachen Ebene, wie sie in [Hei+14] untersucht wurde, und wird in Abbildung 2.12a dargestellt. Die rot-gestrichelte Linie stellt den Querschnitt von zwei aufeinanderfolgenden Laserscans dar. Die blau markierten Punkte (p_1 bis p_6) zeigen sechs Merkmale, die aus den beiden Laserscans extrahiert werden. Die Orientierung und Verschiebung zwischen Laserscanner und Kalibriertarget wird anhand dieser Merkmale ohne Optimierung explizit bestimmt. Aufgrund der bekannten Konfiguration des Manipulators kann die Transformationskette geschlossen und die gesuchte Transformation zwischen Laserscanner und Manipulator bestimmt werden. Die Genauigkeit der Kalibrierung wurde in [AAR14] lediglich numerisch bestimmt. Für eine definierte Winkelauflösung von $0,125^\circ$ wurde ein Winkelfehler von $4,23^\circ$ und ein translatorischer Fehler von $\pm 0,1 \text{ cm}$ berechnet. Dieser Fehler ist optimistisch bestimmt, da der Fehler der Transformation zwischen End-Effektor und Kalibriertarget zu Null angenommen wurde. Außerdem wurde nur die Fehlerauswirkung der Winkelauflösung berücksichtigt und Kantenschüsse vernachlässigt. Der Messfehler durch eine fehlerhafte Bestimmung des Abstands der detektierten Merkmale zum Laserscanner wurde vernachlässigt.

Das in [AAR14] vorgestellte Verfahren nutzt zwei Laserscans des Kalibriertargets, um die Transformation zwischen einem 2D Laserscanner und einem Manipulator zu bestimmen. Ein Foto des realen Settings wird in Abbildung 2.12b dargestellt. Die Maße des Kalibriertargets machen es für eine automatisierte Kalibrierung im Rahmen einer flexiblen Kalibrierung oder



(a) Skizze des Kalibriertargets mit den wesentlichen Merkmalen, dem Ursprung des Koordinatensystems und den zu detektierenden Features im 2D Scan [AAR14].



(b) Foto des realen Settings der Kalibrierung [AAR14].

Abbildung 2.12: Kalibriertarget und Setting für die Kalibrierung mittels gegriffenem, komplexen, planaren Kalibriertarget.

Rekalibrierung bedingt anwendbar. Das Kalibriertarget müsste hierfür mitgeführt und für eine Kalibrierung gegriffen werden. Eine Kalibrierung ohne Kalibriertarget ist nicht möglich. Für die initiale Kalibrierung ist das Verfahren gut geeignet. Die erforderlichen zwei Laserscans verursachen geringen Aufwand. Lediglich der Winkelfehler könnte das Verfahren für einige Anwendungsfälle ausschließen. Ein Winkelfehler von 4.23° verursacht auf einen Abstand von 50 cm bereits einen translatorischen Fehler von 3.4 cm .

2.4 Detektierung Zylinderförmiger Objekte im Laserscan

Das zylinderförmige Kalibriertarget erzeugt im Querschnitt des 2D Laserscanners eine Ellipse. Die Symmetrie-Achse des Kalibriertargets im Laserscan zu detektieren kann somit auf die Problemstellung reduziert werden eine Ellipse zu erkennen und den Mittelpunkt der Ellipse zu

bestimmen.

Ellipsen zu detektieren ist im Bereich der Bildverarbeitung und Robotik eine relevante Problemstellung, welche große Aufmerksamkeit in der Forschungsgemeinde findet [HZ04]. Allgemein werden zwei Ansätze verfolgt: Clustering-Methoden und die Formulierung von Optimierungsproblemen. Während Clustering Methoden wenig Rechenkapazität benötigen und eine geringe Genauigkeit aufweisen, gilt gegenteiliges für Optimierungsverfahren [RWK12]. Die Genauigkeit ist höher und aufgrund des höheren Rechenaufwands konzentrieren sich aktuelle Forschungen darauf Formulierungen zu finden, um die Rechenlast zu reduzieren und Laufzeitfähige Verfahren zu entwickeln.

Optimierungsbasierte Verfahren unterscheiden sich bezüglich der Formulierung des zu minimierenden Gütefunktional. So kann entweder eine algebraische Distanz oder eine geometrische Distanz gewählt werden. Die algebraische Distanz wurde erstmals in [GGS94] vorgestellt und untersucht. Die algebraische Distanz basiert auf der algebraischen Repräsentation der Ellipse. Die Parameter der algebraischen Repräsentation lassen sich nicht geometrisch deuten. Die Formulierung eines Optimierungsproblems auf Basis der algebraischen Distanz lässt sich allerdings mathematisch vereinfachen und muss nicht in einem iterativen Verfahren gelöst werden. Dies reduziert den Rechenaufwand. Die von [GGS94] vorgestellte algebraische Distanz weist den Nachteil auf, dass nicht nur elliptische Lösungen gefunden werden können, sondern ebenfalls hyperbolische und parabolische. [FPF99] hat deswegen eine algebraische Kostenfunktion definiert, welche ausschließlich elliptische Lösungen zulässt.

Verfahren basierend auf der geometrischen Repräsentation der Ellipse enthalten Parameter, welche sich geometrisch interpretieren lassen. Im Gegensatz zur algebraischen Distanz muss das Minimum allerdings in einem iterativen Verfahren bestimmt werden. Dies erhöht den Rechenaufwand.

[HO06] stellte Verfahren basierend auf der algebraischen Distanz und basierend auf der geometrischen Distanz für Messungen mit wenigen Messpunkten gegenüber und konnte zeigen, dass die geometrische Distanz bessere Schätzungen liefert. Die algebraische Distanz führt dazu Bereiche der Ellipse unterschiedlich stark zu gewichten [Ros07]. Eine Übergewichtung der stark gekrümmten Bereiche der Ellipse führt stets dazu diese Bereiche in die Messpunkte zu passen. Verfahren basierend auf der geometrischen Distanz hingegen bestimmen in den Residuen die tatsächliche Distanz der Messpunkte zur idealen Ellipse. So werden sämtliche Bereiche der Ellipse gleich gewichtet.

[SCV12] stellte erstmals ein Verfahren vor, Ellipsen basierend auf der Sampson-Distanz zu schätzen. Die Sampson-Distanz ist die geometrische Distanz zu einer Näherung der Ellipse erster Ordnung, welche auf der algebraischen Repräsentation der Ellipse basiert. Das so definierte Optimierungsproblem lässt sich ebenfalls explizit lösen und erfordert kein iteratives Lösungsverfahren. Außerdem werden die einzelnen Bereiche der angenäherten Ellipse gleich gewichtet. Die Kovarianz der einzelnen Messpunkte der Ellipse kann zur Gewichtung berücksichtigt werden und soll die Detektierung bei verrauschten Daten verbessern. In [SCH15] wird

dieser Ansatz erweitert, sodass auch die Kovarianz der ermittelten Parameter der Ellipse geschätzt werden kann. Da das Gütefunktional auf der algebraischen Repräsentation basiert, lassen sich die Parameter der Ellipsen-Funktion jedoch nicht geometrisch interpretieren. So ist es nicht möglich bekannte Ellipsenparameter zur Verbesserung der Detektierung zu verwenden.

[CL16] stellt ein Verfahren vor, das auf der geometrischen Distanz basiert. Es bestimmt die Position eines Zylinders innerhalb des Laserscans durch eine Ellipsendetektierung und ist außerdem in der Lage die Orientierung des Zylinders im Laserscan zu bestimmen. Im Gegensatz zu dem Verfahren von [SCH15], werden die Unsicherheiten der Messpunkte nicht berücksichtigt und die Kovarianz der ermittelten Parameter nicht geschätzt.

Da Ellipsen mit kleinen Längenunterschieden zwischen Semi- und Primärachse als Kreis angenähert werden können, sind unter der Annahme eines kleinen Einfallswinkels des Kalibriertargets auch Verfahren zur Detektierung von Kreisen geeignet. Für die Erkennung von Kreisen wurde in [Tam+10] die Constant Distance Methode vorgestellt. Hierbei wird der Mittelpunkt eines Kreises detektiert, indem der Mittelwert der zugehörigen Messpunkte um einen konstanten Wert entlang der Sichtachse des Laserscanners verschoben wird. Das Funktionsprinzip wird in Abbildung 2.13 veranschaulicht. Aufgrund der Einfachheit und geringen Rechenlast findet dieses Verfahren in der mobilen Robotik vor allem zur Detektierung von Landmarken Anwendung.

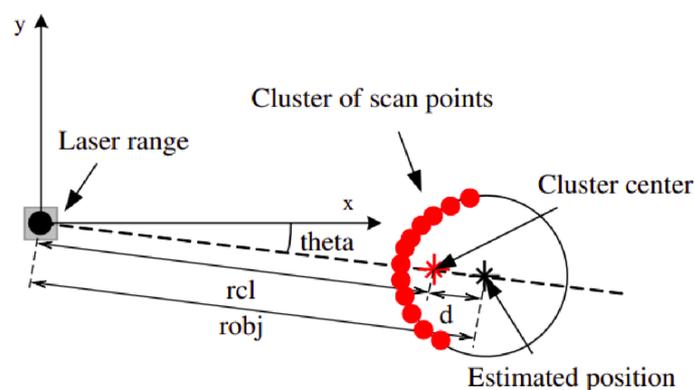


Abbildung 2.13: Constant Distance Methode zur Bestimmung des Mittelpunktes eines Kreises anhand der Messung eines Laserscanners [Tam+10].

2.5 Sensorfehler

Reale Messungen sind stets mit Fehlern behaftet. Diese fehlerbehafteten Messungen der Teilkomponenten wirken sich auf die Genauigkeit einer Kalibrierung aus. Zwar können diese Fehler nicht vermieden werden, allerdings ist es möglich sie zu berücksichtigen. So kann die Genauigkeit der Kalibrierung verbessert oder im Nachhinein quantitativ beurteilt werden. Hierfür ist es erforderlich die entstehenden Sensorfehler zu analysieren, zu modellieren und im Kalibrierprozess mit einzubeziehen [Tha89].

Im Folgenden Kapitel wird das probabilistische Modell vorgestellt, welches genutzt werden kann, um entstehende Sensorfehler zu beschreiben. Die Auswahl dieses Modells für diese Arbeit wird begründet. Schließlich wird insbesondere auf die Fehlerfortpflanzung der Sensorfehler in kinematischen Ketten eingegangen. Abschließend wird heraus gestellt, inwiefern Sensorfehler bei der Kalibrierung im Stand der Forschung Berücksichtigung finden.

2.5.1 Fehlermodelle

Reale Messungen sind aufgrund physikalischer und messtechnischer Einflüsse stets mit einem Fehler behaftet. Der reale Messwert sei durch \hat{x} dargestellt. Die reale Messung führt zu einem Messwert $y(\hat{x})$ und lässt sich durch den formalen Zusammenhang

$$y(\hat{x}) = f(\hat{x}) + e \quad (2.1)$$

beschreiben. Hierbei beschreibt $f(\hat{x})$ die bekannte Relation zwischen realem Wert und dem Messwert. Die Unbekannte e notiert den behafteten Fehler. Eine Modellierung des Messfehlers e führt dazu, ihn berücksichtigen zu können, um die Genauigkeit der Messung zu verbessern oder die Genauigkeit quantitativ beurteilen zu können. Es ist praktisch allerdings nicht möglich ein exaktes Modell des Fehlers e zu erhalten, da die vielen möglichen Fehlerquellen Wissen über sämtliche Einflussmöglichkeiten und Umgebungsbedingungen voraussetzen würden und eine Modellierung praktisch unmöglich machen [TBF05].

Da sich der auftretende Messfehler e im Allgemeinen also nicht präzise bestimmen lässt, kann der reale Wert $y(\hat{x})$ nicht exakt bestimmt werden. Hieraus entsteht die Anforderung an die zugrundeliegenden Fehlermodelle eine möglichst gute Abschätzung des Messfehlers zu liefern. Hierfür sind stets die wichtigsten Fehlerquellen zu berücksichtigen und so exakt wie möglich zu beschreiben [TBF05].

Das probabilistische Fehlermodell liefert eine verbreitete und in der Forschungsgemeinde etablierte Möglichkeit Sensorfehler zu beschreiben. Hierbei liegt die Annahme zu Grunde, dass sich sämtliche Fehler durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung beschreiben lassen, deren Mittelwert dem wahren Wert entspricht. Üblicherweise wird eine kontinuierliche Normalverteilung angenommen, die durch den Mittelwert μ und die Streuung um diesen σ^2 beschrieben werden kann:

$$p(x) = \mathcal{N}(\mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2.2)$$

Diese kann ebenfalls für den multivariaten Fall definiert werden:

$$p(\underline{x}) = \mathcal{N}(\underline{\mu}, \underline{\Sigma}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^p \cdot \det(\underline{\Sigma})}} \cdot e^{-\frac{1}{2} (\underline{x}-\underline{\mu})^T \underline{\Sigma}^{-1} (\underline{x}-\underline{\mu})} \quad (2.3)$$

Hierbei entspricht \underline{x} dem mehrdimensionalen Messwert, $\underline{\mu}$ dem mehrdimensionalen Mittelwert, $\underline{\Sigma}$ der Kovarianzmatrix und p der Dimension der Messwerte.

Die Messfehler eines Sensors resultieren aus einer Vielzahl von Fehlerquellen mit unterschiedli-

chen Fehlerverteilungen. Die Fehler dieser Fehlerquellen summieren sich und ergeben den Gesamtfehler e . Unter der Bedingung, dass die Fehlerverteilungen dieser einzelnen Fehlerquellen unabhängig voneinander sind, nähert sich die Summe mit steigender Anzahl von Fehlerquellen der Normalverteilung. Sofern angenommen werden kann, dass sich der Gesamtfehler aus vielen kleinen Fehlerquellen zusammensetzt ergibt sich für den Gesamtfehler eine Normalverteilung. Dieser Effekt ist als *Zentraler Grenzwertsatz der Statistik* bekannt. [KS16]

Alternativ zu den etablierten probabilistischen Fehlermodellen werden in der Forschungsgemeinschaft auch sogenannte begrenzte Fehlermodelle untersucht. Diese beschreiben den Sensorfehler nicht durch eine probabilistische Verteilung, sondern durch eine abgeschlossene Menge, welche den wahren Messwert mit einschließt. Während bei der probabilistischen Modellierung die durch den Messfehler verursachte Wahrscheinlichkeitsverteilung um den wahren Wert von besonderem Interesse ist, werden bei der begrenzten Modellierung ausschließlich die absoluten Grenzen, in denen sich der wahre Wert befindet (sogenannte Intervalle), betrachtet [Jau+01; RM68; Vog20].

2.5.2 Fehleranalyse des seriellen Manipulators und Fehlermodell des Universal Robot UR5

Das kinematische Modell eines Manipulators beschreibt die Transformationen zwischen der Basis, den einzelnen Gliedern und dem End-Effektor. Diese Transformationen werden durch die strukturellen Eigenschaften des Manipulators als auch der Gelenkstellungen definiert. Sowohl die strukturellen Eigenschaften des Manipulators als auch die Gelenkstellungen können Fehler enthalten [Sta93]. Bezüglich Manipulatoren existieren viele Untersuchungen zu kinematischen Fehlern, ihren Ursachen und der Modellierung. [Mav+97] fasst die Fehlerursachen kinematischer Ketten folgendermaßen zusammen:

Bauteile

Die in einem Manipulator verbauten Komponenten enthalten Fertigungstoleranzen. Diese wirken direkt auf die strukturellen Eigenschaften des Manipulators und erzeugen einen Fehler.

Montierung

Neben den Bauteiltoleranzen können bei der Montage Fehler entstehen, welche ebenfalls die strukturellen Eigenschaften beeinflussen und verfälschen.

Verbiegung

Verbiegungen der Glieder aufgrund der Schwerkraft oder wirkenden äußeren Kräfte führen zu einer Verfälschung des Modells der Manipulator-Struktur und damit zu Fehlern in der Schätzung der Gelenkposen im Raum.

Messung und Regelung

Die Gelenkstellungen werden über entsprechende Sensoren ermittelt oder mit zugrundeliegenden Positionsregelungen gestellt. Hierbei können Messfehler auftreten.

Lagerfehler

In rotatorischen Gelenken können Lagerfehler zu einer elliptischen Rotation der Gelenke führen. Diese führt zu falschen Schätzungen der Bewegung.

Krümmungsfehler

In Schubgelenken können Krümmungsfehler der Schubbahn auftreten. Diese beeinflussen die tatsächliche Position des angetriebenen Gliedes.

Getriebeispiel

Die Getriebe zwischen Antrieb und Glied können Getriebeispiel enthalten und damit die Position verfälschen.

Thermische Effekte

Erhitzung des Manipulators im Dauer-Betrieb oder durch äußere Temperatureinflüsse wirken sich auf die Messungen der Gelenkstellungen und durch Ausdehnung auf die strukturellen Parameter aus.

Der Fehler der Pose des End-Effektors e_{EE} ergibt sich schließlich aus der Fehlerfortpflanzung entlang der seriellen Kette. Ein üblicher Ansatz in der Literatur zur Bestimmung dieser Fehlerfortpflanzung ist die Verwendung der Jacobi Matrix J_E und des identifizierten Fehlervektors e_p [HW96; Sta93]:

$$e_E = \frac{\partial \mathcal{H}_0^N(p)}{\partial p} \cdot e_p = J_E \cdot e_p \quad (2.4)$$

Die homogene Transformationsmatrix $\mathcal{H}_0^N(p)$ beschreibt hierbei die Transformation von der Basis zum Endeffektor. Sie beinhaltet die strukturellen Parameter und Gelenkstellungen des Manipulators als Vektor p . Die unterschiedlichen Konventionen, nach denen die Transformationen bestimmt werden, enthalten verschiedene Parameter. Je nach Konvention können so die Fehler dieser Parameter modelliert und entsprechend berücksichtigt werden. Die Jacobi Matrix entspricht einer partiellen Ableitung erster Ordnung. Auf ihrer Basis kann ein Modell erster Ordnung der Fehlerfortpflanzung entwickelt werden.

In [Wu84] wird dieses Modell basierend auf Denavit und Hartenberg Parametern untersucht. Es enthält aufgrund der Denavit und Hartenberg Konvention den minimalen Satz an Parametern und ist durch die Linearisierung auf kleine Fehler beschränkt. [VW86] erweitert diesen Ansatz auf ein Modell zweiter Ordnung. Dieses ermöglicht die Modellierung von rotatorischen Fehlern größer als 5° . [NGD05] nutzt schließlich ein Fehler-Modell dritter Ordnung zur Kalibrierung, welches die erreichte Genauigkeit des Modells zweiter Ordnung minimal verbessert.

[CC87] ergänzt das kinematische Modell des Manipulators und führt auf diese Art weitere Fehlereinflüsse ein, wie das Getriebeispiel oder eine Verdrehung senkrecht zur Gelenkachse. In [MG93] wird ein Ansatz basierend auf sogenannten speziellen Jacobi Matrizen vorgestellt. Hierbei wird in einem iterativen Verfahren für jeden Denavit und Hartenberg Parameter eine Jacobi Matrix bestimmt und diese schließlich zu einem Modell zusammengeführt.

[ZOD92] untersucht einen Ansatz basierend auf der Fehlermodellierung mittels Screw-Theorie, welche den Vorteil einer kompakten und anschaulichen Darstellung der Fehler ermöglicht. Der Fehler aufgrund von thermischem Drift wird in [Del+06] evaluiert und im Bereich kleiner $80 \mu m$ bemessen.

[Pra14] führt einen Ansatz ein, die identifizierte Kovarianzmatrix der Gelenkfehler Σ_q mittels Jacobi Matrix J_E auf den End-Effektor zu projizieren. Die Kovarianz der Pose des End-Effektors Σ_E ergibt sich so zu:

$$\Sigma_E = J_E \cdot \Sigma_q \cdot J_E^T \quad (2.5)$$

Der in dieser Arbeit verwendete Manipulator (Universal Robot UR5) wurde in [Lia+18] auf seine Fehlereinflüsse untersucht und kalibriert. Das verwendete Model nutzt die Jacobi Matrix, basiert auf MDH-Parametern und geht von mittelwertfreien Normalverteilungen der fehlerbehafteten MDH-Parameter aus. Damit werden ausschließlich Bauteiltoleranzen und mittelwertfreie Messfehler der Gelenkstellungen berücksichtigt. Der translatorische Fehler des Endeffektors wurde ohne Kalibrierung zu 2,00 mm bemessen. Die Kalibrierung hat die Genauigkeit um 57,51% auf einen mittleren Fehler von 0,98 mm verbessert. [Ali17] hat die Standardabweichung der Gelenkwerte zu $0,011^\circ$ identifiziert.

2.5.3 Fehleranalyse des Laserscanner

Es wurde bereits gezeigt, dass sich das Modell eines 2D Laserscanners aufgrund seines Funktionsprinzips darauf reduzieren lässt ein vom rotierenden Laserstrahl getroffenes Objekt als Messpunkt in Polarkoordinaten zu beschreiben. In der Literatur wurden bereits einige Fehler identifiziert und untersucht und sollen im Folgenden aufgelistet und erörtert werden.

Messrauschen der Empfängerelektronik

Für die Funktionsweise des Laserscanners muss der Laserstrahl zunächst von einer Senderelektronik erzeugt werden. Der Laserstrahl wird an einem Objekt reflektiert, über die Empfängerelektronik wieder empfangen und die Signalverschiebung ausgewertet. Von der Empfängerelektronik verursachtes Messrauschen verfälscht hierbei die Messungen [Ada10].

Versatz vor der Aufwärmphase

Es wurde in [YB02] beobachtet, dass Messwerte zu Beginn der Inbetriebnahme eines Laserscanners mit einem Versatz (Drift, Offset) behaftet sind. Dieser Versatz stabilisiert sich jedoch nach einer Aufwärmphase.

Oberflächeneigenschaften der reflektierenden Objekte

In [DK02; Kne+09; LH02; YB02] wurde untersucht inwiefern sich Oberflächeneigenschaften der reflektierenden Objekte auf die Messwerte des Laserscanners auswirken. Es konnte festgestellt werden, dass die Messwerte mit einem Rauschen behaftet sind und der Fehler mit einer Normalverteilung angenähert werden kann. Die Mittelwerte der Messungen variieren nur geringfügig in Abhängigkeit von der Reflektivität, Farbe und Grauwert der Oberfläche. Im wesentlichen wird die Streuung beeinflusst. Einen weiteren Einfluss auf die Genauigkeit hat der Aufttrittswinkel des Laserstrahls auf das Objekt.

Kantenschüsse

Aufgrund des Durchmessers des realen Laserstrahls, kann der Fall auftreten, dass der Laserstrahl zwei Objekte gleichzeitig trifft. Hierbei tritt eine Verschiebung des Mittelwerts der Messung auf [San+11]. Dieser Effekt wird als "Kantenschuss" bezeichnet. [Skr08] konnte feststellen, dass Fehlmessungen dieser Art allerdings vom Abstand der beiden Objekte zueinander abhängen. Ab einem gewissen Abstand tritt dieser Effekt nicht mehr auf. Abbildung 2.14 stellt die Fehlmessung schematisch dar.

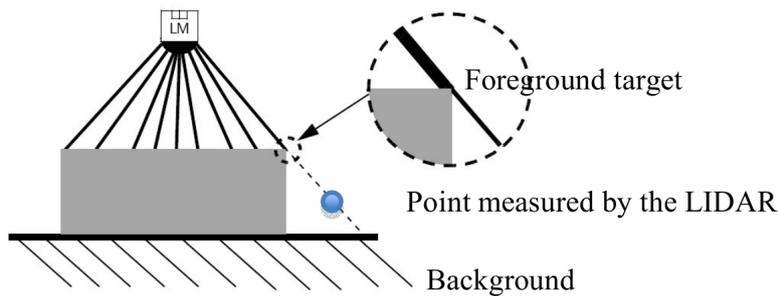


Abbildung 2.14: Schematische Darstellung der Fehlmessung durch einen sogenannten Kantenschuss. [San+11]

2.5.4 Kalibrierung unter Berücksichtigung des Messfehlers

Sofern die Fehler der Messungen identifiziert und modelliert werden, ist es möglich diese Informationen im Kalibriervorgang zu berücksichtigen. Zum einen kann dadurch die Genauigkeit der Kalibrierung verbessert werden. Zum Anderen ist es möglich die erzielte Genauigkeit der Kalibrierung im Nachhinein ohne Referenzkalibrierung zu schätzen.

Ein in der Kalibrierung weit verbreiteter Ansatz ist die sogenannte *Maximum-Likelihood-Methode*. Hierbei wird ein statistisches Modell definiert und in einer Optimierung so angepasst, dass die aufgenommenen Messwerte mit maximaler Wahrscheinlichkeit diesem Modell entsprechen [Swe+97].

Die aufgenommenen Messwerte seien definiert als m_i mit $i \in \{1, \dots, n\}$. Hierbei entspricht i dem Index der jeweiligen Messung und n der Anzahl der Messungen insgesamt. Die zu schätzenden Parameter seien definiert als ϑ . Für den Fall, dass es sich bei den Messungen um unabhängige und identisch verteilte Zufallsvariablen handelt, ist die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion durch die Faktorisierung folgender Verteilung gegeben:

$$p(m_1, \dots, m_n | \vartheta) = \prod_{i=1}^n p(m_i | \vartheta) \quad (2.6)$$

Die Wahrscheinlichkeitsdichte $p(m_1, \dots, m_n | \vartheta)$ beschreibt also die Wahrscheinlichkeit der gesamten Messreihe für die gegebenen Parameter ϑ . Die Likelihood Funktion $L(\vartheta)$ ergibt sich aus der Betrachtung die gesuchten Parameter ϑ als variabel zu interpretieren. Die in 2.6 definierte Wahrscheinlichkeit entspricht der Likelihood:

$$L(\vartheta) = \prod_{i=1}^n p_{\vartheta}(m_i) \quad (2.7)$$

Eine Maximierung der Likelihood Funktion in Abhängigkeit von ϑ führt schließlich zu denjenigen Parametern, welche unter Berücksichtigung der Fehlermodelle die Wahrscheinlichkeit der Messung maximieren. Das Modell wird so angepasst, dass die Messwerte mit maximaler Wahrscheinlichkeit auftreten:

$$\hat{\vartheta} = \arg \max_{\vartheta} L(\vartheta) \quad (2.8)$$

Um die Rechenlast der Optimierung zu verringern, wird üblicherweise die Logarithmus-Funktion auf die Likelihood-Funktion (2.7) angewendet, sodass statt der Multiplikation die Addition genutzt werden kann und folgendes Gütefunktional entsteht:

$$\begin{aligned} \hat{\vartheta} &= \arg \max_{\vartheta} \ln \left(L(\vartheta) \right) = \arg \max_{\vartheta} \ln \left(\prod_{i=1}^n p_{\vartheta}(m_i) \right) \\ &= \arg \max_{\vartheta} \sum_{i=1}^n \ln \left(p_{\vartheta}(m_i) \right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Für den Fall, dass die zugrundeliegenden Dichtefunktionen der einzelnen Messungen als Normalverteilung vorliegen, kann eine weitere Reduzierung der Komplexität des Optimierungsproblems vorgenommen werden. Das Maximum-Likelihood-Problem lässt sich als multivariates, gewichtetes, nicht-lineares Kleinste-Quadrate-Problem formulieren:

$$\arg \min_{\vartheta} \sum_{i=1}^N (\vartheta - m_i)^T \cdot (\Sigma)^{-1} \cdot (\vartheta - m_i). \quad (2.10)$$

Nach der Optimierung des Gütefunktional (2.10) entspricht die Kovarianzmatrix der ermittelten Parameter ϑ der Inversen der Hessischen Matrix. Die Hessische Matrix ist hierbei die zweite Ableitung des Gütefunktional (2.10) im globalen Minimum. In [Tha89] wird allerdings angemerkt, dass mit steigender Komplexität des Modells, mehr Messpunkte erforderlich werden, um eine gute Schätzung zu erhalten. Zu wenig Messpunkte führen zu einem degenerierten Modell und zu fehlerhaften Schätzungen der Unsicherheit.

2.5.5 Kalibrierung von Hokuyo Laserscannern unter Berücksichtigung des Messfehlers

In [FAG15] wird ein Verfahren zur extrinsischen Kalibrierung mehrerer 2D Laserscanner vorgestellt, welches ein probabilistisches Fehlermodell mit zugrundeliegender Normalverteilung nutzt. Hierbei wird eine Ebene in beliebigen Orientierungen von den Laserscannern gemessen

(siehe Abbildung 2.15). Da alle Laserscanner jeweils dieselbe Ebene messen, ergibt sich ein Gleichungssystem, welches die Transformationen zwischen den Laserscannern eindeutig bestimmen lässt.

In [FGA15] wird dieses Verfahren insofern erweitert, dass statt Ebenen Kanten detektiert und zur Kalibrierung genutzt werden (siehe Abbildung 2.16). Der Fehler des Laserscanners wird auch hier als Normalverteilung angenommen.

In [FAG15] und [FGA15] werden die Optimierungsprobleme zunächst wie im vorherigen Kapitel beschrieben als MLE formuliert. Anschließend werden sie zum gewichteten Kleinste-Quadrate-Problem umgeformt. So werden die Fehler der Laserscanner zur Gewichtung der verschiedenen Messungen und zur Verbesserung der Genauigkeit verwendet. Sowohl in [FAG15] als auch in [FGA15] wurden die Laserscanner des Typs Hokuyo UTM-30LX in den realen Experimenten zur Evaluierung der Genauigkeit verwendet und der Fehler mit einer Normalverteilung beschrieben.

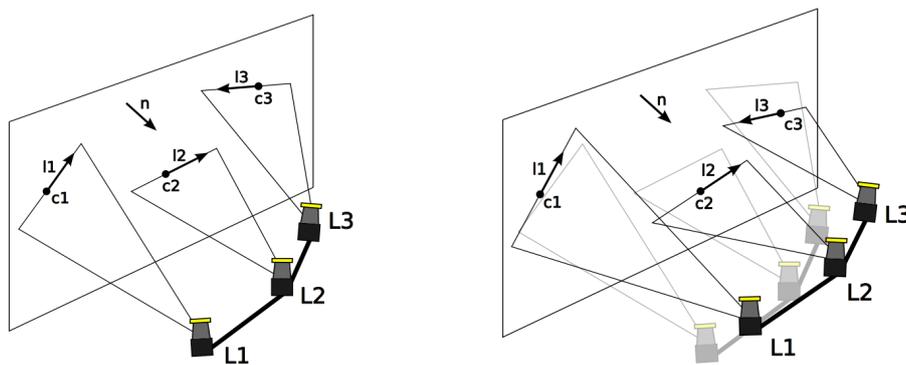


Abbildung 2.15: Kalibrierung mehrerer 2D Laserscanner anhand von Ebenen unter Berücksichtigung des Messfehlers [FGA15].

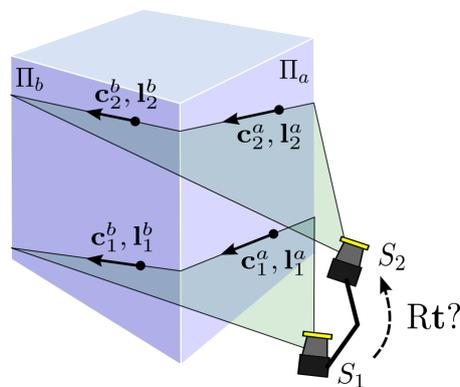


Abbildung 2.16: Kalibrierung zweier 2D Laserscanner anhand von Kanten unter Berücksichtigung des Messfehlers [FAG15]

2.5.6 Wahl des Fehlermodells für diese Arbeit

Da das vorgestellte Kalibrierverfahren insofern erweitert werden soll, dass Messunsicherheiten berücksichtigt werden, ist es erforderlich ein Fehlermodell auszuwählen, das für beide Teilsysteme genutzt werden kann. In diesem Kapitel wird die Wahl des Fehlermodells anhand der bereits vorgestellten Untersuchungen und der verfügbaren Hardware für die realen Experimente begründet.

Der in dieser Arbeit verwendete Laserscanner Hokuyo UST-10LX-H01 stammt vom gleichen Hersteller wie in den Untersuchungen von [FAG15] und [FGA15]. Im vorgestellten Ansatz wird ein zylindrisches Kalibriertarget in unterschiedlichen Orientierungen gemessen und verursacht einen Messfehler. Diese Randbedingungen gleichen den in [FAG15] und [FGA15] gezeigten Verfahren, die Ebenen oder Kanten in beliebigen Orientierungen messen. Daher wird davon ausgegangen, dass der Fehler durch unterschiedliche Auftretswinkel des Laserstrahls im Fehlermodell ausreichend genau berücksichtigt wird. Weiterhin geben Hersteller die Standardverteilung der Messfehler in der Regel in den technischen Spezifikationen an. Diese Angabe könnte für die Kalibrierung verwendet werden, ohne dass das Fehlermodell in der praktischen Anwendung zunächst identifiziert werden muss.

Der in dieser Arbeit verwendete Manipulator (Universal Robot UR5) wurde in [Lia+18] untersucht. Bereits ohne Kalibrierung weist dieser lediglich einen Fehler des Endeffektors von 2,00 mm auf. Es konnte gezeigt werden, dass ein probabilistisches Fehlermodell mit mittelwertfreien Normalverteilungen den Fehler um 57% verbessern kann. [Ali17] gibt die Standardabweichung der Gelenkwerte mit $0,011^\circ$ an.

Aus diesen Gründen wird ein probabilistisches Fehlermodell mit einer zugrundeliegenden mittelwertfreien Normalverteilung für die Beschreibung der Fehler ausgewählt. Damit wird für diese Arbeit die Einschränkung getroffen, dass für den Manipulator ausschließlich mittelwertfreie Messfehler der Gelenkstellungen ohne Getriebeispiel und Bauteiltoleranzen berücksichtigt werden. Das Fehlermodell des Laserscanners berücksichtigt neben Bauteiltoleranzen und Messrauschen zusätzlich die Oberflächeneigenschaften des Kalibriertargets.

2.6 Bezug zur Arbeit

Das grundlegende Funktionsprinzip zur Kalibrierung zwischen Manipulator und 2D Laserscanner wird in Kapitel 2.3 vorgestellt. Für eine hoch präzise Kalibrierung beider Systeme ergibt sich die Möglichkeit ein externes Vermessungssystem wie zum Beispiel ein optisches Trackingsystem zu nutzen. Diese Möglichkeit kann allerdings nur für die initiale Kalibrierung in einer Laborumgebung genutzt werden. Für eine initiale Kalibrierung am Einsatzort und für die Rekalibrierung vor Ort ist sie ungeeignet.

Keines der aktuellen Verfahren ist in der Lage mit dem Manipulator selbst die Systeme 2D Laserscanner und Manipulator zueinander zu kalibrieren. Für die halbautomatisierte Kalibrierung unter Einsatz personeller Ressourcen oder für die automatisierte Kalibrierung zwischen

Manipulator und Laserscanner ist es erforderlich die messbare Bewegung des Manipulators mit den zugehörigen Messungen des Laserscanners in Relation zu setzen. So kann schließlich die Transformation zwischen beiden Systemen bestimmt werden. In der Forschungsgemeinschaft existieren dies bezüglich zwei Ansätze.

Zum einen können zusätzliche Sensoren genutzt werden. Eine am Endeffektor angebrachte Kamera wird mit dem 2D Laserscanner kalibriert und schließlich die bekannte Transformation zwischen Manipulator-Basis und Kamera genutzt, um auf die Transformation zwischen Laserscanner und Manipulator-Basis zu schließen. Dieser Ansatz erfordert allerdings eine am Endeffektor montierte, intrinsisch kalibrierte Kamera und setzt die Transformation zwischen Kamera und Endeffektor als bekannt voraus. Dieses Verfahren kann für die Rekalibrierung demnach nur eingesetzt werden, sofern eine Kamera mitgeführt wird.

Der zweite Ansatz verwendet ein Kalibriertarget, das vom Endeffektor gegriffen wird. Aus mehreren Gründen wird der Ansatz verfolgt ein Kalibriertarget zur Kalibrierung zu verwenden. Die manuelle Kalibrierung lässt sich nicht automatisieren. Zudem ist die Genauigkeit auf die vorhandenen Messmittel begrenzt und von der Transformation der beiden Systeme zueinander abhängig. Funktionsprinzipien unter Zuhilfenahme zusätzlicher Sensoren werden ebenfalls ausgeschlossen, weil die zusätzlich erforderliche Sensorik für viele praktische Anwendungen nicht per se vorhanden ist und für die Kalibrierung angeschafft und angebracht werden müsste. Die gesteckten Randbedingungen dieser Arbeit erfordern deswegen einen Kalibrierprozess ohne zusätzliche Sensoren.

Die Verfahren mit Nutzung eines Kalibriertargets unterscheiden sich im Wesentlichen durch die erforderlichen Geometrien und technischen Ausmaße der Kalibriertargets. Verfahren für die Kalibrierung zwischen Manipulator und 3D Laserscanner können nur bedingt angewendet werden, da der 2D Laserscanner nur einen Querschnitt der Messungen erhält und die Orientierung der Kalibriertargets im Laserscan nicht mit denselben Features und Geometrien bestimmt werden kann. Andersherum können Verfahren für die Kalibrierung zwischen 2D Laserscanner und Manipulator auch für die Kalibrierung zwischen 3D Laserscanner und Manipulator genutzt werden, da planare Schnitte eines 3D Laserscans der Messung eines 2D Laserscanners entsprechen. Für die Kalibrierung eines 2D Laserscanners mit Kalibriertarget wurden bisher zwei Verfahren ([AF07] und [AAR14]) untersucht.

Beide Verfahren nutzen Kalibriertargets komplexer Geometrie. Dies ist methodisch erforderlich, da diese Verfahren die Lage und Orientierung des Kalibriertargets im Laserscan bestimmen müssen, um die Transformationskette zu schließen. Daher ist es notwendig anhand eines Querschnitts der 3-dimensionalen Geometrie die Pose eindeutig zu bestimmen. Die erzielte Genauigkeit der Kalibrierung ist dabei im Wesentlichen davon abhängig, wie genau die Pose des Kalibriertargets anhand des Querschnitts bestimmt werden kann. Um die Pose des komplexen Kalibriertargets zu bestimmen, müssen Merkmale im Laserscan detektiert werden. Die notwendigen Merkmale des Querschnitts werden anhand der bekannten Geometrie des Kalibriertargets in einen geometrischen Zusammenhang zueinander gebracht und so die Pose bestimmt. Da diese Merkmale von einzelnen Messpunkten des Laserscanners abhängig sind,

ist zu vermuten, dass sich der Fehler dieser einzelnen Messpunkte relativ groß auf die erzielte Genauigkeit auswirkt.

Beim vorgestellten Verfahren ist im Gegensatz zum Stand-der-Forschung nicht erforderlich die Orientierung des Kalibriertargets im Laserscan zu bestimmen. Durch die Wahl eines symmetrischen Kalibriertargets kann die Transformationskette anhand der Position der Symmetrie-Achse geschlossen werden.

Weder [AF07] noch [AAR14] nutzen die Möglichkeit ein Optimierungsproblem zu formulieren, sodass Konfigurationsabhängige Messfehler eine große Auswirkung auf die Genauigkeit der Kalibrierung nehmen. Im vorgestellten Ansatz hingegen soll die Transformationskette mittels Optimierung geschlossen werden. Ziel dieser Arbeit ist die Genauigkeit des Verfahrens zu ermitteln und mit dem von [AAR14] vorgestellten Verfahren bezüglich der Genauigkeit zu vergleichen.

Schließlich soll der Ansatz wie in Kapitel 2.5.4 beschrieben insofern erweitert werden, dass Messunsicherheiten durch Formulierung eines gewichteten Optimierungsproblems berücksichtigt werden können.

Für die Kalibrierung zwischen 3D Laserscanner und Manipulator mittels Intensitätsmessung wird in [Pra14] ein Ansatz vorgestellt, welcher die Unsicherheiten der Teilsysteme durch die Formulierung eines gewichteten Optimierungsproblems berücksichtigt. Da der Fehler des End-Effektors allerdings über das Kalibriertarget auf die Laserebene projiziert wird, ist die durch den Manipulator tatsächlich entstehende Unsicherheit abhängig von der Transformation zwischen Laserscanner und Manipulator. Die Projektion des Fehlers auf die Ebene des Laserscanners wird in [Pra14] vernachlässigt, was zu fehlerhaft gewichteten Messposen führen kann und so die Optimierung verschlechtern würde.

Ziel dieser Arbeit ist es den entstehenden Fehler durch den Manipulator zu bestimmen. Hierfür sollen die Messfehler der Gelenkstellungen des Manipulators entlang der kinematischen Kette propagiert und im Gegensatz zum Stand-der-Forschung schließlich auf die aufgespannte Ebene des Laserscanners projiziert werden.

Für die Ermittlung der Symmetrie-Achse des Kalibriertargets ist es erforderlich ein Detektierverfahren für Ellipsen zu nutzen. Aktuelle Verfahren aus dem Bereich der Bildverarbeitung basieren auf der algebraischen Distanz. Diese ist jedoch ungeeignet für die Detektierung von Ellipsen in Laserscans, da bei der algebraischen Distanz die Residuen die verschiedenen Bereiche der Ellipsen ungleich gewichten und bei Ausschnitten von Ellipsen mit hohen Messfehlern zu großen Fehlern in der Detektierung führen können. Eine für Laserscanner geeignete Variante des Stand-der-Forschung, wie sie in [CL16] vorgestellt wird, nutzt daher die geometrische Distanz. Diese weist dieses Problem nicht auf. Das Verfahren von [CL16] berücksichtigt jedoch die Unsicherheit des Laserscanners nicht. Daher ist es nicht möglich die Unsicherheit des detektierten Mittelpunktes zu schätzen, um diese schließlich in der Kalibrierung zu nutzen. Im Laufe der Arbeit sollen die spezifischen Anforderungen an das zu nutzende Detektierverfahren

in Hinblick auf die Kalibrierung definiert werden. Darauf aufbauend soll ein Ansatz ausgewählt beziehungsweise erweitert werden.

Durch die Schätzung der Unsicherheit der Position der Symmetrie-Achse und der Projektion des Manipulator-Fehlers auf die Ebene des Laserscanners werden die Fehler der Teilsysteme erstmals detailliert berücksichtigt. Es soll evaluiert werden, wie der entstehende Gesamtfehler aus den beiden Teilsystemen Laserscanner und Manipulator in einem probabilistischen Fehlermodell abgebildet und berücksichtigt werden kann. Ferner ist zu untersuchen, inwiefern die Berücksichtigung der beiden Fehleranteile die entstehende Genauigkeit verbessert.

Kapitel 3

Detektierung des Kalibriertargets

Für die Kalibrierung zwischen Laserscanner und Manipulator wird in dieser Arbeit der Ansatz gewählt ein zylindrisches Kalibriertarget zu nutzen. Dieses Kalibriertarget muss im Laserscan detektiert werden.

Um die Position des Kalibriertargets zu ermitteln, kann die symmetrische Form des zylinderförmigen Kalibriertargets ausgenutzt werden. So genügt es den Mittelpunkt bzw. die Symmetrie-Achse des Zylinders im Laserscan zu detektieren. Um die Unsicherheit des Laserscanners bei der Kalibrierung berücksichtigen zu können, ist es wiederum erforderlich die Unsicherheit der Detektierung des Kalibriertargets zu schätzen.

Im folgenden Kapitel wird zunächst das für die Kalibrierung erforderliche Modell der Messung des Laserscanners definiert und die ausgewählte Vorverarbeitung der Messdaten beschrieben. Schließlich wird ein Fehlermodell für den Laserscanner definiert. Anschließend wird die Detektierung des zylinderförmigen Kalibriertargets im Laserscan beschrieben. Der resultierende Querschnitt des Kalibriertargets im Laserscan wird modelliert. Zur rudimentären Detektierung des Kalibriertargets in einem frühen Entwicklungsstadium des Kalibrierverfahrens wurde die Constant-Distance-Methode genutzt. Da diese von einem kreisförmigen Querschnitt des Kalibriertargets ausgeht, wird der systematische Fehler durch diese Vereinfachung diskutiert. Schließlich werden die für die Kalibrierung spezifischen Anforderungen bezüglich der Berücksichtigung der Messfehler definiert. Basierend auf diesen Anforderungen wird ein geeignetes Verfahren ausgewählt beziehungsweise weiterentwickelt.

3.1 Datenverarbeitung und Fehlermodell des Laserscanners

Für die Erkennung des Kalibriertargets im Laserscan ist eine Vorverarbeitung der Messdaten notwendig. Außerdem erfordert der gewählte Ansatz ein Fehlermodell des Laserscanners zu definieren, um die Unsicherheiten bei der Kalibrierung berücksichtigen zu können. Folgendes Kapitel beschreibt die Modellierung des Laserscanners und die Filterung der Messdaten. Schließlich wird das Fehlermodell des Laserscanners definiert.

3.1.1 Modellierung des Laserscanners

Wie in Kapitel 2 beschrieben, spannt der Laserscanner über einen rotierenden Laserstrahl eine zwei dimensionale Fläche auf, deren Messpunkte in kartesische Koordinaten $\mathcal{X}(x, y) \in \mathbb{R}^2$ projiziert werden können. Für die Verwendbarkeit von homogenen Koordinatentransformationen wird ein Modell definiert, welches die einzelnen Messpunkte als 4D Vektoren beschreibt. Weiterhin wird das Modell so definiert, dass die Abhängigkeit der Messpunkte von der Konfiguration des Manipulators abgebildet werden kann:

$${}_{i,t}\mathcal{X}_L(q) = \begin{bmatrix} {}_{i,t}x_L(q) & {}_{i,t}y_L(q) & 0 & 1 \end{bmatrix}^T. \quad (3.1)$$

Hierbei entspricht q der zugehörigen Konfiguration des Manipulators, $i \in \mathbb{N} | i \leq N^q$ indiziert den Messpunkt, N^q definiert die Anzahl der Messungen einer vollständigen 270° Messung einer Konfiguration und t bestimmt den Zeitpunkt der Messung.

Die einzelnen Messpunkte ${}_{i,t}\mathcal{X}_L(q)$ werden schließlich zu einer Menge vereinigt, welche einen vollständigen 270° Scan für eine Konfiguration q des Manipulators enthält:

$$\mathcal{X}_L(q) = \bigcup_{i \in N^q} {}_{i,t}\mathcal{X}_L(q) \quad (3.2)$$

Die Teilmenge wiederum, welche sich im Arbeitsbereich des Manipulators befindet und Messpunkte des Kalibriertargets umfasst enthält die Elemente:

$$\mathcal{X}_L^j(q) = \begin{bmatrix} x_L^j(q) & y_L^j(q) & 0 & 1 \end{bmatrix}^T. \quad (3.3)$$

Hierbei indiziert $j \in \mathbb{N} | j \leq J$ die einzelnen Messpunkte des Kalibriertargets und J entspricht der Gesamtzahl der Messpunkte. Der ermittelte Schnittpunkt der Symmetrieachse des Kalibriertargets mit der Ebene des Laserscanners ist definiert als

$$\mathcal{X}_L^I(q) = \begin{bmatrix} x_L^I(q) & y_L^I(q) & 0 & 1 \end{bmatrix}^T. \quad (3.4)$$

Die Messpunkte des Laserscanners und die definierten Mengen werden in Abbildung 3.1 grafisch dargestellt.

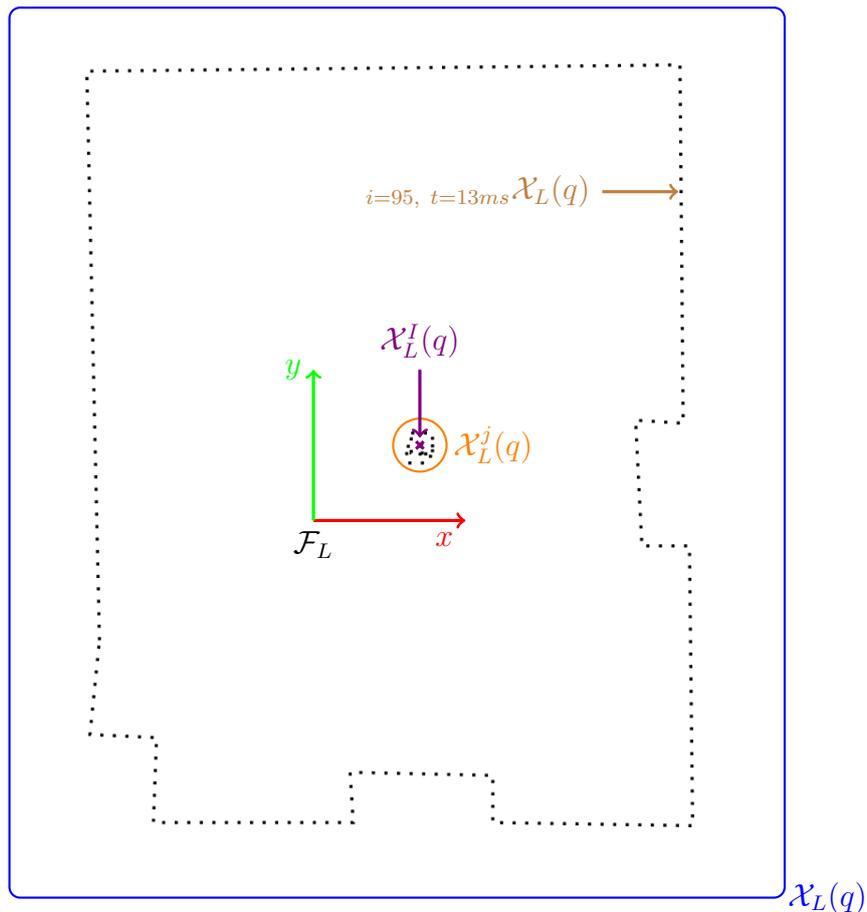


Abbildung 3.1: Messpunkte des Laserscans und deren Modellierung. Einzelne Messpunkt (schwarz), Menge aller Messpunkte (blau umrandet), Menge der Messpunkte des Kalibriertargets (orange umrandet) und geschätzte Symmetrieachse des Kalibriertargets (Violet).

3.1.2 Kantenschuss-Filter

Wie in Kapitel 2 beschrieben, treten aufgrund der Funktionsweise des Laserscanners sogenannte Kantenschüsse auf, welche die Messungen verfälschen. Da für die Detektierung des Kalibriertargets notwendig ist unverfälschte Messpunkte des Querschnitts zu erhalten, müssen diese Kantenschüsse in einer Vorverarbeitung der Messdaten entfernt werden.

Kantenschüsse resultieren daher, dass der reale Laserstrahl einen Durchmesser hat, der größer ist als Null. Weiterhin geben die Hersteller des verwendeten Laserscanners (Hokuyo UST-10LX-H01) an, dass sich der Laserstrahl konisch ausbreitet. Das bedeutet, dass mit steigendem Abstand zum Laserscanner der Durchmesser steigt. Für einen Abstand von 500 mm wird eine Breite von 10 mm angegeben und für einen Abstand von 1000 mm wird eine Breite von 19 mm angegeben. Hieraus ergibt sich ein Winkel von $1,15^\circ$ für die konische Ausbreitung des Laserstrahls.

Da die Winkelabtastung eine Auflösung von $0,125^\circ$ hat, lässt sich Schlussfolgern, dass über eine Anzahl von 9,17 Winkelabtastungen gemittelt wird. Um die Kantenschüsse vollständig

zu entfernen wird daher der Ansatz getroffen die 10 äußersten Messpunkte des Querschnitts zu entfernen.

3.1.3 Definition des Fehlermodells des Laserscanners

Die Auswahl eines geeigneten Fehlermodells wurde bereits in Kapitel 2.5.5 anhand des Stand der Forschung begründet und das probabilistische Fehlermodell mit zugrundeliegender Normalverteilung ausgewählt. Da ein Kantenschuss-Filter verwendet wird und diese Fehlmessungen entfernt werden, ist es nicht erforderlich das Modell bezüglich Kantenschüssen zu erweitern.

Im kartesischen Raum ergibt sich eine Kovarianzmatrix mit einem elliptischen Unsicherheitsbereich. Aufgrund der Funktionsweise des Laserscanners ist die Hauptachse des Unsicherheitsbereichs dabei entlang der radialen oder polaren Achse ausgerichtet. Es wird die Vereinfachung getroffen die Kovarianzmatrix auf die Unsicherheit der Hauptachse des Konfidenzintervalls zu reduzieren. So lässt sich die obere Schranke des Fehlers anhand einer Metrik beschreiben. Daraus ergibt sich die Kovarianzmatrix

$$\Sigma_L = \begin{bmatrix} \sigma_L & 0 \\ 0 & \sigma_L \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

Aufgrund der symmetrischen Charakteristik der Wahrscheinlichkeitsverteilung ist es möglich den Abstand zwischen dem tatsächlichen Punkt und dem gemessenen fehlerhaften Punkt als univariate Wahrscheinlichkeitsverteilung zu beschreiben. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Fehlers eines Messpunktes wird somit beschrieben als:

$$p(\mathcal{E}^L) = \mathcal{N}(\mu_l, \sigma_l). \quad (3.6)$$

Der in dieser Arbeit verwendete Laserscanner Hokuyo UST-10LX-H01 hat einen Abstrahlwinkel des Laserstrahls von $1,15^\circ$ und eine Winkelauflösung von $0,125^\circ$. Daraus resultiert ein Winkelfehler von $\pm 0,6375^\circ$. Über einen Abstand von 1,5 m ergibt sich in kartesischen Koordinaten ein Fehler von $\pm 16,7 \text{ mm}$. Die Standardabweichung entlang der radialen Achse wird zu 30 mm angegeben. In einem Radius von 1,5 m um den Laserscanner kann demnach die obere Schranke des Fehlers mit $\sigma_L = \sigma_r$ beschrieben werden.

3.2 Detektierung des Zylinders im Laserscan

Das vorgestellte Kalibrierverfahren verwendet als Kalibriertarget ein Objekt zylindrischer Form. Im Gegensatz zu state-of-the-art Verfahren ist keine komplexe Geometrie erforderlich, da nicht die Orientierung des Objekts innerhalb des Laser Scans relevant ist, sondern die Position des Kalibriertargets im Laserscan. Um diese Position zu ermitteln, kann die symmetrische Form des Kalibriertargets ausgenutzt werden. So genügt es den Mittelpunkt bzw. die Symmetrie-Achse im Laserscan zu detektieren. Im Folgenden wird der resultierende Querschnitt des Kalibriertargets im Laserscan modelliert und der systematische Fehler durch die Vereinfachung als Kreis und Verwendung der Constant Distance Methode diskutiert. Im Anschluss werden Anforderun-

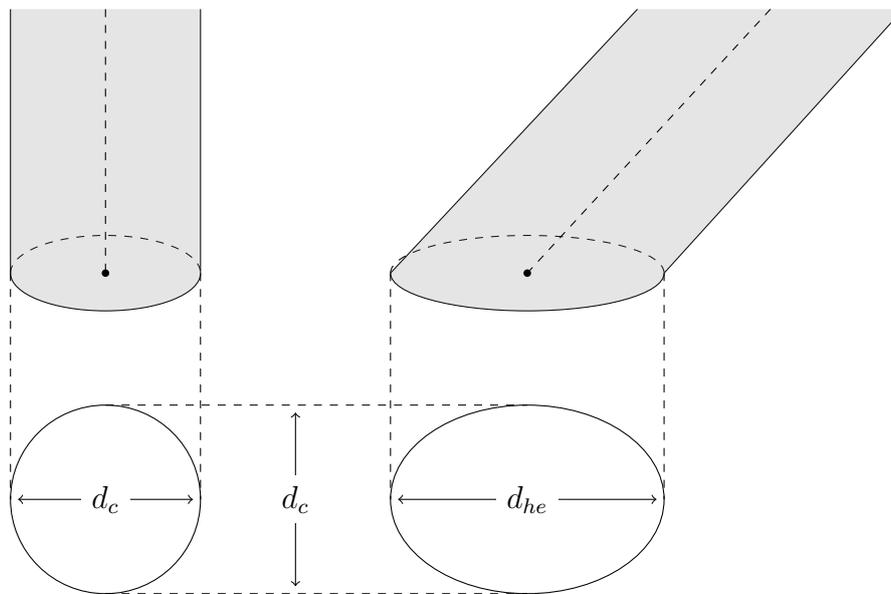


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung des Kalibriertarget-Querschnitts in der 2D Laserebene: senkrechter Eintrittswinkel und verringerter Eintrittswinkel.

gen definiert, welche für die Ellipsendetektierung getroffen werden. Es wird ein entsprechendes Detektierverfahren identifiziert und erweitert.

3.2.1 Modellierung des Querschnitts

Ein Zylinder, der eine zweidimensionale Ebene senkrecht schneidet, ergibt einen Kreis. Mit abnehmendem Eintrittswinkel wird dieser Kreis verzerrt und es entsteht eine elliptische Form mit der sogenannten Haupt- und Nebenachse (siehe Abbildung 3.2). Die Länge der Nebenachse der entstehenden Ellipse entspricht stets dem Durchmesser des Kalibriertargets d_c . Die Länge der Hauptachse d_{he} hingegen ist winkelabhängig und stets größer als d_c . Die Symmetrieachse des Zylinders wird in der vorgestellten Methode genutzt, um die verlängerte Achse des Manipulators oder eine Achse des Manipulators selbst zu detektieren.

3.2.2 Identifikation systematischer Fehler

Sowohl für die Detektierung mit der Constant-Distance-Methode als auch der Detektierung mit Ellipsenfiting-Verfahren ergeben sich systematische Fehler bei der Detektierung des Kalibriertargets. In diesem Kapitel sollen diese identifiziert werden.

Verzerrung des Kreises durch den Eintrittswinkel

Die Constant-Distance Methode, wie in Kapitel 2 vorgestellt, bestimmt den Mittelpunkt eines Kreises anhand der Berechnung des Mittelwertes und der anschließenden Verschiebung um den Korrekturfaktor d_c/π (siehe Abbildung 3.3). Für einen idealen Halbkreis mit unendlich vielen Messpunkten, kann so der Mittelpunkt ohne Fehler bestimmt werden. Handelt es sich jedoch nicht um einen Halbkreis, sondern den Ausschnitt einer Ellipse, führt der Korrekturwert zu einem systematischen Fehler. Für Ellipsen-Detektierungsverfahren werden durch die Verzerrung keine systematischen Fehler verursacht.

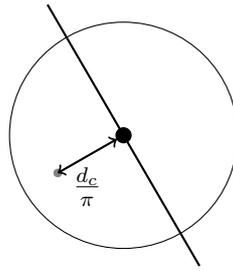


Abbildung 3.3: 2D Querschnitt des zylinderförmigen Kalibriertargets. Eingezeichnet ist der arithmetische Mittelwert eines Halbkreises (grau) und die entsprechende durchmesserabhängige Korrektur zum Mittelpunkt (schwarz).

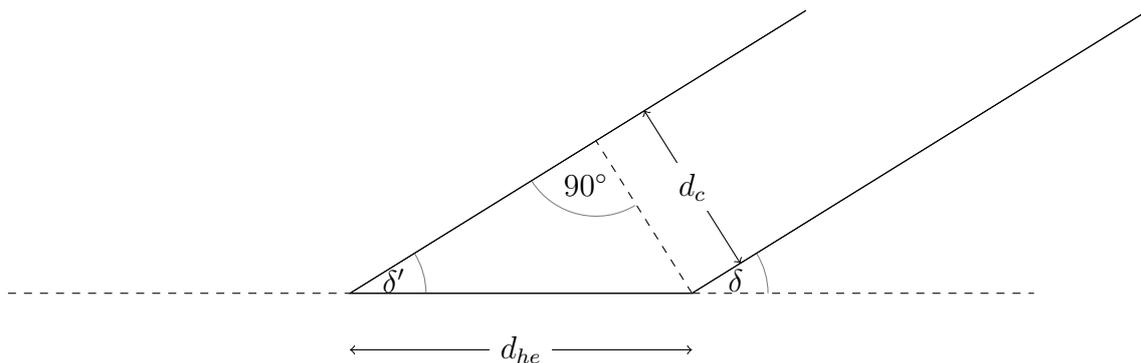


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung des Kalibriertarget-Längsschnitts in der 2D Laserebene mit dem Eintrittswinkel δ .

Der Zusammenhang zwischen der Länge der Hauptachse d_{he} , dem Durchmesser des Kalibriertargets d_c und dem Eintrittswinkel des Kalibriertargets in die Laserebene δ lässt sich analytisch beschreiben. Abbildung 3.4 stellt die Zusammenhänge grafisch dar. Aus dem Sinussatz ergibt sich:

$$\frac{\sin(\delta')}{d_c} = \frac{\sin(90^\circ)}{d_{he}} \quad (3.7)$$

Da für das zylinderförmige Kalibriertarget $\delta = \delta'$ gilt, siehe Abbildung 3.4, führt dies wiederum zu:

$$d_{he} = \frac{\sin(90^\circ)}{\sin(\delta')} \cdot d_c = \frac{d_c}{\sin(\delta)} \quad (3.8)$$

Die relative Zerrung des Kreisdurchmessers in Abhängigkeit zum Eintrittswinkel ergibt sich zu:

$$\frac{d_{he}}{d_c} = \frac{1}{\sin(\delta)} \quad (3.9)$$

Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 3.5 grafisch dargestellt.

Der Gleichung 3.8 ist zu entnehmen, dass die Länge der Semi-Achse proportional ist zum Durchmesser des Targets. Daraus ergibt sich die Konsequenz, dass der absolute Fehler durch die Verzerrung des Querschnitts mit steigendem Durchmesser proportional zunimmt. Ebenfalls ist erkennbar, dass die Verzerrung mit abflachendem Eintrittswinkel steigt.

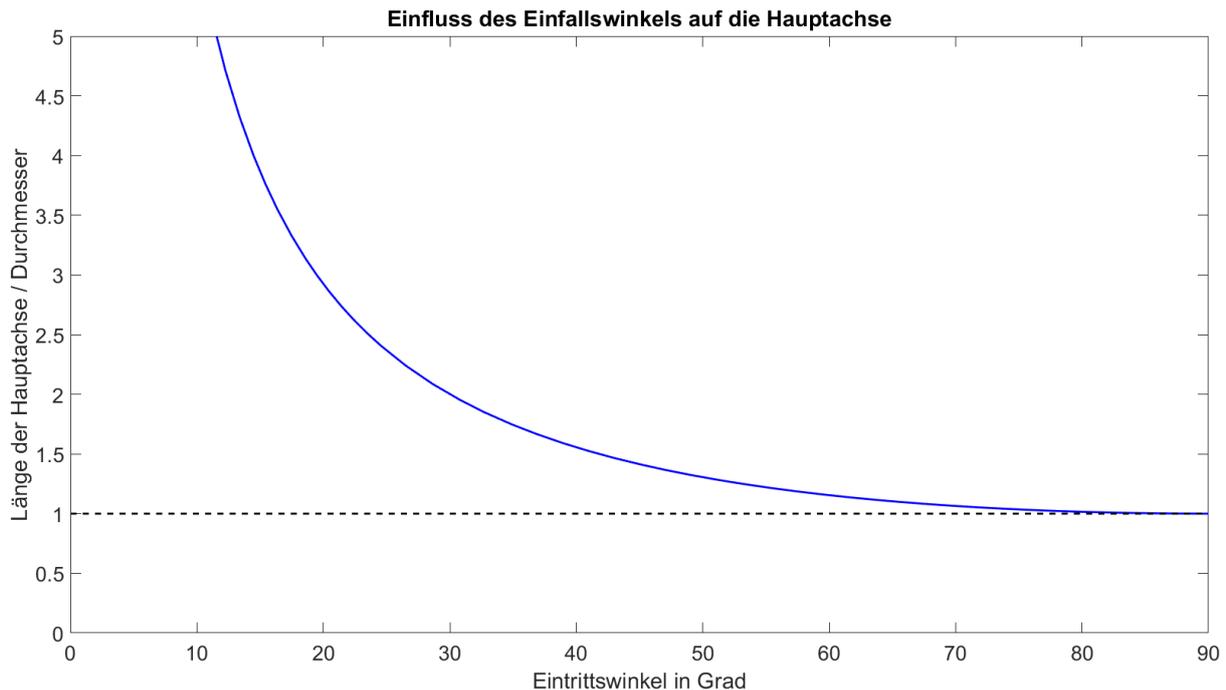


Abbildung 3.5: Funktionaler Zusammenhang zwischen der Länge der Hauptachse und dem Durchmesser in Abhängigkeit vom Eintrittswinkel

Der Querschnitt des zylinderförmigen Kalibriertargets im Laserscan kann als Ellipse modelliert werden. Der Mittelpunkt der Ellipse entspricht der Symmetrieachse des Kalibriertargets. Eine Vereinfachung auf das Modell eines Kreises, wie sie für die Constant-Distance-Methode erforderlich ist führt durch die genannte Verzerrung zu dem beschriebenen systematischen Fehler.

Um den Fehler der Mittelpunkt-detektierung gering zu halten, kann ein Kalibriertarget mit geringem Durchmesser und eine Kalibriertrajektorie mit flachem Eintrittswinkel gewählt werden. Der Einfluss dieses Fehlers soll im Experimentaltail untersucht werden.

Anzahl der Messpunkte

Mit steigendem Abstand zum Laserscanner verringert sich die Anzahl der Messpunkte. Dies wirkt sich auf die Detektierung mit der Constant-Distance-Methode aus, da der Korrekturfaktor von kontinuierlichen Messpunkten entlang des Kreisbogens ausgeht. Weiterhin kann sie einen systematischen Fehler bei der Verwendung von Optimierungsverfahren erzeugen, da bei zu wenig Messpunkten das Modell degeneriert wird [Tha89] (siehe Kapitel 2.5.4). Der Einfluss dieses Fehlers soll im Experimentaltail untersucht werden.

Kantenschussfilter

Sogenannte Kantenschüsse erzeugen Messpunkte, die keine real existierende Oberfläche abbilden. Sie befinden sich an den Randbereichen des Querschnitts des Kalibriertargets und erzeugen Messungen, die scheinbar die Hauptachse der Ellipse vergrößern. Die Filterung von Kantenschüssen führt dazu, dass zwar fehlerhafte Messpunkte entfernt werden, allerdings wer-

den auch die Randbereiche des Querschnitts entfernt. Dadurch wird ein kleinerer Ausschnitt der resultierenden Ellipse sichtbar.

Die Entfernung von Kantenschüssen wirkt sich auf die Constant Distance Methode aus, da die Reduzierung des Teilausschnitts nicht in der Mittelwertbildung berücksichtigt wird. Inwiefern sich Kantenschüsse auf die Detektierung mit Ellipsen-Detektierungsverfahren auswirkt soll im Experimentalteil untersucht werden. Es ist zu vermuten, dass die Verringerung des Ausschnitts die Detektiergenauigkeit verschlechtert.

3.2.3 Ellipsenfitting zur Detektierung des Kalibriertargets

Der im Laserscan resultierende Querschnitt des Kalibriertargets ergibt eine Ellipse mit einer Hauptachse der Länge d_{he} , einer Nebenachse mit der Länge des Kalibriertarget-Durchmessers d_c und einem Mittelpunkt, welcher der Position der Symmetrieachse entspricht (siehe Abbildung 3.2). Um die Position des Kalibriertargets im Laserscan zu ermitteln ist es demnach erforderlich die Symmetrieachse des Kalibriertargets beziehungsweise den Mittelpunkt der Ellipse zu detektieren.

Eine Vereinfachung der Problemstellung durch die Erkennung eines Kreises mit dem Durchmesser des Kalibriertargets kommt für eine Kalibrierung mit gesteigerten Anforderungen an die Genauigkeit nicht in Frage. Es ist in Abbildung 3.5 zu erkennen, dass die entstehende Verzerrung des Kreises mit flacherem Eintrittswinkel deutlich zunimmt. Bereits ein Eintrittswinkel von 60° erzeugt nach Gleichung 3.9 eine Verzerrung von 15,5 %. Außerdem wurden weitere systematische Fehler bei der Nutzung der Constant-Distance-Methode durch die Anzahl der Messpunkte und den Kantenschussfilter identifiziert. Deswegen wird für eine höhere Genauigkeit der Kalibrierung ein Verfahren zur Erkennung von Ellipsen ausgewählt und erweitert.

Um ein Verfahren auszuwählen und zielgerichtet erweitern zu können, werden folgende Anforderungen an die Ellipsenerkennung definiert und begründet:

- Aufgrund der Funktionsweise des Laserscanners kann nicht die vollständige Ellipse sondern nur ein Teil der Ellipse aufgenommen werden. Das Verfahren muss die Ellipse anhand eines Bogenabschnitts unter 180° schätzen können.
- Das Kalibrierverfahren muss die Ungenauigkeit des detektierten Mittelpunktes der Ellipse schätzen können.
- Deswegen muss es außerdem die modellierte Ungenauigkeit der Messpunkte berücksichtigen können.
- Die Länge der Semi-Achse der Ellipse ist bekannt und soll zur Verbesserung der Genauigkeit berücksichtigt werden können.

Zwar erfüllt das von [SCH15] vorgestellte Verfahren die Anforderungen bezüglich der Unsicherheiten, jedoch basiert es auf der Repräsentation der Ellipse in der algebraischen Form. Deswegen können bekannte geometrische Parameter nicht berücksichtigt werden. Für gegebene Teilausschnitte von Ellipsen, wie sie bei Laserscans entstehen, werden daher schlechte

Ergebnisse erwartet und dieses Verfahren soll nicht ausgewählt werden. Diese Hypothesen sollen im Experimententeil der vorliegenden Arbeit geprüft werden.

Das von [CL16] vorgestellte Verfahren basiert auf der geometrischen Repräsentation der Ellipse. Damit lassen sich geometrische Parameter berücksichtigen und können die Schätzung des Mittelpunkts verbessern. Darüber hinaus ist dieses Verfahren in der Lage die Orientierung des Kalibriertargets zu bestimmen. Für den Fall, dass die Bestimmung der Position für eine Kalibrierung nicht ausreichend ist, könnte der Ansatz weiterverfolgt werden, die Orientierung ebenfalls zu berücksichtigen. Da das von [CL16] vorgestellte Verfahren Unsicherheiten nicht miteinbezieht, soll das Verfahren ausgewählt und im Folgenden dahingehend erweitert werden.

Abbildung 3.6 stellt den realen Laserscan des Kalibriertargets schematisch dar. Die einzelnen Messpunkte x_L^j und y_L^j enthalten einen Messfehler, welcher im Allgemeinen mit der Kovarianzmatrix Σ_L beschrieben wird. Wie in Kapitel 3.1.3 begründet wird der vom Laserscanner auftretende Messfehler als Fehler entlang der radialen Achse mit σ_L beschrieben. Die geschätzte Ellipse wird nach [CL16] mit den Parametern θ , d_{he} , d_c , x_L^I und y_L^I beschrieben. Hierbei entspricht θ dem sogenannten Drehwinkel der Ellipse, d_{he} der Länge der Hauptachse, d_c der Länge der Nebenachse und $[x_L^j, y_L^j]$ dem Mittelpunkt.

Der euklidische Abstand zwischen realer Messung und Ellipse r_j ergibt sich nach [CL16] zu

$$r_j = \left| \sqrt{A} - \sqrt{\frac{A}{B} \cdot \frac{(d_{he}/2)^2 (d_c/2)^2}{(d_{he}/2)^2 C + (d_c/2)^2 D}} \right|,$$

$$\begin{aligned} A &= \left(x_L^j - x_L^I \right)^2 + \left(y_L^j - y_L^I \right)^2, \\ B &= \left(x_L^j - x_L^I \right)^2, \\ C &= \left(\frac{y_L^j - y_L^I}{x_L^j - x_L^I} \sin(\theta) + \cos(\theta) \right)^2, \\ D &= \left(\sin(\theta) - \frac{y_L^j - y_L^I}{x_L^j - x_L^I} \cos(\theta) \right)^2. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Das Verfahren von [CL16] wird erweitert, um die Messunsicherheit des Laserscanners berücksichtigen zu können. Dieses wird im Folgenden vorgestellt. Um die Unsicherheiten berücksichtigen zu können wird das Problem zunächst als Maximum Likelihood Schätzung formuliert:

$$\arg \max_{x_L^I(q), y_L^I(q), a, \theta} \ln \prod_{j \in N(q)} p\left(\mathcal{X}_L^j(q) | r_j\right) \quad (3.11)$$

So lässt sich das Fehlermodell des Laserscanners mit einbeziehen. Da die in Kapitel 3.1.3 bestimmte Fehlerverteilung gleichermaßen auf die x- und y-Achse verteilt ist, lässt sich die

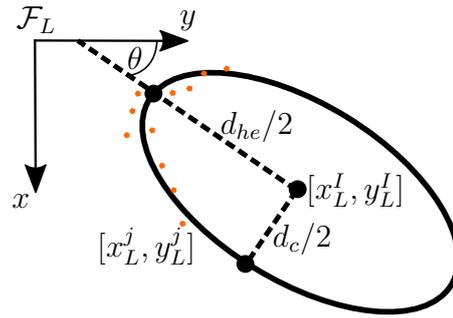


Abbildung 3.6: Laserscan des Kalibriertargets (orangene Punkte) und des idealen elliptischen Querschnitts. Einzelne Messung $[x_L^j, y_L^j]$, resultierende Ellipse mit der Nebenachse a , der Hauptachse b , der Rotation θ und dem Mittelpunkt $[x_L^I, y_L^I]$. In Anlehnung an [CL16].

Verteilung des Residuums r_j als univariate Normalverteilung mit der Standardabweichung σ_L beschreiben:

$$p\left(\mathcal{X}_L^j(q) | r_j\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_L} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{r_j}{\sigma_L}\right)^2} \quad (3.12)$$

Da die Wahrscheinlichkeitsverteilung um einen Messpunkt des Laserscanners außerdem als konstant und unabhängig vom gesuchten Modell angenommen werden kann, lässt sich die formulierte Maximum Likelihood Schätzung zu einem gewichteten nicht-linearen Least-Squares Problem vereinfachen. Dies führt zu:

$$\arg \min_{x_L^I(q), y_L^I(q), a, \theta} \sum_{j \in N(q)} \frac{1}{\sigma_L^2} \cdot r_j^2 \quad (3.13)$$

Da der Radius des Kalibriertargets bekannt ist, kann dieser in der Minimierung für d_c vorgegeben werden. Die Kovarianz Matrix der ermittelten Ellipse $\Sigma_E(q)$ ergibt sich schließlich, wie in Kapitel 2.5.4 beschrieben, aus der Inversen der Hessischen Matrix des Gütefunktional. Diese Kovarianzmatrix enthält die quadrierten Standardabweichungen aller Ellipsenparameter $x_L^I, y_L^I, d_{he}, \theta$.

Schließlich lässt sich die gesuchte Kovarianzmatrix $\Sigma_{CT}(q)$ als entsprechende Untermatrix von $\Sigma_E(q)$ ablesen und ergibt:

$$\Sigma_{CT}(q) = \begin{bmatrix} \sigma_{x_L^I x_L^I} & \sigma_{x_L^I y_L^I} \\ \sigma_{y_L^I x_L^I} & \sigma_{y_L^I y_L^I} \end{bmatrix}. \quad (3.14)$$

Da der zugrundeliegende Messfehler des Laserscanners auf die Fehlerverteilung entlang des radialen Abstandes reduziert wurde, ist im Experimentaltel zu untersuchen mit welcher Genauigkeit sich die Standardabweichung schätzen lässt. Die Wahrscheinlichkeits-Dichtefunktion

des Fehlers der ermittelten Position der Symmetrie-Achse lässt sich schließlich als folgende multivariate Normalverteilung beschreiben:

$$p(\mathcal{E}^{CT}) = \mathcal{N}(0, \Sigma_{CT}). \quad (3.15)$$

Als Startwert für die Optimierung wird der Mittelwert der Messpunkte ausgewählt:

$$\begin{bmatrix} x_{init} \\ y_{init} \end{bmatrix} = \overline{\mathcal{X}_L^j} \quad (3.16)$$

Die Parametergrenzen werden gesetzt zu:

$$\begin{aligned} x_{init} - 2d_C &\leq x_L^I \leq x_{init} + 2d_C \\ y_{init} - 2d_C &\leq y_L^I \leq y_{init} + 2d_C \\ d_c &\leq d_{he} \leq 2d_C \\ -2\pi &\leq \theta \leq 2\pi \end{aligned} \quad (3.17)$$

Aufgrund von lokalen Minima wird das globale Minimum zunächst mit einem Partikelschwarmoptimierer grob identifiziert. Die erhaltene Lösung wird schließlich als Startwert für einen Levenberg-Marquardt Optimierer genutzt, der im globalen Minimum konvergiert. Messposen, die als Ergebnis der Parameter die Parametergrenzen enthalten, sowie Lösungen, die vom Laserscanner aus gesehen vor den Messpunkten liegen, werden als unplausibel klassifiziert, entfernt und für die Kalibrierung nicht weiter berücksichtigt.

3.3 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Kalibrierung zwischen Manipulator und Laserscanner anhand eines zylindrischen Kalibriertargets untersucht. Zu diesem Zweck wurde im letzten Kapitel die Vorverarbeitung des Laserscanners vorgestellt und ein Fehlermodell für den Laserscanner begründet und definiert. Um mit einem einfachen Detektierungsverfahren die Funktionalität des Kalibrierverfahrens prüfen zu können, wurde die Constant-Distance-Methode genutzt. Der dadurch resultierende systematische Fehler wurde diskutiert. Schließlich wurden für die spezifische Problemstellung der Kalibrierung zwischen Laserscanner und Manipulator Anforderungen definiert und ein geeignetes Verfahren ausgewählt und erweitert.

Der Querschnitt des zylindrischen Kalibriertargets im Laserscan kann ohne systematischen Fehler als Ellipse modelliert werden. Die geometrischen Parameter der Ellipse enthalten die Position des Mittelpunkts, welcher den Querschnitt der Symmetrieachse des realen 3-dimensionalen Kalibriertargets darstellt. Das von [CL16] vorgestellte Verfahren wurde für die Detektierung ausgewählt und dahingehend erweitert, dass Unsicherheiten der Messpunkte berücksichtigt werden. Es ist im Laufe der Arbeit zu untersuchen, mit welcher Genauigkeit sich die Standardabweichung des detektierten Mittelpunktes schätzen lässt. Weiterhin soll untersucht werden, inwiefern die Berücksichtigung des bekannten Durchmessers die Detektierung des Kalibriertargets verbessert.

Das definierte Fehlermodell des Laserscanners besteht aus einer Standardverteilung, das für jeden Messpunkt denselben Fehler annimmt. Dadurch ergibt sich der praktische Vorteil die von den Herstellern bereitgestellte Unsicherheit berücksichtigen zu können ohne diese in vorangehenden Experimenten ermitteln zu müssen. Ein weiterer Vorteil ist die Anwendbarkeit vereinfachter probabilistischer Verfahren, welche von mittelwertfreien Normalverteilungen ausgehen. Ein zu nennender Nachteil ist, dass von der Normalverteilung abweichende Fehlerverteilungen den so definierten Messfehler nicht beschreiben.

Kapitel 4

Kalibrierung ohne Berücksichtigung der Messfehler

Die extrinsische Kalibrierung zwischen Manipulator und Laserscanner bestimmt die Transformation zwischen diesen. Das vorgestellte Verfahren reiht sich in diejenigen ein, welche ein Kalibriertarget verwenden und keine zusätzliche Sensorik benötigen. Zur Kalibrierung mittels Kalibriertarget muss die Bewegung des Manipulators in einen geometrischen Bezug zu den korrespondierenden Lasermessungen gesetzt werden. Das Kalibriertarget wird dazu am Endeffektor des Manipulators befestigt und der Querschnitt des Kalibriertargets im Laserscan in unterschiedlichen Konfigurationen gemessen. Für den Fall, dass der Manipulator selbst aus zylindrischen Gliedern besteht, ist kein Kalibriertarget erforderlich.

Das entwickelte Verfahren grenzt sich methodisch insofern von anderen Kalibrierverfahren mit Kalibriertarget ab, dass nicht die Orientierung des Kalibriertargets im Laserscan, sondern lediglich seine Position von Bedeutung ist. Dies soll ermöglicht werden, indem mehr Konfigurationen zur Kalibrierung genutzt werden und sich so eine eindeutige Lösung ergibt. Statt die Orientierung des Kalibriertargets zu bestimmen und mit wenigen Messungen die Transformation zwischen Laserscanner und Manipulator zu ermitteln, wird die Position einer Manipulator-Achse oder verlängerter Manipulator-Achse genutzt und die Transformation mit vielen Messungen bestimmt.

Das folgende Kapitel stellt das Funktionsprinzip vor, wobei Unsicherheiten der Beteiligten Komponenten zunächst unberücksichtigt bleiben.

4.1 Transformationskettenschluss mittels verlängerter Achse des Manipulators

Um die Transformation zwischen Laserscanner und Manipulator zu bestimmen, wird ein zylindrisches Kalibriertarget am Endeffektor des Manipulators befestigt und so die Achse des Manipulators verlängert. In unterschiedlichen Konfigurationen wird der Querschnitt des Zylinders gemessen, die Position der Symmetrieachse bestimmt und über eine Transformationskette

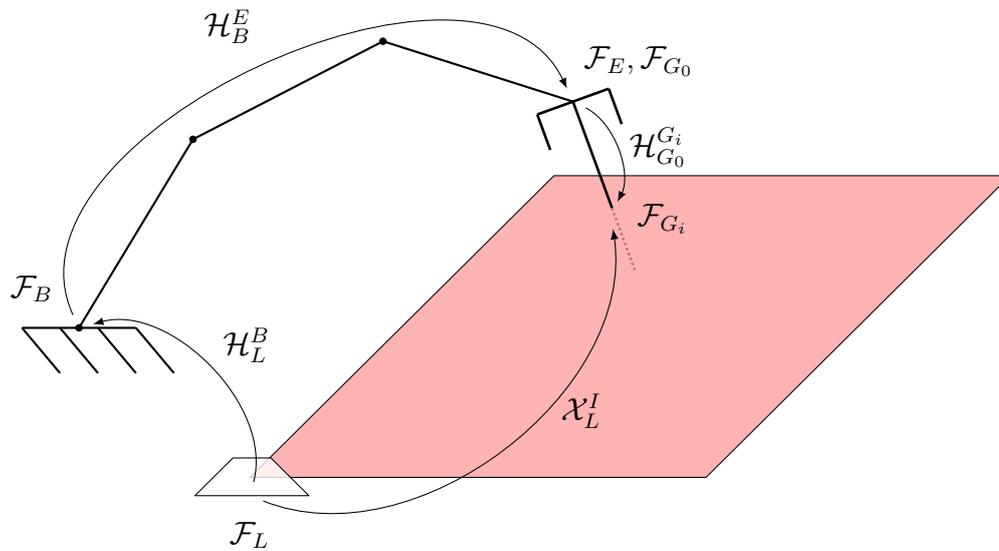


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung des Kalibrier-Settings, Koordinatensysteme und Transformationskette zwischen Laserscanner, Endeffektor und Kalibriertarget. Das Kalibriertarget wird in Form seiner Symmetrieachse dargestellt.

mit der Konfiguration in Bezug gesetzt. Folgendes Kapitel beinhaltet die Modellierung der Problemstellung und die Lösung mittels Optimierung.

4.1.1 Das Funktionsprinzip

Abbildung 4.1 stellt das Setting des Kalibrierverfahrens schematisch dar. Am Endeffektor eines Manipulators ist das zylindrische Kalibriertarget angebracht. Die Symmetrieachse des Kalibriertargets verlängert die z-Achse des Endeffektors. Der Laserscanner spannt eine 2-dimensionale Ebene auf. Die Konfiguration des Manipulators wird so gewählt, dass das Kalibriertarget vom Laserscanner erfasst werden kann. Da die Symmetrieachse des Kalibriertargets die Laserebene in einem Punkt schneidet, ergibt sich eine geschlossene Transformationskette zwischen Laserscanner, Manipulator und Kalibriertarget.

Die gesuchten Parameter der Transformation zwischen Laserscanner und Manipulatorbasis werden in einem Optimierungsverfahren ermittelt. Hierfür wird der Fehler der geschlossenen Transformationskette minimiert.

4.1.2 Modellierung der Transformationskette

Das in Abbildung 4.1 dargestellte Setting zeigt die Koordinatensysteme und Transformationen zwischen den einzelnen Komponenten. Das Kalibrierverfahren zielt darauf ab die statische

Transformation $T_{\Psi}^{B:L}$ vom Koordinatensystem des 2D Laserscanners \mathcal{F}_L zum Koordinatensystem der Manipulatorbasis \mathcal{F}_B zu bestimmen. Hierbei beschreibt

$$\Psi = [\varphi, \vartheta, \psi, t_x, t_y, t_z] \quad (4.1)$$

den gesuchten 6D Vektor, der die Rotation in XYZ-Euler Konvention und die Translation beschreibt. Diese Transformation wird wiederum als homogene Transformationsmatrix $\mathcal{H}_L^B(\Psi)$ ausgedrückt, um die mathematischen Operationen für die Koordinatentransformationen zwischen den Koordinatensystemen zu ermöglichen (siehe Kapitel 2).

Die Konfiguration des Manipulators ist definiert als $q \in Q$, wobei Q die Menge aller Konfigurationen eines Kalibriervorgangs beinhaltet. Die Kinematik des seriellen Manipulators wird als eine Transformation von der Manipulatorbasis \mathcal{F}_B zum Tool Center Point (TCP) \mathcal{F}_E zusammengefasst. Sie ist festgelegt durch die Konfiguration q und wird als homogene Transformationsmatrix $\mathcal{H}_B^E(q)$ beschrieben. Die Z-Achse des TCP zeigt dabei konventionell in Greif-Richtung.

Die Geometrie des zylindrischen Kalibriertargets wird auf die Symmetrieachse mit der Länge h reduziert. Dies wird in Abbildung 4.2 veranschaulicht. Der Schnittpunkt zwischen Sym-

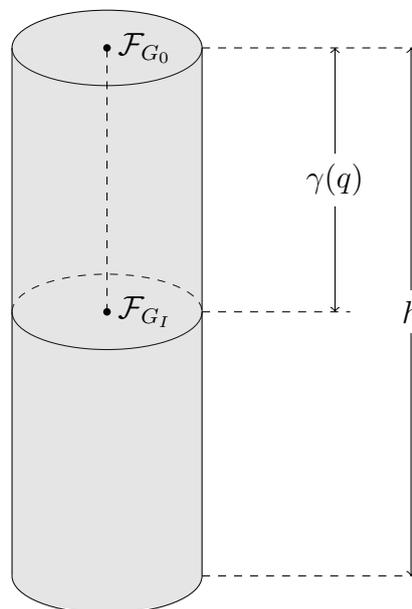


Abbildung 4.2: Zylinderförmiges Kalibriertarget, Ursprungspunkte der dazugehörigen Koordinatensysteme und Schnittpunkt mit der Ebene des Laserscanners entlang der Symmetrieachse.

metrieachse des Kalibriertargets und Laserscan kann als homogene Transformationsmatrix be-

geschrieben werden. Da dieser abhängig ist von der Konfiguration des Manipulators q und der gesuchten Transformation $\mathcal{H}_L^B(\Psi)$ ergibt sich:

$$\mathcal{H}_{G_0}^{G_i}(\gamma, q, \Psi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \gamma(q, \Psi) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Hierbei gilt $\gamma \in [0, h]$. Die Transformation zwischen TCP und Ursprungskordinatensystem des Kalibriertargets wird als $\mathcal{H}_E^{G_0}$ definiert.

Der Schnittpunkt zwischen Laserebene und Symmetrieachse des Kalibriertargets bezogen auf das Koordinatensystem des Laserscanners kann ebenfalls als 4D Vektor dargestellt werden. So wird die Verwendung mit homogenen Koordinatentransformationen ermöglicht. Jede Konfiguration q führt zu einem Schnittpunkt, wobei verschiedene Konfigurationen auch zu demselben Schnittpunkt führen können. Der Schnittpunkt wird als

$$\mathcal{X}_L^I(q) = [x_L^I(q) \quad y_L^I(q) \quad 0 \quad 1]^T \quad (4.2)$$

formuliert.

Sobald das Kalibriertarget die aufgespannte Ebene des Laserscanners schneidet, wird eine geschlossene Transformationskette erzeugt. Da jede Konfiguration q des Manipulators zu einem Schnittpunkt $\mathcal{X}_L^I(q)$ zwischen der Ebene des Laserscanners und dem Kalibriertarget führt, wird die geschlossene Transformationskette als zeitunabhängige Funktion der Konfiguration definiert:

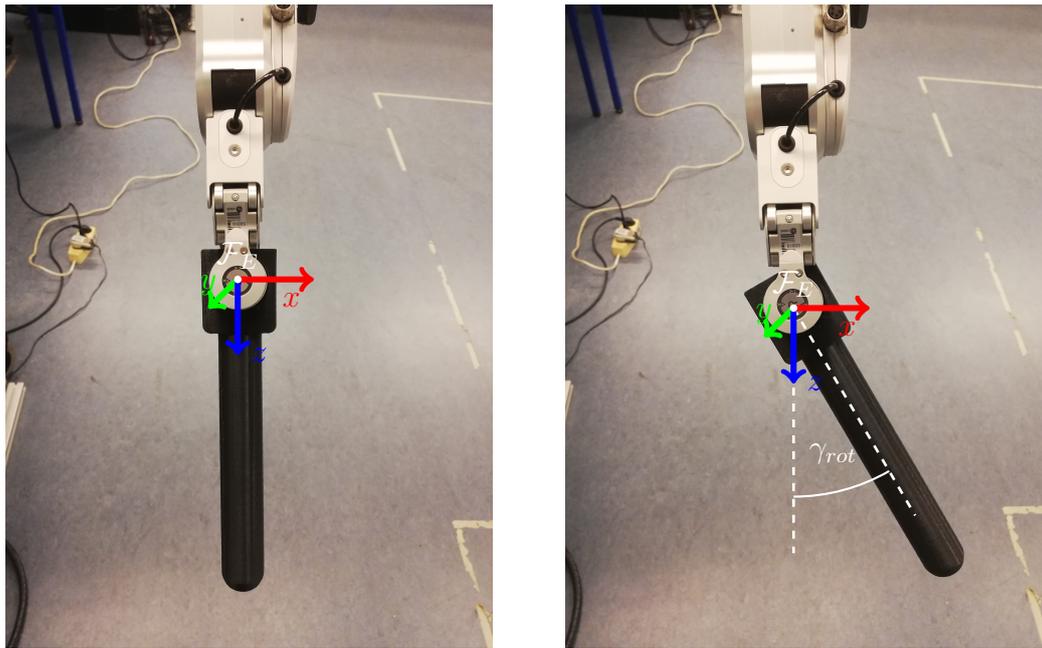
$$\mathcal{X}_L^I(q) = \underbrace{\mathcal{H}_L^B(\Psi) \cdot \mathcal{H}_B^E \cdot \mathcal{H}_E^{G_0} \cdot \mathcal{H}_{G_0}^{G_i}(q, \gamma)}_{\mathcal{X}_B^I(q, \gamma)} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

Somit beschreibt $\mathcal{X}_B^I(q, \gamma)$ den Schnittpunkt zwischen Laserebene und Kalibriertarget aus Perspektive des Koordinatensystems der Manipulatorbasis \mathcal{F}_B . Folgende Gleichung fasst (4.3) zusammen:

$$\mathcal{X}_L^I(q) = \mathcal{H}_L^B(\Psi) \cdot \mathcal{X}_B^I(q, \gamma) \quad (4.4)$$

4.1.3 Verdrehung des Kalibriertargets

Die homogene Matrix $\mathcal{H}_E^{G_0}$ beschreibt die Transformation zwischen dem Tool Center Point (TCP) und dem Kalibriertarget. Da lediglich die Richtung der Symmetrieachse von Bedeutung ist, ergibt sich in üblichen Greifern eine Transformation, welche durch eine Drehung um die y-Achse γ_{rot} beschrieben werden kann. Dies ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Die homogene Transformation ist unabhängig von der Konfiguration des Manipulators, da die Annahme ge-



(a) Gerade gegriffen

(b) Verdreht gegriffen

Abbildung 4.3: Vom Endeffektor gegriffenes Kalibriertarget und Koordinatensystem des TCP \mathcal{F}_E . Es ist zu sehen, dass die Rotation lediglich um die y-Achse mit dem Winkel γ_{rot} stattfinden kann.

troffen werden kann, dass sie während des Kalibriervorgangs unverändert bleibt. So ergibt sich die homogene Transformationsmatrix zu:

$$\mathcal{H}_E^{G_0}(\gamma_{rot}) = \begin{bmatrix} \cos(\gamma_{rot}) & 0 & \sin(\gamma_{rot}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\gamma_{rot}) & 0 & \cos(\gamma_{rot}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Für den Fall, dass das Kalibriertarget so gegriffen wird, dass die z-Achse des TCP verlängert wird, ergibt sich die 4 dimensionale Einheitsmatrix:

$$\mathcal{H}_E^{G_0}(\gamma_{rot} = 0) = \mathbb{1}^{4 \times 4} \quad (4.6)$$

Dieser Fall gilt konventionell ebenfalls für angebrachte Werkzeuge wie ein Bohrkopf oder Sauggreifer.

4.2 Definition des Optimierungsproblems

Das Funktionsprinzip des vorgestellten Kalibrierverfahrens basiert darauf den Schnittpunkt zwischen der Symmetrieachse des Kalibriertargets und der Laserebene für verschiedene, bekannte Konfigurationen des Manipulators, zu bestimmen. Die geschlossene Transformationskette, welche sich durch (4.4) beschreiben lässt, wird genutzt, um eine Metrik zu definieren, welche eine Abweichung zu dieser Transformationskette beschreibt. Diese Abweichung ist abhängig von

der gesuchten, statischen Transformation zwischen dem Laserscanner und der Manipulatorbasis $\mathcal{H}_L^B(\Psi)$ und dem Konfigurationsabhängigen Schnittpunkt entlang des Kalibriertargets $\gamma(q)$. Indem ein Optimierungsproblem formuliert wird, dessen Gütefunktional die genannte Metrik minimiert, lässt sich eine optimale Lösung für die gesuchte Transformation ermitteln. Für den vorgestellten Ansatz wird die Formulierung als Kleinste-Quadrate-Problem genutzt.

Da (4.4) die geschlossene Transformationskette vollständig beschreibt und die gesuchte Transformation mit der Konfiguration des Manipulators und der Messung des Laserscanners in eine geometrische Beziehung setzt, wird folgender Fehlervektor $E = [e_x \ e_y \ e_z \ 0]^T$ definiert:

$$E(q, \Psi, \gamma) = \mathcal{H}_L^B(\Psi) \cdot \mathcal{X}_B^I(q, \gamma) - \mathcal{X}_L^I(q) \quad (4.7)$$

Eine skalare Metrik anhand des beschriebenen Fehlervektors (4.7) wird gegeben durch:

$$\mathcal{E}(\Psi, \gamma) = \sum_{q \in Q} \sqrt{E^T(q) \cdot E(q)} \quad (4.8)$$

Diese Metrik lässt sich geometrisch interpretieren. Sie entspricht der Summe der translatorischen Abweichung zwischen dem gemessenen Schnittpunkt des Kalibriertargets und dem durch den geschätzten Parameter entstehenden Schnittpunkt. Außerdem werden Fehler um den Wert 0 durch die nichtlineare Wurzelfunktion höher gewichtet und verbessern so die Schätzung der Parameter.

Schließlich lässt sich das Gütefunktional des Optimierungsproblems formulieren als:

$$\arg \min_{\Psi, \gamma(q)} \mathcal{E}(q, \Psi, \gamma) \quad (4.9)$$

mit den oberen und unteren Parametergrenzen:

$$\begin{aligned} 0 < \gamma_i &\leq h \\ -2\pi &\leq \vartheta \leq 2\pi \\ -2\pi &\leq \varphi \leq 2\pi \\ -2\pi &\leq \psi \leq 2\pi \end{aligned} \quad (4.10)$$

Es ist zu sehen, dass der Schnittpunkt entlang des Kalibriertargets positiv sein muss und kleiner als seine Höhe. Die Parametergrenzen für die Winkel ϑ, φ, ψ werden für ein Intervall zwischen -2π und 2π gewählt, weil die nichtlinearen Winkelfunktionen so einen stetigen Funktionsverlauf durch den Wert 0 und $\pm\pi$ erzeugen. Man beachte außerdem, dass $\gamma_i(q)$ den Schnittpunkt entlang des Kalibriertargets beschreibt und als konfigurationsabhängige, unbekannte Variable ebenfalls im Rahmen der Optimierung für jede Konfiguration ermittelt wird. Für den Fall, dass die Rotation des eingespannten Kalibriertargets unbekannt ist, lässt sich diese ebenfalls als Parameter γ_{rot} bestimmen. Als Startwert der Optimierung wird jeweils

$$\Psi_{init} = [0, 0, 0, 0, 0, 0] \quad (4.11)$$

verwendet. Dies entspricht dem Fall, dass sich das Koordinatensystem des Laserscanners im Ursprungskordinatensystem des Manipulators befindet. Um nicht in einem lokalen Minimum zu konvergieren wird das globale Minimum zunächst mit einem Partikelschwarmoptimierer grob identifiziert. Dieses wird schließlich als Startwert für einen Levenberg-Marquardt Optimierer genutzt, der so im globalen Minimum konvergiert.

4.3 Kalibrierung ohne Kalibriertarget

Für Manipulatoren mit zylindrischen Gliedern ergibt sich die Möglichkeit die Glieder selbst zur Kalibrierung zu verwenden und vollständig auf ein Kalibriertarget zu verzichten. In diesem Kapitel wird beschrieben, welche Änderungen sich durch diese Nutzung für das Kalibrierverfahren ergeben.

Abbildung 4.4 zeigt schematisch den in dieser Arbeit genutzten Manipulator UR5 von Universal Robots und die zugehörigen Glieder. Die dargestellten Glieder und Abmaße sind typisch für derartige Manipulatoren. Es ist ersichtlich, dass sich lediglich die beiden Glieder (2) und (3) zur Kalibrierung eignen. Da das Glied (3) einen Freiheitsgrad mehr besitzt und einen größeren Arbeitsraum aufspannt, wird dieses genutzt.

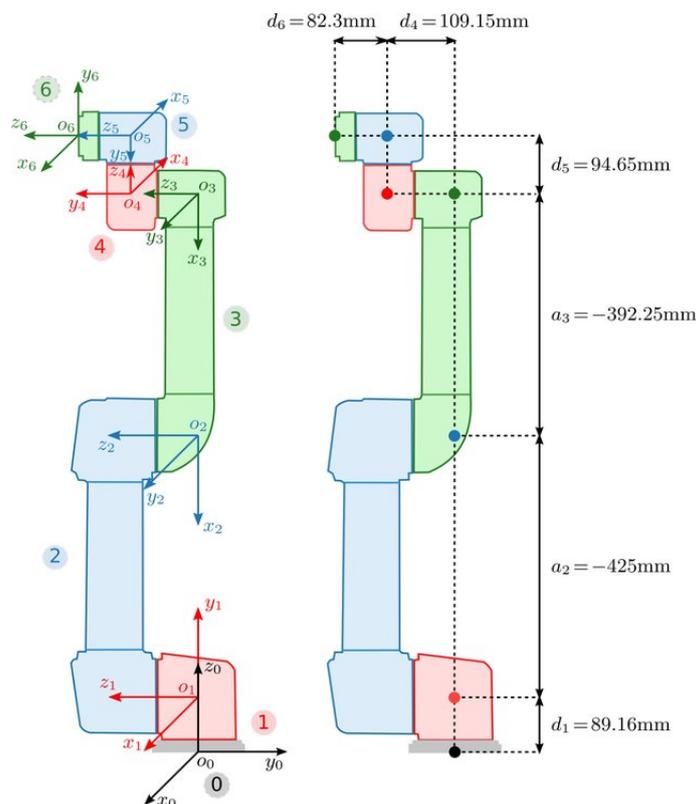


Abbildung 4.4: Schematische Darstellung der Glieder des Universal Robot UR5 [Tek+18].

Die Transformationskette, wie in Gleichung 4.3 vorgestellt, wird nicht entlang des Kalibriertargetes geschlossen, sondern entlang des dritten Manipulatorgliedes. Die Symmetrieachse dieses Gliedes ergibt ebenfalls einen elliptischen Querschnitt.

4.4 Zusammenfassung

Die Kalibrierung mittels zylindrischem Kalibriertarget wurde in diesem Kapitel vorgestellt und wird in dieser Arbeit untersucht. Für die Kalibrierung wird das Kalibriertarget vom Endeffektor des Manipulators gegriffen und schneidet in verschiedenen Posen die aufgespannte zwei dimensionale Ebene des Laserscanners. Die Messungen des Laserscanners und die bekannten Posen des Endeffektors werden schließlich verwendet, um die Kalibrierparameter zu ermitteln.

Im vorgestellten Modell wird die Achse des Endeffektors durch das Kalibriertarget verlängert. Dies ist möglich, da das Modell des realen 3-dimensionalen zylindrischen Kalibriertargets ohne Informationsverlust auf seine Symmetrieachse reduziert werden kann. Dadurch ergibt sich eine geschlossene Transformationskette aus Laserscanner, Manipulator und verlängerter Achse des End-Effektors.

Der detektierte Mittelpunkt wurde als vier-dimensionaler Vektor modelliert und ist damit auf die homogenen Matrizen anwendbar. Die Pose des Kalibriertargets bezüglich des Laserscanners ist abhängig von der gesuchten Transformation und der Konfiguration des Manipulators. Durch die Projektion auf die translatorische Ebene des Laserscanners konnte schließlich ein Gleichungssystem aufgestellt werden, welches den sich ergebenden Schnittpunkt und die Detektierung ausdrückt. Dies ermöglicht wiederum die Definition eines Fehlers der Transformationskette in Abhängigkeit von der gesuchten Transformation. Um die Kalibrierparameter zu ermitteln wurde schließlich ein Kleinste-Quadrate-Problem formuliert, das die Transformationskette schließt.

Für die Kalibrierung ohne Kalibriertarget mit dem Manipulator selbst wurde gezeigt, dass für den UR5 von Universal Robots das dritte Manipulatorglied für die Kalibrierung geeignet ist. Dies gilt für sämtliche Manipulatoren mit einem zylinderförmigen dritten Manipulator-Glied.

Kapitel 5

Kalibrierung unter Berücksichtigung der Messfehler

Das im vorherigen Kapitel vorgestellte Verfahren zur Bestimmung der Transformation zwischen Manipulator und Laserscanner wird in diesem Kapitel erweitert. In einem probabilistischen Modell werden die Messfehler des Laserscanners und des Manipulators berücksichtigt.

Für den Manipulator werden Bauteiltoleranzen und mittelwertfreie Messfehler der Gelenkstellungen ohne Getriebeispiel berücksichtigt. Im Folgenden wird der Fehler der Anschaulichkeit halber ausschließlich anhand der Gelenkstellungen modelliert. Am Ende des Kapitels wird jedoch gezeigt, wie der Fehler anhand sämtlicher fehlerbehafteter Parameter der kinematischen Kette angewendet werden kann.

Es wird beachtet, dass die Stellungen der einzelnen Gelenke einen Einfluss auf den resultierenden Fehler haben. Der Gelenkfehler wird über die Kinematik propagiert und führt zu einer fehlerhaften Messung der Pose des End-Effektors. Diese wiederum wird entlang des Kalibriertargets auf die Ebene des Laserscanners projiziert. Der Fehler des Manipulators ist also Konfigurationsabhängig und sorgt dafür, dass die Stellung des End-Effektors bei weit ausgestrecktem Arm mit einem größeren Fehler behaftet ist.

Dadurch, dass der Fehler des Manipulators auf die Ebene des Laserscanners projiziert wird, ist der projizierte Fehler also von der gesuchten Transformation selbst abhängig. Die Ermittlung der gesuchten Transformation soll wiederum anhand dieses projizierten Fehlers verbessert werden. Im Folgenden Kapitel wird diese gegenseitige Abhängigkeit genauer vorgestellt und modelliert. Ein Ansatz dieses nicht triviale Problem zu lösen wird entwickelt und die für den Ansatz notwendigen Vereinfachungen werden vorgestellt.

Die Messung des Laserscanners enthält ebenfalls einen Fehler. Dieser führt wiederum im Detektierverfahren zu einem Fehler der ermittelten Position der Symmetrieachse. Auch dieser Fehler soll im vorgestellten Verfahren berücksichtigt werden und wird im Folgenden dargelegt.

Schließlich wird gezeigt, wie die beiden Fehlerquellen zusammengeführt werden. Darauf auf-

bauend wird ein Algorithmus entwickelt, der die Transformation bestimmt und die beiden Fehlereinflüsse zur Verbesserung der Genauigkeit berücksichtigt.

5.1 Modellierung der Unsicherheiten der Teilsysteme

Im Folgenden werden die Messfehler der beiden Teilsysteme Manipulator und Laserscanner modelliert. Zunächst wird vorgestellt, wie die Unsicherheit des Manipulators auf die Ebene des Laserscanners projiziert wird. Schließlich wird die Unsicherheit der Detektierung des Zylinders verdeutlicht.

5.1.1 Unsicherheit des Manipulators und Projektion auf die Ebene des Laserscanners

Die Unsicherheit des Manipulators verursacht durch die Projektion auf die Ebene des Laserscanners einen Fehler, der zusätzlich von der gesuchten Transformation selbst abhängig ist. Im Folgenden wird der Fehler der Projektion näher betrachtet. Schließlich wird die Kovarianzmatrix der entstehenden Fehlerverteilung analytisch bestimmt.

Definition und qualitative Erklärung des projizierten Fehlers

Die Konfiguration des Manipulators wird ermittelt, indem die Werte der einzelnen Gelenke gemessen werden. Diese wiederum führen über die entstehende Transformationskette zur Pose des Endeffektors und damit zur Pose des Kalibriertargets. Der Fehler der Gelenkmessungen wird demnach über die Kinematik bis zum Endeffektor propagiert und schließlich entlang des Kalibriertargets auf die Ebene des Laserscanners projiziert.

Für die Modellierung des Fehlers wurde ein probabilistisches Modell ausgewählt. Wie in Kapitel 2 begründet, wird der Fehler der Gelenkstellungen als normalverteilt angenommen. Die Unsicherheiten der Gelenkmessungen werden als mittelwertfreies, gaussches Rauschen modelliert. Die Projektion der Gelenkfehler entlang der kinematischen Kette zum Endeffektor kann wie in Kapitel 2 beschrieben anhand eines Modells erster Ordnung mit der Jakobi Matrix bzw. dem totalen Differential angenähert werden. Der Fehler des Endeffektors lässt sich mit der Kovarianzmatrix Σ_E beschreiben. Die auf die Ebene des Laserscanners projizierte Kovarianzmatrix wird als Σ_Q definiert. Die Fehlerfortpflanzung entlang des Kalibriertargets auf die Ebene des Laserscanners ist in Abbildung 5.1 schematisch dargestellt.

Es wird deutlich, dass sowohl die wahren Parameter $\tilde{\Psi}$ der Transformation zwischen Laserscanner und Manipulator $\mathcal{H}_L^B(\tilde{\Psi})$ als auch die fehlerhaft gemessene Konfiguration des Manipulators q den projizierten Fehler verursachen. Der durch die gemessene Konfiguration entstehende Schnittpunkt mit der Ebene des Laserscanners ${}^Q\mathcal{X}_L^I(q, \tilde{\Psi})$ entspricht nicht dem wahren Schnittpunkt $\mathcal{X}_L^I(\tilde{q}, \tilde{\Psi})$.

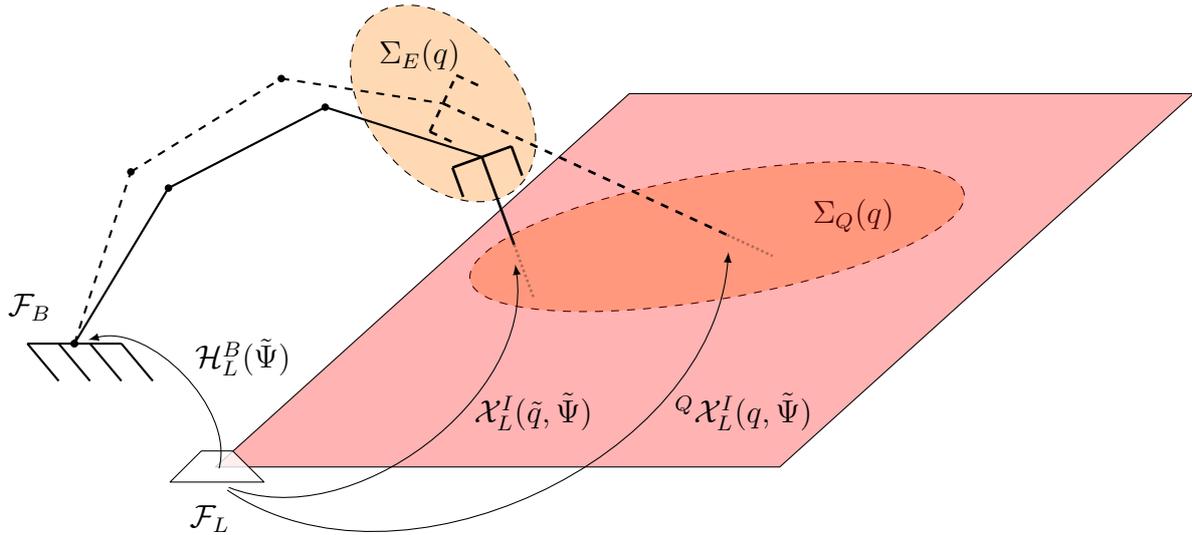


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung des Kalibrier-Settings und des Fehlers durch die Gelenkmessung des Manipulators. Die wahre Konfiguration (durchgezogene Verbindung) führt zu dem wahren Schnittpunkt \mathcal{X}_L^I , wohingegen die gemessene Konfiguration (gestrichelte Verbindung) den Schnittpunkt ${}^Q\mathcal{X}_L^I$ ergibt. Die Koordinatensysteme \mathcal{F}_L , \mathcal{F}_B sowie die Transformation zwischen ihnen $\mathcal{H}_L^B(\tilde{\Psi})$ bleiben unverändert.

Umformung der Transformationskette

Um den projizierten Fehler bestimmen zu können, muss der resultierende Schnittpunkt ${}^Q\mathcal{X}_L^I(q, \tilde{\Psi})$ bekannt sein. Die Transformation vom Endeffektor zum Schnittpunkt $\mathcal{H}_{G_0}^{G_i}(q, \gamma)$ (siehe Kapitel 4) lässt sich nicht messen. Da sich γ allerdings eindeutig aus der Transformation $\mathcal{H}_L^B(\tilde{\Psi})$ und der Konfiguration q ergibt, lassen sich die Gleichungen der Transformationskette so umformen, dass der Schnittpunkt unabhängig von γ bestimmt werden kann.

In Anlehnung an Gleichung 4.3 aus Kapitel 4 kann die Transformationskette zwischen Laserscanner und Schnittpunkt modelliert werden:

$${}^Q\mathcal{X}_L^I = \mathcal{H}_L^B(\tilde{\Psi}) \cdot \underbrace{{}^Q\mathcal{H}_B^E(q) \cdot \mathcal{H}_E^{G_0} \cdot \mathcal{H}_{G_0}^{G_i}(q, \gamma)}_{{}^Q\mathcal{X}_B^I(q, \gamma)} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5.1)$$

${}^Q\mathcal{X}_L^I$ ist hierbei der Schnittpunkt und die gesuchte Variable. Ziel der folgenden Umformung ist es einen von γ unabhängigen Ausdruck zur Bestimmung von ${}^Q\mathcal{X}_L^I$ zu berechnen. Die fehlerbehaftete Transformation zwischen Basis und Endeffektor wird mit ${}^Q\mathcal{H}_B^E(q)$ beschrieben. ${}^Q\mathcal{X}_B^I(q, \gamma)$ definiert den Schnittpunkt zwischen Laserscanner und Kalibriertarget aus Sicht der Manipulatorbasis. Es ergibt sich die zusammengefasste Gleichung:

$${}^Q\mathcal{X}_L^I = \mathcal{H}_L^B(\tilde{\Psi}) \cdot {}^Q\mathcal{X}_B^I(q, \gamma) \quad (5.2)$$

Aufgrund der Verwendung homogener Matrizen wird ein Gleichungssystem mit vier nicht-linearen Gleichungen erzeugt. Hierbei enthält die vierte Gleichung keine Informationen, da sie lediglich den Streckungsfaktor beinhaltet. Die Z-Komponente des Vektors ${}^Q\mathcal{X}_L^I$ muss außerdem dem Wert Null entsprechen, da vom Laserscanner eine zweidimensionale Ebene aufgespannt wird. Der gesuchte Vektor ${}^Q\mathcal{X}_L^I$ besteht somit aus vier Elementen und kann beschrieben werden als:

$${}^Q\mathcal{X}_L^I = \begin{bmatrix} {}^Qx_L^I(q, \tilde{\Psi}) & {}^Qy_L^I(q, \tilde{\Psi}) & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (5.3)$$

So ergibt sich das Gleichungssystem:

$$\begin{bmatrix} {}^Qx_L^I \\ {}^Qy_L^I \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathcal{H}_L^B(\tilde{\Psi}) \cdot {}^Q\mathcal{X}_B^I(q, \gamma) \quad (5.4)$$

Dieses Gleichungssystem lässt sich wiederum nach ${}^Qx_L^I(q, \tilde{\Psi})$ und ${}^Qy_L^I(q, \tilde{\Psi})$ auflösen, sodass ein neues von γ unabhängiges Gleichungssystem entsteht:

$$\begin{bmatrix} {}^Qx_L^I \\ {}^Qy_L^I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^Qg_x(q, \tilde{\Psi}) \\ {}^Qg_y(q, \tilde{\Psi}) \end{bmatrix}. \quad (5.5)$$

Die in 5.5 ermittelten Funktionen ${}^Qg_x(q, \tilde{\Psi})$ und ${}^Qg_y(q, \tilde{\Psi})$ können genutzt werden, um den sich ergebenden Schnittpunkt ${}^Qx_L^I, {}^Qy_L^I$ anhand der gemessenen Konfiguration q und des wahren Parametern $\tilde{\Psi}$ zu bestimmen.

Modellierung der Fehlerfortpflanzung und Projektion auf die Ebene des Laserscanners

Der in den gemessenen Gelenkstellungen enthaltene Fehler wird entlang der Transformation zwischen Laserscanner und Manipulator, entlang der kinematischen Kette des Manipulators und entlang des Kalibriertargets auf die Ebene des Laserscanners propagiert. Diese Fehlerfortpflanzung lässt sich anhand des totalen Differentials bestimmen. Hierfür wird die in Gleichung 5.5 ermittelte Position des Schnittpunkts partiell nach den einzelnen Komponenten des Vektors q abgeleitet und ergibt die Jacobi Matrix. Das totale Differential folgt schließlich zu:

$$\begin{bmatrix} d{}^Qx_L^I(q, \Psi) \\ d{}^Qy_L^I(q, \Psi) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial {}^Qg_x(q, \Psi)}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial {}^Qg_x(q, \Psi)}{\partial q_M} \\ \frac{\partial {}^Qg_y(q, \Psi)}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial {}^Qg_y(q, \Psi)}{\partial q_M} \end{bmatrix}}_{\frac{\partial {}^QG(q, \Psi)}{\partial q}} \cdot \begin{bmatrix} dq_1 \\ \vdots \\ dq_M \end{bmatrix}, \quad (5.6)$$

mit dem Fehlervektor der einzelnen Gelenke $\begin{bmatrix} dq_1 & \dots & dq_M \end{bmatrix}^T$. Die Standardabweichungen der einzelnen Gelenke werden mithilfe des Vektors

$$\sigma_q = \begin{bmatrix} \sigma_{q_1} & \dots & \sigma_{q_M} \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

beschrieben. So ergibt sich schließlich die Kovarianzmatrix $\Sigma_Q(q, \tilde{\Psi})$ des projizierten Fehlers der Gelenkwerte als:

$$\Sigma_Q(q, \Psi) = \frac{\partial^Q G(q, \Psi)}{\partial q} \cdot \sigma_q \cdot \sigma_q^T \cdot \frac{\partial^Q G(q, \Psi)^T}{\partial q}. \quad (5.8)$$

Das vorgestellte Verfahren projiziert mittelwertfreie und normalverteilte Fehler der Gelenkwerte auf die zweidimensionale Ebene des Laserscanners. Sind weitere mittelwertfreie und normalverteilte, fehlerbehaftete Parameter der kinematischen Kette bekannt (wie beispielsweise die Länge, Rotation oder eine Verschiebung der Achsen), können auch diese berücksichtigt werden. In diesem Fall kann der gesamte Fehlervektor als p beschrieben werden und das totale Differential aus Gleichung 5.6 ist partiell nach p abzuleiten. Das entwickelte Fehlermodell ist in der Lage sämtliche Bauteiltoleranzen entlang der kinematischen Kette und das Messrauschen abzubilden.

Die Verwendung des totalen Differentials (Jacobi Matrix) führt zu einem Fehlermodell erster Ordnung und bildet einen Fehler der Gelenkstellungen unter 5° ausreichend genau ab (siehe Kapitel 2).

5.1.2 Unsicherheit des Laserscanners

Ein weiterer Teil des Fehlers der Kalibrierung wird durch den Laserscanner verursacht. Jeder Messpunkt des Laserscanners enthält einen Messfehler σ_L (siehe Kapitel 3.2.3). Bei der Detektierung des Kalibriertargets kann diese Standardabweichung zur Gewichtung der Messpunkte genutzt werden. So lässt sich schließlich die Kovarianzmatrix des detektierten Mittelpunktes der Ellipse aus der Hessischen Matrix bestimmen Σ_{CT} . Aufgrund des zugrundeliegenden Modells der Ellipse und der Verteilung der Messpunkte lässt sich die Kovarianzmatrix bestimmen, selbst wenn jeder einzelne Messpunkt mit dem gleichen Messfehler σ_L beschrieben wird. Abbildung 5.2 stellt den Querschnitt des Zylinders und die resultierenden Ungenauigkeiten in Form der Konfidenzintervalle dar.

Für jede Konfiguration q des Manipulators wird das Kalibriertarget detektiert und hierbei die Messfehler der Messpunkte berücksichtigt. Die aus der Detektierung ermittelte Position des Kalibriertargets wird definiert zu ${}^{CT}x_I^L(q), {}^{CT}y_I^L(q)$. Die geschätzte Kovarianzmatrix wird definiert als:

$$\Sigma_{CT}(q) = \begin{bmatrix} \sigma_{x_I^L x_I^L} & \sigma_{x_I^L y_I^L} \\ \sigma_{y_I^L x_I^L} & \sigma_{y_I^L y_I^L} \end{bmatrix}. \quad (5.9)$$

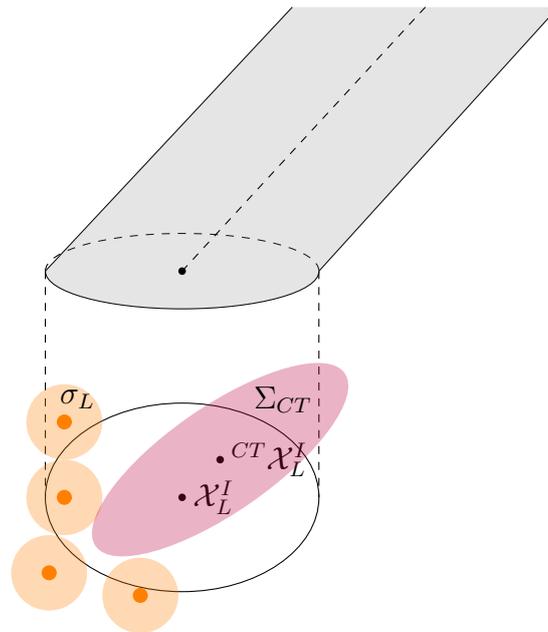


Abbildung 5.2: Schematische Darstellung der Detektierung des Kalibriertargets und Bestimmung der Kovarianz der Detektierung Σ_{CT} . Die einzelnen Messpunkte des Laserscanners haben einen Messfehler σ_L . Das zugrundeliegende Modell der Ellipse und die Verwendung des MLE führen dazu, dass sich die resultierende Kovarianzmatrix des detektierten Mittelpunktes Σ_{CT} bestimmen lässt (siehe Kapitel 3).

5.1.3 Resultierende Gesamtunsicherheit

Die resultierende Gesamtunsicherheit setzt sich aus dem projizierten Fehler der Kinematik des Manipulators und der Detektierung des Kalibriertargets mit dem Laserscanner zusammen.

Der probabilistische Ansatz ermöglicht es die Fehler der Messungen als Wahrscheinlichkeitsdichten zu modellieren. In Abbildung 5.3 werden beide Fehleranteile aufgetragen, um die Bestimmung des Gesamtfehlers zu veranschaulichen.

Die Messung der Konfiguration des Manipulators führt zu einem gemessenen Schnittpunkt mit der Ebene des Laserscanners an der Position ${}^Q \mathcal{X}_L^I$. Die zugehörige wahre Position befindet sich entsprechend der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung an $p(\mathcal{X}_L^I | {}^Q \mathcal{X}_L^I)$. Die wahre Position wird schließlich gemessen und befindet sich entsprechend der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung $p(\mathcal{X}_L^I | {}^{CT} \mathcal{X}_L^I)$ um den detektierten Punkt.

Da von Normalverteilungen ausgegangen wird, ergeben sich die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen entsprechend zu:

$$\begin{aligned} p(\mathcal{X}_L^I | {}^{CT} \mathcal{X}_L^I) &= \mathcal{N}({}^{CT} \mathcal{X}_L^I, \Sigma_{CT}), \\ p(\mathcal{X}_L^I | {}^Q \mathcal{X}_L^I) &= \mathcal{N}({}^Q \mathcal{X}_L^I, \Sigma_Q) \end{aligned} \quad (5.10)$$

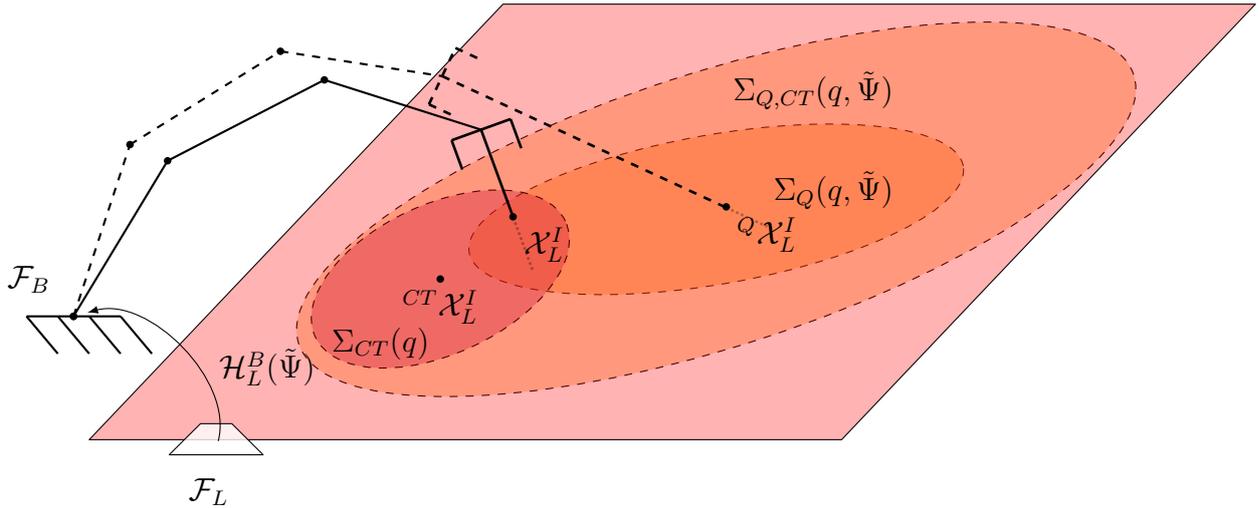


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung des Kalibrier-Settings und der Fehler durch die Gelenkmessung des Manipulators und der Detektierung mit dem Laserscanner. Die reale Konfiguration (durchgezogene Verbindung) führt zu dem Schnittpunkt \mathcal{X}_L^I , wohingegen die gemessene Konfiguration (gestrichelte Verbindung) den Schnittpunkt ${}^Q\mathcal{X}_L^I$ ergibt. Die Detektierung mit dem Laserscanner führt zu ${}^{CT}\mathcal{X}_L^I$. Eingezeichnet sind außerdem die sich ergebenden Konfidenzintervalle Σ_{CT} , Σ_Q und das definierte Konfidenzintervall aus der Summe der beiden $\Sigma_{Q,CT}$. Die Koordinatensysteme \mathcal{F}_L , \mathcal{F}_B sowie die Transformation zwischen ihnen $\mathcal{H}_L^B(\tilde{\Psi})$ bleiben unverändert.

Beide Fehler werden als Mittelwertfrei angenommen. Die Wahrscheinlichkeitsdichten des vom Manipulator ausgelösten Fehlers $p(\mathcal{E}^Q)$ und des von der Detektierung ausgelösten Fehlers $p(\mathcal{E}^{CT})$ werden somit definiert als:

$$\begin{aligned} p(\mathcal{E}^Q) &= \mathcal{N}(0, \Sigma_Q(q, \tilde{\Psi})), \\ p(\mathcal{E}^{CT}) &= \mathcal{N}(0, \Sigma_{CT}). \end{aligned} \quad (5.11)$$

Es wird der Ansatz gewählt einen Gesamtfehler $p(\mathcal{E}^{Q,CT})$ aus der Summe der beiden Fehleranteile zu bilden. Da der Fehler der Gelenkmessungen des Manipulators unabhängig vom Fehler des Laserscanners ist und umgekehrt, ergibt sich die Summe aus der Faltung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen. Dies wiederum führt zu:

$$\begin{aligned} p(\mathcal{E}^{Q,CT}) &= p(\mathcal{E}^Q) * p(\mathcal{E}^{CT}) = \mathcal{N}(0, \Sigma_Q + \Sigma_{CT}), \\ \Sigma_{Q,CT}(q, \tilde{\Psi}) &= \Sigma_Q(q, \tilde{\Psi}) + \Sigma_{CT}. \end{aligned} \quad (5.12)$$

Die Kovarianzmatrix des resultierenden Gesamtfehlers ergibt sich aus der Summe der Kovarianzmatrizen der beiden Teilfehler.

5.2 Kalibrierung

In diesem Kapitel wird das Kalibrierverfahren vorgestellt. Zunächst wird das generelle Funktionsprinzip dargelegt. Es wird gezeigt wie die in Kapitel 5.1 ermittelten Unsicherheiten berück-

sichtigt werden. Schließlich wird das Optimierungsproblem für die Kalibrierung formuliert. Im letzten Teil wird der gesamte Kalibrierprozess in einem sequentiellen Algorithmus zusammengefasst.

5.2.1 Funktionsprinzip

Das Funktionsprinzip ähnelt dem bereits in Kapitel 4.1 vorgestellten Verfahren. Das Kalibrier-target wird vom Endeffektor gegriffen und in verschiedenen Posen werden Messungen erzeugt, welche die Konfiguration des Manipulators mit den zugehörigen Messungen des Laserscanners in Beziehung setzen.

Wiederum wird die resultierende Transformationskette geschlossen, indem die gesuchten sechs Parameter der Transformation zwischen Laserscanner und Manipulator angepasst werden. Im Gegensatz zum bereits vorgestellten Verfahren wird das zugrundeliegende Optimierungsproblem allerdings anhand der in Kapitel 5.1 ermittelten Kovarianzmatrizen gewichtet.

5.2.2 Definition der Optimierungsprobleme

In diesem Kapitel wird das probabilistische Optimierungsproblem für die Kalibrierung formuliert. Es beinhaltet die Gewichtung der Unsicherheiten des Laserscanners und der Gelenkwerte des Manipulators.

Die geschlossene Transformationskette zwischen Manipulator, Kalibriertarget und Laserscanner ist bereits bekannt (siehe Gleichung 5.2) und kann wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben nach den Variablen x_L^I und y_L^I umgestellt werden:

$$\begin{bmatrix} x_L^I \\ y_L^I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_x(q, \Psi) \\ g_y(q, \Psi) \end{bmatrix}. \quad (5.13)$$

Hieraus kann schließlich der Fehlervektor $\mathcal{E}(q, \Psi)$ definiert werden:

$$\mathcal{E}(q, \Psi) = \begin{bmatrix} g_x(q, \Psi) \\ g_y(q, \Psi) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_L^I \\ y_L^I \end{bmatrix}. \quad (5.14)$$

Um diesen Fehlervektor zu minimieren und die Transformation zu bestimmen wird schließlich ein gewichtetes, multivariates nicht-lineares Kleinste-Quadrate-Problem definiert. Hierfür wird die in Kapitel 5.1.3 bestimmte Kovarianzmatrix $\Sigma_{Q,CT}(q, \Psi)$ zur Gewichtung verwendet.

Es ergibt sich:

$$\arg \min_{\Psi} \sum_{q \in Q} \mathcal{E}^T(q, \Psi) \cdot \left(\Sigma_{Q,CT}(q, \Psi) \right)^{-1} \cdot \mathcal{E}(q, \Psi) \quad (5.15)$$

Das definierte Optimierungsproblem enthält eine Gewichtung, die von den zu identifizierenden Parametern selbst abhängt. Dieses Nichtlineare Optimierungsproblem ist allgemein lösbar. In dieser Arbeit wurde der Ansatz gewählt Ψ_{init} in einer initialen Kalibrierung zu ermitteln und diese Transformation zu nutzen, um $\Sigma_{Q,CT}(q, \Psi_{init})$ zu bestimmen. So sind die Gewichtungs-

faktoren unabhängig von den gesuchten Parametern und die Komplexität des Optimierungsproblems wird reduziert.

So ergibt sich das Optimierungsproblem:

$$\arg \min_{\Psi} \sum_{q \in Q} \mathcal{E}^T(q, \Psi) \cdot \left(\Sigma_{Q,CT}(q, \Psi_{init}) \right)^{-1} \cdot \mathcal{E}(q, \Psi). \quad (5.16)$$

Dieses Optimierungsproblem berücksichtigt die modellierten Fehler in Form der Kovarianzmatrix $\Sigma_{Q,CT}(q, \Psi_{init})$. Die Gewichtung führt dazu, dass Messposen mit großen Messfehlern weniger ins Gewicht fallen und umgekehrt. So kann die Genauigkeit der Kalibrierung im Allgemeinen verbessert werden. Da die Kovarianzmatrix aus einer initialen Kalibrierung ermittelt wird, handelt es sich um eine Annäherung an den in Kapitel 5.1.3 ermittelten Fehler.

5.2.3 Finaler Algorithmus

In diesem Kapitel soll das gesamte Kalibrierverfahren in seinen einzelnen Schritten final zusammengefasst werden. Es ergibt sich folgender sequentieller Algorithmus:

1. Die Kalibrierposen werden nacheinander angefahren und führen zu den Messungen des Laserscanners sowie den zugehörigen gemessenen Konfigurationen des Manipulators:
 - Messen der Konfigurationen q
 - Bestimmen von $\mathcal{H}_B^E(q)$
 - Messen des Querschnitts des Kalibriertargets $\mathcal{X}_L^j(q)$
2. Die Symmetrieachse des Kalibriertargets wird anhand der Messungen des Laserscanners detektiert und die Kovarianzmatrix bestimmt:
 - Bestimmen von ${}^{CT}\mathcal{X}_L^I(q)$ und $\Sigma_{CT}(q)$
3. Eine initiale Transformation zwischen Laserscanner und Manipulator wird ohne Berücksichtigung der Messfehler durchgeführt:
 - Bestimmen von Ψ_{init} wie in Kapitel 4.2 beschrieben
4. Die Kovarianzmatrix des durch den Manipulator verursachten Fehlers wird für jede Kalibrierpose anhand der initialen Transformation bestimmt:
 - Bestimmen der Funktionen ${}^Qg_x(q, \Psi_{init})$ und ${}^Qg_y(q, \Psi_{init})$
 - Bestimmen der Jakobi Matrix $\partial^Q G(q, \Psi_{init}) / \partial q$
 - Bestimmen der Kovarianzmatrix $\Sigma_Q(q, \Psi_{init})$
5. Die Kovarianzmatrix des gesamten Fehlers wird bestimmt und verwendet, um die gewichtete Optimierung schließlich zu formulieren und zu lösen:
 - Bestimmen von $\Sigma_{Q,CT}(q)$
 - Lösen von

$$\arg \min_{\Psi} \sum_{q \in Q} \mathcal{E}^T(q, \Psi) \cdot \left(\Sigma_{Q,CT} \right)^{-1} \cdot \mathcal{E}(q, \Psi)$$

- Als Startwert der Optimierung wird Ψ_{init} verwendet und zur Lösung wird der Levenberg-Marquardt Algorithmus genutzt.

5.3 Zusammenfassung

Die Kalibrierung unter Berücksichtigung der Messfehler der Teilkomponenten Laserscanner und Manipulator wurde in dieser Arbeit vorgestellt und erstmals untersucht. Hierfür wurden die Unsicherheiten probabilistisch modelliert. Die Kovarianzmatrizen wurden bestimmt und im Rahmen einer gewichteten Optimierung mit einbezogen. Dies führt zur Bestimmung der Parameter der Transformation.

Durch die Unsicherheiten des Manipulators wird ein Fehler in der Pose des Endeffektors erzeugt. Dieser Fehler wird entlang des Kalibriertargets auf die Ebene des Laserscanners projiziert. Zunächst wurde ein Gleichungssystem aufgestellt, welches den Schnittpunkt zwischen Kalibriertarget und Ebene des Laserscanners ergibt. Darauf aufbauend wurde ein Ansatz vorgestellt, wie die Kovarianzmatrix des projizierten Fehlers anhand des totalen Differentials bestimmt werden kann.

Der durch den Laserscanner erzeugte Messfehler der Messpunkte verursacht eine Unsicherheit bei der Detektierung des Kalibriertargets. Diese wird durch die in Kapitel 3 vorgestellte Methode bestimmt und als Kovarianzmatrix ausgedrückt. Es wurde der Ansatz gewählt den Gesamtfehler aus der Summe der beiden Fehleranteile zu bilden. Dadurch ergibt sich die Kovarianzmatrix des Gesamtfehlers aus der Summe der beiden Kovarianzmatrizen der Projektion und Detektierung.

Schließlich kann die Kovarianzmatrix des Gesamtfehlers genutzt werden, um in einem gewichteten Kleinste-Quadrate-Problem den Fehler beider Teilsysteme zu berücksichtigen.

Da die so ermittelte Kovarianzmatrix des Fehlers von der gesuchten Transformation selbst abhängt, wird der Ansatz gewählt in einer initialen Kalibrierung die Transformation für die Fehlerbestimmung zu ermitteln. Am Ende des Kapitels wurde der finale Algorithmus vorgestellt.

Es wird davon ausgegangen, dass durch die Berücksichtigung der Fehleranteile die Genauigkeit der Kalibrierung verbessert wird. Dies soll im Experimentalteil der Arbeit untersucht werden.

Kapitel 6

Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse

Nach der Einführung der Fehlermodelle und der Detektierung des Kalibriertargets in Kapitel 3, der Kalibrierung ohne Berücksichtigung der Messfehler in Kapitel 4 und mit Berücksichtigung der Messfehler in Kapitel 5 folgt die experimentelle Untersuchung des vorgestellten Ansatzes. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden vorgestellt und diskutiert. Der Schwerpunkt liegt auf der Untersuchung der erzielten Genauigkeit der vorgestellten Verfahren.

Das Kapitel wird in sechs Teile gegliedert. Zunächst werden der Aufbau und die Rahmenbedingungen der realen Experimente vorgestellt. Schließlich wird das Fehlermodell des verwendeten Laserscanners identifiziert. Es folgen Untersuchungen zur Detektierung des Kalibriertargets bzw. des Manipulatorgliedes anhand der Messungen des Laserscanners. Schließlich wird das Kalibrierverfahren mit und ohne Berücksichtigung der Messfehler evaluiert. Diese Kapitel beinhalten auch die Untersuchung der Genauigkeit des aktuellen Verfahrens nach [AAR14]. Abschließend wird das Kalibrierverfahren anhand des Manipulators selbst untersucht. Die Experimente werden sowohl in der Simulation als auch der Realität durchgeführt.

6.1 Aufbau

Im folgenden Kapitel wird der Aufbau der realen Experimente vorgestellt. Dies beinhaltet die verwendeten Komponenten Laserscanner und Manipulator. Das genutzte Referenzsystem zur Untersuchung der Genauigkeit wird ebenfalls vorgestellt. Abschließend werden die Rahmenbedingungen der experimentellen Umgebung beschrieben.

6.1.1 Laserscanner

Für die Experimente wurde der Hokuyo UST-10LX-H01 Laserscanner verwendet. Der über Ethernet angeschlossene Laserscanner besitzt einen Messbereich von 270° . Seine Reichweite beträgt 6 cm bis maximal 30 m . Seine Wiederholgenauigkeit wird im Datenblatt mit 30 mm angegeben und die Abtastfrequenz mit 40 Hertz . Die Winkelauflösung beträgt $0,125^\circ$. Die Aufwärmphase wird mit 10 Sekunden angegeben und die Betriebstemperatur darf zwischen

$-10^{\circ}C$ und $70^{\circ}C$ liegen. Der Sensor arbeitet mit dem Time-of-Flight Prinzip. Zur Erzeugung des Laserstrahls wird eine Laserdiode mit einer Wellenlänge von 905 nm verwendet. Zum Zeitpunkt der Untersuchungen gab es noch keine Veröffentlichungen, welche die Genauigkeit des Laserscanners näher betrachtet haben. Da diese für diese Arbeit jedoch einen Einfluss haben, wird diese im weiteren Verlauf näher analysiert.



Abbildung 6.1: Abbildung des verwendeten Laserscanners Hokuyo UST-10LX-H01.

6.1.2 Manipulator

Als Manipulator wird der UR5 von Universal Robots verwendet. Es handelt sich um einen sogenannten Leichtbauroboterarm. Er besteht aus insgesamt sechs rotatorischen Achsen. In den Achsen wurden gehäuselose Gleichstrommotoren und sogenannte Exzentergetriebe verbaut. Abbildung 6.2 stellt den Manipulator dar. Durch die Verwendung der Exzentergetriebe und hoch genauer Encoder können die Gelenkstellungen mit hoher Präzision gemessen werden. Jeder ausgelieferte Manipulator wird ab Werk individuell kalibriert, sodass Fehlereinflüsse durch Bauteiltoleranzen und fertigungsbedingte Unsicherheiten nahezu ausgeschlossen werden können. [Lia+18] hat den Fehler des Endeffektors ab Werk zu $2,00\text{ mm}$ bemessen. Der Arbeitsraum des Manipulators hat einen Radius von 85 cm . Die Regelung des Manipulators erfolgt über eine sogenannte Control Box, welche über Ethernet angesteuert werden kann. Für die Kommunikation mit dem Manipulator wird der offizielle ROS-Treiber des Herstellers verwendet. Sämtliche Gelenkstellungen können mit einer Frequenz von 125 Hz ausgelesen werden. Wie in Kapitel 2 beschrieben, kann die Genauigkeit der Gelenkwinkel nach [Ali17] mit $0,011^{\circ}$ angegeben werden.

6.1.3 Referenzsystem

Als Referenzsystem wird ein optisches Kamerasystem der Firma Optitrack genutzt. Insgesamt wurden 8 Optitrack Prime 13 Kameras in Betrieb genommen. Diese erfassen die 3D Posen der am Manipulator und Laserscanner befestigten Infrarot Marker. Die Kameras wurden an einer Traverse befestigt. Die Positioniergenauigkeit im Messraum des Tracking Systems wurde nach der Kalibrierung des Tracking Systems mit $0,1\text{ mm}$ angegeben. Die Infrarot Marker sind entlang einer Ebene etwa 150 mm voneinander entfernt. So ergibt sich eine rotatorische Ungenauigkeit

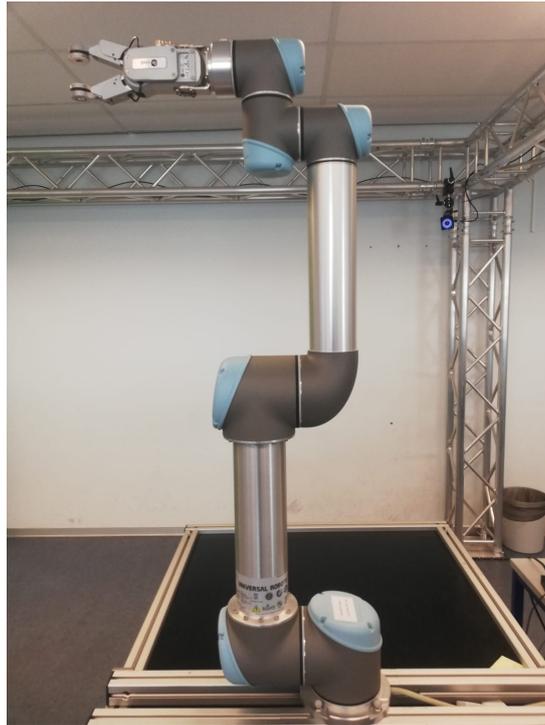


Abbildung 6.2: Abbildung des verwendeten Manipulators UR5 von Universal Robots.

von $\text{asin}\left(\frac{2 \cdot 0,1}{150}\right) = 0,077^\circ$. Abbildung 6.3 stellt das Tracking System und die Marker für die Bestimmung der Referenzkalibrierung dar. Die Referenzkalibrierung wurde ebenfalls mit dem Trackingsystem ermittelt.

6.1.4 Rahmenbedingungen der Versuchsumgebung

Die Versuchsumgebung, in der die realen Experimente stattfanden, wird in Abbildung 6.2 dargestellt. Der Manipulator und der Laserscanner sind über Aluminium Profile fest miteinander verbunden. Alle Experimente wurden in einem von außenlicht abgedunkelten Raum bei künstlichem Licht durchgeführt. So wurde sichergestellt, dass sämtliche Experimente unter ähnlichen Lichtverhältnissen stattfanden. Der Aufbau befand sich mittig in einem Raum. So wurde gewährleistet, dass sämtliche Messpunkte des Laserscanners innerhalb eines Radius von einem Meter nur vom Kalibriertarget stammen können.

6.1.5 Ausgewertete Metriken

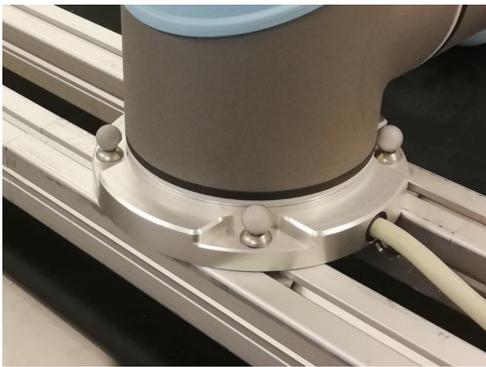
Für die Auswertung der simulierten und realen Experimente werden verschiedene Metriken verwendet. Ziel ist es die Ergebnisse quantitativ und qualitativ bewerten, interpretieren und miteinander vergleichen zu können. Die hierfür verwendeten Metriken werden im Folgenden begründet und definiert.

Verteilung des Messfehlers

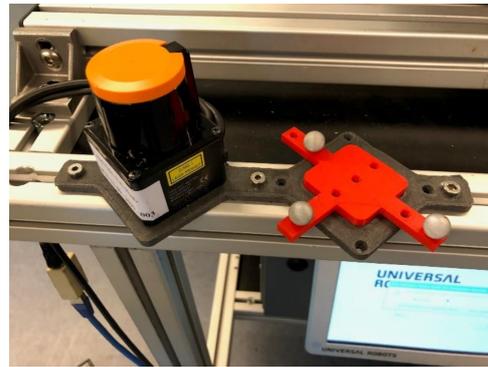
Für die vorgestellte Kalibrierung ist es erforderlich das Fehlermodell des verwendeten Laserscanners zu identifizieren. Hierfür ist es wiederum notwendig die Verteilung des Messfehlers zu



(a) An Traverse fixierte Tracking Kameras zur Bestimmung der Basis-Koordinatensysteme und Pose des Kalibriertargets



(b) Marker zu Bestimmung der Basis des Manipulators



(c) Marker zu Bestimmung der Basis des Laserscanners

Abbildung 6.3: Abbildung des eingesetzten Tracking Systems zur bestimmung der Referenzkalibrierung.

bestimmen. Der Mittelwert des Messfehlers wird im Folgenden mit μ_L und die Standardabweichung mit σ_L bezeichnet.

Detektierung des Kalibriertargets

Im Kern des vorgestellten Kalibrierverfahrens steht die Detektierung des Kalibriertargets. Der detektierte Schnittpunkt der Symmetrieachse des Kalibriertargets entspricht dem Mittelpunkt der Ellipse des sich ergebenden Querschnitts. Dieser ist definiert zu:

$$\mathcal{X}_L^I = \begin{bmatrix} x_L^I & y_L^I \end{bmatrix}^T. \quad (6.1)$$

Der zugehörige Mittelpunkt der Ellipse aus dem Referenzsystem wird bezeichnet als

$$\tilde{\mathcal{X}}_L^I = \begin{bmatrix} \tilde{x}_L^I & \tilde{y}_L^I \end{bmatrix}^T. \quad (6.2)$$

Der absolute Fehler der Detektierung wird definiert als $x_{E,abs}^I = |\tilde{\mathcal{X}}_L^I - \mathcal{X}_L^I|$. Der vorzeichenbehaftete Fehler wird definiert als $x_{E,vz}^I = \tilde{\mathcal{X}}_L^I - \mathcal{X}_L^I$.

Genauigkeit der Kalibrierung

Ein wesentlicher Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit ist die erzielte Genauigkeit der Kalibrierung. Um die Genauigkeit der entwickelten Kalibrierverfahren und des Stand der Forschung zu bestimmen, muss die Abweichung zwischen der jeweils ermittelten Transformation $\hat{\mathcal{H}}_L^B = \mathcal{H}(\hat{\Psi})$ und der Transformation des Referenzsystems $\tilde{\mathcal{H}}_L^B = \mathcal{H}(\tilde{\Psi})$ bestimmt werden. Hieraus wiederum kann die Transformationsmatrix der Abweichung \mathcal{H}_E ermittelt werden:

$$\mathcal{H}_E = \tilde{\mathcal{H}}_L^B \cdot (\hat{\mathcal{H}}_L^B)^{-1} = \left[\begin{array}{ccc|c} R_E & & & P_E \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (6.3)$$

Aus dieser Transformation lassen sich die translatorischen und rotatorischen Abweichungen entlang und um die einzelnen Achsen bestimmen. Die rotatorische Abweichung ergibt sich aus den ZYX-Euler Winkeln der sich ergebenden Rotationsmatrix R_E . Die translatorischen Abweichungen ergeben sich wiederum aus den jeweiligen Komponenten des Vektors P_E . So lassen sich die Fehler-Komponenten der einzelnen Achsen $e_{x,y,z}$ und $e_{\varphi,\vartheta,\psi}$ bestimmen und ermöglichen eine differenzierte Analyse der Kalibriergenauigkeit.

Für eine allgemeine Betrachtung des Fehlers wird außerdem die euklidische Norm der Fehlervektoren für Rotation $e_{|\varphi\vartheta\psi|}$ und Translation $e_{|xyz|}$ bestimmt:

$$e_{x,y,z} = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{bmatrix}, \quad e_{|xyz|} = |e_{x,y,z}|_2$$

$$e_{\varphi,\vartheta,\psi} = \begin{bmatrix} e_\varphi \\ e_\vartheta \\ e_\psi \end{bmatrix}, \quad e_{|\varphi\vartheta\psi|} = |e_{\varphi,\vartheta,\psi}|_2$$

Die Norm des translatorischen Fehlers entspricht dabei dem tatsächlichen Abstand zwischen der Referenztransformation und der ermittelten Transformation. Die Norm des rotatorischen Fehlers lässt sich nicht physikalisch interpretieren und dient lediglich der Vergleichbarkeit unterschiedlicher Kalibrierungen anhand einer einzigen Metrik.

Die simulierten Experimente sollen außerdem statistisch betrachtet werden. Hierfür werden die Mittelwerte μ und Standardabweichungen σ der definierten Fehlermetriken ausgewertet:

$$\mu_i = E(e_i)$$

$$\sigma_i = \sigma(e_i)$$

6.2 Identifikation des Fehlermodells des Laserscanners

Für die realen Experimente wurde der Hokuyo UST-10LX-H01 verwendet. Für die Untersuchung des vorgestellten Kalibrierverfahrens ist es erforderlich die Parameter des Fehlermodells zu bestimmen, um diese bei der Kalibrierung berücksichtigen zu können. Da für den verwendeten Laserscanner zum Zeitpunkt der Untersuchungen keine Veröffentlichungen mit den erforderlichen Daten bestehen, werden diese erstmals im Rahmen dieser Arbeit ermittelt. Das folgende Kapitel umfasst die realen Experimente zur Untersuchung der Genauigkeit und dem Einfluss von Farbe und Material. Der entstehende Fehler eines Messpunktes hängt vom Einfallswinkel des Laserstrahls auf das Messobjekt ab. Dieser variiert bei zylindrischen Objekten entlang der Oberfläche. Daher wurde der Ansatz gewählt die Verteilung des Messfehlers für das gesamte Kalibriertarget zu betrachten. So ist sichergestellt, dass das identifizierte Fehlermodell für die zu untersuchende Geometrie gilt. Die auftretenden Kantenschüsse des Laserscanners werden im anschließenden Kapitel näher betrachtet.

6.2.1 Einfluss von Farbe und Material auf die Messung des Laserscanners

In diesem Experiment wurde der Einfluss der Farbe und des Materials auf die Genauigkeit der Messung bestimmt. Hierfür wurde das in Abbildung 6.4 dargestellte Target mit verschiedenfarbigem Papier umwickelt und die Verteilung des Fehlers aufgenommen. Für das Experiment wurden die Farben blau, grau, orange, rot und weiß variiert. Die gleiche Messung wurde ohne Ummantelung des Kalibriertargets wiederholt. In diesem Fall bestand die reflektierende Oberfläche aus dem verwendeten Filaments des 3D-Druckers.



Abbildung 6.4: Vom End-Effektor gegriffenes Kalibriertarget mit Papierummantelung.

Abbildung 6.5 zeigt die aufgenommenen Verteilungen des Fehlers und in Tabelle 6.1 sind die zugehörigen Mittelwerte und Standardabweichungen der Verteilungen aufgetragen. Es ist

zu erkennen, dass die verschiedenen Farben der Papierummantelung keine deutlichen Unterschiede zueinander aufweisen. Die Farbe hat die Verteilung des Fehlers nicht beeinflusst. Zu sehen ist allerdings, dass das Material einen wesentlichen Einfluss auf die Messung hat. So ist die Verteilung des Kalibriertargets ohne Ummantelung im Vergleich zum Kalibriertarget mit Ummantelung um $2,72 \text{ cm}$ entlang der radialen Achse des Laserscanners verschoben und befinden sich nicht vor den wahren Messpunkten, sondern hinter den wahren Messpunkten.

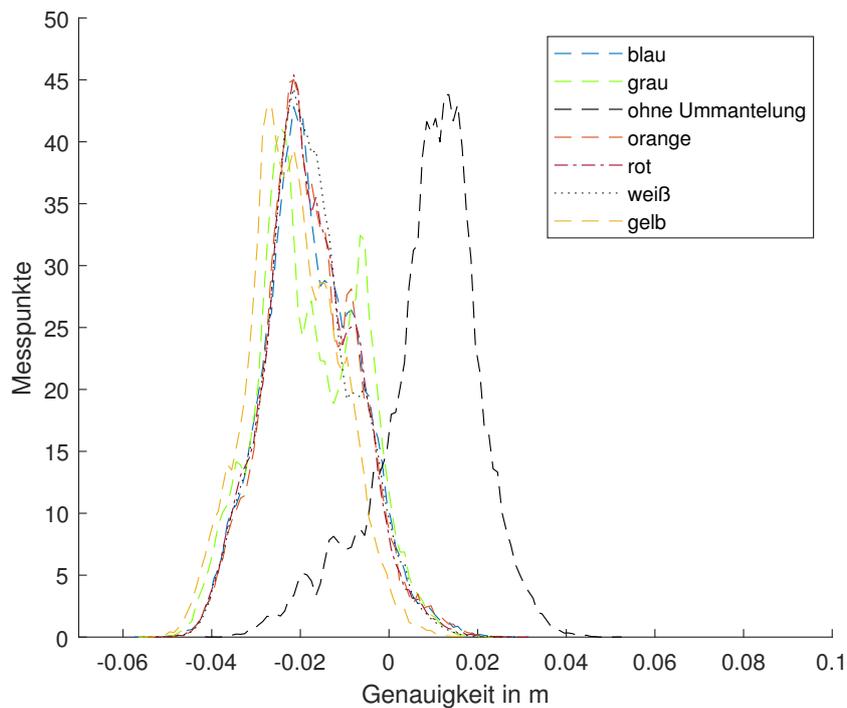


Abbildung 6.5: Verteilungen der Messfehler bei unterschiedlichen Farben sowie ohne Beschichtung des Kalibriertargets. Aufgetragen sind die Anzahl der Messpunkte über der dazugehörigen Genauigkeit.

Tabelle 6.1: Mittelwerte und Standardabweichungen der Messfehler bei unterschiedlichen Farben sowie ohne Beschichtung des Kalibriertargets.

| | μ_L in cm | σ_L in cm |
|--------------------|---------------|------------------|
| blaue Ummantelung | -1,74 | 1,07 |
| graue Ummantelung | -1,79 | 1,16 |
| ohne Ummantelung | 0,89 | 1,17 |
| orange Ummantelung | -1,75 | 1,05 |
| rote Ummantelung | -1,78 | 1,04 |
| weiße Ummantelung | -1,78 | 1,03 |
| gelbe Ummantelung | -2,16 | 1,01 |

In einem weiteren Experiment wurde dieser Effekt bei der Detektierung des verwendeten Roboterarms untersucht. Hierfür wurde das dritte Manipulatorglied mit und ohne Papierummantelung im Laserscan detektiert. Es wurden die Entfernungen zwischen dem Laserscanner und den

entstehenden Messpunkten des Manipulatorgliedes mit und ohne Ummantelung aufgenommen und diese gegenübergestellt. Abbildung 6.6 zeigt die Verteilung der Abstände der aufgenommenen Messpunkte.

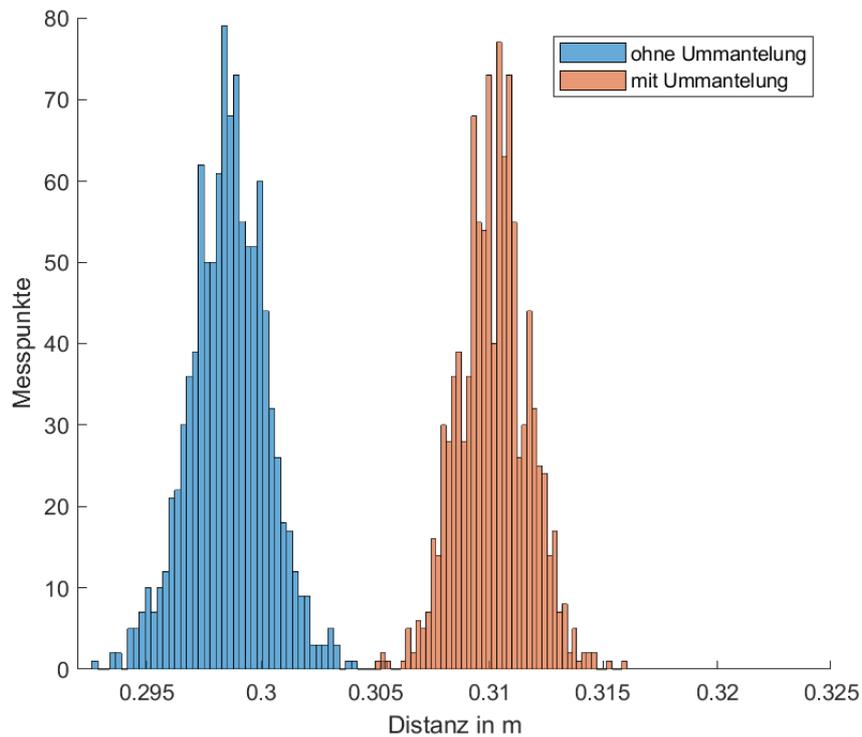


Abbildung 6.6: Vergleich der Messpunkte mit und ohne Ummantelung beim Messen des Roboterarms mit dem Laserscanner. Aufgetragen sind die Anzahl der Messpunkte über der dazugehörigen Distanz zum Laserscanner.

Auch hier ist der Einfluss des Materials zu erkennen. So ist beim Manipulator ohne Ummantelung der Mittelwert der Messwerte um $1,158 \text{ cm}$ in Richtung des Laserscanners verschoben.

Ergebnis des Experiments

Dieses Experiment zeigt, dass das Material des Kalibriertargets die Verteilung des Messfehlers beeinflusst. Die Reflektivität des Materials hat einen direkten Einfluss auf den Mittelwert der sich ergebenden Verteilung, die Standardabweichung bleibt unbeeinflusst. Für eine Korrektur der Messwerte ist die Materialabhängigkeit der Messungen zu berücksichtigen. Es hat sich gezeigt, dass die Farbe des Materials hingegen keinen merklichen Einfluss auf die Messungen hat. Für das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren ergibt sich also die Anforderung die materialabhängige Verteilung des Fehlers vor der Kalibrierung zu bestimmen. Außerdem ergibt sich die Frage welchen Einfluss eine unberücksichtigte Verschiebung auf die ermittelte Genauigkeit hat. Dieser Frage wird in Kapitel 6.6 nachgegangen.

6.2.2 Verteilung des Messfehlers

Wie in Kapitel 3 beschrieben wird für das Fehlermodell des Laserscanners ein probabilistisches Modell genutzt. Es wird wie in [FAG15] und [FGA15] vorgeschlagen (siehe Kapitel 2) von einer Normalverteilung für sämtliche Einfallswinkel für die Kalibrierung ausgegangen. Hierfür ist es notwendig den Mittelwert und die Standardabweichung der Messpunkte zu bestimmen.

Für diese Experimente wurde ein zylindrisches Kalibriertarget (siehe Abbildung 6.4) innerhalb des Arbeitsraumes des Manipulators in verschiedenen Positionen und Orientierungen gemessen. Das Kalibriertarget hat einen Durchmesser von $7,5 \text{ cm}$, welches dem Durchmesser des dritten Manipulatorgliedes des UR5 entspricht. Für die folgenden Messungen wurde es mit weißem, mattem Papier ummantelt. Es wurde in einem 3D-Druck Verfahren entworfen und mit Markern versehen, um Referenzposen zu ermitteln. Die idealen Messpunkte des sich ergebenden Querschnitts in der Messebene des Laserscanners konnten so bestimmt und mit den zugehörigen realen Messungen verglichen werden.

Für die Messungen wurden sowohl der Eintrittswinkel zwischen Kalibriertarget und Messebene des Laserscanners, die Entfernung zwischen Kalibriertarget und Laserscanner als auch der Messwinkel vom Laserscanner zum Kalibriertarget variiert. Tabelle 6.2 stellt eine Übersicht der Parametervariationen der Experimente dar.

Tabelle 6.2: Parametervariation der Experimente zur Ermittlung der Genauigkeit des Laserscanners

| | | | |
|-----------------|-----------|------------|-------|
| Entfernung | 15 cm | 30 cm | 45 cm |
| Messwinkel | 0° | 90° | |
| Eintrittswinkel | 0° | 45° | |

Zunächst wurden die Messungen aller Parametervariationen kumuliert und die sich ergebende Verteilung ausgewertet. Abbildung 6.7 zeigt das Ergebnis. Die optische Prüfung ergibt, dass die Verteilung annähernd einer Normalverteilung entspricht. Die Standardabweichung wurde bestimmt zu $1,38 \text{ cm}$ und der Mittelwert zu $-1,66 \text{ cm}$.

Anschließend wurde die Verteilung des Fehlers für die einzelnen Parametervariationen untersucht. Die Abbildungen 6.8 und 6.9 zeigen die Verteilungen der Messfehler für die verschiedenen Variationen der Parameter. Es werden jeweils die Ergebnisse der Experimente bei gleichem Eintrittswinkel des Kalibriertargets und unterschiedlichen Entfernungen und Messwinkeln aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die einzelnen Verteilungen der Messfehler unterscheiden. Ebenfalls ist zu erkennen, dass sich nicht jede Verteilung durch eine Verteilung entsprechend der Gauss-Kurve beschreiben lässt.

Abbildung 6.8 zeigt die Ergebnisse bei einem Eintrittswinkel des Kalibriertargets von 0° . Werden die unterschiedlichen Abstände und Messwinkel quantitativ miteinander verglichen, lässt sich feststellen, dass sich die berechneten Mittelwerte und Standardabweichungen kaum unter-

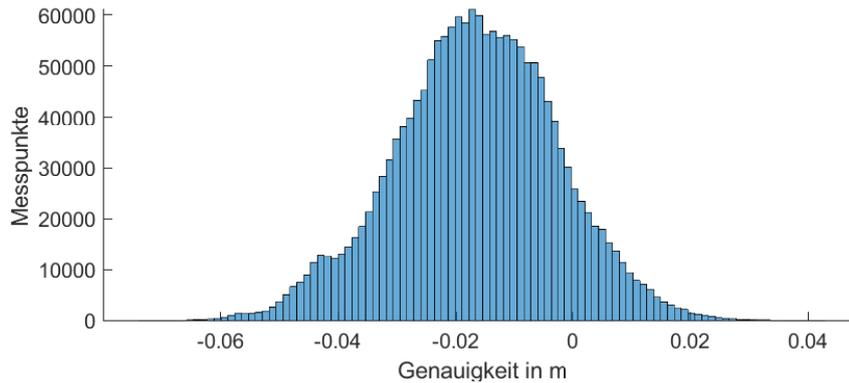


Abbildung 6.7: Kumulierte Verteilung des Messfehlers über alle Parametervariationen. Aufgetragen sind die Anzahl der Messpunkte über der dazugehörigen Genauigkeit.

scheiden. Allerdings lassen die aufgetragenen Verteilungen darauf schließen, dass sie sich nicht grundsätzlich mit einer Normalverteilung beschreiben lassen. Die Messungen in 45 cm Entfernung zum Laserscanner und die Messung in einer Entfernung von 30 cm zum Laserscanner bei einem Messwinkel von 90° zeigen eine Abweichung zur Normalverteilung. Die Kummulierung der Messfehler dieser Messungen hingegen ergibt eine Normalverteilung.

Abbildung 6.9 zeigt die Ergebnisse bei einem Eintrittswinkel des Kalibriertargets von 45° . Im Gegensatz zu den Ergebnissen aus Abbildung 6.8 lassen sich lediglich die Messungen bei 30 cm Entfernung zum Laserscanner nicht als Normalverteilung beschreiben. Es fällt allerdings auf, dass sich die Mittelwerte der aufgenommenen Messfehler zwischen einem Messwinkel von 0° oder 90° unterscheiden. So ist der mittlere Fehler bei einem Messwinkel von 90° größer als bei 0° .

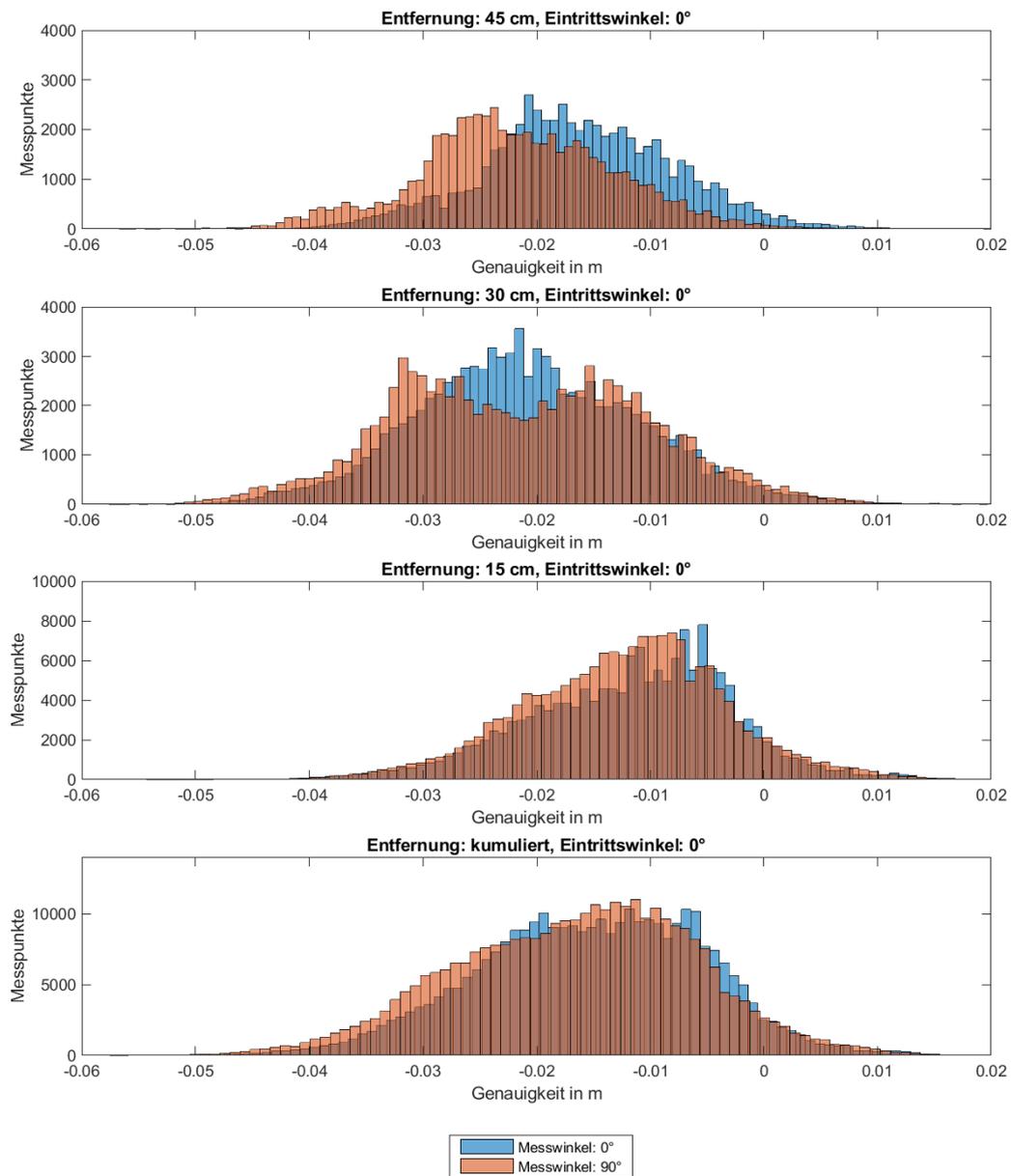


Abbildung 6.8: Verteilung des Messfehlers bei einem Eintrittswinkel von 0° und verschiedenen Entfernungen und Messwinkeln zum Laserscanner.

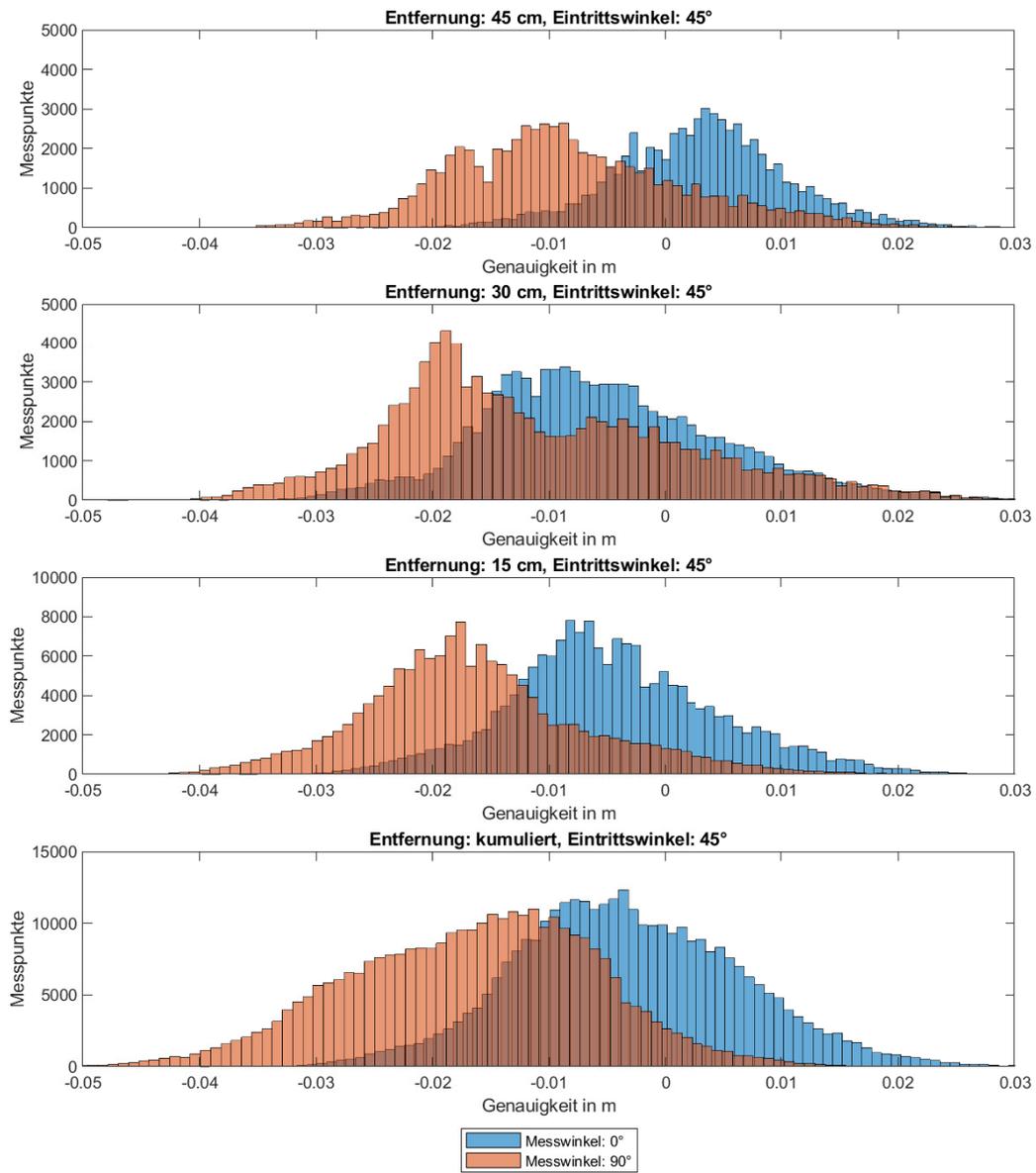


Abbildung 6.9: Verteilung des Messfehlers bei einem Eintrittswinkel von 0° und verschiedenen Entfernungen und Messwinkeln zum Laserscanner.

Vermutete Ursachen für die Fehlerverteilung der Messpunkte

Der beobachtete Effekt, dass die Fehlerverteilungen der einzelnen Messposen keine Normalverteilung ergeben, die Summe jedoch annähernd einer Normalverteilung entspricht, lässt sich anhand des *Zentralen Grenzwertsatz der Statistik* erklären (siehe Kapitel 2). Im Folgenden soll die vermutete Ursache für die abweichenden Fehlerverteilungen der einzelnen Messposen diskutiert werden.

Die resultierende Fehlerverteilung ist abhängig vom Abstand zu Laserscanner, vom Messwinkel des Laserscanners und vom Eintrittswinkel des Kalibriertargets. Durch die Breite des Laserstrahls wird nicht ein einzelner Messpunkt reflektiert, sondern der sich ergebene Querschnitt wird reflektiert und schließlich gemittelt. Durch die Mittelung eines reflektierten Querschnitts ergibt sich ein Fehler, sofern gekrümmte Oberflächen reflektiert werden. Dieser Fehler ist von der Krümmung des vom Laserstrahl getroffenen Querschnitts abhängig.

Bei dem vorliegenden Experiment wird ein Zylinder bei verschiedenen Eintrittswinkeln und Entfernung vom Laserscanner erfasst. Dies erklärt die Abhängigkeit der Fehlerverteilung vom Abstand und vom Eintrittswinkel. Für die Unterschiede durch die variierten Messwinkel des Laserscanners ist dies keine Erklärung.

Auf Nachfrage an den Hersteller wurde die Information zur Verfügung gestellt, dass der Querschnitt des ausgestrahlten Lasers nicht rund ist, sondern elliptisch. Dadurch, dass die Rotation des Laserstrahls mit einem Spiegel verursacht wird, rotiert die Ellipse bei einer 360 °-Drehung des Laserscanners zweimal um sich selbst. Abbildung 6.10 stellt die sich ergebenden Haupt- und Nebenachse des elliptischen Querschnitts des Laserstrahls dar. Hierdurch kann die Abhängigkeit der Fehlerverteilung vom Messwinkel des Laserscanners erklärt werden.

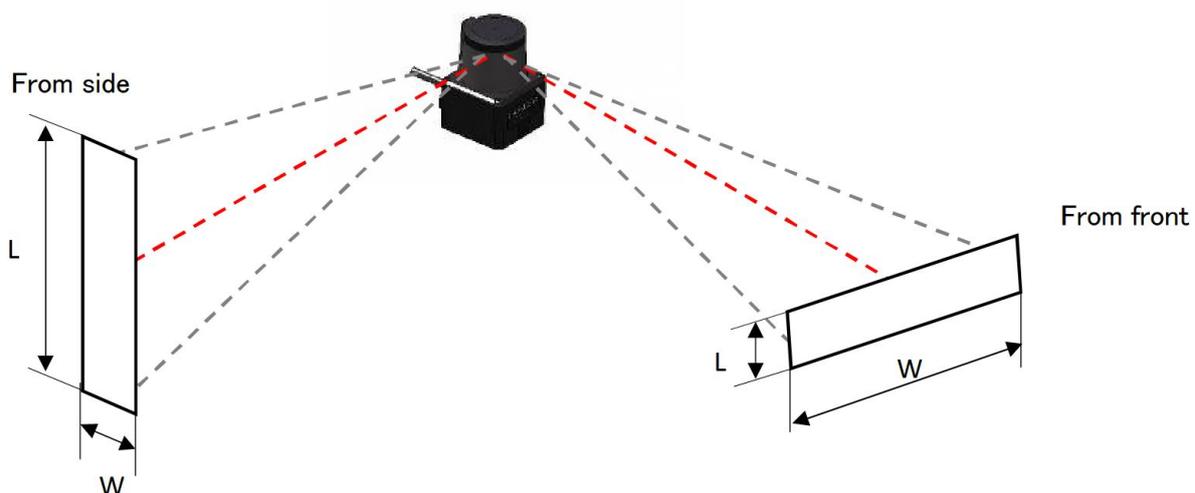


Abbildung 6.10: Rotation der Haupt- und Nebenachse des Laserstrahl entlang der Messwinkel. Vom Hersteller Hokuyo bereitgestellte Grafik.

Ergebnis des Experiments

Die Untersuchungen haben ergeben, dass sich die kumulierten Messfehler annähernd als Nor-

malverteilung mit einem Mittelwert von $\mu_L = -1,66 \text{ cm}$ und einer Standardabweichung von $\sigma_L = 1,38 \text{ cm}$ beschreiben lassen. Die einzelnen Konfigurationen hingegen zeigen Fehlerverteilungen, die zum größten Teil von der Normalverteilung abweichen und sich teilweise im Mittelwert unterscheiden. Weiterhin wird deutlich, dass die ermittelte Standardabweichung des zur Verfügung stehenden Laserscanners relativ groß ist im Verhältnis zur detektierenden Zylindergeometrie. So beträgt der Durchmesser des Zylinders $7,5 \text{ cm}$ und das 3-Sigma-Konfidenzintervall des Messfehlers einzelner Messpunkte ergibt sich zu $8,28 \text{ cm}$.

Da die angenommene Fehlerverteilung in großem Maße von der tatsächlichen Fehlerverteilung abweicht, ergeben sich für den entwickelten Ansatz einige interessante Fragen, die in den kommenden Experimenten untersucht werden sollen:

- Fragen bezüglich der Detektierung des Kalibriertargets
 - Wie wirkt sich die vereinfachte Annahme der Normalverteilung auf die Schätzung der Standardabweichung der Detektierung aus (siehe Kapitel 6.5)?
 - Welche Genauigkeit ergibt sich bei der Detektierung des Kalibriertargets trotz des hohen Messfehlers relativ zur Zylindergeometrie (6.3.2, 6.4.3 und 6.5)?
 - Welche Standardabweichung ergibt sich für die Detektierung und wie ist das Verhältnis zur relativ hohen Standardabweichung der einzelnen Messpunkte (siehe Kapitel 6.3.2)?
 - Welchen Einfluss hat eine unberücksichtigte Verschiebung des Messfehlers aufgrund des Materials des Kalibriertargets auf die ermittelte Genauigkeit der Detektierung (siehe Kapitel 6.6)?
 - Wie könnte der Ansatz zur Detektierung erweitert werden, um die identifizierten Fehlerverteilungen zu berücksichtigen (siehe Kapitel 7)?
- Fragen bezüglich der Kalibrierung
 - Wie wirkt sich die vereinfachte Annahme der Normalverteilung auf die Verbesserung der Genauigkeit der Kalibrierung im realen Experiment aus (siehe Kapitel 6.5)?
 - Welche Genauigkeit ergibt sich bei der Kalibrierung trotz des hohen Messfehlers des zur Verfügung stehenden Laserscanners (siehe Kapitel 6.4.3 und 6.5)?
 - Welchen Einfluss hat eine unberücksichtigte Verschiebung des Messfehlers aufgrund des Materials des Kalibriertargets auf die ermittelte Genauigkeit der Kalibrierung (siehe Kapitel 6.6)?
 - Wie könnte der Ansatz zur Kalibrierung erweitert werden, um die identifizierten Fehlerverteilungen zu berücksichtigen (siehe Kapitel 7)?

6.3 Detektierung des Kalibriertargets

In diesem Kapitel werden die Methoden zur Detektierung des Querschnitts des Kalibriertargets im Laserscan näher untersucht. Es werden die Constant Distance Methode (CDM) aus [Tam+10], die Fast Guaranteed Ellipse Estimation Methode (FGEE) aus [SCH15] und das in

[CL16] eingeführte und in dieser Arbeit erweiterte Verfahren, wie in Kapitel 3 beschrieben, gegenübergestellt. Das in dieser Arbeit erweiterte Verfahren wird im Folgenden mit MLE bezeichnet. Das CDM und das MLE werden selbst implementiert. Für das FGEE wird die vom Autor selbst zur Verfügung gestellte Implementierung aus [Szp17] genutzt. Zunächst werden die Verfahren in der Simulation evaluiert und die Ergebnisse bezüglich der Genauigkeit der Detektierung miteinander verglichen. Schließlich werden reale Experimente durchgeführt.

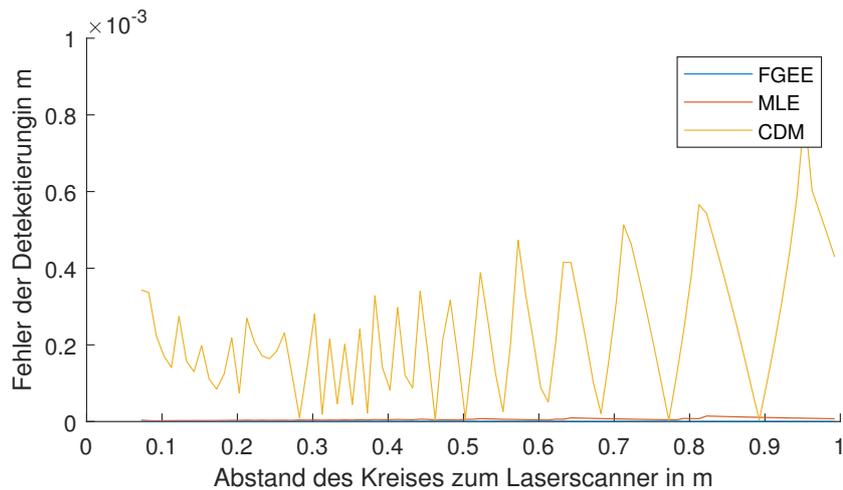
6.3.1 Simulation - Detektierung anhand von Kreis- und Ellipsen-Ausschnitten

In diesem Kapitel werden die Verfahren in der Simulation gegenübergestellt. Hierfür werden Ausschnitte von Kreisen und Ellipsen erzeugt und die Abweichung zum geschätzten Mittelpunkt bewertet. Die Kreisgeometrie wird als bekannt vorausgesetzt, da die Geometrie des verwendeten Kalibriertargets ebenfalls bekannt ist. Die CDM und das MLE nutzen den bekannten Kreisdurchmesser bei der Detektierung. Das FGEE, welches auf der algebraischen Distanz beruht, kann die bekannte Kreisgeometrie nicht als zusätzliche Information verwenden.

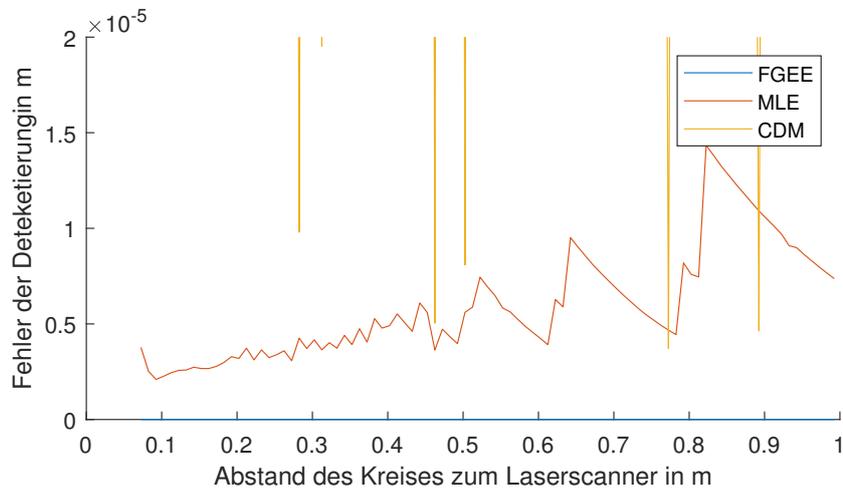
Es wird das Verhalten mit und ohne Messfehler sowie das Verhalten bei sinkender Anzahl an Messpunkten untersucht. Hierfür werden Messpunkte auf Kreisausschnitten erzeugt, welche die Abtastung des realen Laserscanners für verschiedene Abstände imitieren. Für diese Experimente wird die Winkelauflösung des Laserscanners auf $0,125^\circ$ festgelegt, da diese Winkelauflösung mit dem Laserscanner der realen Experimente übereinstimmt. Der Durchmesser des Kreises wird auf $7,5\text{ cm}$ festgelegt, da dies dem Durchmesser des verwendeten Manipulatorgliedes entspricht. Für die Experimente werden sowohl Messungen mit idealen Messpunkten als auch mit fehlerbehafteten Messpunkten durchgeführt. Die Fehler bei den fehlerbehafteten Messpunkten werden als mittelwertfreie Normalverteilung mit einer Standardabweichung von $1,38\text{ cm}$ simuliert. Diese Standardabweichung entspricht der ermittelten Abweichung des verwendeten Laserscanners (siehe Kapitel 6.2).

6.3.1.1 Detektierung von idealen Kreisausschnitten

Zunächst werden halbe Kreisausschnitte detektiert. Abbildung 6.11 zeigt eine Auswertung des Experiments *ohne Messfehler* über verschiedene Abstände hinweg. Es wird der absolute Detektierungsfehler ausgewertet. Es ist zu erkennen, dass die Schätzung der drei Verfahren für die Messungen ohne Messpunkte einen sehr geringen Messfehler aufweisen. Diese liegt für jedes Verfahren und für jeden Abstand unter 1 mm . Es ist außerdem zu sehen, dass die Schätzung mit dem CDM-Verfahren einen deutlich größeren Fehler aufweist als die der beiden auf Optimierung basierenden Verfahren. So liegt der mittlere Fehler der CDM bei $0,2\text{ mm}$ mit einem Maximalwert von $0,8\text{ mm}$. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die CDM einen Korrekturwert verwendet, der von einem idealen Kreis mit unendlich vielen Punkten ausgeht, die Simulation jedoch eine endliche Anzahl an Messpunkten erzeugt und die Winkelauflösung des Laserscanners imitiert. Die Verfahren zur Detektierung der Ellipse hingegen, basieren auf einer Optimierung. Der alternierende Verlauf der Genauigkeitsanalyse ist auf die sprunghaft sinkende Anzahl an Messpunkten auf dem Kreisausschnitt zurückzuführen.



(a) Detektierungsfehler dargestellt im Submillimeter-Bereich.



(b) Detektierungsfehler dargestellt im Mikrometer-Bereich.

Abbildung 6.11: Vergleich der Detektierungsfehler der drei Detektierungsmethoden CDM, FGEE und MLE für Messungen von Kreisen ohne Messunsicherheit in der Simulation.

Außerdem ist zu erkennen, dass das MLE einen größeren Fehler aufweist als das FGEE. Der mittlere Fehler des MLE liegt bei $6 \mu\text{m}$ und der mittlere Fehler des FGEE liegt bei $0,0006 \mu\text{m}$. Dieser geringe Fehler ist darauf zurückzuführen, dass es sich um ideale Messpunkte ohne Messfehler handelt und die jeweils zugrundeliegenden Optimierungen ein Modell in perfekte Datenpunkte passen. Der geringere Fehler des FGEE lässt sich dadurch erklären, dass für die zugrundeliegende Sampson-Distanz eine explizite Lösung des Optimierungsproblems vorhanden ist. Das MLE wird hingegen mit einem iterativen Optimierungsverfahren numerisch gelöst. Ohne Messfehler können alle Verfahren die Kreise anhand der gemessenen Teilausschnitte detektieren und führen zu Schätzungen des Mittelpunktes innerhalb des Querschnitts des Kalibriertargets.

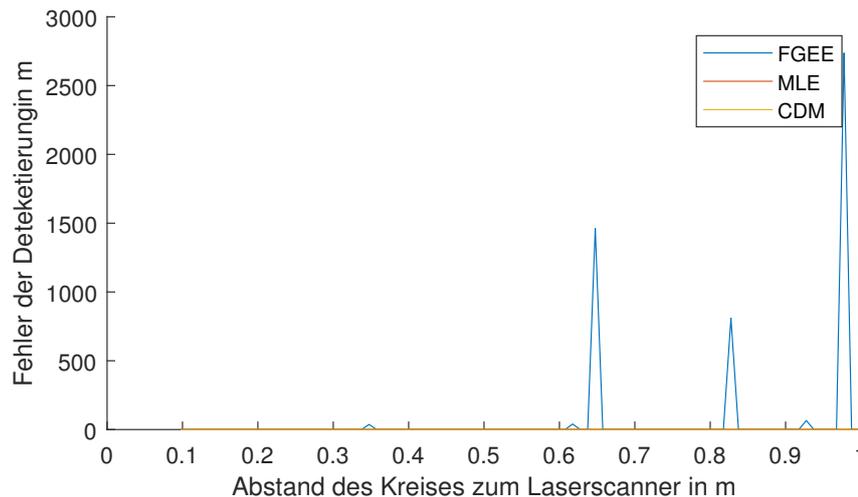
Ergebnis des Experiments

Dieses Experiment hat ergeben, dass das CDM den Mittelpunkt anhand idealer Messpunkte des Kreises mit dem größten absoluten Fehler detektiert. Die Ursache wird darin vermutet, dass keine Optimierung genutzt wird und die Verwendung einer Anzahl endlicher, diskreter Messpunkte einen systematischen Fehler verursacht. In einem späteren Experiment in diesem Kapitel wird der systematische Fehler deswegen genauer untersucht. Für ideale Messpunkte weist das FGEE außerdem einen geringeren absoluten Fehler auf als das in dieser Arbeit vorgestellte MLE.

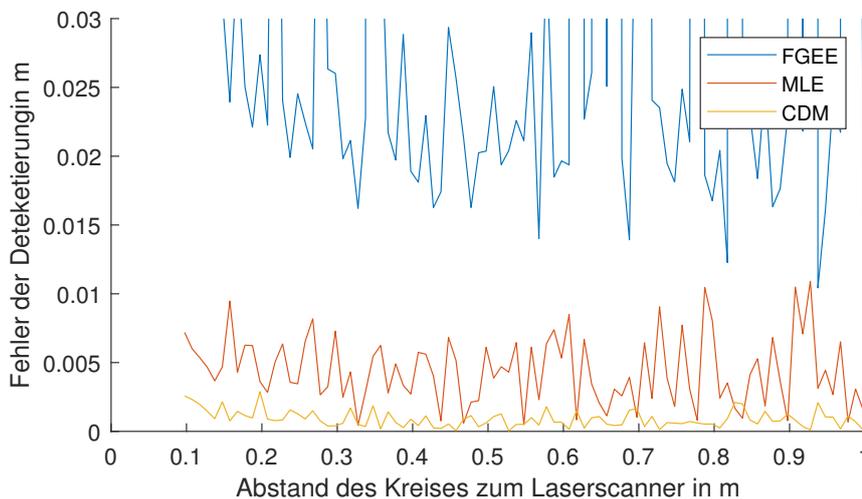
6.3.1.2 Detektierung von fehlerbehafteten Kreisausschnitten

Abbildung 6.12 zeigt eine Auswertung der Experimente *mit Messfehler* über verschiedene Entfernungen hinweg. Dieses Experiment dient zum Vergleich mit dem vorangegangenen Experiment und unterscheidet sich nur darin, dass Messfehler mit $\sigma_L = 6,5 \text{ mm}$ auf die selben Messpunkte beaufschlagt worden sind. Es ist ein deutlicher Unterschied zu den vorherigen Ergebnissen zu erkennen. Die CDM zeigt über alle Distanzen einen mittleren Fehler von $0,9 \text{ mm}$ bei einer Standardabweichung von $0,6 \text{ mm}$. Damit weist es den geringsten Fehler und die geringste Streuung aller verwendeten Verfahren auf. Für das MLE wurde ein mittlerer Fehler von $4,4 \text{ mm}$ und eine Standardabweichung von $2,2 \text{ mm}$ ermittelt. Auffallend ist der stark alternierende und relativ große Fehler des FGEE. Teilweise werden Kreise detektiert, die einen Detektierungsfehler des Mittelpunktes von bis zu 2736 m aufweisen. So liegt der mittlere Fehler des FGEE im Meter-Bereich bei $56,65 \text{ m}$ mit einer Streuung von $333,3 \text{ m}$. Die Auswertung hat ergeben, dass $18,7\%$ aller Detektierungen mittels FGEE einen Fehler größer als $47,8 \text{ mm}$ aufweisen. Eine Analyse ohne Berücksichtigung dieser Ausreißer führt zu einem mittleren Fehler von $22,2 \text{ mm}$. Auch diese weisen also einen deutlich größeren Fehler auf, als mit dem MLE oder dem CDM. So wurde der kleinste Fehler des FGEE zu $10,43 \text{ mm}$ bestimmt und der größte Fehler des MLE zu $10,91 \text{ mm}$. Da für das FGEE die Matlab-Implementierung des Autors [Szp17] verwendet wurde ist ein Implementierungsfehler auszuschließen.

Abbildung 6.13 zeigt beispielhaft eine Messung mit Messfehlern, die zu einer fehlerhaften Detektierung durch das FGEE führt. Dies gibt Rückschluss auf die Ursache des Verhaltens des FGEE. Es ist zu erkennen, dass die vom FGEE geschätzte Ellipse mit einem sehr engen Ellipsenbogen im Teilausschnitt der Messung liegt. Die so geschätzte Ellipse hat eine so große Hauptachse, dass der Mittelpunkt der Ellipse weit verschoben wird. Da nur ein Teilausschnitt des Kreises gemessen wird und der Messfehler relativ groß ist im Verhältnis zur Kreisgeometrie (siehe Kapitel 6.2.2) ergibt sich eine völlig verzerrte Ellipse als optimales Ergebnis. Dieses Problem besteht für das MLE nicht. Aufgrund der zugrundeliegenden geometrischen Repräsentation der Ellipse wird der gegebene Kreisdurchmesser als Information genutzt und reduziert den Raum möglicher Lösungen. Die Verwendung der Information des bekannten Kreisdurchmessers ermöglicht Schätzungen des Kreismittelpunktes, die innerhalb des Querschnitts des Zylinders liegen, auch wenn nur ein Teilausschnitt des Kreises detektiert werden kann und der Messfehler der einzelnen Messpunkte relativ groß ist im Vergleich zur Kreisgeometrie. Weiterhin führt die Nutzung der geometrischen Repräsentation dazu, dass alle Bereiche der zu detektierenden Ellipse gleich gewichtet werden und eine Verzerrung durch eine zu hohe Ge-



- (a) Dieser Graph veranschaulicht die teilweise unplausiblen Ergebnisse des FGEE, das den Mittelpunkt in einer Entfernung von über 1000 m zum wahren Mittelpunkt detektiert.



- (b) Dieser Graph veranschaulicht die Ergebnisse in einem Bereich bis zu 3 cm Abweichung vom tatsächlichen Mittelpunkt.

Abbildung 6.12: Distanzen der geschätzten Mittelpunkte zum idealen Mittelpunkt der verschiedenen Detektierungsmethoden für unterschiedliche Abstände zum Laserscanner.

wichtung von Bereichen mit starker Krümmung nicht auftreten kann.

Ergebnis des Experiments

Dieses Experiment hat gezeigt, dass das FGEE aufgrund des relativ großen Messfehlers im Verhältnis zur Zylindergeometrie nicht geeignet ist den Mittelpunkt zu detektieren. Das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren kann den Mittelpunkt hingegen detektieren. Für kreisförmige Querschnitte des Zylinders zeigt sich, dass das CDM einen geringeren Fehler aufweist als das vorgestellte MLE. Bei einer 3-Sigma-Umgebung von $3 \cdot 2 \cdot \sigma_L = 19,95 \text{ cm}$ liegt der vom CDM verursachte mittlere absolute Fehler bei $0,9 \text{ mm}$ und der vom MLE verursachte Fehler liegt bei $2,2 \text{ mm}$.

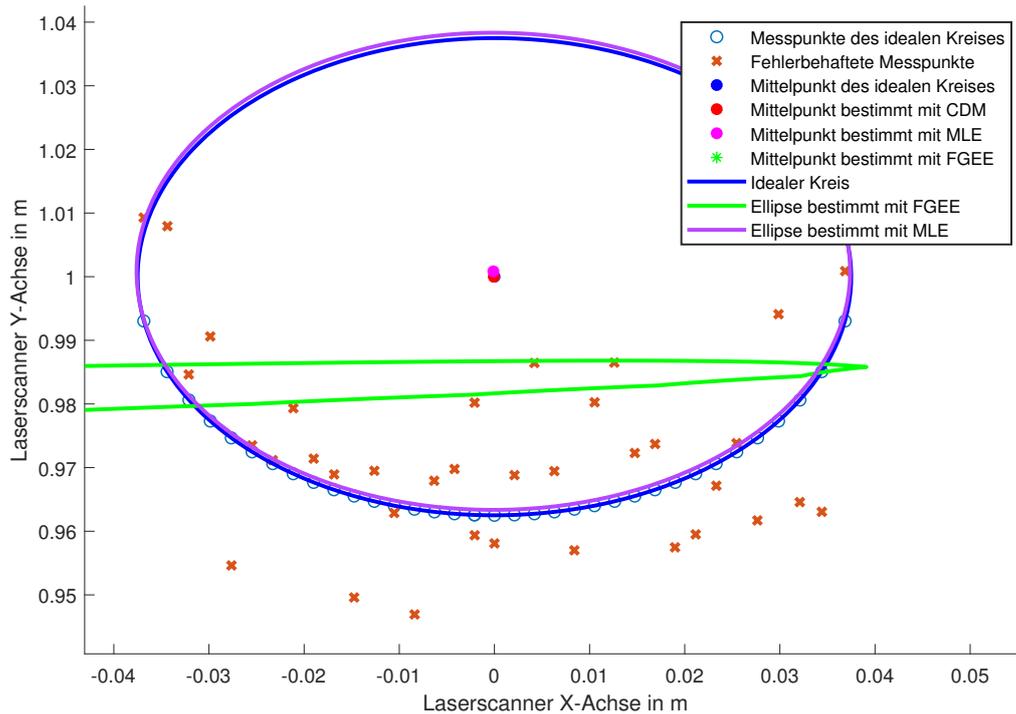


Abbildung 6.13: Beispielhafte Detektierung des Kreises anhand fehlerbehafteter Messpunkte mit den unterschiedlichen Verfahren CDM, FGEE und MLE.

6.3.1.3 Statistische Auswertung der Detektierung von fehlerbehafteten Kreis- und Ellipsen-Ausschnitten

Für eine differenziertere Gegenüberstellung der drei Verfahren werden diese in einem weiteren Experiment anhand einer Monte-Carlo Simulation statistisch gegenübergestellt und auch die Detektierung von Ellipsen betrachtet. Für die drei Entfernungen zum Laserscanner 15, 30 und 45 cm werden jeweils 51 Kreise und Ellipsen detektiert und der Abstand zum idealen Mittelpunkt ausgewertet. Die Standardabweichung des Messfehlers wird auf $\sigma_L = 6,5 \text{ mm}$ festgelegt. Es wird jeweils der Mittelwert des absoluten Fehlers, die Standardabweichung des absoluten Fehlers und der prozentuale Anteil der Ausreißer bestimmt. Hierfür werden Ellipsen definiert mit einer Hauptachsen-Länge von $10,61 \text{ cm}$ und einer Nebenachsen-Länge von $7,5 \text{ cm}$. Dies entspricht dem Querschnitt eines Kalibriertargets mit einem Durchmesser von $7,5 \text{ cm}$ bei einem Eintrittswinkel von 45° in die Messebene des Laserscanners.

Tabelle 6.3 zeigt die Zusammenfassung der Ergebnisse. Es ist zu erkennen, dass sich die Ergebnisse der einzelnen Verfahren deutlich voneinander unterscheiden. Das CDM weist den geringsten Fehler bei der Detektierung von Kreisen auf. Dieser liegt im Mittel über alle Distanzen bei $1,182 \text{ mm}$. Das FGEE weist mit $24,730 \text{ mm}$ die schlechteste Genauigkeit bei der Detektierung von Kreisen auf und das MLE hat einen mittleren Fehler von $5,360 \text{ mm}$. Für die Detektierung von Ellipsen lässt sich hingegen feststellen, dass das MLE die höchste Genauigkeit aufweist. Über alle Distanzen hinweg ergibt sich ein mittlerer Fehler von $3,258 \text{ mm}$. Im Vergleich hierzu erzielt das CDM einen mittleren Fehler von $15,436 \text{ mm}$ und das FGEE einen

mittleren Fehler von 33,012 mm .

Weiterhin ist zu sehen, dass die Standardabweichung des Fehlers beim CDM über alle Messungen hinweg zwischen 0,417 und 0,499 mm liegt und damit die geringste Schwankung aufweist. Die geringe Standardabweichung des CDM lässt sich darauf zurückführen, dass das CDM anhand des Mittelwertes berechnet wird. Die Bestimmung des Mittelwertes führt dazu, dass die Standardabweichung des Mittelwertes mit zunehmender Anzahl an Messpunkten abnimmt. Die Standardabweichung des MLE liegt zwischen 1,599 und 2,052 mm und die Standardabweichung des FGEE schwankt zwischen den Werten 2,118 und 3,302 mm .

Für alle Experimente führt das FGEE zu der größten Anzahl an Ausreißern. Das CDM ergibt keine Ausreißer und das MLE hat mit 1,96% einen einzigen Ausreißer bei einer Entfernung von 45 cm zum Laserscanner ergeben. Außerdem lässt sich feststellen, dass für alle Verfahren die Entfernung zwischen 15 und 45 cm keinen erheblichen Einfluss auf die erzielte Genauigkeit erschließen lässt.

Tabelle 6.3: Stochastischer Fehler der Detektierung der Kreis- und Ellipsenmittelpunkte für das CDM, FGEE und MLE.

| | | Kreis | | | Ellipse | | |
|------|------------------|----------|-------------|--------|----------|-------------|--------|
| | | μ/mm | σ/mm | $o/\%$ | μ/mm | σ/mm | $o/\%$ |
| CDM | 15 cm Entfernung | 1,174 | 0,454 | 0,00 | 15,420 | 0,417 | 0,00 |
| | 30 cm Entfernung | 1,177 | 0,499 | 0,00 | 15,448 | 0,439 | 0,00 |
| | 45 cm Entfernung | 1,194 | 0,421 | 0,00 | 15,440 | 0,433 | 0,00 |
| FGEE | 15 cm Entfernung | 25,064 | 3,302 | 13,73 | 34,219 | 2,542 | 3,92 |
| | 30 cm Entfernung | 24,800 | 2,311 | 13,73 | 31,042 | 3,150 | 3,92 |
| | 45 cm Entfernung | 24,325 | 2,118 | 5,88 | 33,774 | 2,867 | 1,96 |
| MLE | 15 cm Entfernung | 5,152 | 1,992 | 0,00 | 3,494 | 2,052 | 0,00 |
| | 30 cm Entfernung | 5,510 | 1,781 | 0,00 | 3,130 | 1,968 | 0,00 |
| | 45 cm Entfernung | 5,419 | 1,599 | 0,00 | 3,149 | 1,778 | 1,96 |

Da das CDM anhand einer Korrektur des Mittelwertes einen Kreismittelpunkt bestimmt, wirkt sich bei der Ellipsendetektierung der systematische Fehler größer aus als bei der Detektierung von Kreismittelpunkten (siehe Kapitel 3.2.2). Das MLE detektiert die Ellipse hingegen mit einem geringeren Fehler. Da das MLE jedoch auf einem Optimierungsverfahren basiert und das CDM auf der Bestimmung des Mittelwertes, ist die Standardabweichung des CDM-Fehlers kleiner. Es hat sich gezeigt, dass das simple CDM für die Detektierung von Kreisen besser geeignet ist als das auf Optimierung basierende Verfahren. Das FGEE erzeugt für jedes Experiment den größten Fehler, die größte Standardabweichung und die größte Anzahl an Ausreißern. Es zeigt sich für große Messfehler relativ zur Ellipsen-Geometrie bei Teilausschnitten von Kreisen oder Ellipsen als ungeeignet.

Ergebnis des Experiments

Die statistische Auswertung der Detektierung von Kreisen und Ellipsen hat ergeben, dass das FGEE in beiden Fällen den größten Fehler und die größte Anzahl an Ausreißern aufweist. Das

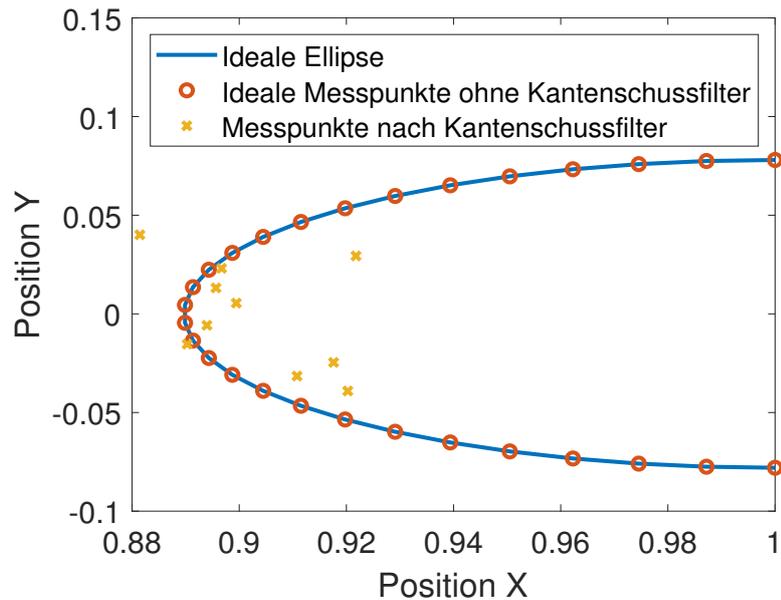
CDM detektiert Kreise mit dem kleinsten mittleren Fehler von $1,182 \text{ mm}$ und das vorgestellte MLE detektiert Kreise mit einem mittleren Fehler von $5,360 \text{ mm}$. Für Ellipsen hingegen weist das vorgestellte Verfahren mit $3,258 \text{ mm}$ den geringsten Fehler auf. Das CDM erzielt aufgrund des systematischen Fehlers einen mittleren Fehler von $15,436 \text{ mm}$.

6.3.1.4 Einfluss des systematischen Fehlers und Schätzung der Standardabweichung

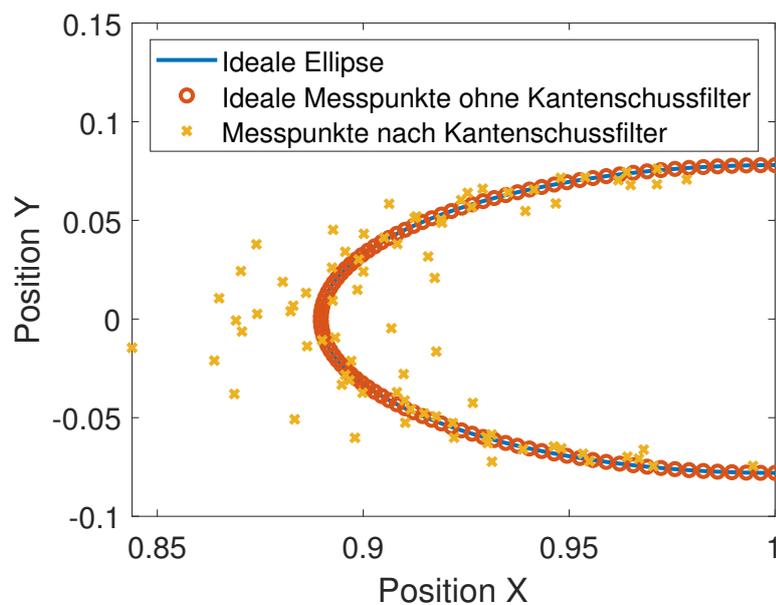
In diesem Experiment soll der Einfluss der systematische Fehler genauer untersucht werden. Die Entfernung vom Kalibriertarget zum Laserscanner beeinflusst die Anzahl der detektierten Messpunkte. Weiterhin verursacht ein schräger Einfallswinkel des Kalibriertarget eine Verzerrung des Kreises zur Ellipse. Die Nutzung des Kantenschussfilters entfernt außerdem Messpunkte an den Randbereichen des Querschnitts. Weiterhin wird die Schätzung der Standardabweichung der Detektierung mit dem vorgestellten Verfahren evaluiert. Da [Tha89] beschreibt, dass für eine korrekte Schätzung der Standardabweichung genügend Messpunkte vorhanden sein müssen (siehe Kapitel 2.5.4), wird der Einfluss der Anzahl der Messpunkte auf die Schätzung der Standardabweichung ebenfalls untersucht. Es soll überprüft werden, welche Anzahl an Messpunkten trotz Kantenschussfilters vorhanden sein muss, um die Standardabweichung mit dem vorgestellten Verfahren korrekt schätzen zu können. Weiterhin wird analysiert inwiefern die Berücksichtigung des Durchmessers die Genauigkeit beeinflusst und trotz des systematischen Fehlers durch die Kantenschüsse die Ergebnisse verbessert. Das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren wird weiterhin mit MLE bezeichnet und berücksichtigt den bekannten Durchmesser. Das ursprüngliche Verfahren ohne Berücksichtigung des Durchmessers wird als MLE- bezeichnet.

Für dieses Experiment werden ideale Kreise und Ellipsen mit einem Durchmesser von $7,5 \text{ cm}$ erzeugt. Die Mittelpunkte liegen alle auf dem Punkt $X_I = 1 \text{ m}$ und $Y_I = 0 \text{ m}$. Schließlich werden auf einem halben Kreisbogen Messpunkte erzeugt und diese mit einem Normalverteilten Fehler versehen. Die Standardverteilung des Messfehlers wird auf $\sigma_X = 1,380 \text{ cm}$ entlang der X-Achse festgelegt und auf $\sigma_Y = 0,138 \text{ cm}$ entlang der Y-Achse. Das MLE gewichtet die einzelnen Messpunkte mit der Standardabweichung $\sigma_L = \sigma_X$. Daraufhin werden die äußersten 10 Messpunkte auf jeder Seite des Halbbogens entfernt, um den verwendeten Kantenschussfilter zu simulieren. Die Anzahl der Messpunkte, die Kantenschüsse enthält, wird von 22 bis 100 variiert. In einer Monte Carlo Simulation werden jeweils 100 Messungen erzeugt und ausgewertet. Abbildung 6.14 zeigt beispielhaft zwei erzeugte Halbkreise mit den zugehörigen Messpunkten.

Die Abbildung 6.14 zeigt die Auswirkungen des verwendeten Kantenschussfilters. Dadurch dass die 10 äußeren Messwerte entfernt werden, kann in keinem Fall der vollständige Halbkreis erfasst werden. Des Weiteren verringert sich der erfassbare Teilausschnitt der Ellipse beziehungsweise des Kreises mit sinkender Anzahl an Messpunkten zusätzlich. Je weiter das zylinderförmige Kalibriertarget beziehungsweise der Manipulator vom Laserscanner entfernt ist, desto weniger Messpunkte werden erfasst und desto kleiner wird der messbare Teilausschnitt des Querschnitts.



(a) Ellipse mit 30 idealen und 10 resultierenden Messpunkten

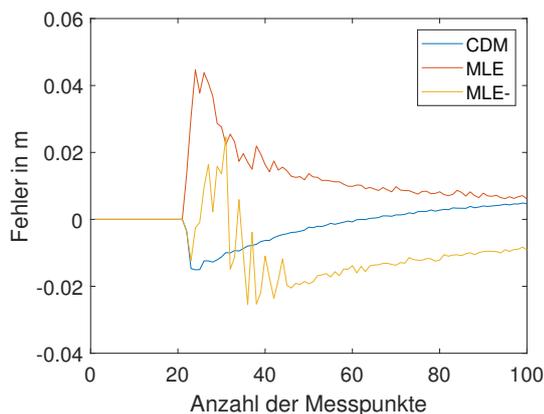


(b) Ellipse mit 100 idealen und 80 resultierenden Messpunkten

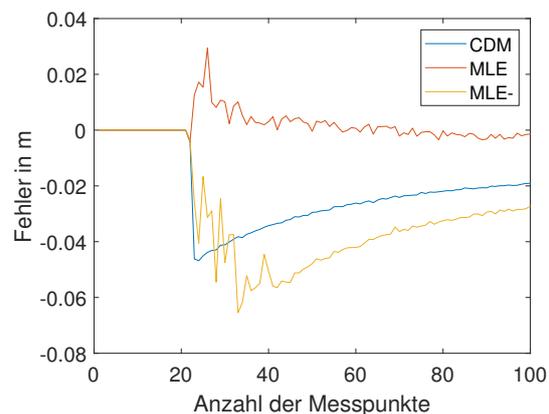
Abbildung 6.14: Beispielhafte Darstellung zweier simulierter Ellipsen mit den zugehörigen fehlerbehafteten Messpunkten nach Anwendung des Kantenschussfilters

In Abbildung 6.15 wird der mittlere Fehler der Detektierung des Mittelpunktes entlang der X-Achse dargestellt. Abbildung 6.15 a) und c) zeigen den Fehler der Kreisdetektierung. Es ist zu sehen, dass das CDM den geringsten Fehler aufweist für die Detektierung von Kreisen. Beim vorzeichenbehafteten Fehler ist außerdem zu erkennen, dass der Fehler des CDM das Vorzeichen wechselt, sodass der Fehler für 61 bis 63 Messpunkte bei nahezu 0 liegt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der systematische Fehler des CDM von mehreren Faktoren abhängt. Die Anzahl der Messpunkte, die Verzerrung des Kreises bei Ellipsenform und das Entfernen der Ränder durch den Kantenschussfilter. Bei einer Anzahl zwischen 61 und 63 Messpunkten he-

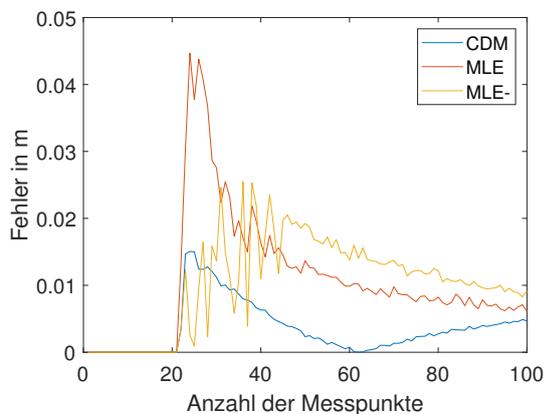
ben sich diese systematischen Fehler gegenseitig auf. Bei mehr als 63 Messpunkten steigt der Fehler wieder und konvergiert nicht gegen 0, da die Ränder des Kreises entfernt wurden. Der Fehler des MLE- ist für weniger als 45 Messpunkte kleiner als beim MLE alterniert jedoch stark. Bei mehr als 45 Messpunkten verringert die Berücksichtigung des Durchmessers den Fehler. Beim MLE ist zu sehen, dass der Fehler mit zunehmender Anzahl an Messpunkten abnimmt und konvergiert. Das MLE- weist ab einer Anzahl von 45 Messpunkten das gleiche Verhalten auf mit dem Unterschied dass der Fehler größer ist.



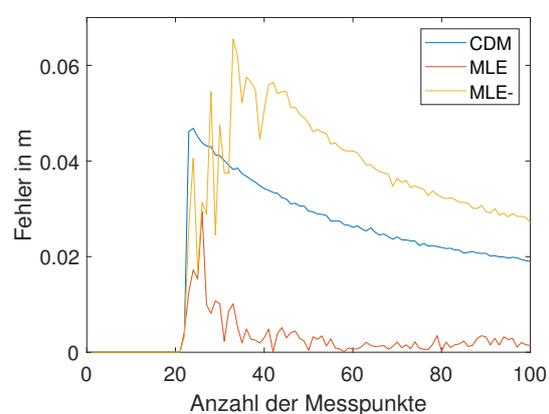
(a) Vorzeichenbehafteter Fehler entlang der X-Achse bei der Detektierung von Kreisen



(b) Vorzeichenbehafteter Fehler entlang der X-Achse bei der Detektierung von Ellipsen



(c) Absoluter Fehler entlang der X-Achse bei der Detektierung von Kreisen



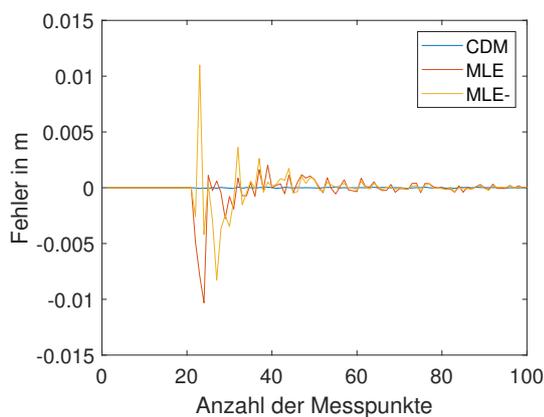
(d) Absoluter Fehler entlang der X-Achse bei der Detektierung von Ellipsen

Abbildung 6.15: Mittlerer Fehler der Detektierungen von Kreisen und Ellipsen Entlang der X-Achse bei steigender Anzahl an Messpunkten

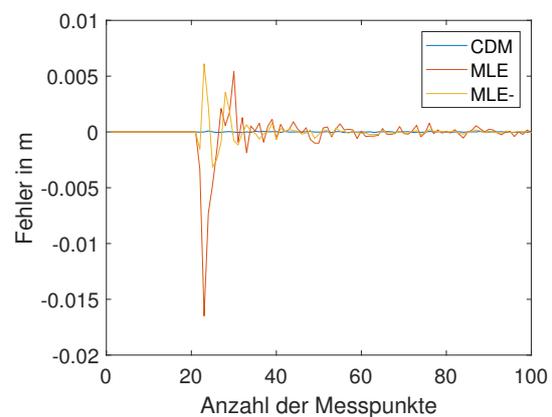
Abbildung 6.15 b) und d) zeigen den Fehler der Ellipsendetektierung. Das MLE und MLE- weisen das gleiche charakteristische Verhalten auf wie bei der Detektierung des Kreises, allerdings ist der Fehler des MLE- um ein dreifaches höher als bei der Kreisdetektierung und das MLE weist den geringsten Fehler von allen Verfahren auf für jede Anzahl an Messpunkten. Der Fehler des CDM ist beim Detektieren der Ellipse wiederum um ein vielfaches höher als bei der Kreisdetektion und außerdem lässt sich feststellen, dass es kein Vorzeichenwechsel des Fehlers gibt. Der systematische Fehler durch die Verzerrung des Kreises überwiegt die beiden

systematischen Fehler durch die Anzahl der Messpunkte und das Entfernen der Ränder.

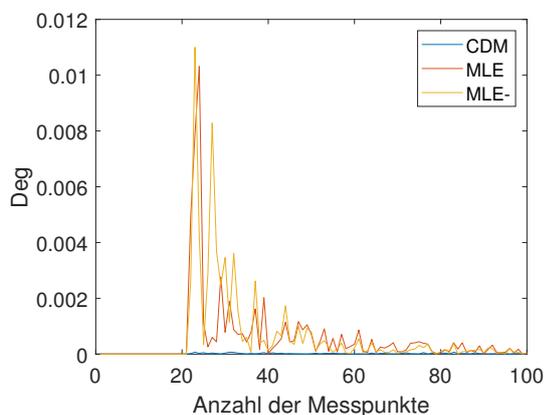
6.16 zeigt die gleichen Analysen für den mittleren Fehler entlang der Y-Achse. Für die Y-Achse war die Standardabweichung des Messrauschens um das 10-fache kleiner als für die X-Achse, sodass dies das unterschiedliche Verhalten erklärt. Das MLE und MLE- weisen nahezu das gleiche Verhalten auf. Der absolute Fehler entlang der Y-Achse liegt für 22 Messpunkte bei 1 *cm* und sinkt mit zunehmender Anzahl bis in den μm -Bereich. Das CDM liegt unabhängig von der Anzahl der Messpunkte im μm -Bereich, was darauf zurückzuführen ist, dass die Messpunkte mit einer sehr kleinen Standardabweichung um den Mittelwert schwanken. Diese Ergebnisse gelten sowohl für Kreise als auch für die Detektierung von Ellipsen.



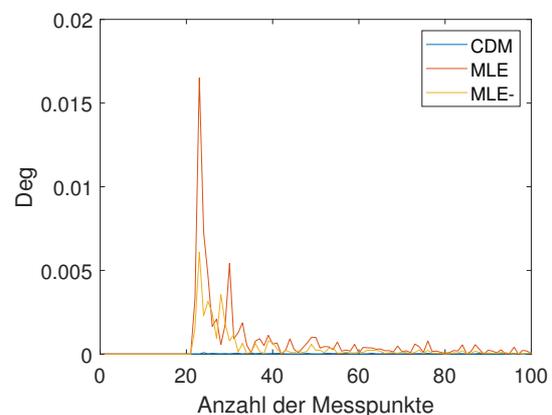
(a) Vorzeichenbehafteter Fehler entlang der Y-Achse bei der Detektierung von Kreisen



(b) Vorzeichenbehafteter Fehler entlang der Y-Achse bei der Detektierung von Ellipsen



(c) Absoluter Fehler entlang der Y-Achse bei der Detektierung von Kreisen

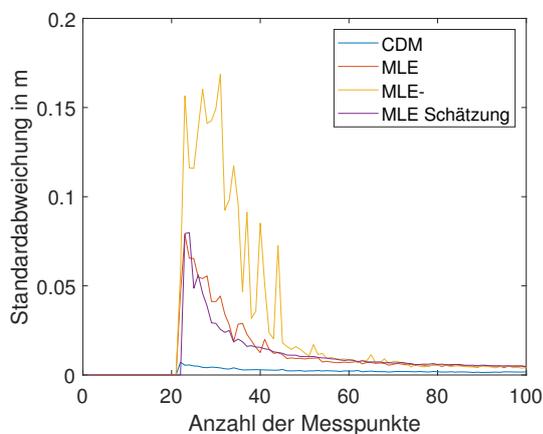


(d) Absoluter Fehler entlang der Y-Achse bei der Detektierung von Ellipsen

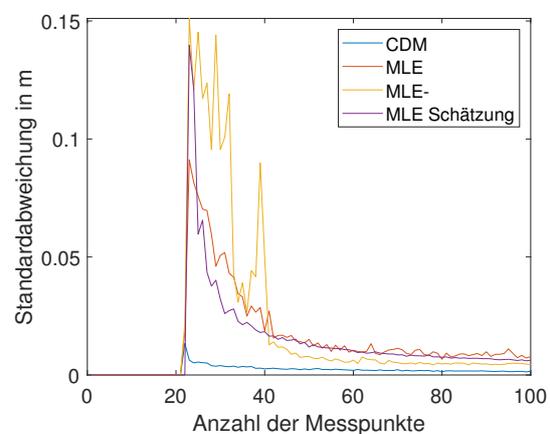
Abbildung 6.16: Mittlerer Fehler der Detektierungen von Kreisen und Ellipsen Entlang der Y-Achse bei steigender Anzahl an Messpunkten

Abbildung 6.17 zeigt die zu den Monte Carlo Simulationen gehörenden mittleren Standardabweichungen und die vom MLE geschätzten Standardabweichungen. Es ist zu sehen, dass die Standardabweichungen entlang der X-Achse größer sind als entlang der Y-Achse. Dies ist auf die unterschiedlichen Standardabweichungen der einzelnen Messpunkte entlang der Achsen

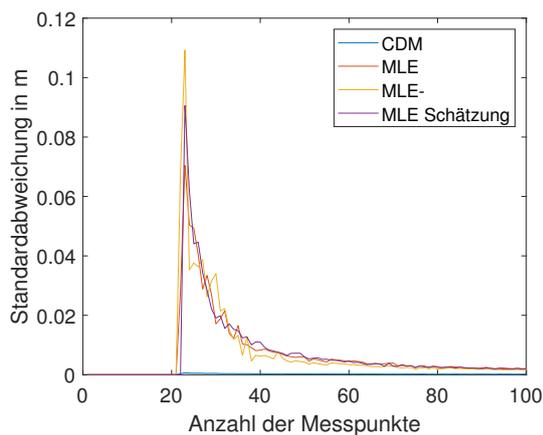
zurückzuführen $\sigma_X = 10 \cdot \sigma_Y$. Die Standardabweichungen des CDM sind um den Faktor 10 kleiner als die vom MLE und MLE-. Dies ist plausibel, da das CDM auf einer Mittelwertbildung basiert und die Mittelwertbildung die resultierende Standardabweichung des Mittelwertes reduziert. Das MLE und das MLE- basieren hingegen auf iterativen Optimierungsverfahren. Für das MLE und das MLE- ist zu sehen, dass deren qualitativer Verlauf für die Y-Achse keine Unterschiede zueinander aufweisen. Die Werte sind nahezu gleich und sinken mit steigender Anzahl an Messpunkten. Entlang der X-Achse ist hingegen ein Unterschied zu erkennen. Bis zu einem Wert von 50 Messpunkten bei der Detektierung von Kreisen und einem Wert von 43 Messpunkten bei Ellipsen ist die Standardabweichung des MLE- etwa doppelt so groß wie die vom MLE. Ab 50 Messpunkten sind die Standardabweichungen für Kreise mit einem Unterschied kleiner als 0,5 mm etwa gleich. Für Ellipsen ist die Standardabweichung mit dem MLE- etwa halb so groß.



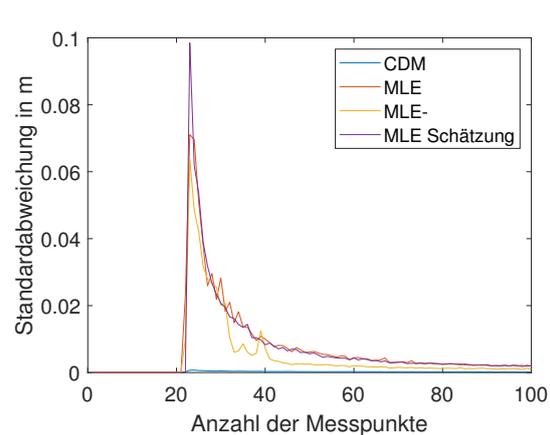
(a) Standardabweichung des Kreises entlang der X-Achse



(b) Standardabweichung der Ellipse entlang der X-Achse



(c) Standardabweichung des Kreises entlang der Y-Achse



(d) Standardabweichung der Ellipse entlang der Y-Achse

Abbildung 6.17: Geschätzte und tatsächliche Standardabweichungen der Detektierungen von Kreisen und Ellipsen entlang der X- und Y-Achse

Die Schätzung der Standardabweichung mit dem in dieser Arbeit erweiterten Ansatz wird

schließlich mit der tatsächlichen Standardabweichung der Monte Carlo Simulation verglichen: Für die X-Achse ist zu erkennen, dass unter 43 Messpunkten bzw. 23 Messpunkte mit entfernten Kantenschüssen die Schätzung der Standardabweichung kleiner ist als die tatsächliche Standardabweichung. Wie in Kapitel [Tha89] erklärt, werden für eine korrekte Schätzung der Standardabweichung mittels Informationsmatrix genügend Messpunkte benötigt (siehe hierzu auch Kapitel 2.5.4). In diesem Fall ist zu sehen, dass zu wenig Messpunkte zu einer Überschätzung der Genauigkeit führen. Ab einer Anzahl von 43 Messpunkten ist der Unterschied zwischen geschätzter Standardabweichung und tatsächlicher Standardabweichung der Monte Carlo Simulation kleiner als 0,3 mm. Für diese Arbeit wird die Entscheidung getroffen, Messungen mit weniger als 50 Messpunkten bzw. weniger als 30 Messpunkten nach Verwendung des Kantenschussfilters, zu verwerfen. Weiterhin kann festgestellt werden, dass die Standardabweichung entlang beider Achsen korrekt geschätzt wird, obwohl das vorgestellte Verfahren lediglich die Standardabweichung der Messfehler entlang der X-Achse berücksichtigt. Die Länge der Hauptachse der Kovarianzmatrix $\sigma_L = \sigma_X = 10 \cdot \sigma_Y$ in Zusammenhang mit einer ausreichenden Anzahl an Messpunkten enthält genügend Informationen, um die sich ergebenden Standardabweichungen mit einem Fehler von kleiner als 0,3 mm zu schätzen.

Ergebnis des Experiments

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass das CDM Kreise auch bei geringer werdender Anzahl an Messpunkten mit dem kleinsten Fehler detektiert. Interessanterweise gibt es eine Anzahl an Messpunkten, an denen sich die verschiedenen systematischen Fehler des CDM aufheben und der Detektierungsfehler Null wird. Für Ellipsen ist der Fehler des vorgestellten MLE am geringsten. Weiterhin wird gezeigt, dass die Berücksichtigung des bekannten Durchmessers die erzielte Genauigkeit des vorgestellten MLE wie erwartet verbessert. Auch ist ersichtlich, dass der systematische Fehler durch Kantenschüsse durch die Berücksichtigung des Durchmessers verringert wird. Außerdem wurde gezeigt, dass das vorgestellte Verfahren die Standardabweichung ab einer Anzahl von 43 Messpunkten bzw. 23 Messpunkten bei entfernten Kantenschüssen korrekt schätzen kann. Obwohl die Messpunkte der Fehler unterschiedlich auf die X- und Y-Achse verteilt sind und das MLE $\sigma_L = \sigma_X$ zur Gewichtung verwendet, wird die Standardabweichung entlang beider Achsen mit einem Fehler unter 0,3 mm geschätzt. Die Verteilung der Messpunkte und das zugrundeliegende Modell enthalten genügend Informationen um die resultierende Unsicherheit entlang beider Achsen zu schätzen.

6.3.2 Reale Experimente - Genauigkeit der Detektierung und Fehlerinflüsse

In diesem Kapitel wird die Genauigkeit der Detektierung anhand von realen Messungen untersucht. Hierfür wird das Kalibriertarget aus Abbildung 6.4 in unterschiedlichen Konfigurationen gemessen, die Symmetrie-Achse mit den drei Verfahren CDM, FGEE und MLE detektiert und die Genauigkeit bestimmt.

6.3.2.1 Einfluss von Kantenschüssen

Die reale Messung des Laserscanners enthält aufgrund des Durchmessers des Laserstrahls sogenannte Kantenschüsse (siehe Kapitel 3). Diese Kantenschüsse bilden Messpunkte nicht existierender Oberflächen im Laserscan ab, sofern zwei Objekte gleichzeitig vom Laserstrahl getroffen werden und den Laserstrahl gleichzeitig reflektieren. Es ist davon auszugehen, dass Kantenschüsse einen Fehler bei der Detektierung des Mittelpunktes verursachen. Dieser Fehler wird in diesem Kapitel für die drei Verfahren CDM, FGEE und MLE untersucht und gegenübergestellt.

Abbildung 6.18 zeigt beispielhaft zwei Messungen des Kalibriertargets ohne Kantenschussfilter. In Abbildung 6.18 a) und c) sind die Aufbauten zu sehen und in Abbildungen 6.18 b) und d) die zugehörigen Messungen des Laserscanners. Die Kantenschüsse sind eindeutig als fehlerhafte Messpunkte zu erkennen. Es ist zu sehen, dass die fehlerhaften Messpunkte an den Randbereichen des Zylinderquerschnitts den Eindruck einer langgezogenen Ellipse erzeugen. Dies erschwert die Detektierung des Mittelpunktes, da die scheinbar verlängerte Hauptachse die Symmetrie-Achse in radialer Richtung verschiebt.

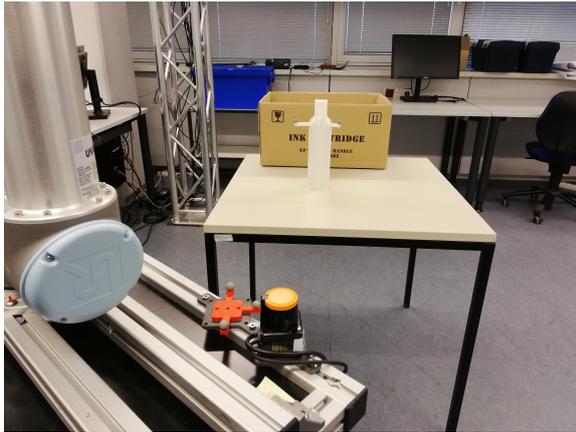
In einem Experiment wurden für verschiedene Positionen des Kalibriertargets die Genauigkeit der Detektierung ermittelt. Tabelle 6.4 zeigt die Ergebnisse der Genauigkeit. Es ist für alle Verfahren festzustellen, dass der verwendete Kantenschussfilter die Genauigkeit verbessert. Der Fehler des FGEE wird von $1,2713\text{ m}$ um $38,2\%$ auf $0,7861\text{ m}$ verringert. Die Genauigkeit der CDM wird durch den Kantenschussfilter um 26% auf $0,0216\text{ m}$ reduziert und die Genauigkeit des MLE um 58% auf $0,0131\text{ m}$.

Tabelle 6.4: Mittlerer Fehler der Detektierung des Mittelpunktes mit und ohne Kantenschussfilter.

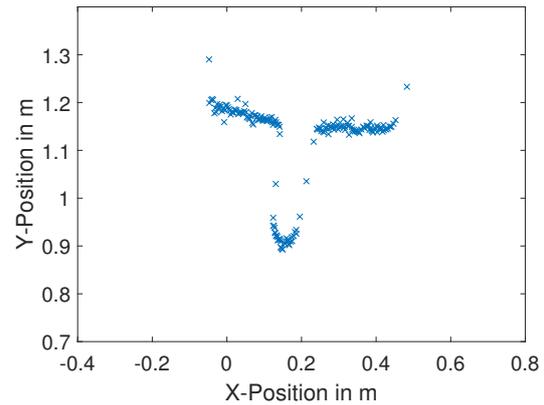
| | Absoluter Fehler in m | | |
|-------------------------|-----------------------|--------|--------|
| | CDM | FGEE | MLE |
| Mit Kantenschussfilter | 0,0216 | 0,7861 | 0,0131 |
| Ohne Kantenschussfilter | 0,0292 | 1,2713 | 0,0312 |

Ergebnis des Experiments

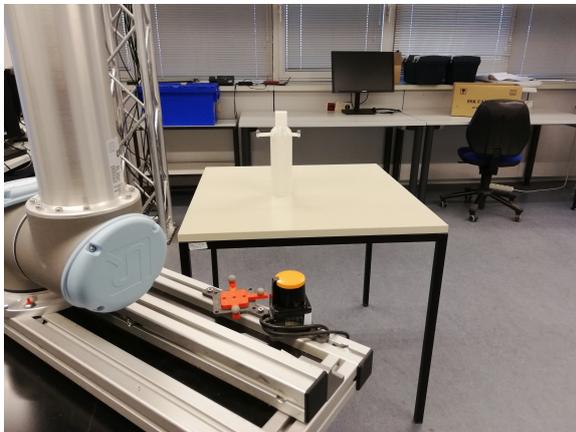
Für die realen Messungen ist festzustellen, dass die Verwendung des Kantenschussfilters eine deutliche Verbesserung aller Detektierungen bewirkt. Die größte Verbesserung wird für das MLE erreicht. Außerdem lassen die Messungen erkennen, dass der Fehler des MLE bei Verwendung des Kantenschussfilters am kleinsten ist. Ohne Kantenschussfilter ist der Fehler des CDM am geringsten.



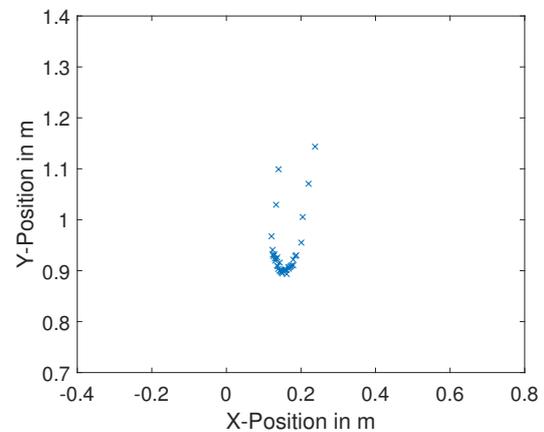
(a) Aufbau des Kalibriertargets unmittelbar vor Störobjekt



(b) Messpunkte vom Kalibriertarget unmittelbar vor Störobjekt



(c) Aufbau des Kalibriertargets etwa 2m vor Störobjekt



(d) Messpunkte vom Kalibriertarget etwa 2m vor Störobjekt

Abbildung 6.18: Messungen mit und ohne Kantenschüsse vor dem Kalibriertarget

6.3.2.2 Einfluss von Lage, Orientierung und Messwinkel des Kalibriertargets

Im Folgenden wird die Genauigkeit der Detektierung genauer untersucht. Da die Experimente aus Kapitel 6.2 gezeigt haben, dass die Verteilung des Fehlers der Messpunkte von der Entfernung, dem Messwinkel und dem Eintrittswinkel des Kalibriertargets abhängt, soll der Einfluss auf die Genauigkeit der Detektierverfahren evaluiert werden. Hierfür wird das Kalibriertarget in unterschiedlichen Orientierungen detektiert. Es werden die Parameter aus Tabelle 6.2 variiert und jeweils 51 Laserscans gemessen. Schließlich wird die Genauigkeit für die Verfahren CDM, FGEE und MLE bestimmt und statistisch ausgewertet. Für jede Messung wird ein Kantenschussfilter verwendet.

Tabelle 6.5 zeigt die Ergebnisse der Verfahren für einen Messwinkel von 0° und Tabelle 6.6 zeigt die Ergebnisse für einen Messwinkel von 90° . Für eine Vergleichbarkeit mit den simulierten Experimenten wird der absolute Fehler untersucht. Es ist ein deutlicher Unterschied zu den Ergebnissen aus der Simulation zu erkennen, was darauf zurückgeführt wird, dass die Verteilung des Fehlers, wie in Kapitel 6.2 untersucht, von den jeweiligen Messposen abhängt.

Tabelle 6.5: Statistische Auswertung der Detektiergenauigkeit für die unterschiedlichen Parametervariationen unter Nutzung des Kantenschussfilters bei einem Messwinkel von 0° . Dargestellt werden der mittlere Fehler, die Standardabweichung des Fehlers und der prozentuale Anteil der Ausreißer.

| Messwinkel = 0° | | Kreis | | | Ellipse | | |
|------------------------|------------------|----------|-------------|--------|----------|-------------|--------|
| | | μ/mm | σ/mm | $o/\%$ | μ/mm | σ/mm | $o/\%$ |
| CDM | 15 cm Entfernung | 10,269 | 0,912 | 1,96 | 17,215 | 1,081 | 1,96 |
| | 30 cm Entfernung | 20,135 | 1,624 | 1,96 | 19,321 | 1,603 | 1,96 |
| | 45 cm Entfernung | 16,074 | 1,791 | 1,96 | 9,150 | 1,726 | 0,00 |
| FGEE | 15 cm Entfernung | 26,649 | 16,714 | 24,45 | 1709,267 | 743,692 | 1,96 |
| | 30 cm Entfernung | 1075,329 | 904,989 | 0,00 | 1384,851 | 414,326 | 1,96 |
| | 45 cm Entfernung | 764,324 | 549,566 | 19,60 | 924,600 | 687,377 | 3,92 |
| MLE | 15 cm Entfernung | 10,231 | 0,928 | 0,00 | 11,707 | 3,962 | 1,96 |
| | 30 cm Entfernung | 4,218 | 2,693 | 3,92 | 33,260 | 4,971 | 0,00 |
| | 45 cm Entfernung | 11,227 | 4,741 | 0,00 | 12,582 | 3,887 | 1,96 |

Tabelle 6.6: Statistische Auswertung der Detektiergenauigkeit für die unterschiedlichen Parametervariationen unter Nutzung des Kantenschussfilters bei einem Messwinkel von 90° . Dargestellt werden der mittlere Fehler, die Standardabweichung des Fehlers und der prozentuale Anteil der Ausreißer.

| Messwinkel = 90° | | Kreis | | | Ellipse | | |
|-------------------------|------------------|------------------|------------------|--------|------------------|------------------|--------|
| | | μ/mm | σ/mm | $o/\%$ | μ/mm | σ/mm | $o/\%$ |
| CDM | 15 cm Entfernung | 13,322 | 1,114 | 0,00 | 22,237 | 1,069 | 0,00 |
| | 30 cm Entfernung | 21,262 | 2,01 | 0,00 | 15,904 | 1,465 | 3,92 |
| | 45 cm Entfernung | 21,915 | 1,691 | 1,96 | 13,774 | 1,835 | 5,88 |
| FGEE | 15 cm Entfernung | 68,499 | 143,091 | 47,06 | $1,7 \cdot 10^5$ | $5,0 \cdot 10^5$ | 45,10 |
| | 30 cm Entfernung | $3,1 \cdot 10^6$ | $3,5 \cdot 10^6$ | 29,41 | $9,0 \cdot 10^5$ | $9,1 \cdot 10^5$ | 29,41 |
| | 45 cm Entfernung | 764,324 | 549,567 | 1,96 | $6,1 \cdot 10^5$ | $1,3 \cdot 10^6$ | 33,33 |
| MLE | 15 cm Entfernung | 4,460 | 2,150 | 0,00 | 22,558 | 8,013 | 0,00 |
| | 30 cm Entfernung | 32,046 | 6,694 | 0,00 | 23,469 | 4,902 | 3,92 |
| | 45 cm Entfernung | 10,791 | 6,385 | 5,88 | 8,547 | 5,241 | 1,96 |

Für einen Messwinkel von 0° zeigt sich, dass das FGEE den größten Fehler bei den realen Messungen aufweist. Selbst unter Vernachlässigung der Ausreißer ergibt sich ein mittlerer Fehler von bis zu $1709,267 \text{ mm}$ bei einer Entfernung von 15 cm zum Kalibriertarget. Die ermittelte Standardabweichung liegt zwischen $16,714$ und $904,989 \text{ mm}$ und ist ebenfalls die größte der drei Verfahren. Gleiches gilt für die Detektierung bei einem Messwinkel von 90° zum Laserscanner. Die realen Experimente zeigen, dass das FGEE mit dem gegebenen Laserscanner nicht geeignet ist, um das Kalibriertarget zu detektieren. Der kleine Ellipsen-Ausschnitt und der relativ große Fehler der Messpunkte bezüglich der Zylindergeometrie führen zu fehlerhaften optimalen Lösungen des FGEE.

Der ermittelte Fehler der Detektierung mittels CDM oder MLE ist wesentlich geringer. Interessanterweise detektiert das MLE die Kreise mit einer besseren Genauigkeit als das CDM. So ist der mittlere Fehler über alle Parametervariationen hinweg $17,163 \text{ mm}$ für das CDM und $12,162 \text{ mm}$ für das MLE. Für die Detektierung der Ellipsen hingegen weist das CDM mit $16,267 \text{ mm}$ einen kleineren Fehler auf als das MLE mit $18,671 \text{ mm}$ über alle Parametervariationen. Insgesamt lässt sich feststellen, dass Kreise besser detektiert werden als Ellipsen. Bezüglich der variierten Parameter lässt sich keine Korrelation der erzielten Genauigkeit der Verfahren erkennen.

Die bestimmten Standardabweichungen der Fehler weisen die gleiche Charakteristik auf wie in den simulierten Experimenten. Die CDM weist insgesamt die geringste Standardabweichung des Fehlers auf und das FGEE die größte. So wird die mittlere Standardabweichung der CDM zu $1,493 \text{ mm}$ bemessen, die des MLE zu $4,547 \text{ mm}$ und die des FGEE liegt aufgrund der fehlerhaften Detektierungen im Meter-Bereich. Dies ist wiederum auf die Funktionsweise der Verfahren zurückzuführen und wurde in Kapitel 6.3.1 bereits erläutert.

Zur holistischen Analyse der Detektiergenauigkeit wurden die Ergebnisse der Abweichungen über alle Parametervariationen hinweg aufgetragen. Abbildung 6.19 stellt die Verteilung in Form eines Histogramms dar. Die maximalen Fehler der CDM und des MLE liegen unter $5,00 \text{ cm}$. Das FGEE weist deutlich größere Fehler auf, jedoch wurde das Histogramm aus Darstellungsgründen nur bis $3,5 \text{ m}$ aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass der Fehler des FGEE deutlich größer verteilt ist, als der Fehler des CDM und des MLE. Weiterhin ist zu sehen, dass das CDM die Ellipsen insgesamt mit einem größeren Fehler detektiert als das MLE. Außerdem ist der systematische Fehler des CDM zu sehen, der dazu führt, dass der kleinste Fehler des CDM bei $5,824 \text{ mm}$ liegt. Der kleinste gemessene Fehler des MLE wurde zu $0,320 \text{ mm}$ bestimmt.

Ergebnis des Experiments

Die Untersuchungen zeigen, dass das vorgestellte Verfahren MLE in den realen Messungen das Kalibriertarget insgesamt mit dem geringsten absoluten Fehler detektiert. Das FGEE ist nicht geeignet und das CDM weist eine höhere Ungenauigkeit auf. Der Fehler des MLE liegt für die verschiedenen Parametervariationen zwischen $4,5 \text{ mm}$ und $33,3 \text{ mm}$ und variiert abhängig vom Eintrittswinkel, Abstand und Messwinkel. Die Ursache für die Abhängigkeit von der erzielten Genauigkeit und der zugehörigen Parametervariation wird in der konfigurationsabhän-

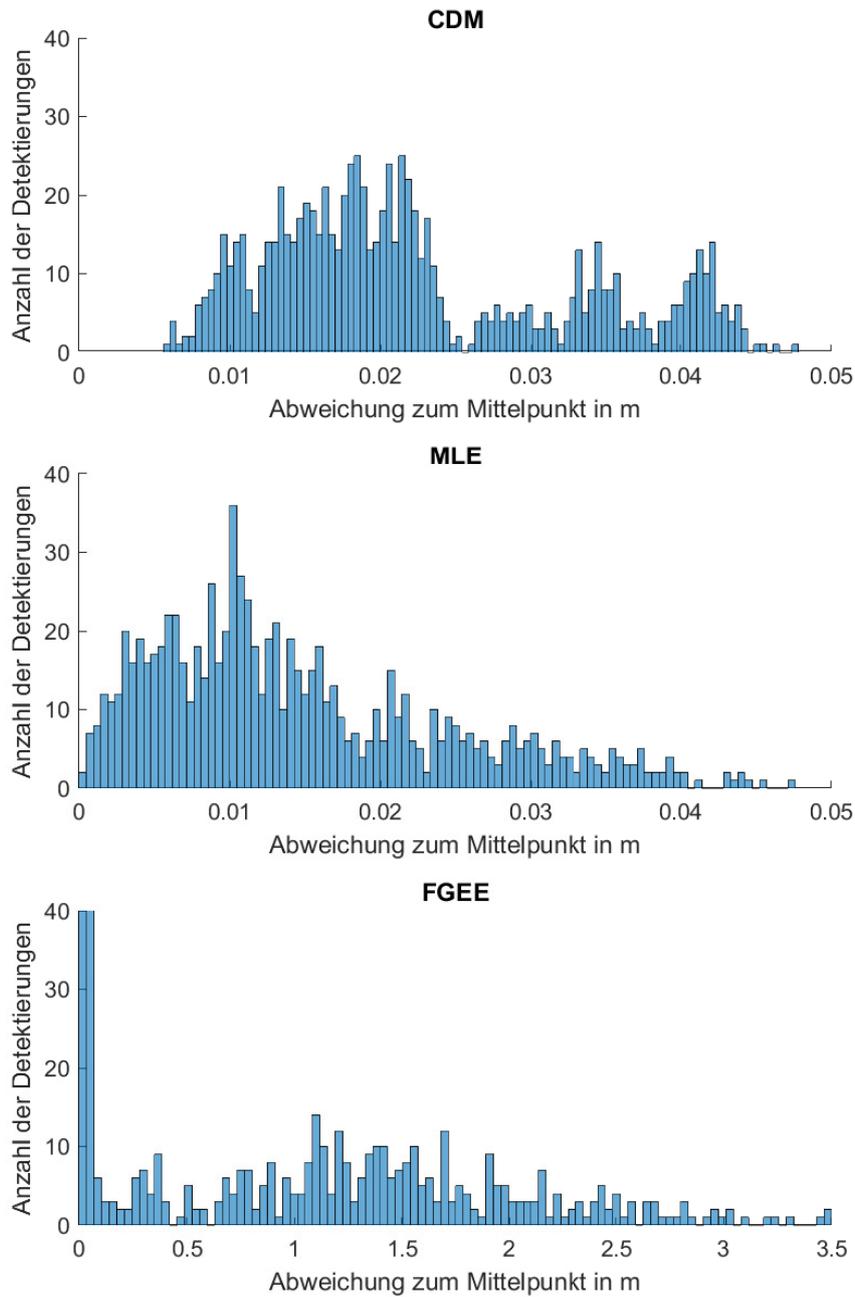


Abbildung 6.19: Histogramm der Abweichungen zum Mittelpunkt über alle Parametervariationen für die Verfahren CDM, MLE und FGEE.

gigen Verteilung des Messfehlers vermutet (siehe Kapitel 6.2.2), da das gleiche Experiment in der Simulation diese Abhängigkeit nicht aufgewiesen hat. Die vorzeichenbehafteten Fehler der Detektierungen werden in den Kapiteln 6.4.3 und 6.4.3 entlang der Kalibriertrajektorien betrachtet.

6.4 Kalibrierung ohne Berücksichtigung der Messfehler

In diesen Experimenten wird das Kalibrierverfahren ohne Berücksichtigung der Messfehler untersucht. Für einen möglichen Vergleich mit dem aktuellen Verfahren unter Verwendung eines Kalibriertargets aus [AAR14] wird dieses als erstes implementiert und auf der realen Plattform untersucht. Schließlich wird der eigene Ansatz anhand von Simulationen evaluiert. Abschließend wird das vorgestellte Verfahren ebenfalls auf der realen Plattform überprüft.

Es wird insbesondere die erzielte Genauigkeit der Kalibrierung untersucht. Für die realen Experimente wird zunächst das Constant Distance Verfahren zur Ermittlung des Kalibriertargets genutzt. In dieser frühen Entwicklungsphase stand das vorgestellte Verfahren, das die Unsicherheiten berücksichtigt, noch nicht zur Verfügung.

6.4.1 Untersuchung des Stand der Forschung

In diesem Kapitel wird das aktuelle Verfahren [AAR14] zur Kalibrierung zwischen Manipulator und Laserscanner experimentell untersucht. Die Untersuchungen dienen dazu das selbst entwickelte Verfahren mit dem aktuellen Stand der Forschung bezüglich der erzielten Genauigkeit vergleichen zu können. Da es sich um ein Verfahren handelt, das keine zusätzliche Sensorik und ein Kalibriertarget nutzt, ist es mit dem selbst entwickelten Verfahren vergleichbar. Beide Verfahren nutzen ausschließlich diejenigen Teilsysteme, die zueinander kalibriert werden sollen.

Das von [AAR14] vorgestellte Verfahren basiert darauf die Pose des Kalibriertargets anhand des vom Laserscanner erfassten Querschnitts zu bestimmen. Hierfür wird das Kalibriertarget in zwei unterschiedlichen Konfigurationen vom Manipulator in die Messebene des Laserscanners gehalten. Es werden jeweils drei Kantenpunkte des entstandenen Querschnitts als Merkmale bestimmt. Aus den Abständen der Kantenpunkten zueinander wird die Pose des Kalibriertargets relativ zum Laserscanner bestimmt. Da die Konfiguration des Manipulators gemessen werden kann, lässt sich die Transformationskette schließen und die Transformation zwischen Manipulator und Laserscanner bestimmen.

In Abbildung 6.20 wird der reale Aufbau des Experiments gezeigt und in Abbildung 6.21 das erstellte Kalibriertarget und die zugehörigen Maße. In Abbildung 6.22 sind die zwei Messungen zu sehen, die zur Ermittlung der Transformation verwendet worden sind. Die verwendeten Merkmale sind gekennzeichnet und zur besseren Darstellung ist die interpolierte Querschnittsfläche des Kalibriertargets eingetragen. Für das Verfahren steht keine offizielle Implementierung vom Autor zur Verfügung, sodass diese selbst erstellt worden ist. Der Fehler, der aus diesen Messungen bestimmten Transformation, wird in Tabelle 6.7 dargestellt.

Die Norm des translatorischen Fehlers wird zu $73,64 \text{ mm}$ bestimmt. Der größte Fehler mit $67,97 \text{ mm}$ tritt entlang der Y-Achse auf. Der Fehler entlang der Z-Achse ist mit $10,01 \text{ mm}$ der kleinste ermittelte Fehler. Die Norm des rotatorischen Fehlers wird zu $7,98^\circ$ bemessen. Der kleinste Anteil des rotatorischen Fehlers tritt mit $0,57^\circ$ um die Z-Achse auf. Der größte rotatorische Fehler entsteht mit $-7,31^\circ$ um die Y-Achse.

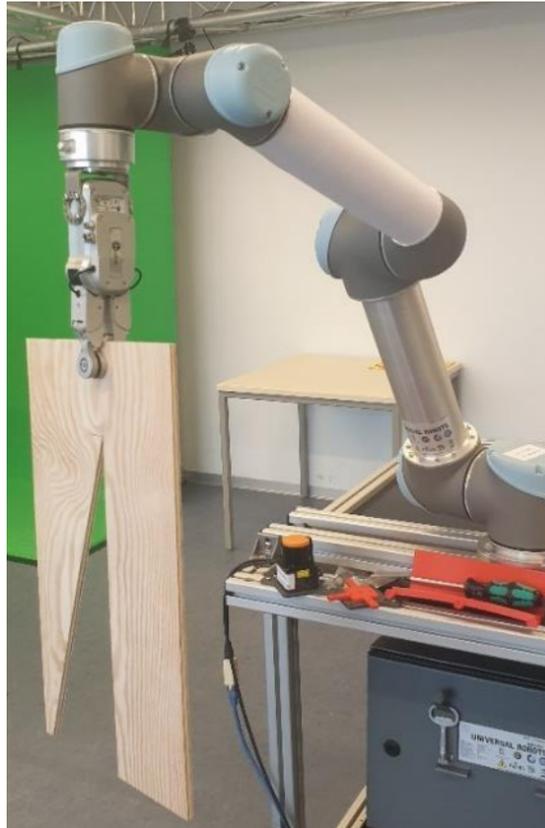


Abbildung 6.20: Aufbau des realen Experiments der Kalibrierung nach [AAR14] mit dem selbst erstellten Kalibriertarget, dem Manipulator Universal Robots UR5 und dem Laserscanner Hokuyo UST-10LX-H01.

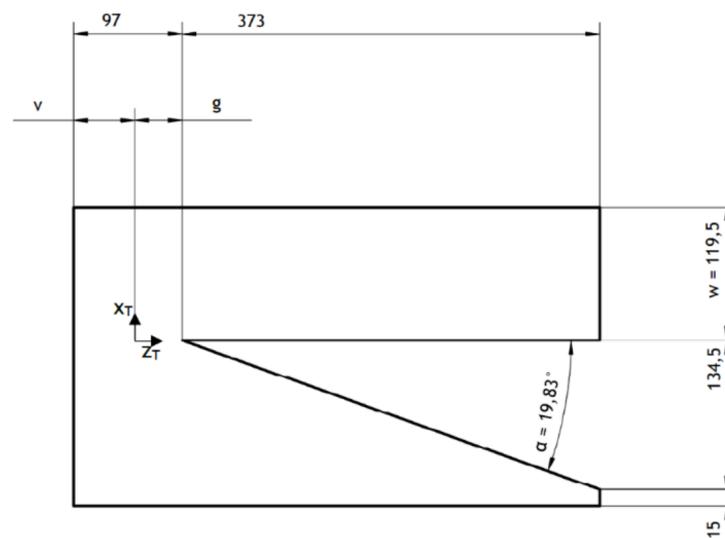
Tabelle 6.7: Analyse der Genauigkeit des realen Experiments mit Kalibriertarget vorgestellt von [AAR14]. Fehler entlang der translatorischen und rotatorischen Achsen

| Fehlermetrik | | Ergebnisse |
|------------------------------|-------------------|------------|
| Translatorischer Fehler [mm] | e_x | 26,51 |
| | e_y | 67,97 |
| | e_z | 10,01 |
| | $ e_{xyz} $ | 73,64 |
| Rotatorischer Fehler [°] | e_{rot_x} | 3,15 |
| | e_{rot_y} | -7,31 |
| | e_{rot_z} | 0,57 |
| | $ e_{rot_{xyz}} $ | 7,98 |

Abbildung 6.22 a) zeigt deutlich die Kantenschüsse an den zu bestimmenden Merkmalen. Es ist zu sehen, dass die benötigten drei Merkmale der beiden Konfigurationen aufgrund der Kantenschüsse nur schwer bestimmt werden können. Da die Kanten detektiert werden müssen, können die Kantenschüsse auch nicht entfernt werden, da diese die realen Kanten enthalten würden. Die Messpunkte der Kantenschüsse wurden anhand der Messungen in Abbildung 6.22 optisch bestimmt. Abbildung 6.23 zeigt die gemessenen Entfernungen zum Kalibriertarget in Polarkoordinaten über den Messwinkel des Laserscanners. Der aus den Kantenschüssen resul-



(a) Foto des verwendeten Kalbriertargets



(b) Technische Bemaßung des Kalbriertargets

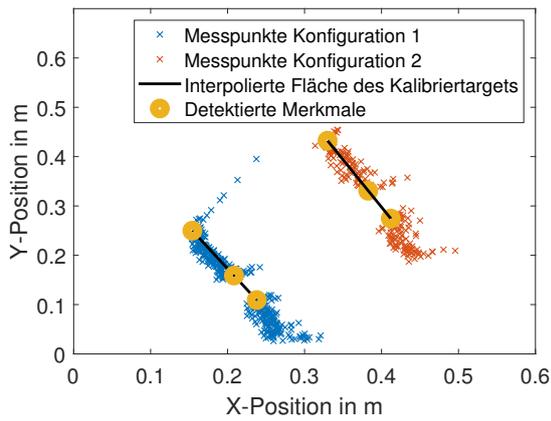
Abbildung 6.21: Verwendetes Kalbriertarget des realen Experiments der Kalibrierung nach [AAR14].

tierende Toleranzbereich wurde anhand der bestimmten Kantenschüsse ebenfalls eingetragen. Der eingetragene Toleranzbereich der zugehörigen Messwinkel um die einzelnen Merkmale liegt zwischen 1° und $1,5^\circ$ für jedes Merkmal.

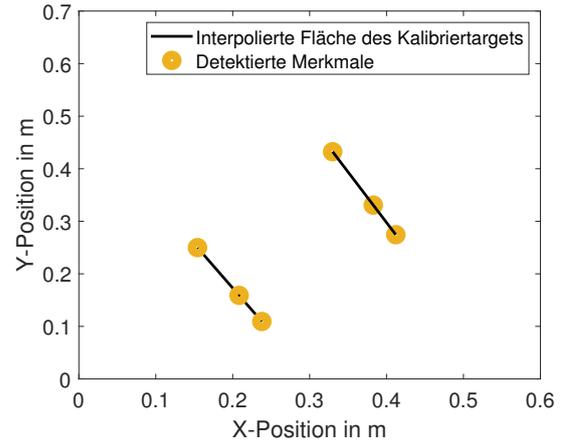
Ergebnis des Experiments

Die Kalibrierung wurde mit dem Verfahren nach [AAR14] zu einer translatorischen Genauigkeit von $73,7 \text{ mm}$ und einer rotatorischen Genauigkeit von $8,0^\circ$ bestimmt. Ein methodisches Problem dieses Verfahrens ist, dass die Pose des Kalbriertargets anhand der Kantenpunkte bestimmt werden muss. Dadurch hängt die Genauigkeit der ermittelten Pose von einzelnen Messpunkten des Laserscanners ab. Es ist in den Abbildungen 6.22 und 6.23 zu erkennen, dass es keine triviale Problemstellung ist die Kantenpunkte zu bestimmen.

Ein weiteres Problem ist, dass die fehlende Transformation lediglich anhand von zwei Mess-

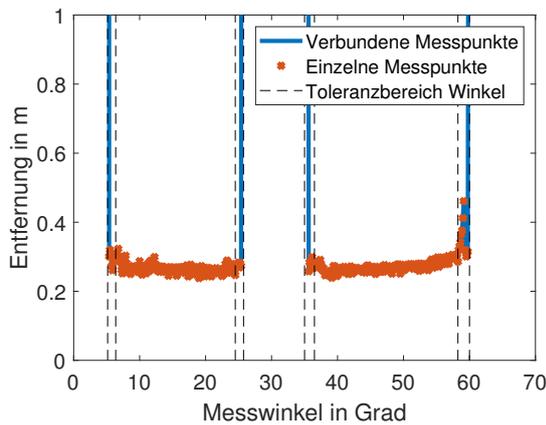


(a) Aufgenommene Messpunkte, interpolierter Querschnitt und extrahierte Merkmale

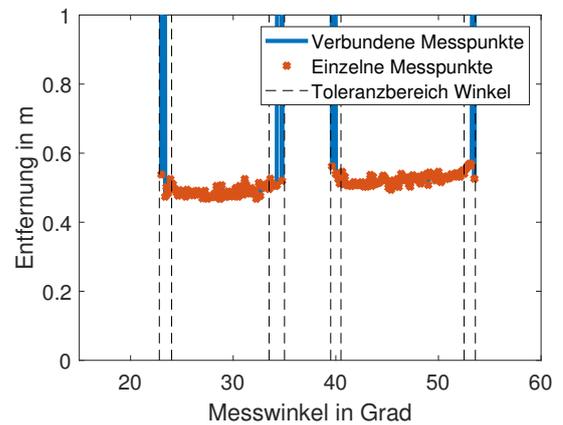


(b) Interpolierter Querschnitt und extrahierte Merkmale

Abbildung 6.22: Messpunkte und extrahierte Merkmale des realen Experiments in kartesischen Koordinaten.



(a) Messpunkte der ersten Konfiguration



(b) Messpunkte der zweiten Konfiguration

Abbildung 6.23: Messpunkte des Kalibriertargets beider Konfigurationen in Polarkoordinaten.

posen bestimmt wird. Ohne eine Optimierung über viele Messposen wirkt sich der Messfehler des zugehörigen Messwinkels einzelner Messungen erheblich aus.

6.4.2 Simulative Kalibrierung

In diesem Kapitel wird das Kalibrierverfahren, wie es in Kapitel 4 vorgestellt wurde, simulativ untersucht. Die Funktionalität und die Genauigkeit des Verfahrens werden evaluiert. Die Ergebnisse werden qualitativ und quantitativ ausgewertet, um die Eigenschaften des Kalibrierverfahrens zu verstehen.

Hierfür wird eine Transformation zwischen Manipulator-Basis und Laserscanner festgelegt. Eine Kalibriertrajektorie wird zufällig bestimmt. Die Schnittpunkte zwischen Kalibriertarget und Laserscanner werden bestimmt und mit einem Messfehler Σ_{CT} versehen. Schließlich wird der Kalibriervorgang auf die sich ergebenden Schnittpunkte und die Transformation zwischen Manipulator-Basis und End-Effektor angewendet.

Die Kalibriertrajektorie des Manipulators entspricht zufälligen Punkten entlang einer Kreisbahn in der x- und y-Ebene um den Manipulator. Die Höhe des End-Effektors und die Orientierung des End-Effektors werden in jeder Position zufällig variiert. Die Höhe variiert zwischen 20 cm und 40 cm bezüglich der Basis des Manipulators. Die Z-Achse des End-Effektors zeigt senkrecht zur Ebene des Laserscanners und variiert in der Orientierung um die x- und y-Achse zwischen -30° und $+30^\circ$. Der Radius der kreisförmigen Trajektorie wurde auf 80 cm festgelegt.

Der Fehler des detektierten Schnittpunktes wird als mittelwertfreie Normalverteilung mit einer Kovarianzmatrix von

$$\Sigma_{CT}(q) = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix} mm$$

definiert. Der Fehler des Manipulators wird auf die Transformation zwischen Manipulator-Basis und End-Effektor angewendet. Sie wird als mittelwertfreie Normalverteilung mit einer Standardverteilung von $\sigma_{x,y,z} = 1 mm$ und $\sigma_{rot_{x,y,z}} = 0,1^\circ$ festgelegt. Der Ground Truth für die Simulation wird festgelegt zu $[\tilde{r}_x \ \tilde{r}_y \ \tilde{r}_z] = [30 \ 50 \ 20] cm$ und $[\tilde{\varphi} \ \tilde{\vartheta} \ \tilde{\psi}] = [5 \ 7 \ 3]^\circ$.

Entlang der beschriebenen Trajektorie wurden mit den festgelegten Messfehlern 75 Monte-Carlo Simulationen durchgeführt. Abbildung 6.24 stellt eine dieser Trajektorien exemplarisch dar. Es ist zu sehen, dass der gesamte Winkelbereich des Laserscanners für die Trajektorie genutzt wird.

Als Startwert der Optimierung wird jeweils $\Psi_{init} = [0, 0, 0, 0, 0, 0]$ verwendet. Dies entspricht der Situation, dass sich das Koordinatensystem des Laserscanners im Ursprung des Manipulators befindet. Die Optimierung wird wie in Kapitel 4.2 beschrieben durchgeführt.

Prüfung des Ansatzes

In einem ersten Experiment wurde eine einzige Kalibrierung ohne Messfehler durchgeführt und die Fehler der Kalibrierparameter in Tabelle 6.8 dargestellt. Der sich ergebende Fehler war für alle Fehlermetriken kleiner als $1,432 \mu m$ beziehungsweise $10^{-6} \cdot 42,546^\circ$, was auf die numerische Lösung durch den Optimierer und die Verwendung von Fließkommazahlen zurückzuführen ist.

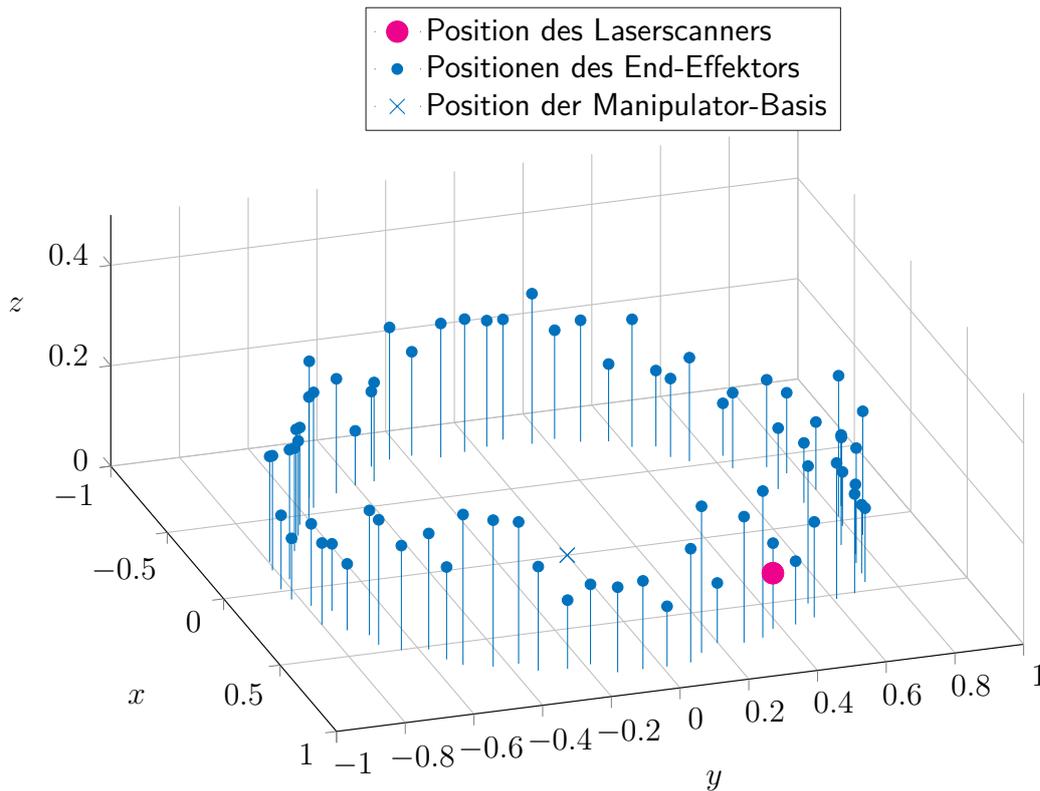


Abbildung 6.24: Exemplarische Kalibriertrajektorie des End-Effektors für die simulativen Experimente. Dargestellt werden die Positionen des End-Effektors während der Kalibrier-Trajektorie, die Position der Manipulator-Basis und die Position des Laserscanners. Die senkrechten Linien stellen nicht das Kalibriertarget dar, sondern veranschaulichen die Höhe der Position des Endeffektors.

Tabelle 6.8: Ergebnisse des simulierten Experiments ohne Messfehler.

| Vorzeichenbehafteter Fehler | | | |
|-----------------------------|-------|----------------------|------------------------|
| Translatorischer Fehler | | Rotatorischer Fehler | |
| $e_x/\mu m$ | 0,062 | $e_{rot_x}/^\circ$ | $-1,680 \cdot 10^{-6}$ |
| $e_y/\mu m$ | 0,017 | $e_{rot_y}/^\circ$ | $42,546 \cdot 10^{-6}$ |
| $e_z/\mu m$ | 1,432 | $e_{rot_z}/^\circ$ | $-7,952 \cdot 10^{-6}$ |

Schließlich wurde die Genauigkeit anhand der beschriebenen Monte Carlo Simulation statistisch ausgewertet. In Tabelle 6.9 sind die Metriken bezüglich der vorzeichenbehafteten Fehler aufgetragen. Der Mittelwert der vorzeichenbehafteten Fehler einer Monte Carlo Simulation ergibt im idealen Fall Null. Daher sind die Mittelwerte der vorzeichenbehafteten Fehler nicht geeignet, um die Charakteristik eines Verfahrens zu beurteilen. In Anlehnung an [FAG15] werden deswegen die Mittelwerte der absoluten Fehler ebenfalls ausgewertet. Diese sind in Tabelle 6.10 eingetragen.

Die mittleren vorzeichenbehafteten Fehler zeigen eine geringe Abweichung zur Referenztransformation. So liegt die Norm des vorzeichenbehafteten translatorischen Fehlers unter 1 mm

und die Norm des vorzeichenbehafteten rotatorischen Fehlers liegt bei $0,04^\circ$. Weiterhin sind die zugehörigen Standardabweichungen um ein vielfaches größer als die mittleren Fehler. Diese beiden Punkte lassen darauf schließen, dass der Kalibrieransatz die Transformation ohne systematischen Fehler bestimmt. Um die Charakteristik des vorgestellten Ansatzes zu untersuchen, werden im Folgenden die absoluten Fehler aus Tabelle 6.10 betrachtet.

Tabelle 6.9: Ergebnisse der simulativen Experimente: Statistische Evaluierung der translatorischen und rotatorischen vorzeichenbehafteten Fehler bezüglich des Laserscanner Koordinatensystems.

| Vorzeichenbehafteter Fehler | | | |
|-----------------------------|--------|----------------------------------|--------|
| Translatorischer Fehler | | Rotatorischer Fehler | |
| $\mu(e_x)/mm$ | 0,171 | $\mu(e_{rot_x})/^\circ$ | 0,001 |
| $\mu(e_y)/mm$ | 0,423 | $\mu(e_{rot_y})/^\circ$ | -0,038 |
| $\mu(e_z)/mm$ | 0,800 | $\mu(e_{rot_z})/^\circ$ | -0,016 |
| $\mu(e_{x,y,z})/mm$ | 0,921 | $\mu(e_{rot_{zyx}})/^\circ$ | 0,041 |
| $\sigma(e_x)/mm$ | 4,285 | $\sigma(e_{rot_x})/^\circ$ | 0,627 |
| $\sigma(e_y)/mm$ | 3,816 | $\sigma(e_{rot_y})/^\circ$ | 0,574 |
| $\sigma(e_z)/mm$ | 8,914 | $\sigma(e_{rot_z})/^\circ$ | 0,235 |
| $\sigma(e_{x,y,z})/mm$ | 10,597 | $\sigma(e_{rot_{zyx}})/^\circ$ | 0,882 |

Tabelle 6.10: Ergebnisse der simulativen Experimente: Statistische Evaluierung der translatorischen und rotatorischen absoluten Fehler bezüglich des Laserscanner Koordinatensystems.

| Absoluter Fehler | | | |
|--------------------------|-------|----------------------------------|-------|
| Translatorischer Fehler | | Rotatorischer Fehler | |
| $\mu(e_x)/mm$ | 3,338 | $\mu(e_{rot_x})/^\circ$ | 0,494 |
| $\mu(e_y)/mm$ | 3,110 | $\mu(e_{rot_y})/^\circ$ | 0,470 |
| $\mu(e_z)/mm$ | 7,169 | $\mu(e_{rot_z})/^\circ$ | 0,192 |
| $\mu(e_{x,y,z})/mm$ | 9,581 | $\mu(e_{rot_{zyx}})/^\circ$ | 0,800 |
| $\sigma(e_x)/mm$ | 2,595 | $\sigma(e_{rot_x})/^\circ$ | 0,383 |
| $\sigma(e_y)/mm$ | 2,230 | $\sigma(e_{rot_y})/^\circ$ | 0,328 |
| $\sigma(e_z)/mm$ | 5,310 | $\sigma(e_{rot_z})/^\circ$ | 0,136 |
| $\sigma(e_{x,y,z})/mm$ | 6,317 | $\sigma(e_{rot_{zyx}})/^\circ$ | 0,522 |

Absoluter Translatorischer Fehler

Der mittlere translatorische Fehler entlang der horizontalen Achsen des Laserscanners liegt bei 3.3 mm und 3.1 mm . Der mittlere translatorische Fehler entlang der vertikalen Z-Achse ist etwa doppelt so groß mit 7.2 mm . Es ergibt sich eine mittlere Norm des translatorischen Fehlers von 9.6 mm . Die Standardabweichungen des translatorischen Fehlers liegen im Millimeter Bereich. Für die X- und Y-Achse ergeben sich $2,6\text{ mm}$ und $2,2\text{ mm}$ und für die Z-Achse ergibt sich ein Wert, der mit $5,3\text{ mm}$ etwa doppelt so groß ist.

Der Fehler entlang der Achse der Lasermessungen ist etwa gleich verteilt entlang der X-

und Y-Achse. Da die Kalibriertrajektorie den gesamten Winkelbereich abdeckt, wird bei der Optimierung keine Achse durch die größere Anzahl an Messungen übergewichtet. Dass der translatorische Fehler entlang der Z-Achse doppelt so groß ist, wie der Fehler entlang der horizontalen Achsen, ist interessant. Dieses Verhalten ergibt sich aus der Funktionsweise des 2D Laserscanners. Da die Messungen entlang der X- und Y-Achse stattfinden, lässt sich die Transformation entlang dieser Achsen besser bestimmen. Die Translation entlang der Z-Achse muss ebenfalls aus Messungen in der X- und Y-Ebene bestimmt werden. Sie ergibt sich implizit aus den aufgenommenen Positionen der Symmetrie-Achse für die verschiedenen Eintrittswinkel in die Ebene des Laserscanners und ist deswegen schwieriger zu bestimmen. Die Standardabweichungen und ihre Verhältnisse zueinander bestätigen diese These.

Absoluter Rotatorischer Fehler

Der mittlere rotatorische Fehler um die horizontalen Achsen ergibt jeweils etwa $0,5^\circ$. Der mittlere rotatorische Fehler um die Z-Achse ergibt $0,2^\circ$. Die Standardverteilungen der rotatorischen Fehler zeigen ein Verhältnis von etwa 2,4:1 bezüglich der Rotation um die Z-Achse zu der X- und Y-Achse.

Der rotatorische Fehler um die horizontalen Achsen ist etwas mehr als doppelt so groß wie um die Z-Achse. Dies lässt sich ebenfalls aus der Funktionsweise des Kalibrierverfahrens erklären. Die Messpunkte der Trajektorie verteilen sich entlang der XY-Ebene des Laserscanners. Deswegen lässt sich eine Drehung Axial zu dieser Ebene gut bestimmen. Die Drehung um die horizontale Achse ist ungenauer zu bestimmen, weil sich diese wie bei der Bestimmung der Translation um die Z-Achse implizit aus dem Eintrittswinkel ergeben.

Ergebnis des Experiments

Das Experiment zeigt, dass der entwickelte Ansatz geeignet ist die Kalibrierparameter zu identifizieren. Weiterhin zeigt sich, dass sich die unterschiedlichen Kalibrierparameter mit unterschiedlicher Genauigkeit bestimmen lassen. Bezüglich des Koordinatensystems des Laserscanners lassen sich die Translation entlang der Z-Achse und die Rotation um die X- und Y-Achse mit geringster Genauigkeit bestimmen.

6.4.3 Reale Kalibrierung mit der Constant-Distance-Methode

In diesem Kapitel wird das Kalibrierverfahren mit realen Komponenten untersucht. Um erste Ergebnisse zu erhalten, wurde in diesem Entwicklungsstadium die Constant-Distance-Methode zur Detektierung des Kalibriertargets verwendet. Der zur Detektierung vorgestellte Ansatz MLE wird in den Experimenten unter Berücksichtigung der Unsicherheiten verwendet (siehe Kapitel 6.5). Es werden drei unterschiedliche Kalibriertrajektorien zur Kalibrierung genutzt und die Auswirkung der Kalibriertrajektorie auf die erzielte Genauigkeit untersucht. Die Genauigkeit wird schließlich mit dem Stand der Forschung verglichen.

Nutzung des Kalibriertargets

Um den systematischen Fehler durch die Kreisannäherung in der Constant-Distance-Methode gering zu halten wird ein Kalibriertarget mit schmalem Durchmesser genutzt. Das verwendete

te Kalibriertarget ist in Abbildung 6.25 dargestellt. Es hat eine Länge von 20 cm und einen Durchmesser von $2,5\text{ cm}$. Durch die angebrachten Marker, kann es vom Tracking System erfasst werden.

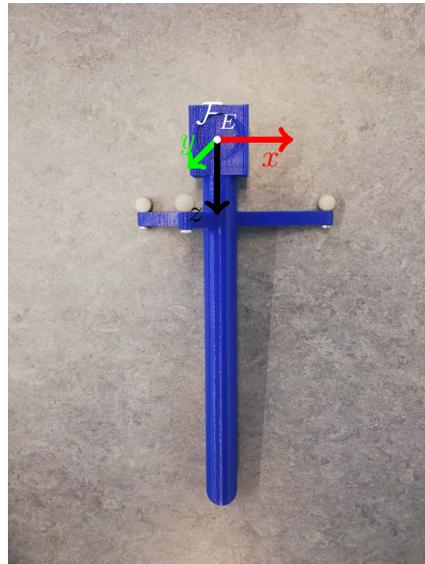


Abbildung 6.25: Vom Endeffektor gegriffenes Kalibriertarget und Koordinatensystem des TCP \mathcal{F}_E .

Es wurden insgesamt drei Trajektorien untersucht, um den Einfluss der Trajektorie auf die Kalibriergenauigkeit zu evaluieren. Die Kalibriertrajektorien unterscheiden sich im Wesentlichen durch ihren Abstand zum Laserscanner:

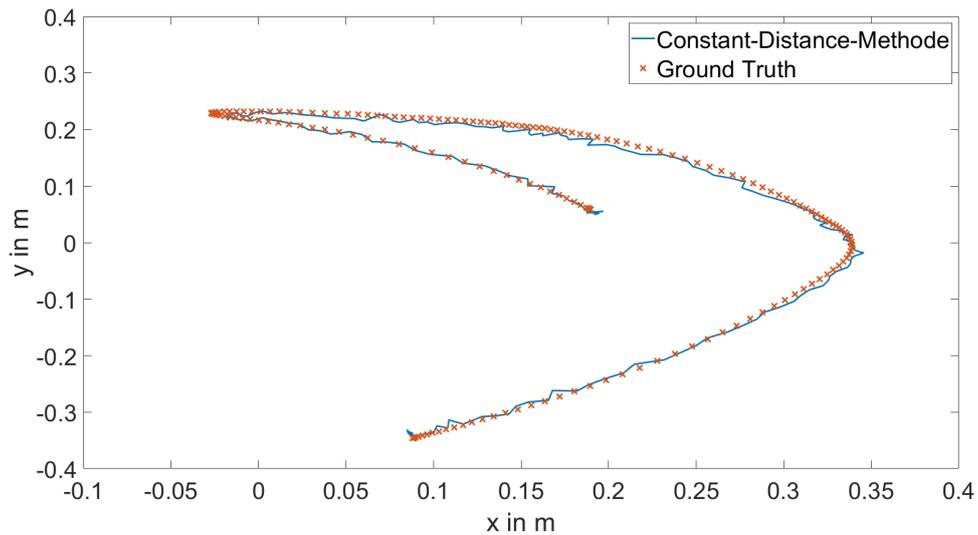
- Geringe Entfernung zum Laserscanner - Abstand zwischen 10 cm und 40 cm
- Große Entfernung zum Laserscanner - Abstand zwischen 40 cm und 100 cm
- Kombinierte Trajektorie - Abstand zwischen 10 cm und 100 cm

Die kombinierte Trajektorie besteht aus den nacheinander abgefahrenen Trajektorien mit nahen und fernen Messpunkten.

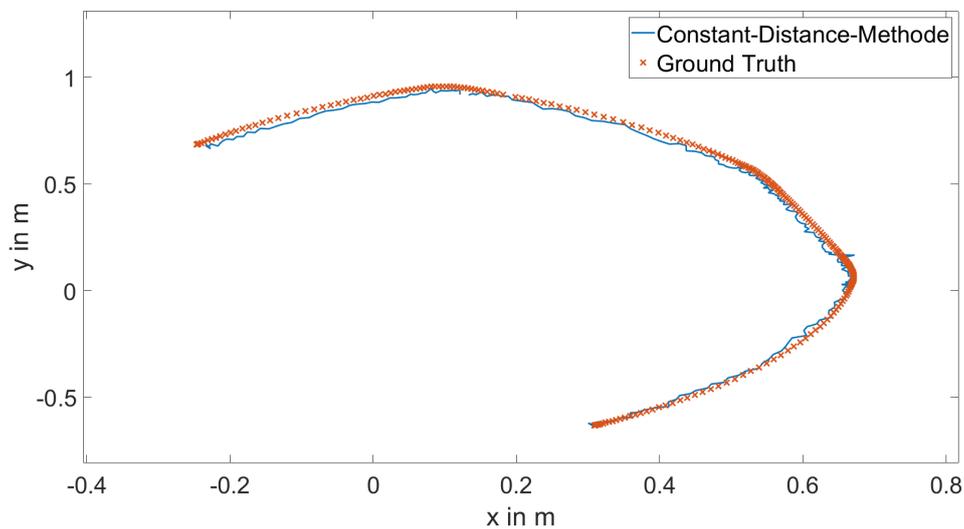
Detektierungsfehler der Constant-Distance-Methode für nahe und ferne Messpunkte

Zunächst wurden die Trajektorien mit naher und weiter Entfernung zum Laserscanner untersucht. Abbildung 6.26 stellt die Trajektorien anhand der Positionen der Symmetrie-Achse im Laserscan dar. Dargestellt wird die ermittelte Position der Symmetrie-Achse des Referenzsystems und anhand der Constant-Distance-Methode.

Es ist zu sehen, dass sowohl bei großer als auch bei kleiner Entfernung Fehler bei der Detektierung auftreten. Abbildung 6.27 zeigt den absoluten Fehler für die einzelnen Messpunkte der beiden Trajektorien. Es ist zu sehen, dass der entstandene Fehler abhängig vom Abstand zum Laserscanner ist. Der maximale Fehler der nahen Trajektorie liegt bei $1,7\text{ cm}$ und der maximale Fehler der fernen Trajektorie wurde zu $4,4\text{ cm}$ bestimmt. Der Fehler lässt sich zum einen durch die Annäherung der Ellipse als Kreis erklären. Mit flacherem Eintrittswinkel nimmt die Verzerrung des Kreises zu und der systematische Fehler vergrößert sich. Die Abhängigkeit



(a) Kalibriertrajektorie - Nah



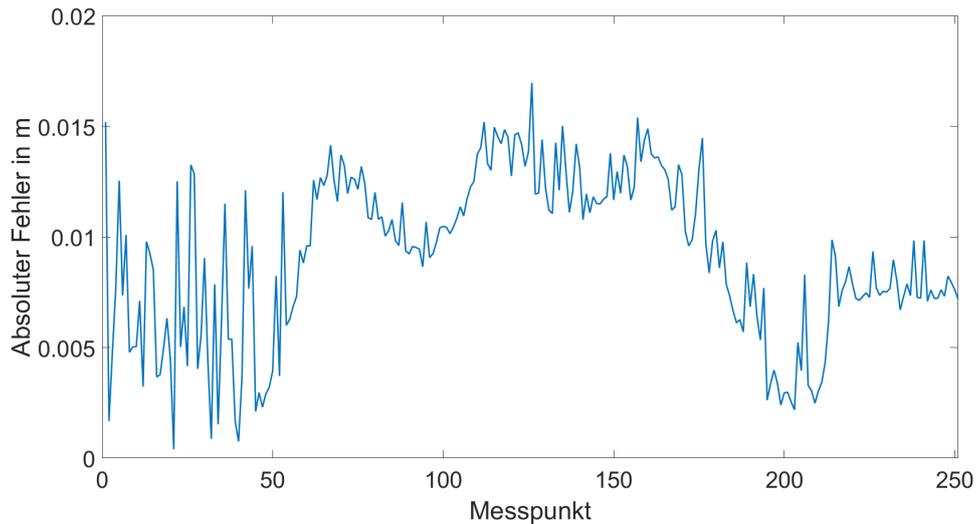
(b) Kalibriertrajektorie - Fern

Abbildung 6.26: Detektierung der Symmetrie-Achse anhand der Constant-Distance-Methode für die nahe und ferne Kalibriertrajektorie.

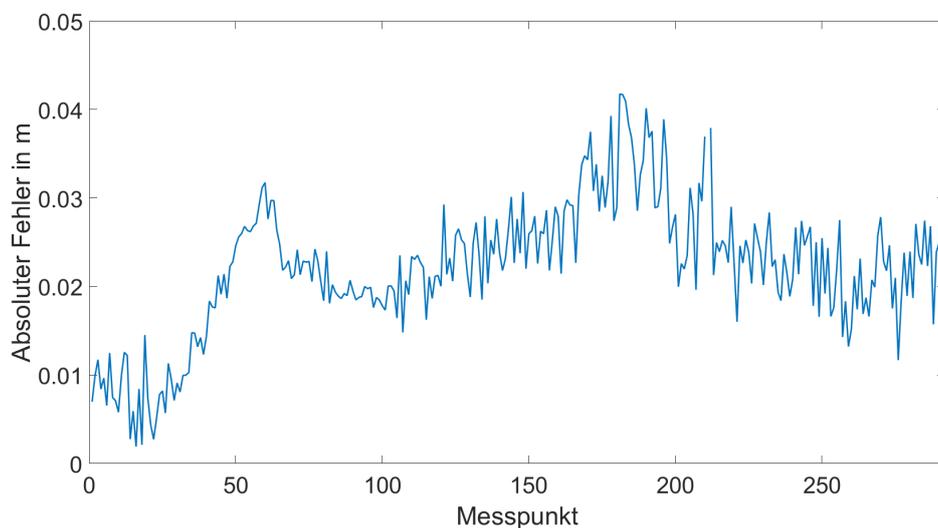
von der Entfernung lässt sich dadurch erklären, dass mit zunehmendem Abstand die Anzahl der Messpunkte abnimmt. Dies führt wiederum dazu, dass der berechnete Korrekturwert für die Verschiebung des Mittelwerts entlang der Sichtachse nicht mit der erforderlichen realen Korrektur übereinstimmt. Mit sinkender Anzahl der Messpunkte auf dem Kreisbogen vergrößert sich der Korrekturwert. Dadurch entsteht ein weiterer systematischer Fehler, welcher aufgrund des Funktionsprinzips des Laserscanners abstandsabhängig ist.

Genauigkeit der Kalibrierung für nahe und ferne Messpunkte

Schließlich wurde die Genauigkeit der Kalibrierung anhand der Fehler zur Referenztransformation bestimmt und die Ergebnisse der beiden Trajektorien miteinander verglichen. Tabelle 6.11 stellt die Fehler der ermittelten Transformationen gegenüber. Die Kalibrierung anhand der na-



(a) Kalibriertrajektorie - Nah



(b) Kalibriertrajektorie - Fern

Abbildung 6.27: Absoluter Fehler der bestimmten Position der Symmetrie-Achse mit der Constant-Distance-Methode für die beiden Trajektorien nah und fern vom Laserscanner.

hen Messpunkte ergibt eine Norm des translatorischen Fehlers von 18 mm . Der Fehler entlang der Z-Achse ist mehr als viermal so groß wie der Fehler entlang der horizontalen Achsen. Für die Rotation ergibt sich bei der Trajektorie mit den nahen Messpunkten eine Norm von $4,43^\circ$. Um die einzelnen Achsen ergibt sich für die Z-Achse ein Fehler, der wesentlich kleiner ist, als um die horizontalen Achsen. Diese Ergebnisse entsprechen qualitativ dem Ergebnis der Simulation.

Für die Trajektorie mit den fernen Messpunkten ergibt sich eine Norm des translatorischen Fehlers von 30 mm . Der Fehler entlang der einzelnen Achsen ist entlang der Z-Achse ebenfalls deutlich größer als entlang der horizontalen Achsen. Für die Rotation ergibt sich bei der Trajektorie mit den fernen Messpunkten eine Norm von $1,26^\circ$. Der rotatorische Fehler ist nahezu

Tabelle 6.11: Analyse der Genauigkeit der realen Experimente mit Kalibriertarget und Constant-Distance-Methode. Fehler entlang der translatorischen und rotatorischen Achsen.

| Fehlermetrik | | Nahe Messpunkte | Ferne Messpunkte |
|------------------------------|-------------------|-----------------|------------------|
| Translatorischer Fehler [mm] | e_x | 0,32 | 7,99 |
| | e_y | 4,44 | 10,21 |
| | e_z | -17,44 | -27,14 |
| | $ e_{xyz} $ | 18,00 | 30,08 |
| Rotatorischer Fehler [°] | e_{rot_x} | -0,03 | 0,56 |
| | e_{rot_y} | 3,27 | 0,87 |
| | e_{rot_z} | -2,86 | -0,71 |
| | $ e_{rot_{xyz}} $ | 4,43 | 1,26 |

gleich um die einzelnen Achsen verteilt.

Der Vergleich zwischen der Genauigkeit der nahen und fernen Messpunkte ergibt, dass die Translation für die nahen Messpunkte besser bestimmt wird, als für die fernen Messpunkte. Für die Rotation gilt gegenteiliges. Obwohl der Fehler der Bestimmung der Position des Kalibriertargets für weit entfernte Messpunkte größer wird, verbessert sich die Genauigkeit der ermittelten Rotation der Transformation.

Die nahen Messpunkte führen zu einem kleineren Fehler der Bestimmung der Position der Messpunkte. Die Ebene des Laserscanners kann anhand dieser Punkte besser translatorisch bestimmt werden. Die Ebene des Laserscanners lässt sich anhand der kleineren Fehler im nahen Bereich des Laserscanners besser in die Stützpunkte verschieben. Für die Rotation gilt dieser Zusammenhang nicht. Für eine Rotation sind weit entfernte Messpunkte besser geeignet, weil weit voneinander entfernte Stützpunkte die Orientierung einer Ebene präziser bestimmen lassen.

Detektierungsfehler der Constant-Distance-Methode für beliebige Entfernung zum Laserscanner Messpunkte

Da die Experimente bezüglich der Entfernung zum Laserscanner ergeben haben, dass der rotatorische Fehler und translatorische Fehler abhängig von der Entfernung zum Laserscanner sind, wurde eine weitere Kalibriertrajektorie aufgenommen, die nahe und weite Entfernungen beinhaltet. Es soll untersucht werden, ob sich so ein kleiner rotatorischer und translatorischer Fehler ergibt. Abbildung 6.28 stellt die Position der Symmetrie-Achse in der Ebene des Laserscanners dar. Es ist zu sehen, dass die in Abbildung 6.27 dargestellten Trajektorien hintereinander abgefahren werden. So ist sichergestellt, dass auch tatsächlich die selben Posen des End-Effektors genutzt werden.

In der Tabelle 6.12 werden die Ergebnisse der translatorischen und rotatorischen Fehler vorgestellt.

Es wird gezeigt, dass die Norm des translatorischen Fehlers bei 19,3 mm liegt. Die Norm des rotatorischen Fehlers liegt bei 1,04°. Der Vergleich mit den Ergebnissen der nahen Trajek-

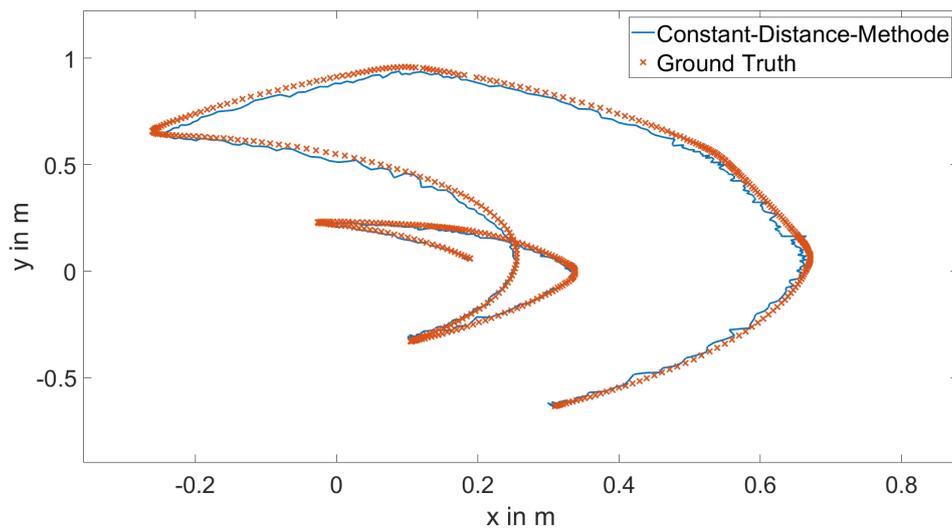


Abbildung 6.28: Detektion der Symmetrie-Achse anhand der Constant-Distance-Methode für die kombinierte Trajektorie.

Tabelle 6.12: Analyse der Genauigkeit der realen Experimente mit Kalibriertarget und Constant-Distance-Methode. Fehler entlang der translatorischen und rotatorischen Achsen.

| Fehlermetrik | | Nahe und ferne Messpunkte |
|------------------------------|-------------------|---------------------------|
| Translatorischer Fehler [mm] | e_x | 6,33 |
| | e_y | 1,89 |
| | e_z | -18,17 |
| | $ e_{xyz} $ | 19,34 |
| Rotatorischer Fehler [°] | e_{rot_x} | 0,62 |
| | e_{rot_y} | 0,46 |
| | e_{rot_z} | 0,69 |
| | $ e_{rot_{xyz}} $ | 1,04 |

torien und der fernen Trajektorie zeigt, dass die Kombination die Genauigkeit verbessert hat. Die Ergebnisse der Rotation liegen in einem ähnlichen Bereich, wie die der fernen Trajektorie und die Ergebnisse der Translation liegen in einem ähnlichen Bereich, wie die der nahen Trajektorie.

Ergebnis des Experiments

Die Untersuchungen haben ergeben, dass der Fehler der Constant Distance Methode bei der Detektion des Kalibriertargets entlang der Kalibriertrajektorie abhängig ist von der Entfernung zum Laserscanner. Mit zunehmendem Abstand steigt auch der Fehler der Detektion. Dies ist auf die abnehmende Anzahl an Messpunkten und den damit entstehenden systematischen Fehler zurückzuführen.

Die Untersuchung zur Genauigkeit der Kalibrierung hat gezeigt, dass der rotatorische Fehler bei entfernten Messposen trotz des größeren Fehlers der Detektion kleiner ist als bei

nahen Messpunkten. Der translatorische Fehler der Kalibrierung verhält sich umgekehrt. Eine Kombination aus nahen und fernen Messpunkten hat den geringsten Fehler der Kalibrierung ergeben.

6.5 Kalibrierung unter Berücksichtigung der Messfehler

In diesen Experimenten wird das Kalibrierverfahren unter Berücksichtigung der Messfehler untersucht. Zunächst werden simulative Experimente durchgeführt. Schließlich wird das vorgestellte Verfahren auf der realen Plattform überprüft.

Zunächst wird in der Simulation geprüft, ob der entwickelte Ansatz die Kalibrierung bestimmen kann. Die Genauigkeit wird ermittelt und evaluiert, ob die geschätzte Unsicherheit der Kalibrierung plausibel ist. In den realen Experimenten wird ebenfalls die Genauigkeit und die Plausibilität der geschätzten Unsicherheit der Kalibrierung untersucht.

6.5.1 Simulative Kalibrierung

In diesem Kapitel wird das Kalibrierverfahren, wie es in Kapitel 5 vorgestellt wurde, simulativ untersucht. Die Funktionalität und die Genauigkeit des Verfahrens werden evaluiert. Die Ergebnisse werden qualitativ und quantitativ ausgewertet, um die Eigenschaften des Kalibrierverfahrens zu verstehen. Um zu beurteilen inwiefern die Berücksichtigung der Messfehler die Genauigkeit verbessern, werden alle Simulationen auch ohne Berücksichtigung der Messfehler ausgewertet (siehe Kapitel 4) und gegenübergestellt. Der Einfluss der Anzahl der Messposen wird ebenfalls untersucht. Das vorgestellte Verfahren gewichtet die einzelnen Messposen anhand des Fehlers aus Manipulator und Laserscanner. Wie in Kapitel 5 vorgestellt, wird der Ansatz gewählt die Summe beider Fehleranteile zur Gewichtung zu bilden und eine initiale Transformation zur Bestimmung des Manipulatorfehlers zu nutzen. Durch diese Vereinfachung wird die Komplexität des Problems reduziert. Die Auswirkung dieser Vereinfachung soll anhand der Schätzung der Unsicherheit untersucht werden.

Für die Simulation wird eine Transformation zwischen Manipulator-Basis und Laserscanner festgelegt zu:

$$\begin{bmatrix} \widetilde{r}_x & \widetilde{r}_y & \widetilde{r}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 20 & 20 & -20 \end{bmatrix} cm$$

$$\begin{bmatrix} \widetilde{\varphi} & \widetilde{\vartheta} & \widetilde{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 & 5 & 45 \end{bmatrix}^\circ$$

Es wird eine Montecarlo Simulation durchgeführt. Hierbei werden unterschiedlichen Kalibriertrajektorien in jeweils 100 Durchläufen simuliert. Die Kalibriertrajektorien unterscheiden sich in der Anzahl $|Q|$ der eingenommenen Messposen des Manipulators mit:

$$|Q| \in \{5, 10, 15, 20, 25, 30\}$$

Die jeweiligen Konfigurationen der Kalibriertrajektorie werden hierbei zufällig bestimmt und alle Gelenkwinkel des Manipulators mit einem zufälligen Messfehler versehen. Die Schnitt-

punkte zwischen Kalibriertarget und Laserscanner werden bestimmt und ebenfalls mit einem Messfehler versehen. Schließlich wird der Kalibriervorgang auf den sich ergebenden Schnittpunkt und die Transformation zwischen Manipulator-Basis und End-Effektor angewendet und die Unsicherheit der bestimmten Parameter geschätzt. Der Messfehler der Manipulatorgelenke wird als Mittelwertfreie Normalverteilung modelliert. Die Standardabweichung der einzelnen Gelenke wird festgelegt zu:

$$\sigma_{q1\dots q6} = 0,16^\circ.$$

Der Messfehler der Detektierung wird ebenfalls als Mittelwertfreie Normalverteilung modelliert. Die Kovarianzmatrix Σ_{CT} wird definiert zu:

$$\Sigma_{CT}(q) = \begin{bmatrix} 8 & 0 \\ 0 & 16 \end{bmatrix} mm$$

Als Startwert der Optimierung wird jeweils $\Psi_{init} = [0, 0, 0, 0, 0, 0]$ verwendet. Dies entspricht einer Transformation im Koordinatensystem des Laserscanners. Die Optimierung wird wie in Kapitel 5 beschrieben durchgeführt.

Durch die Montecarlo Simulation für die unterschiedliche Anzahl an Konfigurationen kann der Einfluss der Anzahl auf die Kalibrierung und die Schätzung der Unsicherheit evaluiert werden. Jede Simulation wird außerdem mit dem in Kapitel 4 vorgestellten Verfahren ohne Berücksichtigung der Messfehler durchgeführt. So lässt sich der Einfluss der Berücksichtigung beurteilen.

Vorzeichenbehafteter Fehler

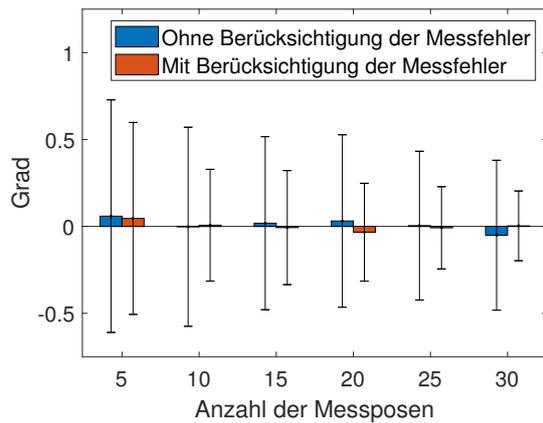
Zunächst werden die vorzeichenbehafteten Fehler untersucht. Diese werden in Abbildung 6.29 grafisch dargestellt. Dargestellt wird der Mittelwert des Fehlers der Kalibrierung, sowie die zugehörige Standardverteilung. Die Ergebnisse werden über der Anzahl der Messposen aufgetragen.

Es ist zu sehen, dass die mittleren Fehler aller Parameter nahezu Null ergeben. Alle translatorischen Fehler sind kleiner als 1,5 mm beziehungsweise kleiner als $0,15^\circ$. Die jeweiligen Standardabweichungen sind um ein vielfaches größer als die Mittelwerte. Dadurch können systematische Fehler des vorgestellten Verfahrens ausgeschlossen werden. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Standardabweichungen mit zunehmender Anzahl an Messposen sinken. Dies zeigt, dass die zunehmende Anzahl an Messposen dazu führt, dass sich die Genauigkeit der Kalibrierung verbessert.

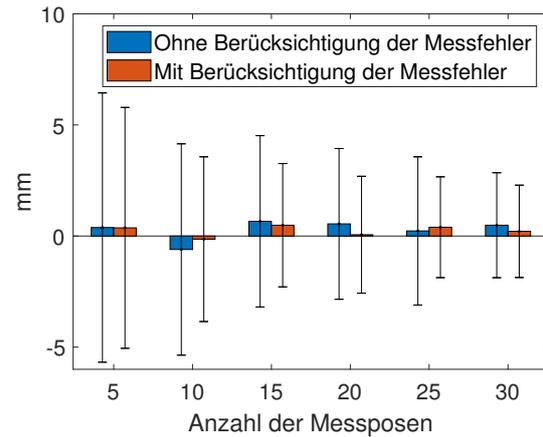
Absoluter Fehler

Um das Verfahren unter Berücksichtigung der Messfehler mit dem Verfahren ohne Berücksichtigung der Messfehler vergleichen zu können, wird außerdem der absolute Fehler der Kalibrierparameter statistisch untersucht. Die Abbildungen 6.30 und 6.31 stellen diese Ergebnisse grafisch dar. Abbildung 6.30 zeigt die statistische Auswertung der translatorischen und rotatorischen Norm des Fehlers.

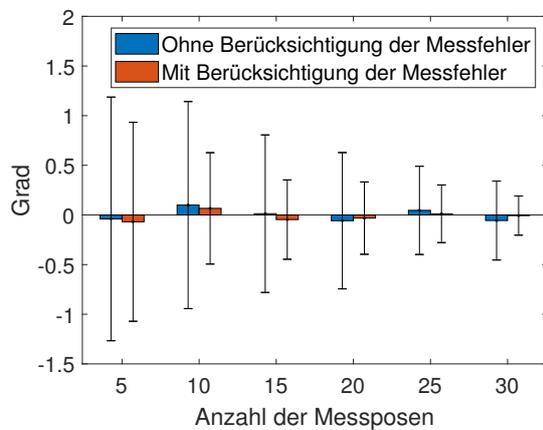
Es ist für beide Verfahren zu sehen, dass der Fehler der Norm mit zunehmender Anzahl der



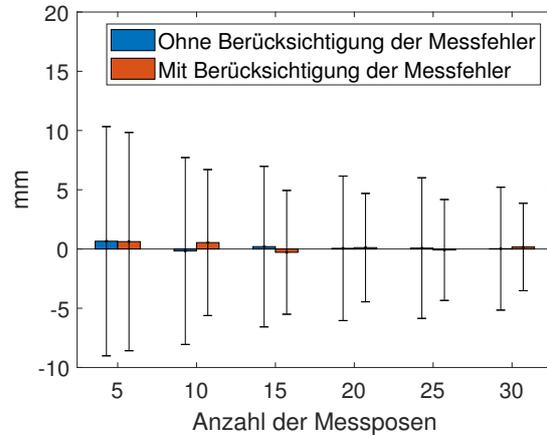
(a) Rotatorischer Fehler der X-Achse



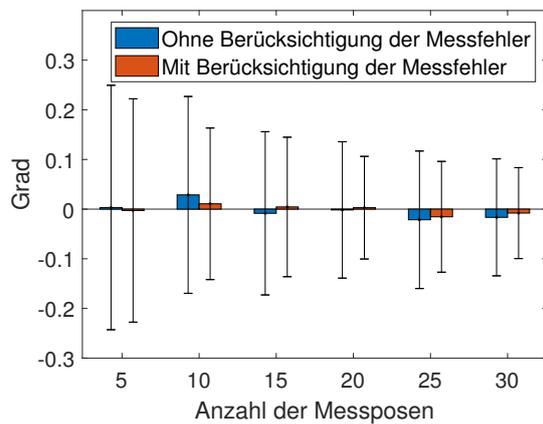
(b) Translatorischer Fehler der X-Achse



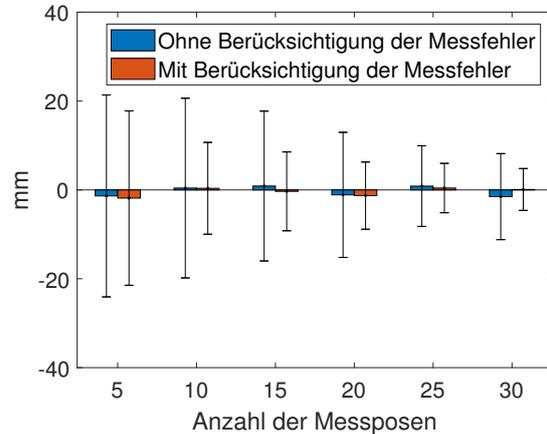
(c) Rotatorischer Fehler der Y-Achse



(d) Translatorischer Fehler der Y-Achse



(e) Rotatorischer Fehler der Z-Achse



(f) Translatorischer Fehler der Z-Achse

Abbildung 6.29: Statistische Auswertung des vorzeichenbehafteten Fehlers der Kalibrierung in der Simulation. Dargestellt wird der Mittelwert und die Standardabweichung des Fehlers der einzelnen Achsen unter und ohne Berücksichtigung der Messfehler über der Anzahl der zugehörigen Messposen der Kalibriertrajektorie.

Messposen abnimmt. Er liegt bei der Translation für 5 Konfigurationen bei etwa 20 mm und für 30 Konfigurationen bei etwa 7,5 mm unter Berücksichtigung des Messfehlers und bei et-

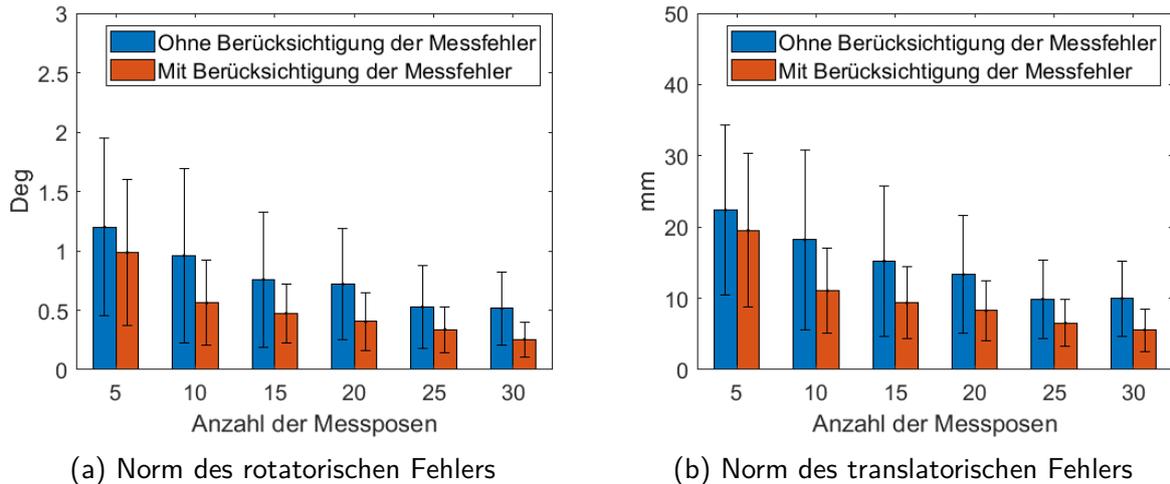


Abbildung 6.30: Statistische Auswertung des absoluten Fehlers der Kalibrierung in der Simulation. Dargestellt wird der Mittelwert und die Standardabweichung der Norm des Fehlers unter und ohne Berücksichtigung der Messfehler über der Anzahl der zugehörigen Messposen der Kalibriertrajektorie.

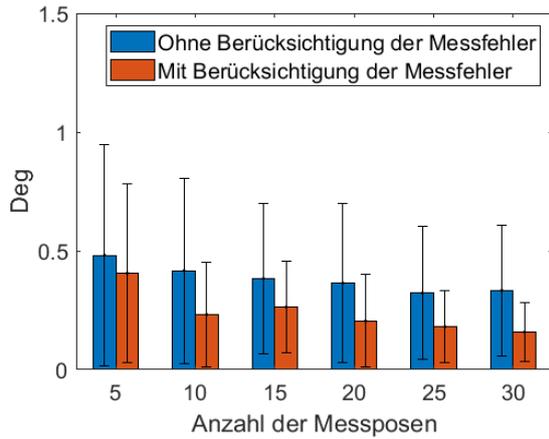
wa 10 *mm* ohne Berücksichtigung des Messfehlers. Für den rotatorischen Fehler gilt selbiges. Er liegt für 5 Konfigurationen bei etwa 1° und für 30 Konfigurationen bei etwa $0,3^\circ$ bzw. $0,5^\circ$.

Es ist außerdem zu sehen, dass der Kalibrierfehler unter Berücksichtigung der Unsicherheiten jeweils deutlich geringer ist als ohne Berücksichtigung der Unsicherheiten. Für 30 Messposen ist der translatorische Fehler 55,4% kleiner und der rotatorische Fehler 57,2% als ohne Berücksichtigung der Unsicherheiten.

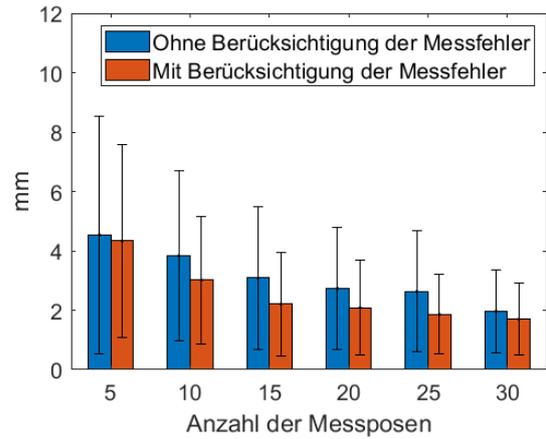
Außerdem zeigt die Auswertung, dass die Standardabweichung des Fehlers für beide Verfahren mit zunehmender Anzahl an Konfigurationen sinkt. Eine steigende Anzahl an Konfigurationen führt demnach dazu, dass die Kalibrierung mit geringerer Streuung bestimmt wird.

Der Vergleich zwischen dem Verfahren unter Berücksichtigung der Messfehler und ohne Berücksichtigung der Messfehler zeigt, dass die Berücksichtigung des Messfehlers den Fehler der Kalibrierung verringert. Die Verbesserung der Kalibriergenauigkeit steigt zudem mit der Anzahl der Messposen. Die Verbesserung der Genauigkeit beträgt translatorisch 12,8% für fünf Konfigurationen und 44,3% für 30 Konfigurationen. Für die Rotation beträgt die Verbesserung 17,8% bei 5 Konfigurationen und 50,2% für 30 Konfigurationen.

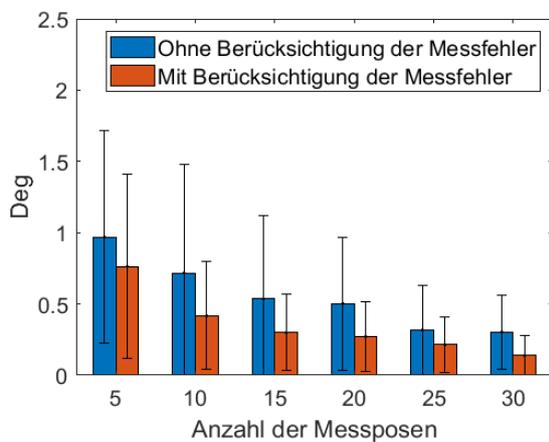
Abbildung 6.31 stellt die statistische Auswertung bezüglich der einzelnen Achsen der Kalibrierung dar. Die Verbesserung der Genauigkeit bezüglich der Anzahl der Konfigurationen zeigt für alle Achsen die gleichen qualitativen Ergebnisse wie durch die Norm der Fehler bereits evaluiert wurde. Darüber hinaus ist zu sehen, dass die Rotation um die Z-Achse mit einem wesentlich geringeren Fehler bestimmt wird, als die Rotation um die horizontalen X- und Y-Achsen: Für jede Anzahl an Konfigurationen etwa Faktor 2,5 für die X-Achse und Faktor 5 für die Y-Achse. Für die Translation entlang der Z-Achse gilt gegenteiliges. Der Fehler entlang der Z-Achse ist



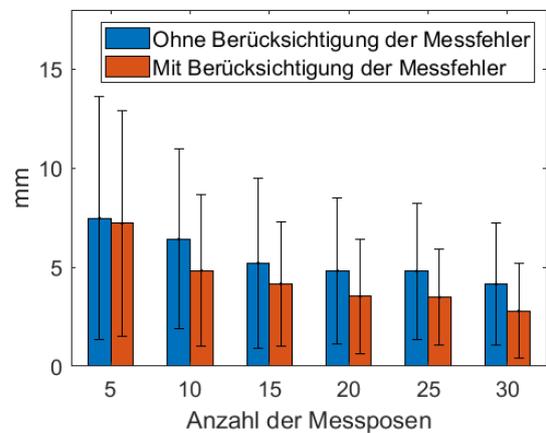
(a) Rotatorischer Fehler der X-Achse



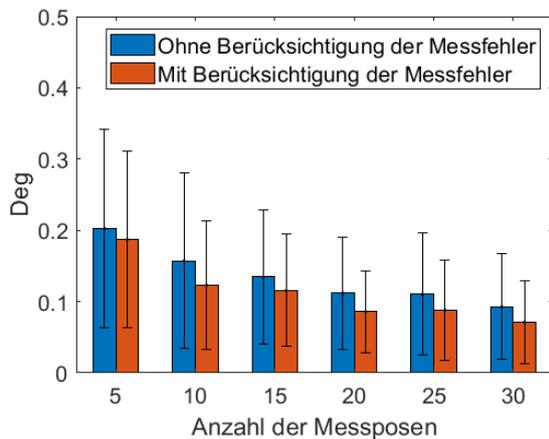
(b) Translatorischer Fehler der X-Achse



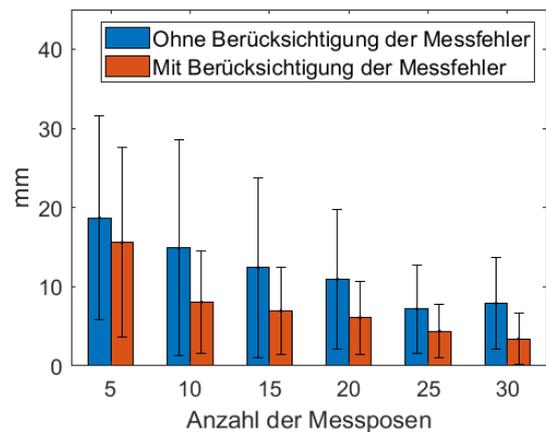
(c) Rotatorischer Fehler der Y-Achse



(d) Translatorischer Fehler der Y-Achse



(e) Rotatorischer Fehler der Z-Achse



(f) Translatorischer Fehler der Z-Achse

Abbildung 6.31: Statistische Auswertung des absoluten Fehlers der Kalibrierung in der Simulation. Dargestellt wird der Mittelwert und die Standardabweichung des Fehlers der einzelnen Achsen unter und ohne Berücksichtigung der Messfehler über der Anzahl der zugehörigen Messposen der Kalibriertrajektorie.

stets größer als entlang der horizontalen Achsen: Für jede Anzahl an Konfigurationen etwa Faktor 5 für die X-Achse und Faktor 2,5 für die Y-Achse.

Zu erkennen ist außerdem, dass die Fehler entlang und um die horizontalen Achsen unterschiedlich aufgeteilt sind und sich dieses Missverhältnis mit zunehmender Anzahl an Messposen verringert. So sind für fünf Messposen die rotatorischen und translatorischen Fehler entlang und um die X-Achse etwa halb so groß wie entlang und um die Y-Achse. Für 30 Konfigurationen sind die Verhältnisse unter Berücksichtigung der Unsicherheiten nahezu aufgehoben. Ohne Berücksichtigung der Messfehler verringert sich das Missverhältnis zwar ebenfalls, jedoch nicht so ausgeprägt.

Schätzung der Unsicherheit

So wie beim vorgestellten Ansatz zur Detektierung der Ellipse die Unsicherheit des Ellipsenmittelpunktes geschätzt werden konnte, kann die Unsicherheit der sich ergebenden Kalibrierparameter ebenfalls anhand der hessischen Matrix bestimmt werden. Da das zugrundeliegende probabilistische Modell Vereinfachungen enthält (siehe Kapitel 5.1), soll untersucht werden, wie sich eine Schätzung der Unsicherheit von der tatsächlichen Unsicherheit der Monte Carlo Simulation unterscheiden. Hierfür wird die mittlere geschätzte Standardabweichung mit der Standardabweichung der Monte Carlo Simulation verglichen.

Abbildung 6.32 zeigt die mittlere geschätzte und tatsächliche Standardabweichung über der Anzahl der Messposen für die Norm der rotatorischen und translatorischen Fehler. Es ist zu se-

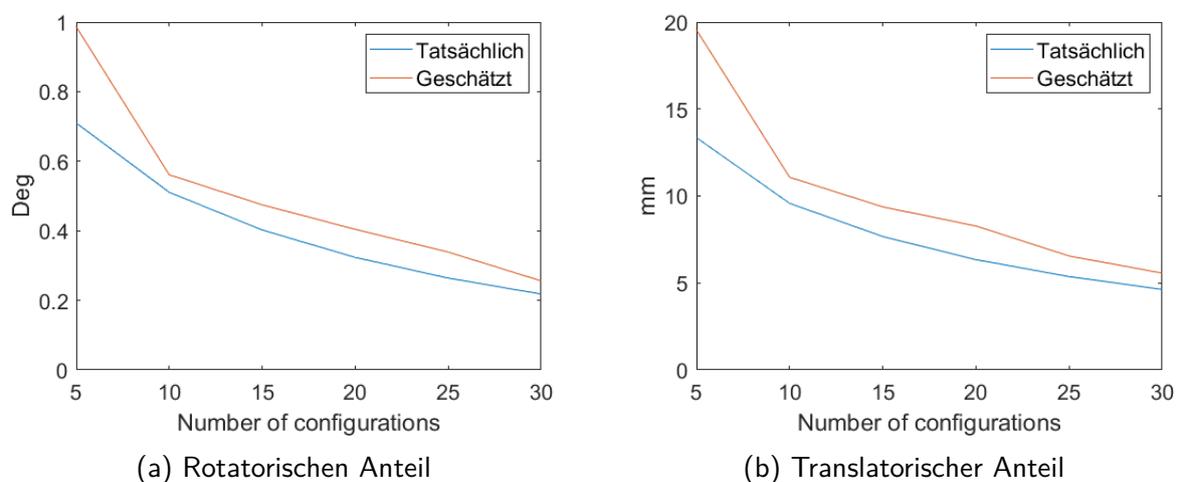


Abbildung 6.32: Statistische Auswertung der geschätzten Standardabweichung der Parameter. Dargestellt wird der geschätzte Wert der Standardabweichung und der tatsächliche Wert für den translatorischen und rotatorischen Anteil der Transformation.

hen, dass sowohl für den rotatorischen Anteil als auch für den translatorischen Anteil stets eine größere Standardabweichung geschätzt wird als sie tatsächlich ist. Das führt dazu, dass eher eine Unterschätzung der Genauigkeit zu beobachten ist. Weiterhin ist zu sehen, dass sich mit steigender Anzahl an Messposen die Schätzung der tatsächlichen Standardabweichung nähert ihn jedoch nicht erreicht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass für die Schätzung der Standardabweichung eine Initiale Optimierung die initiale Transformation bestimmt. Auf Grundlage

dieser initialen Transformation wird der vom Manipulator auf die Ebene des Laserscanners projizierte Fehler für die Gewichtung ermittelt. Diese Vereinfachung des zugrundeliegenden Modells kann nicht korrigiert werden und verursacht vermutlich die bleibende Abweichung zwischen tatsächlicher und geschätzter Standardabweichung.

Ergebnis des Experiments

Das Ergebnis des Experiments zeigt, dass der Kalibrierfehler sowohl mit als auch ohne Berücksichtigung der Unsicherheiten mit zunehmender Anzahl an Messposen sinkt. Weiterhin ist festzustellen, dass der Kalibrierfehler mit Berücksichtigung der Unsicherheiten deutlich kleiner ist als ohne. Die Verbesserung der Genauigkeit durch die Berücksichtigung der Unsicherheiten beträgt für 30 Messposen translatorisch 55,4% und rotatorisch 57,2%

Die Schätzung der Standardabweichung der Kalibrierparameter ist für jede Anzahl an Messposen größer als die tatsächliche Standardabweichung. Die erzielte Genauigkeit wird also stets unterschätzt. Die Abweichung zwischen geschätzter Standardabweichung und tatsächlicher Standardabweichung ist auf die Vereinfachung der Problemstellung durch die Verwendung einer initialen Transformation statt der tatsächlichen Transformation zurückzuführen.

6.5.2 Reale Kalibrierung mit Ellipsenfitting

In diesem Kapitel wird das Kalibrierverfahren, wie es in Kapitel 4 vorgestellt wurde, mit realen Komponenten untersucht. Die Funktionalität und die Genauigkeit des Verfahrens werden evaluiert. Die Ergebnisse werden qualitativ und quantitativ ausgewertet, um die Eigenschaften des Kalibrierverfahrens zu untersuchen. Wie in den simulierten Experimenten in Kapitel 6.5.1 wird die sich ergebene hessische Matrix ausgewertet, um die Standardabweichung der ermittelten Parameter zu bestimmen. Abschließend wird die geschätzte Standardabweichung der Detektierung mit dem tatsächlichen Fehler entlang der Trajektorie verglichen. So wird die Auswirkung der Fehlerverteilung, die von der angenommenen Normalverteilung abweicht untersucht (siehe Kapitel 6.2.2).

Ablauf des Experiments

Für dieses Experiment wurden zwei Kalibriertrajektorien abgefahren. Die erste Kalibriertrajektorie besteht aus zwei Halbbögen um den Laserscanner. Die zweite Kalibriertrajektorie besteht aus denselben Messposen und einem zusätzlichen dritten Halbbogen. Beide Trajektorien werden sowohl unter Berücksichtigung als auch ohne Berücksichtigung der Messfehler untersucht. Im Gegensatz zu dem im vorherigen Kapitel untersuchten realen Experiment wird zur Detektierung des Kalibriertargets das vorgestellte Ellipsenfitting verwendet.

Abbildung 6.33 zeigt das verwendete Kalibriertarget. Es hat einen Durchmesser von 7,5 cm und eine Länge von 20 cm.



Abbildung 6.33: Vom End-Effektor gegriffenes Kalibriertarget.

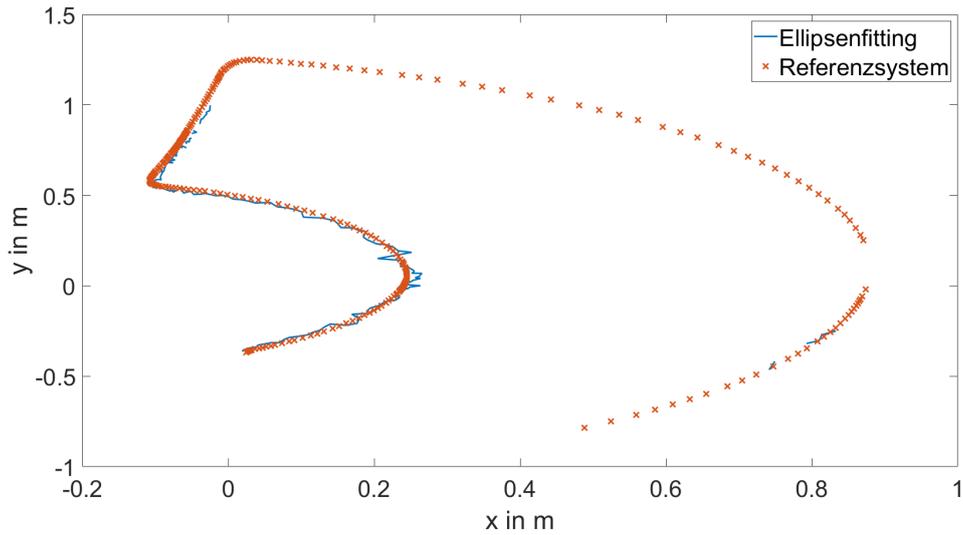
Genauigkeit der Detektierung und der Kalibrierung

Abbildung 6.34 stellt die beiden Kalibriertrajektorien dar. Dargestellt wird zum einen der ermittelte Schnittpunkt des Kalibriertargets mit der Ebene des Laserscanners anhand des Referenzsystems als auch die detektierten Positionen anhand des Ellipsenfittings.

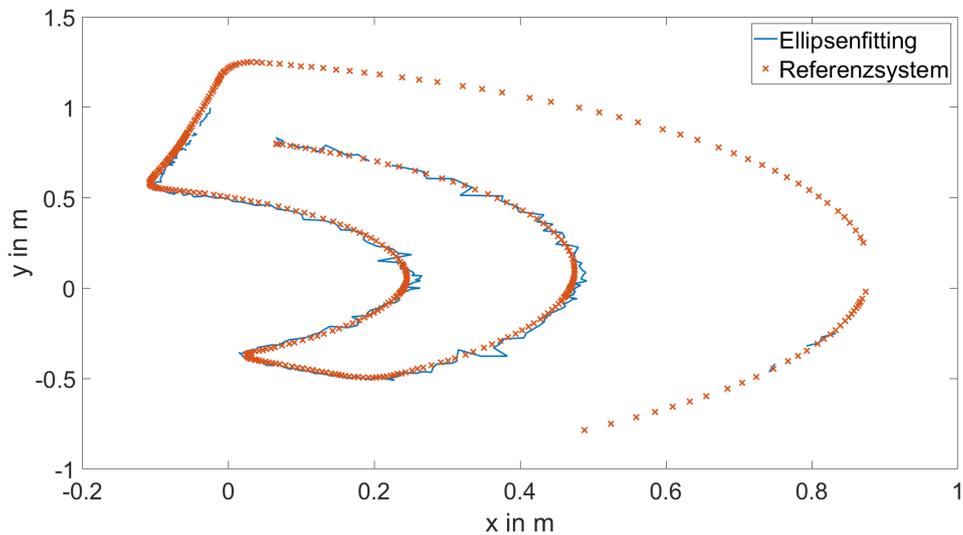
Es ist zu sehen, dass die zweite Kalibriertrajektorie die erste Trajektorie lediglich verlängert. Für eine korrekte Ermittlung der Standardabweichung der Ellipse sind ausreichend Messpunkte erforderlich. Deswegen wurden Messposen mit weniger als 30 Messpunkten nicht berücksichtigt. Die fehlenden Messpunkte im äußersten Halbbogen der Trajektorie zeigen eine Stelle, bei der das Kalibriertarget die Ebene des Laserscanners nicht geschnitten hat.

Abbildung 6.35 zeigt den Fehler des ermittelten Abstands zum Kalibriertarget. Der mittlere Fehler wurde zu $1,23 \text{ mm}$ bestimmt. In Tabelle 6.13 und 6.14 werden die Fehler der Kalibrierung ausgewertet. Tabelle 6.13 zeigt die entstehenden Fehler ohne Berücksichtigung der Messungenauigkeiten. Tabelle 6.14 zeigt die entstehenden Fehler unter Berücksichtigung der Messungenauigkeiten. Dargestellt wird der Fehler der einzelnen Achsen und der Normen.

Die Messungenauigkeit nicht zu berücksichtigen führt bei der ersten Trajektorie zu einer translatorischen Norm von $15,15 \text{ mm}$ und bei der zweiten Trajektorie zu einer translatorischen Norm von $15,03 \text{ mm}$. Die Verbesserung durch die zusätzlichen Messposen in der zweiten Trajektorie ist minimal. Gleiches gilt für den rotatorischen Fehler. Die rotatorische Norm liegt für die erste Trajektorie bei $2,72^\circ$ und bei der zweiten Trajektorie bei $2,76^\circ$. Die qualitative Evaluierung der einzelnen Achsen zeigt die gleichen Ergebnisse, wie die realen Experimente aus dem vorherigen Kapitel mit der Constant-Distance-Methode. Die Translation entlang der Z-Achse wird mit dem größten Fehler bemessen und die Rotation um die Z-Achse mit dem kleinsten Fehler. Der relativ große rotatorische Fehler geht auf die fehlenden Messungen mit großer Entfernung zum



(a) Kalibriertrajektorie - Zwei Halbbögen



(b) Kalibriertrajektorie - Drei Halbbögen

Abbildung 6.34: Detektierung der Symmetrie-Achse anhand des Ellipsenfitting für zwei Kalibriertrajektorien. Dargestellt werden die detektierten Schnittpunkte der Symmetrie-Achse als auch die detektierten Schnittpunkte des Referenzsystems

Laserscanner zurück. Die Werte zeigen, dass der größte Teil des Fehlers durch die Rotation um die Y-Achse entsteht. Da die Anzahl der Messpunkte auf mindestens 30 Messpunkte festgelegt wurde, wurden weit entfernte Messungen nicht berücksichtigt. Dies führte dazu, dass die Orientierung der horizontalen Ebene nur mit großer Ungenauigkeit bestimmt werden kann.

Die Messungenauigkeiten zu berücksichtigen führt bei der ersten Trajektorie zu einem Fehler der translatorischen Norm von 14,17 mm und der rotatorischen Norm von $1,95^\circ$. Im Vergleich mit der Kalibrierung ohne Berücksichtigung der Messungenauigkeit ist der Fehler nur minimal kleiner. Weitere Messposen aus der zweiten Kalibriertrajektorie führen allerdings zu einer

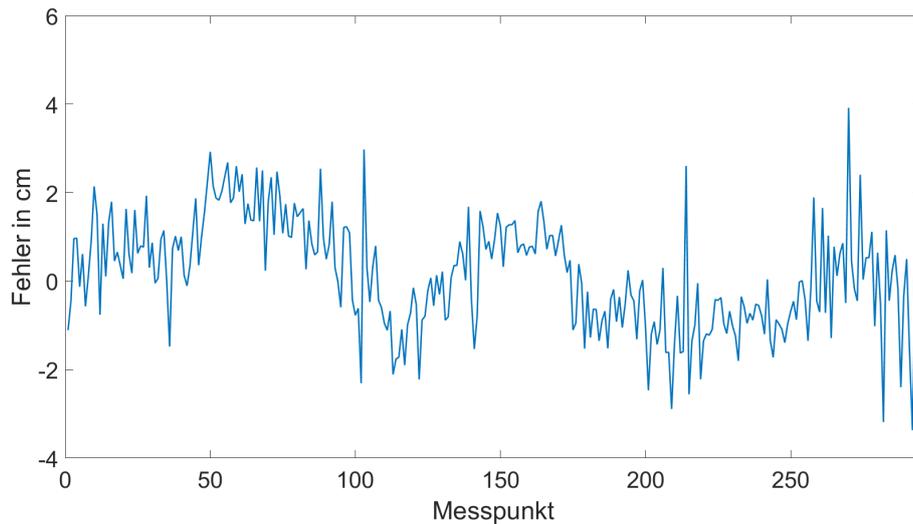


Abbildung 6.35: Fehler des ermittelten Abstands zum Kalibriertarget entlang der Kalibriertrajektorie.

deutlichen Verringerung des Fehlers. Der Fehler der translatorischen Norm wird mit 6,67 mm bemessen und der Fehler der rotatorischen Norm mit $2,21^\circ$. Die Berücksichtigung der Messfehler hat den Fehler der Kalibrierung für die zweite Trajektorie mit ausreichend Messposen translatorisch um 55,6% und rotatorisch um 19,9% verringert.

Tabelle 6.13: Analyse der Genauigkeit der realen Experimente mit Kalibriertarget und Ellipsen Fitting ohne Berücksichtigung der Messungenauigkeiten. Fehler entlang der translatorischen und rotatorischen Achsen.

| Fehlermetrik | | Trajektorie 1 | Trajektorie 2 |
|-----------------------------------|-------------------|---------------|---------------|
| Translatorischer Fehler [mm] | e_x | 1,30 | 0,52 |
| | e_y | 4,30 | 5,31 |
| | e_z | 14,47 | 14,05 |
| | $ e_{xyz} $ | 15,15 | 15,03 |
| Rotatorischer Fehler [$^\circ$] | e_{rot_x} | 0,39 | 0,43 |
| | e_{rot_y} | -2,63 | -2,65 |
| | e_{rot_z} | 0,53 | 0,67 |
| | $ e_{rot_{xyz}} $ | 2,72 | 2,76 |

Tabelle 6.14: Analyse der Genauigkeit der realen Experimente mit Kalibriertarget und Ellipsen Fitting unter Berücksichtigung der Messungenauigkeiten. Fehler entlang der translatorischen und rotatorischen Achsen.

| Fehlermetrik | | Trajektorie 1 | Trajektorie 2 |
|------------------------------|-------------------|---------------|---------------|
| Translatorischer Fehler [mm] | e_x | -1,70 | 1,08 |
| | e_y | 3,56 | -0,35 |
| | e_z | 13,61 | 6,58 |
| | $ e_{xyz} $ | 14,17 | 6,67 |
| Rotatorischer Fehler [°] | e_{rot_x} | 0,49 | -1,26 |
| | e_{rot_y} | 1,80 | -1,59 |
| | e_{rot_z} | -0,56 | 0,89 |
| | $ e_{rot_{xyz}} $ | 1,95 | 2,21 |

Schätzung der Standardabweichung der Kalibrierparameter

Wie in den simulierten Experimenten in Kapitel 6.5.1 wird die sich ergebene hessische Matrix ausgewertet, um die Standardabweichung der ermittelten Parameter zu bestimmen. Tabelle 6.15 zeigt die 3-Sigma-Umgebung der geschätzten Unsicherheit der Parameter. Für alle translatorischen Werte ist zu sehen, dass die 3-Sigma-Umgebung im Bereich der ermittelten Fehler liegt. Außerdem tritt eine Verkleinerung des Konfidenzintervalls für die translatorischen Fehler zwischen der ersten und der erweiterten Trajektorie auf. Für die rotatorischen Parameter ist keine Verkleinerung des Konfidenzintervalls aufgetreten. Außerdem zeigt sich, dass die 3-Sigma-Umgebung der Rotation um die X-Achse und um die Z-Achse für die zweite Trajektorie außerhalb des 3-Sigma-Konfidenzintervalls liegen. Statistisch betrachtet kann dieser Fall eintreten, allerdings liegt die Wahrscheinlichkeit dafür nur bei 0,28 %.

Die Untersuchung der Schätzung der Standardabweichung in der Simulation hat gezeigt, dass die Standardabweichung zu groß geschätzt wird statt zu klein. Auf die Ungenauigkeit des Modells kann die fehlerhafte Schätzung dieser beiden Parameter also nicht zurückgeführt werden. Daher wird vermutet, dass die zugrundeliegenden Fehlerverteilungen der Messpunkte des Laserscanners, die nicht den erforderlichen Normalverteilungen entsprechen, die Ursache für die Fehlschätzung sind. Diese werden daher im Folgenden untersucht.

Tabelle 6.15: Analyse der geschätzten Unsicherheit der realen Experimente mit Kalibriertarget und Ellipsen Fitting unter Berücksichtigung der Messungenauigkeiten.

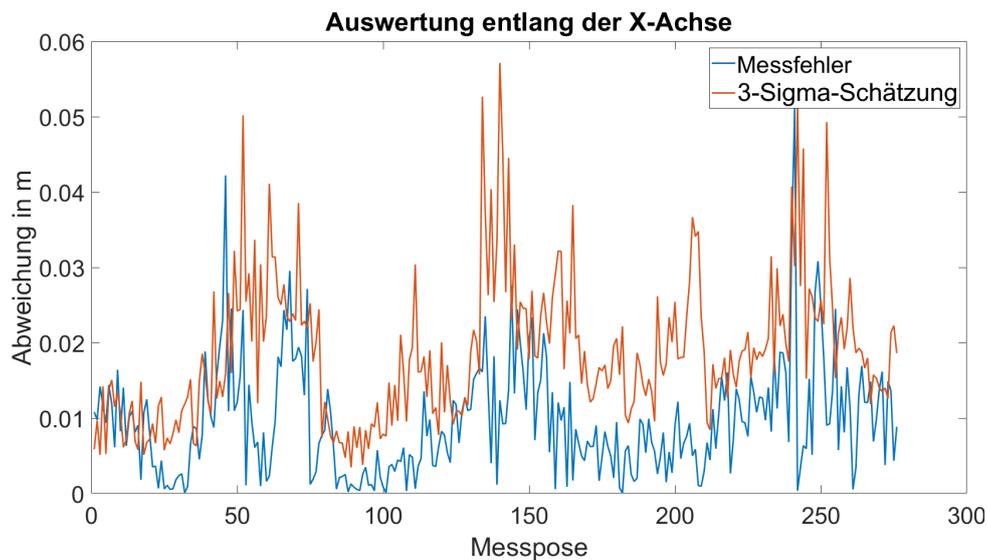
| Metrik | | Trajektorie 1 | Trajektorie 2 |
|---|-----------------------|---------------|---------------|
| Geschätzte Drei-Sigma-Umgebung der Translation [mm] | $3 \sigma(e_x)$ | $\pm 8,7$ | $\pm 2,3$ |
| | $3 \sigma(e_y)$ | $\pm 30,7$ | $\pm 3,6$ |
| | $3 \sigma(e_z)$ | $\pm 18,5$ | $\pm 13,5$ |
| Geschätzte Drei-Sigma-Umgebung der Rotation [°] | $3 \sigma(e_{rot_x})$ | $\pm 1,2$ | $\pm 0,9$ |
| | $3 \sigma(e_{rot_y})$ | $\pm 1,8$ | $\pm 1,8$ |
| | $3 \sigma(e_{rot_z})$ | $\pm 0,6$ | $\pm 0,6$ |

Schätzung der Standardabweichung der Detektierung entlang der Trajektorie

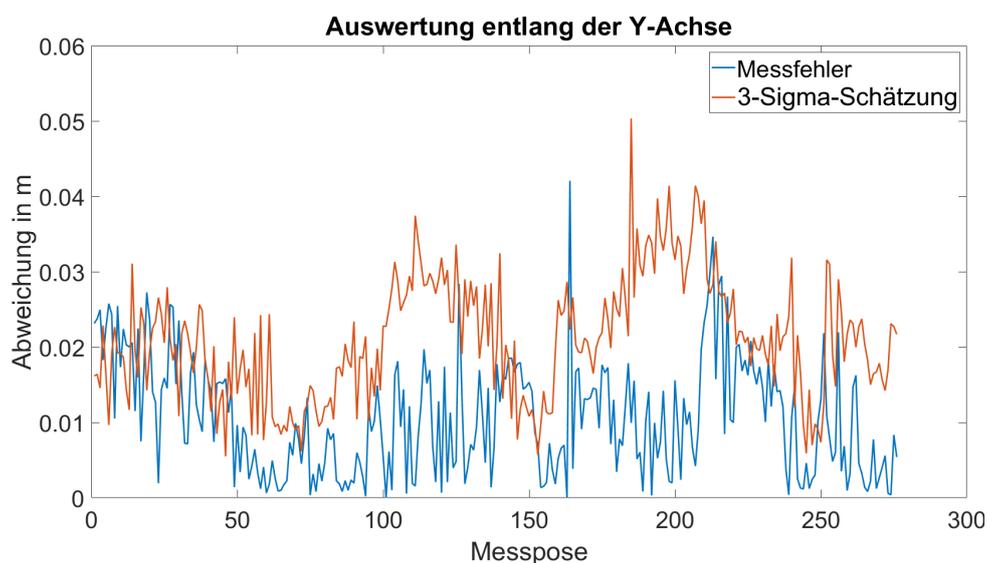
Um die Schätzung der Standardabweichung der Detektierung zu beurteilen wird die geschätzte

Standardabweichung gegen den tatsächlichen Fehler entlang der Trajektorie aufgetragen. Dies wird in Abbildung 6.36 für die X- und die Y-Achse dargestellt.

Es ist zu sehen, dass der qualitative Verlauf der 3-Sigma Umgebung dem qualitativen Verlauf des Messfehlers der X-Achse etwa entspricht. Für die Y-Achse sind zwischen den Messpunkten 100 und 140 sowie den Messpunkten zwischen 170 und 230 deutliche Unterschiede zu erkennen. Das lässt darauf schließen, dass die Standardabweichung für diese Bereiche zu groß geschätzt wird. Es wird vermutet, dass die Überschätzung des Fehlers in diesen Bereichen zu einer fehlerhaften niedrigeren Gewichtung dieser Messposen führt und deswegen die Ungenauigkeit der Kalibreirparameter falsch geschätzt wird.



(a) Kalibriertrajektorie - Zwei Halbbögen



(b) Kalibriertrajektorie - Drei Halbbögen

Abbildung 6.36: 3-Sigma Schätzung der Standardabweichung und tatsächlicher Fehler der Detektierung entlang der Trajektorie.

Ergebnis des Experiments

Dieses Experiment hat ergeben, dass die Berücksichtigung der Messgenauigkeit eine Verbesserung der Genauigkeit verursacht. So wird eine Reduzierung des translatorischen Fehlers um 55,6% und des rotatorischen Fehlers um 19,9% erzielt. Weiterhin wurde gezeigt, dass die Standardabweichung der Kalibrierparameter zu klein geschätzt wurden. Dies weicht von den Ergebnissen der Simulation ab. Die Untersuchung der geschätzten Unsicherheit der Detektierung entlang der Kalibriertrajektorie lässt vermuten, dass die Ursache in den zugrundeliegenden Fehlerverteilungen der Messpunkte des Laserscanners liegt. Diese weichen wie in Kapitel 6.2.2 untersucht von einer Normalverteilung ab.

6.6 Kalibrierung mit dem Manipulator selbst

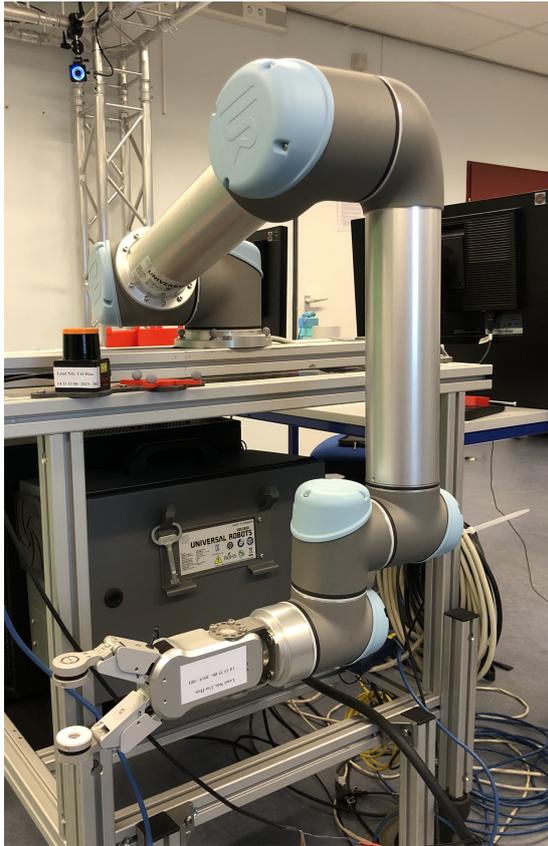
In diesem Kapitel wird das Kalibrierverfahren, wie es in Kapitel 4 vorgestellt wurde, mit realen Komponenten untersucht. Dabei wird der Manipulator selbst zur Kalibrierung verwendet. Das dritte Manipulatorglied dient in diesem Fall als Kalibriertarget. Die Funktionalität und die Genauigkeit des Verfahrens werden evaluiert. Die Ergebnisse werden qualitativ und quantitativ ausgewertet, um die Eigenschaften des Kalibrierverfahrens ohne Kalibriertarget zu verstehen.

Abbildung 6.37 zeigt das untersuchte Setting. Da die Experimente aus Kapitel 6.2 gezeigt haben, dass die Aluminium-Oberfläche des Manipulators zu einer Verschiebung der Messpunkte führt, wurde das Experiment mit und ohne eine Papierschicht um das Manipulator-Glied durchgeführt. So wird untersucht, wie sich eine unberücksichtigte Verschiebung der Messpunkte auf die Kalibrierung und die Schätzung der Unsicherheit auswirkt.

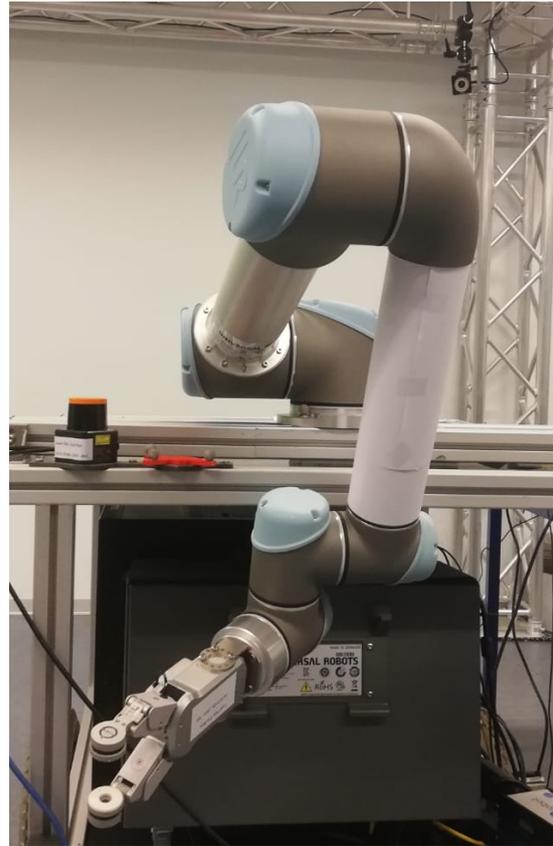
Es ist zu erkennen, dass das dritte Manipulator-Glied aus praktischer Sicht für die Kalibrierung genutzt werden kann, sofern die Manipulator-Glieder vier bis sechs sowie der Greifer unter der Ebene des Laserscanners genügend Raum haben. In Abbildung 6.38 werden die Trajektorien des Manipulators abgebildet. Dargestellt werden die Schnittpunkte der Symmetrie-Achse des Manipulator-Gliedes mit der Ebene des Laserscanners. Diese wurde mittels Ellipsenfitting bestimmt und werden mit dem Schnittpunkt des Referenzsystems verglichen.

Die dargestellte Trajektorie zeigt einen deutlichen Unterschied zu den aufgenommenen Trajektorien unter Verwendung eines Kalibriertargets. Dadurch, dass das dritte Manipulator-Glied verwendet wird, ist die Bewegung eingeschränkt. Der maximale Abstand zum Laserscanner liegt bei etwa 75 cm. Zudem ist bei großen Abständen aufgrund der Kinematik des Manipulators der Eintrittswinkel zwischen Manipulator und Ebene des Laserscanners so flach, dass der Laserstrahl mit geringer Intensität reflektiert wird. Dadurch ergeben sich für große Abstände zu wenig Messpunkte, um die Ellipse zu detektieren. Es zeigt sich auch, dass sich die drei abgefahrenen Halbkreis-Bögen in einem Punkt schneiden. Dies war nicht anders möglich, da der Manipulator an dieser Stelle sonst mit den tragenden Aluminium-Profilen kollidiert wäre.

Abbildung 6.39 zeigt den Fehler des ermittelten Abstands zum Manipulatorglied mit und ohne Papier-Beschichtung. Es ist ebenfalls zu sehen, dass aufgrund der geringen Anzahl an Mess-



(a) Manipulator-Glied mit unveränderter Oberfläche



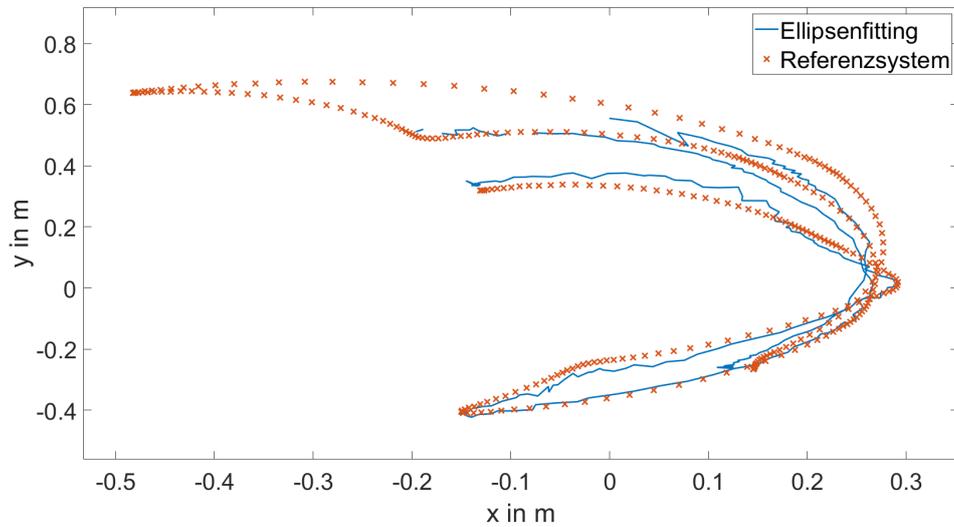
(b) Manipulator-Glied mit Papier überzogener Oberfläche

Abbildung 6.37: Reales Setting der Kalibrierung unter Nutzung des Manipulators selbst als Kalibriertarget.

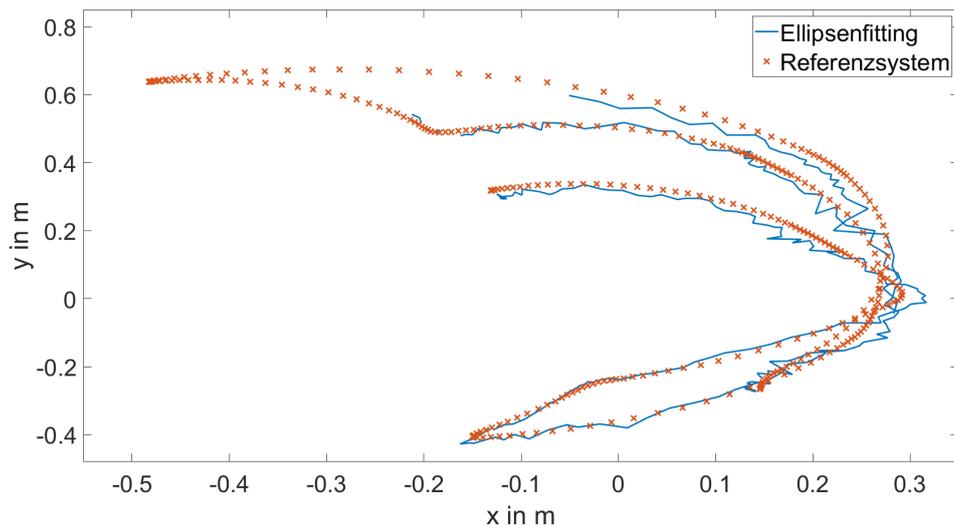
punkten der größte mögliche Abstand zum Kalibriertarget bei etwa 60 cm liegt. Dies ist ein großer Unterschied zu den Trajektorien unter Verwendung eines Kalibriertargets. Bei näherer Betrachtung der Trajektorie ohne Papier-Beschichtung ist weiterhin zu sehen, dass die detektierte Kalibriertrajektorie in einzelnen Bereichen eine deutliche Verschiebung in Richtung des Laserscanners aufweist. Wie in Kapitel 6.3 gezeigt, führt die Reflexion des Aluminiums zu einer Verschiebung der Messpunkte in Richtung des Laserscanner Koordinatensystems. Die Reflexionseigenschaften des Materials des Manipulatorgliedes nicht zu berücksichtigen führt zu einem nicht unerheblichen Fehler der Detektierung des Manipulatorgliedes. Abbildung 6.39 zeigt den ermittelten Fehler des Abstands zum Laserscanner mit und ohne Papier-Beschichtung. Es ist zu sehen, dass der Fehler ohne Papier-Beschichtung entlang der Trajektorie eine deutlich andere Charakteristik aufweist.

Tabelle 6.16 zeigt die ermittelte Genauigkeit der Kalibrierung ohne und mit Papier-Beschichtung des Manipulator-Gliedes. Es ist zu sehen, dass die ermittelten Parameter mit Papierbeschichtung einen kleineren Fehler aufweisen als mit Papier-Beschichtung. So ist die Norm des translatorischen Fehlers 16,54% geringer als die ohne Papierbeschichtung. Die Verbesserung der rotatorischen Parameter liegt bei 72,34% für die Norm des Fehlers. Der Fehler, der durch die unberücksichtigten Reflexionseigenschaften der Oberfläche entsteht wirkt sich also negativ auf

die Ermittlung der Kalibrierparameter aus.



(a) Kalibriertrajektorie - Ohne Papier-Beschichtung

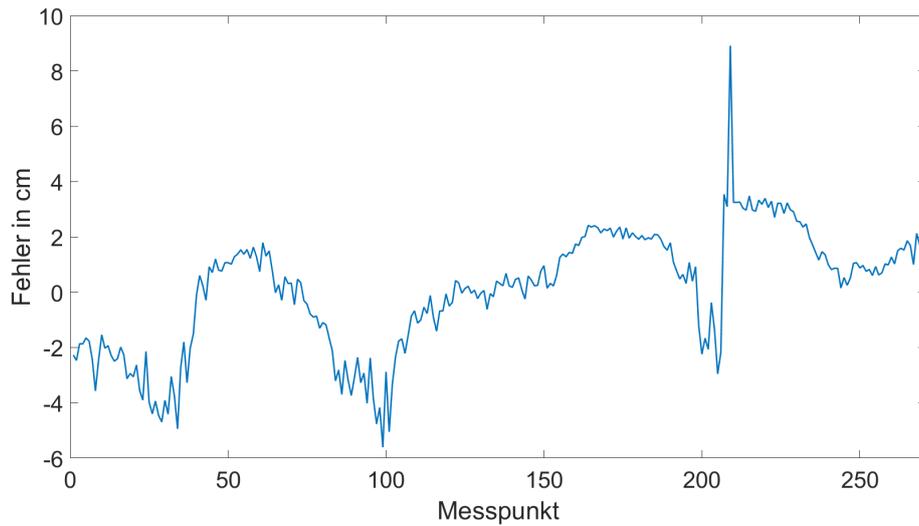


(b) Kalibriertrajektorie - Mit Papier-Beschichtung

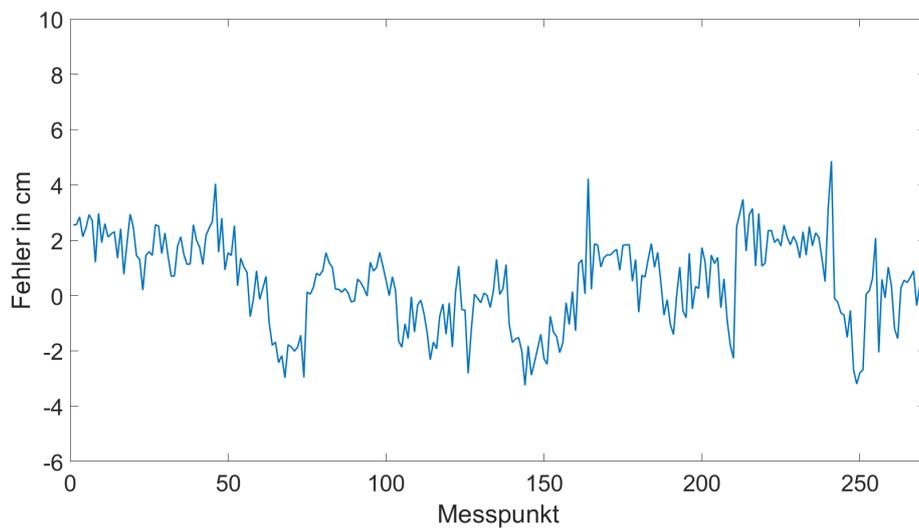
Abbildung 6.38: Detektierung der Symmetrie-Achse anhand des Ellipsenfiting für die Kalibriertrajektorie. Dargestellt werden die detektierten Schnittpunkte der Symmetrie-Achse als auch die detektierten Schnittpunkte des Referenzsystems mit und ohne der Papier-Beschichtung.

Ergebnis des Experiments

Das Experiment hat gezeigt, dass es möglich ist den Manipulator selbst zur Kalibrierung zu verwenden. Die Genauigkeit der ermittelten Kalibrierparameter ergibt sich unter Berücksichtigung der Messfehler translatorisch zu 15,80 mm und rotatorisch zu $0,65^\circ$. Die Reflexionseigenschaften der Beschichtung des Manipulators nicht zu berücksichtigen verschlechtert die Kalibriergenauigkeit wesentlich und führt translatorisch und rotatorisch zu einem Fehler der Kalibrierparameter von 19,07 mm und $2,35^\circ$. Weiterhin haben sich praktische Einschränkungen



(a) Kalibriertrajektorie - Ohne Papier-Beschichtung



(b) Kalibriertrajektorie - Mit Papier-Beschichtung

Abbildung 6.39: Fehler des ermittelten Abstands zum Kalibriertarget entlang der Kalibriertrajektorie mit und ohne Papier-Beschichtung.

gen gezeigt, da das verwendete dritte Manipulatorglied die Kalibriertrajektorie abfahren können muss.

Tabelle 6.16: Genauigkeit mit und ohne Papier-Beschichtung: Analyse der Genauigkeit der realen Experimente ohne Kalibriertarget. Dargestellt werden die Fehler entlang der translatorischen und rotatorischen Achsen für die Kalibrierung mit Berücksichtigung der Messungenauigkeiten.

| Fehlermetrik | | Ohne Beschichtung | Mit Beschichtung |
|------------------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| Translatorischer Fehler [mm] | e_x | 1,64 | 4,41 |
| | e_y | 3,16 | 6,98 |
| | e_z | -18,73 | -13,47 |
| | $ e_{xyz} $ | 19,07 | 15,80 |
| Rotatorischer Fehler [°] | e_{rot_x} | 1,63 | 0,57 |
| | e_{rot_y} | 1,69 | -0,08 |
| | e_{rot_z} | 0,14 | 0,30 |
| | $ e_{rot_{xyz}} $ | 2,35 | 0,65 |

Kapitel 7

Bewertung und Ausblick

7.1 Bewertung

Durch reale und simulierte Experimente konnte gezeigt werden, dass der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz zur Kalibrierung zwischen Manipulator und 2D Laserscanner geeignet ist. Weiterhin wurde gezeigt, dass eine Kalibrierung ohne Kalibriertarget möglich ist, sofern der Manipulator eine Geometrie aufweist, anhand der die Symmetrie-Achse aus einem Querschnitt bestimmt werden kann. Dies gilt für Manipulatoren mit zylinderförmigen Gliedern.

Fehlermodell des Laserscanners

Im Abschnitt 6.2 wurde der Laserscanner Hokuyo UST-10LX-H01 erstmals bezüglich seiner Genauigkeit untersucht. Hierfür wurden für ein zylindrisches Kalibriertarget mit einem Durchmesser von $7,5\text{ cm}$ die Parameter Eintrittswinkel, Messwinkel und Entfernung zum Laserscanner variiert und die entstehende Fehlerverteilung analysiert.

Die Experimente zeigen, dass sowohl der Eintrittswinkel, der Messwinkel als auch die Entfernung zum Laserscanner die Verteilung des Messfehlers beeinflussen. Je nach Lage und Eintrittswinkel des Kalibriertargets variiert die Verteilung des Fehlers und weicht teilweise sogar von der Normalverteilung ab. Die Annahme den Messfehler mit einer Normalverteilung zu beschreiben gilt zwar annähernd, sofern der Fehler über alle Parametervariationen gemittelt wird, trifft jedoch nicht für die einzelnen Parametervariationen zu.

Darüber hinaus wurde der Einfluss der Farbe und des Materials des Kalibriertargets auf die Messung untersucht. Hierbei wurde festgestellt, dass die Farbe keinen wesentlichen Einfluss auf die Messungen nimmt. Im Gegensatz hierzu wirkt sich das Material jedoch merklich auf die Messungen aus. So liegt der Durchmesser des verwendeten Manipulatorgliedes bei $7,5\text{ cm}$ und die Materialabhängigkeit verursacht eine Verschiebung des Mittelwertes um $1,158\text{ cm}$ zwischen Aluminium und Papier beziehungsweise $2,720\text{ cm}$ zwischen dem verwendeten Filament und Papier.

Weiterhin wird deutlich, dass der Messfehler des zur Verfügung stehenden Laserscanners verhältnismäßig groß ist. So wurde die Standardabweichung über alle Parametervariationen zu

13,8 mm bestimmt. Folglich hat das 3-Sigma-Konfidenzintervall der Verteilung des Messfehlers bei Papierummantelung eine Breite von $2 \cdot 3 \cdot \sigma_L = 8,28 \text{ cm}$ und entspricht somit 110,4% des Durchmessers des Manipulatorgliedes beziehungsweise des Kalibriertargets.

Konsequenzen der vereinfachenden Annahme bezüglich der Fehlerverteilung für diese Arbeit

Innerhalb der Forschungsgemeinde ist es eine etablierte Annahme von einer Normalverteilung der Messfehler auszugehen. So wurde die Wahl der Normalverteilung für die Kalibrierung unter Berücksichtigung der Messfehler in dieser Arbeit anhand des Stand der Forschung begründet (siehe Kapitel 2). Die Normalverteilung wird in der Regel nicht in Frage gestellt und abweichende Fehlerverteilungen werden in den gängigen Algorithmen und Simulationen nicht berücksichtigt.

In dieser Arbeit wurde festgestellt, dass die Annahme der Normalverteilung dem realen Experiment nicht stand hält. Aus dieser Feststellung ergaben sich zwei Möglichkeiten die Untersuchungen fortzusetzen: Zum Einen hätte ein Ansatz entwickelt werden können, der die tatsächlichen Fehlerverteilungen berücksichtigt oder auf einem anderen Fehlermodell beruht. Zum Anderen konnten die Auswirkungen, die sich aus der vereinfachenden Annahme ergeben, evaluiert werden.

Ein neu entwickelter Ansätze hätte möglicherweise eine höhere Genauigkeit zur Folge gehabt. Die Auswirkungen der vereinfachenden und etablierten Annahme zu untersuchen würde jedoch neue Erkenntnisse liefern, die über diese Arbeit hinausgehen könnten. Die wissenschaftliche Relevanz die Auswirkungen dieser vereinfachenden Annahme zu untersuchen wurde größer bewertet. Es wurde deswegen die bewusste Entscheidung getroffen den Ansatz weiter zu verfolgen und den sich daraus ergebenden Fragen nachzugehen.

Die folgend diskutierten Ergebnisse enthalten die identifizierten Auswirkungen bezüglich der jeweiligen Experimente. Am Ende dieses Kapitels werden die Auswirkungen dieser vereinfachenden Annahme auf die Detektierung und die Kalibrierung zusammengefasst.

Detektierung des Kalibriertargets

Im Abschnitt 6.3 wurde die Detektierung des Kalibriertargets untersucht. Hierfür wurden Experimente in der Simulation und in der Realität durchgeführt.

Die in der Simulation erzeugten Ausschnitte von Kreisen und Ellipsen wurden mit einem Messfehler beaufschlagt. Es konnte festgestellt werden, dass das FGEE [SCH15] weder Kreise noch Ellipsen zuverlässig detektieren kann. Der im Vergleich zur Kreis- beziehungsweise Ellipsen-Geometrie große Messfehler und der im Laserscan zur Verfügung stehende kleine Ausschnitt führen im realen Experiment zu einem mittleren Detektierungsfehler von 1710 m. Es ließ sich an den Ergebnissen erkennen, dass die Ellipsen mit stark gekrümmten Bereichen in die Messpunkte optimiert wurden und so dieser große Detektierungsfehler entstanden ist. Dies ist auf die zugrundeliegende algebraische Repräsentation der Ellipse zurückzuführen (siehe Kapitel 2).

In den simulierten Experimenten zeigt sich, dass das CDM für die Detektierung von Kreisen einen geringeren Fehler aufweist als das MLE. Für das CDM liegt bei Kreisen der mittlere Fehler bei $1,182 \text{ mm}$ und für das MLE bei $5,360 \text{ mm}$. Das MLE weist wiederum einen kleineren Fehler bei Ellipsen auf. Der mittlere Fehler liegt für das MLE bei $3,258 \text{ mm}$ und für das CDM bei $15,436 \text{ mm}$. Dies ist auf den systematischen Fehler des CDM bei der Detektierung von Ellipsen zurückzuführen.

Es konnte außerdem in der Simulation gezeigt werden, dass durch die vorgestellte Berücksichtigung des bekannten Durchmessers mit dem vorgestellten MLE die Genauigkeit verbessert wird. So wird der durch Kantenschüsse verursachte systematische Fehler bei der Detektierung von Kreisen um 16% und bei der Detektierung von Ellipsen um 31% verringert.

Die Untersuchungen zur Schätzung der Standardabweichung mit dem vorgestellten MLE haben ergeben, dass ab einer Anzahl von 23 Messpunkten bei entfernten Kantenschüssen die Standardabweichung mit einem Fehler kleiner als $0,3 \text{ mm}$ zur Standardabweichung der Monte Carlo Simulation geschätzt werden kann. Obwohl die Messpunkte der Fehler unterschiedlich auf die X- und Y-Achse verteilt sind und das MLE lediglich $\sigma_L = \sigma_X$ zur Gewichtung verwendet, wird die Standardabweichung entlang beider Achsen korrekt geschätzt. Die Verteilung der Messpunkte und das zugrundeliegende Modell enthalten bei 23 Messpunkten genügend Informationen, um die resultierende Unsicherheit entlang beider Achsen zu schätzen.

In den realen Experimenten wurde zunächst der Einfluss von Kantenschüssen auf die Detektierung untersucht und nachgewiesen. Es zeigt sich, dass die Detektierung unter Verwendung eines Kantenschussfilters einen geringeren Fehler aufweist. So konnte der Fehler des MLE durch Verwendung eines Kantenschussfilters um 58% reduziert werden, der Fehler des CDM um 26% und der Fehler des FGEE um 38% . Für alle weiteren Experimente wurde deswegen der Kantenschussfilter verwendet.

Da die Experimente zur Genauigkeit des Laserscanners gezeigt haben, dass die Fehlerverteilung abhängig vom Messwinkel zum Laserscanner, dem Einfallswinkel zur Ebene des Laserscanners und vom Abstand zum Laserscanner ist, wurden in verschiedenen Experimenten diese Parameter variiert und jeweils der Fehler der Detektierung bestimmt. Es hat sich wiederum gezeigt, dass das FGEE für die Detektierung des Kalibriertargets ungeeignet ist. Selbst unter Ausschluss von Ausreißern wies das FGEE einen Fehler im Meter-Bereich auf. Das CDM und das selbst erweiterte MLE wiederum schätzten den Ort des Kalibriertargets stets mit einem Fehler kleiner als $3,5 \text{ cm}$. Es zeigt sich, dass es einen Einfluss auf die Genauigkeit hat, mit welchem Eintrittswinkel das Kalibriertarget in die Ebene des Laserscanners tritt. Das MLE erkennt senkrecht eintretende Kalibriertargets mit einem Fehler von $12,162 \text{ mm}$ und das CDM mit einem Fehler von $17,163 \text{ mm}$. Ein Eintrittswinkel von 45° hingegen erzeugt beim MLE einen Fehler von $18,671 \text{ mm}$ und beim CDM einen geringeren Fehler von $16,267 \text{ mm}$.

Der Abstand zwischen Laserscanner und Kalibriertarget wurde zwischen 15 und 45 cm variiert und hat einen starken Einfluss auf den mittleren Fehler der Detektierung erkennen lassen. Die Abhängigkeit des Fehlers vom Abstand lässt keine Gesetzmäßigkeit erkennen und scheint

willkürlich. Die Genauigkeit bei der Detektierung von Ellipsen und Kreisen weisen zwischen der Simulation und den realen Experimenten unterschiedliches Verhalten auf. So ist in der Simulation das CDM besser geeignet für die Kreis-Detektierung und das MLE für die Ellipsen-Detektierung. Die realen Experimente zeigen gegenteiliges Verhalten.

Das beschriebene Verhalten wird auf die Messpose abhängige Fehlerverteilung des Laserscanners zurückgeführt. Es wird vermutet, dass der systematische Fehler des CDM beim Detektieren einer Ellipse durch die Verschiebung der Fehlerverteilung zum Teil kompensiert wird. Die Detektierung mit dem MLE, die diesen systematischen Fehler bei der Detektierung von Ellipsen nicht hat, wird hingegen verfälscht. Der gleiche Effekt wird bei dem abstandsabhängigen Verhalten des Detektierungsfehlers vermutet.

Außerdem zeigte sich in der Verteilung des Detektierungsfehlers die Auswirkung des systematischen Fehlers des CDM, welches einen kleinsten Fehler von $5,824 \text{ mm}$ verursacht im Gegensatz zum MLE mit einem kleinsten Fehler von $0,320 \text{ mm}$. Das in dieser Arbeit vorgestellte und erweiterte Verfahren MLE weist mit einem mittleren Fehler von $12,390 \text{ mm}$ insgesamt den geringsten Fehler bei der realen Detektierung des Kalibriertargets im Laserscan auf. Dieser Fehler scheint groß im Verhältnis zur Zylindergeometrie mit einem Durchmesser von $7,5 \text{ cm}$. Er wird jedoch relativiert, sofern berücksichtigt wird, dass die Messfehler des Laserscanners ein 3-Sigma-Konfidenzintervall von $8,28 \text{ cm}$ für jeden Messpunkt aufweisen.

Kalibrierung ohne Berücksichtigung der Messfehler

In Abschnitt 6.4 wurde das vergleichbare Verfahren des Stand der Forschung aus [AAR14] in einem realen Experiment untersucht. Wie das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren nutzt es ein Kalibriertarget und verwendet ausschließlich die beiden Teilsysteme, welche zueinander kalibriert werden sollen. Der Fehler der Kalibrierung wird translatorisch zu $73,67 \text{ mm}$ und rotatorisch zu $7,98^\circ$ bestimmt. Dieser große Fehler wird auf das Verfahren selbst zurückgeführt. Für die Kalibrierung werden insgesamt sechs Merkmale der Lasermessung bestimmt und anhand dieser die Orientierung des Kalibriertargets relativ zum Laserscanner berechnet. Bei den Merkmalen handelt es sich um die Kantenpunkte des Kalibriertargets, sodass sich die Messfehler der einzelnen Messpunkte stark auswirken. Weiterhin wird im Gegensatz zum selbst vorgestellten Ansatz kein Optimierungsproblem formuliert. So werden zur Kalibrierung lediglich zwei Konfigurationen verwendet, wodurch der konfigurationsabhängige Messfehler des Laserscanners eine große Auswirkung auf die Kalibrierung hat.

Schließlich wurde das selbst entwickelte Kalibrierverfahren ohne Berücksichtigung der Messfehler untersucht. Die simulierten Experimente konnten zeigen, dass Messungen der Position der Symmetrie-Achse genügen, um die Transformationskette zu schließen und die gesuchte Transformation zwischen Manipulator und Laserscanner zu bestimmen. Es zeigt sich durch die Analyse der mittleren absoluten Fehler das Verhalten, dass die Transformation entlang der Z-Achse des Laserscanners mit einem etwa doppelt so großen Fehler bestimmbar ist, wie die Transformation entlang der horizontalen Achsen. Der Fehler der Rotation um die Z-Achse ist wiederum um den Faktor 2,4 kleiner, als die Rotation um die horizontale Ebene des Laserscanners. Dieses Verhalten ist auf die Messung in der 2-dimensionalen Ebene des Laserscanners

zurückzuführen. Insgesamt ergab sich bei einer simulierten Standardabweichung der Detektierung von 10 mm und einer Standardabweichung der gemessenen End-Effektorpose von 1 mm ein mittlerer vorzeichenbehafteter Fehler von $0,9\text{ mm}$ und ein vorzeichenbehafteter rotatorischer Fehler von $0,041^\circ$.

Schließlich wurde die selbst entwickelte Kalibrierung anhand realer Messungen durchgeführt und bewertet. Dafür wurde ein Kalibriertarget mit einem Durchmesser von $2,5\text{ cm}$ entworfen und mittels CDM-Methode [Tam+10] detektiert. Es wurden insgesamt drei Trajektorien mit unterschiedlichen Entfernungen zum Laserscanner zur Kalibrierung genutzt und die erzielte Genauigkeit gegenübergestellt. Es hat sich gezeigt, dass der Detektierungsfehler des Kalibriertargets bei der nahen Trajektorie am geringsten ist und die Norm des translatorischen Fehlers von $9,176\text{ mm}$ aufweist. Der mittlere Detektierungsfehler der fernen Trajektorie liegt bei $22,158\text{ mm}$. Dies lässt sich dadurch erklären, dass mit zunehmendem Abstand zum Laserscanner die Anzahl der Messpunkte abnimmt und der systematische Fehler der CDM-Methode steigt. Außerdem wirkt sich die konfigurationsabhängige Fehlerverteilung des Laserscanners aus.

Die Ergebnisse der darauf basierenden Kalibrierung zeigten, dass der translatorische Fehler der Kalibrierung der nahen Trajektorie bei $18,00\text{ mm}$ liegt und der translatorische Fehler der fernen Trajektorie bei $30,08\text{ mm}$. Dies lässt sich dadurch erklären, dass sich der größere Fehler der Detektierung auf die Kalibrierung auswirkt.

Interessanterweise wies der rotatorische Fehler der Kalibrierung jedoch gegenteiliges Verhalten auf. So wurde der rotatorische Fehler der nahen Trajektorie zu $4,43^\circ$ bemessen und der rotatorische Fehler der fernen Trajektorie zu $1,26^\circ$. Trotz des größeren Fehlers der Detektierung des Kalibriertargets, wird die Rotation der Kalibrierung mit einem geringeren Fehler bestimmt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Rotation einer 2-dimensionalen Ebene mit voneinander entfernt liegenden Stützpunkten genauer bestimmt werden kann als mit nah beieinander liegenden Stützpunkten. Dies gilt für die translatorischen Parameter jedoch nicht.

Es hat sich weiterhin gezeigt, dass die aus beiden Trajektorien zusammengesetzte Trajektorie mit nahen und fernen Messposen die Vorteile vereint und einen geringen translatorischen als auch rotatorischen Fehler in der Kalibrierung aufweist. Die zusammengesetzte Trajektorie führte zu einem translatorischen Fehler von $19,34\text{ mm}$ und einem rotatorischen Fehler von $1,04^\circ$. Für alle Trajektorien hat sich außerdem gezeigt, dass der Fehler der Z-Komponente des translatorischen Fehlers den größten Anteil ausmacht. Dieser liegt bei der zusammengesetzten Trajektorie beispielsweise bei $18,17\text{ mm}$. Die translatorischen Fehler entlang der X- und Y-Achse liegen hingegen bei $6,33\text{ mm}$ und $1,89\text{ mm}$. Für einen geringen Fehler der Kalibrierung sind idealerweise also nahe und ferne Messposen zu verwenden.

Kalibrierung unter Berücksichtigung der Messfehler

In Abschnitt 6.5 wurde ermittelt inwiefern die Berücksichtigung der Messfehler die Kalibrierung verbessert. Weiterhin wurde untersucht, inwiefern die Unsicherheit der ermittelten Kalibrierung geschätzt werden kann.

Hierfür wurden zunächst Experimente in der Simulation durchgeführt. In einer Monte-Carlo Simulation wurden unterschiedliche Trajektorien mit einer steigenden Anzahl an Messposen von 5 bis 30 in jeweils 100 Durchläufen statistisch ausgewertet und miteinander verglichen.

Es hat sich gezeigt, dass die Genauigkeit der Kalibrierung sowohl mit als auch ohne Berücksichtigung der Messfehler mit steigender Anzahl an Messposen steigt. So sinkt die Norm des rotatorischen absoluten Fehlers ohne Berücksichtigung der Messfehler von 5 Messposen auf 30 Messposen um 57,2%. Der absolute translatorische Fehler sinkt um 55,4%. Qualitativ zeigen alle Experimente das gleiche Verhalten wie bei den simulierten Experimenten aus Abschnitt 6.4. Der rotatorische Fehler um die Z-Achse ist für 5 Messposen um den Faktor 2,5 bis 5 geringer als der rotatorische Fehler um die horizontalen Achsen und der translatorische Fehler entlang der Z-Achse ist um den Faktor 2,7 bis 3,8 größer als entlang der X- und Y-Achse. Es zeigt sich allerdings, dass dieses Missverhältnis der Achsen zueinander mit zunehmender Anzahl an Messposen abnimmt und bei 30 Messposen nahezu aufgehoben ist.

Die Experimente zeigen außerdem, dass die Berücksichtigung der Messfehler zu einer signifikanten Verbesserung der Kalibriergenauigkeit führt. Weiterhin ist zu sehen, dass die Verbesserung der Genauigkeit mit zunehmender Anzahl an Messposen steigt. So beträgt die Verbesserung der translatorischen Genauigkeit 44,3% und die rotatorische Genauigkeit 50,2% für jeweils 30 Messposen.

Die Auswertung der mittleren geschätzten Standardabweichung der Kalibrierung hat ergeben, dass diese für jede Anzahl an Messposen stets größer ist als die tatsächliche mittlere Standardabweichung der Monte Carlo Simulation. Die Genauigkeit der erzielten Kalibrierung wird also unterschätzt. Mit zunehmender Anzahl an Messposen verbessert sich die Schätzung. Diese liegt für 5 Messposen $0,2^\circ$ bzw. 6 mm zu hoch und für 30 Messposen $0,04^\circ$ bzw. 1,5 mm zu hoch.

Schließlich wurde das Kalibrierverfahren unter Berücksichtigung der Messfehler mit realen Messdaten untersucht. Da die Berücksichtigung der Messfehler mit dem CDM nicht möglich ist, wurde das vorgestellte Verfahren MLE zur Detektierung des Kalibriertargets genutzt. Es wurden wiederum zwei Kalibrier-Trajektorien mit dem Manipulator abgefahren. Die erste Kalibriertrajektorie bestand aus sehr fernen und sehr nahen Messposen. Die zweite Kalibriertrajektorie erweiterte diese Trajektorie um weitere Messposen in einem mittleren Abstand.

Durch die Einschränkung, dass für das Ellipsenfitting mit dem MLE 30 Messpunkte vorhanden sein müssen, wurden Messposen in einem Abstand von über 80 cm nicht berücksichtigt. Dies ist ein wesentlicher Unterschied im Vergleich zur Nutzung der CDM Methode, wie sie in Abschnitt 6.4 untersucht worden ist, da aus diesem Grund die fernen Messposen nicht für die Kalibrierung zur Verfügung standen.

Ohne Berücksichtigung der Messfehler fand daher keine wesentliche Verbesserung der Kalibrierung zwischen der ersten und der zweiten Kalibriertrajektorie statt. Die zweite Kalibriertra-

jektorie enthielt aufgrund der vielen unberücksichtigten Messposen keinen wesentlichen zusätzlichen Informationsgehalt. Die Norm des translatorischen Fehlers lag für die erste Trajektorie bei $15,15 \text{ mm}$ und für die zweite Trajektorie bei $15,03 \text{ mm}$. Die Norm des rotatorischen Fehlers lag bei $2,72^\circ$ für die erste Trajektorie und bei $2,76^\circ$ für die zweite Trajektorie.

Ein anderes Verhalten wies die Kalibrierung unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten auf. Zwar ist die erste Trajektorie mit geringer Anzahl an Messposen trotz Berücksichtigung der Messunsicherheiten nicht wesentlich besser als ohne Berücksichtigung der Messunsicherheit, jedoch wurde der Fehler der erweiterten Trajektorie mit mehr Messposen deutlich verbessert. So wies die Kalibrierung der ersten Trajektorie eine Norm des translatorischen Fehlers von $14,17 \text{ mm}$ auf und die der erweiterten Trajektorie von $6,67 \text{ mm}$. Die Norm des rotatorischen Fehlers der ersten Trajektorie lag bei $1,95^\circ$ und die der zweiten bei $2,21^\circ$. Der translatorische Fehler hat sich im Vergleich zur Kalibrierung ohne Berücksichtigung der Messfehler also um $55,6\%$ verringert. Der rotatorische Fehler wurde durch die Berücksichtigung des Messfehlers um $19,9\%$ verringert.

Das reale Experiment hat außerdem ergeben, dass die Schätzung der Unsicherheit der Kalibrierung zu optimistisch ist. So befand sich die geschätzte Standardabweichung der Rotation um die X- und Z-Achse außerhalb des geschätzten 3-Sigma Konfidenzintervalls. Eine Untersuchung der geschätzten Unsicherheit der Detektierung entlang der Kalibriertrajektorie ließ darauf schließen, dass die Standardabweichung in einzelnen Bereichen zu groß geschätzt wird. Die Ursache für dieses Verhalten wird in der Tatsache vermutet, dass die angenommene Fehlerverteilung nicht für die einzelnen Messposen gilt, sondern nur über alle Messposen gemittelt. So wird die Unsicherheit für den Schnittpunkt des Kalibriertargets mit der Laserebene zu pessimistisch geschätzt. Die dadurch fehlerhafte Gewichtung in der Kalibrierung führt zu einer Verschlechterung der Ergebnisse statt zu einer Verbesserung, wodurch sich die optimistische Schätzung der Kalibrierengenauigkeit erklären lässt. Die Schätzung der Kalibrierparameter scheint also nicht die tatsächliche Unsicherheit zu bestimmen. Die Schätzung der Standardabweichung kann jedoch dazu genutzt werden, um die erzielte Genauigkeit zweier Kalibrierungen miteinander zu vergleichen. So haben die geschätzten Standardabweichung der ersten und der zweiten Kalibriertrajektorie die Verbesserung der Genauigkeit wiedergegeben. Die Schätzung könnte dazu dienen die erzielte Verbesserung durch zusätzliche Messposen zu beurteilen. In einem iterativen Kalibrierprozess könnten so lange zusätzliche Messposen angefahren werden bis die geschätzte Standardabweichung konvergiert.

Kalibrierung ohne Kalibriertarget

In Abschnitt 6.6 wurde die Kalibrierung mit dem Manipulator selbst untersucht. Die Kalibrierung mit dem Manipulator selbst führt unter Berücksichtigung der Messfehler zu einem translatorischen Fehler von $15,15 \text{ mm}$ und zu einem rotatorischen Fehler von $0,65^\circ$. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der größte Anteil des translatorischen Fehlers mit $13,47 \text{ mm}$ entlang der Verschiebung der Z-Achse des Laserscanners auftritt.

Die Bewegung der drei Freiheitsgrade führt allerdings zu praktischen Problemen. Es können aufgrund der eingeschränkten Kinematik keine Messposen aufgenommen werden, welche einen

großen Abstand zueinander besitzen. Der Vergleich mit dem Experiment mit Kalibriertarget zeigt außerdem, dass die translatorischen Parameter mit Kalibriertarget um 58% besser geschätzt worden sind. Die rotatorischen Parameter werden hingegen ohne Kalibriertarget um 71% besser geschätzt. Da der Fehler der Detektierung des Kalibriertargets beziehungsweise des Manipulator-Gliedes etwa gleich sind, sind weitere Einflüsse der Kalibriertrajektorie zu vermuten. Weiterhin zeigt sich, dass eine automatische Kalibrierung ohne Kalibriertarget nur möglich ist, sofern die Transformation zwischen Laserscanner und Manipulator grob bekannt ist. Ansonsten kann die Kalibriertrajektorie des Manipulators nicht kollisionsfrei geplant werden.

Zudem wird ersichtlich, dass die Reflexionseigenschaften des Manipulator-Materials für den genutzten Laserscanner berücksichtigt werden sollten. Ein unberücksichtigter statischer Messfehler durch veränderte Reflexionseigenschaften des Materials verschlechtert die Bestimmung der Kalibrierparameter und führt außerdem zu einer zu optimistischen Schätzung der Unsicherheit der Kalibrierparameter. Das bedeutet wiederum, dass entweder Maßnahmen bezüglich der Beschichtung des Manipulators vorgenommen werden müssen oder die Fehlerverteilung des verwendeten Laserscanners bekannt sein muss.

Für den Fall dass zylinderförmige Werkzeuge zur Kalibrierung verwendet werden sollen, hat sich herausgestellt, dass die Kalibrierung unter Berücksichtigung der Messfehler nur eingeschränkt anwendbar ist. Der Durchmesser eines Bohrkopfes oder eines Sauggreifers liegt unter 2,5 cm. Je nach Auflösung des verwendeten Laserscanners könnten dadurch zu wenige Messpunkte für die Ellipsendetektierung resultieren. In diesem Fall müsste die Kalibrierung ohne Berücksichtigung der Messfehler mit der Constant Distance Methode zur Detektierung und Kalibrierung genutzt werden.

Kritische Betrachtung der erzielten Genauigkeit

Der erzielte Fehler aller vorgestellten Verfahren um und entlang aller drei Achsen der gesuchten Transformation ergibt folgendes Gesamtbild:

Die Kalibrierung ohne Berücksichtigung der Messfehler führte im realen Experiment mit der zur Verfügung stehenden Hardware zu einem translatorischen Fehler von 19,34 mm und einem rotatorischen Fehler von $1,04^\circ$. Dies ist zwar die geringste translatorische Genauigkeit, die in allen realen Experimenten erzielt wurde, jedoch ist es für diesen Ansatz nicht erforderlich die Parameter der Fehlermodelle zu identifizieren.

Die Kalibrierung unter Berücksichtigung des Messfehlers zeigte im realen Experiment einen translatorischen Fehler von 6,67 mm und einen rotatorischen Fehler von $2,21^\circ$. Dieser rotatorische Fehler führt bei einem Meter Entfernung zum Laserscanner bereits zu einem translatorischen Fehler von 39 mm.

Die Kalibrierung ohne Kalibriertarget unter Berücksichtigung der Messfehler zeigte im realen Experiment einen translatorischen Fehler von 15,80 mm und einen rotatorischen Fehler von $0,65^\circ$.

Diese Genauigkeit lässt sich anhand der manuellen Kalibrierung mit einem Gliedermaßstab vermutlich besser erreichen. Sofern es erforderlich ist alle drei Komponenten der Transformation zu bestimmen, zeigt das Verfahren auf dem aktuellen Entwicklungsstand nur einen Vorteil, sofern es automatisiert ohne den Einsatz manueller Anwender eingesetzt werden soll. Dieser Fall ist mit manuellen Mitteln und anderen aktuellen Verfahren bisher nicht zu lösen gewesen. Dabei ist abzuwägen, ob die erzielte Genauigkeit für den jeweiligen Einsatzbereich ausreichend ist.

Weiterhin wurde festgestellt, dass der ermittelte Fehler des aktuellen Verfahrens [AAR14] mit 73,64 mm und 7,98° je nach Bezugswert um Faktor 3,5 bis 12 größer ist als bei dem vorgestellten Verfahren. Das vorgestellte Verfahren nutzte für die Kalibrierung lediglich die zu kalibrierenden Teilsysteme Manipulator und Laserscanner. Unter diesen Bedingungen wird sich der Fehler der Teilsysteme stets auf die Kalibrierung auswirken. Sofern keine externen Mittel zur Kalibrierung zwischen einem feststehenden 2D Laserscanner und Manipulator eingesetzt werden sollen oder können, wie etwa optische Messsysteme oder eine Kamera, weist das vorgestellte Verfahren den geringsten Fehler auf.

Es existieren Anwendungen, für die nicht alle drei Achsen der Transformation bestimmt werden müssen. Soll lediglich die Transformation entlang der X- und Y-Achse bestimmt werden, wie beispielsweise bei der Rekalibrierung nach einer horizontalen Verschiebung, zeigte das Kalibrierverfahren unter Berücksichtigung der Messfehler einen translatorischen Fehler entlang dieser Achsen von 1,14 mm und einen rotatorischen Fehler um die Z-Achse von 0,89°. Diese Genauigkeit ist mit manuellen Mitteln nicht zu erreichen.

Einschränkungen des Verfahrens

Im Kapitel 1 wurden bereits Randbedingungen für das vorgestellte Verfahren definiert. Die vorgestellten Untersuchungen haben weitere Einschränkungen für die Anwendbarkeit aufgezeigt, die im Folgenden kurz zusammengefasst werden sollen.

In dieser Arbeit sollten die Unsicherheiten der Teilsysteme berücksichtigt werden. Im Laufe der Arbeit wurde zu diesem Zweck ein probabilistisches Fehlermodell entworfen. Folgende Einschränkungen ergeben sich aus dem Fehlermodell:

- Für den Manipulator werden Bauteiltoleranzen und mittelwertfreie Messfehler der Gelenkstellungen ohne Getriebeispiel berücksichtigt.
- Für den Laserscanner werden Bauteiltoleranzen, Messrauschen sowie Oberflächeneigenschaften berücksichtigt.

Der vorgestellte Ansatz muss von den jeweiligen Komponenten durchführbar sein. Daraus ergeben sich weitere Einschränkungen:

- Der Laserscanner muss die Schnittpunkte des Kalibriertargets messen können. Daher muss die aufgespannte Ebene des Laserscanners die mögliche Bewegung des Kalibriertargets schneiden.
- Das Kalibriertarget muss in verschiedenen Winkeln die Ebene des Laserscanners schneiden. Der Manipulator muss die entsprechenden Freiheitsgrade bei der Bewegung des Kalibriertargets abbilden können.
- Für die Transformation zwischen Manipulator und Laserscanner selbst existieren keine Einschränkungen.

Beobachtete Auswirkungen der vereinfachenden Annahme der Normalverteilung

Zusammenfassend konnten folgende Auswirkungen durch die vereinfachte Fehlerverteilung beobachtet werden:

- Bei der Detektierung des Kalibriertargets wirkte sich die Fehlerverteilung aus, weil der verschobene Mittelwert der Fehlerverteilung einiger Messposen einen systematischen Fehler verursachte.
- Es wird vermutet, dass der systematische Fehler der Constant-Distance-Methode dadurch für diese Messposen kompensiert wurde.
- Das auf Optimierung basierende Verfahren wies keinen systematischen Fehler auf, so dass die Detektierung durch den zusätzlichen systematischen Fehler der Fehlerverteilung verschlechtert wurde.
- Die Schätzung der Standardabweichung der Detektierung entlang der Kalibriertrajektorie scheint in einigen Bereichen zu groß geschätzt worden zu sein.
- Es ist anzunehmen, dass diese Fehlschätzung wiederum eine fehlerhafte Gewichtung dieser Messposen bewirkt und dadurch die Standardabweichung der Kalibrierparameter zu gering geschätzt wird.
- Trotz der vereinfachenden Annahme und der geschilderten Auswirkungen wurde im realen Experiment die Genauigkeit durch die Berücksichtigung der Messfehler deutlich verbessert. Der Fehler der translatorischen Kalibrierparameter wurde um 56% reduziert und der Fehler der rotatorischen Parameter wurde um 20% reduziert.

Bewertung der Kalibrierung in Bezug auf die gesetzten Ziele

In Kapitel 1 wurden Ziele definiert, welche den Rahmen der Untersuchungen und Entwicklungen des Ansatzes stecken sollten. Im Folgenden wird bewertet inwiefern diese Ziele erreicht worden sind:

- (Z₁) Das Verfahren wurde in simulierten und realen Experimenten mehrfach angewendet und alle sechs Kalibrierparameter konnten ermittelt werden. Die Genauigkeit wurde in simulierten und realen Experimenten untersucht. Die Charakteristik des Kalibrierverfahrens wurde ebenfalls untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass sich die Genauigkeit der einzelnen rotatorischen und translatorischen Achsen voneinander unterscheiden und einer Charakteristik folgen. Weiterhin wurde ein Einfluss der Kalibriertrajektorie auf die erzielte Genauigkeit festgestellt. So führen Messposen mit geringer und hoher Entfernung

zum Laserscanner zur höchsten Genauigkeit.

- (Z₂) Der vorgestellte Ansatz wurde insofern erweitert, dass die Unsicherheiten der Teilsysteme berücksichtigt werden. Hierfür wurde ein probabilistisches Modell entwickelt, das den Fehler des Laserscanners und des Manipulators beinhaltet. Für die Detektierung der Achse beziehungsweise des Kalibriertargets wurde entsprechend der vorliegenden Problemstellung ein bestehendes Verfahren erweitert, mit aktuellen Verfahren verglichen und bezüglich seiner Genauigkeit untersucht. Im Gegensatz zum aktuellen Stand der Forschung wurde die Unsicherheit durch die Fehlerfortpflanzung entlang der zu bestimmenden Transformation selbst ebenfalls berücksichtigt. Das Kalibrierverfahren wurde sowohl mit als auch ohne Berücksichtigung der Messunsicherheiten analysiert und die Genauigkeit der Parameter evaluiert. Für die realen Experimente mussten die Parameter der Fehlermodelle der Teilsysteme ausgewählt werden. Der zur Verfügung stehende Laserscanner wurde untersucht und die Parameter des definierten Fehlermodells wurden identifiziert. Für die Fehlermodelle des verfügbaren Manipulators wurden identifizierte Parameter aktueller Untersuchungen verwendet. Es konnte gezeigt werden, dass sich die Genauigkeit der Kalibrierung wesentlich verbessert. Dies wurde sowohl in den simulierten als auch den realen Experimenten nachgewiesen. Durch die Berücksichtigung der Messfehler konnte die Genauigkeit in der Simulation translatorisch um 55% und rotatorisch um 57% verbessert werden. Im realen Experiment mit Kalibriertarget betrug die Verbesserung translatorisch 56% und rotatorisch 20%. In der Simulation wurde gezeigt, dass sich die Genauigkeit der ermittelten Kalibrierung in Form der Standardabweichung mit einem Fehler von etwa 20% schätzen lässt und die Genauigkeit stets unterschätzt wird. In den realen Experimenten wurde allerdings festgestellt, dass die Genauigkeit zu optimistisch geschätzt wird.
- (Z₃) Der vorgestellte Ansatz wurde auf einer realen Plattform in Betrieb genommen und unter Nutzung verfügbarer Komponenten validiert. Weiterhin wurde das aktuelle Verfahren [AAR14] implementiert und die Genauigkeit ermittelt. Das vorgestellte Verfahren erzielte in den realen Experimenten eine Verringerung des translatorischen Fehlers zwischen 59% und 91% und des rotatorischen Fehlers zwischen 44% und 92% verglichen mit dem Verfahren [AAR14].
- (Z₄) Es wurde nachgewiesen, dass der vorgestellte Ansatz ohne Nutzung eines Kalibriertargets genutzt werden kann. Für Manipulatoren mit zylinderförmigen Gliedern ist keine zusätzliche Sensorik oder ein Mitführen von Kalibriertargets erforderlich. Allerdings ergibt sich das Problem, dass die Kalibrierung grob bekannt sein muss, damit eine Kalibriertrajektorie bestimmt werden kann, die eine Kalibrierung ermöglicht ohne dass der Manipulator mit weiteren Anbauten kollidiert. Weiterhin muss unter der Ebene des Laserscanners genügend Platz sein für den Endeffektor. Die Kalibrierung unter Nutzung eines zylinderförmigen Werkzeugs entspricht der Kalibrierung mit gegriffenem zylinderförmigen Kalibriertarget.

7.2 Ausblick

Ein großer Vorteil des in dieser Arbeit vorgestellten Ansatzes ist, dass für Manipulatoren mit zylinderförmigen Gliedern oder Werkzeugen kein Kalibriertarget benötigt wird. Dies ist möglich durch die Reduzierung der zylinderförmigen Geometrie auf die Symmetrieachse. Die Symmetrieachse verlängert die Achse des Manipulators und schneidet die Ebene des Laserscanners in einem unbekanntem Punkt entlang der Symmetrieachse. Dieser Ansatz kann dahingehend erweitert werden, dass statt einer Symmetrieachse eine ebene Fläche als Kalibriertarget die Ebene des Laserscanners schneidet. Für diesen Fall ergeben sich pro Messpunkt im Laserscanner zwei unbekannte Variablen entlang des Kalibriertargets: entlang der Breite und entlang der Höhe der Fläche. Das sich ergebene 2-dimensionale Raster lässt sich wiederum über bekannte Geometrien legen, sodass die Transformationskette auch für komplexere Geometrien geschlossen werden könnte. Für einen Laserscanner mit dem sich der Querschnitt genauer detektieren lässt, könnte dieser Ansatz dazu geeignet sein, Kalibriertargets beliebiger aber bekannter Geometrie zu nutzen.

Bezüglich des Fehlermodells des Laserscanners wurde eine Normalverteilung angenommen. Die realen Experimente haben allerdings gezeigt, dass diese nur für die Mittelung über alle Parametervariationen gilt, allerdings nicht für die einzelnen Messposen des Kalibriertargets. Das Verfahren könnte insofern erweitert werden, dass für die einzelnen Messposen unterschiedliche Fehlerverteilungen identifiziert und entsprechend zur Gewichtung berücksichtigt werden. Eine initiale Kalibrierung könnte die einzelnen Messposen grob bestimmen und schließlich das zugehörige Fehlermodell auswählen. Es könnte untersucht werden, inwiefern die größere Modellierungstiefe des Messfehlers die Genauigkeit der Kalibrierung und die Schätzung der erzielten Genauigkeit verbessert.

Weiterhin wurde in den simulierten Experimenten gezeigt, dass die Standardabweichung der Kalibrierparameter nur mit einem Fehler von etwa 20% geschätzt werden kann. Diese fehlerhafte Schätzung wird darauf zurückgeführt, dass eine initiale Schätzung Ψ_{init} statt die tatsächliche Transformation Ψ für die Bestimmung der Unsicherheiten $\Sigma_{Q,CT}$ verwendet wird. Das Verfahren könnte insofern erweitert werden, dass in einem iterativen Prozess Ψ_{init} nach jeder Kalibrierung mit dem neu geschätzten Wert initialisiert und das Kalibrierverfahren erneut durchgeführt wird bis Ψ_{init} konvergiert.

Der Ansatz eine Optimierung zu verwenden, um die Kalibrierparameter zu bestimmen, kann dazu führen, dass Bereiche des Parameterraums der Gütefunktion Übergewichtet werden. Es ist denkbar, dass eine gleichmäßige Verteilung der Messposen und Eintrittswinkel die Ergebnisse der Optimierung noch weiter verbessert. Auch dieser Aspekt könnte in fortführenden Arbeiten untersucht werden.

Im Laufe der Arbeit wurde festgestellt, dass aktuelle Verfahren die Fehlerfortpflanzung durch die gesuchte Transformation selbst nicht modellieren. Daher wurde dieser Aspekt tiefer untersucht. Ein weiterer interessanter Untersuchungsaspekt wäre der Einfluss der Kalibriertrajektorie gewesen. Die Experimente haben gezeigt, dass die Kalibriertrajektorie einen wesentlichen Ein-

fluss auf die erzielte Genauigkeit der Kalibrierung hat. Weitere Untersuchungen könnten dem Einfluss der Kalibriertrajektorien nachgehen: Welche Charakteristik weisen optimale Trajektorien auf? Wie lässt sich der Informationsgehalt bestimmen? Kann der Informationsgehalt zur Gewichtung der Messposen genutzt werden, um die Genauigkeit weiter zu verbessern? Sind Trajektorien besser geeignet, weil sie große Bereiche des Parameterraums abdecken oder sollten einzelne Messposen angefahren werden, die sich stark voneinander unterscheiden?

Kapitel 8

Zusammenfassung

Damit Manipulatoren die Messdaten von Laserscannern für die Bewegungsplanung berücksichtigen können ist eine extrinsische Kalibrierung der beiden Systeme erforderlich. Im dauerhaften Betrieb ist das Robotik-System äußeren Einflüssen wie Vibrationen oder Stößen ausgesetzt. Diese können die Systeme verschieben oder rotieren und verändern so die zugrundeliegende kinematische Struktur. Eine fehlerhafte kinematische Struktur kann wiederum zu Kollisionen zwischen dem Manipulator und der Umgebung oder zu einer eingeschränkten Funktion führen. Um diesem Problem zu begegnen sind Kalibriermethoden erforderlich, die mit ausreichender Genauigkeit automatisiert durchführbar sind oder in der Praxis einfach angewendet werden können.

Aktuelle Verfahren zur Kalibrierung zwischen Manipulator und Laserscanner nutzen entweder eine am End-Effektor angebrachte Kamera oder ein vom Manipulator gegriffenes Kalibriertarget. Wird eine Kamera zur Kalibrierung genutzt, so ist zwangsläufig eine intrinsisch kalibrierte Kamera für den Kalibriervorgang zu beschaffen und dauerhaft am End-Effektor zu befestigen oder griffbereit mitzuführen. Außerdem wird zusätzlich eine Hand-Auge Kalibrierung benötigt, um die Transformation zwischen End-Effektor und Kamera zu identifizieren. Verfahren, die Kalibriertargets nutzen, basieren nach aktuellem Stand der Forschung auf der Bestimmung der Orientierung und Position des Kalibriertargets im Laserscan. Um einen geringen Kalibrierfehler zu verursachen, werden deswegen große Kalibriertargets mit komplexer Geometrie benötigt. Eine automatische Kalibrierung ohne zusätzliche Sensorik ist mit den aktuellen Verfahren nicht möglich. Die Kamera-basierten Verfahren erfordern eine Kamera und die Kalibriertarget-basierten Verfahren erfordern zu große Kalibriertargets, die mitgeführt und gegriffen werden müssten. Aktuelle Verfahren zur Kalibrierung zwischen Manipulator und Laserscanner können außerdem die Messunsicherheiten des Laserscanners und des Manipulators nicht korrekt berücksichtigen. So wird die Fehlerfortpflanzung durch die zu ermittelnde Transformation selbst in den zugrundeliegenden Modellen vernachlässigt.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren erfordert keine zusätzliche Sensorik, um die Kalibrierparameter zu bestimmen. Zudem wird für Manipulatoren mit zylinderförmigen Gliedern ermöglicht, diese selbst zur Kalibrierung zu verwenden. Auf diese Weise kann erstmals eine automatische Kalibrierung ohne ein mitzuführendes oder anzubringendes Kalibriertarget oder zusätzliche Sensorik durchgeführt werden. Gleiches gilt für Manipulatoren mit zylinderförmigen

Werkzeugen am End-Effektor, wie beispielsweise Bohrköpfe oder zylinderförmige Sauggreifer. Manipulatoren, die nicht über zylinderförmige Glieder oder Werkzeuge verfügen, können ein zylinderförmiges Kalibriertarget nutzen. Dieses kann im Gegensatz zum aktuellen Stand der Forschung aufgrund der kleinen Abmessungen mitgeführt und im laufenden Betrieb gegriffen werden.

Der zentrale Kern des entwickelten Ansatzes ist das Schließen der Transformationskette zwischen Manipulator und Laserscanner anhand der Schnittpunkte zwischen einer verlängerten Achse des Manipulators und der Messebene des Laserscanners. Dies ist methodisch eine wesentliche Unterscheidung zu den Verfahren des Stand der Forschung, die darauf basieren die vollständige Pose des Kalibriertargets anhand des 2-dimensionalen Querschnitts der Messungen des Laserscanners zu ermitteln. Für die Bestimmung des Schnittpunkts der verlängerten Achse des Manipulators wurde der Ansatz gewählt die Symmetrieachse eines Zylinders zu detektieren. Dies ermöglicht für Manipulatoren mit zylinderförmigen Gliedern den genannten Verzicht auf Kalibriertargets beziehungsweise ermöglicht den Einsatz vom Manipulator handhabbarer Kalibriertargets. Außerdem lässt sich die Symmetrieachse eines Zylinders durch seine achsensymmetrische Struktur relativ genau bestimmen, da eine Menge von Messpunkten genutzt werden kann, um das Merkmal Schnittpunkt zu detektieren. Aktuelle Verfahren sind hingegen darauf angewiesen anhand einzelner Messpunkte die Position und Orientierung des Kalibriertargets zu bestimmen und deswegen fehleranfälliger in der Detektierung der erforderlichen Merkmale.

Der sich ergebene Querschnitt des Zylinders erzeugt eine Ellipse. Die Symmetrieachse des Zylinders zu detektieren entspricht also der Problemstellung den Mittelpunkt einer Ellipse zu detektieren. Durch die Funktionsweise des Laserscanners entsteht allerdings keine vollständige Ellipse im Laserscan, sondern es kann nur ein Teilausschnitt gemessen werden. Zusätzlich müssen Kantenschüsse an den Randbereichen der Ellipse gefiltert werden, wodurch der sichtbare Teilausschnitt der Ellipse weiter verkleinert wird. Es konnte gezeigt werden, dass der kleine verwendbare Teilausschnitt der Ellipse sowie ein im Verhältnis zur Zylindergeometrie relativ großer Messfehler dazu führen, dass aktuelle Verfahren aus dem Bereich der Bildverarbeitung zur Ellipsendetektierung nicht genutzt werden können. Ein für Laserscanner entwickeltes Verfahren wurde deswegen so angewendet, dass der bekannte Durchmesser des Zylinders zur Verbesserung der Detektierung als Information genutzt werden kann. Zusätzlich wurde es so erweitert, dass die Messunsicherheit des Laserscanners genutzt und die sich ergebene Unsicherheit des detektierten Schnittpunktes geschätzt werden kann.

Der Fehler der einzelnen Messposen im Kalibrierprozess setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. Die einzelnen Messpunkte des Laserscanners sind mit einem Messfehler behaftet. Diese wiederum wirken sich auf die Detektierung der Symmetrieachse aus, sodass jeder detektierte Schnittpunkt mit einer Unsicherheit entlang der Achsen des Laserscanners behaftet ist und als Kovarianzmatrix beschrieben werden kann. Eine weitere Fehlerkomponente entsteht durch den Manipulator. Jede Manipulator-Achse erzeugt einen Fehler und diese werden jeweils durch Fehlerfortpflanzung entlang der kinematischen Kette bis zum End-Effektor mit dem eingespannten Kalibriertarget beziehungsweise dem für die Kalibrierung genutzten Manipula-

torglied propagiert. Schließlich wird dieser Fehler entlang des Kalibriertargets beziehungsweise entlang des Manipulatorgliedes auf die Ebene des Laserscanners projiziert. Aufgrund der Projektion des Fehlers von der Manipulatorkinematik auf die Ebene des Laserscanners ist die Transformation zwischen Laserscanner und Manipulator selbst für die Bestimmung des Fehlers erforderlich. Diese wird im vorgestellten Ansatz durch eine vorangehende Kalibrierung ohne Berücksichtigung der Messfehler initial bestimmt. Der vom Manipulator auf die Ebene des Laserscanners projizierte Fehler lässt sich ebenfalls als Kovarianzmatrix beschreiben. Die Summe der beiden Kovarianzmatrizen kann wiederum genutzt werden, um die einzelnen Messposen des formulierten Optimierungsproblems entsprechend zu gewichten. Die Gewichtung führt dazu, dass sich die Genauigkeit der Kalibrierung verbessert.

Der vorgestellte Ansatz wurde in Kapitel 6 durch Experimente in der Simulation und in der realen Umgebung untersucht. Als reale Plattform wurde der Universal Robot UR5 und der 2D Laserscanner Hokuyo UST-10LX-H01 verwendet. Es konnte gezeigt werden, dass eine Kalibrierung ohne Kalibriertarget möglich ist. Im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen erfordert der entwickelte Ansatz keine zusätzliche Sensorik. Für Manipulatoren mit zylinderförmigen Gliedmaßen oder Werkzeugen sind keine Kalibriertargets erforderlich. Für beliebige Manipulatoren können zylinderförmige Kalibriertargets verwendet werden, die durch ihre kleinen geometrischen Ausmaße für eine Rekalibrierung mitgeführt werden können. Der Vergleich des selbst entwickelten Verfahrens bei Nutzung eines zylinderförmigen Kalibriertargets mit dem Stand der Forschung nach [AAR14] zeigt, dass das selbst entwickelte Verfahren einen wesentlich geringeren Fehler aufweist. Der translatorische und rotatorische Fehler der Kalibrierparameter konnte in den realen Experimenten zwischen 44% und 92% verringert werden. Der Hauptbeitrag dieser Arbeit ist der Nachweis, dass der Manipulator selbst für die Kalibrierung zwischen Laserscanner und Manipulator genutzt werden kann und mit dem vorgestellten Ansatz einen geringeren Fehler aufweist als aktuelle Kalibriertarget basierte Verfahren. Ohne das vorgestellte Verfahren ist eine Kalibrierung ohne Kalibriertarget und zusätzlicher Sensorik bisher nicht möglich gewesen. Zudem wurde ein Kalibrierverfahren entwickelt und untersucht, das mit Kalibriertarget ohne zusätzliche oder externe Sensorik einen geringeren Kalibrierfehler verursacht als aktuelle Verfahren ohne zusätzliche Sensorik.

Literaturverzeichnis

- [AAR14] Thomas Timm Andersen, Nils Axel Andersen und Ole Ravn. „Calibration between a Laser Range Scanner and an Industrial Robot Manipulator“. In: *2014 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Control and Automation (CICA)* (2014), S. 1–8. DOI: 10.1109/CICA.2014.7013252.
- [Ada10] Martin Adams. „Laser and Radar Based Robotic Perception“. In: *Foundations and Trends in Robotics* (2010). DOI: 10.1561/23000000011.
- [AF07] Matthew E Antone und Yuli Friedman. „Fully Automated Laser Range Calibration“. In: *British Machine Vision Conference (BMVC)*. 2007.
- [Ali17] Mohammed Myasar Ali. „High-Precision Grasping and Placing for Mobile Robots“. Dissertation. University of Rostock, 2017.
- [BHM16] Roger Bostelman, Tsai Hong und Jeremy Marvel. „Survey of research for performance measurement of mobile manipulators“. In: *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* (2016). DOI: 10.6028/jres.121.015.
- [CC87] Jigien Chen und Lih Ming Chao. „Positioning Error Analysis for Robot Manipulators with All Rotary Joints“. In: *IEEE Journal on Robotics and Automation* (1987). DOI: 10.1109/JRA.1987.1087144.
- [CL16] Youdong Chen und Chongxu Liu. „Radius and orientation measurement for cylindrical objects by a light section sensor“. In: *Sensors (Switzerland)* (2016). DOI: 10.3390/s16111981.
- [Cou10] S Cousins. „ROS on the PR2 [ROS Topics]“. In: *IEEE Robotics & Automation Magazine* (2010). DOI: 10.1109/mra.2010.938502.
- [Dan99] Konstantinos Daniilidis. „Hand-Eye Calibration Using Dual Quaternions“. In: *International Journal of Robotics Research* (1999).
- [Del+06] F. L.M. Delbressine *et al.* „Modelling thermomechanical behaviour of multi-axis machine tools“. In: *Precision Engineering* (2006). DOI: 10.1016/j.precisioneng.2005.05.005.

- [DIN99] DIN EN ISO 9283. „Industrieroboter - Leistungskenngrößen und zugehörige Prüfmethode“. 1999.
- [DK02] Albert Diosi und Lindsay Kleeman. „Uncertainty of Line Segments Extracted from Static SICK PLS Laser Scans“. In: *Australasian Conference on Robotics and Automation*. 2002.
- [FAG15] Eduardo Fernández-Moral, Vicente Arévalo und Javier González-Jiménez. „Extrinsic calibration of a set of 2D laser rangefinders“. In: *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2015. DOI: 10.1109/ICRA.2015.7139475.
- [Fan+19] Yia Fan *et al.* „Extrinsic Calibration between a Camera and a 2D Laser Rangefinder using a Photogrammetric“. In: *Sensors* 19.9 (2019), S. 2030. DOI: 10.3390/s19092030..
- [FGA15] Eduardo Fernández-Moral, Javier González-Jiménez und Vicente Arévalo. „Extrinsic calibration of 2D laser rangefinders from perpendicular plane observations“. In: *International Journal of Robotics Research* (2015). DOI: 10.1177/0278364915580683.
- [FPF99] Andrew Fitzgibbon, Maurizio Pilu und Robert B. Fisher. „Direct least square fitting of ellipses“. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* (1999). DOI: 10.1109/34.765658.
- [Fre67] F. Freudenstein. „Screw calculus and its applications to mechanics (Vintoe istchislenye i iego prilozheniya v mekhanike)“. In: *Journal of Mechanisms* (1967). DOI: 10.1016/0022-2569(67)90046-8.
- [GG94] Walter Gander, Gene H. Golub und Rolf Strebler. „Least-squares fitting of circles and ellipses“. In: *BIT* (1994). DOI: 10.1007/BF01934268.
- [Gom+15] Ruben Gomez-Ojeda *et al.* „Extrinsic calibration of a 2d laser-rangefinder and a camera based on scene corners“. In: *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2015. DOI: 10.1109/ICRA.2015.7139700.
- [Ham44] William Rowan Hamilton. „II. On quaternions; or on a new system of imaginaries in algebra“. In: *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* (1844). DOI: 10.1080/14786444408644923.
- [Hay83] Samad A. Hayati. „ROBOT ARM GEOMETRIC LINK PARAMETER ESTIMATION.“ In: *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*. 1983.
- [HC11] Jwu Sheng Hu und Yung Jung Chang. „Calibration of an eye-to-hand system using a laser pointer on hand and planar constraints“. In: *Proceedings - IEEE*

- International Conference on Robotics and Automation*. 2011. DOI: 10.1109/ICRA.2011.5979846.
- [HC12] Jwu Sheng Hu und Yung Jung Chang. „Eye-hand-workspace calibration using laser pointer projection on plane surface“. In: *Industrial Robot* (2012). DOI: 10.1108/01439911211201663.
- [HD55] R. S. Hartenberg und J. Denavit. „A kinematic notation for lower pair mechanisms based on matrices“. In: *Journal of Applied Mechanics* (1955).
- [He+10] Ruibo He *et al.* „Kinematic-parameter identification for serial-robot calibration based on POE formula“. In: *IEEE Transactions on Robotics* (2010). DOI: 10.1109/TRO.2010.2047529.
- [Hei+14] Tapio Heikkilä *et al.* „Calibration procedures for object locating sensors in flexible robotized machining“. In: (2014). DOI: 10.1109/MESA.2014.6935567.
- [HKG16] John Hollerbach, Wisama Khalil und Maxime Gautier. „Model identification“. In: *Springer Handbook of Robotics*. 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-32552-1_6.
- [HO06] Matthew Harker und Paul O’Leary. „First order geometric distance (The Myth of Sampsonus)“. In: *BMVC 2006 - Proceedings of the British Machine Vision Conference 2006*. 2006. DOI: 10.5244/c.20.10.
- [Hvi+10] Mads Hvilshj *et al.* „Calibration Techniques for Industrial Mobile Manipulators: Theoretical configurations and Best practices“. In: *ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics)* (2010), S. 1–7.
- [HW96] John M. Hollerbach und Charles W. Wampler. „The calibration index and taxonomy for robot kinematic calibration methods“. In: *International Journal of Robotics Research* (1996). DOI: 10.1177/027836499601500604.
- [HZ04] Richard Hartley und Andrew Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. 2004. DOI: 10.1017/cbo9780511811685.
- [Jau+01] Luc Jaulin *et al.* *Applied Interval Analysis*. 2001. DOI: 10.1007/978-1-4471-0249-6.
- [Kaa+10] Sanna Kaasalainen *et al.* „Effect of target moisture on laser scanner intensity“. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* (2010). DOI: 10.1109/TGRS.2009.2036841.
- [Kaa+11] Sanna Kaasalainen *et al.* „Analysis of incidence angle and distance effects on terrestrial laser scanner intensity: Search for correction methods“. In: *Remote Sensing* (2011). DOI: 10.3390/rs3102207.

- [KKL08] Antero Kukko, Sanna Kaasalainen und Paula Litkey. „Effect of incidence angle on laser scanner intensity and surface data“. In: *Applied Optics* (2008). DOI: 10.1364/AO.47.000986.
- [Kne+09] Laurent Kneip *et al.* „Characterization of the compact Hokuyo URG-04LX 2D laser range Scanner“. In: *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2009. DOI: 10.1109/ROBOT.2009.5152579.
- [Kri+17] Simon Kriegel *et al.* „Toward fully autonomous mobile manipulation for industrial environments“. In: *International Journal of Advanced Robotic Systems* August (2017), S. 1–19. DOI: 10.1177/1729881417718588. URL: <https://doi.org/10.1177/1729881417718588>.
- [KS16] Vladik Kreinovich und Sergey P. Shary. „Interval methods for data fitting under uncertainty: A probabilistic treatment“. In: *Reliable Computing* (2016).
- [LH02] Derek D Lichti und B R Harvey. „the Effects of Reflecting Surface Material Properties on Time-of-Flight Laser Scanner Measurements“. In: *Geospatial Theory, Processing and Applications* (2002).
- [Li08] Jianfeng Li. „Calibration of a portable laser 3-D scanner used by a robot and its use in measurement“. In: 47.January 2008 (2008), S. 1–8. DOI: 10.1117/1.2829766.
- [Lia+18] Bin Liang *et al.* „Calibration of UR5 manipulator based on kinematic models“. In: *Proceedings of the 30th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2018*. 2018. DOI: 10.1109/CCDC.2018.8407738.
- [Low85] David G Lowe. *Perceptual Organization and Visual Recognition*. Kluwer Academic Publishers, 1985. DOI: 10.1007/978-1-4613-2551-2.
- [LW11] Daniel Lecking und Bernardo Wagner. „Lokalisationsverfahren autonomer mobiler Systeme mittels 2D- und 3D-Umgebungsmodellen im industriellen Umfeld auf der Basis einer 3D-Umgebungserfassung“. In: *KI - Künstliche Intelligenz* (2011). DOI: 10.1007/s13218-011-0096-9.
- [Mav+97] C. Mavroidis *et al.* „Systematic error analysis of robotic manipulators: Application to a high performance medical robot“. In: *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 1997. DOI: 10.1109/robot.1997.614262.
- [MG93] C.R. Mirman und K.C. Gupta. „Identification of Position-Independent Robot Parameter Errors Using Special Jacobian Matrices“. In: *The International Journal of Robotics Research* (1993). DOI: 10.1177/027836499301200307.

- [MTK16] Robin R. Murphy, Satoshi Tadokoro und Alexander Kleiner. „Disaster robotics“. In: *Springer Handbook of Robotics*. 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-32552-1_60.
- [NGD05] M. Neagoe, G. Gogu und D. Diaconescu. „High degree accuracy modelling and calibration of serial robots with large errors“. In: *Product Engineering: Eco-Design, Technologies and Green Energy*. 2005. DOI: 10.1007/1-4020-2933-0_23.
- [OYB09] Yoichi Okubo, Cang Ye und Johann Borenstein. „Characterization of the Hokuyo URG-04LX laser rangefinder for mobile robot obstacle negotiation“. In: *Unmanned Systems Technology XI*. 2009. DOI: 10.1117/12.818332.
- [PO94] Frank C Park und Koichiro Okamura. „Kinematic Calibration and the Product of Exponentials Formula“. In: *Advances in Robot Kinematics and Computational Geometry*. 1994. DOI: 10.1007/978-94-015-8348-0_12.
- [Pra14] Vijay Pradeep. „Calibrating a Multi-arm Multi-sensor Robot : A Bundle Adjustment Approach Calibrating a multi-arm multi-sensor robot :“. In: January 2014 (2014). DOI: 10.1007/978-3-642-28572-1.
- [Qui+09] Morgan Quigley *et al.* „High-accuracy 3D sensing for mobile manipulation: Improving object detection and door opening“. In: 2009. DOI: 10.1109/robot.2009.5152750.
- [RM68] R. D. Richtmyer und Ramon E. Moore. „Interval Analysis“. In: *Mathematics of Computation* (1968). DOI: 10.2307/2004792.
- [Rob] K.S. Roberts. „A new representation for a line“. In: *Proceedings CVPR '88: The Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. IEEE Comput. Soc. Press, S. 635–640. DOI: 10.1109/CVPR.1988.196303. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/196303/>.
- [Ros07] Paul L. Rosin. „Evaluating Harker and O’Leary’s distance approximation for ellipse fitting“. In: *Pattern Recognition Letters* (2007). DOI: 10.1016/j.patrec.2007.05.012.
- [RWK12] Mohamed Rahayem, Naoufel Werghe und Johan Kjellander. „Best ellipse and cylinder parameters estimation from laser profile scan sections“. In: *Optics and Lasers in Engineering* (2012). DOI: 10.1016/j.optlaseng.2012.03.014.
- [SAG97] Klaus Schröer, Stephen L. Albright und Michael Grethlein. „Complete, minimal and model-continuous kinematic models for robot calibration“. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* (1997). DOI: 10.1016/S0736-5845(96)00025-7.

- [San+11] Ricardo Sanz-Cortiella *et al.* „Characterisation of the LMS200 laser beam under the influence of blockage surfaces. Influence on 3D scanning of tree orchards“. In: *Sensors* (2011). DOI: 10.3390/s110302751.
- [SCH15] Zygmunt L. Szpak, Wojciech Chojnacki und Anton van den Hengel. „Guaranteed Ellipse Fitting with a Confidence Region and an Uncertainty Measure for Centre, Axes, and Orientation“. In: *Journal of Mathematical Imaging and Vision* (2015). DOI: 10.1007/s10851-014-0536-x.
- [SCV12] Zygmunt L. Szpak, Wojciech Chojnacki und Anton Van Den Hengel. „Guaranteed ellipse fitting with the Sampson distance“. In: *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-33715-4_7.
- [Sic+08] Bruno Siciliano *et al.* *Robotics: Modelling, Planning and Control*. 1st. Springer Publishing Company, Incorporated, 2008.
- [SK16] Bruno Siciliano und Oussama Khatib. *Springer handbook of robotics*. 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-32552-1.
- [Skr08] Piotr Skrzypczyński. „How to recognize and remove qualitative errors in time-of-flight laser range measurements“. In: *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS*. 2008. DOI: 10.1109/IROS.2008.4650594.
- [SNS11] Roland Siegwart, Illah R Nourbakhsh und Davide Scaramuzza. *Introduction to Autonomous Mobile Robots, Second Edition*. 2011. DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5509725. arXiv: arXiv:1402.5188v1.
- [Son+19] Tao Song *et al.* „A calibration method of dual two-dimensional laser range finders for mobile manipulator“. In: *International Journal of Advanced Robotic Systems* (2019). DOI: 10.1177/1729881419876783.
- [Spa+13] Dieter Spath *et al.* „Produktionsarbeit der Zukunft-Industrie 4.0“. In: *Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO* (2013). DOI: 978-3-8396-0570-7.
- [SS87] Henry W. Stone und Arthur C. Sanderson. „PROTOTYPE ARM SIGNATURE IDENTIFICATION SYSTEM.“ In: 1987.
- [Sta93] David Stanton. „Fundamentals of manipulator calibration. B. W. Mooring, Z. S. Roth and M. R. Driels“. 1993. DOI: 10.1016/0005-1098(93)90119-E.
- [Swe+97] Jan Swevers *et al.* „Optimal robot excitation and identification“. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* (1997). DOI: 10.1109/70.631234.

- [Szp17] Zygmunt L. Szpak. „MATLAB Implementation: Guaranteed Ellipse Fitting with a Confidence Region and an Uncertainty Measure for Centre, Axes and Orientation“. 2017. URL: <https://github.com/zygmuntszpak/guaranteed-ellipse-fitting-with-a-confidence-region-and-an-uncertainty-measure> (aufgerufen am 10.11.2021).
- [Tam+10] H. Tamura *et al.* „Position measurement system for cylindrical objects using laser range finder“. In: *Proceedings of SICE Annual Conference* (2010).
- [TBF05] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard und Dieter Fox. *Probabilistic robotics*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2005.
- [Tek+18] Burak Teke *et al.* „Real-time and Robust Collaborative Robot Motion Control with Microsoft Kinect [®] v2“. In: *2018 14th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications, MESA 2018*. 2018. DOI: 10.1109/MESA.2018.8449156.
- [Tha89] William Carlisle Thacker. „The role of the Hessian matrix in fitting models to measurements“. In: *Journal of Geophysical Research* (1989). DOI: 10.1029/jc094ic05p06177.
- [TL89] R Y Tsai und R K Lenz. „A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration“. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 5.3 (1989), S. 345–358. DOI: 10.1109/70.34770.
- [Vog20] R Voges. „Bounded-Error Visual-LiDAR Odometry on Mobile Robots Under Consideration of Spatiotemporal Uncertainties“. Dissertation. Leibniz Universität Hannover, 2020.
- [VW86] W K Veitschegger und Chi Haur Wu. „Robot Accuracy Analysis Based on Kinematics“. In: *IEEE Journal on Robotics and Automation* (1986). DOI: 10.1109/JRA.1986.1087054.
- [Wie19] C S Wieghardt. „Selbstkalibrierung von mobilen Manipulatoren basierend auf strukturiertem Licht“. Dissertation. Leibniz Universität Hannover, 2019.
- [Wie62] Thomas Freud Wiener. „Theoretical analysis of gimballess inertial reference equipment using delta-modulated instruments“. Dissertation. Massachusetts Institute of Technology, 1962. URL: <http://hdl.handle.net/10945/13259>.
- [Wu84] Chi haur Wu. „A Kinematic CAD Tool for the Design and Control of a Robot Manipulator“. In: *The International Journal of Robotics Research* (1984). DOI: 10.1177/027836498400300105.
- [WW03] Oliver Wulf und Bernardo Wagner. „Fast 3D scanning methods for laser measurement systems“. In: *Proceedings of the International Conference on Control Systems and Computer Science* (2003). DOI: 10.1117/12.900763.

- [WW17] C S Wieghardt und B Wagner. „Self-calibration of a mobile manipulator using structured light“. In: *2017 18th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*. 2017, S. 197–203. DOI: 10.1109/ICAR.2017.8023518.
- [Yan+14] Xiangdong Yang *et al.* „A minimal kinematic model for serial robot calibration using POE formula“. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* (2014). DOI: 10.1016/j.rcim.2013.11.002.
- [YB02] Cang Ye und Johann Borenstein. „Characterization of a 2-D laser scanner for mobile robot obstacle negotiation“. In: *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2002. DOI: 10.1109/robot.2002.1013609.
- [ZOD92] J C Ziegert, D G Olson und P Datsoris. „Description of machine tool errors using screw coordinates“. In: *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME* (1992). DOI: 10.1115/1.2917039.
- [ZP04] Qilong Zhang und Robert Pless. „Extrinsic Calibration of a Camera and Laser Range Finder (improves camera calibration)“. In: *Intelligent Robots and Systems (IROS)* (2004). DOI: 10.1109/IROS.2004.1389752.
- [ZR92] Hanqi Zhuang und Zvi S Roth. „Robot calibration using the CPC error model“. In: *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* (1992). DOI: 10.1016/0736-5845(92)90027-4.
- [ZRH92] Hanqi Zhuang, Zvi S Roth und Fumio Hamano. „A Complete and Parametrically Continuous Kinematic Model for Robot Manipulators“. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* (1992). DOI: 10.1109/70.149944.

Liste der Veröffentlichungen

Autor

J. Alberts, S. P. Kleinschmidt, B. Wagner. Probabilistic Calibration of a Manipulator and a 2D Laser Scanner. IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR), 2020

J. Alberts, S. P. Kleinschmidt, B. Wagner. 6-DoF Extrinsic Calibration between a Manipulator and a 2D Laser Scanner. International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotic, Lecture Notes in Electrical Engineering, Springer, 2020

J. Alberts, S. P. Kleinschmidt, B. Wagner. Robust Calibration Procedure between a Manipulator and a 2D Laser Scanner. International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), 2019

Patente im Rahmen der wissenschaftlichen Tätigkeit

J. Alberts; Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Deutschland. Verfahren zur Kalibrierung zwischen Manipulator und 2D Laser Scanner ohne zusätzliche Sensorik oder spezielle Kalibrier Targets. Veröffentlichungsdatum 2021/09/16. DE. Patent DE102020106998A1

Liste der betreuten Arbeiten

Christoph Jaschkowitz, „Evaluierung des RGB-D SLAM Algorithmus auf einem Einplatinenrechner für die Verwendung auf einem UAV“, Master Thesis, 2018.

Michael Kuhlmann, „Integration eines Quadrocopters in das ROS-Framework und Entwicklung eines User-Interfaces zur Steuerung“, Bachelor Thesis, 2018.

Kai Wang, „Investigation of sensor-based drift compensation for quadcopters“, Master Thesis, 2019.

Johannes Disselkamp, „Evaluierung der Robustheit und Regelgüte verschiedener Quadrocopter Trajektorienfolgeregelungen in einer Matlab/Simulink Simulation“, Studienarbeit, 2019.

Nils Sonemann, „Entwicklung und Evaluierung eines Verfahrens zur markerbasierten Positionsbestimmung von Objekten“, Master Thesis, 2019.

Marian Wehber, „Entwurf eines Laborversuchs für den Einsatz einer Sortieranlage im Labor für Steuerungstechnik“, Bachelor Thesis, 2019.

Jan Thieß Brockmann, „Entwicklung eines Testframeworks für Roboter im industriellen Umfeld“, Bachelor Thesis, 2019.

Yukai Zhou, „Experimentelle Untersuchung und Erweiterung eines Verfahrens zur extrinsischen Kalibrierung zwischen Manipulator und Laserscanner“, Bachelor Thesis, 2020.

Amine Berhouma, „Automatische Kalibrierung zwischen Manipulator und Laserscanner“, Master Thesis, 2020.

Anton Gleich, „Aufbau und Erweiterung eines Versuchsstandes für das Labor Steuerungstechnik“, Master Thesis, 2020.

Michael Kuhlmann, „Fehleranalyse der Lokalisierung zylindrischer Objekte in einem 2D Laserscan“, Master Thesis, 2020.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig verfasst habe. Alle benötigten Hilfsmittel sind vollständig angegeben. Die Dissertation wurde nicht als Diplom-, Master- oder ähnliche Prüfungsarbeit verwendet und weder Dissertation oder Teile sind vorher veröffentlicht worden. Frühere Promotionsgesuche habe ich nicht eingereicht. Es wurden keine kommerziellen Promotionsberater in Anspruch genommen.

Hildesheim, 02. Februar 2022

.....
Jan Alberts

Über den Autor

Name: Jan Alberts
Geburtsdatum: 20. März 1987
Geburtsort: Hildesheim (Niedersachsen, Deutschland)

Ausbildung

2015 - 2017 Studium der Elektrotechnik
an der Technischen Universität Braunschweig
Abschluss Master of Science mit Auszeichnung

2015 Auslandssemester
an der University of Southampton, Vereinigtes Königreich

2013 Summerschool
an der University of North Carolina at Greensboro, USA

2012 - 2015 Studium der Elektro- und Informationstechnik
an der Hochschule Hannover
Jahrgangsbester Abschluss Bachelor of Engineering

2008 - 2012 Berufsausbildung zum Elektroniker für Geräte und Systeme
bei der Robert Bosch GmbH am Standort Hildesheim

Wissenschaftliche Arbeit

2017 - 2022 Wissenschaftlicher Mitarbeiter
an der Leibniz Universität Hannover
im Institut für Systems Engineering in der Arbeitsgruppe Echtzeitsysteme

