



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN



DIPLOMARBEIT

Beiträge zur kinematischen und dynamischen Kalibrierung eines Industrie-Roboterarmes

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

im Rahmen des Studiums

Geodäsie und Geoinformation

eingereicht von

Maximilian Pühringer BSc

Matrikelnummer 01226861

ausgeführt am Department für Geodäsie und Geoinformation
der Fakultät für Mathematik und Geoinformation
der Technischen Universität Wien

Betreuung

Betreuer: Univ.Prof. Dr.-Ing. Hans-Berndt Neuner

Mitwirkung: Dipl.-Ing. Sabine Horvath BSc

Wien, am 1. Oktober 2019

(Unterschrift VerfasserIn)

(Unterschrift BetreuerIn)



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

Bedingt durch ihre Interdisziplinarität ist die Ingenieurgeodäsie immer wieder mit neuen Anwendungen und Aufgaben gefordert. Getrieben durch Industrie 4.0 stellen Industrieroboter ein solches Betätigungsfeld dar, das erst in letzter Zeit entstanden ist und nun die Ingenieurgeodäten beschäftigt.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Kalibrierung eines Roboterarmes durchzuführen, wobei ein Lasertracker als Referenz dient. Dazu wird ein mathematisches Modell des Roboterarmes benötigt, das anhand von Koordinatensystemen die Geometrie des Roboterarmes beschreibt. Es handelt sich dabei um ein parametrisches Modell, dessen Parameter mittels eines Schätzverfahrens, das die Kalibrierung darstellt, bestimmt werden sollen.

Zur Kalibrierung werden sowohl ein kinematisches als auch ein dynamisches Modell verwendet. Das kinematische Modell umfasst 33 Parameter, die die Geometrie des Roboterarmes sowie die Transformation zwischen Roboterarm und Lasertracker beschreiben. Das dynamische Modell stellt eine Erweiterung des kinematischen Modells dar, zusätzlich zu den Parametern des kinematischen Modells werden fünf Steifigkeitsparameter eingeführt.

Eine Simulation zeigt, dass lineare Abhängigkeiten zwischen einigen Parametern auftreten, die durch die Geometrie des Roboterarmes bedingt sind. Durch eine Singulärwertzerlegung können vier Parameterpaare und zwei Parametertripel identifiziert werden, von denen jeweils nur ein Parameter im Ausgleichsverfahren bestimmt werden kann. Weiters kann durch die Simulation festgestellt werden, dass für die Kalibrierung eine zufällige Auswahl an Armstellungen des Roboterarmes äußerst wichtig ist, um die Anzahl der Korrelationen zwischen den Parametern gering zu halten.

Bei der Durchführung der Kalibrierung zeigt der Globaltest, dass der Roboterarm nicht vollständig durch die aufgestellten Modelle repräsentiert werden kann, wobei das dynamische Modell bessere Werte erzielt. Auch durch einige weiterführende Untersuchungen können etwaige Modellschwächen nicht gefunden werden. Dennoch wurden im Zuge dieser Arbeit wichtige Erkenntnisse gewonnen und einige nützliche Nebenprodukte geschaffen, die sowohl für eine Optimierung der vorliegenden Kalibrierung als auch für Anwendungen abseits der Kalibrierung genutzt werden können.

Abstract

Engineering geodesy is a very interdisciplinary field within geodesy, which is always challenged with new applications and tasks. Driven by Industry 4.0, industrial robots represent such a new field that has emerged only recently and now concerns the engineering geodesists.

The aim of this work is to perform a calibration of a robotic arm using a laser tracker as a reference. For this purpose, a mathematical model of the robot arm is required that describes the geometry of the robot arm by means of coordinate systems. This model is a parametric model whose parameters should be determined by an estimation procedure that represents the calibration.

For the calibration both a kinematic and a dynamic model are used. The kinematic model includes 33 parameters that describe the geometry of the robot arm and the transformation between robot arm and laser tracker. The dynamic model is an extension of the kinematic model, which introduces five additional stiffness parameters.

A simulation shows that linear dependencies between some parameters occur due to the geometry of the robot arm. By a singular value decomposition, four parameter pairs and two parameter triplets can be identified, of which only one parameter can be estimated in the adjustment procedure. Furthermore, the simulation reveals that a random selection of arm positions of the robot arm is of utmost importance for the calibration to keep the number of correlations between the parameters low.

When performing the calibration, the global test shows that both calibration models cannot fully represent the robot arm, whereby the dynamic model achieves better values. Even some further investigations can not find possible model weaknesses. Nevertheless, in the course of this work, important insights have been gained and some useful secondary products got created that can be used both for optimization of the present calibration and for applications apart from calibration.

Danksagung

Mein Dank gilt in erster Linie Herrn Univ.Prof. Dr.-Ing. Hans-Berndt Neuner, der mir diese Arbeit ermöglicht hat und mir in unseren unzähligen Gesprächen neue Impulse und Inspiration gegeben hat.

Ein herzliches Dankeschön möchte ich auch an Frau Dipl.-Ing. Sabine Horvath BSc richten, die mit ihrer fachlichen Kompetenz zu jeder Zeit eine direkte Ansprechperson in allen Belangen dieser Arbeit war und mich mit immer neuen Gedanken und Ideen motiviert hat.

Ein besonderes Danke geht an meine Freundin Michaela, mit der ich über alles reden kann, die mir in schwierigen Situationen beisteht und die mit ihrer liebevollen Art jeden Tag meines Lebens bereichert.

Der größte Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die mir nicht nur das Studium, sondern meinen gesamten Bildungsweg ermöglicht haben. Liebe Mama, lieber Papa, ohne eure Unterstützung in jeglicher Hinsicht wäre all dies nicht möglich gewesen!

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Begriffe	3
2.1.1	Pose, Position und Orientierung	3
2.1.2	Genauigkeitsmaße eines Roboterarmes	3
2.1.3	Kalibrierung	4
2.2	Koordinatensysteme	4
2.2.1	Basis-Koordinatensystem	5
2.2.2	Glied-Koordinatensystem	5
2.2.3	Endeffektor-Koordinatensystem	6
2.2.4	Welt-Koordinatensystem	6
2.3	Transformation	8
2.3.1	Ähnlichkeitstransformation	8
2.3.2	Homogene Ähnlichkeitstransformation	9
2.3.3	Transformation mithilfe der Denavit-Hartenberg-Parameter	11
2.3.4	Transformation nach Hayati und Mirmirani	13
2.4	Kinematik	13
2.4.1	Vorwärtskinematik	14
2.4.2	Inverse Kinematik	14
2.5	Kalibrierung	15
2.5.1	Überblick	15
2.5.2	Stand der Technik	16
2.5.3	Auswahl der Kalibrierungsmethode	20
3	Methodik	21
3.1	Funktionales Modell	21
3.2	Stochastisches Modell a priori	22
3.3	Beurteilung der Parameterschätzung	23
3.3.1	Globaltest	23
3.3.2	Genauigkeiten der ausgeglichenen Parameter	24
3.3.3	Parametertest	25
3.3.4	Korrelationen der ausgeglichenen Parameter	25
3.4	Regularität, Singularitäten, Singulärwertzerlegung	26
3.5	Dynamisches Kalibrierungsmodell	27
4	Simulation	31
4.1	Näherungswerte	31
4.2	Erstellen von Simulationsdaten	32
4.3	Konfigurationsanalyse	34

4.4	Linear abhängige Parameter	34
4.4.1	Direkte Beobachtung einzelner Parameter und Rangbestimmung	35
4.4.2	Direkte Beobachtung von Parametergruppen und Rangbestimmung	35
4.4.3	Direkte Beobachtung von Parametergruppen und Singulärwertzerlegung	35
4.4.4	Nähere Betrachtung der rechten Singulärvektoren	37
4.4.5	Auswahl der bestimmmbaren Parameter	38
4.5	Ergebnisse	39
4.5.1	Kinematische Kalibrierung	40
4.5.2	Dynamische Kalibrierung	44
5	Messung und Auswertung	47
5.1	Instrumentarium	47
5.1.1	Roboterarm	47
5.1.2	Lasertracker	49
5.1.3	Überprüfung des Lasertrackers	50
5.2	Messaufbau	50
5.3	Eigenschaften des Endeffektors	50
5.3.1	Technische Komponenten	51
5.3.2	Bestimmung der Endeffektor-Translation aus theoretischen Abschätzungen	53
5.3.3	Messtechnische Bestimmung der Endeffektor-Translation	55
5.3.4	Bestimmung der Endeffektor-Translation durch Ausgleichung	57
5.3.5	Masse und Schwerpunkt des Endeffektors	57
5.4	Berechnung möglicher Armstellungen	57
5.5	Ergebnisse	60
5.5.1	Kinematische Kalibrierung	61
5.5.2	Dynamische Kalibrierung	64
5.6	Nähere Untersuchung der Ergebnisse	66
5.6.1	Interne Kalibrierungswerte des Roboterarmes	67
5.6.2	Encoder-Genauigkeit	68
6	Fazit und Ausblick	71
	Literatur	73
A	Armstellungen für die Kalibrierung	77



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

1 Einführung

Die Ingenieurgeodäsie ist jener Teil der angewandten Geodäsie, der sich mit Planung, Ausführung und Überwachung von geometrischen Objekten beschäftigt. Diese Objekte können technische Objekte aus dem Maschinen- und Anlagenbau, auch Bauwerke oder natürliche Objekte sein. Nach Wieser et al. [2017] ist ein wesentliches Merkmal der Ingenieurgeodäsie „die kompetente Bearbeitung geometriebezogener Fragestellungen unter Berücksichtigung des Wirtschaftlichkeitsprinzips und mit durchgreifender Qualitätsbeurteilung von der Planung über die Messung bis zur Auswertung und Interpretation. Die Aufgabenstellungen bzw. Anwendungsfelder liegen fast ausschließlich im interdisziplinären Umfeld und fordern vom Ingenieurgeodäten daher in besonderem Maße auch Kenntnisse und Verständnis übergeordneter Prozesse der Nachbardisziplinen; genannt seien hier beispielhaft das Bauwesen, die Geowissenschaften oder der Maschinenbau.“

Gerade durch diese Interdisziplinarität wird das Betätigungsfeld der Ingenieurgeodäsie immer breiter. Beispiele der vielfältigen Aufgaben sind das Überwachen von instabilen Berghängen durch automatische Monitoringsysteme, die Steuerung von Tunnelbohrmaschinen, Gleiskontrollmessungen, Deformationsmessungen bei Brücken oder Staumauern, das Ausrichten von Maschinenteilen, Geometriekontrolle während Fertigungsprozessen im Flugzeug- und Schiffsbau. Durch diese Vielfalt ist besonderes Bewusstsein bezüglich Sensorik und geodätischer Messtechnik gefordert.

Durch die Interdisziplinarität ist auch in der Ingenieurgeodäsie Industrie 4.0 ein schlagender Begriff. Der Ausdruck steht formal für die vierte industrielle Revolution, die nach den ersten drei bereits erfolgten Revolutionierungsschritten nun eingeleitet werden soll. Der Fokus liegt auf intelligenten Objekten, Geräten, Maschinen oder Anlagen, die auch cyber-physische Systeme genannt werden. Weitere Elemente sind der automatisierte Datenaustausch zwischen Maschinen, eine globale Netzwerkinfrastruktur, das sogenannte „Internet der Dinge“, das zur Steuerung und Überwachung dient. Industrie 4.0 stellt auch Anspruch auf selbstlernende Systeme und Einbindung von virtuellen Daten in die reale Welt und fordert sinnvollen Umgang und systematisches Auswerten von großen Datenmengen.

Ein Fortschritt der Industrie bedeutet auch neue Betätigungsfelder in der Ingenieurgeodäsie, so zum Beispiel die Steuerung von Industrierobotern. Speziell die Automobilindustrie ist hauptverantwortlich für den enormen Aufschwung von Industrierobotern. Bei den dort eingesetzten Robotern handelt es sich meist um Roboterarme. Um sie verwenden und handhaben zu können, muss ein Bewusstsein und Verständnis über das System Roboterarm geschaffen werden. In diesem Ausschnitt der Ingenieurgeodäsie ist die vorliegende Arbeit einzugliedern.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein mathematisches Modell zu definieren, das dem Aufbau, also der Geometrie des Roboterarmes entspricht. Dieses mathematische Modell beschreibt die einzelnen Roboterarmelemente mit Hilfe von in der Geodäsie bekannten Elementen wie Koordinatensystemen oder Transformationen. Diese Elemente und folglich das mathematische Modell werden durch eine Vielzahl an Parametern beschrieben. Zur Bestimmung der Parameter wird eine Kalibrierung durchgeführt, dabei dient der Roboterarm als Messgerät und wird mit einem Normal verglichen.

Im Forschungsbereich Ingenieurgeodäsie der Technischen Universität in Wien ist das System Roboterarm kein völliges Novum, auch Horvath und Neuner [2019] greifen in ihrer Publikation dieses Thema auf. Der von ihnen verfasste Artikel befasst sich mit einem nicht-parametrischen Ansatz, um einen Roboterarm zu beschreiben. Nicht zuletzt um eine Vergleichsbasis zwischen parametrischen und nicht-parametrischen Modellen von Roboterarmen zu schaffen, beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit Ersterem.

Dazu werden in Kap. 2 einige grundlegende Begriffe erläutert, geodätische Elemente in Bezug zur Robotik gesetzt und ein Blick auf andere Kalibrierungsansätze geworfen. Kap. 3 beschreibt Vorgehensweisen, um das mathematische Modell und deren Parameter zu charakterisieren und zu untersuchen. Aufgrund der Komplexität des Modells und der Vielzahl an Parametern werden diese Methoden in einer Simulation (Kap. 4) angewandt. Die Durchführung der Kalibrierung und deren Ergebnisse sind in Kap. 5 dargelegt, während Kap. 6 die Arbeit resümiert und Schlussfolgerungen sowie Anregungen liefert.

2 Grundlagen

2.1 Begriffe

2.1.1 Pose, Position und Orientierung

Als *Position* wird ein Punkt im Raum verstanden, die Beschreibung einer Position gelingt über einen 3×1 Positionsvektor. Die *Orientierung* wird bei Betrachtung eines dreidimensionalen Körpers wichtig und beschreibt seine Ausrichtung im Raum. Die Beschreibung gelingt über einen körpereigenen Koordinatenrahmen, formal ist dies eine 3×3 Rotationsmatrix, die aus 3 Rotationswinkel aufgestellt wird. [Craig, 1989]

Die *Pose* ist die Kombination von Position und Orientierung und beinhaltet sechs Größen. Das verbindende Element ist der Ursprung, der einerseits als Punkt im Raum dient und andererseits der Schnittpunkt der Koordinatenachsen des Rahmens ist, der die Orientierung beschreibt. Da die Glieder und Gelenke eines Roboterarmes sowie ein montiertes Werkzeug als Körper betrachtet werden können, ist die Pose eine äußerst wichtige Bezeichnung in der Robotik.

2.1.2 Genauigkeitsmaße eines Roboterarmes

Die Positionierfähigkeit eines Roboterarmes wird mit unterschiedlichen Genauigkeitsmaßen ausgedrückt. Eine sehr weit verbreitete und fast von jedem Hersteller angegebene Größe ist die *Wiederholgenauigkeit*. Die Wiederholgenauigkeit gibt das Vermögen des Roboterarmes an, zu einer zuvor eingenommenen Pose zurückzukehren. Die Gründe für die Differenz zweier solcher Posen können beispielsweise die Ansteuerung der Gelenke, Flexibilität der Roboterstruktur oder die Nachgiebigkeit bzw. Steifigkeit der Gelenke und Glieder sein. Die *Auflösung* ist schwieriger zu definieren, manchmal wird sie als kleinstmögliche Bewegung des Roboterarms aufgefasst, diese variiert jedoch oft über den Arbeitsbereich. Eine andere Definition bezieht sich auf die digitalen Signale des Roboterarmes, die Auflösung eines Gelenks ist die kleinste Signaländerung, die registriert und ausgeführt werden kann. Eine weitere Messgröße für die Positionierfähigkeit ist die *Posengenauigkeit*. Sie beschreibt die Fähigkeit des Roboterarmes, eine spezifische Pose, die zuvor noch nicht eingenommen wurde, anzufahren. [Mooring et al., 1991]

Die korrekte Unterscheidung zwischen Wiederholgenauigkeit und Posengenauigkeit ist äußerst wichtig, zum tieferen Verständnis seien, ebenfalls nach Mooring et al. [1991], zwei weitere Begriffe eingeführt: Der Gelenksraum (joint space) und der Aufgabenraum (task space). Wird eine Pose über drei kartesische Koordinaten und drei Winkel festgelegt, so ist dies eine Definition im Aufgabenraum. Wird die Pose über die Geometrie des Roboterarmes und die Gelenkwinkel vorgegeben, geschieht die Definition im Gelenksraum.

Bei einer erneuten Betrachtung der Genauigkeitsmaße kann nun besser zwischen Wiederholgenauigkeit und Posengenauigkeit unterschieden werden. Bei der Wiederholgenauigkeit ist die Pose bereits im Gelenksraum festgelegt, da sie kurz zuvor angefahren worden ist. Damit sind die Gelenkwinkel bekannt. Bei der Posengenauigkeit hingegen ist die Pose nur im Aufgabenraum gegeben und die Gelenkwinkel, um diese Pose zu erreichen, müssen erst bestimmt werden. Mit

anderen Worten, die Pose muss vom Aufgabenraum in den Gelenksraum übergeführt werden. [Mooring et al., 1991]

2.1.3 Kalibrierung

Nach DIN 1319-1 [1995] ist die Kalibrierung das „Ermitteln des Zusammenhangs zwischen Messwert [...] und dem zugehörigen wahren oder richtigen Wert der als Eingangsgröße vorliegenden Messgröße für eine betrachtete Messeinrichtung bei vorgegebenen Bedingungen.“ Der Messwert ist dabei jene Größe, die vom Messgerät ausgegeben wird und zufälligen sowie systematischen Fehlern unterliegt. Die Eingangsgröße ist jene Größe, die vom Messgerät erfasst werden soll. Während ihr wahrer Wert in den seltensten Fällen bekannt und als ideell anzusehen ist, ist ihr richtiger Wert ein, meist durch Vereinbarung festgelegter, bekannter Vergleichswert. Zur Bestimmung des richtigen Wertes wird oft ein sogenanntes Normal verwendet, dies kann ein Messgerät aber auch ein Referenzmaterial sein. Nach Möglichkeit sollte der richtige Wert so bestimmt werden, dass die Messabweichungen um eine Zehnerpotenz kleiner sind als die des Messwertes. Kalibrieren darf nicht mit Justieren verwechselt werden. Beim Justieren wird das Messgerät verändert, beim Kalibrieren erfolgt kein Eingriff auf das Messgerät.

Die Kalibrierung eines Roboterarmes hat das Ziel, seine Posengenauigkeit zu verbessern. Die Überführung der Pose vom Aufgabenraum in den Gelenksraum (siehe Kap. 2.1.2) geschieht über ein mathematisches Modell. Je besser dieses mathematische Modell der Geometrie des Roboterarmes entspricht, desto besser ist dessen Posengenauigkeit. Dort greift die Kalibrierung eines Roboterarmes an. Es gilt, ein geeignetes mathematisches Modell zu finden und im Falle eines parametrischen Modells die verschiedenen Parameter zu bestimmen.

Mooring et al. [1991] unterteilt die Kalibrierung in verschiedene Grade, diese Unterscheidung wird von vielen Autoren verwendet und findet sich daher oft in der Literatur wieder. Bei der Kalibrierung 1. Grades werden nur die Gelenke selbst kalibriert, es wird eine Beziehung zwischen dem Gelenkwinkelgeber und dem tatsächlichen Gelenkwinkel gesucht. Unter Kalibrierung 2. Grades versteht man eine kinematische Kalibrierung. Es soll ein Modell gefunden werden, dessen Parameter der Geometrie des Roboterarmes entsprechen. Die Kalibrierung 3. Grades, auch dynamische Kalibrierung genannt, umfasst außerdem die Steifigkeit der Gelenke und Glieder sowie Effekte wie Reibung und Spiel in den Gelenken.

2.2 Koordinatensysteme

In der Geodäsie werden unterschiedlichste Koordinatensysteme genutzt, um Zuständen oder Abläufen einen Bezug zu geben und mathematisch beschreiben zu können. Die Auswahl an Koordinatensystemen ist groß, häufig werden kartesische (orthogonale), polare oder elliptische Koordinatensysteme, sowohl in der Ebene als auch im Raum, verwendet.

In der Robotik werden dreidimensionale rechtshändige kartesische Koordinatensysteme bevorzugt. Um einen Roboterarm zu beschreiben, werden mehrere Koordinatensysteme benötigt: Das Basis-Koordinatensystem, das Endeffektor-Koordinatensystem, das Glied-Koordinatensystem und das Welt-Koordinatensystem.

2.2.1 Basis-Koordinatensystem

Die Basis ist der nicht bewegte Teil des Roboterarmes und dient zur Montage des Roboterarmes [Craig, 1989]. Die z-Achse stellt die Rotationsachse des ersten Gelenks dar, die x-Achse wird willkürlich in einer dazu orthogonalen Ebene gewählt und die dritte Achse komplettiert das rechtshändige System. Der Ursprung liegt somit im Schnittpunkt dieser Ebene mit der Rotationsachse. Meist steht die Rotationsachse des ersten Gelenks normal auf die Montageeinheit des Roboterarmes, sodass je nach Montage Boden, Decke oder Wand die orthogonale Ebene darstellen. Das Basis-Koordinatensystem ist in Abb. 2.1 gezeigt, die x-Achse ist rot, die y-Achse grün und die z-Achse blau dargestellt.

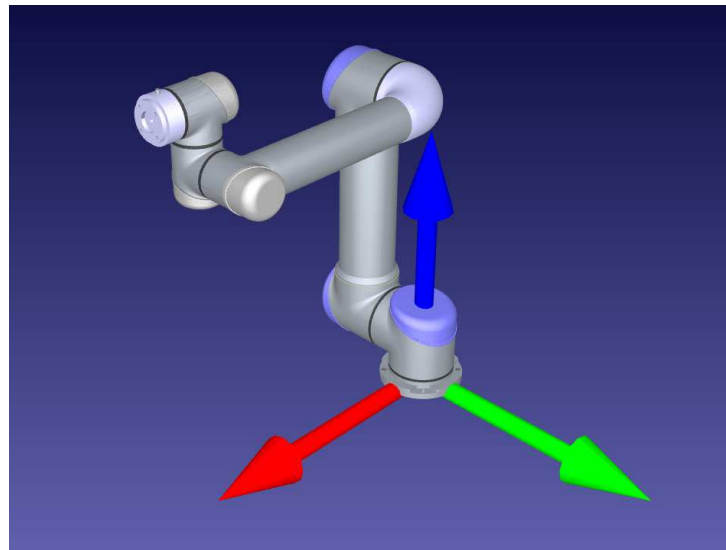


Abb. 2.1: Basis-Koordinatensystem

2.2.2 Glied-Koordinatensystem

Ein Roboterarm besteht aus mehreren Gliedern, die über die Gelenke miteinander verbunden sind. Zur Beschreibung der Position und Orientierung eines Gliedes wird für jedes Glied des Roboterarmes ein eigener Koordinatenrahmen eingeführt, der dem Glied-Koordinatensystem entspricht. Die Rotationsachse des Gelenks stellt die z-Achse dar. Die x-Achse zeigt in Richtung der gemeinsamen Normalen, die zwischen den Rotationsachsen des betrachteten und des nachfolgenden Gelenks gefunden werden kann. Die dritte Achse komplettiert das rechtshändige System. [Corke, 2013; Hollerbach et al., 2008] Das Glied-Koordinatensystem ist in jedem Glied durch einen eigenen Glied-Koordinatenrahmen realisiert. Abb. 2.2 zeigt die Glied-Koordinatenrahmen des Roboterarmes UR5. Es ist zu erkennen, dass das Basis-Koordinatensystem ein Sonderfall des Glied-Koordinatensystems ist.

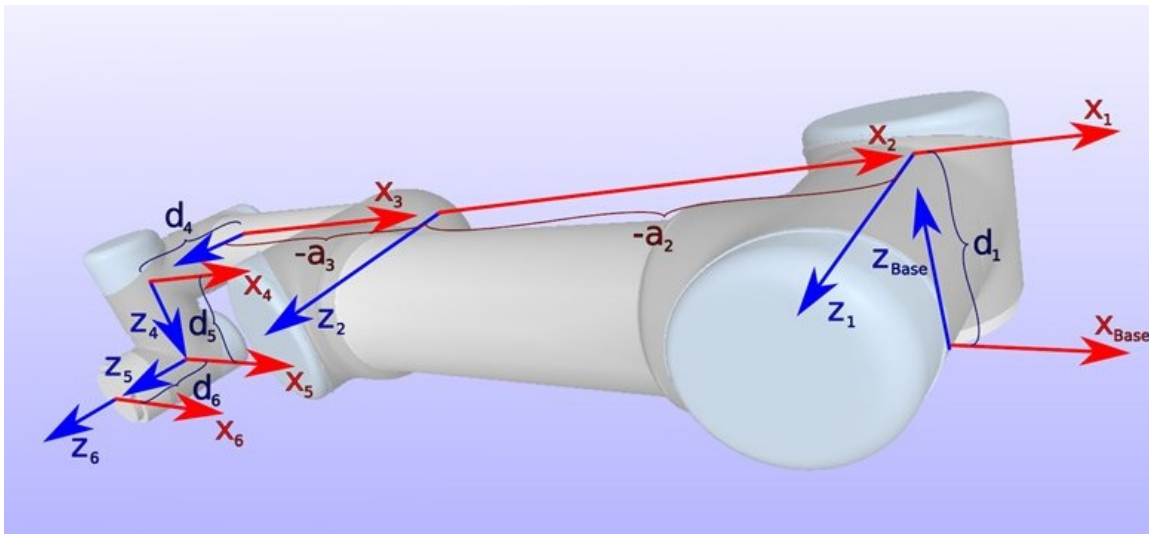


Abb. 2.2: Glied-Koordinatenrahmen des Roboterarmes UR5¹, zur besseren Übersicht werden nur die x- und z-Achse dargestellt

2.2.3 Endeffektor-Koordinatensystem

Am Ende des Roboterarmes wird meist eine Art von Werkzeug montiert. In der Literatur werden für dieses Werkzeug dafür die Begriffe Endeffektor, Tool oder Probe verwendet. Im Folgenden wird der Begriff Endeffektor genutzt. Der Endeffektor wird nach dem letzten Gelenk, dem sogenannten Roboterflansch, angebracht. Das entsprechende Koordinatensystem hängt von der Bauweise des Endeffektors ab. Als Ursprung des Endeffektor-Koordinatensystems gilt der Tool Center Point (TCP), er kann beispielsweise eine Tastspitze (wie bei Dupuis et al. [2017]) oder ein definierter Messpunkt für eine externe Messtechnik (T-Probe bei Horvath und Neuner [2019]) sein. Die Achsen des Endeffektor-Koordinatensystems werden oft parallel zu den Achsen des Koordinatenrahmens des letzten Gelenks gewählt, somit entspricht eine Transformation einer Translation mit nur drei Parametern. Es ist aber auch möglich, die Achsen dem Endeffektor anzupassen und willkürlich zu wählen. Auch das Endeffektor-Koordinatensystem ist ein rechtshändiges orthogonales System. Abb. 2.3 zeigt ein Endeffektor-Koordinatensystem für einen Kugelreflektor, der auf den Roboterflansch mithilfe einer Platte und eines Zylinders montiert ist.

2.2.4 Welt-Koordinatensystem

Alle Bewegungen des Roboterarmes und damit auch des Endeffektors werden relativ zum Welt-Koordinatensystem ausgeführt. Das Welt-Koordinatensystem entspricht oft dem Koordinatensystem einer externen Messtechnik, kann aber auch dem Arbeitsbereich des Roboterarmes (zum Beispiel einem Montagetisch, siehe Abb. 2.4) angepasst sein. Andere Namen sind auch übergeordnetes oder Sensor-Koordinatensystem.

¹Quelle: <https://www.universal-robots.com/how-tos-and-faqs/faq/ur-faq/parameters-for-calculations-of-kinematics-and-dynamics-45257>, aufgerufen am 18.07.2019

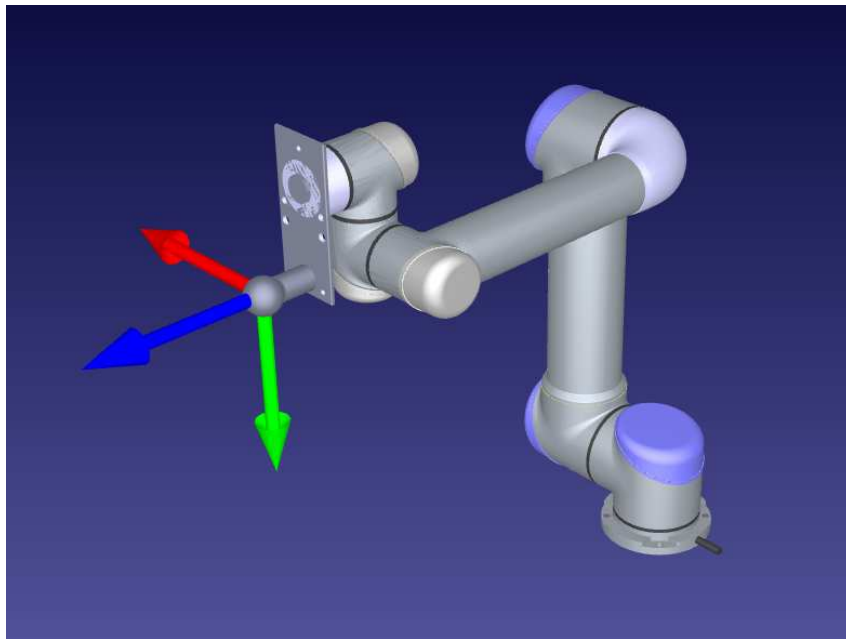


Abb. 2.3: Endeffektor-Koordinatensystem

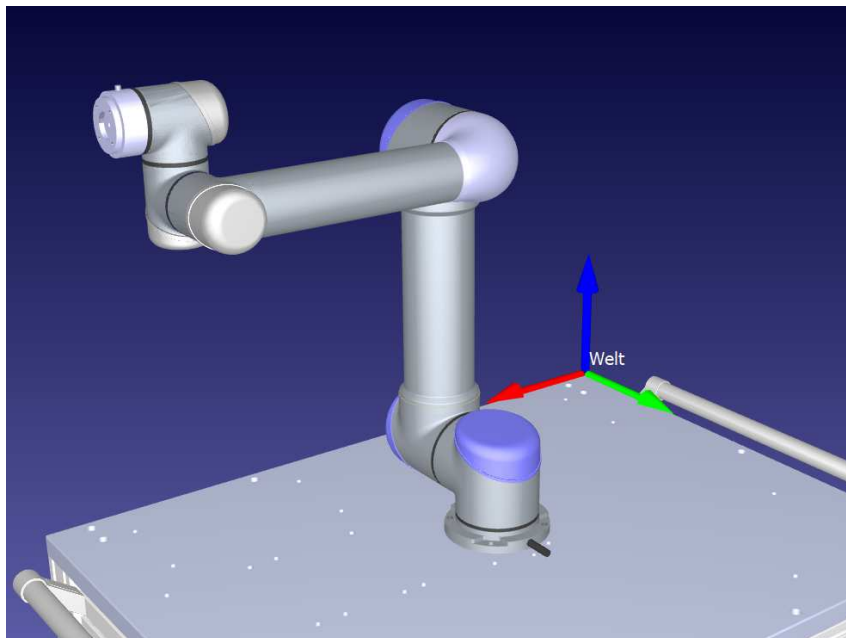


Abb. 2.4: Welt-Koordinatensystem

2.3 Transformation

Um Position und Orientierung, also die Pose eines Körpers in verschiedenen Koordinatensystemen anzugeben, wird eine Transformation benötigt. Eine Transformation stellt den Wechsel von einem Koordinatensystem in ein anderes dar, das Bezugssystem ändert sich.

2.3.1 Ähnlichkeitstransformation

In der Robotik kann von einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation ausgegangen werden. Voraussetzung dafür ist gleicher Maßstab in den drei Koordinatenachsen. Eine Ähnlichkeitstransformation kann nach Kahmen [2006] in drei Schritte unterteilt werden:

1. Translationen t_x , t_y und t_z entlang den drei Koordinatenachsen
2. Elementardrehungen um die Winkel ω_x , ω_y und ω_z
(bzw. Drehung um den Winkel φ um eine definierte Achse)
3. Multiplikation des Maßstabsfaktors m

Die Transformationsgleichung hat die Form:

$$\mathbf{X}_1 = \mathbf{t} + m \mathbf{R} \mathbf{X}_2 \quad \text{mit} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{X}_1 = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{X}_2 = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \mathbf{t} = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix}$$

Der Punkt \mathbf{X} wird vom Koordinatensystem 1 in das Koordinatensystem 2 transformiert, dies wird durch den Index angegeben. Der Maßstabsfaktor m ist ein Skalar und berechnet sich aus dem Streckenverhältnis der betrachteten Koordinatensysteme. Die Rotationsmatrix \mathbf{R} kann aus verschiedenen Größen gebildet werden und daher unterschiedliche Gestalt annehmen:

- Bei der **Kardanwinkel-Darstellung** setzt sich die Rotationsmatrix aus den Elementardrehungen um die einzelnen Koordinatenachsen zusammen. Die Reihenfolge der Elementardrehungen spielt dabei eine entscheidende Rolle, es wird zuerst um die x-Achse, dann um die y-Achse und zuletzt um die z-Achse gedreht:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_z \mathbf{R}_y \mathbf{R}_x = \begin{pmatrix} \cos \omega_z & \sin \omega_z & 0 \\ -\sin \omega_z & \cos \omega_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \omega_y & 0 & -\sin \omega_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \omega_y & 0 & \cos \omega_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_x & \sin \omega_x \\ 0 & -\sin \omega_x & \cos \omega_x \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Ausmultipliziert ergeben sich folgende Einträge in der Rotationsmatrix (mit $c = \cos$ und $s = \sin$):

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} c\omega_y c\omega_z & c\omega_x s\omega_z + s\omega_x s\omega_y c\omega_z & s\omega_x s\omega_z - c\omega_x s\omega_y c\omega_z \\ -c\omega_y s\omega_z & c\omega_x c\omega_z - s\omega_x s\omega_y s\omega_z & s\omega_x c\omega_z + c\omega_x s\omega_y s\omega_z \\ s\omega_y & -s\omega_x c\omega_y & c\omega_x c\omega_y \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Da die Reihenfolge der Elementardrehungen x-y-z ist, werden ω_x , ω_y und ω_z als Kardanwinkel bzw. Roll-, Nick- und Gierwinkel (roll, pitch, yaw) genannt. [Gattringer, 2011]

- Die **Winkel/Achse-Darstellung** der Rotationsmatrix gelingt mit einem Drehwinkel φ um eine bestimmte Achse. Diese Achse wird durch den Einheitsvektor $\mathbf{u} = (u_x \ u_y \ u_z)^T$ festgelegt. Nach Gattringer [2011] kann die Rotationsmatrix wie folgt berechnet werden:

$$\mathbf{R} = \cos \varphi \mathbf{I} + (1 - \cos \varphi) \mathbf{u} \mathbf{u}^T + \sin \varphi \tilde{\mathbf{u}}, \quad (2.4)$$

wobei \mathbf{I} die Einheitsmatrix ist und

$$\tilde{\mathbf{u}} = \begin{pmatrix} 0 & -u_z & u_y \\ u_z & 0 & -u_x \\ -u_y & u_x & 0 \end{pmatrix}.$$

Ausrechnen und Einsetzen der Komponenten liefern wieder die Rotationsmatrix (mit $c = \cos$ und $s = \sin$):

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} u_x^2(1 - c\varphi) + c\varphi & u_x u_y(1 - c\varphi) - u_z s\varphi & u_x u_z(1 - c\varphi) + u_y s\varphi \\ u_x u_y(1 - c\varphi) + u_z s\varphi & u_y^2(1 - c\varphi) + c\varphi & u_y u_z(1 - c\varphi) - u_x s\varphi \\ u_x u_z(1 - c\varphi) - u_y s\varphi & u_y u_z(1 - c\varphi) + u_x s\varphi & u_z^2(1 - c\varphi) + c\varphi \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Da vier Parameter benötigt werden, handelt es sich bei (2.5) um eine nicht minimale Darstellung.

2.3.2 Homogene Ähnlichkeitstransformation

Die Benutzung von homogenen Koordinaten erlaubt oft elegantere Formulierungen, so auch bei der Ähnlichkeitstransformation. Dazu wird der \mathbb{R}^3 in den \mathbb{R}^4 eingebettet. Dem Quadrupel $(x, y, z, k) \in \mathbb{R}^4$ wird der Punkt $(\frac{x}{k}, \frac{y}{k}, \frac{z}{k}) \in \mathbb{R}^3$ zugeordnet, wobei $k \neq 0$ sein muss. Das Quadrupel wird auch homogene Koordinaten des betreffenden Punktes genannt [Scheid und Schwarz, 2009].

Wählt man $k = 1$, so lässt sich (2.1) in homogenen Koordinaten ausdrücken:

$$\mathbf{X}_1^H = \mathbf{t}^H + m \mathbf{R}^H \mathbf{X}_2^H \quad \text{mit} \quad (2.6)$$

$$\mathbf{X}_1^H = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{X}_2^H = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{t}^H = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \mathbf{R}^H = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & 0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & 0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Der Exponent H soll zur besseren Differenzierung beitragen. Wie in Bajd et al. [2010] beschrie-

ben, kann auch eine Translation in Form einer Matrix angegeben werden:

$$\mathbf{X}_1^H = \tau \mathbf{X}_2^H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 + t_x \\ y_2 + t_y \\ z_2 + t_z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Die rechte Seite von (2.7) entspricht im \mathbb{R}^3

$$\begin{pmatrix} x_2 + t_x \\ y_2 + t_y \\ z_2 + t_z \end{pmatrix} = \mathbf{X}_2 + \mathbf{t}, \quad (2.8)$$

somit ist Äquivalenz gegeben.

Folglich lässt sich (2.6) folgendermaßen umformen:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_1^H &= \tau m \mathbf{R}^H \mathbf{X}_2^H \\ &= m \tau \mathbf{R}^H \mathbf{X}_2^H \\ &= m \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & 0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & 0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{X}_2^H \\ &= m \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{X}_2^H \\ \mathbf{X}_1^H &= m \mathbf{T} \mathbf{X}_2^H \end{aligned} \quad (2.9)$$

Zur Verdeutlichung der einfließenden Größen sei die sogenannte *homogene Transformationmatrix* \mathbf{T} nochmals dargestellt:

$$\mathbf{T} = \left(\begin{array}{ccc|c} & & & \\ & \mathbf{R} & & \mathbf{t} \\ & & & \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \quad (2.10)$$

Die Parameter in \mathbf{T} sind die Translationen t_x , t_y und t_z und, je nachdem welche Darstellung für die Rotationsmatrix gewählt wird, entweder die Kardanwinkel ω_x , ω_y , ω_z oder die Komponenten u_x , u_y , u_z des Einheitsvektors der Drehachse und der Drehwinkel φ .

In vielen Anwendungsfällen der Robotik ist der Maßstab in zwei Koordinatensystemen ident, also $m = 1$. Im Weiteren wird nur noch von homogenen Koordinaten und Transformationen ausgegangen und auf den Exponenten verzichtet. Da in der Robotik oftmals mehrere Transformationen notwendig sind, wird die Transformationmatrix \mathbf{T} mit einem Exponenten, der das

Ausgangskoordinatensystem kennzeichnet, und mit einem Index, der das Zielkoordinatensystem kennzeichnet, versehen. Damit lautet die Notation für die homogene dreidimensionale Ähnlichkeitstransformation in der Robotik:

$$\mathbf{X}_1 = \mathbf{T}_1^2 \mathbf{X}_2 \quad (2.11)$$

Die umgekehrte Transformation gelingt über die Inverse von \mathbf{T} . Es gilt:

$$\mathbf{X}_2 = \left(\mathbf{T}_1^2\right)^{-1} \mathbf{X}_1 = \mathbf{T}_2^1 \mathbf{X}_1 \quad (2.12)$$

2.3.3 Transformation mithilfe der Denavit-Hartenberg-Parameter

Die Glieder eines Roboterarmes sind starre Verbindungen, während die Gelenke beweglich sind. Die in Selig [2005] beschriebenen niedere Elementepaare nach Reuleaux stellen sechs Möglichkeiten für ein solches Gelenk dar. Das niedere Elementepaar wird immer von einem Hohl- und einem Vollkörper gleicher Gestalt gebildet. Diese können sich relativ zueinander bewegen, wobei sie sich immer an einer Kontaktfläche berühren. Die einzig möglichen Körper, die ein niederes Elementepaar bilden können, sind (Abb. 2.5): Kugeln, Zylinder, Ebenen, Schraubkörper, Rotationskörper und Translationskörper. Die letzteren beiden Elementepaare bilden Dreh- und Schubgelenke.

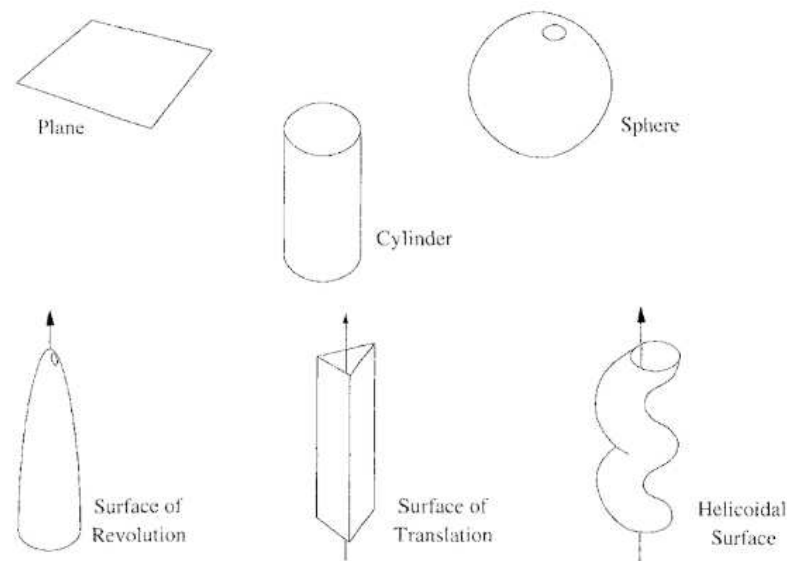


Abb. 2.5: Körper, die ein niederes Elementepaar bilden können [Selig, 2005]

In der Robotik dominieren Dreh- und Schubgelenke, da diese nur einen Freiheitsgrad besitzen und aus mechanischen Konstruktionsgründen zu bevorzugen sind [Craig, 1989]. Denavit und Hartenberg [1955] zeigen, dass zur Beschreibung der Transformation zwischen Koordinatensystemen, die jeweils ein niederes Elementepaar mit nur einem Freiheitsgrad beschreiben, vier Parameter genügen. Ob ihrer Bedeutung heißen diese vier Parameter *Denavit-und-Hartenberg-Parameter* (DH-Parameter) und sind:

- Gelenkwinkel θ_j (joint angle)
- Gliedverdrehung α_j (link twist)
- Gliedlänge a_j (link length)
- Gliedversatz d_j (link offset)

Corke [2013] zeigt in Abb. 2.6, dass

- der Gelenkwinkel θ_j der Winkel zwischen den Achsen x_{j-1} und x_j um die Achse z_{j-1} ,
- die Gliedverdrehung α_j der Winkel zwischen den Achsen z_{j-1} und z_j um die Achse x_j ,
- die Gliedlänge a_j der Abstand der Achse z_{j-1} zur Achse z_j entlang der Achse x_j und
- der Gliedversatz d_j der Abstand des Ursprungs vom Koordinatenrahmen $j - 1$ zur Achse x_j entlang der Achse z_{j-1} ist.

Die Parameter α_j und a_j sind für jedes Glied des Roboterarms konstant. Liegt ein Schubgelenk vor, ist θ_j konstant und d_j variabel, zusätzlich wird $\alpha_j = 0$. Betrachtet man ein Drehgelenk wird d_j konstant und θ_j variabel. [Corke, 2013]

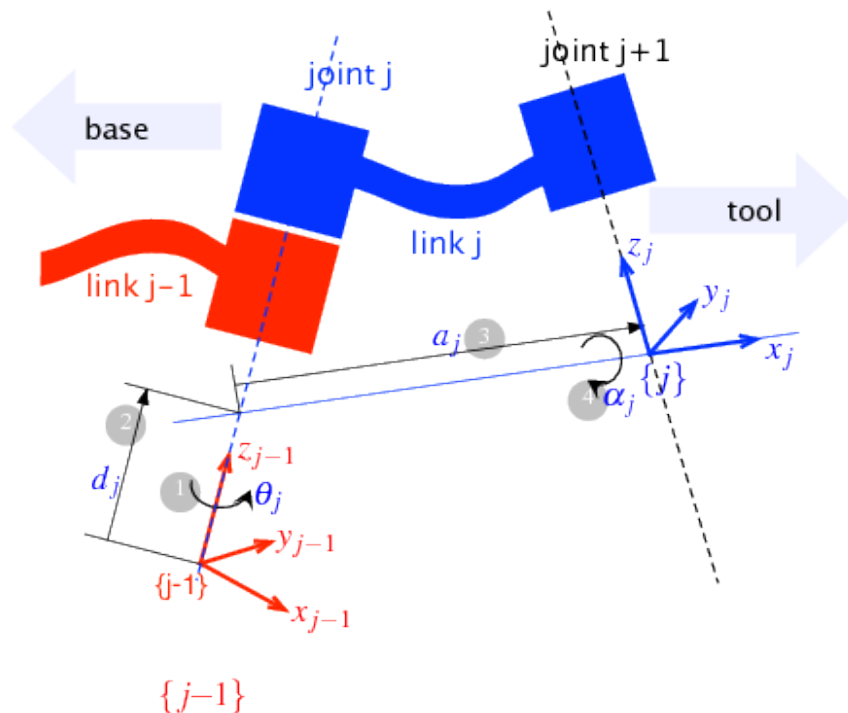


Abb. 2.6: Die DH-Parameter, gezeigt an zwei aufeinanderfolgenden Gelenken $j - 1$ und j eines Roboterarmes. Die Nummern geben die Reihenfolge der Elementardrehungen bzw. Translationen an, die zur Transformation vom Koordinatenrahmen $j - 1$ in den Koordinatenrahmen j benötigt werden. [Corke, 2013]

Die Transformation vom Koordinatenrahmen $j - 1$ in den Koordinatenrahmen j gelingt nun mithilfe der DH-Parameter, sie setzt sich aus zwei Elementardrehungen und zwei Translationen

zusammen, die Nummern 1 bis 4 in Abb. 2.6 zeigen die entsprechende Reihenfolge. Die homogene Transformationsmatrix lautet:

$$\begin{aligned}
\mathbf{T}_{j-1}^j &= \mathbf{R}_z(\theta_j) \boldsymbol{\tau}_z(d_j) \boldsymbol{\tau}_x(a_j) \mathbf{R}_x(\alpha_j) \\
&= \begin{pmatrix} \cos \theta_j & -\sin \theta_j & 0 & 0 \\ \sin \theta_j & \cos \theta_j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a_j \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_j & -\sin \alpha_j & 0 \\ 0 & \sin \alpha_j & \cos \alpha_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} \cos \theta_j & -\sin \theta_j \cos \alpha_j & \sin \theta_j \sin \alpha_j & a_j \cos \theta_j \\ \sin \theta_j & \cos \theta_j \cos \alpha_j & -\cos \theta_j \sin \alpha_j & a_j \sin \theta_j \\ 0 & \sin \alpha_j & \cos \alpha_j & d_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{2.13}
\end{aligned}$$

2.3.4 Transformation nach Hayati und Mirmirani

Im Falle von parallelen Rotationsachsen zweier oder mehrerer Gelenke ist die gemeinsame Normale nicht definiert. Hayati und Mirmirani [1985] führen daher eine weitere Winkelgröße β_j statt dem Gliedversatz d_j ein. β_j ist definiert als Winkel zwischen den Achsen z_{j-1} und z_j um die Achse y_j . Die Transformation vom Koordinatenrahmen $j-1$ in den Koordinatenrahmen j gelingt nun mit drei Elementardrehungen und einer Translation:

$$\begin{aligned}
\mathbf{T}_{j-1}^j &= \mathbf{R}_z(\theta_j) \boldsymbol{\tau}_x(a_j) \mathbf{R}_x(\alpha_j) \mathbf{R}_y(\beta_j) = \\
&= \begin{pmatrix} \cos \theta_j \cos \beta_j - \sin \theta_j \sin \alpha_j \sin \beta_j & -\sin \theta_j \cos \alpha_j & \cos \theta_j \sin \beta_j + \sin \theta_j \sin \alpha_j \cos \beta_j & a_j \cos \theta_j \\ \sin \theta_j \cos \beta_j + \cos \theta_j \sin \alpha_j \sin \beta_j & \cos \theta_j \cos \alpha_j & \sin \theta_j \sin \beta_j - \cos \theta_j \sin \alpha_j \cos \beta_j & a_j \sin \theta_j \\ -\cos \alpha_j \sin \beta_j & \sin \alpha_j & \cos \alpha_j \cos \beta_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{2.14}
\end{aligned}$$

(2.14) gilt in dieser Form nur für Drehgelenke.

2.4 Kinematik

Die Kinematik befasst sich mit der Beschreibung der Bewegung von Punkten oder starren Körpern. Lage, Geschwindigkeit und Beschleunigung charakterisieren solch eine Bewegung. Die Ursache der Bewegung, also die Kräfte, und die Frage nach der Beschreibung des Körpers werden in der Kinematik außer Acht gelassen und fallen in den Bereich der Dynamik [Craig, 1989].

Im Folgenden wird die Kinematik eines Roboterarmes durch die Position und Orientierung seiner Gelenke und Glieder in statischen Zuständen beschrieben.

2.4.1 Vorwärtskinematik

Die Vorwärtskinematik beschäftigt sich mit der Beschreibung von Position und Orientierung des Endeffektors bzw. des Endeffektorrahmens im Basis-Koordinatensystem. Falls kein Endeffektor montiert ist, wird die Position und Orientierung des letzten Gliedes, dem sogenannten Roboterflansch, gesucht. Voraussetzung dafür ist das Bekanntsein der DH-Parameter für den gesamten Roboterarm. Das sind einerseits die momentanen Winkel- bzw. Längenwerte der Dreh- und Schubgelenke und andererseits konstruktive (also durch die Bauweise des Roboterarmes vorgegebene) Werte und können dem Handbuch entnommen werden.

Die Vorwärtskinematik besteht aus einer Reihe von Transformationen, der Basisrahmen ist das Ausgangssystem und der Endeffektorrahmen das Zielsystem. Mithilfe der homogenen Transformationsmatrizen lässt sich die Vorwärtskinematik als Produkt einzelner Transformationen beschreiben:

$$\mathbf{T}_0^n = \prod_{i=1}^n \mathbf{T}_{i-1}^i, \quad (2.15)$$

wobei der Koordinatenrahmen 0 dem Basisrahmen und der Koordinatenrahmen n dem Endeffektorrahmen entspricht. Alle anderen Koordinatenrahmen $1, \dots, n-1$ sind Glied-Koordinatenrahmen.

Die meisten Roboterarme haben sechs Gelenke, also $n = 7$. Da die Position und Orientierung des Endeffektors als Zielgrößen gelten, wird die Transformation vom letzten Gelenk zum Endeffektor herausgehoben und die Transformationen von der Basis bis zum letzten Gelenk werden zusammengefasst (E für Endeffektorrahmen):

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_0^E &= \mathbf{T}_0^6 \mathbf{T}_6^E \quad \text{mit} \\ \mathbf{T}_0^6 &= \mathbf{T}_0^1 \mathbf{T}_1^2 \mathbf{T}_2^3 \mathbf{T}_3^4 \mathbf{T}_4^5 \mathbf{T}_5^6 \end{aligned} \quad (2.16)$$

In vielen Anwendungsfällen entspricht die Transformation \mathbf{T}_6^E einer Translation, da die Achsen des Endeffektorrahmens parallel zu den Achsen des letzten Glied-Koordinatenrahmens gewählt werden.

Soll der Endeffektorrahmen in einem Weltraum (W) gefunden werden, beispielsweise um die vom Roboterarm angesteuerte Position mit der von einer externen Messtechnik bestimmten Position zu vergleichen, gelingt dies durch die Einführung einer weiteren Transformation in (2.16):

$$\mathbf{T}_W^E = \mathbf{T}_W^0 \mathbf{T}_0^6 \mathbf{T}_6^E \quad (2.17)$$

2.4.2 Inverse Kinematik

Bei der Arbeit mit Roboterarmen taucht oft das gegenteilige Problem der Vorwärtskinematik auf. Es wird eine Position des Endeffektors im Raum vorgegeben und die Winkel- bzw. Längenwerte der Dreh- bzw. Schubgelenke sollen gefunden werden. Mit dieser Aufgabenstellung beschäftigt sich die inverse Kinematik. Nach Corke [2013] ist die inverse Kinematik im Allgemeinen nicht eindeutig. Zusätzlich kann je nach Bauweise des Roboterarmes nicht immer eine geschlossene Lösung für die inverse Kinematik gefunden werden und es muss auf eine numerische Lösung

übergegangen werden. Die Bedingung für eine geschlossene Lösung ist, dass der Roboterarm sechs Gelenke hat und sich die letzten drei Gelenksachsen in einem Punkt schneiden.

Ein Roboterarm kann eine vorgegebene Position im Raum durch verschiedene Armstellungen erreichen. Daher muss bei einer Lösung für die inverse Kinematik die Armstellung angegeben werden. Dazu wird der Roboterarm mit dem menschlichen Arm verglichen. Der Unterschied ist, dass der Roboterarm Gelenke mit nur einer Drehachse hat, die allerdings kaum Begrenzungen aufweisen. So wird zum Beispiel die Schulter oder das Handgelenk durch mehrere Robotergelenke abgebildet. Für die inverse Kinematik unterscheidet man folgende Armstellungen: links- oder rechtshändig, Ellenbogen oben oder unten (in Bezug auf die Schulter) und umgedrehtes oder nicht umgedrehtes Handgelenk. Daraus ergeben sich theoretisch acht Armstellung, wobei, je nach gewünschter Position im Raum, nicht immer alle möglich sind.

Die geschlossene und numerische Lösung wird hier nicht weiter behandelt, sie kann bei Corke [2013], Craig [1989] oder Selig [2005] gefunden werden.

2.5 Kalibrierung

2.5.1 Überblick

Hollerbach et al. [2008] verschaffen einen guten Überblick über die Roboterarm-Kalibrierung (Abb. 2.7). Sie unterscheiden zwischen parametrischen und nicht-parametrischen Modellen, fokussieren sich auf Ersteres und differenzieren dabei zwischen kinematischen Parametern und Trägheitsparametern. Bei der Parameterbestimmung wird auf die meist notwendige Linearisierung und auf Probleme mit unzureichenden Daten bzw. nicht bestimmbar Parametern hingewiesen. Die parametrische Kalibrierung wird von Hollerbach et al. [2008] außerdem in zwei wesentliche Kategorien unterteilt: Die Open-Loop-Kalibrierung und die Closed-Loop-Kalibrierung. Bei der Open-Loop-Kalibrierung wird eine externe Messtechnik zur Bestimmung der Pose genutzt, bei der Closed-Loop-Kalibrierung werden Bedingungen für die Pose verwendet, die sich aus physikalischen Gründen ergeben. Beide Ansätze können weiter unterschieden werden, je nachdem wie viele der sechs Komponenten der Pose durch die Messtechnik bzw. die Bedingung bestimmt werden.

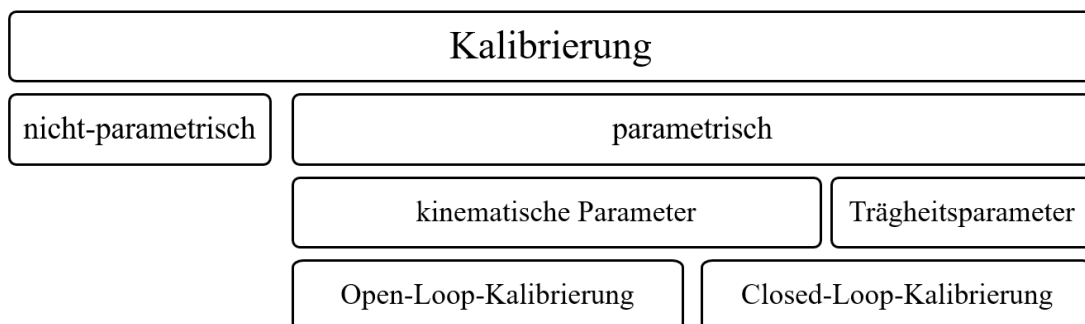


Abb. 2.7: Die von Hollerbach et al. [2008] beschriebene Gliederung von Roboterarm-Kalibrierungen

2.5.2 Stand der Technik

Ein Beispiel für eine Open-Loop-Kalibrierung ist bei Nubiola und Bonev [2013] zu finden. In ihrer Veröffentlichung wird an einem ABB-Roboterarm eine Platte montiert, an der acht Kugelreflektoren angebracht werden können, deren Position durch einen Lasertracker bestimmt werden. Die Messungen erfolgen vollautomatisch und es wird ein dynamisches Kalibrierungsmodell verwendet. Über einen Beobachtbarkeitsindex werden aus 1000 sogenannten Konfigurationen (Pose und zugehörige Armstellung) die besten 52 für die Kalibrierung ausgewählt, die restlichen dienen zur Validierung. Die Parameterbestimmung erfolgt in einem iterativen Kleinste-Quadrate-Ausgleich. Nubiola und Bonev [2013] empfehlen, den Roboterarm nur dann mit mehreren Kugelreflektoren zu kalibrieren, wenn später mehrere Endeffektoren verwendet werden oder dieser noch nicht bekannt ist. Wird hingegen ein bekannter Endeffektor verwendet, sollte dessen Referenzpunkt zur Lasertrackermessung und damit nur eine Position zur Kalibrierung herangezogen werden.

In einer weiteren Publikation nutzen Nubiola und Bonev [2014] ein Kreisformmessgerät (präzises Distanzmessgerät mit magnetischen Kugeln als Endpunkte), um einen Fanuc-Roboterarm zu kalibrieren. Zur Kalibrierung werden zwei dreieckige Platten mit magnetischen Nestern in den Ecken verwendet, eine montiert als Endeffektor, die andere wird neben der Basis des Roboterarms starr mit der Bodenplatte verbunden. Pro Konfiguration werden sechs Distanzmessungen mit dem Kreisformmessgerät durchgeführt. Durch die Montage der Platten wird die Kalibrierung in einem sehr kleinen Messbereich des Roboterarms ausgeführt. Eine weitere Herausforderung ist der extrem kleine Messbereich des Kreisformmessgeräts. Mithilfe eines Lasertrackers werden Validierungsmessungen und auch eine Kalibrierung durchgeführt. Die Kalibrierung mit dem Lasertracker erzielt bessere Genauigkeitswerte als die mit dem Kreisformmessgerät. Nubiola und Bonev [2014] stellen aber fest, dass die Kalibrierung mit dem Kreisformmessgerät eine in Relation sehr günstige und funktionierende Methode ist.

Filion et al. [2018] führen eine Open-Loop-Kalibrierung mit einem photogrammetrischen System als externe Messtechnik durch, bei der für einen Fanuc-Roboterarm ein dynamisches Kalibrierungsmodell angebracht wird. Neben dem Endeffektor, der aus einer dreieckigen Platte mit ebenen punktförmigen Reflektoren in den Ecken besteht, benötigt das photogrammetrische System außerdem zwei Referenzmaßstäbe und einen Referenzrahmen, die im Raum fixiert werden. Für jede der 34 Konfiguration, die zur Kalibrierung genutzt werden, werden mehrere Bilder mit einer von Hand geführten Kamera aufgenommen, daraus ein 3D-Modell berechnet und die Messpunkte der Platte extrahiert. Die Parameterbestimmung erfolgt in einer Kleinste-Quadrate-Ausgleichung. Es werden 40 Parameter bestimmt, allerdings sind 15 davon nicht dem Roboterarm zugeordnet, sondern dienen zur Bestimmung eines übergeordneten Rahmens sowie der Translationen vom Flansch zu den drei Reflektoren. Die Validierung der Kalibrierung erfolgt über einen Lasertracker, dazu werden die ebenen Reflektoren durch Kugelreflektoren ersetzt und im gesamten Arbeitsbereich in 1000 Posen gemessen. Filion et al. [2018] führen außerdem eine weitere Kalibrierung mit dem Lasertracker durch, die nicht näher erläutert wird. Sie stellen dabei fest, dass diese Methode genauer, jedoch kostenintensiver ist als jene mit dem photogrammetrischen System.

Eine Closed-Loop-Kalibrierung kann bei Joubair und Bonev [2015a] gefunden werden. Sie nutzen drei enorm glatte Kugeln (Oberflächenbestimmung im Zehntel-Mikrometerbereich), die dreieckig auf einer schwenkbaren Platte montiert werden, um einen Fanuc-Roboterarm zu kalibrieren. Der Radius der Kugeln ist höchst präzise bekannt und die Distanz zwischen den Kugeln wird mit einer Koordinatenmessmaschine bestimmt. Es wird ein geometrisches Kalibrierungsmodell genutzt, das zuvor mit einer Simulation auf seine Funktionalität überprüft wird. Als Endeffektor ist eine Tastspitze montiert, das Abtasten der Kugeln erfolgt vollautomatisch. Jede Kugel wird 15 Mal abgetastet, aus je acht zufällig ausgewählten Abtastungen wird 30 Mal eine Kugel genähert und deren Zentrum und Radius bestimmt. Zur Kalibrierung wird außerdem eine weitere Orientierung der Platte genutzt. Joubair und Bonev [2015a] geben keinen Einblick, wie diese Messungen und damit die Bedingungen in die Ausgleichung eingeführt werden. Zur Validierung werden Messungen in drei weiteren Orientierungen der Platte durchgeführt. Die daraus bestimmten Radien und Abstände der Kugeln werden mit dem Soll verglichen. Dieser Kalibrierungsansatz ist sehr kleinräumig, auch die Validierung erfolgt nur im kalibrierten Bereich des Roboterarmes.

Joubair und Bonev [2015b] liefern ein weiteres Beispiel für eine Closed-Loop-Kalibrierung. Als Geometrie wird ein Quader aus Granit genutzt, durch den vier orthogonale Ebenen definiert werden. Eine Tastspitze als Endeffektor an einem Fanuc-Roboterarm misst vollautomatisch 100 Punkte pro Ebene, von denen zwei Drittel zur Parameterbestimmung sowohl eines geometrischen als auch eines dynamischen Modells genutzt werden. Die Handhabung der Messungen in der Ausgleichung wird etwas detaillierter angegeben, der Ansatz ist jedoch auch nicht reproduzierbar. Es ist beispielsweise nicht ersichtlich, wie und ob überhaupt die Orthogonalität der Ebenen als Bedingung genutzt wird oder nur die Ebenen selbst als Bedingungen eingeführt werden. Bevor die tatsächliche Kalibrierung durchgeführt wird, werden anhand einer Simulation die verwendeten Modelle bestätigt. Die Validierung erfolgt einerseits über die nicht zur Kalibrierung verwendeten gemessenen Punkte auf der Ebene und andererseits über die bei Joubair und Bonev [2015a] verwendeten Kugeln. Die Unterschiede zwischen dem geometrischen und dem dynamischen Modell zeigen sich nur bei letzterer Validierungsmethode. Auch diese Kalibrierung erfolgt in einem sehr kleinen Arbeitsbereich, ob die Validierung mit den Kugeln im gleichen oder in einem anderen Arbeitsbereich stattfindet, ist nicht ersichtlich. Joubair und Bonev [2015b] argumentieren, dass in der Industrie oft nur kleine Arbeitsbereiche nötig sind.

Auch Dupuis et al. [2017] führen eine Closed-Loop-Kalibrierung durch. Sie verwenden einen Längsmaßstab mit drei konischen Bohrungen, deren Abstand hoch präzise bekannt ist. Die Kalibrierung erfolgt für einen Romer-Roboterarm, dies ist ein mit sieben Gelenken ausgestatteter und damit redundanter Koordinatenmessarm, während die oben genannten Roboterarme Industrieroboterarme mit sechs Gelenken sind. Zur Kalibrierung wird der Längsmaßstab im Messbereich des Roboterarmes unterschiedlich positioniert und orientiert. Das Abtasten der Bohrungen erfolgt manuell mit einer Kugeltastspitze als Endeffektor mehrmals in unterschiedlichen Armstellungen. Diese Messungen dienen als tatsächliche Beobachtungen, die Distanzbedingungen werden hingegen als Pseudo-Beobachtungen in die Ausgleichung eingeführt. Dupuis et al. [2017] geben auch die Überführung des Gauß-Markov-Modells in ein Gauß-Helmert-Modell nachvollziehbar

an. Außerdem wird eine Simulation zur Verifikation des Ausgleichungsansatzes durchgeführt. Die Validierung der Kalibrierung erfolgt mittels zwei standardisierter Tests. Dupuis et al. [2017] stellen weiter fest, dass eine Kalibrierung in einem Quadranten des Messbereiches gleich genaue Parameter wie die Kalibrierung im gesamten Messbereich liefert.

Die oben angeführten Publikationen, die sich mit unterschiedlichsten Kalibrierungsansätzen beschäftigen, sind in Tab. 2.1 zusammengefasst. Es soll sich dabei nur um einen groben Überblick handeln und die Vergleichbarkeit fördern.

Aus den oben erwähnten Publikationen ist ersichtlich, dass die Auswahl einer geeigneten externen Messtechnik bzw. einer Referenzgeometrie ein entscheidender Faktor der Kalibrierung ist. So untersuchen Piratelli-Filho und Lesnau [2010] in ihrer Publikation eine semi-virtuelle Referenzgeometrie. An einem Längsmaßstab mit einem quadratischen Querschnitt werden an beiden Enden vier Bohrungen angebracht, die dann mit einer Kugeltastspitze abgetastet werden. Aus je vier zusammengehörigen Messungen wird je eine virtuelle Kugel sowie deren Zentrum und Radius berechnet. Zwischen den Zentren der virtuellen Kugeln kann somit die Distanz gefunden werden. Der Längsmaßstab hat zusätzlich zwei reelle Kugeln an den Enden, die ebenso abgetastet werden und zum Vergleich dienen. Der Vergleich der reellen und semi-virtuellen Geometrie erfolgt über einen standardisierten Test (ASME B89), dessen Voraussetzungen allerdings nicht vollständig erfüllt werden. Piratelli-Filho und Lesnau [2010] stellen fest, dass die semi-virtuelle Geometrie günstiger und weniger fehleranfällig als die reelle Geometrie ist, da das Abtasten der Bohrungen besser als das Abtasten der Kugel bewerkstelligt werden kann.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgen Piratelli-Filho et al. [2012], die ebenso mit virtuellen Kugeln, bestimmt aus vier nicht-koplanaren konischen Bohrungen, arbeiten. Allerdings werden diese Bohrungen auf pyramidenförmigen Aluminiumblöcken angebracht und diese Blöcke in einem 4x4 Raster auf einer Platte angeordnet, somit ergeben sich 16 virtuelle Kugeln. Die Platte wird mit einer Koordinatenmessmaschine kalibriert und danach an drei Positionen im Raum mit unterschiedlicher Orientierung von einem Robotermessarm erfasst, um standardisierte Tests (ASME B89) durchzuführen. Ebenso werden mit einem Längsmaßstab mit zwei reellen Kugeln an seinen Enden diese Tests ausgeführt. Piratelli-Filho et al. [2012] schließen aus den Ergebnissen, dass die Platte zur Kalibrierung des verwendeten Robotermessarmes ausreicht, für genauere Modelle jedoch Verbesserungen stattfinden müssen.

In der Literatur lassen sich auch Ansätze finden, die den nicht-parametrischen Modellen zuzuordnen sind. Ein Beispiel liefern Horvath und Neuner [2019], die zwar keine Kalibrierung durchführen, aber anhand von künstlichen neuronalen Netzen und eines erweiterten Kalman Filter eine Systembestimmung durchführen. Ein künstliches neuronales Netz besteht aus Eingangs- und Ausgangsgrößen, die über versteckte Ebenen miteinander verbunden sind. Diese Ebenen bestehen aus Knoten, die zueinander und zwischen den Ebenen über Gewichtungsfaktoren verbunden sind. Die Gewichtungsfaktoren werden in einem Trainingsprozess über das erweiterte Kalman Filter optimiert. Horvath und Neuner [2019] beweisen, dass das erweiterte Kalman Filter mit einigen Vereinfachungen den bisherigen Ansätzen entspricht, die mit der sogenannten Levenberg-Marquardt-Methode arbeiten. Der Vorteil des erweiterten Kalman Filter gegenüber der Levenberg-Marquardt-Methode ist, dass die Stochastik der Eingangsdaten zur Optimierung

Roboterarm ¹	Quelle	Modell ^{2,3,4}	Messmittel	Genauigkeit ⁵ [mm]	Bestimmung/Bedingung
ABB IRB 1600 ($f = 6$)	Nubiola und Bonev [2013]	OL, dyn, 29	Faro Lasertracker	0.364/0.130/0.696 ^a	Pose aus je drei Messpunkten
Fanuc LR Mate 200iC ($f = 6$)	Nubiola und Bonev [2014]	OL, dyn, 25	Renishaw Kreisformmessgerät	0.796/0.275/1.630 ^a	Pose aus je sechs Distanzmessungen
Fanuc LR Mate 200iC ($f = 6$)	Filion et al. [2018]	OL, dyn, 31	Creaform fotogr. System	0.197/0.091/0.619 ^a	Position von Modellpunkten
Fanuc LR Mate 200iC ($f = 6$)	Joubair und Bonev [2015a]	CL, geom, 19	Edelstahlkugeln	0.086/0.025/0.127 ^b	Distanzen zwischen drei Kugeln
Fanuc LR Mate 200iC ($f = 6$)	Joubair und Bonev [2015b]	CL, geom, 26	Granitquader	0.274/0.166/0.599 ^b 0.025/0.018/0.080 ^c	Messpunkte auf vier Ebenen
Fanuc LR Mate 200iC ($f = 6$)	Joubair und Bonev [2015b]	CL, dyn, 30	Granitquader	0.153/0.067/0.274 ^b 0.025/0.018/0.076 ^c	Messpunkte auf vier Ebenen
Romer Infinite 2.0 ($f = 7$)	Dupuis et al. [2017]	CL, geom, 23	Längsmaßstab	0.056/0.084 ^d	Messpunkte auf Linien

¹ f repräsentiert den Freiheitsgrad des Roboterarmes und entspricht der Anzahl seiner Gelenke.

² OL steht für Open-Loop-Kalibrierung, CL für Closed-Loop-Kalibrierung.

³ Beim geometrischen Modell werden die DH-Parameter für alle Glieder und Gelenke kalibriert, beim dynamischen Modell werden zusätzliche Parameter für die Steifigkeit der Gelenke und Glieder eingeführt. Unabhängig davon werden bei manchen Modellen noch weitere Parameter für andere Koordinatenrahmen (Endeffektor- oder Welt-rahmen) kalibriert.

⁴ Die Zahl gibt die Anzahl der bestimmbareren Kalibrierparameter an.

⁵ Erzielte Genauigkeit nach der Kalibrierung.

^a Differenz zwischen der Positionsmessung eines Lasertrackers und der aus den Gelenkwinkel berechneten Position des Roboterarmes (Mittelwert/ Standardabweichung/Maximalwert).

^b Differenz zwischen einer Soll-Distanz und einer aus Messungen des Roboterarmes berechneten Distanz zwischen Kugelzentren (Mittelwert/ Standardabweichung/Maximalwert).

^c Normalabstand von einem vom Roboterarm gemessenen Punkt zur berechneten Ebene (Mittelwert/ Standardabweichung/Maximalwert).

^d Doppelte Standardabweichung nach einem SPAT-Test (single point articulation performance test, ASME B89.4.22) bzw. nach einem standardisierten volumetrischen Test (VDI/VDE 6217 Teil 9).

Tab. 2.1: Vergleich von Kalibrierungsansätzen

der Gewichtungsfaktoren genutzt werden kann. Anhand einer Simulation wird gezeigt, dass die Verwendung des erweiterten Kalman Filter den Optimierungsprozess beschleunigt. In einem experimentellen Versuch wird bestätigt, dass das gefundene System einen Roboterarm beschreiben kann, jedoch kann die Herstellerwiederholgenauigkeit nicht erreicht werden, was Horvath und Neuner [2019] auf das fortgeschrittene Alter des untersuchten Roboterarms zurückführen.

2.5.3 Auswahl der Kalibrierungsmethode

Wie in Kap. 2.5 gezeigt, gibt es eine Vielzahl an Methoden, um eine Kalibrierung eines Roboterarmes durchzuführen. Die Entscheidung, ob eine Open-Loop- oder eine Closed-Loop-Kalibrierung durchgeführt wird, ist stark abhängig vom ausgewählten Messmittel, mit dem die Pose oder Teile der Pose bestimmt werden. In dieser Arbeit wird als Messmittel ein Lasertracker verwendet, da der Lasertracker ein oftmals verwendetes, funktionierendes Messmittel ist. Zusätzlich wird die Kalibrierung mittels Lasertracker des Öfteren zum Vergleich mit anderen Messmitteln herangezogen, so zum Beispiel bei Nubiola und Bonev [2014] oder Filion et al. [2018]. Bei diesen Vergleichen erzielt die Kalibrierung mit dem Lasertracker bessere Genauigkeit als die neu vorgestellte Methode und dient daher als Normal. Darüber hinaus ist ein Lasertracker mit entsprechender Bediensoftware am Institut vorhanden und ständig verfügbar. Der Lasertracker stellt eine externe Messtechnik dar, es handelt sich bei der Kalibrierung um eine Open-Loop-Kalibrierung. Der Lasertracker kann, je nachdem welcher Endeffektor verwendet wird, nur die Position oder mithilfe einer sogenannten T-Probe die komplette Pose bestimmen.

Als Kalibrierungsmodell wird sowohl ein kinematisches als auch ein dynamisches Modell gewählt. Ursprünglich war ein rein kinematisches Kalibrierungsmodell angedacht, im Zuge der Ausarbeitung dieser Arbeit stellte sich jedoch heraus, dass durch einen dynamischen Kalibrierungsansatz möglicherweise eine Verbesserung erzielt werden kann.

3 Methodik

3.1 Funktionales Modell

Als fundamentales Modell dient die Vorwärtskinematik (Kap. 2.4.1). Als Weltraum wird der durch den Lasertracker vorgegebene Koordinatenrahmen eingeführt. Der Lasertracker misst die Position eines Kugelreflektors, der mit einer Platte und einem magnetischen Nest am Roboterflansch als Endeffektor befestigt wird. Die Transformation vom Roboterflansch zum Endeffektor entspricht damit einer Translation. Die Positionsmessung des Lasertrackers steht demnach der über die Transformationen berechneten Position des Kugelreflektors gegenüber. Das funktionale Modell ergibt sich somit aus (2.17) zu

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{T}_{LT}^0 \mathbf{T}_0^6 \begin{pmatrix} x_E \\ y_E \\ z_E \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Die Parameterschätzung erfolgt mithilfe eines Gauß-Markov-Modells. Dazu müssen die Beobachtungen durch eine Funktion der Unbekannten formuliert werden können. Um dem zu entsprechen, werden die Gelenkwinkel des Roboters als Konstanten eingeführt, somit sind die Beobachtungen nur die Positionsmessungen des Lasertrackers und entsprechen der linken Seite von (3.1).

In \mathbf{T}_{LT}^0 finden sich sechs Unbekannte, drei Rotations- und drei Translationsparameter für die Transformation vom Lasertrackerrahmen zur Roboterbasis. Die Unbekannten in \mathbf{T}_0^6 sind die jeweils vier DH-Parameter pro Gelenk für den Roboterarm, wobei statt der Gelenkwinkel Nulllagenfehler eingeführt werden, da die Gelenkwinkel als konstante Parameter betrachtet werden. Auch die Translation zwischen Roboterflansch und Endeffektor gilt als unbekannt und wird im Ausgleichsverfahren geschätzt.

Folglich sind in Summe 33 Unbekannte im funktionalen Modell enthalten, diese werden im Unbekanntenvektor $\mathbf{x}_u = (\delta\theta_1, \delta\theta_2, \delta\theta_3, \delta\theta_4, \delta\theta_5, \delta\theta_6, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, x_E, y_E, z_E, r_x, r_y, r_z, t_x, t_y, t_z)^T$ zusammengefasst. Durch Näherungswerte für den Unbekanntenvektor kann der genäherte Unbekanntenvektor \mathbf{x}_0 gefunden werden. Die Parameterschätzung liefert uns den geschätzten Wert für den Unbekanntenvektor $\hat{\mathbf{x}}$, der Differenzvektor $\mathbf{x} = \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}_0$ wird als Vektor der Unbekanntenzuschläge bezeichnet.

Da in (3.1) auch nicht lineare Ausdrücke vorkommen, ist es notwendig, das funktionale Modell mithilfe einer Taylor-Entwicklung zu linearisieren. Die Reihenentwicklung wird nach den ersten Ableitungen abgebrochen, die partiellen Ableitungen nach den Unbekannten \mathbf{x}_u werden in der Modellmatrix \mathbf{A} zusammengefasst.

Die n Positionsmessungen des Lasertrackers werden in den Beobachtungsvektor $\mathbf{l}_{obs} = (x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots, x_n, y_n, z_n)^T$ zusammengefasst. Es müssen also mindestens elf Positionen gemessen werden, um die Parameter bestimmen zu können. Ebenso können mithilfe der Näherungs-

werte und der Gelenkwinkel Beobachtungen berechnet werden, sie sind im genäherten Beobachtungsvektor \mathbf{l}_0 zu finden. Die Differenz dieser beider Vektoren gibt den gekürzten Beobachtungsvektor $\mathbf{l} = \mathbf{l}_{obs} - \mathbf{l}_0$. Der Schätzwert der Beobachtungen wird mit $\hat{\mathbf{l}}$ bezeichnet und unterscheidet sich um die Verbesserungen $\mathbf{v} = \hat{\mathbf{l}} - \mathbf{l}_0$ vom genäherten Beobachtungsvektor. Damit kann (3.1) im Gauß-Markov-Modell folgendermaßen angegeben werden:

$$\mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{l} + \mathbf{v} \quad (3.2)$$

3.2 Stochastisches Modell a priori

Die Messgenauigkeiten des Lasertrackers sind der Bedienungsanleitung [Leica Geosystems, 2003] zu entnehmen und in Tab. 3.1 angeführt. Die Standardabweichung für den Nahbereich muss

Messgröße	Standardabweichung
Distanzmessung (Modus: Interferometer)	$5 \mu m$
Distanzmessung (Modus: Absolutdistanzmesser)	$12.5 \mu m$
Winkelmessung (Nahbereich, $< 2.5m$)	$12.5 \mu m$
Winkelmessung (Fernbereich, $> 2.5m$)	$1.05 ''$

Tab. 3.1: Messgenauigkeiten des Lasertrackers LTD800

mittels der Messdistanz r zu einer Winkelgröße berechnet werden:

$$\sigma_{Winkel} = \arctan \left(\frac{12.5 \cdot 10^{-6}}{r [m]} \right) \quad (3.3)$$

Der Lasertracker misst Horizontalwinkel φ , Zenitdistanz z und die Distanz r zum Zielpunkt, der damit in polaren Koordinaten im Lasertrackerrahmen gegeben ist. Die Umrechnung in kartesische Koordinaten gelingt mittels

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \sin z \cos \varphi \\ r \sin z \sin \varphi \\ r \cos z \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

In der Bediensoftware des Lasertrackers kann eingestellt werden, ob kartesische oder polare Koordinaten als Ausgangsgrößen verwendet werden. Das funktionale Modell (3.1) verlangt kartesische Messgrößen, das stochastische Modell (Tab. 3.1) ist aber nur für polare Messgrößen verfügbar. Folglich werden kartesische Messgrößen verwendet und der funktionale Zusammenhang (3.4) und die angegebenen Genauigkeiten für Winkel- und Distanzmessung in das Varianzfortpflanzungsgesetz eingeführt, um die Genauigkeiten der kartesischen Koordinaten zu ermitteln. Dazu

wird das stochastische Modell (Tab. 3.1) in der Kovarianzmatrix

$$\Sigma_{xx} = \begin{pmatrix} \sigma_r^2 & \sigma_{rz} & \sigma_{r\varphi} \\ \sigma_{zr} & \sigma_z^2 & \sigma_{z\varphi} \\ \sigma_{\varphi r} & \sigma_{\varphi z} & \sigma_\varphi^2 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

wiedergegeben, wobei keine Kovarianzen vorliegen und damit nur die Diagonale besetzt ist. Der funktionale Zusammenhang (3.4) zwischen kartesischen und polaren Größen kann zeilenweise in drei Funktionen geteilt werden. Die Ableitungen dieser Funktionen nach den Messgrößen bilden die Funktionsmatrix:

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial r} & \frac{\partial f_x}{\partial z} & \frac{\partial f_x}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial f_y}{\partial r} & \frac{\partial f_y}{\partial z} & \frac{\partial f_y}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial f_z}{\partial r} & \frac{\partial f_z}{\partial z} & \frac{\partial f_z}{\partial \varphi} \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

Die Kovarianzmatrix der fortgepflanzten (kartesischen) Größen lautet dann:

$$\Sigma_{ff} = \mathbf{F}\Sigma_{xx}\mathbf{F}^T \quad (3.7)$$

Jede Positionsmessung i des Lasertrackers liefert eine eigene Kovarianzmatrix $\Sigma_{ff}^{(i)}$. Diese Matrizen werden in der Kovarianzmatrix der Beobachtungen Σ_{ll} zusammengesfasst. Um entweder ein anderes Bezugsniveau herzustellen oder aber um die Invertierbarkeit zu gewährleisten, kann die Varianz der Gewichtseinheit a priori σ_0^2 eingeführt werden. Die Kofaktormatrix \mathbf{Q}_{ll} ergibt sich dann aus

$$\mathbf{Q}_{ll} = \frac{1}{\sigma_0^2} \Sigma_{ll} \quad (3.8)$$

Die Gewichtung der Beobachtungen erfolgt reziprok zu den Varianzen und Kovarianzen, dies wird durch Inversion der Kofaktormatrix erreicht:

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q}_{ll}^{-1} \quad (3.9)$$

3.3 Beurteilung der Parameterschätzung

Das Ausgleichungsverfahren wird an einigen wesentlichen Gesichtspunkten beurteilt:

- Globaltest
- Genauigkeiten der ausgeglichenen Parameter
- Parametertest
- Korrelationen der ausgeglichenen Parameter

3.3.1 Globaltest

Der Globaltest dient zur Überprüfung des funktionalen und stochastischen Modells. Formal entspricht der Globaltest einem F-Test, der zwei Standardabweichungen bzw. Varianzen mit-

einander vergleicht. Als zu vergleichende Größen werden einerseits die in Kap. 3.2 beschriebene Varianz der Gewichtseinheit a priori σ_0^2 und andererseits die Varianz der Gewichtseinheit a posteriori s_0^2 herangezogen. s_0^2 berechnet sich aus der gewichteten Verbesserungsquadratsumme und dem Freiheitsgrad der Ausgleichung f , der sich aus der Differenz zwischen Anzahl der Beobachtungen n und Anzahl an Unbekannten u ergibt:

$$s_0^2 = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{f} \quad \text{mit} \quad f = n - u \quad (3.10)$$

Die Hypothese des Globaltest lautet, dass die Varianz der Gewichtseinheit a posteriori gleich der Varianz der Gewichtseinheit a priori ist. Die Testgröße berechnet sich als Quotient der beiden:

$$T_G = \frac{s_0^2}{\sigma_0^2} \quad (3.11)$$

Der Globaltest wird als beidseitiger Test mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% durchgeführt. Mithilfe des Freiheitsgrades kann ein unteres und oberes Quantil gefunden werden. Ist die Testgröße kleiner als das untere Quantil, so kann davon ausgegangen werden, dass das stochastische Modell zu pessimistisch abgeschätzt wurde. Ist hingegen die Testgröße größer als das obere Quantil, dann ist entweder das stochastische Modell zu optimistisch angesetzt worden oder es liegen Fehler im funktionalen Modell vor.

3.3.2 Genauigkeiten der ausgeglichenen Parameter

Die Kovarianzmatrix der ausgeglichenen Unbekannten \mathbf{Q}_{xx} entspricht der Inversen der Normalgleichungsmatrix \mathbf{N} und wird mit der Varianz der Gewichtseinheit a posteriori s_0^2 zur empirischen Kovarianzmatrix der ausgeglichenen Unbekannten multipliziert:

$$\mathbf{C}_{xx} = s_0^2 \mathbf{Q}_{xx} = s_0^2 \mathbf{N}^{-1} \quad (3.12)$$

Die Quadratwurzeln der Diagonalelemente der empirischen Kovarianzmatrix entsprechen der Standardabweichung der kinematischen Kalibrierparameter:

$$\sigma_i = \sqrt{C_{xx}(i, i)} \quad (3.13)$$

Dabei ist auf die richtige Zuordnung entsprechend der Reihenfolge der Parameter im Unbekanntenvektor \mathbf{x} zu achten. Die Einheit der jeweiligen Standardabweichung richtet sich nach der Einheit des zugehörigen Parameters.

Als Daumenregel gilt, dass die Genauigkeit eines ausgeglichenen Parameters um mindestens eine Potenz kleiner sein soll als der Wert des ausgeglichenen Parameters. Liegen der Parameterwert und seine Genauigkeit im gleichen Größenbereich oder ist der Parameterwert kleiner als seine Genauigkeit, so könnte es sich um einen zufälligen Wert im Bereich der Genauigkeit handeln.

3.3.3 Parametertest

In der Ausgleichung werden für die Kalibrierparameter Werte geschätzt. Der Parametertest gibt an, ob sich dieser Parameterwert signifikant vom Nominalwert unterscheidet oder ein eventueller Werteunterschied als zufällig betrachtet werden kann. Die Hypothese lautet, dass der ausgeglichene Wert eines Kalibrierparameters \hat{x}_i unter Beachtung seiner Genauigkeit σ_i gleich seinem Nominalwert \tilde{x}_i ist. Kann die Hypothese verworfen werden, so kann von einer signifikanten Änderung gesprochen werden. Die Testgröße errechnet sich wie folgt:

$$T_P = \frac{\hat{x}_i - \tilde{x}_i}{\sigma_i} \quad (3.14)$$

Die Testgröße T_P folgt der Student-Verteilung mit dem Freiheitsgrad der Ausgleichung f , der in die Genauigkeit des Parameters einfließt. Der Test erfolgt zweiseitig mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%, die entsprechende Quantile können gefunden werden. Liegt die Testgröße außerhalb des von den Quantilen vorgegebenen Intervalls, so kann von Signifikanz, d.h. einer signifikanten Änderung des Parameterwertes, gesprochen werden.

3.3.4 Korrelationen der ausgeglichenen Parameter

Der Korrelationskoeffizient ρ stellt ein dimensionsloses Maß dar, sodass Kovarianzen unabhängig von ihrer Einheit verglichen werden können. Die betrachtete Kovarianz zwischen zwei Parametern wird mittels der zugehörigen Standardabweichungen normiert:

$$\rho_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sigma_i \sigma_j} \quad (3.15)$$

Der Wert für den Korrelationskoeffizient kommt zwischen -1 und 1 zu liegen. Ein Wert an den Enden dieses Intervalls bedeutet hohe Korrelation der betrachteten Parameter und damit hohe gegenseitige Beeinflussung. Ein Wert nahe 0 bedeutet wenig Korrelation und lässt auf eine gute Trennbarkeit der Parameterschätzung schließen.

Der Korrelationskoeffizient kann zwischen allen in der Ausgleichung bestimmten Parametern gebildet werden. Die Korrelationsmatrix

$$\mathbf{R}_{xx} = \begin{pmatrix} 1 & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1u} \\ \rho_{21} & 1 & \cdots & \rho_{2u} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{u1} & \rho_{u2} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

fasst die Korrelationskoeffizienten aller Parameter zusammen, wobei u die Anzahl der Unbekannten ist.

3.4 Regularität, Singularitäten, Singulärwertzerlegung

Im Gauß-Markov-Modell kann die Lösung für die Unbekanntenzuschläge explizit angegeben werden:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} \\ &= \mathbf{N}^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} \end{aligned} \quad (3.17)$$

(3.17) fordert aber, dass die Normalgleichungsmatrix \mathbf{N} regulär, das heißt invertierbar ist. Eine quadratische Matrix ist dann regulär, wenn ihr Rang der Anzahl an Spalten bzw. Zeilen entspricht, das heißt wenn die Matrix vollen Rang hat. Regularität lässt sich auch anhand von Eigenwerten und der Determinante feststellen: Eine quadratische Matrix ist regulär, wenn ihre Determinante ungleich Null oder keiner ihrer Eigenwerte gleich Null ist.

Der Rang einer rechteckigen Matrix kann maximal der kleineren Anzahl an Spalten oder Zeilen entsprechen. Im Falle der Matrix \mathbf{A} ist die Spaltenanzahl sicher immer kleiner oder gleich der Zeilenanzahl, da sonst die Lösbarkeit des Gleichungssystems verloren geht. Entspricht der Rang der Matrix \mathbf{A} nicht ihrer Spaltenanzahl, so hat auch \mathbf{N} nicht vollen Rang, ist damit singular und verliert seine Invertierbarkeit. Ist dies der Fall, so gibt es voneinander linear abhängige Zeilen- bzw. Spaltenvektoren in \mathbf{A} . Da in der Matrix \mathbf{A} die partiellen Ableitungen des funktionalen Modells nach den Unbekannten zu finden sind, korrespondieren die Spaltenvektoren mit den zu bestimmenden kinematischen Parametern. Demnach gibt es voneinander linear abhängige Parameter. Dies ist ein wohl bekanntes Problem in der Robotik und rührt daher, dass sich die Koordinatenrahmen, die die Gelenke eines Roboterarms beschreiben, oft ähnlich sind, manche der Koordinatenachsen sind parallel oder nahezu parallel.

Hollerbach et al. [2008] beschreiben zwei Möglichkeiten, um mit Singularitäten im Gleichungssystem umzugehen: Entweder es wird ein minimale Menge an Parametern gefunden, die das System physikalisch sinnvoll beschreiben oder die Parameter werden so berechnet, dass sie den Eingangsdaten, also den Beobachtungen, möglichst gut entsprechen. Bei Ersterem müssen unumgängliche Parameter aus der Parameterschätzung entfernt werden, bei Letzterem handelt es sich um einen Approximationsansatz, bei dem die physikalische Bedeutung verloren gehen kann. Da in dieser Arbeit bei der Parameterschätzung die kinematischen Kalibrierparameter bestimmt werden, ist die physikalische Bedeutung äußerst wichtig und darf auf keinen Fall verloren gehen. Der Fokus wird daher auf die Elimination von Parametern aus der Schätzung gelegt. Das Entfernen von Parametern entspricht einem Konstantsetzen des Kalibrierparameter auf ihren Nominalwert.

Auch in der Literatur lassen sich zahlreiche Ansätze mit Parameterelimination finden, so zum Beispiel bei Dupuis et al. [2017]; Filion et al. [2018]; Joubair und Bonev [2015a,b]; Nubiola und Bonev [2013, 2014]. Allerdings verwenden die Autoren unterschiedliche mathematische Werkzeuge, um die zu entfernenden Parameter zu identifizieren. Während Dupuis et al. [2017] eine Singulärwertzerlegung nutzen, bestimmen Joubair und Bonev [2015a,b] mithilfe der Konditionszahl die linear abhängigen Parameter. In Filion et al. [2018] und Nubiola und Bonev [2013,

2014] wird die Vorgehensweise zur Parameteridentifikation nicht näher beschrieben.

Hollerbach et al. [2008] schlagen zur Bestimmung der linear abhängigen Parameter eine Singulärwertzerlegung oder eine QR-Zerlegung vor. Bei der Singulärwertzerlegung wird eine Matrix $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ so zerlegt, dass gilt:

$$\mathbf{M} = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T = \sum_{i=1}^n \mathbf{u}_i \mu_i \mathbf{v}_i^T \quad (3.18)$$

Dabei sind nach Hansen [1997] $\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ und $\mathbf{V} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ orthogonale Matrizen, während $\mathbf{S} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ eine rechteckige Diagonalmatrix ist. \mathbf{S} hat die nicht negative Diagonalelemente $(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$, die Singulärwerte genannt werden und nicht ansteigend sortiert sind, sodass $\mu_1 \geq \mu_2 \geq \dots \geq \mu_n \geq 0$. Die Spaltenvektoren $(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_m)$ von \mathbf{U} werden linke Singulärvektoren genannt und entsprechen den Eigenvektoren des Produktes $\mathbf{M} \mathbf{M}^T$. Die Spaltenvektoren $(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n)$ von \mathbf{V} werden rechte Singulärvektoren genannt und sind die Eigenvektoren des Produktes $\mathbf{M}^T \mathbf{M}$. Die quadrierten Singulärwerte entsprechen außerdem den Eigenwerten von $\mathbf{M}^T \mathbf{M}$ bzw. den n -größten Eigenwerten von $\mathbf{M} \mathbf{M}^T$.

Da die Singulärwertzerlegung genutzt werden soll, um voneinander linear abhängige Parameter im funktionalen Modell zu finden, wird sie auf die Modellmatrix \mathbf{A} in (3.2) angewandt:

$$\sum_{i=1}^n \mathbf{u}_i \mu_i \mathbf{v}_i^T \mathbf{x} = \mathbf{l} + \mathbf{v} \quad (3.19)$$

Betrachtet man die Summe in (3.19), so kann man μ_i und $\mathbf{v}_i^T \mathbf{x}$ in der Summe nach vorne stellen, da sie Skalare sind. Gibt man das Skalarprodukt $\mathbf{v}_i^T \mathbf{x}$ komponentenweise an, so lässt sich eindeutig erkennen, dass die einzelnen Einträge in jedem rechten Singulärvektor den Einfluss eines einzelnen Parameters zum zugehörigen Singulärwert regeln:

$$\sum_{i=1}^n \mu_i (\mathbf{v}_i^T \mathbf{x}) \mathbf{u}_i = \sum_{i=1}^n \mu_i (v_{i,1}^T x_1 + v_{i,2}^T x_2 + \dots + v_{i,n}^T x_n) \mathbf{u}_i \quad (3.20)$$

Weiters stellt Hansen [1997] fest, dass, wenn es einen zum größten Singulärwert μ_1 vergleichsweise sehr kleinen Singulärwert μ_i gibt, eine Linearkombination der Spalten in \mathbf{A} (und somit eine lineare Abhängigkeit der Parameter) vorliegt, die durch die Elemente im zugehörigen rechten Singulärvektor \mathbf{v}_i angezeigt werden.

3.5 Dynamisches Kalibrierungsmodell

Nach Corke [2013] wirken auf die Gelenke eines bewegten Roboterarmes eine Summe aus Kräften. Diese Kräfte sind Trägheit, Coriolis-Kraft, Fliehkraft, Schwerkraft oder auch Reibung. Da der Roboterarm nur für statische Messungen verwendet wird, kann auf alle Kräfte, die von Geschwindigkeit und Beschleunigung abhängig sind, verzichtet werden. Es genügt, die Wirkung der Schwerkraft auf den Roboterarm zu modellieren. Dazu werden zusätzliche Parameter für die Steifigkeit der Gelenke bzw. der dort verbauten Getriebe eingeführt. Wie auch in Filion et al.

[2018]; Joubair und Bonev [2015b]; Nubiola und Bonev [2013, 2014] zu finden, wird jedes Getriebe als Drehfeder mit einem Steifigkeitsparameter λ betrachtet. Der Steifigkeitsparameter λ kann nach Böge [2009] mittels

$$\delta\vartheta = \lambda\tau \quad (3.21)$$

zu einer Winkelgröße berechnet werden. τ ist dabei das Drehmoment, das auf das jeweilige Gelenk wirkt. Eine Besonderheit stellt das erste Gelenk dar. Da die Drehachse dieses Gelenks genau entgegen der Schwerkraft gerichtet ist, berechnet sich das Drehmoment zu 0. Deshalb wird für das erste Gelenk auch kein Steifigkeitsparameter eingeführt. Die Anzahl der Unbekannten im dynamischen Kalibrierungsmodell erhöht sich auf 38, der in Kap. 3.1 angegebene Unbekanntenvektor \mathbf{x}_u wird um $(\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6)^T$ erweitert.

Das Drehmoment muss für jede Armstellung des Roboters für jedes Gelenk berechnet werden, nur so kann $\delta\vartheta$ in das Ausgleichungsmodell eingeführt werden. Dazu muss in einem ersten Schritt die Schwerkraft, die durch jedes Glied des Roboterarmes entsteht, berechnet werden. Eine Kraft ist das Produkt aus Masse und Beschleunigung. Deshalb wird die Masse des Roboterarmes und Information über deren Verteilung benötigt. Bei den meisten Herstellern wird die Masse und ein zugehöriger Schwerpunkt für jedes Glied des Roboterarmes angegeben.

Die Schwerebeschleunigung beträgt 9.81 m/s^2 , sie wirkt Richtung Erdboden und kann damit im Basis-Koordinatenrahmen als homogener Vektor $\mathbf{g}_0 = (0, 0, -9.81, 1)^T$ angegeben werden. Dieser Vektor muss in jeden Koordinatenrahmen des Roboterarmes transformiert werden:

$$\mathbf{g}_i = (\mathbf{T}_0^i)^{-1} \mathbf{g}_0 \quad \text{für } i = 1, \dots, 5 \quad (3.22)$$

Die z-Achse des Koordinatenrahmens i entspricht der Drehachse des Gelenks $i+1$, damit müssen alle nachfolgenden Glieder $j > i$ für die Berechnung des Drehmoments berücksichtigt werden. Für jedes nachfolgende Glied j wird ein der Masse entsprechender Schwerkraftvektor im Koordinatenrahmen i berechnet:

$$\mathbf{f}_{ij} = m_j \mathbf{g}_i \quad \text{für } i = 0, \dots, 5 \quad \text{und } j = 1, \dots, 6, \quad (3.23)$$

wobei nur jene Kombinationen berechnet werden, bei denen $j > i$ ist.

Der Schwerpunkt jedes Gliedes des Roboterarmes ist im entsprechenden Glied-Koordinatenrahmen gegeben. Daher werden die Schwerpunktsvektoren $\mathbf{s}_j = (s_x, s_y, s_z, 1)_j^T$ der nachfolgenden Glieder in den jeweiligen Koordinatenrahmen über

$$\mathbf{c}_{ij} = \mathbf{T}_i^j \mathbf{s}_j \quad (3.24)$$

transformiert. Das Drehmoment \mathbf{t}_{ij} , das durch die die Schwerkraft eines einzelnen Gliedes j und der Entfernung zum Gelenk $i+1$ im Koordinatenrahmen i entsteht, wird über das Kreuzprodukt $\mathbf{t}_{ij} = \mathbf{c}_{ij} \times \mathbf{f}_{ij}$ berechnet. Da die Drehachse des Gelenks $i+1$ in der z-Achse des Koordinatenrahmens i liegt, wirkt nur die z-Komponente des jeweiligen Drehmoments auf das Gelenk, es kann daher auf das Kreuzprodukt verzichtet werden und auf eine komponentenweise Berechnung

übergegangen werden:

$$t_{ij}^{(z)} = c_{ij}^{(x)} f_{ij}^{(y)} - f_{ij}^{(x)} c_{ij}^{(y)} \quad (3.25)$$

Das gesamte Drehmoment τ_{i+1} , das auf das Gelenk $i+1$ wirkt, wird als Summe der z-Komponenten der Drehmomente, die durch alle nachfolgende Glieder verursacht werden, berechnet:

$$\tau_{i+1} = \sum_{j=i+1}^6 t_{ij}^{(z)} \quad \text{für } i = 0, \dots, 5 \quad (3.26)$$

Da die Massen zum Roboterflansch hin geringer werden und zusätzliche weniger Bauteile des Roboterarmes auf das betrachtete Gelenk wirken, nimmt das Drehmoment von der Basis aus gesehen von Gelenk zu Gelenk ab.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

4 Simulation

Da sowohl das kinematische als auch das dynamische Kalibrierungsmodell sehr komplex sind, was sich nicht zuletzt in der großen Menge an Parametern äußerst, wird eine Simulation durchgeführt. Die Erkenntnisse der Simulation können in weiterer Folge für die tatsächliche Kalibrierung genutzt werden, um einerseits festzulegen, wie und welche Parameter des Modells bestimmt werden können, und um andererseits die Messung planen zu können, beispielsweise welche Beobachtungen notwendig sind oder weggelassen werden können, um ein bestmögliches Ergebnis zu erreichen. Ein weiterer Vorteil der Simulation ist die Überprüfung der korrekten Implementierung der Kalibrierungsmodelle in der Software.

4.1 Näherungswerte

Da bei der Parameterschätzung eine Linearisierung vorgenommen wurde, müssen für die Unbekannten Näherungswerte gefunden werden. Durch adäquate Näherungswerte kann der Linearisierungsfehler möglichst klein gehalten werden und das Ausgleichsverfahren iteriert schneller. Als Näherungswerte für die DH-Parameter werden die Nominalwerte aus dem Kalibrier-Handbuch [Universal Robots, 2017] des Herstellers genommen. Die Nulllagenfehler $\delta\theta_i$ werden als sehr klein erwartet und können sowohl negativ als auch positiv ausfallen, sie werden daher mit 0 genähert. Für die Endeffektor-Translationen werden vorerst realitätsnahe Werte angenommen, da der tatsächliche Aufbau noch nicht bekannt ist. Die Transformation zwischen den Koordinatenrahmen des Lasertrackers und der Roboterbasis hängt von der Position des Lasertrackers und des Roboterarmes im Raum ab. Die Rotationen um die x- und y-Achse sind als klein zu erwarten, da beide Systeme durch ihren Aufbau nahezu horizontal ausgerichtet sind. Die Rotation um die z-Achse hängt vom Nullpunkt des Lasertrackers sowie von der Ausrichtung des Roboterarmes ab. Die Translationen sind sehr einfach über den Abstand zwischen den Messsystemen steuerbar. Als Näherungswerte werden daher empirische Werte aus einer anderen Messung angenommen. Sämtliche Näherungswerte sind in Tab. 4.1 gelistet.

Bei Anwendung des dynamischen Kalibrierungsmodells sind auch für die Steifigkeitsparameter λ_i Näherungswerte zu finden. Der Größenbereich für die Winkelgröße $\delta\theta$, die aus Drehmoment und Steifigkeitsparameter berechnet wird, ist mit einigen wenigen Hundertstelgrad abzuschätzen. Daher werden die Werte für λ_i als sehr klein erwartet und da zusätzlich das Vorzeichen unbekannt ist, werden alle Steifigkeitsparameter mit dem Näherungswert Null in die Ausgleichung eingeführt. Die Einheit der Steifigkeitsparameter ist Rad/Nm.

Aus dem Aufbau des Roboterarms geht hervor, dass in den Gelenken 1-3 und 4-6 jeweils gleiche Getriebe verbaut werden, erstere sind größer als zweitere. Es ist daher anzunehmen, dass sich für gleiche Getriebe die Steifigkeitsparameter in einer ähnlichen Größendimension befinden.

\mathbf{T}_{i-1}^i	$\delta\theta_i$ [rad]	α_i [rad]	a_i [m]	d_i [m]		
1	0	$\frac{\pi}{2}$	0	0.089 159		
2	0	0	-0.425 00	0		
3	0	0	-0.392 25	0		
4	0	$\frac{\pi}{2}$	0	0.109 15		
5	0	$-\frac{\pi}{2}$	0	0.094 65		
6	0	0	0	0.082 30		
<hr/>						
\mathbf{T}_{LT}^0	r_x [°]	r_y [°]	r_z [°]	t_x [m]	t_y [m]	t_z [m]
	-0.10	-3.00	-73.00	-2.800	0.400	0.380
<hr/>						
		x_E [m]	y_E [m]	z_E [m]		
\mathbf{T}_6^E		0.075	0.075	0.050		

Tab. 4.1: Näherungswerte für die Parameterschätzung

4.2 Erstellen von Simulationsdaten

Zur Durchführung der Parameterschätzung werden Beobachtungen, das sind die Messpunkte des Lasertrackers in kartesischen Koordinaten, benötigt. Zur Berechnung dient das funktionale Modell, es legt die Parameter fest. Aufgrund des nicht-linearen funktionalen Modells können die Berechnungen nur mithilfe von Näherungswerten erfolgen. Neben den in Tab. 4.1 angeführten Werten für die Transformation zwischen Lasertracker und Roboterbasis, die DH-Parameter und die Endeffektor-Translation, werden auch die Gelenkwinkel, die als Konstanten in das funktionale Modell einfließen, gebraucht. Um eine gute räumliche Abdeckung des Arbeitsbereiches zu erreichen, werden zufällige Posen im Raum ausgewählt und die Gelenkwinkel mithilfe der Software RoboDK berechnet. Die für die Berechnung verwendeten Posen sind in Abb. 4.1 visualisiert.

Die so berechneten Beobachtungen würden perfekt gemessenen Werten entsprechen, sie müssen daher noch dem stochastischen Modell, also der Messgenauigkeit des Lasertrackers angepasst werden. Erst dann entsprechen die Werte realen Messdaten, als wären sie vom Lasertracker gemessen worden. Dazu werden die Messdaten zuerst in polare Größen umgerechnet und mithilfe des Varianzfortpflanzungsgesetzes eine Kovarianzmatrix für die kartesischen Größen berechnet. Diese Kovarianzmatrix wird in eine multivariate Normalverteilung eingeführt, die die kartesischen Messgrößen als Erwartungswerte hat. Aus dieser multivariaten Normalverteilung werden neue zufällige Werte für die kartesischen Größen gezogen. Dieser Vorgang wird Verrauschen der Simulationsdaten genannt. Die so berechneten Messpunkte des Lasertrackers dienen als Beob-

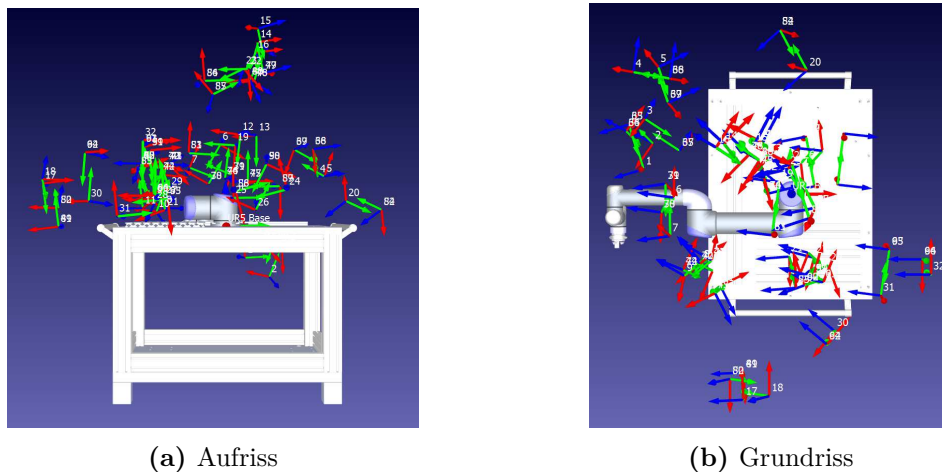


Abb. 4.1: Posen für die Berechnung der Modellmatrix \mathbf{A}

achtungen im Ausgleichsverfahren.

Bevor jedoch die Parameterschätzung durchgeführt wird, kann bereits die Modellmatrix \mathbf{A} berechnet werden, um einerseits den Einfluss der Gelenkwinkel zu untersuchen und um andererseits festzustellen, ob es Parameter gibt, die voneinander linear abhängen. Diese Analysen werden in Kap. 4.3 und 4.4 vorgenommen.

Um auch das dynamische Kalibrierungsmodell in der Simulation anwenden zu können, werden mit den Gelenkwinkeln Drehmomente berechnet. Zur Berechnung werden die Massen der einzelnen Glieder und deren Schwerpunkte im entsprechenden Koordinatenrahmen benötigt, sie sind in Tab. 4.2 gelistet und können nach den in Kap. 3.5 angeführten Formeln berechnet werden.

Glieder	Masse [kg]	Schwerpunkt		
		x [m]	y [m]	z [m]
1	3.7000	0	-0.025 61	0.001 93
2	8.3930	0.2125	0	0.113 36
3	2.3300	0.1500	0	0.026 50
4	1.2190	0	-0.0018	0.016 34
5	1.2190	0	-0.0018	0.016 34
6	0.1879	0	0	-0.001 159

Tab. 4.2: Massen und Schwerpunkte der einzelnen Roboterglieder ²

²Quelle: <https://www.universal-robots.com/how-tos-and-faqs/faq/ur-faq/parameters-for-calculations-of-kinematics-and-dynamics-45257>, aufgerufen am 18.07.2019

4.3 Konfigurationsanalyse

Der maximal mögliche Rang von \mathbf{A} ist $n = 33$, da dies, entsprechend der Unbekannten, die Anzahl der Spalten ist. Die Zeilenanzahl variiert je nach Anzahl der Beobachtungen, ist aber immer größer als die Spaltenanzahl. Wäre $\text{rang}(\mathbf{A}) = n$, hätte die Modellmatrix \mathbf{A} vollen Rang, die Normalgleichungsmatrix \mathbf{N} wäre regulär und die Unbekannten könnten nach (3.17) berechnet werden. Allerdings hat die Modellmatrix \mathbf{A} nicht vollen Rang, der Rang berechnet sich zu $r = 25$. Der sich daraus ergebende Rangdefekt $d = 8$ ist durchaus als groß anzusehen.

Um festzustellen, wie der Rangdefekt der Modellmatrix verursacht wird, ist es notwendig, die in \mathbf{A} einfließenden Größen genauer zu betrachten. Neben den DH-Parametern, der Transformation vom Lasertracker zum Roboter und der Translation des Endeffektors sind das auch die Gelenkwinkel. Ihnen ist besondere Aufmerksamkeit zu schenken, da sie im Gegensatz zu den anderen Größen pro Beobachtung variieren. Um den Einfluss der Konfiguration der Beobachtungen auf die Bestimmbarkeit der Parameter zu untersuchen, werden daher so viele Armstellungen wie möglich simuliert und in die Modellmatrix eingeführt. Die Anzahl der Armstellungen begrenzt sich jedoch durch die Rechenkapazität und -dauer, die benötigt wird, um die Matrix \mathbf{A} aufzustellen. Um die den Armstellungen entsprechenden Gelenkwinkel zu berechnen, wird wie folgt vorgegangen: Alle Gelenke vollführen in 30° -Schritten eine volle Umdrehung (360°). Während das letzte Gelenk gedreht wird, werden alle anderen Gelenke fixiert. Dann wird das vorletzte Gelenk um 30° gedreht und das letzte Gelenk vollführt wieder eine volle Drehung. Dieser Vorgang wird vom letzten bis zum ersten Gelenk so fortgeführt. Nach Dupuis et al. [2017] stellt die longitudinale Abdeckung des Arbeitsbereiches des Roboterarms für eine Kalibrierung keinen Informationsgewinn dar, wichtiger sind die radiale und vertikale Abdeckung. Daher wird auch in dieser Konfigurationsanalyse das erste Gelenk nur in einem Bereich von 90° gedreht, allerdings in 15° -Schritten.

Führt man die Berechnungen nach diesem Schema durch, ergeben sich über 1.74 Milliarden Armstellungen. Es sei festgehalten, dass nicht alle Armstellungen tatsächlich möglich sind, sie würden eine Kollision des Roboterarmes mit sich selbst verursachen. Für die Konfigurationsanalyse ist dies aber nebensächlich, es soll untersucht werden, ob eine eklatant höhere Anzahl an Armstellungen einen Informationsgewinn darstellt oder ob eine kleine zufällige Auswahl ausreicht.

Jede Armstellung liefert drei Zeilen in der Modellmatrix, folglich hat \mathbf{A} mehr als 5.22 Milliarden Zeilen. Der Rang von \mathbf{A} ändert sich allerdings nicht, $r = 25$ und somit $d = 8$. Mithilfe der Konfigurationsanalyse zeigt sich, dass eine kleine zufällige Auswahl an Armstellungen (die auch physisch tatsächlich möglich sind) reicht. Durch eine Vielzahl an Armstellungen kann kein Informationsgewinn erreicht werden.

4.4 Linear abhängige Parameter

In Kap. 4.3 wird gezeigt, dass eine erhöhte Anzahl an Armstellungen keinen positiven Einfluss auf den Rangdefekt der Modellmatrix hat. Es muss daher voneinander linear abhängige Parameter

im funktionalen Modell geben. Um festzustellen, welche Parameter linear abhängig sind und damit den Rangdefekt der Modellmatrix verursachen, werden folgende Methoden angewendet:

- Direkte Beobachtung einzelner Parameter und anschließende Rangbestimmung
- Direkte Beobachtung von Parametergruppen (entsprechend den verschiedenen Transformationen) und anschließende Rangbestimmung.
- Direkte Beobachtung von Parametergruppen und anschließende Singulärwertzerlegung
- Nähere Betrachtung der Singulärwertzerlegung, im Speziellen der rechten Singulärvektoren

4.4.1 Direkte Beobachtung einzelner Parameter und Rangbestimmung

In einem ersten Schritt werden die Parameter einzeln als direkt beobachtet in die Modellmatrix \mathbf{A} eingeführt. Dazu wird die Matrix \mathbf{A} um eine Zeile erweitert, die an der dem Parameter entsprechenden Spalte eine Eins hat und ansonsten aus Nullen besteht. Verändert sich der Rang der modifizierten Matrix \mathbf{A}^* nicht, dann kann davon ausgegangen werden, dass dieser Parameter linear unabhängig ist, da die direkte Beobachtung keinen Beitrag zur Lösung des Systems leistet. Dies ist der Fall bei den Parametern $\delta\theta_2, \delta\theta_3, \delta\theta_4, \delta\theta_5, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, d_5$, sie werden daher als linear unabhängig betrachtet.

4.4.2 Direkte Beobachtung von Parametergruppen und Rangbestimmung

Es ist auch möglich, Parametergruppen als direkt beobachtet einzuführen, der Matrix \mathbf{A} werden mehrere Zeilen nach obigen Schema hinzugefügt. Somit kann die Auswirkung der verschiedenen Transformationen auf das Gleichungssystem untersucht werden. Mögliche Parametergruppen sind die Transformation vom Lasertracerrahmen zum Basisrahmen \mathbf{T}_{LT}^0 , die Transformationen der einzelnen Roboterglieder \mathbf{T}_{i-1}^i mit $i = 1, 2, \dots, 6$ und die Translation vom Roboterflansch zum Endeffektor τ_6^E . Keine dieser direkten Beobachtungen wirkt nicht rangerhöhend, also keine der Transformation kann sich als vollständig linear unabhängig hervorheben. Auffällig ist jedoch, dass sowohl die direkte Beobachtung der drei Parameter von τ_6^E als auch die direkte Beobachtung der vier Parameter von \mathbf{T}_5^6 den Rang der Matrix \mathbf{A}^* um 3 bzw. 4 erhöht. Da die Translation τ_6^E der Transformation \mathbf{T}_5^6 folgt, ist ein Zusammenhang zwischen den Parametern zu vermuten.

4.4.3 Direkte Beobachtung von Parametergruppen und Singulärwertzerlegung

Im nächsten Analyseschritt wird eine Singulärwertzerlegung für die Matrix \mathbf{A} und die veränderten Matrizen \mathbf{A}^* durchgeführt. Wie von Hansen [1997] konstatiert, charakterisiert der rechte Singulärvektor \mathbf{v}_n zum kleinsten Singulärwert μ_n jene Spalten der Modellmatrix, die eine Linearkombination darstellen. Der größte Eintrag des Vektors kann einer bestimmten Spalte und somit einem Parameter zugeordnet werden, der mit mindestens einem weiteren Parameter in linearer Abhängigkeit steht. Der damit identifizierte Parameter wird aus der Parameterschätzung entfernt, indem die entsprechende Spalte aus der Matrix \mathbf{A} gestrichen wird, die Spaltenanzahl

n verringert sich um 1. Der Rang der Matrix bleibt dabei erhalten. Diese Vorgehensweise wird solange wiederholt, bis die Spaltenanzahl dem Rang entspricht. Der Rangdefekt d gibt somit die Anzahl der Iterationen an.

Tab. 4.3 zeigt jene Parameter, die durch die Singulärwertzerlegung aus der Schätzung entfernt werden. Die erste Spalte zeigt jene Parameter, die entfernt wurden ohne dass Parametergruppen als beobachtet eingeführt wurden. Bei allen weiteren Spalten wird die Singulärwertzerlegung auf eine modifizierte Modellmatrix angewandt. Im Kopf der Tabelle ist zu sehen, welche Beobachtungsgruppen jeweils zur Matrix \mathbf{A} hinzugefügt werden.

direkt beobachtet:	-	τ_6^E	T_5^6	T_{LT}^0	T_0^1	T_{LT}^0 & τ_6^E
$\delta\theta_1$	•	•	•			
$\delta\theta_6$	•			•	•	
α_6	•	•		•	•	•
a_6	•			•	•	
d_1	•	•	•			
d_2	•	•		•	•	
d_3	•		•	•	•	•
d_4	•	•	•			•
d_6	•			•	•	
Rangdefekt d	8	5	4	6	6	3

Tab. 4.3: Durch Singulärwertzerlegung aus der Schätzung entfernte Parameter; grün: Parameter, die sowohl bei direkter Beobachtung von τ_6^E und T_5^6 nicht entfernt werden; blau: Parameter, die sowohl bei direkter Beobachtung von T_{LT}^0 und T_0^1 nicht entfernt werden; grau: mehrere voneinander linear abhängige Parameter, es werden immer gleichzeitig zwei entfernt

Von Interesse sind nun jene Parameter, die durch die Singulärwertzerlegung bei \mathbf{A} , jedoch nicht bei \mathbf{A}^* entfernt werden. Bei der direkten Beobachtung von τ_6^E sind dies $\delta\theta_6, a_6$ und d_6 , ebenso bei der direkten Beobachtung von T_5^6 , zusätzlich wird bei letzterem auch α_6 nicht mehr entfernt. Diese Felder sind in Tab. 4.3 grün hinterlegt. Diese Parameter sind allesamt DH-Parameter des sechsten Gelenks und lassen darauf schließen, dass es starke Abhängigkeiten zwischen τ_6^E und T_5^6 gibt.

Die blau hinterlegten Felder in Tab. 4.3 zeigen die Parameter $\delta\theta_1$ und d_1 , die bei der direkten Beobachtung von sowohl T_{LT}^0 als auch T_0^1 nicht durch die Singulärwertzerlegung entfernt werden. Auch zwischen diesen beiden Transformationen gibt es Abhängigkeiten.

Da das Ziel die Bestimmung der kinematischen Kalibrierparameter ist, ist es naheliegend, jene Parameter als direkt beobachtet einzuführen, die nicht den DH-Parametern entsprechen, dies sind die Transformation T_{LT}^0 und τ_6^E . Die dann entfernten Parameter sind in der letzten Spalte von Tab. 4.3 zu finden. Interessant ist, dass beide Transformationen gleichzeitig direkt beobachtet den gleichen Beitrag liefern wie wenn sie einzeln hinzugefügt werden. Daraus kann

geschlossen werden, dass es keine Abhängigkeiten zwischen diesen Transformationen gibt.

Die Parameter $x_E, y_E, z_E, r_x, r_y, r_z, t_x, t_y, t_z$ werden hingegen nie durch die Singulärwertzerlegung entfernt, auch hier sind weitere Untersuchungen notwendig, ob und welche von diesen Parametern linear unabhängig sind. Auf die Parameter d_2, d_3, d_4 (grau hinterlegt) wird später eingegangen.

4.4.4 Nähere Betrachtung der rechten Singulärvektoren

Bei näherer Betrachtung des rechten Singulärvektors \mathbf{v}_n zum kleinsten Singulärwert μ_n während der Iteration zeigt sich, dass sich der größte Eintrag manchmal nur um einen minimalen Wert vom zweitgrößten Eintrag unterscheidet, in Einzelfällen sind die Einträge sogar ident. Diese Vektoreinträge regeln - wie in (3.20) gezeigt - den Einfluss der einzelnen Parameter auf den betrachteten Singulärwert. Gibt es keinen eindeutig größten Eintrag, liegt also die Vermutung nahe, dass zwei oder mehr Parameter einen ähnlichen Einfluss haben und voneinander linear abhängen. Tab. 4.4 soll dies zeigen, sie ist zeilenweise zu beurteilen. Pro Zeile stehen jene Parameter, die dem größten und dem zweitgrößten Element von \mathbf{v}_n entsprechen. Da \mathbf{v}_n ein orthonormierter Vektor ist, stellt der Wert in Prozent den Einfluss dieses Parameters auf den betrachteten Singulärwert dar. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass die Singulärwertzerlegung und damit auch der Vektor \mathbf{v}_n in jeder Iteration neu berechnet wird.

Iteration	$v_{n,max}$	Anteil [%]	$v_{n,max-1}$	Anteil [%]	
1	r_z	50	$\delta\theta_1$	50	!
2	d_4	47	d_3	46	!
3	α_6	71	x_E	12	
4	$\delta\theta_6$	91	x_E	3	
5	d_2	33	d_3	33	!
6	d_6	45	z_E	45	!
7	d_1	29	t_z	29	!
8	a_6	50	x_E	50	!

Tab. 4.4: Parameter, die den größten Einfluss auf den rechten Singulärvektor \mathbf{v}_n zum kleinsten Singulärwert μ_n darstellen. Der Einfluss dieser Parameter ist in Prozent angegeben. Die Betrachtung wird für jeden Iterationsschritt der Singulärwertzerlegung gemacht.

Nun sind jene Paare kritisch zu beurteilen, bei denen sich der Einfluss der Parameter kaum unterscheidet, sie sind mit einem Rufzeichen in Tab. 4.4 gekennzeichnet. Die iterative Singulärwertzerlegung wurde so programmiert, dass der Benutzer entscheiden kann, welcher Parameter aus der Schätzung entfernt wird. Haben die Parameter identischen oder ähnlichen Einfluss, so zeigt sich, dass es genau so gut möglich ist, den zweiten Parameter zu entfernen. Ferner bestimmt bei identen Anteilen die Reihenfolge der Parameter im Unbekanntenvektor \mathbf{x} und damit

die Reihung der Spalten in \mathbf{A} , welcher der Parameter entfernt wird. Dies ist zum Beispiel der Fall bei den Parameterpaaren a_6, x_E oder d_6, z_E .

Tab. 4.4 zeigt die Parameter und deren Anteile in der iterativen Singulärwertzerlegung exemplarisch an der unveränderten Modellmatrix \mathbf{A} . Diese Analyse wird auch für die um die oben erwähnten Beobachtungsgruppen erweiterten Matrizen durchgeführt. Zusätzlich werden auch mehr als die zwei größten Elemente des Vektors betrachtet, da davon ausgegangen werden muss, dass es auch mehrere voneinander linear abhängige Parameter geben kann. Dies ist zum Beispiel der Fall bei d_2, d_3, d_4 (grau hinterlegt in Tab. 4.3), es müssen daher zwei der drei Parameter aus der Schätzung entfernt werden, um Regularität gewährleisten zu können.

Es ist auch möglich, jene rechten Singulärvektoren $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_r$ zu beurteilen, die den größeren Singulärwerten $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_r$ entsprechen, wobei $r = \text{rang}(\mathbf{A})$ ist. Bei diesen Vektoren ist auffällig, dass bei manchen Parametern die Einträge immer ident sind, der Anteil von zwei oder drei Parametern ist pro Vektor genau gleich. Dies lässt auch darauf schließen, dass diese Parameter voneinander linear abhängig sind. Parameter, bei denen dies zutrifft, sind wiederum d_2, d_3, d_4 , aber auch a_6, x_E und d_6, z_E .

4.4.5 Auswahl der bestimmbaren Parameter

Aufgrund der angeführten Methoden und durchgeführten Analysen werden folgende Parameter als voneinander linear abhängig eingestuft:

- d_2, d_3, d_4
- a_6, x_E
- d_6, z_E
- $\delta\theta_6, \alpha_6, y_E$
- $\delta\theta_1, r_z$
- d_1, t_z

Um vollen Rang der Modellmatrix \mathbf{A} und in weiterer Folge Regularität von \mathbf{N} zu erreichen, muss nun je Parametergruppe ein Parameter ausgewählt werden, der in der Ausgleichung mitgeschätzt wird. Die anderen Parameter werden auf ihren Nominalwert gesetzt und von der Ausgleichung ausgeschlossen, indem sie aus dem Unbekanntenvektor \mathbf{x} entfernt werden. Damit wird auch das funktionale Modell nicht nach diesen Parametern abgeleitet und die Spaltenanzahl von \mathbf{A} verringert sich.

In der Parametergruppe d_2, d_3, d_4 werden d_2 und d_3 aus der Schätzung entfernt. Die Begründung ist im Aufbau des Roboterarmes zu finden. Die z -Achsen der entsprechenden Koordinatenrahmen 1,2 und 3 sind parallel definiert, es bleibt dem Anwender überlassen, in welchem Koordinatenrahmen er den Gliedversatz zwischen Koordinatenrahmen 1 und 3 anbringt. d_2, d_3, d_4 sind also willkürliche Parameter, nur die Summe kann geschätzt werden. Der Hersteller setzt

die Parameter auf die in Tab. 4.1 angegebenen Werte fest, der Gliedversatz zwischen den Koordinatenrahmen 1 und 3 wird mit d_4 modelliert. Dementsprechend wird dieser Parameter in der Ausgleichung mitgeschätzt.

Weiters werden die Endeffektor-Translationen x_E, y_E, z_E aus der Ausgleichung entfernt, damit ist die eindeutige Bestimmung von a_6 und d_6 möglich. In der dritten Parametergruppe wird außerdem $\delta\theta_6$ nicht mitgeschätzt, dadurch kann α_6 in der Ausgleichung bestimmt werden. Die Endeffektor-Translationen können ausgeschlossen werden, weil sie mit einem weiteren Ausgleichungsverfahren gesondert bestimmt werden können. Auch der Nulllagenfehler $\delta\theta_6$ kann in einer separaten Berechnung bestimmt werden, indem sich nur das letzte Gelenk dreht und der durch die Drehung erreichte Winkel als Bedingung eingeführt wird.

Mit der gleichen Vorgehensweise ist auch der Nulllagenfehler im ersten Gelenk $\delta\theta_1$ extern bestimmbar und wird dem Unbekanntenvektor entfernt. Somit bleibt der Rotationsparameter r_z in der Ausgleichung erhalten.

Im letzten Parameterpaar wird d_1 entfernt, einerseits damit \mathbf{T}_{LT}^0 vollständig geschätzt wird und andererseits weil die Kalibrierung dieses Parameters nur für Roboterarbeiten wichtig ist, die die Montageebene beinhalten, zum Beispiel das Abtasten eines Tisches oder einer Wand, auf der der Roboterarm befestigt ist.

4.5 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulation mit dem kinematischen Kalibrierungsansatz sollen anhand von drei verschiedenen Datensätzen gezeigt werden:

1. 32 Posen, die so gewählt wurden, dass der Roboterflansch in die gleiche Richtung zeigt ³
2. 59 zufällige, realisierbare Posen
3. Jene 59 Posen aus Variante (2), wobei bei jeder Pose das letzte Gelenk um 180° gedreht wird, wenn dies ohne Kollision möglich ist. Dadurch entstehen 98 realisierbare Posen.

Mit jeder Ausführung der Parameterschätzung werden die Datensätze entsprechend der Lasertracker-Stochastik neu verrauscht. Da das Verrauschen der Daten der Normalverteilung folgt, kann es im äußersten Ausnahmefall sein, dass ein Datensatz bessere Messwerte enthält, als der Lasertracker eigentlich imstande ist zu messen. Um dem vorzubeugen, wird die Parameterschätzung mehrere Male durchgeführt. Alle unten angeführten Beurteilungsgrößen stellen also keine Ausreißer im Sinne des Verrauschens dar.

Um einen Einfluss der Näherungswerte ausschließen zu können, werden diese mit jeder Parameterschätzung zufällig verändert. Als Ausgangsgrößen dienen die in Tab. 4.1 angeführten Werte. Die Veränderung der Näherungswerte sämtlicher Winkelgrößen findet gleichverteilt in einem Bereich von ± 0.1 Grad statt. Für die Veränderung der Näherungswerte der Distanzgrößen werden Zufallszahlen im Bereich von ± 5 mm gezogen.

³Posen stammen aus einer anderen Messkampagne, bei der eine T-Probe eine ständige Sichtverbindung zu einem Lasertracker fordert

4.5.1 Kinematische Kalibrierung

Als erste Beurteilungsgröße wird der Globaltest mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% herangezogen, die Testgrößen und Quantile sind in Tab. 4.5 gelistet. Alle drei Datensätze festigen

Datensatz	1	2	3
Testgröße	0.85	0.92	1.02
unteres Quantil	0.70	0.79	0.84
oberes Quantil	1.35	1.24	1.18

Tab. 4.5: Globaltest-Ergebnisse der Simulation

das stochastische und funktionale Modell, die Testgröße kommt zwischen den beiden Quantilen zu liegen. Da es sich um eine Simulation handelt, werden vor allem die Berechnungen und Implementierungen in der Software bestätigt. Ob das stochastische und funktionale Modell dem tatsächlichen Messaufbau entsprechen, kann erst mit realen Messdaten geprüft werden.

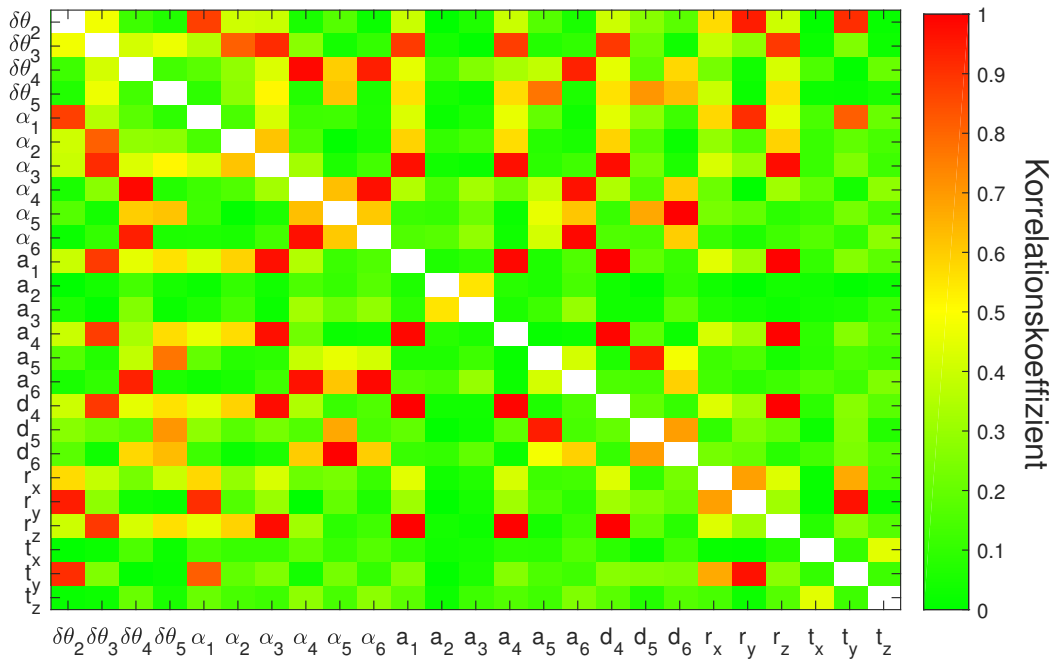


Abb. 4.2: Korrelationen kinematisches Modell - Datensatz 1

Die Korrelationen der ausgeglichen Parameter sind in Abb. 4.2 bis 4.4 dargestellt. Der Korrelationskoeffizient wird dabei absolut betrachtet, sein Wert ist damit zwischen 0 und 1 zu finden. Die Farbgebung ist nach dem Ampelsystem gestaltet, grüne Kacheln bedeuten wenig Korrelation und gute Trennbarkeit zwischen den betrachteten Parametern während rote Kacheln hohe Korrelation und gegenseitige Beeinflussung bedeuten.

Betrachtet man Abb. 4.2, so ist ersichtlich, dass die Einschränkung der Posen äußerst viele

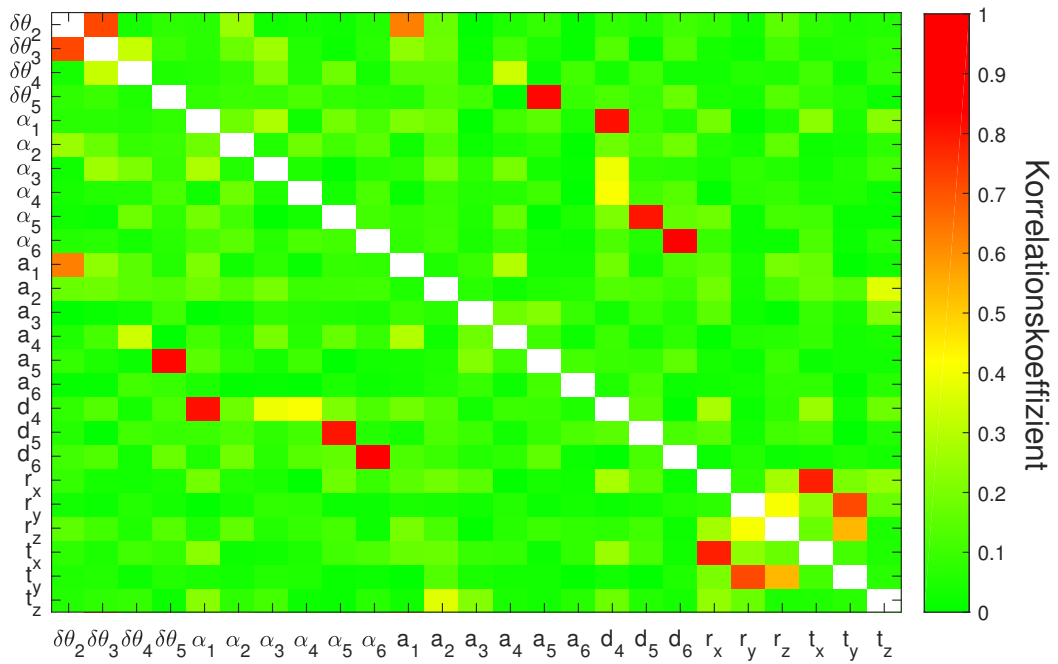


Abb. 4.3: Korrelationen kinematisches Modell - Datensatz 2

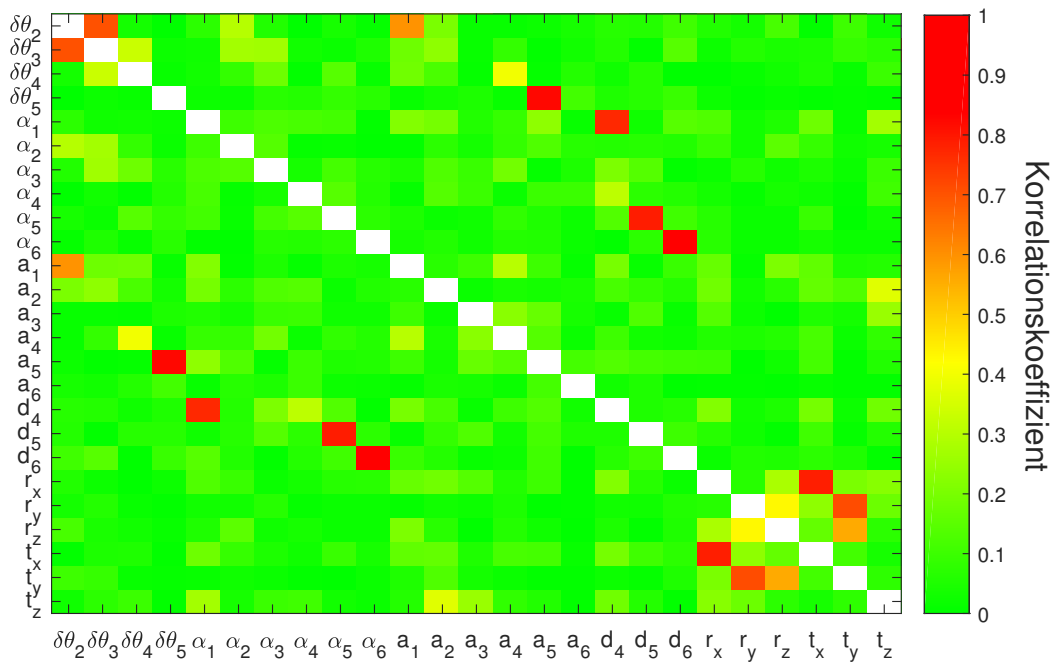


Abb. 4.4: Korrelationen kinematisches Modell - Datensatz 3

Korrelation zwischen		Korrelationskoeffizient	
		Datensatz 2	Datensatz 3
α_6	d_6	0.84	0.84
$\delta\theta_5$	a_5	0.82	0.82
α_1	d_4	0.81	0.77
α_5	d_5	0.80	0.79
r_x	t_x	0.78	0.78
$\delta\theta_2$	$\delta\theta_3$	0.72	0.70
r_y	t_y	0.71	0.71
$\delta\theta_2$	a_1	0.63	0.59
r_z	t_y	0.54	0.56

Tab. 4.6: Korrelationskoeffizienten ($\rho > 0.5$) der Datensätze 2 und 3

Korrelationen zwischen den Parametern verursacht, da sehr wenig Bewegung im Handgelenk des Roboterarmes gegeben ist. Die zufällige Auswahl der Posen verringert die Anzahl der Korrelationen drastisch, einige wenige Parameter korrelieren dennoch miteinander, siehe Abb. 4.3 und 4.4.

Da Abb. 4.3 vor allem Korrelationen zwischen den DH-Parametern des fünften und sechsten Gelenks sowie bei der Transformation zwischen Lasertracker und Basis zeigt, sind im Datensatz 3 die 180°-Drehungen im letzten Gelenk eingeführt worden, Abb. 4.4 zeigt aber sehr ähnliche Korrelationen. Zur genaueren Analyse sind in Tab. 4.6 die Korrelationskoeffizienten, deren Wert größer als 0.5 ist, für die Datensätze 2 und 3 gelistet. Die Parameterpaare sind ident, die Werte unterscheiden sich nur minimal. Wahrscheinlich müssten Bedingungen, die zum Beispiel Drehungen in bestimmten Gelenken beschreiben, in die Ausgleichung eingeführt werden, damit die zusätzlichen Beobachtungen die Korrelationen verringern. Das Gauß-Markov-Modell lässt das Einführen von Bedingungen zwischen Beobachtungen allerdings nicht zu.

Die Genauigkeiten der ausgeglichenen Parameter sind in Tab. 4.7 ersichtlich. Die Genauigkeiten von Datensatz 1 lassen wiederum erkennen, dass die Korrelationen keine genaue Bestimmung der Parameter zulassen. Legt man den Fokus auf Datensatz 2 und 3, so sind die Genauigkeiten als sehr zufriedenstellend zu bewerten. Die Winkelgrößen werden im Bereich von zwei bis drei Bogensekunden bestimmt, während die Längen mit maximal drei Tausendstelmmillimeter geschätzt werden. Datensatz 3 weist bis auf zwei Ausnahmen knapp bessere Genauigkeiten als Datensatz 2 auf, was vermutlich an der höheren Anzahl an Posen liegt.

Bei Durchführung der Ausgleichung entsprechen die Werte der ausgeglichenen Parameter jenen Werten, die bei der Erstellung der Simulationsdaten eingeführt wurden, sie unterscheiden sich nur im Größenbereich der Stochastik des Lasertrackers, bei Winkelwerten um wenige Bogensekunden, bei Distanzen um wenige Hundertstelmmillimeter. Führt man die Ausgleichung mit unverrauschten Beobachtungen durch, so werden die Simulationsdaten exakt abgebildet.

Weiters liefert die Ausgleichung auch bei stark veränderten Näherungswerten - Längen bis zu mehreren Zentimetern und Winkeln um bis zu 20° - die gleichen Parameterwerte. Das lässt auf eine sehr flache zu minimierende Funktion im Ausgleichsverfahren schließen, es gibt ein eindeutiges Minimum, das durch die Schätzung gefunden wird.

Auf die Durchführung eines Parametertests wird verzichtet, da die Nominalwerte den simulierten und damit wahren Werten entsprechen. Die Sinnhaftigkeit dieses Test ist erst mit echten Messdaten gegeben.

Parameter	Datensatz 1	Datensatz 2	Datensatz 3
$\delta\theta_2$ ["]	385.8070	0.8629	0.7012
$\delta\theta_3$ ["]	598.0991	1.1800	1.0062
$\delta\theta_4$ ["]	1601.4833	1.6938	1.5678
$\delta\theta_5$ ["]	3442.2556	2.7740	2.2314
α_1 ["]	137.1699	0.7464	0.6255
α_2 ["]	94.5897	0.5887	0.4378
α_3 ["]	757.7437	1.1986	1.1603
α_4 ["]	2830.6757	1.5215	1.3743
α_5 ["]	3623.7255	2.5537	2.0922
α_6 ["]	2319.8337	2.5790	3.6928
a_1 [mm]	2.4080	0.0015	0.0013
a_2 [mm]	0.2078	0.0012	0.0011
a_3 [mm]	0.3443	0.0012	0.0011
a_4 [mm]	1.2716	0.0013	0.0012
a_5 [mm]	2.0074	0.0023	0.0017
a_6 [mm]	0.5478	0.0011	0.0008
d_4 [mm]	7.7321	0.0019	0.0016
d_5 [mm]	1.8710	0.0024	0.0017
d_6 [mm]	2.5671	0.0016	0.0016
r_x ["]	137.5166	0.8947	0.4802
r_y ["]	355.9402	0.5030	0.6368
r_z ["]	1947.2787	0.4221	0.3478
t_x [mm]	0.1247	0.0029	0.0014
t_y [mm]	0.1850	0.0016	0.0022
t_z [mm]	0.2533	0.0020	0.0018

Tab. 4.7: Genauigkeiten der ausgeglichenen Parameter

4.5.2 Dynamische Kalibrierung

Die Simulation des dynamischen Kalibrierungsmodells wird anhand des dritten Datensatzes aus Kap. 4.5 ausgewertet.

Als erste Beurteilungsgröße wird der Globaltest herangezogen, die Testgröße kommt bei mehrmaligem Ausführen der Ausgleichung immer im durch die Quantile vorgegebenen Intervall zu liegen. Somit kann behauptet werden, dass die Erweiterung des Modells um die Steifigkeitsparameter und die Drehmomente korrekt implementiert wurde.

Betrachtet man die Korrelationen der ausgeglichenen Parameter (Abb. 4.5), so ist festzustellen, dass diese den Korrelationen im kinematischen Modell sehr ähnlich sind. Einen Unterschied stellen die zusätzlichen Korrelationen zwischen λ_2 und a_2 bzw. λ_2 und t_z dar.

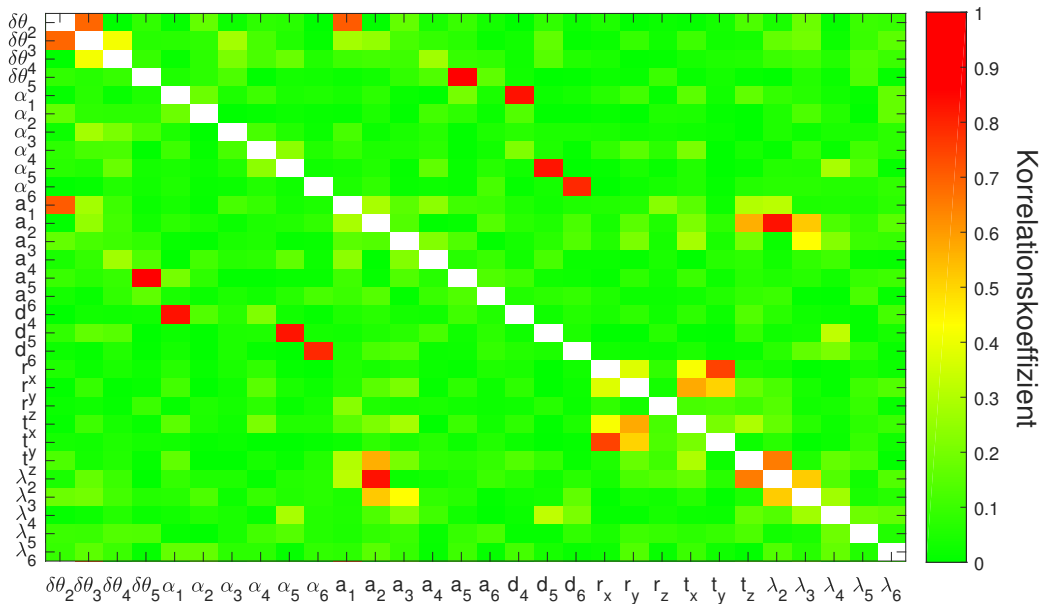


Abb. 4.5: Korrelationen im dynamischen Kalibrierungsmodell - Datensatz 3

Auch die Genauigkeiten der ausgeglichenen Parameter sind wie im kinematischen Modell sehr gut, Winkelgrößen werden mit maximal 2 Bogensekunden, Längen mit bis zu 3 Hundertstelmillimeter bestimmt. Die zusätzlichen Steifigkeitsparameter werden ebenso um mindestens eine Potenz genauer bestimmt als ihr Wert. Auf eine detaillierte Auflistung wird daher verzichtet.

Die Parameterwerte selbst entsprechen wie im kinematischen Modell den in der Simulation eingeführten Werten. Bei verrauschten Beobachtungen treten Abweichungen im Bogensekunden- bzw. Hundertstelmillimeterbereich auf, bei unverrauschten Beobachtungen werden die Parameterwerte in der Schätzung exakt reproduziert. Hervorzuheben ist, dass sogar die getrennte Bestimmbarkeit der Nulllagenfehler $\delta\theta_i$ und der Winkelzuschläge $\delta\vartheta_i$, berechnet aus Steifigkeitsparameter und Drehmoment, gegeben ist, obwohl beide Werte additiv an den Gelenkwinkel angebracht werden.

Wie in der Simulation des kinematischen Modells wird auch hier auf einen Parameterstest verzichtet, da die Nominalwerte die simulierten und damit wahren Werte darstellen.

Die Simulation mit beiden Kalibrierungsansätzen lässt erkennen, dass

- das stochastische und funktionale Modell in beiden Fällen korrekt implementiert wurde,
- eine zufällige Auswahl an Posen unumgänglich ist und
- einige wenige Korrelationen erhalten bleiben.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

5 Messung und Auswertung

5.1 Instrumentarium

5.1.1 Roboterarm

Der verwendete Roboterarm wurde von der Firma Universal Robots hergestellt, trägt die Bezeichnung UR5 und gehört zur Serie CB3. Die Abmaße des Roboterarmes sind in Abb. 5.1 ersichtlich. Die Reichweite des Roboterarmes beträgt 850 mm bei einer Nutzlast von 5 kg,

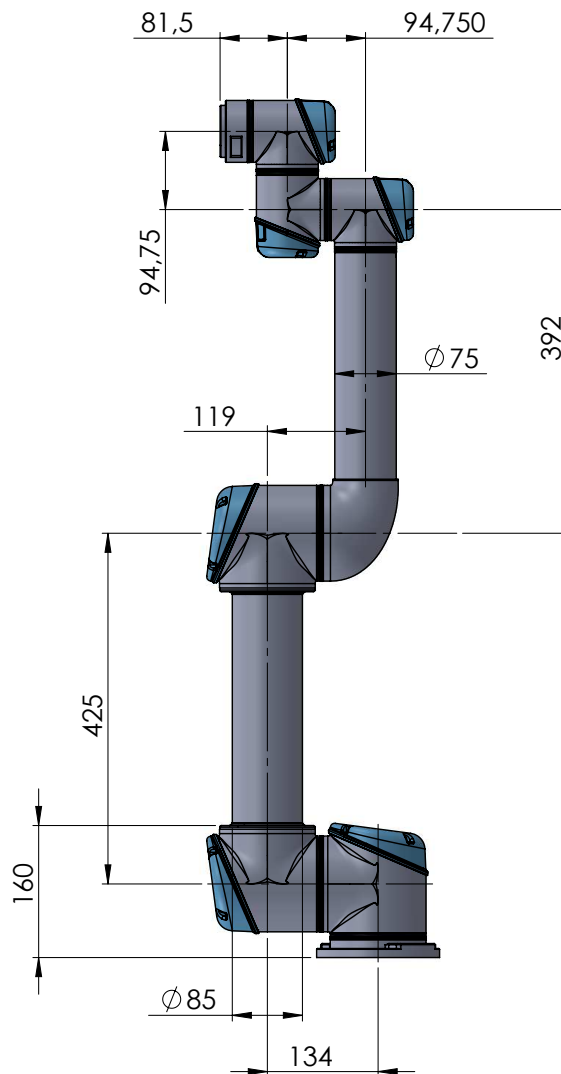


Abb. 5.1: Schematische Darstellung des Roboterarmes UR5⁴

die gleichzeitig der Maximalmasse des Endeffektors entspricht. Der Roboterarm UR5 hat sechs Gelenke, die jeweils einen Messbereich von $\pm 360^\circ$ aufweisen. Jedes der Gelenke kann mit einer

⁴Quelle: https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/ur-support-site/16316/24105_Support.PDF, abgerufen am 31.07.2019

Geschwindigkeit von bis zu $180^\circ/s$ bewegt werden. Die Wiederholgenauigkeit wird mit 0.1 mm spezifiziert. [Universal Robots, 2018]

Zum Messsystem des Roboterarmes gehören außerdem eine Steuerungseinheit und eine Bedieneinheit (Abb. 5.2). Die Bedieneinheit ist durch einen Touchscreen realisiert und per Kabel an die Steuerungseinheit angeschlossen. Die Steuerungseinheit stellt damit das Bindeglied zum Roboterarm dar und dient auch als Schnittstelle für eine externe Bedieneinheit. Der Roboterarm



(a) Bedieneinheit



(b) Steuerungseinheit

Abb. 5.2: Komponenten des Messsystems

ist mittig auf einem Aluminiumtisch (Abb. 5.3) montiert, dessen Länge, Breite und Höhe 1000, 780 bzw. 770 mm beträgt. Die Steuerungseinheit ist in der Ablage dieses Tisches montiert und auch die Bedieneinheit kann am Tisch aufgehängt werden. Dadurch kann das gesamte Messsystem mitsamt des Aluminiumtisches mit einem entsprechendem Hubgerät transportiert werden. Damit ein fester Stand des Tisches am Boden gewährleistet werden kann, ist einer der vier Füße höhenverstellbar.



Abb. 5.3: Aluminiumtisch zur Montage des Roboterarm-Messsystems

5.1.2 Lasertracker

Der Lasertracker trägt die Bezeichnung LTD800 und ist ein Produkt der Firma Leica Geosystems. Der Lasertracker setzt sich aus vier Einheiten (Abb. 5.4) zusammen: Grundplatte, Standrohr, Sensoreinheit und Steuerungseinheit. Letztere ist mechanisch von den anderen drei

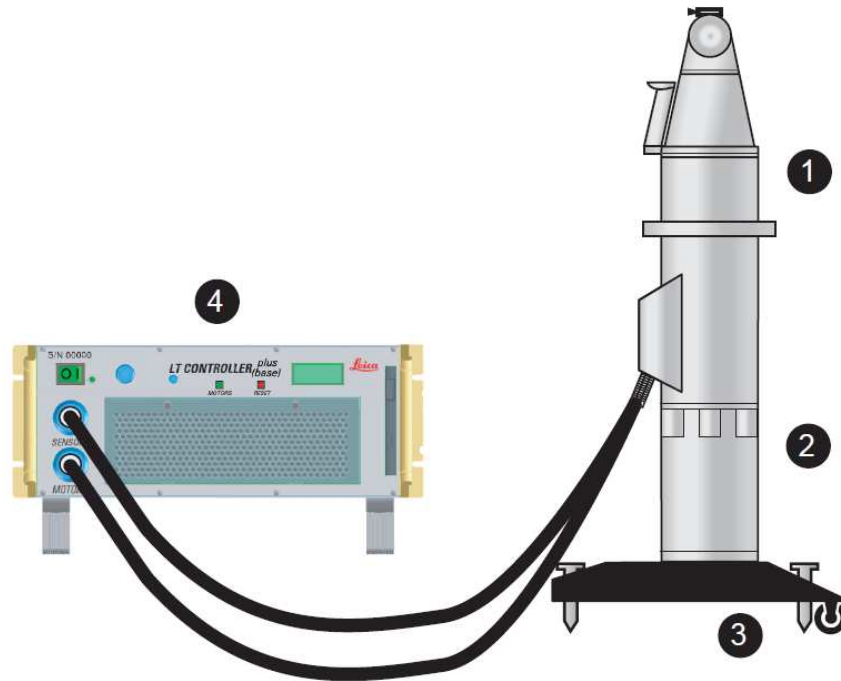


Abb. 5.4: Schematische Darstellung des Lasertrackers LTD800 (1: Sensoreinheit, 2: Standrohr, 3: Grundplatte, 4: Steuerungseinheit) [Leica Geosystems, 2003, abgeändert]

Einheiten getrennt, in einem separaten Trärgestell untergebracht und über Kabel verbunden. Grundplatte, Standrohr und Sensoreinheit sind hingegen mechanisch verbunden. Die Steuerungseinheit dient zusätzlich als Schnittstelle zur Bedieneinheit (Laptop mit entsprechender Software) und zu anderen Instrumenten wie Wetterstation, Neigungssensor, T-Cam, T-Probe oder T-Scan. Im verwendeten Messaufbau wird nur die Wetterstation genutzt, sie liefert Daten zu Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck, um atmosphärische Korrekturen zu berechnen.

Das Herzstück des Lasertrackers ist die Sensoreinheit. Sie setzt sich aus Interferometer, Absolutdistanzmesser, fotosensitivem Detektor, Kippspiegel, Vogelbad, Motoren, Spiegeln, Strahlteilern, etc. zusammen. In der Sensoreinheit erfolgt die eigentliche Messung sowie das mechanische Nachsteuern zur Verfolgung des Zielpunktes.

Der Lasertracker LTD800 kann Distanzen mit zwei verschiedenen Verfahren messen. Die Distanzmessung mit dem Laser-Interferometer weist eine bessere Messgenauigkeit auf, fordert aber eine ständige Sichtverbindung vom Lasertracker weg bis zum Messpunkt, da ein Initialabstand gemessen werden muss. Der Absolut-Distanzmesser hingegen arbeitet auch ohne Initialisierung, weist dafür leicht schlechtere Messgenauigkeit auf. Die Winkelmessung verwendet inkrementelle Winkelschrittgeber. Die Ablesung erfolgt fotoelektrisch auf einer Glasscheibe mit 18000 radial

angeordneten Streifen. Die Messgenauigkeiten von Winkel- und Distanzmessung sind in Tab. 3.1 zu finden.

Die oben stehenden Informationen sind dem Handbuch des LTD800 [Leica Geosystems, 2003] entnommen.

5.1.3 Überprüfung des Lasertrackers

Die Überprüfung des Lasertrackers erfolgt anhand eines zweiten Lasertrackers, der für eine kurze Zeit ausgeborgt werden konnte. Dieser Lasertracker trägt die Bezeichnung AT960 und erreicht den technischen Spezifikationen des Herstellers [Hexagon Metrology, 2015] zufolge eine Winkel-messgenauigkeit von $15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}$ und eine Distanzmessgenauigkeit von $0.5 \mu\text{m}$. Mit beiden Lasertrackern werden 10 durch Wandkonsolen stabilisierte Punkte im Messkeller mit dem Kugelreflektor gemessen. Die Messungen der Punkte erfolgt im jeweils eigenen Koordinatenrahmen. In der Software **SpatialAnalyzer** kann folgend eine Transformation zwischen den beiden Koordinatenrahmen anhand der 10 Identpunkte berechnet werden. Die Unterschiede der transformierten Punkte des LTD800 und der als Referenz betrachteten Punkte des AT960 betragen maximal 0.050 mm bzw. 0.034 mm RMS-Fehler. Einen Hauptbeitrag liefert dabei die z-Komponente der Punkte, wahrscheinlich weil die Punkte sich besser in x- und y-Richtung verteilen, da diese Achsen nahezu die Ebene des Messkellers repräsentieren, während die z-Achse durch die Raumhöhe und durch die Konsolen, die auf nur zwei unterschiedlichen Höhen montiert sind, beschränkt ist.

Wichtig ist auch noch die Betrachtung des Maßstabes der Transformation, ein von Eins abweichender Wert könnte durch einen Distanzmessfehler entstehen. Die Angabe von **SpatialAnalyzer** ist mit sechs Nachkommastellen gegeben, dabei ist keine Abweichung festzustellen.

Damit bestätigen sowohl die Differenzwerte der Punkte als auch der Maßstab der Transformation die Angaben der beiden Lasertracker. Dies bestätigt die theoretischen Annahmen im stochastischen Modell.

5.2 Messaufbau

Der Aufbau der Messung ist in Abb. 5.5 zu sehen, links im Bild der Lasertracker mit Bedieneinheit im Hintergrund, rechts der Roboterarm, montiert auf einem Aluminiumtisch, in dessen Ablage die Steuerungseinheit untergebracht ist. Die Bedienung des Lasertrackers erfolgt mit dem abgebildeten Laptop und der Software **SpatialAnalyzer**, die des Roboterarmes mit einem Desktop-Computer und dem Framework ROS. Der Touchscreen des Roboterarmes wird grundsätzlich nicht gebraucht, befindet sich für den Notfall in der Nähe des Bedieners, um einen Notstopp ausführen zu können. Der Lasertracker und die Basis des Roboterarmes sind etwa drei Meter voneinander entfernt.

5.3 Eigenschaften des Endeffektors

Die der Endeffektor-Translation zugeordneten Parameter x_E, y_E, z_E werden in der Ausgleichung nicht bestimmt, sie werden jedoch für die Vorwärtskinematik gebraucht und fließen somit als



Abb. 5.5: Messaufbau im Messkeller

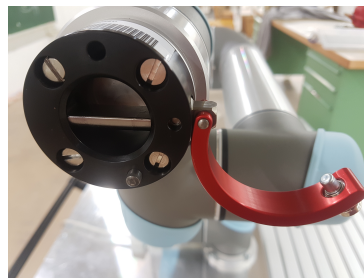
Konstante in die Ausgleichung ein. Damit können auch keine Genauigkeitsmaße für diese Parameter angegeben werden. Diese Parameter sollten mit einer Standardabweichung von maximal 0.2 mm eingeführt werden, da sich etwaige Fehler in anderen Parametern niederschlagen könnten. Es ist daher notwendig, für den tatsächlichen Messaufbau eine mechanische Verbindung vom Roboterflansch zum Kugelreflektor zu finden, die diesem Genauigkeitsbereich entspricht.

Für die Anwendung des dynamischen Kalibrierungsmodells ist außerdem die Masse und der Schwerpunkt des Endeffektors zu bestimmen.

5.3.1 Technische Komponenten



(a) geschlossen



(b) geöffnet



(c) Gegenstück

Abb. 5.6: Schnellverschlussadapter

Für den verwendeten Roboterarm UR5 gibt es einen Schnellverschlussadapter (Abb. 5.6), dieser besteht aus zwei Teilen. Der eigentliche Verschluss wird direkt am Roboterflansch montiert, die Montage erfolgt mittels vier Schrauben. Das Gegenstück kann an verschiedenen Endeffektoren angebracht werden, sodass schnell zwischen ihnen gewechselt werden kann.



Abb. 5.7: Kugelreflektor

Abb. 5.8: Wandpunktnest⁵

Um den Kugelreflektor (Abb. 5.7) präzise verwenden zu können, wird ein sogenanntes Wandpunkt nest (Abb. 5.8) verwendet. Dieses Nest ist zylindrisch aufgebaut, wobei es am planen Ende beispielsweise an einer Konsole mithilfe eines Senkkopfschraubens fixiert werden kann. Am anderen Ende wird ein starker Magnet eingesetzt, der den Kugelreflektor halten kann. Durch den innenliegenden Konus wird der Kugelreflektor zentriert. Der Hersteller des Wandpunkt nestes gibt den Abstand vom planen Ende bis zum oberen Kugelende des Reflektors mit 69.05 mm an. Der Radius des Kugelreflektors beträgt 19.05 mm, daher kann der Abstand vom planen Ende bis zum Kugelmittelpunkt, der den Messpunkt des Lasertrackers darstellt, mit 50 mm beziffert werden.



(a) Vorderseite



(b) Rückseite

Abb. 5.9: Adapterplatte aus Aluminium

Als Verbindungsstück zwischen dem Schnellverschluss und dem Wandpunkt nest wird eine 5 mm dicke Adapterplatte (Abb. 5.9) verwendet. In der 185 mm langen und 80 mm breiten Platte aus Aluminium sind gefaste Löcher mit unterschiedlichen Durchmessern ausgebohrt, außerdem ragen eine 5 mm dicke Scheibe sowie ein Zapfen an einer Seite hervor. Durch die Scheibe wird das Gegenstück des Schnellverschlusses zentriert und mit dem Zapfen gegen Verdrehen gesichert. Das Gegenstück wird dann mit vier passgenauen Schrauben sowie Muttern und Beilagscheiben an der Adapterplatte mechanisch starr verbunden.

Eine Herausforderung stellt die Befestigung des Wandpunkt nestes an der Adapterplatte dar.

⁵Quelle: <https://arxgeometres.de/produkte/messadapter/wandpunkt nest-1-fuer-1-5-reflektor>, abgerufen am 16.07.2019

Da zur Befestigung des Nests ein Senkkopfschrauben verwendet werden muss und keines der Löcher in der Adapterplatte mit einem Gewinde versehen ist, muss eine Mutter zur Befestigung benutzt werden.

5.3.2 Bestimmung der Endeffektor-Translation aus theoretischen Abschätzungen

Da sämtliche Abmaße der verwendeten Komponenten bekannt sind, können diese in den Koordinatenrichtungen des Roboterflanschrahmens sehr trivial aufsummiert werden. Es ist aber zu bedenken, wie genau die einzelnen Komponenten hergestellt wurden und ob die Reproduzierbarkeit bei erneutem Anbringen der Komponenten im geforderten Genauigkeitsbereich gegeben ist.

Die Wiederholgenauigkeit des Schnellverschlusses wird vom Hersteller mit 0.02 mm angegeben [Grip, 2016]. Die Fräsgenauigkeit der Adapterplatte wird mit 0.005 mm und die Reproduzierbarkeit der Kugelreflektorposition des Wandpunktneustes mit 0.01 mm abgeschätzt. Der Radius des Kugelreflektors ist mit einer Genauigkeit von 0.0025 mm gegeben [Leica Geosystems, 2011].

Das schwächste Glied in der Kette stellt definitiv die Befestigung des Wandpunktneustes an der Adapterplatte dar. Um den gegebenen Lochabstand verwenden zu können, muss sich das Wandpunktneust über Schraube und Mutter im geforderten Genauigkeitsbereich zentrieren. Dazu muss sich die Schraube sowohl im Wandpunktneust als auch im Loch zentrieren. Ersteres geschieht durch den Senkkopf des Schraubens, zweiteres wird mit einer abgerundete Mutter bewerkstelligt, die sich durch die Fase des Loches zentrieren soll. Damit die Rundung der Mutter in das ausgewählte Loch (Durchmesser 6.6 mm) schlüpft, muss von der für das Wandpunktneust eigentlich vorgesehen Gewindegröße M6 auf M5 übergegangen werden. Der Senkkopf des M5-Schraubens ist weiterhin groß genug, um am Konus des Wandpunktneustes aufzuliegen.

Zur Überprüfung der Zentrierung werden mit dem Lasertracker Messungen durchgeführt. Dazu wird die Adapterplatte am Roboterarm befestigt und der Roboterarm in vier verschiedene Armstellungen bewegt. Bei jeder Armstellung wird das Wandpunktneust an der Adapterplatte befestigt, der Kugelreflektor eingesetzt und mit dem Lasertracker eine fünf Sekunden lange Messung durchgeführt. Dieser Vorgang wird zehn Mal ausgeführt, wobei jedes Mal das Wandpunktneust neu an der Adapterplatte angeschraubt wird. Zusätzlich wird die Adapterplatte ein Mal fix am Robotertisch verschraubt und es erfolgen ebenso zehn Messungen. Die Armstellungen des Roboterarmes sowie die fixe Montage der Adapterplatte sind in Abb. 5.10 zu sehen.

Aus je zehn zusammengehörigen Messungen wird mittels der Software **SpatialAnalyzer** ein Schwerpunkt berechnet und die Distanzen der Messpunkte zum Schwerpunkt beurteilt, die Ergebnisse sind in Tab. 5.1 zu sehen.

Die Erwartung an die Reproduzierbarkeit der Befestigung des Wandpunktneustes kann damit nicht erfüllt werden, die (empirische) Standardabweichung erreicht bereits gerundete Werte zwischen 0.5 und 0.7 mm, die maximalen Abweichungen kommen zwischen 0.8 und 1.1 mm zu liegen. Daher werden weitere Befestigungsmöglichkeiten in Betracht gezogen.

Die erste Veränderung wird dahingehend vorgenommen, dass die Positionen von Schraube

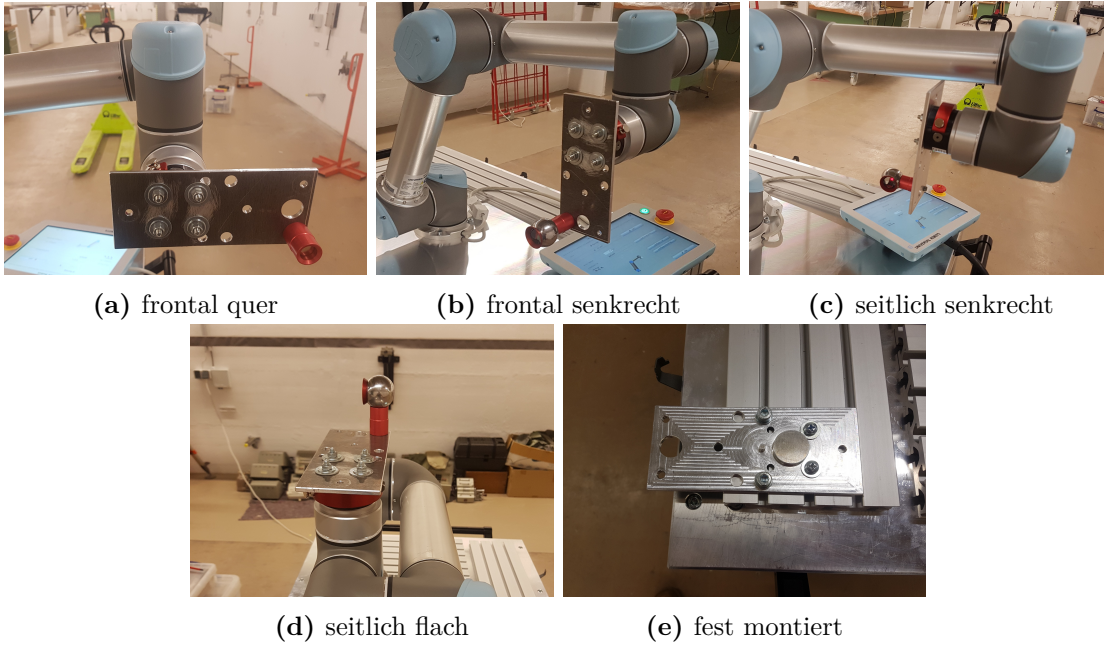


Abb. 5.10: Messkonfigurationen zur Überprüfung der Befestigung des Wandpunktnestes

Position Adapterplatte	RMS [mm]	MAX [mm]
frontal quer	0.578	0.950
frontal senkrecht	0.482	0.791
seitlich senkrecht	0.626	0.970
seitlich flach	0.702	1.126
fest montiert	0.663	0.910

Tab. 5.1: Empirische Standardabweichung (RMS) und maximale Abweichung der Messpunkte zum Schwerpunkt

und Mutter vertauscht werden, da die Rundung der Mutter und auch die Fase des Loches wenig ausgeprägt sind. Durch das Tauschen liegt nun die Schräge des Schraubenkopfes besser an der Fase des Loches auf und die Rundung der Mutter kann sich am vergleichsweise großen Konus des Wandpunktnestes zentrieren. Zur Evaluierung dieser Befestigung werden erneut Messungen mit dem Lasertracker durchgeführt, allerdings wird die Fix-Montage der Adapterplatte als repräsentativ genug erachtet. Die Messungen erfolgen einerseits mit einem M5-Gewinde und, da die Mutter nun nicht mehr ins Loch schlüpfen muss, mit einem M6-Gewinde, die Ergebnisse sind in Tab. 5.2 zu sehen. Dabei zeigt sich, dass das Vertauschen die gewünschte Wirkung zeigt, die

Gewindegröße	RMS [mm]	MAX [mm]
M5	0.330	0.592
M6	0.089	0.165

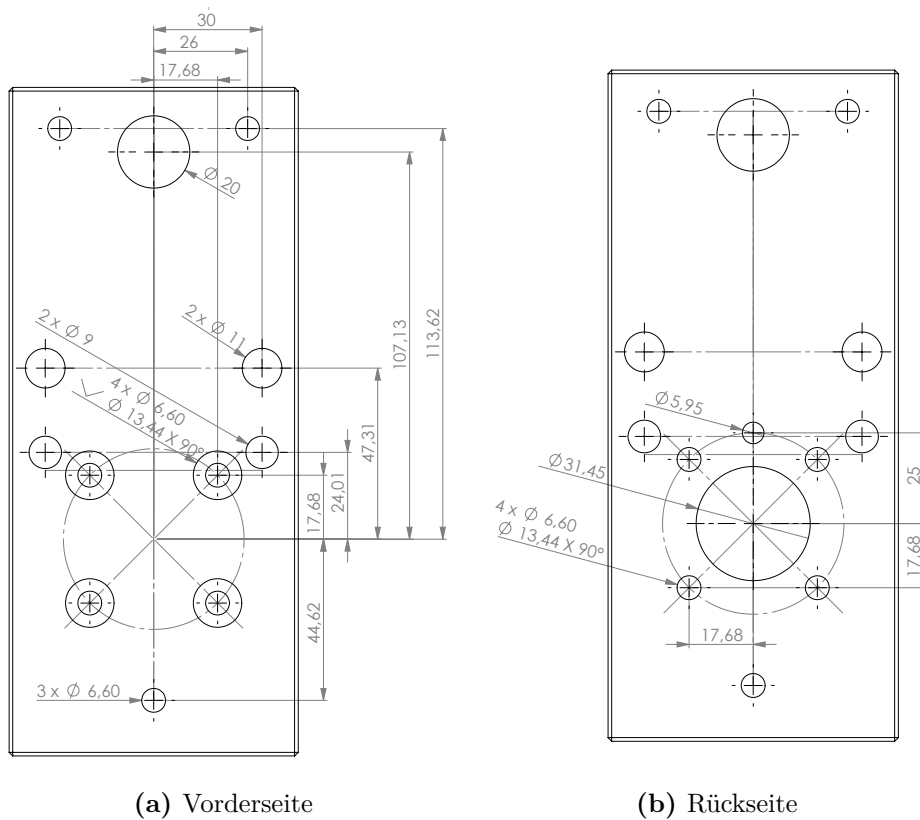
Tab. 5.2: Empirische Standardabweichung (RMS) und maximale Abweichung der Messpunkte zum Schwerpunkt, bei fester Montage der Adapterplatte am Tisch (Abb. 5.10e) und Vertauschen von Schraube und Mutter

Zentrierung erzielt bereits bei der Gewindegröße M5 eine halb so große Standardabweichung und einen um ein Drittel kleineren Maximalwert. Weiters wird festgestellt, dass durch den Umstieg auf eine M6-Schraube die Reproduzierbarkeit der Zentrierung deutlich verbessert werden kann. Eine Begründung kann das kleinere Spiel der M6-Schraube im ausgewählten Loch sein. Darüber hinaus besitzt die M6-Schraube einen etwa 20 mm langen Schaft, der das Spiel sicher weiter verringert. Die entsprechenden Genauigkeitsmaße in Tab. 5.2 kommen im angestrebten Bereich zu liegen.

Damit kann die Endeffektor-Translation den Abstandsangaben aus den jeweiligen Konstruktionsdateien entnommen werden. Die Translationen in x- und y-Richtung werden nur durch das ausgewählte Loch auf der Adapterplatte beeinflusst, sie belaufen sich nach Abb. 5.11 auf 26.00 mm und 113.62 mm. Diese Größen müssen aufgrund der Lage der Adapterplatte im Flansch-Koordinatenrahmen noch mit einem negativen Vorzeichen versehen werden. Die z-Komponente der Endeffektor-Translation berechnet sich als Summe aus der Höhe des Schnellverschlusses, der Dicke der Adapterplatte, der Höhe des Wandpunktnestes und dem Radius des Kugelreflektors zu 87.00 mm.

5.3.3 Messtechnische Bestimmung der Endeffektor-Translation

Um die theoretischen Überlegungen zu verifizieren, werden Messungen mit dem Lasertracker durchgeführt, um die Endeffektor-Translation zu bestimmen. Dazu wird der Kugelreflektor in das magnetische Wandpunktnest eingesetzt und die Position mit dem Lasertracker bestimmt. Nun muss dieser Punkt in Bezug zum Flansch-Koordinatenrahmen bestimmt werden, dieser Koordinatenrahmen ist dem Lasertracker nicht bekannt, er muss daher ebenso durch Messungen realisiert werden. Die Software „Spatial Analyzer“ bietet zahlreiche Methoden, um einen Koordinatenrahmen an geometrische Objekte (Ebenen, Linien, Punkte, etc.) anzupassen. Zur



(a) Vorderseite

(b) Rückseite

Abb. 5.11: Konstruktionsdatei der Adapterplatte

Realisierung der z-Achse wird die Adapterplatte mit dem Kugelreflektor abgetastet und eine Ebene eingepasst, dessen Normalvektor der z-Achse entspricht. Da der Kugelreflektor sehr stabil in die Löcher der Adapterplatte gehalten werden kann, werden mit mehrmaligen Messungen zwei Punkte bestimmt, die durch zwei gleich große Löcher in der Adapterplatte realisiert werden. Durch diese Punkte wird eine Linie gelegt, die der x-Achse entspricht. Die dritte Achse wird durch die Rechtshandregel gefunden. Als letztes Element des Koordinatenrahmens muss der Ursprung gefunden werden. Dazu wird der Kugelreflektor erneut in das Wandpunktnest eingesetzt und das letzte Gelenk des Roboterarmes um 360° gedreht. Somit beschreibt der Kugelreflektor einen Kreis, der durch die Software eingepasst werden kann. Im letzten Schritt wird der Mittelpunkt dieses Kreises berechnet und auf die Ebene der Adapterplatte projiziert. Dieser projizierte Mittelpunkt dient als Ursprung des Koordinatensystems. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass die maximalen Fehler der Einpassung der Ebene und des Kreises bei 0.01 mm zu liegen kommen, ebenso genau ist die Mittelwertbildung der Punkte, die die Löcher repräsentieren. Die messtechnische Bestimmung der Endeffektor-Translation ergibt -26.08 mm in x-Richtung und -114.04 mm in y-Richtung. Der z-Wert wird nicht angegeben, da er nur dem Abstand von der Adapterplattenoberfläche entsprechen würde.

Allerdings setzt auch die messtechnische Bestimmung einige Annahmen voraus: Die Zentrierung der Adapterplatte am Schnellverschluss sowie am Flansch muss gewährleistet sein, damit durch die Rotation des letzten Gelenks der Koordinatenursprung gefunden werden kann. Die

Längs- und Querrichtung der Adapterplatte müssen der x- und y-Achse des Flansch-Koordinatenrahmens entsprechen, d.h. die Adapterplatte darf keinesfalls verdreht sein. Die gemessenen Löcher müssen der Querrichtung bzw. der y-Achse entsprechen.

5.3.4 Bestimmung der Endeffektor-Translation durch Ausgleichung

Da die Werte aus den theoretischen Überlegungen und die Werte aus der messtechnischen Bestimmungen eine doch große Diskrepanz aufweisen, kann schwer beurteilt werden, welche der Werte für die Endeffektor-Translation genommen werden sollen.

In einer externen Ausgleichung nach dem Gauß-Helmert-Modell werden daher die Komponenten der Translation bestimmt, als Messgrößen werden Positionen des Kugelreflektors bei verschiedenen Armstellungen genutzt, einerseits mit dem Lasertracker gemessen und andererseits durch die Software des Roboterarmes berechnet. Die Ausgleichung schätzt neben der Endeffektor-Translation auch die Transformationsparameter zwischen Lasertracker und Basis des Roboterarmes. Die berechneten Werte für die Endeffektor-Translation sind -26.32 , -113.98 und 86.82 mm in x-,y- und z-Richtung.

5.3.5 Masse und Schwerpunkt des Endeffektors

Die Masse des Endeffektors wurde einerseits den Datenblättern der einzelnen Komponenten (siehe Kap. 5.3.1) entnommen und andererseits mit einer Waage gewogen. Der Schwerpunkt des Endeffektors ist in einem Konstruktionsprogramm berechnet worden, indem den einzelnen Komponenten Masse bzw. Dichte zugewiesen worden sind. Die Werte des Schwerpunktes des Endeffektors beziehen sich auf den Roboterflansch-Koordinatenrahmen. Zur Berechnung des Drehmoments wird das letzte Glied und der Endeffektor als ein Körper betrachtet, da sie starr verbunden sind und keine Verdrehung zueinander aufweisen können. Masse und Schwerpunktkoordinaten werden daher addiert.

Die Masse des verwendeten Endeffektors beträgt 0.7890 kg und der Schwerpunkt wird mit dem Vektor $\mathbf{s}_E = (-0.01345, -0.07299, 0.05813)^T$ im Koordinatenrahmen des Roboterflansches angegeben.

5.4 Berechnung möglicher Armstellungen

Der Roboterarm kann grundsätzlich jedes Gelenk zwischen -360 und 360 Grad bewegen, es muss allerdings gewährleistet sein, dass der Roboterarm nicht mit sich selbst oder etwaigen Gegenständen kollidiert. Eine große Einschränkung stellt sicherlich der 100 cm lange und 78 cm breite Aluminiumtisch dar, auf dem der Roboterarm mittig montiert ist. Auch die am Flansch montierte Adapterplatte mit dem Wandpunktnest darf bei keiner Bewegung des Roboters eine Kollision verursachen. Zusätzlich ist auch nicht jede Bewegung des Roboterarmes möglich, Singularitäten stellen hierbei das größte Problem dar. Eine Singularität tritt entweder dann auf, wenn zu einer für den Endeffektor gegebenen Position im Raum die inverse Kinematik eine unendliche Anzahl an Gelenkwinkel eine Lösung liefert oder aber dann, wenn bei einer Bewegung

ein oder mehrere bestimmte Gelenke mit unendlicher Geschwindigkeit bewegt werden müssten. Zum besseren Verständnis hilft es, sich ein Radioteleskop vorzustellen, das sich in Azimuth und Elevation bewegen kann. Verfolgt dieses Radioteleskop eine Quelle und bewegt sich diese im Zenit über das Radioteleskop, so müsste es sich plötzlich mit enorm hoher Geschwindigkeit azimuthal drehen. Das Radioteleskop würde dem nicht nachkommen und bricht daher die Verfolgung ab. Ebenso bricht die Steuerung des Roboterarmes solch eine Bewegung ab.

Jede Armstellung des Roboterarmes besteht aus sechs Gelenkwinkeln. Im ersten Schritt werden einige hundert zufällige Armstellungen - seien sie auch physisch nicht möglich - berechnet. Da der Robotertisch vor allem das zweite Gelenk einschränkt, werden für dieses Gelenk die Zufallswerte im Intervall $[-183, 3]^\circ$ beschränkt, für alle anderen Gelenke wird der volle Bewegungsumfang genutzt.

Die so berechneten Armstellungen werden in ein Python-Skript eingeführt. Dieses Skript bindet eine RoboDK-Programmierschnittstelle ein, dass eine Vielzahl von Funktionen beinhaltet. Das Programm RoboDK muss dazu gestartet und der verwendete Roboterarm geladen sein. Zusätzlich bietet RoboDK die Möglichkeit, Konstruktionsdateien einzubinden. Sowohl der Aluminiumtisch mit all seinen Anbauten als auch sämtliche Komponenten des Endeffektors (siehe Kap. 5.3.1) stehen als solche Dateien zur Verfügung bzw. werden in einem externen Konstruktionsprogramm erstellt und dem Roboterarm hinzugefügt. Der gesamte Aufbau bezüglich des Roboterarmes kann somit in RoboDK konzipiert werden, er ist in Abb. 5.12 dargestellt. Bei Einbindung der

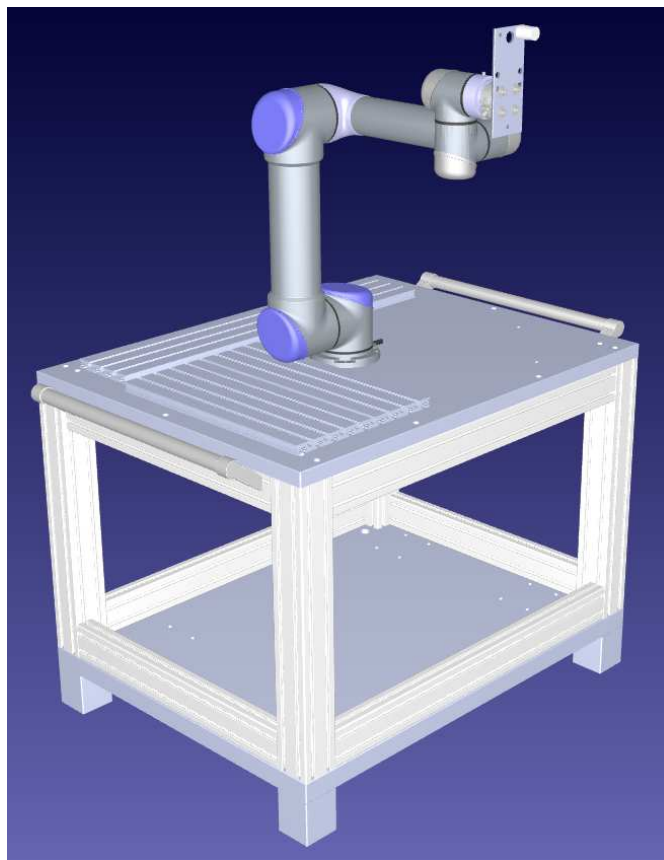


Abb. 5.12: Roboterarm-Messaufbau in RoboDK

Konstruktionsdateien ist außerdem darauf zu achten, dass die sogenannte Kollisionsmaske richtig eingestellt wird. Die Kollisionsmaske legt fest, welche aller einzelnen Teile mit den jeweils anderen kollidieren dürfen. Aufeinanderfolgende Gelenke bzw. Glieder des Roboterarms müssen sich beispielsweise berühren dürfen, da sie ja formschlüssig verbunden sind, während die Berührung eines Gelenkes mit dem Montagetisch unerwünscht ist.

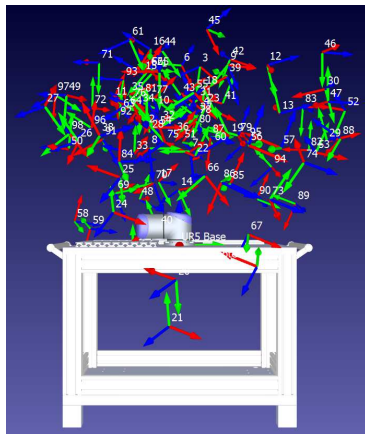
Nun werden alle vorhin zufällig erstellten Armstellungen am Roboterarm über die Gelenkwinkel eingestellt und überprüft, ob eine Kollision vorliegt. Alle kollisionsfreien und damit physisch möglichen Armstellungen werden für die weitere Berechnung herangezogen. Die Anzahl der überhaupt möglichen Armstellungen reduziert sich bei diesem Vorgang auf ungefähr die Hälfte.

Es folgt der schwierige Schritt, einen Bewegungsablauf für den Roboterarm zu finden, der möglichst viele der Armstellungen inkludiert, aber keine Singularitäten verursacht. Grundsätzlich gibt es zwei Bewegungsarten des Roboterarmes:

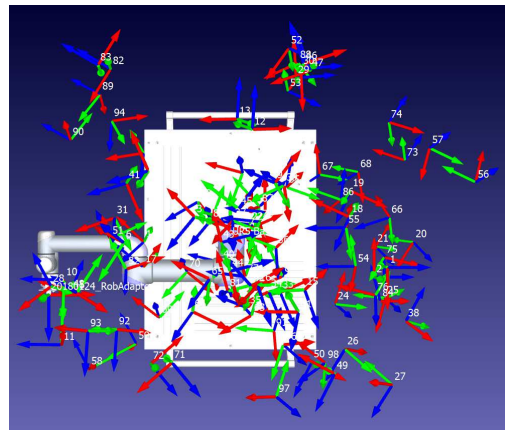
- Die **lineare Bewegung** wird vor allem dann genutzt, wenn der Endeffektor eine möglichst kurze und zeitsparende Bewegung bewerkstelligen soll. Die Linie zwischen der momentanen und gewünschten Pose ist für die Bewegung ausschlaggebend. Die lineare Bewegung wird z.B. sehr stark in automatisierten Produktionsabläufen verwendet, bei denen die schnellste und damit kostengünstigste Bewegung wichtig ist. Das Auftreten von Singularitäten ist dabei häufiger, da die Einschränkungen durch die Gelenke nicht beachtet werden.
- Die **Gelenks-Bewegung** hingegen berücksichtigt nicht den Endeffektor, sondern die Gelenke und deren Drehbereich. Die Bewegung erfolgt so, dass sie am „komfortabelsten“ für die Gelenke ist, sie ist auch im Sinne des Stromverbrauchs effektiver. Während der Bewegung treten weniger Singularitäten auf, jedoch vollführt der Endeffektor viel mehr Bewegung. Dies ist vor allem dann ein Nachteil, wenn eine dauernde Sichtverbindung einer externen Messtechnik zum Endeffektor von Nöten ist.

Eine Sichtverbindung vom Lasertracker zum Kugelreflektor ist bei der Messung grundsätzlich nicht notwendig, erleichtert aber den Messvorgang, weil das erneute Messen des Initialabstandes entfällt. Da aber der Kugelreflektor während der Bewegung aus dem Wandpunkt nest genommen wird und somit die Sichtverbindung zum Lasertracker gewährleistet ist, kann auf eine lineare Bewegung verzichtet werden. Es wird daher eine Folge von Armstellungen gesucht, die mit einer Gelenks-Bewegung vollführt werden können. Dazu wird eine logische Matrix mithilfe von Python und der RoboDK-Schnittstelle erstellt, die jede Bewegung zwischen jeweils zwei der physisch möglichen Armstellungen testet. Sollten Singularitäten oder Kollisionen auftreten, so wird dieser Bewegung logisch falsch zugeordnet. Mithilfe dieser Matrix wird dann, ausgehend von der Grundstellung des Roboterarmes (Gelenkwinkel: $0, -90, -90, 0, 90, 0$) die längste mögliche Abfolge von Armstellungen gesucht. Als Gegenprobe wird diese Abfolge nochmals mit dem Roboterarm in RoboDK abgefahren, zusätzlich werden dabei die Endeffektor-Posen visualisiert.

Eine einfache Methode die Anzahl an Armstellungen zu erhöhen ist, im letzten Gelenk eine Rotation einzuführen. Dabei entsteht eine völlig andere Position des Kugelreflektors im Raum mit wenig Bewegungsaufwand des Roboterarmes. Es bedarf natürlich einer Überprüfung, ob



(a) Aufriß



(b) Grundriß

Abb. 5.13: Endeffektor-Posen der für die Messung verwendeten Armstellungen

diese Drehung im letzten Gelenk eine Kollision oder eine Singularität verursacht. Sollte dies nicht der Fall sein, kann sehr einfach eine weitere Armstellung der Abfolge hinzugefügt werden. Bevor sich der Roboterarm zur nächsten vorgesehenen Armstellung weiterbewegt, wird das letzte Gelenk wieder in seine Ausgangsposition zurückgedreht.

Jene Auswahl an Armstellungen, die auch physisch möglich sind und vom Roboterarm nacheinander angefahren werden können, sind in Anhang A zusammengefasst. Die zugehörigen Endeffektor-Posen sind in Abb. 5.13 zu sehen. Da bei der Berechnung der Armstellungen die Position des Lasertrackers in Bezug auf den Roboterarm außer Acht gelassen wurde, können aus dieser Auswahl 21 Armstellungen nicht gemessen werden. Sie werden im Messprozedere zwar vom Roboterarm angefahren, bei der Messung mit dem Lasertracker aber ausgelassen.

5.5 Ergebnisse

Für die Parameterschätzung mit den tatsächlich gemessenen Daten werden jene Gelenkwinkel als Konstanten eingeführt, die von der Steuerungseinheit des Roboterarms aufgezeichnet werden. Der Aufzeichnung erfolgt mit 200 Hertz, diese Werte werden für jede Pose des Roboterarms gemittelt. Die gemittelten Gelenkwinkel werden auch als Eingangsgrößen für die Berechnung der Drehmomente im dynamischen Kalibrierungsmodell verwendet.

Als Näherungswerte für die DH-Parameter dienen die Werte des Herstellers, die im oberen Teil von Tab. 4.1 angeführt sind. Um Näherungswerte für die Transformation zwischen Lasertrackerrahmen und Roboterbasisrahmen zu finden, werden mit dem Lasertracker Punkte des Robotertisches gemessen und anhand dieser Punkte in der Software `SpatialAnalyzer` ein Koordinatenrahmen erstellt, der dem Basisrahmen des Roboterarms entspricht. Die Translation und Rotation dieses Koordinatenrahmens kann dann im Koordinatenrahmen des Lasertrackers ausgedrückt werden, sie sind in Tab. 5.3 angeführt. Die in der Parameterschätzung verwendeten Werte für die Endeffektor-Translation sind jene, die in Kap. 5.3.4 bestimmt wurden, auch sie werden als Konstanten eingeführt. Bei Verwendung des dynamischen Kalibrierungsmodelles wer-

	r_x [°]	r_y [°]	r_z [°]	t_x [m]	t_y [m]	t_z [m]
T_{LT}^0	-0.013	0.869	30.457	3.206 242	0.441 931	-0.632 922

Tab. 5.3: Näherungswerte für die Transformation T_{LT}^0 im tatsächlichen Messaufbau

den Näherungswerte für die Steifigkeitsparameter benötigt. Da keine Informationen seitens des Herstellers vorliegen und die Werte als sehr klein erwartet werden, werden die Näherungswerte mit Null angenommen.

Jene Parameter, die voneinander linear abhängen und Singularitäten verursachen, werden vorab aus der Parameterschätzung entfernt. Diese Parameter sind in Kap. 4.4.5 angeführt.

5.5.1 Kinematische Kalibrierung

Die ausgeglichenen Parameter der kinematischen Kalibrierung (Tab. 5.4) sind einerseits die DH-Parameter, wobei fünf der 24 Parameter ausgeschlossen wurden, da sie bei der Schätzung Singularitäten verursachen würden, und andererseits die Transformationsparameter zwischen den Koordinatenrahmen des Lasertrackers und der Roboterbasis. Die zugehörigen Genauigkeiten sind in Tab. 5.5 angeführt, für die aus der Schätzung entfernten Parameter kann keine Genauigkeit angegeben werden. Vor allem bei den Winkelgrößen sind die Genauigkeiten als groß einzustufen, die der Distanzgrößen sind zufriedenstellender. Die Erwartung an die Genauigkeiten kann jedoch nicht erfüllt werden, auch die Simulation ließ bessere Werte erwarten.

Es stellt sich nun die Frage, welche der Parameter sich signifikant von ihrem Nominalwert verändert haben, dazu wird der Parametertest durchgeführt. Als signifikant verändert werden dabei die Parameter $\delta\theta_4$, α_1 , α_2 , α_3 , a_1 , a_2 , a_3 , d_4 , d_5 , d_6 , r_z , t_x und t_z eingestuft, bei allen anderen Parametern kann der Werteunterschied im Sinne der Genauigkeit als zufällig erachtet werden.

	T_{i-1}^i	$\delta\theta_i$ [°]	α_i [°]	a_i [m]	d_i [m]
	1	0	90.018	0.000 215	0.089 159
	2	0.008	-0.021	-0.425 405	0
	3	0.006	0.258	-0.392 389	0
	4	0.071	89.990	-0.000 004	0.110 330
	5	0.023	-90.000	0.000 055	0.094 882
	6	0	0.021	0.000 032	0.082 517

	r_x [°]	r_y [°]	r_z [°]	t_x [m]	t_y [m]	t_z [m]
T_{LT}^0	-0.002	0.879	30.443	3.204 556	0.441 864	-0.633 332

Tab. 5.4: Asugeglichene Parameter - kinematisches Modell

	T_{i-1}^i	$\delta\theta_i$ ["]	α_i ["]	a_i [mm]	d_i [mm]
	1	-	23.73	0.059	-
	2	30.50	19.93	0.038	-
	3	39.00	39.07	0.038	-
	4	54.80	47.74	0.044	0.063
	5	81.61	89.59	0.074	0.079
	6	-	81.92	0.030	0.060

	r_x ["]	r_y ["]	r_z ["]	t_x [mm]	t_y [mm]	t_z [mm]
T_{LT}^0	31.73	19.40	13.72	0.061	0.109	0.072

Tab. 5.5: Genauigkeiten der ausgeglichenen Parameter - kinematisches Modell

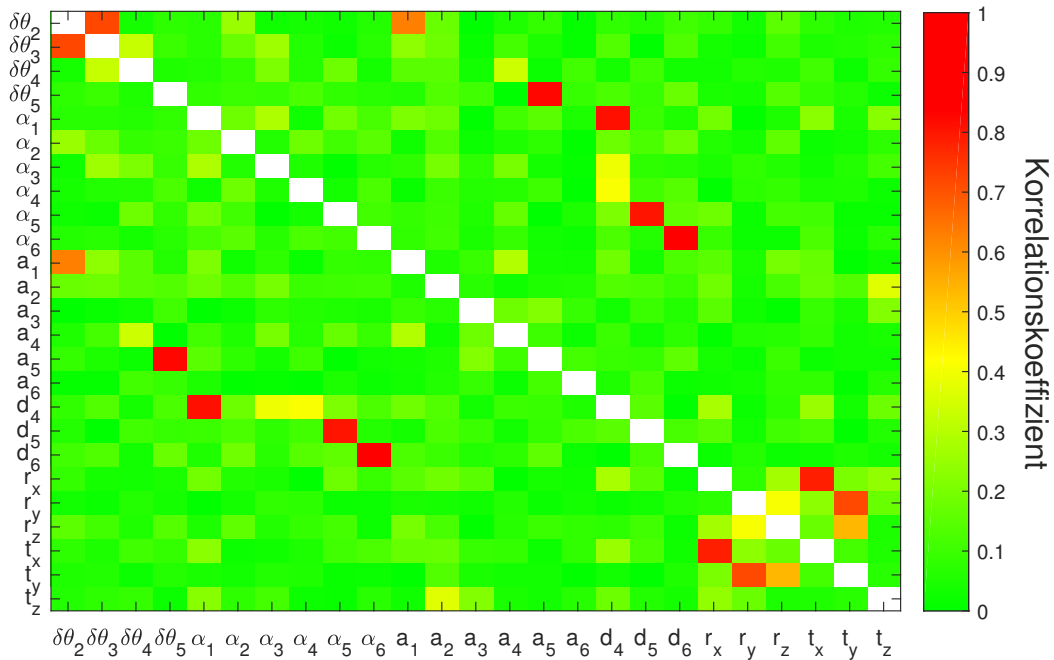


Abb. 5.14: Korrelationen kinematisches Modell - Messdaten

Korrelation zwischen		Korrelationskoeffizient
α_5	d_5	0.88
$\delta\theta_5$	a_5	0.85
α_1	d_4	0.83
r_x	t_y	0.77
α_6	d_6	0.72
$\delta\theta_2$	a_1	0.70
$\delta\theta_2$	$\delta\theta_3$	0.69
r_y	t_x	0.55

Tab. 5.6: Korrelationskoeffizienten ($\rho > 0.5$) der ausgeglichenen Parameter - kinematisches Modell

Abb. 5.14 visualisiert die Korrelationen der ausgeglichenen Parameter, die entsprechenden Zahlenwerte sind in Tab. 5.6 gelistet. Die stärksten Korrelationen treten bei den DH-Parametern der Transformation \mathbf{T}_4^5 auf. Interessanterweise ist in beiden Fällen eine Winkelgröße mit einer Distanzgröße korreliert, eine getrennte Bestimmung ist nicht möglich. Dieses Phänomen tritt bei fast allen Korrelationen auf, eine Ausnahme bildet nur das Korrelationspaar $\delta\theta_2 - \delta\theta_3$. Da von kleinen Änderungen der Parameter ausgegangen werden kann, scheint es, dass durch die Geometrie des Roboterarmes bedingt, oftmals eine Änderung eines Winkels durch eine Distanzänderung ersetzt werden könnte (und umgekehrt). Folglich sind die entsprechenden Parameter stark korreliert. Am leichtesten vorstellbar ist das bei der Korrelation zwischen α_1 und d_4 unter erneuter Betrachtung von Abb. 2.2, die die Koordinatenrahmen des Roboterarmes zeigt. α_1 beschreibt den Winkel zwischen den Achsen z_0 und z_1 um die Achse x_1 . Eine kleine Änderung dieser Größe kann auch durch eine Änderung von d_2 bewirkt werden. Da aber nur die Summe aus d_2 , d_3 und d_4 schätzbar ist und in Kap. 4.4.5 d_4 als bestimmender Parameter festgelegt wurde, kann sich eine Änderung von α_1 auch in einer Änderung von d_4 abbilden. Bei den anderen korrelierten Größen gilt das gleiche, auch wenn es oft schwierig fällt, sich das in der Geometrie des Roboterarmes vorzustellen. Die Korrelation zwischen $\delta\theta_2$ und $\delta\theta_3$ rührt offenbar aus den parallel definierten Drehachsen der Gelenke. Eine getrennte Bestimmung der Nulllagenfehler ist dann nicht möglich.

Die Testgröße des Globaltests berechnet sich zu 1179.05. Sie liegt weit außerhalb des von den Quantilen vorgegebenen Bereichs, die sich zu 0.81 und 1.20 berechnen. Es kann daher auf einen Fehler im stochastischen oder funktionalen Modell geschlossen werden. Ein Fehler im stochastischen Modell kann ausgeschlossen werden, da sowohl der Lasertracker überprüft

wurde und damit seine stochastischen Werte bestätigt wurden (siehe Kap. 5.1.3) als auch in der Simulation die korrekte Implementierung des stochastischen Modells verifiziert wurde. Ebenso wird die Implementierung des funktionalen Modells mithilfe der Simulation kontrolliert. Es kann daher die Schlussfolgerung gezogen werden, dass das kinematische Kalibrierungsmodell dem Roboterarm nicht entspricht.

5.5.2 Dynamische Kalibrierung

Die ausgeglichenen Parameter der dynamischen Kalibrierung sind in Tab. 5.7 ersichtlich. Gegenüber dem kinematischen Modell gibt es keine eklatant auffälligen Veränderungen, oft sind es nur Hundertstel- oder gar Tausendstelgrad bzw. Hundertstelmillimeter, nur a_2 und a_3 ändern sich um einige Zehntelmillimeter. Die geometrischen Parameter bestimmen sich also zu sehr ähnlichen Werten. Auch die dynamischen Parameter, also die Steifigkeitsparameter, sind in Tab. 5.7 angeführt. Sie wurden jeweils für die Gelenke 2 und 3 bzw. 4, 5 und 6 in einem ähnlichen Größenbereich erwartet, da in diesen Gelenken jeweils gleiche Getriebe verbaut sind. Die Gelenke nahe der Basis erfüllen diese Erwartung, die Gelenke Richtung Roboterflansch allerdings nicht, vor allem λ_6 ist um ein bis zwei Potenzen größer als die anderen beiden. Obwohl in diesem sechsten Gelenk die Drehmomente nicht so groß sind wie in den anderen Gelenken, berechnen sich die Winkelgrößen, die dann additiv an den Gelenkwinkel angebracht werden, doch zu einigen Hundertstelgrad, maximal zu knapp einem Zehntelgrad. Diese großen Werte entstehen vermutlich dadurch, dass λ_6 den Nulllagenfehler $\delta\theta_6$ kompensiert, der in der Parameterschätzung entfernt werden muss.

	T_{i-1}^i	$\delta\theta_i$ [°]	α_i [°]	a_i [m]	d_i [m]	λ_i [Rad/Nm]
1		0	90.021	0.000 125	0.089 159	-
2		-0.002	-0.017	-0.425 162	0	1.3×10^{-5}
3		0.008	0.259	-0.392 283	0	1.1×10^{-5}
4		0.070	89.988	0.000 001	0.110 315	5.3×10^{-5}
5		0.031	-89.994	0.000 086	0.094 868	-8.2×10^{-5}
6		0	0.019	0.000 053	0.082 496	1.8×10^{-3}
	r_x [°]	r_y [°]	r_z [°]	t_x [m]	t_y [m]	t_z [m]
T_{LT}^0	0.001	0.879	30.445	3.204 569	0.441 881	-0.632 897

Tab. 5.7: Ausgegliche Parameter - dynamisches Modell

Die Genauigkeiten der ausgeglichenen Parameter im dynamischen Kalibrierungsmodell sind in Tab. 5.8 zu finden, sie sind den Werten des kinematischen Modells sehr ähnlich. Für die aus der Parameterschätzung entfernten Werte kann keine Genauigkeit angegeben werden. Bei den Steifigkeitsparametern fällt auf, dass λ_3 , λ_4 und λ_5 im Vergleich zu ihrem Parameterwert mit schlechter Genauigkeit bestimmt werden.

Der Parametertest zeigt eine signifikante Veränderung der ausgeglichenen Werte im Vergleich zu ihrem Nominalwert bei den Parametern $\delta\theta_4$, α_1 , α_2 , α_3 , a_1 , a_2 , d_4 , d_5 , d_6 , r_z , t_x , λ_2 und λ_6 . Dies entspricht nur etwa einem Drittel der Parameter. Hinsichtlich der Steifigkeitsparameter bedeutet das, dass man die Werte für λ_3 , λ_4 und λ_5 als zufällig im Sinne ihrer Genauigkeit erachten muss.

T_{i-1}^i	$\delta\theta_i$ ["]	α_i ["]	a_i [mm]	d_i [mm]	λ_i [Rad/Nm]
1	-	22.98	0.059	-	-
2	30.27	19.37	0.071	-	3.1×10^{-6}
3	37.76	37.18	0.046	-	9.0×10^{-6}
4	53.50	46.22	0.043	0.060	1.2×10^{-4}
5	77.56	88.88	0.070	0.079	2.7×10^{-4}
6	-	78.76	0.029	0.058	9.0×10^{-4}

T_{LT}^0	r_x ["]	r_y ["]	r_z ["]	t_x [mm]	t_y [mm]	t_z [mm]
	30.13	18.73	13.12	0.058	0.103	0.112

Tab. 5.8: Genauigkeiten der ausgeglichenen Parameter - dynamisches Modell

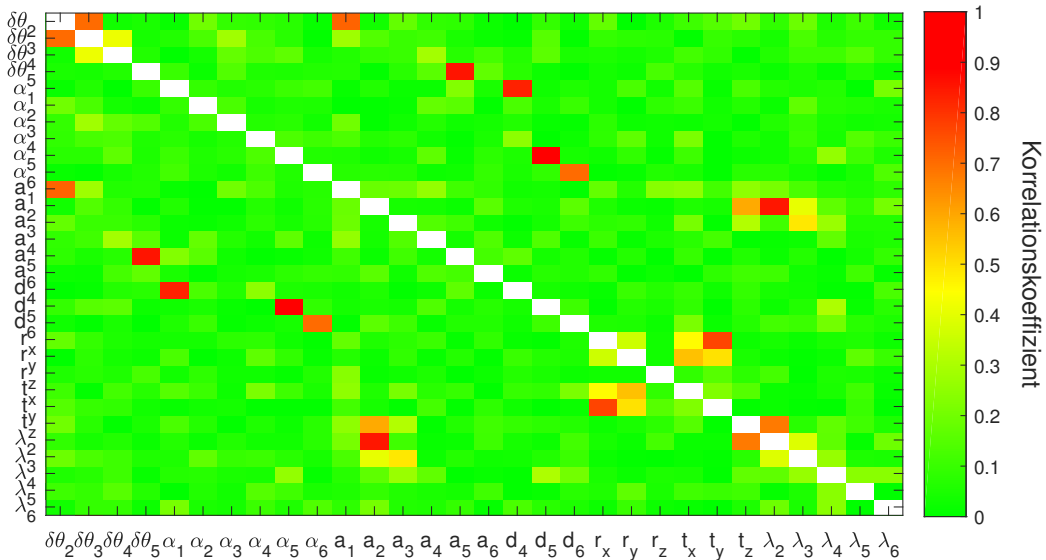


Abb. 5.15: Korrelationen dynamisches Modell - Messdaten

Abb. 5.15 zeigt die Korrelationen der ausgeglichenen Parameter im dynamischen Kalibrierungsmodell. Es zeigt sich ein sehr ähnliches Bild wie bei den Korrelationen im kinematischen Modell (Abb. 5.14). Dennoch gibt es ein paar zusätzliche korrelierte Parameter. Bei Betrachtung der Korrelationskoeffizienten in Tab. 5.9 wird deutlich, dass die Parameter, die im kinematischen Modell korreliert sind, ebenso im dynamischen Modell korreliert sind. Es sind exakt die gleichen

Korrelation zwischen		Korrelationskoeffizient
α_5	d_5	0.89
$\delta\theta_5$	a_5	0.85
a_2	λ_2	0.85
α_1	d_4	0.83
r_x	t_y	0.76
$\delta\theta_2$	a_1	0.71
α_6	d_6	0.70
$\delta\theta_2$	$\delta\theta_3$	0.70
t_z	λ_2	0.67
a_2	t_z	0.59
r_y	t_x	0.55

Tab. 5.9: Korrelationskoeffizienten ($\rho > 0.5$) der ausgeglichenen Parameter - dynamisches Modell

Parameterpaare betroffen, sogar die Koeffizienten unterscheiden sich, wenn überhaupt, nur in der zweiten Nachkommastelle. Dies festigt die in Kap. 5.5.1 getroffene Aussage, dass die Korrelationen durch die Geometrie des Roboterarmes entstehen und nicht vermeidbar sind. Zusätzlich korreliert der Steifigkeitsparameter λ_2 mit a_2 und t_z , die wiederum auch miteinander korreliert sind, was auf eine Korrelation aller drei Parameter schließen lässt.

Als letzte Beurteilungsgröße wird der Globaltest herangezogen. Die Testgröße berechnet sich zu 1054.35, dieser Wert liegt weiterhin weit außerhalb des Bereichs, der von den Quantilen vorgegeben wird, sie berechnen sich zu 0.81 und 1.20. Im Vergleich der Testgröße des dynamischen Modells zur Testgröße des kinematischen Modells kann eine leichte Verbesserung erreicht werden. Die Erweiterung des Kalibrierungsmodells um die Steifigkeitsparameter erzielt jedoch nicht den gewünschten Effekt, der Globaltest zeigt weiterhin eine deutliche Schwäche des funktionalen Modells.

5.6 Nähere Untersuchung der Ergebnisse

Da sowohl das kinematische als auch das dynamische Kalibrierungsmodell einen Fehler des funktionalen Modells aufzeigen, werden noch zwei weitere Ansätze untersucht, um mögliche Fehler zu eruieren. Ein erster Ansatz sind die internen Kalibrierungswerte des Roboterarmes, die vom Hersteller am Gerät gespeichert werden. Der zweite Ansatz beschäftigt sich mit den Gelenken verbauten Encodern. Es stellt sich die Frage, ob die Gelenkwinkel einer Stochastik unterliegen, die aufgrund des Gauß-Markov-Modells nicht in die Parameterschätzung miteinbezogen werden kann.

5.6.1 Interne Kalibrierungswerte des Roboterarmes

Universal Robots führt bei jedem ihrer Roboter vor Auslieferung eine interne Kalibrierung durch, einerseits mit einer speziellen Platte und andererseits mit einem zweiten baugleichen Roboterarm. Die entsprechenden Vorgänge können dem Kalibrier-Handbuch [Universal Robots, 2017] entnommen werden. Die gefundenen Werte werden in Konfigurationsdateien direkt in der Steuerungseinheit des Roboterarmes gespeichert. Eine dieser Konfigurationsdateien enthält Zuschläge für die Nominalwerte der DH-Parameter, sie sind in Tab. 5.10 zu finden. Diese Zuschläge werden

T_{i-1}^i	$\Delta\theta_i$ [°]	$\Delta\alpha_i$ [°]	Δa_i [m]	Δd_i [m]
1	0.0030	-0.0613	0.000 17	0.000 04
2	-80.2427	-0.1254	0.352 95	191.494 27
3	72.2920	0.2512	0.003 77	203.873 60
4	7.9505	-0.0448	0.000 01	12.380 53
5	0.0031	0.0148	0.000 09	0.000 25
6	0.0023	0	0	0.000 28

Tab. 5.10: Zuschläge für die Nominalwerte der DH-Parameter

zu den Nominalparametern addiert und die so neu gewonnenen Werte als Näherungswerte für die Ausgleichung verwendet.

In einem ersten Analyseschritt wird die in Kap. 3.4 beschriebene Singulärwertzerlegung angewendet, um zu überprüfen, ob sich die linearen Abhängigkeiten der Parameter verändern. Tatsächlich verschwindet die lineare Abhängigkeit der Parameter d_2 , d_3 und d_4 , alle drei können in der Ausgleichung geschätzt werden.

Wird nun die Parameterschätzung mit dem dynamischen Kalibrierungsmodell durchgeführt, müssen nur sechs der 38 Parameter entfernt und auf ihren Näherungswert konstant gesetzt werden. Die Testgröße des Globaltest berechnet sich zu 76, dieser Wert stellt eine enorme Verbesserung dar, ist aber immer noch weit von dem durch die Quantile vorgegebenen Bereich entfernt.

Die Zuschläge in Tab. 5.10 sind allerdings äußerst kritisch zu hinterfragen. Sehr auffällig sind die hohen Werte für $\Delta\theta_2$, $\Delta\theta_3$ und $\Delta\theta_4$ sowie für Δd_2 , Δd_3 und Δd_4 . Auch die Zuschläge $\Delta\alpha_2$, $\Delta\alpha_3$, Δa_2 und Δa_3 sind als enorm groß zu bewerten. Es liegt die Vermutung nahe, dass diese Werte aus einer Parameterbestimmung entstammen, die nahe dem Singularitätsbereich ist. Dies wird wie folgt untersucht: Die Parameterschätzung wird mit einer zufälligen Auswahl von 67 Armstellungen durchgeführt, die zehn restlichen Armstellungen dienen zur Validierung. Die Validierung erfolgt durch erneutes Einführen der zehn restlichen Armstellungen bzw. deren Gelenkwinkel in das nicht linearisierte funktionale Modell, wobei die aus der Schätzung gewonnenen

Parameter als Kalibrierparameter verwendet werden. Die Erwartung an die Differenz zwischen den so berechneten Positionen des Kugelreflektors und der durch den Lasertracker gemessenen Position liegt bei 2-3 Hundertstelmmillimeter, also in der Messgenauigkeit des Lasertrackers. Dieser Vorgang des Ausschließens von Armstellungen und anschließender Validierung wird zehn Mal wiederholt. Dabei variiert einerseits die Testgröße des Globaltest nach dem Schätzverfahren zwischen 65 und 85, aber auch die Parameterbestimmung erfolgt jedes Mal unterschiedlich. Die Standardabweichung der Differenzen der berechneten und gemessenen Positionen variiert zwischen 0.07 und 0.1 mm, auch dieser Wert erfüllt nicht die Erwartung.

Eine weitere Festigung der Annahme, dass diese Werte nahe dem Singularitätsbereich liegen, gelingt, wenn die ausgeglichenen Beobachtungen erneut mit der Messgenauigkeit des Lasertrackers verrauscht werden und ein weiteres Mal als Beobachtungen in die Parameterschätzung eingeführt werden. Die Ausgleichung sollte Parameterwerte im Bereich des Rauschens liefern, tatsächlich variieren die ausgeglichenen Parameter aber um einige Meter.

Weiters ist die physikalische Interpretation der Zuschläge nicht mehr gegeben, als Beispiel sei die Länge des zweiten Gliedes a_2 genannt, dies sich durch Addition des angegebenen Zuschlages Δa_2 zu 0.072 m berechnet. Hier reicht das bloße Auge, um zu erkennen, dass dieser Wert nicht dem Roboterarm entspricht.

Der Ansatz mit den in Tab. 5.10 angeführten Zuschlägen wird daher nicht weiter verfolgt, sie stammen offenbar aus einer Parameterbestimmung, deren Ergebnisse nicht weiter hinterfragt werden.

5.6.2 Encoder-Genauigkeit

In jedem Gelenk des Roboterarmes ist ein eigenes Getriebe verbaut, sie entstammen alle der gleichen Baureihe und werden in zwei unterschiedlichen Baugrößen verwendet. In jedem Getriebe ist auch ein Encoder verbaut, über den genauen Aufbau und das Arbeitsprinzip der Encoder gibt es keine Informationen. Diese Encoder registrieren die Gelenkwinkel, also die momentane Winkelstellung der Gelenke, bezogen auf einen Nullpunkt. Die Registrierung der Gelenkwinkel erfolgt mit 200 Hertz.

Das verwendete funktionale Modell führt die Gelenkwinkel als Konstanten ein, damit eine Parameterschätzung im Gauß-Markov-Modell möglich ist, eigentlich entsprechen die Gelenkwinkel aber Beobachtungen. Der Vorteil an Beobachtungen ist, dass für sie eine Stochastik in der Ausgleichung angebracht werden kann. Die Parameterschätzung müsste dann allerdings im Gauß-Helmert-Modell durchgeführt werden, da dann eine Beobachtung nicht mehr nur durch eine Gleichung ausgedrückt werden kann. Da dies ein sehr aufwändig ist und zusätzlich keine Angabe über die Genauigkeit der Encoder vonseiten des Herstellers verfügbar ist, wird auf diesen Schritt verzichtet.

Allerdings kann die Simulation genutzt werden, um zu überprüfen, wie stark die Gelenkwinkel rauschen müssen, sodass der Globaltest eine ähnliche Testgröße wie bei der Auswertung der Messdaten zeigt. Dazu werden um den Erwartungswert Null normalverteilte Werte berechnet, die zu den Gelenkwinkel addiert und so verrauscht werden. Die Standardabweichung der Nor-

malverteilung spiegelt demzufolge die Genauigkeit der Gelenkwinkel wieder. Die Erwartung an die Encoder-Genauigkeit kann mit einigen wenigen Bogensekunden, was etwa einem Tausendstelgrad äquivalent ist, beziffert werden.

Die Simulation im dynamischen Kalibrierungsmodell zeigt, dass die Genauigkeit der Gelenkwinkel zu 2.5 Hundertstelgrad, das entspricht 90 Bogensekunden, gewählt werden muss, damit sich die Testgröße des Globaltest zu 1000 berechnet. Dieser Wert als Encoder-Genauigkeit erscheint allerdings als äußerst unrealistisch und erfüllt die Erwartung bei weitem nicht.

Die nicht modellierte Genauigkeit der Encoder kann die Diskrepanz zwischen Roboterarm und funktionalem Modell nicht vollständig erklären, aber einen Teil dazu beitragen. Denn bei Durchführung der Simulation mit 0.001 Grad als Encoderrauschen kommt die Testgröße mit 2.71 außerhalb des oberen Quantils, das sich zu 1.18 berechnet, zu liegen.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

6 Fazit und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, ein mathematisches Modell zu finden, das der Geometrie des vorgestellten Roboterarmes entspricht. Bei dem gefundenen Modell handelt es sich um ein parametrisches Modell, das neben geometrischen auch dynamische Parameter enthält. Die Kalibrierung dient dazu, diese Parameter zu bestimmen, indem sie den Zusammenhang zwischen dem als Messgerät verwendeten Roboterarm und einem Normal, dem Lasertracker, herstellt.

Die Simulation wurde genutzt, um die Komplexität des Kalibrierungsmodelles zu untersuchen. Durch eine detaillierte Analyse der Modellmatrix mithilfe einer Singulärwertzerlegung ist es gelungen, Parameter zu identifizieren, die voneinander linear abhängen und damit Singularitäten verursachen, die eine Parameterschätzung verhindern. Weiters konnte mit Hilfe der Simulation festgestellt werden, dass eine gleichmäßige Verteilung der Roboterarmposen im Raum unverzichtbar ist, um Korrelationen zwischen Parametern zu reduzieren.

Auf die Qualitätsbeurteilung, das ein souveränes Merkmal der Ingenieurgeodäsie darstellt, wird in dieser Arbeit besonderes Augenmerk gelegt. Neben den Genauigkeiten und Korrelationen von Parametern nach dem Schätzverfahren ist dies auch die Prüfung des zugrundeliegenden Modells durch den Globaltest sowie die Frage nach der Signifikanz der Parameterwerte. In dieser Arbeit rückt vor allem der Globaltest ins Rampenlicht, da er sowohl bei Anwendung des kinematischen als auch des dynamischen Kalibrierungsmodelles Schwächen aufzeigt. Durch eine durchgeführte Überprüfung des verwendeten Lasertrackers und seiner Genauigkeitsangaben, die die Stochastik der Beobachtungen vorgeben, kann diese Schwäche auf das funktionale Modell eingegrenzt werden. Auch weiterführende Untersuchungen hinsichtlich interner Kalibrierungswerte und Encoder-Genauigkeiten konnten das funktionale Modell nicht aufwerten.

Durch die intensive Auseinandersetzung mit dem System Roboterarm konnte ein Verständnis in vielen Thematiken erlangt und vertieft werden. Dies betrifft vor allem die Robotik, Koordinatensysteme und Transformationen, die Parameterschätzung, das Identifizieren von Singularitäten und linear abhängigen Parametern, das Erstellen und Anwenden einer Simulation und nicht zuletzt auch das Implementieren von theoretischen Ansätzen in verschiedener Software und den praktischen Umgang mit Roboterarm und Lasertracker.

Im Zuge dieser Arbeit wurden auch Erkenntnisse gewonnen, die abseits der Kalibrierung eingesetzt werden können. Hier seien beispielsweise der Aufbau und die Eigenschaften des verwendeten Endeffektors oder die Berechnung von zufälligen, physisch möglichen Armstellungen des Roboterarmes, auch bei Verwendung von anderen Endeffektoren, genannt.

Zur Optimierung der Kalibrierung könnte in einem weiteren Schritt auf Basis dieser Arbeit die Parameterschätzung, die derzeit im Gauß-Markov-Modell erfolgt, in einem Gauß-Helmert-Modell formuliert und implementiert werden. Durch dieses Modell könnten die Gelenkwinkel als Beobachtungen und damit als stochastische Größen eingeführt werden. Weiters wäre das Aufstellen von Bedingungen zwischen Beobachtungen möglich, um unter Umständen die Anzahl der Korrelationen zwischen den Parametern zu verringern. Ebenso könnte mit einem anderen Endeffektor von der Position auf die Pose als Messgröße übergegangen werden.

Ein weiterer Gedanke wäre, den Lasertracker als Normal mit einer Referenzgeometrie, zum

Beispiel einem Längsmaßstab oder einer Kugel, zu ersetzen. Es ist aber zu bedenken, dass dies weitreichende Änderungen im gesamten Kalibrierungsmodell zur Folge hätte.

Literatur

- [Bajd et al. 2010] BAJD, T. ; MIHELJ, M. ; LENARČIČ, J. ; STANOVNIK, A. ; MUNIH, M.: *Homogenous Transformation Matrices*. S. 9–22. In: *Robotics*. Dordrecht : Springer Netherlands, 2010
- [Böge 2009] BÖGE, A.: *Federn*. S. 659–678. In: BÖGE, Alfred (Hrsg.): *Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2009
- [Corke 2013] CORKE, Peter: *Robotics, Vision And Control : Fundamental Algorithms In MATLAB*. 2. Edition. Berlin [u.a.] : Springer, 2013 (Springer tracts in advanced robotics)
- [Craig 1989] CRAIG, John J.: *Introduction To Robotics*. 3. Edition. Upper Saddle River, NJ [u.a.] : Pearson Prentice Hall, 1989
- [Denavit und Hartenberg 1955] DENAVIT, J. ; HARTENBERG, R. S.: A Kinematic Notation For Lower-pair Mechanisms Based On Matrices. In: *ASME, Journal of Applied Mechanics* 22 (1955), S. 215–221
- [DIN 1319-1 1995] DIN 1319-1: *Grundlagen der Meßtechnik, Teil 1: Grundbegriffe*. 1995. – Deutsches Institut für Normung
- [Dupuis et al. 2017] DUPUIS, J. ; HOLST, C. ; KUHLMANN, H.: Improving The Kinematic Calibration Of A Coordinate Measuring Arm Using Configuration Analysis. In: *Precision Engineering* 50 (2017), S. 171 – 182
- [Filion et al. 2018] FILION, Alexandre ; JOUBAIR, Ahmed ; TAHAN, Antoine S. ; BONEV, Ilian A.: Robot Calibration Using A Portable Photogrammetry System. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 49 (2018), S. 77 – 87
- [Gattringer 2011] GATTRINGER, Hubert: *Kinematik*. S. 21–39. In: *Starr-elastische Roboter-systeme: Theorie und Anwendungen*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2011
- [Grip 2016] GRIP: *Datenblatt Manuelles Greiferwechselsystem MGW063*, 2016. – GRIP GmbH Handhabungstechnik
- [Hansen 1997] HANSEN, Per C.: *Rank-deficient And Discrete Ill-posed Problems : Numerical Aspects Of Linear Inversion*. Philadelphia : SIAM, 1997
- [Hayati und Mirmirani 1985] HAYATI, S ; MIRMIRANI, M: Improving the absolute positioning accuracy of robot manipulators. In: *Journal of Robotic Systems* 2 (1985)
- [Hexagon Metrology 2015] HEXAGON METROLOGY: *Producte Brochure: Leica Absolute Tracker AT960*, Juli 2015

- [Hollerbach et al. 2008] HOLLERBACH, John ; KHALIL, Wisama ; GAUTIER, Maxime: *Model Identification*. S. 321–344. In: SICILIANO, Bruno (Hrsg.) ; KHATIB, Oussama (Hrsg.): *Springer Handbook of Robotics*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2008
- [Horvath und Neuner 2019] HORVATH, Sabine ; NEUNER, Hans: System Identification Of A Robot Arm With Extended Kalman Filter And Artificial Neural Networks. In: *Journal Of Applied Geodesy* 13 (2019), Nr. 2, S. 135–150
- [Joubair und Bonev 2015a] JOUBAIR, Ahmed ; BONEV, Ilian A.: Kinematic Calibration Of A Six-axis Serial Robot Using Distance And Sphere Constraints. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 77 (2015), Nr. 1, S. 515–523
- [Joubair und Bonev 2015b] JOUBAIR, Ahmed ; BONEV, Ilian A.: Non-kinematic Calibration Of A Six-axis Serial Robot Using Planar Constraints. In: *Precision Engineering* 40 (2015), S. 325 – 333
- [Jäger et al. 2017] JÄGER, Reiner ; MÜLLER, Tilman ; SALER, Heinz: *Klassische Und Robuste Ausgleichungsverfahren: Ein Leitfaden Für Ausbildung Und Praxis Von Geodäten Und Geoinformatikern*. 2. Auflage. Heidelberg : Wichmann, 2017
- [Kahmen 2006] KAHMEN, Heribert: *Angewandte Geodäsie: Vermessungskunde*. 20. Auflage. Berlin [u.a.] : de Gruyter, 2006
- [Leica Geosystems 2003] LEICA GEOSYSTEMS: *Leica Laser Tracker Bedienungsanleitung*, 2003
- [Leica Geosystems 2011] LEICA GEOSYSTEMS: *Metrology Product Catalog*, 2011
- [Mooring et al. 1991] MOORING, Benjamin W. ; ROTH, Zvi S. ; DRIELS, Morris R.: *Fundamentals Of Manipulator Calibration*. New York [u.a.] : Wiley, 1991
- [Niemeier 2008] NIEMEIER, Wolfgang: *Ausgleichsrechnung: Statistische Auswertemethoden*. 2. Auflage. Berlin [u.a.] : de Gruyter, 2008 (De-Gruyter-Lehrbuch)
- [Nubiola und Bonev 2014] NUBIOLA, A. ; BONEV, I.A.: Absolute Robot Calibration With A Single Telescoping Ballbar. In: *Precision Engineering* 38 (2014), Nr. 3, S. 472–480. – cited By 52
- [Nubiola und Bonev 2013] NUBIOLA, Albert ; BONEV, Ilian A.: Absolute Calibration Of An ABB IRB 1600 Robot Using A Laser Tracker. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 29 (2013), Nr. 1, S. 236 – 245
- [Piratelli-Filho et al. 2012] PIRATELLI-FILHO, Antonio ; FERNANDES, Fabricio Henrique T. ; ARENCIBIA, Rosenda V.: Application Of Virtual Spheres Plate For AACMMs Evaluation. In: *Precision Engineering* 36 (2012), Nr. 2, S. 349 – 355
- [Piratelli-Filho und Lesnau 2010] PIRATELLI-FILHO, Antonio ; LESNAU, Glauber R.: Virtual Spheres Gauge For Coordinate Measuring Arms Performance Test. In: *Measurement* 43 (2010), Nr. 2, S. 236 – 244

- [Scheid und Schwarz 2009] SCHEID, Harald ; SCHWARZ, Wolfgang: *Projektive Geometrie*. S. 134–154. In: *Elemente der Linearen Algebra und der Analysis*. Heidelberg : Spektrum Akademischer Verlag, 2009
- [Selig 2005] SELIG, J. M.: *Geometric Fundamentals Of Robotics*. 2. Edition. New York, NY : Springer Science+Business Media, 2005
- [Universal Robots 2017] UNIVERSAL ROBOTS: *Kinematic Calibration Manual For CB3*, 2017
- [Universal Robots 2018] UNIVERSAL ROBOTS: *UR5/CB3 - Original Instructions*, 2018
- [Wieser et al. 2017] WIESER, Andreas ; KUHLMANN, Heiner ; SCHWIEGER, Volker ; NIEMEIER, Wolfgang: *Ingenieurgeodäsie – eine Einführung*. S. 1–22. In: SCHWARZ, Willfried (Hrsg.): *Ingenieurgeodäsie: Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2017



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

A Armstellungen für die Kalibrierung

	1 [°]	2 [°]	3 [°]	4 [°]	5 [°]	6 [°]
1	0.00	-90.00	-90.00	0.00	90.00	0.00
2	0.00	-90.00	-90.00	0.00	90.00	180.00
3	-112.30	-77.13	-1.74	-294.97	286.79	-149.66
4	-112.30	-77.13	-1.74	-294.97	286.79	30.34
5	-147.30	-124.86	21.72	-175.95	306.31	30.80
6	-147.30	-124.86	21.72	-175.95	306.31	210.8
7	44.55	-149.33	98.95	-27.87	271.99	109.8
8	44.55	-149.33	98.95	-27.87	271.99	289.8
9	-316.30	-122.86	9.76	2.24	224.24	79.39
10	15.64	-27.38	-35.43	-129.45	-107.79	111.25
11	15.64	-27.38	-35.43	-129.45	-107.79	291.25
12	-251.20	-79.14	-86.73	2.28	69.36	18.00
13	-251.20	-79.14	-86.73	2.28	69.36	198.00
14	170.80	-96.84	-145.1	26.39	135.07	322.63
15	-283.49	-45.35	-85.62	279.34	-63.70	-107.22
16	-283.49	-45.35	-85.62	279.34	-63.70	72.78
17	7.79	-109.57	131.92	341.25	136.64	-212.23
18	-318.33	-161.97	42.87	331.17	-64.48	-0.78
19	-318.33	-161.97	42.87	331.17	-64.48	179.22
20	-183.69	-12.38	50.28	351.09	-235.39	182.22
21	-183.69	-12.38	50.28	351.09	-235.39	2.22
22	172.65	0.65	-124.81	313.98	-268.80	-154.05
23	172.65	0.65	-124.81	313.98	-268.80	25.95
24	350.53	-104.69	-114.33	-6.71	-291.40	174.02
25	350.53	-104.69	-114.33	-6.71	-291.40	354.02
26	-21.85	-121.93	-38.00	-135.64	-345.77	252.53
27	-21.85	-121.93	-38.00	-135.64	-345.77	72.53
28	-341.39	-51.38	13.12	-40.66	155.47	314.31
29	-267.71	-153.32	36.03	-186.65	356.85	-41.97
30	-267.71	-153.32	36.03	-186.65	356.85	138.03
31	183.23	-166.79	59.62	18.09	123.02	108.17
32	183.23	-166.79	59.62	18.09	123.02	288.17
33	61.85	-22.89	-134.22	-40.94	-41.43	-140.57
34	61.85	-22.89	-134.22	-40.94	-41.43	39.43
35	-33.48	-75.77	-87.62	-230.15	82.37	169.44
36	-254.70	-163.38	136.53	162.91	-101.93	-129.50
37	-254.70	-163.38	136.53	162.91	-101.93	50.50

A ARMSTELLUNGEN FÜR DIE KALIBRIERUNG

38	332.95	-155.58	-10.42	261.98	-168.74	-137.50
39	-287.51	-82.16	-22.22	209.88	125.25	58.94
40	78.61	-120.69	158.62	243.1	190.21	-105.09
41	291.71	-93.82	50.76	320.65	24.86	95.10
42	291.71	-93.82	50.76	320.65	24.86	275.10
43	-128.21	-71.89	-71.43	323.2	232.80	-143.41
44	-128.21	-71.89	-71.43	323.2	232.80	36.59
45	-63.31	-82.33	19.98	191.34	220.37	41.95
46	228.61	-35.83	-19.30	-124.22	329.89	358.82
47	228.61	-35.83	-19.30	-124.22	329.89	178.82
48	14.35	-29.03	1.61	-13.01	220.26	-27.28
49	-28.96	-172.77	80.98	-185.00	354.13	97.66
50	-28.96	-172.77	80.98	-185.00	354.13	277.66
51	-14.14	-14.74	-100.65	338.64	233.66	310.37
52	91.99	-180.16	48.81	-87.57	321.76	-342.11
53	91.99	-180.16	48.81	-87.57	321.76	-162.11
54	9.74	-164.01	43.94	-38.63	262.45	237.91
55	9.74	-164.01	43.94	-38.63	262.45	57.91
56	-169.73	-8.24	-10.55	-51.57	74.33	323.83
57	-169.73	-8.24	-10.55	-51.57	74.33	143.83
58	-116.83	-152.49	-39.11	-155.73	35.24	101.93
59	-116.83	-152.49	-39.11	-155.73	35.24	281.93
60	130.5	-42.05	-112.93	-75.31	163.92	-262.41
61	127.8	-109.84	55.25	-94.83	228.85	-352.54
62	313.21	-147.34	56.72	298.37	-90.69	32.02
63	313.21	-147.34	56.72	298.37	-90.69	212.02
64	-42.55	-143.92	90.94	317.56	-321.31	118.78
65	-42.55	-143.92	90.94	317.56	-321.31	298.78
66	178.00	-4.36	7.11	-182.3	-249.99	50.11
67	202.71	-21.8	50.59	97.47	-261.62	27.44
68	202.71	-21.8	50.59	97.47	-261.62	207.44
69	248.82	-179.15	116.34	-221.27	-286.76	22.60
70	248.82	-179.15	116.34	-221.27	-286.76	202.60
71	25.75	-46.53	-10.64	-145.43	-345.97	-348.49
72	25.75	-46.53	-10.64	-145.43	-345.97	-168.49
73	-162.48	-41.99	37.06	29.37	-303.13	312.00
74	-162.48	-41.99	37.06	29.37	-303.13	132.00
75	-348.81	-97.45	-68.58	-105.57	-325.47	308.83
76	-348.81	-97.45	-68.58	-105.57	-325.47	128.83
77	-336.42	-155.94	93.24	-92.66	-117.28	-37.88
78	-336.42	-155.94	93.24	-92.66	-117.28	142.12

A ARMSTELLUNGEN FÜR DIE KALIBRIERUNG

79	155.95	-56.98	-133.53	-275.78	74.55	-261.96
80	155.95	-56.98	-133.53	-275.78	74.55	-81.96
81	10.92	-67.49	-43.08	190.20	82.22	-182.94
82	130.93	-154.59	13.37	319.95	108.27	183.80
83	130.93	-154.59	13.37	319.95	108.27	3.80
84	-18.07	-178.00	11.98	336.79	-145.99	-63.04
85	-327.68	-80.88	-136.84	2.56	129.69	-99.85
86	-327.68	-80.88	-136.84	2.56	129.69	80.15
87	-96.41	-16.81	-129.05	343.88	-128.53	-253.63
88	-118.00	-28.26	37.52	209.37	112.90	-309.47
89	-51.77	-43.50	75.71	163.51	-68.49	104.70
90	-51.77	-43.50	75.71	163.51	-68.49	284.70
91	284.92	-172.89	69.44	346.52	247.40	97.08
92	5.49	-61.65	30.79	182.64	349.66	-119.22
93	5.49	-61.65	30.79	182.64	349.66	60.78
94	298.07	-52.93	22.12	342.33	297.37	357.42
95	298.07	-52.93	22.12	342.33	297.37	177.42
96	83.30	-19.35	-83.28	324.82	315.29	200.72
97	83.30	-19.35	-83.28	324.82	315.29	20.72
98	-236.20	-5.45	-27.39	113.52	209.76	304.13