



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN



Robotische Assemblierung von Betonringsegmenten im Tunnelbau

DIPLOMARBEIT

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing.)

unter der Leitung von
Univ.-Prof. Dr. techn. A. Kugi
Dr. techn. C. Hartl-Nesic

eingereicht an der
Technischen Universität Wien
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik

von
Gerald Ebmer
Matrikelnummer 01325683

Wien, im Oktober 2021

Gruppe für komplexe dynamische Systeme

A-1040 Wien, Gußhausstr. 27–29, Internet: <https://www.acin.tuwien.ac.at>



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.

Vorwort

Während der Erstellung der vorliegenden Arbeit konnte ich auf die Hilfe und Unterstützung zahlreicher Menschen zurückgreifen, wofür ich mich an dieser Stelle bei allen beteiligten herzlichst bedanke.

Mein großer Dank gilt Univ.-Prof. Dr. techn. Andreas Kugi für die Möglichkeit diese Arbeit durchführen zu können und für den Freiraum diese Arbeit in vollem Umfang umsetzen zu dürfen.

Ohne die initiale Motivation durch Bmstr. Dipl.-Ing. Robert Pechhacker wäre diese Arbeit erst gar nicht entstanden. Daher gilt dir, Robert, mein besonderer Dank für die Möglichkeit, das Vertrauen und die umfassende Wissensvermittlung bezüglich des modernen Tunnelbaus.

An der Entstehung dieser Arbeit direkt beteiligt war zudem mein Betreuer Dr. techn. Christian Hartl-Nesic. Christian, dir gilt mein großer Dank für deine äußerst umfassende Betreuung in sämtlichen Bereichen, beginnend bei den theoretischen Themen der Robotik, über die praktischen Herausforderungen während der Herstellung des Versuchsaufbaus bis hin zu den äußerst detaillierten und konstruktiven Korrekturen während der Erstellung dieser Niederschrift. Danke, dass du mir auf ein zuvor unerreichtes Niveau verholfen hast.

Für den Beistand, den konstruktiven Austausch sowie alles, was wir zusammen erreicht haben und noch erreichen werden, bedanke ich mich bei meinen Kollegen Lukas Pechhacker und Andreas Hirtenlehner.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie. Vor allem danke ich meinen Eltern für die Unterstützung, um mir diese Ausbildung zu ermöglichen sowie den Rückhalt während all dieser Zeit. Meinen Brüdern Markus und Stefan danke ich für den unumstößlichen Glauben an mich. Zu guter Letzt gilt mein aus tiefstem Herzen empfundener Dank meiner langjährigen Partnerin Nadine für all die wunderbare Zeit und die bedingungslose Unterstützung.

Wien, im Oktober 2021



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.

Abstract

In modern tunnel construction, the creation of an underground cavity is mainly accomplished mechanically using tunnel boring machines. In addition to the rock cutting, the tunnel boring machine serves to support the underground cavity until the final support measures have been installed. During the so-called ring erection, the tunnel lining is built from reinforced concrete segments assembled as a ring. The segment manipulator (erector) is still widely controlled manually during ring erection.

In this thesis, a system for the robotic assembly of concrete ring segments in tunnel construction is presented. The system includes the lightweight industrial robot KUKA LBR iiwa 14 R820 for manipulating the ring segments and cameras for the marker-based pose detection of the segments.

First, the mathematical model of the robot and the visual pose estimation are derived. In the next step, the trajectory planning and the trajectory interpolation based on spline curves are introduced in detail. A control law in the joint space and an impedance control in the task space for contact tasks are formulated.

The experimental setup is described based on the introduced foundations. For the visual pose estimation of the segments, the kinematic relationships for picking up and placement of the segments are derived. Additionally, the filtering of the pose signals is described. The assembly process is divided into rough and fine positioning. In the case of fine positioning, a method for iterative trajectory planning is presented, which takes into account the improved pose feedback from the visual pose estimation when approaching the segment.

The system components and the assembly process are first tested in simulation and are then successfully validated in an experimental setup. The experimental setup is based on a replica of a real tunnel lining on a scale of 1:5. The segments of the tunnel lining are created by a 3D printing process. The lower limit of the resolution of the segment pose estimation is in the range of ten micrometers for position signals and for orientation signals in the range of one milliradian.

The solutions presented in this thesis can also be used in a more general context, e.g. for the assembly of concrete elements in building construction or for the construction of ballastless railroad tracks.



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.

Kurzzusammenfassung

Im modernen Tunnelbau erfolgt die Errichtung eines unterirdischen Hohlraums überwiegend maschinell unter Verwendung von Tunnelbohrmaschinen. Neben dem Ausbruch des Gebirges dient die Tunnelbohrmaschine dazu, den entstandenen Hohlraum solange zu stützen bis die endgültige Tunnelsicherung eingebaut ist. Während des sog. Ringbaus wird die Tunnelsicherung aus ringförmig angeordneten Stahlbetonsegmenten errichtet. Die Steuerung des Segmentmanipulators (Erektor) während des Ringbaus erfolgt noch weitgehend manuell.

In dieser Arbeit wird daher ein System zur robotischen Assemblierung von Betonringsegmenten im Tunnelbau vorgestellt. Das beschriebene System umfasst den Leichtbauindustrieroboter KUKA LBR iiwa 14 R820 für die Manipulation der Ringsegmente und Kameras für die markerbasierte Posenerfassung der Segmente.

Zunächst werden die mathematischen Grundlagen des Roboters und der visuellen Posenschätzung hergeleitet. Danach werden die Trajektorienplanung und die Trajektorieninterpolation basierend auf Spline-Kurven im Konfigurationsraum und im Arbeitsraum detailliert eingeführt. Das Regelgesetz im Konfigurationsraum und die Impedanzregelung im Arbeitsraum für Kontaktaufgaben werden ebenfalls diskutiert.

Auf Basis dieser Grundlagen wird der Versuchsaufbau detailliert beschrieben. Für die visuelle Posenschätzung der Segmente werden die kinematischen Beziehungen bei der Segmentaufnahme und Segmentplatzierung hergeleitet und die Filterung der Posensignale behandelt. Anschließend wird der Assembliervorgang in Grob- und Feinpositionierung aufgeteilt und im Detail diskutiert. Im Fall der Feinpositionierung wird ein Verfahren zur iterativen Trajektorienplanung vorgestellt, das bei Annäherung an die Segmentaufnahme- bzw. Segmenteinbauposition das verbesserte Posenseedback der visuellen Posenschätzung berücksichtigt.

Die Systemkomponenten und der Assembliervorgang werden zunächst in Simulation auf Funktionsfähigkeit geprüft und abschließend im experimentellen Versuch erfolgreich validiert. Der experimentelle Versuchsaufbau basiert auf einer Nachbildung einer realen Tunnelauskleidung im Maßstab 1:5. Die Segmente der Tunnelauskleidung sind im 3D-Druckverfahren nachgebildet. Die untere Grenze der Auflösung der Segmentposenschätzung liegt für Positionssignale im Bereich von zehn Mikrometern und für Orientierungssignale im Bereich von einem Milliradian.

Die vorgestellten Lösungen in dieser Arbeit können auch in einem allgemeineren Kontext eingesetzt werden, z. B. für die Assemblierung von Betonelementen im Hochbau oder bei der Errichtung von Bahngleisen im schotterlosen Oberbau.



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.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Tunnelbau	1
1.1.1	Aufbau einer geschichteten Tunnelbohrmaschine	2
1.1.2	Tunnelbau im Schildvortrieb	2
	Ringbau	4
	Tübbinge	5
1.1.3	Potenzial für Automatisierung im Tunnelbau	6
1.2	Literaturstudie	7
1.3	Ziel der Arbeit	8
1.4	Gliederung der Arbeit	8
2	Theoretische Grundlagen	11
2.1	Mathematisches Modell des Roboters	11
2.1.1	Kinematik	11
2.1.2	Dynamik	14
2.2	Visuelle Posenschätzung	14
2.2.1	Kameramodell	15
	Externe Transformation	15
	Perspektivische Transformation	16
	Interne Transformation	16
	Allgemeine Projektionsmatrix	17
2.2.2	Kamerakalibrierung	18
2.2.3	Posenschätzung	19
2.3	Trajektorienplanung	19
2.3.1	Konfigurationsraum	20
2.3.2	Arbeitsraum	20
2.3.3	Trajektorienparametrierung	21
	Trapezförmiges Geschwindigkeitsprofil	21
2.4	Trajektorieninterpolation	22
2.4.1	Spline-Interpolation unter Nebenbedingungen	23
2.4.2	Orientierungsinterpolation mit Quaternionen	25
2.5	Regelungskonzept	28
2.5.1	Regelung im Konfigurationsraum	28
2.5.2	Regelung im Arbeitsraum	28
2.5.3	Nullodynamik	29
3	Robotischer Assemblierprozess	31
3.1	Beschreibung des Versuchsaufbaus	31

3.2	Visuelle Posenschätzung der Segmente	32
3.2.1	Kinematische Beziehungen	34
	Segmentaufnahme	35
	Segmentplatzierung	35
3.2.2	Filterung der Positions- und Orientierungssignale	35
3.2.3	Kalibrierung	36
	Segmentaufnahme (Kameras 1 und 2)	36
	Segmenplatzierung (Kamera 3)	36
3.3	Assembliervorgang	37
3.3.1	Grobpositionierung	37
3.3.2	Feinpositionierung	38
	Überblick	38
	Iterative Trajektorienplanung	38
3.4	Implementierung	39
3.4.1	Ablaufsteuerung	41
3.4.2	Trajektorienplanung	44
3.4.3	Trajektorieninterpolation und Trajektorienfolgeregelung	44
4	Simulation	45
4.1	Systemarchitektur	45
4.2	Ergebnisse	46
4.2.1	Ablauf der Tübbingplatzierung	47
4.2.2	Grobpositionierung	49
	Trajektorienplanung und -interpolation im Konfigurationsraum	49
	Regelung im Konfigurationsraum	50
4.2.3	Feinpositionierung mithilfe der iterativen Trajektorienplanung	51
	Trajektorienplanung und -interpolation basierend auf visueller Posenschätzung	52
	Regelung im Arbeitsraum	53
4.2.4	Ringbau	54
5	Experimenteller Versuchsaufbau	57
5.1	Systemarchitektur	57
5.2	Ergebnisse	59
5.2.1	Ablauf der Tübbingaufnahme	60
5.2.2	Grobpositionierung	61
	Regelung im Konfigurationsraum	61
5.2.3	Feinpositionierung mithilfe der iterativen Trajektorienplanung	61
	Regelung im Arbeitsraum	62
5.2.4	Positions- und Orientierungsrauschen	65
5.2.5	Ringbau	66
	Spaltmaße	67
6	Zusammenfassung und Ausblick	71

A	Ableitung der Quaternionenexponentialfunktion	75
B	Reglerparameter	79
	B.1 Simulation	79
	B.2 Experimenteller Versuchsaufbau	79
	B.2.1 Unterlagerte Drehmomentenregelung und Reibungskompensation	80
C	Positionsschätzung mit Kalman-Filter	81
D	Kameraparameter	83
	D.1 Simulation	83
	D.2 Experimenteller Versuchsaufbau	83
E	Ablaufsequenzen	85
	E.1 Simulation	85
	E.1.1 Platzierung Segment B	85
	E.2 Experimenteller Versuchsaufbau	87
	E.2.1 Aufnahme Segment A2	87
	E.2.2 Platzierung Segment B	89
F	Ergebnisse	93
	F.1 Simulation	93
	F.2 Experimenteller Versuchsaufbau	96



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.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Tunnelbohrmaschine	3
1.2	Segmentring	5
2.1	Roboterarm	12
2.2	Kameramodell	15
2.3	ArUco Marker	20
2.4	Trapezförmiges Geschwindigkeitsprofil in normierter Zeit \tilde{t} mit $\xi = 0.1$. . .	22
3.1	Laboraufbau	32
3.2	Segment im Ring	33
3.3	Kinematische Beziehung zwischen dem Roboterarm und dem zu manipu- lierenden Tübbing.	34
3.4	Iterative Trajektorienplanung	39
3.5	Darstellung der Implementierung.	40
3.6	Beispiele für Ablaufsequenzen.	43
4.1	Simulation der robotischen Assemblierung von Ringsegmenten mit visueller Posenschätzung.	46
4.2	Darstellung der Platzierung von Segment B als Bildsequenz.	48
4.4	Grobpositionierung während der Platzierung von Segment B.	51
4.5	Iterative Trajektorienplanung.	53
4.6	Regelung im Arbeitsraum.	54
4.7	Ringbau in Simulation.	56
5.1	Laboraufbau der robotischen Assemblierung von Ringsegmenten mit visu- eller Posenschätzung.	58
5.2	Darstellung der Aufnahme von Segment A2 als Bildsequenz.	60
5.3	Regelung im Konfigurationsraum.	62
5.4	Regelung im Arbeitsraum.	63
5.5	Gelenkwinkel- und Drehmomentenverlauf während der Aufnahme des Segments A2.	64
5.6	Rauschen der Posenschätzung	65
5.7	Ringbau im experimentellen Versuchsaufbau.	68
F.1	Simulation Tübbingplatzierung	94
F.2	Simulation Tübbingaufnahme	95
F.3	Versuch Tübbingaufnahme	97
F.4	Versuch Tübbingaufnahme	98



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.

Tabellenverzeichnis

1.1	Maßtoleranzen für Tübbinge [11].	5
3.1	Kennzahlen der Tunnelauskleidung.	33
5.1	Spaltmaße der Längsfugen.	69
B.1	Reglerparameter für die Simulation in Gazebo.	79
B.2	Reglerparameter für den praktischen Versuch.	79
D.1	In der Simulation verwendete Kameraparameter.	83
D.2	Im Laborversuch verwendete Kameraparameter.	83



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 Einleitung

Digitalisierung und Automatisierung durchdringen zunehmend sämtliche Bereiche des täglichen Lebens. Die steigende Rechenleistung und Vernetzung von Baugruppen in Geräten und Maschinen ermöglicht dabei stetig neue Anwendungsbereiche [1]. Das industrielle Umfeld bietet sich für Automatisierung besonders an, da eine strukturierte Umgebung vorherrscht und vornehmlich repetitive Tätigkeiten mit identen Bauteilen in hohen Stückzahlen anfallen [2]. Sinkende Anschaffungs- und Betriebskosten von Roboter in Relation zum Produktionsfaktor Arbeit ermöglichen zunehmend Anwendungsgebiete abseits der Massenproduktion [3]. Ein Wirtschaftsbereich, der davon profitiert, ist die Braubranche. Sich wiederholende Tätigkeiten, ein oft erhöhtes Gesundheitsrisiko für Arbeiter und mögliche Kosteneinsparungen motivieren den Einsatz von Automatisierungstechnik [4]. Vor allem im Bausektor stoßen die etablierten Arbeitsabläufe hinsichtlich Produktivität und Kosteneffizienz an ihre Grenzen [5].

Neben allgemeinen Hürden wie hohe Innovationskosten und mangelnde Innovationskultur in der Bauwirtschaft [4] erfordern die unstrukturierten und wenig vorhersagbaren Umgebungsbedingungen auf Baustellen zusätzlichen Forschungs- und Entwicklungsaufwand. Vor diesem Hintergrund bietet der Tunnelbau gute Voraussetzungen für den Einsatz von Automatisierungstechnik. Hohe Investitionssummen im Tunnelbau [6] ermöglichen die notwendigen Investitionen in Automatisierungstechnik. Standardisierte Arbeitsabläufe während des Tunnelbaus in einer weitgehend strukturierten Umgebung verringern den Aufwand, neue Technologien in den praktischen Einsatz überzuführen. Neben den technischen Aspekten ist das erhöhte Gesundheitsrisiko für Arbeiter ein wichtiger Motivator, um Automatisierungstechnik im Ringbau einzusetzen.

1.1 Tunnelbau

Im modernen Tunnelbau erfolgt die Erstellung eines unterirdischen Hohlraums überwiegend maschinell unter Verwendung von sog. *Tunnelbohrmaschinen*. Dieser Prozess wird Vortrieb oder Auffahrung genannt. Tunnelbohrmaschinen dienen dem Abbau des Gebirges, Abtransport des Abraums und Auskleidung des entstandenen Ausbruchhohlraums mit dem Ziel der Erstellung eines fertigen Tunnelbauwerks. Im Bereich zwischen dem Ausbruch des Gesteins und dem Einbau einer Sicherung in Form der Tunnelauskleidung besteht Verletzungsgefahr für Menschen und Beschädigungsgefahr für Maschinen. Für die Tunnelsicherung werden entweder Spritzbeton, Anker-/Stahlbögen, Ortbeton, Fertigteile aus Stahl bzw. Stahlbeton (sog. Tübbinge) oder mit sog. Injektionsbeton (in situ Herstellung der Tunnelsicherung mit Gleitschalungen) verwendet [7]. Der weitere Verlauf dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Tunnelsicherung mit Tübbingungen aus Stahlbeton. Bei ungünstigen Gebirgsverhältnissen, langen Baulosen (Tunnelbauwerk wird in der Regel in mehrere

Baulose aufgeteilt), knapper Bauzeit oder strengen Anforderungen an Oberflächensetzungen werden häufig sog. geschildete Tunnelbohrmaschinen eingesetzt. Der Schild ist eine zylindrische Stahlkonstruktion, die den Bereich zwischen Gebirgsabbau und Einbau der Tübbinge umschließt und sichert.

1.1.1 Aufbau einer geschildeten Tunnelbohrmaschine

Der prinzipielle Aufbau einer geschildeten Tunnelbohrmaschine (Schildmaschine) mit den wichtigsten Baugruppen ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Der Materialabbau an der von den Abbauwerkzeugen aufgespannten Abbaufont, der sog. Ortsbrust, erfolgt durch das Schneidrad. Das Schneidrad wird entweder hydraulisch oder elektrisch angetrieben. Das Nenndrehmoment des Antriebs reicht - abhängig vom Schilddurchmesser - von 1000 kN m bis über 35 000 kN m [8]. Als Abbauwerkzeuge dienen im Schneidrad verankerte Schneidrollen, sog. Disken. Der Abraum gelangt durch Öffnungen im Schneidrad in den Bereich zwischen Schneidrad und Druckwand, der sog. Abbaukammer. Von dort wird der Abraum über Förderbänder oder ähnliche Vorrichtungen abtransportiert.

Die notwendigen Kräfte für den Vorschub der Tunnelbohrmaschine werden durch Hydraulikzylinder, den Vortriebspresen, eingeleitet. Die Vortriebspresen stützen sich über Pressenschuhe axial auf der Stirnfläche der Tunnelauskleidung ab, welche als Widerlager dient, siehe Abbildung 1.1. Am vorderen Ende werden die Kräfte über die Druckwand in den Schild und auf das Stützmedium bzw. in das Schneidrad eingeleitet. Dabei wird die Tunnelbohrmaschine entgegen den Reibungskräften des Erdreichs und der erforderlichen Stützkraft der Ortsbruststützung in Vortriebsrichtung nach vorne geschoben. Die Vortriebspresendrucke liegen im Bereich von 600 kN/m^2 , bezogen auf die Ortsbrustfläche [8].

Der Schild unterteilt sich in Schneidenschuss, Mittelschuss und Schildschwanz und dient zur Sicherung des errichteten Hohlraums, bis die Tunnelsicherung eingebaut ist. Der Schneidenschuss grenzt direkt an das Schneidrad an und weist eine typische Stahlblechdicke von 50 mm bis 100 mm auf. Im Anschluss befindet sich der Mittelschuss. Der abschließende Abschnitt wird Schildschwanz genannt, in dessen Schutz die Tunnelauskleidung errichtet wird. Die Blechdicke in diesem Bereich reicht von 40 mm bis 80 mm.

Für den Einbau der Tübbinge wird ein hydraulisch aktiver Manipulator, der sog. Erektor, verwendet. Der Erektor ist mit dem Fahrträger als Kragarmkonstruktion an das Erektortragg Kreuz im Mittelschuss des Schildmantels montiert, siehe Abbildung 1.1. Als Endeffektor kommt eine Vakuumsaugplatte zur Anwendung, mit der die tonnenschweren Tübbinge angehoben werden können. Die Steuerung der Hydraulikventile des Erektors erfolgt direkt durch den Erektorfahrer mithilfe eines mobilen Bedienpults [9].

1.1.2 Tunnelbau im Schildvortrieb

Der Vortrieb mit Schildmaschinen erfolgt nach folgendem Prinzip: Bei gleichzeitigem Ausbruch des Gebirges wird die Tunnelbohrmaschine in der Tunnelachse vorgeschoben. Der entstandene Hohlraum wird solange gestützt, bis die endgültige Tunnelsicherung eingebaut ist. Die Tunnelsicherung besteht aus ringförmig angeordneten Stahlbetonsegmenten, den Tübbing (vgl. Kapitel 1.1.1). Die Errichtung der Tunnelsicherung wird Ringbau genannt

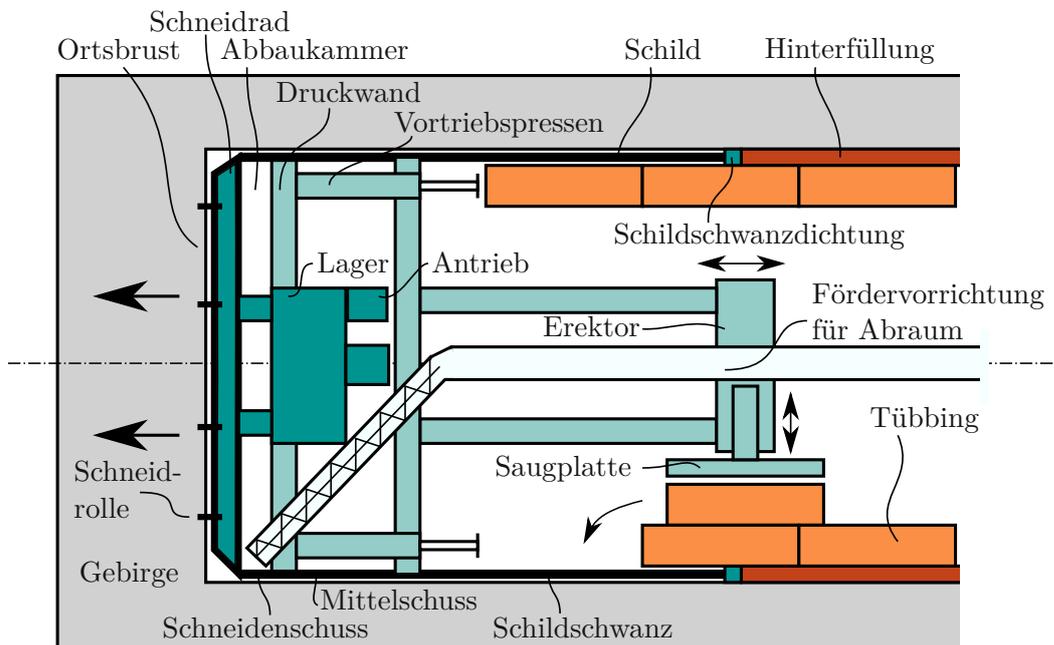


Abbildung 1.1: Skizze der wichtigsten Baugruppen einer Schild-Tunnelbohrmaschine.

und wird im Folgenden beschrieben.

Der Vortrieb und der Ringbau wechseln einander ab, wobei der zuletzt errichtete Ring als Widerlager für die Vortriebspresen dient. Während des Ringbaus widersteht der Schild dem Gebirgsdruck und dem eventuell anstehenden Grundwasser. Die dadurch reduzierten Spannungsumlagerungen und Änderungen des Grundwasserspiegels führen zu einer signifikanten Reduktion von Oberflächensetzungen, besonders bei seichten, d. h. knapp an der Oberfläche verlaufenden Tunnel. Der Anwendungsbereich dieser Vortriebsmethode erstreckt sich von Festgestein bis Lockergestein mit geringer Standzeit [9]. Die Standzeit beschreibt dabei die mögliche Zeit, die das Gebirge ungestützt standfest ist [8].

Im Vortrieb wird das Schneidrad gegen die Ortsbrust gedrückt. Die im Schneidrad verankerten Schneidrollen werden dabei mit einer Nennanpresskraft von über 300 kN [10] und einer Abrollgeschwindigkeit von bis zu 190 m/min in den Fels gedrückt. Dabei sprengen und zermahlen die Schneidrollen das Gestein [8]. Durch die hohe Beanspruchung und dem einhergehenden Verschleiß müssen die Schneidrollen regelmäßig getauscht werden. Durch hohe Gebirgs- und Wasserdrücke kann eine aktive Ortsbruststützung durch ein Druckmedium (bspw. Bentonit, Druckluft) notwendig sein, wodurch die Abbaukammer unter einem Druck von bis zu 4 bar stehen kann. Der Einstieg für Menschen in die Abbaukammer ist unter diesen Umständen aufwendig, da zusätzliche Druckschleusen notwendig sind.

Ringbau

Im Bereich des Schildschwanzes wird die Tunnelauskleidung als endgültige Sicherung gegenüber dem umgebenden Gebirge errichtet. Dabei wird zwischen einschaliger und mehrschaliger Konstruktion der Auskleidung unterschieden. Der Ausbau erfolgt mithilfe von Tübbing, die in einem Ring angeordnet werden. Der einschalige Ringbau ist bei Vortrieb mit Flüssigkeits- oder Erddruckschilden in nicht standfesten Böden oder bei dem Ausbau unter dem Grundwasserspiegel weltweiter Standard. Dabei nehmen die Tübbinge die Gebirgs- und Innenlasten auf und gewährleisten gleichzeitig den Abschluss gegen eindringendes oder austretendes Wasser (bspw. Stollen). Dem gegenüber bietet die zweischalige Konstruktion eine etwa 5-10 % Kostenreduktion (Stand 2011, siehe [8]). Verantwortlich dafür sind geringere Tübbingstärken, reduzierte Bewehrungsgehalte, verminderte Genauigkeitsanforderungen, höhere Vortriebsleistungen aufgrund kürzerer Ringbauzeiten und fehlender Mörtelverpressung.

Bei der Weiterfahrt der Tunnelbohrmaschine nach erfolgtem Ringbau entsteht ein Ringraum, der nach außen durch das umgebende Gebirge und nach innen durch die Tübbingelemente sowie stirnseitig durch die Schildschwanzdichtung begrenzt wird. Die Spaltweite beträgt üblicherweise zwischen 70 mm und 120 mm, bei einem Arbeitsbereich der Schildschwanzdichtung von +/- 20 mm bis 40 mm. Die nominelle Spaltweite ist weitgehend unabhängig vom Schilddurchmesser. Allerdings ergeben sich Ringweitenänderungen über den Umfang durch die unvermeidliche Exzentrizität der Auskleidung zum Schildschwanz und durch die zu erwartende Verformung von Sicherung und Schild unter dem Gebirgsdruck. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Abstände zwischen der Tübbingaußenseite und dem Gebirge, der sog. Schildschwanzluft. Zur Reduzierung von Setzungen wird der Ringspalt unmittelbar an der Entstehungsstelle, d. h. hinter dem Schild, mit Mörtel oder einem ähnlichen Verfüllungsmaterial unter Druck verpresst (sog. Hinterfüllung).

Um Kurvenfahrten im Vortrieb zu ermöglichen, hat sich die Verwendung eines einseitigen konischen Universalrings – vorstellbar als schräg abgeschnittene Zylindermantelscheibe, vgl. Abbildung 1.2 – bewährt. Die Schrägung des Rings wird als *tapering* (dt. Konizität) bezeichnet. Die Vortriebsrichtung kann durch einfache Drehung des Rings gewählt werden. Für Kurvenfahrten wird die gewünschte Ringposition wiederholt angewandt. Bei geraden Abschnitten werden die Ringpositionen abgewechselt, wodurch sich im Mittel ein gerader Tunnelverlauf ergibt.

Liegt der Schlussstein in der Sohle (unterste Position), muss der Ringbau mit dem ersten Tübbing in der Firste (oberste Position) beginnen. In diesem Fall wird der Ring während der Bauzeit lediglich durch die Pressenbeaufschlagung in Position gehalten, wodurch besondere Acht auf die Sicherung des Arbeitspersonals gegeben werden muss. Eine weitere Limitierung bei der Verwendung von Blocktübbing stellt der sequenzielle Ablauf des Vortriebs und des Ringbaus, bedingt durch die begrenzten Hubwege der Vortriebspresen, dar. Die Versorgung des Ringbaus mit Tübbinge erfolgt durch den sog. Segment-Feeder (Vorrichtung zur Segmentbereitstellung für den Erektor) und den Tübbingkran im hinteren Teil der Tunnelbohrmaschine (Nachläufer). Die Segmente werden durch einen Tunnelzug oder sog. Multi Service Vehicle (MSV) zur Tunnelbohrmaschine befördert.

Bezeichnung	Toleranzen
Tübbingbreite	± 0.5 mm
Tübbingdicke	± 2.0 mm
Tübbingbogenlänge	± 0.6 mm
Längsfugenebenheit	± 0.3 mm
Ringfugenebenheit	± 0.3 mm
Verschräkungswinkel in Längsfugen	$\pm 0.04^\circ$
Winkel der Längsfugenkonizität	$\pm 0.01^\circ$

Tabelle 1.1: Maßtoleranzen für Tübbinge [11].

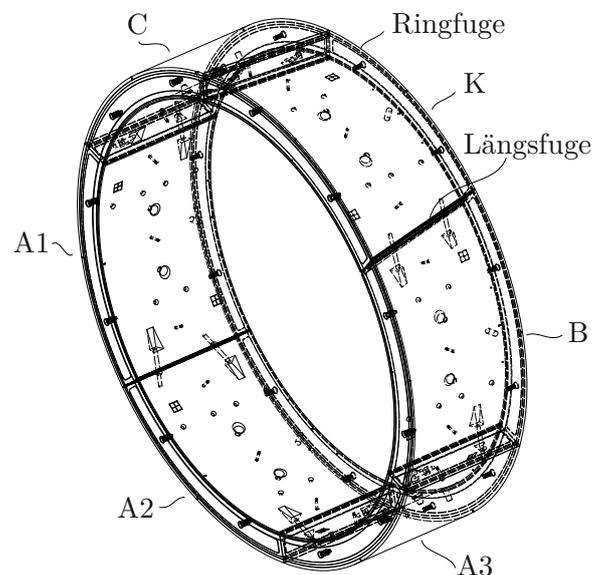


Abbildung 1.2: Segmentring bestehend aus Segmenttypen A1, A2, A3, B, C und Schlussstein K.

Tübbinge

Die Tübbinge selbst werden aus Stahlbeton hergestellt und weisen typischerweise eine Dicke von 20 cm bis 50 cm und eine Breite zwischen 1 m und 2 m auf, wobei die Tendenz zu größeren Tübbingbreiten geht, um die Vortriebszeiten und die entstehenden Fugenlängen zu verringern [8]. Typische Maßtoleranzen für die Herstellung von Tübbinge sind in Tabelle 1.1 aufgelistet. Die Herstellungs- und Einbauungenauigkeiten führen bei zunehmender Tübbingbreite allerdings zu vermehrten konzentrierten Zwangsbeanspruchungen in den Fugenbereichen. Dadurch können verstärkt Abplatzungen und Risse entstehen.

Die häufigste Ringvariante besteht aus Blocktübbingen mit rechteckigem Grundriss in einer Konfiguration aus fünf bis acht Segmenten und einem keilförmigen Schlussstein. In Abbildung 1.2 ist ein Ring bestehend aus sechs Segmenten dargestellt. Beim Einbau

des Schlusssteins werden Spreizkräfte in den Ring eingeleitet, die zur Vorspannung der Tübbingauskleidung in Ringrichtung dienen. Um die Dichtheit des Rings herzustellen, wird an den einzelnen Tübbing ein in Nuten gefasstes, umlaufendes Dichtprofilband, der sog. Dichtrahmen, vorgesehen. Die Längsfugen werden im fertigen Ring zusätzlich zur Vorspannung durch den Schlussstein auch vom umgebenden Gebirgsdruck und dem anstehenden Wasserdruck komprimiert. Dabei muss der Anpressdruck des Dichtungsrahmens größer als der einseitig wirkende Wasserdruck sein. Um ein kurzzeitiges „Aufatmen“ des Dichtrahmens während des Bauzustands zu verhindern, erfolgt meist eine Verschraubung der Tübbing oder eine Verbindung durch Koppellelemente. Durch den Versatz der Längsfugen benachbarter Ringe erhöht sich die Steifigkeit der Auskleidungsröhre und vermindert damit Zwangsbeanspruchungen im Tübbingverbund. Zusätzlich erzielt eine Ringfugenverzahnung eine verbesserte kraftschlüssige Kopplung benachbarter Ringe bei gleichzeitiger Verminderung der Verformungsfähigkeit der Röhre und einer Verbesserung der Dichtheitsproblematik sich kreuzender Fugen.

1.1.3 Potenzial für Automatisierung im Tunnelbau

Die überwiegenden Schäden an der Tübbingauskleidung werden im Bauzustand verursacht. Unzulässig hohe Kontaktspannungen durch hohe Vortriebsbelastungen kombiniert mit Herstellungs- und Einbautoleranzen und daraus entstehender geometrischer Unverträglichkeiten sind als Hauptursachen zu nennen. Speziell bei der Verwendung einschaliger und wasserdichter Tübbingauskleidungen sind Beschädigungen kritisch, da die Dichtheit nicht gewährleistet werden kann. Während der Ringmontage führt unsachgemäßes Versetzen der Tübbing durch den Erektor zu Schäden an der Betonoberfläche und am umlaufenden Dichtungsband. Insbesondere beim Einschub des Schlusssteins kommt es aufgrund beengter Platzverhältnisse häufig zu Schäden. Die Längsfugen des neu zu bauenden Rings sind in der Regel durch den Erektor und die Verschraubung noch nicht vollständig komprimiert, sodass der Ring insgesamt zu groß erscheint. Der konische Schlussstein kann nur unter hohem Kraftaufwand eingeschoben werden. Bei ungenauem Ringbau kann es hier zu Verkantungen und damit zu Betonabplatzungen kommen.

Nach dem Verlassen des Schildmantels wird der Tübbingring durch den Mörteldruck der Ringspaltverpressung und anstehendem Erd- und Wasserdruck beansprucht. Die Lasten, die in diesem Bauzustand auf den Ring einwirken, sind qualitativ die höchsten Lasten in der gesamten Bau- und Gebrauchszeit. Bei Austritt aus dem Schildschwanz kann es dabei zu Verdrehungen und Eckabplatzungen an den Berührungsflächen kommen. Diese Schäden sind durch sorgfältigen Ringbau und planmäßige Komprimierung der Längsfugen bereits im Bereich des Schildschwanzes vermeidbar. Zusätzlich besteht die Gefahr, dass der Tübbingring im Bereich des noch nicht erhärteten Ringspaltverpressmörtels unter Auftrieb ovalisiert und es zu unzulässigen Beton-Beton-Kontakten und Abplatzungen kommt.

Zusammenfassend ist der Ringbau ein entscheidender Bauabschnitt im Tunnelbau, sowohl für die erzielbare Vortriebsleistung als auch für die schlussendlich erzielbare Qualität des Tunnels. Aktuell werden Mannschaften aus in der Regel drei Arbeitern im Schichtbetrieb beim Ringbau eingesetzt, um einen kontinuierlichen Vortrieb zu gewährleisten. Neben der Sicherheitsgefahr für die Arbeiter im Bereich des Ringbaus wird durch die Ar-

beiter selbst ein unteres Limit für den erzielbaren Tunneldurchmesser gesetzt. Speziell bei Utility-Tunnel, wie bspw. Wasserleitungen oder Tunnel für Materialbeförderungen, ist der minimal mögliche Tunneldurchmesser für die Wirtschaftlichkeit entscheidend. Der Ringbau im Schildvortrieb bietet durch die hohe Anzahl an exakt zu platzierenden Tübbing (mehrere tausend Tübbinge pro Kilometer) und dem damit verbundenen Arbeitsaufwand und Sicherheitsrisiko optimale Voraussetzungen für den Einsatz von Automatisierungstechnik.

1.2 Literaturstudie

Bereits Ende der 1980er Jahre wurden Systeme für die Automatisierung des Ringbaus vorgeschlagen. Vor allem in Japan wurden erste Systeme entwickelt, wie z. B. das automatische Ringbausystem [12]. Dabei wird der Segment-Feeder und der Erektor für den Ringbau digital gesteuert. Die Erfassung der Segmentausrichtung erfolgt durch einen optischen Sensor, ähnlich einer Reflexlichtschranke. Das beschriebene System wurde aufgrund hoher Komplexität und Kosten nicht in die Praxis überführt. Ohno et al. [13] ergänzt die automatische Erstellung der Tunnelauskleidung um eine Vortriebsrichtungsregelung. Das System besteht aus Vortriebsrichtungsregelung, Segmentversorgung und Ringbau. Dadurch entsteht ein vollständig autonomes Schildvortriebssystem. Der praktische Einsatz scheiterte aber an der hohen Komplexität des Konzepts [13].

Neben der Tunnelauskleidung mittels vorgefertigter Betonsegmente wurden zu dieser Zeit alternative Auskleidungsoptionen, die eine einfachere Automatisierung erlauben, behandelt. In der Arbeit [14] wird ein System beschrieben, um die Tunnelauskleidung vor Ort aus Kunstharz gießen zu können. Das Verfahren wurde in einem Testtunnel versuchsweise angewandt. Die vergleichsweise hohen Kosten der Tunnelauskleidung durch die Verwendung von Kunstharz verhinderten eine breite Anwendung dieses Verfahrens. Das Prinzip die Tunnelauskleidung direkt vor Ort zu erstellen, wurde von Braaksma et al. [15] ebenfalls aufgegriffen. In dieser Arbeit wird ein Roboterarm am vorderen Ende des Schildschwanzes verwendet, um Schalungselemente zu platzieren. Der Hohlraum zwischen Gebirge und Schalung wird mit Beton ausgefüllt. Während des Vortriebs härtet der Beton aus. Danach werden die Schalungselemente durch einen zweiten Roboterarm im hinteren Bereich des Schildes wieder demontiert, wodurch eine kontinuierliche Errichtung der Tunnelauskleidung möglich ist. In dieser Arbeit wird speziell auf die Roboterregelung eingegangen, die im Wesentlichen als Positions-, Kraft- und Impedanzregelung konzipiert ist und bei Kontakt des Roboters oder der Schalungselemente mit der Umwelt ein gewünschtes Verhalten erzielt. In [16] wird die praktische Anwendung automatischer Schalungssysteme für Tunnelgewölbe dargestellt. Die Arbeit beschreibt die Erfahrungen während des Baus des Eisenbahntunnels Paghuaashan in Taiwan. Speziell im Hinblick auf wirtschaftliche Faktoren wurde ein Vorteil durch die Anwendung automatisierter Systeme trotz hoher Anschaffungskosten festgestellt. Die hohe Auffahrlänge von über 7 km und hohe Pönalzahlungen bei Überschreitung der vereinbarten Bauzeit werden als wesentliche Einflussfaktoren genannt.

Abseits des Tunnelbaukontexts beschäftigt sich [17] mit der Positions- und Orientierungsschätzung von Bauteilen in einer Baustellenumgebung und der robotischen Manipulation der Bauteile basierend auf den Positions- und Orientierungsschätzungen. Weiters behandelt diese Arbeit die Erfassung des Ist-Bauzustands anhand von 3D-Sensordaten.

Für die Posenschätzung der Bauteile wird ein markerbasiertes Verfahren verwendet. Die Manipulation der Bauteile erfolgt durch einen 6-achsigen Industrieroboter. Die Roboterregelung erfolgt durch PID-Regler im Gelenkraum. Der Kontakt mit der Umgebung wird in dieser Arbeit nicht behandelt. Die Posenschätzung erzielt eine Genauigkeit von weniger als 1 cm, hingegen werden für die Schätzung der Orientierung keine Kennzahlen genannt. Die Posenschätzung unter Verwendung der 3D-Daten eines Tiefensensors, der sog. Point-Cloud [18], wird in [17] ebenfalls untersucht. Dieses Verfahren liefert allerdings ungenauere Ergebnisse als die markerbasierte Posenschätzung. Als Limitierungen werden u. a. mangelnde Robustheit bei wechselnden Beleuchtungssituationen genannt. Die Posenschätzung durch 3D-Objekterkennung wird in [19] betrachtet. Die Trainingsdaten werden aus den im BIM-Modell (Building Information Modeling, Informationsmodell für die digitale Gebäudeplanung [20]) inkludierten CAD-Daten abgeleitet und mithilfe von gewählten Deskriptoren mit den 3D-Sensordaten abgeglichen. Als problematisch erweisen sich Ähnlichkeiten zwischen Objekten, homogenen Oberflächen und das Rauschen des Tiefensensors. Der Positionsfehler liegt im Bereich von einigen Zentimeter.

Die französische Baufirma Bouygues beantragte 2016 ein Patent in Frankreich zur automatischen Aufnahme und Platzierung von Segmenten für den Ringbau [21] und reichte 2017 den internationalen Patentantrag ein [22]. Das System basiert auf der Verwendung von vier Laserlinien-Triangulationssensoren. Dadurch können Position und Orientierung der Segmente sowie die Spaltmaße zu den benachbarten Segmenten ermittelt werden. Im Video [23] ist das System der Firma Bouygues mit Projektnamen *Atlas* ab Zeitpunkt 1:03:20 zu sehen. Die Montagevorrichtungen sowie die Schutzgehäuse der Sensoren sind ab 1:07:12 ersichtlich.

1.3 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Demonstration eines Systems zur automatischen Errichtung eines Tübbingrings. Die Evaluierung dieses Systems erfolgt in Simulation und am experimentellen Versuchsaufbau. Dabei werden die Tübbinge einer realen Tunnelauskleidung im Maßstab 1:5 verwendet. Die Manipulation der Segmente erfolgt durch einen 7-achsigen Industrieroboter, dessen Endeffektor mit einer im Maßstab nachgebauten Vakuumsaugplatte ausgestattet ist. Für die Fixierung der Segmente während des Ringbaus werden die Vortriebspresen durch eine pneumatische Haltevorrichtung nachgeahmt. Die Posenerfassung der Segmente erfolgt markerbasiert mithilfe mehrerer Kameras. Unter Verwendung einer Physiksimulation wird das entwickelte System auf Durchführbarkeit überprüft und die notwendigen Systemkomponenten werden so weit als möglich vorab implementiert und getestet. Am experimentellen Versuchsaufbau wird die Durchführbarkeit des Ringbaus und die erzielbare Genauigkeit ermittelt.

1.4 Gliederung der Arbeit

Der nachfolgende Teil der Arbeit gliedert sich wie folgt:

In Kapitel 2 werden die mathematischen Grundlagen beschrieben. Zunächst wird ein mathematisches Modell der Kinematik und Dynamik des verwendeten Roboters hergeleitet.

Die visuelle Posenschätzung mit Schwerpunkt auf der Projektion der dreidimensionalen Umgebung auf die Kamerasensorebene sowie die Kamerakalibrierung werden überblicksmäßig dargestellt. Das zugrunde liegende Verfahren für die markerbasierte Posenschätzung der verwendeten Software-Bibliothek wird überblicksmäßig behandelt. Anschließend wird die Trajektorienplanung von Punkt-zu-Punkt-Bewegungen diskutiert. Für die Interpolation der Trajektorien wird ein auf Splines basierendes Verfahren verwendet, das auf quaternionenbasierte Orientierungstrajektorien erweitert wird. Abschließend werden die verwendeten Roboterregelungsstrategien im Konfigurationsraum und im kartesischen Raum unter Berücksichtigung kinematischer Redundanzen beschrieben.

Kapitel 3 beschreibt das System zur robotischen Assemblierung von Betonringsegmenten. Zunächst wird der experimentelle Aufbau des Ringbausystems diskutiert. Danach werden die Voraussetzungen für die visuelle Posenschätzung der Ringsegmente behandelt. Im darauffolgenden Abschnitt wird der eigentliche Assembliervorgang beschrieben und auf die einzelnen Teilschritte für das Aufnehmen und Platzieren von Segmenten eingegangen. In diesem Abschnitt wird die iterative Trajektorienplanung basierend auf der visuellen Posenschätzung erörtert. Der abschließende Abschnitt behandelt die einzelnen Komponenten des Assembliersystems und ihr Zusammenwirken.

In Kapitel 4 sind die Simulationsergebnisse dargestellt. Zunächst erfolgt eine kurze Beschreibung der Simulationsumgebung und der Implementierung des Assembliersystems. Anschließend werden die Simulationsergebnisse dargestellt. Kapitel 5 folgt der gleichen Struktur wie Kapitel 4 und stellt die Ergebnisse des realen Versuchs dar. Zusätzlich werden die Messergebnisse des Positions- und Orientierungsrauschens betrachtet.

Abschließend werden in Kapitel 6 die wesentlichen Punkte dieser Arbeit zusammengefasst und aufbauend auf ihren Ergebnissen ein Ausblick für zukünftige Entwicklungen im Bereich der Ringbauautomatisierung und der Tunnelbauautomatisierung gegeben.



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.

2 Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel beschreibt die mathematischen Grundlagen, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit benötigt werden. Die Schwerpunkte werden dabei auf den in dieser Arbeit verwendeten Leichtbauindustrieroboter für die Manipulation von Betonringsegmenten und das Kamerasystem zur visuellen Positions- und Orientierungserfassung der Segmente gelegt.

Im ersten Abschnitt wird das mathematische Modell des Roboters behandelt. Dazu werden homogene Transformationen eingeführt, mit deren Hilfe die Beschreibung der Vorwärtskinematik erfolgt und die Manipulator Jacobi-Matrix berechnet wird. Anschließend wird das dynamische Modell des Roboters eingeführt.

Im zweiten Abschnitt wird die visuelle Posenschätzung betrachtet. Dafür wird der Abbildungsvorgang eines dreidimensionalen Objekts auf die zweidimensionale Sensorebene einer Kamera in Form eines Kameramodells beschrieben. Auf die Bestimmung der Parameter des Kameramodells wird im Zuge der Kamerakalibrierung eingegangen. Abschließend erfolgt eine Übersicht von Methoden zur Posenschätzung dreidimensionaler Objekte basierend auf ihrer projektiven Abbildung.

Der dritte und vierte Abschnitt behandeln die Planung bzw. Interpolation von Trajektorien im Konfigurations- und Arbeitsraum. Bei der Trajektorienplanung werden Punkt-zu-Punkt-Bewegungen betrachtet. Die Interpolation der Trajektorien erfolgt mithilfe von B-Splines.

Abschließend wird die Roboterregelung im Konfigurations- und Arbeitsraum behandelt. Für die Regelung im Arbeitsraum wird zusätzlich die Regelung der Nulldynamik diskutiert.

2.1 Mathematisches Modell des Roboters

Die Manipulation der Segmente im Versuchsaufbau erfolgt durch den Roboterarm KU-KA LBR iiwa 14 R820. Dabei handelt es sich um einen Leichtbauindustrieroboter mit sieben rotatorischen Freiheitsgraden (engl. degrees of freedom, DoF). Nachfolgend werden homogene Transformationen eingeführt, mit deren Hilfe die Vorwärtskinematik und die Manipulator Jacobi-Matrix hergeleitet werden. Anschließend werden die dynamischen Bewegungsgleichungen des Roboterarms angeführt, die die Grundlage für die Auslegung der Roboterregelung in Kapitel 2.5 bilden.

2.1.1 Kinematik

Eine homogene Transformation $\mathbf{H}_A^{\mathcal{B}}$ beschreibt die Position und Orientierung, zusammen kurz als Pose bezeichnet, des Koordinatensystems \mathcal{B} in Bezug auf das Koordinatensystem \mathcal{A} und setzt sich aus der Verschiebung (Translation) $\mathbf{d}_A^{\mathcal{B}} \in \mathbb{R}^3$ und der Drehung (Rotation)

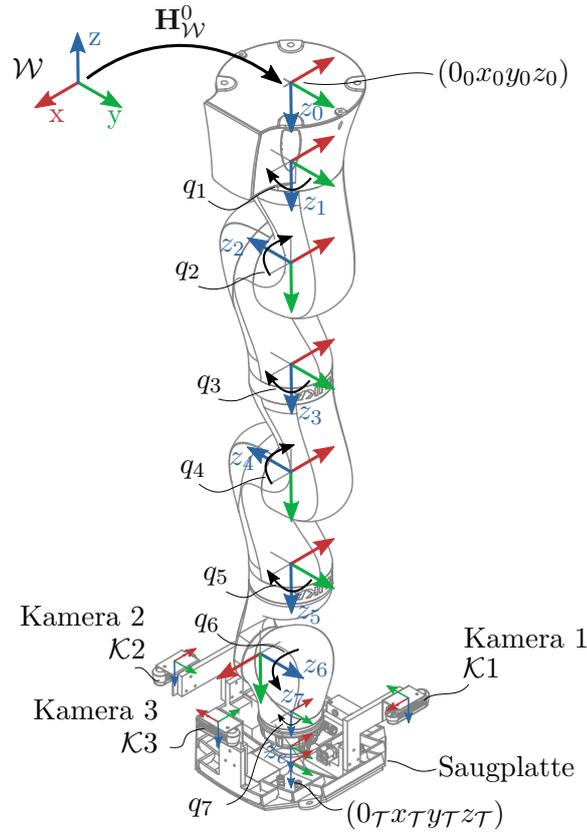


Abbildung 2.1: Roboterarm mit Saugplatte.

$\mathbf{R}_{\mathcal{A}}^{\mathcal{B}} \in \text{SO}(3)$ gemäß

$$\mathbf{H}_{\mathcal{A}}^{\mathcal{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{\mathcal{A}}^{\mathcal{B}} & \mathbf{d}_{\mathcal{A}}^{\mathcal{B}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

zusammen. Ein Punkt $\mathbf{p}_{\mathcal{B}}$ in den homogenen Koordinaten des Koordinatensystems \mathcal{B} , gegeben durch $\mathbf{p}_{\mathcal{B}} = [x_{\mathcal{B}}, y_{\mathcal{B}}, z_{\mathcal{B}}, 1]^T$, transformiert sich in den Punkt $\mathbf{p}_{\mathcal{A}}$ im Koordinatensystem \mathcal{A} mit $\mathbf{p}_{\mathcal{A}} = [x_{\mathcal{A}}, y_{\mathcal{A}}, z_{\mathcal{A}}, 1]^T$ entsprechend der Vorschrift

$$\mathbf{p}_{\mathcal{A}} = \mathbf{H}_{\mathcal{A}}^{\mathcal{B}} \mathbf{p}_{\mathcal{B}} . \quad (2.2)$$

Die inverse Transformation berechnet sich zu

$$(\mathbf{H}_{\mathcal{A}}^{\mathcal{B}})^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{\mathcal{B}}^{\mathcal{A}} & -(\mathbf{R}_{\mathcal{B}}^{\mathcal{A}}) \mathbf{d}_{\mathcal{A}}^{\mathcal{B}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H}_{\mathcal{B}}^{\mathcal{A}} , \quad (2.3)$$

wobei die Beziehung

$$(\mathbf{R}_{\mathcal{A}}^{\mathcal{B}})^{-1} = (\mathbf{R}_{\mathcal{A}}^{\mathcal{B}})^T = \mathbf{R}_{\mathcal{B}}^{\mathcal{A}} \quad (2.4)$$

für Rotationsmatrizen, d. h. orthonormale Matrizen, verwendet wurde.

In Abbildung 2.1 ist der Roboterarm mit Vakuumsaugplatte am Endeffektor dargestellt. Für jedes Gelenk i ist das zugehörige Koordinatensystem $(0_i x_i y_i z_i)$ dargestellt, $i = 1, \dots, 7$.

Die z -Achse entspricht jeweils der Rotationsachse des zugehörigen Gelenks. Die serielle Kinematik des Roboters wird durch die homogenen Transformationen $\mathbf{H}_i^j(q_i)$ zwischen den benachbarten Koordinatensystemen i und j beschrieben. Beginnend bei der Basis (Index 0) werden die Transformationen der einzelnen Koordinatensysteme (Index $1, \dots, 7$) bis zum Endeffektor (Index e) sukzessive zusammengesetzt

$$\mathbf{H}_0^e(\mathbf{q}) = \mathbf{H}_0^1(q_1)\mathbf{H}_1^2(q_2)\mathbf{H}_2^3(q_3)\mathbf{H}_3^4(q_4)\mathbf{H}_4^5(q_5)\mathbf{H}_5^6(q_6)\mathbf{H}_6^7(q_7)\mathbf{H}_7^e. \quad (2.5)$$

Die resultierende Transformation $\mathbf{H}_0^e(\mathbf{q})$ wird als Vorwärtskinematik des Roboters bezeichnet und ist eine Funktion der generalisierten Gelenkwinkel $\mathbf{q}^T = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_7]$. Die Gelenkwinkel \mathbf{q} bilden dabei die generalisierten Koordinaten des Roboters und beschreiben den Konfigurationsraum. Für die Beschreibung des Segmentaufnahmepunkts, im Weiteren als TCP (engl. tool center point) bezeichnet, werden die konstanten homogenen Transformationen $\mathbf{H}_{\mathcal{W}}^0$ und \mathbf{H}_e^T eingeführt. Für die Position des TCP im Arbeitsraum ergibt sich dadurch

$$\mathbf{H}_{\mathcal{W}}^T(\mathbf{q}) = \mathbf{H}_{\mathcal{W}}^0\mathbf{H}_0^e(\mathbf{q})\mathbf{H}_e^T. \quad (2.6)$$

Die Pose $\mathbf{x}_e^T = [\mathbf{d}_0^{eT}, \phi_0^{eT}] \in \mathbb{R}^6$ eines allgemeinen Starrkörpers wird im dreidimensionalen Arbeitsraum durch drei Größen zur Beschreibung der Position \mathbf{d}_0^e und drei Größen zur Beschreibung der Orientierung in Minimalkoordinatendarstellung ϕ_0^e zusammengesetzt. Dabei erfasst \mathbf{d}_0^{eT} die drei translatorischen Freiheitsgrade und ϕ_0^{eT} die drei rotatorischen Freiheitsgrade.

Für die Minimaldarstellung der Orientierung eines Starrkörpers genügen drei Winkel $\phi_0^{eT} = [\phi, \theta, \psi]$. Hierfür werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit die sog. Roll-Pitch-Yaw Winkel, kurz RPY, verwendet. Die Achsenfolge lautet ZYX und wird durch die Rotationsmatrix [24]

$$\mathbf{R}_{RPY}(\phi) = \mathbf{R}_z(\phi)\mathbf{R}_y(\theta)\mathbf{R}_x(\psi) \quad (2.7)$$

beschrieben.

Basierend auf (2.5) und (2.7) kann die Vorwärtskinematik in Minimaldarstellung angedeutet werden

$$\mathbf{x}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_0^e(\mathbf{q}) \\ \phi_0^e(\mathbf{q}) \end{bmatrix} = \mathbf{f}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^6. \quad (2.8)$$

Der Zusammenhang zwischen den Gelenksgeschwindigkeiten $\dot{\mathbf{q}}$ im 7-dimensionalen Konfigurationsraum und den translatorischen und rotatorischen Geschwindigkeiten im 6-dimensionalen Arbeitsraum wird über die geometrische Manipulator Jacobi-Matrix $\mathbf{J}_g(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{6 \times 7}$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_0^e \\ \boldsymbol{\omega}_0^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \mathbf{d}_0^e \\ \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \boldsymbol{\omega}_0^e \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_g(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (2.9)$$

hergestellt. In (2.9) bezeichnet \mathbf{v}_0^e die translatorische Geschwindigkeit und $\boldsymbol{\omega}_0^e$ den Vektor der Drehwinkelgeschwindigkeit des Endeffektors. Der Vektor der Drehwinkelgeschwindigkeiten $(\boldsymbol{\omega}_0^e)^T = [\omega_{0,1}^e, \omega_{0,2}^e, \omega_{0,3}^e]$ kann aus der schiefsymmetrischen Matrix

$$\mathbf{S}(\boldsymbol{\omega}_0^e) = \dot{\mathbf{R}}_0^e(\mathbf{R}_0^e)^T = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{0,3}^e & \omega_{0,2}^e \\ \omega_{0,3}^e & 0 & -\omega_{0,1}^e \\ -\omega_{0,2}^e & \omega_{0,1}^e & 0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

ermittelt werden.

Bei der Verwendung von Minimaldarstellungen zur Parametrierung von Rotationen kann es zu Darstellungssingularitäten, auch Kardanblockade genannt, kommen. Dabei hat die Manipulator Jacobi-Matrix nicht mehr vollen Rang und es kann ω_0^e nicht mehr aus den Winkelgeschwindigkeiten $\dot{\phi}_0^e$ berechnet werden. Abhilfe schafft eine nicht-minimale Darstellung der Orientierung $\phi_0^e \in \mathbb{H}$ durch Quaternionen, die formal in Kapitel 2.4.2 eingeführt werden.

Der verwendete Roboter besitzt 7 Freiheitsgrade und damit einen Freiheitsgrad mehr als der dreidimensionale kartesische Raum mit 6 Freiheitsgraden. Diese kinematische Redundanz erlaubt Eigenbewegungen des Roboterarms bei feststehender Endeffektorpose. Im Allgemeinen muss für kinematisch redundante Manipulatoren auf numerische Methoden für die Berechnung der inversen Kinematik zurückgegriffen werden. Die spezielle SRS-Struktur (spherical-revolute-spherical) des verwendeten Roboters KUKA LBR iiwa 14 R820 erlaubt aber eine analytische Lösung der inversen Kinematik, wie in [25] dargestellt ist.

Ein Maß zur Beurteilung der aktuellen Roboterkonfiguration im Hinblick auf kinematische Singularitäten bietet die sogenannte Manipulierbarkeit (engl. manipulability measure) [24]

$$w(\mathbf{q}) = \sqrt{\det(\mathbf{J}_g(\mathbf{q})\mathbf{J}_g^T(\mathbf{q}))}. \quad (2.11)$$

Dieses Maß geht gegen null bei der Annäherung an singuläre Konfigurationen.

2.1.2 Dynamik

Als Grundlage für die in Abschnitt Kapitel 2.5 beschriebenen Regelungskonzepte werden nachfolgend die Bewegungsgleichungen des Roboterarms angeführt. Dabei werden die Glieder des Roboters als Starrkörper betrachtet und die Elastizitäten der Gelenke vernachlässigt. Die Bewegungsgleichungen lauten somit

$$\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} \quad (2.12)$$

mit der Massenmatrix $\mathbf{D}(\mathbf{q})$, der Coriolismatrix $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, den Potenzialkräften $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ und den generalisierten Momenten $\boldsymbol{\tau}$. Die Massenmatrix $\mathbf{D}(\mathbf{q})$ ist stets positiv definit und damit invertierbar. Weiters gilt, dass $\dot{\mathbf{D}}(\mathbf{q}) - 2\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ schiefsymmetrisch ist und für die Potenzialkräfte gilt $\mathbf{g}^T(\mathbf{q}) = \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} V(\mathbf{q})$, mit der potenziellen Energie $V(\mathbf{q})$ [26]. Für eine detaillierte Herleitung sei auf [27], [28] verwiesen.

2.2 Visuelle Posenschätzung

In diesem Abschnitt wird die Abbildung des dreidimensionalen Raums auf die zweidimensionale Kameraebene anhand des Lochkameramodells beschrieben und in Form der Kameraparameter charakterisiert. Anschließend werden die durch Linsen verursachten Abbildungsfehler und ihre Berücksichtigung durch Verzerrungsmodelle diskutiert. Danach folgt eine kurze Einführung in die Kamerakalibrierung für die Bestimmung der

Kameraparameter sowie der Verzerrungsparameter. Abschließend wird eine Methodenübersicht für Verfahren zur Berechnung der homogenen Transformation zwischen Ebenen im dreidimensionalen Raum und dem Kamerakoordinatensystem präsentiert. Die folgenden Ausführungen basieren auf [29].

2.2.1 Kameramodell

Der projektive Abbildungsprozess einer dreidimensionalen Szene auf die zweidimensionale Bildebene einer Kamera, wie in Abbildung 2.2 dargestellt, wird nachfolgend beschrieben. Der Ursprung des Kamerakoordinatensystems \mathcal{K} befindet sich im Projektionszentrum der Kamera (Brennpunkt). Die $z_{\mathcal{K}}$ -Achse entspricht dabei der optischen Achse und diese schneidet die Bildebene (Sensorebene) im Kamerahauptpunkt C , der vom Ursprung um die Brennweite f entfernt ist.

Die optische Abbildung wird in drei Abschnitte unterteilt, nämlich in die externe, perspektivische und interne Transformation.

Externe Transformation

Zunächst erfolgt die externe Transformation. Dabei wird das Koordinatensystem der Szene (Weltkoordinatensystem \mathcal{W}) in das Kamerakoordinatensystem \mathcal{K} transformiert. Die Beschreibung erfolgt durch eine homogene Transformation $\mathbf{H}_{\mathcal{K}}^{\mathcal{W}}$, vgl. (2.1), die das Weltkoordinatensystem \mathcal{W} in Bezug auf das Kamerakoordinatensystem \mathcal{K} darstellt. Ein homogener Punkt im Weltkoordinatensystem $\mathbf{p}_{\mathcal{W}} = [X_{\mathcal{W}}, Y_{\mathcal{W}}, Z_{\mathcal{W}}, 1]^T$ transformiert sich

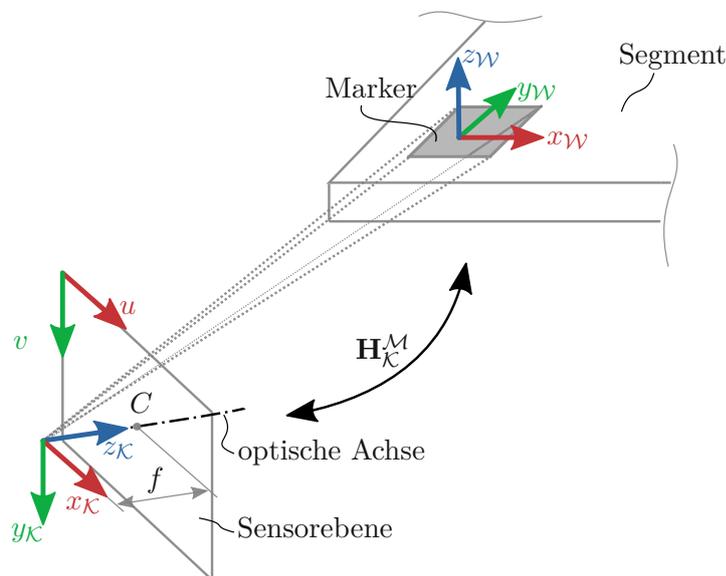


Abbildung 2.2: Perspektivische Abbildung einer 3D-Szene auf die 2D-Sensorebene.

auf einen Punkt im Kamerakoordinatensystem $\mathbf{p}_{\mathcal{K}} = [X_{\mathcal{K}}, Y_{\mathcal{K}}, Z_{\mathcal{K}}, 1]^T$ mit

$$\mathbf{p}_{\mathcal{K}} = \mathbf{H}_{\mathcal{K}}^{\mathcal{W}} \mathbf{p}_{\mathcal{W}} . \quad (2.13)$$

Perspektivische Transformation

Als Nächstes erfolgt die perspektivische Transformation, die einen dreidimensionalen Punkt $\mathbf{p}_{\mathcal{K}}$ in den Punkt $\tilde{\mathbf{m}}_{\mathcal{K}} = [x, y, 1]^T$ in der zweidimensionalen Bildebene abbildet. Als Grundlage dienen die Gleichungen für die Zentralprojektion

$$\frac{x}{X_{\mathcal{K}}} = \frac{y}{Y_{\mathcal{K}}} = \frac{f}{Z_{\mathcal{K}}} , \quad (2.14)$$

mit der Brennweite f . Die Darstellung im projektiven Raum lautet

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ s \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{P}} \begin{bmatrix} X_{\mathcal{K}} \\ Y_{\mathcal{K}} \\ Z_{\mathcal{K}} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

mit $x = \frac{U}{s}$, $y = \frac{V}{s}$ für $s \neq 0$. Der Parameter s entspricht dabei der $Z_{\mathcal{K}}$ -Koordinate (Tiefe parallel zur optischen Achse $z_{\mathcal{K}}$). Daraus folgt, dass die Abbildung auf einen Punkt $\tilde{\mathbf{m}}_{\mathcal{K}}$ nur bis auf einen Skalar s bestimmt ist, da für unterschiedliche Werte von $Z_{\mathcal{K}}$ mehrere Punkte des dreidimensionalen Raums auf den gleichen Punkt in der zweidimensionalen Sensorebene abgebildet werden, es gilt

$$s\tilde{\mathbf{m}}_{\mathcal{K}} = \mathbf{P}\mathbf{p}_{\mathcal{K}} . \quad (2.16)$$

Die Matrix \mathbf{P} wird perspektivische Projektionsmatrix genannt.

Interne Transformation

Abschließend erfolgt die interne Transformation, bei der die Transformation der Maßeinheit der Koordinatensysteme (bspw. metrisch) in die (diskreten) Bildkoordinaten erfolgt. Hierfür sind die horizontale und vertikale Skalierung k_u bzw. k_v , sowie die Verschiebungen u_0 und v_0 notwendig, damit der Bildmittelpunkt mit dem Kamerahauptpunkt C übereinstimmt. Die Verschiebungen u_0 und v_0 betragen in der Regel die halbe Pixelzahl vertikal und horizontal. Die interne Transformationsmatrix \mathbf{M} lautet

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} k_u & 0 & u_0 \\ 0 & k_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} . \quad (2.17)$$

Hat die Bildebene den Abstand $f = 1$ vom Ursprung des Kamerakoordinatensystems \mathcal{K} , spricht man von normierten Koordinaten und die Projektionsmatrix entspricht

$$\mathbf{P}_N = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} . \quad (2.18)$$

Die Freiheitsgrade der internen Transformationsmatrix \mathbf{M} und der perspektivischen Projektionsmatrix \mathbf{P} lassen sich zusammengefasst in der Kameramatrix \mathbf{K} darstellen. Für die Kameramatrix \mathbf{K} gilt

$$\mathbf{MP} = \mathbf{KP}_N \quad (2.19)$$

mit der Nomenklatur für \mathbf{K}

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

entsprechend [30].

Allgemeine Projektionsmatrix

Der vollständige Projektionsvorgang lautet

$$s\mathbf{m}_{\mathcal{K}} = \underbrace{\mathbf{K} \mathbf{P}_N}_{\substack{\text{intern,} \\ \text{perspektivisch}}} \underbrace{\mathbf{H}_{\mathcal{K}}^{\mathcal{W}}}_{\text{extern}} \mathbf{p}_{\mathcal{W}} = \tilde{\mathbf{P}} \mathbf{p}_{\mathcal{W}} \quad (2.21)$$

mit der allgemeinen Projektionsmatrix

$$\tilde{\mathbf{P}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{q}}_1^T \\ \tilde{\mathbf{q}}_2^T \\ \tilde{\mathbf{q}}_3^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{q}_1^T, q_{1,4}] \\ [\mathbf{q}_2^T, q_{2,4}] \\ [\mathbf{q}_3^T, q_{3,4}] \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{3 \times 4}. \quad (2.22)$$

Damit ist der Zusammenhang zwischen einem dreidimensionalen Punkt $\mathbf{p}_{\mathcal{W}}$ im Weltkoordinatensystem \mathcal{W} und seiner Abbildung $\mathbf{m}_{\mathcal{K}}$ auf der zweidimensionalen Sensorebene bis auf den Skalierungsfaktor s hergestellt. Die externe Transformation $\mathbf{H}_{\mathcal{K}}^{\mathcal{W}}$ enthält sechs Freiheitsgrade (externe Parameter) und die interne Transformation \mathbf{K} wird durch vier Freiheitsgrade (interne Parameter) beschrieben. Wie in (2.15) ersichtlich, kann der freie Parameter s aus (2.21) durch Division der ersten bzw. zweiten Zeile durch die dritte Zeile eliminiert werden und daraus folgen die Bildkoordinaten $u, v \in \mathbb{R}$ mit

$$u = \frac{\tilde{\mathbf{q}}_1^T \mathbf{p}_{\mathcal{W}}}{\tilde{\mathbf{q}}_3^T \mathbf{p}_{\mathcal{W}}} \quad (2.23)$$

$$v = \frac{\tilde{\mathbf{q}}_2^T \mathbf{p}_{\mathcal{W}}}{\tilde{\mathbf{q}}_3^T \mathbf{p}_{\mathcal{W}}} \quad (2.24)$$

Die diskreten Koordinaten \hat{u} und \hat{v} , beschrieben in Bildpunkten (Pixel), folgen mit der Sensorbreite W , der Sensorhöhe H , der horizontalen Pixelanzahl \hat{W} und der vertikalen Pixelanzahl \hat{H} aus

$$\hat{u} = \text{sgn}(u) \left\lceil \left| u \frac{\hat{W}}{W} \right| + 0.5 \right\rceil \quad (2.25)$$

$$\hat{v} = \text{sgn}(v) \left\lceil \left| v \frac{\hat{H}}{H} \right| + 0.5 \right\rceil \quad (2.26)$$

Dabei bezeichnet $\lceil \cdot \rceil$ den Abrundungsoperator und es gilt $\hat{u}, \hat{v} \in \mathbb{N}$.

2.2.2 Kamerakalibrierung

Die im vorigen Abschnitt erläuterten externen und internen Parameter – im Weiteren mit $\hat{\mathbf{p}}$ bezeichnet – sind unbekannt. Die Parameter werden im Zuge einer Parameterschätzung – der Kamerakalibrierung – ermittelt. Dazu wird eine dreidimensionale Szene mit bekannter Geometrie angenommen und basierend auf dessen Abbildung in die Bildebene erfolgt die Schätzung der Parameter. Ausgehend von Gleichung (2.21) lässt sich die Abbildung in die Sensorebene mit der Projektionsmatrix (2.22) anschreiben als

$$s\mathbf{m}_{\mathcal{K}} = s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \tilde{\mathbf{P}}\mathbf{p}_{\mathcal{W}} = \begin{bmatrix} [\mathbf{q}_1^T, q_{1,4}] \\ [\mathbf{q}_2^T, q_{2,4}] \\ [\mathbf{q}_3^T, q_{3,4}] \end{bmatrix} \mathbf{p}_{\mathcal{W}} . \quad (2.27)$$

Ausgehend vom Punkt $\bar{\mathbf{p}}_{\mathcal{W}} = [X_{\mathcal{W}}, Y_{\mathcal{W}}, Z_{\mathcal{W}}]^T$ im Weltkoordinatensystem \mathcal{W} folgt daraus für den Bildpunkt $\bar{\mathbf{m}}_{\mathcal{K}} = [u, v]^T$ das Gleichungssystem

$$\begin{aligned} (\mathbf{q}_1 - \mathbf{q}_3 u)^T \bar{\mathbf{p}}_{\mathcal{W}} + q_{1,4} - q_{3,4} u &= 0 \\ (\mathbf{q}_2 - \mathbf{q}_3 v)^T \bar{\mathbf{p}}_{\mathcal{W}} + q_{2,4} - q_{3,4} v &= 0 . \end{aligned} \quad (2.28)$$

In Matrixschreibweise lautet (2.28)

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{0} , \quad (2.29)$$

mit der Matrix $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{2N \times 12}$ für N Messpunkte und dem Vektor

$$\mathbf{x}^T = [\tilde{\mathbf{q}}_1^T, \tilde{\mathbf{q}}_2^T, \tilde{\mathbf{q}}_3^T] \in \mathbb{R}^{1 \times 12} . \quad (2.30)$$

Für die Lösung des Gleichungssystems (2.29) fehlen noch die Koordinaten der Messpunkte $\bar{\mathbf{p}}_{\mathcal{W}}$ in der dreidimensionalen Szene. Diese können durch Abbildung einer bekannten Geometrie, bspw. eines Schachbrettmusters, gewonnen werden. Ein Schachbrettmuster bietet sich durch die einfache Geometrie, den hohen Kontrast und die einfache Detektion der Quadrate an. Aus diesem Muster werden die Kantenlänge und der Abstand der Quadrate für die Kamerakalibrierung verwendet.

Die Eigenschaften von Linsen können im Kameramodell durch zusätzliche Verzerrungsmodelle berücksichtigt werden. Radiale Verzerrungen werden im Modell

$$u_{r,dist} = u(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (2.31a)$$

$$v_{r,dist} = v(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (2.31b)$$

und tangentiale Verzerrungen mithilfe von

$$u_{t,dist} = u + [2p_1 uv + p_2(r^2 + 2u^2)] \quad (2.32)$$

$$v_{t,dist} = v + [p_1(r^2 + 2v^2) + 2p_2 uv] \quad (2.33)$$

mit dem Radius vom Bildmittelpunkt r berücksichtigt [30]. Die Erweiterung des Gleichungssystems (2.29) um die Verzerrungsmodelle (2.31) und (2.33) mit den Verzerrungsparameter $\hat{\mathbf{d}} = [k_1, k_2, p_1, p_2, k_3]$ führt auf ein nichtlineares Minimierungsproblem

$$\min_{\substack{\hat{\mathbf{p}} \in \mathbb{R}^{10} \\ \hat{\mathbf{d}} \in \mathbb{R}^5}} \mathbf{F}(\mathbb{P}, \mathbb{M}, \hat{\mathbf{p}}, \hat{\mathbf{d}}) \quad (2.34)$$

mit der Kostenfunktion

$$\mathbf{F}(\mathbb{P}, \mathbb{M}, \hat{\mathbf{p}}, \hat{\mathbf{d}}) = \sum_{i=1}^n [\hat{u}_i - u'_i(\hat{\mathbf{p}}, \hat{\mathbf{d}})]^2 + [\hat{v}_i - v'_i(\hat{\mathbf{p}}, \hat{\mathbf{d}})]^2. \quad (2.35)$$

Dabei entspricht \mathbb{P} der Menge der n Punkte in der dreidimensionalen Szene $\bar{\mathbf{p}}_{\mathcal{W}}$ aus denen sich mithilfe von (2.27) und der Verzerrungsmodelle (2.31), (2.33) die zugehörigen Bildpunkte $\mathbf{m}'_{\mathcal{K}} = [u', v']^T$ berechnen lassen. Die Menge \mathbb{M} entspricht den mit dem Kamerasensor gemessenen Bildkoordinaten $\hat{\mathbf{m}}_{\mathcal{K}} = [\hat{u}, \hat{v}]^T$. Durch das Lösen von (2.34) können die Parameter des verzerrungsfreien Kameramodells $\hat{\mathbf{p}}$ und die Verzerrungsparameter $\hat{\mathbf{d}}$ gewonnen werden. Die Erweiterung des Kameramodells (2.28) um Verzerrungsmodelle ist in [31] dargestellt. In [31] wird außerdem ein Lösungsverfahren für (2.34) diskutiert. Für detailliertere Ausführungen zur Kamerakalibrierung sei auf [29], [32], [33] und [30] verwiesen.

2.2.3 Posenschätzung

Plane-based Pose Estimation (PPE, dt. ebenenbasierte Posenschätzung) ist ein bedeutendes Teilgebiet der digitalen Bildverarbeitung. Dabei wird die relative Pose einer Modellebene bezüglich des Kamerakoordinatensystems ermittelt. Zu bestimmende Modellebenen können u. a. durch planare Marker dargestellt werden, siehe Abbildung 2.3. Die Textur im Marker entspricht einer Codierung zur eindeutigen Identifizierung des Markers. Nach erfolgter Kamerakalibrierung wird ein PPE-Verfahren zur Bestimmung der externen Kameraparameter, d. h. zur Bestimmung der sechs Freiheitsgrade der Modellebene, angewendet.

Verfahren zur Lösung des PPE-Problems können in zwei Bereiche geteilt werden. Die erste Gruppe basiert auf der Ermittlung der Homographie zwischen Modell- und Bildebene. Eine Homographie bezeichnet allgemein eine projektive Transformation [34]. Für die Lösung des PPE-Problems besonders interessant sind Verfahren, die auf der Homographie zwischen zwei Ebenen im zweidimensionalen projektiven Raum \mathbb{P}^2 [29], [34], [35] basieren. Diese Verfahren werden mit dem Begriff Homography Decomposition (HD, dt. Homographiedekomposition) zusammengefasst [36]. Die zweite Gruppe betrachtet das PPE-Problem als generelle Starrkörperpositionsschätzung basierend auf n Punkt-zu-Punkt-Korrespondenzen (engl. PnP-Problem) [33] [37]. Eine sehr schnelle und präzise Posenschätzung ist die sog. Infinitesimal Plane-Based Pose Estimation (IPPE, dt. infinitesimale ebenenbasierte Posenschätzung) und wird in [36] vorgestellt. Dieses Verfahren ist robust gegenüber Rauschen, nutzt vorhandene Redundanzen und beruht systematisch auf den Punkttransformationen mit den geringsten Ungenauigkeiten in der Posenschätzung. IPPE bietet die Grundlage für die Erfassung der externen Parameter in der *ArUco*-Softwarebibliothek [38].

2.3 Trajektorienplanung

Für die Trajektorienplanung werden zeitlich parametrisierte Punkt-zu-Punkt-Pfade verwendet, hier auch als *Bewegungen* bezeichnet. Dabei erfolgt die Bewegung stets ausgehend von



Abbildung 2.3: ArUco Marker [39].

der aktuellen Endeffektorpose zu einer vorgegebenen Zielpose. Komplexere Bewegungsabläufe können durch Aneinanderreihung von Punkt-zu-Punkt-Bewegungen abgebildet werden.

In diesem Abschnitt wird zunächst die Pfadplanung im Konfigurationsraum und im Arbeitsraum beschrieben. Abschließend wird auf die zeitliche Parametrierung der Pfade eingegangen, um die erforderlichen Stetigkeitsanforderungen der Trajektorien zu gewährleisten.

2.3.1 Konfigurationsraum

Die Pfadplanung im Konfigurationsraum erfolgt durch lineare Interpolation in den Gelenkwinkeln \mathbf{q} mit dem Pfadparameter $\sigma \in [0, 1]$ zu

$$\mathbf{q}(\sigma) = (\mathbf{q}_1 - \mathbf{q}_0)\sigma + \mathbf{q}_0 . \quad (2.36)$$

Dabei entspricht \mathbf{q}_0 der Startkonfiguration, das ist in der Regel die aktuelle Konfiguration des Roboterarms, und \mathbf{q}_1 der gewünschten Zielkonfiguration.

2.3.2 Arbeitsraum

Die Pfadplanung im Arbeitsraum teilt sich in eine Positions- und Orientierungskomponente auf. Für die Positionskomponente $\mathbf{d}_0^e(\sigma) \in \mathbb{R}^3$ erfolgt die Planung analog zu Kapitel 2.3.1, d. h. es gilt

$$\mathbf{d}_0^e(\sigma) = (\mathbf{d}_1 - \mathbf{d}_0)\sigma + \mathbf{d}_0 . \quad (2.37)$$

Mithilfe von Quaternionen $\tilde{q} \in \mathbb{H}$, die formal in Kapitel 2.4.2 eingeführt werden, und der sphärisch linearen Interpolation (slerp, engl. spherical linear interpolation) [40] folgt für die Orientierungskomponente

$$\begin{aligned} \phi_0^e(\sigma) &= \text{slerp}(\tilde{q}_0, \tilde{q}_1, \sigma) \\ &= \tilde{q}_0 \left(\tilde{q}_0^{-1} \tilde{q}_1 \right)^\sigma \end{aligned} \quad (2.38)$$

Dabei beschreibt \tilde{q}_0 die Anfangsorientierung und \tilde{q}_1 die gewünschte Zielorientierung als Quaternion.

2.3.3 Trajektorienparametrierung

In diesem Abschnitt wird die zeitliche Pfadparametrierung $\sigma(t)$ beschrieben. Durch diese Parametrierungen führen die in Kapitel 2.3.1 und Kapitel 2.3.2 beschriebenen Pfade zu zumindest zweifach differenzierbaren Trajektorien.

Trapezförmiges Geschwindigkeitsprofil

Durch eine Beschleunigungsphase am Beginn der Trajektorie und eine Bremsphase am Trajektorienende mit jeweils konstanter Beschleunigung bzw. Verzögerung ergibt sich eine zweifach differenzierbare Trajektorie mit einem trapezförmigen Geschwindigkeitsprofil [24]. Die Parametrierung in normierter Zeit $\tilde{t} \in [0, 1]$ lautet

$$\ddot{\sigma}(\tilde{t}) = A \begin{cases} 1 & \text{für } 0 \leq \tilde{t} < \xi \\ 0 & \text{für } \xi \leq \tilde{t} < 1 - \xi \\ -1 & \text{für } 1 - \xi \leq \tilde{t} < 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.39a)$$

$$\dot{\sigma}(\tilde{t}) = A \begin{cases} \tilde{t} & \text{für } 0 \leq \tilde{t} < \xi \\ \xi & \text{für } \xi \leq \tilde{t} < 1 - \xi \\ 1 - \tilde{t} & \text{für } 1 - \xi \leq \tilde{t} < 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.39b)$$

$$\sigma(\tilde{t}) = \frac{A}{2} \begin{cases} \tilde{t}^2 & \text{für } 0 \leq \tilde{t} < \xi \\ \xi(2\tilde{t} - \xi) & \text{für } \xi \leq \tilde{t} < 1 - \xi \\ -\tilde{t}^2 - 2\xi^2 + 2\tilde{t} + 2\xi - 1 & \text{für } 1 - \xi \leq \tilde{t} < 1 \\ -2\xi(-1 + \xi) & \text{für } 1 \leq \tilde{t} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.39c)$$

mit den Nebenbedingungen

$$\begin{aligned} \sigma(0) &= 0 \\ \sigma(1) &= 1 \\ \dot{\sigma}(0) &= 0 \\ \dot{\sigma}(1) &= 0 \end{aligned} \quad (2.40)$$

Der Parameter $\xi \in [0, 0.5]$ legt den Anteil der Beschleunigungs- bzw. Bremsphase an der gesamten Trajektorie fest. Unter Berücksichtigung der Bedingung (2.40) folgt für den freien Parameter A die Beziehung

$$A = \frac{1}{\xi(1 - \xi)} \quad (2.41)$$

Der zeitliche Verlauf von (2.39) ist in Abbildung 2.4 für $\xi = 0.1$ dargestellt.

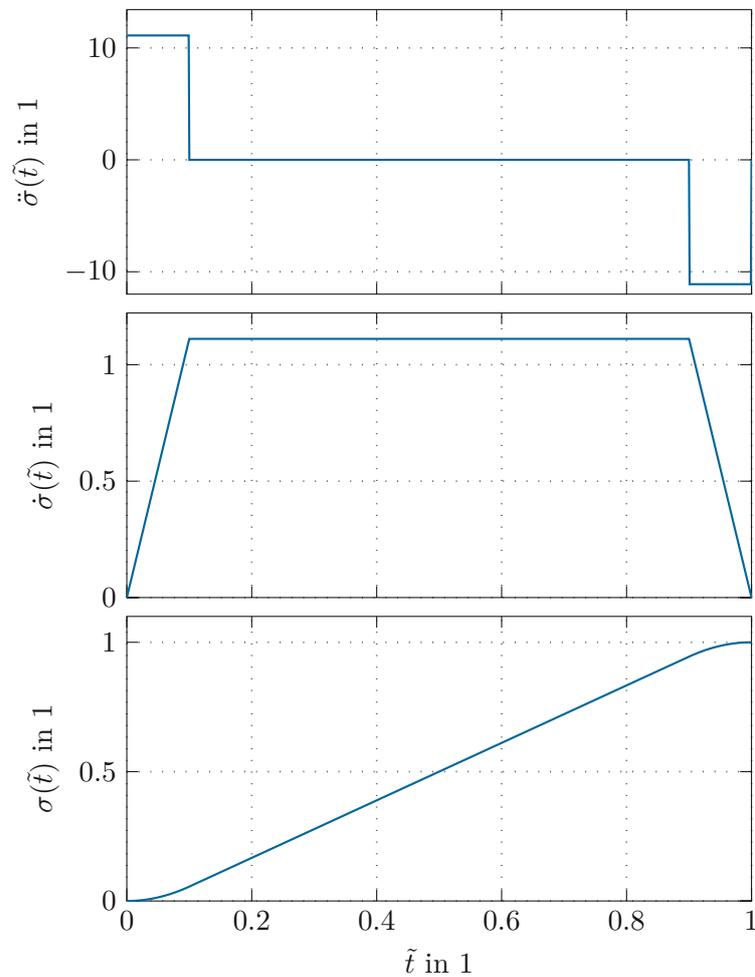


Abbildung 2.4: Trapezförmiges Geschwindigkeitsprofil in normierter Zeit \tilde{t} mit $\xi = 0.1$.

2.4 Trajektorieninterpolation

Durch die Trajektorienplanung werden die Trajektorien in einem groben Zeitraster vorgegeben. Um nun die Trajektorien in einem feineren Zeitraster, bspw. Abtastzeit der Trajektorienfolgeregelung, auszuführen, ist eine Trajektorieninterpolation notwendig. Die Interpolation der Solltrajektorien im Konfigurationsraum bzw. Arbeitsraum erfolgt mithilfe von B-Splines. Im folgenden Abschnitt wird die in [41] ausgeführte Berechnung der Spline-Kontrollpunkte basierend auf den vorgegebenen Trajektorienpunkten unter der Berücksichtigung von Ableitungen an beliebigen Trajektorienpunkten zusammengefasst. Anschließend wird die Spline-Interpolation auf die Orientierungsinterpolation mit Quaternionen erweitert.

2.4.1 Spline-Interpolation unter Nebenbedingungen

Die in diesem Abschnitt vorgestellte Spline-Interpolation wird anhand eines skalaren Problems behandelt. Die Erweiterung auf vektorwertige Punkte ist direkt möglich.

B-Spline-Kurven der Ordnung p sind C^{p-1} -Funktionen und werden in der Form

$$C(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) P_i \quad (2.42)$$

zusammengesetzt. Dabei entspricht $u \in [0, 1]$ dem Interpolationsparameter, P_i den Kontrollpunkten $i = 1, \dots, n$ und $N_{i,p}(u)$ den B-Spline-Basisfunktionen der Ordnung p , welche gemäß

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u), \quad p \geq 1 \quad (2.43a)$$

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & u \in [u_i, u_{i+1}] \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.43b)$$

definiert sind. In (2.43) sind $u_i \in \mathbf{u}$ die Elemente des Knotenvektors \mathbf{u}

$$\mathbf{u} = \underbrace{[u_0 = \dots = u_p, u_{p+1}, \dots, u_n]}_{p+1}, \underbrace{[u_{m-p} = \dots = u_m]}_{p+1} \quad (2.44)$$

mit $m = n + p + 1$. Damit die Spline-Kurve alle vorgegebenen Trajektorienpunkte Q_j zu den Zeitpunkten \tilde{t}_j , $j = 0, \dots, n$ passiert, d. h.

$$Q_j = C(\tilde{t}_j) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(\tilde{t}_j) P_i, \quad j = 0, \dots, n, \quad (2.45)$$

müssen die Zeitpunkte $\tilde{t}_j \in [0, 1]$, der Knotenvektor \mathbf{u} und die Kontrollpunkte P_0, \dots, P_n berechnet werden. Die Berechnung der Parametrierung erfolgt entsprechend der *chord length method* (dt. Methode der Sehnenlängen) durch

$$\tilde{t}_0 = 0, \quad (2.46a)$$

$$\tilde{t}_j = \tilde{t}_{j-1} + \frac{Q_j - Q_{j-1}}{d}, \quad (2.46b)$$

$$\tilde{t}_n = 1, \quad (2.46c)$$

mit der gesamten Sehnenlänge

$$d = \sum_{j=1}^n |Q_j - Q_{j-1}|. \quad (2.47)$$

Der Knotenvektor \mathbf{u} wird entsprechend der *de-Boor-Knoten* [42] zu

$$u_0 = \dots = u_p = 0, \quad (2.48a)$$

$$u_{i+p} = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^{i+p-1} \tilde{t}_j, \quad i = 1, \dots, n - p, \quad (2.48b)$$

$$u_{n+1} = \dots = u_m = 1 \quad (2.48c)$$

festgelegt.

Im nächsten Schritt werden vorgegebene Ableitungen an beliebigen Trajektorienpunkten berücksichtigt. Ausgehend von den bereits definierten Trajektorienpunkten Q_j , $j = 0, \dots, n$ werden die Ableitungen D_k an den Indizes der Trajektorienpunkte I_k mit den Skalierungsfaktoren α_k , $k = 0, \dots, l$ gewählt. Dabei gilt $l \leq n$, d. h. zu jedem Datenpunkt $C(\tilde{t}_j) = Q_j$ kann wahlweise die Ableitung $C'(t_{I_k}) = \alpha_k D_{I_k}$ mit $I_k = j$ vorgegeben werden oder weggelassen werden. Der Parameter α_k beeinflusst die Gewichtung der Ableitung bei der nachfolgenden Bestimmung der Spline-Kontrollpunkte. Für die Ableitung des B-Splines (2.42) und (2.43) ergibt sich

$$C'(u) = \sum_{i=0}^n N'_{i,p}(u) P_i, \quad (2.49a)$$

$$N'_{i,p}(u) = p \left(\frac{N_{i,p}(u)}{u_{i+p} - u_i} - \frac{N_{i+1,p-1}(u)}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} \right) \quad (2.49b)$$

mit den Ableitungen an den Rändern

$$D_0 = C'(u_0) = \frac{p}{u_{p+1} - u_0} (P_1 - P_0), \quad (2.50a)$$

$$D_n = C'(u_m) = \frac{p}{u_m - u_n} (P_n - P_{n-1}). \quad (2.50b)$$

Die Gleichungen (2.50) werden gemäß

$$\gamma_0 D_0 = -P_0 + P_1, \quad (2.51a)$$

$$\gamma_0 = \frac{u_{p+1} - u_0}{p}, \quad (2.51b)$$

$$\gamma_n D_n = -P_{n-1} + P_n, \quad (2.51c)$$

$$\gamma_n = \frac{u_m - u_n}{p} \quad (2.51d)$$

umgeschrieben. Für eine detaillierte Beschreibung der Berechnung des neuen Knotenvektors sei auf [41] verwiesen. Mithilfe der B-Spline-Basisfunktionen (2.43), der Ableitung der Basisfunktionen (2.49) und (2.50), der $n + 1$ Datenpunkte Q_j und der l Ableitungen D_{I_k} kann nun das Gleichungssystem zur Bestimmung der Kontrollpunkte

euklidischen Raum durch Quaternionenmultiplikationen \otimes dargestellt werden. Nachfolgend wird die Quaternionenmultiplikation nicht explizit ausgewiesen, sondern als normales Produkt geschrieben. Im Hinblick auf Rotationen bietet sich folgende Interpretation von Einheitsquaternionen an

$$\underset{\sim}{q} = \mathcal{H} \begin{pmatrix} \cos(\phi) \\ \sin(\phi)\mathbf{n} \end{pmatrix} \quad (2.55)$$

wobei ϕ dem halben Rotationswinkel θ entspricht, d. h. $\phi = \frac{\theta}{2}$ und \mathbf{n} ist die Rotationsachse. Es gilt $|\mathbf{n}| = 1$ und $|\mathbf{q}_v| = |\sin(\phi)|$. Die mithilfe einer Einheitsquaternion $\underset{\sim}{q}$ beschriebene Drehung kann eindeutig als Rotationsmatrix $\mathbf{R} \in \text{SO}(3)$ dargestellt werden. Die inverse Abbildung, d. h. die Zuordnung einer Einheitsquaternion zu einer gegebenen Rotationsmatrix ist nicht eindeutig. Dies liegt daran, dass $\underset{\sim}{q}$ und $-\underset{\sim}{q}$ die gleiche Drehung beschreiben. Eine Übersicht der Rechenregeln für Quaternionen findet sich in [45], [46], [47].

Die Interpolation einer Orientierungstrajektorie mit Quaternionen gestaltet sich schwieriger als für eine Positionstrajektorie, da wegen

$$\left| \underset{\sim}{q} \right| = 1 \quad (2.56)$$

die einzelnen Komponenten von $\underset{\sim}{q}$ nicht getrennt betrachtet werden dürfen. Für die Orientierungsinterpolation werden daher reine Quaternionen $\underset{\sim}{\Psi} \in \{\mathbb{H} \mid w = 0\}$

$$\underset{\sim}{\Psi} = \mathcal{H} \begin{pmatrix} 0 \\ \boldsymbol{\psi} \end{pmatrix} = \mathcal{H} \begin{pmatrix} 0 \\ \phi\mathbf{n} \end{pmatrix} \quad (2.57)$$

eingeführt. Mit der Abbildung reiner Quaternionen $\underset{\sim}{\Psi}$ auf Einheitsquaternionen $\underset{\sim}{q}$ durch die Exponentialfunktion

$$e^{\underset{\sim}{\Psi}} = \mathcal{H} \begin{pmatrix} \cos(\phi) \\ \sin(\phi)\mathbf{n} \end{pmatrix} = \underset{\sim}{q} \quad (2.58)$$

wird die Zwangsbedingung (2.56) implizit berücksichtigt und die Interpolation in den Komponenten von $\Im(\underset{\sim}{\Psi}) = \boldsymbol{\psi}$ ist direkt möglich. Die Umkehrabbildung durch den Logarithmus ist für Einheitsquaternionen definiert als

$$\underset{\sim}{\Psi} = \ln(\underset{\sim}{q}) . \quad (2.59)$$

Eine Drehung ausgehend von der Quaternion q_1 um den Winkel $\theta(\sigma) = 2\phi(\sigma)$, der Rotationsachse $\mathbf{n}(\sigma)$ und dem Kurvenparameter σ lässt sich definieren als

$$\begin{aligned} \underset{\sim}{q}(\sigma) &= q_1 e^{\underset{\sim}{\Psi}(\sigma)} \\ &= q_1 e^{\mathcal{H} \begin{pmatrix} 0 \\ \phi(\sigma)\mathbf{n}(\sigma) \end{pmatrix}} \\ &= q_1 \mathcal{H} \begin{pmatrix} \cos(\phi(\sigma)) \\ \sin(\phi(\sigma))\mathbf{n}(\sigma) \end{pmatrix} . \end{aligned} \quad (2.60)$$

Neben der Orientierung sind die zugehörigen Ableitungen, das sind der Vektor der Drehwinkelgeschwindigkeit $\boldsymbol{\omega}$ und der Vektor der Drehwinkelbeschleunigung $\dot{\boldsymbol{\omega}}$, für die Roboterregelung notwendig. Nachfolgend wird für die Ableitung nach dem Pfadparameter σ die Notation $(\cdot)' = \frac{\partial(\cdot)}{\partial\sigma}$ verwendet. In Quaternionendarstellung berechnet sich die pfadbezogene Winkelgeschwindigkeit zu

$$\tilde{\boldsymbol{\Omega}}(\sigma) := \mathcal{H}\left(\begin{array}{c} 0 \\ \boldsymbol{\Omega}(\sigma) \end{array}\right) = 2\tilde{q}'(\sigma)\tilde{q}^*(\sigma) . \quad (2.61)$$

und mit der zeitlichen Pfadparametrierung $\sigma(t)$ folgt für die momentane Winkelgeschwindigkeit $\boldsymbol{\omega}$ die Beziehung

$$\boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{\Omega}(\sigma(t))\dot{\sigma}(t) . \quad (2.62)$$

Durch Umformen von (2.61) zu

$$\tilde{q}'(\sigma) = \frac{1}{2}\tilde{\boldsymbol{\Omega}}\tilde{q}(\sigma) \quad (2.63)$$

und Ableitung nach σ unter Anwendung der Kettenregel folgt für die zweite Ableitung

$$\tilde{q}''(\sigma) = \frac{1}{2}\left(\tilde{\boldsymbol{\Omega}}'\tilde{q}(\sigma) + \tilde{\boldsymbol{\Omega}}\tilde{q}'(\sigma)\right) . \quad (2.64)$$

Durch umformen von (2.64) und der Eigenschaft von Einheitsquaternionen $\tilde{q}^* = \tilde{q}^{-1}$ gilt

$$\tilde{\boldsymbol{\Omega}}' = 2\tilde{q}''(\sigma)\tilde{q}^*(\sigma) - \tilde{\boldsymbol{\Omega}}\tilde{q}'(\sigma)\tilde{q}^*(\sigma) . \quad (2.65)$$

Die pfadbezogene Drehwinkelbeschleunigung folgt aus (2.65) und (2.61) zu

$$\tilde{\boldsymbol{\Omega}}'(\sigma) = \mathcal{H}\left(\begin{array}{c} 0 \\ \boldsymbol{\Omega}'(\sigma) \end{array}\right) = 2\left(\tilde{q}''(\sigma)\tilde{q}^*(\sigma) - \left(\tilde{q}'(\sigma)\tilde{q}^*(\sigma)\right)^2\right) . \quad (2.66)$$

Für die momentane Drehwinkelbeschleunigung $\dot{\boldsymbol{\omega}}$ gilt mit (2.62)

$$\dot{\boldsymbol{\omega}} = \boldsymbol{\Omega}'(\sigma(t))\dot{\sigma}(t)^2 + \boldsymbol{\Omega}(\sigma(t))\ddot{\sigma}(t) . \quad (2.67)$$

Für die Berechnung von $\tilde{q}'(\sigma)$ und $\tilde{q}''(\sigma)$ basierend auf (2.58) mit der Interpolation in $\tilde{\Psi}$ folgt

$$\tilde{q}'(\sigma) = \tilde{q}_1 \frac{\partial}{\partial\sigma} \left(e^{\tilde{\Psi}(\sigma)} \right) , \quad (2.68a)$$

$$\tilde{q}''(\sigma) = \tilde{q}_1 \frac{\partial^2}{\partial\sigma^2} \left(e^{\tilde{\Psi}(\sigma)} \right) . \quad (2.68b)$$

Die Berechnung von (2.68) ist in Anhang A ausgeführt.

2.5 Regelungskonzept

Dieser Abschnitt behandelt Regelungskonzepte, mithilfe derer der Roboter einer gewünschten Trajektorie im Konfigurationsraum $\mathbf{q}_d(t)$ oder im Arbeitsraum $\mathbf{x}_d(t)$ folgen kann. Die Grundlage für den Regelungsentwurf bilden die Bewegungsgleichungen (2.12), wobei die generalisierten Momente $\boldsymbol{\tau}$ im Allgemeinen in die Stelleingänge $\boldsymbol{\tau}_c$, dissipative Momente $\boldsymbol{\tau}_d$ und externe generalisierte Momente $\boldsymbol{\tau}_{ext}$ aufgeteilt werden, d. h. es gilt

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_c + \boldsymbol{\tau}_d + \boldsymbol{\tau}_{ext} . \quad (2.69)$$

Dissipative Momente $\boldsymbol{\tau}_d$ werden in den folgenden Betrachtungen nicht berücksichtigt. Die externen generalisierten Momente $\boldsymbol{\tau}_{ext}$ werden nicht gemessen und können daher nicht kompensiert werden. Es wird daher für die nachfolgenden Regelgesetze $\boldsymbol{\tau}_{ext} = \boldsymbol{\tau}_d = 0$ angenommen.

2.5.1 Regelung im Konfigurationsraum

Bei der Trajektorienfolgeregelung im Konfigurationsraum [26] soll der Roboterarm – siehe Kapitel 2.1 – einer vorgegebenen Trajektorie bestmöglich folgen. Die Solltrajektorie der Gelenkwinkel $\mathbf{q}_d(t)$ muss zumindest zweifach differenzierbar sein. Hierfür wird das *Regelgesetz der inversen Dynamik* [27]

$$\boldsymbol{\tau}_c = \mathbf{D}(\mathbf{q})\mathbf{v} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) \quad (2.70)$$

verwendet, das den virtuellen Stelleingang \mathbf{v} aufweist. Eingesetzt in (2.12) folgt daraus das lineare Eingangs-Ausgangsverhalten

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{v} . \quad (2.71)$$

Die Wahl von \mathbf{v} zu

$$\mathbf{v} = \ddot{\mathbf{q}}_d - \mathbf{K}_0(\mathbf{q} - \mathbf{q}_d) - \mathbf{K}_1(\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_d) \quad (2.72)$$

mit den positiv definiten Diagonalmatrizen \mathbf{K}_0 und \mathbf{K}_1 liefert die asymptotische Stabilität des Fehlersystems [48] gemäß

$$\ddot{\mathbf{e}}_q + \mathbf{K}_1\dot{\mathbf{e}}_q + \mathbf{K}_0\mathbf{e}_q = \mathbf{0} \quad (2.73)$$

mit dem Regelfehler $\mathbf{e}_q = \mathbf{q} - \mathbf{q}_d$.

2.5.2 Regelung im Arbeitsraum

Für die Trajektorienfolgeregelung im Arbeitsraum ist ein Regelgesetz in den Arbeitsraumkoordinaten erforderlich [27]. Dafür wird (2.9) nach der Zeit abgeleitet

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_0^e \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_0^e \end{bmatrix} = \mathbf{J}_g(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}_g(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} \quad (2.74)$$

um den Zusammenhang der Beschleunigungsterme zwischen Konfigurationsraum $\ddot{\mathbf{q}}$ und Arbeitsraum $\dot{\mathbf{v}}_e$ bzw. $\dot{\boldsymbol{\omega}}_0^e$ zu erhalten.

Der virtuelle Eingang \mathbf{v} in (2.70) wird für die Regelung im Arbeitsraum zu

$$\mathbf{v}_c = \mathbf{J}_g^*(\mathbf{q}) \left(\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_{0,d}^e \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_{0,d}^e \end{bmatrix} - \tilde{\mathbf{K}}_1 \begin{bmatrix} \mathbf{v}_0^e(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{v}_{0,d}^e \\ \boldsymbol{\omega}_0^e(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \boldsymbol{\omega}_{0,d}^e \end{bmatrix} - \tilde{\mathbf{K}}_0 \begin{bmatrix} \mathbf{d}_0^e(\mathbf{q}) - \mathbf{d}_{0,d}^e \\ \mathfrak{S}_{\tilde{\sim}}(q_e) \end{bmatrix} - \dot{\mathbf{J}}_g(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} \right) \quad (2.75)$$

mit den positiv definiten Matrizen $\tilde{\mathbf{K}}_1$ und $\tilde{\mathbf{K}}_0$ gewählt.

Durch die Verwendung eines kinematisch redundanten Manipulators erfolgt die Inversion der Manipulator Jacobi-Matrix mit der rechten Pseudoinversen, die um einen Regularisierungsterm $\lambda^2 \mathbf{E}$ zur sog. Damped-Least-Squares-Inversen (DLS-Inversen) erweitert wurde

$$\mathbf{J}_g^*(\mathbf{q}) = \mathbf{J}_g^T(\mathbf{q}) \left(\mathbf{J}_g(\mathbf{q}) \mathbf{J}_g^T(\mathbf{q}) + \lambda^2 \mathbf{E} \right)^{-1}. \quad (2.76)$$

Durch den Regularisierungsterm mit $0 < \lambda \ll 1$ ist die Matrixinversion in der Umgebung von Singularitäten besser konditioniert.

Für den Regelfehler gilt

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_t \\ \mathbf{e}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_0^e(\mathbf{q}) - \mathbf{d}_{0,d}^e \\ \mathfrak{S}_{\tilde{\sim}}(q_e) \end{bmatrix}. \quad (2.77)$$

Der Orientierungsfehler \mathbf{e}_r in (2.77) entspricht dem Imaginärteil des als Quaternion q_e dargestellten Orientierungsfehlers $\Delta \mathbf{R} = \mathbf{R}_0^e(\mathbf{q}) \mathbf{R}_{0,d}^{eT}$. Dabei beschreibt $\mathbf{R}_{0,d}^e$ die Sollorientierung und $\mathbf{R}_0^e(\mathbf{q})$ die aktuelle Orientierung des Endeffektors. Der Stabilitätsnachweis für die Wahl des Regelfehlers entsprechend (2.77) ist in [49] dargestellt.

2.5.3 Nulldynamik

Die Berechnung der Drehmomente für die Gelenke des Roboterarms, d. h. für die Stellgrößen $\boldsymbol{\tau}_c$, basierend auf der kartesischen Solltrajektorie ist unterbestimmt und hat einen ungenutzten Freiheitsgrad zur Folge. Bei feststehender Endeffektorpose kann der Roboterarm Selbstbewegungen ausführen.

Mithilfe der erweiterten Projektion mit dynamischer Konsistenz (engl. augmented projection with dynamic consistency) [50] kann eine Entkopplung der Regelung der Endeffektorpose und der Armkonfiguration erreicht werden [28]. Dazu wird die erweiterte Projektionsmatrix \mathbf{N}^{aug} gemäß

$$\mathbf{N}^{\text{aug}} = \mathbf{D}(\mathbf{q})\mathbf{N} \quad (2.78a)$$

$$\mathbf{N} = (\mathbf{E} - \mathbf{J}_g^\dagger \mathbf{J}_g) \quad (2.78b)$$

mit $\mathbf{J}_g^\dagger = \mathbf{J}_g^T (\mathbf{J}_g \mathbf{J}_g^T)^{-1}$ verwendet. Mit (2.78) kann nun der ungenutzte Freiheitsgrad zur Positionierung des Roboterarms in die gewünschte Armkonfiguration \mathbf{q}_N benutzt werden. Das erweiterte Regelgesetz $\boldsymbol{\tau}'_c$ lautet somit

$$\boldsymbol{\tau}'_c = \boldsymbol{\tau}_c + \mathbf{N}^{\text{aug}} \boldsymbol{\tau}_N. \quad (2.79)$$

Mithilfe des Nullraumreglers

$$\boldsymbol{\tau}_N = -\mathbf{K}_{0N}(\mathbf{q} - \mathbf{q}_N) - \mathbf{K}_{1N}(\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_N) \quad (2.80)$$

mit den positiv definiten Matrizen \mathbf{K}_{0N} und \mathbf{K}_{1N} wird die gewünschte Armkonfiguration im Nullraum asymptotisch stabilisiert.

Der vollständige virtuelle Stelleingang \mathbf{v}_c im Arbeitsraum folgt aus (2.75), (2.79) und lautet

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_c = & \mathbf{J}_g^*(\mathbf{q}) \left(\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_{0,d}^e \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_{0,d}^e \end{bmatrix} - \tilde{\mathbf{K}}_1 \begin{bmatrix} \mathbf{v}_0^e(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{v}_{0,d}^e \\ \boldsymbol{\omega}_0^e(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \boldsymbol{\omega}_{0,d}^e \end{bmatrix} - \tilde{\mathbf{K}}_0 \begin{bmatrix} \mathbf{d}_0^e(\mathbf{q}) - \mathbf{d}_{0,d}^e \\ \mathfrak{S}(q_e) \end{bmatrix} - \mathbf{J}_g(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} \right) \\ & + (\mathbf{E} - \mathbf{J}_g^\dagger \mathbf{J}_g) \underbrace{(-\mathbf{K}_{0N}(\mathbf{q} - \mathbf{q}_N) - \mathbf{K}_{1N}(\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_N))}_{\text{Nullraumregler}} . \end{aligned} \quad (2.81)$$

Der Nullraumregler mit den positiv definiten Matrizen \mathbf{K}_{0N} und \mathbf{K}_{1N} stabilisiert die gewünschte Armkonfiguration im Nullraum asymptotisch. In der Regel wird $\ddot{\mathbf{q}}_N = \mathbf{0}$, $\dot{\mathbf{q}}_N = \mathbf{0}$ und die gewünschte Armkonfiguration \mathbf{q}_N gleich der Startkonfiguration der aktuellen Trajektorie gewählt.

3 Robotischer Assemblierprozess

In diesem Kapitel wird die praktische Umsetzung des Systems zur robotischen Assemblierung von Betonringsegmenten im Tunnelbau beschrieben. Zunächst wird der experimentelle Versuchsaufbau und seine Komponenten für die Umsetzung im Labormaßstab erklärt. Anschließend wird auf die visuelle Posenschätzung der Segmente eingegangen und es werden die dafür benötigten kinematischen Beziehungen eingeführt. Der Assembliervorgang des Rings im Rahmen des Versuchsaufbaus wird anschließend in Kapitel 3.3 diskutiert und die wesentlichen Abschnitte des Assembliervorgangs werden erklärt. Schließlich wird die Implementierung des gesamten Systems und seiner Komponenten beschrieben. Diese Implementierung bietet die Grundlage für die Simulation (Kapitel 4) und die Umsetzung am realen Versuchsaufbau (Kapitel 5).

3.1 Beschreibung des Versuchsaufbaus

Für die praktische Durchführung des autonomen Ringbaus am Versuchsaufbau müssen die Tübbinge und die erforderlichen Komponenten einer Tunnelbohrmaschine nachgebildet werden. Das umfasst den Erektor mit der Saugplatte und die Vortriebspresen zur Fixierung der Tübbinge während des Ringbaus. Die Nachbildung des Erektors besteht aus dem Leichtbauindustrieroboter KUKA LBR iiwa 14 R820 und der maßstabsgetreuen Nachbildung der Vakuumsaugplatte als Manipulator, dargestellt in Abbildung 2.1. Die Vortriebspresen werden durch Pneumatikzylinder nachgeahmt. Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abbildung 3.1 zu sehen. Er bildet die Gegebenheiten einer realen Tunnelbaustelle im Maßstab 1:5 nach. Der Käfig bildet das umliegende Gebirge nach und dient gleichzeitig als Aufnahme für die Pneumatikzylinder. An deren bewegten Ende sind Klammern als Nachbildung der Pressenschuhe (siehe Kapitel 1.1.1) angebracht. Mithilfe der pneumatisch aktuierten Klammern werden die Tübbinge während des Ringbaus gegen die Montageplatte gepresst und in Position gehalten. Die einzelnen Komponenten sind starr an ein Aluminiumgerüst montiert und stehen daher in fester kinematischer Relation zueinander. Die Tübbinge und die Vakuumsaugplatte wurden für den Versuchsaufbau als 3D-Druck hergestellt.

In Tabelle 3.1 sind die wichtigsten Daten der Tunnelauskleidung des realen Tunnels und des Versuchsaufbaus im Labormaßstab 1:5 aufgelistet. Bei der Angabe der Tübbinglänge ist die Konizität des Tübbingrings (vgl. Kapitel 1.1.2) als symmetrische Toleranzgrenze angegeben. Jeder Ring der Tunnelauskleidung besteht aus sechs Segmenten, nämlich A1, A2, A3, B, C und dem Schlussstein K. Die zwölf Vortriebspresen werden daher in sechs Vortriebspresengruppen (VTP-Gruppe) unterteilt. Jede VTP-Gruppe dient zur Fixierung eines der sechs Segmente.

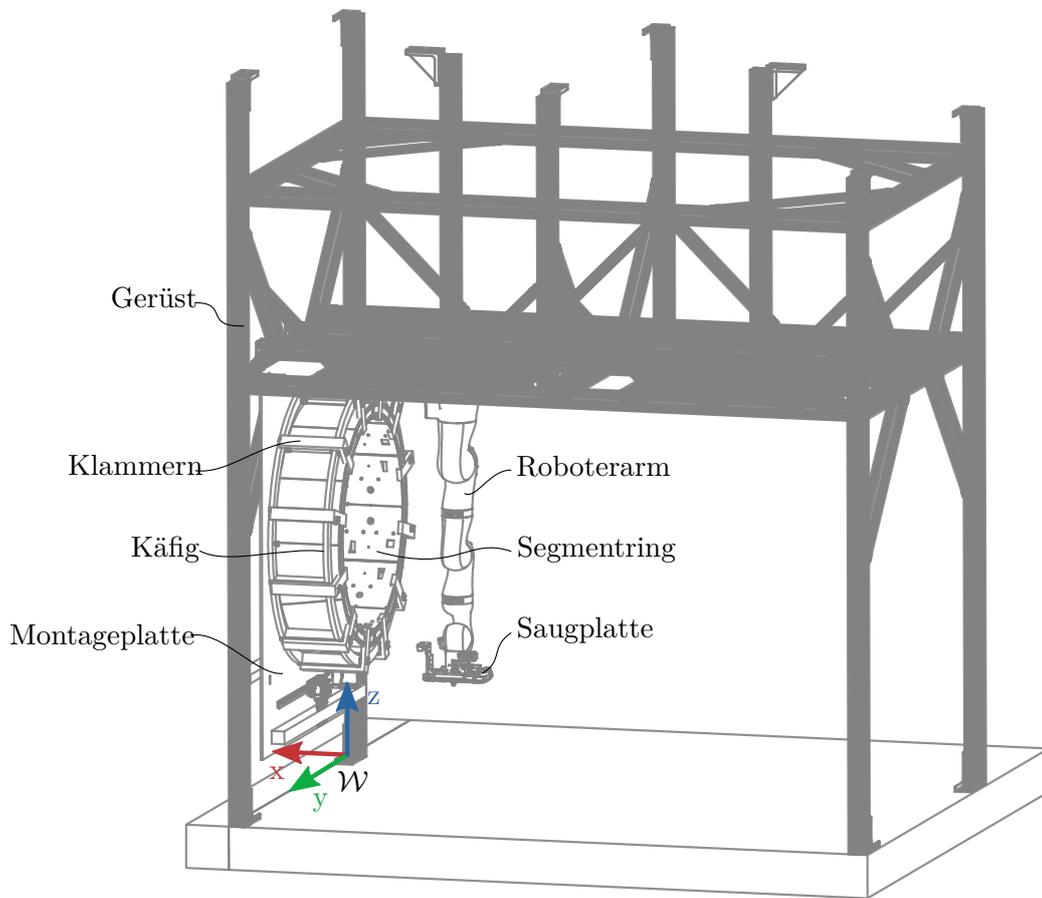


Abbildung 3.1: Darstellung des Aufbaus für die praktische Durchführung des Ringbaus unter Laborbedingungen.

3.2 Visuelle Posenschätzung der Segmente

Die Erfassung der Position und Orientierung der Segmente, kurz Posenerfassung, erfolgt visuell durch eine markerbasierte Posenschätzung. Die Grundlagen der Posenschätzung sind in Kapitel 2.2 beschrieben. Für die Implementierung der Posenschätzung und die Erstellung der Marker wird die ArUco-Softwarebibliothek verwendet [38], [39].

In Abbildung 3.2 ist das im Ring positionierte K-Segment dargestellt. Die Marker $\mathcal{SM}1$ und $\mathcal{SM}2$ dienen zur Erfassung der Segmentpose. Die Marker $\mathcal{M}1$ bis $\mathcal{M}3$ sind mit der Montageplatte verbunden und entsprechen im realen Umfeld einem Segment im zuvor errichteten Ring. Diese Marker bilden somit die Referenz für den Bau der nachfolgenden Segmente.

Die Saugplatte ist mit drei Kameras ausgestattet, zu sehen in Abbildung 2.1. Während der Segmentaufnahme wird Kamera 1 zur Erfassung des Segmentmarkers $\mathcal{SM}1$ verwendet

Bezeichnung	realer Tunnel	Versuchsaufbau im Labormaßstab 1:5
Schilddurchmesser	5940 mm	1200 mm
Anzahl der Ringsegmente	6	6
Ringaußendurchmesser	5600 mm	1120 mm
Ringinnendurchmesser	4900 mm	980 mm
Tübbinglänge	1500 mm \pm 10 mm	300 mm \pm 2 mm

Tabelle 3.1: Kennzahlen der Tunnelauskleidung.

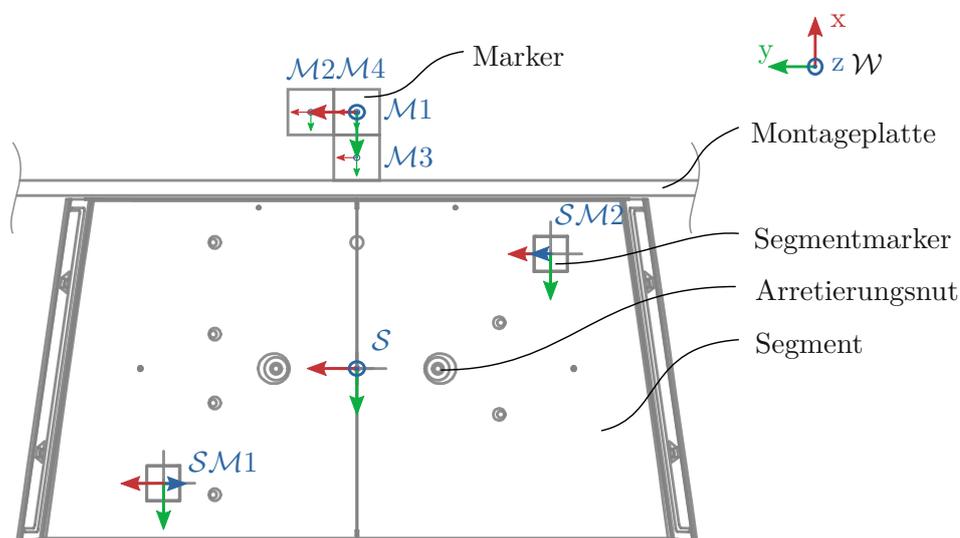


Abbildung 3.2: Grundriss des im Ring positionierten Segments K.

und während der Segmentplatzierung wird Kamera 3 zur Erfassung der Marker $\mathcal{M}1$ bis $\mathcal{M}3$ verwendet. Kamera 2 und der Segmentmarker $\mathcal{SM}2$ sind optional vorgesehen, um eine exakte Posenschätzung des aufzunehmenden Segments zu erzielen. Die Posenerfassung durch Kamera 1 ist allerdings bereits gut genug, daher wird Kamera 2 nachfolgend nicht verwendet.

Die Marker $\mathcal{M}1$ bis $\mathcal{M}3$ bilden einen neuen (virtuellen) Marker $\mathcal{M}4$ mit dem Ursprung $0_{\mathcal{M}4} = 0_{\mathcal{M}1}$. Die x -Achse zeigt in Richtung $\mathcal{M}2$ und die y -Achse zeigt in Richtung $\mathcal{M}3$. Die Orientierung von $\mathcal{M}4$ wird anhand der Positionsschätzung der Marker $\mathcal{M}1$ bis $\mathcal{M}3$ berechnet.

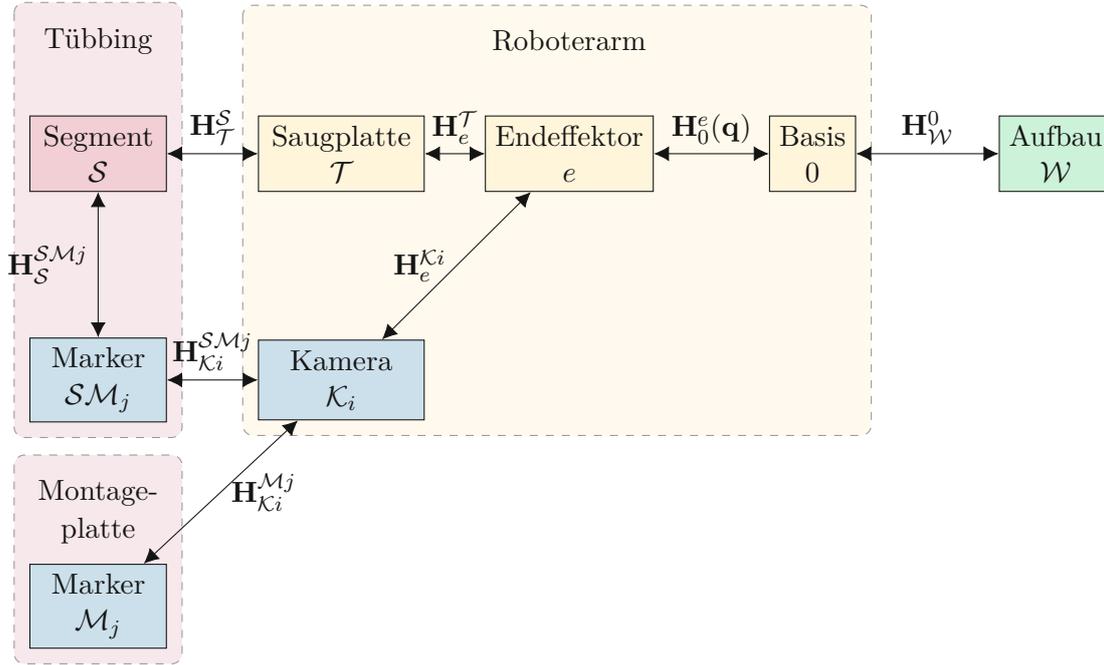


Abbildung 3.3: Kinematische Beziehung zwischen dem Roboterarm und dem zu manipulierenden Tübbing.

3.2.1 Kinematische Beziehungen

Die kinematischen Beziehungen zwischen Segment, Roboter und Umgebung sind in Abbildung 3.3 schematisch dargestellt. Beginnend im Ursprung des Koordinatensystems des Versuchsaufbaus \mathcal{W} (Weltkoordinatensystem) beschreibt $\mathbf{H}_{\mathcal{W}}^0$ die Transformation in das Roboterbasiskoordinatensystem 0. Die homogene Transformation $\mathbf{H}_0^e(\mathbf{q})$ entspricht der Vorwärtskinematik des Roboters als Funktion der Gelenkwinkel \mathbf{q} und \mathbf{H}_e^T entspricht der statischen Transformation in den TCP der Saugplatte \mathcal{T} in Bezug auf das Endeffektorkoordinatensystem e (siehe Kapitel 2.1.1). Die an der Saugplatte montierten Kameras $i \in \{1, 2, 3\}$ werden im Endeffektorkoordinatensystem e mit $\mathbf{H}_e^{\mathcal{K}_i}$ beschrieben.

Die Pose der Segmentmarker \mathcal{SM}_j , $j \in \{1, 2\}$ bezüglich des Segments \mathcal{S} wird durch $\mathbf{H}_{\mathcal{S}}^{\mathcal{SM}_j}$ erfasst. Im Allgemeinen ist die Transformation $\mathbf{H}_{\mathcal{S}}^T$ zwischen dem Segment \mathcal{S} und dem TCP \mathcal{T} unbekannt und wird durch die markerbasierte Posenbestimmung geschätzt. Nur wenn ein Segment mithilfe der Saugplatte vom Roboter aufgenommen wurde, ist die Pose des Segments bezüglich des TCP aufgrund der Arretierbolzen der Saugplatte und der Arretierungsnuten im Segment bekannt. Diesen Fall beschreibt die Transformation $\tilde{\mathbf{H}}_{\mathcal{S}}^T$. Die Erfassung der Pose des Segments \mathcal{S} bezüglich des TCP \mathcal{T} erfolgt durch die Detektion der Segmentmarker \mathcal{SM}_j mithilfe der Kameras \mathcal{K}_i , $i \in \{1, 2\}$. Die Segmentpose wird durch die von der Posenschätzung berechneten Transformation $\mathbf{H}_{\mathcal{K}_i}^{\mathcal{SM}_j}$ beschrieben.

Zusammenfassend ergibt sich die homogene Transformation für die Segmentpose \mathcal{S} im Roboterbasiskoordinatensystem 0 gemäß

$$\mathbf{H}_0^{\mathcal{S}} = \mathbf{H}_0^e(\mathbf{q})\mathbf{H}_e^{\mathcal{K}_i}\mathbf{H}_{\mathcal{K}_i}^{\mathcal{SM}_j}\mathbf{H}_{\mathcal{SM}_j}^{\mathcal{S}}. \quad (3.1)$$

Die bekannten Transformationen \mathbf{H}_0^W , \mathbf{H}_e^T , $\mathbf{H}_e^{K_i}$, $\tilde{\mathbf{H}}_S^T$ und $\mathbf{H}_S^{M_j}$ sind aus dem CAD-Modell des Laboraufbaus (siehe Abbildung 3.1) entnommen. Am realen Versuchsaufbau wird die homogene Transformation $\mathbf{H}_e^{K_i}$ durch eine Kalibrierung ermittelt, siehe Kapitel 3.2.3.

Segmentaufnahme

Für die Aufnahme eines Segments mithilfe der Vakuumsaugplatte wird die entsprechende Pose des TCP \mathcal{T} relativ zum Segment \mathcal{S} gegeben im Roboterbasiskoordinatensystem 0 ermittelt. Hierfür muss mindestens einer der beiden Segmentmarker $\mathcal{SM}1$ bzw. $\mathcal{SM}2$ im Sichtbereich von Kamera 1 bzw. 2 sein. Im weiteren Verlauf wird der Marker $\mathcal{SM}1$ für die Bestimmung der Aufnahmeposition verwendet. Mithilfe der geschätzten Transformation \mathbf{H}_{K1}^{SM1} und der bekannten Geometrie des Segments, ergibt sich die gewünschte Pose des TCP \mathcal{T} , d. h. der Pose der Saugplatte im Moment der Segmentaufnahme, zu

$$\mathbf{H}_{0,A}^T = \mathbf{H}_0^e(\mathbf{q})\mathbf{H}_e^{K1}\mathbf{H}_{K1}^{SM1}\mathbf{H}_{SM1}^S\mathbf{H}_S^{S,off}\tilde{\mathbf{H}}_S^T. \quad (3.2)$$

Die Transformation $\mathbf{H}_S^{S,off}$ dient dazu, den TCP in einem gewünschten Abstand (engl. offset) zum Segment zu positionieren. Diese Transformation wird in Kapitel 3.4.1 benötigt.

Segmentplatzierung

Die Platzierung eines Segments erfolgt analog zur Segmentaufnahme. Als Marker wird der aus den Markern $\mathcal{M}1$ bis $\mathcal{M}3$ ermittelte virtuelle Marker $\mathcal{M}4$ verwendet. Das aufgenommene Segment mit der Pose \mathcal{S} ist mit der Saugplatte mit dem Koordinatensystem \mathcal{T} arretiert. Daher gilt die bekannte homogene Transformation $\tilde{\mathbf{H}}_S^T$. Für die Markererfassung dient Kamera 3. Die benötigte Pose \mathcal{T} für die Saugplatte bei der Platzierung des Segments lautet daher

$$\mathbf{H}_{0,P}^T = \mathbf{H}_0^e(\mathbf{q})\mathbf{H}_e^{K3}\mathbf{H}_{K3}^{M4}\mathbf{H}_{M4}^S\mathbf{H}_S^{S,off}\tilde{\mathbf{H}}_S^T. \quad (3.3)$$

3.2.2 Filterung der Positions- und Orientierungssignale

Die Positioniergenauigkeit der Segmente im Ring durch den Roboter wird u. a. durch das Positions- bzw. Orientierungsrauschen der visuellen Posenschätzung sowie nicht erkannten Markern in einzelnen Kamerabildern limitiert. Aus diesem Grund werden die Positionen der Marker $\mathcal{M}1$ bis $\mathcal{M}3$ mithilfe eines Kalman-Filters geschätzt. Für den virtuellen Marker $\mathcal{M}4$ erfolgt die Filterung der Positions- und Orientierungssignale implizit durch die Filterung der Positionssignale der Marker $\mathcal{M}1$ bis $\mathcal{M}3$.

Bei der Segmentaufnahme werden ebenfalls nur die Positionssignale des Markers $\mathcal{SM}1$ gefiltert. Aufgrund der Arretierungsbolzen der Vakuumsaugplatte in Verbindung mit den Arretierungsnuten in den Segmenten (siehe Abbildung 3.2) ist die Segmentaufnahme weniger empfindlich auf Orientierungsrauschen.

Für den Zeitpunkt $t_{k+1} = (k+1)T_a$ folgt die Schätzung der Positionssignale $\hat{\mathbf{y}}_{k+1} = [\hat{x}_{K_i}^{M_j}, \hat{y}_{K_i}^{M_j}, \hat{z}_{K_i}^{M_j}]^T$ basierend auf den Positionssignalen der visuellen Positionsschätzung $\mathbf{y}_{k+1} = [x_{K_i}^{M_j}, y_{K_i}^{M_j}, z_{K_i}^{M_j}]^T$ aus

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = \Phi\hat{\mathbf{x}}_k + \mathbf{L}(\mathbf{y}_k - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}_k) \quad (3.4a)$$

$$\hat{\mathbf{y}}_k = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}_k. \quad (3.4b)$$

Dazu wird in (3.4) die Markerbewegung mit konstanter Geschwindigkeit angenommen

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T_a & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & T_a & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T_a \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

mit dem Zustandsvektor

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \begin{bmatrix} \hat{x}_{\mathcal{K}_i}^{\mathcal{M}_j} \\ \hat{y}_{\mathcal{K}_i}^{\mathcal{M}_j} \\ \hat{z}_{\mathcal{K}_i}^{\mathcal{M}_j} \\ \hat{x}_{\mathcal{K}_i}^{\mathcal{M}_j} \\ \hat{y}_{\mathcal{K}_i}^{\mathcal{M}_j} \\ \hat{z}_{\mathcal{K}_i}^{\mathcal{M}_j} \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

Die Berechnung der Kalman-Verstärkung \mathbf{L} sowie die verwendeten Parameter wird in Anhang C diskutiert.

3.2.3 Kalibrierung

Im realen Versuch ist es notwendig, die unvermeidlichen Abweichungen des realen Aufbaus gegenüber dem CAD-Modell zu kompensieren. Dazu wird die unbekannte Transformation $\mathbf{H}_e^{\mathcal{K}_i}$ aus den als bekannt angenommenen Transformationen $\mathbf{H}_e^{\mathcal{T}}$, $\tilde{\mathbf{H}}_S^{\mathcal{T}}$ und $\mathbf{H}_S^{\mathcal{M}_j}$ sowie der geschätzten Transformation $\mathbf{H}_{\mathcal{K}_i}^{\mathcal{M}_j}$ berechnet (vgl. Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3).

Segmentaufnahme (Kameras 1 und 2)

Für die Kalibrierung von $\mathbf{H}_e^{\mathcal{K}_1}$ wird ein Segment mit der Sauplatte angesaugt und die Transformation $\mathbf{H}_e^{\mathcal{K}_1}$ aus

$$\mathbf{H}_e^{\mathcal{K}_1} = \mathbf{H}_e^{\mathcal{T}} \tilde{\mathbf{H}}_S^{\mathcal{S}} \mathbf{H}_S^{\mathcal{M}_1} \mathbf{H}_{S\mathcal{M}_1}^{\mathcal{K}_1} \quad (3.7)$$

ermittelt. Die Kalibrierung von Kamera 2 erfolgt analog zu (3.7).

Segmentplatzierung (Kamera 3)

Im Fall der Segmentplatzierung wird ein Segment manuell mit der Saugplatte gegriffen und das Segment an der exakten Position im Ring platziert. Hierfür werden in der Montageplatte montierte Arretierungsbolzen eingesetzt. Dadurch ist eine genaue Ausrichtung der Marker \mathcal{M}_1 bis \mathcal{M}_3 bezüglich der Kamera 3 sichergestellt. Die Kalibrierung von $\mathbf{H}_e^{\mathcal{K}_3}$ erfolgt analog zu (3.7) mit

$$\mathbf{H}_e^{\mathcal{K}_3} = \mathbf{H}_e^{\mathcal{T}} \tilde{\mathbf{H}}_S^{\mathcal{S}} \mathbf{H}_S^{\mathcal{M}_4} \mathbf{H}_{S\mathcal{M}_4}^{\mathcal{K}_3}. \quad (3.8)$$

3.3 Assembliervorgang

Der eigentliche Assembliervorgang des Segmentrings erfolgt durch sukzessives Einfügen der Tübbinge in den Ring. Die Reihenfolge der Tübbinge entsprechend ihres Segmenttyps hängt von der Ringposition (Drehung des Rings) ab. Die nachfolgend betrachtete Abfolge lautet: B (Sohle), A3, A2, A1 (Firste), C, K. Der Ringbau erfolgt aus Sicht des Roboters in Abbildung 3.1 im Uhrzeigersinn. Ein vollständiger Segmentring ist in Abbildung 1.2 dargestellt.

Die automatische Platzierung eines Segments im Ring besteht aus mehreren Abschnitten. Zunächst fährt der Roboterarm in die vorab bekannte Aufnahme- und Platzierungsposition des zu platzierenden Segments. Die Marker $SM1$ und $SM2$ sind dann im Sichtbereich der Kamera 1 bzw. Kamera 2. Durch die visuelle Posenerfassung wird der Roboterarm zur Greifpose bewegt, die Saugplatte mit Vakuum beaufschlagt und das Segment angehoben. Das Segment ist somit fest mit der Saugplatte arretiert.

Anschließend bewegt sich der Roboterarm zu der Platzierungsposition des Segments im Ring. Dabei ist bei der Wahl der Via- und Zielpunkte der Konfigurationsraumtrajektorien (Grobpositionierung) auf Kollisionen mit dem Käfig, bzw. dem Gebirge unter Realbedingungen, und benachbarten Segmenten zu achten. Die Marker $M1$ bis $M3$ sind in diesem Abschnitt im Sichtbereich von Kamera 3. Somit ist durch die Reihenfolge der Segmentplatzierung auch die Position der benachbarten Segmente bekannt und der Einbau des Segments erfolgt unter Berücksichtigung der genauen, markerbasierten Schätzung der Posen.

Während der Roboter das Segment in der gewünschten Zielposition hält, schließen die pneumatisch aktuierten Klammern und fixieren somit das Segment. Abschließend wird das Vakuum der Saugplatte deaktiviert. Der Roboter fährt im Segmentring radial nach innen, um das Segment vom Sauggreifer zu lösen und danach weiter in die ursprüngliche Ausgangsposition. Dieser Prozess wiederholt sich für jedes Segment, bis der Ring vollständig assembliert ist. Besondere Acht ist beim Schlussstein auf den Einfädelvorgang zu geben, da dieser Kontaktstellen an drei Seiten aufweist, nämlich mit der Montageplatte und zwei benachbarten Segmenten.

Die Positionierung des Manipulators im Zuge der Segmentaufnahme und Segmentplatzierung wird unterteilt in eine Grob- und Feinpositionierung.

3.3.1 Grobpositionierung

Im Fall der Grobpositionierung werden ausgedehnte Bewegungen des Manipulators ausgeführt. Die Trajektorienplanung erfolgt im Konfigurationsraum, siehe Kapitel 2.3.1, wobei die Startkonfiguration $\mathbf{q}_{\text{start}}$ der aktuellen Roboterarmkonfiguration \mathbf{q} entspricht. Die Zielkonfiguration \mathbf{q}_{ziel} ist der Ablaufsteuerung bei der Definition der Ablaufsequenz bekannt zu geben, siehe Kapitel 3.4.1.

Einzigste Anforderung an die Zielposition bei der Segmentaufnahme ist die Gewährleistung, dass die Marker $SM1$ bzw. $SM2$ des zu greifenden Segments im Blickfeld von Kamera 1 bzw. Kamera 2 sind. Diese Anforderung an die Zielkonfiguration ist im realen Tunnelbaueinsatz in der Regel ohnehin durch den Segment-Feeder (siehe Kapitel 1.1.2) und der damit bekannten Position des aufzunehmenden Tübbings erfüllt. Dadurch ist die grobe Position der Segmentmarker $SM1$ und $SM2$ bekannt.

Die Lage des neu zu errichtenden Rings und damit die Position des zu platzierenden Segments sind ebenfalls mit hinreichender Genauigkeit bekannt, um die Marker $\mathcal{M}1$ bis $\mathcal{M}3$ in den Sichtbereich von Kamera 3 zu bringen.

3.3.2 Feinpositionierung

Die Feinpositionierung umfasst die präzisen Bewegungen bei der Segmentaufnahme und Segmentplatzierung. Zur Bestimmung der exakten Pose eines Segments wird die visuelle Posenschätzung – beschrieben in Kapitel 2.2 und Kapitel 3.2 – eingesetzt. Bei der Feinpositionierung erfolgt eine iterative Planung der Trajektorien im Arbeitsraum (kartesischer Raum) des Roboters.

Überblick

Mithilfe der markerbasierten Posenschätzung kann die Pose eines Segments relativ zum Manipulator bestimmt werden (Segmentaufnahme). Gleichmaßen kann auch die Pose des aktuell gegriffenen Segments in Relation zu einem bereits verbauten Segment bestimmt werden (Segmentplatzierung). Durch die relative Messung der Posen entfällt die Notwendigkeit einer präzisen, absoluten Kalibrierung des Roboters im Arbeitsraum.

Die auftretenden Kontaktkräfte bei der Interaktion des Manipulators mit der Umwelt werden durch die Wahl der Regelparameter in (2.81) beeinflusst. Die Roboterregelung entspricht einer Impedanzregelung und weist dadurch die Charakteristik eines Feder-Dämpfer-Systems auf.

Damit der Roboterarm bei der Trajektorienausführung nicht mit der Umgebung oder den Kameras kollidiert, wird die kinematische Redundanz des Roboters eingesetzt. Durch die Wahl des Sollwerts des Nullraumreglers \mathbf{q}_N in (2.81) kann die Konfiguration des Roboters bei vorgegebener Endeffektorpose beeinflusst werden, siehe Kapitel 2.1.1.

Iterative Trajektorienplanung

Bei Annäherung des Manipulators an das Segment bzw. an die Platzierungsposition verbessert sich die visuelle Erfassung der Marker. Dadurch stehen mit geringer werdenden Abstand der Kameras zu den Markern bessere Posenschätzungen der jeweiligen Zielpose zur Verfügung. Diese neuen Schätzungen werden verwendet, um den verbleibenden Trajektorienabschnitt neu zu planen. Die auf der visuellen Posenschätzung basierende Trajektorienplanung wird während der Feinpositionierung iterativ ausgeführt. Die Qualität der vorgegebenen Zielposition \mathbf{H}_0^T in (3.2) und (3.3) hängt direkt von $\mathbf{H}_{\mathcal{K}i}^M$ und damit von der Posenschätzung ab.

Die iterative Trajektorienplanung ist schematisch als Zeitdiagramm in Abbildung 3.4 illustriert. Die Arbeitsraumtrajektorie n beginnt bei $t_{n,0}$ und endet nominell bei $t_{n,1}$. Im Rahmen der iterativen Planung wird diese Trajektorie zum Zeitpunkt $t_{n+1,0}$ von der Trajektorie $n+1$ unterbrochen. Diese neue Trajektorie basiert auf einer aktuelleren, besseren Posenschätzung und wird bis zum selben Endzeitpunkt $t_{n+1,1} = t_{n,1}$ geplant. Die nächste Trajektorie $n+2$ setzt dieses Schema fort bis der Endzeitpunkt $t_{n,1} = t_{n+1,1} = t_{n+2,1}$ und die Zielpose $\mathbf{x}_e(t_{n,1})$ im Arbeitsraum erreicht ist.

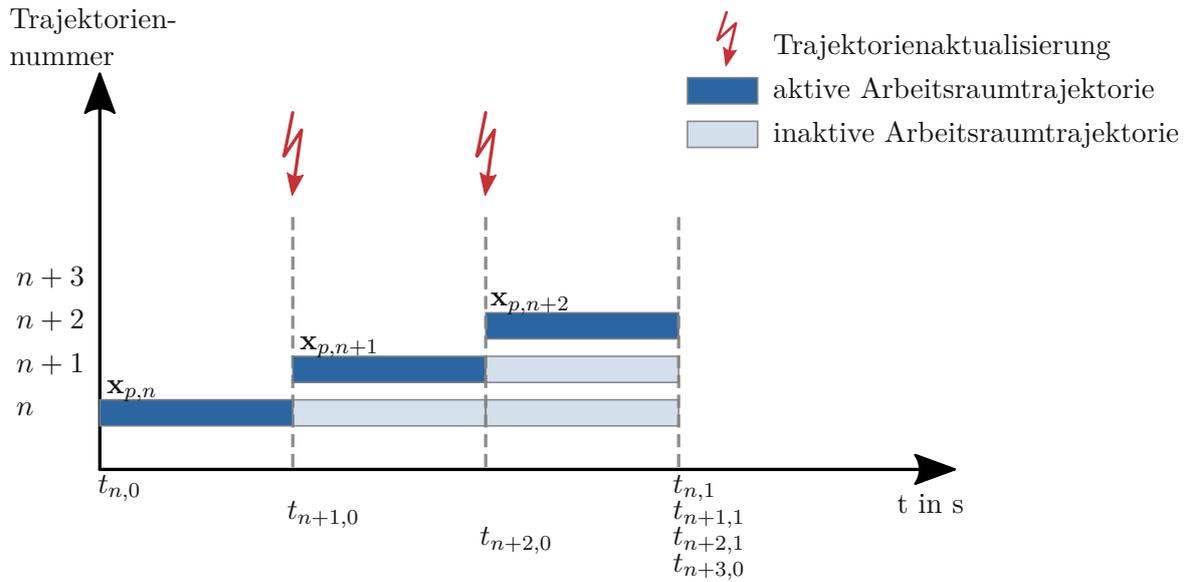


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung der iterativen Trajektorienplanung.

Zu beachten ist die Anforderung an einen stetigen Übergang auf die neue Trajektorie. Aufgrund von (2.8) und (2.9) muss gelten

$$\mathbf{x}_{p,n+1}(t_{n+1,0}) = \mathbf{x}_e(t_{n+1,0}) \quad (3.9a)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{p,n+1}(t_{n+1,0}) \\ \boldsymbol{\omega}_{0,p,n+1}^e(t_{n+1,0}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_e(t_{n+1,0}) \\ \boldsymbol{\omega}_0^e(t_{n+1,0}) \end{bmatrix}. \quad (3.9b)$$

3.4 Implementierung

Das System zur robotischen Assemblierung von Ringsegmenten gliedert sich im Wesentlichen in die Ablaufsteuerung, die visuelle Posenschätzung, die Trajektorienplanung, die Trajektorieninterpolation und Trajektorienfolgeregelung. Abbildung 3.5 liefert einen Überblick über die Interaktion der einzelnen Komponenten.

Als Implementierungsframework wird ROS (Robot Operating System) verwendet. Jede Komponente stellt dabei einen ROS-Node dar und die Kommunikation erfolgt via ROS-Messages und ROS-Topics. Dabei kann jeder Node als sog. *Publisher* ROS-Messages an ein beliebiges ROS-Topic senden. Andere Nodes können als *Subscriber* die Messages eines Topics empfangen.

Die Ablaufsteuerung koordiniert die einzelnen Aktionen der Assemblierung des Segmentrings. Die digitale Abbildung des Systems erfolgt durch die digitalen Zwillinge (engl. digital twins) *TIGS* und *Iiwa*. Die Instanz der *TIGS*-Komponente (engl. tubing installation and guiding system) umfasst dabei die digitale Abbildung der Vortriebspressen, des Saugplattenvakuums und der visuellen Posenerfassung. Für die Posenschätzung werden die Bilder der Kameras mithilfe der ArUco-Softwarebibliothek verarbeitet, siehe Kapitel 2.2. Die resultierende Markerpose $\mathbf{H}_{\mathcal{K}i}^{Mj}$ wird durch die *TIGS*-Instanz bereitgestellt.

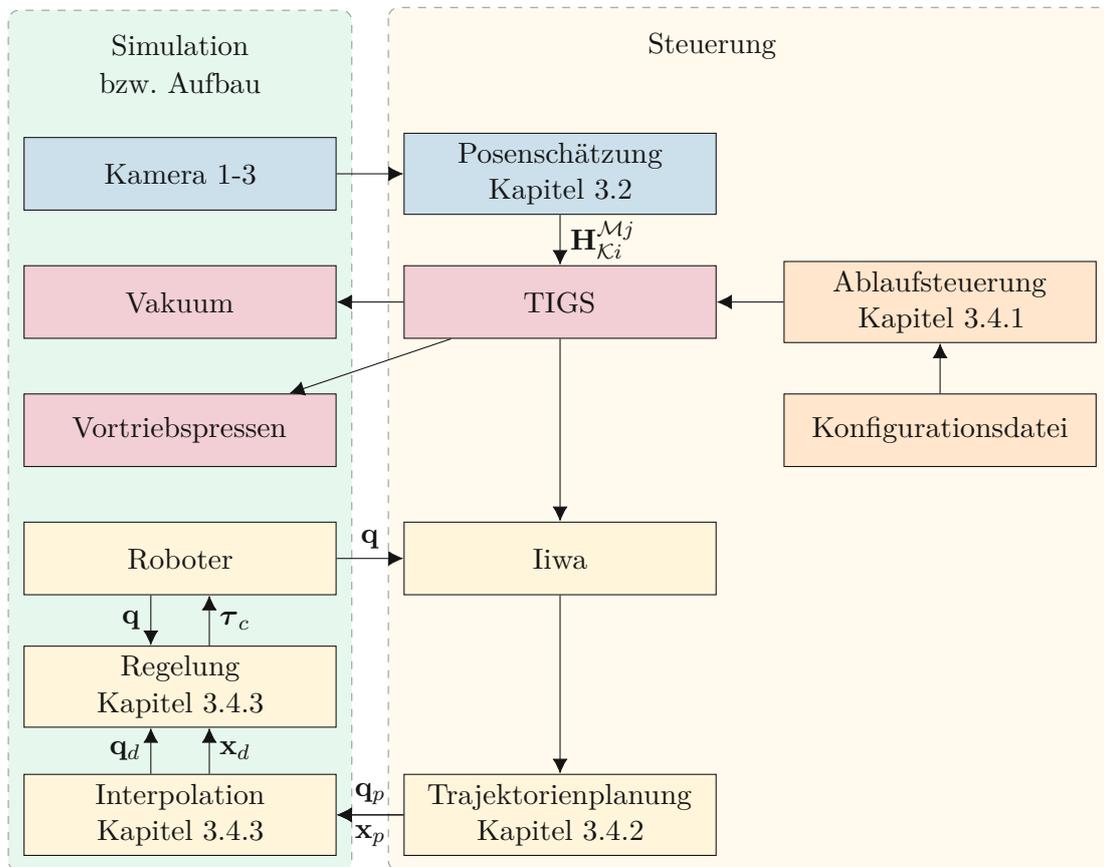


Abbildung 3.5: Darstellung der Implementierung.

Die digitale Abbildung des Roboterarms erfolgt durch die Instanz der *Iiwa*-Komponente. Darin abgebildet ist u. a. die momentane Roboterkonfiguration \mathbf{q} und darauf basierend die Vorwärtskinematik entsprechend Kapitel 2.1.1. Die Trajektorienplanung wird von der *Iiwa*-Instanz aufgerufen und basiert auf Kapitel 2.3. In Kapitel 2.5 sind die Grundlagen der Trajektorienfolgeregelung dargestellt. Die Interpolation der geplanten Trajektorien \mathbf{q}_p bzw. \mathbf{x}_p im Zeitraster der Roboterregelung liefert die Solltrajektorien \mathbf{q}_d bzw. \mathbf{x}_d und beruht auf den in Kapitel 2.4 beschriebenen Methoden.

Das System wird zunächst in Simulation auf Funktionalität und Durchführbarkeit geprüft und anschließend am realen Versuchsaufbau realisiert. Daher gibt es abhängig von der Realisierung implementierungsspezifische Unterschiede, auf die in Kapitel 4.1 respektive Kapitel 5.1 eingegangen wird. In Abbildung 3.5 sind die von der Realisierung abhängigen Komponenten im Bereich *Simulation bzw. Aufbau* und die vom Aufbau unabhängigen Komponenten im Bereich *Steuerung* zusammengefasst.

In den nachfolgenden Abschnitten wird auf die einzelnen Komponenten in Abbildung 3.5 detaillierter eingegangen.

3.4.1 Ablaufsteuerung

Die während des Ringbaus durchgeführten Abläufe werden in einzelne Aktionen unterteilt. Diese Aktionen werden in einer Sequenz aneinandergereiht und von der Ablaufsteuerung koordiniert. Dadurch können die benötigten Abläufe für die Segmentaufnahme oder die Segmentpositionierung in den unterschiedlichen Ringpositionen einfach durch Erstellen der jeweiligen Sequenzen programmiert werden.

Eine Aktion besteht aus einer Transitionsbedingung (TB), einer Transitionsaktion (TA) und einem Prozessausgangsabbild (engl. Process Output Image, POI). Ist die Transitionsbedingung erfüllt, wird die aktuelle Aktion verlassen und die nächste Aktion ausgeführt. Während dieser Transition wird die Transitionsaktion ausgeführt. Während eine Transition aktiv ist, wird das Prozessausgangsabbild zyklisch ausgegeben und dient dazu, wiederkehrende Aufgaben wie bspw. die iterative Trajektorienplanung auszuführen. Die Transitionsbedingung entspricht in der Regel $(t - t_0) > T_{Aktion}$, d. h. die Aktion ist für die Zeitdauer T_{Aktion} aktiv.

Die nachfolgende Auflistung zeigt die wichtigsten Aktionen und ihre Beschreibung:

- **STOP**
Es werden keine Aktoren angesteuert. Der Roboter verbleibt in seiner aktuellen Konfiguration.
- **JSMOV**
Dient zur Ausführung einer Trajektorie im Konfigurationsraum des Roboters (JS steht für engl. jointspace). Als Argument wird die Zielkonfiguration \mathbf{q}_1 angegeben.
- **TSMOV**
Dient zur Ausführung einer Trajektorie im Arbeitsraum des Roboters (TS steht für engl. taskspace). Als Argument wird die Zielpose für den Endeffektor \mathbf{H}_0^T angegeben.
- **TSMOVREL**
Dient zur Ausführung einer Relativbewegung im Arbeitsraum des Roboters. Als Argument wird die gewünschte Pose \mathcal{T}^* bezüglich der ursprünglichen Endeffektorpose \mathcal{T} in Form der homogenen Transformation $\mathbf{H}_S^{S,off}$ angegeben. Die Pose des TCP berechnet sich zu $\mathbf{H}_0^T = \mathbf{H}_0^e(\mathbf{q})\mathbf{H}_e^T\tilde{\mathbf{H}}_7^S\mathbf{H}_S^{S,off}\tilde{\mathbf{H}}_S^T$.
- **NULLSP**
Setzt den Sollwert \mathbf{q}_N des Nullraumreglers (2.81), siehe Kapitel 2.5.3.
- **VISFB_PICKUP**
Führt die Segmentaufnahme basierend auf der visuellen Posenschätzung von Kamera 1 mit iterativer Trajektorienplanung aus. Als Argument wird die Zeitdauer zwischen den Trajektorienaktualisierungen T_{update} angegeben.
- **VISFB_OFFSET_PICKUP**
Ähnlich dem obigen Befehl allerdings ist die Zielpose um $\mathbf{H}_S^{S,off}$ versetzt, siehe (3.2). Als Argumente werden $\mathbf{H}_S^{S,off}$ und das Trajektorienaktualisierungsintervall T_{update} angegeben.

- **VISFB_PLACE**
Führt die Segmentplatzierung basierend auf der visuellen Posenschätzung von Kamera 3 mit iterativer Trajektorienplanung aus. Als Argument wird das Trajektorienaktualisierungsintervall T_{update} angegeben.
- **VISFB_OFFSET_PLACE**
Ähnlich dem obigen Befehl allerdings ist die Zielpose um $\mathbf{H}_S^{\text{S,off}}$ versetzt, siehe (3.3). Als Argumente sind $\mathbf{H}_S^{\text{S,off}}$ und das Trajektorienaktualisierungsintervall T_{update} anzugeben.
- **TOOLPARAM**
Mit diesem Befehl wird die am Endeffektor des Roboters angebrachte Masse sowie der Massenschwerpunkt angepasst. Diese Parameter werden in den dynamischen Bewegungsgleichungen (2.12) berücksichtigt und beeinflussen dadurch die Roboterregelung der inversen Dynamik (2.70).
- **VAC**
Dieser Befehl dient der Steuerung des Saugplattenvakuums. Als Argument wird der Sollzustand des Vakuums (*ein* bzw. *aus*) übergeben.
- **VTP**
Mit diesem Befehl werden die Vortriebspessengruppen angesteuert. Als Argument wird der Sollzustand jeder Vortriebspessengruppe (*offen* bzw. *geschlossen*) übergeben.

Zwei exemplarische Ablaufsequenzen sind in Abbildung 3.6 dargestellt. Im Fall der Segmentaufnahme (Abbildung 3.6a) erfolgt zunächst die Grobpositionierung mit **JSMOV**. Danach wird mittels **NULLSP** die aktuelle Armkonfiguration an den Nullraumregler übermittelt, damit diese beim Umschalten auf den Arbeitsraumregler erhalten bleibt. Als erster Schritt der Feinpositionierung wird der Manipulator durch **TSMOVREL** näher an die planmäßige, a priori bekannte Segmentposition gebracht. Wichtig dabei ist, dass der Segmentmarker $\mathcal{SM}1$ zu diesem Zeitpunkt von Kamera 1 gut erfasst wird. Andernfalls muss die planmäßige Segmentposition angepasst werden. Das Saugplattenvakuum wird mit **VAC** aktiviert und die Segmentaufnahme wird mit **VISFB_OFFSET_PICKUP** gestartet. Dabei wird die iterative Trajektorienplanung ausgeführt, um bei Annäherung an das Segment die aktuellsten Posenschätzungen zu verwenden. Der Positionsoffset als Argument des Befehls kann dazu verwendet werden, den TCP in das Innere des Segments zu platzieren. Mithilfe des Impedanzreglers des Roboters wird dadurch eine Kraft ausgeübt, die zur Komprimierung der Vakuumdichtung der Saugplatte dient. Dadurch kann sich das Vakuum der Saugplatte aufbauen und das Segment wird am Manipulator fixiert. Danach werden die geänderten Parameter der Masse und des Schwerpunktes mit dem Befehl **TOOLPARAM** aktualisiert und das Segment mit **TSMOVREL** angehoben. Die weiteren Bewegungen erfolgen wieder im Konfigurationsraum mit **JSMOV** (Grobpositionierung).

Der Ablauf für die Segmentplatzierung Abbildung 3.6b erfolgt analog. Im Vergleich zur Segmentaufnahme müssen zusätzlich die Vortriebspessengruppen angesteuert werden, um das im Ring positionierte Segment zu fixieren.

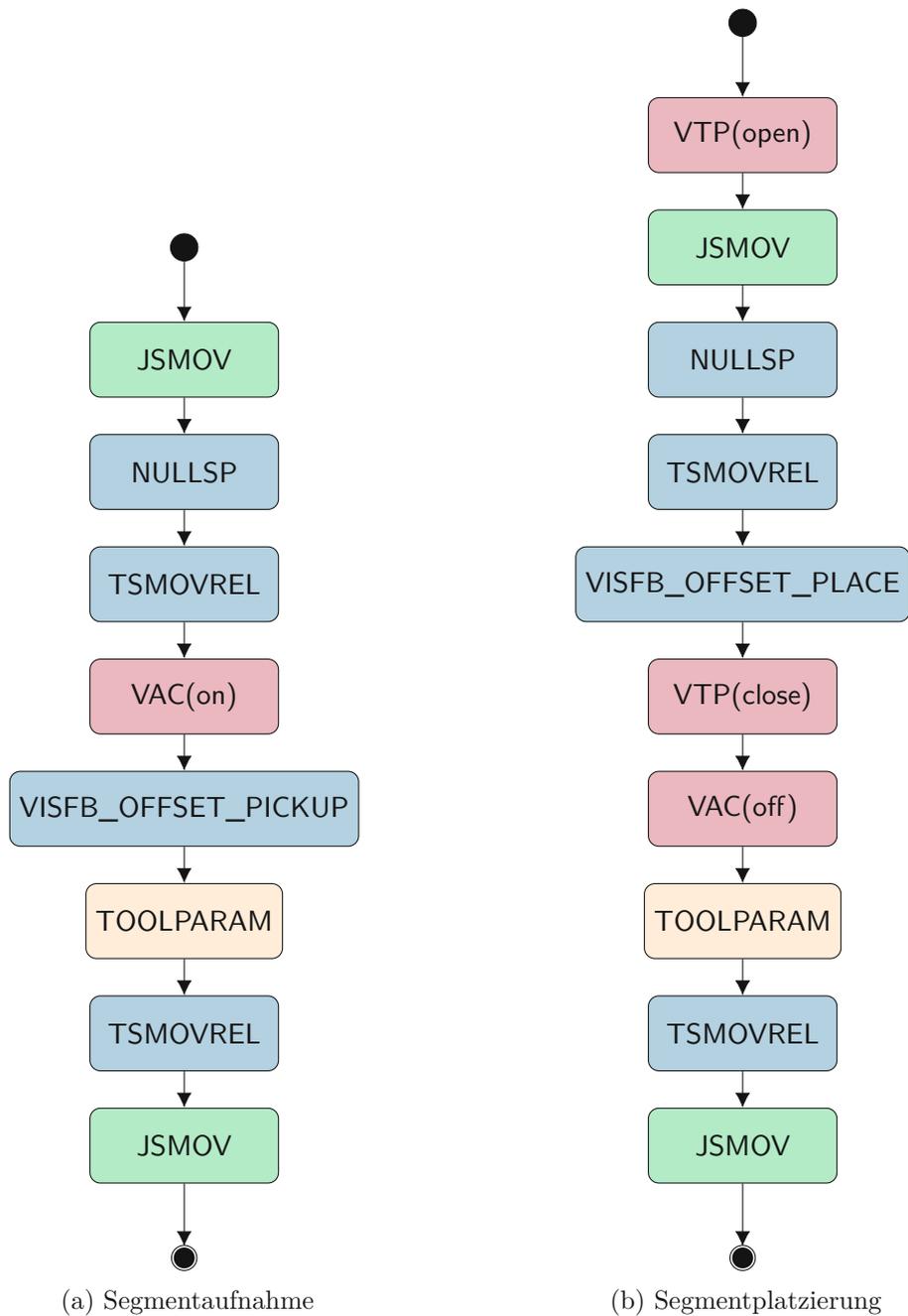


Abbildung 3.6: Beispiele für Ablaufsequenzen.

Die Definition der Ablaufsequenzen erfolgt durch sog. TOML-Dateien, einem Dateiformat für Konfigurationsdateien.

3.4.2 Trajektorienplanung

Die Trajektorienplanung in Abbildung 3.5 dient der Planung von Konfigurationsraumtrajektorien \mathbf{q}_p und Arbeitsraumtrajektorien \mathbf{x}_p entsprechend Kapitel 2.3. Die Daten der *Iiwa*-Instanz liefern die Startwerte für die Trajektorienplanung. Für Konfigurationsraumtrajektorien wird die gewünschte Zielkonfiguration \mathbf{q}_1 und die Trajektoriendauer angegeben. Im Fall von Arbeitsraumtrajektorien wird die Zielpose des TCP als homogene Transformation \mathbf{H}_0^T in Bezug auf das Roboterbasiskoordinatensystem 0 sowie die Trajektoriendauer übergeben. Die zeitliche Parametrierung der Punkt-zu-Punkt-Bewegungen entspricht Kapitel 2.3.3. Die Planung erfolgt auf einem groben Zeitraster. Es werden 30 Trajektorienpunkte berechnet und an die Trajektorienfolgeregelung gesendet, welche die Solltrajektorie mithilfe von Splines interpoliert.

Beim visuellen Feedback werden die Bilder der Kameras mithilfe der ArUco-Softwarebibliothek [38], [39] auf sichtbare Marker durchsucht. Für detektierte Marker erfolgt die Schätzung der Pose mithilfe der ArUco-Softwarebibliothek basierend auf den Grundlagen aus Kapitel 2.2.3. Als Ausgangssignal der visuellen Posenschätzung in Abbildung 3.5 wird die homogene Transformation $\mathbf{H}_{\mathcal{K}_i}^{M_j}$ des Markers j in Bezug auf das Koordinatensystem der Kamera i sowie der berechnete virtuelle Marker \mathcal{M}_4 (siehe Kapitel 3.2) von der *TIGS*-Instanz bereitgestellt. Diese Transformationen werden in (3.2) und (3.3) für die Bestimmung von \mathbf{H}_0^T verwendet.

3.4.3 Trajektorieninterpolation und Trajektorienfolgeregelung

Die Trajektorieninterpolation und Regelung des Roboters arbeitet je nach empfangener Trajektorie entweder im Konfigurationsraum oder im Arbeitsraum. Im Fall einer Konfigurationsraumtrajektorie wird die geplante Trajektorie $\mathbf{q}_{p,n}$ im Zeitraster der Regelung mithilfe von Splines interpoliert wodurch die Solltrajektorie \mathbf{q}_d entsteht. Die Interpolation ist in Kapitel 2.4.1 beschrieben. Für die Trajektorienfolgeregelung im Konfigurationsraum wird das Regelgesetz (2.72) eingesetzt. Im Fall von Arbeitsraumtrajektorien erfolgt die Interpolation der geplanten Trajektorie $\mathbf{x}_{p,n}$ in den Positionskoordinaten analog zu Kapitel 2.4.1. Die Orientierungsinterpolation der geplanten Trajektorie $\mathbf{x}_{p,n}$ erfolgt entsprechend der in Kapitel 2.4.2 dargestellten Interpolationsmethode. Die Interpolation stellt die Solltrajektorie \mathbf{x}_d für die Trajektorienfolgeregelung bereit. Die Regelung im Arbeitsraum erfolgt mit dem Regelgesetz (2.81).

Die Einhaltung der Übergangsbedingung (3.9) während der iterativen Trajektorienplanung wird durch die Trajektorieninterpolation sichergestellt. Wird eine neue Trajektorie an die Trajektorieninterpolation übermittelt, so wird der aktuelle Trajektorienpunkt und die aktuelle Ableitung als Startpunkt der neuen aktualisierten Trajektorie durch die momentane TCP-Istpose $\mathbf{x}_{\mathcal{T}}$ bzw. der Ableitung $\dot{\mathbf{x}}_{\mathcal{T}}$ angepasst. Die Grundlage dafür bietet Kapitel 2.4 und speziell die Berücksichtigung der Randableitungen (2.51) im Gleichungssystem zur Berechnung der Spline-Kontrollpunkte (2.52).

4 Simulation

In diesem Kapitel wird die Simulation des Ringbaus beschrieben. Mithilfe der Simulation wird die Durchführbarkeit des Ringbaus unter Verwendung des in Kapitel 3 beschriebenen Systems überprüft. Das betrifft zunächst die Einhaltung der kinematischen Rahmenbedingungen, die durch die Verwendung des Roboterarms KUKA LBR iiwa 14 R820 in Verbindung mit dem Aufbau gegeben sind, siehe Abbildung 3.1. In weiterer Folge dient die Simulation zur Prüfung der Funktionalität der einzelnen Komponenten in Abbildung 3.5. Besonders das Verhalten der iterativen Trajektorienplanung basierend auf der visuellen Posenschätzung – beschrieben in Kapitel 3.3.2 – wird evaluiert, bevor der Einsatz im realen Versuch erfolgt.

Der Ringbau besteht im Wesentlichen aus der wiederholten Abfolge von Segmentaufnahme und Segmentplatzierung und jeder dieser Vorgänge setzt sich wiederum aus Grobpositionierungs- und Feinpositionierungsabschnitten zusammen. Daher werden die Simulationsergebnisse exemplarisch anhand einer Platzierungssequenz diskutiert. Anhand eines Grobpositionierungs- und eines Feinpositionierungsabschnitts wird die Funktion der einzelnen Systemkomponenten im Konfigurationsraum bzw. Arbeitsraum evaluiert. Der vollständige Ringbau wird abschließend durch eine Bildsequenz illustriert.

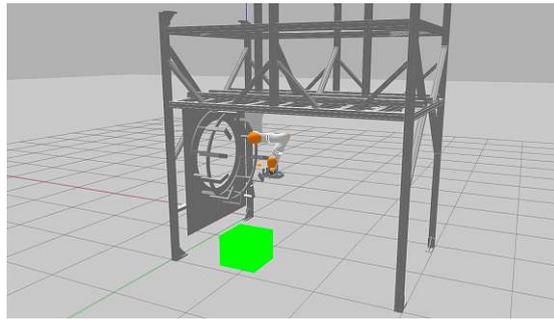
4.1 Systemarchitektur

Die Architektur des Ringbausystems entspricht Abbildung 3.5. Die physikalische Simulation des Aufbaus, wie in Abbildung 3.1 dargestellt, erfolgt mithilfe des 3D-Robotersimulators Gazebo [51] und ist in Abbildung 4.1a abgebildet.

Die Trajektorienfolgeregelung und die Trajektorieninterpolation sind als Gazebo-Plug-in implementiert und werden mit einer Zykluszeit von $T_{a,c} = 1$ ms ausgeführt. Dadurch wird die Synchronität zwischen der Physiksimulation durch Gazebo und der Roboterregelung sichergestellt. Die als Sensoren verwendeten Kameras sind mithilfe des Kamera-Plug-Ins implementiert. Die hierfür verwendeten Parameter sind in Anhang D aufgelistet. Für die Simulation der Vakuumsaugkraft der Saugplatte wird das Vacuum-Gripper-Plug-In in Gazebo verwendet. Die gelb hinterlegten Komponenten in Abbildung 3.5 stellen eigenständige ROS-Nodes dar und werden mit einer Zykluszeit von $T_{a,n} = 100$ ms ausgeführt.

Um die Simulation zu beschleunigen, wurden die Vortriebspresen und das Aluminiumgerüst aus der Simulation entfernt. Außerdem wurde für die Aufnahme und die Platzierung eines jeden Tübbings ein separater Simulationslauf nur mit den notwendigen Tübbingen und Markern durchgeführt.

Die Simulation der Segmentaufnahme mit dem Vacuum-Gripper-Plug-In und den daraus folgenden Berührungen von Starrkörpern gestaltet sich schwierig, da zum Teil



(a) Simulation des Versuchsaufbaus in Gazebo.

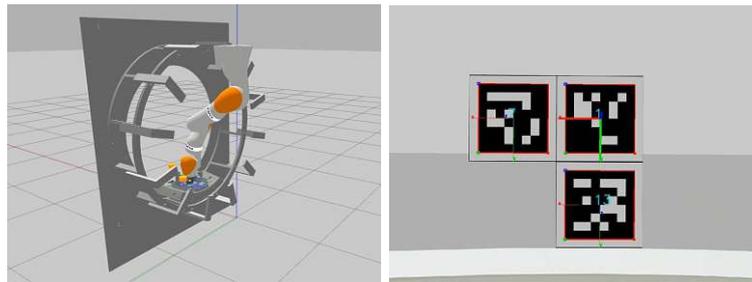
(b) Platzierung des Tübbings B. (c) Marker $M1$ bis $M3$ aus Sicht von Kamera 3.

Abbildung 4.1: Simulation der robotischen Assemblierung von Ringsegmenten mit visueller Posenschätzung.

große Schwankungen der Kontaktkräfte auftreten. Für die Segmentplatzierung wird daher jeder Tübbing als zusätzliches, starr verbundenes Glied des Roboterarms modelliert, um die Simulation der Berührungskräfte zwischen Saugplatte und Tübbing zu vermeiden. Aus diesem Grund erfolgt die Evaluierung der einzelnen Systemkomponenten in Simulation nachfolgend anhand der Platzierung von Segment B. Die Segmentaufnahme im praktischen Versuch wird in Kapitel 5 detailliert betrachtet.

4.2 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Simulationsergebnisse anhand der Platzierung des Segments B evaluiert. Die Betrachtung der Ergebnisse und die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich direkt auf die Platzierungssequenzen der restlichen Segmente übertragen, da die weiteren Ablaufsequenzen analog zu der hier betrachteten Sequenz zusammengesetzt sind. Im Wesentlichen gelten die nachfolgenden Betrachtungen auch für die Segmentaufnahme, die sich ebenfalls aus Grobpositionierungs- und Feinpositionierungsabschnitten zusammensetzt. Allerdings sind bei der Segmentaufnahme die Kontaktkräfte zwischen Saugplatte und Segment – u. a. für die Kompression der Vakuumdichtung – und damit das Impedanzverhalten der Roboterregelung im Arbeitsraum von Interesse. Aufgrund der zuvor erwähnten Simulationsartefakte während der Segmentaufnahme erfolgt daher die Betrachtung der Segmentaufnahme nur im praktischen Versuch in Kapitel 5.

In Kapitel 4.2.1 wird der Ablauf der Segmentplatzierung beschrieben und anhand der Bildsequenz Abbildung 4.2 illustriert. Danach erfolgt in Kapitel 4.2.2 die Betrachtung der Trajektorienplanung und Trajektorieninterpolation sowie der Roboterregelung im Konfigurationsraum im Zuge eines Grobpositionierungsabschnittes. Analog dazu behandelt Kapitel 4.2.3 den Funktionsnachweis der Trajektorienplanung und Trajektorieninterpolation sowie der Roboterregelung im Arbeitsraum anhand eines Feinpositionierungsabschnittes. Zusätzlich wird die iterative Trajektorienplanung basierend auf der visuellen Posenschätzung evaluiert.

Die Darstellung der Simulationsergebnisse der gesamten Segmentplatzierung befindet sich in Anhang F.1.

4.2.1 Ablauf der Tübbingplatzierung

Die nachfolgende Erklärung des Ablaufs der Platzierung von Segment B basiert auf der Ablaufsequenz in Anhang E.1.1. Für die Illustration der einzelnen Abschnitte dient die Bildsequenz in Abbildung 4.2. Der gesamte Ablauf wird dabei in die Grobpositionierungsabschnitte $\textcircled{G1}$ bis $\textcircled{G6}$ (Befehl **JSMOV** in Anhang E.1.1) und in die Feinpositionierungsabschnitte $\textcircled{F1}$ (Befehl **TSMOVREL** in Anhang E.1.1), $\textcircled{I1}$ und $\textcircled{I2}$ (Befehl **VISFB_OFFSET_PLACE** in Anhang E.1.1) unterteilt.

Das im Verlauf der Segmentaufnahme aufgenommene Segment muss aufgrund der kinematischen Rahmenbedingungen des Laboraufbaus in Verbindung mit dem verwendeten Roboterarm in den Ring „eingefädelt“ werden. Dies erfolgt durch einen Bewegungsablauf im Konfigurationsraum, der aus sechs PTP-Bewegungen (Befehl **JSMOV**) zusammengesetzt ist. Zu Beginn eines Simulationsdurchgangs befindet sich der Roboterarm in der Initialposition, dargestellt in Abbildung 4.1a. Im ersten Abschnitt $\textcircled{G1}$ fährt der Roboter aus der Initialposition in die nominelle Ausgangsposition der Segmentplatzierung, die gleichzeitig der Endposition der Segmentaufnahme entspricht, dargestellt in Abbildung 4.2a. Danach beginnt der Bewegungsablauf, um das Segment in die Platzierposition im Ring zu befördern:

- Ausgehend von der Roboterkonfiguration in Abbildung 4.2a wird im Abschnitt $\textcircled{G2}$ der Roboterarm mit dem Gelenk q_2 ausgestreckt und das Gelenk q_4 abgewinkelt. Die Zielkonfiguration des Abschnitts $\textcircled{G2}$ ist in Abbildung 4.2b dargestellt.
- Anschließend wird das Gelenk q_2 abgewinkelt und dadurch das Segment in Richtung des Ringes bewegt, zu sehen in Abbildung 4.2c.
- Durch Änderung des Gelenkwinkels q_4 und des Gelenkwinkels q_6 wird das Segment vollständig in den Ring gehoben, dargestellt in Abbildung 4.2d.
- Im Abschnitt $\textcircled{G5}$ wird das Segment im Ring radial nach außen bewegt. Bis zu dieser Position verläuft die Segmentplatzierung für alle Einbaupositionen gleich. Die zuvor erwähnte Absenkung des Segments ist notwendig, damit der Roboter für die nachfolgenden Bewegungen zum Anfahren der Einbauposition der Segmente A3, A2, A1, C und K genügend Bewegungsfreiraum hat. Die Roboterstellung am Ende von Abschnitt $\textcircled{G5}$ ist in Abbildung 4.2e dargestellt.

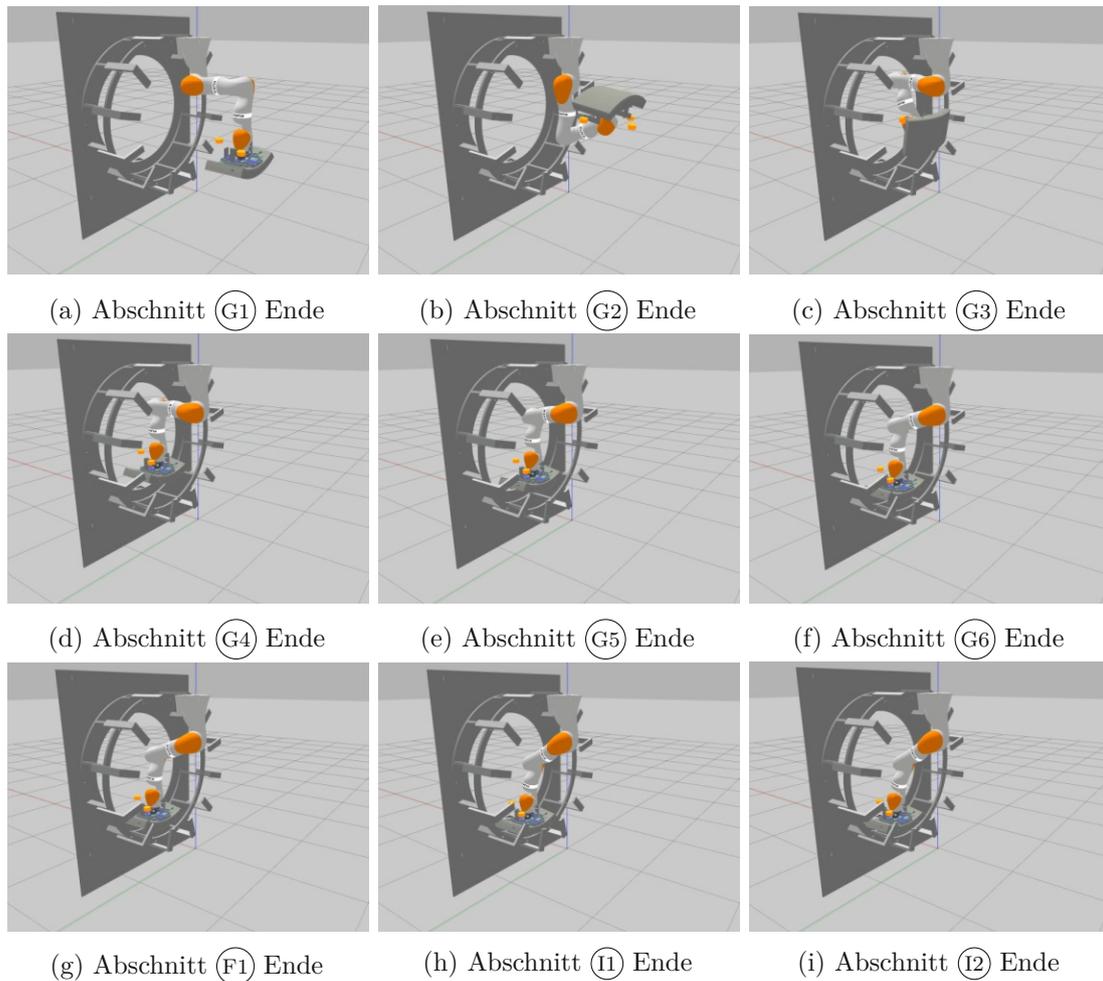


Abbildung 4.2: Darstellung der Platzierung von Segment B als Bildsequenz.

- Die letzte Konfigurationsraumtrajektorie im Abschnitt (G6) dient zum (groben) Anfahren der gewünschten Einbauposition des gegriffenen Segments. Da in der beschriebenen Sequenz das Segment B in der Sohle des Rings eingebaut wird, erfolgt im Abschnitt (G6) erneut eine Absenkung des Segments, zu sehen in Abbildung 4.2f. Damit ist die Grobpositionierung des Segments B abgeschlossen.

Nach erfolgter Grobpositionierung in den Abschnitten (G1) bis (G6) beginnt die Feinpositionierung im Arbeitsraum. Im Abschnitt (F1) wird das Segment als Erstes mithilfe des Befehls **TSMOVREL** in die negative z_S -Richtung 5 cm abgesenkt und 5 cm in positiver x_S -Richtung (siehe Koordinatensysteme in Abbildung 3.2) bewegt, siehe Abbildung 4.2g. Dadurch befinden sich die Marker $\mathcal{M}1$ bis $\mathcal{M}3$ im Sichtbereich von Kamera 3, dargestellt in Abbildung 4.1c. Basierend auf den Positionssignalen der erfassten Marker $\mathcal{M}1$ bis $\mathcal{M}3$ wird die Pose des virtuellen Markers $\mathcal{M}4$ berechnet. Die Pose des virtuellen Markers $\mathcal{M}4$ bildet die Grundlage für die nachfolgende iterative Trajektorienplanung.

Als finaler Schritt der Segmentplatzierung erfolgt die Feinpositionierung mithilfe der

iterativen Trajektorienplanung in den Abschnitten (I1) und (I2). Im Abschnitt (I1) wird das Segment mithilfe des Befehls **VISFB_OFFSET_PLACE** in einem Abstand von 3 cm in y_S -Richtung von der finalen Einbauposition entfernt platziert (Abbildung 4.2h). Der Abstand in y_S -Richtung von der Montageplatte dient dazu, dass im letzten Abschnitt (I2) das Segment entlang der y_S -Richtung hin zur Montageplatte frontal bewegt wird und damit die finale Einbauposition erreicht wird, dargestellt in Abbildung 4.2i.

4.2.2 Grobpositionierung

Die Grobpositionierung im Konfigurationsraum wird nachfolgend anhand des Abschnitts (G2) detailliert betrachtet. Die Ausgangskonfiguration des Roboters ist in Abbildung 4.2a ersichtlich und die Zielkonfiguration am Ende von (G2) ist in Abbildung 4.2b dargestellt.

Zunächst wird die Trajektorienplanung und darauf aufbauend die Trajektorieninterpolation im Konfigurationsraum diskutiert. Anschließend erfolgt die Betrachtung der Trajektorienfolgeregelung im Konfigurationsraum.

Trajektorienplanung und -interpolation im Konfigurationsraum

Im Abschnitt (G2) wird die Konfigurationsraumtrajektorie ausgeführt, die mithilfe des Befehls **JSMOV** in der Ablaufsequenz in Anhang E.1.1 konfiguriert wurde. Ausgehend von der Roboterkonfiguration zu Beginn des Abschnitts (Ist-Konfiguration) wird die Trajektorie zur Zielkonfiguration (Befehlsargument, siehe Kapitel 3.4.1) geplant, vgl. Kapitel 3.4.3 und Kapitel 2.3.1.

Die 30 Datenpunkte der geplanten Trajektorie $\mathbf{q}_{p,2}$ werden im nächsten Schritt an die Trajektorieninterpolation übermittelt, wie in Abbildung 3.5 schematisch dargestellt. Die Trajektorieninterpolation liefert die Solltrajektorie \mathbf{q}_d für die Trajektorienfolgeregelung.

Stellvertretend für den vollständigen Konfigurationsraum ist das Zusammenwirken der Trajektorienplanung und -interpolation anhand des einzelnen Gelenkwinkels q_4 in Abbildung 4.3 ersichtlich. Die q_4 -Komponente der geplanten Trajektorie $\mathbf{q}_{p,2}$ ist im Diagramm durch magentafarbene Datenpunkte markiert. Die Datenpunkte dienen als Kontrollpunkte für die im Zuge der Trajektorieninterpolation berechneten Spline-Kurve, vgl. Kapitel 2.4.1. Wie in Abbildung 4.3 zu sehen ist, verläuft die Komponente q_4 der Solltrajektorie \mathbf{q}_d durch die eingetragenen Datenpunkte. Allerdings ist ein leichter Versatz zwischen $\mathbf{q}_{p,2}$ und \mathbf{q}_d erkennbar. Die Ursache liegt in der zeitlichen Latenz der Datenübertragung von der Trajektorienplanung zur Trajektorieninterpolation (eigene ROS-Nodes) von ca. 11 ms.

Für die zeitliche Parametrierung der geplanten Trajektorie wird das trapezförmige Geschwindigkeitsprofil (Kapitel 2.3.3) verwendet. In Abbildung 4.4a sind neben dem Verlauf der Solltrajektorie \mathbf{q}_d auch die erste und zweite Ableitung $\dot{\mathbf{q}}_d$ und $\ddot{\mathbf{q}}_d$ im zweiten Diagramm bzw. dritten Diagramm abgebildet. Obwohl nur die Datenpunkte der geplanten Trajektorie $\mathbf{q}_{p,2}$ übertragen wurden, sind aus den Ableitungen der Spline-Kurve das trapezförmige Geschwindigkeitsprofil im zweiten Diagramm und die Abschnitte konstanter Beschleunigung bzw. Verzögerung im dritten Diagramm gut erkennbar.

Allerdings ist in Abbildung 4.4a im $\ddot{\mathbf{q}}_d$ -Diagramm das in Kapitel 2.4.1 erwähnte Oszillieren der Spline-Kurve respektive ihrer Ableitungen im Bereich der Beschleunigungs- und

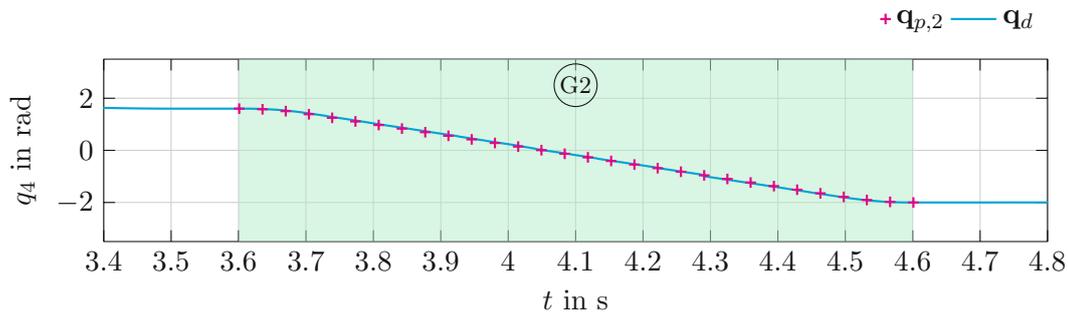


Abbildung 4.3: Darstellung der Komponente q_4 interpolierten Trajektorie \mathbf{q}_d basierend auf den Datenpunkten der geplanten Trajektorie $\mathbf{q}_{p,2}$ für den Abschnitt $\textcircled{G2}$.

Verzögerungsphase erkennbar. Diese Oszillationen in der zweiten Ableitung der Solltrajektorie stellen für den Einsatz der Trajektorienplanung im beschriebenen Assemblierungssystem keine Einschränkung dar.

Zusammenfassend entspricht das Verhalten der Trajektorienplanung und der Trajektorieninterpolation im Konfigurationsraum den Erwartungen an eine einfache Parametrierung der geplanten Trajektorien und an eine akkurate Interpolation der Solltrajektorien.

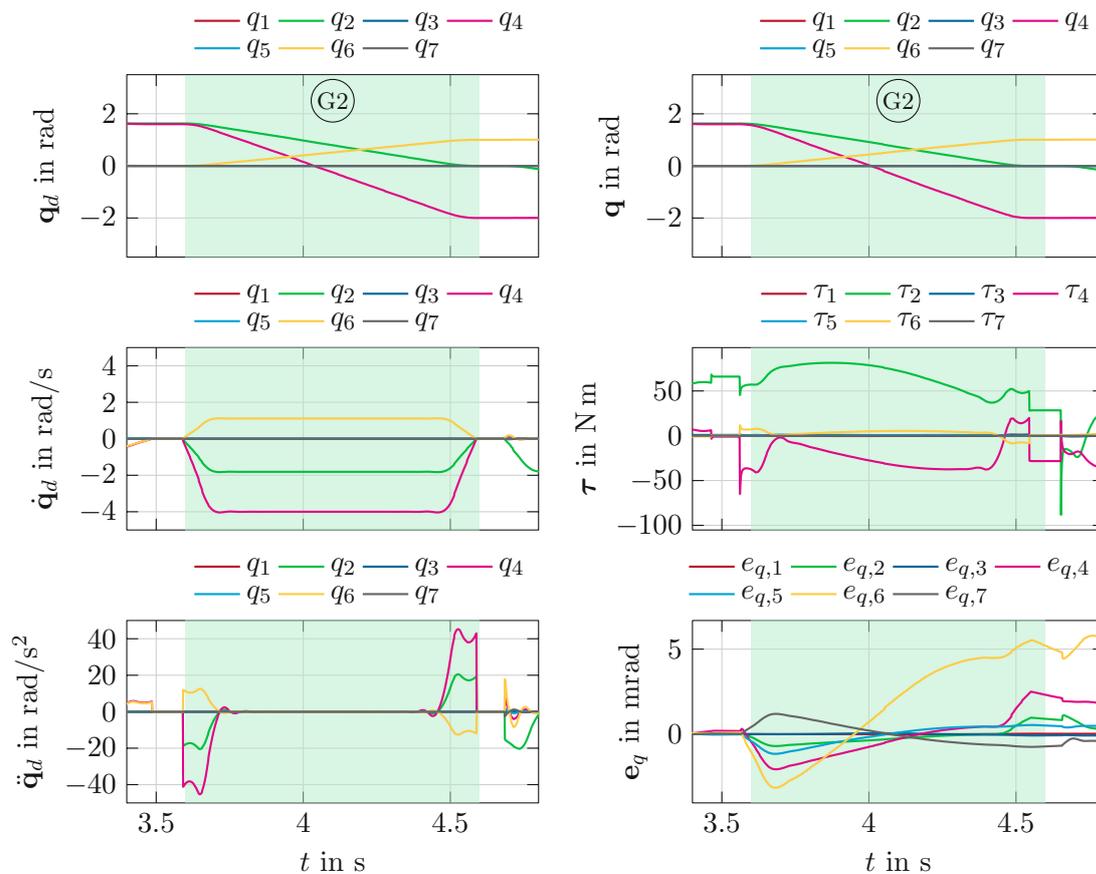
Regelung im Konfigurationsraum

Für die Beurteilung der Trajektorienfolgeregelung im Konfigurationsraum basierend auf dem Regelgesetz (2.72) dient Abbildung 4.4b. Das erste Diagramm zeigt den Verlauf der Gelenkwinkel \mathbf{q} , im zweiten Diagramm ist der Verlauf der Drehmomente $\boldsymbol{\tau}$ und abschließend ist der Regelfehler \mathbf{e}_q dargestellt. Die verwendeten Reglerparameter sind in Anhang B.1 aufgelistet.

Der Abschnitt $\textcircled{G2}$ bietet sich für die Betrachtung der Regelung besonders an, da während der kurzen Trajektoriendauer von 1 s große Änderungen in den Gelenkwinkel ausgeführt werden und infolgedessen hohe Beschleunigungswerte auftreten.

Stellvertretend wird erneut der Gelenkwinkel q_4 betrachtet. Im oberen Diagramm in Abbildung 4.4a ist der Verlauf des Sollwerts beginnend bei $q_4 = 1.6$ rad hin zu $q_4 = -2.0$ rad ersichtlich. Dies führt zu hohen Beschleunigungswerten \ddot{q}_4 , dargestellt im dritten Diagramm in Abbildung 4.4a. Diese Phasen hoher Beschleunigung bzw. Verzögerung sind qualitativ im Drehmomentenverlauf im zweiten Diagramm in Abbildung 4.4b sichtbar.

Die hohe Dynamik der Bewegung in Verbindung mit den nicht aktualisierten Trägheitsmomenten führt zu dem im dritten Diagramm in Abbildung 4.4b dargestellten Verlauf des Regelfehlers \mathbf{e}_q . Einzig $e_{q,6}$ weist im Vergleich zu den restlichen Fehlersignalen einen erhöhten Verlauf auf. Dies liegt an der hohen Änderungsrate des Gelenkwinkels \dot{q}_4 (Sollverlauf ersichtlich in Abbildung 4.4a) und der daraus resultierenden Zentripetalkraft die auf das Gelenk q_6 wirkt. In den Ablaufsequenzen wird mit dem Befehl **TOOLPARAM** lediglich die am Endeffektor angebrachte Masse und der geänderte Massenschwerpunkt parametrieren. Die durch das aufgenommene Segment geänderten Trägheitsmomente des Endeffektors werden nicht berücksichtigt. Trotz der abweichenden Trägheitsmomente und



(a) Interpolierte Konfigurationsraumtrajektorie (b) Regelung im Konfigurationsraum.

Abbildung 4.4: Grobpositionierung während der Platzierung von Segment B.

der hohen Dynamik befindet sich der Regelfehler, dargestellt im dritten Diagramm in Abbildung 4.4b, nur im Bereich einiger mrad.

Nach Erreichen der stationären Zielkonfiguration nach $\textcircled{G6}$ im Verlauf der Grobpositionierung klingt der Regelfehler auf weit unter 1 mrad ab, siehe Abbildung F.1. Das Trajektorienfolgeverhalten und die stationäre Regelabweichung sind damit ausreichend genau für die Grobpositionierung der Segmente.

4.2.3 Feinpositionierung mithilfe der iterativen Trajektorienplanung

Die Feinpositionierung im Arbeitsraum wird analog zu Kapitel 4.2.2 anhand des Abschnitts \textcircled{II} detailliert betrachtet. Zu Beginn des Abschnitts befindet sich der Roboter in der in Abbildung 4.2g dargestellten Ausgangskonfiguration. Die Konfiguration am Ende von Abschnitt \textcircled{II} ist in Abbildung 4.2h dargestellt.

Zunächst wird die iterative Trajektorienplanung und die dafür notwendige visuelle Posenschätzung diskutiert. Darauf aufbauend erfolgt die Betrachtung der Trajektorieninterpolation im Arbeitsraum. Schließlich wird die Trajektorienfolgeregelung im Arbeitsraum

evaluiert.

Trajektorienplanung und -interpolation basierend auf visueller Posenschätzung

Im Abschnitt (II) erfolgt die Feinpositionierung basierend auf der Pose des virtuellen Markers $\mathcal{M}4$, der durch Kamera 3 erfasst wird. Die iterative Trajektorienplanung basierend auf der Markerpose wird mit dem in der Ablaufsequenz (Anhang E.1.1) angegebenen Aktualisierungsintervall $T_{\text{update}} = 0.5\text{ s}$ ausgeführt. In Kapitel 3.3.2 ist die Funktionsweise der iterativen Trajektorienplanung beschrieben.

Die Trajektorienplanung und -interpolation wird getrennt für die Positionssignale \mathbf{d} und Orientierungssignale ϕ behandelt. Nachfolgend werden die Betrachtungen wieder stellvertretend für eine Positions- bzw. Orientierungskomponente ausgeführt.

Die x -Komponente des Positionssignals $\mathbf{d}_{\mathcal{K}3}^{\mathcal{M}4}$ des von Kamera 3 erfassten Markers $\mathcal{M}4$ ist im ersten Diagramm in Abbildung 4.5a dargestellt. Im zweiten Diagramm ist die y -Komponente der iterativ geplanten Trajektorien $\mathbf{x}_{p,i}$ mit $i = 1, \dots, 8$ eingezeichnet. Die Trajektorienstartpunkte sind jeweils mit einer Markierung versehen. Im dritten Diagramm ist schließlich die y -Komponente der interpolierten Solltrajektorie \mathbf{x}_d dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Bezugssysteme entspricht die x -Komponente im ersten Diagramm geometrisch der y -Komponente im zweiten und dritten Diagramm.

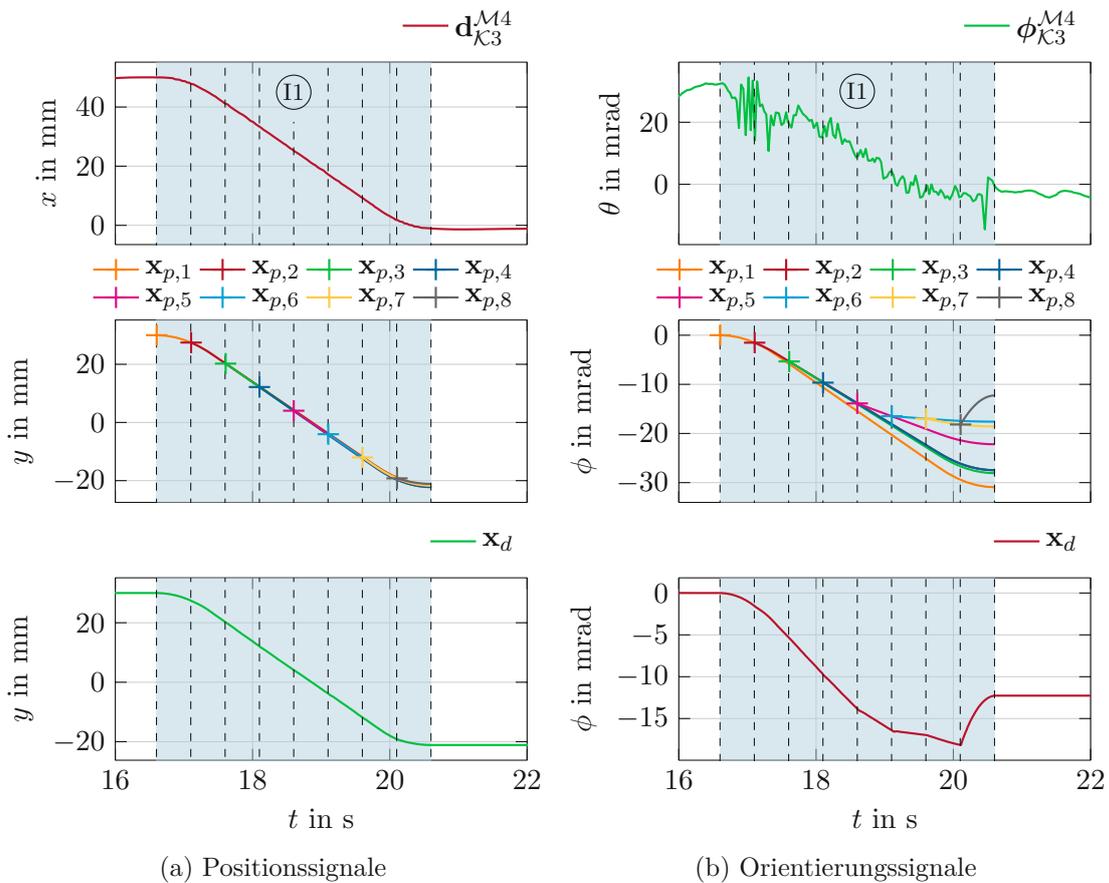
Die Markerpose bezieht sich auf das Koordinatensystem $\mathcal{K}3$ von Kamera 3 und die Trajektorien sind im Roboterbasiskoordinatensystem 0 ausgedrückt. Die Berechnung der TCP-Sollpose $\mathbf{H}_{0,P}^T$ ausgehend von der Markerpose $\mathbf{H}_{\mathcal{K}3}^{\mathcal{M}4}$ entspricht (3.3). In Abbildung 2.1 und Abbildung 3.2 ist die Lage der Koordinatensysteme 0, $\mathcal{K}3$, \mathcal{T} , \mathcal{S} und $\mathcal{M}4$ ersichtlich. Das bedeutet die $x_{\mathcal{K}3}$ -Richtung zeigt in die negative y_0 -Richtung. Daher wurden die korrespondierenden Positionskomponenten in Abbildung 4.5a gewählt.

Die iterative Trajektorienplanung, dargestellt im zweiten Diagramm in Abbildung 4.5a, liefert nun in jedem Aktualisierungsschritt T_{update} eine neue Trajektorie $\mathbf{x}_{p,i}$, die im aktuellen Zeitpunkt beginnt und bis zu zum Ende von Abschnitt (II) reicht. Die Aktualisierungsereignisse sind durch vertikale, strichlierte Linien gekennzeichnet.

Die Trajektorien $\mathbf{x}_{p,i}$ werden nun an die Trajektorieninterpolation übermittelt, die die Interpolation anhand der aktuellsten Trajektorie $\mathbf{x}_{p,i}$ durchführt. Die resultierende Solltrajektorie ist im dritten Diagramm in Abbildung 4.5a dargestellt. Durch den glatten Verlauf von $\mathbf{d}_{\mathcal{K}3}^{\mathcal{M}4}$ sind die jeweils nachfolgenden Trajektorien $\mathbf{x}_{p,i}$ deckungsgleich mit den vorhergehenden Trajektorien $\mathbf{x}_{p,i-1}$, wie im zweiten Diagramm in Abbildung 4.5a ersichtlich ist. Entsprechend glatt verläuft die Solltrajektorie \mathbf{x}_d im dritten Diagramm.

Im Fall der Orientierungssignale, dargestellt in Abbildung 4.5b, ist das Verhalten der iterativen Trajektorienplanung aufgrund des Rauschens der gemessenen Orientierungssignale $\phi_{\mathcal{K}3}^{\mathcal{M}4}$ deutlicher ersichtlich. Die Darstellung der Orientierung durch RPY-Winkel dient der Anschaulichkeit. Die Trajektorienplanung und -interpolation arbeitet auf Basis von Quaternionen wie in Kapitel 2.3.2 bzw. Kapitel 2.4.2 beschrieben. Wie zuvor sind in Abbildung 4.5b die korrespondierenden Orientierungssignale dargestellt, d. h. die θ -Komponente der visuellen Posenschätzung und die ϕ -Komponente der Trajektorienplanung bzw. -interpolation.

Da das gegriffene Segment bereits die Orientierung der finalen Einbauposition hat, ist die Änderung der θ -Orientierungskomponente im ersten Diagramm in Abbildung 4.5b



(a) Positionssignale

(b) Orientierungssignale

Abbildung 4.5: Iterative Trajektorienplanung.

gering, wodurch die Auswirkungen des Signalrauschens stärker hervortreten. Entsprechend führen die geplanten Trajektorien $x_{p,i}$ nur zu einer Orientierungsänderung von etwa 30 mrad, wie im zweiten Diagramm in Abbildung 4.5b ersichtlich ist. Allerdings ist die sukzessive Korrektur der Endorientierung im Verlauf der iterativen Trajektorienplanung klar ersichtlich. Die sich ändernde Endorientierung ist auf das Rauschen des $\theta_{\mathcal{K}3}^{M4}$ -Signals zurückzuführen. Die interpolierte ϕ -Komponente der Solltrajektorie, dargestellt im dritten Diagramm in Abbildung 4.5b, zeigt den resultierenden Sollverlauf der ϕ -Orientierung.

Zusammenfassend entspricht das Verhalten der iterativen Trajektorienplanung und der Trajektorieninterpolation im Arbeitsraum den Erwartungen an eine sukzessiv verbesserte Trajektorienplanung, basierend auf den aktuellsten visuellen Posenschätzungen und an eine stetige Interpolation der Solltrajektorie basierend auf den iterativ aktualisierten Trajektorien.

Regelung im Arbeitsraum

Die Bewertung der Roboterregelung im Arbeitsraum wird anhand von Abbildung 4.6 diskutiert. Dabei erfolgt wieder die Aufteilung in Positionssignale, dargestellt in Abbildung 4.6a

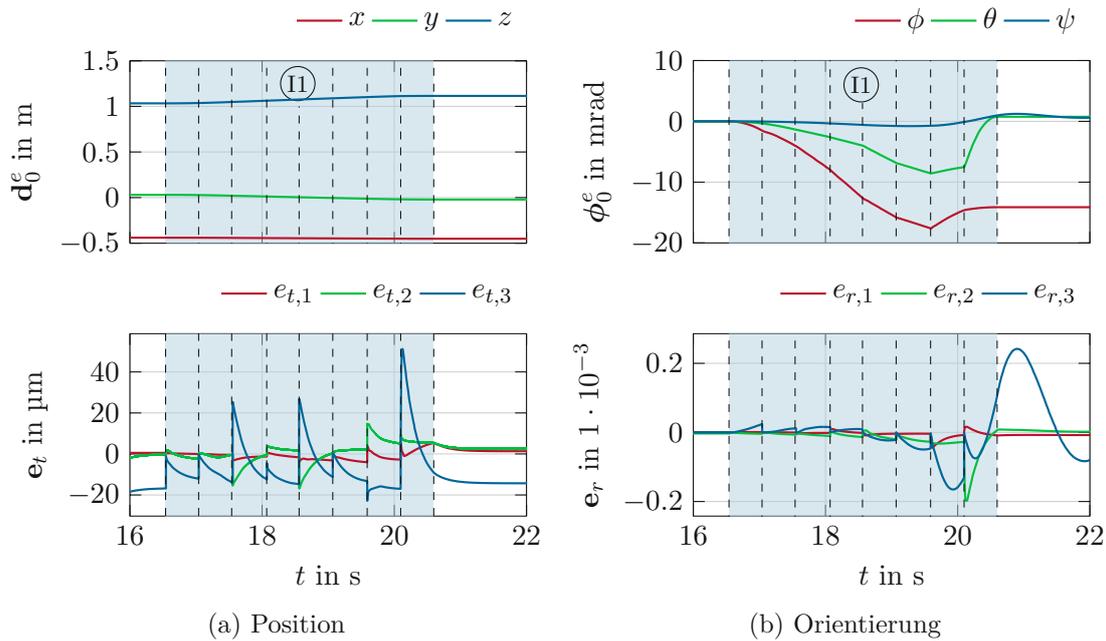


Abbildung 4.6: Regelung im Arbeitsraum.

und in Orientierungssignalen, dargestellt in Abbildung 4.6b. Die verwendeten Regelparameter sind in Anhang B.2 aufgelistet. Die oberen beiden Diagramme in Abbildung 4.6 zeigen den Verlauf der Endeffektorposition \mathbf{d}_0^e bzw. der Endeffektororientierung ϕ_0^e . Darunter ist der kartesische Positionsfehler \mathbf{e}_t bzw. der Orientierungsfehler \mathbf{e}_r entsprechend (2.77) dargestellt.

Die im Zuge der iterativen Trajektorienplanung aktualisierten Trajektorien beginnen immer bei der momentanen TCP-Istpose, vgl. Kapitel 3.4.3. Dadurch wird bei jeder Trajektorienaktualisierung der Sollwert \mathbf{x}_d gleich dem momentanen Istwert \mathbf{x}_T gesetzt (gleiches gilt für die erste Ableitung). Dadurch treten Sprünge im kartesischen Regelfehler zum Zeitpunkt der Trajektorienaktualisierungen (strichlierte vertikale Linien) auf.

Der stationäre Regelfehler der $e_{t,3}$ -Komponente, ersichtlich am Beginn und am Ende des \mathbf{e}_t -Diagramms deutet auf eine Abweichung der in den Bewegungsgleichungen (Kapitel 2.1.2) berücksichtigten Endeffektormasse und -schwerpunkt gegenüber den in der Simulation verwendeten Massenparametern (Definition in URDF-Datei bzw. in XACRO-Datei) hin. Eine mögliche Ursache stellen Rundungsfehler dar, da die Angabe des Massen- und der Schwerpunktparameter gerundet auf drei signifikante Stellen erfolgt.

Der Positionsfehler liegt im Bereich einiger hundertstel Millimeter und der Orientierungsfehler weist eine Größenordnung von 0.1 mrad auf. Damit ist der Funktionsnachweis der Regelung im Arbeitsraum im Zuge der Feinpositionierung erfüllt.

4.2.4 Ringbau

Die Aufnahme und Platzierung der restlichen Segmente A3, A2, A1, C und K setzt sich aus den oben beschriebenen Grob- und Feinpositionierungsabschnitten zusammen. Die

Ablaufsequenz der Segmentaufnahme ist im Wesentlichen für alle Segmente identisch, da die Aufnahmeposition der Segmente gleich ist (grüner Block in Abbildung 4.1a). Bei der Segmentplatzierung wird die für jedes Segment unterschiedliche Einbauposition durch die Zielkonfiguration im Positionierungsabschnitt (G6) berücksichtigt (vgl. Kapitel 4.2.1). Dadurch wird das Segment in die jeweilige Ringposition bewegt, wodurch die entsprechenden Marker in den Sichtbereich der Kamera 3 gelangen. Die Feinpositionierung erfolgt danach wieder für alle Segmente in gleicher Weise. Der Einbau des Schlusssteins K folgt dem gleichen Schema, allerdings ist die Positionierung in noch mehr Abschnitte unterteilt, um das Einfädeln in den bestehenden Ring zu ermöglichen.

Beim Einbau der Segmente ist auf eine frontale Annäherung der Segmentstirnfläche mit der Montageplatte sowie der Seitenflächen des einzubauenden Segments mit den bereits installierten Segmenten zu achten, um Scherkräfte an diesen Flächen zu vermeiden, die sich auf die Positioniergenauigkeit auswirken. Daher ist die Feinpositionierung (siehe Kapitel 4.2.1) in den Abschnitten (F1) und (I1) mit einem vorgegeben Positions-Offset in x_S bzw. y_S versehen. Der finale Abschnitt (I2) bewegt das Segment in die endgültige Einbauposition. Die Simulationsergebnisse der Einbausequenz des Segments B sind in Anhang F.1 dargestellt.

Der vollständige Ringbau ist als Bildsequenz in Abbildung 4.7 abgebildet. Die Funktionalität des Systems zur robotischen Assemblierung der Ringsegmente ist damit durch die Simulation nachgewiesen.

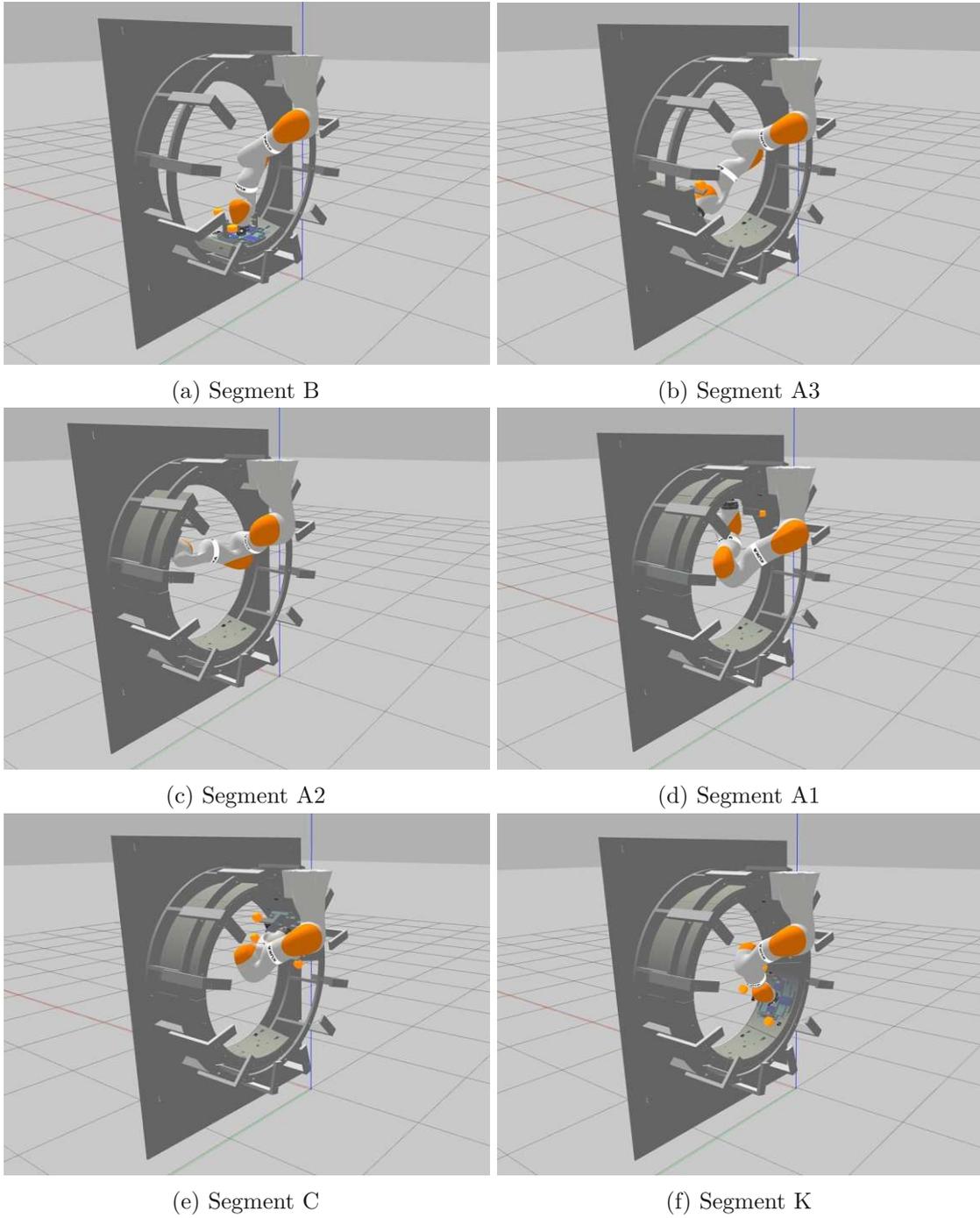


Abbildung 4.7: Ringbau in Simulation.

5 Experimenteller Versuchsaufbau

Nach der erfolgreichen Simulation des Ringbausystems, beschrieben in Kapitel 4, widmet sich dieses Kapitel dem Ringbau am praktischen Versuchsaufbau. Zunächst wird die Systemarchitektur des realen Versuchsaufbaus behandelt. Dabei werden Unterschiede zur Systemarchitektur im Vergleich zu Kapitel 4.1 aufgelistet und beschrieben.

Der im Laboraufbau durchgeführte Ringbau soll die Funktionsfähigkeit des Ringbausystems unter realen Bedingungen bestätigen. Analog zu der in Kapitel 4 betrachteten Segmentplatzierung erfolgt in diesem Kapitel die Diskussion der Ergebnisse anhand der Segmentaufnahme. Zusätzlich widmet sich dieses Kapitel der Betrachtung der visuellen Positionsschätzung der Ringsegmente im Hinblick auf die erzielbare Auflösung. Ausschlaggebend hierfür ist das Rauschen der Positions- und Orientierungssignale.

Abschließend wird der Ringbau am praktischen Versuchsaufbau in Form einer Bildsequenz dargestellt und hinsichtlich der erzielten Spaltmaße evaluiert.

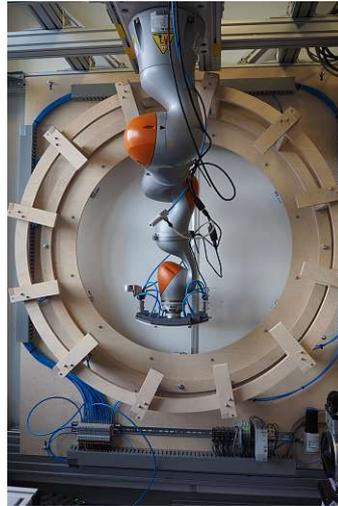
5.1 Systemarchitektur

Die Systemarchitektur des experimentellen Versuchsaufbaus basiert auf der in Kapitel 4.1 beschriebenen Architektur. Die Abweichungen von der genannten Architektur werden nachfolgend erläutert.

Der in Abbildung 3.5 grün hinterlegte, linke Block *Aufbau* ist im Gegensatz zu Kapitel 4 real ausgeführt. Die in Abbildung 3.1 dargestellten Komponenten Montageplatte, Käfig und Klammern sind aus Sperrholz gefertigt und am Gerüst, das aus Aluminium-Profilen zusammengesetzt ist, montiert. Die Ringsegmente sowie die Vakuumsaugplatte sind im 3D-Druckverfahren hergestellt und entsprechen der im Maßstab 1:5 skalierten Nachbildung realer Tübbinge bzw. einer realen Erektor-Saugplatte. Die Klammern werden durch pneumatische Zylinder aktuiert. Die vorhandene Druckluft dient auch zur Erzeugung des Saugplattenvakuums mithilfe eines sog. Ejektors. Ein Ejektor entspricht einer Strahlpumpe, die mithilfe der durchströmenden Druckluft Unterdruck durch das Venturi-Prinzip erzeugt.

Für die Manipulation der Tübbinge wird der Roboterarm KUKA LBR iiwa 14 R820 verwendet. Die Implementierungen der Trajektorieninterpolation und der Roboterregelung unterscheiden sich von den bisher verwendeten Implementierungen, da für den Laborbetrieb bereits erprobte Implementierungen vorlagen. Die Unterschiede sind wie folgt:

- Im Hinblick auf die Trajektorieninterpolation erfolgt die Spline-Interpolation nun nicht mehr über alle 30 Punkte der geplanten Trajektorien, sondern über ein gleitendes Fenster bestehend aus drei Trajektorienpunkten.
- Bezüglich der Stetigkeitsanforderung am Trajektorienbeginn wird die geplante Trajektorie \mathbf{q}_p bzw. \mathbf{x}_p um Trajektorienpunkte vor dem geplanten Trajektorienbeginn ergänzt, die den Istwerten \mathbf{q} bzw. \mathbf{x} entsprechen.



(a) Experimenteller Versuchsaufbau im Labor.



(b) Aufnahme des Tübbings A2. (c) Marker $SM1$ aus Sicht von Kamera 1.

Abbildung 5.1: Laboraufbau der robotischen Assemblierung von Ringsegmenten mit visueller Posenschätzung.

- Die Interpolation von Konfigurationsraumtrajektorien und die Interpolation der Positionskomponente der Arbeitsraumtrajektorien erfolgt analog zu Kapitel 2.4.1.
- Für die Interpolation der Orientierungskomponente von Arbeitsraumtrajektorien wird das in [52] beschriebene Verfahren verwendet. Dabei wird in Anlehnung an die Spline-Interpolation in \mathbb{R}^3 eine beliebige Quaternionenkurve als Produkt einfacher Quaternionenkurven dargestellt.
- Die Roboterregelung entspricht den in Kapitel 2.5 vorgestellten Regelgesetzen für den Konfigurations- und den Arbeitsraum, wobei das Regelgesetz im Konfigurationsraum gegenüber (2.72) um einen Integralanteil erweitert wurde. Die Reglerparameter sind in Anhang B.2 aufgelistet.

Aufgrund der Abweichungen des realen Roboters von der Modellierung als Starrkörpersystem findet zusätzlich eine Reibungskompensation und eine unterlagerte Drehmomentenregelung aufgrund der Gelenkelastizitäten statt. Die Reibungskompensation in Form eines

Störgrößenbeobachters entspricht dem in [53] vorgestellten Prinzip. Die Parametrierung ist in Anhang B.2 dokumentiert. Um die Auswirkungen der Gelenksselastizitäten des realen Roboters zu unterdrücken, findet die singuläre Störtheorie (engl. singular perturbation theory) Anwendung, beschrieben in [28]. Dabei wird das dynamische Verhalten des Roboters aufgeteilt in ein langsames Teilsystem, das dem bisher behandelten Modell eines Starrkörpersystems entspricht und einem schnellen Teilsystem, das die Gelenksselastizitäten abbildet. Die Regelung erfolgt durch einen unterlagerten Drehmomentenregler, um das schnelle Teilsystem zu stabilisieren, welcher auf ein quasi-stationäres Starrkörpersystem mit modifizierter Massenmatrix führt. Die Parameter des Drehmomentenreglers sind in Anhang B.2 angeführt. Zusätzlich sind im realen Aufbau Sicherheitsüberwachungen für die Gelenkwinkel, Gelenkwinkelgeschwindigkeiten und die Motormomente implementiert.

Die Roboterregelung ist in der PC-basierten Echtzeitsteuerungsumgebung TwinCAT 3 der Firma Beckhoff implementiert [54] und wird mit einer Zykluszeit von $T_{a,c} = 0.125$ ms ausgeführt. Die Kommunikation mit den ROS-Nodes – dargestellt im Block *Steuerung* in Abbildung 3.5 – erfolgt über das Beckhoff ADS-Protokoll [55]. Weitere Informationen bezüglich der Ansteuerung des Roboterarms und der verwendeten Implementierung der Roboterregelung sind in [56] und [57] zu finden.

Für die Bilderfassung werden Kameras vom Typ Intel RealSense D435i verwendet [58]. Die Anordnung der Kameras ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Die Parameter der Bilderfassung im praktischen Versuch sind in Anhang D.2 aufgelistet.

5.2 Ergebnisse

Die Diskussion der Ergebnisse des Ringbaus am experimentellen Versuchsaufbau erfolgt in analoger Weise zur Simulation in Kapitel 4.2. Anhand der Segmentaufnahme des Segments A2 werden die Ergebnisse aus der Simulation am realen Aufbau validiert.

Die Regelung im Konfigurationsraum wird nachfolgend anhand eines Grobpositionierungsabschnitts evaluiert und in analoger Weise wird die Regelung im Arbeitsraum anhand eines Feinpositionierungsabschnitts betrachtet. Speziell bei der Segmentaufnahme tritt der Fall auf, dass das Segment zwischen Untergrund und Saugplatte fest eingespannt ist. In dieser Situation bestimmt das Impedanzverhalten der Roboterregelung (2.75) die Interaktion des Roboterarms mit der Umgebung, d. h. mit dem Segment. Die Interaktion des Roboters mit dem aufzunehmenden Segment wird anhand des kartesischen Regelfehlers und des Drehmomentenverlaufs diskutiert.

In einem weiteren Abschnitt diskutiert dieses Kapitel das Rauschverhalten der visuellen Posenschätzung. Hierfür wird die Standardabweichung der Positions- und Orientierungssignale betrachtet. Die Posensignale stammen aus der Platzierung des Segments B am Versuchsaufbau, da nur bei der Segmentplatzierung Marker $\mathcal{M}1$ bis $\mathcal{M}3$ und der virtuelle Marker $\mathcal{M}4$ verwendet werden.

Die Messergebnisse der gesamten Segmentaufnahme und der Segmentplatzierung befinden sich in Anhang F.2. Die Darstellung des vollständigen Ringbaus erfolgt abschließend als Bildsequenz. Zusätzlich sind die erzielten Spaltmaße des robotisch assemblierten Rings dokumentiert und einem manuell erbauten Ring gegenübergestellt.

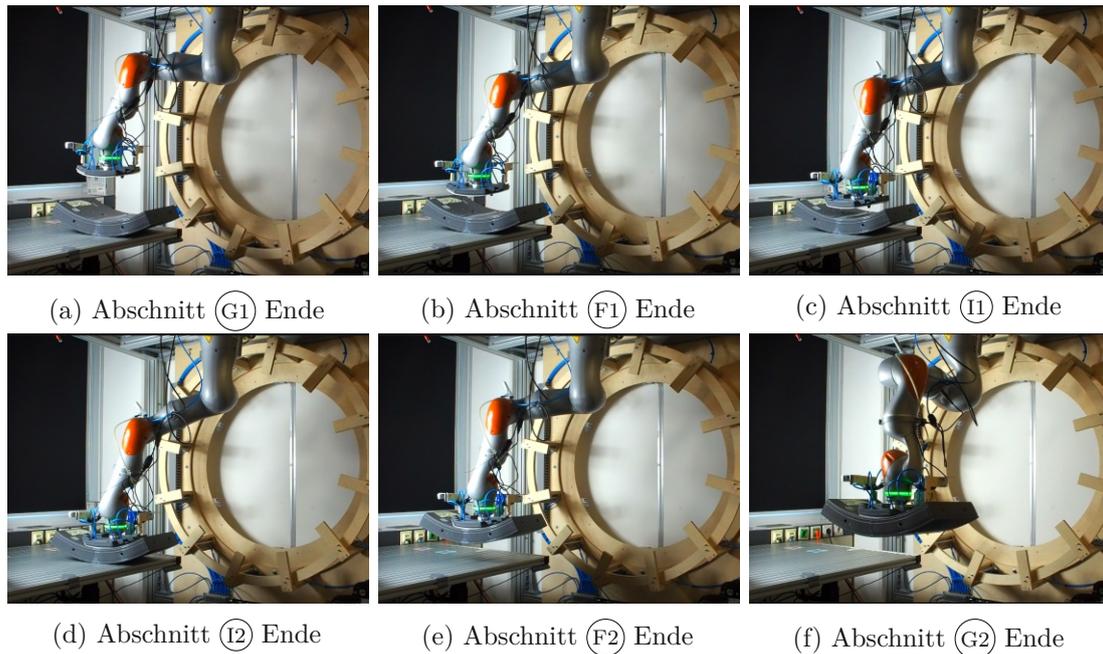


Abbildung 5.2: Darstellung der Aufnahme von Segment A2 als Bildsequenz.

5.2.1 Ablauf der Tübbingaufnahme

Die nachfolgende Erklärung der Segmentaufnahme von Segment A2 orientiert sich an der Ablaufsequenz aus Anhang E.2.1. Für die Illustration der einzelnen Abschnitte dient die Bildsequenz in Abbildung 5.2. Der gesamte Aufnahmeablauf wird dabei in die Grobpositionierungsabschnitte $\textcircled{G1}$ und $\textcircled{G2}$ (Befehl **JSMOV** in Anhang E.2.1) und in die Feinpositionierungsabschnitte $\textcircled{F1}$, $\textcircled{F2}$ (Befehl **TSMOVREL** in Anhang E.2.1), $\textcircled{I1}$ und $\textcircled{I2}$ (Befehl **VISFB_OFFSET_PLACE** in Anhang E.2.1) unterteilt.

Zu Beginn des Aufnahmevorgangs fährt der Roboter im Abschnitt $\textcircled{G1}$ zur Segmentaufnahme-position. Dadurch befindet sich die Saugplatte über dem Segment, zu sehen in Abbildung 5.2a. Danach wird im Zuge der Feinpositionierung die Saugplatte in Abschnitt $\textcircled{F1}$ um 10 cm abgesenkt (Abbildung 5.2b). Der Segmentmarker $SM1$ wird dadurch von Kamera 1 gut erfasst.

Anschließend beginnt die nächste Phase der Feinpositionierung, die iterative Trajektorienplanung. Während des Abschnitts $\textcircled{I1}$ wird die Saugplatte unter Berücksichtigung der visuellen Posenschätzung und mithilfe der iterativen Trajektorienplanung 5 cm über dem Tübbing A2 positioniert, dargestellt in Abbildung 5.2c. Das Saugplattenvakuum wird zu diesem Zeitpunkt aktiviert. Im Abschnitt $\textcircled{I2}$ wird die Saugplatte abgesenkt. Diesmal beträgt der vorgegebene Positionsoffset 1.5 cm in negative z_S -Richtung (vgl. Abbildung 3.2). Durch das Impedanzverhalten des kartesischen Regelgesetzes (2.81) wird die Saugplatte auf das Segment gepresst (Abbildung 5.2d) und komprimiert so die Vakuumdichtung der Saugplatte und das Vakuum kann sich ausbilden. Durch die Komprimierung der Vakuumdichtung und dem Aufbau des Vakuums ist das Segment nun fest mit der Saugplatte

verbunden. Im Abschnitt (F2) wird der aufgenommene Tübbing um 10 cm angehoben (Abbildung 5.2e) und mit der nachfolgenden Konfigurationsraumtrajektorie im Abschnitt (G2) in die Ausgangskonfiguration für die Segmentplatzierung gebracht, dargestellt in Abbildung 5.2f.

5.2.2 Grobpositionierung

Die Grobpositionierung im Konfigurationsraum wird nachfolgend anhand des Abschnitts (G2) detailliert betrachtet. Die Ausgangskonfiguration des Roboters ist in Abbildung 5.2a ersichtlich und die Zielkonfiguration am Ende von (G2) ist in Abbildung 5.2f dargestellt.

Für die Diskussion der Trajektorienplanung und darauf aufbauend der Trajektorieninterpolation im Konfigurationsraum sei an dieser Stelle auf Kapitel 4.2.2 verwiesen. Im nachfolgenden Abschnitt wird die Trajektorienfolgeregulation im Konfigurationsraum im praktischen Versuch betrachtet.

Regelung im Konfigurationsraum

Für die Beurteilung der Trajektorienfolgeregulation am experimentellen Versuchsaufbau dienen die in Abbildung 5.3 dargestellten Messergebnisse. Das erste Diagramm zeigt den Verlauf der Gelenkwinkel \mathbf{q} , im zweiten Diagramm ist der Verlauf der Drehmomente $\boldsymbol{\tau}$ und abschließend ist der Regelfehler \mathbf{e}_q im dritten Diagramm dargestellt. Die verwendeten Reglerparameter sind in Anhang B.2 aufgelistet.

Auffällig gegenüber den Simulationsergebnissen ist das erhöhte Signalrauschen der Drehmomentensignale und des Regelfehlers in Abbildung 5.3. Das Messrauschen der Drehmomentensensoren ist im zweiten Diagramm in Abbildung 5.3 im Bereich vor und nach dem Abschnitt (G2) (Stillstand des Roboters) ersichtlich. Die Hauptursache des Rauschens ist auf die unterlagerte Reibungskompensation und die unterlagerte Drehmomentenregelung zurückzuführen, deren Auswirkung während der Trajektorienausführung im Abschnitt (G2) ersichtlich sind.

Im Gegensatz zur Simulationsumgebung sind die Massen und die Schwerpunkte im experimentellen Versuchsaufbau nicht exakt bekannt. Die Massen der Saugplatte und der Segmente wurden gemessen. Die Schwerpunkte wurden aus dem CAD-Modell der entsprechenden Komponenten des Aufbaus entnommen und sind damit lediglich eine Näherung der tatsächlichen Parameterwerte.

Wie in Kapitel 5.1 erwähnt, wurde das Regelgesetz um einen Integralanteil erweitert. Der Verlauf des Regelfehlers \mathbf{e}_q ist im dritten Diagramm in Abbildung 5.3 dargestellt. Darin ist ersichtlich, dass die Regelung im Konfigurationsraum ordnungsgemäß funktioniert und keine bleibende Regelabweichung erkennbar ist.

5.2.3 Feinpositionierung mithilfe der iterativen Trajektorienplanung

Die Feinpositionierung im Arbeitsraum wird analog zu Kapitel 4.2.3 anhand des Abschnitts (I2) betrachtet. Zu Beginn des Abschnitts befindet sich der Roboter in der in Abbildung 5.2c dargestellten Ausgangskonfiguration, d. h. die Saugplatte ist etwa 5 cm vom Segment entfernt. Die Konfiguration am Ende von (I2) ist in Abbildung 5.2d dargestellt. Der

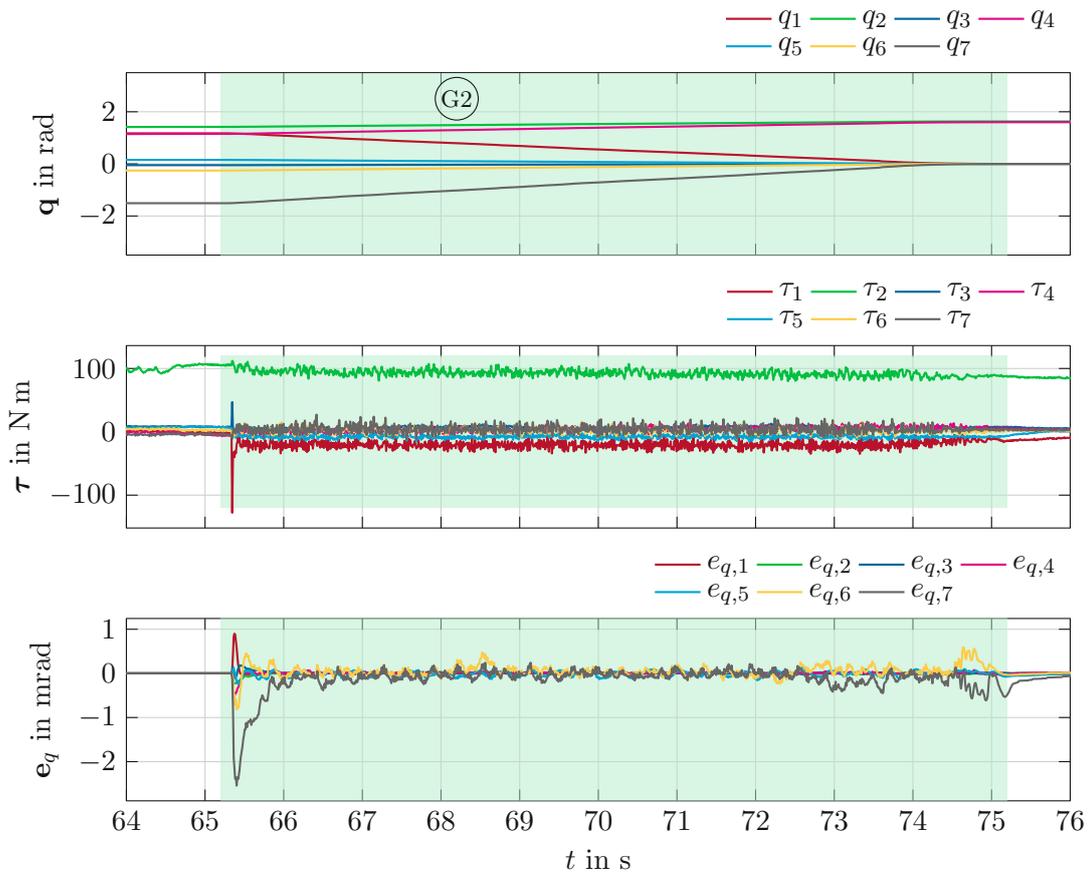


Abbildung 5.3: Regelung im Konfigurationsraum.

Abschnitt ⑫ beinhaltet den Aufnahmevorgang des Segments durch die Saugplatte. Dieser Vorgang wird nachfolgend detaillierter diskutiert.

Die iterative Trajektorienplanung und die visuelle Posenschätzung sowie die darauf aufbauende Trajektorieninterpolation im Arbeitsraum sind in Kapitel 3.3 beschrieben. Der nachfolgende Abschnitt widmet sich der Trajektorienfolgeregelung im Arbeitsraum angewendet am praktischen Versuchsaufbau.

Regelung im Arbeitsraum

Die Bewertung der Roboterregelung im Arbeitsraum erfolgt anhand von Abbildung 5.4. Dabei werden die Positionssignale in Abbildung 5.4a und die Orientierungssignale in Abbildung 5.4b getrennt dargestellt. Der Verlauf der Gelenkwinkel \mathbf{q} sowie der Drehmomentenverlauf $\boldsymbol{\tau}$ sind gesondert in Abbildung 5.5 dargestellt. Die verwendeten Regelparameter sind in Anhang B.2 aufgelistet.

Die oberen beiden Diagramme in Abbildung 5.4 zeigen den Verlauf der Endeffektorposition \mathbf{d}_0^e bzw. der Endeffektororientierung $\boldsymbol{\phi}_0^e$. Darunter ist der kartesische Positionsfehler \mathbf{e}_t bzw. der Orientierungsfehler \mathbf{e}_r entsprechend (2.77) dargestellt.

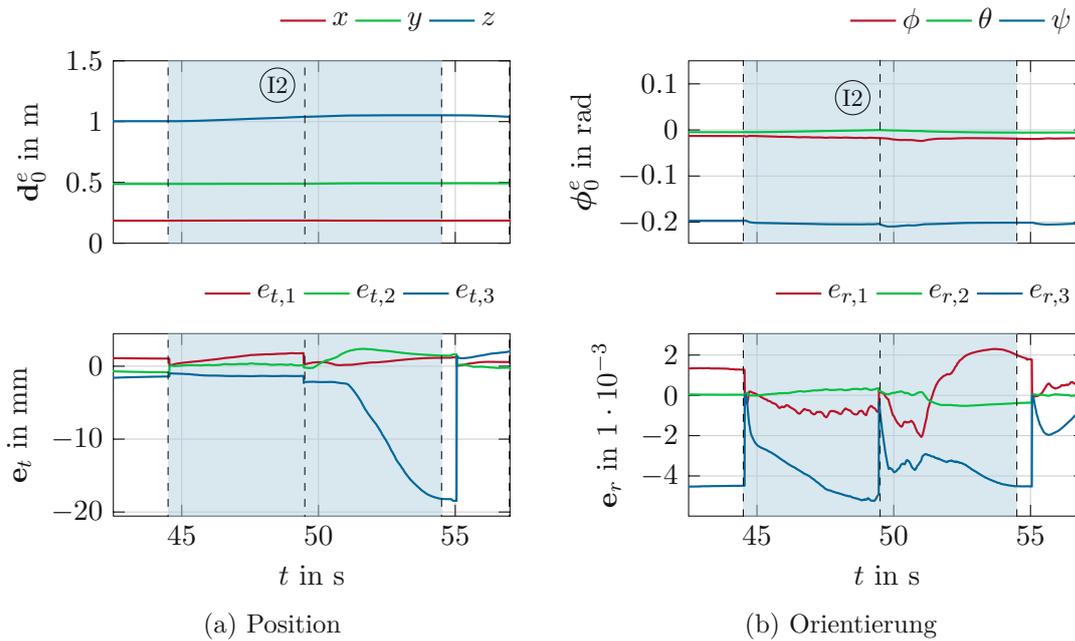


Abbildung 5.4: Regelung im Arbeitsraum.

Der im Vergleich zur Simulation (Abbildung 4.6) erhöhte Regelfehler ist auf die nicht exakt bekannten Massen- und Schwerpunktparameter (vgl. Kapitel 5.2.2) zurückzuführen.

Von besonderem Interesse ist der Anstieg des Regelfehlers $e_{t,3}$ im zweiten Trajektorienaktualisierungsintervall ($t = 49.5$ s bis $t = 54.5$ s) in Abbildung 4.6a, da in diesem Abschnitt der physische Kontakt der Saugplatte mit dem Segment auftritt. Der finale Regelfehler von $e_{t,3} \approx 18$ mm setzt sich aus dem vorgegebenen Positionsoffset in negative z_S -Richtung (siehe Kapitel 5.2.1) von 1.5 cm, dem unkomprimierten Zustand der Vakuumdichtung und der bestehenden stationären Regelabweichung zusammen. Im Orientierungsfehler \mathbf{e}_r im zweiten Diagramm in Abbildung 5.4b wirkt sich der Kontakt der Saugplatte mit dem Segment nicht erkennbar aus. Dies liegt daran, dass die Saugplatte durch das visuelle Feedback der Posenschätzung bereits parallel zum Segment ausgerichtet ist. Aufgrund des ebenen Untergrunds – das Segment liegt auf einem Tisch – findet auch keine Verdrehung während des physischen Kontakts der Saugplatte mit dem Segment statt.

Die Auswirkung des physischen Kontakts der Saugplatte mit dem Segment ist im Drehmomentenverlauf von τ_2 , dargestellt im zweiten Diagramm in Abbildung 5.5, ebenfalls deutlich erkennbar. Im zweiten Trajektorienaktualisierungsintervall ab $t = 51$ s ist zunächst eine Abnahme des Rauschens des Drehmomentenverlaufs von τ_2 erkennbar. Das bedeutet, dass sich die Saugplatte in physischem Kontakt mit dem Segment befindet, da das Gelenk q_2 zum Stillstand kommt und der Anteil der Reibungskompensation am aufgeschalteten Drehmoment wegfällt. Ab dem Zeitpunkt des physischen Kontakts der Saugplatte mit dem Segment ist eine Zunahme des Regelfehlers $e_{t,3}$ in Abbildung 5.4a erkennbar. Danach ist eine (sehr) geringe Abnahme des Drehmoments zwischen $t = 52.5$ s und $t = 53.5$ s um einige Newtonmeter erkennbar. Die Abnahme des Drehmoments ist auf die Abstützung

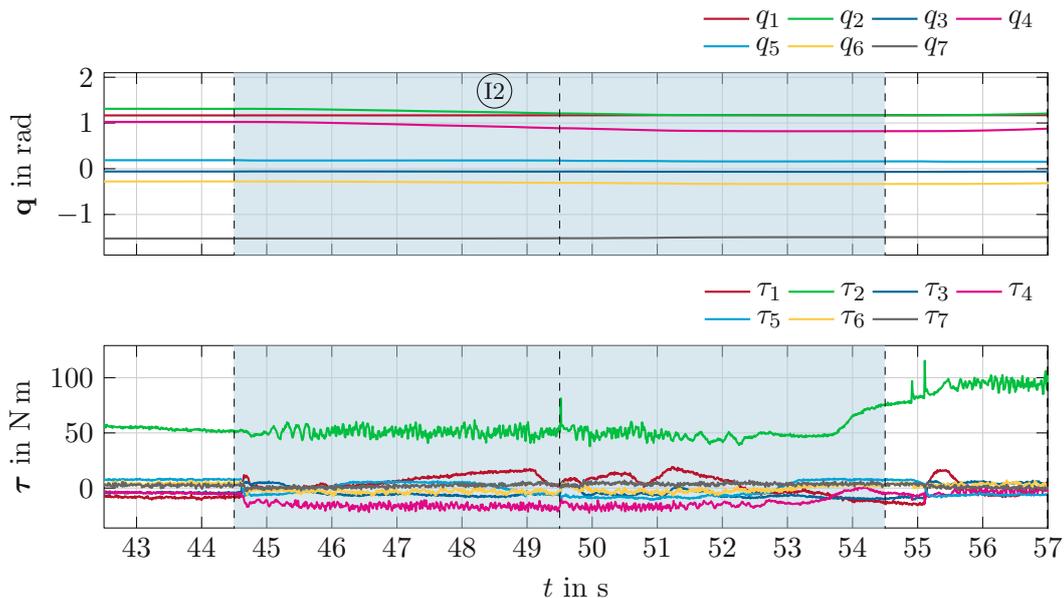


Abbildung 5.5: Gelenkwinkel- und Drehmomentenverlauf während der Aufnahme des Segments A2.

des Roboterarms am Segment zurückzuführen. Durch die Kraftausübung wird die Vakuumdichtung auf das Segment gedrückt, wodurch sich das Vakuum beginnt auszubilden. Zu diesem Zeitpunkt liegt das Segment noch am Tisch auf, allerdings lastet nun ein Teil des Segmentgewichts von $m_S \approx 1.5 \text{ kg}$ am Endeffektor des Roboters. Mit zunehmender Komprimierung der Vakuumdichtung, in Folge des Aufbaus des Saugplattenvakuums, nimmt die Dicke der Dichtung ab. Dadurch steigt der Regelfehler $e_{t,3}$ an, dargestellt in Abbildung 5.4a, und das Drehmoment τ_2 nimmt gegen Ende des Abschnitts ⑫ zu.

Die geänderten Massen- und Schwerpunktparameter sind zu diesem Zeitpunkt noch nicht in der Regelung berücksichtigt. Die Parameteraktualisierung erfolgt erst im nächsten Schritt in der Ablaufsequenz (Anhang E.2.1). Ab dem Zeitpunkt des physischen Kontakts mit dem Segment bei $t = 51 \text{ s}$ nimmt der Regelfehler bis zur Aktualisierung der Massen- und Schwerpunktparameter zum Zeitpunkt $t = 55 \text{ s}$ stetig zu.

Zusammenfassend ermöglicht die beschriebene Regelung im Arbeitsraum die erfolgreiche Aufnahme des Segments. Das Impedanzverhalten der Regelung sorgt für ausreichende Kontaktkräfte zur Kompression der Vakuumdichtung, ohne dabei zu hohe Kräfte auf das Segment auszuüben, die zu Beschädigungen oder einer Notabschaltung des Roboters führen würden. Der hier beschriebene Vorgang findet in ähnlicher Weise bei der Segmentplatzierung während der Interaktion des Segments mit benachbarten Segmenten oder der Montagewand statt. Die Ergebnisse und Erklärungen können analog zu diesem Fall übertragen werden.

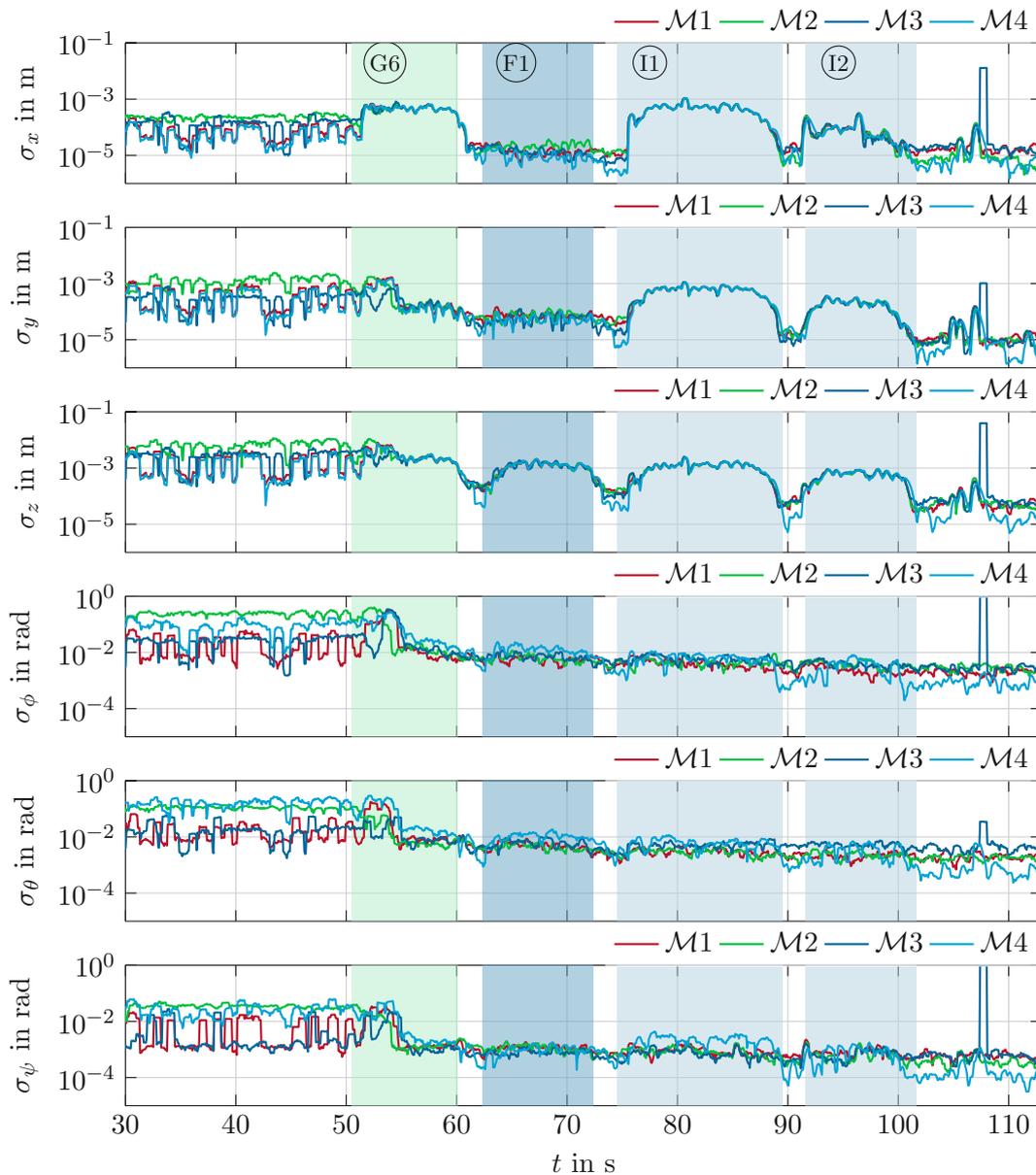


Abbildung 5.6: Abbildung der Standardabweichung des Rauschens bei der Posenschätzung während der Platzierung des Tübbings B. Die zugehörige Ablaufsequenz ist in Anhang E.2.2 dargestellt.

5.2.4 Positions- und Orientierungsrauschen

Dieser Abschnitt widmet sich der erzielbaren Positions- und Orientierungsaufösung basierend auf den Positions- und Orientierungssignalen der visuellen Posenschätzung, beschrieben in Kapitel 2.2. Die nachfolgenden Betrachtungen basieren auf den Messwerten aus der Platzierung des Segments B. Für die Segmentplatzierung werden die drei Marker

$\mathcal{M}1$ bis $\mathcal{M}3$ und der virtuelle Marker $\mathcal{M}4$ verwendet. Der Ablauf der Segmentplatzierung am praktischen Versuchsaufbau entspricht dem in Kapitel 4 beschriebenen Ablauf.

In Abbildung 5.6 sind die Standardabweichungen σ_i , $i \in \{x, y, z, \phi, \theta, \psi\}$ der einzelnen Komponenten der Positions- und Orientierungssignale mithilfe eines Filters mit einer Fensterlänge von 10 Datenpunkten auf einer logarithmischen Skala dargestellt. Die Signale weisen bis zum Zeitpunkt $t = 55$ s eine erhöhte Standardabweichung σ auf, was auf eine reduzierte effektive Kameraauflösung in Verbindung mit der zu Beginn großen Entfernung des Markers zur Kamera zurückzuführen ist.

Besonders bei den Positionssignalen ist im nachfolgenden Signalverlauf der Wechsel zwischen Bereichen mit geringerer Standardabweichung (bspw. bei $t = 90$ s) und Bereichen mit höherer Standardabweichung (bspw. bei $t = 95$ s) erkennbar. In den erstgenannten Bereichen führt der Roboter keine Bewegungen aus, ersichtlich in Abbildung F.4 an den Zwischenräumen zwischen den Abschnitten (G6), (F1), (I1), (I2) und (G2). Umgekehrt korrespondieren Bereiche mit erhöhter Standardabweichung mit Bewegungen des Roboters. Die Ursache liegt in der Bewegungsunschärfe (engl. motion blur) der erfassten Bilder während der Endeffektor Bewegungen ausführt.

Bei den Orientierungssignalen tritt dieses Verhalten nicht auf, da sich die Marker im Kamerabild nicht drehen. Allerdings nimmt die Standardabweichung generell ab, je näher sich die Kamera dem erfassten Marker befindet, d. h. je besser die Auflösung des erfassten Markers ist.

Die Filterung der Positions- und Orientierungssignale, beschrieben in Kapitel 3.2.2, des virtuellen Markers $\mathcal{M}4$ liefert hinsichtlich des erzielten Rauschens keine signifikante Verbesserung. Allerdings wird die Robustheit der Posenschätzung durch die Signalschätzung mithilfe des in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Kalman-Filters wesentlich verbessert. Zum Zeitpunkt $t = 108$ s wird der Marker $\mathcal{M}3$ nicht erkannt. Die Signale des Markers $\mathcal{M}3$ weisen hier einen Sprung in der Standardabweichung auf. Die gefilterten Signale des virtuellen Markers $\mathcal{M}4$ sind von dieser Fehldetektion aber unbeeinflusst.

Zusammenfassend liegt die Größenordnung der Standardabweichung von Positionssignalen bei geringem Abstand zwischen der Kamera und den Markern bei $\sigma_t \approx 0.01$ mm, $t \in \{x, y, z\}$ und von Orientierungssignalen bei $\sigma_r \approx 1$ mrad, $r \in \{\phi, \theta, \psi\}$. Dadurch wird auch die untere Grenze der erzielbaren Auflösung durch die visuelle Posenschätzung gelegt.

5.2.5 Ringbau

Neben der Aufnahme des Segments A2 und der Platzierung des Tübbings B wurden für den experimentellen Ringbau auch die Tübbinge A3, A2, A1, C und der Schlussstein K im Ring platziert. Die Messergebnisse der Segmentaufnahme und der Segmentplatzierung sind in Anhang F.2 dargestellt. In Anhang E.2 sind die entsprechenden Ablaufsequenzen dokumentiert. Die Dauer der Ablaufsequenzen wurde für die Laborversuche im Vergleich zu den Simulationssequenzen aus Sicherheitsgründen großzügig ausgelegt. Dadurch kann der Bediener im Falle einer Fehlfunktion rechtzeitig eingreifen und eine Notabschaltung auslösen.

Als Dokumentation des erfolgreichen Assemblievorgangs eines Segmentrings dient die Bildsequenz in Abbildung 5.7. Jedes Bild zeigt die Roboterkonfiguration im Moment des Einbaus eines Tübbings. Die bereits platzierten Segmente werden durch die prototypischen

Vortriebspresen gehalten. Bei der Segmentplatzierung im experimentellen Versuch wurden neue Segmente manuell mit der Saugplatte arretiert, um die repetitive Segmentaufnahme zu vermeiden. Die in Kapitel 4.2.1 beschriebene Grobpositionierung verkürzt sich dadurch auf den Abschnitt (G6). Die Feinpositionierung erfolgt wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben.

Damit ist der Funktionsnachweis des beschriebenen Systems unter Realbedingungen erbracht. Nachfolgend ist die erzielte Genauigkeit des erbauten Rings durch die Messung der erzielten Spaltmaße dokumentiert.

Spaltmaße

Im Zuge der Herstellung des Laboraufbaus (vgl. Abbildung 3.1) sind aufgrund von Fertigungstoleranzen und den verwendeten Materialien Abweichungen der Naturmaße von den Planmaßen vorhanden. Hauptverantwortlich sind die manuelle Fertigung der Holzkonstruktion und der (saisonal) schwankende Feuchtigkeitseinfluss auf die Holzelemente. Selbst die Fertigungstoleranz des 3D-Druckverfahrens führte bei den Abmessungen der erstellten Tübbinge zu merkbaren Abweichungen des Ist- vom Sollmaß. Daher wurde ein manuell assemblierter Ring als Vergleich herangezogen.

Die erzielten Spaltmaße bei der manuellen Assemblierung können als bestmögliche Werte, die aufgrund der vorhandenen Toleranzen möglich sind, angesehen werden. Die während des robotischen Ringbaus und im Zuge der manuellen Ringassemblierung erzielten Spaltmaße der Längsfugen sind in Tabelle 5.1 aufgelistet. Der manuell erstellte Ring wurde mithilfe von Arretierungsbolzen in der Montageplatte und entsprechenden Arretierungsnuten auf den Stirnseiten der Tübbinge erstellt. Dadurch konnte trotz manueller Assemblierung die exakte Ringposition der Tübbinge erzielt werden. Der robotische Assembliervorgang verwendet keine Arretierungshilfen. In diesem Fall basiert die Segmentplatzierung ausschließlich auf der visuellen Posenschätzung.

Im realen Ringbau sind Spaltmaße von weniger als zehn Millimeter gefordert. Die durch die robotische Assemblierung im praktischen Versuch erzielten Spaltmaße sind daher noch zu hoch.

Die höheren Spaltmaße im Vergleich zum manuellen Ringbau werden größtenteils durch eine Abweichung der Segmentzielposition in z_S -Richtung verursacht, siehe Abbildung 3.2. Das führt zu einem zu „groß“ gebauten Ring. Die vermutete Ursache liegt in den verwendeten homogenen Transformationen für die Bestimmung der Pose des TCPs \mathcal{T} bei der Segmentplatzierung in (3.3). Die homogenen Transformationen wurden anhand des CAD-Modells des Aufbaus ermittelt und vernachlässigen daher die Abweichungen der Naturmaße von den Planmaßen sowie die Fertigungsungenauigkeiten. Bei der Kalibrierung der Kamerapose \mathcal{K}_3 im Bezug auf das Endeffektorkoordinatensystem e in (3.7) sowie bei der Ermittlung des TCPs \mathcal{T} in (3.3) betrifft dies die homogenen Transformationen $\mathbf{H}_e^{\mathcal{T}}$, $\mathbf{H}_T^{\mathcal{S}}$, $\mathbf{H}_S^{\mathcal{M}4}$ und $\mathbf{H}_{\mathcal{M}4}^{\mathcal{K}3}$. Die homogene Transformation $\mathbf{H}_e^{\mathcal{T}}$ basiert auf den Abmessungen des CAD-Modells der Saugplatte. Dadurch sind die Fertigungstoleranzen aufgrund des 3D-Druckverfahrens nicht berücksichtigt. Die Auswirkung der Vakuumsaugdichtung, dargestellt in der homogenen Transformation $\mathbf{H}_T^{\mathcal{S}}$, basiert auf einer empirischen Schätzung der komprimierten Dichtungsdicke und ist ebenfalls nicht exakt bekannt. Aufgrund der Fertigungsungenauigkeiten bei der manuellen Montage der Marker $\mathcal{M}1$ bis $\mathcal{M}3$ auf der Montageplatte (siehe Abbildung 3.2) entspricht die homogene Transformation $\mathbf{H}_S^{\mathcal{M}4}$

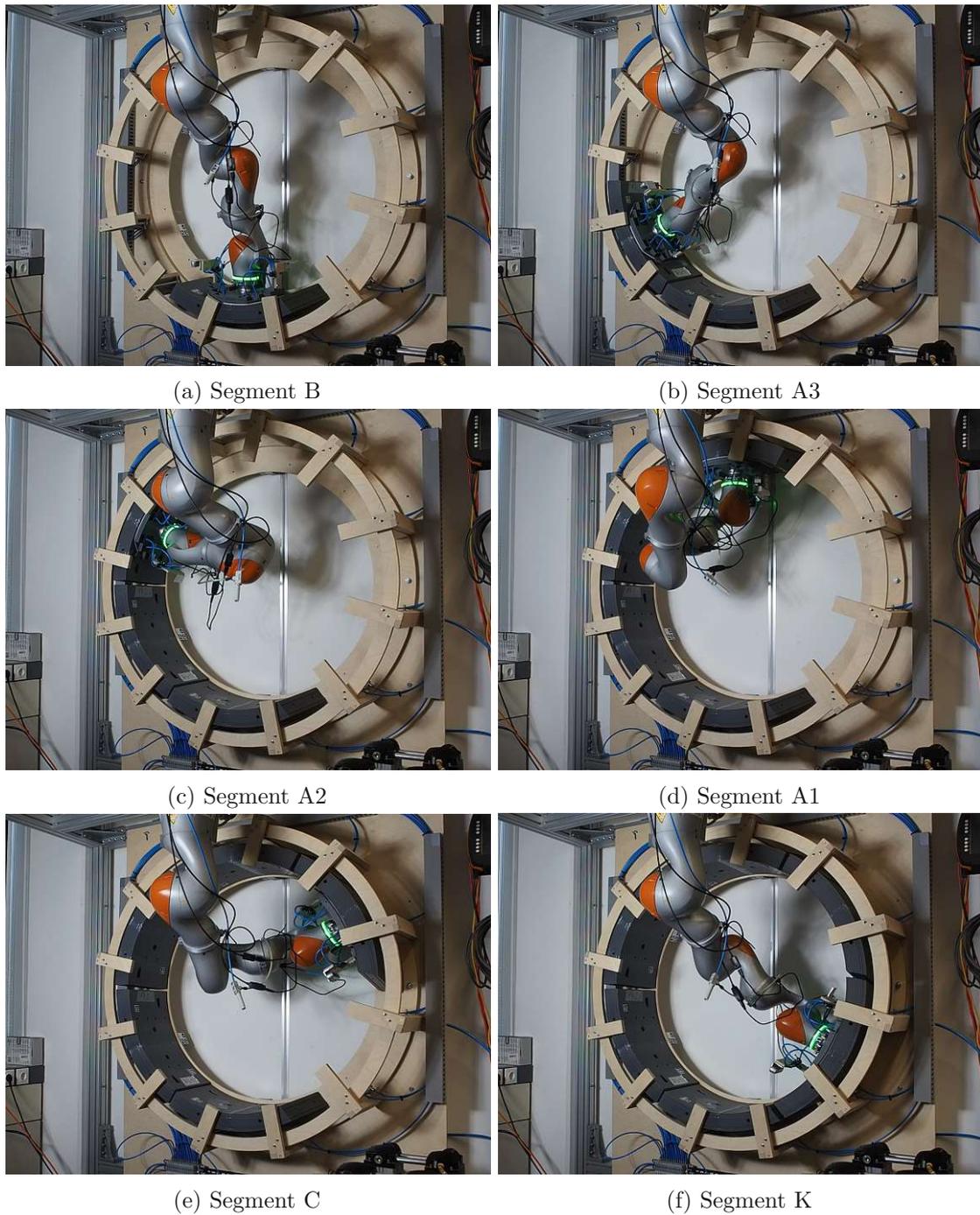


Abbildung 5.7: Ringbau im experimentellen Versuchsaufbau.

nicht exakt den tatsächlichen Gegebenheiten. Die gemessene Pose des virtuellen Markers \mathcal{M}_4 bezüglich des Kamerakoordinatensystems \mathcal{K}_3 ist aufgrund der Kamerakalibrierung ebenfalls mit einem Fehler behaftet. Die verwendete Werkskalibrierung der Kamera wird

Spalt	robotische Assemblierung	manuelle Assemblierung
B – A3	8 mm	3 mm
A3 – A2	18 mm	7 mm
A2 – A1	17 mm	3 mm
A1 – C	15 mm	3 mm
C – K	16 mm	8 mm
K – B	16 mm	3 mm

Tabelle 5.1: Spaltmaße der Längsfugen.

allerdings als genau genug angenommen, um keinen signifikanten Anteil an den erhöhten Spaltmaßen zu verursachen.



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 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit zeigt den Beweis für die Durchführbarkeit der robotischen Assemblierung von Betonringsegmenten im Tunnelbau in Form eines experimentellen Versuchsaufbaus. Das beschriebene System umfasst einen Industrieroboter für die Manipulation der Segmente und eine markerbasierte Posenschätzung für die Erfassung der Segmente.

Zunächst wurde in Kapitel 1 ein Einblick in den modernen Tunnelbau und speziell den Ringbau gegeben. Als weiteren Schwerpunkt dieses Kapitels wurden die häufigsten Schadensursachen und Fehlerquellen beim Ringbau zusammengefasst, um das Potenzial für Automatisierungstechnik im Tunnelbau aufzuzeigen.

Im darauffolgenden Kapitel 2 wurden die theoretischen Grundlagen für die Umsetzung des Assemblersystems ausgeführt. Zu Beginn erfolgte die Beschreibung des mathematischen Modells des Roboters. Anschließend wurden die Grundlagen der visuellen Posenschätzung und der Trajektorieninterpolation auf Basis von Spline-Kurven dargestellt. Zum Abschluss dieses Kapitels wurden die verwendeten Regelgesetze der inversen Dynamik im Konfigurationsraum und Arbeitsraum eingeführt.

Der Versuchsaufbau für die robotische Assemblierung von Ringsegmenten im Labormaßstab wurde in Kapitel 3 beschrieben. Die Bewegungen des Roboters wurden in Grobpositionierung und Feinpositionierung aufgeteilt. Im Fall der Feinpositionierung wurde eine iterative Trajektorienplanung eingeführt, die bei Annäherung an die Segmentaufnahme- bzw. Segmenteinbauposition das verbesserte Posenfeedback der visuellen Posenschätzung berücksichtigt und die geplanten Trajektorien iterativ aktualisiert. Für Kontaktaufgaben wurde eine kartesische Impedanzregelung verwendet, um kontrollierte Kontaktkräfte ausüben zu können. Abschließend wurde die Implementierung des Systems in ROS beschrieben.

Für die Überprüfung der Durchführbarkeit der robotischen Assemblierung mithilfe des erarbeiteten Systems und zur Validierung der einzelnen Systemkomponenten wurde in Kapitel 4 der Aufbau in Simulation getestet. Die Simulation erfolgte im 3D-Robotersimulator Gazebo. Im Zuge der Simulation wurde die Segmentplatzierung detailliert betrachtet. Während der iterativen Trajektorienplanung zeigten sich Sprünge im kartesischen Regelfehler, die auf einen nicht-stetigen Übergang der Trajektorien hindeuten. Der Positionsfehler bei der Segmentplatzierung lag im Bereich einiger hundertstel Millimeter und der Orientierungsfehler im Bereich einiger zehntel Milliradian. Mithilfe der Simulation konnte die Funktionalität des Gesamtsystems und speziell der iterativen Trajektorienplanung bestätigt werden.

In Kapitel 5 wurde das System im experimentellen Versuch validiert. Dabei wurde speziell die Segmentaufnahme betrachtet und die Interaktion des Roboters mit dem aufzunehmenden Segment diskutiert. Dabei führte das Impedanzverhalten der Roboterregelung zu einer planmäßigen Kompression der Vakuumdichtung, ohne dabei zu hohe Kontaktkräfte auszuüben, die zu einer Beschädigung des Segments oder zu einer Notabschaltung des

Roboters führen würden. Für die Verbesserung der Ergebnisse der Segmentposenschätzung wurde die Filterung der Posensignale beschrieben. Dadurch konnte eine robustere Posenschätzung auch im Fall zeitweise nicht erkannter Marker erzielt werden. Zusätzlich konnte die untere Grenze der Auflösung der visuellen Posenschätzung ermittelt werden. Dazu wurde die Standardabweichung des Positions- und Orientierungsrauschens der erfassten Markerposen betrachtet. Für Positionssignale liegt die untere Grenze der Standardabweichung im Bereich von zehn Mikrometern und für Orientierungssignale im Bereich von einem Milliradian. Während der Bewegungsausführung durch den Endeffektor erhöhen sich die Werte der Standardabweichung aufgrund der Bewegungsunschärfe der Kamerabilder. Abschließend wurde der vollständige Ringbau in Form einer Bildsequenz dargestellt. Die Genauigkeit des Ringbaus wurde in Form der erzielten Spaltmaße dokumentiert. Gegenüber einem manuell assemblierten Referenzring sind die Spaltmaße des robotisch assemblierten Rings um fünf bis 14 Millimeter erhöht. Die Ursache der erhöhten Spaltmaße liegt bei nicht berücksichtigten Abweichungen der Naturmaße von den Planmaßen.

Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Arbeit kann das System in weiterführenden Arbeiten in verschiedenen Aspekten verbessert werden. Beispielsweise bietet eine präzisere Bestimmung der Naturmaße des experimentellen Aufbaus eine direkte Verbesserung der Platziergenauigkeit im praktischen Versuch. Zusätzlich kann der Übergang der Trajektorien bei der iterativen Trajektorienplanung auf Basis der visuellen Posenschätzung verbessert werden, um die in Kapitel 4.2.3 beschriebenen Sprünge im Regelfehler zu verringern. Im Weiteren kann die in Kapitel 2.4.1 beschriebene Trajektorieninterpolation mit Spline-Kurven erweitert werden, um die zweite Ableitung an den Rändern der Trajektorien zu berücksichtigen und damit C^2 -Stetigkeit der resultierenden Trajektorie zu gewährleisten. In zukünftigen Arbeiten sind verschiedene Forschungsrichtungen möglich. Einerseits kann die markerlose Posenschätzung der Segmente mithilfe von 3D-Objekterkennungsverfahren erforscht werden. Dabei kann die bekannte Geometrie der Segmente mit den erfassten 3D-Bilddaten abgeglichen werden, um die Pose des Segments zu bestimmen. Andererseits ist die Implementierung des Systems zur robotischen Assemblierung von Betonringsegmenten auf einer realen Tunnelbohrmaschine von hoher Relevanz für die Untersuchung der Praxis-tauglichkeit. Dadurch können die Auswirkungen von Verschmutzungen und Vibrationen ermittelt werden. Diese Arbeit bietet zudem die Grundlage für die Assemblierung von Fertigteilen in einem allgemeineren Kontext als dem Tunnelbau. Als naheliegendes Beispiel bietet sich im Bereich der Errichtung von Eisenbahngleisen der schotterlose Oberbau (sog. Feste Fahrbahn) an. Die vorgestellten Lösungen können auch im Hochbau bei der Assemblierung von Betonelementen eingesetzt werden.



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.





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 Ableitung der Quaternionenexponentialfunktion

Nachfolgend ist die Berechnung der beiden Ausdrücke in (2.68) ausgeführt. Die Notation und die Begriffe entsprechen denen aus Kapitel 2.4.2. Hilfreiche Rechenregeln und Beziehungen für die folgenden Herleitungen sind in [59], [60], [61] und [47] zu finden.

Die wichtigsten Zusammenhänge lauten

$$\underset{\sim}{q}(\sigma) = \mathcal{H} \left(\begin{array}{c} \cos(\phi(\sigma)) \\ \sin(\phi(\sigma))\mathbf{n}(\sigma) \end{array} \right) = e^{\underset{\sim}{\Psi}(\sigma)} \quad (\text{A.1})$$

$$\underset{\sim}{\Psi}(\sigma) = \mathcal{H} \left(\begin{array}{c} 0 \\ \boldsymbol{\psi}(\sigma) \end{array} \right) = \mathcal{H} \left(\begin{array}{c} 0 \\ \phi(\sigma)\mathbf{n}(\sigma) \end{array} \right), \quad (\text{A.2})$$

mit $\underset{\sim}{\Psi}(\sigma) \in \{\mathbb{H} \mid w = 0\}$, $\boldsymbol{\psi}(\sigma), \mathbf{n}(\sigma) \in \mathbb{R}^3$ und $\phi(\sigma) \in \mathbb{R}$.

Die Abhängigkeit von σ für $\phi(\sigma)$, $\mathbf{n}(\sigma)$ und $\boldsymbol{\psi}(\sigma)$ wird nachfolgend der Übersichtlichkeit wegen weggelassen. Zusätzlich wird die Ableitung $\frac{\partial}{\partial \sigma}$ als $(\cdot)'$ notiert. Es gilt

$$|\mathbf{n}| = 1 \quad (\text{A.3})$$

$$\phi = |\boldsymbol{\psi}| = \sqrt{\boldsymbol{\psi} \cdot \boldsymbol{\psi}}, \quad (\text{A.4})$$

und für die Ableitung des Winkels ϕ gilt

$$\begin{aligned} \phi' &= \frac{1}{2} (\boldsymbol{\psi} \cdot \boldsymbol{\psi})^{-\frac{1}{2}} \underbrace{(\boldsymbol{\psi}' \cdot \boldsymbol{\psi} + \boldsymbol{\psi} \cdot \boldsymbol{\psi}')}_{2\boldsymbol{\psi} \cdot \boldsymbol{\psi}'} \\ &= \frac{\boldsymbol{\psi} \cdot \boldsymbol{\psi}'}{\phi}. \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

Die Berechnung von $\frac{\partial}{\partial \sigma} e^{\underset{\sim}{\Psi}(\sigma)}$ erfolgt getrennt für Real- und Imaginärteil. Aus (A.2) und (A.4) folgt $\mathbf{n} = \frac{\boldsymbol{\psi}}{\phi}$. Dadurch kann (A.1) angeschrieben werden als

$$e^{\underset{\sim}{\Psi}(\sigma)} = \mathcal{H} \left(\begin{array}{c} \cos(\phi) \\ \frac{\sin(\phi)}{\phi} \boldsymbol{\psi} \end{array} \right). \quad (\text{A.6})$$

Damit folgt für den Realteil

$$\begin{aligned} \Re \left(\frac{\partial}{\partial \sigma} e^{\underset{\sim}{\Psi}(\sigma)} \right) &= -\sin(\phi)\phi' \\ &= -\frac{\sin(\phi)}{\phi} (\boldsymbol{\psi} \cdot \boldsymbol{\psi}') \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

und für den Imaginärteil folgt

$$\begin{aligned} \Im\left(\frac{\partial}{\partial\sigma}e^{\sim\Psi(\sigma)}\right) &= \frac{\sin(\phi)}{\phi}\psi' + \underbrace{\left(\frac{\cos(\phi)\phi' - \sin(\phi)\phi'}{\phi^2}\right)}_{\left(\frac{\cos(\phi)}{\phi} - \frac{\sin(\phi)}{\phi^2}\right)\frac{\psi\cdot\psi'}{\phi}}\psi \\ &= \frac{\sin(\phi)}{\phi}\psi' + \left(\frac{\cos(\phi)}{\phi^2} - \frac{\sin(\phi)}{\phi}\right)(\psi\cdot\psi')\psi \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

Aus der Ableitung des Realteils (A.7) und der Ableitung des Imaginärteils (A.8) folgt für die Ableitung der Quaternionenexponentialfunktion

$$\frac{\partial}{\partial\sigma}e^{\sim\Psi(\sigma)} = \mathcal{H}\left(\begin{array}{c} -\frac{\sin(\phi)}{\phi}(\psi\cdot\psi') \\ \frac{\sin(\phi)}{\phi}\psi' + \left(\frac{\cos(\phi)}{\phi^2} - \frac{\sin(\phi)}{\phi}\right)(\psi\cdot\psi')\psi \end{array}\right) \quad (\text{A.9})$$

Für die Berechnung von $\frac{\partial^2}{\partial\sigma^2}e^{\sim\Psi(\sigma)}$ werden zunächst folgende Terme berechnet

$$\frac{\partial}{\partial\sigma}(\psi\cdot\psi') = \psi'\cdot\psi' + \psi\cdot\psi'' \quad , \quad (\text{A.10})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial\sigma}\left(\frac{\sin(\phi)}{\phi}\right) &= -\frac{\cos(\phi)\phi\phi' - \sin(\phi)\phi'}{\phi^2} \\ &= \left(\frac{\cos(\phi)}{\phi^2} - \frac{\sin(\phi)}{\phi}\right)(\psi\cdot\psi') \quad , \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

$$\frac{\partial}{\partial\sigma}\left(\frac{\cos(\phi)}{\phi^2}\right) = \frac{-\sin(\phi)\phi^2\phi' - 2\cos(\phi)\phi\phi'}{\phi^4} \quad (\text{A.12})$$

$$= \frac{-\sin(\phi) - 2\frac{\cos(\phi)}{\phi}}{\phi^3}(\psi\cdot\psi') \quad (\text{A.13})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial\sigma}\left(\frac{\sin(\phi)}{\phi^3}\right) &= \frac{\phi^3\cos(\phi)\phi' - 3\sin(\phi)\phi^2\phi'}{\phi^6} \\ &= \frac{\cos(\phi) - 3\frac{\sin(\phi)}{\phi}}{\phi^4}(\psi\cdot\psi') \quad . \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

Mit (A.13) und (A.14) folgt

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial\sigma}\left(\frac{\cos(\phi) - \frac{\sin(\phi)}{\phi}}{\phi^2}\right) &= \frac{\partial}{\partial\sigma}\left(\frac{\cos(\phi)}{\phi^2}\right) - \frac{\partial}{\partial\sigma}\left(\frac{\sin(\phi)}{\phi^3}\right) \\ &= \left(\frac{-\sin(\phi) - 2\frac{\cos(\phi)}{\phi}}{\phi^3} - \frac{\cos(\phi) - 3\frac{\sin(\phi)}{\phi}}{\phi^4}\right)(\psi\cdot\psi') \quad . \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

Die Berechnung von $\frac{\partial^2}{\partial \sigma^2} e^{\tilde{\Psi}(\sigma)}$ erfolgt durch erneute Ableitung von (A.9).

$$\frac{\partial^2}{\partial \sigma^2} e^{\tilde{\Psi}(\sigma)} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{\partial}{\partial \sigma} e^{\tilde{\Psi}(\sigma)} \right). \quad (\text{A.16})$$

Analog zu oben erfolgt die Berechnung wieder getrennt für Real- und Imaginärteil. Für den Realteil gilt

$$\begin{aligned} \Re \left(\frac{\partial^2}{\partial \sigma^2} e^{\tilde{\Psi}(\sigma)} \right) &= \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(-\frac{\sin(\phi)}{\phi} (\boldsymbol{\psi} \cdot \boldsymbol{\psi}') \right) \\ &= -(\boldsymbol{\psi}' \cdot \boldsymbol{\psi}' + \boldsymbol{\psi} \cdot \boldsymbol{\psi}'') - (\boldsymbol{\psi} \cdot \boldsymbol{\psi}') \frac{\cos(\phi) - \frac{\sin(\phi)}{\phi}}{\phi^2} (\boldsymbol{\psi} \cdot \boldsymbol{\psi}') \end{aligned} \quad (\text{A.17})$$

und für den Imaginärteil gilt

$$\begin{aligned} \Im \left(\frac{\partial^2}{\partial \sigma^2} e^{\tilde{\Psi}(\sigma)} \right) &= \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\underbrace{\frac{\sin(\phi)}{\phi} \boldsymbol{\psi}'}_T + \underbrace{\left(\frac{\cos(\phi) - \frac{\sin(\phi)}{\phi}}{\phi^2} \right)}_U \underbrace{(\boldsymbol{\psi} \cdot \boldsymbol{\psi}') \boldsymbol{\psi}}_V \right) \\ &= \underbrace{\left(\frac{\cos(\phi) - \frac{\sin(\phi)}{\phi}}{\phi^2} \right)}_{T'} (\boldsymbol{\psi} \cdot \boldsymbol{\psi}') \boldsymbol{\psi}' + \frac{\sin(\phi)}{\phi} \boldsymbol{\psi}'' \\ &\quad + \underbrace{\left(\frac{-\sin(\phi) - 2 \frac{\cos(\phi)}{\phi}}{\phi^3} - \frac{\cos(\phi) - 3 \frac{\sin(\phi)}{\phi}}{\phi^4} \right)}_{U'} (\boldsymbol{\psi} \cdot \boldsymbol{\psi}') \underbrace{(\boldsymbol{\psi} \cdot \boldsymbol{\psi}') \boldsymbol{\psi}}_V \\ &\quad + \underbrace{\left(\frac{\cos(\phi) - \frac{\sin(\phi)}{\phi}}{\phi^2} \right)}_U \underbrace{((\boldsymbol{\psi}' \cdot \boldsymbol{\psi}' + \boldsymbol{\psi} \cdot \boldsymbol{\psi}'') \boldsymbol{\psi} + (\boldsymbol{\psi} \cdot \boldsymbol{\psi}') \boldsymbol{\psi}')}_{V'}. \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

Bei der Implementierung der Berechnungen in einem Digitalrechner können unbestimmte Ausdrücke auftreten, die in einer Umgebung um die betreffende Stelle als Reihenentwicklung implementiert werden müssen, damit die korrekten, endlichen Grenzwerte sichergestellt sind.



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.

B Reglerparameter

B.1 Simulation

	Bezeichnung	Wert
Konfigurationsraum	\mathbf{K}_0	$diag(550, 550, 550, 550, 550, 550, 550)$
	\mathbf{K}_1	$diag(330, 330, 330, 330, 330, 330, 330)$
Arbeitsraum	$\tilde{\mathbf{K}}_0$	$diag(550, 550, 550, 1200, 1200, 1200)$
	$\tilde{\mathbf{K}}_1$	$diag(120, 120, 120, 120, 120, 120)$
	\mathbf{K}_{0N}	$diag(50, 50, 50, 50, 50, 50)$
	\mathbf{K}_{1N}	$diag(20, 20, 20, 20, 20, 20)$

Tabelle B.1: Reglerparameter für die Simulation in Gazebo.

B.2 Experimenteller Versuchsaufbau

	Bezeichnung	Wert
Konfigurationsraum	\mathbf{K}_0	$diag(1200, 1200, 1200, 1200, 1200, 1200, 1200)$
	\mathbf{K}_1	$diag(60, 60, 60, 60, 60, 60, 60)$
	\mathbf{K}_I	$diag(8000, 8000, 8000, 8000, 8000, 8000, 8000)$
Arbeitsraum	$\tilde{\mathbf{K}}_0$	$diag(1200, 1200, 1200, 550, 550, 550)$
	$\tilde{\mathbf{K}}_1$	$diag(120, 120, 120, 120, 120, 120)$
	\mathbf{K}_{0N}	$diag(50, 50, 50, 50, 50, 50)$
	\mathbf{K}_{1N}	$diag(20, 20, 20, 20, 20, 20)$
Reibungskompensation	\mathbf{L}_f	$diag(200, 200, 300, 300, 500, 1000, 1000)$
Singular Perturbation	\mathbf{K}_τ	$diag(4, 4, 4, 5, 3, 2.5, 2.5)$
	\mathbf{D}_τ	$diag(0.015, 0.015, 0.015, 0.02, 0.01, 0.01, 0.01)$

Tabelle B.2: Reglerparameter für den praktischen Versuch.

B.2.1 Unterlagerte Drehmomentenregelung und Reibungskompensation

Aufgrund der Gelenksselastizitäten wird das Regelgesetz (2.70) erweitert zu

$$\boldsymbol{\tau}_m = \boldsymbol{\tau}_c - \mathbf{K}_\tau(\boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\tau}_c) - \epsilon \mathbf{D}_\tau \dot{\boldsymbol{\tau}} \quad (\text{B.1})$$

mit den neuen Stelleingängen $\boldsymbol{\tau}_m$, den gemessenen Drehmomenten $\boldsymbol{\tau}$ und dem singulären Störparameter $0 < \epsilon \ll 1$. Für eine detaillierte Betrachtung sei auf [28] verwiesen.

Für die Kompensation der Reibung in den Gelenken des Roboters wird der in [53] vorgestellte Störungsbeobachter

$$\hat{\boldsymbol{\tau}}_f = -\mathbf{L}_f \mathbf{J}_m (\dot{\hat{\boldsymbol{\Theta}}}_m - \dot{\boldsymbol{\Theta}}_m) \quad (\text{B.2})$$

mit der Beobacherverstärkung \mathbf{L}_f , der Matrix der Motorträgheitsmomente \mathbf{J}_m , den geschätzten Motorpositionen $\hat{\boldsymbol{\Theta}}_m$ und den gemessenen Motorpositionen $\boldsymbol{\Theta}_m$ verwendet.

Die unterlagerte Drehmomentenregelung (B.1) und die Reibungskompensation (B.2) ergeben zusammen den neuen Stelleingang

$$\boldsymbol{\tau}_{m,f} = \boldsymbol{\tau}_m + \hat{\boldsymbol{\tau}}_f . \quad (\text{B.3})$$

C Positionsschätzung mit Kalman-Filter

Dieser Abschnitt beschreibt die Berechnung der Kalman-Verstärkung \mathbf{L} in Kapitel 3.2.2.

Für die mathematischen Grundlagen von Kalman-Filter sei an dieser Stelle auf die detaillierte Beschreibung in [62] verwiesen. Die nachfolgende Notation ist an die Nomenklatur der *Control System Toolbox* von Mathworks angelehnt [63].

Ausgehend von der Abtastzeit $T_a = 30$ ms, der Fehlerkovarianzmatrix des Prozessrauschens

$$\mathbf{G} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}, \quad (\text{C.1})$$

der Fehlerkovarianzmatrix des Messrauschens

$$\mathbf{H} = 2\mathbf{E}_{3 \times 3}, \quad (\text{C.2})$$

und

$$\mathbf{Q} = \mathbf{E}_{6 \times 6} \quad (\text{C.3a})$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{E}_{3 \times 3} \quad (\text{C.3b})$$

$$\mathbf{N} = \mathbf{0} \quad (\text{C.3c})$$

folgt die Kalman-Verstärkung

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 0.21634 & -4.9855 \cdot 10^{-17} & -8.4024 \cdot 10^{-18} \\ 6.9611 \cdot 10^{-17} & 0.21634 & -3.0117 \cdot 10^{-17} \\ 2.5832 \cdot 10^{-18} & 7.3993 \cdot 10^{-19} & 0.21634 \\ 0.39652 & 1.45 \cdot 10^{-16} & 1.2969 \cdot 10^{-17} \\ -2.9132 \cdot 10^{-17} & 0.39652 & -1.0477 \cdot 10^{-16} \\ 1.5442 \cdot 10^{-18} & -1.6173 \cdot 10^{-17} & 0.39652 \end{bmatrix}. \quad (\text{C.4})$$

Die detaillierte Berechnung der Kalman-Verstärkung ist in [62] beschrieben.



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.

D Kameraparameter

D.1 Simulation

Parameter	Wert
horizontales Sichtfeld	69°
vertikales Sichtfeld	42°
horizontale Auflösung	1920 px
vertikale Auflösung	1080 px
Bildrate	30 Hz

Tabelle D.1: In der Simulation verwendete Kameraparameter.

Kamera 1 bis 3 verwenden die Parameter in Tabelle D.1. In der Simulation sind die Verzerrungsparameter $\hat{\mathbf{d}} = \mathbf{0}$ gewählt, siehe Kapitel 2.2.2. Das Bildrauschen wird für jeden Farbkanal $c_i \in [0, 1]$ eines Pixels mit einer Standardabweichung von $\sigma_N = 0.007$ berechnet.

D.2 Experimenteller Versuchsaufbau

Parameter	Wert
horizontales Sichtfeld	69°
vertikales Sichtfeld	42°
horizontale Auflösung	640 px
vertikale Auflösung	480 px
Bildrate	30 Hz

Tabelle D.2: Im Laborversuch verwendete Kameraparameter.

Im Versuchsaufbau werden Kamera 1 und 2 mit den Parametern entsprechend Tabelle D.2 verwendet. Bezüglich der Kamerakalibrierung findet die in den Kameras gespeicherte Werkskalibrierung Anwendung. Die im Vergleich zu Anhang D.1 reduzierte Auflösung im Laborversuch liegt an der stabileren Datenübertragung über die aktiven USB-3 Kabel (Länge: 3 m) und an der geringeren Rechenlast bei der Markerdetektion.



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.

E Ablaufsequenzen

E.1 Simulation

E.1.1 Platzierung Segment B

Listing E.1: Ablaufsequenz für Platzierung des Segments B.

```
title = "iiwa action sequence - Segment B"
##### Segment B #####
[[Action]]
type = "TOOLPARAM"
time = "2.0"
mass = "2.84"
cogx = "5.78E-04"
cogy = "-2.83E-05"
cogz = "7.31E-02"

### Move to middle position
[[Action]]
type="JSMOV"
time="1.0"
joints="0.0, 1.629, -0.000, 1.6, -0.000, 0.0, 0.0" # q1, .., q7

[[Action]]
type="JSMOV"
time="1.0"
joints="0, 0.0, 0, -2.0, 0, 1.0, 0" # q1, .., q7

[[Action]]
type="JSMOV"
time="1.0"
joints="0, -1.6, 0, -2.0, 0, 1.0, 0" # q1, .., q7

[[Action]]
type="JSMOV"
time="1.0"
joints="0, -1.6, 0, -1.57, 0, 0.0, 0" # q1, .., q7

# CP/Ausgangsposition
```

```
[[Action]]
type="JSMOV"
time="0.8"
joints="0.0, -1.6, 0.0, -1.57, 0.0, 0.0, 0.0"

### segment B
[[Action]]
type="JSMOV"
time="4.0"
joints="0.04542327942147395, -1.4061128827366434, -1.1723955140041653e
↪ -13, -1.340724334885106, 0.0, 0.06538854785154136,
↪ -0.045423279421573426"

[[Action]]
type="NULLSP"
time="0.1"
joints="0.04542327942147395, -1.4061128827366434, -1.1723955140041653e
↪ -13, -1.340724334885106, 0.0, 0.06538854785154136,
↪ -0.045423279421573426"

[[Action]]
type="TSMOVREL"
time="4.0"
position="0.05, 0.0, -0.05" # x, y, z
orientation ="1.0, 0.0, 0.0, 0.0" # w, x, y, z

## place with bicone offset
[[Action]]
type="STOP"
time="0.5"

# place final
[[Action]]
type="VISFB_OFFSET_PLACE"
time="4.0"
update_interval="0.5"
offset="-0.00, 0.03, 0.000"
orientationoffset="1.0, 0.0, 0.0, 0.0"

[[Action]]
type="STOP"
time="2.0"

[[Action]]
type="VISFB_OFFSET_PLACE"
```

```

time="2.0"
update_interval="0.2"
offset="-0.001, -0.00, 0.000"
orientationoffset="1.0, 0.0, 0.0, 0.0"

# release segment
[[Action]]
type="STOP"
time="2.0"

```

E.2 Experimenteller Versuchsaufbau

E.2.1 Aufnahme Segment A2

Listing E.2: Ablaufsequenz für Segmentaufnahme.

```

title = "iiwa action sequence - Laboraufbau Segment A2 Pickup"
[[Action]]
type = "TOOLPARAM"
time = "0.1"
mass = "1.42" #"1.4"
cogx = "-0.0077"
cogy = "0.0000"
cogz = "-0.0"

[[Action]]
type="ADSVAC"
time="2.0"
state="OFF"

[[Action]]
type="JSMOV"
time="10.0"
joints="1.3, 1.629, -0.000, 1.2, -0.000, -0.4, -1.800" # q1, .., q7

[[Action]]
type="STOP"
time="1.0"

[[Action]]
type="NULLSP"
time="0.1"
joints="1.3, 1.629, -0.000, 1.2, -0.000, -0.4, -1.800" # q1, .., q7

```

```
[[Action]]
type = "STOP"
time = "1.0"

[[Action]]
type="TSMOVREL"
time="5.0"
position="0.0, 0.0, -0.1" # x, y, z
orientation = "1.0, 0.0, 0.0, 0.0" # w, x, y, z

[[Action]]
type = "STOP"
time = "1.0"

### pick up
[[Action]]
type="VISFB_OFFSET_PICKUP"
time="15.0"
update_interval="5.0"
offset="0, 0, 0.05"

[[Action]]
type="ADSVAC"
time="2.0"
state="ON"

[[Action]]
type="VISFB_OFFSET_PICKUP"
time="10.0"
update_interval="5.0"
offset="0, 0, -0.015"

[[Action]]
type = "TOOLPARAM"
time = "0.1"
mass = "2.95" #"1.4"
cogx = "-0.002"
cogy = "0"
cogz = "0"

[[Action]]
type="TSMOVREL"
time="10.0"
position="0.0, 0.0, 0.1" # x, y, z
orientation = "1.0, 0.0, 0.0, 0.0" # w, x, y, z
```

```

### Move to middle position
[[Action]]
type="JSMOV"
time="10.0"
joints="0.0, 1.629, -0.000, 1.6, -0.000, 0.0, 0.0" # q1, .., q7

[[Action]]
type = "STOP"
time = "1.0"

```

E.2.2 Platzierung Segment B

Listing E.3: Ablaufsequenz für Platzierung des Segments B.

```

title = "iiwa action sequence - Laboraufbau Segment B"
##### Segment B #####
[[Action]]
type = "TOOLPARAM"
time = "0.1"
mass = "2.95" #"1.4"
cogx = "-0.002"
cogy = "0"
cogz = "0"

[[Action]]
type="ADSVTP"
time="1.0"
GR1="ON"
GR2="OFF"
GR3="OFF"
GR4="OFF"
GR5="OFF"
GR6="OFF"

### segment B
[[Action]]
type="JSMOV"
time="10.0"
joints="0.04542327942147395, -1.4061128827366434, -1.1723955140041653e
    ↪ -13, -1.340724334885106, 0.0, 0.06538854785154136,
    ↪ -0.045423279421573426"

[[Action]]
type="STOP"

```

```
time="1.0"

[[Action]]
type="NULLSP"
time="1.0"
joints="0.04542327942147395, -1.4061128827366434, -1.1723955140041653e
  ↪ -13, -1.340724334885106, 0.0, 0.06538854785154136,
  ↪ -0.045423279421573426"

[[Action]]
type="TSMOVREL"
time="10.0"
position="0.0, 0.0, -0.05" # x, y, z
orientation = "1.0, 0.0, 0.0, 0.0" # w, x, y, z

## place with bicone offset
[[Action]]
type="STOP"
time="2"

[[Action]]
type="VISFB_OFFSET_PLACE"
time="15.0"
update_interval="5.0"
offset="-0.00, 0.01, 0.02"
orientationoffset="1.0, 0.0, 0.0, 0.0"

[[Action]]
type="STOP"
time="2.0"

# place final
[[Action]]
type="VISFB_OFFSET_PLACE"
time="10.0"
update_interval="5.0"
offset="0.004448512688899695, 0.0011389680408926295,
  ↪ -0.007226099147891745"
orientationoffset="0.9999622642545075, -0.0032519380541327463,
  ↪ -0.008052549749984095, -0.00022673423766898652"

[[Action]]
type="STOP"
time="2.0"
```

```

[[Action]]
type="ADSVTP"
time="1.0"
GR1="OFF"
GR2="OFF"
GR3="OFF"
GR4="OFF"
GR5="OFF"
GR6="OFF"

[[Action]]
type="STOP"
time="2.0"

[[Action]]
type="ADSVAC"
time="5.0"
state="OFF"

##### Segment B #####
[[Action]]
type = "TOOLPARAM"
time = "0.1"
mass = "1.42" #"1.4"
cogx = "-0.0077"
cogy = "0.0000"
cogz = "-0.0"

# release segment
[[Action]]
type="STOP"
time="2.0"

[[Action]]
type="JSMOV"
time="10.0"
joints="0.04542327942147395, -1.4061128827366434, -1.1723955140041653e
↪ -13, -1.340724334885106, 0.0, 0.06538854785154136,
↪ -0.045423279421573426"

# CP/Ausgangsposition
[[Action]]
type="JSMOV"
time="10"
joints="0.0, -1.6, 0.0, -1.57, 0.0, 0.0, 0.0"

```

```
[[Action]]  
type="ADSVAC"  
time="1.0"  
state="ON"
```

```
[[Action]]  
type="STOP"  
time="5.0"
```

F Ergebnisse

F.1 Simulation

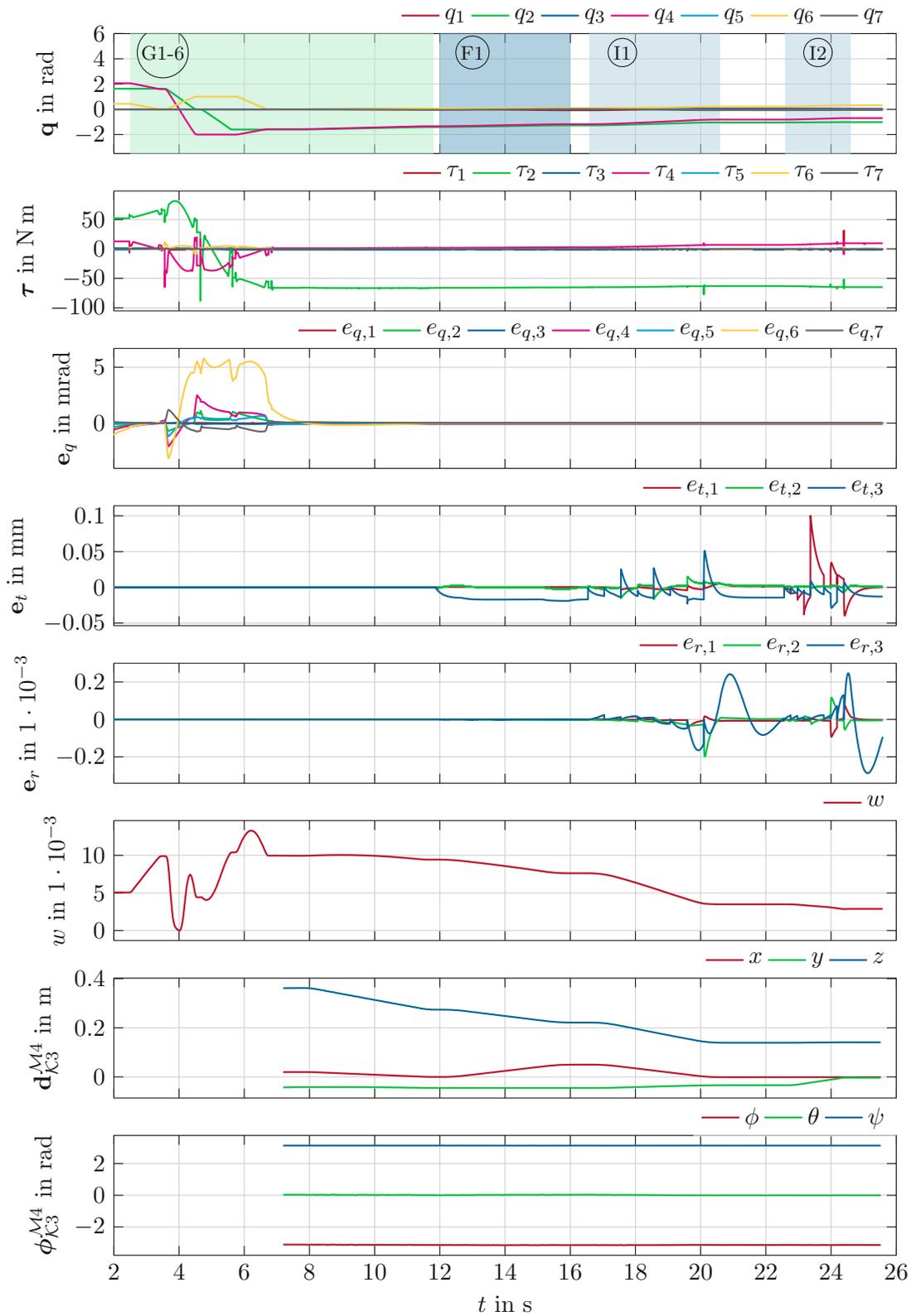


Abbildung F.1: Abbildung der Simulationsergebnisse aus der Platzierung des Tübbings B.

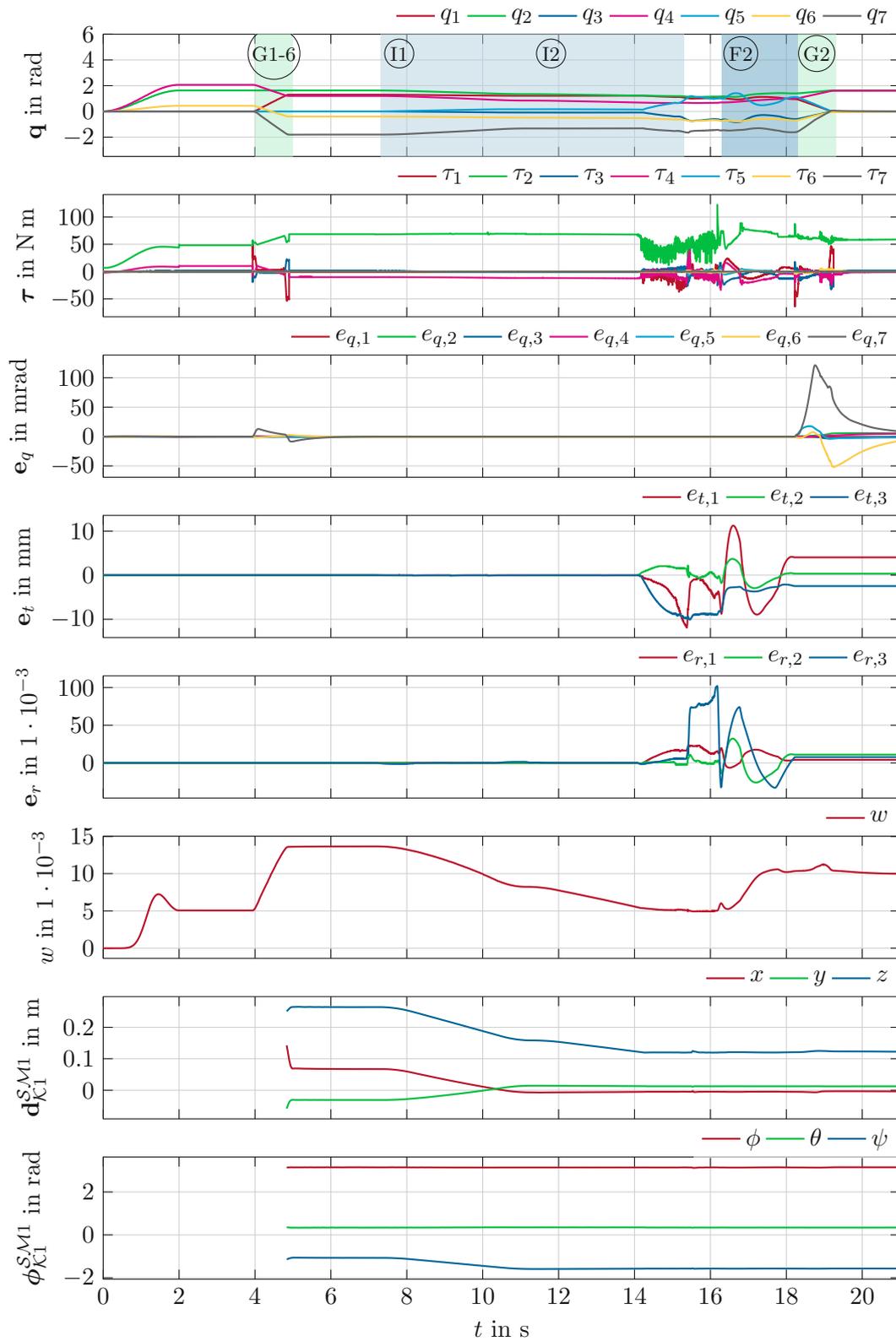


Abbildung F.2: Abbildung der Simulationsergebnisse aus der Aufnahme des Tübbings A2.

F.2 Experimenteller Versuchsaufbau

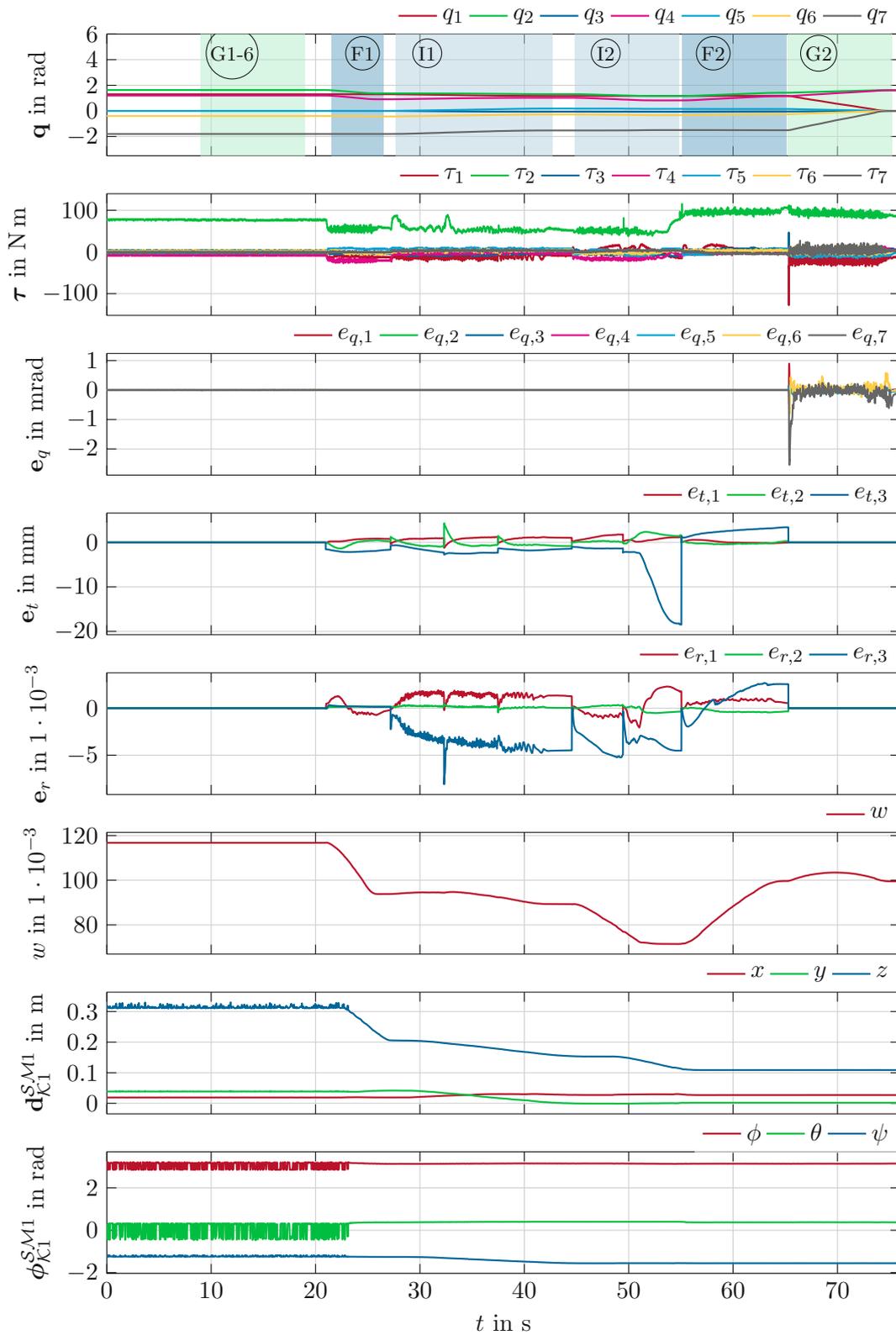


Abbildung F.3: Abbildung der Versuchsergebnisse aus der Aufnahme des Tübbings A2.

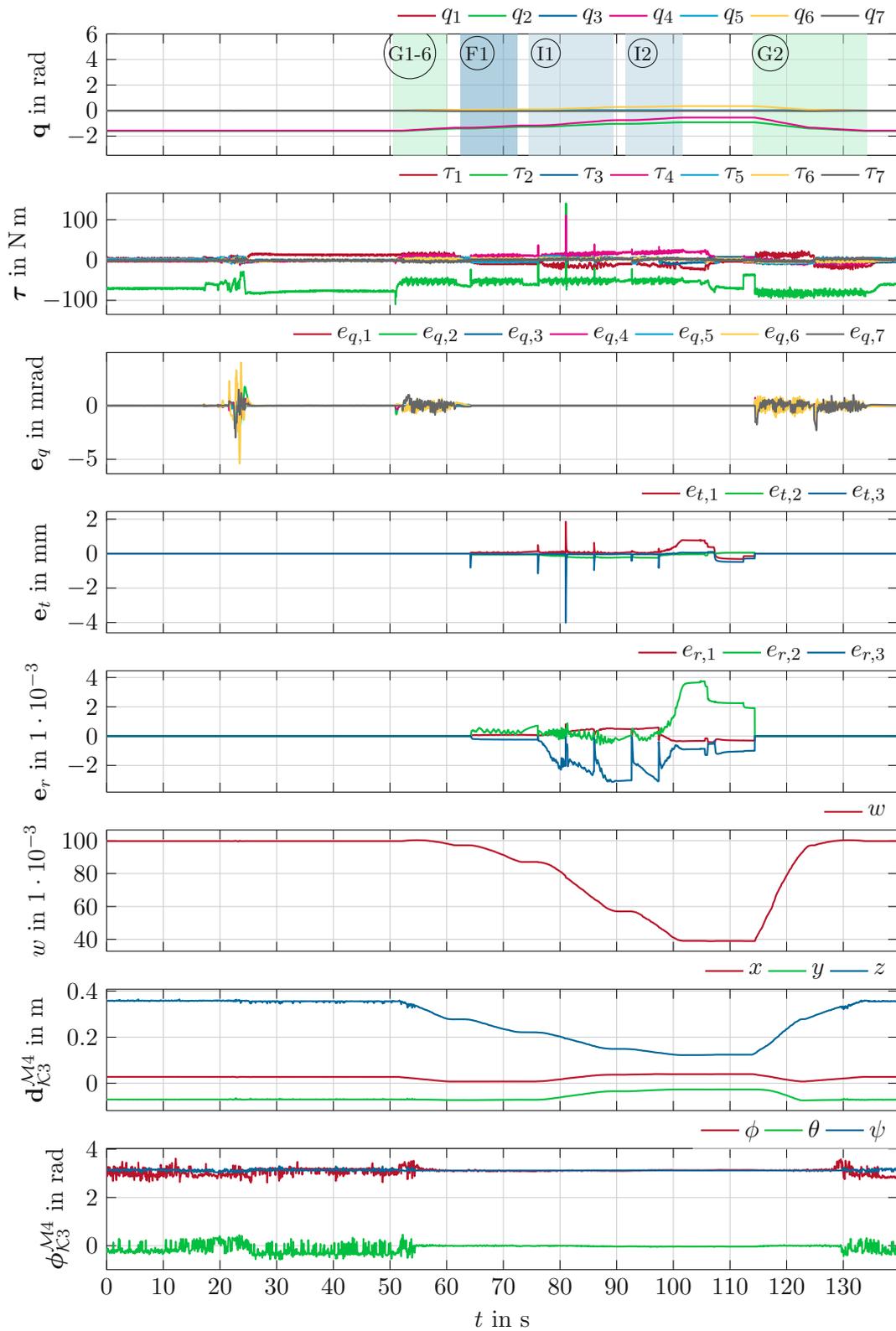


Abbildung F.4: Abbildung der Versuchsergebnisse aus der Platzierung des Tübbings B.

Literatur

- [1] B. Fröndhoff, A. Höpner und K. Knitterscheidt. „Zukunft der Industrie: Kampf um die Steuerung der digitalen Fabrik“, Handelsblatt. (2019), Adresse: <https://www.handelsblatt.com/technik/it-internet/automatisierung-zukunft-der-industrie-kampf-um-die-steuerung-der-digitalen-fabrik/25312260.html?ticket=ST-6207032-WgMANqPa94b46AAa6Cwe-ap6> (besucht am 04.07.2021).
- [2] M. Chui, J. Manyika und M. Miremadi. „Where machines could replace humans and where they can't (yet)“. (2016), Adresse: <https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/where-machines-could-replace-humans-and-where-they-cant-yet> (besucht am 04.07.2021).
- [3] J. Tilley. „Automation, robotics, and the factory of the future“. (2017), Adresse: <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/automation-robotics-and-the-factory-of-the-future> (besucht am 04.07.2021).
- [4] Q. Chen, B. García de Soto und B. T. Adey, „Construction automation: Research areas, industry concerns and suggestions for advancement“, *Automation in Construction*, Jg. 94, S. 22–38, 2018. Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580517311068> (besucht am 04.07.2021).
- [5] T. Bock, „The future of construction automation: Technological disruption and the upcoming ubiquity of robotics“, *Automation in Construction*, Jg. 59, S. 113–121, 2015. Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092658051500165X> (besucht am 04.07.2021).
- [6] A. Benardos, C. Paraskevopoulou und M. Diederichs, „Assessing and benchmarking the construction cost of tunnels“, in *Proceedings of the 66th Canadian Geotechnical Conference, GeoMontreal on Geoscience for Sustainability*, Bd. 29, Montreal, Canada, Sep. 2013, S. -.
- [7] D. D. Genske, *Ingenieurgeologie: Grundlagen und Anwendung*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2015.
- [8] B. Maidl, M. Herrenknecht, U. Maidl und G. Wehrmeyer, *Maschinelles Tunnelbau Im Schildvortrieb*. Berlin, Germany: Wilhelm Ernst & Sohn Verlag, 2011.
- [9] G. Girmscheid, *Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau*. Berlin, Germany: Ernst Sohn, 2008.
- [10] W. Leitner, *Baubetriebliche Modellierung der Prozesse maschineller Tunnelvortriebe im Festgestein: von der Penetration zur Vortriebsgeschwindigkeit*. Innsbruck, Austria: Innsbruck Univ. Press, 2004.

- [11] Deutsche Bahn AG, *Richtlinie Eisenbahntunnel planen, bauen und in Stand halten*, Frankfurt am Main, Germany, 1998.
- [12] M. Wada, „Automatic segment erection system for shield tunnels“, *Advanced robotics*, Jg. 5, Nr. 4, S. 429–443, 1990.
- [13] H. Ohno, K. Kazama, A. Higashide und A. Tomioka, „Fully Automated System for Shield Tunnelling under Integrated Control“, in *Proceedings of the 13th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Tokyo, Japan: International Association for Automation und Robotics in Construction (IAARC), Juni 1996, S. 779–788.
- [14] Y. Kimura, T. Saito und T. Sakurada, „Development of a Fully Automatic Robotic System for Small Diameter Tunnel Construction: "Development of the ACE MOLE 1200-M2 Construction Method"“, in *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Brighton, UK: International Association for Automation und Robotics in Construction (IAARC), Mai 1994, S. 441–448.
- [15] J. Braaksma, B. Klaassens, R. Babuška und C. de Keizer, „Hybrid control design for a robot manipulator in a shield tunneling machine“, in *Proceedings of the first International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, Dordrecht, Netherlands: Springer-Verlag, Aug. 2004, S. 143–150.
- [16] P. H. Lin, H. Tserng und C. C. Lin, „Automated construction of the Paghuashan tunnel for Taiwan High Speed Rail (THSR) project“, *Automation in construction*, Jg. 15, Nr. 5, S. 627–639, 2006.
- [17] C. Feng, Y. Xiao, A. Willette, W. McGee und V. R. Kamat, „Vision guided autonomous robotic assembly and as-built scanning on unstructured construction sites“, *Automation in construction*, Jg. 59, S. 128–138, 2015.
- [18] R. B. Rusu und S. Cousins, „3D is here: Point Cloud Library (PCL)“, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, China: IEEE, Mai 2011, S. 1–4.
- [19] M. Dawod und S. Hanna, „BIM-assisted object recognition for the on-site autonomous robotic assembly of discrete structures“, *Construction Robotics*, Jg. 3, Nr. 1-4, S. 69–81, 2019.
- [20] Autodesk. „Bauplanung und -ausführung mit BIM - Building Information Modeling“, Autodesk GmbH. (2021), Adresse: <https://www.autodesk.de/solutions/bim> (besucht am 05.07.2021).
- [21] B. T. PUBLICS. „1. FR3057014 - DISPOSITIF ET PROCEDE DE PRISE ET DE POSE AUTOMATISEE D'UN VOUSOIR POUR FORMER UN REVETEMENT D'UN TUNNEL“, WIPO IP Portal. (2016), Adresse: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=FR214449890&tab=NATIONALBIBLIO> (besucht am 06.07.2021).

- [22] —, „1. WO2018065726 - A DEVICE AND METHOD FOR THE AUTOMATED PICKING UP AND PLACING A SEGMENT FOR FORMING A TUNNEL LINING“, WIPO IP Portal. (2018), Adresse: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=W02018065726> (besucht am 05.07.2021).
- [23] B. T. Society. „A Contractor View of Mechanised Tunnelling Evolution and Innovations“, Youtube. (2019), Adresse: <https://www.youtube.com/watch?v=aIh9hXoZmEQ> (besucht am 05.07.2021).
- [24] B. Siciliano, *Robotics : modelling, planning and control*, Ser. Advanced textbooks in control and signal processing. London, UK: Springer-Verlag, 2010.
- [25] M. Shimizu, H. Kakuya, W.-K. Yoon, K. Kitagaki und K. Kosuge, „Analytical Inverse Kinematic Computation for 7-DOF Redundant Manipulators With Joint Limits and Its Application to Redundancy Resolution“, *IEEE transactions on robotics*, Jg. 24, Nr. 5, S. 1131–1142, 2008.
- [26] B. Siciliano und O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2008.
- [27] M. W. Spong, S. Hutchinson und M. Vidyasagar, *Robot modeling and control*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2006.
- [28] C. Ott, *Cartesian impedance control of redundant and flexible joint robots*, Ser. Springer tracts in advanced robotics. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2008.
- [29] O. Schreer, *Stereoanalyse und Bildsynthese*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2005.
- [30] G. Bradski, „The OpenCV Library“, *Dr. Dobb's Journal of Software Tools*, 2000.
- [31] J. Weng, P. Cohen und M. Herniou, „Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation“, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Jg. 14, Nr. 10, S. 965–980, 1992.
- [32] R. Szeliski, *Computer vision : algorithms and applications*, Ser. Texts in computer science. London, UK: Springer-Verlag, 2011.
- [33] Z. Zhang, „A flexible new technique for camera calibration“, *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Jg. 22, Nr. 11, S. 1330–1334, 2000.
- [34] K. Kanatani, Y. Sugaya und Y. Kanazawa, *Guide to 3D Vision Computation: Geometric Analysis and Implementation*, Ser. Advances in Computer Vision and Pattern Recognition. Cham, Switzerland: Springer-Verlag, 2016.
- [35] S. Benhimane und E. Malis, „Homography-based 2d visual tracking and servoing“, *The International Journal of Robotics Research*, Jg. 26, Nr. 7, S. 661–676, 2007.
- [36] T. Collins und A. Bartoli, „Infinitesimal plane-based pose estimation“, *International journal of computer vision*, Jg. 109, Nr. 3, S. 252–286, 2014.
- [37] P. Sturm, „Algorithms for plane-based pose estimation“, in *Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.*, Bd. 1, Hilton Head Island, SC: IEEE, Juni 2000, S. 706–711.

- [38] F. J. Romero-Ramirez, R. Muñoz-Salinas und R. Medina-Carnicer, „Speeded up detection of squared fiducial markers“, *Image and vision Computing*, Jg. 76, S. 38–47, 2018.
- [39] S. Garrido-Jurado, R. Muñoz-Salinas, F. Madrid-Cüvas und R. Medina-Carnicer, „Generation of fiducial marker dictionaries using Mixed Integer Linear Programming“, *Pattern recognition*, Jg. 51, S. 481–491, 2016.
- [40] K. Shoemake, „Animating Rotation with Quaternion Curves“, New York: Association for Computing Machinery, Juli 1985, S. 245–254.
- [41] L. A. Piegl, L. A. Piegl, K. Rajab, K. Rajab, V. Smarodzinana und V. Smarodzinana, „Curve interpolation with directional constraints for engineering design“, *Engineering with computers*, Jg. 24, Nr. 1, S. 79–85, 2008.
- [42] C. De Boor, *A practical guide to splines*, Ser. Applied mathematical sciences. New York: Springer-Verlag, 1978.
- [43] M. Neubauer und A. Müller, „Smooth orientation path planning with quaternions using B-splines“, in *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, Hamburg, Germany, Sep. 2015, S. 2087–2092.
- [44] J. Kramer und A.-M. von Pippich, *Von den natürlichen Zahlen zu den Quaternionen: Basiswissen Zahlbereiche und Algebra*. Wiesbaden, Germany: Springer-Verlag, 2013.
- [45] J. Vince, *Rotation Transforms for Computer Graphics*. London, UK: Springer-Verlag, 2011.
- [46] —, *Imaginary Mathematics for Computer Science*. Cham, Switzerland: Springer-Verlag, 2018.
- [47] E. B. Dam, M. Koch und M. Lillholm, „Quaternions, interpolation and animation“, University of Copenhagen, Techn. Ber., 1998.
- [48] R. Kelly, V. Santibáñez und A. Loría, *Control of robot manipulators in joint space*, Ser. Advanced textbooks in control and signal processing. London, UK: Springer-Verlag, 2005.
- [49] J. Yuan, „Closed-loop manipulator control using quaternion feedback“, *IEEE Journal on Robotics and Automation*, Jg. 4, Nr. 4, S. 434–440, 1988.
- [50] A. Dietrich, C. Ott und A. Albu-Schäffer, „An overview of null space projections for redundant, torque-controlled robots“, *The International Journal of Robotics Research*, Jg. 34, Nr. 11, S. 1385–1400, 2015.
- [51] N. Koenig und A. Howard, „Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator“, in *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Bd. 3, Sendai, Japan, Sep. 2004, 2149–2154 vol.3.
- [52] M.-J. Kim, M.-S. Kim und S. Y. Shin, „A general construction scheme for unit quaternion curves with simple high order derivatives“, in *Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, New York, Sep. 1995, S. 369–376.

- [53] L. Le-Tien, A. Albu-Schäffer, K. Janschek und G. Hirzinger, „Entkopplungsregelung und Reibungskompensation für einen Roboter mit elastischen verkoppelten Gelenken“, *Automatisierungstechnik at*, Jg. 58, Nr. 9, S. 499–511, 2010.
- [54] B. A. G. bibinitperiod C. KG. „TwinCAT 3 Produktübersicht - Philosophie“, Beckhoff Automation GmbH & Co. KG. (2021), Adresse: https://infosys.beckhoff.com/index.php?content=../content/1031/tcadscommon/html/tcadscommon_introads.htm&id=1593850731570799832 (besucht am 06.07.2021).
- [55] —, „Einführung ADS“, Beckhoff Automation GmbH & Co. KG. (2021), Adresse: https://infosys.beckhoff.com/index.php?content=../content/1031/tcadscommon/html/tcadscommon_introads.htm&id=1593850731570799832 (besucht am 06.07.2021).
- [56] C. Hartl-Nesic, T. Glück und A. Kugi, „Surface-Based Path Following Control: Application of Curved Tapes on 3-D Objects“, *IEEE Transactions on Robotics*, Jg. 37, Nr. 2, S. 615–626, 2021.
- [57] C. Hartl-Nesic, *Surface-based path following control on freeform 3D objects*, Ser. Modellierung und Regelung komplexer dynamischer Systeme. Shaker Verlag, 2020.
- [58] *Intel RealSense D400 Series Product Family Datasheet*, Revision 005, Intel Corporation, Jan. 2020.
- [59] N. Dantam, „Quaternion computation“, *Georgia Institute of Technology, Institute for Robotics and Intelligent Machines*, 2014.
- [60] B. Graf, „Quaternions and dynamics“, *arXiv: Dynamical Systems*, 2008.
- [61] F. L. Markley, Y. Cheng, J. L. Crassidis und Y. Oshman, „Averaging quaternions“, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Jg. 30, Nr. 4, S. 1193–1197, 2007.
- [62] D. Simon, *Optimal State Estimation*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2006.
- [63] Mathworks. „Design Kalman filter for state estimation“, Mathworks. (2021), Adresse: <https://de.mathworks.com/help/control/ref/ss.kalman.html> (besucht am 06.07.2021).



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.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit gemäß dem Code of Conduct – Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis (in der aktuellen Fassung des jeweiligen Mitteilungsblattes der TU Wien), insbesondere ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel, angefertigt wurde. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet. Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder in ähnlicher Form in anderen Prüfungsverfahren vorgelegt.

Wien, im Oktober 2021

Gerald Ebmer