



PARAMETERANALYSE EINES REDUNDANTEN ROBOTERS MIT PIVOTPUNKT-RESTRIKTION



Jessica Hutzl

Parameteranalyse eines redundanten
Roboters mit Pivotpunkt-Restriktion

Parameteranalyse eines redundanten Roboters mit Pivotpunkt-Restriktion

von
Jessica Hutzl

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie
KIT-Fakultät für Informatik

Tag der mündlichen Prüfung: 23. Januar 2017
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Heinz Wörn
Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Dillmann

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe
KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.
Reprint using the book cover is not allowed.
www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed
under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2017 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISBN 978-3-7315-0704-8

DOI 10.5445/KSP/1000072643

PARAMETERANALYSE EINES REDUNDANTEN ROBOTERS
MIT PIVOTPUNKT-RESTRIKTION

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

der KIT-Fakultät für Informatik
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

von

Jessica Hutzl

aus Heidelberg

Tag der mündlichen Prüfung: 23.01.2017

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Heinz Wörn

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Dillmann

Kurzfassung

Mit dem zunehmenden Einsatz von unterstützenden Robotern im Operationssaal rückt die Herausforderung in den Fokus, dass der Chirurg mit einem System zusammenarbeiten soll, dessen Limitationen er kaum kennt. Der Bewegungsraum in der minimal-invasiven Chirurgie wird dabei durch Trokare (Pivotpunkte) und den Arbeitsbereich des Roboters eingeschränkt. Der Einsatz eines redundanten Roboters soll im Operationsraum mehr Beweglichkeit und Flexibilität geschaffen. Dabei müssen die roboterspezifischen Parameter an die Situation angepasst bzw. für den jeweiligen Operationstyp gefunden werden, um einen technisch guten Operationsverlauf zu gewährleisten.

Die Herausforderung besteht darin, den bestmöglichen Parametersatz zur Erfüllung der nicht näher bekannten Aufgabe (abzufahrenden Trajektorie) zu finden. Es wird ein Konzept erarbeitet, das die Roboterperformanz eines redundanten Roboters mit Pivotpunkt-Restriktion bewertet.

Um den Roboter an seine Aufgabe und damit an sein Arbeitsgebiet anzupassen, muss dieses Gebiet zunächst bekannt sein. Dazu wird die Zielregion definiert, welche aus markerbasierten Trackingdaten hervorgeht. Zur Analyse und zur Evaluation der Roboterperformanz müssen die als Positionswerte vorhandenen Trackingdaten generalisiert werden. Durch die Unterteilung einer Operation in Phasen und Schritte können phasenbezogene Trajektorien und damit auch phasenbezogene Punktwolken erstellt werden. Ein Algorithmus bildet aus den Trajektorien eine strukturierte Punktwolke, die den Arbeitsbereich im Trokarkoordinatensystem beschreibt. Diese Punktwolke besitzt eine Gitterstruktur, welche durch die einstellbare Auflösung eng- oder grobmaschiger sein kann. Außerdem werden neben der Gitterstruktur weitere Methoden vorgestellt, mit denen die Zielregion abgebildet werden kann. Auf Basis von Clusterverfahren wird ein Markov Modell aufgestellt, dessen Übergangsmatrizen die Bewegungen einer Operationsphase repräsentieren. In den Unterabschnitten werden

verschiedene Verfahren beschrieben, welche eine Verallgemeinerung der Trajektorien bewirken. Eine Clusterkette kann mithilfe der Übergangswahrscheinlichkeiten von einem zu den anderen Clustern gebildet werden. Die Approximation einer Trajektorie durch das Verbinden der Clusterzentren kann durch die Richtungsprädikation oder unter Nutzung der Kovarianzmatrix der einzelnen Cluster verbessert werden. Die berechnete strukturierte Zielpunktswolke wird der Analyse zur Beurteilung der Roboterperformanz übergeben.

Dieser Arbeit liegt ein redundanter Roboter mit serieller Kinematik zugrunde. Für die Parameteranalyse wird die inverse Kinematik auf analytischem Weg berechnet. Es wurden folgende Parameter identifiziert, welche sich auf die Roboterperformanz auswirken: Roboterkonfigurationstyp, Orientierung des Werkzeugs, Nullraumparameter, Relation zwischen Roboterbasis und Pivotpunkt. Zusammen bilden sie den Parametersatz, welcher optimal an die Operation und ihre Phasen angepasst werden soll. Durch die Redundanz ergeben sich mehrere Gelenkwinkelstellungen, um dieselbe Roboterendeffektorpose zu erreichen. Gerade beim Pivotpunkt-Szenario darf der Parametersatz nur unter bestimmten Bedingungen verändert werden. So kann es sein, dass zu Beginn ein ungünstiger Parameter gesetzt wurde, welcher eine später gewünschte Bewegung verhindert. Um dem entgegenzuwirken, wird vorab eine Parameteranalyse durchgeführt.

Für die Bewertung der Roboterperformanz werden drei Indikatoren vorgeschlagen, welche den Erfolg kennzeichnen. Die Erreichbarkeit, die Gelenkwinkelbewegung der einzelnen Gelenke und die Gefahr einer Singularität dienen als Performanzkriterien. Die Berechnung der Indikatoren wird auf einzelne Punktwolken (Phasen) angewendet.

Aufgrund der unterschiedlichen Zielregionen ergeben sich daraus phasenspezifische Optima. Es muss ein Parametersatz gefunden werden, der für alle Operationsphasen ein gutes Ergebnis liefert. Nur der Nullraumparameter darf sich dabei als einziger Parameter während der Operation an das Arbeitsgebiet anpassen, die restlichen Parameter müssen konstant bleiben. Bei der Verknüpfung der einzelnen Phasen zu einer Operation liegt der Fokus auf der Vergleichbarkeit der Güte zwischen unterschiedlichen Punktwolken und Parametersätzen. Es werden drei Methoden zur Verbindung von mehreren Phasen eines Indikators vorgestellt. Die Nutzung der jeweiligen Methode wird passend zu der gewünschten Aussagekraft des Indikators gewählt.

Zur Evaluation des Konzepts wurden 20 Operationen am Phantom aufgezeichnet und im Anschluss annotiert. Die daraus entstandenen Trajektorien der Instrumente werden als Wissensbasis der Analyse genutzt und die Zielregion wird mithilfe eines Gitters als gerasterte Punktwolke abgebildet. Auf Basis der Zielregion werden Datensätze erstellt, welche die Güte einzelner Parametersätze illustrieren. Die Unterschiede zwischen Parametersätzen und einzelnen Parametern werden in Bezug auf die Indikatoren deutlich. Um die Methodik zu validieren, werden verschiedene Parametersätze auf fünf Operationen angewendet, welche in einer zweiten Versuchsreihe entstanden sind. Mit der Datengrundlage der ersten Versuchsreihe wird eine Parameteranalyse durchgeführt, wobei gute und schlechte Parametersätze aufgezeigt werden. Eine Aussage über die tatsächliche Güte wird durch die zweite Versuchsreihe getroffen.

Danksagung

Diese Arbeit wurde am Institut für Anthropomatik und Robotik - Intelligente Prozessautomation und Robotik (IAR-IPR) der Fakultät Informatik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) erstellt. Sie wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs/Transregio 125 *Cognition-Guided Surgery* im Plattformprojekt Robotik von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

Während meiner Zeit am IAR-IPR wurde ich auf verschiedenste Art unterstützt und ich möchte an dieser Stelle Danke sagen.

Meinem Doktorvater Prof. Heinz Wörn möchte ich dafür danken, dass er mir die Möglichkeit bot, an seinem Institut zu promovieren, sowie für das Vertrauen, welches er mir in der Durchführung meiner Arbeiten entgegenbrachte. Für die Übernahme des Koreferats danke ich Prof. Rüdiger Dillmann vielmals.

Ich danke meinen Kolleginnen und Kollegen für die vielfältigen fachlichen Gespräche und das gute Arbeitsklima: Wir hatten eine tolle gemeinsame Zeit, die ich als Erfahrung nicht missen möchte.

Besonders möchte ich Dr. Jörg Raczkowski hervorheben, welcher stets an der fachlichen und persönlichen Entwicklung seiner Schäfchen interessiert ist: Ich bin dir für das Mentoring sehr dankbar.

Für das Korrekturlesen und Engagement möchte ich mich herzlich bei meiner Schwester Selina, meinen Freundinnen Lisa und Jara, meinem Vater Albert und seiner Freundin Monika sowie meinen Arbeitskollegen David und Jan bedanken. Mein letzter Dank richtet sich an meinem Freund Martin, der stets an meiner Seite war, als ich einen Rat benötigte.

Karlsruhe, den 10. August 2017

Jessica Hutzl

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Danksagung	v
1 Einleitung	1
1.1 Einführung in das interdisziplinäre Gebiet	1
1.1.1 Einführung in die minimal-invasive Chirurgie	1
1.1.2 Technische Aspekte in der Roboter-assistierten Chirurgie	7
1.2 Motivation - Ziele der Arbeit	9
1.3 Kapitelüberblick	11
2 Grundlagen	13
2.1 Transformationen im Raum	13
2.2 Denavit-Hartenberg-Konvention	16
2.3 Fulcrum-Effekt	18
3 Stand der Forschung	21
3.1 Vorangegangene Arbeiten	21
3.1.1 Positionierung der Trokare und des Roboters in der Medizin	21
3.1.2 Forschungsplattformen	25
3.1.3 Ein redundanter Roboter und sein Arbeitsraum	26
3.2 Neuerung	29
4 Patienten- und Operationsmodell	33
4.1 Patientenmodell	33
4.1.1 Modellanpassung durch anatomische Landmarken	35
4.1.2 Registrierung im Operationssaal	36

4.2	Operationsmodell	40
4.2.1	Beschreibung der Zielregion durch eine ummantelnde Hülle . . .	40
4.2.2	Beschreibung der Zielregion durch Clustering	44
	Modellbildung	46
	Erstellen einer verallgemeinerten Trajektorie	47
	Richtungsprädiktion	49
4.2.3	Semantisches Modell der Operation	52
	Kurzbeschreibung der Rektumresektion	53
	Medizinisches Phasenmodell	54
5	Robotermodell - Die Parameter	57
5.1	Aufbau des Roboters und der Umgebung	57
5.1.1	Laparoskopische Instrumente	61
5.2	Beschreibung der Koordinatensysteme	63
5.3	Arbeitsraumoptimierungsparameter	66
5.3.1	Die Position des Pivotpunkts	67
5.3.2	Der Roboterkonfigurationstyp	68
5.3.3	Der Nullraumparameter	70
5.3.4	Die Orientierung am Roboterendeffektor	72
5.3.5	Zusammenfassung der Arbeitsraumoptimierungsparameter . . .	73
5.4	Ableitung von Kriterien für die Roboterperformanz	74
5.4.1	Die Erreichbarkeit	74
5.4.2	Die Gelenkbewegung	76
5.4.3	Die Singularität	79
5.4.4	Zusammenfassung der Indikatoren	82
6	Phasenbezogene Roboterparameteranalyse	83
6.1	Normierung der Indikatoren zur Vergleichbarkeit	85
6.1.1	Umgang mit dem Erreichbarkeitsindex	85
6.1.2	Umgang mit dem Gelenkbewegungsindex	87
6.1.3	Umgang mit dem Singularitätsindex	88
6.2	Methoden zur Verknüpfung der Phasen	89
6.2.1	Visualisierung der Datenmatrix	89
6.2.2	Verknüpfung der Phasen	90
6.3	Finden des Optimums	93
6.3.1	Programmablauf	93
6.3.2	Einsatz der Methoden	95

6.3.3	Sortieren und Maximieren der Güte	96
6.3.4	Auswertung der Indikatoren	97
7	Evaluation	99
7.1	Datengewinnung	99
7.1.1	Erste Versuchsreihe - handgeführte Versuche	101
7.1.2	Zweite Versuchsreihe - Roboter-assistierte Versuche	102
7.1.3	Versuche in der Simulationsumgebung	102
7.2	Ergebnisse der Versuchsreihen	103
7.2.1	Aufbereitung der Daten	103
7.2.2	Erfassung der Zielregion	104
7.2.3	Untersuchungen zur Roboterperformanz	106
7.2.4	Wahl der Roboterparameter	111
7.3	Diskussion der Ergebnisse	119
8	Zusammenfassung	121
9	Ausblick	125
	Literatur	127
	Abbildungsverzeichnis	142
	Tabellenverzeichnis	143
	Anhang	145
A	Mathematisches Modell - kinematische Kette	145
B	Ergebnisse im Detail	149
B.1	Zielregion	149
B.2	Parameterwahl	152
B.2.1	Roboterkonfigurationstypen	152
B.2.2	Orientierung am Roboterendeffektor	155
B.2.3	Nullraumparameter	158
B.2.4	Bewertung einzelner Phasen der ersten Versuchsreihe	162
B.2.5	Vergleich der ersten und zweiten Versuchsreihe	164

KAPITEL 1

Einleitung

Zu Beginn dieser Arbeit wird eine Einführung in das Gebiet der minimal-invasiven Roboter-assistierten Chirurgie gegeben. Daraus folgend ergeben sich die Motivation und die Ziele der Arbeit, welche in Kapitel 1.2 aufgezeigt werden. Der Inhalt der folgenden Kapitel wird abschließend in Kapitel 1.3 erläutert.

1.1 Einführung in das interdisziplinäre Gebiet

Das Arbeitsfeld in der minimal-invasiven Chirurgie wird zum besseren Verständnis beschrieben und die technischen Aspekte hervorgehoben.

1.1.1 Einführung in die minimal-invasive Chirurgie

Die minimal-invasive Chirurgie wird seit den 1980er Jahren in Kliniken angewandt, wobei erste Ansätze bis in die Antike zurückreichen. Die Anzahl an Operationen, die minimal-invasiv durch die Bauchdecke¹ durchgeführt werden, schwankt zwischen Kliniken sehr stark. Dies hängt mit den unterschiedlichen Schwerpunkten, aber auch mit der Erfahrung und Fähigkeit der Chirurgen auf diesem Gebiet zusammen. [Car10]

Vor der Einführung der minimal-invasiven Chirurgie wurden ausschließlich sogenannte offene Operationen praktiziert. Dabei wird ein entsprechend großer Schnitt gesetzt, um an die Operationsregion zu gelangen. Der Chirurg arbeitet insbesondere mit seinen Händen und kann damit alles ertasten. So hat er die Möglichkeit, beispielsweise ein

¹ Laparoskopie: minimal-invasiver Eingriff im Bereich der Bauchhöhle

Karzinom in einem Organ zu erfühlen. Der gesetzte Schnitt am Patienten birgt jedoch einen großen Gewebeschaden und ein erhöhtes Infektionsrisiko [Gan14]. Mit der minimal-invasiven Technik soll der Gewebeschaden durch punktuell gesetzte Zugänge gemindert werden.

In der klassischen minimal-invasiven Chirurgie werden möglichst kleine Schnitte am Körper für den Zugang zum Operationsgebiet gesetzt. Durch diese Zugänge werden Instrumente und ein Endoskop geführt, die der Chirurg von außen bedient. Mit der endoskopisch minimal-invasiven Zugangsart und dem Einsatz von speziellen Instrumenten wurden neue Operationstechniken entwickelt. Meistens finden diese Eingriffe laparoskopisch statt. Die Abbildung 1.1 zeigt schematisch das Grundprinzip der sogenannten Laparoskopie.

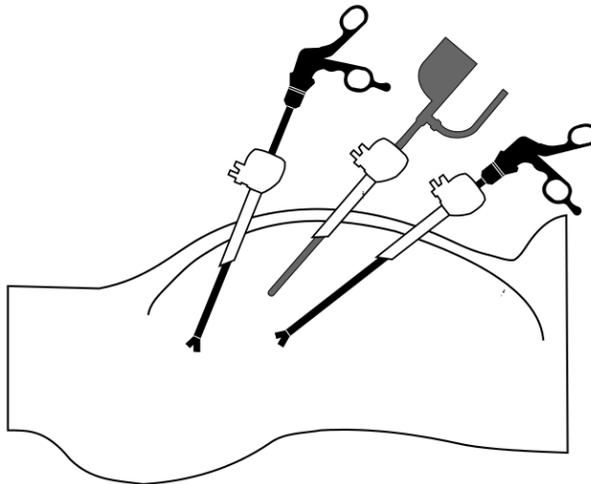


Abbildung 1.1: Die Trokare sind auf der Bauchdecke durch kleinen Einschnitte angebracht. Zwei Instrumente und das Endoskop werden durch die Trokare ins Körperinnere geführt.

In der Laparoskopie werden mindestens zwei Zugänge für die Instrumente und ein weiterer Zugang für das Endoskop gesetzt. Für einen Zugang wird zuerst ein kleiner Schnitt auf der Bauchoberfläche des Patienten gemacht. Im Anschluss wird ein Trokar durch diese Öffnung geschoben. In Abbildung 1.2 ist ein Trokar zu sehen. Der Trokar dient zum Einführen und Entfernen der Operationswerkzeuge und besitzt zusätzlich eine Ventilfunktion. Eine bessere Sicht und mehr Manipulationsspielraum werden durch das Einblasen eines Gases erreicht. Aufgrund der dehnbaren Bauchdecke vergrößert sich das Volumen des Bauchraums durch das einströmende Gas.



Abbildung 1.3: Laparoskopische Instrumente der Fa. Storz [Kar16]: Die Schere und der Greifer verfügen die Möglichkeit, einen Strom zum Koagulieren (Veröden) an dem messingfarbenen Dorn anzulegen.

Auf einen längeren Zeitraum gesehen, können dadurch mehr Patienten in einem Krankenhaus aufgenommen und operiert werden.

Die neue Operationstechnik bedeutet für den Chirurgen eine neue Herausforderung mit erhöhtem Schwierigkeitsgrad. Während der Chirurg bei einer offenen Operation mit seinen Händen direkt das Operationsgebiet durch Abtasten erkundet, fehlt ihm bei der Laparoskopie der haptische Eindruck. Dieser Vorgang wird als Palpation bezeichnet und kann nicht ersetzt werden. Allerdings kann der Chirurg mithilfe einer Gewebefärbung versuchen mit den „Augen zu fühlen“ und damit den Informationsverlust ausgleichen bzw. eine Information über das Gewebe erhalten. Die Handhabung mit den langen Instrumentenschäften benötigt Training und resultiert in einer merkbar steileren Lernkurve. Jeder Zugang wird nach dem Einführen zu einem stationären Drehpunkt (Pivotpunkt) der Instrumente. Die Bedienung der laparoskopischen Instrumente benötigt durch den Fulcrum-Effekt (vgl. Kap. 2.3) eine gewisse Einlernzeit [Hee06]. Außerdem ist der Bewegungsraum durch die fehlenden Freiheitsgrade stark eingeschränkt. Eine Bewegung der Instrumente ist nicht intuitiv.

Des Weiteren ist die Arbeitshaltung für den Chirurgen und seinen Assistenten während der Operation weniger ergonomisch. Sie stehen gemeinsam am Operationstisch, wobei der Assistent in der Regel das Endoskop führt. Der Monitor, welcher das Kamerabild zeigt, steht meistens in Operationsrichtung. Dazu wendet sich der Chirurg dem Monitor zu und verdreht seinen Oberkörper, da sich so die Hand-Auge-Koordination

besser umsetzen lässt. Die Folge ist eine unnatürliche Haltung, die teilweise über mehrere Stunden gehalten werden muss.

In Abbildung 1.4 ist die räumliche Anordnung im Operationssaal dargestellt. Dabei kann die Position des Chirurgen und des Assistenten sehr nahe beieinander sein. Außerdem besteht eine Kollisionsgefahr der Instrumente und des Endoskops beim Manipulieren außerhalb des Körpers.

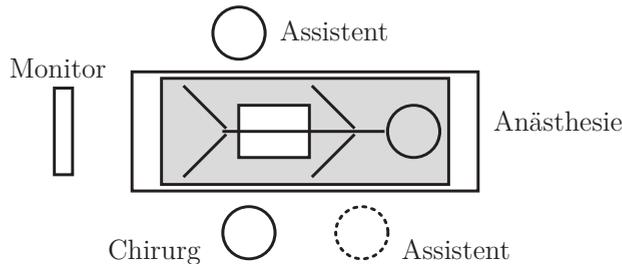


Abbildung 1.4: Räumliche Anordnung im Operationssaal

Da ein Endoskop verwendet wird, finden diese chirurgischen Eingriffe nicht unter direkter Sicht auf den Operationsbereich statt. Die Beweglichkeit ist ähnlich eingeschränkt, wie bei den manipulierenden Operationswerkzeugen. Der Sichtbereich wird durch die Kameraauflösung und die Linsengröße begrenzt. Ein ganzheitlicher Überblick über das gesamte Operationsgebiet wird dem Chirurgen nicht vermittelt. Zudem werden in den meisten Krankenhäusern keine Stereoendoskope eingesetzt. Folglich fehlt die Tiefenwahrnehmung und der Chirurg muss anhand des zweidimensionalen Bilds die dreidimensionale Position des Instruments abschätzen.

Einige Abhilfen können durch den Einsatz eines Roboters geschaffen werden. Das Ziel dabei ist es, den Chirurgen während des operativen Eingriffs zu unterstützen und die Präzision zu erhöhen [Ber14]. Der Roboter arbeitet in der Regel nicht autonom. Aktionen müssen stets vom Chirurgen selbst ausgeführt werden. Nach dem Master-Slave-Prinzip übernimmt der Roboter lediglich die Aufgaben, welche der Chirurg vorgibt (vgl. Abb. 1.5). In diesem Kontext wird häufig von einem Telemanipulationssystem gesprochen, welches den über Eingabegeräte erteilten Befehlen folgt. Dabei wird die Bewegung der Instrumentenspitzen direkt vom Chirurgen vorgegeben. Der Fulcrum-Effekt wird dadurch umgegangen. Das Zwischenschalten des Roboters resultiert in einer intuitiven Bedienung der Instrumente.

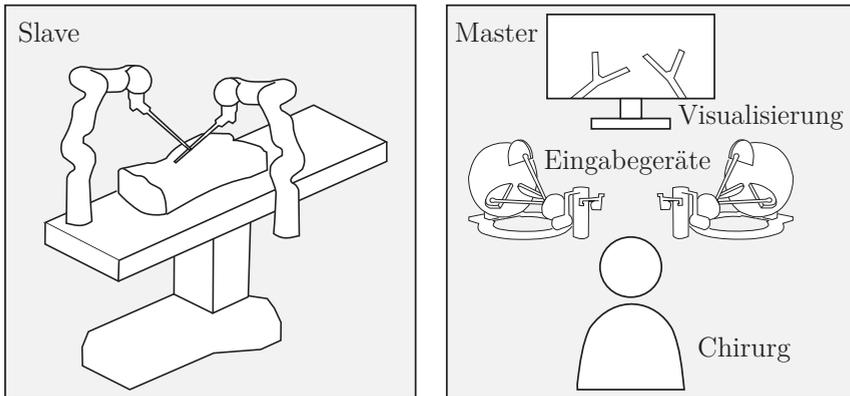


Abbildung 1.5: Aufbau in der Roboter-assistierten Chirurgie nach dem Master-Slave-Prinzip

Durch die Art der Bedienung können mehrere Freiheitsgrade im Instrument umgesetzt werden. Die Instrumentenspitze ist nicht starr, sie kann ähnlich wie das Handgelenk bewegt werden. Dadurch entstehen zwei weitere Freiheitsgrade an der Instrumentenspitze. Hierfür müssen auch die Eingabegeräte die entsprechende Anzahl an Freiheitsgraden besitzen. In Abbildung 1.6 ist ein solches Eingabegerät dargestellt, mit dem sich die Instrumentenspitze steuern lässt. Im Vergleich dazu ist das Steuern von mehreren Freiheitsgraden durch die direkte Kraftübertragung am Handgriff des laparoskopischen Instruments erschwert.

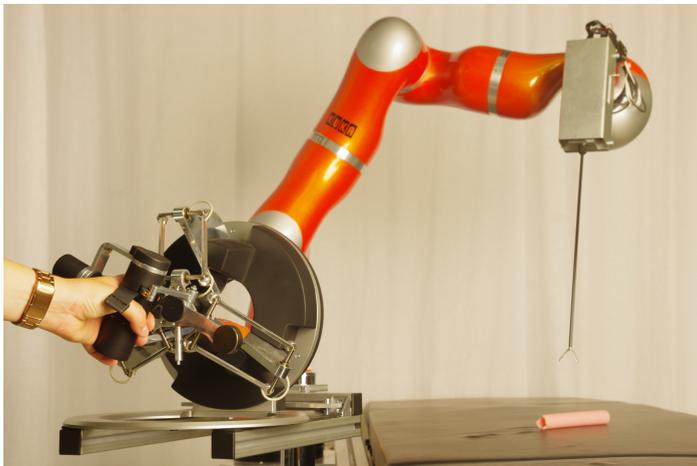


Abbildung 1.6: Das Eingabegerät omega.7 der Fa. Force Dimension [For16] besitzt drei aktive Freiheitsgrade für die Translationsbewegung und drei weitere passive Freiheitsgrade für die Rotation. Der Freiheitsgrad für das Greifen ist ebenfalls aktiv.

Darüber hinaus lässt sich mittels eines Tremorfilters aus den Steuerbefehlen des Chirurgen die Zitterbewegung bei der Signalübertragung glätten. Eine Skalierung der Bewegung wird ebenfalls ermöglicht und kann in einer präziseren Ausführung resultieren. Der Roboter besitzt folglich zusätzliche Funktionen, wie das Bereinigen und Untersetzen der Bewegung. Der Chirurg sitzt an einer Konsole, an der sich neben den Eingabegeräten für das Führen der Instrumente auch ein Bildschirm zur Übertragung des Endoskopbilds befindet. Durch die Arbeit an einer Konsole anstatt direkt am Operationstisch gibt es die Möglichkeit, dem Chirurgen einen guten dreidimensionalen Eindruck zu vermitteln. Hierbei schaut der Chirurg wie durch ein Fernglas auf das Operationsgebiet. Das linke und rechte Auge erhält jeweils eine andere Bildinformation, sodass im Kopf ein dreidimensionales Bild entsteht. Dazu ist ein Stereoendoskop notwendig, welches beispielsweise bei dem Chirurgiesystem *da Vinci Surgical System*³ standardmäßig eingebaut ist. Eine vergrößerte Darstellung des Operationsgebiets wird ebenfalls angeboten.

Die ergonomische Position des Chirurgen wird durch das Sitzen an der Konsole verbessert. Somit ist eine Verdrehung des Oberkörpers nicht mehr notwendig. Darüber hinaus ermöglicht es die Konsole, eine Pause zu machen, um die Arme kurzzeitig zu entspannen. Der Roboter fixiert während dieser Zeit die Instrumentenposition. Da der Chirurg nicht direkt am Operationstisch steht, muss er keine sterile Kleidung tragen. Ein Wechsel der Chirurgen ist dadurch sehr einfach und schnell möglich.

Es kann sein, dass die Operation offen durchgeführt werden muss, wenn es zu Komplikationen kommt. Ein Beispiel ist eine starke Blutung, deren Ursache nicht schnell genug gefunden werden kann. Der geringe Manipulationsspielraum, die fehlende Haptik und das kleine Sichtfeld durch das Endoskop können ansonsten zu einem höheren Risiko für den Patienten führen. Komplikationen können aber auch von technischer Seite hervorgerufen werden. Neben dem Ausfall des Systems selbst können Probleme mit dem schwer abschätzbaren Arbeitsraum des Roboters oder Kollisionen zwischen den Roboterarmen auftreten.

1.1.2 Technische Aspekte in der Roboter-assistierten Chirurgie

Mit dem Einsatz von Robotern in der Medizin erhöht sich die Komplexität der Operation bzw. der Operationsvorbereitung. Gleichzeitig ergibt sich die Chance, einen

³ Produkt der Firma Intuitive Surgical [Int16]

größeren Benefit durch die Verwendung des Roboters zu erzielen. Das gelingt beispielsweise durch Assistenzfunktionen, die durch die neue Technik erst möglich sind.

Das wohl bekannteste Chirurgesystem *da Vinci Surgical System* - bestehend aus vier Roboterarmen und einer Konsole⁴ - bietet dem Chirurgen und seinem Team bereits Unterstützung an. Jedoch liegt auch in diesem System noch Potential, wie zum Beispiel beim Positionieren des Roboters selbst [Cha14]. Für die Vorbereitung der Operation wird mehr Zeit benötigt, da der Roboter durch das Überstülpen der Schutzfolien der sterilen Umgebung angepasst werden muss. Ein eingespieltes Team kann die Vorbereitungszeit mit höherer Arbeitserfahrung senken. Jedoch liegt die Aufbauzeit beispielsweise noch bei ca. 60 Minuten für eine radikale Prostatektomie⁵ [Las12].

Kollisionen zwischen den Roboterarmen des *da Vinci Surgical System* und der Umgebung werden nicht vermieden und auch nicht erkannt. Des Weiteren gibt es noch keine Hilfestellung beim Platzieren der Zugänge. Gerade zu eng gesetzte Zugänge können zu Kollisionen zwischen den Roboterarmen führen.

Der Roboter nimmt im Operationssaal einen großen Platz ein, sodass aufgrund der Raumgröße nicht jeder Operationssaal genutzt werden kann. Die Aufgabe des Robotersystems ist in der Regel vordefiniert und kann als abgeschlossenes System bezeichnet werden. Eine Aufgabe außerhalb des Telemanipulationsmodus zu übernehmen, ist für den Roboter nicht möglich. Es handelt sich somit um kein modulares System.

Daher wird der Einsatz von kleineren Robotern in der Chirurgie, denen unterschiedliche Aufgaben zugewiesen werden können, in der Forschung auf verschiedenen Gebieten erkundet (vgl. Kap. 3). Redundante Leichtbauroboter werden für verschiedene Forschungsplattformen genutzt [Hag10; Nic13]. Die Roboter weisen ein geringeres Gewicht auf, sodass sie einfach vom Operationstisch entfernt werden können. Dies ist im Fall von Komplikationen während der Operation von Vorteil. Außerdem können die Komponenten schnell ausgetauscht werden, wenn eine der Komponenten des modularen Systems ausfällt. Ein Sieben-Achs-Roboter bietet die Möglichkeit einer Ausweichbewegung an. Dies schafft Flexibilität am Operationstisch.

Durch die Redundanz ergeben sich mehrere Lösungen, eine Lage im Raum zu erreichen. Dadurch nimmt das System an Komplexität zu.

⁴ in der neusten Version: *da Vinci Xi* [Int16]

⁵ Prostatektomie: (Teil-)Entfernung der Prostata durch einen chirurgischen Eingriff

1.2 Motivation - Ziele der Arbeit

Eine höhere Komplexitätsstufe fordert eine genauere Betrachtung der Randbedingungen [Zac11] in Bezug auf die Bahn- und Arbeitsraumplanung. Die Herausforderung stellt sich bei der Wahl der passenden Roboterparameter (vgl. Kap. 5.3). Die Redundanz eines Roboters erweitert den diskreten Arbeitsraum. Eine Limitierung des Arbeitsraums durch Gelenkansschläge ist jedoch weiterhin existent. Auch die Reduktion der Freiheitsgrade durch den Pivotpunkt im minimal-invasiven Szenario erhöht den Schwierigkeitsgrad.

Der Chirurg und sein Team weisen ihre Kompetenz im Bereich der Medizin auf. Als Anwender eines technischen Systems und als Nicht-Experten im Bereich Robotik wollen diese das System lediglich nutzen. Deshalb soll dem Chirurgen ein Werkzeug gegeben werden, welches die Vorteile eines redundanten Roboters umsetzt.

Der Bewegungsbereich des Roboters ist aufgrund der Randbedingungen schwer ersichtlich. Nicht nur die Position des Roboterendeffektors ist dabei von Interesse, sondern auch die Orientierung. Die Einschränkung durch den Pivotpunkt bewirkt eine Umkehrung der Bewegungsrichtung. Hinzu kommt eine Skalierung der Bewegung durch den Instrumentenschaft (vgl. Kap. 2.3).

Die gewählten Parameter sind für das Gelingen der Operation entscheidend. Die Position der Roboterbasis in Relation zu dem Pivotpunkt trägt maßgeblich zum Erfolg einer Operation bei. Damit wird festgelegt, in welchem Bereich im Raum der Roboterendeffektor manipulieren muss. Wenn jedoch die erreichbaren Orientierungen betrachtet werden, ist die Berechnung des erreichbaren Manipulationsraums vielschichtiger. Der Nullraum, welcher sich durch die Redundanz ergibt, bietet zusätzlichen Spielraum bei der Gelenkstellung einer Orientierung. (vgl. Kap. 5)

Das dargestellte Problem ist vergleichbar mit einem sechs-dimensionalen Labyrinth. Der Chirurg manipuliert und fährt eine von ihm gesteuerte Trajektorie ab. Im Fall einer erreichten Gelenkgrenze kann dies mit einer Sackgasse verglichen werden, aus der ein Rückweg gefunden werden muss. Durch das Umsetzen von Parametern verändert sich das Labyrinth und die Trajektorie ist ohne Einschränkung abfahrbar.

In dieser Arbeit werden Kriterien und Methoden herausgearbeitet, welche eine Roboterperformanz abbilden. Mit dem Ziel, optimierte Roboterparameter für einen Eingriff mit Pivotpunkt-Restriktion zu finden, wird die Zielregion auf Basis von Trajektorien ausgewertet. Es wird nach einer situationsbezogenen Lösung gesucht – dies bedeutet,

nicht der gesamte Arbeitsraum des Roboters steht im Fokus. Stattdessen wird der benötigte Arbeitsraum genauer betrachtet. Dazu wird eine Wissensbasis erstellt, welche eine semantisch annotierte Trajektorie als Grundlage besitzt. Der benötigte Arbeitsraum des Roboters wird phasenweise betrachtet, sodass die Roboterparameter sich an die Operationsphase und damit dem abzudeckenden Gebiet anpassen. Eine Punktwolke oder eine einzelne Trajektorie kann je nach Anwendungsfall betrachtet werden. Die definierten Performanzkriterien werden auf die phasenbezogene Punktwolke, welche das abzudeckende Gebiet repräsentiert, angewendet. Die Erreichbarkeit, die Gelenkbewegung und die Nähe zu Singularitäten stellen die Kriterien dar, auf deren Basis eine Aussage zum Performanzmaß erstellt wird. Das Performanzmaß kann als Güte bezeichnet werden, welcher eine Metrik aus den einzelnen Kriterien zugrunde liegt. Neben den lokalen und globalen Maxima von Gütewerten werden auch Bereichsmaxima betrachtet. Die Bereichsmaxima stehen für die Robustheit des gewählten Parametersatzes. Dies trägt bei Ungenauigkeiten zu einer stabilen Lösung bei. Das Konzept ist in Abbildung 1.7 dargestellt.

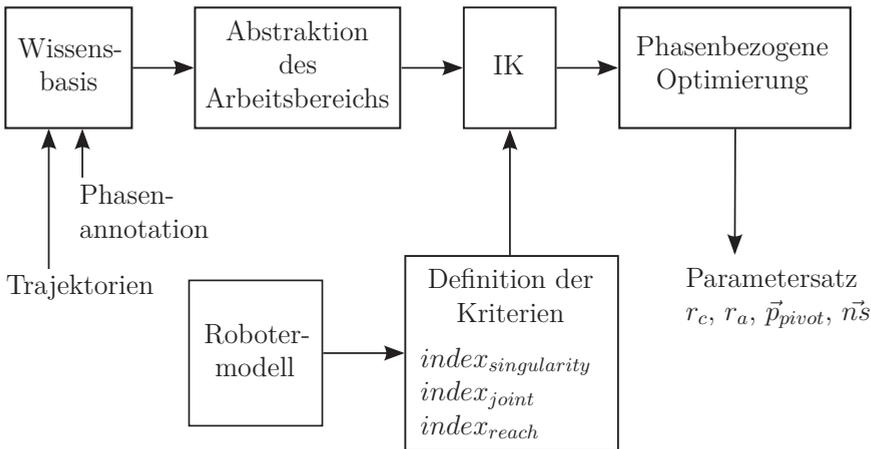


Abbildung 1.7: Konzeptvorstellung

Zum Erreichen des Ziels wurden interdisziplinäre Versuche zum Aufbau einer Wissensbasis durchgeführt. Eine erfolgreiche Umsetzung konnte bereits in der Evaluation zur Endoskopführung [Wag15] gezeigt werden. In der Simulation wurden zusätzliche Untersuchungen zum Vergleich von berechnetem Gütewert und der Realität gemacht.

1.3 Kapitelüberblick

Die folgende Arbeit gliedert sich in neun Kapitel auf. Das Kapitel 1 beschäftigt sich mit der Einführung in die minimal-invasive Roboter-assistierte Chirurgie. Daraus leitet sich die Motivation dieser Arbeit ab, welche gleichzeitig das Ziel formuliert. Das Vorgehen wird als Konzept dargestellt. Für das allgemeine Verständnis wird in den Grundlagen (vgl. Kap. 2) auf die Transformationen, Konventionen und den Fulcrum-Effekt eingegangen. Die bisherigen Erkenntnisse auf diesem Gebiet werden in Kapitel 3 beschrieben. Aus den Unterschieden zu dieser Arbeit leitet sich die Neuerung gegenüber den vorangegangenen Arbeiten ab.

In Kapitel 4.1 wird das Patientenmodell und die Möglichkeit der Übertragung von Methoden auf einen Patienten vorgestellt. Dazu gehören die Modellanpassung an den Patienten und die Patientenregistrierung. Das Operationsmodell aus Kapitel 4.2 wird auf Basis von Trajektorien und der dazugehörigen semantischen Information erstellt. Es werden Methoden zur Beschreibung der Zielregion gezeigt, welche die Bewegungen eines laparoskopischen Instruments abstrahieren (vgl. Kap. 4.2.1, 4.2.2). Als Beispiel für die Semantifizierung einer Operation wurde die Rektumresektion gewählt (vgl. Kap. 4.2.3).

Im Zentrum dieser Arbeit steht die Definition der Parameter, welche aus dem Robotermodell (vgl. Kap. 5) hervorgehen. Neben der Beschreibung des Roboters und der Umgebung, in der der Roboter arbeiten soll (vgl. Kap. 5.1, 5.2), werden die Besonderheiten der Kinematik und deren Einfluss hervorgehoben (vgl. Kap. 5.3). Dieser Einfluss wirkt sich auf die vorgestellten Kriterien aus, welche in Kapitel 5.4 näher erläutert werden.

Die Zusammenführung des Operationsmodells und des Robotermodells findet in Kapitel 6 statt. Es wird auf die Vergleichbarkeit von Operationsphasen und Indikatoren eingegangen. Außerdem wird die Strategie beschrieben, welche zum Finden des optimalen Parametersatzes für eine Operation führt.

Das Kapitel 7 gibt eine Beschreibung des Versuchsaufbaus und dessen Durchführung wieder. Des Weiteren werden die Ergebnisse einer Parameteranalyse vorgestellt und diskutiert. Die letzten beiden Kapitel 8 und 9 fassen die Höhepunkte der Arbeit zusammen und geben einen Ausblick auf zukunftsweisende und spannende Fragestellungen.

KAPITEL 2

Grundlagen

In diesem Kapitel werden die für das Verständnis der Arbeit notwendigen Grundlagen erläutert.

2.1 Transformationen im Raum

Im euklidischen Raum müssen verschiedene Koordinatensysteme in ein Verhältnis zueinander gesetzt werden. Dabei handelt es sich beispielsweise um das Weltkoordinatensystem WKS , das Roboterbasiskoordinatensystem RKS oder das Basiskoordinatensystem BKS und das (Roboter-)Endeffektorkoordinatensystem KSE_E . In der Robotik werden Transformationen zur Beschreibung von Koordinatensystemen verwendet. Dabei werden die sechs Freiheitsgrade im Raum beschrieben, drei für die Position und drei weitere für die Orientierung.

Die Position eines Körpers im euklidischen Raum kann durch einen 3×1 Vektor dargestellt werden. Weiter lässt sich die Rotation eines Körpers mithilfe einer 3×3 Rotationsmatrix beschreiben. Als Lage wird die Zusammenfassung von Orientierung und Position genannt. Dies kann durch eine homogene Matrix, auch Frame genannt, ausgedrückt werden. Es handelt sich dabei um eine 4×4 Matrix, welche Gleichung 2.1 zeigt. Der Translationsvektor $\mathbf{T}_{3 \times 1}$ bildet die Position ab und die Rotationsmatrix $\mathbf{R}_{3 \times 3}$ die Rotation.

$$\mathbf{M}_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{3 \times 3} & \mathbf{T}_{3 \times 1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{R}_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} R_{xx} & R_{yx} & R_{zx} \\ R_{xy} & R_{yy} & R_{yz} \\ R_{xz} & R_{yz} & R_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\mathbf{T}_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

In der Robotik sind zwei Interpretationen von Rotationsmatrizen üblich [Dil10]: Euler-Winkel und Roll-Pitch-Yaw RPY. Sie unterscheiden sich in der Festlegung der Rotationsachsen und der Reihenfolge der Ausführung.

Mit den Euler-Winkeln wird die Drehung um die veränderten Achsen beschrieben. Es gibt sechs mögliche Kombinationen der Drehreihenfolge und die verwendete Konvention muss bekannt sein, damit die Transformation eindeutig ist. Um das Prinzip darzustellen wird eine der Konventionen in Abbildung 2.1 erklärt.

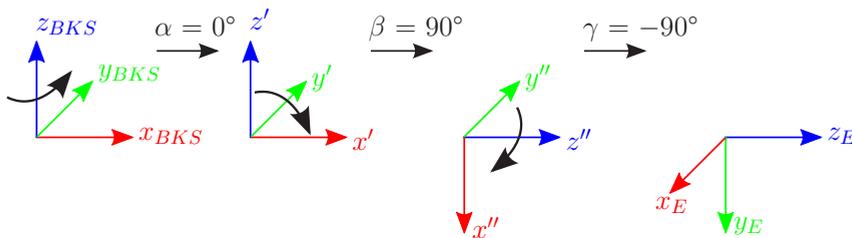


Abbildung 2.1: Die Euler-Winkler beziehen ihre Drehung jeweils auf das neu entstandene Koordinatensystem.

Es wird mit einer Drehung um die z -Achse z_{BKS} des Basiskoordinatensystems BKS mit dem Winkel α begonnen. Danach wird um die neu entstandene y -Achse y' mit dem Winkel β gedreht. Zuletzt erfolgt die Drehung um die veränderte z -Achse z'' mit dem Winkel γ .

$$\mathbf{R}_{Euler} = \mathbf{R}_z(\alpha) \cdot \mathbf{R}_{y'}(\beta) \cdot \mathbf{R}_{z''}(\gamma) \quad (2.4)$$

In Gleichung 2.4 ist zu sehen, dass es sich bei den Euler-Winkeln um eine Multiplikation der einzelnen Drehmatrizen von links nach rechts handelt. Die Drehung bezieht sich auf das linksstehende Matrixprodukt. Für die erste Drehmatrix ist das Bezugssystem das Basiskoordinatensystem, welches durch die Einheitsmatrix repräsentiert wird.

Eine weitere Möglichkeit zur Beschreibung einer Transformation ergibt sich durch die Drehung um die feststehenden Achsen. Diese Methode wird als Roll-Pitch-Yaw bezeichnet. Dabei wird um die drei kartesischen Achsen des Basiskoordinatensystem gedreht. Begonnen wird in diesem Fall mit einer Drehung um die x -Achse $x_{BK S}$, gefolgt von einer Drehung um die y -Achse $y_{BK S}$ und abgeschlossen mit einer Drehung um z -Achse $z_{BK S}$. Die Zwischenschritte sind in Abbildung 2.2 detailliert gezeigt. Es ergibt sich eine Multiplikation der einzelnen Drehmatrizen von rechts nach links (vgl. Glg. 2.5).

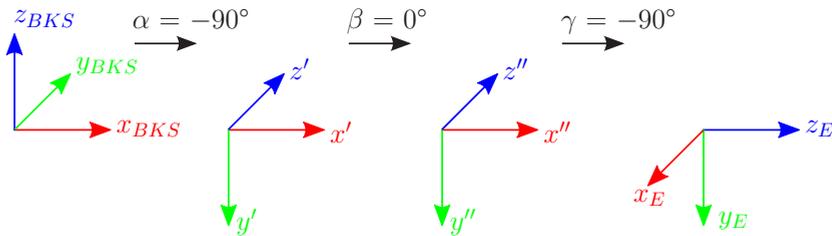


Abbildung 2.2: Bei der Transformation nach dem Vorgehen Roll-Pitch-Yaw wird die Drehung immer auf das Basiskoordinatensystem bezogen.

$$\mathbf{R}_{RPY} = \mathbf{R}_z(\gamma) \cdot \mathbf{R}_y(\beta) \cdot \mathbf{R}_x(\alpha) \quad (2.5)$$

Zur Vollständigkeit sei an dieser Stelle die Darstellungsmethode einer Transformation als Quaternion genannt. Dabei wird eine Rotation durch einen 4×1 Vektor dargestellt. Dazu sind vier Parameter notwendig. Die Rotation wird durch die Angabe einer Drehachse (3×1 Vektor) und einem Drehwinkel (Skalar) beschrieben. Die Information über die Position fehlt bei Quaternionen, weshalb duale Quaternionen eingeführt wurden, welche die Positionsangabe beinhalten.

2.2 Denavit-Hartenberg-Konvention

Für die Erstellung eines kinematischen Modells eines Roboters wird häufig die Denavit-Hartenberg-Konvention gewählt. Diese ist vor allem für die Erstellung der Vorwärtskinematik relevant und hilfreich. Dabei wird die kinematische Kette eines Roboters durch die Denavit-Hartenberg-Parameter beschrieben. Dazu werden die benachbarten Gelenken mithilfe von Koordinatensystemen systematisch in einen Zusammenhang gebracht. Die Methode basiert auf den homogenen Matrizen, wobei eine Reduktion von sechs auf vier Parameter erreicht wird. Die Reduktion entspringt der Redundanz bei der Annahme eines rechtshändigen kartesischen Koordinatensystems, bei dem sich die 3. Achse, hier die y -Achse, ergibt.

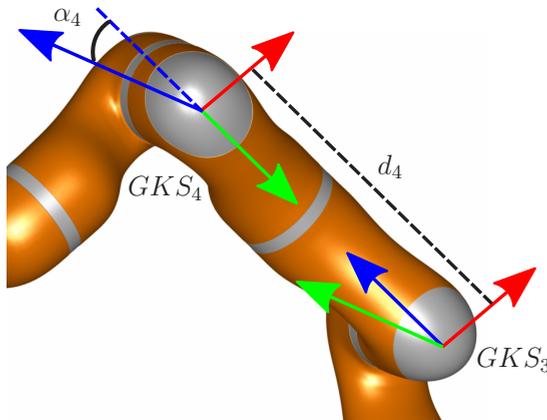


Abbildung 2.3: Die Denavit-Hartenberg-Parameter am Beispiel des 3. und 4. Gelenks des LBR4+. Für diesen Roboter wurden die Parameter $\alpha_4 = -90^\circ$ und $d_4 = 0,4$ m gewählt. Der Parameter a_4 hat die Länge 0 m, da sich die Drehachsen schneiden. Die x -Achsen liegen bereits parallel zueinander, sodass sich $\theta_4 = 0^\circ$ ergibt. Die Farbgebung der Koordinatensysteme ist folgende: x -Achse rot, y -Achse grün, z -Achse blau.

Die Denavit-Hartenberg-Konvention beschreibt die Koordinatentransformation zwischen zwei Robotergelenken mit vier Parametern. Im ersten Schritt werden die z -Achsen für die Gelenkkoordinatensysteme GKS auf die angetriebenen Achsen gelegt. Damit entspricht die z -Achse der Gelenkkoordinatensysteme der jeweiligen Bewegungsachse. Die Anzahl an Gelenkkoordinatensystemen ergibt sich aus der Anzahl an Gelenken $n_{gelenke}$. Mit der Laufvariable i wird das GKS_i dem i -ten Gelenk zugewiesen, dabei gilt: $i = 1 \dots n_{gelenke}$, $i \in \mathbb{N}^+$. Die positive Drehrichtung des Drehgelenks, bei einem Translationsgelenk der positive Fahrweg, spiegelt die

positive Richtung der z -Achse wider. Die x - und y -Achsen ergeben sich durch die Transformation, welche im Folgenden kurz erklärt wird. Dabei steht die x_i -Achse immer senkrecht auf der z_{i-1} -Achse. Daraus ergibt sich, dass das Kreuzprodukt aus der z_{i-1} -Achse und der z_i -Achse die x_i -Achse darstellt. Diese Folgerung kann aufgrund des geforderten rechtshändigen kartesischen Koordinatensystems gezogen werden.

Die Denavit-Hartenberg-Transformation setzt sich aus zwei Rotationen und zwei Translationen zusammen. Daraus ergeben sich die vier Denavit-Hartenberg-Parameter:

- d_i Translation entlang der z_{i-1} -Achse
- θ_i Rotationswinkel um die z_{i-1} -Achse
- a_i Translation entlang x_i -Achse
- α_i Rotationswinkel um die x_i -Achse

Es wird mit einer Translation entlang der z_{i-1} -Achse begonnen. Dabei wird das GKS_{i-1} entlang der z_{i-1} -Achse verschoben bis es am Fußpunkt der Normalen, welche zwischen den Gelenkachsen z_i und z_{i-1} existiert, liegt. Es wird angenommen, dass die Gelenkachsen windschief zueinander sind. Die Denavit-Hartenberg-Konvention ist nicht immer eindeutig, sodass dem Anwender nahe gelegt wird, die frei wählbaren Parameter auf Null zu setzen. Der Abstand zwischen dem GKS_{i-1} und dem Fußpunkt der vorher gezogenen Normalen wird als Parameter d_i bezeichnet. Weiter geht es mit einer Rotation des neuen, translatorisch verschobenen Hilfskoordinatensystems. Der Winkel θ_i beschreibt die Rotation um die z_{i-1} -Achse bis zum Schnittpunkt der Achsen x_{i-1} und z_i . Die Länge der Strecke zwischen den beiden Gelenkachsen z_i und z_{i-1} wird als Parameter a_i bezeichnet. Der Translationsparameter a_i bewegt das Hilfskoordinatensystem entlang der x_{i-1} -Achse auf die Position des GKS_i . Die Rotation mit dem Winkel α_i um die x_i -Achse überführt die z_{i-1} -Achse in die z_i -Achse. Die Multiplikation von links nach rechts der einzelnen Transformationen ergibt die Denavit-Hartenberg-Transformation von GKS_{i-1} in GKS_i . In Gleichung 2.6 ist die mathematische Beschreibung der Denavit-Hartenberg-Transformation gezeigt.

$$\mathbf{D}_{i-1,i} = \mathbf{T}_{z_{i-1}}(d_i) \cdot \mathbf{R}_{z_{i-1}}(\theta_i) \cdot \mathbf{T}_{x_i}(a_i) \cdot \mathbf{R}_{x_i}(\alpha_i)$$

$$\mathbf{D}_{i-1,i} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i) \sin(\alpha_i) & \cos(\theta_i) \mathbf{a}_i \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i) \sin(\alpha_i) & \sin(\theta_i) \mathbf{a}_i \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & \mathbf{d}_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

mit

$$\mathbf{T}_{z_{i-1}}(d_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \mathbf{d}_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_{z_{i-1}}(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T}_{x_i}(a_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \mathbf{a}_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_{x_i}(\alpha_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.3 Fulcrum-Effekt

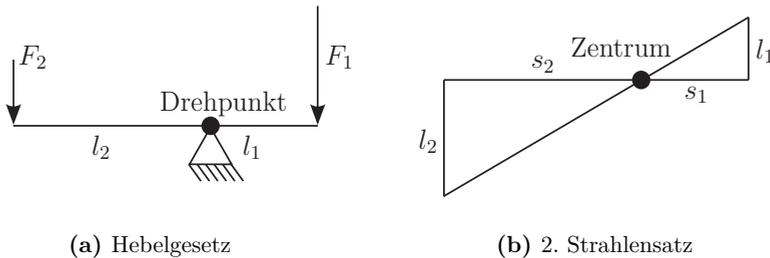
In der Laparoskopie wird ein stabförmiges Instrument durch einen Trokar in das Körperinnere geschoben. Der Chirurg bewegt das Instrument damit um einen Drehpunkt, welcher auf der Schaftachse des Trokars liegt. Der Drehpunkt wird in diesem Kontext auch als Pivotpunkt bezeichnet.

Physikalisch wird der Fulcrum-Effekt durch das Hebelgesetz beschrieben. Dieses besagt, dass ein Drehmomentengleichgewicht herrscht (vgl. Abb. 2.4(a)). Ein Drehmoment wird durch eine Kraft und einen Hebelarm erzeugt. Damit liegt auf der linken und rechten Seite des Drehpunkts ein Drehmoment an, welches gleich groß ist. Neben dem Hebelgesetz kann der Strahlensatz die Umkehrung der Richtung darstellen. Hierbei liegt der Fokus nicht auf der Kraft, sondern auf der Wegstrecke, welche zurückgelegt werden muss (vgl. Abb. 2.4(b)). Passend zu Abbildung 2.4 können die zwei folgenden Gleichungen formuliert werden:

$$F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot l_2 \quad (2.7)$$

$$\frac{l_1}{s_1} = \frac{l_2}{s_2} \quad (2.8)$$

Übertragen auf die Laparoskopie muss der Chirurg das Instrument durch eine entgegengesetzte Kraft bewegen. Zudem sind die Kraft und die Wegstrecke durch den Hebelarm (Instrumentenschaft) skaliert. Eine kleine Bewegung des Handgriffs am Instrument führt zu einer großen intrakorporalen Bewegung der Instrumentenspitze. Dies findet genau dann statt, wenn der Chirurg die Instrumentenspitze weit in das Körperinnere steckt. In Abbildung 2.5 wird der Effekt am Patienten gezeigt. Der Trokar übernimmt so die Funktion des Drehpunkts. An der Instrumentenspitze und am Handgriff sitzt der Kraftangriffspunkt der jeweiligen Kräfte F_1 , F_2 . Der Instrumentenschaft stellt den Hebelarm für beide Kräfte dar und teilt sich längenmäßig am Drehpunkt auf.



(a) Hebelgesetz
(b) 2. Strahlensatz
Abbildung 2.4: Das Hebelgesetz und der 2. Strahlensatz im Vergleich

Durch das Zwischenschalten eines Roboters besteht die Möglichkeit, dass der Roboter den Fulcrum-Effekt bereits ausgleicht. Der Chirurg bewegt durch ein Telemanipulationssystem lediglich die Endeffektoren, welche in seinem Fall die Instrumentenspitzen sind. Damit ist für ihn der Fulcrum-Effekt nicht mehr existent. Die Ergonomie für den Chirurgen wird dadurch ebenfalls verbessert [Gal98]. Der Roboter muss aufgrund des Fulcrum-Effekts einen entsprechend großen Arbeitsraum besitzen. Selbst wenn das Operationsgebiet sehr klein erscheint, entspricht dieses Gebiet nicht dem Bewegungsraum, welchen der Roboterendeffektor abdecken muss. Die Zielpunkte nahe des Trokars bewirken durch die Instrumentenschaftlänge eine große Bewegung des Roboterendeffektors.

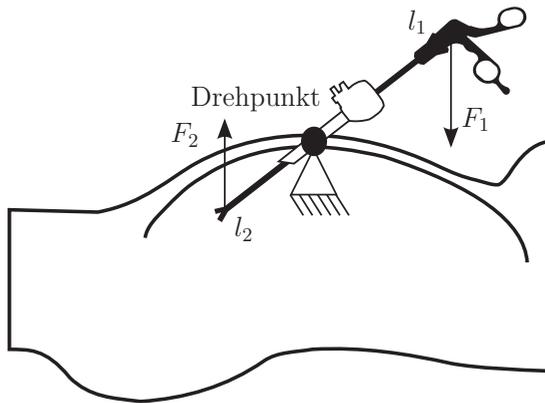


Abbildung 2.5: Hebelgesetz übertragen auf die Laparoskopie

KAPITEL 3

Stand der Forschung

Im Kapitel 3.1 wird auf die bisherigen Forschungsarbeiten eingegangen. Im Anschluss wird die Lücke zum Stand der Forschung aufgezeigt und den Ansatz der Arbeit verdeutlicht (vgl. Kap. 3.2).

3.1 Vorangegangene Arbeiten

In drei Teile gegliedert werden die Arbeiten vorgestellt, auf denen zum Teil aufgebaut wird bzw. deren Ansatz sich grundlegend unterscheidet. Als Erstes werden die Arbeiten aus dem Bereich der Trokarplanung und der Roboterplatzierung im Operationsraum vorgestellt (vgl. Kap. 3.1.1). Des Weiteren werden zwei Forschungsplattformen für die Chirurgierobotik (vgl. Kap. 3.1.2) beschrieben, welche redundante Roboter einsetzen. Im letzten Abschnitt wird auf die Lösung der inversen Kinematik und den Arbeitsraum eines redundanten Roboters eingegangen (vgl. Kap. 3.1.3).

3.1.1 Positionierung der Trokare und des Roboters in der Medizin

Adhami et al. [Adh03] und Coste-Maniere et al. [Cos04] stellen mit ihrer Forschergruppe ein Verfahren zur Planung einer minimal-invasiven Operation vor. Als Beispiel wird die Herzchirurgie herangezogen, bei der die Trokare zwischen den Rippen platziert werden müssen. Der Suchraum der möglichen Positionen ist damit deutlich geringer als bei der Platzierung auf der Bauchoberfläche. Die Positionierung des Trokars wird entkoppelt von dem Robotersystem betrachtet. Das Chirurgiesystem *da Vinci Surgical System* mit seinen aktiven (zeitvariant) und passiven (zeitinvariant)

Freiheitsgraden wird in diesem Zug in die Optimierung miteinbezogen. Die aktiven Freiheitsgrade ergeben in Summe eine Redundanz, welche genutzt wird, um diese zu optimieren oder eine nicht zufriedenstellende Situation der passiven Freiheitsgrade auszubessern. Die Wahl der Trokarpositionen beruht auf einer geometrischen Beschreibung der kegelförmigen Zielregion und auf weiteren Kriterien, wie der Sichtbarkeit der Zielregion. Eine Operation an einem Hund wurde durchgeführt und das System mit den vorgeschlagenen Planungsmethodiken getestet. Die Operation wurde als erfolgreich bewertet. Dennoch zeigte sich in der Praxis, mit welchen Komplikationen zu rechnen ist, an welchen Stellen noch nachgearbeitet werden muss und welche Lösungsansätze bereits ein gutes Ergebnis erzielen. Aus den Versuchen ging ein empfohlener Mindestabstand zwischen den Trokarpositionen von 42,4 mm hervor.

Trejos et al. [Tre07] untersucht am Beispiel des *da Vinci Surgical System* mögliche Roboter- (aktive Basis) und Trokarpositionen in der Herzchirurgie. Mithilfe eines Schnittbilds (Computertomografie CT) und des Zielgebiets wird eine Menge an Trokarpositionen gewählt, welche dem Optimierungsalgorithmus übergeben werden. Ein Performanzmaß wird eingeführt, welches sich auf die Methoden von Stocco et al. [Sto98] und Gosselin et al. [Gos91] stützt. Die Zielregion wird als Quader repräsentiert. Ein höheres Performanzmaß ergibt sich aus einer weiter entfernten Trokarposition von der Zielregion. Es wird festgestellt, dass sich die Änderung des Patientenmodells auf die Planungsergebnisse auswirken.

L. W. Sun et al. [Sun07] beschäftigt sich mit der Positionierung des Trokars und der Roboterarme des *da Vinci Surgical System*. Eine Trokarposition wird mithilfe der Abstraktion der Zielregion als einfacher Quader berechnet. Es geht nicht eindeutig hervor, ob der Weg zur Zielregion analysiert wird. Die Position des Roboters wird durch zwei Indikatoren bewertet, welche die Fertigkeit und die Erreichbarkeit des Roboters beschreiben. Als Grundlage dient die Jacobi-Matrix. Außerdem wird die Kollision zwischen Roboterarmen betrachtet. In [Sun07] wird die These bestätigt, dass der Arbeitsraum des Roboters von der gewählten Relation zwischen Roboterbasis und Pivotpunkt abhängt.

Die Arbeiten von Adhami et al. [Adh03], Coste-Maniere et al. [Cos04], Trejos et al. [Tre07] und L. W. Sun et al. [Sun07] beschäftigen sich mit der ersten Version des *da Vinci Surgical System* [Int16], welcher nur drei Roboterarme besitzt.

Bauernschmitt et al. [Bau07] schlägt für die Positionierung von Trokaren ein iteratives System vor, welches auf Basis von Schnittbildaufnahmen (CT) und einer Registrierung

den Chirurgen unterstützt. Die Schritte des Verfahrens beginnen bei der Perzeption, welche durch eine Schnittbildaufnahme repräsentiert wird, gehen über zur Planung und enden in einer Analyse. Ein externes Tracking der Instrumente sowie die Registrierung der Schnittbildaufnahme mit der aktuellen Patientenposition erlauben dem Chirurgen den Blick ins Körperinnere. Das System soll unabhängig von dem genutzten Robotersystem einsetzbar sein. Das Verfahren wird für die Herzchirurgie getestet. Für die Registrierung des Patienten wird eine hohe Genauigkeit gefordert. Die Zielregion sowie die geforderten Kriterien an die Trokarposition werden nicht näher spezifiziert.

Feuerstein et al. [Feu08] zeigt ein Verfahren zur Trokarplatzierung auf Basis von Schnittbildern und einem markerbasierten Tracking für die Leberchirurgie. Durch die Nutzung eines C-Arms¹ ist eine Patientenregistrierung nicht mehr notwendig und es müssen lediglich die Koordinatensysteme des C-Arms und des Trackingsystems zueinander registriert sein. Auch die Veränderung der Bauchdecke durch die Insufflation kann durch das intraoperative Erstellen des Patientenmodells nachgebildet werden. Dem Chirurgen werden Risikostrukturen im Endoskopkamerabild angezeigt, was ihn bei der Trokarplanung unterstützt.

T.-C. Chen et al. [Che13] sucht nach Kriterien, welche eine gute Trokarposition ausmachen. Dazu werden Versuche, bezogen auf unterschiedliche Operationstypen, durchgeführt. Die Trokarpositionen wurden jeweils verändert und die Aktion wurde anhand der Zeit bemessen. Der Arbeitswinkel und der Neigungswinkel wurden auf ihre Größe hin näher untersucht. Es wird eine räumliche Anordnung von Trokarpositionen vorgeschlagen.

Die verschiedenen Forschergruppen haben bisher ihre Zielregion durch einfache Volumen dargestellt, welche vom Chirurgen oder aus Schnittbildern extrahiert wurden. Die Erkenntnis, dass die Insufflation eine Veränderung des Patientenmodells bewirkt, wurde zwar festgestellt, konnte aber meist nicht miteinbezogen werden. Eine Ausnahme zeigt Feuerstein et al. [Feu08], welcher intraoperativ ein Schnittbild erzeugt. Es geht oftmals nicht hervor, ob neben der Zielregion selbst auch der Weg zur Zielregion untersucht wurde [Tre07], [Sun07]. Eine Unterteilung der Operation in verschiedene Phasen wurde bisher noch nicht umgesetzt. Für den

¹ C-Arm: Schnittbildgebendes System auf Basis der Röntgentechnologie, welches intraoperativ für die Navigation verwendet werden kann.

Roboter wurde ein Performanzmaß abgeleitet, welches sich auf die Determinante der Jacobi-Matrix stützt.

Weede et al. [Wee10] stellt eine Wissensbasis mithilfe von aufgenommenen Trajektorien auf. Im Zentrum steht die Bewegungsprädiktion für einen chirurgischen Eingriff. Dazu werden Markov Modelle gebildet, welche mithilfe von Clustermethoden erstellt werden. Über eine Übergangsmatrix wird eine Prädiktion durchgeführt und dient unter anderem für die Bewegung eines Endoskops [Wee11]. Weede et al. [Wee13b] nutzt für die Zugangsplanung mehrere Optimierungsparameter, deren Güte mittels Fuzzy-Logik beschrieben wird. Neben der Erreichbarkeit werden Kriterien zur Bewertung der Ergonomie und der Kollisionsvermeidung zwischen den Instrumenten beurteilt. Zur Verknüpfung der Kriterien wird die T-Norm verwendet, welche als Zielfunktion definiert wird. Für die Optimierung wird der eigens entwickelte Seed Throwing Algorithmus [Wee09] verwendet, welcher iterativ eine Lösung berechnet.

Chang et al. [Cha14] hebt die Erfolgsfaktoren einer minimal-invasiven, Roboter-assistierten Operation hervor. Neben dem Erfahrungswissen und den Fertigkeiten des Chirurgen wird die Positionierung des Patienten und des Trokars genannt. Es werden Relationen zwischen den Trokaren empfohlen, welche eine gute Manipulierbarkeit ergeben und gleichzeitig die Gefahr einer Kollision reduzieren. Es wird keine Optimierung durchgeführt, stattdessen stützt sich das Ergebnis auf die subjektive Einschätzung des Chirurgen.

Mit diesem Beitrag von Chang et al. [Cha14] wird deutlich, dass Forschungsarbeiten auf technischer Basis noch nicht in den Operationssaal gelangt sind. Es muss daher ein allgemeineres Modell generiert werden, sodass der Übertrag auf den Menschen ein geringeres Hindernis oder eine geringere Schwierigkeit darstellt.

In der Arbeit von Taylor et al. [Tay16] wird ein Überblick über die Roboter- und Computer-assistierte Chirurgie gegeben. Darunter ist ein Modell, welches den Informationsfluss darstellt, der für die Computer-assistierte Chirurgie notwendig ist. Das Verfahren wird beschrieben durch eine Wissensbasis mit patientenspezifischen Informationen, einem Modell und einer Planung, welche zu einer Aktion führt. Eine Rückführung der Information innerhalb des Modells ist durch die patientenspezifische und die statistische Auswertung gegeben. Ein solches Grundprinzip verfolgen in der Regel alle Forschungsarbeiten. Es wird jedoch angemerkt, dass die Bewertung bei Roboter- und Computer-assistierten Systemen nicht klar definiert ist. Des Weiteren wird vorgeschlagen, welche Bewertungsfaktoren (Qualität, Zeit, Kosten, Sicherheit, Genauigkeit etc.) zu analysieren und zu bewerten sind. Dies geschieht, indem klar

herausgestellt wird, für wen der jeweilige Faktor wichtig ist, welche Evaluierungsmethoden empfohlen werden und welche Auswirkungen die Verbesserung hat.

3.1.2 Forschungsplattformen

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR [Deu16] präsentierte mit [Kon09], [Hag10] und [Thi10] ihre Forschungsplattform MiroSurge für die minimal-invasive Roboter-assistierte Chirurgie. Die modulare Plattform besteht aus Leichtbaurobotern, welche als DLR MIRO bezeichnet werden, den Instrumenten MICA, einer Stereoendoskopkamera, haptischen Eingabegeräten und einem Bildschirm, welcher ein dreidimensionales Bild liefert. Der DLR MIRO Roboter besitzt neben seinen sieben Gelenken, respektive Freiheitsgraden, ein geringes Gewicht im Verhältnis zu seiner Traglast ($<10\text{ kg} - 30\text{ N}$). In jedem Gelenk befinden sich Kraft- und Drehmomentsensoren, sodass eine Positions-, Kraft- und Impedanzregelung möglich ist. Der DLR MIRO Roboter folgt der ersten Generation KineMedic [Kon06]. Das DLR MICA Instrument zeichnet sich durch seine drei Freiheitsgrade und den Kraft-Momenten-Sensor an der Instrumentenspitze aus. Mit den haptischen Eingabegeräten ist eine Telemanipulation der Roboterarme möglich [Tob11]. Die Vision dieses Aufbaus ist es, eine Operation am schlagenden Herzen durchführen zu können. Die Nutzung des Nullraums wird auf die Kollisionsvermeidung, den Abstand zu den Gelenkgrenzen und die Vermeidung von Singularitäten beschränkt.

Mit [Mön11], [Nic11] wird das System OP:Sense der Forschergruppe des KIT Karlsruhe vorgestellt, welches für das Szenario einer minimal-invasiven, Roboter-assistierten Chirurgie verwendet wird. Es sollen sowohl Telemanipulation als auch autonome Aufgaben ermöglicht werden. Im Zentrum des Medizinrobotiklabors stehen hierfür zwei Leichtbauroboter der Firma KUKA [KUK16] als Aktoren zur Verfügung. Weitere Aktoren werden ebenfalls in die Plattform integriert. Am Roboterendeffektor können verschiedene Systeme angebracht werden. Die motorisierten Instrumente [Hut13a] sind zu Telemanipulationszwecken entworfen worden. Für weitere Anwendungsszenarien ist die Montage eines Ultraschallgeräts [Bey11], einer Knochenfräse [Böh13], eines CO_2 -Lasers und flexibler Instrumente [Min14] möglich. Zum Thema Sicherheit und Arbeitsablauf (Workflow) bauen diverse Arbeiten auf ein kamerabasiertes Sensornetz auf. Das Kamerasystem, bestehend aus verschiedenen Kamertypen, übernimmt unterschiedliche Aufgaben, welche zur Unterstützung dienen: So werden Infrarotkameras zum markerbasierten Tracking [Adv16; NDI16] von Objekten eingesetzt, PMD-Sensoren [pmd16] überwachen die Roboterpose und die Kinect-Sensoren [Mic16]

erlauben eine Personenerkennung und ein -tracking [Bey13; Bey15; Nic10]. Der Labor-Operationssaal wird von sechs ARTTRACK2 Kameras, vier Kinect-Kameras, welche von vier Kinect One abgelöst wurden, sechs weitere PMD S3 und einem PMD Cam-Cube 2.0 abgedeckt. Die unterschiedlichen Kameratypen gehen für die Erstellung von Assistenzfunktionen aufgrund ihrer unterschiedlichen Spezifikation eine Symbiose ein. Darauf basierend kann eine Gestensteuerung, eine Workflowerkennung oder auch eine Situationserkennung abgeleitet werden [Bey12; Sch14]. Eine Simulationsumgebung, welche ein Umweltmodell abbildet, aktualisiert den beobachteten Raum. Die Applikation der autonomen Kameraführung [Bih14a] durch einen Roboter ist ebenfalls integriert. Die gesamte Architektur [Bih14b] baut auf der Struktur des Robot Operating System ROS [Rob16] auf. Aufgrund der Schnittstelle ist eine schnelle Einbindung verschiedener Komponenten möglich [Nic13]. Eine detaillierte Beschreibung des Aufbaus ist in Bihlmaier et al. [Bih16b] gegeben.

Die formulierten Ziele der vorliegenden Arbeit beziehen sich auf einen redundanten Roboter, welcher in den beiden Forschungsplattformen eingesetzt wird. Eine Auseinandersetzung mit dem Arbeitsraum des Roboters ist für den Erfolg einer Operation besonders wichtig.

3.1.3 Ein redundanter Roboter und sein Arbeitsraum

Ein Roboter kann über die Angabe von Gelenkwinkel verschiedene Posen im Raum einnehmen. Die möglichen Roboterposen hängen unter anderem von der Anzahl an Freiheitsgraden und den Gelenkgrenzen ab. Eine Pose, bestehend aus Position und Orientierung, wird durch sechs Freiheitsgrade vollständig beschrieben. Ein redundantes System ist folglich überbestimmt und es sind mehrere Gelenkwinkelkonfigurationen für das Erreichen einer Endeffektorpose möglich. Die Vorgabe von Gelenkwinkeln resultiert in der Endeffektorpose. Die zugehörige Berechnung wird Vorwärtstransformation genannt und ist bei einem seriellen Robotersystem einfach zu lösen. Die Berechnung der Gelenkwinkel bei der Vorgabe einer Endeffektorpose wird durch die inverse Kinematik gelöst. Es gibt drei grundsätzliche Vorgehen zur Lösung der inversen Kinematik: geometrisch, analytisch und numerisch. Charakteristiken eines redundanten Roboters werden in Chiaverini et al. [Chi16] vorgestellt. Im Folgenden werden verschiedene Arbeiten vorgestellt, welche sich mit der Problematik der Lösung der inversen Kinematik und der Bahnplanung eines redundanten Robotersystems auseinandersetzen.

Asfour et al. [Asf03] zeigt einen Algorithmus zur Lösung der inversen Kinematik, welcher sich auf die Zerlegung des Arbeitsraums des redundanten Roboters und der analytischen Beschreibung der Redundanz des Roboters stützt. Eine Betrachtung der einzelnen Gelenkwinkelgrenzen findet nicht statt. Zusätzlich sollen Trajektorien erzeugt werden, welche den Manipulationsbewegungen eines Menschen ähnlich sind. Ein Großteil der unnatürlichen Armkonfigurationen wird durch den Algorithmus eliminiert, welcher echtzeitfähig ist.

Moradi et al. [Mor05] präsentiert ein mathematisches Verfahren zur Lösung der inversen Kinematik für einen redundanten Roboter. Auf analytischer Basis wird der aufgespannte Nullraum betrachtet. Die gesamte Lösungsmenge wird aufgezeichnet. Im Gegensatz dazu gibt die numerische Lösung nur ein lokales Ergebnis aus. Auf Basis des geometrischen Modells wird mit der Vorgabe des Nullraumparameters eine Lösung erzeugt. In dieser Arbeit soll die Ellenbogen-Bewegung minimiert werden. Deshalb wird lediglich die Einschränkung des Nullraums betrachtet und eine Kostenfunktion zur Minimierung aufgestellt.

Bertram et al. [Ber06] schlägt einen integrierten Ansatz bestehend aus der Lösung der inversen Kinematik und der Bewegungsplanung für Manipulationsaufgaben vor. Bei der Bahnplanung sollen sowohl der Konfigurationsbereich als auch Hindernisse miteinfließen, da sich mehrere Trajektorien zwischen Start- und Zielpose ergeben können, welche nicht unbedingt möglich sind. Zusätzlich wird der Suchraum durch mehrere Greifmöglichkeiten vergrößert, was zu mehreren Zielposen führt. Für die Lösung des Problems wurde eine Erweiterung des Rapidly-exploring Random Trees RRT Algorithmus vorgenommen. Eine heuristische Zielfunktion bewertet die möglichen Zielposen auf Basis des Zielobjekts in Bezug auf den Objektmittelpunkt und die Einschränkungen beim Greifvorgang.

Die Arbeit von Konietschke [Kon07] beschäftigt sich mit einer Designoptimierung und der präoperativen Planung im Bereich der Chirurgierobotik. Für die Designoptimierung wurde die Gelenkanordnung des redundanten Roboters und eines Instruments betrachtet. Die Anpassung der Gelenklänge wurde für das Szenario der minimal-invasiven Roboter-assistierten Chirurgie vorgenommen. Es wurden Optimierungskriterien definiert: Vermeidung von Gelenkwinkelgrenzen und Singularitäten, Manipulierbarkeit, Geschicklichkeit, Genauigkeit, Kollisionsvermeidung, Robustheit und die Gesamtgröße des Roboters. Die präoperative Planung bezieht sich auf die Registrierung des Patienten und der Roboter zueinander im Operationssaal. Außerdem wird die Position des Roboters und des Pivotpunkts geplant. Für die Umsetzung

werden generische Algorithmen verwendet. Für eine geschlossene Lösung der inversen Kinematik muss der Nullraumparameter gesetzt werden. Damit findet bereits eine Vorauswahl der Roboterparameter statt, welche den Arbeitsraum des Roboters beeinflussen. Die Parameterauswahl des Roboters wird nicht genauer erörtert.

Vahrenkamp et al. [Vah08] baut auf dem Verfahren von Bertram et al. [Ber06] auf. Die Methode basiert auf einem System mit 19 Freiheitsgraden. Zur Lösung der Aufgabe werden Untersysteme gebildet, welche für die relevanten Planungsphasen verwendet werden. Durch die Aufteilung liefert der Planungsalgorithmus eine schnellere Lösung. Der Algorithmus wurde gegen den Standard-RRT evaluiert und zeigt ein schnelleres Verhalten.

Stocco et al. [Sto98] definiert einen globalen Isotropieindex GII, welcher durch das Verhältnis von minimalen und maximalen singulären Werten im Arbeitsraum gebildet wird. Die Leistungsfähigkeit eines Roboters wird damit über einen skalaren Wert bewertet. Das Ziel ist es, eine Entwurfsrichtlinie für die optimale geometrische Anordnung der Sechs-Achsigen-Stewart-Plattform zu erhalten. Die Berechnungen stützen sich auf die Massenmatrix und die Jacobi-Matrix.

Shimizu et al. [Shi08] konzentriert seine Arbeit auf die Lösung der inversen Kinematik. Dabei steht nicht die Berechnung der Gelenkwinkel einer zugehörigen Roboterendeffektorpose im Vordergrund, sondern die Gelenkwinkelgrenzen, welche die Bewegung auf dem Redundanzkreis einschränken. Die überwiegend geometrischen Überlegungen zeigen als Resultat die Gelenkwinkelgrenzen der einzelnen Gelenke zu einer Roboterendeffektorpose. Dieses Vorgehen wurde von Kunze [Kun12] für die Forschungsplattform OP:Sense übernommen und liegt dieser Arbeit zugrunde.

Zacharias [Zac11] zeigt eine Art der Arbeitsraumanalyse, welche neben der Position auch die Orientierung beinhaltet. Die neu eingeführte Capability Map soll eine Aussage zur Prozessplanung geben und gleichzeitig die Eignung eines Roboters für eine Aufgabe überprüfen. Die einzelnen Roboterparameter werden nicht genauer betrachtet, da auch keine inverse Kinematik umgesetzt wird. Stattdessen werden zufällige Gelenkwinkel ausgegeben, deren Aussage über die Erreichbarkeit eines Punkts im Raum (Voxelgrid) zugeordnet wird. Die Visualisierung gibt dem Benutzer einen Überblick über die Erreichbarkeit des Roboters im Raum inklusive der Orientierung.

Lohmann et al. [Loh12] stellt ein Verfahren zur schnellen Arbeitsraumdarstellung eines redundanten Roboters am Beispiel des DLR MIRO Roboterarms vor. Der Algorithmus erstellt eine Halbschale, welche aufgrund der Gelenkgrenzen und der

Pivotpunkt-Restriktion Einkerbungen enthält. Die Erreichbarkeitsprüfung bezieht sich allein auf die Position. Iterativ werden die Positionen abgefragt, welche sich entsprechend des Ergebnisses entlang der Erreichbarkeitsgrenze befinden. Die Einkerbung stellt eine Arbeitsraumbegrenzung dar. Dem Chirurgen soll auf diese Weise eine Möglichkeit gegeben werden, bei der er prüfen kann, ob sich seine Zielregion innerhalb der Arbeitsraumbegrenzungen befindet. Das Verfahren bezieht jedoch keine weiteren Roboterparameter in die Analyse mit ein. Weiter können Arbeitsraumgrenzen innerhalb der Schale nur zufällig gefunden werden. Hutzl et al. [Hut13b] baut auf dem Algorithmus auf und fügt weitere Parameter zur Lösung der inversen Kinematik hinzu. Neben dem Schalenmodell wird der gesamte Arbeitsraum (Halbkugel) inklusive Pivotpunkt betrachtet. Dabei fällt auf, dass sich die Erreichbarkeit in Bezug auf die Wahl der Parameter unterscheidet.

Die bisherigen Arbeiten setzten sich mit dem Arbeitsraum eines redundanten Roboters auseinander. Während von [Mor05], [Shi08] auf die Möglichkeiten der Berechnung der inversen Kinematik auf analytischem Weg eingegangen wird, verwenden andere eine numerische Lösung [Kon07]. Eine weitere Analyse kann durch die Lösung der direkten Kinematik durchgeführt werden [Zac11]. Jedoch wurde bisher noch nicht umfangreich auf die Auswirkung der einzelnen Parameter eingegangen.

3.2 Neuerung

In der Chirurgierobotik wurde bereits festgestellt, dass die Positionierung des Roboters in Relation zum Drehpunkt (Pivotpunkt) nicht trivial ist. Die dazugehörige Zielregion wird abstrahiert in einer Optimierung dargestellt. Zu Beginn wurde die Zielregion mit einfachen Geometrien wie einem Quader vereinfacht. Für diesen Fall wird jedoch nicht der Weg zur Zielregion, welcher ebenfalls möglich sein muss, miteinbezogen. Die Vereinfachung der Zielregion durch einen Kegel bot hierfür eine Verbesserung. Der Aufbau einer Wissensbasis durch aufgenommene Trajektorien einer Operation bietet eine bessere Auflösung der Zielregion. Die Unterteilung einer Operation in Phasen, welche unterschiedliche Arbeitsräume repräsentieren, erhöht die Komplexität in gleichem Maß wie die Aussagegenauigkeit über die Zielregion. Durch Clustermethoden wird eine verallgemeinerte Aussage über die Trajektorie selbst möglich. Der Ansatz von Weede [Wee13a] schlägt die Verbindung der Clusterzentren vor.

An dieser Stelle setzt die Verbesserung durch diese Arbeit in Bezug auf die Arbeitsregion ein. In der Planungsphase muss ausreichend Varianz geboten sein. Auch in

Bezug auf die Robustheit und Stabilität einer Untersuchung wird es vorgezogen, sich nicht auf das alleinige, abgeleitete Wissen einer (verallgemeinerten) Trajektorie zu stützen. Gleichzeitig wird aber die Chance einer Optimierung durch Wissen erkannt. Es wird stattdessen eine Ableitung der Trajektorien zu einem Gitternetz vorgeschlagen. Dieses Gitternetz kann durch eine ummantelnde Hülle oder einen verallgemeinerten Trajektorienschlauch, erstellt auf Basis der Clustervarianz, dargestellt werden.

Die Redundanz eines Roboterarms bietet einen größeren Lösungsraum, welcher jedoch von den Startbegebenheiten (Parametern) abhängt. Eine spezifische Analyse, welche die analytische Lösung der inversen Kinematik einschließt, wurde bisher noch nicht umgesetzt. Außerdem gehen bisherige Arbeitsraumanalysen eines redundanten Roboters auf den gesamten Arbeitsraum ein und prüfen die Erreichbarkeit. Vernachlässigt wird auch die Gelenkbewegung, welche als Kriterium zur Sicherstellung der Pivotpunkt-Restriktion gewählt werden kann. Die Methoden von Gosselin et al. [Gos91] und Stocco et al. [Sto98] erscheinen für eine Analyse einzelner Parameter nicht geeignet, da sie einen globalen Wert wünschen, der sich unter anderem auf die Jacobi-Matrix stützt.

Deshalb werden in dieser Arbeit drei Indikatoren festgelegt, welche sich an das bestehende Performanzmaß anlehnen. Anstelle die Jacobi-Matrix zu betrachten, wird aus der Lösung der inversen Kinematik nach Shimizu et al. [Shi08] das Performanzmaß abgeleitet. Die Untersuchungen ergeben für einen gewählten Parametersatz ein Güte, sodass ein Vergleich von unterschiedlichen Arbeitsgebieten und Parametersätzen möglich ist.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein Mittel zu schaffen, welches den Nutzen der Redundanz über mehrere Operationsphasen verdeutlicht. Die Einflussfaktoren der Roboterperformanz werden hervorgehoben und in einem Parametersatz präsentiert. Es ist nicht notwendig, den gesamten Arbeitsraum des Roboters zu betrachten, sondern den gewünschten Arbeitsraum genauer zu untersuchen. Mit der analytischen Lösung der inversen Kinematik wird dies erstmals umgesetzt.

Der Arbeitsraum wird wissensbasiert aus Trajektorien eines Operationstyps abgeleitet und kann durch die Auflösung der Zielregion präzisiert oder verallgemeinert werden. Durch die Betrachtung eines Operationsmodells ergeben sich phasenbezogene Arbeitsräume, welche ihr Optimum an Roboterperformanz in einem Parametersatz finden. Für unterschiedliche Operationsphasen entstehen gute und schlechte Parametersätze.

Eine Lücke in der bisherigen Forschung wird durch eine Verbindung zwischen einer phasenbezogenen Parameteranalyse und dem Finden eines gemeinsamen Parameters geschlossen.

KAPITEL 4

Patienten- und Operationsmodell

Für das Szenario „minimal-invasive Roboter-assistierte Chirurgie“ wird zunächst das Patienten- und im Folgenden das Operationsmodell vorgestellt. Während im ersten Abschnitt des Kapitels auf das Patientenmodell (vgl. Kap. 4.1) und dessen Randbedingungen eingegangen wird, beschreibt der zweite Abschnitt (vgl. Kap. 4.2) die Vorgehensweise zur Abbildung des Operationsverlaufs. Es werden Methoden des Clusterings sowie Markov Modelle verwendet und erweitert, mit dem Ziel, den genutzten Arbeitsraum einzelner laparoskopischer Instrumente darzustellen.

4.1 Patientenmodell

Als Grundlage für das Patientenmodell steht für diese Arbeit das Phantom OpenHELP [Ken15] zur Verfügung. Das Phantom ist einem männlichen Patienten nachempfunden und aus medizinischen Daten abgeleitet. Dabei ist lediglich der Torso des Menschen nachgebildet. Das Phantom besitzt ein ungefähres, äußeres Abmaß von $689 \times 396 \times 241 \text{ mm}^3$. Dies entspricht einer 1:1 Skalierung im Vergleich zum realen Patienten. Der Bereich des Beckens ist ausgehöhlt und im Inneren dieses Teils findet die ausgewählte Operation statt (vgl. Kap. 4.2). Das Becken ist zirka $252 \times 376 \times 206 \text{ mm}^3$ groß.

Für das Phantom stehen zwei unterschiedliche Arten von Bauchdecken zur Auswahl. Zum einen existiert eine flexible Bauchdecke, welche mit Magneten befestigt wird. Ähnlich wie beim realen Patienten wird hier mithilfe eines Insufflators ein Gas (Kohlenstoffdioxid oder Helium) in den Bauchraum geblasen, um die Sichtverhältnisse

zu verbessern. Gleichzeitig wird dadurch ein größerer Manipulationsspielraum erreicht, da sich der Bauch aufbläht.

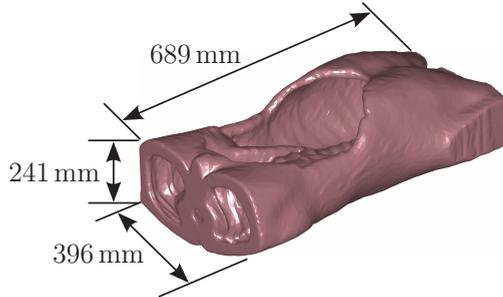
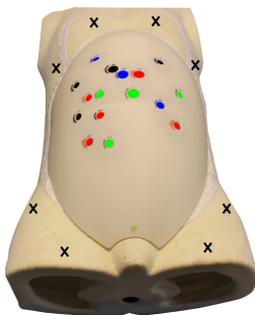
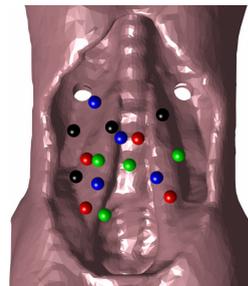


Abbildung 4.1: OpenHELP: Die Dimension des Phantoms

Die flexible Bauchdecke soll die Beweglichkeit einer realen Bauchdecke besitzen und die Haut des Bauches nachahmen. Die Zugänge, welche für die laparoskopischen Instrumente gesetzt werden müssen, können frei gewählt werden. Die andere Bauchdecke des Phantoms ist starr. Sie wird auf den Torso aufgesetzt und verschließt somit das Phantom. In diesem Fall sind die Zugänge vordefiniert. Die 16 Zugänge sind farblich markiert und bilden vier verschiedene Konfigurationen, welche entsprechend markiert sind. Es sind verschiedene Variationen an Zugängen für eine Operation möglich. Für die weiteren Untersuchungen spielt die Art der Bauchdecke eine untergeordnete Rolle. Es wird die starre Bauchdecke und die darauf blau gekennzeichneten Zugänge verwendet.



(a) Das reale Phantom wurde mittels 3D-Druckverfahren hergestellt.



(b) Für die Simulation wird das 3D-Modell verwendet.

Abbildung 4.2: Die verwendeten Zugänge sind in Blau gekennzeichnet. Es sind drei Zugänge für manipulierende Instrumente und ein weiterer für das Endoskop vorgesehen. Die als schwarze Kreuze markierten Stellen sind im CT-Bild sichtbar und dienen der Registrierung des Phantoms im Raum.

4.1.1 Modellanpassung durch anatomische Landmarken

Eine patientenspezifische Auslegung soll mithilfe von Landmarken möglich sein. So kann die Anatomie des jeweiligen Menschen berücksichtigt werden und als Eingabegröße in die Berechnung mit einfließen. Dazu dienen anatomische Landmarken, welche durch einen Algorithmus im Idealfall automatisch erkannt werden. Dabei werden natürliche Landmarken verwendet, wie beispielsweise ein Teil eines Organs oder eine Knochenstruktur. Hierbei muss der Prozess des Findens von Landmarken und das Segmentieren der Landmarke in einem medizinischen Schnittbild (Computertomografie CT, Magnetresonanztomografie MRT) getrennt betrachtet werden. Während das Bestimmen von Landmarken häufig durch Fachkräfte (Chirurg) übernommen wird, gibt es schon viele Ansätze zur automatischen Segmentierung [Nor15]. Nach dem Erkennen der Landmarke kann eine semantische Information hinterlegt werden. Mithilfe der zusätzlichen Information können Distanzrelationen zwischen Landmarken gebildet werden. Das Patientenmodell wird auf diese Weise an den Patienten angepasst.



Abbildung 4.3: Aus den Schnittbildern sind die folgenden Organe segmentiert worden: Die Leber befindet sich auf der linken Seite im Vordergrund. Dahinter symmetrisch zur Wirbelsäule sind die Nieren zu erkennen. Auf der rechten Seite oberhalb der rechten Niere sitzt die Milz.¹

Für die Positionierung des Roboters zum Patienten ist die Position des Trokars auf der Bauchoberfläche relevant. In Kapitel 5.3 wird die Relevanz der Relation zwischen Roboter und Trokar detailliert beschrieben. Die Zugangsplanung betrachtet das Problem der Positionierung der Trokare auf der Bauchoberfläche. Dabei sollen die Trokare so platziert werden, dass die Instrumentenlänge ausreicht und der Manipulations-

¹ erstellt von Dipl.-Inform. Tobias Norajitra, Deutsches Krebsforschungszentrum, Heidelberg

spielraum groß genug ist [Wee13b]. Da hier die Analyse des Roboters im Vordergrund steht, wird der Trokar als bereits fix gesetzter Punkt gesehen. Von technischer Seite ist der Trokar der Pivotpunkt der Manipulation. Ein gutes Beispiel für eine ähnlich bleibende Position des Trokars liefert der Trokar für das Endoskop. Dieser wird in der Regel in der Nähe des Bauchnabels gesetzt. Dies hat vor allem kosmetische Gründe und wird durch die Vorschläge aus Carus [Car10] für Trokarpositionen verschiedener Operationstypen gestützt.

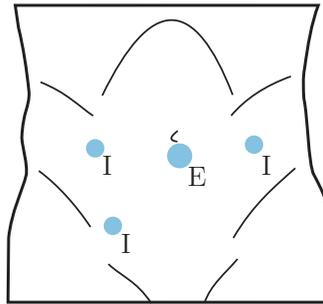


Abbildung 4.4: Eine mögliche Art der Trokarpositionierung für die laparoskopische Rektumresektion [Car10] ist gezeigt. Die Trokarpositionen für die Instrumente sind mit einem **I** abgekürzt. Der Trokar für das Einführen des Endoskops ist als **E** beschrieben.

Erst nach dem Setzen des ersten Trokars kann mit der Insufflation der Bauchhöhle begonnen werden. Der Trokar für das Endoskop wird normalerweise zu Beginn platziert, da der Chirurg anschließend von innen die Position der anderen Trokare wählen kann. Damit soll vermieden werden, dass sich Risikostrukturen (Blutgefäße) an den Stellen des Einstichs befinden. Mit der Insufflation hat sich die Bauchoberfläche gegenüber eines präoperativen Schnittbilds verändert. Darauf wird im nächsten Abschnitt näher eingegangen.

4.1.2 Registrierung im Operationssaal

Für die Verwendung von präoperativen² Bildmaterial nimmt der Chirurg eine Hand-Auge-Kalibrierung vor. Dies geschieht mithilfe seiner Fähigkeit, medizinische Bilder zu lesen und auf den Patienten übertragen zu können. Dabei wird eine sehr gute dreidimensionale Vorstellungskraft des Chirurgen gefordert. Bei einem minimal-invasiven Eingriff im abdominalen Bereich wird ein Gas eingeleitet. Dadurch ergibt sich eine weitere Herausforderung, bei der zwei Zustände mit unterschiedlichen

² präoperative: Phase vor einer (chirurgischen) Operation [Dud07]

Ausgangsgrößen miteinander verbunden werden müssen. In diesem Fall muss ein zweidimensionales Schnittbild auf den Patienten, welcher sich durch die Bauchwölbung verändert hat, übertragen werden.

Aus diesem Grund wird eine Registrierung des Patienten im Operationsaal für sinnvoll erachtet. Darüber hinaus basieren die Daten, auf denen die Planung geschieht, sowohl aus der präoperativen als auch aus der intraoperativen³ Phase. Für Therapiezwecke und zur Analyse der Operation können auch die Aufnahmen nach einer Operation von Interesse sein. Die Überlegungen zur Registrierung des Patienten dienen der Nutzung und Weiterverarbeitung von Daten. So können Methoden realitätsnah getestet werden. Herausfordernd ist dabei der Umstand, dass diese Daten keine Laborqualität besitzen. Deshalb gelten bestimmte Randbedingungen, die von technischer Seite gelöst werden müssen.

Die Wahrscheinlichkeit, dass für einen Patienten alle Aufnahmen existieren, ist aufgrund des normalen Klinikalltags gering. Das Schnittbild kann bereits sechs Monate vor dem chirurgischen Eingriff erstellt worden sein. Denn nicht für jede Operation wird der Patient um eine Schnittbildaufnahme gebeten. Es ist ebenfalls möglich, dass bei den intraoperativen Aufnahmen bereits alle Trokare platziert sind oder nur der Trokar für das Endoskop gesetzt ist. Außerdem kann es dazu kommen, dass ein Patient früher entlassen wird und die letzte Aufnahme fehlt. Es ist daher damit zu rechnen, dass die Datensätze unvollständig sind. Da es sich um Daten aus dem Klinikalltag handelt, können bestimmte Ablaufbestimmungen nicht gefordert werden.

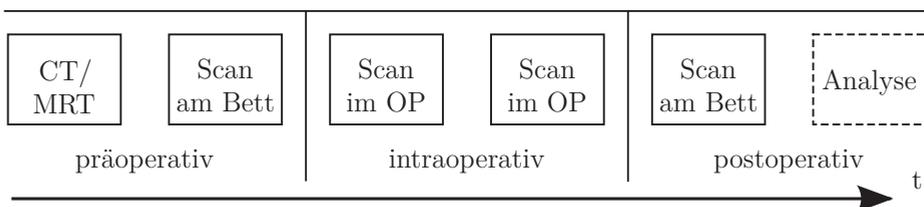


Abbildung 4.5: Prozessablauf der Patientenregistrierung

³ intraoperativ: Phase während des (chirurgischen) Eingriffs [Dud07]

Das Konzept zeigt die fünf Aufnahmezeitpunkte, welche im Idealfall einfach miteinander zu verknüpfen sind. In der präoperativen Phase werden ein Schnittbild (MRT oder CT) und ein 3D-Scan am Krankenbett erfasst. Nachdem der Patient auf dem Operationstisch liegt und die Operation vorbereitet wurde, werden zwei weitere 3D-Scans durchgeführt. Dies findet in der intraoperativen Phase statt. Es wird ein 3D-Scan vor und ein 3D-Scan nach der Insufflation aufgenommen. Die postoperative⁴ Aufnahme findet nach der Operation am Krankenbett des Patienten statt.

Aus dem Schnittbild des Patienten ist an dieser Stelle nur die Bauchoberfläche relevant. Diese wird mithilfe eines Schwellenwerts aus den Daten gefiltert. Während der Aufnahme liegt der Patient auf einer Liege. Oberhalb des Patienten befindet sich Luft. Daher kann die Luft-zu-Patienten-Grenze genutzt werden. Es folgt eine dreidimensionale Punktwolke der Bauchoberfläche. Zur Registrierung zwischen der Extraktion des Schnittbilds und dem 3D-Scan vor der Insufflation oder des präoperativen 3D-Scans wird der Iterative-Closest-Point ICP Algorithmus [Bes92; Che92] verwendet. Der ICP Algorithmus minimiert den euklidischen Abstand zwischen Quell- und Zielpunktwolke. Mit der Annahme, dass die grobe Orientierung ($\pm\Delta$ Orientierung $\ll 180^\circ$) bereits stimmt, wird die Position des Bauchnabels als Landmarke verwendet. Im Fokus steht die Translation der Punktwolken zueinander. Für das Einlesen und Verarbeiten der Schnittbilder (DICOM-Format) sowie den ICP Algorithmus bietet MATLAB⁵ die entsprechenden Funktionen an.

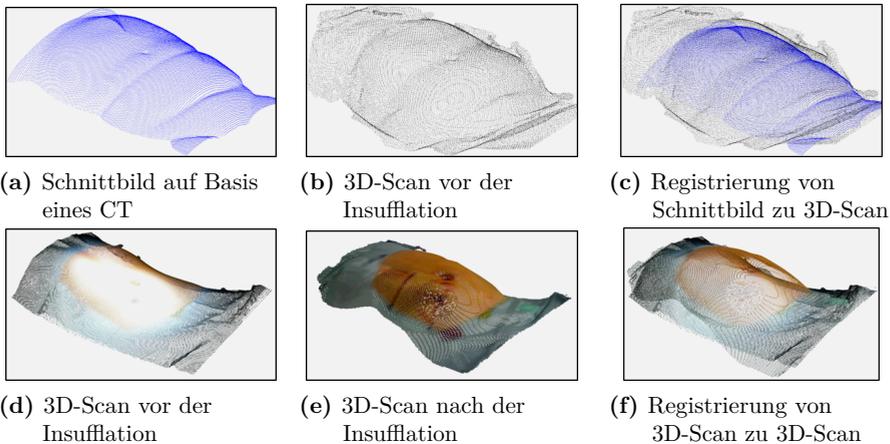


Abbildung 4.6: Punktwolkenregistrierung beim Patienten

⁴ postoperative: Phase nach dem chirurgischen Eingriff [Dud07]

⁵ Produkt der Fa. MathWorks [The16], Version 2015b: *dicomread()*, *pcregrid()*

Ein halbautomatisches Programm unterstützt den Anwender beim Registrierungsprozess der zwei intraoperativen 3D-Scans. Die 3D-Scans werden durch ein von Hand geführtes Gerät erstellt. Die Koordinatensysteme der 3D-Scans sind folglich verschieden. Jedoch kann die Annahme getroffen werden, dass die Aufnahmen von der ungefähr gleichen Position entsteht. Außerdem hat sich der Zustand der Bauchoberfläche verändert. Der von Hand geführte Scanner liefert neben der Punktwolke auch die Farbinformation zu den einzelnen Punkten. Der veränderliche Bereich – das ist hier die Bauchdecke – wird aus den Punktwolken für die Registrierung entfernt. Durch die Operationslampe ist der Bauchbereich in der Regel überbelichtet. Dieser Effekt kann genutzt werden, um die nicht abgedeckte Bauchoberfläche auf Basis der Farbwerte zu extrahieren. Außerdem ist es mithilfe eines Linienzugs möglich, eine Segmentierung durchzuführen.

Die segmentierten Punktwolken werden einem Algorithmus als Eingangsgröße übergeben. Dazu stehen zwei Algorithmen aus der Point Cloud Library PCL [Poi16] zur Verfügung: Random Sample Consensus RANSAC [Fis81] und ICP. Der RANSAC Algorithmus basiert auf der Zuordnung von Merkmals-Histogrammen. Dabei wird für jeden Punkt aus Quell- und Zielpunktvolke ein Histogramm erstellt. Er identifiziert die aussagekräftigsten Histogramme und ordnet diese aus Quell- und Zielpunktvolke zu Korrespondenzen. Zufällig werden Korrespondenzen gewählt und die Transformation berechnet. Dies wird k -mal wiederholt und die beste Transformation als Lösung ausgegeben. Die subjektive Betrachtung über die Qualität der Registrierung ist um zwei messbare Qualitätskriterien ergänzt worden. Dazu werden die Normalen der Punkte aus dem segmentierten Bauchbereich betrachtet. Für jede Punktwolke des segmentierten Bauchbereichs wird die gemittelte Normale berechnet. Der Differenzwinkel sollte möglichst klein, am besten unter 5° liegen. Als zweites Qualitätsmerkmal kann der Funktionswert des verwendeten Algorithmus hinzugezogen werden. Er gibt den Fehler der Minimierungsfunktion wieder, welcher sich aus dem quadratischen euklidischen Abstand zur Korrespondenz ergibt. Ein normierter Wert kann über die Anzahl von genutzten Korrespondenzen gebildet werden und ist somit vergleichbar.

Wenn der Roboter die Kamera für die Aufnahmen der dreidimensionalen Punktwolken führt, ist die Fehleranfälligkeit deutlich reduziert. Die intraoperativen Aufnahmen vor und nach der Insufflation sind dennoch sinnvoll, denn der nicht-insufflierte Zustand findet seine Verwendung bei der Registrierung zu den prä- und postoperativen Phasen.

Der postoperative 3D-Scan findet seine Verwendung in der Analyse. Die gesetzten Zugänge können auf der Bauchoberfläche ermittelt und im Schnittbild in Bezug auf die Zielregion, bspw. ein Organ, gesetzt werden. Das wiederum hilft bei der Zugangsplanung.

Für die Roboterpositionierung ist die Registrierung von Roboter zum Patienten notwendig. Die Wichtigkeit der Relation zwischen Trokar und Roboterbasis wird später nochmals hervorgehoben. Erst mit einer Registrierung im Operationssaal können präoperative Planungsdaten umgesetzt werden, auch weil sich die Bauchdecke durch das Insuffizieren verändert und einen Einfluss auf die Position des Bauchnabels besitzt. Das wirkt sich auf die Randbedingungen der Analyse der Roboterparameter aus.

4.2 Operationsmodell

Um die Zielregion und den Bewegungsablauf eines bestimmten Operationstyps beschreiben zu können, wird ein Operationsmodell erstellt. Als Eingabegröße dient die Werkzeugspitze eines laparoskopischen Instruments oder eines Endoskops. Der Vorgang wird wissensbasiert analysiert, sodass eine Arbeitsraumaussage für ein Werkzeug innerhalb einer definierten Operation hervorgeht (vgl. Kap. 4.2.1, 4.2.2). Die Operation kann in verschiedene Phasen und Schritte unterteilt werden und dabei entstehen Untermodelle einer Operation. Eine Beschreibung der medizinischen Handlung ist in Kapitel 4.2.3 dargestellt. Das Operationsmodell dient in Verbindung mit dem Robotermodell (vgl. Kap. 5) als Grundlage für die Optimierung des Roboters selbst (vgl. Kap. 6).

4.2.1 Beschreibung der Zielregion durch eine ummantelnde Hülle

Mit einer Bounding Box werden Objekte umgeben und machen damit einen Bereich aus, in der sich die Region im dreidimensionalen Raum befindet [Hut15a]. Die Methode ist von der Zeit unabhängig. Es wird angenommen, dass sich die Trajektorien eines Werkzeugtyps innerhalb einer Operation in der gleichen Bounding Box befinden. Die Trajektorien dienen als Eingangsgröße für eine Wissensbasis bzw. einen Algorithmus. Das Ergebnis des Algorithmus resultiert in einer ummantelnden Hülle der aufgenommenen Trajektorien. Eine Punktwolke mit der gewünschten Auflösung entsteht, wenn das Innere der Hülle mit einem Gitter versehen wird.

Da die zeitliche Abfolge der Positionswerte der Trajektorien für dieses Verfahren nicht relevant ist, entsteht eine Punktwolke \mathbf{pcl}_{traj} . Eine einzelne Trajektorie $traj$ wird durch Positionen beschrieben.

$$\begin{aligned} traj_i &= (\vec{p}_{i,1}, \dots, \vec{p}_{i,n_i}) & \vec{p}_{i,k} &\in \mathbb{R}^3 \\ pcl_{traj} &= (traj_1, \dots, traj_{t_i}) & traj_m &\in \mathbb{R}^3 \end{aligned}$$

Dabei stellt n_i die Anzahl von Positionswerten der Trajektorie i und t_i die Anzahl von aufgenommenen Trajektorien dar. In dieser Punktwolke befinden sich nur einzigartige Werte. Redundante Positionswerte werden verworfen, da sie keinen Vorteil bewirken.

Die Auflösung der resultierenden Punktwolke muss definiert werden. Das Abstraktionslevel der Trajektorien kann damit frei gewählt werden. Das Verfahren verläuft schichtweise entlang einer kartesischen Achse und kann auf alle drei Achsen übertragen werden. Dazu werden die einzelnen Schichten auf Basis der Minima und Maxima einer Achse bestimmt - entsprechend der Auflösung res (vgl. Glg. 4.1). Innerhalb jeder Schicht werden die Grenzen im kartesischen Koordinatensystem betrachtet. Die Grenzen beziehen sich auf die beiden verbleibenden Achsen.

$$\begin{aligned} \vec{p} &= (p_x, p_y, p_z)^T \\ fac_{res} &= \frac{1}{res} \end{aligned} \tag{4.1}$$

Am Beispiel der z -Achse: Es soll der kleinste und größte Wert p_z aus den Positionsdaten aller Trajektorien pcl_{traj} ermittelt werden. Mithilfe der Auflösung werden das Minimum und das Maximum entsprechend gerundet⁶. Die einzelnen Schichten ergeben sich aus z_{min} , z_{max} und der Auflösung. Die erste Schicht enthält die Punkte, welche auf der z -Achse zwischen $z_{min} - \frac{res}{2}$ und $z_{min} + \frac{res}{2}$ liegen.

⁶ verwendete Funktion aus MATLAB [The16], Version 2015b: $\text{floor}()$, $\text{ceil}()$

$$\begin{aligned}
 z_{min} &= \frac{\text{floor}(p_{z,min} \cdot fac_{res})}{fac_{res}} \\
 z_{max} &= \frac{\text{ceil}(p_{z,max} \cdot fac_{res})}{fac_{res}} \\
 z_{layer} &= z_{min}, z_{min} + 1 \cdot res, \dots, z_{min} + k \cdot res, z_{max}
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

Im nächsten Schritt werden diese Punkte ebenfalls auf ihr Minimum und Maximum der verbleibenden zwei Koordinatenachsen x und y überprüft. Wie auch bei der z -Achse werden diese Werte gerundet. Aus der Punktwolke der ersten Schicht entsteht ein Gitter parallel zur xy -Ebene auf der Höhe von z_{min} . Das Gitter wird in x -Richtung durch x_{min} und x_{max} begrenzt. Äquivalent dazu werden die Grenzen auf der y -Achse berechnet. Der Abstand der Gitterpunkte ergibt sich aus der Auflösung res . Aus der heterogenen Punktwolke ist ein Gitter entstanden, welches eine Schicht diskretisiert beschreibt. Der Vorgang des Diskretisierens wird für alle Schichten bis z_{max} durchgeführt. Aus diesem Vorgang resultiert eine diskretisierte Punktwolke, welche die Trajektorien in z -Richtung umgibt.

Durch die Pivotpunkt-Restriktion kann davon ausgegangen werden, dass es eine Vorzugsrichtung gibt. In diesem Fall liegt die Vorzugsrichtung auf der z -Achse des WKS . Die Trajektorien werden daher bereits ausreichend von der ersten Iteration, welche entlang der Vorzugsrichtung ausgeführt wird, beschrieben.

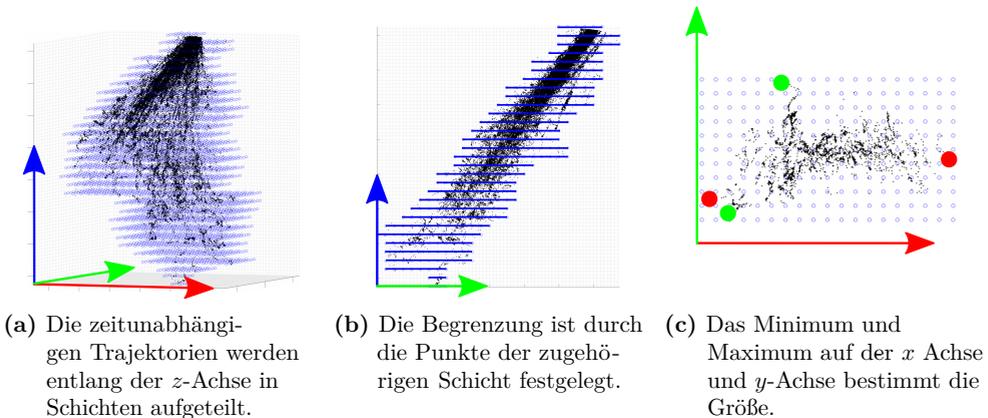


Abbildung 4.7: Die Trajektorien werden zeitunabhängig betrachtet und anschließend in Schichten, welche durch die Auflösung definiert wurden, eingeteilt. In den Schaubildern ist der Vorgang entlang der z -Achse gezeigt.

Der Vorgang kann für die x -Achse und die y -Achse wiederholt werden. Es entstehen drei wertdiskrete Punktwolken, welche im Anschluss überlagert werden. In Abbildung 4.8 sind die Punkte einer Schicht der z -Achse gezeigt. Der blaue Quader stellt die Punkte, welche auf Basis der Minima und Maxima der z -Achse erstellt wurden. Dazu sind zusätzlich die Schichten, welche sich entlang der x -Achse und y -Achse ergeben, gezeigt. Die Schichten den x -Achse und y -Achse sind zusammengefasst als Polyeder dargestellt. Für eine Zusammenführung der Punktwolken stehen verschiedene Vorgehensweisen zur Verfügung: Zum Ersten können alle Punkte der drei Punktwolken zusammengefasst werden. Eine weitere Möglichkeit stellt die Anforderung, dass die Punkte mindestens in zwei von drei Punktwolken vorkommen müssen, dar. Dass die Punkte der Ergebnis-Punktwolke in allen drei Punktwolken zu finden sein müssen, ist die letzte vorgestellte Art. Bei allen Varianten enthält die Ergebnis-Punktwolke keine redundanten Punkte. Diese werden, wie auch bei der Start-Punktwolke, entfernt.

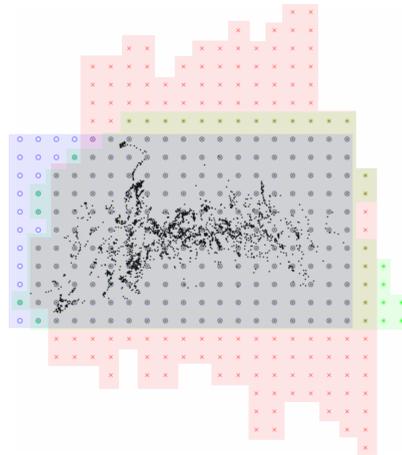


Abbildung 4.8: Die Überlagerung der Punktwolken ist auf eine Schicht der z -Achse projiziert.

In Hinblick auf die Anwendung ist es wichtig, dass eine zusammenhängende Punktwolke entsteht. Einzelne Inseln als Ableger von der Hauptpunktwolke sollten nicht vorhanden sein. Ein Voxelgrid erfüllt deshalb die Anforderungen nicht. Außerdem ist es gewünscht, dass Hohlräume vermieden werden. Dagegen sollen Einschnitte abgebildet werden, sodass nicht eindeutig von einer konvexen oder konkaven Hülle ausgegangen werden kann. Das Ziel der Abstraktion des Zielgebiets kann mit der Diskretisierung der Trajektorien erreicht werden.

4.2.2 Beschreibung der Zielregion durch Clustering

Für die Beschreibung der Zielregion einer bestimmten chirurgischen Operation wird angenommen, dass die Trajektorien der Werkzeugspitze eine Ähnlichkeit aufweisen [Blu08]. Eine Wissensbasis wird mithilfe von Trajektorien eines Werkzeugtyps für einen Operationstyp gebildet. Eine aufgenommene Trajektorie stellt die dreidimensionale Position der Werkzeugspitze in einer zeitlichen Reihenfolge dar. Mehrere Trajektorien des gleichen Werkzeugs eines Operationstyps zeigen eine charakteristische Form auf. Die kumulierten Positionen in einer Region werden als wichtige Bereiche bezeichnet. Sie stellen die Zielregion bzw. den Operationsbereich dar, welche aus mehreren Trajektorien erstellt wird. Mithilfe von Methoden aus dem Gebiet des Clusterings kann eine Aussage über das Gebiet und die zeitliche Abfolge gegeben werden. [Hut14]

Der Prozess des Clusterings ist in mehrere Schritte unterteilt. Zu Beginn wird eine dreidimensionale Punktwolke aus allen Trajektorien erstellt. Lediglich die Positionsdaten der Trajektorie sind hierfür relevant und damit erstmal unabhängig von der zeitlichen Reihenfolge. Die zeitunabhängigen Daten werden im Anschluss an einen Clusteralgorithmus übergeben. Der Clusteralgorithmus benötigt als Eingabegrößen noch ein Clusterkriterium und die Anzahl von Cluster. Als Kriterium für das Clustering wird die Euklidische Distanz gewählt. Die Anzahl der Cluster $N_{cluster}$ kann an die jeweilige Operationsphase bzw. an die Punktwolke angepasst werden.

Es wird eine hierarchische Clusteranalyse durchgeführt. Dies zeichnet sich durch ein distanzbasiertes Verfahren aus. Der Complete-Linkage Algorithmus [Kin67] zeichnet sich dadurch aus, dass er bei der Clusterzuordnung von Punkten den größten Abstand eines Punkts innerhalb des bestehenden Clusters betrachtet. Dadurch sollen Interessenbereiche oder auch Ausreißer besser dargestellt werden.

Die Nutzung von redundanten Positionen wird beim Clustering selbst vermieden. Die Anzahl der Punkte hat erheblichen Einfluss auf die Laufzeit des Algorithmus. Deshalb werden Informationen mit dem gleichen Inhalt in diesem Schritt zusammengefasst. Je nach Auflösung und Genauigkeit können die Messdaten angepasst werden. Damit kann die Anzahl der Eingabewerte verringert werden. Die redundanten Positionen beeinflussen nicht das Clusterverfahren selbst.

Nach dem Erstellen der Cluster werden die Kovarianz und der Mittelwert der einzelnen Cluster berechnet. Dazu werden die redundanten Informationen wieder in die Analyse aufgenommen. Durch das Gewicht der einzelnen Positionen können sich

der Schwerpunkt und ebenso die Kovarianz des Clusters verschieben. Die zeitliche Reihenfolge ist in diesem Schritt nicht relevant.

Zur Veranschaulichung des Ergebnisses werden die gebildeten Cluster als Ellipsoide dargestellt. Gleichung 4.3 beschreibt den Mittelwert $\vec{\mu}_i$ und gibt die Position des Clusters i im Raum wieder. Mithilfe der Kovarianz Σ kann die Form des Ellipsoids berechnet werden (vgl. Glg. 4.4). Sie beinhaltet die Hauptachsen des Ellipsoids.

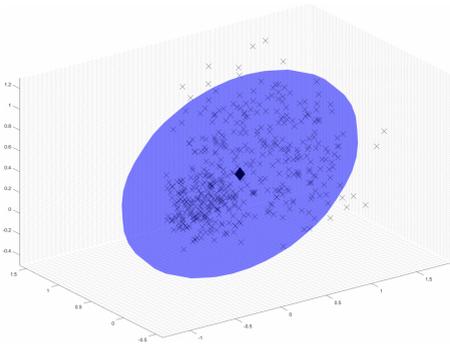
$$\vec{\mu}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} \vec{p}_{i,k} \quad (4.3)$$

$$\Sigma_i = \frac{1}{n_i - 1} \sum_{k=1}^{n_i} (\vec{p}_{i,k} - \vec{\mu}_i) \cdot (\vec{p}_{i,k} - \vec{\mu}_i)^T \quad (4.4)$$

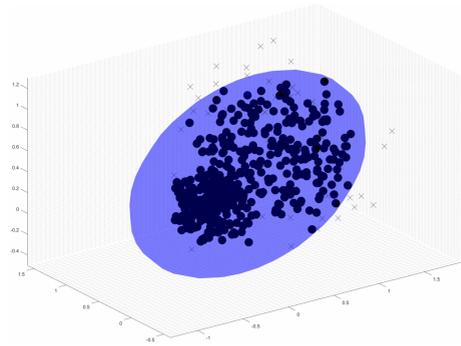
Die Punktwolke eines Clusters i beinhaltet die Punkte $\vec{p}_{i,1}, \dots, \vec{p}_{i,n_i} \in \mathbb{R}^3$. Die Anzahl von Punkten wird als n_i bezeichnet.

Es folgt eine Analyse der einzelnen Cluster. Dabei sollen Auffälligkeiten in den Daten erkannt werden. Dazu gehören beispielsweise Ausreißer, welche aus den Daten entfernt werden sollen. Ein Ausreißer-Cluster definiert sich dadurch, dass es ausschließlich Positionen einer Trajektorie beinhaltet. Zudem kann das Konfidenzintervall des Clusters betrachtet werden. Es folgt eine Analyse der Dichte des Clusters aus den Informationen der Kovarianz und der zugehörigen Punkte. Um ein Cluster, als Ellipsoid gesehen, kompakter und konzentrierter weiter verarbeiten zu können, wird der Erwartungsbereich untersucht. So können Punkte entfernt werden, welche außerhalb des gewünschten Erwartungsbereichs liegen. Eine erneute Berechnung des Mittelwerts und der Kovarianz verändert den jeweiligen Wert.

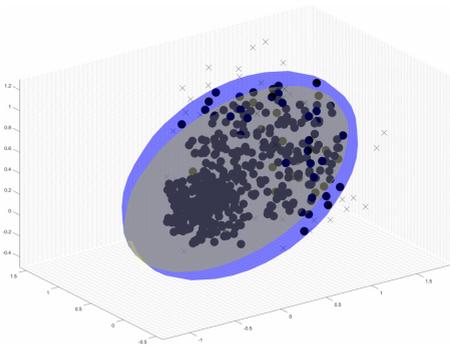
Die Abbildung 4.9 zeigt die einzelnen Schritte der Modifikation des Clusters. Die χ^2 -Verteilung wird genutzt, um den Vertrauensbereich zu definieren. Die Punkte außerhalb werden entfernt, sodass die Varianz des Clusters kompakter wirkt. Die Mittelwerte der beiden Cluster liegen an unterschiedlichen Positionen (vgl. Kap. 4.9(d)).



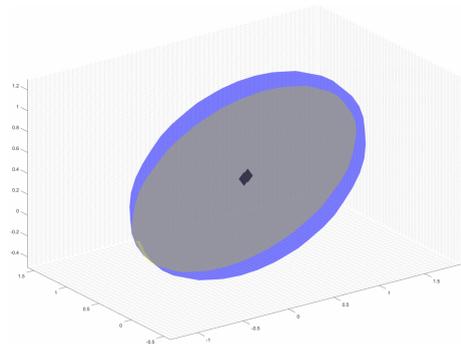
(a) 1. Schritt: Mittelwert und Kovarianz mit 90% Konfidenzbereich



(b) 2. Schritt: Aufzeigen der Punkte innerhalb des Vertrauensbereichs



(c) 3. Schritt: Berechnung des neuen Mittelwerts und der neuen Kovarianz



(d) 4. Schritt: Überlagerte Darstellung des alten und modifizierten Clusters inkl. Mittelwert

Abbildung 4.9: Nutzung des Konfidenzintervall bei Clustern mithilfe der χ^2 -Verteilung

Modellbildung

Die Information über die zeitliche Reihenfolge wird beim Erstellen eines Modells hinzugezogen. Die Punkte einer Trajektorie erhalten die Information über ihre Clusterzugehörigkeit. Damit entsteht eine Markov-Kette. Beim Betrachten der Clusterübergänge jeder Trajektorie kann eine Übergangsmatrix erstellt werden. Diese Übergangsmatrix beschreibt die Anzahl von Übergängen von einem Cluster A in das Cluster B :

$$C_{A,B} = \sum_{i=1}^{|T|} \sum_{k=1}^{|t_i|-1} \mathbf{1}_{C(t_{i,k})=A} \cdot \mathbf{1}_{C(t_{i,k+1})=B} \quad (4.5)$$

In Gleichung 4.5 wird mit T die Trajektorie und mit $t_{i,k}$ der k -te Punkt auf der Trajektorie i beschrieben. Das Cluster $C(t_{i,k})$ ist das Cluster des k -ten Punkts und entsprechend $C(t_{i,k+1})$ das Cluster des folgenden Punkts. Mithilfe der Indikatorfunktion wird der Wert 0 oder 1 zugewiesen. Es gilt, $\mathbf{1}_{C(t_{i,k})=A}$ entspricht dem Wert 1, wenn der Punkt $t_{i,k}$ zum Cluster A gehört, anderenfalls nimmt er den Wert Null an. Die Diagonale der Übergangsmatrix ist Null, da nur Übergänge in ein anderes Cluster betrachtet werden. Die Größe der Übergangsmatrix ist entsprechend der Anzahl von Cluster $N_{cluster} \times N_{cluster}$.

Ein Markov Modell 1. Ordnung erhält man, wenn die entstandenen Übergangsmatrizen normalisiert vorliegen. Um Schleifen innerhalb des Modells zu bemerken und im Anschluss eine korrekte Vorhersage zu treffen, wird zunächst auch das vorhergehende Cluster betrachtet. Es entsteht ein Modell 2. Ordnung, welches eine Übergangsmatrix mit drei Dimensionen besitzt. In Abbildung 4.10 ist der Nutzen des Modells 2. Ordnung dargestellt.

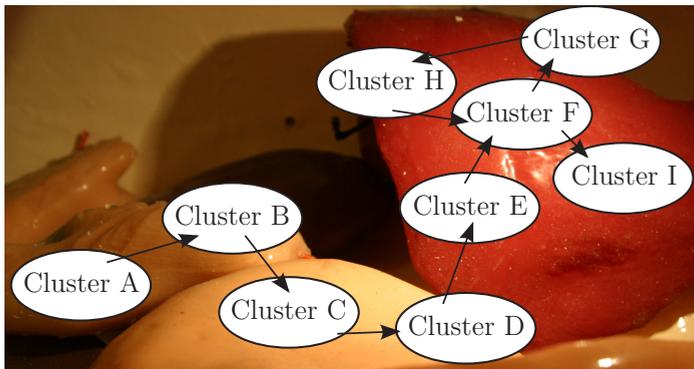


Abbildung 4.10: Prinzipdarstellung zum Modell 1. und 2. Ordnung: Das Modell 1. Ordnung besitzt eine positive Übergangswahrscheinlichkeit von Cluster F zu Cluster G und I. Wenn das vorangegangene Cluster mit einbezogen wird, ist der Übergang eindeutig. [Hut14]

Erstellen einer verallgemeinerten Trajektorie

Neben der räumlichen Darstellung der Zielregion durch die Cluster kann mithilfe der Übergangsmatrix ein zeitlicher Bezug ergänzt werden. Es wird eine Prädiktion auf Basis der Clusterübergänge angestrebt.

Für den Algorithmus wird zu Beginn das Start- und Endcluster definiert. Dazu wird die Übergangsmatrix genauer betrachtet. Ein Startcluster besitzt im Idealfall keine Übergänge von anderen Cluster. Die Summe der Einträge einer Spalte ergibt für das

Startcluster Null. Das Endcluster zeichnet sich dadurch aus, dass nur Übergänge in dieses Cluster stattfinden. Folglich muss die Summe der Einträge einer Zeile Null ergeben.

Mithilfe des Markov Modells 2. Ordnung kann aus dem aktuellen und dem vorangegangenen Cluster das nächste Cluster bestimmt werden. Das Cluster mit der höchsten Wahrscheinlichkeit zu wählen, ist die einfachste Methode. Eine Methode, welche mehrere Cluster für die Prädiktion miteinschließt, ist im nächsten Unterkapitel (vgl. Kap. 4.2.2) vorgestellt. Anhand der Reihenfolge der bereits durchlaufenen Cluster können Schleifen innerhalb der Kette detektiert werden. Um eine Schleife zu vermeiden, wird das Cluster mit der zweithöchsten Wahrscheinlichkeit gewählt. Der Algorithmus terminiert beim Erreichen des zu Beginn definierten Endclusters. Es wurden jedoch noch weitere Abbruchkriterien definiert. Da das Instrument durch den Trokar geführt wird, kann beim minimal-invasiven Szenario das Endcluster dem Startcluster entsprechen. Bei mehrmaliger Schleifenbildung bricht der Algorithmus ebenfalls ab. Die Mittelwerte der einzelnen Cluster können miteinander verbunden werden und stellen damit den groben Verlauf der Operation dar. Eine sogenannte Cluster-Kette wurde gebildet.

Die Cluster-Kette entsteht aus den Mittelwerten eine Trajektorie, welche durch lineare Interpolation zwischen den Stützpunkten (Clustermittlen) erweitert werden kann. Eine verallgemeinerte Trajektorie kann beispielsweise dem Roboter zu Testzwecken übergeben werden. Die Abbildung einer Trajektorie auf Basis von vielen lässt jedoch keine Abweichung zu. Mit der Betrachtung der Kovarianz der Cluster kann die Trajektorie um weitere Punkte ergänzt werden, welche nicht direkt auf ihr liegen. Dazu wird mithilfe der Kovarianz der Vertrauensbereich analysiert. Wie bereits oben beschrieben lässt sich die Kovarianzmatrix als Ellipsoid darstellen. Ein Hilfsvektor zeigt von der aktuellen zur nächsten Clustermitte. Die Ebene, welche orthogonal zum Hilfsvektor liegt und die Clustermitte des aktuellen Clusters beinhaltet, dient als Projektionsebene. Das Ellipsoid wird auf die Ebene projiziert und resultiert in einer Ellipse. Der gewünschte Vertrauensbereich kann eingestellt werden und die Ellipse passt sich diesem an. Da die bisherige Trajektorie diskrete Werte umfasst, wird an dieser Stelle ein Diskretisierungsschritt vorgenommen. Um mit diskreten Werten arbeiten zu können, wird die Ellipse durch ein gleichmäßiges Vieleck ersetzt. Die Menge von Punkten, welche die Ellipse repräsentieren, kann durch die Auflösung angepasst werden. Für das nächste Cluster wird ebenfalls eine Ellipse berechnet. Die Anzahl der Punkte des Vielecks müssen identisch sein. Auch die Anordnung der Punkte ist im Uhrzeigersinn um den Hilfsvektor festgelegt. Daraufhin können

die Punkte der beiden Ellipsen verbunden werden. Auf der Strecke dazwischen können beliebig viele Punkte hinzugenommen werden. Die durch eine Cluster-Kette entstandene Trajektorie wird durch diesen Prozess erweitert.

Richtungsprädiktion

Die Richtungsprädiktion ist eine Fortführung des Clusterings, welche ebenfalls auf der Übergangsmatrix (vgl. Kap. 4.2.2) basiert. Das Verfahren dient, im Gegensatz zum Ansatz der verallgemeinerten Trajektorie, der online-Prädiktion. Dies bedeutet, wenn eine Bewegung stattfindet, kann eine Wahrscheinlichkeit für die nächste Bewegungsrichtung angegeben werden. Dazu muss die aktuelle Bewegung die gleichen Merkmale wie die aufgenommenen Trajektorien der Wissensbasis besitzen. Mit der Richtungsprädiktion wird das Ziel verfolgt, eine Vorhersage während der Operation zu machen um damit die Parameter des Roboters entsprechend anzupassen.

Im ersten Schritt wird die aktuelle Position aufgenommen und einem Cluster zugeordnet. Mithilfe der mehrdimensionalen Normalverteilung⁷ $\phi(\vec{p}; \mu_i, \Sigma_i)$ kann für jedes Cluster eine Wahrscheinlichkeit ausgegeben werden, welche eine Aussage über die Zugehörigkeit macht. Nachdem der Wert normiert wurde, sind die Wahrscheinlichkeiten vergleichbar. Es empfiehlt sich, nicht nur das wahrscheinlichste Cluster zu wählen, sondern mindestens drei Cluster, deren Zugehörigkeit zum aktuellen Punkt wahrscheinlich sind. Wenn der Vertrauensbereich bereits sehr niedrig ist, ist eine eindeutige Zuordnung schwierig. Als Beispiel sei die Situation genannt, dass gerade ein Clusterübergang stattfindet und der aktuelle Punkt genau zwischen den Schwerpunkten der Cluster liegt. Die Wahrscheinlichkeit über die Clusterzugehörigkeit ist in dem beschriebenen Fall eher niedrig.

$$\phi(\vec{p}; \mu_i, \Sigma_i) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2}(\vec{p} - \mu_i)^T \Sigma_i^{-1} (\vec{p} - \mu_i)\right)}{\sqrt{(2\pi)^3 \det(\Sigma_i)}} \quad (4.6)$$

$$C_{ML} = \operatorname{argmax}_{i=1, \dots, N_{cluster}} \phi(\vec{p}; \mu_i, \Sigma_i) \quad (4.7)$$

⁷ verwendete Funktion aus MATLAB [The16], Version 2015b: mnpdf()

Auf Basis der Wahrscheinlichkeit der Clusterübergänge vom zugeordneten Cluster wird das nächste Cluster ermittelt. Hier kann sowohl das Modell 1. Ordnung als auch das Modell 2. Ordnung verwendet werden. Die prädizierten Cluster können, gemeinsam mit ihrer Wahrscheinlichkeit, aus der Übergangsmatrix ermittelt werden. Das Ergebnis der Wahrscheinlichkeit wird in Zusammenhang mit der Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit gesetzt. Daraus resultieren die Cluster, welche am wahrscheinlichsten sind.

Da eine Richtungsprädiktion ausgegeben werden soll, werden die Punkte innerhalb des aktuellen und prädizierten Clusters genauer betrachtet. Die Lage der Clusterpunkte soll Einfluss auf die Richtungsprädiktion nehmen und deshalb werden diese in Bezug zum aktuellen Punkt gesetzt. Dazu wird der aktuelle Punkt mit der Einheitskugel ummantelt, deren Mitte durch den aktuellen Punkt beschrieben ist. Eine diskrete Beschreibung der Kugel wird einer analytischen vorgezogen, sodass diese gleichmäßig in Längen- und Breitengrade unterteilt wird. Die Anzahl von Längen- und Breitengrade wird durch die Auflösung der Richtungsprädiktion definiert. Dadurch wird die Kugel in Trapeze und Dreiecke aufgeteilt, welche als Fenster bezeichnet werden. An den Polen der Kugel befinden sich die Dreiecke; die restlichen Fenster sind als Trapeze dargestellt.

Anstelle der Einheitskugel kann auch ein Ikosaeder verwendet werden. Dieser besitzt 20 gleichseitige Dreiecke als Fläche. Damit sind alle Fenster gleich groß und für die Verteilung muss keine Normierung über die Fenstergröße vorgenommen werden. Allerdings ist die Auflösung im Vergleich zur Einheitskugel schwieriger einzustellen.

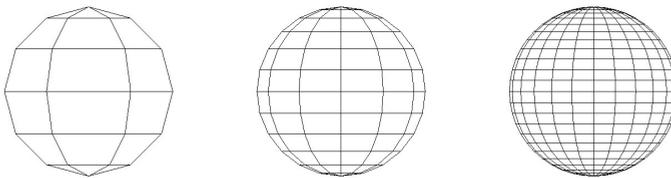


Abbildung 4.11: Von links nach rechts nimmt die Auflösung der Einheitskugel zu. Während links das Raster sehr grobmaschig ist, kann die Richtung im linken Bild aufgrund der höheren Fensteranzahl präziser unterschieden werden.

Um eine lokale Aussage über die Verteilung der Punkte um den aktuellen Punkt machen zu können, werden die umliegenden Punkte einem Fenster zugeordnet. Dafür werden Ebenen zwischen zwei Eckpunkten und dem aktuellen Punkt gebildet, mit Ausnahme der diagonal liegenden Eckpunkte. Es entsteht eine Pyramide mit drei- oder

vierseitiger Grundfläche. Da alle umliegenden Punkte ohne Distanzeinschränkung in die Berechnung der Verteilung einfließen sollen, besitzt die Ebene der Grundfläche keine (begrenzende) Funktion. Die Punkte, welche von einem Fenster gesehen werden, liegen alle im Inneren der gebildeten drei- oder vierseitigen Pyramide. Die Normalen der Ebenen geben Auskunft über die Zuordnung. Durch die Art der Erstellung der einzelnen Ebenen ist sichergestellt, dass alle Normalenvektoren nach innen zeigen. Abbildung 4.12 zeigt exemplarisch den aktuellen Punkt umgeben vom Einheitskreis sowie eine Punktwolke.

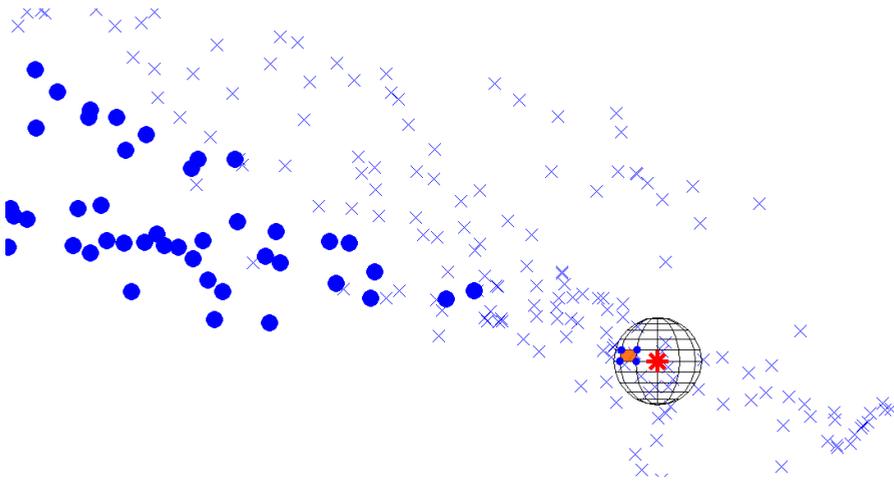


Abbildung 4.12: Konzept zur Erstellung der Wahrscheinlichkeitsverteilung: Der aktuelle Punkt ist mit einem roten Stern markiert. Das ausgewählte Fenster (orangefarben) ist mit blauen Punkten auf dem Gitterpunkten des Einheitskreises hervorgehoben. Die Punktwolke, welche diesem Fenster zugeordnet werden, sind durch blaue Punkte dargestellt. [Hut15b]

Nach der Zuordnung der Punkte kann auf Basis des kumulierten Werts eine Aussage über den Ort der meisten Punkte in der Umgebung getroffen werden. Zur Normierung wird die Fläche des Fensters hinzugenommen, da es ansonsten zu einer Verzerrung der Wahrscheinlichkeitsaussage kommt. Ein Vektor, welcher im Zentrum des Einheitskreises beginnt, soll die Richtung und die Wahrscheinlichkeit über die Länge der Strecke ausgeben. Für eine Vorhersage werden die Punktwolken des aktuellen und des prädierten Clusters gewichtet verwendet.

Wenn die beiden Punktwolken gleichermaßen die Richtung beeinflussen sollen, wird der Wert v aus der Gleichung 4.8 auf 0,5 gesetzt. Ein über die Zeit abnehmender Wert v ist ebenfalls möglich. Dieser bewertet, ob der aktuelle Punkt gerade erst in das Cluster eingetroffen oder bereits am Verlassen des Cluster ist.

$$r = v \cdot actualClusterPoints + (1 - v) \cdot predictedClusterPoints \quad (4.8)$$

Das Ergebnis zeigt eine räumliche Wahrscheinlichkeitsverteilung, deren Maximum die Richtung vorhersagt. In Abbildung 4.13 ist eine solche räumliche Wahrscheinlichkeitsverteilung gezeigt. Die längste Strecke gibt die vermutete Richtung des nächsten Punkts an.

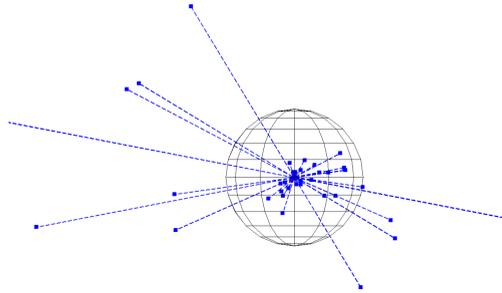


Abbildung 4.13: Räumliche Wahrscheinlichkeitsverteilung [Hut15b]

Mit dem Modell der Richtungsprädiktion steht ein Verfahren zur Verfügung, welches sich für die Online-Prädiktion empfiehlt. In Bezug auf den redundanten Roboter kann der Nullraumparameter während der Operation angepasst werden. Die Überlegungen für den optimalen Nullraumparameter werden auf diese Weise nicht von den Gelenkgrenzen, sondern von den nächsten zu erreichenden Lagen geprägt.

4.2.3 Semantisches Modell der Operation

Für die Beschreibung der Zielregion wurden in den vorhergehenden Kapiteln (4.2.1, 4.2.2) Algorithmen präsentiert. Diese Berechnungen sollen auf verschiedene Operationsphasen angewendet werden. Die Semantifizierung des Modells trägt dazu bei, dass spezifischere Modelle ausgegeben werden können. Die aufgenommenen Trajektorien werden auf diese Weise einer Phase und einem Schritt zugeordnet. Die Annahmen, welche bei der Erstellung der Algorithmen getroffen wurden, sollen durch das Unterteilen der Operation erfüllt werden.

Am Beispiel der Rektumresektion wird an dieser Stelle ein Ablauf der Operation dargestellt [Mie14]. Der Erklärung zur Rektumresektion folgt das Phasenmodell.

Kurzbeschreibung der Rektumresektion

Die Rektumresektion ist ein chirurgischer Eingriff zur Teilentfernung des Mastdarms (Rektum) [Dud07]). Meist findet eine Entfernung aufgrund eines potentiell bösartigen Tumors, Karzinom, statt. Der Mastdarm bezeichnet einen Teil des Dickdarms (Intestinum crassum), welcher zwischen dem Sigmoid (Colon sigmoideum) und dem Darmausgang (Anus) liegt. In Abbildung 4.14 sind relevante Strukturen des Bauchraums (Abdomen) für eine Rektumresektion illustriert.

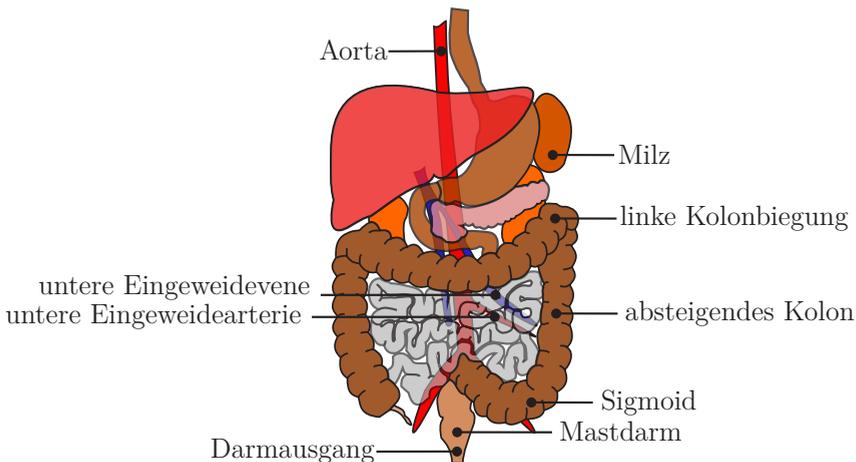


Abbildung 4.14: Das Abdomen mit seinen Organen nach [Dud16]

Die Operation beginnt mit einer Untersuchung der Operationsregion. Das Gebiet wird mittels Endoskop auf Metastasen und Adhäsionen geprüft. Anschließend wird entschieden, ob die Operation minimal-invasiv verlaufen kann. Für die Resektion sind einige Vorarbeiten notwendig, wozu die Mobilisierung des Grimmdarms (Kolon) gehört. Dazu werden die Verklebungen zur seitlichen Bauchwand gelöst. Dabei arbeitet der Chirurg vom Sigmoid, über den absteigenden Kolon (Colon descendens) zur linken Kolonbiegung (Flexura coli sinistra). Das absteigende Kolon sitzt in der Nähe der Milz (Splén), deren unterer Zipfel als anatomische Landmarke dienen kann. Es wird nochmals geprüft, ob der Grimmdarm vollständig frei präpariert ist.

Die Operationsregion wechselt vom Dickdarm zur Bauchaorta (Aorta abdominalis). Dort werden die Blutgefäße lokalisiert und von der Aorta getrennt. Es handelt sich dabei um die untere Eingeweidearterie (Arteria mesenterica inferior) und die untere Eingeweidevene (Vena mesenterica inferior). Der Blutfluss wird durch das Setzen von mehreren Klemmen durch einen Clipper gestoppt und anschließend getrennt.

Wieder wird die Operationsregion gewechselt und es wird der Zugang zum kleinen Becken (Pelvis minor) frei präpariert. Dazu werden zwei Einschnitte auf der rechten und linken Seite des Mastdarms gesetzt. Es ist besonders auf die Risikostruktur, die Harnleiter (Ureter), zu achten. Ihre Funktion darf durch die Operation nicht verloren gehen, sodass diese Region sorgfältig freigelegt wird. Ein Schnitt trennt den Mastdarm vom oberen Teil des Dickdarms.

Mithilfe eines Staplers wird der verbleibende Teil mit dem oberen Teil des Dickdarms wieder verbunden. Der Mastdarm wird zum Bergen in den oberen Teil des Bauchs (Abdomen) gebracht. Ein kleiner Schnitt oberhalb des Schambeins (Os pubis) erlaubt das Entfernen über einen Bergebeutel.

Am Ende der Operation werden die kritischen Strukturen wie der Harnleiter, die Harnblase, die Nerven und die Muskeln des Beckenbodens auf Verletzungen untersucht.

Für die laparoskopisch durchgeführte Operation wird aufgrund des großen Arbeitsbereichs mit wechselnden Trokaren gearbeitet. Dies wird auch so im Phantom umgesetzt, welches im Patientenmodell beschrieben wurde (vgl. Kap. 4.1).

Medizinisches Phasenmodell

Das medizinische Modell wird in Phasen unterteilt, welche wiederum in Operationsschritte unterteilt werden können. Zur Phasenerkennung wurde von Katic et al. [Kat15] eine Ontologie erstellt. Sogenannte Triggersignale dienen als Eingangs- oder Ausgangssignal für einen Phasenwechsel.

In Tabelle 4.1 ist das verwendete medizinische Modell [Mieng] semantisch dargestellt. Die Unterteilung erfolgt in sechs Phasen, welche sich auch räumlich unterscheiden. Die erste und letzte Phase dient der Kontrolle vor und nach dem chirurgischen Eingriff. Die Schritte bezeichnen einzelne Handhabungen im Ablauf der Operation.

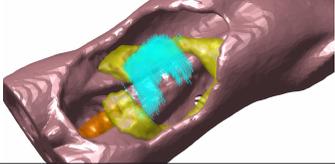
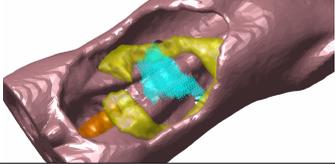
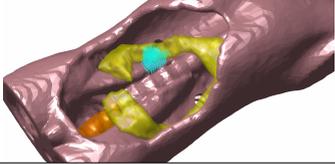
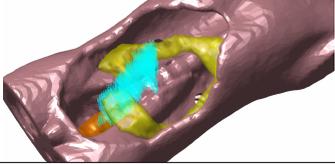
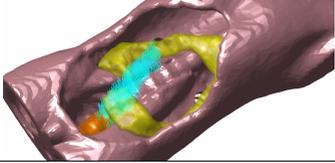
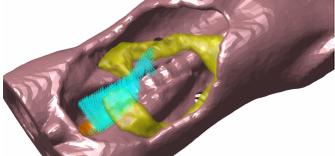
Der Arbeitsraum einer Rektumresektion ist groß und deckt im Abdominalbereich drei von vier Quadranten ab. Die Tabelle 4.2 zeigt die räumliche Nutzung des Endoskops im Abdomen. Die Trajektorien des Endoskops wurden zur besseren Darstellung bereits mit dem Algorithmus aus Kapitel 4.2.1 abstrahiert.

Tabelle 4.1: Gliederung der Operationsphasen in mehrere Phasen und Schritte [Mieng]

Phase		Schritt	
1	Laparoskopische Diagnose	1	Prüfen auf Metastasen und Adhäsionen
2	Mobilisierung des Kolons	2	Mobilisierung des Sigmoids
		3	Mobilisierung des absteigenden Kolons
		4	Mobilisierung der linken Kolonbiegung
		5	Untersuchung des Kolons
3	Gefäßresektion	6	Einschnitt in den Retroperitonealraum
		7	Umreißen der Gefäße
		8	Durchtrennen der Arterie
		9	Durchtrennen der Vene
4	Dissektion des Rektums	10	Öffnen des kleinen Beckens
		11	Dissektion des Rektums
5	Resektion des Rektums	12	Durchtrennen des Rektums
		13	Bergen des Rektums
6	Kontrolle des kleinen Beckens	14	Kontrolle des kleinen Beckens

4 Patienten- und Operationsmodell

Tabelle 4.2: Das Operationsmodell einer Rektumresektion: Der Darm ist in gelb dargestellt und das Rektum in orange. Die Region des Endoskops der jeweiligen Phase ist als Gitter in der Farbe türkis gekennzeichnet.

	Phase	Beispiel
1	Laparoskopische Diagnose	
2	Mobilisierung des Kolons	
3	Gefäßresektion	
4	Dissektion des Rektums	
5	Resektion des Rektums	
6	Kontrolle des kleinen Beckens	

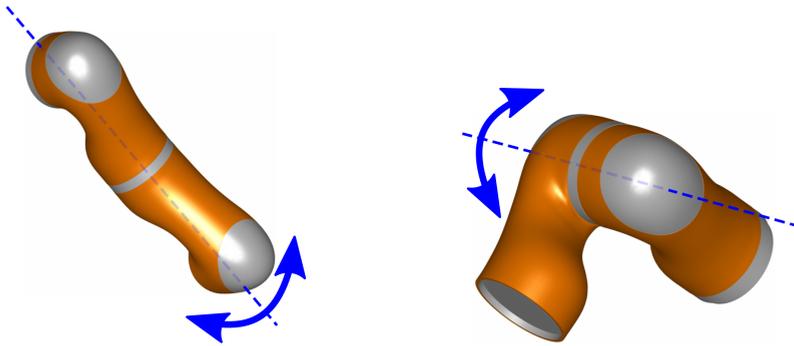
KAPITEL 5

Robotermodell - Die Parameter

Der Erfolg einer Roboter-gestützten Operation ist eng mit den einstellbaren Parametern eines redundanten Roboters verbunden. Deshalb wird in Kapitel 5.1 der dieser Arbeit zugrundeliegende Roboter vorgestellt. Weiter werden in Kapitel 5.2 die verwendeten Koordinatensysteme definiert und deren Bezug zum Szenario hergestellt. Im Detail werden die zu optimierenden Parameter des Roboters diskutiert (vgl. Kap. 5.3). Die drei gewählten Performanzkriterien, Erreichbarkeit, Gelenkbe-
wegung und Singularität, sind die Grundlage der Güte und werden in Kapitel 5.4 beschrieben.

5.1 Aufbau des Roboters und der Umgebung

Im Folgenden wird der verwendete redundante Roboter und dessen Aufbau vorgestellt. Der Roboter besitzt sieben Gelenke, welche seriell angeordnet sind. Die kinematische Kette wird durch vier Torsionsgelenke und drei Rotationsgelenke aufgebaut, welche im Wechsel angeordnet sind. Bei einem Torsionsgelenk verläuft die Drehachse parallel zu den beiden Achsen der Roboterglieder. Dagegen bilden die beiden Achsen der Roboterglieder bei einem Rotationsgelenk einen rechten Winkel. Es ergibt sich ein überbestimmtes System aufgrund der sieben Bewegungsfreiheitsgrade. Durch die so gegebene Redundanz kann eine Roboterendeffektorpose mit verschiedenen Gelenkpositionen erreicht werden. Die Anordnung der Gelenke bewirkt außerdem das Halten einer Roboterendeffektorpose, während sich die Roboterpose und damit auch die einzelnen Gelenkpositionen verändern.



- (a) Torsionsgelenk: Drehachse liegt parallel zu den Achsen der Roboterglieder. (b) Rotationsgelenk: Drehachse verläuft rechtwinklig zu den beiden Achsen der Roboterglieder.

Abbildung 5.1: Verwendete Arten von Drehgelenken

Aufgrund der Ähnlichkeit zum menschlichen Arm wird das 2. Gelenk als Schulter, das 4. Gelenk als Ellenbogen und das 6. Gelenk als Handgelenk bezeichnet. Zwischen der Schulter und dem Handgelenk kann ein Nullraum aufgespannt werden, in dem sich der Ellenbogen auf einem Kreis - dem Redundanzkreis - bewegen kann, ohne die Roboterendeffektorpose zu verändern.

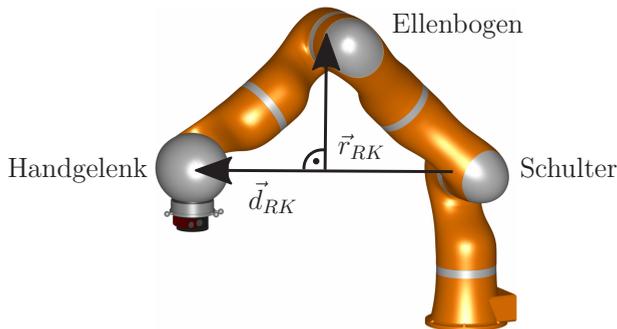


Abbildung 5.2: Die Benennung der Rotationsgelenke mit den Begriffen des menschlichen Arms wird eingeführt. Sowohl die Drehachse \vec{d}_{RK} als auch der Radius \vec{r}_{RK} des Redundanzkreises ist dargestellt.

Ein Richtungsvektor, welcher von der Schulter zum Handgelenk zeigt, stellt die Drehachse des Redundanzkreises dar. Die Position des Ellenbogens auf dem Kreis wird als Nullraumparameter bezeichnet und wird in der Einheit Grad ($^{\circ}$) angegeben.

Die Bewegung auf dem Redundanzkreis wird limitiert durch die Gelenkansschläge. Auf dem Redundanzkreis können gültige Nullraumparameter in Form von Intervallen zusammengefasst werden. Diese Intervalle ergeben sich aus der Überlagerung einzelner Gelenkansschläge, welche letztendlich dazu führen, dass keine vollständige Bewegung auf dem Redundanzkreis möglich ist.

Das Halten einer Roboterendeffektorpose EE ist nur innerhalb eines gültigen Intervalls möglich. Das Wechseln vom aktuellen Intervall zu einem anderen gültigen Intervall führt zwangsläufig dazu, dass der Redundanzkreis verlassen werden muss und sich damit auch die Roboterendeffektorpose zumindest kurzzeitig verändert. Während sich der Roboter auf einer Trajektorie von Pose A zu Pose B bewegt, verändern sich die Gelenkwinkel und somit die gültigen Intervalle des Nullraumparameters. Für die Zielpose ergeben sich neue gültige Intervallpaare. Durch die Bewegung können die Intervalle größer oder kleiner werden und damit auch zusammenfallen oder sich aufteilen.

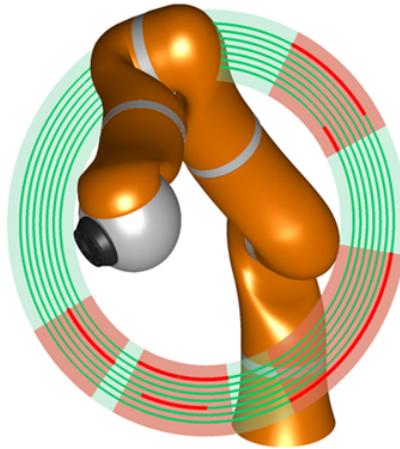


Abbildung 5.3: Das Bewegen auf dem Redundanzkreis ist nur innerhalb der grün gekennzeichneten Bereiche möglich. Einzelne Gelenkansschläge limitieren die Bewegung auf dem Redundanzkreis.¹[Hut14]

Eine solche Kinematik weisen beispielsweise die Leichtbauroboter LBR und iiwa der Firma KUKA auf, sowie mit leichten Modifikationen der Leichtbauroboter DLR MIRO, welcher am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) [Deu16] entwickelt wurde. In dieser Arbeit wird der Leichtbauroboter LWR4+ der Firma

¹ erstellt von Dr.-Ing. Mirko Kunze, KIT Karlsruhe

KUKA [KUK16] verwendet. Die Gelenkanschläge der Torsionsgelenke liegen bei $\pm 170^\circ$ und die der Rotationsgelenke bei $\pm 120^\circ$. Der Roboter wiegt 16 kg und zeichnet sich durch eine Traglast von 7 kg aus.

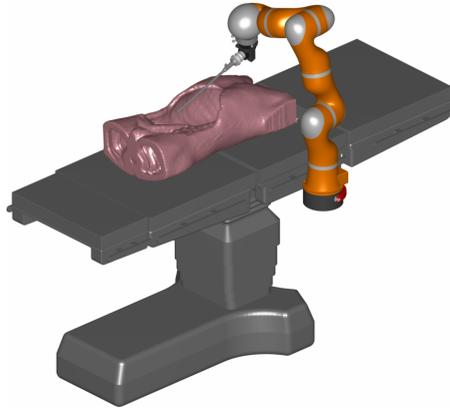


Abbildung 5.4: Ein Leichtbaurobter ist am Operationstisch befestigt. Am Endeffektor ist ein Werkzeug montiert.

Für das Szenario der Roboter-assistierten Chirurgie ist der Roboter an einem Operationstisch der Firma Maquet [MAQ16] auf der Höhe der Liegefläche befestigt. Durch das verwendete Schnellkupplungssystem der Firma Grip [GRI16] lässt sich der Roboter mit wenigen Handgriffen am Operationstisch anbringen und wieder entfernen.

Am Roboterendeffektor befindet sich ebenfalls eine Schnellkupplung der Firma Grip. Darüber lassen sich verschiedene Werkzeuge montieren. Im angewendeten Szenario handelt es sich um laparoskopische Instrumente, welche aufgrund ihres Einsatzzwecks einen langen Schaft aufweisen. Der Instrumentenschaft ist orthogonal zur letzten Drehachse des Roboters angeordnet. Es werden zwei Instrumententypen unterschieden, die bildgebenden und die manipulierenden Instrumente. Das Endoskop ist starr ohne weiteren Freiheitsgrad am Roboterendeffektor angebracht. Die Kamera ist fest mit der Optik (langer Schaft) verbunden. Die manipulierenden Instrumente, wie Schere und Greifer, stellen den zweiten Instrumententyp dar. Diese haben neben der Greif- und Schneidfunktion einen weiteren Freiheitsgrad. Die Rotation um die Instrumentenachse bewirkt eine zusätzliche Redundanz für das Gesamtsystem, bestehend aus Roboter und Instrument und wird deshalb ausgeklammert. Als Tool Center Point TCP wird die Werkzeugspitze definiert.

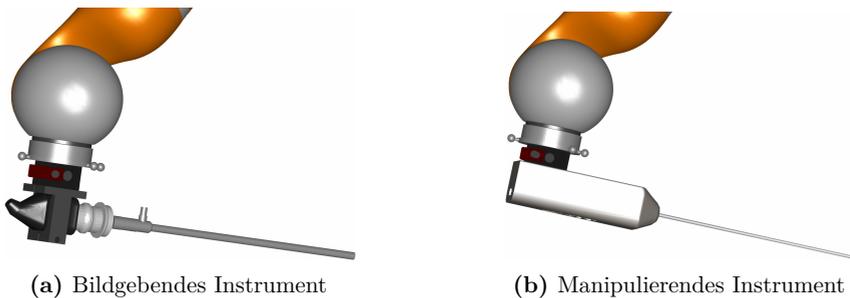


Abbildung 5.5: Laparoskopische Instrumente zur Montage am Roboterendeffektor

Das Gesamtsystem wird für die Optimierung durch den redundanten Roboter LBR4+ und einem Instrument ohne weitere Freiheitsgrade beschrieben. Der Roboter ist direkt am Operationstisch angebracht und kann durch die Redundanz für Sicherheit, Zuverlässigkeit und Flexibilität im Operationssaal sorgen.

5.1.1 Laparoskopische Instrumente

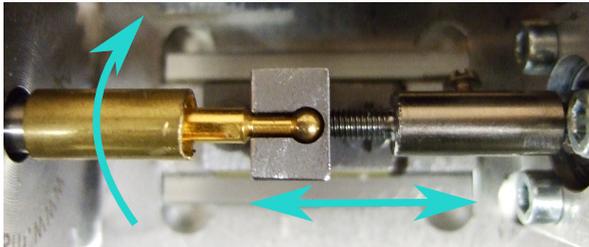
Um das Szenario „Telemanipulation“ umsetzen zu können, wurden motorisierte Instrumente entwickelt, welche an den Roboterendeffektor geflanscht werden können. Der Schaft und das funktionale Ende des Instruments stammen von laparoskopischen Instrumenten, wie sie bereits im Operationssaal verwendet werden. Als funktionales Ende ist die Art des Greifers oder der Schere gemeint. Mit dem Entfernen des Handgriffs am Standardinstrument bietet sich aufgrund des modularen Stecksystems der Firma Richard Wolf [Ric16] eine mechanische Schnittstelle an.

Die zwei Freiheitsgrade werden durch zwei bürstenlose Gleichstrommotoren der Firma Fritz Faulhaber [Dr 16] angetrieben. Die Rotation des Instrumentenschafts um seine Achse wird durch eine Stirnraduntersetzung und einen Motor umgesetzt. Das Stirnradgetriebe schafft zudem den nötigen Abstand, welcher für die parallele Anordnung der beiden Motoren notwendig ist. Anstelle des Chirurgen übernimmt ein Motor die Kraftübertragung für das Öffnen und Schließen des funktionalen Endes.

Dazu wandelt ein Spindelantrieb die rotatorische in eine lineare Bewegung um. Die Spindel ist ohne Achsversatz durch eine Wellen-Naben-Verbindung mit dem Motor verbunden. Die Drehmomentübertragung findet mithilfe einer radial wirkenden Schraube sowohl über einen Formschluss als auch über einen Reibkraftschluss statt. Die Linearführung und der sich darauf bewegende Schlitten führen die Spindelmutter. Ebenfalls mit dem Schlitten verbunden ist die mechanische Stelle zum Öffnen und Schließen

des Instruments (Formschluss). Das messingfarbende Endstück des Instruments darf sich nicht in axialer Richtung bewegen, muss aber drehbar um die Instrumentenachse sein. Anderenfalls behindern sich die beiden Freiheitsgrade bei der Ausführung ihrer Bewegung. [Hut13a]

Rotationsbewegung



Linearbewegung

Abbildung 5.6: Getriebe des motorisierten Instruments

Bei der Konstruktion wurde auf eine einfache Umsetzung geachtet. Dazu gehört die Verwendung von Standardbauteilen, sowie für die Fertigung angepasste Geometrien. Das Instrument ist in Abbildung 5.7 gezeigt. Das Gehäuse wurde im 3D-Druckverfahren gefertigt und dient neben der Optik, der Schalldämmung und dem Schutz vor äußeren Einwirkungen.



(a) Das Gehäuse des Instrument



(b) Blick auf die Motoren und das Getriebe

Abbildung 5.7: Motorisiertes Instrument

Die Steuerelektronik des Motors wird über eine CAN-Bus Schnittstelle angesprochen. Als Kommunikationsinterface zwischen Instrumentensteuerung und der Antriebselektronik wird ein PCAN-USB-Adapter der Firma Peak [PEA16] verwendet. Dieser wird in das Robot Operating System ROS [Rob16] eingebunden, welches hier als Middleware genutzt wird, und steht damit in der Struktur des OP:Sense Systems zur Verfügung. Das motorisierte Instrument [Hut13a] kam auf einer Konferenz

(CARS 2013 [Com16b]), einer Messe (CeBIT 2014 [KIT16]) und in diversen Evaluationen zum Einsatz.

5.2 Beschreibung der Koordinatensysteme

In dieser Arbeit werden ausschließlich rechtshändige kartesische Koordinatensysteme verwendet. Das Weltkoordinatensystem WKS liegt mit der x - und y -Achse auf dem Boden des Raums während die positive z -Achse in Richtung der Decke zeigt. Der Operationstisch steht mit seinem Fuß mittig auf dem Boden im Ursprung des Weltkoordinatensystems. Der Roboter kann links- oder rechtsseitig an der langen Kante des Operationstischs montiert werden. Das Roboterkoordinatensystem RKS befindet sich an der Basis des Roboters und wird zum Weltkoordinatensystem nur in translatorischer Richtung verschoben.

Die einzelnen Gelenkkordinatensysteme des Roboters wurden nach der Denavit-Hartenberg-Konvention (vgl. Kap. 2.2) bestimmt. Das Endeffektorkoordinatensystem KS_{EE} befindet sich damit am Ende der kinematischen Kette des Roboters. Die z -Achse des letzten Gelenks zeigt entlang der Drehachse.

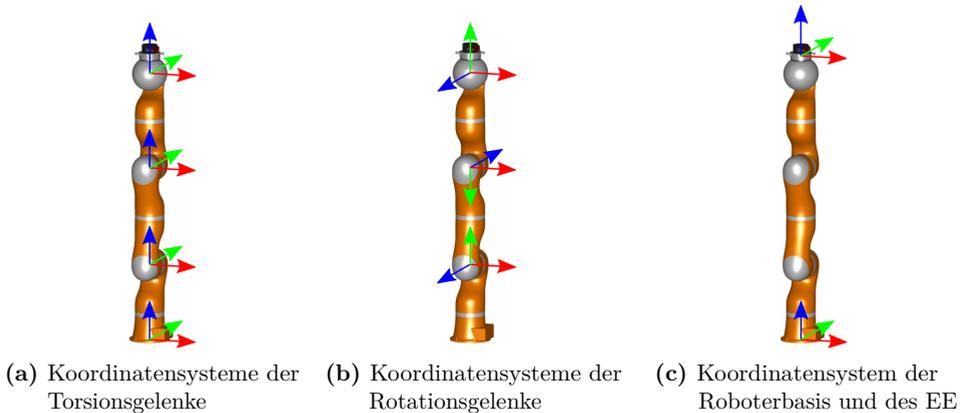


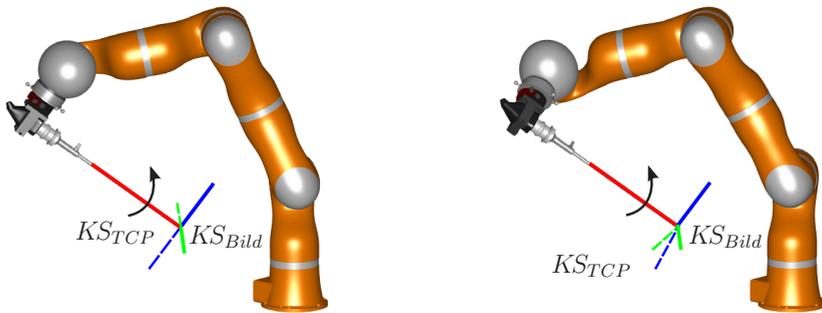
Abbildung 5.8: Die Koordinatensysteme der Robotergerlenke sind nach der Denavit-Hartenberg-Konvention dargestellt. Die x -Achse ist in rot, die y -Achse in grün und die z -Achse in blau gekennzeichnet.

An der Werkzeugspitze liegt das Koordinatensystem KS_{TCP} , welches vom KS_{EE} lediglich in translatorischer Richtung verschoben wird, da keine aktiven Freiheitsgrade am Werkzeug vorliegen. Im Fall des Endoskops kann zusätzlich das Bildkoordinatensystem KS_{Bild} betrachtet werden. Es befindet sich an der gleichen Position wie

das KS_{TCP} , jedoch besitzt es eine andere Orientierung. Um ein aufrechtes Bild zu erhalten, richtet sich die Orientierung des KS_{Bild} immer nach dem Horizont.

In Abbildung 5.9 hält der Roboter das Endoskop. Während sich das Bildkoordinatensystem in beiden Bildern an derselben Stelle befindet, ändert der Roboterendeffektor seine Orientierung und damit auch die Orientierung am TCP und folglich seine Gelenkwinkel.

Ein weiteres Koordinatensystem wird benötigt, um das Phantom des Patienten auf dem Operationstisch zu platzieren. Das Trokarkoordinatensystem $KS_{Trokär}$ hat die gleiche Orientierung wie das Roboterbasiskoordinatensystem und befindet sich an der Einstichstelle des Trokars auf der Bauchoberfläche des Patienten. Durch die links- und rechtsseitige Montage des Roboters, lassen sich alle relevanten Orientierungsszenarien beschreiben.



- (a) Die Verdrehung der Koordinatensysteme KS_{TCP} zu KS_{Bild} liegt bei 180° um die x -Achse.
- (b) Die Verdrehung der Koordinatensysteme KS_{TCP} zu KS_{Bild} liegt bei 135° um die x -Achse.

Abbildung 5.9: Aufgrund der softwareseitigen Drehung des Kamerabilds ergibt sich neben dem KS_{TCP} am TCP ein weiteres Koordinatensystem, das KS_{Bild} .

Die Gelenkwinkelgrenzen der einzelnen Gelenke sind symmetrisch zu ihrem Nullpunkt. In Abbildung 5.10 liegt der Koordinatenursprung in der Mitte der Roboterbasis. Der Arbeitsraum des Roboters ist symmetrisch zur x -Achse. Die Aufteilung in Quadranten dient der Veranschaulichung der symmetrischen Arbeitsräume, welche bei der Hinzunahme eines Pivotpunkts und der Zielregion unterschieden werden können. Mit der Pivotpunkt-Restriktion können Vereinfachungen getroffen werden, welche den Suchraum des optimalen Arbeitsraums in Bezug auf die Zielregion für eine Operation einschränken. Zugleich wird verdeutlicht, welchen Einfluss die Zielregion durch die Pivotpunkt-Restriktion besitzt.

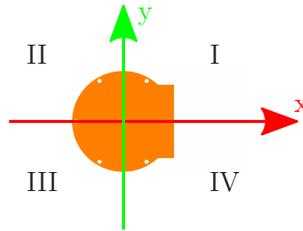


Abbildung 5.10: Gelenksymmetrie zur Roboterbasis (orangefarbener Grundriss): Die Quadranten I und IV haben den gleichen Wertebereich aufgrund der symmetrischen Gelenkgrenzen. Gleiches gilt für den II. und III. Quadranten.

Die beiden Abbildungen 5.11, 5.12 zeigen die Überlegungen zur Verallgemeinerung des Suchraums. Dabei werden Extremfälle und Vereinfachungen zugleich betrachtet. Die grauen Kästen symbolisieren den Operationstisch, wobei die beiden mittleren Kästen dieselbe Liege darstellen sollen. Die hellgrauen, gestrichelten Kästen sollen einen virtuellen Operationstisch zeigen, welcher unterstützend für die Verallgemeinerung des Such- und Arbeitsraum genutzt werden kann. Zusammengesetzt kann die Aussage getroffen werden, dass der linksseitige Arbeitsraum des LBR 1 durch den linksseitigen Arbeitsraum des LBR 2 repräsentiert wird. Gleiches gilt für den rechtsseitigen Arbeitsraum. Die beiden Roboter sind über die orangefarbene Roboterbasisposition angedeutet. Die Zielregion wird durch ein Dreieck, welches in der xy -Ebene liegt, dargestellt. Durch die Pivot-Restriktion ergeben sich für den Roboter neue Einschränkungen bzw. verschiedene Möglichkeiten der Anordnung zwischen den zwei Koordinatensystemen $KS_{Trokcar}$ und RKS . Aus den Schaubildern (vgl. Abb. 5.11, 5.12) geht hervor, dass sich durch die Möglichkeit der beidseitigen Montage und der Gelenksymmetrie des Roboters bereits eine Reduzierung des Suchbereichs ergibt.

Zusätzlich kann aufgrund der Zusammenarbeit zwischen Roboter und Chirurg am Operationstisch gewünscht sein, dass der Roboter dem Chirurgen gegenüber stehen soll, anstelle direkt an seiner Seite zu stehen. Somit ist die Montage des Roboters, der Situation geschuldet, festgelegt und schränkt den Suchraum einer optimalen Relation zwischen Roboterbasis und Pivotpunkt weiter ein.

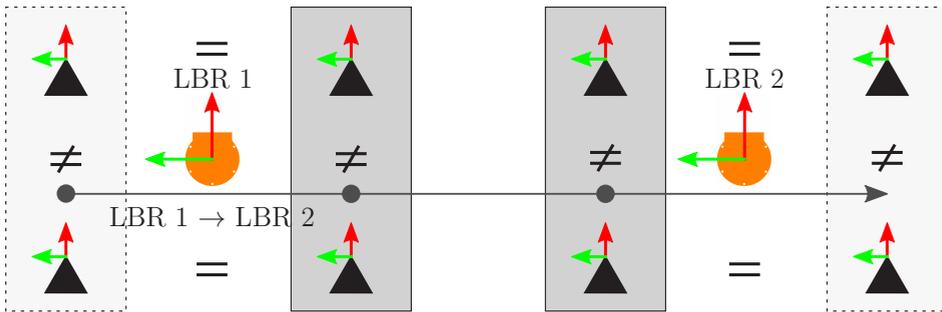


Abbildung 5.11: Veranschaulichung der Gelenksymmetrie mit Pivotpunkt-Restriktion einer zweidimensionalen Zielregion (schwarzes Dreieck) mit Spiegelsymmetrie zur x -Achse des Koordinatensystem KS_{Trokar}

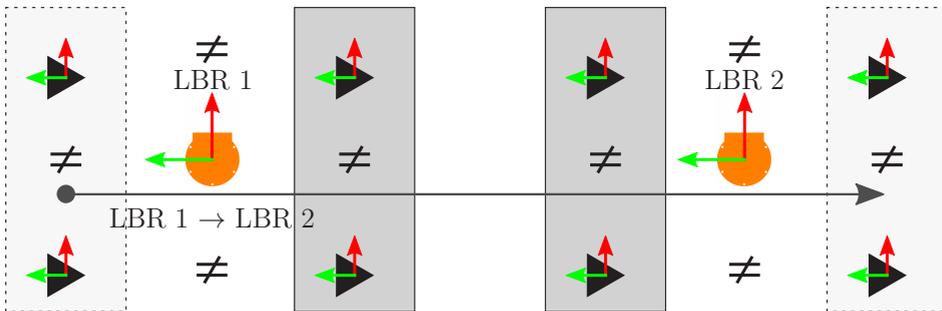


Abbildung 5.12: Veranschaulichung der Gelenksymmetrie mit Pivotpunkt-Restriktion einer zweidimensionalen Zielregion (schwarzes Dreieck) mit Spiegelsymmetrie zur y -Achse des Koordinatensystem KS_{Trokar}

5.3 Arbeitsraumoptimierungsparameter

Im folgenden Abschnitt sollen die Parameter beschrieben werden, welche für die eindeutige Beschreibung einer Roboterpose und damit für die Berechnung der inversen Kinematik IK notwendig sind. Die inverse Kinematik wird auf analytischem Weg berechnet, da so alle Lösungen gefunden und ausgewertet werden können [Shi08]. Die Parameter dienen später als Optimierungsparameter des Arbeitsraums für die in Kapitel 5.4 definierten Kriterien.

Eine Randbedingung bei der Berechnung der Zielpose ist die Pivotpunkt-Restriktion. In der minimal-invasiven Chirurgie werden Trokare auf der Bauchdecke platziert, welche als Zugang für die Instrumente dienen. Der Trokar wirkt als Pivotpunkt, um welchen während einer Bewegung des TCP pivotisiert werden muss. Eine Bewegung

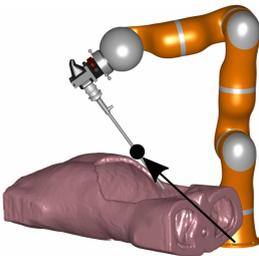
des TCP im Patienteninneren resultiert in einer entgegengesetzten Bewegung des Roboters. Zudem wirkt der lange Instrumentenschaft als Hebelarm, sodass eine kleine Bewegung der Instrumentenspitze nahe des Pivotpunkts zu einer großen Bewegung des Roboterendeffektors führt. Dies wird durch den Fulcrum-Effekt (vgl. Kap. 2.3) beschrieben.

Der Pivotpunkt muss während einer Roboterbewegung ständig auf der Instrumentenachse liegen. Das Verlassen des Pivotpunkts bedeutet eine Missachtung der Pivotpunkt-Restriktion und damit eine Verletzung der Bauchdecke des Patienten. Zur Sicherung der Pivotpunkt-Restriktion ist eine Interpolation um den Pivotpunkt notwendig. Zur Einhaltung des Drehpunkts muss dies folglich softwareseitig kontrolliert werden.

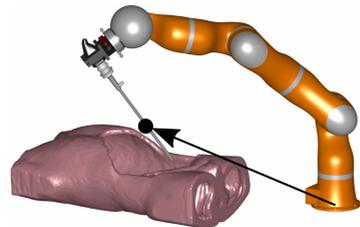
5.3.1 Die Position des Pivotpunkts

Die Relation zwischen dem Trokar, dem Pivotpunkt, und der Roboterbasis hat einen Einfluss auf die Roboterperformanz und wird deshalb als Optimierungsparameter betrachtet. Der Roboterparameter ist ein dreidimensionaler Vektor \vec{p}_{pivot} und wird im Roboterkoordinatensystem angegeben. Der Vektor \vec{p}_{pivot} gibt außerdem die Position des Trokarkoordinatensystems $KS_{Trokcar}$ an.

Die Zielregion liegt im Trokarkoordinatensystem. Das bedeutet, dass die Relation zwischen Trokar und Zielregion nicht verändert wird. Dies resultiert aus den Bedingungen des minimal-invasiven Szenarios. Zudem würde die Veränderung der Relation zwischen Trokar und Zielregion eine weitere Fragestellung, die der Zugangsplanung, adressieren.



- (a) Der Pivotpunkt liegt sehr nahe an der Roboterbasis. Dies kann zu Kollisionen zwischen der Roboterbasis und der Instrumentenspitze führen.



- (b) Der Pivotpunkt liegt zu weit von der Roboterbasis entfernt. Der Arbeitsraum des Roboters ist zu klein, um die Zielposen zu erreichen.

Abbildung 5.13: Darstellung von Trokarpositionen \vec{p}_{pivot} im RKS

Die Gelenkbewegung und damit auch die Abstände zu den Gelenkgrenzen verändern sich durch die Pivotpunkt-Restriktion. Es ergeben sich daher gut und schlecht gewählte Trokar-zu-Roboter-Relationen. In Abbildung 5.13 sind Extremfälle dargestellt. Bei dem gezeigten Fall in Abbildung 5.13(a) sitzt die Roboterbasis zu nah am Patienten. In der virtuellen Umgebung bedeutet dies, dass die beiden Volumenkörper ineinander liegen. Die Möglichkeiten der Position des Pivotpunkt werden dadurch begrenzt. Dagegen zeigt die Abbildung 5.13(b) den umgekehrten Grenzfall.

Der Pivotpunkt befindet sich sehr weit von der Roboterbasis entfernt und damit am Rand des Roboterarbeitsraums. Damit wird deutlich, welchen Einfluss die Pivotpunkt-Restriktion auf die Beweglichkeit des Roboters darstellt.

5.3.2 Der Roboterkonfigurationstyp

Der redundante Roboter kann eine Endeffektorpose durch seine kinematische Überbestimmtheit mit verschiedenen Gelenkpositionen erreichen. Für die Lösung der inversen Kinematik werden acht Roboterkonfigurationstypen r_c bestimmt. Die Roboterkonfigurationstypen unterscheiden sich im Wertebereich der Rotationsgelenke, die sich durch positive und negative Bereiche darstellen. Dies resultiert, in Abhängigkeit der Rotationsgelenkvorzeichen in acht Konfigurationstypen. Die Lösung der inversen Kinematik wird damit für jeden Konfigurationstyp eindeutig. So wird der Roboterkonfigurationstyp $r_c = 0$ durch positive Wertebereiche der drei Rotationsgelenke beschrieben und durch die Notation $(+, +, +)$ kenntlich gemacht.

In Abbildung 5.14 sind die acht unterschiedlichen Roboterkonfigurationstypen dargestellt. Es wurde eine Zielpose gewählt, welche für alle Roboterkonfigurationstypen möglich ist. Die unterschiedlichen Konfigurationen können erkannt werden, wenn die Schulter, den Ellenbogen oder das Handgelenk des Roboters betrachtet wird. Dabei fällt auf, dass die Rotationsgelenke (j_2, j_4, j_6) spiegelsymmetrische Lösungen aufweisen, während die Torsionsgelenke (j_1, j_3, j_5, j_7) sich unsymmetrisch verhalten. Die Änderung der Torsionsgelenke, falls vorhanden, liegt bei $\Delta 180^\circ$ pro Gelenk und wird deshalb als unsymmetrisch bezeichnet. Das Wechseln des Roboterkonfigurationstyps beeinflusst die Erreichbarkeit des TCP. Dies macht sich in Form der Erreichbarkeit einer Position und im Besonderen der Orientierung bemerkbar. Jedoch gleichzeitig steigt bei einem Konfigurationswechsel die Wahrscheinlichkeit, dass die Pivotpunkt-Restriktion nicht eingehalten werden kann. Deshalb soll ein geeigneter Roboterkonfigurationstyp gefunden werden, welcher während der Operation nicht verändert werden muss.

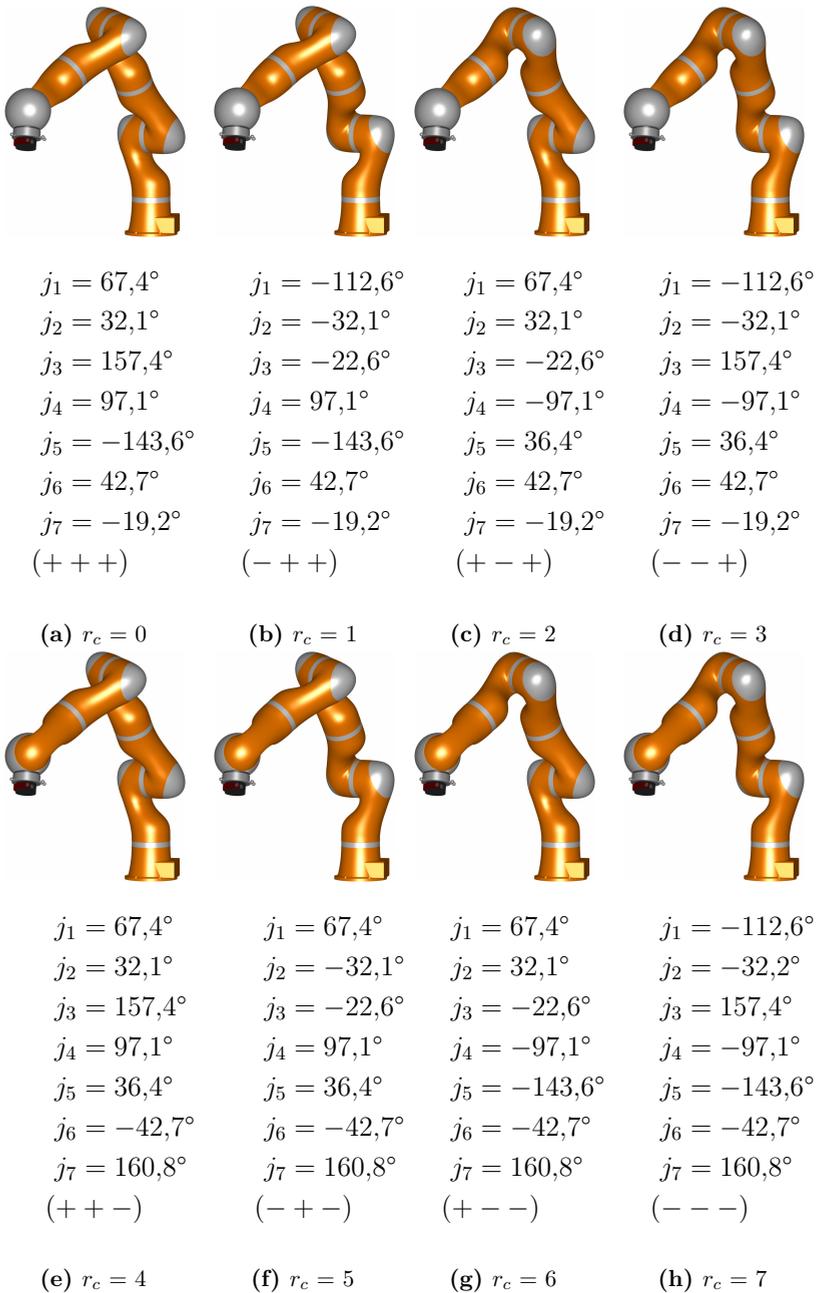


Abbildung 5.14: Acht unterschiedliche Roboterkonfigurationstypen r_c sind möglich, während der Roboterendeffektor und die Position des Ellenbogens ($ns = 12,0^\circ$) gleich bleiben. In Klammern steht die Notation zur Beschreibung des Wertebereichs der Rotationsgelenke.

5.3.3 Der Nullraumparameter

Die Position des Ellenbogens auf dem Redundanzkreis wird durch den Nullraumparameter ns definiert. Neben der Verbesserung der Performanz gilt die Vermeidung einer Patient-Roboter-Kollision als vorrangig. Die überlagerte Darstellung der Roboterpose in Abbildung 5.15 zeigt die Bewegung des Ellenbogens auf dem Redundanzkreis. Gleichzeitig wird deutlich, dass der Roboter durch die Position des Nullraums einen gewissen Bereich für sich einnimmt. Ein gesetzter Nullraumparameter wird für diese Anwendung durchgängig gehalten.

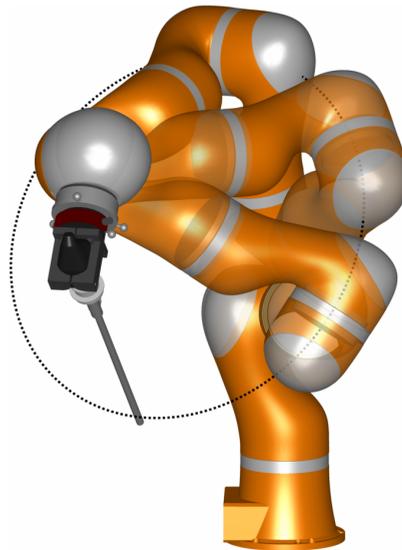
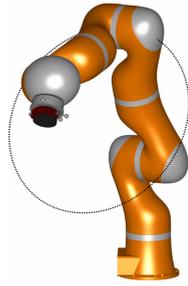


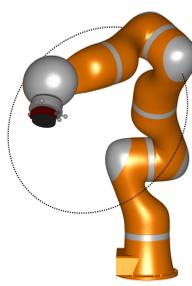
Abbildung 5.15: Überlagerte Darstellung der Bewegung im Nullraum

Dabei steht die Veränderung der gültigen Intervalle des Nullraumparameters im Fokus. Die Bewegung von der Startpose zur Zielpose bedingt zwangsläufig eine Verschiebung der gültigen Nullraumparameterintervalle. Bei einer langen Bahn des TCP wäre es möglich, die geforderte Start- und Endpose zu erreichen, allerdings ist damit nicht sichergestellt, dass es zu keinem Zeitpunkt der Bewegung zu einer Verletzung der Pivotpunkt-Restriktion kommt. Dies tritt genau dann ein, wenn ein gesperrter Bereich auf dem Redundanzkreis überwunden werden muss. Mit einem gut gewählten Nullraumparameter, der an das Arbeitsgebiet angepasst ist, werden solche Konfigurationsänderungen vermieden. Die in Abbildung 5.16 gesetzten Nullraumparameter zeigen für eine Zielpose die jeweiligen Gelenkwinkel und damit auch indirekt die Nähe zu den Gelenkgrenzen an.



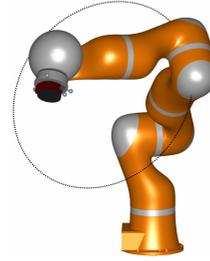
$$\begin{aligned} j_1 &= -119,0^\circ \\ j_2 &= 18,7^\circ \\ j_3 &= 0^\circ \\ j_4 &= -83,2^\circ \\ j_5 &= 15,5^\circ \\ j_6 &= 40,8^\circ \\ j_7 &= -24,3^\circ \end{aligned}$$

(a) $ns = 0^\circ$



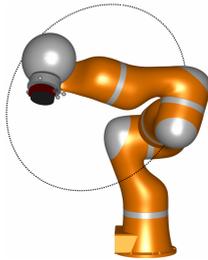
$$\begin{aligned} j_1 &= -77,0^\circ \\ j_2 &= 29,3^\circ \\ j_3 &= -61,7^\circ \\ j_4 &= -83,2^\circ \\ j_5 &= 53,8^\circ \\ j_6 &= 52,4^\circ \\ j_7 &= -47,0^\circ \end{aligned}$$

(b) $ns = 30^\circ$



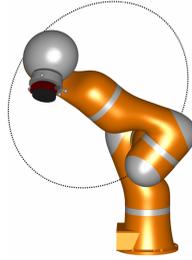
$$\begin{aligned} j_1 &= -69,5^\circ \\ j_2 &= 48^\circ \\ j_3 &= -90,4^\circ \\ j_4 &= -83,2^\circ \\ j_5 &= 80,5^\circ \\ j_6 &= 70,9^\circ \\ j_7 &= -55,8^\circ \end{aligned}$$

(c) $ns = 60^\circ$



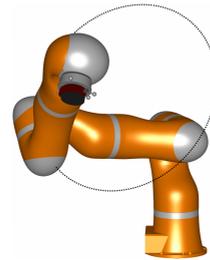
$$\begin{aligned} j_1 &= -73,8^\circ \\ j_2 &= 67,5^\circ \\ j_3 &= -111,0^\circ \\ j_4 &= -83,2^\circ \\ j_5 &= 102,8^\circ \\ j_6 &= 90,9^\circ \\ j_7 &= -55,3^\circ \end{aligned}$$

(d) $ns = 90^\circ$



$$\begin{aligned} j_1 &= -84,1^\circ \\ j_2 &= 84,3^\circ \\ j_3 &= -131,3^\circ \\ j_4 &= -83,2^\circ \\ j_5 &= 126,8^\circ \\ j_6 &= 109,1^\circ \\ j_7 &= -46,8^\circ \end{aligned}$$

(e) $ns = 120^\circ$



$$\begin{aligned} j_1 &= -153,7^\circ \\ j_2 &= 84,3^\circ \\ j_3 &= 131,3^\circ \\ j_4 &= -83,2^\circ \\ j_5 &= -110,1^\circ \\ j_6 &= 97,1^\circ \\ j_7 &= 25,7^\circ \end{aligned}$$

(f) $ns = -120^\circ$

Abbildung 5.16: Beispielhaft werden 6 Nullraumparameter gezeigt. Die Zielpose und der Roboterkonfigurationstyp ($r_c = 2, (+ - +)$) bleiben konstant. Für die gewählte Zielpose ist der Redundanzkreis lediglich für die Bereiche $(-180; -164,8]^\circ$ und $[144,4; 180]^\circ$ gesperrt.

5.3.4 Die Orientierung am Roboterendeffektor

Einen weiteren Parameter stellt die Orientierung des Roboterendeffektors r_a dar. Die vorgegebene Orientierung wird bereits durch den Trokar eingeschränkt. Das Zielkoordinatensystem wird durch den Nutzer oder einen Algorithmus vorgegeben. In Falle der Endoskopkameraführung wird vom Chirurgen ein im Horizont stehendes Bild gewünscht. Dies resultiert in einem Zielkoordinatensystem, dessen Orientierung bereits durch die Randbedingungen festgelegt ist. Dabei verläuft die y -Achse des K_{STCP} parallel zur xy -Ebene des Weltkoordinatensystems. Der Winkel zwischen den z -Achsen des Weltkoordinatensystem und des K_{STCP} gibt die Rotation des Kamerabilds wieder.

Bei der beschriebenen Gesamtkinematik bedeutet eine Rotation von 0° ein auf dem Kopf stehendes Kamerabild. Eine Rotation von 180° entspricht einem im Horizont liegendes Kamerabild, welches in der Regel gewünscht ist. Weiter gibt es die Möglichkeit, das Kamerabild um einen bestimmten Winkel zu drehen, sodass das Kamerabild im Horizont liegt. Dies kann auf zwei Arten realisiert werden. Zum einen kann das Endoskop entsprechend an den Roboterendeffektor angebracht werden. Dies führt zu einer mechanischen Veränderung des Gesamtaufbaus, ist zudem statisch und wird deshalb nicht weiter verfolgt. Weiter gibt es die Möglichkeit, mithilfe einer Bildtransformation das Kamerabild um einen gewünschten Winkel zu drehen.

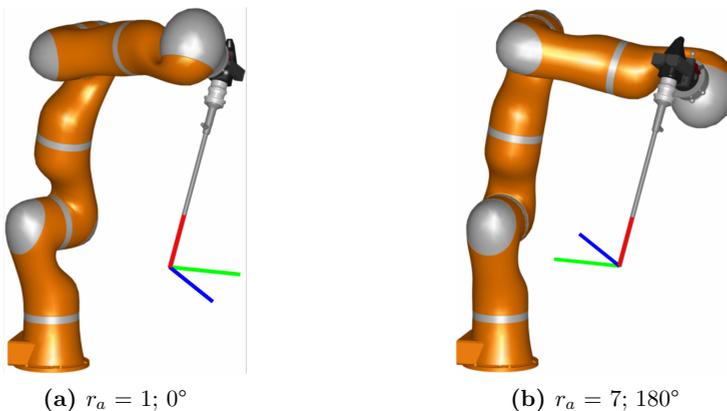


Abbildung 5.17: Orientierung am Endeffektor: Während die Position der Instrumentenspitze und damit auch die Position des Roboterendeffektors gleich bleibt, hat sich die Orientierung um die x -Achse (Instrumentenschaft) um 180° verändert.

Die Verdrehung des KS_{TCP} zur z -Achse des Weltkoordinatensystem wird durch den Parameter r_a ausgedrückt, welcher letztendlich die Orientierung des Roboterendeffektors darstellt. In den Gleichungen 5.1 ist die Definition der Orientierung des Zielkoordinatensystems beschrieben. Der Vektor \vec{x} ergibt sich aus den zwei Fixpunkten, dem Pivotpunkt \vec{p}_{pivot} und dem Zielpunkt \vec{p} . Mithilfe des Kreuzprodukts der Vektoren \vec{x} und \vec{z}_{WKS} wird der Vektor \vec{y} gefunden, welcher in der xy -Ebene des Weltkoordinatensystem liegt.

Da ein rechtshändiges kartesisches Koordinatensystem gewünscht ist, ist die z -Achse des Zielkoordinatensystems trivial. Die homogene Matrix P zeigt das Ergebnis, das Zielkoordinatensystem, auf.

$$\begin{aligned}
 \vec{z}_{WKS} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^T \\
 \vec{x} &= \frac{\vec{p}_{pivot} - \vec{p}}{\|\vec{p}_{pivot} - \vec{p}\|} \\
 \vec{y} &= \frac{\vec{x} \times \vec{z}_{WKS}}{\|\vec{x} \times \vec{z}_{WKS}\|} \\
 \vec{z} &= \frac{\vec{x} \times \vec{y}}{\|\vec{x} \times \vec{y}\|} \\
 \mathbf{P}_{TCP} &= \begin{pmatrix} \vec{x} & \vec{y} & \vec{z} & \vec{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

5.3.5 Zusammenfassung der Arbeitsraumoptimierungsparameter

Damit wurden vier Parameter vorgestellt, welche einen Einfluss auf den Arbeitsraum des Roboters nehmen. Deshalb werden sie auch Arbeitsraumoptimierungsparameter genannt. Zusammengefasst handelt es sich dabei um den Roboterkonfigurationstyp r_c , den Nullraumparameter ns , die Orientierung des Roboterendeffektors r_a und die Position des Pivotpunkts \vec{p}_{pivot} im Roboterkoordinatensystem. Gemeinsam stellen die Arbeitsraumparameter einen zu wählenden Parametersatz P_R für die Lösung der inversen Kinematik und damit der Optimierung dar.

$$\mathbf{P}_R = \{r_c, r_a, ns, \vec{p}_{pivot}\} \tag{5.2}$$

5.4 Ableitung von Kriterien für die Roboterperformanz

Das Gelingen einer Roboter-assistierten Operation soll möglichst nicht durch den Roboter limitiert oder sogar behindert werden. Deshalb soll mithilfe des Performanzmaßes eine Aussage über die gewählten Roboterparameter getroffen werden. Die gewählten Kriterien leiten sich aus bereits bestätigten Ergebnissen von anderen Robotersystemen ab [Sun07].

Die Roboterperformanz wird von den Arbeitsraumoptimierungsparametern (vgl. Kap. 5.3) beeinflusst und stellt durch geschickt gewählte Parameter die Basis für eine erfolgreiche Durchführung einer Operation dar. Im Folgenden werden die Kriterien definiert, welche ein Gütemaß der Roboterperformanz wiedergeben. Dabei wird sowohl das Kriterium an sich als auch die Wahl der Metrik des Gütemaßes beschrieben.

Das Gütemaß wird lediglich auf den gewählten Arbeitsraum angewendet. Dafür wurde in Kapitel 4.2 der relevante Arbeitsraum herausgearbeitet, der nun in Form einer Punktwolke zur Verfügung steht. Diese Punktwolke wird anhand der Kriterien bewertet, sodass ein Gütemaß über die Eignung der Arbeitsraumparameter entscheidet. Zur Beurteilung kommt daher lediglich ein kleiner Teil des maximal möglichen Arbeitsraums. Durch die Pivotpunkt-Restriktion, die Instrumentenlänge und die Bauchdecke des Patienten kann vereinfacht gesagt werden, dass der maximale Arbeitsraum durch eine Halbkugel beschrieben wird.

Es werden drei Kriterien angewendet, welche genauer erläutert werden. Der berechnete Wert wird als Index oder Indikator bezeichnet.

5.4.1 Die Erreichbarkeit

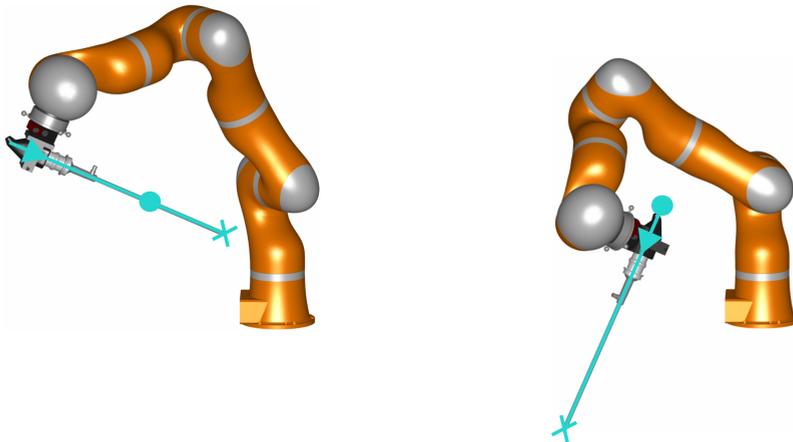
Während einer Operation soll der Roboter alle gewünschten Posen einnehmen können. Mit der Berechnung der inversen Kinematik kann jede Pose überprüft werden. Ein Parametersatz, bestehend aus den in Kapitel 5.3 gesetzten Parametern, ist zur Lösung der inversen Kinematik notwendig. Der Erreichbarkeitsindex $index_{reach}$ wird prozentual angegeben. Die nicht erreichten Posen werden kumuliert und durch die Anzahl an zu erreichenden Posen N geteilt. Folglich ergibt sich der Wert 0 für eine vollständig erreichbare Punktwolke, dagegen der Wert 1 wenn keiner der gewählten Punkte erreichbar ist.

$$index_{reach} = \frac{\sum_{n=1}^N A_n}{N} \quad (5.3)$$

$$A_n = \begin{cases} 0, & \mathbf{P}_n \text{ erreichbar} \\ 1, & \mathbf{P}_n \text{ nicht erreichbar} \end{cases}$$

Gleichung 5.3 zeigt die Berechnung des Erreichbarkeitsindex, wobei \mathbf{P}_n die n -te von N geforderten Posen bedeutet.

Wenn die Lösung der inversen Kinematik einen gültigen Wert ausgibt, ist eine Pose für den Roboter erreichbar. Die berechneten Gelenkwinkel liegen innerhalb der Gelenkgrenzen. Die direkte Folgerung, dass \mathbf{P}_n deshalb auch erreichbar ist, ist jedoch aufgrund des Pivotpunkt-Szenarios nicht möglich. Es muss ebenfalls die Randbedingung erfüllt sein, dass der Pivotpunkt zwischen dem Zielpunkt und dem Roboterendeffektor liegt. Die Abbildung 5.18 zeigt die Fallunterscheidung.



(a) Der Pivotpunkt liegt zwischen der Zielpose und dem Roboterendeffektor.

(b) Der Pivotpunkt liegt außerhalb der Strecke, welche zwischen Zielpose und Roboterendeffektor erstellt werden kann.

Abbildung 5.18: Der Pivotpunkt muss immer zwischen der Zielpose und dem Roboterendeffektor liegen. Für die Darstellung gilt: EE:= Dreieck, \vec{p}_{pivot} := Kreis, TCP:= Kreuz

Im übertragenen Sinn soll der Roboter nicht den Patienten verletzen und durch den Trokar ins Körperinnere fahren. Liegt der Zielpunkt oberhalb, bezogen auf die z -Achse des WKS , des Pivotpunkts, kann es ebenfalls zu einer Kollision zwischen Roboterendeffektor und Patient kommen. Dies ist in Abbildung 5.19 beschrieben. Es

kann davon ausgegangen werden, dass die insufflierte Bauchdecke des Patienten eine konvexe Hülle darstellt und der Trokar auf dem Plateau des Bauchs sitzt. Deshalb wird lediglich die z -Achse näher betrachtet.

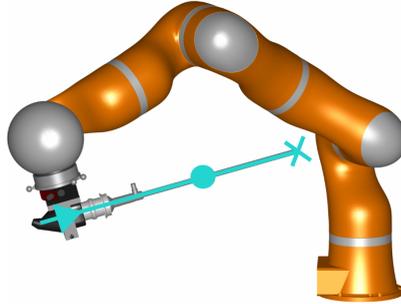


Abbildung 5.19: Der Pivotpunkt liegt innerhalb der Strecke, welche zwischen Zielpose und Roboterendeffektor erstellt werden kann. Jedoch kommt es sehr wahrscheinlich zu einer Kollision zwischen dem Roboterendeffektor und dem Patienten, da der Zielpunkt oberhalb des Pivotpunkts liegt. Für die Darstellung gilt: EE:= Dreieck, \vec{p}_{pivot} := Kreis, TCP:= Kreuz

5.4.2 Die Gelenkbewegung

Als weiteres Merkmal dient die Größe der Gelenkbewegung beim Verfahren des Roboters. Kleine Bewegungen lassen den Roboter selbst ruhiger wirken. Schließlich arbeitet ein Mensch in direkter Umgebung mit dem Roboter zusammen. Eine schnelle und hektische, wenn auch kontrollierte, Bewegung des Roboters könnte das Sicherheitsempfinden beeinflussen. Die Gelenkbewegung näher zu betrachten ist außerdem in Bezug auf die Pivotpunkt-Restriktion sinnvoll.

Bei einer Fahrt von der Startpose zur Zielpose muss zudem darauf geachtet werden, dass die Pivotpunkt-Restriktion während der Fahrt nicht verletzt wird. Damit der Pivotpunkt während der Fahrt gehalten wird, erfolgt eine zusätzliche Interpolation um den Pivotpunkt. Dies geschieht softwareseitig und kann aufgrund der kinematischen Kette nicht durch den mechanischen Aufbau gelöst werden. Daher können Gelenkanschlüsse dazu führen, dass obwohl das Erreichen der Start- und Zielposition möglich ist, die Interpolation um den Pivotpunkt fehlschlägt. Dazu wurde folgende Näherung angenommen: Bei kleinen Gelenkbewegungen einzelner Gelenke zwischen zwei Posen mit sehr kurzer Distanz ist eine Interpolation um den Pivotpunkt möglich.

Um den gewählten Parametersatz in Bezug auf die Gelenkbewegung bewerten zu können, werden die kartesischen Nachbarn einer Pose betrachtet. Die Nachbarposen, welche geprüft werden, sind in Abbildung 5.20 schematisch dargestellt. Dazu wird in positiver und negativer x -, y - und z -Richtung die Gelenkstellung der Pose berechnet. Die Nachbarposen liegen in einem gewählten Abstand r von der aktuellen Position \vec{p} . Der Abstand zu der aktuellen Position wird entsprechend der Auflösung der Punktwolke gewählt.

Die Orientierung der Nachbarpose wird auf Basis der Pivotpunkt-Restriktion und der Randbedingung, dass die y -Achse des TCP in der xy -Ebene des WKS liegen muss, berechnet. Es ergeben sich sechs betrachtete Nachbarposen $M(\vec{p})$ (vgl. Glg. 5.4), deren Gelenkwinkel separat genauer betrachtet werden.

$$M(\vec{p}) = \vec{p} + \vec{e}, \quad e \in \left\{ \begin{pmatrix} r \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -r \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ r \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ -r \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ r \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -r \end{pmatrix} \right\} \quad (5.4)$$

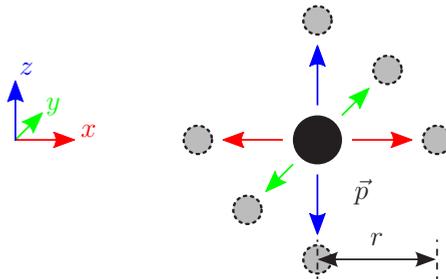


Abbildung 5.20: Kartesische Nachbarn der aktuellen Position \vec{p} im Abstand von r

Die Berechnung des Gelenkbewegungsindex $index_{joint}$ (vgl. Glg. 5.5) erfolgt durch die Klassifizierung der größten Gelenkbewegung eines Gelenks pro Nachbar (vgl. Glg. 5.8). Er resultiert in einem Zeilenvektor, welcher für die gesamte Punktwolke (Anzahl an Punkte $N_{reached}$) gilt. Die vier Spalten beschreiben vier Gruppen. Pro überprüfter erreichbarer Nachbarpose wird ein Zähler in der jeweiligen Gruppe hochgesetzt. Die einzelnen Gruppen definieren sich über die größte Gelenkbewegung zwischen der aktuellen Pose und der Nachbarpose. In Gleichung 5.7 ist die Unterteilung der Gelenkklassen gezeigt.

$$index_{joint} = \sum_{n=1}^{N_{reached}} index_{joint}(\vec{p}_n) \quad (5.5)$$

$$index_{joint}(\vec{p}_n) = \sum_{q \in (M(\mathbf{P}_n))} f(j(\vec{p}), j(\vec{q})) \quad (5.6)$$

$$f(j_1, j_2) = \begin{cases} [1 & 0 & 0 & 0], & g(j_1, j_2) \in [0^\circ; 10^\circ) \\ [0 & 1 & 0 & 0], & g(j_1, j_2) \in [10^\circ; 25^\circ) \\ [0 & 0 & 1 & 0], & g(j_1, j_2) \in [25^\circ; 45^\circ) \\ [0 & 0 & 0 & 1], & g(j_1, j_2) \geq 45^\circ \end{cases} \quad (5.7)$$

$$g(j(\vec{p}), j(\vec{q})) = \max_{i=1, \dots, 7} |j_{\vec{p}, i} - j_{\vec{q}, i}| \quad (5.8)$$

$$\vec{j}_k = \left(j_{k,1}, \dots, j_{k,7} \right)^T \quad (5.9)$$

Visuell kann der Gelenkbewegungsindex als Histogramm dargestellt werden. Ein guter Gelenkbewegungsindex zeichnet sich damit durch ein abfallendes Histogramm aus, wobei der Erreichbarkeitsindex in Bezug dazu gesetzt sein muss. Das Maximum, der beste Wert, stellt die Multiplikation der Anzahl an erreichten Punktwolkenpunkten $N_{reached}$ mit den getesteten Nachbarn $N_{neighbors}$ dar. Der Zelleneintrag liegt dabei in der ersten Spalte:

$$index_{joint,max} = [N_{neighbors} \cdot N_{reached} \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (5.10)$$

Die Summe der einzelnen Spalten ist immer kleiner gleich $6 \cdot N_{reached}$ und beträgt im Minimum den Wert 0 – schlechtester Wert, da es sich zu diesem Zeitpunkt noch um eine absolute Zahl handelt. Nachbarpunkte, welche nicht erreicht werden, gehen nicht in die Wertung mit ein. Der Gelenkbewegungsindex bildet eine Untermenge des Erreichbarkeitsindex.

5.4.3 Die Singularität

Eine Roboterstellung wird als singularär bezeichnet, wenn die Determinante der Jacobi-Matrix null wird: $\det(J_A) = 0$. Nähert man sich einer Singularität, fällt auf, dass sich die Gelenkachsen auffällig schnell bewegen. Das hängt mit der Lösung der inversen Kinematik und der Steuerung des Roboters selbst zusammen.

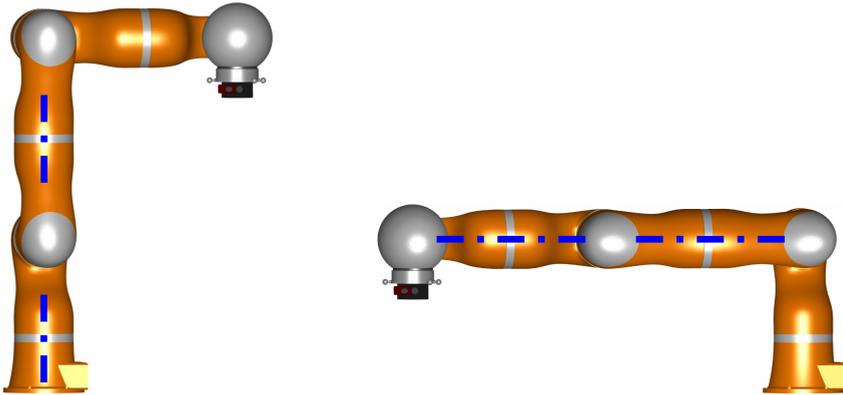
Die Singularität erkennt man an bestimmten Gelenkkonfigurationen. Hierbei verliert der Roboter durch die Gelenkstellung einen Freiheitsgrad. Es wird zwischen Randsingularitäten und inneren Singularitäten unterschieden. Während Randsingularitäten am Rand des Arbeitsraums, bspw. durch die Streckung des Roboters, hervorgerufen werden, treten innere Singularitäten bei kollinearen Rotationsachsen auf. Für die Lösung der inversen Kinematik liegen in diesem Fall unendlich viele Lösungen vor.

Der LWR4+ besitzt in der Position „Kerze“ gleich mehrere Singularitäten. Die Drehachsen der Torsionsgelenke sind identisch. Zudem muss aufgrund der sieben Bewegungsfreiheitsgraden mit der Pseudoinversen-Jacobi-Matrix gearbeitet werden.



Abbildung 5.21: Der Roboter befindet sich in der Position „Kerze“, bei der alle Gelenkwinkel den Wert 0° haben.

Durch die Randbedingung, dass der Roboter einen Pivotpunkt halten muss, ergeben sich zwei Fälle, die zur Singularität führen können. Im ersten Fall liegen die beiden Rotationsachsen der Gelenke 1 und 3 bei $j_{\vec{k},4} = 0^\circ$ wirkungsgleich. Deutlich wahrscheinlicher ist die Randsingularität beim Überstrecken des Roboterarms: $j_{\vec{k},4} = 0^\circ$. Die Gelenkachsen 3 und 5 sind identisch und damit gibt es unendlich viele Lösungen. Hier stellt die Singularität eine Arbeitsraumbegrenzung dar und wird deshalb im Folgenden genauer beachtet. Das Gelenk 4 soll nicht in eine Singularität laufen.



(a) Singularität wird durch die Lage der Drehachsen des 1. und 3. Gelenks hervorgerufen.

(b) Singularität wird durch die Lage der Drehachsen des 3. und 5. Gelenks hervorgerufen.

Abbildung 5.22: Singularitäten des Roboters im Szenario MIC

Das vierte Gelenk stellt den Ellenbogen des Roboters dar. Da dieses Gelenk den Arbeitsraum begrenzt und trotz Redundanz keine Alternativen vorhanden wären, wird dieses Gelenk genauer untersucht. Der Gelenkwinkel des Ellenbogens wird anhand der Nähe zur Singularität bewertet. Umso näher die Singularität, desto höher wird der kumulierte Wert gewichtet. So sollen sowohl wenige Posen nahe der Singularität als auch viele Posen mit etwas geringerer Singularitätsgefahr in die Berechnung des Singularitätsindex $index_{singularity}$ einfließen.

Gleichung 5.12 zeigt die gewählte Fallunterscheidung. Dabei stellt die Funktion $h(j_{\vec{k},4})$ den gewichteten Wert dar, welcher auf Basis des Gelenkwinkels gewählt wird. Weiter in Gleichung 5.11 wird der Singularitätsindex kumuliert und normiert. Die Anzahl $N_{reached}$ spiegelt die Anzahl an gültigen Posen der Zielpunktwolke wider.

$$index_{singularity} = \frac{\sum_{n=1}^{N_{reached}} h(j_{\vec{p}_n,4})}{5 \cdot N_{reached}} \quad (5.11)$$

$$h(j_{\vec{k},4}) = \begin{cases} 5, & |j_{\vec{k},4}| \in [0^\circ; 3^\circ) \\ 4, & |j_{\vec{k},4}| \in [3^\circ; 5^\circ) \\ 3, & |j_{\vec{k},4}| \in [5^\circ; 10^\circ) \\ 2, & |j_{\vec{k},4}| \in [10^\circ; 15^\circ) \\ 1, & |j_{\vec{k},4}| \in [15^\circ; 20^\circ) \\ 0, & |j_{\vec{k},4}| \geq 20^\circ \end{cases} \quad (5.12)$$

Der Gütwert findet sein Maximum bei 1 und sein Minimum bei 0. Für den normierten Wert des Singularitätsindex steht die 1, genau wie beim Erreichbarkeitsindex, für einen schlechten Wert. Die Singularitätsgefahr, welche das 4. Gelenk betrifft, ist damit bei einem niedrigen Wert geringer. Jedoch gilt diese Aussage nur für die erreichte ($N_{reached}$) Punktwolke und nicht für die geforderte Punktwolke (N). Wie auch beim Gelenkbewegungsindex bezieht sich der Wert des Singularitätsindex auf die erreichbare Teilmenge der Zielpunktwolke. Der Wert muss folglich in Zusammenhang mit der Erreichbarkeit beurteilt werden.

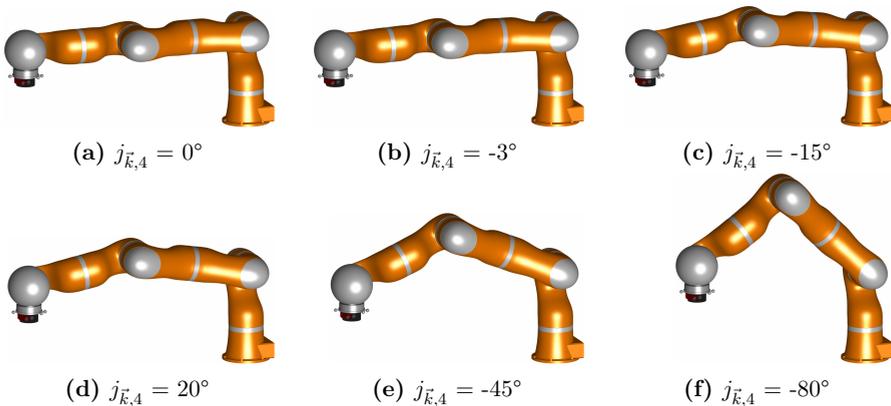


Abbildung 5.23: Überblick zum Gelenkwinkel $j_{\vec{k},4}$ für die Singularitätsbetrachtung

5.4.4 Zusammenfassung der Indikatoren

Die Roboterperformanz wird mithilfe von Indikatoren beschrieben. Der Erreichbarkeitssindex ist ein wichtiger Indikator für die Bewegung des Roboters in einem vorgegebenen Raum. Weiter gibt der Gelenkbewegungsindex Aufschluss über die gleichmäßige Bewegung des Roboters und ist ein Indikator für eine problemfreie Bahnplanung. Eine Singularität soll vermieden werden und der Indikator, welcher eine gewichtete Nähe zur Singularität darstellt, soll möglichst gering sein. Die Güte wird mit den Indikatoren beschrieben, welche kombiniert in die phasenbezogene Analyse (vgl. Kap. 6) eingehen.

KAPITEL 6

Phasenbezogene Roboterparameteranalyse

Im nachfolgenden Abschnitt wird eine Roboterparameteroptimierung mit den in Kapitel 5.3 definierten, roboterspezifischen Parametern angestrebt. Die Parameteranalyse wird anschließend für jede Operationsphase durchgeführt. Ein phasenbezogenes Ergebnis, welches für die gesamte Operation gilt, wird durch eine Verknüpfung der aus der Parameteranalyse stammenden Indikatoren erreicht.

Das Kapitel zeigt im Abschnitt 6.1, welche Anforderungen die einzelnen Indikatoren an die Auswertung besitzen. Es wird auf die Normierung der Güte eingegangen, sodass die Indikatoren von unterschiedlichen Parametersätzen und Phasen verglichen werden können. Im Abschnitt 6.2 werden Methoden zur Verknüpfung der einzelnen Phasen zu einer Operation vorgestellt. Dies zielt auf einen Indikator ab, welcher für den gesamten Eingriff gilt und in einem Parametersatz für den Roboter resultiert. Zur besseren Darstellung der Ergebnisse wird eine Möglichkeit zur Visualisierung vorgeschlagen. Zum Schluss (vgl. Kap. 6.3) wird auf die Suche des Optimums eingegangen.

Eine Bewertung des Parametersatzes entsteht aus den drei definierten Indikatoren, die sich auf die überprüfte Punktwolke beziehen. Die drei Indikatoren repräsentieren die drei Kriterien, welche im Kapitel 5.4 vorgestellt wurden. Die Aufgabe ist es, diese Indikatoren zu vereinen und in Relation zu anderen Parametersätzen zu stellen. Daraus eröffnet sich die Chance, durch die Redundanz des Roboters und der Aufteilung in Unterpunktwolken (Phasen) einen Parametersatz während einer Operation ändern zu können. [Hut15a]

Abbildung 6.1 beschreibt den Vorgang der phasenbezogenen Optimierung, welcher sich auch durch die folgende mathematische Gleichung 6.1 darstellen lässt. Gleichung 5.2, welche den Parametersatz \mathbf{P}_R des Roboters definiert, wird an dieser Stelle aufgrund der Betrachtung mehrerer Phasen erweitert. Der Nullraumparameter soll abhängig von der Phase eingestellt werden und wird deshalb als Vektor formuliert. Eine Anpassung des Parametersatzes \mathbf{P}_R ist deshalb notwendig (vgl. Glg. 6.2). Wenn ein Parametersatz nur auf eine Phase bezogen wird, dann wird dies im tiefgestellten Index vermerkt.

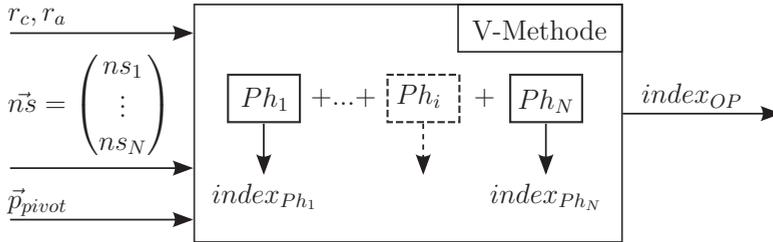


Abbildung 6.1: Modell für die phasenbezogene Analyse: Die Eingabegrößen entsprechen einem Parametersatz \mathbf{P}_R . Die einzelnen Operationsphasen $Ph_1 \dots Ph_N$ erhalten mithilfe der Lösung der inversen Kinematik ihre Indikatoren $index_{Ph}$, welche dann über Verknüpfungsmethoden miteinander verbunden werden. Als Ausgangsgröße steht ein Indikator $index_{OP}$ für die gesamte Operation zur Verfügung.

$$index_{OP} = f(index_{Ph_1}, \dots, index_{Ph_N}) \tag{6.1}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_R &= \{r_c, r_a, \vec{n}s, \vec{p}_{pivot}\} = \{P_{R,1}, \dots, P_{R,N}\} \\ \mathbf{P}_{R,1} &= \{r_c, r_a, ns_1, \vec{p}_{pivot}\} \end{aligned} \tag{6.2}$$

Zur besseren Lesbarkeit wird in diesem Kapitel von (Operations-)Phasen gesprochen. Da die Repräsentation der Operationsphase sowie -schritte als Punktwolke erfolgte, ist eine problemlose Übertragbarkeit möglich.

6.1 Normierung der Indikatoren zur Vergleichbarkeit

In Kapitel 5.4 wurden bereits die Indikatoren vorgestellt:

- Erreichbarkeitsindex $index_{reach}$, vgl. Glg. 5.3
- Gelenkbewegungsindex $index_{joint}$, vgl. Glg. 5.5
- Singularitätsindex $index_{singularity}$, vgl. Glg. 5.11

Für jeden Parametersatz bestehend aus dem Roboterkonfigurationstyp, dem Pivotpunkt, dem Nullraumparameter und der Orientierung am Roboterendeffektor werden diese drei Indikatoren berechnet. Im Folgenden werden die Resultate der drei Indikatoren auch als Indikatorset bezeichnet. Damit diese Indikatoren untereinander verglichen werden können, wird eine Normierung vorgenommen. Das Ziel ist es, eine Vergleichbarkeit sowohl zu anderen Parametersätzen als auch zu unterschiedlichen Phasen respektive unterschiedlichen Punktwolken zu gewährleisten.

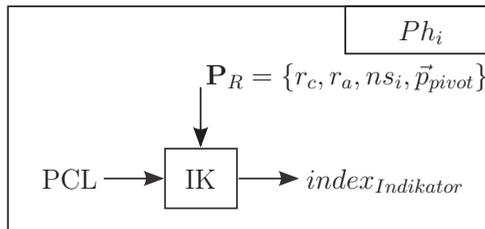


Abbildung 6.2: Ablaufmodell für die Berechnung der Indikatoren: Die Punktwolke PCL repräsentiert eine Phase Ph_i , mit $i = 1 \dots N^+$. Der Indikator $index_{Indikator}$ ist verallgemeinert dargestellt und kann durch die drei bekannten Indikatoren ersetzt werden.

Gleichung 6.3 greift das Modell aus Abbildung 6.2 auf. Die Ausgangsgröße $index_{Ph_i, Indikator}$ kann durch einen Indikator oder die Menge aller drei Indikatoren ersetzt werden.

$$index_{Ph_i, Indikator} = f(r_c, r_a, n s_i, \vec{p}_{pivot}) \quad (6.3)$$

6.1.1 Umgang mit dem Erreichbarkeitsindex

Der Erreichbarkeitsindex ist ein Skalar zwischen 0 und 1. Ein direkter Vergleich mit anderen Parametersätzen derselben Punktwolke ist möglich. Wenn unterschiedliche

Punktwolken miteinander verglichen werden sollen, muss unterschieden werden, ob die Roboterendeffektorpose aufgrund der Gelenkwinkelgrenzen oder der Instrumentenlänge nicht erreicht werden konnte.

Es wird ausgeschlossen, dass Punkte in der Punktwolke vorhanden sind, welche zu einer Verletzung des Patienten durch Kollision führen (vgl. Abb. 5.18(b), 5.19). Das Nichterreichen einer Zielpose aufgrund der Instrumentenlänge ist endgültig, da die Änderung des Parametersatzes die Erreichbarkeit nicht beeinflussen kann. Anders ist es bei einer nicht erreichbaren Roboterendeffektorpose. Dort besteht die Möglichkeit, dass eine Roboterendeffektorpose mit einem neuen Parametersatz eingenommen werden kann, da durch den veränderten Parametersatz andere Gelenkwinkel zum Erreichen der Roboterendeffektorpose notwendig sind. Mit dem Wissen, dass kein Einfluss auf die Instrumentenlänge, jedoch auf den Parametersatz genommen werden kann, wird die Definition des Erreichbarkeitsindex an dieser Stelle geändert:

$$index_{reach'} = \frac{\sum_{n=1}^{N_{checked}} A_n}{N_{checked}}$$

mit

$$A_n = \begin{cases} 0, & \mathbf{P}_n \text{ erreichbar} \\ 1, & \mathbf{P}_n \text{ nicht erreichbar} \end{cases} \quad (6.4)$$

Die Gleichung 6.4 zur Beschreibung der Erreichbarkeit setzt die gültigen Roboterposen mit denen auf die Instrumentenlänge geprüften Zielpunkten \mathbf{P}_n in ein Verhältnis. Die Anzahl der geprüften Zielpunkte ist $N_{checked}$. Für die weitere Analyse wird davon ausgegangen, dass die Punktwolke Positionen beinhaltet, bei denen es zu keiner Einschränkung durch die Instrumentenlänge kommt.

$$N := N_{checked} \geq N_{reached}$$

$$index_{reach'} = index_{reach} \quad (6.5)$$

Mit der Anforderung 6.5 sind Vergleiche zwischen unterschiedlichen Parametersätzen und Punktwolken erlaubt. Letzteres ist besonders relevant für die phasenbezogene Optimierung, bei der unterschiedliche Punktwolken und Parametersätze verknüpft und verglichen werden.

6.1.2 Umgang mit dem Gelenkbewegungsindex

Für den Gelenkbewegungsindex werden die Gelenkbewegungen zu den kartesischen Nachbarn bewertet. Dazu muss die zu bewertende Position erreichbar sein. Wenn die Position vom Roboter nicht erreicht werden kann, ist eine Beurteilung der Gelenkbewegung nicht möglich. Deshalb ist der Gelenkbewegungsindex als Untermenge des Erreichbarkeitsindex zu sehen. Als Zeilenvektor angegeben, lässt sich der Gelenkbewegungsindex durch ein Histogramm darstellen.

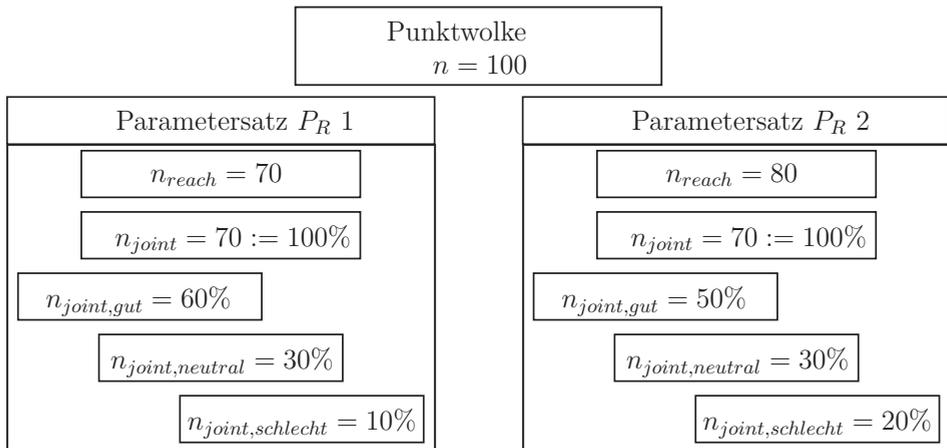


Abbildung 6.3: Motivation zur Vergleichbarkeit des Gelenkbewegungsindex

Abbildung 6.3 zeigt beispielhaft eine mögliche Verteilung der guten bis schlechten Gelenkbewegungen bei gleicher Punktwolke mit unterschiedlichen Parametersätzen. Dabei soll hervorgehoben werden, dass der Gelenkbewegungsindex eine Untermenge des Erreichbarkeitsindex bildet. Aus dem Schaubild geht hervor, dass die Aussage, welcher der bessere Parametersatz ist, zunächst nicht eindeutig ist.

Das Ziel ist es, einen skalaren Wert zu generieren, welcher sich mit anderen Gelenkbewegungsindexen vergleichen lässt. Dazu werden die einzelnen Spalten gewichtet und addiert. Die erste Spalte $index_{joint}(1)$ soll das Ergebnis am meisten beeinflussen, da dort die Anzahl an geringen Gelenkbewegungen kumuliert wird. In der letzten Spalte $index_{joint}(4)$ sind die mit hohen Gelenkbewegung zu den Nachbarn verbundenen Punkte notiert. Sie fließen mit einem geringen Gewicht ein. Die in Gleichung 6.6 vorgeschlagene Gewichtung der Spalten orientiert sich an dem Sortierprinzip „Sortieren nach Zeilen“. Die Gewichtungswerte $(x_1 \dots x_4)$ können an die Anzahl der Punkte der Punktwolke angepasst werden. Das Verhältnis zur Erreichbarkeit wird durch die

Division der geprüften Punkte hergestellt. Damit der Index zwischen 0 und 1 liegt, wird zusätzlich durch die Anzahl an geprüften Nachbarn $N_{neighbors}$ dividiert. Eine Normierung kann somit erreicht werden.

$$\begin{aligned} V_{checked} &= \frac{1}{N_{checked}} \\ V_{neighbors} &= \frac{1}{N_{neighbors}} = \frac{1}{6} \\ V_{joint} &= \sum_{i=1}^4 x_i \cdot index_{joint}(i) \\ &\text{mit } x_1 := 1000; x_2 := 100; x_3 := 10; x_4 := 1; \end{aligned} \tag{6.6}$$

$$index_{joint,norm} = V_{checked} \cdot V_{neighbors} \cdot V_{joint} \tag{6.7}$$

Gleichung 6.7 liefert einen skalaren Wert, welcher in ein Verhältnis zu den geprüften Punkten gesetzt wird. Ein Vergleich mit anderen Parametersätzen und jetzt auch mit Punktwolken ist möglich.

6.1.3 Umgang mit dem Singularitätsindex

In Gleichung 5.11 wurde bereits eine Normierung des Singularitätsindex vorgenommen. Durch die Betrachtung des Gelenkwinkels j_4 , von dem die größte Singularitätsgefahr ausgeht, wird dieser als Signalwert verwendet. Ein hoher Singularitätsindex steht für eine hohe Singularitätsgefahr. Ein niedriger Wert ist besser, jedoch nicht aussagekräftig, da nur die erreichbaren Posen beurteilt wird. Der Singularitätsindex muss deshalb in einen Zusammenhang mit dem Erreichbarkeitsindex gesetzt werden. Mithilfe eines Schwellenwerts werden Parametersätze ausgeschlossen, obwohl der Erreichbarkeitsindex und der Gelenkbewegungsindex eine positive Beurteilung liefern. Details zur Wahl des Schwellenwerts werden in Kapitel 7 gegeben.

6.2 Methoden zur Verknüpfung der Phasen

Bevor die einzelnen Phasen zu einer Operation zusammengefügt werden (vgl. Kap. 6.2.2), wird eine Einführung zur Visualisierung der Ergebnisse in Form einer Datenmatrix vorgestellt (vgl. Kap. 6.2.1).

6.2.1 Visualisierung der Datenmatrix

Ein Datensatz wird repräsentiert durch

- eine Punktwolke PCL
- die roboterspezifischen Parameter: r_c, r_a, ns
- eine Menge von Pivotpunkten:

$$\mathbf{P}_{pivot} = \{p_{x,1} \cdots p_{x,l}\} \times \{p_{y,1} \cdots p_{y,m}\} \times \{p_z\}$$
- die Indikatoren

Aus der Menge der Pivotpunkte ergibt sich für jeden Pivotpunkt ein Indikatorset aus Erreichbarkeitsindex, Gelenkbewegungsindex und Singularitätsindex. Für die Visualisierung wird die Menge der Pivotpunkte strukturiert der Berechnung übergeben. Eine Datenmatrix mit veränderlichen x - und y -Werten stellt die Menge der Pivotpunkte dar. Die Position des Pivotpunkts auf der z -Achse bleibt konstant. So kann ein Indikator auf eine dreidimensionale Oberfläche übertragen werden. Während die x - und y -Werte der Oberfläche den x - und y -Positionen der Pivotpunkte entsprechen, stellt der Indikator selbst die 3. Dimension dar (vgl. Abb. 6.4). Redundant dazu wird der Indikator zusätzlich durch eine Farbampel repräsentiert.

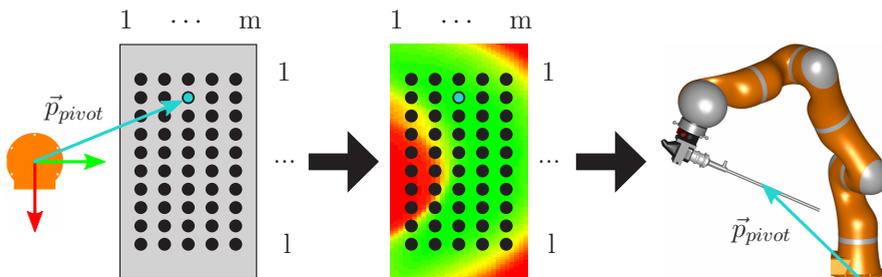


Abbildung 6.4: Der Pivotpunkt wird als Datenmatrix in den Berechnungen verarbeitet: $\mathbf{P}_{pivot} = \{p_{x,1} \cdots p_{x,l}\} \times \{p_{y,1} \cdots p_{y,m}\} \times \{p_z\}$. Ein Element der Datenmatrix, in schwarz gekennzeichnet, repräsentiert einen Parametersatz $\mathbf{P}_{R,PCL}$ einer Punktwolke PCL.

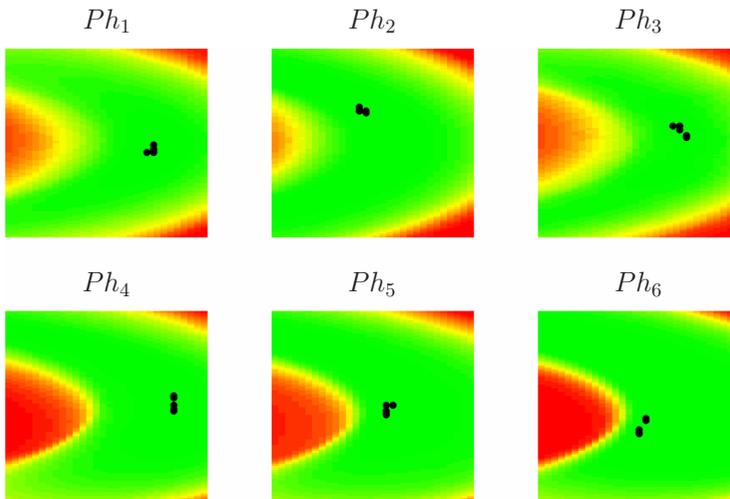


Abbildung 6.5: Der getestete Parametersatz ist durch den Indikatoren $index_{reach}$ farblich dargestellt. Während der Parametersatz auf allen Bildern identisch ist, wurde die der Berechnung übergebende Punktwolke verändert. Es wird sichtbar, dass Phasen ($Ph_1 \dots Ph_6$) unterschiedlich auf diesen Parametersatz reagieren. Durch schwarze Punkte sind die fünf besten Pivotpunkte in jedem Schaubild hervorgehoben. Für dieses Schaubild wurde $r_c = 2$, $r_a = 0^\circ$ und $ns = 0^\circ$ verwendet.

In Abbildung 6.5 ist das Ergebnis verschiedener Phasen dargestellt. Jeder Punkt auf dem Gitter steht für einen hinterlegten Parametersatz, wobei r_c , r_a , ns unverändert bleiben, variiert \vec{p}_{pivot} . Die Farbgebung entspricht der Bewertung: grün $\hat{=}$ gut; rot $\hat{=}$ schlecht. Eine Operation setzt sich aus mehreren Phasen zusammen. Dabei darf der Parametersatz im Bezug auf den Nullraumparameter angepasst werden – die restlichen Parameter müssen konstant bleiben. Übertragen auf das Schaubild muss die gewählte Position auf dem Gitter in den einzelnen Diagrammen ($Ph_1 \dots Ph_6$) gleich bleiben. Das lokale Optimum der einzelnen Phasen – gezeigt in den Diagrammen durch schwarze Punkte – liegt jedoch an unterschiedlichen Stellen. Daher werden im nächsten Abschnitt verschiedene Methoden vorgestellt, welche eine Verknüpfung der Phasen erlauben.

6.2.2 Verknüpfung der Phasen

Nachdem die Indikatoren für die Parametersätze erstellt wurden, sollen diese miteinander verknüpft werden, um eine aus einzelnen Phasen bestehende Operation abbilden zu können. Motiviert wird das Problem durch Abbildung 6.1. Dort werden die errechneten Indikatoren der jeweiligen Phasen eines Parametersatzes dargestellt.

Mit dem Rang wird die ausschlaggebende Bewertung vergeben. An dieser Stelle wird nun der Entscheidungsprozess dargestellt, welches Verfahren zielführend für ein gutes Ergebnis eingesetzt werden kann.

Tabelle 6.1: Motivation zur Verknüpfung von Indikatoren verschiedener Phasen mit einem Parametersatz: Welchen Rang haben diese vier Parametersätze nach einer Verknüpfung?

	Ph_1	Ph_2	Ph_3	Ph_4	Rang
$P_R 1$	0,7	0,70	0,70	0,7	?
$P_R 2$	0,7	0,80	0,95	0,4	?
$P_R 3$	0,7	0,85	0,85	0,5	?
$P_R 4$	0,8	0,75	0,65	0,8	?

Es werden im Folgenden drei Verfahren vorgestellt:

- Bildung des Mittelwerts
- Multiplikation der Indikatoren
- Maximierung des Minimums

Bildung des Mittelwerts

Um die durchschnittliche Güte eines Indikators über alle Phasen zu erhalten, wird das arithmetischen Mittel gewählt. Der gewählte Indikator erhält zur Berechnung den Parametersatz \mathbf{P}_R und die jeweilig Punktvolke bzw. Phase Ph_i . Die Summe wird gemittelt über die Anzahl an Phasen N_{Ph} .

$$index_{avg}(P_R) = \frac{1}{N_{Ph}} \sum_{i=1}^{N_{Ph}} index_{Indikator}(Ph_i) \quad (6.8)$$

Ein Nachteil dieser Methode ist, dass der Anteil eines schwachen Index ausgeglichen werden kann. Besonders problematisch ist dies, wenn sich die Indexe $index_{Indikator}$ in ihrem Wert stark unterscheiden. Im Mittel fällt der Ausreißer nicht auf. Das Ergebnis liegt zwischen 0 und 1.

Multiplikation der Faktoren

Durch die Multiplikation der Indexe wird ebenfalls die Menge der Güte zu einem Wert vereint. Die Vorgehensweise ist ähnlich der Bildung des Mittelwerts. Das Produkt der Indikatoren aus den unterschiedlichen Phasen stellt ein weiteres Verfahren dar.

$$index_{multiply}(P_R) = \frac{1}{N_{Ph}} \prod_{i=1}^{N_{Ph}} index_{Indikator}(Ph_i) \quad (6.9)$$

In diesem Fall nimmt der schwächste Index aus der Produktreihe großen Einfluss auf das Ergebnis. Somit kann ein Parametersatz durch einen relativ schlechten Einzelwert in seiner Güte stark reduziert werden. Der Ausreißer wirkt sich deutlich auf das Ergebnis aus. Das Ergebnis liegt zwischen 0 und 1.

Maximierung des Minimums

Bei diesem Verfahren ist das schwächste Glied in der Kette ausschlaggebend. Dazu wird kein einzelner Index für die Kombination der Phasen und Parametersätze bestimmt. Stattdessen wird das Minimum innerhalb des gebildeten Vektors identifiziert und dessen Wert maximiert. Da der schwächste Index betrachtet wird, ist die Kombination der guten Indexe zweitrangig.

$$index_{minmax}(P_R) = argmin([index_{Indikator}(Ph_1); \dots ; index_{Indikator}(Ph_N)]) \quad (6.10)$$

In diesem Fall wird eine gleichbleibende Güte über alle Phasen angestrebt. Als Ergebnis wird der niedrigste Wert aus dem Zeilenvektor zurückgegeben.

Eine gewichtete Anwendung der Methoden ist aus aktueller Sicht nicht zielführend. Die Wichtigkeit der Region geht nicht aus den Daten hervor, weder durch die zeitliche Dauer einer Phase noch durch Häufigkeit von Punkten innerhalb einer Region.

Tabelle 6.2: Rangfolge unterschiedlicher Methoden

	Ph_1	Ph_2	Ph_3	Ph_4	$index_{avg}$		$index_{multiply}$		$index_{minmax}$	
					Erg	Rang	Erg	Rang	Erg	Rang
$P_R 1$	0,7	0,70	0,70	0,7	0,7000	4	0,2401	3	0,70	1
$P_R 2$	0,7	0,80	0,95	0,4	0,7125	3	0,2128	4	0,40	4
$P_R 3$	0,7	0,85	0,85	0,5	0,7250	2	0,2529	2	0,50	3
$P_R 4$	0,8	0,75	0,65	0,8	0,7500	1	0,3120	1	0,65	2

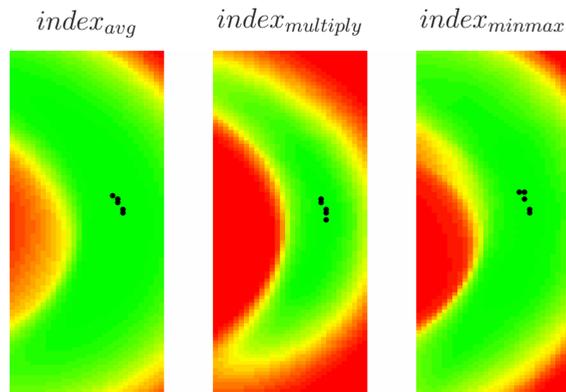


Abbildung 6.6: Die verwendeten Verknüpfungsmethoden erreichen unterschiedliche Maxima. Als Grundlage der Verknüpfung dienen die Phasen aus Abbildung 6.5.

6.3 Finden des Optimums

Das Optimierungsverfahren wird in vier Abschnitten beschrieben. Neben dem Programmablauf (vgl. Kap. 6.3.1) wird der Einsatz der beschriebenen Methoden erläutert (vgl. Kap. 6.3.2). Die Optimierung ist in die Maximierung der Güte (vgl. Kap. 6.3.3) und in die Auswertung des lokalen und globalen Maximums aufgeteilt (vgl. Kap. 6.3.4).

6.3.1 Programmablauf

Für die roboterspezifischen Parametersätze P_R werden lösungsorientierte Werte den einzelnen Parametern zugeordnet. Als Eingabegröße werden die acht unterschiedlichen Roboterkonfigurationstypen r_c definiert, welche im Kapitel 5.3.2 erläutert wurden.

$$r_c = 1 \cdots 8 \in \mathbb{N}^+ \quad (6.11)$$

Die Orientierung am Roboterendeffektor wird durch einen Winkel repräsentiert (vgl. Kap. 5.3.4). Die Parametermenge r_a kann damit folgende Werte einnehmen:

$$r_a = 0^\circ \cdots 360^\circ \in \mathbb{R}^+ \quad (6.12)$$

Für die Berechnung werden diskrete Werte aus der Menge von Winkeln gewählt.

Der Nullraumparameter gibt die Position des Ellenbogens auf dem Redundanzkreis wieder (vgl. Kap. 5.3.3). Die mögliche Menge des Nullraumparameters wird folgendermaßen dargestellt:

$$n_s = -180^\circ \cdots 180^\circ \in \mathbb{R}^+ \quad (6.13)$$

Die inverse Kinematik fordert eine Menge von diskreten Nullraumparametern, welche auf Basis des Anwendungsfalls gewählt wird.

Die Menge von Pivotpunkten wird durch eine Datenmatrix repräsentiert. Die Größe der Datenmatrix wiederum ergibt sich aus dem Abstand der einzelnen Pivotpunkte, dem Start- und dem Endpunkt der zu testenden Pivotpunkte. Der Startpunkt definiert sich aus dem gewünschten Minimalwert auf der x - und y -Achse, die Endpunkte durch die Maximalwerte. Die Position entlang der z -Achse wird für den Berechnungsschritt konstant gehalten. Die Datenmatrix stellt später die Struktur für das Abspeichern der Ergebnisse dar.

$$\mathbf{p}_{pivot} = \{p_{x,1} \cdots p_{x,l}\} \times \{p_{y,1} \cdots p_{y,m}\} \times \{p_z\} \quad (6.14)$$

Der Programmablauf gestaltet sich folgendermaßen: Zu Beginn muss für jeden Parametersatz eine Matrix von Indikatorsets berechnet werden. Dies geschieht durch die Berechnung der inversen Kinematik, welche die einzelnen Parametersätze und eine Punktwolke als Eingabegröße übergeben bekommt. Die Abfrage verläuft über eine kaskadierte Kontrollstruktur (For-Schleife), welche sich parallelisiert ausführen lässt. Dazu wird eine Datenstruktur verwendet, welche in der MATLAB-Umgebung angeboten wird und sich leicht weiterverarbeiten lässt. Besonders ist darauf zu achten, dass nach dem Prozess des Parallelisierens die Ergebnisse gemeinsam in eine Datenstruktur abgelegt werden können. Die Ergebnisse werden zusammengefasst in einer Matrix abgespeichert, welche die gleiche Größe wie die Menge von Pivotpunkten besitzt. Folglich werden die Ergebnisse als Datensatz bezeichnet, bei dem jeder Zelleneintrag die Information zum Indikatorset beinhaltet.

6.3.2 Einsatz der Methoden

Die im vorherigen Abschnitt (vgl. Kap. 6.2) genannten Methoden sollen zur Verbindung der Phasen zu einer Operation eingesetzt werden. Nach Abwägung der Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren wird für jeden Indikator eine Methode gewählt.

Das arithmetische Mittel wird als geeignete Methode für die Zusammenfassung des Gelenkbewegungsindex gesehen, da die durchschnittliche Gelenkbewegung aussagekräftig ist. Die Forderung nach kleinen Gelenkbewegungen ist weiterhin relevant. Für die Bewertung aller Phasen soll eine schwer durchführbare Phase keinen starken Einfluss auf die Gesamtentscheidung nehmen. Um dieser problematischen Phase ein relatives Gewicht zu geben, wird die Durchschnittsbildung empfohlen. Dies gilt auch im Hinblick darauf, dass das Kriterium der Gelenkbewegung nicht alleinig in die Zielfunktion eingeht.

Der Vergleich des Erreichbarkeitsindex zwischen Punktwolken und Parametersätzen ist problemlos möglich, da dieser einen Absolutwert liefert. Deshalb wird die Methode der Maximierung des Minimums angewandt. Der aus dem Ergebnis resultierende Wert stellt den schwächsten Index aus allen Phasen dar. Es wird eine Mindestmenge von erreichten Punkten innerhalb einer Punktwolke vorausgesetzt. Der gewünschte Wert liegt bei 100% Erreichbarkeit für jede Punktwolke. Aus diesem Grund erscheint diese Methode für die Bewertung der Erreichbarkeit besonders geeignet.

Für die Vermeidung von Singularitäten wird die Methode der Multiplikation zur Verknüpfung des Singularitätsindex verwendet. Der Nachteil dieses Verfahrens wird in diesem Kontext vorteilhaft bewertet, da ein schlechter Index, von dem eine Gefahr ausgeht, einen großen Einfluss auf den berechneten Wert besitzt. Hierbei wird ausgenutzt, dass bereits ein schlechter Index für ein schwaches Ergebnis genügt. Mittels eines definierten Schwellenwerts, werden Parametersätze nach dem Verknüpfen der einzelnen Datensätze, aussortiert. Auf diese Weise werden Parametersätze mit einem guten Erreichbarkeitsindex und Gelenkbewegungsindex nachträglich entfernt.

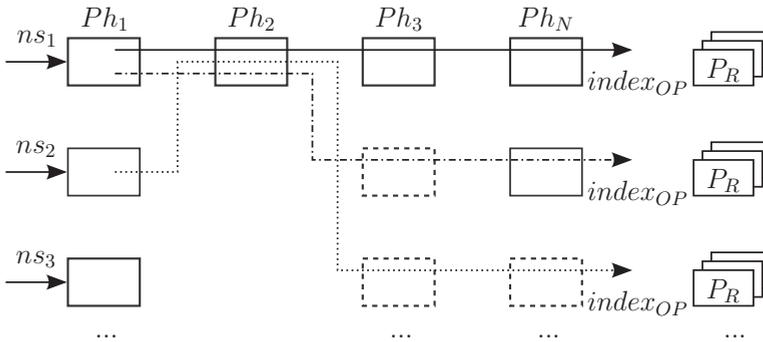


Abbildung 6.7: Kombination von Phasen und Nullraum: Da die Roboterparameter r_c , r_a , \mathbf{p}_{pivot} (als Datenmatrix) konstant bleiben, variiert der Nullraumparameter über die Phasen. Am Ende wird ein Indikator für die gesamte Operation ausgegeben, wobei der Parametersatz einen Vektor \vec{n}_s enthält

Für die Weiterverarbeitung wird pro verknüpftem Datensatz $index_{OP}(P_R)$ nur eine bestimmte Auswahl an Parametersätzen übernommen (vgl. Abb. 6.7). Zusätzlich werden Anforderungen an die Erreichbarkeit und die Gelenkbewegung gestellt, welche ein Mindestmaß abdecken sollen. Damit kann ausgeschlossen werden, dass Daten für die Weiterberechnung benutzt werden, die einer schlechten Kombination an Datensätzen entspringen. Diese würden einen unnötigen Überschuss an Daten produzieren.

6.3.3 Sortieren und Maximieren der Güte

Nach einer Verbindung der einzelnen Phasen zu einer Operation, entsteht für die Bewertung erneut ein Indikatorset $index_{OP}$. Der Gelenkbewegungsindex, ermittelt durch das arithmetische Mittel, der Erreichbarkeitsindex mit dem schwächsten Wert einer Phase und der Singularitätsindex durch die Multiplikation stehen als zusammenfassende Indikatoren zur Weiterverarbeitung zur Verfügung.

Nach dem Verknüpfen eines Datensatzes wird lediglich eine Teilmenge für die weiteren Untersuchungen verwendet. Dazu wird das Ergebnis, welches aus einer Kombination von Datensätzen besteht, genauer betrachtet. Durch einen gesetzten Schwellenwert können Parametersätze bereits durch einen schwachen Singularitätsindex eliminiert werden. Eine Rangfolge wird auf Basis des gemittelten Gelenkbewegungsindex erstellt. Der Erreichbarkeitsindex entscheidet letztendlich ergebnisbezogen, wie viele Parametersätze aus einem Datensatz übernommen werden. Damit wird die Menge

von Parametersätzen reduziert, welche mit den Parametersätzen anderer Datensatzkombinationen verglichen wird. Die ergebnisbezogene Entscheidung orientiert sich an den Werten der Rangfolge. Standardmäßig werden die besten zehn Parametersätze übernommen. Eine Anpassung der Anzahl kann durch die Vorgabe einer bestimmten Erreichbarkeit erzielt werden. Es soll zudem eine Möglichkeit bestehen, mehr als zehn Parametersätze weiterzugeben. Dieser Fall tritt ein, wenn eine Kombination an Datensätzen besonders gut passt. Als Beispiel ist angeführt, dass Ergebnisse mit einer 99-100 % Erreichbarkeit nicht verworfen werden sollen. Im umkehrten Fall kann es auch sein, dass eine Phase besonders schwer zu erreichen ist und die Bewertung durch den Index dementsprechend niedrig ausfällt. Dennoch soll für diese Kombination eine gute Lösung gefunden werden.

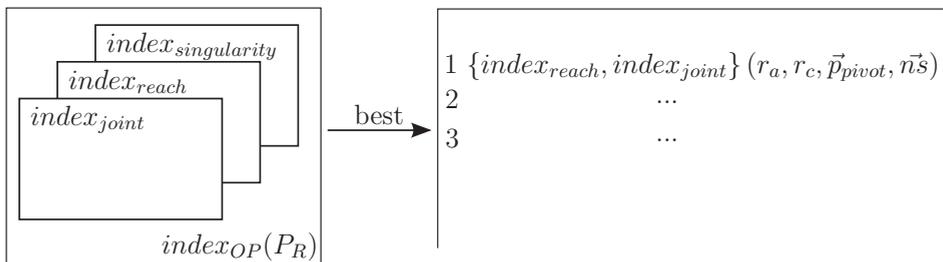


Abbildung 6.8: Der Indikator $index_{OP}(P_R)$ fasst die Bewertung der Operation zusammen. Lediglich gute Parametersätze werden weiter verarbeitet.

Damit ist die Vorverarbeitung abgeschlossen. Es werden die beiden Indikatoren Erreichbarkeit und Gelenkbewegung mit dem zugehörigen Parametersatz zur übergreifenden Suche des Optimums übergeben. Als übergreifende Suche versteht sich, dass sich durch die Phasen und den veränderlichen Nullraumparameter eine gewisse Menge von Kombinationen von Datensätzen ergibt. Die Anzahl von Kombination berechnet sich aus der Anzahl an Phasen und der Anzahl an skalaren Werten für den Nullraumparameter: $N_{Ph}^{N_{ns}}$. Um die folgende Analyse nicht für alle Kombinationen durchführen zu müssen, wird auf diese Weise bereits eine Auswahl getroffen (vgl. Abb. 6.8).

6.3.4 Auswertung der Indikatoren

Nach der Vorauswahl werden die beiden Indikatoren nach ihrem Maximum sortiert. Eine Sortierreihenfolge wird folgendermaßen angestrebt: Der Erreichbarkeitsindex gilt gerundet als erstes Kriterium der Sortierung. So werden die Indikatoren in Gruppen

eingeteilt, welche in Gleichung 6.15 eine Intervallgröße¹ von 0.5% für $a = 200$ liefert. Damit wird davon ausgegangen, dass der Erfolg einer Operation nicht ausschließlich von einer Verbesserung der Erreichbarkeit in einem kleinen Prozentbereich abhängt.

$$index_{Indikator,round} = \frac{round(a \cdot index_{Indikator})}{a} \quad (6.15)$$

Innerhalb der Gruppen wird im Anschluss nach dem gemittelten Gelenkbewegungsindex sortiert. Damit wird ein Verfahren vorgeschlagen, welches sich an zwei Indexen orientiert, um das gemeinsame Maximum zu finden.

Mit der Ausgabe der besten zehn Parametersätze lassen sich die am besten geeigneten Pivotpunkte grafisch darstellen. Die Werte stehen jeweils für sich alleine und kleine Abweichungen können große Auswirkungen haben. Deshalb werden weitere Parametersätze - beispielsweise aus den besten 100 Parametersätzen - analysiert. Wenn eine charakteristische Form entsteht, kann darauf geschlossen werden, dass die einzelnen Parametersätze keine Insellösung darstellen. Stattdessen kann gefolgert werden, dass für diesen Operationstyp eine Region an Pivotpunkten empfohlen wird. Bei näherer Betrachtung des Parametersatzes im Bezug auf den Roboterkonfigurationstyp und die Orientierung des Roboterendeffektors kann im Idealfall eine verallgemeinerte Aussage getroffen werden. Die Untersuchung des phasenbezogenen Nullraumparameters könnte ebenfalls eine Generalisierung erlauben - zumindest für einzelne Phasen. Als Folge daraus kann ein robustes Modell abgeleitet werden. Das Bereichsmaximum wird mit der Empfehlung eines Parametersatzes ausgegeben. Indirekt wird damit eine Empfindlichkeitsanalyse durchgeführt, da der Einfluss der Änderung von Parametern bereits bei der verallgemeinerten Aussage betrachtet wird, sodass eine stabile bzw. praktisch robuste Lösung vorgeschlagen wird.

¹ verwendete Funktion aus MATLAB [The16], Version 2015b: `round()`

KAPITEL 7

Evaluation

Das Kapitel zur Evaluation der vorgeschlagenen Algorithmen zur Bewertung der Roboterperformanz teilt sich in drei Teile auf. Um die Ergebnisse sinnvoll einzuordnen, wird zu Beginn im Unterkapitel Datengewinnung (vgl. Kap. 7.1) der Versuchsaufbau und der Ablauf der Experimente erklärt. Weiter werden Methoden aus dem Patienten-, Operations- und Robotermodell (vgl. Kap. 4, 5) auf die gewonnenen Daten angewandt. Die Zwischenergebnisse sind in den Kapiteln 7.2.2 und 7.2.3 dargestellt. Die Verknüpfung der einzelnen Komponenten zu einem Endergebnis findet in Kapitel 7.2.4 statt, wofür Kapitel 6 die methodische Grundlage stellt. Zum Schluss werden die Ergebnisse diskutiert (vgl. Kap. 7.3).

7.1 Datengewinnung

Zur Evaluation der erforschten Methoden wurden gemeinsam mit Medizinern des Universitätsklinikums Heidelberg Experimente durchgeführt. Um einen realitätsnahen Versuchsaufbau zu erstellen, wurde das von Medizinern entwickelte menschliche Phantom OpenHELP [Ken15] verwendet. Es wurde außerdem darauf geachtet, dass der Versuch eine vollständige Operation nachstellt. Eine komplexe Operation stellt die Rektumresektion dar (vgl. Kap. 4.2.3). Es handelt sich dabei um eine umfangreiche Operation, welche sowohl einen großen Operationsbereich als auch eine lange zeitliche Operationsdauer besitzt. Der Phantomversuch wurde entsprechend angepasst, sodass der Operationsbereich ähnlich, die zeitliche Dauer jedoch verkürzt wurde.

Es wurden zwei Versuchsreihen im Labor durchgeführt. Die Trajektorien der Instrumente und des Endoskops wurden aufgenommen, sowie das Endoskopbild

selbst. Die Versuchsreihen unterscheiden sich in der Art der Führung des Endoskops. Während im ersten Versuch ein Assistent für den Chirurgen das Endoskop führt, übernimmt diese Aufgabe in der zweiten Versuchsreihe ein Roboter. Die autonome Bewegung des Roboters basiert auf den von Bihlmaier [Bih16a] entwickelten Algorithmen. Für die weiteren Untersuchungen ist deshalb die Trajektorie des Endoskops relevant. Die Trajektorie beinhaltet die Information über mehrere Positionen in zeitlicher Reihenfolge.

Für das markerbasierte Tracking der Instrumente, des Endoskops und des Phantoms wurden diese mit eindeutig zuordnenden Markersternen ausgestattet. Die Markersterne bestehen aus mindestens vier reflektierenden Kugeln, welche in einer Ebene liegen. Die Abbildung 7.1 zeigt zwei Markersterne befestigt an einem laparoskopischen Instrument. Jeder Markerstern muss geometrisch eindeutig konstruiert werden, sodass es zu keiner Verwechslung aufgrund von Ähnlichkeiten kommt. Dazu sind die Hinweise der Hersteller zu beachten. Anstelle des markerbasierten Trackings kann die Position der Instrumentenspitzen im Kamerakoordinatensystem erkannt und gespeichert werden. Einen Ansatz präsentiert Bodenstedt et al. [Bod16], welches auf Basis von Textur und Farbe, sowie Lerndaten die Position wiedergibt. Jedoch fehlt der Bezug zur Umgebung, welcher für die Registrierung relevant ist. Erst wenn beispielsweise der Roboter ein Stereoendoskop führt und die Position des Endoskops im Raum über die Ansteuerung des Roboters bekannt ist, kann eine Relation zum Weltkoordinatensystem hergestellt werden. Des Weiteren liefert ein markerbasiertes Tracking zuverlässige Positionsdaten von allen Instrumenten.

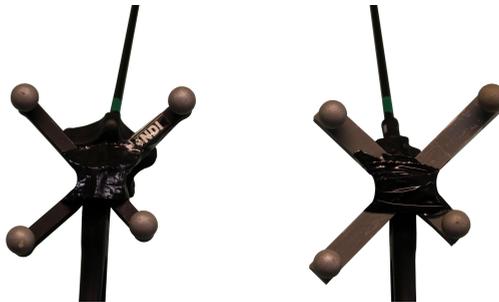


Abbildung 7.1: Markersterne an den Handgriffen der Instrumente

Wie auf den Fotos in Abbildung 7.1 zu sehen ist, befinden sich die Marksterne am Handgriff des Instruments. Es werden daher die Positionen der Handgriffe getrackt. Eine Pivotisierungsroutine ist notwendig, um die Position der Instrumentenspitze zu erhalten.

Der physische Versuchsaufbau wird bei beiden Versuchsreihen nicht verändert. Die Versuche werden vom selben Chirurgen durchgeführt und durchlaufen alle die beschriebenen Operationsphasen (vgl. Kap. 4.2) der Rektumresektion. Die Trokarpositionen der Instrumente und des Endoskops am Phantom bleiben ebenfalls gleich.

7.1.1 Erste Versuchsreihe - handgeführte Versuche

Diese Versuchsreihe verfügt über 20 vollständig aufgezeichnete Phantomoperationen. Der Torso des Phantoms lag dabei auf einem Operationstisch. Die Arbeitsinstrumente wie Greifer und Schere wurden vom Chirurgen geführt. Auch die Endoskopkamera und gegebenenfalls ein Hilfsinstrument wurde von menschlicher Hand, der des Assistenten, bewegt.

Bei dieser Versuchsreihe kam das System Polaris von NDI [NDI16] zum Einsatz. Dabei handelt es sich um ein in der Medizin zugelassenes, optisches Trackingsystem. Um die Abdeckung des Trackingbereichs zu vergrößern und eine Redundanz zu schaffen, wurden zwei Systeme verwendet. Die Systeme waren um ca. 90° versetzt auf einem Radius von ca. 1 m um die Phantommitte angeordnet. Eine gegenseitige Beeinflussung der Systeme konnte nicht festgestellt werden. Während der Aufnahme wurde eines der Systeme als Hauptsystem definiert, dessen Daten vorrangig genutzt werden. Das zweite System kam bei Verdeckung zum Einsatz. Ein Markerstern am Phantom selbst, welches während der kompletten Intervention statisch ist, dient als Referenz. So können die beiden Sensoren zueinander in Bezug gesetzt werden. Das System gibt die Positionsdaten mit einer Frequenz von ca. 10 Hz zur Speicherung weiter. In Abbildung 7.2 ist die räumliche Darstellung des Versuchsaufbaus dargestellt.

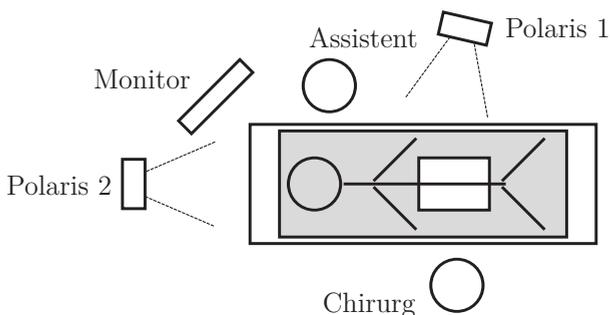


Abbildung 7.2: Räumliche Anordnung während der 1. Versuchsreihe

7.1.2 Zweite Versuchsreihe - Roboter-assistierte Versuche

Die zweite Versuchsreihe beinhaltet fünf Versuche, bei denen der LBR4+ das Endoskop führte. Der Chirurg arbeitete gemeinsam mit dem Roboter am Operationstisch.

Alle Versuche mit dem LBR4+ konnten erfolgreich durchgeführt werden. Ein Assistent war während dieser Versuchsreihe nicht notwendig. Ein Versuch wurde als erfolgreich gewertet, wenn die Operation vom Chirurgen ohne Erreichbarkeitsprobleme oder Sicherheitsbedenken absolviert wurde. Dazu wurde bereits auf Basis der ersten Versuchsreihe (vgl. Kap. 7.1.1) eine Roboterparameteroptimierung angewandt. Der berechnete Parametersatz wurde so validiert.

Im Gegensatz zur ersten Versuchsreihe wurde das markerbasierte System ART-Tracking2 [Adv16] verwendet. Dieses optische Trackingverfahren nutzt ebenfalls die reflektierten Marker. Es kamen sechs Kameras zum Einsatz, welche an der Decke befestigt sind. Die Anordnung der Kameras deckt den Bereich um den Operationstisch ab (vgl. Abb. 7.3). Die Kameras sind bereits zueinander registriert. Die Aufnahmequalität ist hinsichtlich ihrer Genauigkeit und Redundanz besser als bei der ersten Versuchsreihe. Die zeitliche Auflösung der Daten beträgt ca. 50 Hz.

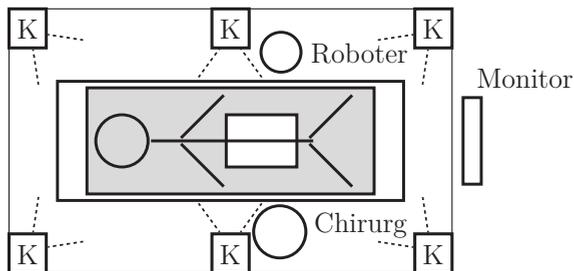


Abbildung 7.3: Räumliche Anordnung während der 2. Versuchsreihe: Die ART-Kameras sind mit einem **K** gekennzeichnet.

7.1.3 Versuche in der Simulationsumgebung

Mithilfe der erstellten Simulationsumgebung soll eine Verifikation der Parameteranalyse durchgeführt werden. Dazu bildet die erste Versuchsreihe die Wissensbasis. In der zweiten Versuchsreihe konnten die gewünschten Trajektorien bereits abgefahren werden. Der Parametersatz wurde konstant gehalten und lediglich die Trajektorien nach dem Algorithmus von Bihlmaier et al. [Bih15] sind unterschiedlich. Die Trajektorien können in das Trokarkoordinatensystem transformiert werden. Somit besteht

die Möglichkeit, den Parametersatz bestehend aus der Roboterkonfiguration, dem Pivotpunkt, den Nullraumparametern (phasenabhängig) und der Orientierung des Roboterendeffektors zu ändern. Die Güte des Parametersatzes kann in ein Verhältnis zu der Güte der abgefahrenen Trajektorie gesetzt werden. Es kann auf diese Weise geprüft werden, ob ein berechneter, guter Parametersatz auch einen guten Wert der Güte aufweist. Zudem kann untersucht werden, ob ein als schlecht bewerteter Parametersatz auch eine schlechte Güte besitzt.

7.2 Ergebnisse der Versuchsreihen

Die gewonnenen Informationen aus den Versuchsreihen werden entsprechend aufbereitet und an die Methoden weitergegeben. Die einzelnen Schritte von der Erfassung der Zielregion über die Analyse der roboterspezifischen Parameter zum Finden eines optimalen Parametersatzes werden im Folgenden durchgeführt. Es wird auf die Umsetzung der beschriebenen Methoden eingegangen und ein Ergebnis ausgegeben.

7.2.1 Aufbereitung der Daten

Die Versuchsdaten werden in MATLAB [The16] aufbereitet, um diese im Anschluss an den Algorithmus zum Bilden der Zielregion zu übergeben. Den Trajektorien wird als Erstes ihre Phase zugewiesen. Die Information über die jeweilige Operationsphase wurde nach dem Versuch anhand des Endoskopvideos notiert. In der zweiten Versuchsreihe konnte die Phaseninformation online erfasst werden. Die Trajektorien sind in diesem Fall direkt annotiert.

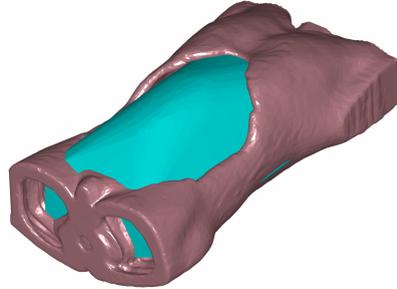
Während der Versuche kam es zu Verdeckungen, sodass die Instrumente nicht durchgängig eine gültige Positionsinformation besitzen. Außerdem können ungültige Werte durch die enge Position der Handgriffe entstehen. Das Trackingsystem ist in diesem Fall nicht in der Lage, die Anordnung der Markerkugeln auf den Markersternen richtig einzuordnen. Da nicht bekannt ist, was der Chirurg in dieser Zeit mit den Instrumenten gemacht hat, wird keine Interpolation zwischen zwei gültigen Positionen durchgeführt.

Für diese Versuche wurde davon abgesehen, Ausreißer zu identifizieren und auszuschließen. Dies wird durch die Ungenauigkeit des Trackingsystems begründet. Stattdessen wird besonderer Wert darauf gelegt, dass sich die Trajektorien im Phantom befinden.

Damit soll sichergestellt sein, dass die relevante Information, nämlich die Bewegungen im Inneren, verwendet wird. In Abbildung 7.4 sind die beiden Möglichkeiten zur Bildung einer Hülle zur visuellen Unterstützung dargestellt. In den weiteren Untersuchungen wird die Hülle, welche den Bauchraum füllt, genutzt (vgl. 7.4(b)).



(a) Das Phantom wird durch eine Hülle ummantelt.



(b) Nur die Trajektorien im Phantominneren gelten als relevant.

Abbildung 7.4: Bounding Box des Phantoms

7.2.2 Erfassung der Zielregion

Die aufbereiteten Daten stehen in Phasen unterteilt zur Verfügung. Mit dem Ziel, eine Punktwolke für jede Phase zu generieren, wird die stabilste Methode gewählt (vgl. Kap. 4.2.1). Eine Abstraktion wird durch eine Gitterstruktur erreicht. Die Auflösung res dieser Struktur wird gesetzt:

$$res = 0.005 \tag{7.1}$$

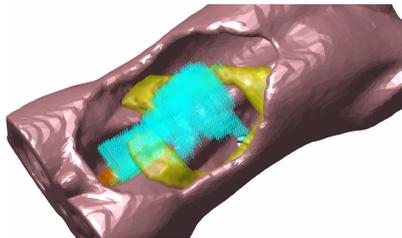


Abbildung 7.5: Zielregionen verschiedener Phasen im Phantom

In Abbildung 7.6 sind die Abstraktionsschritte der Phase 1 gezeigt. Alle folgenden Phasen befinden sich im Anhang B.1. Die erste Reihe beschreibt die Iterationen entlang der x -, y - und z -Achse, welche in Kapitel 4.2.1 erklärt sind. Dabei fällt

auf, dass die Beschreibung durch die z -Achse bereits eine gute Repräsentation der Trajektorien wiedergibt. Sie wird deshalb innerhalb dieses Szenarios als Vorzugsachse bezeichnet. In der unteren Reihe sind die Eingangs- und Ausgangsgrößen in Form einer Punktwolke zu sehen.

Die Rohdaten (org) werden strukturiert und in zwei Varianten ausgegeben. Die erste Variante (2-Dir) verwendet alle Punkte, welche mindestens in zwei der drei Iterationspunktwolken (x -Dir, y -Dir, z -Dir) beinhalten. Die Punkte, welche in allen Iterationspunktwolken vorkommen, werden als zweite Variante (3-Dir) ausgegeben.

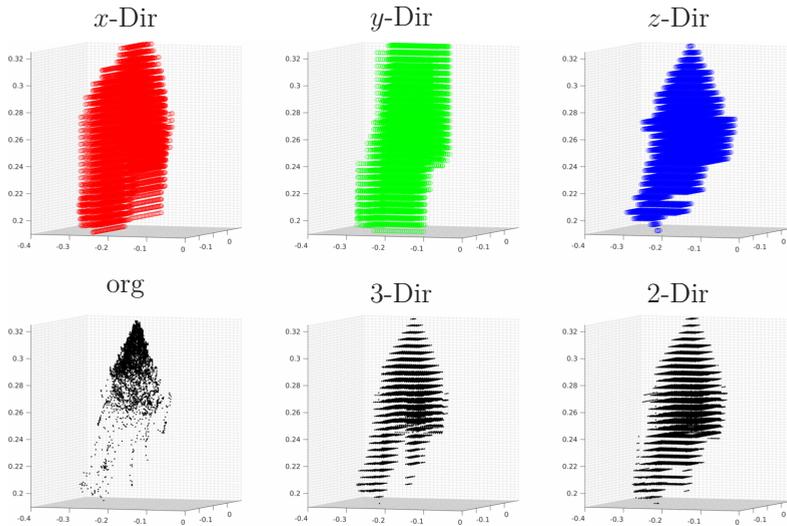


Abbildung 7.6: Zielregion der Phase 1 und ihre Iterationsschritte; Achsenbeschriftung in Meter

In Tabelle 7.1 ist die Anzahl von Punkten pro Phase wiedergegeben. In der Regel findet eine Reduktion der Anzahl an Punkten statt. Die Ausnahmen können durch die Phasen selbst und das Verfahren begründet werden. Während in der ersten und letzten Phase das Verhältnis von Aufnahmezeit (Anzahl an Punkten) und Bewegungsvolumen gering ist, fällt das Verhältnis bei den anderen Phasen höher aus. Aus der semantischen Beschreibung der Operation geht hervor, dass die erste und letzte Phase zu Kontrollzwecken dienen. Es werden flächendeckend verschiedene Strukturen begutachtet. Die mittleren Phasen (2 bis 4) bilden die Operationsphasen ab, in denen manipulative Aktionen ausgeführt werden. Der ausgefüllte Raum jeder Phase im Phantom ist im Kapitel 4.2.3 bei der Erklärung des semantischen Operationsmodells in Tabelle 4.2 bereits dargestellt.

Tabelle 7.1: Von der Trajektorie zur Punktwolke: Die Anzahl an Punkten pro Phase ist gezeigt. Die Werte der Tabelle beziehen sich auf die einzelnen Iterationsschritte entlang der Achsen x , y , z sowie deren Überlagerung. Die Abbildung 7.6 stellt die Schritte der Phase 1 visuell dar.

	org	x -Dir	y -Dir	z -Dir	2-Dir	3-Dir
Ph_1	5775	9955	8845	8800	7886	5686
Ph_2	47540	7588	4833	4812	4347	3645
Ph_3	76669	4208	5448	5443	4446	3305
Ph_4	30857	6400	12984	6204	6211	5091
Ph_5	18525	4753	11721	4556	4827	3669
Ph_6	4243	7153	13223	5809	5965	4657

Es entsteht eine strukturierte Punktwolke für jede Phase. Diese wird dem Roboter für die Parameteranalyse übergeben. Die Abbildung 7.5 zeigt das Phantom und verschiedene Punktwolken einer Operation. Die unterschiedlichen Räume der Schritte werden klar dargestellt.

7.2.3 Untersuchungen zur Roboterperformanz

Die Roboterperformanz wird durch drei Indikatoren beschrieben. Die folgenden Abbildungen zeigen, wenn nicht anders genannt, die Erreichbarkeit des Roboters. Es sollen die Unterschiede und der Einfluss der Parameter anhand der Versuchsdaten aufgezeigt werden. Für das bessere Verständnis der Schaubilder wurde bereits in Kapitel 6 die Informationsrepräsentation genauer erläutert (vgl. Abb. 6.4), weshalb an dieser Stelle darauf verwiesen wird.

Dem Roboterparametersatz werden diskrete Werte zugewiesen. Die Vorgabe der Datenmatrix, welche aus vielen Pivotpunkten besteht, wird durch äußere Randbedingungen festgelegt. Die äußeren Randbedingungen werden durch die sichere Platzierung des Patienten auf dem Tisch sowie dem Wunsch des Chirurgen, auf einer bestimmten Seite zu stehen, festgelegt. Die Höhe p_z ist durch die Höhe des Phantoms auf dem Operationstisch bereits definiert. Der Abstand zwischen den Gitterpunkten beträgt in x - und y -Richtung jeweils 1 cm. Es entsteht ein Suchraum im RKS der folgenden Größe in Meter:

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{pivot} &= \{p_{x,1} \cdots p_{x,l}\} \times \{p_{y,1} \cdots p_{y,m}\} \times \{p_z\} \\ &= \{-0.5 \cdots 0.5\} \times \{0.25 \cdots 0.55\} \times \{0.315\} \end{aligned} \quad (7.2)$$

Der Grund, weshalb der Chirurg wünscht, dass der Roboter auf der ihm gegenüberliegenden Seite angebracht wird, wird in Abbildung 7.7 sichtbar. Die Aufgabe des Roboters ist es, das Endoskop während der Operation zu führen. Der Roboterparameter r_a ist in den beiden Bildern unterschiedlich. So hält der Roboter im linken Bild die Kamera auf dem Kopf, $r_a = 0^\circ$. Im rechten Bild steht die Kamera aufrecht, $r_a = 180^\circ$.

Der Roboterendeffektor sowie der obere Teil des Roboterarms sind sehr nah am Oberkörper des Chirurgen, wenn sich der Roboter und der Chirurg auf derselben Seite des Operationstischs befinden (vgl. Abb. 7.7(a)). Die Bewegungen des Roboters können schnell zu einer Kollision mit dem Chirurgen führen und damit die Operation stören. Im schlimmsten Fall kommt es zu einer Verletzung des Chirurgen durch den Roboter. Dagegen steht in Abbildung 7.7(b) der Roboter auf der gegenüberliegenden Seite. Die zweite Versuchsreihe wurde mit dieser Anordnung durchgeführt. Zu einer Kollision mit dem Chirurgen kam es dabei nicht und das Sicherheitsempfinden wurde positiv beurteilt.¹



(a) Chirurg steht auf der gleichen Seite des Operationstischs, wie der Roboter.



(b) Chirurg und Roboter stehen sich gegenüber am Operationstisch.

Abbildung 7.7: Position des Chirurgen und des Roboters am Operationstisch

¹ nach Aussage von Dr. med. Martin Wagner, Universitätsklinikum Heidelberg

Abbildung 7.8 bildet die acht verschiedenen Roboterkonfigurationstypen r_c ab. Dabei dient eine Punktwolke in Form von Phase 1 als Eingangsgröße. Der Parametersatz bleibt über alle acht Bilder unverändert mit Ausnahme des Parameters r_c . Bei den Bildern fallen die Symmetrien der jeweiligen Roboterkonfigurationstypen auf, wobei diese nicht komplett identisch sind, sondern nur Ähnlichkeiten aufweisen. Dies wird sichtbar an der Änderung der hervorgehobenen fünf besten Werte für $r_c = 1$ und $r_c = 5$. Im Anhang stehen weitere Schaubilder zum Roboterkonfigurationstyp zur Analyse zur Verfügung, welche sich im Parameter r_a unterscheiden (vgl. Anhang B.2.1).

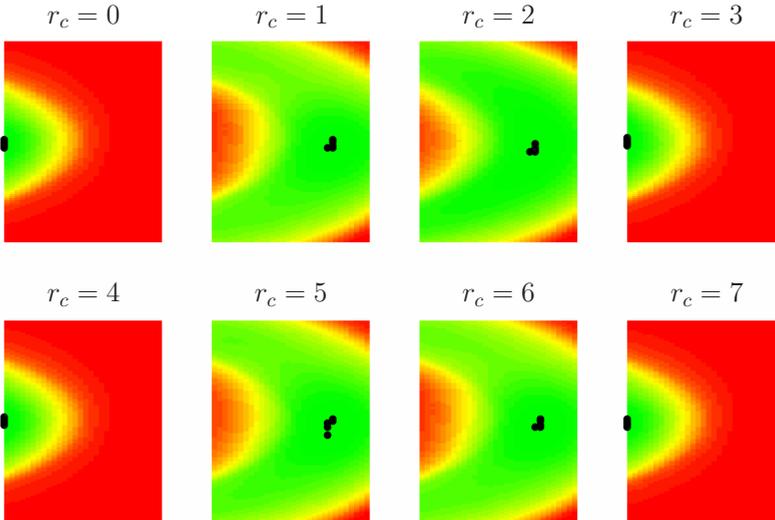


Abbildung 7.8: Ergebnis für unterschiedliche r_c bei gleichbleibendem $r_a = 0^\circ$, $ns = 0^\circ$, Ph_1 : Die schwarzen Punkte markieren die fünf besten Werte des jeweiligen Datensatzes.

Die Untersuchung der Orientierung am Roboterendeffektor r_a wird durch diskrete Vorgaben durchgeführt. Es werden zwölf Orientierungen betrachtet, welche sich um 30° unterscheiden. Es lässt sich die Veränderung der Erreichbarkeit von einem zum nächsten Schaubild (vgl. Abb. 7.9) erkennen, welche gleichmäßig über die Drehung des Instrumentenschafts geschieht. Auch die Bewegung der fünf besten Indikatoren spiegelt die Rotation des Instrumentenschafts wieder. Die Eignung der jeweiligen Parameter ist durch den hohen Grünanteil sichtbar, jedoch sollte die Betrachtung der einzelnen Werte nicht vernachlässigt werden. Während in diesen Schaubildern (vgl. Abb. 7.9) der Roboterkonfigurationstyp $r_c = 2$ genutzt wird, befinden sich im Anhang B.2.2 Schaubilder, welche eine Veränderung von r_c aufweisen.

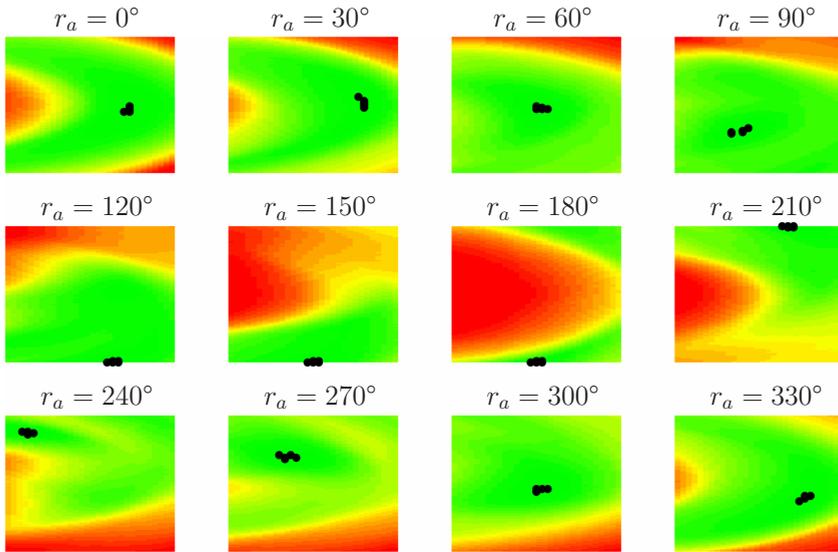


Abbildung 7.9: Ergebnis für unterschiedliche r_a bei gleichbleibendem $r_c = 2$, $ns = 0^\circ$, Ph_1 : Die schwarzen Punkte markieren die fünf besten Werte des jeweiligen Datensatzes.

Die zu untersuchenden Werte des Nullraumparameters werden ebenfalls in der Planungsphase eingeschränkt und diskret vorgegeben. Die Einschränkung des Nullraums geht aus der Situation hervor, dass der Patient auf dem Operationstisch nicht in Kontakt mit dem Roboter kommen soll. Wird eine Nullraumbewegung auf dem gesamten oder in der unteren Hälfte des Redundanzkreises erlaubt, kann es zu einer Kollision mit dem Patienten kommen. Zudem werden feste Nullraumparameter getestet, welche eine scheinbar ruhigere und vorhersehbare Bewegung des Roboters bewirken. Dies ist besonders für den Chirurgen wichtig, da er in der unmittelbaren Umgebung des Roboters steht.

In Abbildung 7.10 werden zwei verschiedene Nullraumparameter verwendet. Die Zeilen zeigen unterschiedliche Nullraumparameter und die Spalten verschiedene Phasen. Die markierten besten Punkte befinden sich in allen sechs Schaubildern an unterschiedlichen Stellen. Sechs Phasen mit unterschiedlichen Nullraumparametern sind im Anhang B.2.3 gezeigt.

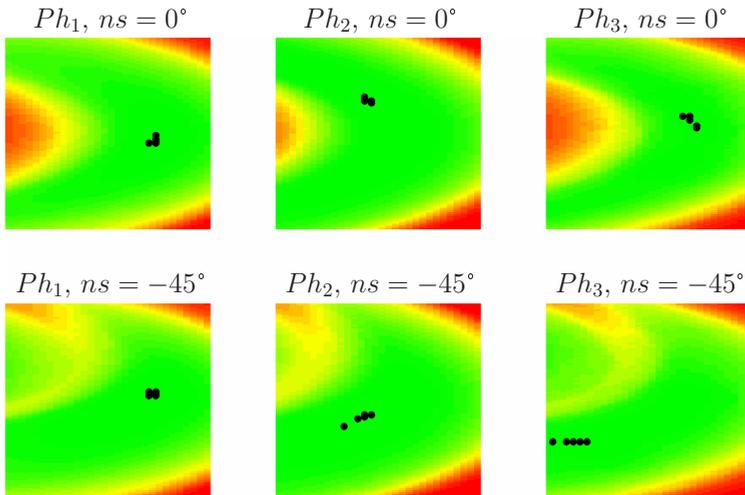


Abbildung 7.10: Während in der oberen Zeile die Phasen mit $ns = 0^\circ$ berechnet wurden, wurde in der Unteren $ns = -45^\circ$ gewählt. Die Spalten geben unterschiedliche Phasen wieder. Die schwarzen Punkte markieren die fünf besten Werte des jeweiligen Datensatzes.

Das Finden eines globalen Minimums in Form eines Parametersatzes erscheint aufgrund der Vielfalt nicht trivial. Deshalb wurden in Kapitel 6.2 Methoden beschrieben, welche das Verknüpfen der Phasen ermöglichen. In Abbildung 7.11 wurden sechs Phasen miteinander verbunden. Die Schaubilder zeigen die Güte der Indikatoren für einen Parametersatz.

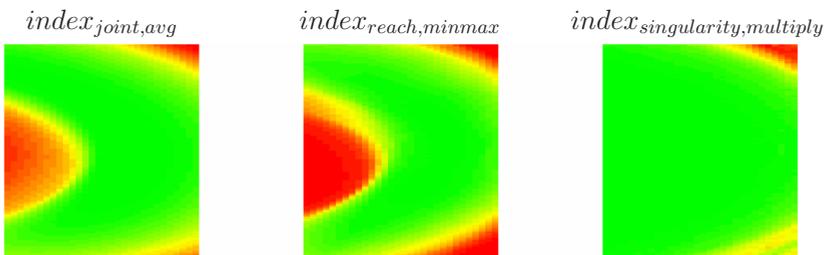


Abbildung 7.11: Anwendung der Verknüpfungsmethoden auf die einzelnen Indikatoren: Die Eingabegröße in Form von verschiedenen Phasen ist in allen Schaubildern gleich.

Ein Schwellenwert sw wird verwendet, um die Pivotpunkte herauszunehmen, bei denen die Gefahr einer Überstreckung des Ellenbogens vorhanden ist. Es findet eine Überlagerung mit dem Gelenkbewegungsindex statt, sodass die ausgeschlossenen Pivotpunkte den Wert 1 erhalten. Dieser Vorgang ist in Abbildung 7.12 beschrieben.

$$sw = 0,02 \quad (7.3)$$

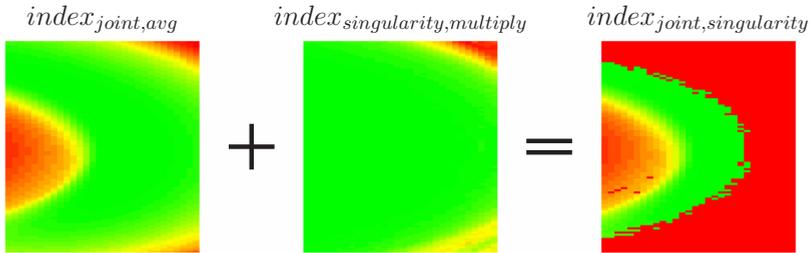


Abbildung 7.12: Die Mindestanforderung an den Singularitätsindex wird auf 0,02 gesetzt. Durch die Überlagerung mit dem Gelenkbewegungsindex werden bestimmte Parametersätze ausgeschlossen.

Abschließend kann gesagt werden, dass der Einsatz der gewählten Roboterparameter an einen Arbeitsraum angepasst werden kann. Eine Eignung einzelner Parameter und Kombinationen lässt sich bereits aus den Schaubildern ableiten.

7.2.4 Wahl der Roboterparameter

Für die Analyse werden diskrete Werte an eine kaskadierte Kontrollstruktur übergeben. Dazu werden die Pivotpunkte aus der Datenmatrix (vgl. Abb. 7.2) ausgelesen. Während die Roboterkonfiguration und die Orientierung für die weitere Betrachtung konstant bleiben, werden für den Nullraumparameter sieben Werte getestet.

$$\begin{aligned} r_c &= 2 \\ r_a &= 0^\circ \\ \vec{n}\vec{s} &= \begin{bmatrix} 0^\circ & 10^\circ & -10^\circ & 30^\circ & -30^\circ & 45^\circ & -45^\circ \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7.4)$$

Die Wahl der Roboterparameter verläuft mithilfe der Indikatoren, welche aus der Verknüpfung der Phasen entstanden sind. Bei der Berechnung der Indikatoren, welche sich auf die gesamte Operation beziehen, werden lediglich die besten zehn Werte einer Roboterkonfiguration übernommen. Zudem wird eine Anforderung an den Erreichbarkeitsindex und den Gelenkbewegungsindex gestellt, damit nicht unnötige schlechte Parametersätze gespeichert und weiterverarbeitet werden.

$$\begin{aligned} index_{reach} &\leq 0.17 \\ index_{joint} &\leq 0.15 \end{aligned} \tag{7.5}$$

Eine Liste von Parametersätzen mit den beiden Indikatoren wird gruppiert anhand des Erreichbarkeitsindex. Die Gruppen werden im Abstand von 0.5% Schritten gebildet. Die Sortierung verläuft absteigend nach dem gerundeten Erreichbarkeitsindex gefolgt vom Gelenkbewegungsindex. Die bestmögliche Roboterkonfiguration ergibt sich aus dem Minimum.

In einem späteren Schritt wird die erste Versuchsreihe der zweiten gegenüber gestellt. Jedoch wurde in der zweiten Versuchsreihe auf die Durchführung der ersten Phase verzichtet, sodass im Folgenden fünf Phasen betrachtet werden. Die Zuordnung der Phasen ist identisch und stellt folglich keinen Verlust dar. Deshalb werden fünf Phasen bei der Berechnung des bestmöglichen Parametersatzes verwendet.

In Tabelle 7.2 sind die besten Roboterkonfigurationen gezeigt. Zuvor wurde bereits die Wahl des Roboterkonfigurationstyp $r_c = 2$ und der Orientierung am Roboterendeffektor $r_a = 0^\circ$ getroffen. Für diesen Fall steht das Bild der Endoskopkamera auf dem Kopf, welches softwareseitig dauerhaft um 180° gedreht wird. Deshalb sind in der Tabelle 7.2 lediglich die Nullraumparameter, die Pivotposition und die Güte dargestellt. Das Ergebnis der besten zehn Parametersätze zeigt, dass die Werte der Indikatoren sehr nahe beieinander liegen. Für den Gelenkbewegungsindex wurde das arithmetische Mittel verwendet, sodass ähnliche Werte plausibel sind. Der Erreichbarkeitsindex wurde auf Basis der Minimierung des Maximums ermittelt. Der Wert der schlechtesten Phase ist hier maßgeblich. Deshalb können die 12% einer Punktwolke, welche nicht erreicht werden können, auf eine Phase hindeuten, welche für den Roboter schwierig zu erreichen ist.

Des Weiteren fällt auf, dass sich bei 45° eine günstige Position des Ellenbogens befindet. Die Aussage gilt für diese Operation und bedeutet nicht, dass dies grundsätzlich der zu wählende Nullraumparameter ist. Die Positionen der Pivotpunkte liegen sehr nahe beieinander oder sind sogar identisch, jedoch mit unterschiedlichen Parametersätzen (vgl. P_R 1 u. P_R 5). Die Pivotpunkte wurden in Abbildung 7.13 in einen räumlichen Zusammenhang mit dem Roboter gebracht. Die grünen Punkte markieren die besten zehn und die gelben Punkte die besten 100 Pivotpunkte. Die Parametersätze, welche die Mindestanforderungen (vgl. Glg. 7.5) erfüllen, sind in grau gekennzeichnet. Eine Überlagerung der Punkte findet statt.

Tabelle 7.2: Besten zehn Parametersätze mit $r_c = 2$ und $r_a = 0^\circ$

	$index_{joint}$	$index_{reach}$	ns_1	ns_2	ns_3	ns_4	ns_5	x	y
P_R 1	0,1478	0,1258	45°	45°	45°	45°	45°	-0,12	0,32
P_R 2	0,1480	0,1258	45°	45°	45°	45°	45°	-0,12	0,31
P_R 3	0,1480	0,1244	45°	45°	45°	45°	45°	-0,14	0,32
P_R 4	0,1489	0,1271	45°	45°	45°	45°	30°	-0,15	0,34
P_R 5	0,1489	0,1258	45°	45°	45°	45°	30°	-0,12	0,32
P_R 6	0,1490	0,1244	45°	45°	45°	45°	30°	-0,14	0,32
P_R 7	0,1497	0,1271	-45°	45°	45°	45°	45°	-0,15	0,34
P_R 8	0,1498	0,1271	-45°	45°	45°	45°	45°	-0,15	0,33
P_R 9	0,1504	0,1271	-45°	45°	45°	45°	30°	-0,15	0,34
P_R 10	0,1506	0,1271	45°	45°	45°	30°	45°	-0,15	0,34

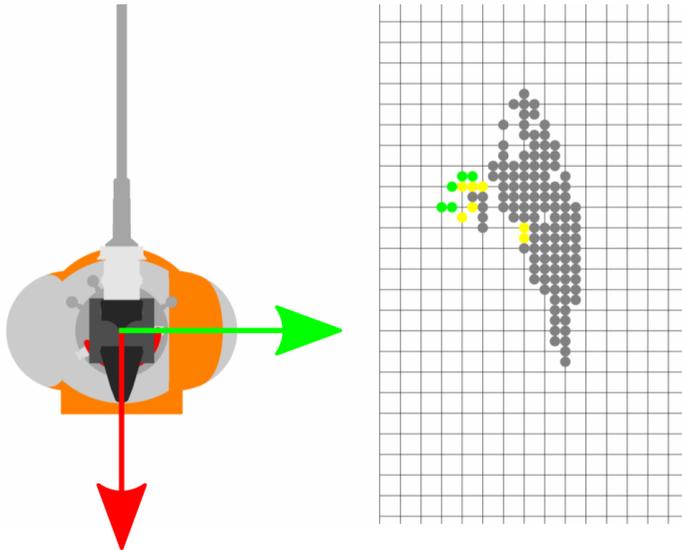


Abbildung 7.13: Die besten Parametersätze sind in Form des Pivotpunkts im *RKS* gezeigt. Die Werte aus der Tabelle 7.2 sind in grün dargestellt.

Als nächstes werden die Parametersätze auf die zweite Versuchsreihe übertragen. Dazu werden die besten drei Parametersätze (best), sowie die Parametersätze, welche gerade noch die Mindestanforderung für die Erreichbarkeit und Gelenkbewegung erreichen (last), und zufällig generierte Parametersätze (rand) gewählt. Die fünf Trajektorien der zweiten Versuchsreihe werden nun mit den oben genannten Parametersätzen in der Simulation getestet. Für jede Trajektorie werden die Werte der Indikatoren ermittelt. Der Singularitätsindex ist in allen Fällen gleich null, was eine ideale Gegebenheit ist. Tabelle 7.3 zeigt das Ergebnis jedes Parametersatzes für die einzelnen Trajektorien. Der Gelenkbewegungsindex befindet sich im Bereich von 0,286 bis 0,416 für die besten drei Parametersätze und ist dem Bereich für die letzten Parametersätze, welche die Mindestanforderung erfüllen, ungefähr ähnlich mit 0,280 bis 0,354. Ebenso der Erreichbarkeitsindex, welcher bis auf eine Ausnahme, sich nah an einer vollkommenen Erreichbarkeit aller Punktwolken befindet. Zur Erinnerung, beim Erreichbarkeitsindex wird der schlechteste Wert ausgegeben.

Die zufällig gewählten Parametersätze liefern schlechtere Werte. Sowohl der Gelenkbewegungsindex als auch der Erreichbarkeitsindex besitzen höhere Werte und sind damit schlechter. Gerade der letzte zufällig gewählte Parametersatz zeigt eine Problematik auf, welche mit dem beschriebenen Vorgang vermieden wird. Denn während die Erreichbarkeit gute Ergebnisse liefert, ist die Gelenkbewegung extrem hoch und soll aufgrund des hohen Gelenkbewegungsindex nicht verwendet werden. Die Korrelation der Indikatoren ist nicht ausschließlich gegeben.

Tabelle 7.3: Parametersätze, mit $r_c = 2$ und $r_a = 0^\circ$, werden auf die Trajektorien der zweiten Versuchsreihe angewendet

	<i>index_{joint}</i> Trajektorie					<i>index_{reach}</i> Trajektorie				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
best 1	0,289	0,352	0,344	0,405	0,367	0,062	0,008	0,026	0,008	0,005
best 2	0,293	0,363	0,357	0,416	0,374	0,062	0,008	0,026	0,008	0,005
best 3	0,286	0,343	0,331	0,382	0,363	0,062	0,008	0,026	0,008	0,005
last 3	0,284	0,261	0,249	0,289	0,293	0,162	0,001	0,000	0,007	0,002
last 2	0,294	0,302	0,280	0,321	0,315	0,056	0,000	0,000	0,005	0,000
last 1	0,295	0,296	0,324	0,354	0,327	0,070	0,008	0,026	0,008	0,005
rand 1	0,346	0,327	0,379	0,439	0,376	0,229	0,145	0,175	0,269	0,391
rand 2	0,515	0,464	0,532	0,612	0,529	0,873	0,711	0,752	0,709	0,720
rand 3	0,651	0,613	0,687	0,733	0,623	0,071	0,056	0,057	0,025	0,023

Die Trajektorien der zweiten Versuchsreihe unterscheiden sich im räumlichen Umfang ihrer Bewegung im Vergleich zur ersten Versuchsreihe. Bedingt durch die Endoskopkameraführung durch den Roboter wurden weniger Bewegungen angestrebt. In Abbildung 7.14 ist die Punktvolke der jeweiligen Phase gezeigt, sowie die fünf Trajektorien der zweiten Versuchsreihe. Im Anhang befinden sich die Schaubilder der restlichen drei Phasen (vgl. Abb. B.23).

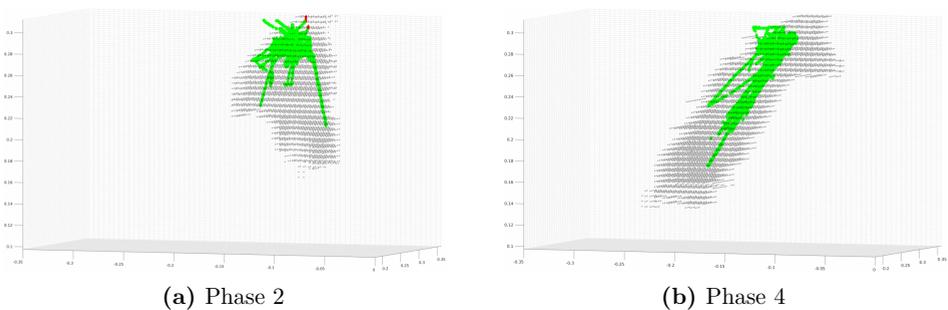


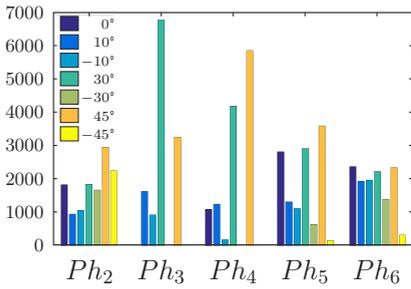
Abbildung 7.14: Die Punktvolke stammt aus den Daten der ersten Versuchsreihe und die fünf Trajektorien wurden in der zweiten Versuchsreihe aufgenommen. Die Trajektorien sind farblich auf Basis der Erreichbarkeit dargestellt. Als Beispiel diente der bestmögliche Parametersatz.

Außerdem wurde der beste Parametersatz auf alle Punktwolken angewendet. Dabei fällt auf, dass der Roboter meist in der Nähe des Pivotpunkts Probleme mit der Erreichbarkeit besitzt. Die Abbildungen B.22 befinden sich im Anhang. Eine Auswertung des Optimums der einzelnen Phasen ist in Tabelle 7.4 gezeigt. Im Anhang sind die sechs geprüften Phasen in Form ihrer zugehörigen Punktwolken dargestellt (vgl. Abb. B.21).

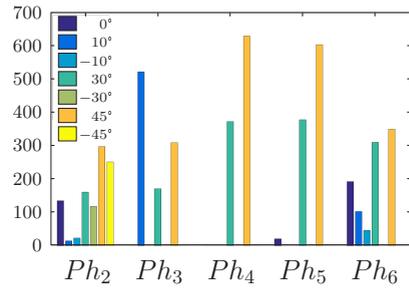
Tabelle 7.4: Beste Parametersätze der einzelnen Phasen mit $r_c = 2$ und $r_a = 0^\circ$

	$index_{joint}$	$index_{reach}$	ns	x	y
Ph_1	0,174	0,092	30°	-0,16	0,36
Ph_2	0,067	0,004	45°	-0,03	0,34
Ph_3	0,431	0,127	45°	-0,15	0,34
Ph_4	0,142	0,057	45°	-0,11	0,38
Ph_5	0,070	0,004	45°	-0,12	0,31
Ph_6	0,016	0,002	45°	-0,28	0,35

In der Liste der besten zehn Parametersätze taucht auffällig häufig der Nullraumparameter $ns = 45^\circ$ auf. Daraufhin erfolgt eine genauere Betrachtung des Nullraumparameters bezogen auf die Parametersätze, welche die (Mindest-) Anforderungen an Erreichbarkeit und Gelenkbewegung erfüllen. Da eine stabile und robuste Lösung gewünscht ist, wird die Häufigkeitsverteilung des Nullraumparameters innerhalb aller ausgewählten Parametersätze untersucht. In Abbildung 7.15 ist ein Balkendiagramm gezeigt, welches die Verteilung der Nullraumparameter bezogen auf die einzelnen Phasen wiedergibt. Dabei wird sichtbar, dass die gewünschten Anforderungen nicht nur von Nullraumparameter $ns = 45^\circ$ erfüllt werden. Für einzelne Phasen können stabilere Lösungen gewählt werden, wie $ns_3 = 10^\circ$ oder $ns_3 = 30^\circ$ für die Phase 3. Für die Phasen 4, 5 und 6 empfiehlt sich auch $ns = 30^\circ$. Im Gegenzug wird von der Nutzung für diese Operation unter Betrachtung der Häufigkeit von $ns = -30^\circ$ und $ns = -45^\circ$ abgeraten.



(a) Häufigkeit des Nullraumparameters für die einzelnen Phasen bezogen auf alle gewählten Parametersätze



(b) Häufigkeit des Nullraumparameters für die einzelnen Phasen bezogen auf die 1000 besten Parametersätze

Abbildung 7.15: Empfehlung für die Wahl des Nullraumparameters in den Phasen 2 bis 6

Neben dem Nullraumparameter wird auch die Position des Pivotpunkts detailliert betrachtet. Bereits in Abbildung 7.13 wird deutlich, dass es einen Bereich gibt, in dem sich einige (ausreichend) gute Pivotpunkte befinden. Der Pivotpunkt, welcher am Häufigsten in den 12566 Parametersätzen vorkommt, hat einen 5%-igen Anteil an der gesamten Verteilung. In Abbildung 7.16 ist die Häufigkeit als dritte Dimension repräsentiert, während die x - und y -Achsen die Pivotpunktposition wiedergeben. Die Schaubilder in Abbildung 7.17 zeigen die Verteilung entlang einer Achse. Die einzelnen Balken werden überlagert dargestellt.

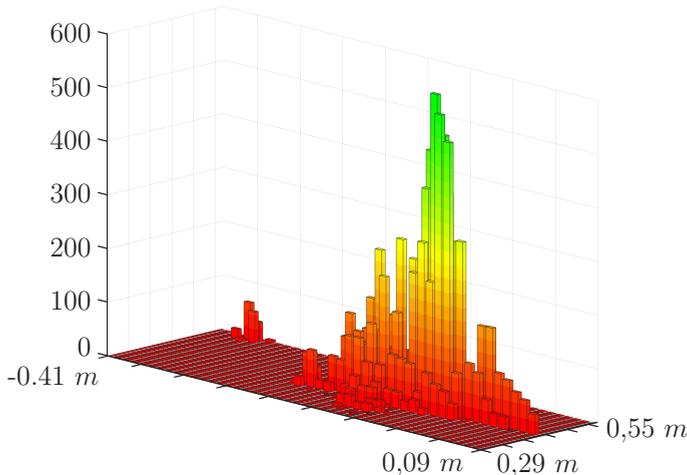


Abbildung 7.16: Eine Empfehlung der Region mit guten Pivotpunkten für diesen Operationstyp: Die Ansicht zeigt, einen Bereich in dem es viele Parametersätze gibt und stellt zugleich die Anzahl an Parametersätzen dar.

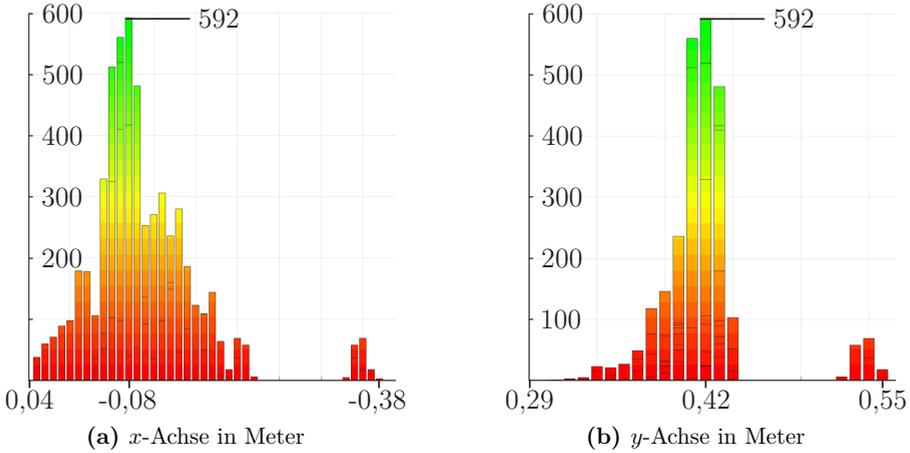


Abbildung 7.17: Eine Empfehlung der Region mit guten Pivotpunkten für diesen Operationstyp: Die Seitenansicht des obigen Schaubilds 7.16 gibt die Positionsinformation der Pivotpunkte in x - und y -Richtung wieder. In z -Richtung ist die Häufigkeit aufgetragen.

Abbildung 7.15 zeigt die Verteilung des Nullparameters für den Pivotpunkt, welcher am häufigsten in der Liste der Parametersätze vorkommt, der die Mindestanforderung erfüllt. Für die zweite Phase eignen sich alle Nullraumparameter gleichermaßen. Alle weiteren Phasen nutzen den Nullraumparameter $ns = -45^\circ$ nicht. Dabei sticht Phase 3 besonders hervor, welche einen Nullraumparameter $ns = 30^\circ$ fordert. In Phase 4 kommt $ns = -30^\circ$ und $ns = -45^\circ$ nicht vor und empfiehlt sich deshalb nicht.

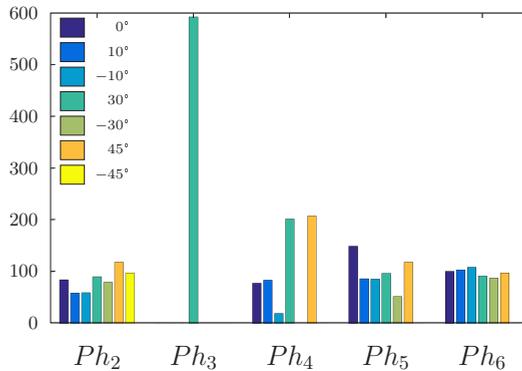


Abbildung 7.18: Verteilung des Nullraumparameters für den stärksten Pivotpunkt in den Phasen 2-6

Das definierte Bereichsmaximum liegt daher für $r_c = 2$, $r_a = 0^\circ$ bei:

$$\begin{aligned}
 p_{pivot} &= \begin{pmatrix} -0,08 \\ 0,42 \\ 0,315 \end{pmatrix} m \\
 \vec{n}s &= \begin{pmatrix} 45^\circ \\ 30^\circ \\ 45^\circ \\ 0^\circ \\ -10^\circ \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{7.6}$$

7.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Zielregion wurde durch eine Gitterstruktur beschrieben. Eine Reduktion der Anzahl der Punkte wurde in der Regel herbeigeführt. Dadurch wurde die Menge der Punkte, welche durch die inverse Kinematik abgefragt werden müssen, vermindert. Ein Abgleich zwischen der ersten und zweiten Versuchsreihe lässt darauf deuten, dass der Roboter dahingehend optimiert wurde, sich möglichst wenig zu bewegen. Die Räume der zweiten Versuchsreihe sind deutlich kleiner. Die Abdeckung der ersten Versuchsreihe ist damit eine positive Abschätzung der Zielregion, welche noch verkleinert werden kann.

Für die Darstellung der einzelnen Roboterparameter wurde die Phase 1 gewählt, damit die gleiche Punktwolke für alle Analysen verwendet wird. Der Einflussfaktor, welcher von der Punktwolke ausgeht, soll damit gering gehalten werden. Dadurch, dass die Punktwolke nicht symmetrisch zur x - und/oder y -Achse des WKS ist, entstehen bei der Wahl des Parametersatzes Unterschiede. Am Beispiel der acht Roboterkonfigurationen kann eine Symmetrie auf Basis der Farbgebung abgeleitet werden, jedoch befinden sich die fünf besten Indikatoren nicht an exakt derselben Stelle. Dies wird auch beim Betrachten der unterschiedlichen Roboterendeffektororientierungen r_a deutlich. Die untersuchten Nullraumparameter (vgl. Glg. 7.4) geben bereits eine Empfehlung für eine günstige Wahl an. In den Abbildungen 6.5, 7.10, B.2.3 werden die Nullraumparameter gegenüber gestellt. Dort kommen besonders die Gelenkgrenzen zur Geltung, welche sich durch die Wahl des Parametersatzes ergeben.

Für die Parameteranalyse wurden Indikatoren bestimmt, welche Aufschluss über die Roboterperformanz geben sollen. Es wurde eine Liste mit den besten Parametersätzen geliefert (vgl. Tab. 7.2), bei der die Werte der Indikatoren sehr dicht beieinander liegen. Außerdem sind die Parametersätze dieser Liste sich sehr ähnlich, sodass fraglich ist, ob eine globale Aussage getroffen werden kann. Die Untersuchung mit den fünf Trajektorien (vgl. Tab. 7.3) ergeben für die Parametersätze der Liste, welche die Anforderungen (vgl. Glg. 7.5) erfüllen, ähnliche Werte. Zwischen dem besten prognostizierten und dem letzten Parametersatz liegen ca. 12000 Parametersätze, jedoch ist der Unterschied zwischen den Indikatoren gering bzw. schwankend. In Abbildung 7.13 wird deshalb die vollständige Liste der Parametersätze angezeigt. Dabei wird sichtbar, dass sich die besten Werte in einem Randbereich befinden.

Es folgt eine separate Betrachtung der Pivotpunkte und der Nullraumparameter, welche eine allgemeinere Aussage erlaubt. In Abbildung 7.15 wird die Häufigkeit des Nullraums für die einzelnen Phasen dargestellt. Während in der Bestenliste die Häufigkeitsverteilung zu Gunsten des Nullraumparameters $n_s = 45^\circ$ ausfällt, ist das Ergebnis der Verteilung in Tabelle 7.15(a) nicht eindeutig. Für Phase 2 und 6 liegt die Häufigkeit einzelner Nullraumparameter sehr eng beieinander. Die Verteilung des Pivotpunkts zeigt eine Region auf, in der sich gute Parametersätze befinden.

Aus diesem Grund wird der häufigste Pivotpunkt auf seine Nullraumparameter untersucht. Wie in Abbildung 7.18 zu sehen ist, besitzen unterschiedliche Phasen Vorzüge für einen Nullraumparameter. Der Vergleich mit der Bestenliste zeigt, dass das anfängliche, sortierte Ergebnis basierend auf den Indikatoren nicht ausschlaggebend ist. Der Vorschlag des Parametersatzes beinhaltet mehrere Nullraumparameter und der Pivotpunkt liegt versetzt zum Indikator-Optimum (vgl. Glg. 7.6). Die Nutzung der Indikatoren der Mindestanforderung (vgl. Glg. 7.5) in Form des Schwellenwerts führt zu guten Ergebnissen. Die zufällige Wahl von Parametersätzen außerhalb der Liste ergibt schlechtere Resultate und zeigt auch das unkorrelierte Verhalten der Indikatoren (Erreichbarkeit u. Gelenkbewegung). Mit der Annahme, dass alle Parametersätze der Liste ein ähnliches Ergebnis liefern, ist das Bereichsmaximum die beste Wahl der Parameter.

KAPITEL 8

Zusammenfassung

Roboter werden heutzutage nicht nur in Fertigungsstraßen eingesetzt, sondern finden unter anderem auch im Bereich Medizin ihre Aufgabe. Bei einer minimal-invasiven Operation sind lediglich kleine Einschnitte notwendig, durch die mit langen Instrumenten über Trokare im Körperinneren manipuliert wird. Ein Endoskop ist eines der möglichen Werkzeuge. Es ermöglicht dem Chirurgen die Sicht auf das Operationsgebiet. Dieses Verfahren besitzt viele Vorteile für den Patienten, wie zum Beispiel einen geringeren Blutverlust und die Schonung des Gewebes. Für den Chirurgen ergeben sich jedoch durch die Handhabung der Instrumente, die fehlende Haptik, das reduzierte Sichtfeld und die ergonomisch mangelhafte Arbeitshaltung Nachteile. Ziel des Einsatzes des Roboters ist die Entlastung und Unterstützung des Chirurgen.

Dabei arbeitet der Roboter in der Regel nicht autonom, sondern wird stattdessen vom Chirurgen geführt. Dies geschieht nach dem Master-Slave-Prinzip und wird als Telemanipulation bezeichnet, wobei der Chirurg an einer Konsole sitzt und die Instrumente und das Endoskop steuert.

Der Einsatz des Roboters stellt jedoch auch eine Herausforderung an den Chirurgen und das Personal dar, da sie sich mit solch einem komplexen System auseinandersetzen müssen. Gerade der Arbeitsraum eines Roboters, welcher durch seine Gelenkwinkelgrenzen limitiert wird, ist für den Menschen schwer einzuschätzen. Die Pivotpunkt-Restriktion stellt zusätzlich eine Randbedingung an die Bahnplanung und den Arbeitsraum. Leichtbauroboter mit Redundanzen erscheinen aufgrund ihrer Flexibilität und ihrer geringen Größe für den Operationsaal geeignet [Nic11], [Hag10]. Die Redundanz erhöht die Vielfalt an Möglichkeiten und gleichzeitig auch die Komplexität des Systems. Mit der gezielten Wahl der roboterspezifischen Parameter sollen

die Vorteile dieses Roboters genutzt werden. Die Aufgabe ist es, einen bestmöglichen Parametersatz zu finden. Besonders die vorher nicht genau spezifizierte Bahn des Roboters ist herausfordernd für die Planung und die Wahl des Parametersatzes.

In dieser Arbeit wurde eine Parameteranalyse durchgeführt, welche sich auf einen seriellen, redundanten Roboter bezieht. Die Pivotpunkt-Restriktion ergibt sich aus dem minimal-invasiven Szenario, bei dem das Instrument außerhalb des Körpers vom Roboter gesteuert wird. Der Roboter muss dabei den Pivotpunkt einhalten, welcher durch den Trokar repräsentiert wird. Anderenfalls kommt es zu Verletzungen am Patienten.

Die Parameteranalyse wird auf die Zielregion angewendet. Es wird ein kleiner Teil des Roboterarbeitsraums betrachtet, da der komplette Arbeitsraum für die Erfüllung der Aufgabe nicht relevant ist. Stattdessen muss eine Zielregion möglichst genau beschrieben werden, welche neben dem Operationsziel auch die Bewegungen zu dieser Region abbildet. Deshalb werden Versuche am Phantom durchgeführt und die Instrumentenposition durch ein Trackingsystem aufgenommen. Die zwei Verfahren erlauben eine Abstraktion der Zielregion aus den Trajektorien. Die Trajektorien stammen aus aufgezeichneten Versuchen und geben Positionswerte wieder. Ein Versuch entspricht einer Operation am Phantom und wird in mehrere Phasen und Schritte aufgeteilt. Das Operationsmodell beschreibt eine Rektumresektion. Die semantische Annotation der Operation ermöglicht eine Aufteilung der Trajektorien in Phasen und Schritte, sodass phasenspezifische Modelle erstellt werden können. Es wird ein Modell pro Phase und Instrument berechnet.

Die Zielregion kann durch eine Gitterstruktur oder Cluster dargestellt werden. Durch eine phasenbezogene, zeitunabhängige Betrachtung der Trajektorien ergibt sich eine strukturierte Punktwolke. Es findet eine Art der Ummantelung der Zielregion statt, welche durch einen Algorithmus erstellt wird. Eine andere Möglichkeit zeigt die Bildung einer Markov-Kette. Dazu ist ein Clusterverfahren notwendig (Complete-Linkage Algorithmus), welcher die zeitunabhängigen Punkte in Cluster einteilt. Eine Übergangsmatrix wird im Anschluss erstellt. Diese bezieht sich auf die Reihenfolge der Clusterübergänge gemäß der ursprünglichen Trajektorie. Mithilfe der Übergangswahrscheinlichkeiten kann eine solche Markov-Kette gebildet werden. Eine Schleifenbildung wird durch die Verwendung des Markov Modells 2. Ordnung vermieden, welches das vorangegangene Cluster zusätzlich mit einschließt. Eine Erweiterung der Markov-Kette wird durch die Richtungsprädiktion oder durch die Betrachtung der Kovarianzmatrix möglich. Bei der Richtungsprädiktion fließt neben den prädizierten Clustern auch

die Punktwolke der Cluster mit ein. Ein schlauchartiger Überzug der Markov-Kette wird durch die Betrachtung der Kovarianzen der Cluster erreicht. Damit lässt sich der Vertrauensbereich auf die Trajektorie übertragen. Die vorgestellten Verfahren resultieren in einer phasenbezogenen Punktwolke, welche für die Analyse des Roboters erforderlich ist. In der Evaluation wurden auf Basis der ersten Versuchsreihe sechs strukturierte Punktwolken errechnet. Die Auflösung des Gitters wurde dabei auf 1 mm gesetzt. Der visuelle Eindruck der Abstraktion erfüllt die Anforderungen und deckt die Trajektorien der zweiten Versuchsreihe ab.

Zur Lösung der inversen Kinematik wurde eine geschlossene Form der Berechnung gewählt [Shi08]. Daraus ergeben sich die Parameter, welche die Roboterperformanz beeinflussen. Die Definition der Roboterkonfigurationstypen legt fest, in welchem Wertebereich sich die Rotationsgelenke befinden sollen. Daraus resultieren die acht Konfigurationstypen. Durch die Redundanz und das Aufspannen eines Nullraums können sich die Gelenkwinkel bei gleichbleibender Roboterendeffektorpose verändern. Die Bewegung auf dem Redundanzkreis kann dazu führen, dass Gelenkgrenzen näher oder weiter weg rücken. Die Wahl des Nullraumparameters kann daher auch entscheidend für die Erreichbarkeit einer Pose sein. Die Orientierung am Roboterendeffektor wurde als Parameter definiert, da diese durch die Pivotpunkt-Restriktion bereits limitiert wird und damit die Lösungsmöglichkeiten einschränkt. Für den dargestellten Fall, welcher die Nutzung einer autonomen Endoskopkameraführung darstellt, muss während einer Operation die Orientierung konstant bleiben. Der Pivotpunkt geht ebenfalls als Parameter in die Berechnungen mit ein. Ein Parametersatz besteht aus einem Roboterkonfigurationstyp, einer Orientierung am Roboterendeffektor, einem Nullraumparameter und dem Pivotpunkt. Die Auswirkungen der Parameter auf die Güte der Roboterperformanz wurden detailliert betrachtet. Die Unterschiede zwischen einzelnen Parametern oder ganzen Parametersätzen wurden visuell präsentiert.

Es wurden dafür drei Indikatoren vorgeschlagen, welche eine Aussage über die Roboterperformanz liefern. Die Erreichbarkeit einer Punktwolke wird ebenso wie eine geringe Gelenkbewegung und die Vermeidung von Singularitäten gefordert. Da die Gelenkbewegung und die Singularität nur untersucht werden können wenn die Pose auch erreicht wurde, gelten diese beiden Indikatoren als Untermenge der Erreichbarkeit. Die Normierung dieser Indikatoren ist zwingend notwendig, um eine Vergleichbarkeit zu anderen Punktwolken und Parametersätzen zu gewährleisten.

Die Indikatoren wurden für eine Punktwolke berechnet und geben damit Informationen einzelner Phasen wieder. Die Phasen werden zu einer Operation vereint. Dies

bedeutet, dass auch die Indikatoren der verschiedenen Phasen miteinander verbunden werden müssen. Es werden drei Methoden zur Verknüpfung vorgeschlagen. So wird bei der Erreichbarkeit die Methode zur Minimierung des Maximums gewählt ($0 = \text{gut}$). Diese Methode eignet sich aufgrund der Anforderung an die Erreichbarkeit besonders gut. Um eine erfolgreiche Durchführung einer Operation zu erzielen, sollten alle Phasen eine hohe Güte besitzen. Deshalb wird besonderes auf die Minimierung des schlechtesten Werts geachtet. Das arithmetische Mittel führt die Gelenkbewegungsindexe einzelner Phasen zusammen. Da der Singularitätsindex nahe Null liegen soll und eine Mindestanforderung darstellt, empfiehlt sich dafür die Multiplikation aller Indikatoren. Auf diese Weise sticht der schwächste Index am stärksten hervor. Durch eine Vorverarbeitung werden lediglich gute Parametersätze gewählt. Dazu wurde sowohl an den Singularitätsindex als auch an den Erreichbarkeitsindex eine Mindestanforderung gestellt. Eine Gruppierung der besten Erreichbarkeitsindexe, folgt einer Minimierung des Gelenkbewegungsindex.

Diese als gut identifizierten Parametersätze wurden in zweiten Versuchsreihe untersucht. Des Weiteren wurden zufällige Parametersätze ausgewertet und gegenübergestellt. Die Indikatoren, welche eine Anforderung an die Güte stellen, beschreiben die Performanz des Roboters gut. Eine genauere Analyse des Pivotpunkts und des Nullraumparameters verfolgt das Ziel eines Bereichsmaximums. Eine Abweichung zur Bestenliste, welche auf Basis des Indikator-Optimums erstellt wurde, wird daraufhin empfohlen. Die Robustheit des Parametersatzes in Bezug auf Abweichungen wurde somit erhöht.

KAPITEL 9

Ausblick

Diese Arbeit bietet neue Ansatzpunkte in Bezug auf die Wahl von Roboterparametern für redundante Assistenz-Roboter in der Chirurgie. Anstatt beliebige Parameter für eine Operation zu wählen, wird ein auf den bestimmten Operationstyp zugeschnittener Parametersatz ermittelt. Die Orientierung am Endeffektor wurde - bedingt durch das Szenario der Kameraführung - zunächst auf eine konstante Orientierung festgesetzt. Es gibt jedoch auch die Möglichkeit einen Orientierungsbereich zu betrachten und damit die diskrete Herangehensweise aufzubrechen. Gleiches ist beim Nullraumparameter möglich. Dazu müssen allerdings Methoden entwickelt werden, welche sich mit der Entstehung von blockierten Bereichen auf dem Redundanzkreis auseinandersetzen.

Der Suchbereich, dargestellt durch die Datenmatrix der zu untersuchenden Pivotpunkte, wurde an die äußeren Randbedingungen angepasst. Eine methodische Suche innerhalb des gesamten möglichen Raums, welche auf guten Indikatoren basiert, zeigt ebenfalls Potenzial in Bezug auf die Berechnungsdauer. Weiterer Optimierungsbedarf ergibt sich durch die Einbindung vorhandener Softwaremodule [Kun16]. Das Aufzeigen der Unterschiede zwischen Parametersätzen bestätigt eine weitere Forschungsarbeit im Bereich der Roboterparameter in Bezug auf ihren Arbeitsraum.

Es ist ebenso denkbar, den Nullraum des Roboters auf Basis einer Wissensmodellierung zu ändern. Erste Ansätze wurden in dieser Arbeit mit der Richtungsprädiktion gezeigt. Bisherige Ansätze optimierten häufig den Nullraumparameter in Bezug auf den Abstand zu Gelenkgrenzen. Mit dem Wissen über die nächsten Posen könnte der Nullraumparameter dazu genutzt werden, diese optimal zu erreichen.

Literatur

- [Adh03] Adhami, Louai und Eve Coste-Maniere: „Optimal Planning for Minimally Invasive Surgical Robots“. *Proceedings of the Transactions on Robotics and Automation* (2003), Bd. 19(5): S. 854–863 (siehe S. 21, 22).
- [Adv16] Advanced Realtime Tracking GmbH. Nov. 2016. URL: <http://www.ar-tracking.com/home/> (siehe S. 25, 102).
- [Asf03] Asfour, Tamim und Rüdiger Dillmann: „Human-like Motion of a Humanoid Robot Arm Based on a Closed-Form Solution of the Inverse Kinematics Problem“. *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (2003), Bd. 2: S. 1407–1412 (siehe S. 27).
- [Bau07] Bauernschmitt, Robert, Marco Feuerstein, Jörg Traub, Eva Schirmbeck, Gudrun Klinker und R. Lange: „Optimal Port Placement and Enhanced Guidance in Robotically Assisted Cardiac Surgery“. *Surgical Endoscopy* (2007), Bd. 21(4): S. 684–687 (siehe S. 22).
- [Ber06] Bertram, Dominik, James Kuffner, Rüdiger Dillmann und Tamim Asfour: „An Integrated Approach to Inverse Kinematics and Path Planning for Redundant Manipulators“. *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2006: S. 1874–1879 (siehe S. 27, 28).
- [Ber14] Berliner, Leonard, Julia Benzko, Klaus M Radermacher, Thomas Neumuth, Alexander Seitel, Horst Karl Hahn, Christian Hansen, Peter Mildenerger, Marion Jürgens, Jürgen Popp et al.: *Der digitale Operationssaal*. Health Academy. De Gruyter, 2014 (siehe S. 5).
- [Bes92] Besl, Paul J und Neil D McKay: „A method for registration of 3-D shapes“. *Proceedings of the Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)* (1992), Bd. 14(2): S. 239–256 (siehe S. 38).

- [Bey11] Beyl, Tim, Thorsten Brennecke, Jörg Raczkowsky und Heinz Wörn: „Ultrasound Tomography using a Light Weight Robot“. *Proceedings of the 25th International Congress and Exhibition in Computer Assisted Radiology and Surgery* (2011), Bd. 6: 355–356 (siehe S. 25).
- [Bey12] Beyl, Tim, Philip Nicolai, Jörg Raczkowsky und Heinz Wörn: „Ein Kinect basiertes Überwachungssystem für Workflowerkennung und Gestensteuerung im Operationssaal“. *Tagungsband der 11. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Computer- und Roboterassistierte Chirurgie e. V. (CURAC)*. 2012 (siehe S. 26).
- [Bey13] Beyl, Tim, Philip Nicolai, Raczkowsky, Heinz Wörn, Mirko D. Comparetti und Elena De Momi: „Multi Kinect People Detection for Intuitive and Safe Human Robot Cooperation in the Operating Room“. *Proceedings of 16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)* (2013), Bd.: S. 1–6 (siehe S. 26).
- [Bey15] Beyl, Tim, Philip Nicolai, Mirko D. Comparetti, Jörg Raczkowsky, Elena De Momi und Heinz Wörn: „Time-of-flight-assisted Kinect camera-based people detection for intuitive human robot cooperation in the surgical operating room“. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* (2015), Bd.: S. 1–17 (siehe S. 26).
- [Bih14a] Bihlmaier, Andreas und Heinz Wörn: „Automated Endoscopic Camera Guidance: A Knowledge-Based System towards Robot Assisted Surgery“. *Proceedings of the 41st International Symposium on Robotics (ISR/ Robotik)*. 2014: S. 1–6 (siehe S. 26).
- [Bih14b] Bihlmaier, Andreas und Heinz Wörn: „ROS-based Cognitive Surgical Robotics“. 2014: S. 253–255 (siehe S. 26).
- [Bih15] Bihlmaier, Andreas und Heinz Wörn: „Learning Surgical Know-How: Dexterity for a Cognitive Endoscope Robot“. 2015 (siehe S. 102).
- [Bih16a] Bihlmaier, Andreas: „Learning Dynamic Spatial Relations“. Diss. KIT Karlsruhe, 2016 (siehe S. 100).
- [Bih16b] Bihlmaier, Andreas, Tim Beyl, Philip Nicolai, Mirko Kunze, Julien Mintenbeck, Luzie Schreiter, Thorsten Brennecke, Jessica Hutzl, Jörg Raczkowsky und Heinz Wörn: „Ros-based Cognitive Surgical Robotics“. *Robot Operating System (ROS)*. Bd. 1. Springer, 2016: S. 317–342 (siehe S. 26).

- [Blu08] Blum, Tobias, Nicolas Padoy, Hubertus Feußner und Nassir Navab: „Modeling and online recognition of surgical phases using hidden markov models“. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI)*. Springer, 2008: S. 627–635 (siehe S. 44).
- [Bod16] Bodenstedt, Sebastian, Jochen Görtler, Martin Wagner, Hannes Kenngott, Beat Peter Müller-Stich, Rüdiger Dillmann und Stefanie Speidel: „Superpixel-based Structure Classification for Laparoscopic Surgery“. *Proceedings of the International Society for Optical Engineering (SPIE)*. 2016 (siehe S. 100).
- [Böh13] Böhme, A., T. Beyl, J. Raczkowski, C. Müller und H. Wörn: „Feasibility Studies for Robot Assisted Total Knee Arthroplasty using a Light-Weight-Robot“. *Conference of the International Society for Medical Innovation and Technology (iSMIT)* (2013), Bd. (siehe S. 25).
- [Car10] Carus, Thomas: *Operationsatlas Laparoskopische Chirurgie*. Springer Berlin Heidelberg, 2010 (siehe S. 1, 36).
- [Cha14] Chang, Charles, Zoe Steinberg, Anup Shah und Mohan S Gundeti: „Patient Positioning and Port Placement for Robot-Assisted Surgery“. *Journal of Endourology* (2014), Bd. (siehe S. 8, 24).
- [Che13] Chen, Tsung-Chih, Ming-Chih Ho und Yung-Yaw Chen: „Port Placement Selection in Minimally Invasive Surgery“. *Proceedings of the International Conference of Automatic Control (CACs)* (2013), Bd.: S. 135–139 (siehe S. 23).
- [Che92] Chen, Yang und Gérard Medioni: „Object Modelling by Registration of Multiple Range Images“. *Image and Vision Computing* (1992), Bd. 10(3): S. 145–155 (siehe S. 38).
- [Chi16] Chiaverini, Stefano, Giuseppe Oriolo und Anthony A. Maciejewski: „Redundant Robots“. *Springer Handbook of Robotics*. Hrsg. von Siciliano, Bruno und Oussama Khatib. Bd. 1. Springer International Publishing, 2016: S. 221–242 (siehe S. 26).
- [Com16a] Computer Assisted Radiology and Surgery 2013: *Covidien plc*. Nov. 2016. URL: <http://www.covidien.eu/products/pages.aspx> (siehe S. 3).
- [Com16b] Computer Assisted Radiology and Surgery 2013: *Präsentation: Forschungsplattform OP:Sense*. Nov. 2016. URL: <http://rob.ipr.kit.edu/1739.php> (siehe S. 63).

- [Cos04] Coste-Maniere, Eve, Louai Adhami, Fabien Mourgues und Olivier Bantiche: „Optimal Planning of Robotically Assisted Heart Surgery: First Results on the Transfer Precision in the Operating Room“. *The International Journal of Robotics Research* (2004), Bd. 23(4-5): S. 539–548 (siehe S. 21, 22).
- [Deu16] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR): *Medizinrobotik*. Nov. 2016. URL: http://www.dlr.de/rmc/rm/de/desktopdefault.aspx/tabid-3795/16616_read-40529/ (siehe S. 25, 59).
- [Dil10] Dillmann, Prof. Dr.-Ing. Rüdiger: „Einführung in die Robotik I“. Vorlesungsunterlagen. 2010 (siehe S. 14).
- [Dr 16] Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG: *Serie 2232 22F BX4 CCD*. Nov. 2016. URL: <http://www.faulhaber.com/de/de/> (siehe S. 61).
- [Dud07] Dudenredaktion: *Duden - Wörterbuch medizinischer Fachbegriffe*. Bibliographisches Institut GmbH, 2007 (siehe S. 36–38, 53).
- [Dud16] Duden online: *Suchbegriff Bauch, Christiane von Solodkoff, Dr. Michael von Solodkoff, Neckargemünd*. Nov. 2016. URL: <http://www.duden.de/> (siehe S. 53).
- [Feu08] Feuerstein, Marco, Thomas Mussack, Sandro M Heining und Nassir Navab: „Intraoperative Laparoscope Augmentation for Port Placement and Resection Planning in Minimally Invasive Liver Resection“. *IEEE transactions on medical imaging* (2008), Bd. 27(3): S. 355–369 (siehe S. 23).
- [Fis81] Fischler, Martin A und Robert C Bolles: „Random Sample Consensus: a Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography“. *Communications of the ACM* (1981), Bd. 24(6): S. 381–395 (siehe S. 39).
- [For16] Force Dimension: *omega.7, sigma.7*. Nov. 2016. URL: <http://www.force-dimension.com/> (siehe S. 6).
- [Gal98] Gallagher, AG, N McClure, J McGuigan, K Ritchie und NP Sheehy: „An Ergonomic Analysis of the Fulcrum Effect in the Acquisition of Endoscopic Skills“. *Endoscopy* (1998), Bd. 30(07): S. 617–620 (siehe S. 19).

- [Gan14] Gandaglia, Giorgio, Khurshid R Ghani, Akshay Sood, Jessica R Meyers, Jesse D Sammon, Marianne Schmid, Briony Varda, Alberto Briganti, Francesco Montorsi, Maxine Sun et al.: „Effect of Minimally Invasive Surgery on the Risk for Surgical Site Infections: Results from the National Surgical Quality Improvement Program (NSQIP) Database“. *JAMA surgery* (2014), Bd. 149(10): S. 1039–1044 (siehe S. 2).
- [Gos91] Gosselin, Clement und Jorge Angeles: „A Global Performance Index for the Kinematic Optimization of Robotic Manipulators“. *Journal of Mechanical Design* (1991), Bd. 113(3): S. 220–226 (siehe S. 22, 30).
- [GRI16] GRIP GmbH Handhabungstechnik. Nov. 2016. URL: http://www.grip-gmbh.com/p_energiekupplungen.htm (siehe S. 60).
- [Hag10] Hagn, Ulrich, Rainer Konietzschke, Andreas Tobergte, Mathias Nickl, Stefan Jörg, Bernhard Kübler, Georg Passig, Martin Gröger, Florian Fröhlich, Ulrich Seibold et al.: „DLR MiroSurge: a Versatile System for Research in Endoscopic Telesurgery“. Springer, 2010: S. 183–193 (siehe S. 8, 25, 121).
- [Hee06] Heemskerck, J, R Zandbergen, JG Maessen, JWM Greve und ND Bouvy: „Advantages of Advanced Laparoscopic Systems“. *Surgical Endoscopy And Other Interventional Techniques* (2006), Bd. 20(5): S. 730–733 (siehe S. 4).
- [Hut13a] Hutzl, Jessica, Andreas Bihlmaier, Oliver Weede und Heinz Wörn: „An Automated Instrument as Component of a Cognitive Medical Robotic System for Minimal Invasive Surgery“. *Conference of the International Society for Medical Innovation and Technology (iSMIT)*. 2013: S. 3 (siehe S. 25, 62).
- [Hut13b] Hutzl, Jessica, Mirko Kunze und Heinz Wörn: „Arbeitsraumanalyse als Grundlage der Zugangsplanung“. *Tagungsband der 12. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Computer- und Roboterassistierte Chirurgie e.V. (CURAC)*. 2013: S. 51–54 (siehe S. 29).
- [Hut14] Hutzl, Jessica, David Oertel und Heinz Wörn: „Knowledge-based Direction Prediction to Optimize the Null-Space Parameter of a Redundant Robot in a Telemanipulation Scenario“. *International Symposium on Robotic and Sensors Environments (ROSE)*. IEEE. 2014: S. 25–30 (siehe S. 44, 47, 59).

- [Hut15a] Hutzl, Jessica, Andreas Bihlmaier, Martin Wagner, Hannes Götz Kenngott, Beat Peter Müller und Heinz Wörn: „Knowledge-based Workspace Optimization of a Redundant Robot for Minimally Invasive Robotic Surgery (MIRS)“. *Proceedings of the International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. IEEE. 2015: S. 1403–1408 (siehe S. 40, 83).
- [Hut15b] Hutzl, Jessica und Heinz Wörn: „Spatial Probability Distribution for Port Planning in Minimal Invasive Robotic Surgery (MIRS)“. *Proceedings of the 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA)*. IEEE. 2015: S. 204–210 (siehe S. 51, 52).
- [Int16] Intuitive Surgical, Inc. Nov. 2016. URL: <http://www.intuitivesurgicals.com/> (siehe S. 7, 8, 22).
- [Kar16] Karl Storz GmbH & Co. KG. Nov. 2016. URL: <https://www.karlstorz.com/de/de/index.htm> (siehe S. 4).
- [Kat15] Katic, Darko, Chantal Julliard, Anna-Laura Wekerle, Hannes Kenngott, Beat Peter Müller-Stich, Rüdiger Dillmann, Stefanie Speidel, Pierre Jannin und Bernard Gibaud: „LapOntoSPM: an Ontology for Laparoscopic Surgeries and its Application to Surgical Phase Recognition“. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* (2015), Bd. 10(9): S. 1427–1434 (siehe S. 54).
- [Ken15] Kenngott, H.G., J.J. Wünscher, M. Wagner, A. Preukschas, A.L. Wekerle, P. Neher, S. Suwelack, S. Speidel, F. Nickel, D. Oladokun, L. Maier-Hein, R. Dillmann, H.P. Meinzer und B.P. Müller-Stich: „OpenHELP (Heidelberg Laparoscopy Phantom): Development of an Open-Source Surgical Evaluation and Training Tool“. *Surgical Endoscopy* (2015), Bd. 29(11): S. 3338–3347 (siehe S. 33, 99).
- [Kin67] King, Benjamin: „Step-wise Clustering Procedures“. *Journal of the American Statistical Association* (1967), Bd. 62(317): S. 86–101 (siehe S. 44).
- [KIT16] KIT Karlsruhe: *Forschungsplattform OP:Sense auf CeBIT 2014*. Nov. 2016. URL: <https://www.pkm.kit.edu/cebit2014.php> (siehe S. 63).
- [Kon06] Konietzschke, Rainer, Tobias Ortmaier, Christian Ott, Ulrich Hagn, Luc Le-Tien und Gerd Hirzinger: „Concepts of Human-Robot Co-Operation for a New Medical Robot“. *Proceedings of the 2. International Workshop*

- on *Human Centered Robotic Systems (HCRS)*. Citeseer. 2006: S. 1–6 (siehe S. 25).
- [Kon07] Konietschke, Rainer: „Planning of Workplaces with Multiple Kinematically Redundant Robots“. Diss. Technische Universität München, 2007 (siehe S. 27, 29).
- [Kon09] Konietschke, Rainer, Ulrich Hagn, Mathias Nickl, Stefan Jörg, Andreas Tobergte, Georg Passig, Ulrich Seibold, Luc Le Tien, Bernhard Kübler, Martin Gröger et al.: „The DLR MiroSurge - A Robotic System for Surgery“. (2009), Bd. 9: S. 1589–1590 (siehe S. 25).
- [KUK16] KUKA Roboter GmbH: *Leichtbauroboter LBR4+*. Nov. 2016. URL: <http://www.kuka-robotics.com/germany/de/> (siehe S. 25, 60).
- [Kun12] Kunze, Mirko: „Implementierung der inversen Kinematik in MATLAB“. interner Bericht. 2012 (siehe S. 28).
- [Kun16] Kunze, Mirko: „Berechnung der inversen Kinematik auf der CPU“. interner Bericht. 2016 (siehe S. 125).
- [Las12] Lasser, M. S., C. K. Patel, S. E. Elsamra, J. F. Renzulli, G. E. Halebian und G. Pareek: „Dedicated Robotics Team reduces Pre-surgical Preparation Time“. *Indian Journal of Urology* (2012), Bd. 28(3): S. 263–266 (siehe S. 8).
- [Loh12] Lohmann, Martin, Rainer Konietschke, Anja Hellings, Christoph Borst und Gerhard Hirzinger: „A Workspace Analysis Method to Support Intraoperative Trocar Placement in Minimally Invasive Robotic Surgery (MIRS)“. *Tagungsband der 11. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Computer- und Roboterassistierte Chirurgie e. V. (CURAC)*. 2012 (siehe S. 28).
- [MAQ16] MAQUET Vertrieb und Service Deutschland GmbH. Nov. 2016. URL: <http://www.maquet.com/de/> (siehe S. 60).
- [Mic16] Microsoft Corporation. Nov. 2016. URL: <https://developer.microsoft.com/de-de/windows/kinect> (siehe S. 25).
- [Mie14] Mietkowski, Patrick und Martin Wagner: „Unterteilung der Rektumresektion am Phantom in Phasen und Schritte“. interner Bericht. 2014 (siehe S. 52).

- [Mieng] Mietkowski, Patrick: „Entwicklung und Evaluation eines kognitiven Assistenzsystems in der minimalinvasiven Chirurgie am Beispiel eines lernenden Kameraführungsroboters“. Im Erscheinen (siehe S. 54, 55).
- [Min14] Mintenbeck, Julien, Christoph Ledermann, Ramon Estana und Heinz Wörn: „EndoSnake - A Single-Arm-Multi-Port MIRS System with Flexible Instruments“. *Proceedings of the International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS)* (2014), Bd. 13 (siehe S. 25).
- [Mön11] Mönnich, Holger, Philip Nicolai, Tim Beyl, Jörg Raczkowsky und Heinz Wörn: „A Supervision System for the Intuitive Usage of a Telemanipulated Surgical Robotic Setup“. *Proceedings of the International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. 2011: S. 449–454 (siehe S. 25).
- [Mor05] Moradi, Hadi und Sukhan Lee: „Joint Limit Analysis and Elbow Movement Minimization for Redundant Manipulators using Closed Form Method“. *Proceedings of the International Conference on Intelligent Computing*. Springer. 2005: S. 423–432 (siehe S. 27, 29).
- [NDI16] NDI International Headquarters: *Polaris Optical Tracking Systems*. Nov. 2016. URL: <http://www.ndigital.com/> (siehe S. 25, 101).
- [Nic10] Nicolai, Philip, Holger Mönnich, Jörg Raczkowsky, Heinz Wörn und Jens Bernshausen: „Überwachung eines Operationssaals für die kooperative robotergestützte Chirurgie mittels neuartiger Tiefenkameras“. *Tagungsband der 9. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Computer- und Roboterassistierte Chirurgie e.V. (CURAC)*. 2010 (siehe S. 26).
- [Nic11] Nicolai, Philip, Tim Beyl, Holger Mönnich, Jörg Raczkowsky und Heinz Wörn: „OP:Sense - An Integrated Rapid Development Environment in the Context of Robot Assisted Surgery and Operation Room Sensing“. *Proceedings of the International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. 2011: S. 2421–2422 (siehe S. 25, 121).
- [Nic13] Nicolai, Philip, Thorsten Brennecke, Mirko Kunze, Luzie Schreiter, Tim Beyl, Yaokun Zhang, Jörg Raczkowsky Julien Mintenbeck und Heinz Wörn: „The OP:Sense Surgical Robotics Platform: First Feasibility Studies and Current Research“. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*. 2013: S. 136–137 (siehe S. 8, 26).

- [Nor15] Norajitra, Tobias, Hans-Peter Meinzer und Klaus H Maier-Hein: „3D Statistical Shape Models Incorporating 3D Random Forest Regression Voting for Robust CT Liver Segmentation“. *Proceedings of the International Society for Optical Engineering (SPIE)*. 2015: S. 941406–941406 (siehe S. 35).
- [PEA16] PEAK-System Technik GmbH: *PCAN-USB-Adapter*. Nov. 2016. URL: <http://www.peak-system.com/Home.59.0.html> (siehe S. 62).
- [pmd16] pmdtechnologies ag. Nov. 2016. URL: <http://pmdtec.com/> (siehe S. 25).
- [Poi16] Point Cloud Library. Nov. 2016. URL: <http://www.pointclouds.org/> (siehe S. 39).
- [Ric16] Richard Wolf GmbH: *ERAGONmodular*. Nov. 2016. URL: <http://www.richard-wolf.com/de/endoskope.html> (siehe S. 61).
- [Rob16] Robot Operating System (ROS). Nov. 2016. URL: <http://www.ros.org/> (siehe S. 26, 62).
- [Sch14] Schreiter, Luzie, Lisa Senger, Tim Beyl, Elmar Berghöfer und Jörg Raczkowsky und Heinz Wörn: „Probabilistische Echtzeit-Situationserkennung im Operationssaal am Beispiel von OP:Sense“. *Tagungsband der 13. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Computer- und Roboterassistierte Chirurgie e.V. (CURAC)*. 2014: 177-180 (siehe S. 26).
- [Shi08] Shimizu, M., 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* (2008), Bd. 24(5): S. 1131–1142 (siehe S. 28–30, 66, 123).
- [Sto98] Stocco, L, Septimiu E Salcudean und Farrokh Sassani: „Fast Constrained Global Minimax Optimization of Robot Parameters“. *Robotica* (1998), Bd. 16(06): S. 595–605 (siehe S. 22, 28, 30).
- [Sun07] Sun, Loi Wah und Chung Kwong Yeung: „Port Placement and Pose Selection of the da Vinci Surgical System for Collision-free Intervention based on Performance Optimization“. *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems (RSJ)*. IEEE. 2007: S. 1951–1956 (siehe S. 22, 23, 74).

- [Tay16] Taylor, Russell H., Arianna Menciassi, Gabor Fichtinger, Paolo Fiorini und Paolo Dario: „Medical Robotics and Computer-Integrated Surgery“. *Springer Handbook of Robotics*. Hrsg. von Siciliano, Bruno und Oussama Khatib. Cham: Springer International Publishing, 2016: S. 1657–1684 (siehe S. 24).
- [The16] The MathWorks GmbH: *MATLAB*. Nov. 2016. URL: <http://de.mathworks.com/> (siehe S. 38, 41, 49, 98, 103).
- [Thi10] Thielmann, Sophie, Ulrich Seibold, Robert Haslinger, Georg Passig, Thomas Bahls, Stefan Jörg, Mathias Nickl, Alexander Nothhelfer, Ulrich Hagn und Gerd Hirzinger: „MICA - A new Generation of Versatile Instruments in Robotic Surgery“. *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2010: S. 871–878 (siehe S. 25).
- [Tob11] Tobergte, Andreas, Patrick Helmer, Ulrich Hagn, Patrice Rouiller, Sophie Thielmann, Sébastien Grange, Alin Albu-Schäffer, François Conti und Gerd Hirzinger: „The sigma. 7 Haptic Interface for MiroSurge: A new Bi-Manual Surgical Console“. *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems (RSJ)*. IEEE. 2011: S. 3023–3030 (siehe S. 25).
- [Tre07] Trejos, AL, RV Patel, I Ross und B Kiaii: „Optimizing Port Placement for Robot-Assisted Minimally Invasive Cardiac Surgery“. *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery* (2007), Bd. 3(4): S. 355–364 (siehe S. 22, 23).
- [Vah08] Vahrenkamp, N., C. Scheurer, T. Asfour, J. Kuffner und R. Dillmann: „Adaptive Motion Planning for Humanoid Robots“. *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems (RSJ)*. 2008: S. 2127–2132 (siehe S. 28).
- [Wag15] Wagner, Martin, Andreas Bihlmaier, Patrick Mietkowski, Sebastian Bodenstedt, Stefanie Speidel, Heinz Wörn, Beat Müller-Stich und Hannes G. Kenngott: „Cognitive Camera Robot for Cognition-Guided Laparoscopic Surgery“. *Proceedings of the Hamlyn Symposium on Medical Robotics*. 2015 (siehe S. 10).
- [Wee09] Weede, Oliver, Alexander Kettler und Heinz Wörn: „Seed Throwing Optimization: A Probabilistic Technique for Multimodal Function Optimization“. *Future Computing, Service Computation, Cognitive,*

-
- Adaptive, Content, Patterns, 2009. COMPUTATIONWORLD'09. Computation World: IEEE. 2009: S. 515–519 (siehe S. 24).*
- [Wee10] Weede, Oliver, Daniel Stein, Nicolas Gorges, Beat Müller und Heinz Wörn: „A Cognitive Path-Guidance-System for Minimally Invasive Surgery“. *International Symposium on Intelligent Systems and Informatics. IEEE. 2010: S. 139–144 (siehe S. 24).*
- [Wee11] Weede, Oliver, Holger Mönnich, Beat Müller und Heinz Wörn: „An Intelligent and Autonomous Endoscopic Guidance System for Minimally Invasive Surgery“. *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE. 2011: S. 5762–5768 (siehe S. 24).*
- [Wee13a] Weede, Oliver: „Wissensbasierte Planung für die minimal-invasive Chirurgie“. Diss. KIT Karlsruhe, 2013 (siehe S. 29).
- [Wee13b] Weede, Oliver, Josphine Wünscher, Hannes Kenngott, Beat Müller-Stich und Heinz Wörn: „Knowledge-based Planning of Port Positions for Minimally Invasive Surgery“. (2013), Bd.: S. 12–17 (siehe S. 24, 36).
- [Zac11] Zacharias, Franziska: „Knowledge Representations for Planning Manipulation Actions“. Diss. Technische Universität München, 2011 (siehe S. 9, 28, 29).

Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematische Zeichnung zur Laparoskopie	2
1.2	Trokar	3
1.3	Laparoskopische Instrumente	4
1.4	Räumliche Anordnung im Operationssaal	5
1.5	Aufbau in der Roboter-assistieren Chirurgie	6
1.6	Eingabegerät zur Steuerung	6
1.7	Konzeptskizze	10
2.1	Euler-Winkel	14
2.2	Roll-Pitch-Yaw	15
2.3	Beispiel zu DH Parametern	16
2.4	Hebelgesetz, Strahlensatz	19
2.5	Hebelgesetz übertragen auf die Laparoskopie	20
4.1	Phantom OpenHELP Abmessungen	34
4.2	OpenHelp mit markierten Zugängen	34
4.3	Multiorgansegmentierung	35
4.4	Darstellung der Trokarpositionen für eine lap. Rektumresektion	36
4.5	Prozessablauf der Patientenregistrierung	37
4.6	Punktwolkenregistrierung beim Patienten	38
4.7	Verallgemeinerung der Trajektorien durch ein Gitter	42
4.8	Überlagerung der Punktwolken	43
4.9	Nutzung des Konfidenzintervall bei Clustern	46
4.10	Prinzipdarstellung zum Modell 1. und 2. Ordnung	47
4.11	Auflösung der Einheitskugel	50
4.12	Konzept zur Erstellung der Wahrscheinlichkeitsverteilung	51
4.13	Räumliche Wahrscheinlichkeitsverteilung	52

4.14	Das Abdomen mit seinen Organen	53
5.1	Verwendete Arten von Drehgelenken	58
5.2	Abbildung des menschlichen Arms	58
5.3	Bewegung auf dem Redundanzkreis	59
5.4	Szenenüberblick	60
5.5	Lap. Instrumente zur Montage am Roboterendeffektor	61
5.6	Getriebe des motorisierten Instruments	62
5.7	Motorisiertes Instrument	62
5.8	Koordinatensysteme der Robotergelenke	63
5.9	Koordinatensysteme des TCP und des Kamerabilds	64
5.10	Gelenksymmetrie des Roboters	65
5.11	Nutzung der Gelenksymmetrie 1	66
5.12	Nutzung der Gelenksymmetrie 2	66
5.13	Darstellung von Trokarpositionen im RKS	67
5.14	Roboterkonfigurationstypen - Überblick	69
5.15	Überlagerte Darstellung der Bewegung im Nullraum	70
5.16	Nullraumparameter - Überblick	71
5.17	Orientierung am Endeffektor	72
5.18	Einschränkungen der Erreichbarkeit durch Instrumentenlänge	75
5.19	Einschränkungen der Erreichbarkeit durch Kollision	76
5.20	Kartesische Nachbarn	77
5.21	Leichtbauroboter LWR4+ in der Position „Kerze“	79
5.22	Singularitäten des Roboters im Szenario	80
5.23	Überblick zum Gelenkwinkel $j_{\vec{k},4}$ für die Singularitätsbetrachtung	81
6.1	Modell für die phasenbezogene Analyse	84
6.2	Modell für die Berechnung der Indikatoren	85
6.3	Motivation zur Vergleichbarkeit des Gelenkbewegungsindex	87
6.4	Der Pivotpunkt als Datenmatrix	89
6.5	Visualisierung von sechs Datensätzen	90
6.6	Auswirkung der vorgeschlagenen Verknüpfungsmethoden	93
6.7	Kombination von Phasen und Nullraum	96
6.8	Konzept zum Finden des besten Parametersatzes	97
7.1	Markersterne an den Handgriffen der Instrumente	100
7.2	Räumliche Anordnung während der 1. Versuchsreihe	101
7.3	Räumliche Anordnung während der 2. Versuchsreihe	102

7.4	Bounding Box des Phantoms	104
7.5	Zielregionen im Phantom	104
7.6	Zielregion der Phase 1	105
7.7	Position des Chirurgen und des Roboters am Operationstisch	107
7.8	Ergebnis für unterschiedliche r_c	108
7.9	Ergebnis für unterschiedliche r_a	109
7.10	Visualisierung eines Datensatzes	110
7.11	Anwendung der Verknüpfungsmethoden	110
7.12	Nutzung eines Schwellenwerts	111
7.13	Gute Pivotpositionen im <i>RKS</i>	113
7.14	Punktwolken mit Trajektorien	115
7.15	Balkendiagramm über den Nullraumparameter einzelner Phasen	117
7.16	Verteilung der Pivotpunkte im Suchraum - 3D	117
7.17	Verteilung der Pivotpunkte im Suchraum - Seitenansicht	118
7.18	Verteilung des Nullraumparameters für den stärksten Pivotpunkt	118
B.1	Zielregion der Phase 2	149
B.2	Zielregion der Phase 3	150
B.3	Zielregion der Phase 4	150
B.4	Zielregion der Phase 5	151
B.5	Zielregion der Phase 6	151
B.6	Ergebnis für unterschiedliche $r_c; r_a = 60^\circ, ns = 0^\circ$	152
B.7	Ergebnis für unterschiedliche $r_c; r_a = 120^\circ, ns = 0^\circ$	153
B.8	Ergebnis für unterschiedliche $r_c; r_a = 180^\circ, ns = 0^\circ$	153
B.9	Ergebnis für unterschiedliche $r_c; r_a = 240^\circ, ns = 0^\circ$	154
B.10	Ergebnis für unterschiedliche $r_c; r_a = 300^\circ, ns = 0^\circ$	154
B.11	Ergebnis für unterschiedliche $r_a; r_c = 0, ns = 0^\circ$	155
B.12	Ergebnis für unterschiedliche $r_a; r_c = 1, ns = 0^\circ$	156
B.13	Ergebnis für unterschiedliche $r_a; r_c = 3, ns = 0^\circ$	156
B.14	Ergebnis für unterschiedliche $r_a; r_c = 5, ns = 0^\circ$	157
B.15	Visualisierung von sechs Datensätzen mit $ns = 10^\circ$	158
B.16	Visualisierung von sechs Datensätzen mit $ns = -10^\circ$	159
B.17	Visualisierung von sechs Datensätzen mit $ns = 30^\circ$	159
B.18	Visualisierung von sechs Datensätzen mit $ns = -30^\circ$	160
B.19	Visualisierung von sechs Datensätzen mit $ns = 45^\circ$	160
B.20	Visualisierung von sechs Datensätzen mit $ns = -45^\circ$	161
B.21	Optimum der einzelnen Phasen	162

Abbildungsverzeichnis

B.22	Bestmöglicher Parametersatz aus Daten der ersten Versuchsreihe . .	163
B.23	Punktwolken mit Trajektorien	164

Tabellenverzeichnis

4.1	Gliederung der Operationsphasen in Phasen und Schritte	55
4.2	Operationsmodell einer Rektumresektion	56
6.1	Motivation zur Verknüpfung von Indikatoren	91
6.2	Rangfolge unterschiedlicher Methoden	93
7.1	Von der Trajektorie zur Punktwolke	106
7.2	Besten zehn Parametersätze	113
7.3	Parametersätze auf zweite Versuchsreihe	115
7.4	Phasenbezogenes Optimum	116

ANHANG A

Mathematisches Modell - kinematische Kette

Die Transformationsmatrizen nach der Denavit-Hartenberg-Konvention für den KUKA LBR4+:

$$dh(:, :, 1) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

$$dh(:, :, 2) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0,31 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.2})$$

$$dh(:, :, 3) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0,31 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.3})$$

$$dh(:, :, 4) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0,71 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.4})$$

$$dh(:, :, 5) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0,71 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.5})$$

$$dh(:, :, 6) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1,1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.6})$$

$$dh(:, :, 7) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1,1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.7})$$

Der Endeffektor des Roboters ist entlang der z -Achse des letzten Gelenks verschoben.

$$dh(:, :, 8) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1,178 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.8})$$

Die Transformationsmatrizen nach der Denavit-Hartenberg-Konvention für das Werkzeug: Da keine aktiven Freiheitsgrade vorliegen, verändern sich die Matrizen lediglich in translatorischer Richtung. Die einzelnen Matrizen beziehen sich auf das zweiteilige Kupplungssystem, die Markerplatte für das optische Tracking der Endeffektorpose, die Kameralhalterung, die Kamera und die Optik.

$$dh(:, :, 9) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1,178 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.9})$$

$$dh(:, :, 10) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1,188 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.10})$$

$$dh(:, :, 11) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1,22 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.11})$$

$$dh(:, :, 12) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -0,025 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1,255 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.12})$$

$$dh(:, :, 13) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -0,03 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1,255 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.13})$$

$$dh(:, :, 14) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0,0049 \\ 0 & 1 & 0 & 0,022 \\ 0 & 0 & 1 & 1,241 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.14})$$

$$dh(:, :, 15) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -0.079 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1,255 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.15})$$

$$dh(:, :, 12) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -0.455 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1,255 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.16})$$

ANHANG B

Ergebnisse im Detail

B.1 Zielregion

Das Ergebnis des iterativen Vorgangs zur Erstellung der Punktwolke ist für die Phasen 2 bis 6 gezeigt. Die Vorzugsrichtung entlang der z -Achse ist in allen Abbildungen erkennbar.

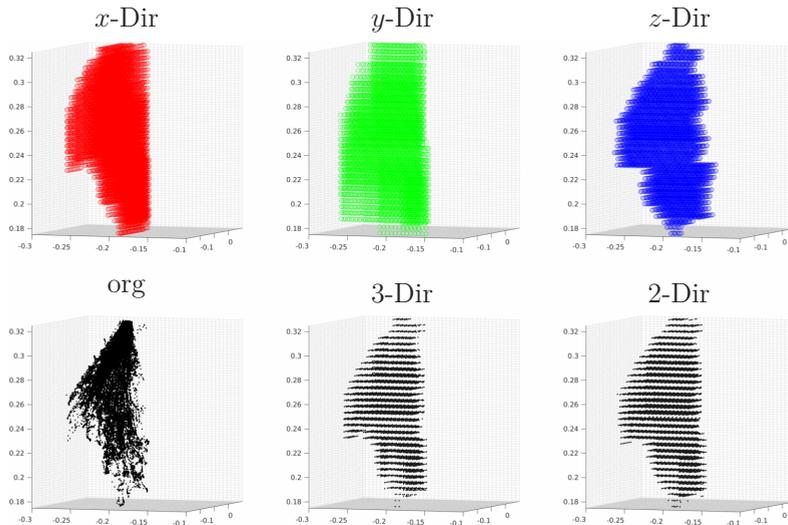


Abbildung B.1: Zielregion der Phase 2 und ihre Iterationsschritte;
Achsenbeschriftung in Meter

B Ergebnisse im Detail

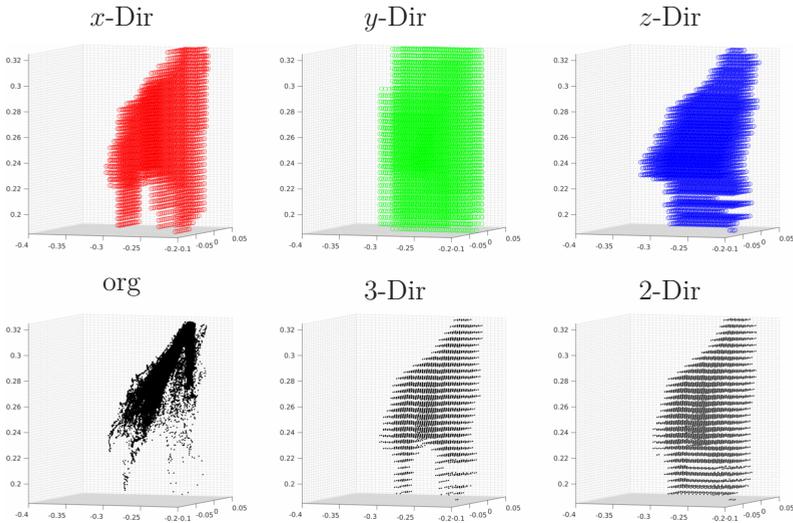


Abbildung B.2: Zielregion der Phase 3 und ihre Iterationsschritte; Achsenbeschriftung in Meter

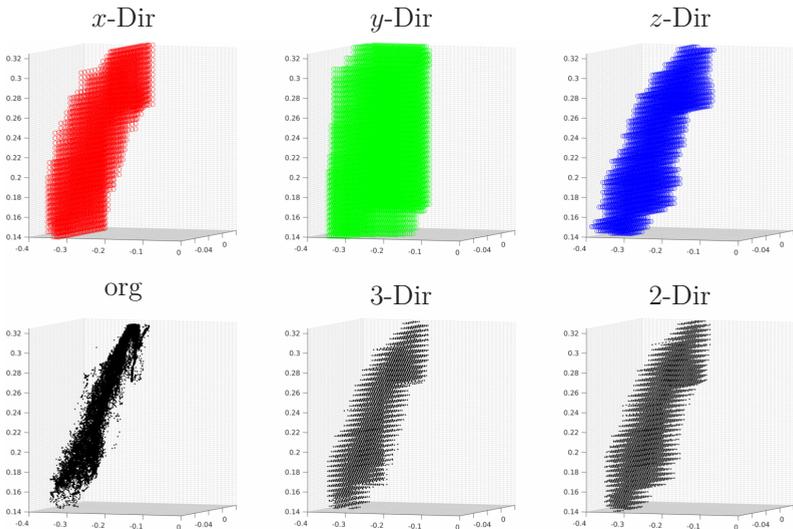


Abbildung B.3: Zielregion der Phase 4 und ihre Iterationsschritte; Achsenbeschriftung in Meter

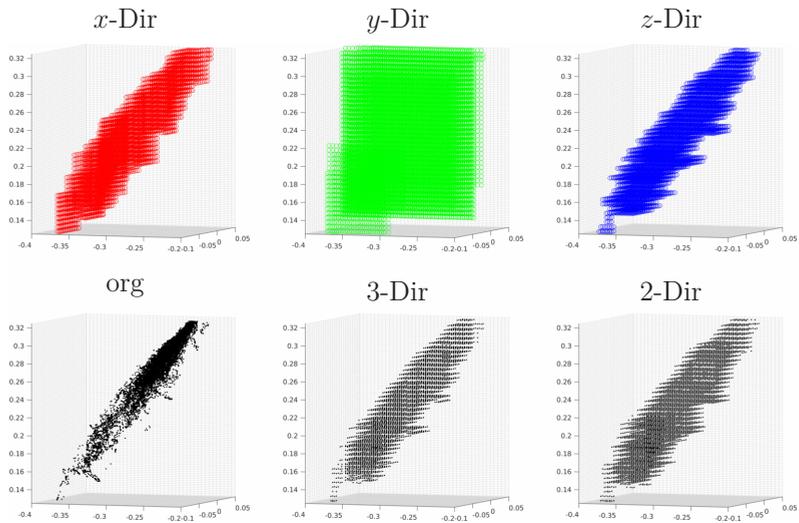


Abbildung B.4: Zielregion der Phase 5 und ihre Iterationsschritte; Achsenbeschriftung in Meter

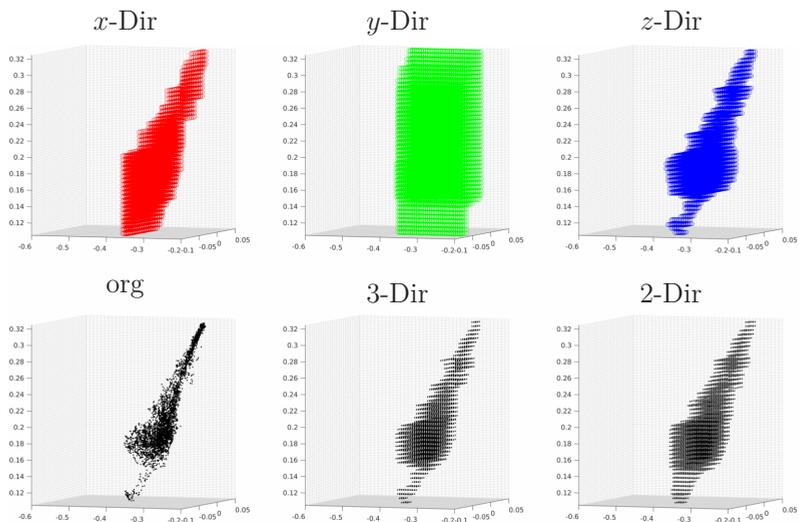


Abbildung B.5: Zielregion der Phase 6 und ihre Iterationsschritte; Achsenbeschriftung in Meter

B.2 Parameterwahl

B.2.1 Roboterkonfigurationstypen

Jede Abbildung zeigt die acht unterschiedlichen Roboterkonfigurationstypen. Die Orientierung des Roboterendeffektors verändert sich von Abbildung zu Abbildung. Der Nullraumparameter bleibt in allen Abbildungen bei $ns = 0^\circ$. In Abbildung 7.8 fand bereits eine Gegenüberstellung mit $r_a = 0^\circ$ statt.

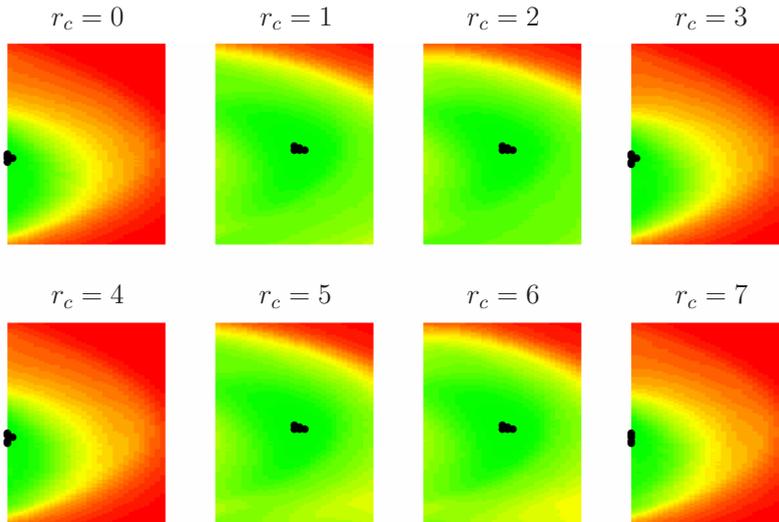


Abbildung B.6: Ergebnis für unterschiedliche r_c bei gleichbleibendem $r_a = 60^\circ$, $ns = 0^\circ$, Ph_1 : Die schwarzen Punkte markieren die fünf besten Werte des jeweiligen Datensatzes.

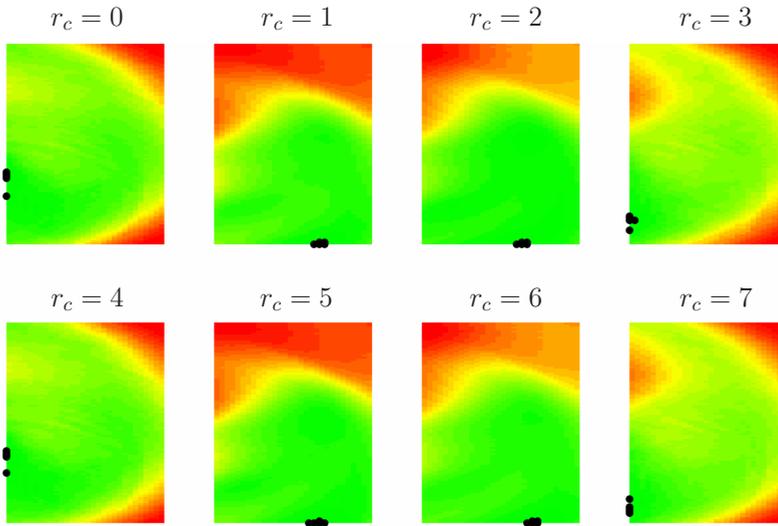


Abbildung B.7: Ergebnis für unterschiedliche r_c bei gleichbleibendem $r_a = 120^\circ$, $ns = 0^\circ$, Ph_1 : Die schwarzen Punkte markieren die fünf besten Werte des jeweiligen Datensatzes.

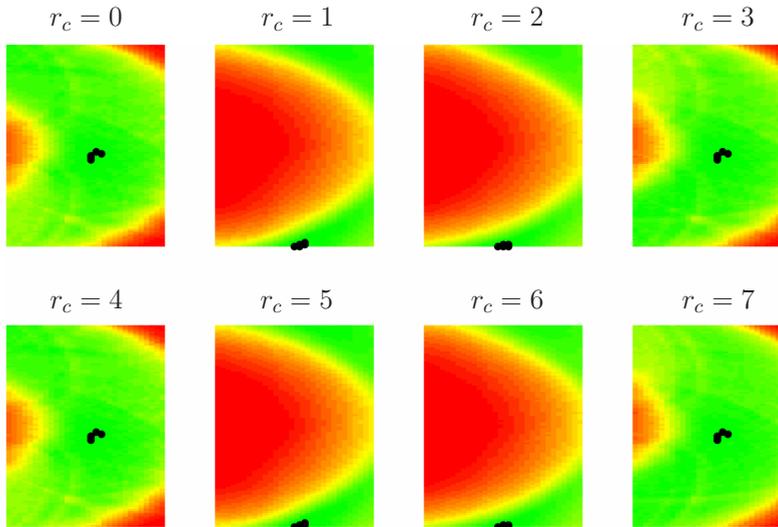


Abbildung B.8: Ergebnis für unterschiedliche r_c bei gleichbleibendem $r_a = 180^\circ$, $ns = 0^\circ$, Ph_1 : Die schwarzen Punkte markieren die fünf besten Werte des jeweiligen Datensatzes.

B Ergebnisse im Detail

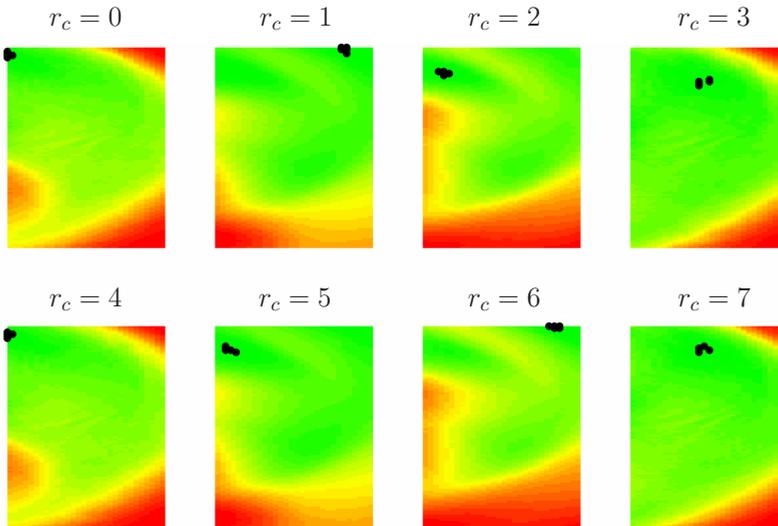


Abbildung B.9: Ergebnis für unterschiedliche r_c bei gleichbleibendem $r_a = 240^\circ$, $ns = 0^\circ$, Ph_1 : Die schwarzen Punkte markieren die fünf besten Werte des jeweiligen Datensatzes.

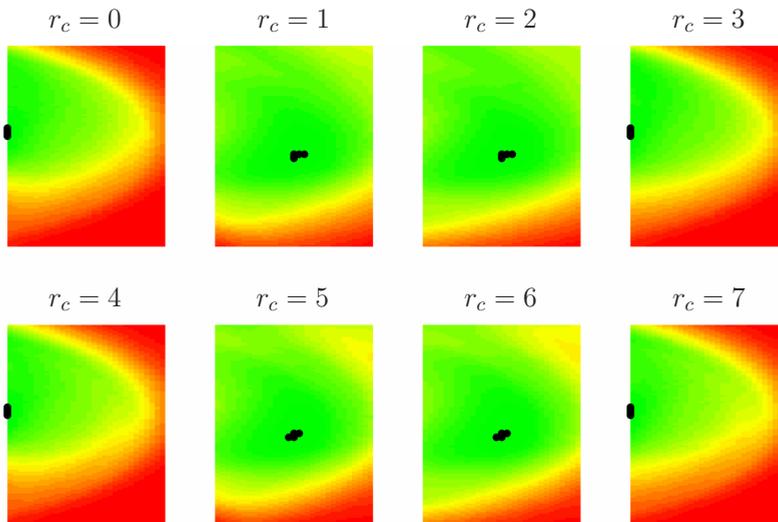


Abbildung B.10: Ergebnis für unterschiedliche r_c bei gleichbleibendem $r_a = 300^\circ$, $ns = 0^\circ$, Ph_1 : Die schwarzen Punkte markieren die fünf besten Werte des jeweiligen Datensatzes.

B.2.2 Orientierung am Roboterendeffektor

Den folgenden Abbildungen liegt die gleiche zu beurteilende Punktwolke zugrunde - genau wie in Abbildung 7.9. Während der Roboterkonfigurationstyp und der Nullraumparameter unverändert bleiben, wird in den Unterschaubildern die Orientierung am Roboterendeffektor verändert. Dabei fällt auf, dass bestimmte Roboterkonfigurationstypen ähnliche Ergebnisse erzielen. So verhalten sich die Abbildung 7.9 und die Abbildung B.14 ähnlich, jedoch nicht identisch.

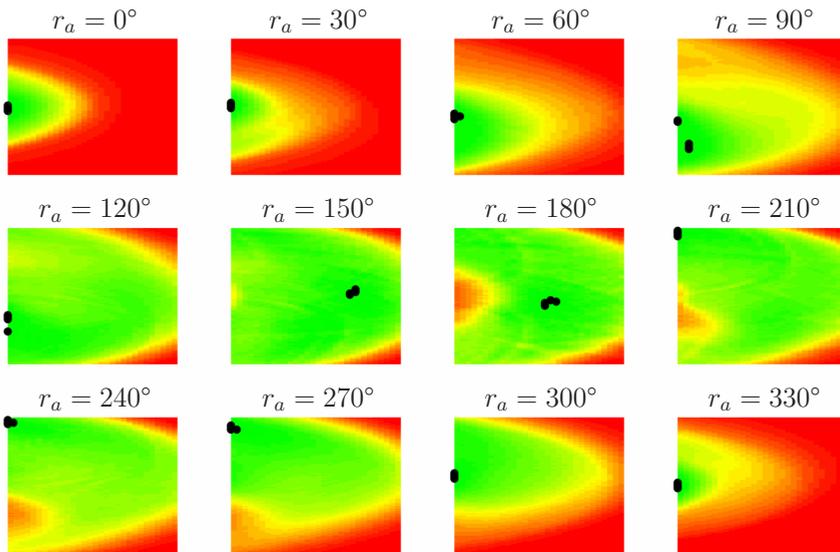


Abbildung B.11: Ergebnis für unterschiedliche r_a bei gleichbleibendem $r_c = 0$, $ns = 0^\circ$, Ph_1 : Die schwarzen Punkte markieren die fünf besten Werte des jeweiligen Datensatzes.

B Ergebnisse im Detail

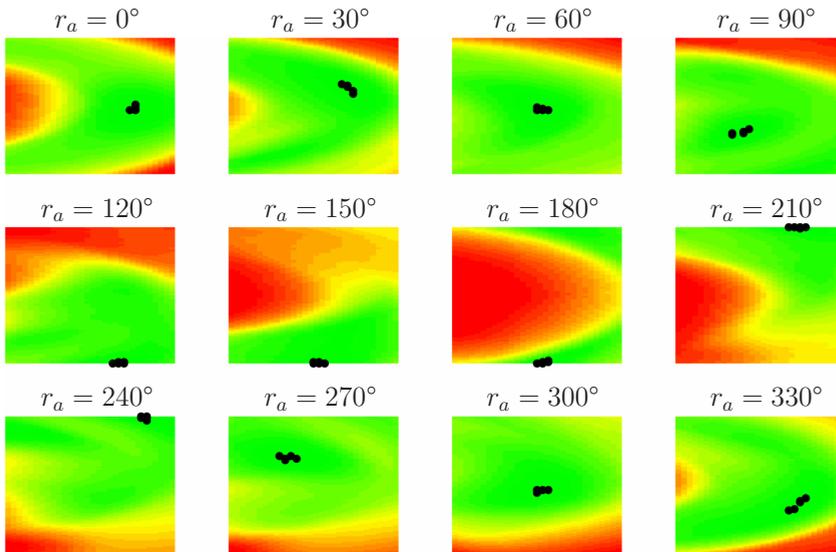


Abbildung B.12: Ergebnis für unterschiedliche r_a bei gleichbleibendem $r_c = 1$, $n_s = 0^\circ$, Ph_1 : Die schwarzen Punkte markieren die fünf besten Werte des jeweiligen Datensatzes.

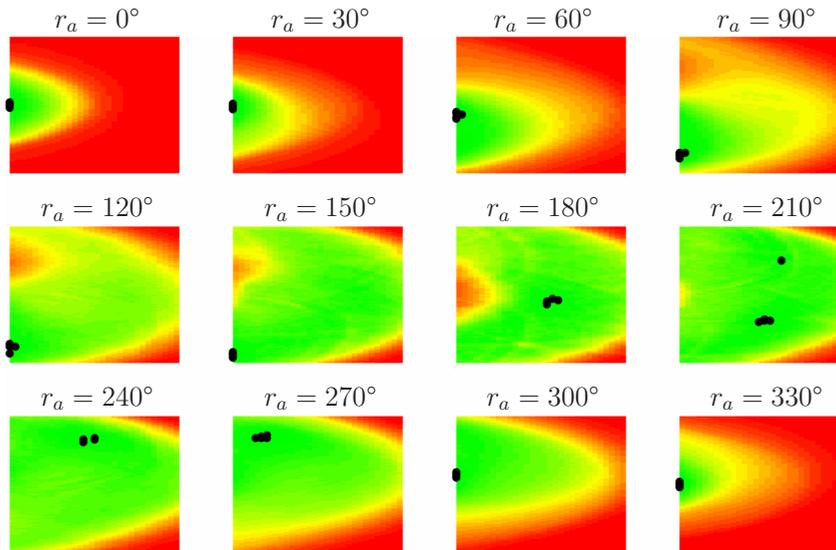


Abbildung B.13: Ergebnis für unterschiedliche r_a bei gleichbleibendem $r_c = 3$, $n_s = 0^\circ$, Ph_1 : Die schwarzen Punkte markieren die fünf besten Werte des jeweiligen Datensatzes.

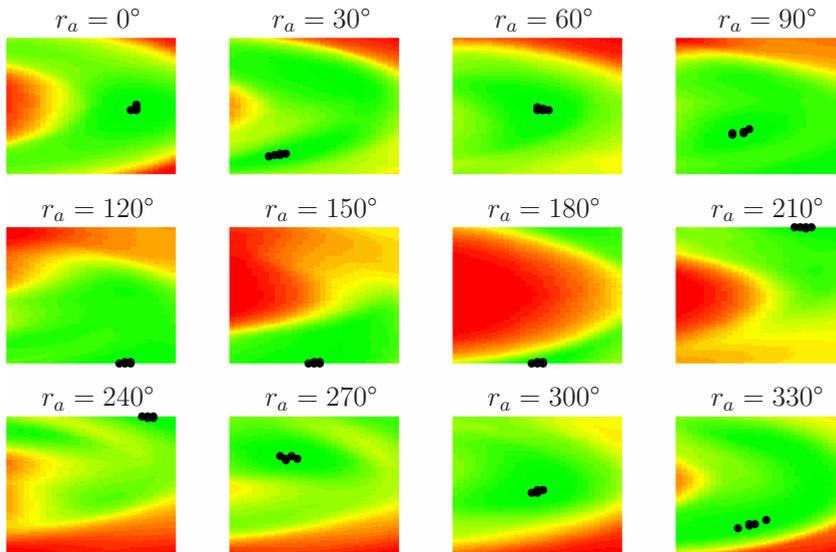


Abbildung B.14: Ergebnis für unterschiedliche r_a bei gleichbleibendem $r_c = 6$, $ns = 0^\circ$, Ph_1 : Die schwarzen Punkte markieren die fünf besten Werte des jeweiligen Datensatzes.

B.2.3 Nullraumparameter

Der getestete Parametersatz ist durch den Indikator $index_{reach}$ farblich dargestellt. Während der Parametersatz auf allen Schaubildern einer Abbildung identisch ist, wurde die der Berechnung übergebene Punktwolke verändert. Es wird sichtbar, dass Phasen ($Ph_i \dots Ph_6$) unterschiedlich auf diesen Parametersatz reagieren. Die Abbildungen 6.5 und 7.10 wurden zur Beschreibung des Einflusses des Nullraumparameters bereits in den entsprechenden Kapiteln gezeigt.

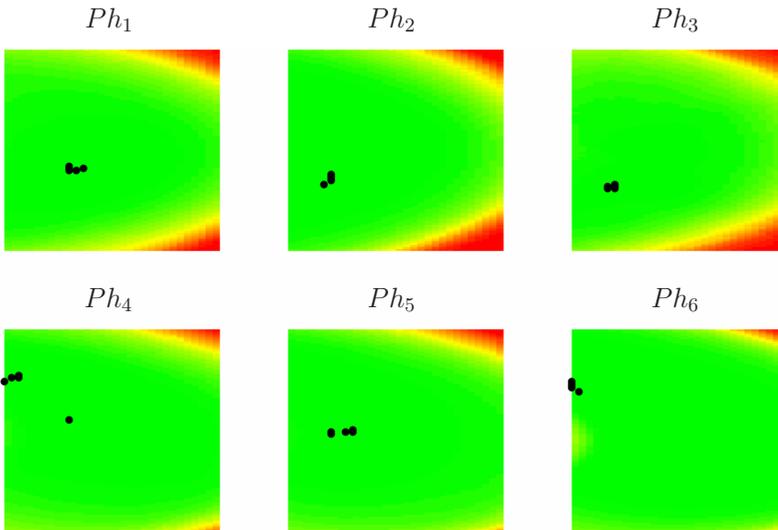


Abbildung B.15: Für alle Phasen wurde der Parametersatz gewählt:
 $r_c = 2, r_a = 0^\circ, ns = 10^\circ$

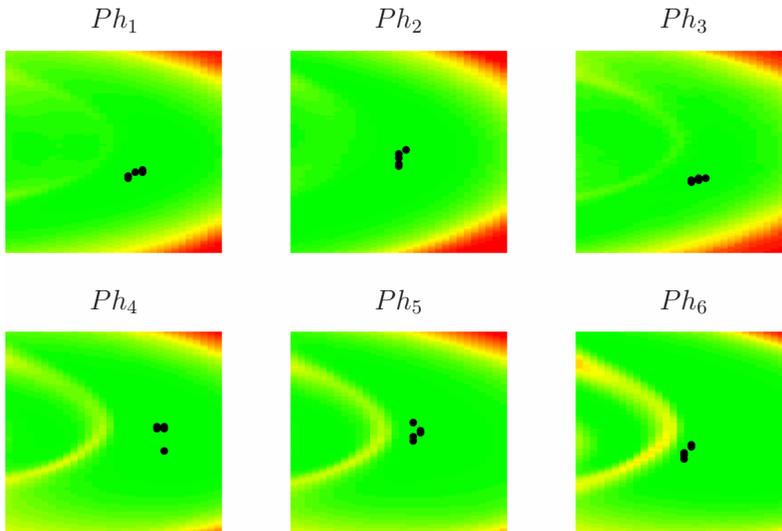


Abbildung B.16: Für alle Phasen wurde der Parametersatz gewählt:
 $r_c = 2, r_a = 0^\circ, ns = -10^\circ$

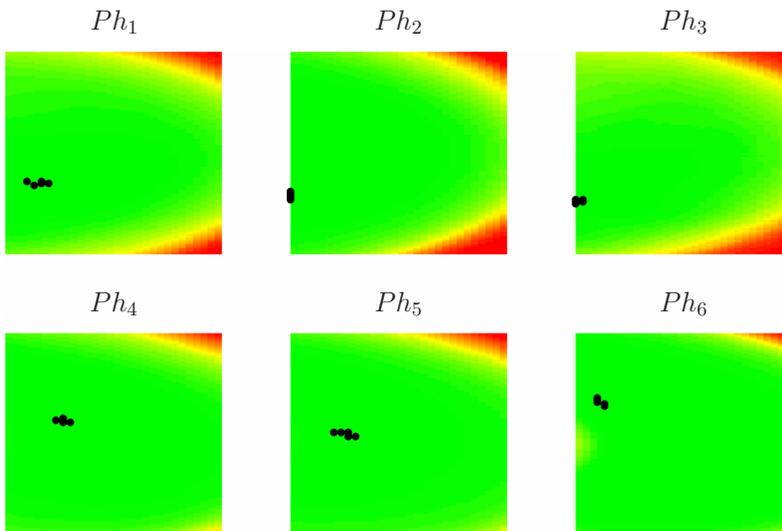


Abbildung B.17: Für alle Phasen wurde der Parametersatz gewählt:
 $r_c = 2, r_a = 0^\circ, ns = 30^\circ$

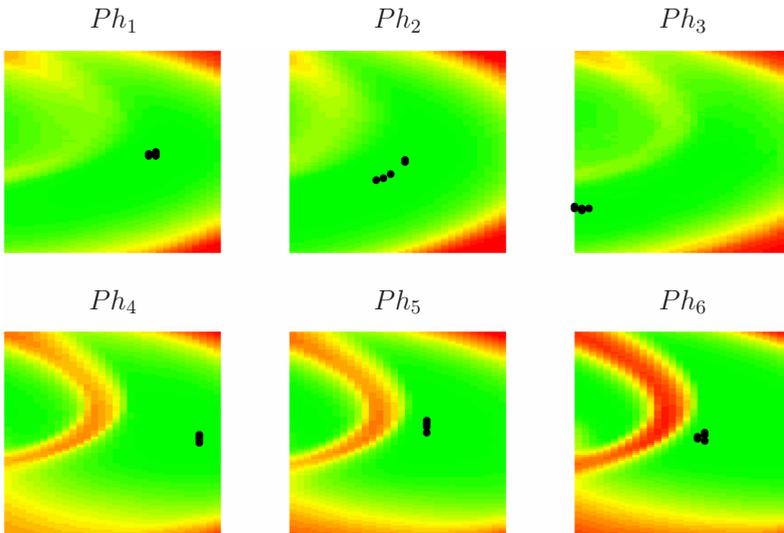


Abbildung B.18: Für alle Phasen wurde der Parametersatz gewählt:
 $r_c = 2$, $r_a = 0^\circ$, $ns = -30^\circ$

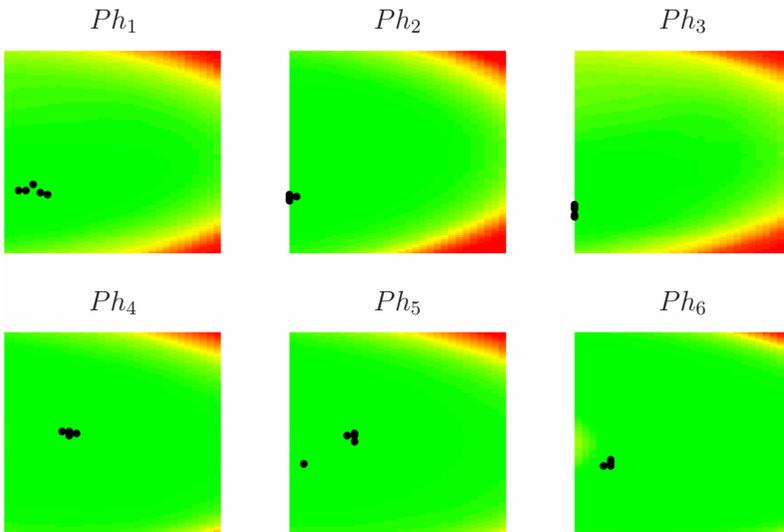


Abbildung B.19: Für alle Phasen wurde der Parametersatz gewählt:
 $r_c = 2$, $r_a = 0^\circ$, $ns = 45^\circ$

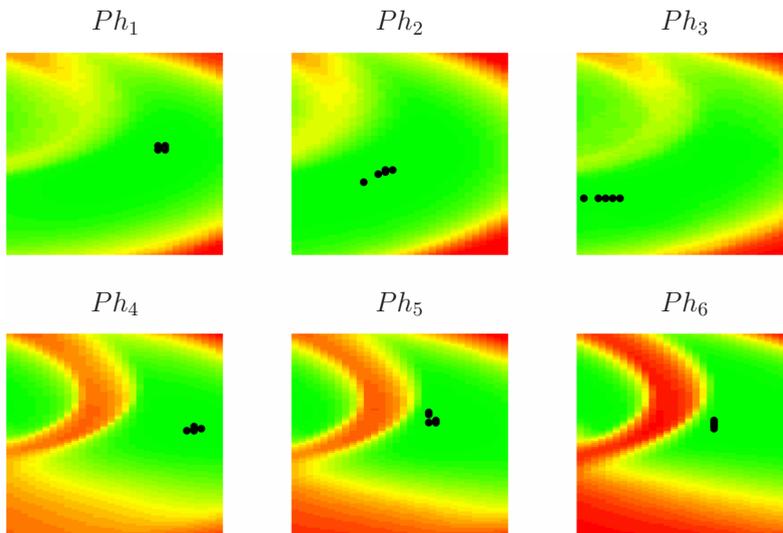


Abbildung B.20: Für alle Phasen wurde der Parametersatz gewählt:
 $r_c = 2$, $r_a = 0^\circ$, $ns = -45^\circ$

B.2.4 Bewertung einzelner Phasen der ersten Versuchsreihe

In Abbildung B.21 werden die bestmöglichen Parametersätze für die jeweilige Phase betrachtet. Der Pivotpunkt befindet an unterschiedlichen Positionen. Dagegen zeigt Abbildung B.22 die Phasen mit dem bestmöglichen Parametersatz laut Tabelle 7.2.

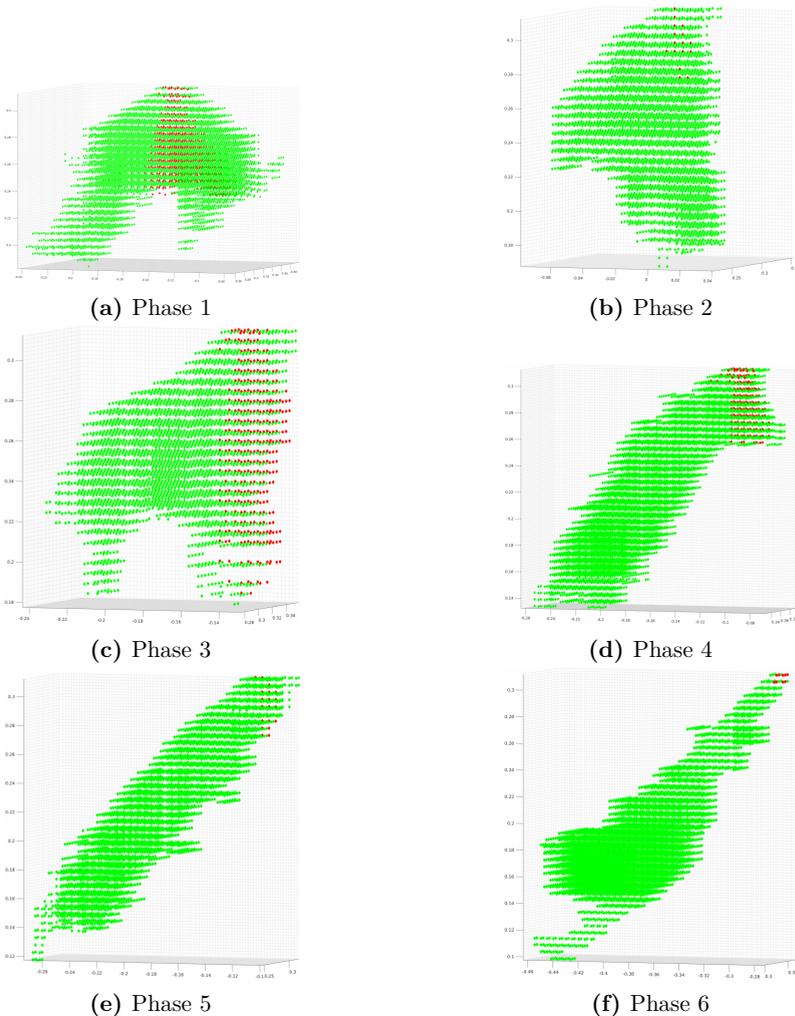


Abbildung B.21: Die bestmöglichen Parametersätze der einzelnen Phasen, vgl. Tab. 7.4

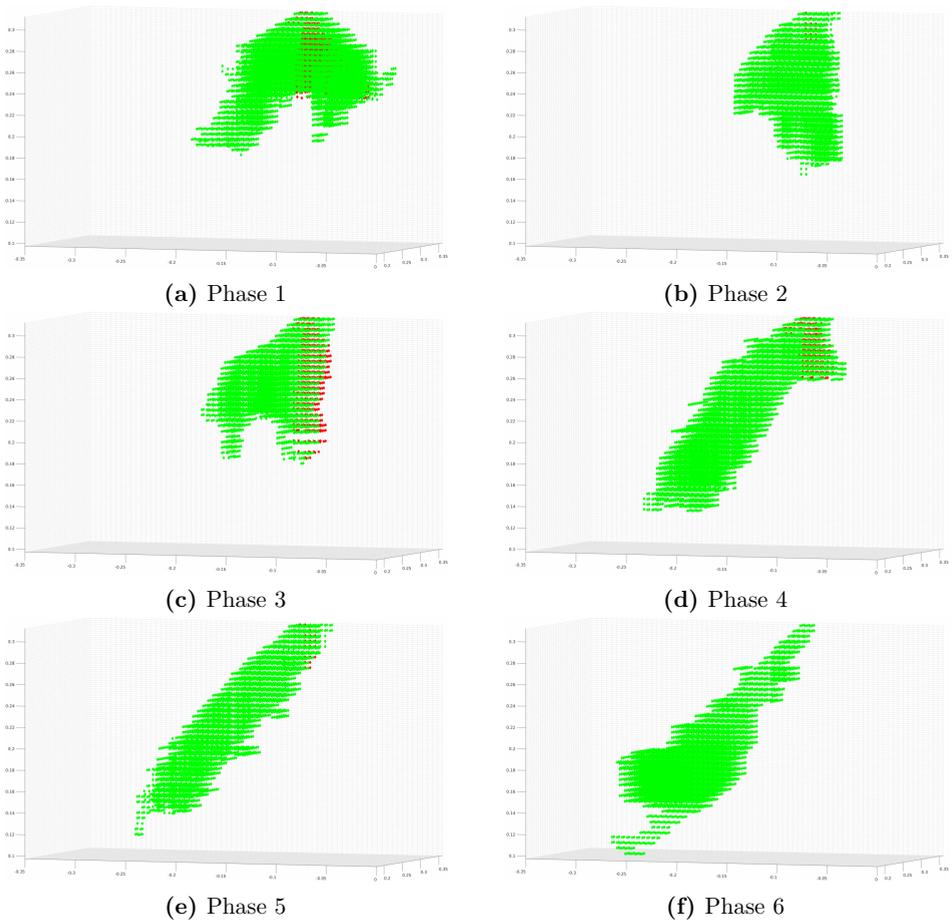
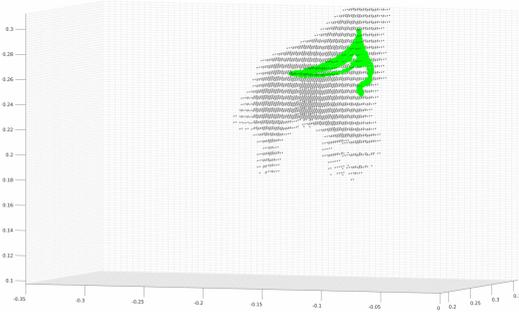


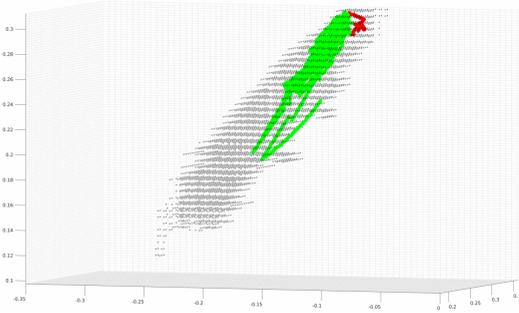
Abbildung B.22: Bestmöglicher Parametersatz mit den phasenspezifischen Punktwolken der ersten Versuchsreihe, vgl. Tab. 7.2

B.2.5 Vergleich der ersten und zweiten Versuchsreihe

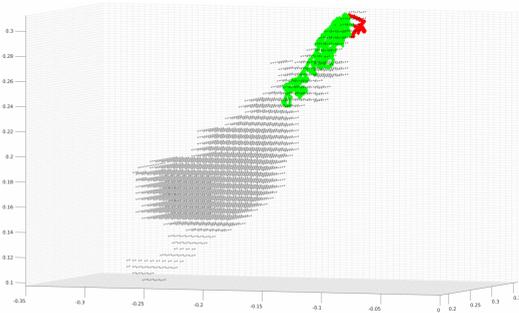
Die Phasen 2 und 4 befindet sich in Abbildung 7.14.



(a) Phase 3



(b) Phase 5



(c) Phase 6

Abbildung B.23: Die Punktwolke stammt aus den Daten der ersten Versuchsreihe und die Trajektorien (5) gehören zur zweiten Versuchsreihe. Die Trajektorien sind farblich auf Basis der Erreichbarkeit dargestellt.

Roboter werden heutzutage nicht nur in Fertigungsstraßen eingesetzt, sondern finden unter anderem auch im Bereich Medizin ihre Aufgabe. Um die Qualität der Roboterbewegung bemessen zu können wird eine Parameteranalyse durchgeführt. Dabei ist das Ziel die Wahl der Parameter eines seriellen, redundanten Roboters zu optimieren. Aus dem minimal-invasiven Szenario in der Chirurgie ergibt sich die Pivotpunkt-Restriktion, wobei der Trokar den Pivotpunkt repräsentiert. Die Roboterperformanz ist abhängig von den gewählten Roboterparametern und dem Operationsgebiet. Durch Indikatoren wird die Roboterperformanz beurteilt. Dazu gehört beispielsweise die Erreichbarkeit des Operationsgebiets. Für unterschiedliche Phasen einer Operation, respektive unterschiedliche Zielregionen, ergeben sich jeweils optimale Roboterparameter, welche am Ende fusioniert werden. Damit ergibt sich für eine gesamte Operation ein passender Parametersatz, welcher für die Durchführung entscheidend ist.



ISBN 978-3-7315-0704-8



9 783731 507048 >

Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier