

Greifplanung basierend auf Objektsymmetrieeigenschaften

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

der Fakultät für Informatik

des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Markus Przybylski

aus Freudenstadt

Tag der mündlichen Prüfung:	10. Juli 2013
Erster Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Dillmann
Zweiter Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Heinz Wörn

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Anthropomatik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Allen voran möchte ich meinem Doktorvater Prof. Dr. Rüdiger Dillmann für seine Unterstützung, das mir entgegengebrachte Vertrauen sowie seine fachlichen Anregungen herzlich danken. Ebenso danke ich Prof. Dr. Heinz Wörn für die Übernahme des Korreferats und das der Arbeit entgegengebrachte Interesse. Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Tamim Asfour, dem Leiter der Forschungsgruppe Humanoide Roboter, für seine engagierte Unterstützung, seinen unermüdlichen Einsatz und das Vertrauen in meine Arbeit.

Bei allen Kollegen möchte ich mich herzlich für die gute Atmosphäre am Institut, die gute Zusammenarbeit und die stete Hilfsbereitschaft bedanken.

Insbesondere möchte ich mich bei meinem Bürokollegen und Freund David Gonzalez bedanken, für zweieinhalb unvergessliche Jahre im gemeinsamen Büro, viele gemeinsame Abende und Gespräche, seine moralische Unterstützung und seine andere Perspektive zu vielen Dingen. Das alles habe ich immer als Bereicherung empfunden.

Großen Dank schulde ich Dr. Kai Welke, meinem Diplomarbeitsbetreuer, Kollegen und langjährigen Mentor, für seine Unterstützung bei Problemen mit ARMAR, Programmier- und Linuxproblemen jedweder Art, seine geradezu unerschöpfliche Erfahrung, seine Gelassenheit, seine moralische Unterstützung sowie seine unendliche Geduld und Hilfsbereitschaft. Bei Martin Do möchte ich mich für die Unterstützung bei vielen Problemen mit ARMAR bedanken, für seine Geduld, seine Ruhe und Gelassenheit, sowie seine immerwährende Hilfsbereitschaft. Dr. Niko Vahrenkamp gebührt mein Dank vor allem für die Unterstützung bei vielen Fragen zum Visual Servoing, zu Virtual Robot und zu ARMAR allgemein.

Bei Dr. Pedram Azad möchte ich mich für seine Unterstützung bei allen Fragen zu ARMARs Vision-System und zur Objekterkennung sowie für die Zusammenarbeit bei der Vorlesung Kognitive Systeme bedanken.

Julian Schill und Paul Holz gilt mein Dank für die Hilfe bei allen Hardware-Problemen im Zusammenhang mit ARMAR, insbesondere bei der Ansteuerung und Sensorik der Roboterhände. Ähnliches gilt für meinen ehemaligen Kollegen und Bürokollegen Christian Böge, dem auch mein Dank für die Zusammenarbeit bei Demos und für viele Gespräche gilt.

Bei Manfred Kröhnert und Mirko Wächter möchte ich mich für gut zweieinhalb Jahre gemeinsamer Bürozeit bedanken, bei Mirko außerdem für seine engagierte Unterstützung beim Einlernen neuer Testobjekte in ARMARs Objekterkennungssystem.

Bei David Schiebener möchte ich mich vor allem für die Unterstützung bei der Vorlesung Kognitive Systeme bedanken, durch die er mich gegen Ende meiner Promotion sehr entlastet hat, sowie für das Korrekturlesen der vorliegenden Ausarbeitung und einen unvergesslichen gemeinsamen Aufenthalt in Japan. Ihm und Manfred danke ich auch für die vielen gemeinsamen Abende auf dem Parkett des AKK.

Ebenso möchte ich mich bei den weiteren Mitgliedern unserer Forschungsgruppe bedanken, Stefan Ulbrich, Ömer Terlemez und Sebastian Schulz, sowie bei den ehemaligen Kollegen Dr. Alexander Bierbaum, Steven Wieland und Stefan Gärtner.

Bei Dr. Alexander Kasper möchte ich mich für die wiederholte Unterstützung beim Einscannen neuer Testobjekte bedanken. Dr. Martin Lösch gilt mein Dank für Hilfe im Rahmen seiner Admintätigkeit.

Ebenso möchte ich bei den weiteren Mitgliedern der PdV-Gruppe, der Medizingruppe und der Gruppe Kognitive Automobile bedanken.

Auch bei Christine Brand, Isabell Wappler und Diana Kreidler bedanke ich mich für die Unterstützung und Zusammenarbeit.

Weiterhin möchte ich mich bei allen Studenten bedanken, mit denen ich zusammengearbeitet habe. Daniel Kappler möchte ich vor allem für seine technische Unterstützung bei vielen Fragen im Zusammenhang mit OpenRAVE danken. Ebenfalls möchte ich mich bei Can Yumusak für seinen Einsatz bedanken.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern und meiner Schwester für ihre bedingungslose Unterstützung in jeder Hinsicht.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	iii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielsetzung	2
1.2 Beiträge dieser Arbeit	3
2 Stand der Forschung	7
2.1 Begriffe und Grundlagen	7
2.1.1 Das Problem der Greifplanung	7
2.1.2 Dimensionalität der Greifplanung, mögliche zusätzliche Randbedingungen und die Folgen	8
2.1.3 Grifftaxonomien – Wie greift der Mensch?	10
2.2 Abgrenzung	13
2.2.1 Greifen auf Kontaktebene	13
2.2.2 Griffsynthese	14
2.2.3 Unbekannte Objekte	14
2.2.4 Ansätze jenseits der Planung und nachgelagerte Frage- stellungen	15
2.3 Systematik	15
2.4 Eigengriffe – Dimensionsreduktion durch Handsynergien	16
2.5 Greifplanung durch Formvergleich	17
2.5.1 Grundidee	17

2.5.2	Verfahren im Einzelnen	18
2.6	Teilebasiertes Greifen	21
2.6.1	Grundidee	21
2.6.2	Verfahren im Einzelnen	23
2.7	Zusammenfassung und Bewertung der Ansätze	26
2.7.1	Fortschritt über den Stand der Forschung hinaus	28
3	Das Gitter medialer Kugeln – eine Objektrepräsentation für die Greifplanung	31
3.1	Die Bedeutung der Objektgeometrie für die Greifplanung	31
3.2	Die Mediale-Achse-Transformation	33
3.2.1	Die Mediale-Achse-Transformation nach [Blum 67]	33
3.2.2	Berechnung und Stabilität der Mediale-Achse-Transformation	37
3.3	Zusammenhang zwischen Mediale-Achse-Transformation und Greifplanung	40
3.3.1	Greifplanung als Problem von Objektsymmetrieeigenschaften und lokaler Dicke	40
3.3.2	Reduktion des Greifens auf das Greifen einzelner medialer Kugeln	42
3.3.3	Die Rolle der Datenstruktur	42
3.4	Das Gitter medialer Kugeln	42
3.4.1	Aufbau und Dimensionierung des Gitters	44
3.4.2	Einsortieren der Kugeln in das Gitter	46
3.4.3	Nachbarschaftszugriff	47
3.5	Zusammenfassung	49
4	Greifplanung auf dem Gitter medialer Kugeln	51
4.1	Grundidee und Überblick	51
4.2	Auswahl relevanter Kugeln für die Greifplanung	52

4.2.1	Mechanische Betrachtungen zum Objektwinkel	53
4.2.2	Geometrische Betrachtungen zum Objektwinkel	58
4.2.3	Eine untere Schranke für den Objektwinkel	58
4.2.4	Die Rolle des Kugelradius	60
4.3	Analyse lokaler Objektsymmetrieeigenschaften	62
4.4	Erzeugung von Griffkandidaten	66
4.4.1	Mediale Kugeln auf einer lokalen Symmetrieachse	68
4.4.2	Mediale Kugeln auf dem Rand einer lokalen Symmetrie- ebene	69
4.4.3	Mediale Kugeln im Inneren einer lokalen Symmetrieebene	72
4.4.4	Sonderfälle	72
4.4.5	Ergebnisse der Griffkandidaten-Erzeugung	74
4.5	Das Testen von Griffkandidaten	74
4.6	Die Berechnung von Kraftgriffen	76
4.6.1	Bestimmung der Handpose	77
4.6.2	Das Schließen der Hand	80
4.7	Die Berechnung von Präzisionsgriffen	82
4.7.1	Vorformung und Startpose der Hand	85
4.7.2	Verfeinerung von Handpose und -konfiguration	88
4.8	Zusammenfassung	92
5	Experimente und Ergebnisse	93
5.1	Simulationsexperimente	93
5.1.1	Implementierung	93
5.1.2	Handmodell und Testobjekte	94
5.1.3	Parameterwahl	94
5.1.4	Experiment 1: Kraftgriffe auf großen Objekten	96
5.1.5	Experiment 2: Kraftgriffe auf handgroßen Objekten	98
5.1.6	Experiment 3: Präzisionsgriffe	104

5.1.7	Rechenzeiten	106
5.2	Greifexperimente auf dem humanoiden Roboter ARMAR-IIIb . . .	109
5.2.1	Griffausführung auf ARMAR-IIIb	109
5.2.2	Experimente	110
5.3	Zusammenfassung	113
6	Weitere Untersuchungen und Anwendungen	115
6.1	Zweihändige Greifplanung	115
6.1.1	Einleitende Betrachtungen	115
6.1.2	Grundidee	116
6.1.3	Das Finden von Griffkandidaten für den ersten Endeffektor	118
6.1.4	Das Finden von Griffkandidaten für den zweiten Endeffektor	119
6.1.5	Griffqualität	121
6.1.6	Maximierung der Manipulabilität	121
6.1.7	Manipulabilitäts-Cluster	122
6.1.8	Ergebnisse	125
6.1.9	Bewertung	127
6.2	Griffauswahl anhand menschlicher Griffdaten	128
6.2.1	Grundidee	129
6.2.2	Akquise menschlicher Griffdaten	129
6.2.3	Ähnlichkeit zwischen menschlichen und geplanten Griffen	130
6.2.4	Experimentelle Evaluation auf dem humanoiden Roboter ARMAR-III	131
6.2.5	Diskussion	134
6.3	Zusammenfassung	139

7	Zusammenfassung und Ausblick	141
7.1	Wissenschaftliche Beiträge der Arbeit	141
7.2	Ausblick	144
7.2.1	Weitere Griffe aus den Taxonomien	145
7.2.2	Dynamiksimulation	145
7.2.3	Unbekannte Objekte	145
7.3	Schlussbetrachtung	146
7.3.1	Das Ergebnis	146
7.3.2	... und wie es zu der Idee kam	147
A	Softwarekomponenten und Systemaspekte	151
	Abbildungsverzeichnis	155
	Tabellenverzeichnis	165
	Literatur	167

Kapitel 1

Einleitung

Roboter werden seit Jahrzehnten in der industriellen Fertigung eingesetzt, wo sie die hocheffiziente Produktion von Gütern ermöglichen. Kennzeichnend für diesen Einsatz der Roboter sind hochstrukturierte Umgebungen und genau spezifizierte Aufgabenstellungen sowie hohe Anforderungen an Geschwindigkeit, Präzision, Wiederholgenauigkeit und Kraft der Roboter.

Seit einiger Zeit befasst sich die Forschung mit der Entwicklung von Service-Robotern, die Menschen zukünftig auch außerhalb der bisherigen Fabrikumgebungen in vielfältiger Weise unterstützen sollen. Denkbare Einsatzszenarien für solche Systeme liegen unter anderem im Gesundheitswesen oder in privaten Haushalten, wo sie beispielsweise älteren Menschen länger ein selbstbestimmtes Leben zuhause ermöglichen könnten, indem sie ihnen einfache Arbeiten, wie z.B. Hol- und Bringdienste, abnehmen. Weitere Möglichkeiten liegen im Einsatz bei Kooperationsaufgaben zusammen mit dem Menschen, beispielsweise dem gemeinsamen Tragen und Manipulieren großer oder schwerer Gegenstände, etwa bei Montagearbeiten. Auch Katastrophenszenarien wie havarierte Atomkraftwerke oder Bergungsarbeiten in eingestürzten Gebäuden bieten Anreize für die Entwicklung solcher Roboter. Die gemeinsame Grundidee solcher Szenarien besteht darin, dem Menschen körperlich anstrengende, eintönige oder gefährliche Arbeiten abzunehmen.

Stetige Fortschritte im Hardware-Bereich haben zu humanoiden Systemen wie ARMAR-III [Asfour 06] geführt, die in ihrer Gestalt dem Menschen nachempfunden sind und aus Sicht der Aktorik bereits heute in der Lage sind, unterstützende Tätigkeiten auszuüben. Dieser Entwicklung auf der technischen Seite steht jedoch eine Reihe kognitiver Probleme gegenüber, die algorithmisch gelöst wer-

den müssen, bevor der Einsatz von Service-Robotern in Szenarien wie den oben beschriebenen Realität werden kann.

1.1 Motivation und Zielsetzung

Grundlage und Voraussetzung für die Bewältigung vieler der eingangs angeführten Aufgaben ist die Fähigkeit, Objekte zu greifen. Während Menschen das Greifen bereits in ihrer frühen Kindheit lernen, stellt es für Roboter ein hochdimensionales Problem dar, in das unter anderem Form und Größe des Objektes, aufzubringende Kräfte und Bewegungsfreiheitsgrade der Hände einfließen.

Das Greifen bei Industrierobotern ist gekennzeichnet durch eine begrenzte Anzahl vorgegebener Objekte, die oft in vordefinierten Posen vorliegen und für die mittels menschlicher Erfahrung manuell Griffe definiert werden. Als Endeffektoren kommen hier oft Parallelbackengreifer mit teilweise objektspezifisch angepasster Form der Greiferbacken zum Einsatz.

Dem stehen im Fall von Service-Robotern beliebig viele in Form und Größe verschiedene Objekte gegenüber, die in beliebigen Posen angetroffen werden können, und mit komplexeren, teilweise der menschlichen Hand nachempfundenen Endeffektoren gegriffen werden sollen. Die beliebigen Posen führen dazu, dass manche denkbare Griffe nicht ausführbar sind, weil sie für den Roboter kinematisch nicht erreichbar oder durch Hindernisse in der Umgebung verdeckt sind. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, für jedes Objekt viele verschiedene Griffe zu erzeugen. Es ist jedoch unmöglich, für alle denkbaren Objekte manuell eine Menge von Griffen zu definieren. Hier besteht ein Ausweg in der Verwendung automatischer Greifplanungsverfahren, die auf der Basis einer geometrischen Beschreibung des Objektes und einer geometrischen und kinematischen Beschreibung der Hand große Mengen von Griffen erzeugen können.

Vielen bisher bekannten Greifplanungsverfahren ist gemeinsam, dass sie Schwierigkeiten haben, mit der Form der Objekte umzugehen. Dies führt in manchen Fällen dazu, dass nach dem Brute-Force-Prinzip sehr viele Griffkandidaten getestet werden müssen und nur eine verhältnismäßig geringe Ausbeute an sogenannten Kraftschlussgriffen, d.h. Griffen, die extern einwirkenden Kräften und Momenten widerstehen können, erzielt wird. In anderen Fällen werden hingegen viele intuitiv sinnvoll erscheinende Griffkandidaten frühzeitig aus dem Suchraum entfernt, weil die verwendeten Methoden die Objektgeometrie nur ungenau approximieren können, was ebenfalls zu einer niedrigen Ausbeute an Kraftschlussgriffen führt.

In der Forschung auf dem Gebiet der Greifplanung hat sich in der vergangenen Dekade zeitweise die Meinung durchgesetzt, dass die Auswertung der Objektgeometrie ein zu schwieriges Problem darstelle, und dass man Griffe eher durch das Testen möglichst vieler nahezu zufällig generierter Griffkandidaten planen sollte. An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an.

Zielsetzung dieser Arbeit ist die Extraktion wesentlicher für das Greifen wichtiger geometrischer Eigenschaften aus der Form von Objekten, um mit deren Hilfe das Problem der Greifplanung leichter lösen zu können.

Hierbei soll das exzessive Testen von Griffkandidaten nach dem Brute-Force-Prinzip vermieden werden. Stattdessen sollen durch eine Analyse der Objektgeometrie möglichst hochwertige Griffkandidaten erzeugt werden, um eine hohe Ausbeute an Kraftschlussgriffen unter diesen Griffkandidaten zu erzielen. In diesem Rahmen werden Methoden zur Planung von Kraft- und Präzisionsgriffen für nahezu beliebig geformte Objekte für Roboterhände mit mindestens zwei opponierbaren virtuellen Fingern entwickelt.

1.2 Beiträge dieser Arbeit

Im Einzelnen werden in der Arbeit folgende Problemstellungen untersucht:

- Planung von Kraftgriffen
- Planung von Präzisionsgriffen
- Planung zweihändiger Griffe
- Bewertung und Auswahl geplanter Griffe nach ihrer Menschenähnlichkeit

Im Folgenden werden die Beiträge dieser Arbeit kurz beschrieben. Die beiden Hauptbeiträge sind:

- **Das Gitter medialer Kugeln – eine Objektrepräsentation für die Greifplanung.** Für die Greifplanung ist es vorteilhaft, wenn die für die Objektgeometrie verwendete Repräsentation für das Greifen wichtige Informationen direkt zur Verfügung stellt. In Kapitel 3 wird das *Gitter medialer Kugeln* vorgestellt, eine Objektrepräsentation basierend auf der Mediale-Achse-Transformation (MAT). Die MAT ist ein vollständiger Formdeskriptor (engl.: shape descriptor), der Objekte durch das Einbeschreiben von Kugeln maximaler Größe beschreibt und die Objektgeometrie mit beliebiger

Genauigkeit darstellen kann. Das Gitter medialer Kugeln ermöglicht den effizienten Zugriff auf lokale Teile der Objektgeometrie sowie die einfache Extraktion wichtiger Griffparameter wie Anrückpunkt, Anrückrichtung, Orientierungsvektor und Vorformung der Hand aus der MAT. Durch die Kugelradien ist außerdem eine Einschätzung der lokalen Dicke an jeder Stelle des Objektes möglich, welche für die Greifbarkeit mit einer gegebenen Roboterhand entscheidend ist.

- **Ein Greifplanungsalgorithmus basierend auf lokalen Objektsymmetrieeigenschaften.** Im Hinblick auf die Ausführbarkeit von Griffen auf humanoiden Robotern sind Greifplanungsverfahren sinnvoll, welche Objekte zunächst in einfachere Teile zerlegen, für diese Teile dann Griffkandidaten erzeugen und diese ähnlich zum realen Greifvorgang in zeitlicher Vorwärtsrichtung simulieren. In Kapitel 4 wird zunächst ein Zusammenhang zwischen den Eigenschaften greifbarer medialer Kugeln und einer für den Kraftschluss notwendigen Bedingung hergeleitet. Darauf aufbauend wird ein im Bereich des Teilebasierten Greifens angesiedelter und auf dem Oppositionsprinzip basierender Greifplanungsalgorithmus entwickelt, der geometrisch sinnvolle Griffkandidaten mittels Hauptkomponentenanalyse aus dem Gitter medialer Kugeln extrahiert und daraus wahlweise Kraft- oder Präzisionsgriffe berechnet. In Kapitel 5 wird der Greifplanungsalgorithmus auf einer Vielzahl von Testobjekten gegen ein etabliertes auf Oberflächennormalen basierendes Greifplanungsverfahren evaluiert. Ferner werden resultierende Griffe auf dem humanoiden Roboter ARMAR-III ausgeführt.

Unter Verwendung der oben beschriebenen Objektrepräsentation und des darauf basierenden Greifplanungsalgorithmus werden zusätzliche Untersuchungen durchgeführt, die zu folgenden weiteren Beiträgen führen:

- **Ein Algorithmus zur Planung zweihändiger Griffe basierend auf der Kombination einhändiger Griffkandidaten.** Ein bislang in der Forschung wenig betrachtetes Problem ist die Planung zweihändiger Griffe. In Kapitel 6 wird ein Verfahren vorgestellt, welches durch den in Kapitel 4 beschriebenen Greifplaner erzeugte Griffkandidaten verwendet, um zweihändige Griffkonfigurationen zu generieren. Hierfür wird die kinematische Struktur von ARMAR-III in ein Teilsystem für Arme und Hände und ein Teilsystem für Torso und Plattform zerlegt. Für die gefundenen zweihändigen Griffkonfigurationen wird zusätzlich eine lokale Optimierung der Manipulabilität durchgeführt, um die Beweglichkeit des Roboters nach dem Greifen des Objektes zu verbessern.

- **Ein Verfahren zur Griffauswahl anhand menschlicher Griffdaten.** Das Ergebnis der Greifplanung ist oft eine Vielzahl von Griffen, aus denen für die Ausführung auf dem Roboter ausgewählt werden kann. In Kapitel 6 wird untersucht, wie menschliche Griffdaten ausgewertet werden können, um dem Roboter die automatische Auswahl eines möglichst menschenähnlichen Griffes zu ermöglichen. Die Auswahl und Ausführung dieser Griffe wird auf dem humanoiden Roboter ARMAR-III gezeigt.

Kapitel 2

Stand der Forschung

In diesem Kapitel wird ein Überblick über verwandte Arbeiten gegeben, soweit diese im engeren oder weiteren Sinne für die vorliegende Arbeit von Interesse sind. Zunächst werden in Abschnitt 2.1 das Problem der Greifplanung definiert, Aussagen über seine Dimensionalität gemacht und Untersuchungen am menschlichen Vorbild betrachtet. In Abschnitt 2.2 wird eine Abgrenzung zu weitläufig verwandten, aber für die vorliegende Arbeit weniger interessanten Teilgebieten und Fragestellungen vorgenommen, bevor in den Abschnitten 2.3 bis 2.6 auf die für diese Arbeit in besonderem Maße relevanten simulationsbasierten Ansätze der Greifplanung eingegangen wird. Abschnitt 2.7 fasst Unterschiede, Gemeinsamkeiten, Vor- und Nachteile dieser simulationsbasierten Ansätze zusammen und ordnet die vorliegende Arbeit in den Kontext dieser Ansätze ein.

2.1 Begriffe und Grundlagen

2.1.1 Das Problem der Greifplanung

Das Problem der Greifplanung besteht darin, für eine gegebene Roboterhand und ein gegebenes Objekt solche Handposen und -konfigurationen zu finden, dass die daraus resultierenden Griffe extern einwirkenden Kräften auf das Objekt widerstehen.

2.1.2 Dimensionalität der Greifplanung, mögliche zusätzliche Randbedingungen und die Folgen

Der Raum möglicher Handposen und -konfigurationen, die hohe Anzahl der Bewegungsfreiheitsgrade moderner Roboterhände sowie die Form des Objektes definieren die Greifplanung als ein hochdimensionales Suchproblem mit möglichen zusätzlichen Randbedingungen.

Die Handpose relativ zum Objekt ist durch die sechs Freiheitsgrade des kartesischen Raums bestimmt: drei translatorische und drei rotatorische. Je nach betrachtetem Handmodell variiert die Anzahl der Bewegungsfreiheitsgrade (engl.: Degrees of Freedom (DoF)), die durch die in der Hand vorhandenen Gelenke bestimmt ist. Der einfachste Fall, ein Parallelbackengreifer, besitzt nur einen einzigen Freiheitsgrad. Modelle der menschlichen Hand hingegen – um ein extremes Beispiel zu nennen – werden üblicherweise mit mehr als 20 Bewegungsfreiheitsgraden modelliert. Heute in der Forschung übliche Roboterhände sind in ihrer mechanischen Komplexität zwischen diesen beiden Grenzen angesiedelt.

Im Falle einer Roboterhand mit n Bewegungsfreiheitsgraden stellt die Greifplanung somit ein $(n + 6)$ -dimensionales Suchproblem dar.

Je nach Anwendungsgebiet können zusätzlich zur Minimalforderung nach Kraftschluss [Reuleaux 76] des Griffes weitere Fragestellungen und Randbedingungen von Bedeutung sein:

1. *Ausregelung eines Griffes*: Wieviel Kraft soll auf das Objekt ausgeübt werden? Ein rohes Ei muss anders gegriffen werden als beispielsweise eine Kaffeetasse.
2. *Manipulabilität*: Je nach Handkonfiguration bei einem Griff ist eine Manipulation des gegriffenen Objektes in der Hand in größerem oder geringerem Maße möglich.
3. *Natürlichkeit*: Als zusätzliche Kriterium kann gefordert werden, dass ein Griff von einem menschlichen Beobachter als natürlich, intuitiv oder menschenähnlich wahrgenommen wird.
4. *Aufgaben-Spezifität*: Welcher Griff für ein Objekt sinnvoll ist, hängt u.U. davon ab, welche Aktionen nach dem Greifen mit dem Objekt durchgeführt werden sollen.

5. *Kinematische Erreichbarkeit*: Die Handpose und -konfiguration eines Griffes muss für den Roboter im Rahmen der Einschränkungen durch die Roboterkinematik erreichbar sein. Dieses Problem kann durch zusätzliche Hindernisse in der unmittelbaren Umgebung des zu greifenden Objektes weiter verschärft werden.

Punkt 1 und 2 in der obigen Aufzählung sind stark vom Objekt und der verwendeten Roboterhand abhängig und können direkt während der Greifplanung berücksichtigt werden. In der aktuellen Forschung treten sie jedoch oft in den Hintergrund oder werden gesondert betrachtet.

Die Natürlichkeit in Punkt 3 kann während der Greifplanung berücksichtigt oder danach bewertet werden. Sie ist aus Gründen der Akzeptanz von Bedeutung für humanoide Roboter in menschenzentrierten Umgebungen, sowie für die realistische Animation des Greifens.

Punkt 4 unterscheidet sich von Punkt 2 insofern, als bei der Aufgaben-Spezifität im Vergleich zur Manipulabilität Fragestellungen auf höherem Abstraktionsniveau betrachtet werden, so etwa die Frage, in welchem Maße ein gegriffenes Objekt durch den Griff verdeckt wird, wenn das Objekt einer Person gezeigt werden soll, oder die Wahl unterschiedlicher Griffe für eine Tasse, abhängig davon, ob sie in die Spülmaschine gestellt oder daraus getrunken werden soll.

Punkt 5 ist für die tatsächliche Ausführbarkeit von Griffen durch reale Roboter von großer Bedeutung und kann bei der Greifplanung berücksichtigt werden, wird aber wegen des typischerweise hohen Aufwandes für die Greifplanung oft getrennt davon betrachtet.

Insgesamt beschreiben die Punkte 4 und 5 Fragestellungen, die der eigentlichen Greifplanung im Sinne der Definition im vorigen Abschnitt eher nachgelagert sind.

Selbst bei Beschränkung auf die Minimalforderung nach Kraftschluss [Reuleaux 76] ist das Problem der Greifplanung allgemein trotz jahrzehntelanger Forschung mit heutigen Methoden nach wie vor nicht analytisch lösbar. Bedingt durch diese Komplexität konzentrieren sich die meisten Forschungsarbeiten auf Teilaspekte des Problems und machen vereinfachende Annahmen bezüglich der nicht betrachteten Aspekte.

2.1.3 Grifftaxonomien – Wie greift der Mensch?

Der vermutlich älteste Forschungszeitung im Bereich des Greifens befasst sich mit Beobachtungen am Menschen. Im Mittelpunkt des Interesses steht hier die Katalogisierung der vom Menschen verwendeten Griffe, ihre Gruppierung und Klassifizierung in Ordnungsschemata und Taxonomien. Obwohl es in diesem Bereich noch nicht direkt um das Planen von Griffen geht, ist er dennoch bedeutsam, da er wesentlich zur Entwicklung der noch heute verwendeten Begriffe beigetragen sowie Ideen und Konzepte geliefert hat, die von der Greifplanung aufgegriffen wurden. Daher soll an dieser Stelle eine Übersicht über wichtige Arbeiten gegeben werden.

Frühe Arbeiten

Frühe Arbeiten sind vor allem im medizinischen Bereich zu finden und gehen zurück bis in die Zeit nach dem Ersten Weltkrieg, als man sich mit Prothesen für Kriegsversehrte beschäftigte [Schlesinger 19]. Eine frühe Zusammenfassung wesentlicher verschiedener Griffmuster (engl.: prehension patterns) gemäß der ungefähren Form der zu greifenden Objekte in die Griffotypen *Zylindrisch*, *Fingerspitzen*, *Haken*, *Palmar*, *Sphärisch*, *Lateral* findet sich in [Taylor 55].

Kraft- und Präzisionsgriffe

Napier [Napier 56] führte die noch heute verwendete Unterscheidung in *Kraft-* und *Präzisionsgriffe* ein. Hierbei bezeichnen Kraftgriffe solche Griffe, bei denen die Maximierung der Kontaktfläche zwischen Hand und Objekt im Mittelpunkt steht, um Kraft auf das Objekt ausüben zu können. Die Handfläche ist hierbei wesentlich an der Stabilisierung des Griffes beteiligt. Bei Präzisionsgriffen hingegen haben nur die Fingerspitzen Kontakt mit dem Objekt. Hier steht das Ermöglichen der Manipulation des gegriffenen Objektes innerhalb der Hand im Vordergrund.

Eine Grifftaxonomie für Montgearbeiten

Cutkosky ([Cutkosky 86],[Cutkosky 89]) beobachtete Mechaniker bei der Arbeit mit unterschiedlichen Werkzeugen, was zu einer Klassifikation typischer in Montgearbeiten vorkommender Griffe führte. Die resultierende Taxonomie behält die

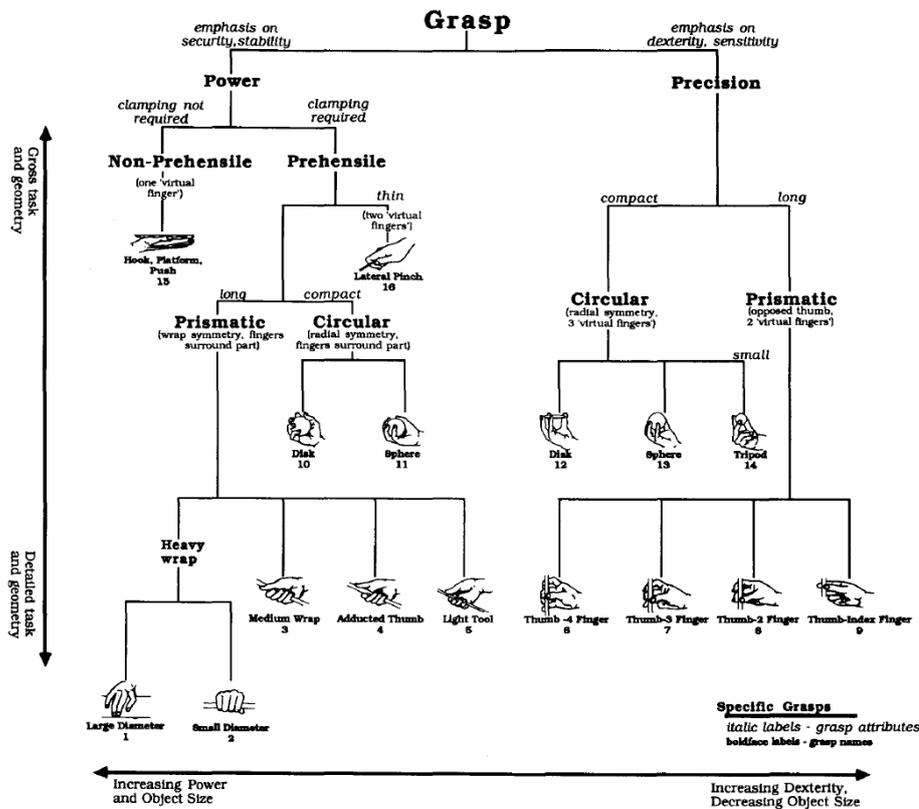


Abbildung 2.1: Die Griff-taxonomie von Cutkosky. Nachdruck aus [Cutkosky 89], ©1989 IEEE.

Unterscheidung von Kraft- und Präzisionsgriffen bei, verfeinert aber die Kategorisierung. Kraftgriffe werden nun weiter unterteilt in ergreifende (engl.: prehensile) und nicht-ergreifende (engl. non-prehensile) Griffe. Weiterhin werden sowohl Kraft- als auch Präzisionsgriffe anhand der ungefähren Objektform weiter unterteilt in prismatische und sphärische Griffe, nach der Anzahl der beteiligten Finger sowie der Rolle des Daumens. Zusätzlich werden die Griffe nach der Detailliertheit der Anforderungen der jeweils mit dem Objekt auszuführenden Aufgabe und nach der Objektform angeordnet. Eine Einschränkung besteht darin, dass viele alltägliche Griffe, z.B. Griffe zum Schreiben mit einem Stift, in dieser Taxonomie nicht enthalten sind.

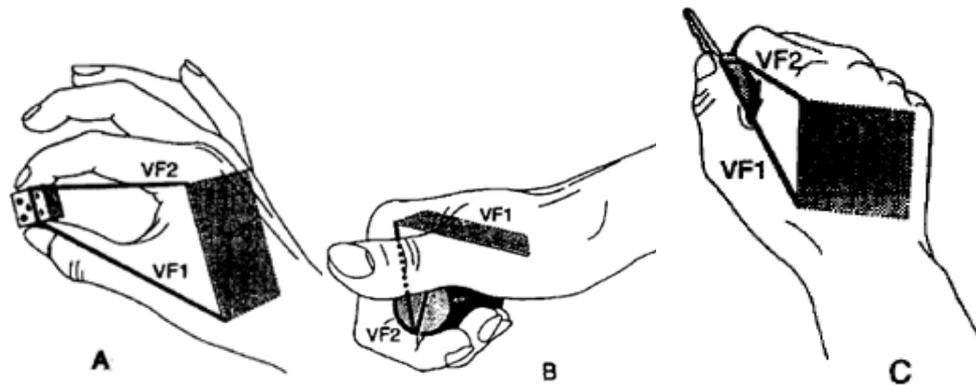


Abbildung 2.2: Verschiedene Oppositionstypen: pad opposition (links), palm opposition (Mitte) und side opposition (rechts). Nachdruck aus [Iberall 97], ©1997 IJRR/Sagepub

Eine anwendungsneutrale Griff-taxonomie

Im Gegensatz zu Cutkosky stellte Kamakura ([Kamakura 80], [Kamakura 89]) eine Taxonomie auf, die keine Einschränkungen bezüglich des Anwendungsgebiets der Griffe oder der gegriffenen Objekte aufweist. Die von ihm vorgeschlagene Taxonomie unterscheidet 14 Griffmuster, die in vier Kategorien aufgeteilt werden. Zwei bereits bekannte Klassen sind der Kraftgriff und der Präzisionsgriff. Hinzu kommen eine Zwischenform (intermediate grip) und der daumenlose Griff (engl.: grip involving no thumb). Bei der Untersuchung wurden, indem vor dem Greifen auf die Testobjekte Farbe aufgetragen wurde, auch die Flächen auf der Hand bestimmt, die während des jeweiligen Griffs mit dem Objekt in Kontakt waren.

Virtuelle Finger und das Oppositionsprinzip

Iberall ([Iberall 86],[Iberall 97]) führte das Konzept der virtuellen Finger (engl.: virtual fingers) und des Oppositionsraums (engl.: opposition space) ein. Die Grundidee hierbei besteht darin, dass ein Griff realisiert wird, indem ein Objekt zwischen zwei virtuellen Fingern eingeklemmt wird, die in entgegengesetzter Richtung Kräfte ausüben, also zueinander in Opposition stehen. Ein virtueller Finger ist hierbei eine Abstraktion, die mehrere reale Finger zusammenfasst oder auch einfach entgegengesetzt orientierte Kontaktflächen auf der Hand bezeichnet, die durch Objektkontakt an einem Griff beteiligt sind. Hierbei werden drei verschiedene Formen der Opposition unterschieden, abhängig von der Lage der Ach-

se, entlang der die Opposition vorliegt, relativ zur Handfläche (siehe Abbildung 2.2):

- Opposition zwischen den Innenseiten der Fingerspitzen (engl.: pad opposition)
- Opposition zwischen der Handfläche und den Innenseiten der Finger (engl.: palm opposition)
- Opposition zwischen dem Daumen und den radialen Seiten der Fingerspitzen, bzw. zwischen den radialen Seiten der Fingerspitzen ohne Beteiligung des Daumens (engl.: side opposition)

Eine umfassende Griff-taxonomie

Eine aktuelle Übersicht über bedeutende Griff-taxonomien ist in [Feix 09] zu finden. Ein Vergleich sowie eine Zusammenfassung und neue Anordnung der in diesen Taxonomien beschriebenen Griffe führte zu einer neuen, umfassenden Griff-taxonomie.

2.2 Abgrenzung

Die Greifplanung hat, wie bereits eingangs beschrieben, das Ziel, Handposen relativ zu einem gegebenen Objekt sowie zugehörige Handkonfigurationen zu finden, sodass daraus resultierende Griffe extern einwirkenden Kräften und Momenten widerstehen können. In diesem Abschnitt soll eine begriffliche Abgrenzung gegenüber Themenkomplexen vorgenommen werden, die zwar im Zusammenhang zur Greifplanung stehen, die aber für die vorliegende Arbeit nur am Rande von Interesse sind und daher nicht näher behandelt werden sollen.

2.2.1 Greifen auf Kontaktebene

An dieser Stelle nur kurz gestreift werden soll das Gebiet des *Greifens auf Kontaktebene* (engl.: contact-level grasping), auf dem vor allem in den 1980er und 1990er Jahren intensiv geforscht wurde. Die Arbeiten in diesem Bereich reduzieren Greifplanung meist auf die Frage nach dem optimalen oder hinreichend guten Positionieren einer vordefinierten Anzahl punktförmiger Kontakte auf dem

(oft nur als zweidimensional angenommenen) Objekt, um Griffe mit bestimmten mechanischen Stabilitätseigenschaften zu erzielen. Gemeinsam ist diesen Arbeiten, dass sie die Handkinematik und die damit verbundenen zusätzlichen Einschränkungen nicht betrachten, da sie Finger nur als Kontaktpunkte annehmen, die sich frei und ungehindert im Raum bewegen können. Ein Überblick über diesen Bereich findet sich in [Bicchi 00]. Die heutige Bedeutung dieser Arbeiten besteht hauptsächlich darin, dass viele Erkenntnisse daraus in die Entwicklung mechanischer Qualitätsmaße wie Kraftschluss (siehe z.B. [Ferrari 92]) eingeflossen sind, die bis heute in auf Simulationsumgebungen wie GraspIt! [Miller 04] und OpenRAVE [Diankov 08] gestützten Greifplanungsverfahren verwendet werden, aber bezüglich ihrer Aussagekraft mittlerweile auch in Frage gestellt werden [Balasubramanian 10]. Bei Bedarf wird später an geeigneter Stelle auf Arbeiten aus diesem Bereich verwiesen.

2.2.2 Griffsynthese

Im Unterschied zum Bereich des *Greifens auf Kontaktebene* beschäftigt sich das Gebiet der *Griffsynthese* (engl.: grasp synthesis) auch mit der Kinematik der Hand. Hier werden Begriffe wie *Geschicklichkeit*, *Gleichgewicht*, *Stabilität* und *Dynamisches Verhalten* (engl.: dexterity, equilibrium, stability, dynamic behaviour) untersucht, die über den Kraftschluss hinausgehen. Die Arbeiten auf diesem Gebiet sind eher von Bedeutung für die Ausregelung von Griffen (engl.: grasp control) sowie die In-Hand-Manipulation (engl.: dexterous manipulation) und liegen damit außerhalb des für die vorliegende Arbeit relevanten Themenbereichs. Ein Überblick über Arbeiten im Bereich der Griffsynthese findet sich in [Shimoga 96].

2.2.3 Unbekannte Objekte

Ein weiterer Punkt der Unterscheidung und Abgrenzung besteht in den Annahmen, die über das zu greifende Objekt gemacht werden. Die Greifplanung geht immer davon aus, dass das Objekt *bekannt* ist, in dem Sinne, dass ein geometrisches Modell des Objektes vorliegt. Folglich werden in der vorliegenden Arbeit keine Arbeiten betrachtet, die das *Greifen unbekannter Objekte* behandeln. Diese Unterscheidung verschwimmt jedoch zunehmend, da durch die fortschreitende 3D-Sensortechnologie partielle Objektmodelle erstellt werden können, wodurch in manchen Fällen, auf die gesondert hingewiesen wird, die Anwendung von Methoden der Greifplanung ermöglicht wird.

2.2.4 Ansätze jenseits der Planung und nachgelagerte Fragestellungen

Einige weitere Themenfelder aktueller Forschung beschäftigen sich zwar mit dem Greifen, aber betrachten Planung als hierfür ungeeigneten Ansatz oder befassen sich mit weitergehenden Fragen, die der eigentlichen Greifplanung nachgelagert sind. In diesem Sinne werden keine Arbeiten betrachtet, deren Ziel es ist, die Fähigkeit des Greifens für einen Roboter mittels Methoden des maschinellen Lernen zu realisieren. Auch sind Arbeiten aus dem Bereich des *aufgabenspezifischen Greifens* (engl.: task-specific grasping) für die vorliegende Arbeit nicht von Interesse, da sie sich mehr mit der Auswahl von Griffen für bestimmte Aufgaben befassen, also einem der Greifplanung nachgelagerten Problem, als mit der Planung dieser Griffen an sich.

2.3 Systematik

Nach der Abgrenzung im vorigen Abschnitt verbleiben vor allem simulationsbasierte Ansätze zur Greifplanung, die für die vorliegende Arbeit im engeren Sinne interessant sind. Kennzeichnend für diese Verfahren ist, dass sie ein geometrisches und kinematisches Modell der Roboterhand und ein geometrisches Modell des Objektes in einer Simulationsumgebung betrachten, um mit unterschiedlichen Methoden Griffen zu generieren und Aussagen über deren Qualität zu machen. Die Verfahren unterscheiden sich vor allem hinsichtlich der Rolle der Handkinematik, der Gewichtung der Objektgeometrie und des Umgangs mit der Dimensionalität des Suchraums. Im den folgenden drei Abschnitten wird eine Unterteilung der Verfahren in drei Hauptklassen vorgenommen:

- Dimensionsreduktion des Handkonfigurationsraums durch Handsynergien
- Greifplanung durch Formvergleich
- Teilebasiertes Greifen

Model	DOFs	Description	Eigengrasp 1		Description	Eigengrasp 2	
			min	max		min	max
Gripper	4	Prox. joints flexion			Dist. joints flexion		
Barrett	4	Spread angle opening			Finger flexion		
DLR	12	Prox. joints flexion Finger abduction			Dist. joints flexion Thumb flexion		
Robonaut	14	Thumb flexion MCP flexion Index abduction			Thumb flexion MCP extension PIP flexion		
Human	20	Thumb rotation Thumb flexion MCP flexion Index abduction			Thumb flexion MCP extension PIP flexion		

Abbildung 2.3: Eigengriffe für fünf unterschiedliche Handmodelle. Nachdruck aus [Ciocarlie 07], ©2007 IEEE.

2.4 Eigengriffe – Dimensionsreduktion durch Handsynergien

Bereits frühe Untersuchungen, deren Ziel die systematische Einordnung und Katalogisierung der vom Menschen verwendeten Griffe war ([Napier 56],[Cutkosky 89],[Iberall 97]), legten nahe, dass viele der am häufigsten verwendeten Griffe in wenigen Bereichen des Konfigurationsraumes der Hand liegen. In [Santello 98] wurde diese Vermutung systematisch untersucht, indem mittels eines Datenhandschuhs die Gelenkwinkel der Hand bei Griffen am Menschen gemessen wurden. Die Auswertung der Messdaten mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse zeigte, dass bereits die ersten beiden Hauptkomponenten 80% der Varianz in den Messdaten erklären.

Ciocarlie [Ciocarlie 07] bezeichnete die Hauptkomponenten als *Eigengrasps* und entwickelte darauf basierend ein Greifplanungsverfahren. Die Grundidee besteht darin, Greifplanung als ein Optimierungsproblem zu betrachten, bei dem die Abstände zwischen der Objektfläche und vordefinierten Punkten auf der Hand minimiert werden sollen, wobei für Kraftgriffe Punkte auf der ganzen Handfläche verwendet werden, während für Präzisionsgriffe nur Punkte an den Fingerspitzen betrachtet werden. Die Suche nach möglichen Lösungen erfolgt dann in einem

Raum, der durch die sechs Freiheitsgrade der Handpose und die beiden ersten Eigengrasps aufgespannt wird, was eine deutliche Dimensionsreduktion gegenüber einer Suche im kompletten Konfigurationsraum der Hand bedeutet. Als Optimierungsverfahren wird Simulierte Abkühlung (engl.: Simulated Annealing) verwendet. Der Optimierungsprozess führt in der Regel jedoch nicht zu einem optimalen Anschmiegen der Hand an das Objekt, sodass nach Verstreichen einer definierten Zeitspanne der Eigengrasp-Raum durch finales Schließen der Fingergelenke verlassen werden muss, um gültige Griffe zu erzielen. Abbildung 2.3 zeigt die in [Ciocarlie 07] vorgeschlagenen ersten beiden Eigengriffe für fünf unterschiedliche Handmodelle. In [Ciocarlie 08] wurde der Eigengrasp-Planer zur Unterstützung der kortikalen Ansteuerung einer Handprothese verwendet. Weitere, neuere Arbeiten im Bereich der Handsynergien beschäftigen sich mit weiteren Untersuchungen am Menschen, jedoch zusätzlich mit temporalen Daten bezüglich des kompletten Greifprozesses [Romero 10], sowie mit der Nutzung der Handsynergien für die Regelung von Händen ([Ficuciello 11],[Ficuciello 12]), auch im Hinblick auf die optimalen Greifkräfte ([Prattichizzo 10], [Gabicchine 11]), jedoch weniger mit ihrem Nutzen für die Greifplanung.

2.5 Greifplanung durch Formvergleich

2.5.1 Grundidee

Dieser Forschungszweig umfasst eine Reihe von Ansätzen, welche Griffe durch Formvergleich (engl.: shape matching) zwischen zwei unterschiedlichen Objekten oder zwischen Objekt und Hand erzeugen. Die Handkinematik wird hierbei in vielen Fällen gegenüber der Formanpassung an das Objekt eher nachrangig behandelt. Im Vordergrund steht bei einigen Verfahren eher das Ziel, ein gutes Anschmiegen der Oberfläche der Hand an die des Objektes zu erreichen. Dies geschieht teilweise auch im Hinblick auf ästhetische Aspekte, insbesondere dann, wenn das eigentliche Ziel der Forschung eher in der möglichst realistischen grafischen Animation des Greifens als im Generieren von auf realen Robotern erfolgreich ausführbaren Griffen besteht.

Formvergleich und Formabstimmung können auf unterschiedliche Weise geschehen:

- Die Form eines neuen Objektes wird mit anderen Objekten in einer Datenbank, für die bereits Griffe geplant wurden, verglichen. Griffe für das

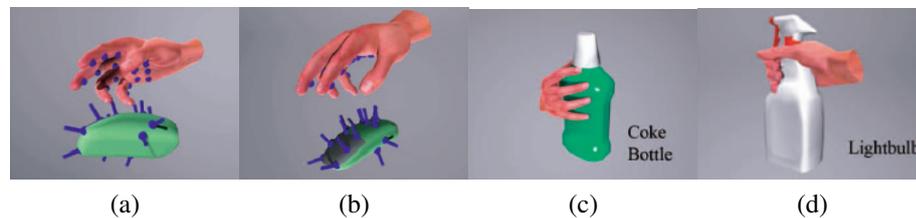


Abbildung 2.4: Handkonfiguration für das Greifen einer Maus, mit Kontaktpunkten an Hand und Objekt sowie Kontaktnormalen auf der Objektoberfläche (a)+(b), Griff für eine Colaflasche, angepasst auf eine Reinigungsmittelflasche (c), Griff für eine Glühbirne, angepasst auf eine Sprühflasche (d). Nachdruck aus [Li 07], ©2007 IEEE.

ähnlichste Objekt in der Datenbank werden auf das neue Objekt angepasst. Hierbei ist teilweise auch die Anwendung auf Objekte möglich, deren Form nur zum Teil bekannt ist, etwa aufgrund partieller Sensordaten.

- Der Formvergleich findet zwischen der Form des neuen Objektes und der Form der Handoberfläche statt, basierend auf einer Datenbank unterschiedlicher Handkonfigurationen, der u.U. Messungen am menschlichen Greifvorgang zugrunde liegen.
- Der Formvergleich wird zwischen einem Objekt und der Hand durchgeführt, jedoch ohne den Einsatz einer Datenbank für Handkonfigurationen oder Objekte.

2.5.2 Verfahren im Einzelnen

Datenbankbasierte Ansätze

In [Li 07] wurde ein Ansatz vorgestellt, bei dem menschliche Motion Capturing-Daten von Griffen für eine Reihe von Grundobjekten verwendet werden. Um Griffe für ein neues Anfrageobjekt zu planen, wird ein Formvergleich zwischen der Objektoberfläche und den Handinnenflächen von Griffen in der Datenbank vorgenommen. Basierend auf einem Gütemerkmal, das aus Paaren von Oberflächenpunkten, ihrem Abstand zueinander, und dem Winkel zwischen den Oberflächennormalen an diesen Punkten besteht, werden mögliche Griffkandidaten aus der Griffdatenbank ausgewählt, deren Pose dann am neuen Objekt ausgerichtet wird.

Die hieraus resultierenden Griffkandidaten werden geclustert, und die Handkonfigurationen durch Inverse Kinematik-Berechnungen an die Oberfläche des neuen Objektes angepasst (siehe Abbildung 2.4). Der Ansatz verwendet ein biomechanisch motiviertes menschliches Handmodell und hat vor allem die optimale grafische Animation des Greifens zum Ziel. Ein ähnlicher in [Goussous 09] beschriebener Ansatz basiert ebenfalls auf Formvergleich zwischen einer Datenbank von Handkonfigurationen und einem Objektmodell, stützt sich jedoch nicht auf menschliche Motion-Capturing-Daten, und beschreibt zusätzlich eine optimierungsbasierte Haltungsprädiktion (engl.: posture prediction) für den kompletten Arm und Oberkörper des virtuellen Menschen Santos. Diese wird zum Herausfiltern unbequemer Griffposen genutzt. Im Gegensatz dazu erfolgt in [Goldfeder 09a] der Formvergleich nicht zwischen dem Anfrageobjekt und der Hand, sondern zwischen dem Anfrageobjekt und Objekten in der Datenbank, wobei für jedes Objekt in der Datenbank eine Sammlung von Griffen vorliegt, die mit Hilfe des Eigengrasp-Planers [Ciocarlie 07] generiert wurden. Greifplanung für ein neues Anfrageobjekt erfolgt, indem über Zernike-Deskriptoren die geometrisch ähnlichsten Objekte in der Datenbank ermittelt werden, und deren Griffe dann auf das neue Objekt angepasst werden. Hierzu erfolgt zunächst eine Ausrichtung von Anfrageobjekt und Datenbankobjekt aneinander mittels Hauptkomponentenanalyse. Die vorgeplanten Griffe werden an das neue Objekt angepasst, indem die Hand vom Objekt zurückgezogen und die Finger geöffnet werden, bis keine Durchdringung oder Kollision mit dem Objekt mehr vorliegt, und anschließend die Hand wieder bis zum Kontakt auf das Objekt zubewegt und die Finger geschlossen werden. Zum Abschluss werden die angepassten Griffe auf Kraftschluss getestet [Ferrari 92]. Der Ansatz wurde in [Goldfeder 09b] erweitert, um auch Griffe für bisher unbekannte Objekte zu generieren, für die nur ein partieller dreidimensionaler Scan vorliegt. Hierzu wurde der sogenannte *Cap Descriptor* eingeführt, der das Aussehen des Objektes für einen Tiefensensor beschreibt, abhängig von der Objektform und der Pose des Sensors relativ zum Objekt. Dieser ermöglicht den Vergleich von Teilansichten eines Objektes mit bekannten Modellen in der Datenbank und somit die Identifikation geometrisch ähnlicher Objekte. Vorberechnete Griffe für jedes der ähnlichsten Objekte werden dann auf den jeweils anderen ähnlichsten Objekten getestet, und diejenigen Griffe, die auch gut auf die jeweils anderen ähnlichsten Objekte generalisieren, werden als geeignet für das neue unbekannte Objekt bewertet.

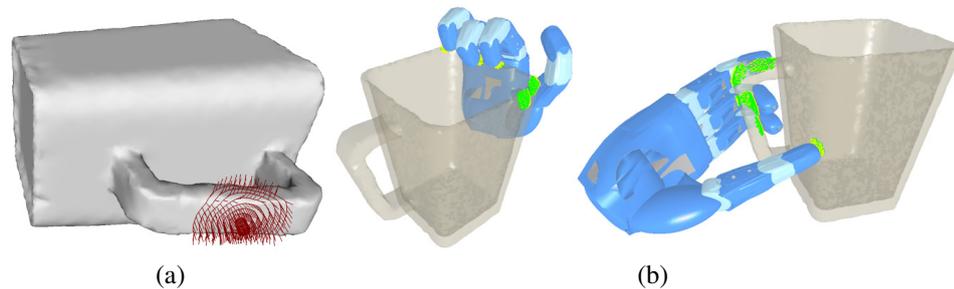


Abbildung 2.5: Geodätische Kreise um einen Oberflächenpunkt auf einer Tasse (a), zwei stabile Griffe für dieses Objekt (b). Nachdruck aus [Li 11], ©2011 IEEE.

Sonstige Ansätze

Einige Ansätze verzichten auf die Nutzung einer Datenbank bekannter Objekte oder Handkonfigurationen. Die in [Li 11] vorgestellte Methode generiert Griffe, indem zunächst wenige Vorformungen der Hand durch einen Oberflächen-deskriptor dargestellt werden, der auf geodätischen Konturen (siehe Abbildung 2.5a) und einer kontinuierlichen Repräsentation der Oberfläche basiert. Mithilfe dieses Deskriptors werden Handoberfläche und Objektoberfläche verglichen und die diesbezüglich besten Handposen relativ zum Objekt gefunden. Eventuelle Durchdringungen der resultierenden Handposen mit dem Objekt werden durch Anpassung der Fingerkonfigurationen und der Handpose aufgelöst. Abschließend werden die Griffe auf Kraftschluss getestet. Die Verwendung geodätischer Konturen ermöglicht eine bessere Repräsentation lokaler Oberflächen als zufällig gesampelte Oberflächenpunkte, sowie die Detektion von Henkeln und dünnen Teilen eines Objektes. Zwei Beispiele für resultierende Griffe sind in Abbildung 2.5b zu sehen.

Ein sehr weit entwickelter Ansatz in diesem Bereich wurde in [Saut 12] vorgestellt und behandelt die Erzeugung von Präzisionsgriffen. Hier wird das Ziel verfolgt, den typischerweise erwarteten hohen Rechenaufwand für Kollisionstests und Inverse Kinematik zu reduzieren, indem objekt- und handspezifische Vorberechnungen durchgeführt werden, auf deren Ergebnisse bei der eigentlichen Greifplanung zurückgegriffen wird. Hierzu wird, basierend auf einem Sampling, die Objektoberfläche durch einen Baum aus an den Koordinatenachsen ausgerichteten minimal-umgebenden Quadern (engl. minimal axis-aligned bounding boxes) dargestellt. Der Finger-Arbeitsraum wird durch Einbeschreiben von Kugeln approximiert, deren Zentren jeweils bestimmte Fingerkonfigurationen beschreiben (siehe Abbildung 2.6a). Die eigentliche Planung von Griffen erfolgt

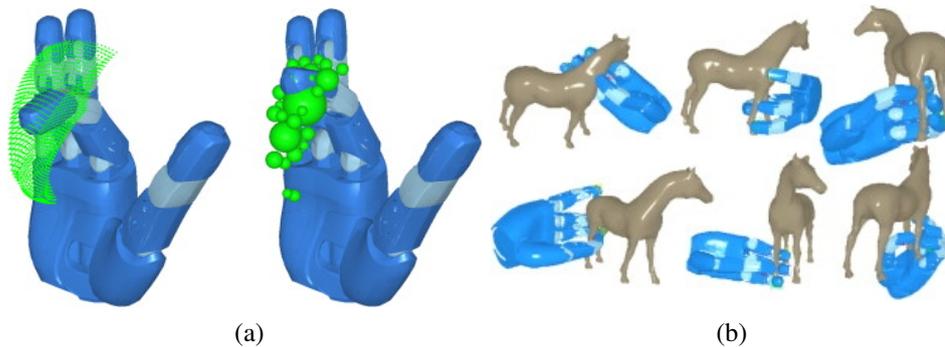


Abbildung 2.6: Der diskretisierte Arbeitsraum des Zeigefingers als Gitter und als volumetrische Approximation durch Kugeln (a), einige Beispielgriffe für eine Pferdefigur (b). Nachdruck aus [Saut 12], ©2012 Elsevier.

dann, indem zunächst durch Sampling Paare von Oberflächenpunkten bestimmt werden (sogenannte *Grasp Frames*), deren Normalen ein Skalarprodukt mit negativem Wert haben. Die *Grasp Frames* dienen als Ausgangspunkt für die Berechnung von Handposen relativ zum Objekt, wobei die endgültige Handkonfigurationen durch den Schnitt der Finger-Arbeitsräume mit dem hierarchischen Objekt-Oberflächenmodell berechnet werden. Abschließend werden die so erhaltenen Griffe auf Kraftschluss getestet. Einige Beispiele für resultierende Griffe sind in Abbildung 2.6b zu sehen.

2.6 Teilebasiertes Greifen

2.6.1 Grundidee

Die grundlegende Idee des teilebasierten Greifens (engl. *grasping by parts*) besteht darin, jeweils nur Teile eines Objektes zu betrachten, um dann für diese Teile Griffkandidaten zu generieren. Diese Vorgehensweise ist psychologisch motiviert durch die Erkenntnis, dass auch der Mensch Objekte in seiner Umwelt als Anordnung und Kombination einfacher Formen wahrnimmt [Hoffman 84]. Das Konzept ist in der Psychologie unter der Bezeichnung *Theorie der volumetrischen Erkennung* (engl. *recognition-by-components (RBC)*) [Biederman 87] bekannt.

Gemeinsamkeiten

Gemeinsam ist diesen Ansätzen, dass Endpose und Endkonfiguration der Hand in der Regel in zwei voneinander getrennten Schritten bestimmt werden.

Hierzu werden die einzelnen Griffkandidaten in solcher Weise parametrisiert, dass der Vorgang des Greifens zeitlich gesehen in Vorwärtsrichtung simuliert werden kann. Ein Griffkandidat wird in diesen Fällen beschrieben durch einen Anrückpunkt auf dem oder im Objekt, eine Anrückrichtung, entlang der sich die Hand dem Anrückpunkt nähert, eine Orientierung der Hand, sowie oft eine Vorformung der Hand (engl. *preshape*), die eine Gelenkwinkelkonfiguration der Hand vor dem Schließen der Finger beschreibt. Um einen Griffkandidaten zu simulieren, erfolgt zunächst die Bestimmung der endgültigen Handposition durch Vor- und Zurückbewegen der Hand entlang der Anrückrichtung, wobei nach jedem Verschiebungsschritt eine Kollisionsprüfung zwischen Hand und Objekt durchgeführt wird, bis Kontakt zwischen Hand und Objekt hergestellt ist, aber keine gegenseitige Durchdringung mehr vorliegt. In einem zweiten Schritt wird dann unter Benutzung der Vorwärtskinematik die Endkonfiguration der Hand bestimmt, indem die Finger geschlossen werden, wobei erneut iterativ auf Kollision zwischen Objekt und den bewegten Fingergliedern getestet wird. Ist ein weiteres Schließen der Finger nicht mehr möglich oder unerwünscht, werden die Kontakte zwischen Hand und Objekt bestimmt, und der Griff in einem abschließenden dritten Schritt auf seine Qualität getestet. Hierbei wird üblicherweise auf Kraftschluss (engl. *force-closure*) [Reuleaux 76] getestet und die Größe der maximal kompensierbaren äußerlich angreifenden Kraft (engl. *maximum disturbance wrench*) bestimmt [Ferrari 92].

Eine weitere Gemeinsamkeit dieser Klasse von Verfahren besteht außerdem darin, dass die *Grifftiefe* (engl. *standoff*, *finger depth*), die den Abstand der Handfläche zum Objekt bei Präzisionsgriffen beschreibt, oft als freier Parameter betrachtet wird, der vom Benutzer gewählt werden kann. Die Verfahren sind in der Regel primär auf das Generieren von Kraftgriffen ausgelegt, wobei durch benutzerdefiniertes Sampling der Grifftiefe ein zusätzliches Wegbewegen der Hand entlang der Anrückrichtung vor dem Schließen der Finger erreicht werden kann, sodass auf diese Weise auch Präzisionsgriffe generiert werden können.

Unterschiede

Wesentliche Unterschiede zwischen den Verfahren bestehen in den Heuristiken, welche verwendet werden, um Griffkandidaten für ein Objekt zu erzeugen. Einige Algorithmen nehmen hierzu zunächst eine Zerlegung des Objektes in einfachere

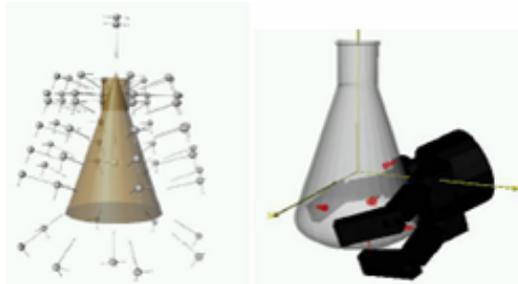


Abbildung 2.7: Zerlegung eines Erlenmeyerkolbens in die Grundkörper Kegel und Zylinder mit den zugehörigen Anrückrichtungen für die Hand (links), ein Griff für das Objekt (rechts). Nachdruck aus [Miller 03], ©IEEE 2003

Teile vor, während andere Algorithmen zwar lokale Eigenschaften der Objektform auswerten, eine explizite Zerlegung in Teile jedoch vermeiden. Die Anzahl und Qualität der erzeugten Griffkandidaten sowie die letztendlich erzielte Ausbeute an Kraftschlussgriffen hängt stark von der jeweils verwendeten Heuristik ab.

2.6.2 Verfahren im Einzelnen

Der erste Ansatz in dieser Richtung wurde in [Miller 03] vorgestellt und stützt sich auf den Simulator GraspIt! [Miller 04]. Hier werden die Objektmodelle in Grundkörper (engl. shape primitives) zerlegt: Boxen, Zylinder, Kugeln und Kegel. Die Zerlegung muss von Hand durch den Benutzer erfolgen, da bisher kein automatisiertes Verfahren hierfür bekannt ist. Je nach Grundkörper werden dann nach unterschiedlichen Regeln Griffkandidaten erzeugt. So werden beispielsweise für Boxen Anrückrichtungen der Hand erzeugt, die senkrecht auf den Seitenflächen der Box stehen, und für Zylinder ergeben sich Anrückrichtungen senkrecht zum Zylindermantel sowie senkrecht zu Boden und Deckel des Zylinders. Die Zerlegung eines Erlenmeyerkolbens in Primitive sowie ein resultierender Griff sind in Abbildung 2.7 zu sehen. Das Verfahren wurde in [Xue 08] um einen nachgeschalteten Optimierungsschritt erweitert, der die Finger nach dem ersten Schließen gemäß vorberechneter möglicher Kontaktpunkte weiter bewegt, um die Griffqualität zu verbessern.

In [Goldfeder 07] wurde ein Ansatz vorgestellt, der mittels nichtlinearer Optimierung ein Objekt durch einen Binärbaum aus Superquadriken darstellt. Hierbei wird, durch Betrachtung des Approximationsfehlers mit Hilfe eines automatischen Teile-und-verbinde-Verfahrens (engl. split and merge) das Objekt immer weiter in kleinere Superquadriken zerlegt, und außerdem geprüft, ob benachbarte

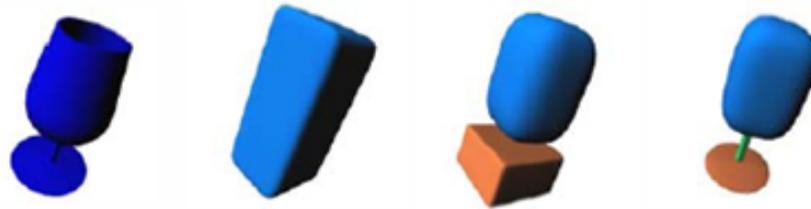


Abbildung 2.8: Schrittweise Approximation eines Weinglases (ganz links) durch einen Binärbaum aus Superquadriken. Nachdruck aus [Goldfeder 07], ©IEEE 2007

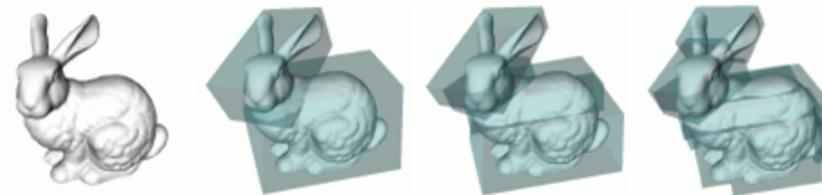


Abbildung 2.9: Schrittweise Approximation des Stanford-Häschens (ganz links) durch minimal-umgebende Quader. Nachdruck aus [Huebner 08], ©IEEE 2008

Superquadriken ohne wesentliches Anwachsen des Approximationsfehlers durch eine größere Superquadrik ersetzt werden können. Um Griffkandidaten zu erzeugen, wird die Oberfläche der Superquadriken gesampelt, wobei deren Oberflächennormalen als Anrückrichtungen für die Hand verwendet werden, und die Handorientierung jeweils an den Hauptachsen der Superquadrik ausgerichtet wird. Die schrittweise Approximation eines Beispielobjektes durch einen Binärbaum aus Superquadriken ist in Abbildung 2.8 zu sehen.

In [Huebner 08] wurde ein ähnliches Verfahren vorgestellt, jedoch auf Basis von minimal-umgebenden Quadern (engl. minimum volume bounding boxes). Auch hier kommt ein Teile-und-verbinde-Verfahren für die Zerlegung des Objektes zum Einsatz (siehe Abb. 2.9). Der Autor begründet seine Entscheidung für minimal-umgebende Quader damit, dass diese die Form eines Objektes zwar weniger genau approximieren können als Superquadriken, dafür der Zerlegungsprozess aber weniger rechenaufwendig und weniger sensibel gegen Rauschen und Ausreißer sei. Griffkandidaten werden so generiert, dass sich die Hand den Seitenflächen der Quader entlang deren Oberflächennormalen nähert, wobei solche Seitenflächen, die durch direkt benachbarte Quader verdeckt werden, nicht berücksichtigt werden. Bemerkenswert ist, dass das Verfahren im Gegensatz zu anderen Ansätzen auch auf unvollständigen Laser- und Stereokameramessdaten evaluiert wurde.

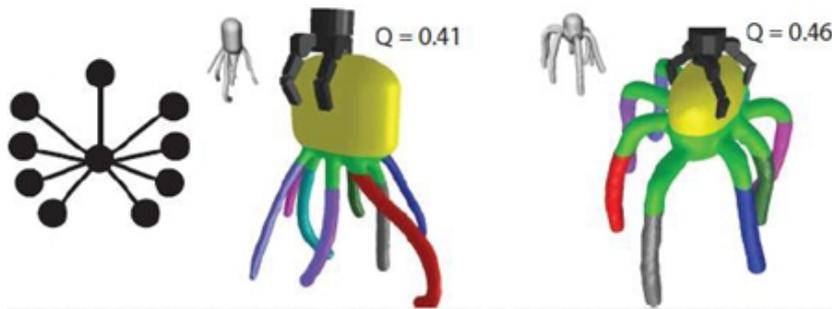


Abbildung 2.10: Reeb-Graph der Klasse von oktopusartigen Objekten (links), sowie generierte Beispielgriffe für zwei verschiedene Oktopusobjekte. Nachdruck aus [Aleotti 10], ©IEEE 2010

In [Geidenstam 09] wurde eine Erweiterung des Verfahrens vorgestellt, die zusätzlich die Schätzung des *Grifftiefe*-Parameters (im Paper *Fingertiefe*, engl. Finger depth genannt) ermöglicht. Dies wird erreicht durch Projektion der eingeschlossenen Punkte auf die Seitenflächen eines Quaders und das Trainieren eines neuronalen Netzes.

Ein Verfahren, das keine Zerlegung des Objektes vornimmt, wurde in [Berenson 07] vorgestellt. Bei diesem Verfahren wird die Objekt Oberfläche gesampelt und die Oberflächennormalen an den Abtastungspunkten als Anrückrichtung für die Hand verwendet. Da die Oberflächennormalen keine weiteren Informationen für eine sinnvolle Wahl der Handorientierung liefern, wird die Handorientierung dem Benutzer als frei zu wählender *Rollwinkel*-Parameter (engl. roll angle) zugänglich gemacht. Der Rollwinkel beschreibt eine zusätzliche Rotation der Hand um die Anrückrichtung herum.

Ein weiterer Ansatz in diesem Zusammenhang wurde in [Roa 12] vorgestellt. Hier wird, ausgehend von einem minimal umhüllenden Quader, die Objekt Oberfläche scheibenweise gesampelt, wobei die Orientierung der Scheiben durch die Orientierung des umhüllenden Quaders vorgegeben ist. Für die Oberflächenpunkte jeder Scheibe wird dann der am besten eingepasste Kreis bestimmt. Anrückrichtungen für die Hand werden radial zu diesem Kreis gewählt, wobei Oberflächenteile mit niedriger lokaler Krümmung priorisiert werden.

Aleotti und Caselli [Aleotti 10] präsentierten ein Verfahren, bei dem das Objekt mit Hilfe des Reeb-Graphs topologisch segmentiert wird (siehe Abb. 2.10). Für einen vom Benutzer ausgewählten Teil des Objektes werden dann Griffe generiert, indem zunächst Schwerpunkt und Hauptachsen dieses Objektteils berechnet und darauf basierend anschließend Anrückrichtungen und Handorientierungen ge-

neriert werden. Das Verfahren ist hauptsächlich auf das Planen von Griffen für topologisch ähnliche Objekte, die zu bestimmten vordefinierten Klassen gehören, ausgelegt.

2.7 Zusammenfassung und Bewertung der Ansätze

In diesem Kapitel wurde eine Unterteilung des aktuellen Stands der Forschung zur Greifplanung in drei Hauptbereiche vorgeschlagen: Eigengriffe, Greifplanung mittels Formvergleich, sowie das Teilebasierte Greifen. Alle Verfahren stellen jeweils Kompromisse mit unterschiedlicher Priorisierung der Teilprobleme der Greifplanung dar: der Handkinematik, der Objektgeometrie und dem Umgang mit der Dimensionalität des Problems.

Der auf menschliche Handsynergien aufgebaute Ansatz der **Eigengriffe** zielt in erster Linie auf die Dimensionsreduktion des Konfigurationsraumes der Hand ab. Greifplanung wird hier als Optimierungsproblem behandelt, bei dem die Handkinematik vereinfacht betrachtet wird. Die Handkonfiguration wird hierbei während der Greifplanung weitestgehend in einem durch die beiden ersten Eigengriffe aufgespannten Unterraum des Konfigurationsraums optimiert, bevor nach einem Timeout dieser Unterraum verlassen wird und durch Schließen der Finger die für einen Griff nötigen Kontakte zwischen Hand und Objekt hergestellt werden. Die Form des Objektes wird nicht analytisch oder heuristisch für die Problemlösung betrachtet, sondern fließt in den Optimierungsprozess ein, bei dem die Abstände zwischen den Kontaktpunkten auf der Hand und der Objektoberfläche minimiert werden. Folglich hat der Benutzer auch keinen Einfluss darauf, an welchen Stellen Griffe für das Objekte gefunden werden sollen. Der Ansatz ist vor allem für Kraftgriffe mit gutem Anschmiegen der Hand an das Objekt geeignet, kann aber durch Priorisierung der Kontaktpunkte auf den Fingerspitzen auch Präzisionsgriffe erzeugen.

Demgegenüber wird bei den auf **Formvergleich** basierenden Ansätzen die Geometrie des Objektes sehr stark gewichtet. Auch hier wird eine Anpassung der Handoberfläche an die Form des Objektes angestrebt, jedoch nicht implizit im Rahmen eines Optimierungsverfahrens. Stattdessen werden Datenbanken mit Handkonfigurationen oder anderen Objekten verwendet, mit denen das aktuelle Objekt verglichen wird, oder alternativ werden lokale Ansätze zum Vergleich von Teilen der Hand mit Teilen der Objektoberfläche verwendet. Die Handkinematik wird gegenüber der Objektgeometrie oft nachrangig behandelt, indem nach

dem Formvergleich einzelne Gelenke bewegt werden, um gegenseitige Durchdringungen zwischen Hand und Objekt aufzulösen und dadurch einen gültigen Griffkandidaten zu generieren. Ein wesentlicher Vorteil einiger datenbankbasierter Verfahren in diesem Bereich besteht darin, dass, besonders bei Kraftgriffen, oft insbesondere optisch sehr ansprechende Griffe gefunden werden, was auch im Sinne der beabsichtigten Verwendung dieser Verfahren im Bereich der grafischen Animation ist. Bei den nicht datenbankbasierten Verfahren entstehen hingegen viele eher unnatürlich anmutende Griffe. Ein deutlicher Nachteil dieser Klasse von Ansätzen besteht darin, dass diese kaum Informationen darüber liefern, wie die beabsichtigte Handpose und -konfiguration während des Greifvorgangs zu erreichen sind, d.h. insbesondere aus welcher Richtung sich die Hand dem Objekt nähern soll, wie sie dabei relativ zum Objekt orientiert sein soll, wie die Finger sich schließen sollen, um vorzeitige und ungewollte Kollisionen mit dem Objekt zu vermeiden, und in welcher Startkonfiguration der Hand dieser Schließvorgang beginnen soll. Während diese Fragen bei der grafischen Animation weniger im Vordergrund stehen mögen, so erscheinen sie im Hinblick auf die Ausführbarkeit der Griffe auf einem realen Roboter als sehr problematisch.

Die Ansätze aus dem Bereich des **Teilebasierten Greifens** stellen einen stärkeren Kompromiss zwischen Handkinematik und Objektgeometrie dar. Die Objektgeometrie wird gröber behandelt als bei den auf Formvergleich basierenden Verfahren. Sie dient hier nicht der optimalen Anpassung der Handkonfiguration zum Anschmiegen an das Objekt, sondern wird in erster Linie dazu verwendet, den Suchraum möglicher Handposen am Objekt durch Anwendung unterschiedlicher Approximationsverfahren und Heuristiken für die Generierung von Griffkandidaten einzuschränken. Eine Besonderheit dieser Ansätze besteht in der Parametrierung der Griffkandidaten durch Anrückpunkt, Anrückrichtung, Handorientierung und Vorformung der Hand, die eine Simulation der Griffkandidaten in zeitlicher Vorwärtsrichtung erlaubt, d.h. Handpose und Handkonfiguration beim Griff kommen in der Simulation während der Greifplanung auf sehr ähnliche Weise zustande wie bei der Ausführung eines Griffes auf dem realen Roboter, nämlich durch eine Anrückbewegung der Hand und das Schließen der Finger. Dies stellt, neben der Einschränkung des Suchraumes, einen großen Vorteil dieser Klasse von Ansätzen dar, da hierdurch gewährleistet ist, dass die Handposen und -konfigurationen der im Simulator geplanten Griffe auch in der Realität durch den Roboter ohne unerwünschte Kollisionen zwischen Hand und Objekt angefahren werden können.

Einige Nachteile und Einschränkungen der Verfahren des Teilebasierten Greifens ergeben sich vor allem durch den verwendeten Vorwärtsansatz zur Griffsimulation und durch die eher grobe Betrachtung der Geometrie.

Der Vorwärtsansatz ist zum einen für Hände mit komplexeren, am Menschen orientierten Daumenkinematiken schwieriger zu realisieren, da hier durch schlichtes Schließen der Finger nicht mehr gewährleistet ist, dass der Daumen nach dem Schließen in Opposition zu den übrigen Fingern steht, was aber für einen kraftschlüssigen Griff meist nötig ist. Hinzu kommt, dass durch diese Vorgehensweise nur solche Griffe erzeugt werden können, die trotz der Dekomposition der Greifplanung in Vorformung der Hand, Anrückbewegung und Schließen der Finger auffindbar sind. Prinzipbedingt führt das Anstreben schwer zugänglicher Finger-Endpositionen am Objekt oft zu einem vorzeitigen Abbruch der Finger-Schließbewegung, weil die Finger unbeabsichtigt mit anderen Teilen des Objektes kollidieren. So können beispielsweise kaum Griffe generiert werden, bei denen Finger in Löcher gesteckt werden müssen (Extrembeispiel: Bowling-Kugel), ohne an anderer Stelle mit dem Objekt zu kollidieren.

Auch liegt der Schwerpunkt dieser Verfahren vor allem auf der Planung von Kraftgriffen, da die für Präzisionsgriffe wichtige Grifftiefe in der Regel nicht bestimmt wird. Stattdessen muss der Nutzer bei Präzisionsgriffen die optimale Grifftiefe empirisch bestimmen, gegebenenfalls durch wiederholtes Ausführen des Planers mit unterschiedlichen Werten für den Grifftiefe-Parameter.

Ein bislang gravierender Nachteil dieser Verfahren besteht außerdem in den relativ ungenauen Ansätzen für die Approximation der Objektgeometrie. Einerseits ist hierdurch zwar eine effektive Reduktion des Suchraums für Griffkandidaten möglich, jedoch werden durch die verwendeten Approximationsverfahren und die darauf aufbauenden Heuristiken für die Generierung von Griffkandidaten auch viele geometrisch sinnvolle Griffkandidaten aus dem Suchraum entfernt, während in anderen Fällen sehr viele Griffkandidaten generiert und getestet werden, hierbei aber oft nur eine relativ geringe Ausbeute an Kraftschlussgriffen erzielt wird.

2.7.1 Fortschritt über den Stand der Forschung hinaus

Die vorliegende Arbeit ist – im Hinblick auf die angestrebte Ausführbarkeit der Griffe auf einem realen Roboter – im Bereich des Teilebasierten Greifens angesiedelt und greift die oben beschriebenen Probleme dieser Ansätze in Bezug auf unzureichende Formapproximation und niedrige Ausbeuten an Kraftschlussgriffen auf. Hierzu benutzt diese Arbeit das aus Iberalls Griff-taxonomie [Iberall 97] bekannte Prinzip des Oppositionsraums und kombiniert dieses mit der Idee einer Objektrepräsentation auf Basis eines vollständigen Formdeskriptors, der Mediale-Achse-Transformation [Blum 67], welche Symmetrieinformationen des Objektes

enthält und für die Greifplanung nutzbar macht. Hierdurch kann eine beliebig genaue Approximation der Objektform erzielt werden.

Der darauf aufbauende Algorithmus zur Greifplanung nutzt lokale Objektsymmetrieeigenschaften, die in der Mediale-Achse-Transformation enthalten sind, zur Reduktion des Suchraumes, wobei im Unterschied zu bisher bekannten Verfahren, die auf einfacheren Methoden zur Formapproximation basieren, das Verwerfen geometrisch sinnvoller Griffkandidaten weitgehend vermieden wird. Hieraus ergeben sich oftmals besser an die Objektform angepasste Griffe sowie höhere Ausbeuten an Kraftschlussgriffen.

In der Literatur zum Teilebasierten Greifen wird darüber hinaus die Planung von Präzisionsgriffen, wenn überhaupt, nur am Rande behandelt. Insbesondere erfolgt die Bestimmung des für Präzisionsgriffe wichtigen Parameters der Grifftiefe in aller Regel durch schlichtes Ausprobieren unterschiedlicher Parameterwerte. In der vorliegenden Arbeit wird dieses Problem aufgegriffen und ein Algorithmus zur Planung von Präzisionsgriffen mit paralleler Vorformung der Hand vorgestellt, der die optimale Grifftiefe über ein iteratives Verfahren ermittelt.

In der Literatur finden sich zudem bislang kaum Arbeiten zur zweihändigen Greifplanung. In der vorliegenden Arbeit wird anhand einer weitergehenden Untersuchung demonstriert, dass der hier vorgestellte Ansatz zur einhändigen Greifplanung durch zusätzliche Betrachtung der kinematischen Erreichbarkeit und der Manipulabilität so erweitert werden kann, dass damit auch zweihändige Griffe geplant werden können.

Kapitel 3

Das Gitter medialer Kugeln – eine Objektrepräsentation für die Greifplanung

In diesem Kapitel wird die Objektrepräsentation vorgestellt, die als Grundlage für den in Kapitel 4 beschriebenen Greifplanungsalgorithmus dient: das Gitter medialer Kugeln. In Abschnitt 3.1 wird zunächst die Bedeutung der Objektgeometrie für die Greifplanung motiviert. Abschnitt 3.2 behandelt die Mediale-Achse-Transformation, welche das Fundament für die neue Objektrepräsentation darstellt. In Abschnitt 3.3 wird der Zusammenhang zwischen der Mediale-Achse-Transformation und dem Teilebasierten Greifen hergestellt, bevor in Abschnitt 3.4 das Gitter medialer Kugeln beschrieben wird. Abschnitt 3.5 gibt eine kurze Zusammenfassung.

3.1 Die Bedeutung der Objektgeometrie für die Greifplanung

In Simulationsumgebungen, die für die Greifplanung benutzt werden (z.B. GraspIt! [Miller 04], OpenRAVE [Diankov 08]), wird die Objektgeometrie üblicherweise durch ein Dreiecksnetz repräsentiert, welches die Oberfläche des Objektes beschreibt. Eine Gemeinsamkeit der Greifplanungsverfahren nach dem Prinzip des *Teilebasierten Greifens* besteht darin, dass diese zur Erzeugung von Griffkandidaten Approximationen für die Objektgeometrie mit einem höheren Abstraktionsniveau im Vergleich zum üblichen Dreiecksnetz verwenden,

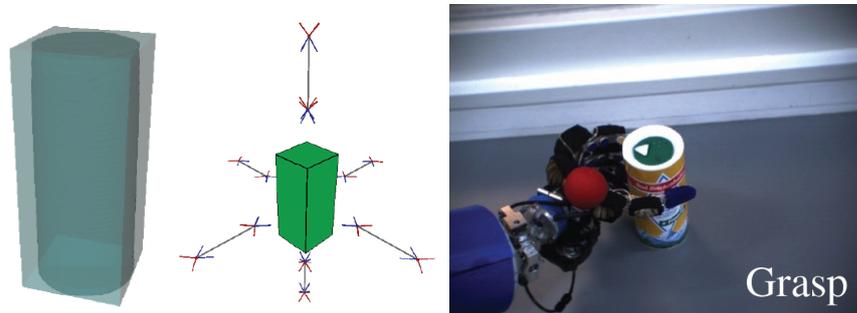


Abbildung 3.1: Links: Approximation einer zylinderförmigen Salzdose mit einem minimal-umhüllenden Quader. Mitte: Aus dem Quader generierte Anrückrichtungen für die Salzdose. Rechts: Ausführung eines Griffes durch ARMAR. Nachdrucke aus [Huebner 09], ©2009 IEEE

z.B. Formprimitive [Miller 03], Superquadriken [Goldfeder 07] oder lediglich minimal-umgebende Quader [Huebner 08], [Huebner 09]. Die Verfahren benutzen unterschiedliche Heuristiken, um, basierend auf den jeweils verwendeten vereinfachten Formen, Griffkandidaten zu generieren, die dann auf Kraftschluss getestet werden.

Ein wesentlicher Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, dass durch die Zerlegung der Objektform in einfachere Komponenten der Suchraum für mögliche Griffkandidaten erheblich verkleinert wird.

Die in den bisher bekannten Greifplanungsverfahren im Bereich des teilebasierten Greifens (siehe Abschnitt 2.6) verwendeten Verfahren zur Formapproximation haben jedoch den wesentlichen Nachteil, dass sie die ursprüngliche Objektform nicht mit beliebiger Genauigkeit darstellen können. Eine zu grobe Formapproximation hat zur Folge, dass auch viele aus menschlicher Sicht intuitive und potentiell hochwertige Griffkandidaten frühzeitig aus dem Suchraum entfernt werden. Insbesondere die Approximation durch minimal-umgebende Quader vereinfacht die Form des Objektes sehr stark und liefert nur relativ wenige Griffkandidaten für ein Objekt.

Beispielsweise liefert ein Zylinder, der durch einen minimal-umgebenden Quader approximiert wird, nur vier verschiedene auf den Zylindermantel gerichtete Anrückrichtungen für die Hand, nämlich jeweils eine Anrückrichtung senkrecht zu jeder Seitenfläche des umgebenden Quaders, sowie je eine Anrückrichtung für Deckel und Boden (siehe Abbildung 3.1). Aus menschlicher Sicht hingegen sind, bedingt durch die Symmetrieachse des Zylinders, beliebig viele Anrückrichtungen

der Hand senkrecht zu dieser Symmetrieachse denkbar. Das frühzeitige Entfernen vielversprechender Griffkandidaten aus dem Suchraum ist jedoch im Hinblick auf einen realen Roboter zu restriktiv, da kinematische Randbedingungen sowie Hindernisse in einer echten Umgebung viele Griffe für ein Objekt undurchführbar machen können.

Daher erscheint es sinnvoll, in Bezug auf eine Objektrepräsentation und ein Greifplanungsverfahren folgende Ziele anzustreben:

1. Die Objektrepräsentation sollte die Form eines Objektes möglichst genau beschreiben können, sodass nicht durch eine ungenaue Approximation der Form vielversprechende Griffkandidaten von vornherein aus dem Suchraum entfernt werden.
2. Sie sollte außerdem für die Greifplanung relevante geometrische Eigenschaften des Objektes dem Planungsverfahren zugänglich machen. Erlaubt die Objektrepräsentation die Generierung geometrisch sinnvoller Griffkandidaten, so sollte es möglich sein, eine höhere Ausbeute an Kraftschlussgriffen zu erzielen und somit die Anzahl zu testender Griffkandidaten und den damit verbundenen Rechenaufwand zu reduzieren.

Die Objektrepräsentation für die Greifplanung, die in diesem Kapitel vorgestellt wird, basiert auf der Mediale-Achse-Transformation.

3.2 Die Mediale-Achse-Transformation

Die Mediale-Achse-Transformation (MAT) ist ein sogenannter *vollständiger Formdeskriptor* (engl. complete shape descriptor), der beliebige Formen mit beliebiger Genauigkeit darstellen kann, indem diese durch das Einbeschreiben von Kugeln maximaler Größe approximiert werden.

3.2.1 Die Mediale-Achse-Transformation nach [Blum 67]

Das Konzept der Mediale-Achse-Transformation wurde 1967 von Harry Blum [Blum 67] eingeführt.

Motivation

Motivation für die Entwicklung der Mediale-Achse-Transformation war ursprünglich die Bildverarbeitung bei biologischen Systemen, oder präziser ausgedrückt, einige grundlegende Probleme des Formensehens (engl.: shape vision), nämlich die Segmentierung des Gesichtsfeldes in einzelne Objekte, sowie die Positionsbestimmung und Erkennung biologisch relevanter Formen. Blum stellte zum damaligen Zeitpunkt fest, dass in zahlreichen Experimenten die Bedeutung von Attributen wie Intensität, Farben, Kanten, Winkeln, Bewegungen und Lichtstrom (engl.: luminous flux) ausführlich untersucht worden war, während Attribute der Form bis dahin kaum betrachtet worden waren. Als primären Grund dafür, warum es so schwierig ist, die Eigenschaften von Formen zu extrahieren, identifiziert Blum die enorme Vielfalt möglicher Formen, die es unmöglich macht, im Rahmen von Experimenten mehr als eine kleine Stichprobe des Parameterraumes abzudecken.

Blum postulierte, dass es, unter der Annahme, dass

- eine Form nicht a priori isoliert werden kann und
- die Vielzahl möglicher auf die Form einwirkender Störungen, trotz derer eine Form immer noch identifiziert werden kann, nicht erschöpfend aufzählbar ist,

einen Prozess zur Extraktion von Formeigenschaften geben müsse, der nicht an der kombinatorischen Explosion einfacher Kongruenzbetrachtungen scheitert.

Definition über die Zeit

Blum definiert die Mediale-Achse-Transformation nicht mathematisch-formal, sondern anschaulich als einen Prozess der Wellenausbreitung in Abhängigkeit der verstrichenen Zeit.

Die Grundannahme, auf der die Definition aufsetzt, geht von einer zweidimensionalen Ebene mit bestimmten Eigenschaften aus. Die Ebene kann an beliebigen Punkten angeregt werden, woraufhin sich die Anregung in Form von Wellenfronten mit konstanter Geschwindigkeit über die Ebene ausbreitet. Ferner wird eine gewisse Refraktärzeit angenommen, d.h. nach einer Anregung können die Punkte der Ebene eine gewisse Zeit lang nicht erneut angeregt werden.

Zweidimensionale Objekte bzw. Bilder werden durch ihre Konturen in der Ebene beschrieben. Von der Kontur eines Bildeindrucks gehen Wellenfronten aus, die sich über die Ebene in alle Richtungen mit konstanter Geschwindigkeit ausbreiten. Eine Besonderheit tritt auf, wenn sich, bedingt durch die Form der Kontur, an manchen Stellen Ecken in der Wellenfront bilden, oder Wellenfronten aufeinander treffen: Die Wellenfronten fließen *nicht* durcheinander hindurch. Trifft eine Wellenfront während ihrer Ausbreitung an einem Punkt auf eine oder mehrere andere Wellenfronten, so löschen sich diese Wellenfronten an diesem Punkt aus, und die Ausbreitung kommt an diesem Punkt zu einem Ende, da die Wellen nicht durcheinander hindurch fließen. Anschaulich spricht Blum in diesem Zusammenhang auch von der sog. Grasfeuer-Transformation (engl.: grassfire transform), bei der die Kontur in Brand gesetzt wird und sich die Fronten des Grasfeuers über die Ebene ausbreiten, bis sie auf andere Fronten des Feuers treffen und die ganze Ebene abgebrannt ist.

In diesem Bild ist die Mediale Achse (MA) die Vereinigung aller Punkte der Ebene, in denen während der Ausbreitung der Wellenfronten Ecken in den Wellenfronten auftreten oder Wellenfronten aufeinander treffen. Die Mediale-Achse-Transformation ergibt sich, wenn in jedem Punkt der MA zusätzlich die verstrichene Zeit zwischen dem Start der Wellenfront und ihrer Ankunft im betrachteten Punkt betrachtet wird.

Definition über Äquidistanz-Kriterium

Eine alternative Definition ergibt sich durch die Betrachtung des minimalen Abstandes zwischen jedem Punkt der Ebene und der Kontur. Für die meisten Punkte der Ebene ist dieser minimale Abstand eindeutig bestimmt und gehört zu einem einzigen Punkt auf der Kontur. Für Punkte auf der MA ist der Minimalabstand hingegen nicht eindeutig einem Punkt auf der Kontur zugeordnet. Die Mediale Achse ist somit der geometrische Ort (engl. locus) aller Punkte, die zu mehr als einem Punkt auf der Kontur denselben minimalen Abstand aufweisen. Die MA stellt somit eine Art Symmetrielinie der Kontur dar, bzw. eine symmetrisch zentrale Beschreibung des durch die Kontur begrenzten Raums.

Begrifflichkeiten

Blum wählte in [Blum 67] den Begriff *Mediale-Achse-Transformation* als Bezeichnung für den Prozess der Ausbreitung der Wellenfronten, und den Begriff

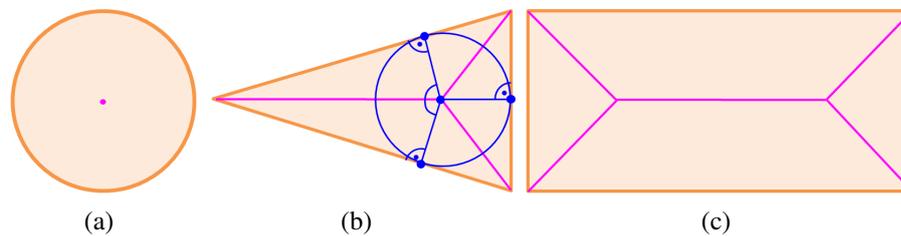


Abbildung 3.2: Die Mediale Achse einiger einfacher zweidimensionaler Formen, in lila eingezeichnet.

Mediale-Achse-Funktion (engl.: medial axis function) für das Ergebnis des Prozesses, also die Mediale Achse zusammen mit der jeweils benötigten Zeit bis zum Auftreten der Eckpunkte in den Wellenfronten bzw. bis zum Eintreffen der Wellenfronten an den Punkten der gegenseitigen Auslöschung. Der Begriff *Mediale-Achse-Funktion* ist heute weniger gebräuchlich. Stattdessen bezeichnet der Begriff *Mediale-Achse-Transformation* sowohl den Prozess als auch sein Ergebnis, wobei der Prozess selbst in den Hintergrund getreten ist.

Eigenschaften

Einige Beispiele für die zweidimensionale MA sind in Abbildung 3.2 zu sehen. Ein Kreis wird auf einen Punkt reduziert. Bei einem Dreieck bewegen sich die drei Ecken in der Wellenfront von den Ecken des Dreiecks aus zum Zentrum des Inkreises des Dreiecks, dem größten in das Dreieck einbeschreibbaren Kreis, wo sie aufeinander treffen. Die MA eines Rechtecks verzweigt sich an zwei Stellen. Allgemein werden zweidimensionale Formen ohne Löcher auf baumartige Strukturen reduziert. Jedes Loch im Raum bzw. in der Form wird durch einen Kreis im MA-Graph dargestellt. Somit werden topologische Eigenschaften der Form durch primitive Eigenschaften des MA-Graphen repräsentiert [Blum 67]. Die MA für dreidimensionale Objekte besteht aus zweidimensionalen Strukturen, den sog. Blättern (engl. sheets), die abhängig von der Objektform zu eindimensionalen oder nulldimensionalen Objekten (d.h. Linien oder Punkten) degenerieren können. Abbildung 3.3 zeigt Oberflächenmodelle einiger für die vorliegende Arbeit verwendeter Testobjekte zusammen mit ihrer jeweiligen Medialen Achse. Gut zu erkennen sind hier die zentrale Symmetrieebene bei dem Quader, sowie die zentrale Symmetrieachse bei dem Zylinder. Die MA wurde hier nach der Methode aus [Dey 03a] berechnet.

Bei konvexen Formen liegt die MA komplett im Inneren der Kontur. Bei nicht-

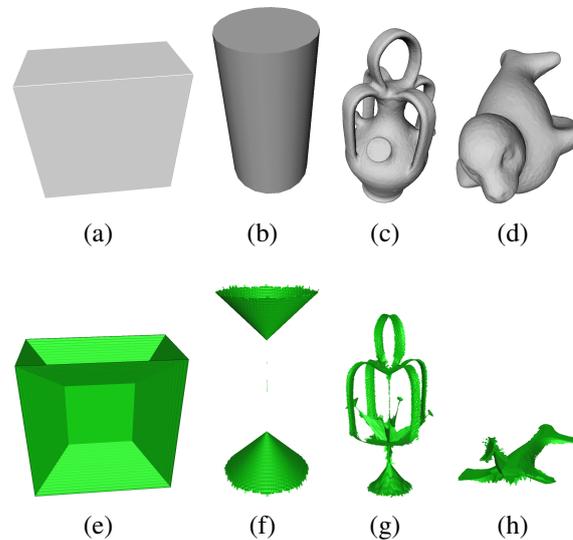


Abbildung 3.3: Zwei einfach geformte und zwei komplexe Objekte zusammen mit ihrer jeweiligen Medialen Achse.

konvexen Formen liegen Teile der MA auch außerhalb der Kontur, können aber bei Bedarf herausgefiltert werden [Dey 03b]. Die MAT ist nicht dimensionserhaltend, aber bijektiv. Die ursprüngliche MAT nach [Blum 67] ist nicht stabil. Hierauf wird in Abschnitt 3.2.2 gesondert eingegangen.

3.2.2 Berechnung und Stabilität der Mediale-Achse-Transformation

Exakte Berechnung

Die exakte Berechnung der MAT ist nur für eine beschränkte Klasse von Formen möglich. Für semi-algebraische Varietäten kann sie mit Methoden der Computeralgebra berechnet werden und ist in diesem Falle selbst auch wieder eine semi-algebraische Varietät [Attali 09]. Tatsächliche Implementierungen sind bisher beschränkt auf den planaren Fall, stückweise lineare Formen und Formen bestehend aus einer endlichen Anzahl von Kreisen bzw. Kugeln.

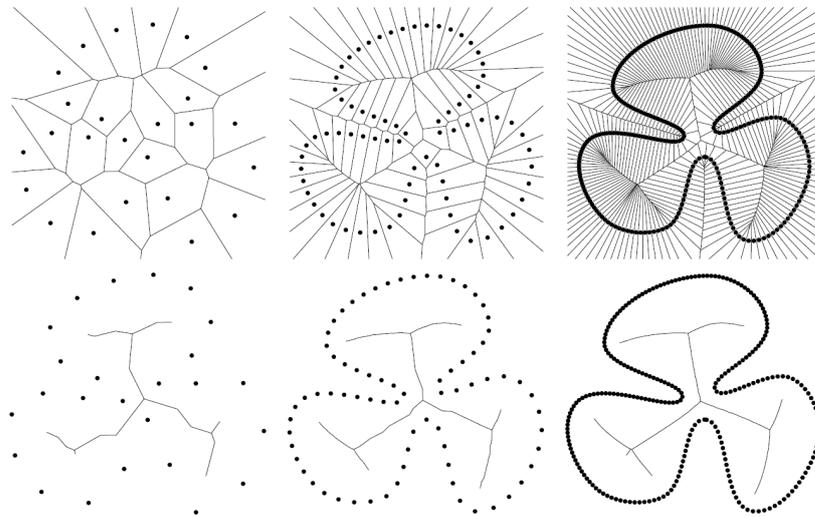


Abbildung 3.4: Obere Zeile: Voronoi-Graph einer gepunkteten zweidimensionalen Kontur. Untere Zeile: Approximation der Medialen Achse durch die vollständig innerhalb der Kontur liegenden Ecken und Kanten des Voronoi-Graphen. Nachdruck aus [Attali 96], ©1996 IEEE

Approximative Berechnung

Wegen der mit der exakten Berechnung der MAT verbundenen Schwierigkeiten sind allgemein Verfahren zur approximativen Berechnung der MAT weiter verbreitet. Für die näherungsweise Berechnung kann der Zusammenhang zwischen der MAT und dem Voronoi-Graph ausgenutzt werden. Für zweidimensionale Konturen kann die MA berechnet werden, indem zunächst der Voronoi-Graph eines ε -Samples der Kontur berechnet wird, d.h. eines Samples der Kontur, bei dem der Hausdorff-Abstand jedes Punktes zur Kontur kleiner als ε ist. Diejenigen Ecken und Kanten des Voronoi-Graphen, die komplett innerhalb der Kontur liegen, approximieren die Mediale Achse [Brandt 94] (siehe Abbildung 3.4). Leider sind diese Erkenntnisse nicht direkt auf den dreidimensionalen Raum übertragbar. Im Gegensatz zum zweidimensionalen Fall treten im dreidimensionalen Fall für beliebig kleine Werte von ε sog. Splitter (engl.: slivers) in der 3D Delaunay-Triangulation auf [Amenta 99], die nicht mit der Kontur in Zusammenhang stehen und die nicht in der Nähe der Medialen Achse liegen müssen. Um Abhilfe für dieses Problem zu schaffen, können beispielsweise selektiv Voronoi-Ecken eliminiert werden [Amenta 99], und durch Verbindung der verbleibenden Voronoi-Ecken (sog. Pole) mittels Simplexes der gewichteten Delaunay-Triangulation eine geometrische Struktur erzeugt werden, die die Mediale Achse approximiert

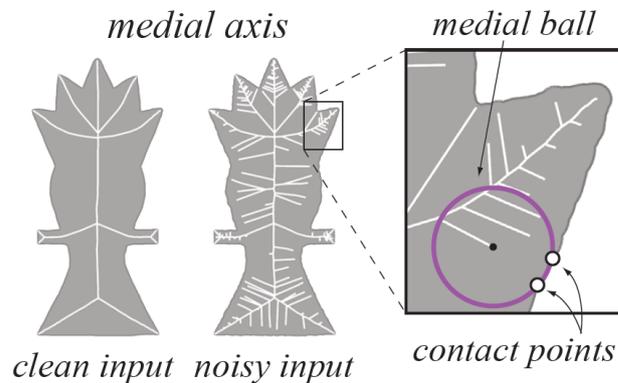


Abbildung 3.5: Links: Mediale Achse einer zweidimensionalen Kontur. Mitte und rechts: Ausbildung zusätzlicher Zweige bei verrauschten Eingabedaten. Nachdruck aus [Miklos 10], ©2010 ACM

[Amenta 01b]. Alternativ kann auch direkt ein Teilgraph des Voronoi-Graphen identifiziert werden, der die Mediale Achse approximiert [Dey 02],[Dey 04b].

Stabilität

Eine Eigenschaft der Mediale-Achse-Transformation, die in vielen Anwendungsgebieten zu Problemen führt, besteht in ihrer Instabilität. Kleine Veränderungen der Eingabekontur können zu großen Veränderungen in der zugehörigen MAT führen [Attali 09]. Dies ist insbesondere problematisch bei Rauschen auf dem Sampling der Oberfläche der Eingabekontur bzw. kleinen Veränderungen der Kontur, wie sie durch Approximation von Oberflächen durch Dreiecksnetze entstehen können. Diese führen für die Form an sich eher unwesentlichen Veränderungen führen im zweidimensionalen Fall zu zusätzlichen Zweigen (engl.: Branches) der MA (siehe Abbildung 3.5) und im dreidimensionalen Fall zu zusätzlichen Stacheln (engl.: Spikes). Die Auswirkungen des Rauschens betreffen jedoch nicht die komplette Struktur der MA, sondern nur Teile davon.

Durch Filterung der MA ist es möglich, eine stabile Teilmenge der MA zu identifizieren, welche nicht durch das Rauschen beeinflusst ist. Verbreitete Verfahren filtern die MA durch eine Bewertung, wie wichtig jeder Punkt der MA für die Kontur ist. Eine Möglichkeit besteht in der Bewertung nach dem Objektwinkel, d.h. dem eingeschlossenen Winkel zwischen zwei Vektoren vom Kugelmittelpunkt zu den nächstgelegenen Nachbar-Punkten auf der Kontur [Attali 96], [Amenta 01b], [Dey 04a]. Je kleiner der Objektwinkel einer medialen Kugel, desto weniger trägt diese zur Kontur bei. Alternativ kann eine Bewertung mit dem

Umkreisradius (engl.: circumradius) dieser Nachbarn erfolgen, was zum Konzept der λ -MA führt [Chazal 05]. Ein vollkommen anderer Ansatz besteht darin, zunächst die MAT der Kontur zu berechnen und die daraus resultierenden Kugeln zu vergrößern. Für die daraus resultierende neue Kontur kann nun in einem zweiten Schritt die MAT exakt berechnet werden. Diese wird mit einem Objektwinkel-Kriterium gefiltert und die Kugeln anschließend auf ihre Originalgröße zurückgeschumpft. Das Ergebnis ist eine vereinfachte MAT, die sogenannte *Scale Axis Transform* [Giesen 09],[Miklos 10], die von durch Rauschen induzierten Instabilitäten bereinigt ist.

3.3 Zusammenhang zwischen Mediale-Achse-Transformation und Greifplanung

Da die MAT eine kompakte Repräsentation von Formen und ihrer Konnektivität ermöglicht, hat sie viele unterschiedliche Anwendungsgebiete gefunden. Die Anwendungen in der Bildverarbeitung sind seit langer Zeit zahlreich; Übersichten hierzu sind in [Haralick 92],[Jähne 97],[Lam 92] zu finden. In der Robotik wurde die MAT für die Bewegungsplanung eingesetzt [Latombe 91]. Weitere Anwendungsgebiete umfassen die Vereinfachung von CAD-Modellen [Thakur 09], die Erzeugung von Werkzeug-Trajektorien in CAM [Held 01], das Routing in Sensor-Netzwerken [Bruck 07] und die Merkmalsextraktion beim geometrischen Design [Hisada 02]. Jedoch wurde nach bestem Wissen des Autors der vorliegenden Arbeit vor den Veröffentlichungen [Przybylski 10] und [Przybylski 11a] nicht versucht, die MAT für die Greifplanung zu nutzen.

3.3.1 Greifplanung als Problem von Objektsymmetrieeigenschaften und lokaler Dicke

Im Folgenden soll kurz der Zusammenhang zwischen der MAT, dem Teilebasierten Greifen und dem Oppositionsprinzip (engl.: Opposition space) dargestellt werden, der begründet, warum die MAT ein sehr geeignetes Werkzeug für die Greifplanung darstellt. Zunächst ist festzuhalten, dass alle drei Konzepte durch Vorbilder in der Natur motiviert sind. Das Problem der Formsegmentierung in der Bildverarbeitung bei biologischen Systemen hat (siehe Abschnitt 3.2.1) zur Entwicklung der MAT geführt. Das Konzept des Teilebasierten Greifens ist aus

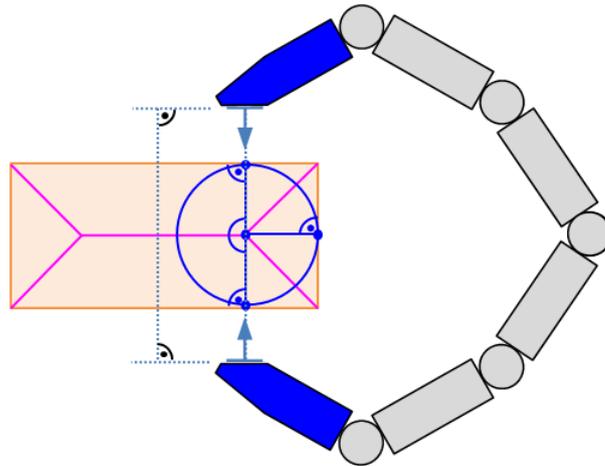


Abbildung 3.6: Der Zusammenhang zwischen Mediale-Achse-Transformation, Oppositionsprinzip und Greifplanung: Der von der Hand anzufahrende Anrückpunkt am bzw. im Objekt muss *zwischen* möglichen Kontaktpunkten der Finger mit dem Objekt liegen und die lokale Dicke des Objektes (d.h. der Kugeldurchmesser) muss kleiner als der Abstand zwischen zwei Fingern bei geöffneter Hand sein.

der Einsicht entstanden, dass Menschen Objekte in ihrer Umwelt als Kombinationen einfacher Formen wahrnehmen (siehe Abschnitt 2.6). Das Oppositionsprinzip (siehe Abschnitt 2.1.3) wurde durch die Beobachtung entdeckt, dass Menschen Objekte durch Einklemmen zwischen mindestens zwei virtuellen Fingern greifen. Dieses *Einklemmen* hat zwar mechanische Gründe (siehe Abschnitt 4.2.1), nämlich das Erzielen von Kraftschluss, führt aber auf ein geometrisches Symmetrieproblem: Der von der Hand anzufahrende Anrückpunkt am bzw. im Objekt muss zwingend *zwischen* möglichen Kontaktpunkten der Finger mit dem Objekt liegen (siehe Abbildung 3.6). Viele mögliche Anrückpunkte mit diesen Eigenschaften sind Teil der MA. Zusätzlich muss der Abstand zwischen diesen angestrebten Kontaktpunkten kleiner sein als der Abstand zwischen zwei Fingern bei geöffneter Hand, damit die Finger das Objekt auf entgegengesetzten (engl.: opposing) Seiten berühren können. Diese Information – die lokale Dicke des Objektes – ist über die Radien der medialen Kugeln direkt in der MAT enthalten.

3.3.2 Reduktion des Greifens auf das Greifen einzelner medialer Kugeln

Die MAT erlaubt eine alternative Betrachtung des Greifens. Eine einzelne Kugel kann gegriffen werden, indem die Hand in Richtung des Kugelmittelpunkts bewegt wird, bis Kontakt auftritt, und die Finger anschließend um die Kugel herum geschlossen werden. Ob eine einzelne Kugel mit einer gegebenen Hand gegriffen werden kann, hängt nur vom Kugeldurchmesser ab.

Die MAT erlaubt es, beliebig geformte Objekte durch mediale Kugeln darzustellen und das Greifen nahezu beliebig geformter Objekte auf das Greifen einzelner medialer Kugeln zu reduzieren.

Zusätzlich für die Greifplanung nötige Informationen wie die Anrückrichtung der Hand und die Handorientierung ergeben sich dann aus der räumlichen Beziehung einer zu greifenden medialen Kugel zu den medialen Kugeln in ihrer Umgebung. Hierauf wird in Kapitel 4 detailliert eingegangen.

3.3.3 Die Rolle der Datenstruktur

Die MAT enthält also für die Greifplanung wertvolle Informationen über die Form eines Objektes. Die Hauptaufgabe einer Datenstruktur für das Teilebasierte Greifen besteht nun darin, die Informationen der MAT in solcher Weise zu organisieren, dass für den Greifplaner ein effizienter Zugriff auf lokale Umgebungen beliebiger medialer Kugeln möglich ist, um Aussagen über die Struktur des Objektes an dieser Stelle machen zu können. Zu diesem Zweck wird im nächsten Abschnitt das Gitter medialer Kugeln vorgestellt.

3.4 Das Gitter medialer Kugeln

Für den später in Kapitel 4 vorgestellten Greifplanungsalgorithmus wird eine diskretisierte Version der MAT verwendet. Das Grundelement der diskretisierten MAT ist die *mediale Kugel*. Eine mediale Kugel ist ein 4-Tupel

$$s = (X, r, p_s, \alpha_o), \quad (3.1)$$

bestehend aus den folgenden vier Elementen:

- X bezeichnet die Position des Kugelmittelpunktes in kartesischen Koordinaten.
- r bezeichnet den Kugelradius.
- p_s bezeichnet die Punkte, an denen die Kugel die Objektoberfläche berührt.
- Der Objektwinkel (engl. object angle) α_o [Miklos 10] bezeichnet den größten Winkel, der durch zwei Vektoren eingeschlossen wird, die den Kugelmittelpunkt mit zwei unterschiedlichen nächsten Oberflächenpunkten p_{s_i} and p_{s_j} verbindet, an denen die Kugel die Objektoberfläche berührt. Je nach Autor werden für den Objektwinkel auch andere Bezeichnungen verwendet, etwa *medial angle* [Dey 04a], *solid angle* [Amenta 01a], *separation angle* ([Foskey 03],[Sud 05]), *bisector angle* [Attali 96], wobei in einigen Fällen auch nur die Hälfte des größten eingeschlossenen Winkels als Objektwinkel bezeichnet wird.

Um lokale Eigenschaften der Objektform für die Greifplanung ausnutzen zu können, ist es nötig, effizient auf lokale Teile der Objektform zugreifen zu können, woraus sich ein Suchproblem ergibt. Eine bekannte Standarddatenstruktur für die Suche in mehrdimensionalen Räumen ist der kd-Baum, in dem die Suche nach dem nächsten Nachbarn mit einer durchschnittlichen Laufzeit von $O(\log n)$ möglich ist [Bentley 75]. Wenn man jedoch von einer ungefähr gleichmäßigen Verteilung der Punkte im Suchraum ausgeht, kann der nächste Nachbar zu einem Anfragepunkt bei Verwendung einer geeigneten zellrasterbasierten Datenstruktur sogar in durchschnittlich konstanter erwarteter Zeit $O(1)$ gefunden werden, wie in [Bentley 80] gezeigt wurde. Der in der vorliegenden Arbeit verwendete Ansatz basiert auf den Ergebnissen von [Bentley 80]. Der Grundgedanke der zellrasterbasierten Datenstruktur besteht darin, alle n Punkte in einer dreidimensionalen kartesischen Gitterstruktur vorzuhalten, wobei der Index der Gitterzelle, in der ein Punkt abgelegt wird, sich direkt aus seinen kartesischen Koordinaten errechnet. Im Gegensatz zu Baumstrukturen entfällt hierdurch die Suche im Baum mit $O(\log n)$, da der Index der jeweiligen Gitterzelle in $O(1)$ berechnet werden kann. Zur Bestimmung des nächsten Nachbarn eines Anfragepunktes müssen dann nur die in der Gitterzelle liegenden Punkte und gegebenenfalls zusätzlich benachbarte Gitterzellen mit den darin enthaltenen Punkten betrachtet werden.

3.4.1 Aufbau und Dimensionierung des Gitters

Der Grundgedanke von Bentley [Bentley 80] ist, ein Gitter mit $N \approx \frac{n}{C}$ Zellen anzulegen, weil dies den besten durchschnittlichen Aufwand für den Zugriff verspricht, wobei n die Anzahl der Punkte in der Punktwolke (im vorliegenden Fall die medialen Kugeln der MAT) und C die sogenannte Zelldichte bezeichnet, d.h. die durchschnittliche Anzahl Punkte pro Gitterzelle. Bentley [Bentley 80] verwendete in seiner Arbeit ein Gitter der Größe $N = \sqrt[2]{\frac{n}{C}} \times \sqrt[2]{\frac{n}{C}}$ Zellen für eine zweidimensionale Punktwolke. Um für beliebige Werte von n ganzzahlige Zellanzahlen zu erreichen, ist es sinnvoll, die Zellanzahlen aufzurunden. Somit ergibt sich ein Gitter der Größe

$$N = \lceil \sqrt[2]{\frac{n}{C}} \rceil \times \lceil \sqrt[2]{\frac{n}{C}} \rceil \quad (3.2)$$

Zellen.

Gitter für einen Würfel

Analog ergibt sich im dreidimensionalen Raum somit ein Gitter mit

$$N = \lceil \sqrt[3]{\frac{n}{C}} \rceil \times \lceil \sqrt[3]{\frac{n}{C}} \rceil \times \lceil \sqrt[3]{\frac{n}{C}} \rceil \quad (3.3)$$

Zellen. Bei einem Würfel der Seitenlänge a ergibt sich die Zellanzahl $N_a = N_x = N_y = N_z$ pro Gitterdimension durch die Formel

$$N_a = \lceil \sqrt[3]{\frac{n}{C}} \rceil. \quad (3.4)$$

Die Zellbreite δ hängt von der Seitenlänge a des Würfels ab und ergibt sich durch die Formel

$$\delta = \frac{a}{N_a}. \quad (3.5)$$

Gitter für einen Quader

Im Falle der vorliegenden Arbeit liegen die Kugelmittelpunkte, auf die effizient zugegriffen werden können soll, jedoch in einem Quader, dessen Seitenlängen a_1, a_2, a_3 im Gegensatz zu einem Würfel nicht notwendigerweise gleich sind. Bei Verwendung der Formeln 3.3 und 3.4 für jede einzelne Kante des Quaders würden

sich somit quaderförmige Zellen ergeben. Um nun euklidische Abstandsberechnungen auf dem Gitter zu ermöglichen, sollten die einzelnen Gitterzellen jedoch würfelförmig sein, was bei einem Quader zu unterschiedlichen Zellanzahlen je Dimension führt. Ein einfacher Ansatz zur Lösung dieses Problems besteht darin, zunächst nur die Zellanzahl N_1 für eine Kante des Quaders (und somit Dimension des Gitters) mit der Formel

$$N_1 = \lceil \sqrt[3]{\frac{n}{C}} \rceil \quad (3.6)$$

zu berechnen, und darauf die Zellbreite mittels Formel 3.5 zu bestimmen. Die Zellanzahlen für die beiden verbleibenden Dimensionen des Gitters ergeben sich dann zu

$$N_2 = \frac{a_2}{\delta}, \quad N_3 = \frac{a_3}{\delta}. \quad (3.7)$$

Zellanzahlen für Quader mit sehr unterschiedlichen Kantenlängen

Wegen der potentiell sehr unterschiedlichen Kantenlängen eines Quaders im Gegensatz zu einem Würfel hängt die resultierende Gesamtzahl der Zellen im Gitter sehr davon ab, welche Quaderkante zur Bestimmung der Zellbreite mit Hilfe der Formeln 3.6 und 3.5 verwendet wird. Der hier betrachtete allgemeine Quader ist an den Koordinatenachsen ausgerichtet und soll die Kantenlängen a_x, a_y, a_z mit

$$a_x = x_{max} - x_{min} \quad (3.8)$$

$$a_y = y_{max} - y_{min} \quad (3.9)$$

$$a_z = z_{max} - z_{min} \quad (3.10)$$

haben. Hierbei beschreiben die Parameter $(x_{min}, y_{min}, z_{min})$ die minimalen und $(x_{max}, y_{max}, z_{max})$ die maximalen vorkommenden Koordinaten der Punkte in der betrachteten Punktwolke, wodurch sich die Eckpunkte des Quaders ergeben. Seien nun a_{max} die längste Quaderkante und N_{max} dementsprechend die Zellanzahl entlang a_{max} . Wird zur Bestimmung der Zellanzahl N_1 der ersten Quaderkante und der Zellbreite δ über die Formeln 3.4 (bzw. 3.6) und 3.5 die längste Quaderkante a_{max} verwendet, also $N_1 = N_{max}$ berechnet und entsprechend in Formel 3.5 $a = a_{max} = \max(a_x, a_y, a_z)$ gewählt, werden oft statt der angestrebten Zellanzahl von $N \approx \frac{n}{C}$ deutlich zu viele Zellen ($N \gg \frac{n}{C}$) generiert, bei Verwendung der kürzesten Quaderkante $a_{min} = \min(a_x, a_y, a_z)$ dagegen deutlich zu wenige ($N \ll \frac{n}{C}$). Dies kann sich nachteilig auf den erwarteten Aufwand für Zugriff und Suche auswirken:

- Im Falle zu vieler kleiner Zellen müssen unnötig viele Zellen betrachtet werden.
- Im Falle zu weniger großer Zellen müssen unnötig viele Abstände zwischen Startpunkt und in den Zellen enthaltenen Kugelmittelpunkten berechnet werden.

Auch die Verwendung der mittleren Quaderkante a_{mid} verspricht im Allgemeinen keine Abhilfe, da in manchen Fällen $a_{mid} \approx a_{max}$ gilt, in anderen hingegen $a_{mid} \approx a_{min}$. Eine praktikable Lösung besteht darin, das Verhältnis k zwischen längster und kürzester Kantenlänge des Quaders in die Berechnung der Zellanzahl und Zellbreite einfließen zu lassen:

$$k = \frac{a_{max}}{a_{min}} = \frac{\max(a_x, a_y, a_z)}{\min(a_x, a_y, a_z)} \quad (3.11)$$

Die Zellanzahl für die längste Quaderseite a_{max} kann dann mit der Formel

$$N_{max} = \lceil \sqrt[3]{\frac{kn}{C}} \rceil \quad (3.12)$$

berechnet werden. Die Zellbreite und die Zellanzahlen für die verbleibenden beiden Quaderkanten ergeben sich unverändert über die Formel 3.5 und 3.7. Auf diese Weise kann eine Gesamtzellanzahl N mit $N \approx \frac{n}{C}$ im Gitter erreicht werden, auch bei deutlichen Unterschieden zwischen kürzester und längster Quaderkante.

3.4.2 Einsortieren der Kugeln in das Gitter

Um die Gitterstruktur mit den medialen Kugeln zu füllen, werden diese abhängig von ihren kartesischen Koordinaten in das Gitter einsortiert. Hierzu wird für jede Kugel s mit folgender Formel der dreidimensionale Index (i_x, i_y, i_z) derjenigen Gitterzelle c berechnet, in der s abgelegt werden soll:

$$\begin{pmatrix} i_x \\ i_y \\ i_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lfloor N_x(x - x_{min}) / (x_{max} - x_{min}) \rfloor \\ \lfloor N_y(y - y_{min}) / (y_{max} - y_{min}) \rfloor \\ \lfloor N_z(z - z_{min}) / (z_{max} - z_{min}) \rfloor \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

Hierbei steht (x, y, z) für die Koordinaten des Mittelpunktes X der Kugel s . Da die Indexberechnung in Formel 3.13 in $O(1)$ erfolgt und jede Kugel einmal betrachtet wird, ist das Einsortieren aller n Kugeln in $O(n)$ möglich. Die Anzahl der Gitterzellen entlang der jeweiligen Koordinatenachse ist mit N_x, N_y, N_z bezeichnet.

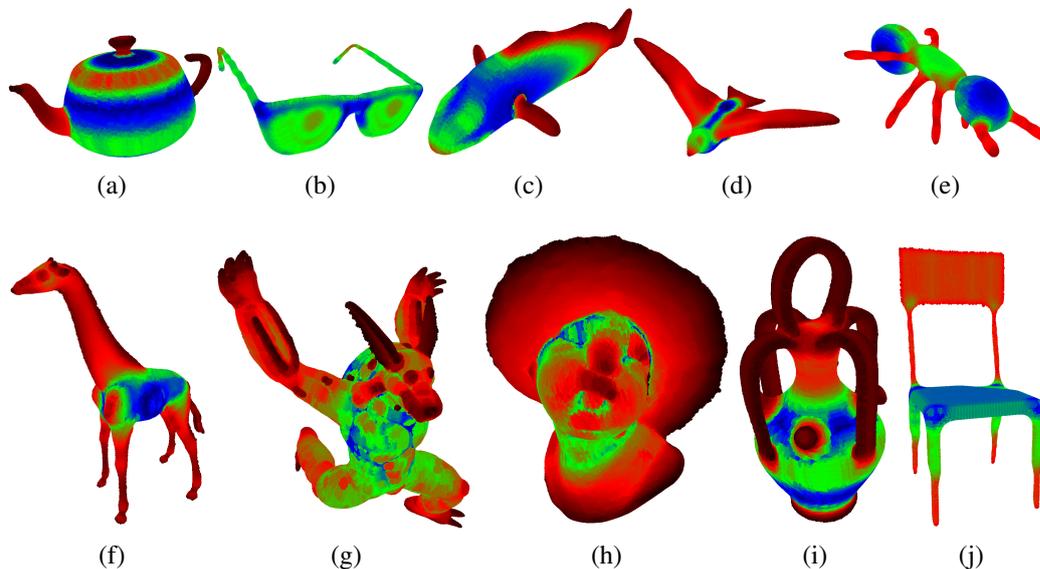


Abbildung 3.7: Das Gitter medialer Kugeln für einige in dieser Arbeit verwendete Testobjekte aus dem *Chen mesh segmentation benchmark* [Chen 09]. Die Kugeln sind abhängig von ihrer Größe eingefärbt, von dunkelrot für die kleinsten Kugeln über grün bis dunkelblau für die größten Kugeln. Abbildungen (b) bis (e) sind Nachdrucke aus [Przybylski 11a], Abbildung (i) ist ein Nachdruck aus [Vahrenkamp 11], ©2011 IEEE

Die Parameter $x_{min}, y_{min}, z_{min}$ stehen, wie bereits beschrieben, für die minimalen Koordinaten, $x_{max}, y_{max}, z_{max}$ für die maximalen Koordinaten eines an den Koordinatenachsen ausgerichteten minimal-umgebenden Quaders, welcher die aus den Mittelpunkten der medialen Kugeln bestehende Punktwolke enthält.

Die Abbildungen 3.7 und 3.8 zeigen das Gitter medialer Kugeln für einige in der vorliegenden Arbeit verwendete Testobjekte.

3.4.3 Nachbarschaftszugriff

Mit Hilfe der resultierenden dreidimensionalen Gitterstruktur kann nun effizient auf eine lokale Umgebung um eine Anfragekugel s zugegriffen werden. Für den in Kapitel 4 beschriebenen Greifplanungsalgorithmus ist vor allem wichtig, alle benachbarten Kugeln in einer kugelförmigen lokalen Umgebung N vom Suchradius r_N um die Anfragekugel s herum zu bestimmen.

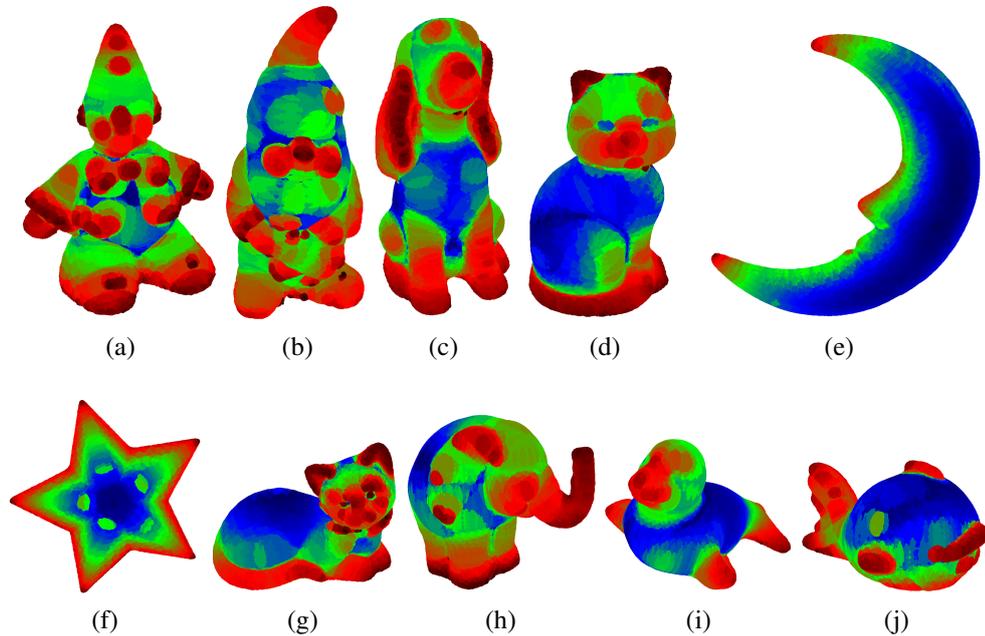


Abbildung 3.8: Das Gitter medialer Kugeln für einige digitalisierte Testobjekte aus Styropor. Die Kugeln sind abhängig von ihrer Größe eingefärbt, von dunkelrot für die kleinsten Kugeln über grün bis dunkelblau für die größten Kugeln. Abbildungen (a) bis (c) sind Nachdrucke aus [Przybylski 11a], ©2011 IEEE

Der Zugriff gliedert sich in folgende Schritte: Die Bestimmung der zu betrachtenden Gitterzellen, der Zugriff auf die Kugeln in diesen Gitterzellen, und der abschließende Test, ob die Kugeln innerhalb der kugelförmigen Umgebung liegen.

Zunächst wird für die Anfragekugel s über Formel 3.13 der Index (i_x, i_y, i_z) derjenigen Gitterzelle c berechnet, in der s liegt. Über den Suchradius r_N und die Zellbreite δ kann der Suchradius in Gitterzellen r_{cu} berechnet werden:

$$r_{cu} = \lceil \frac{r_N}{\delta} \rceil. \quad (3.14)$$

Die Menge aller von der Suchanfrage betroffenen Zellindizes J_{cubes} ergibt sich dann zu

$$J = [i_x - r_{cu}, i_x + r_{cu}] \times [i_y - r_{cu}, i_y + r_{cu}] \times [i_z - r_{cu}, i_z + r_{cu}]. \quad (3.15)$$

Indem die Kugeln aus allen Gitterzellen mit Indizes $(j_x, j_y, j_z) \in J_{cubes}$ aus dem Gitter G geholt werden, ergibt sich die Menge S_{cu} aller Kugeln in einer würfelförmigen Umgebung um s . Die Menge S_{r_N} aller Kugeln in einer kugelförmigen

Umgebung N um s ergibt sich, indem alle $s_{cu} \in S_{cu}$ auf ihren euklidischen Abstand d zur Anfragekugel s getestet werden:

$$S_{r_N} = \{s_{cu} \in S_{cu} | d(s, s_{cu}) \leq r_N\} \quad (3.16)$$

Die Berechnung der Indizes der zu betrachtenden Gitterzellen kann in $O(1)$ erfolgen, die Bestimmung von S_{r_N} in $O(|J| + |S_{cu}|)$, also linear in Abhängigkeit von der Anzahl der zu betrachtenden Gitterzellen J und der Menge der darin enthaltenen Kugeln $s_{cu} \in S_{cu}$, jedoch unabhängig von der Gesamtzahl n der im Gitter G enthaltenen Kugeln.

3.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde das Gitter medialer Kugeln eingeführt, eine Objektrepräsentation für die Greifplanung im Sinne des Teilebasierten Greifens. Das Gitter medialer Kugeln basiert auf der Mediale-Achse-Transformation [Blum 67], einem vollständigen Formdeskriptor, der beliebige Formen mit beliebiger Genauigkeit beschreiben kann. Die Mediale-Achse-Transformation eignet sich in besonderer Weise für das Teilebasierte Greifen, da sie für die Greifplanung relevante Informationen wie mögliche Anrückpunkte für die Hand und lokale Dicke des Objektes direkt enthält. Das Gitter medialer Kugeln organisiert die Mediale-Achse-Transformation in einer Datenstruktur, die den effizienten Zugriff auf mediale Kugeln und deren lokale Umgebung ermöglicht.

Im nächsten Kapitel wird ein Verfahren zur Greifplanung beschrieben, welches auf dem Gitter medialer Kugeln basiert und dessen Eigenschaften ausnutzt.

Kapitel 4

Greifplanung auf dem Gitter medialer Kugeln

In diesem Kapitel wird ein Greifplanungsverfahren vorgestellt, das auf der in Kapitel 3 vorgestellten Objektrepräsentation – dem Gitter medialer Kugeln – basiert. Abschnitt 4.1 beschreibt kurz die Grundidee des Verfahrens und gibt einen Überblick. Abschnitt 4.2 erklärt, welche medialen Kugeln für die Greifplanung von besonderem Interesse sind und welche Eigenschaften diese besitzen. Abschnitt 4.3 zeigt, wie mittels Hauptkomponentenanalyse lokale Symmetrieeigenschaften eines Objektes aus dem Gitter medialer Kugeln extrahiert werden können, die anschließend in Abschnitt 4.4 zur Erzeugung von Griffkandidaten dienen. Ab Abschnitt 4.5 wird beschrieben, wie aus diesen Griffkandidaten Kraftschlussgriffe berechnet werden können, wobei in Abschnitt 4.6 eine Methode für Kraftgriffe und in Abschnitt 4.7 eine Methode für Präzisionsgriffe vorgestellt wird. Abschnitt 4.8 schließt das Kapitel mit einer kurzen Zusammenfassung ab.

4.1 Grundidee und Überblick

Die Grundidee des im Folgenden beschriebenen Ansatzes zur Greifplanung kann wie folgt beschrieben werden:

- Wenn ein Objekt eine lokale Symmetrieebene besitzt, dann soll es dort in solcher Weise gegriffen werden, dass der Daumen auf der einen Seite und die anderen Finger auf der anderen Seite dieser Symmetrieebene das Objekt berühren und somit das Objekt zwischen diesen beiden opponierenden virtuellen Fingern eingeklemmt wird (siehe Abbildung 4.1a, 4.1b).

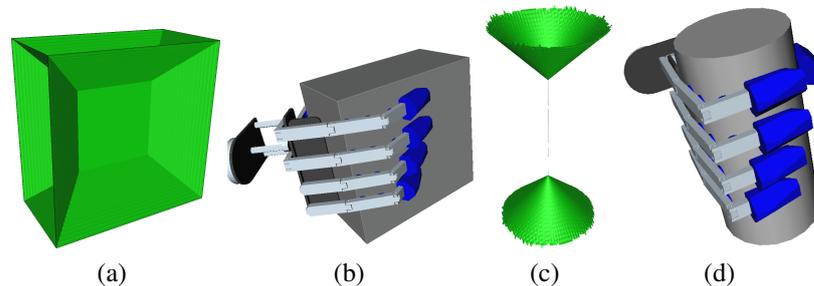


Abbildung 4.1: Grundidee des Greifplanungsverfahrens: Die Symmetrieebene eines Objektes soll zwischen Daumen und restlichen Fingern eingeklemmt werden (a),(b). Bei Objekten mit einer Symmetrieachse soll diese durch die Finger umschlossen werden (c),(d). Nachdruck aus [Przybylski 10], ©2010 IEEE

- Wenn ein Objekt eine lokale Symmetrieachse besitzt, dann soll es dort in solcher Weise gegriffen werden, dass Daumen und Finger der Hand beim Griff diese Symmetrieachse umschließen (siehe Abbildung 4.1c, 4.1d).

Durch Auswertung der in der Mediale-Achse-Transformation enthaltenen Informationen kann diese Grundidee verallgemeinert und auf nahezu beliebig geformte Objekte angewandt werden (siehe [Przybylski 11a]), wie im Rest dieses Kapitels beschrieben wird.

Der in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Algorithmus zur Greifplanung besteht aus den folgenden Schritten (siehe Abbildung 4.2): Zunächst werden diejenigen medialen Kugeln im Gitter ausgewählt, die für die Greifplanung verwendet/betrachtet werden sollen. Anschließend werden die Symmetrieeigenschaften lokaler Umgebungen um diese Kugeln analysiert und darauf basierend Griffkandidaten generiert. Im letzten Schritt wird für jeden Griffkandidaten die endgültige Pose und Gelenkkonfiguration der Hand bestimmt sowie ein Test auf Kraftschluss durchgeführt.

4.2 Auswahl relevanter Kugeln für die Greifplanung

Wie bereits weiter oben beschrieben, besteht die für das Greifplanungsverfahren verwendete Objektrepräsentation aus einem dreidimensionalen Gitter in das Objekt einbeschriebener medialer Kugeln, die die Form des Objektes mit allen De-

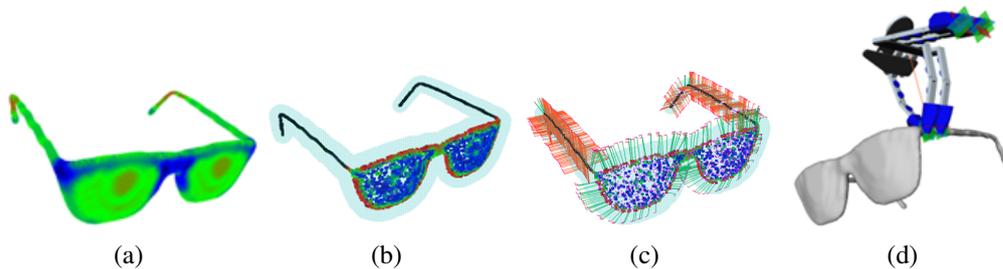


Abbildung 4.2: Überblick über die einzelnen Schritte des Algorithmus zur Greifplanung. Gitter medialer Kugeln, basierend auf der Mediale-Achse-Transformation; Kugeln eingefärbt abhängig von ihrem Radius (a), Analyse lokaler Symmetrieeigenschaften des Objektes (b), auf Basis der Symmetrieanalyse generierte Griffkandidaten (c), ein resultierender Kräftechlussgriff (d). Abbildungen (a) und (c) sind Nachdrucke aus [Przybylski 11a], ©2011 IEEE

tails beschreiben. Die einzelnen einbeschriebenen Kugeln tragen jedoch in unterschiedlicher Weise zur Form des Objektes bei, und nicht alle diese Kugeln sind in gleichem Maße relevant für die Greifplanung. Die Relevanz der einzelnen Kugeln für das Greifen hängt wesentlich von zwei Parametern ab, dem Objektwinkel α_o und dem Kugelradius r . Die Bedeutung dieser beiden Parameter soll im Folgenden näher betrachtet werden.

4.2.1 Mechanische Betrachtungen zum Objektwinkel

Gemäß dem Konzept des Oppositionsraums (engl.: opposition space) ([Iberall 86],[Iberall 97]) besteht eine sehr grundlegende Klasse von Griffen aus solchen Griffen, bei denen das Objekt zwischen zwei virtuellen Fingern eingeklemmt wird, die das Objekt auf entgegengesetzten Seiten berühren. Eine mechanische Erklärung, warum diese Griffe funktionieren, liefert die Kräftechluss Theorie ([Murray 94], [Ferrari 92]), welche, basierend auf einem Kontaktmodell und den Kontakten zwischen Objekt und Hand, vorhersagt, ob und in welchem Maße ein Griff extern angreifenden Kräften widerstehen kann.

Während die Methoden der Kräftechluss Theorie für beliebige Anzahlen von Kontakten funktionieren, bildet der Fall von nur zwei Kontakten zwischen Objekt und Hand einen interessanten Sonderfall, da er die Untersuchung der einfachsten denkbaren Griffe und ihrer Voraussetzungen ermöglicht. Im Folgenden soll gezeigt werden, dass ein Zusammenhang zwischen der Kräftechlussbedingung für

einen Griff mit zwei Kontakten und dem Objektwinkel einer medialen Kugel besteht.

Die Normalkraft, die auf ein Objekt an einem Punkt seiner Oberfläche aufgebracht werden kann, ist abhängig vom Haftreibungskoeffizienten der sich berührenden Oberflächen. Der Reibungskegel an einem Punkt der Objekt Oberfläche beschreibt, in welchem Maße der Kraftvektor von der Oberflächennormale abweichen kann, sodass trotz dieser Abweichung noch eine Normalkraft am betrachteten Oberflächenpunkt aufgebracht werden kann. Je größer der Haftreibungskoeffizient, desto größer ist die mögliche Abweichung und somit die Breite des Reibungskegels. Gemäß Nguyen [Nguyen 88] ist ein *planarer antipodischer Griff* (engl. planar antipodal grasp) unter Verwendung eines Punktkontaktmodells mit Coulomb-Reibung genau dann ein Kraftschlussgriff, wenn die Gerade, welche die beiden Kontaktpunkte verbindet, innerhalb beider Reibungskegel liegt. Nguyen [Nguyen 88] präsentiert ebenfalls einen entsprechenden Satz für *räumliche antipodische Griffe* (engl. spatial antipodal grasps) unter Annahme zweier entgegengesetzt orientierter Kontakte in einem Weichgewebekontaktmodell (engl. soft-finger contact model).

Im Folgenden soll der zweidimensionale Fall eines Griffes mit zwei Kontakten betrachtet werden, um Rückschlüsse auf Mindestvoraussetzungen für einen Kraftschlussgriff zu erlauben, welche wiederum bei der Ableitung von Heuristiken für das Generieren von Griffkandidaten verwendet werden können.

Die Orientierung eines Reibungskegels hängt von der Oberflächennormale des Objektes an der Stelle des Kontaktes ab. Der Öffnungswinkel eines Reibungskegels hängt vom Haftreibungskoeffizienten zwischen den beiden sich berührenden Oberflächen ab [Murray 94]. Wenn β den halben Öffnungswinkel des Kegels bezeichnet, gilt nach [Murray 94] für den Zusammenhang zum Haftreibungskoeffizienten μ_s folgende Formel:

$$\tan \beta = \mu_s \quad (4.1)$$

Der Haftreibungskoeffizient hängt wiederum vom Material der beiden Körper ab. Analog zur Kontaktnormalen eines Reibungskegels stehen auch die Vektoren, die den Mittelpunkt einer medialen Kugel mit den Punkten verbindet, an denen die Kugel die Objekt Oberfläche berührt, an diesen Punkten senkrecht zur Objekt Oberfläche.

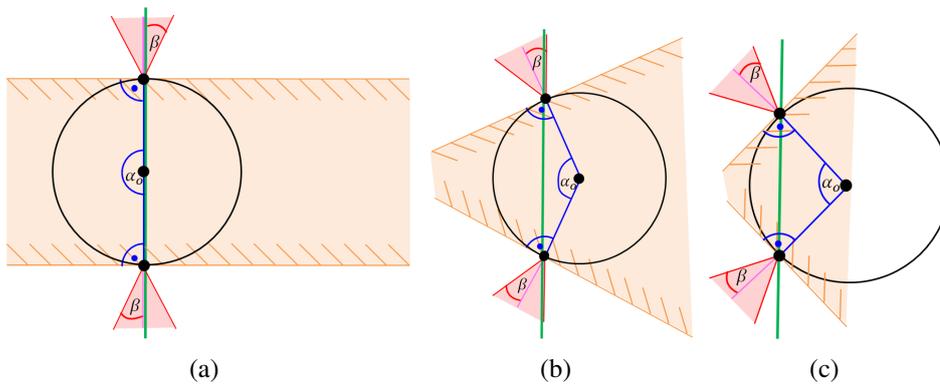


Abbildung 4.3: Die Beziehung zwischen der Kraftschlussbedingung eines antipodischen Zweifingergriffes und dem Objektwinkel einer medialen Kugel. Im Falle eines Kraftgriffes verläuft die grüne Gerade, welche die beiden Kontaktpunkte miteinander verbindet, innerhalb beider Reibungskegel (a). Der Grenzfall, in dem die Verbindungsgerade auf der Oberfläche der Reibungskegel verläuft (b). Ein Beispiel, in dem die Verbindungsgerade außerhalb der Reibungskegel verläuft (c). Die Kontaktkonfigurationen in (b) und (c) führen nicht zu Kraftschlussgriffen.

Zusammenhang zwischen der Kraftschlussbedingung für antipodische Zweifingergriffe und dem Objektwinkel einer medialen Kugel

Nimmt man Kontakte zwischen zwei Fingern und der Objektoberfläche genau an den Punkten an, an denen eine mediale Kugel die Objektoberfläche berührt, lässt sich eine Beziehung zwischen dem Haftreibungskoeffizienten μ_s und dem Objektwinkel α_o ableiten. Abbildung 4.3a zeigt einen Kraftschlussgriff mit $\alpha_o = 180^\circ$. In diesem Fall verläuft die Gerade, welche die beiden Kontaktpunkte verbindet, innerhalb der beiden Reibungskegel. Abbildung 4.3b zeigt ein Beispiel, in dem die Verbindungslinie auf der Oberfläche der Reibungskegel verläuft. Abbildung 4.3c zeigt einen Fall, bei dem die Verbindungslinie außerhalb der Reibungskegel verläuft. Die Kontaktkonfigurationen in den Abbildungen 4.3b und 4.3c führen nicht zu Kraftschlussgriffen.

Sei β der halbe Öffnungswinkel der Reibungskegel in den Abbildungen 4.3a bis Fig. 4.3c. Aus Abbildung 4.3b kann dann abgeleitet werden, dass für einen antipodischen Zweifingerkraftschlussgriff die folgende Bedingung erfüllt sein muss, weil anderenfalls die Verbindungslinie zwischen den beiden Kontaktpunkten nicht innerhalb der beiden Reibungskegel verläuft:

$$\alpha_o + 2\beta > \pi \quad (4.2)$$

Tabelle 4.1: Haftreibungszahlen für unterschiedliche Materialpaare, entnommen aus [Murray94].

Materialpaar	Haftreibungskoeffizient
Stahl auf Stahl	0,58
Polyethylen auf Stahl	0,3-0,35
Polyethylen auf Polyethylen	0,5
Gummi auf Feststoffen	1-4
Holz auf Holz	0,25-0,5
Holz auf Metallen	0,2-0,6
Holz auf Leder	0,3-0,4
Leder auf Metallen	0,6

Aus den Gleichungen (4.1) und (4.2) folgt, dass der minimale Objektwinkel $\alpha_{o,min}$ für einen planaren antipodischen Kraftschlussgriff mit zwei Kontakten durch

$$\alpha_{o,min} > \pi - 2 \arctan \mu_s \quad (4.3)$$

oder, bei Angabe der Winkel in Grad, durch

$$\alpha_{o,min} > \frac{180^\circ}{\pi} (\pi - 2 \arctan \mu_s) \quad (4.4)$$

gegeben ist. Aus Gleichung (4.4) kann geschlossen werden, dass es bei Zweifingerkraftschlussgriffen eine untere Schranke für den Objektwinkel gibt, der vom Haftreibungskoeffizienten μ_s und somit von den Materialien der Fingerspitze und des Objektes abhängt. Je größer der Wert des Haftreibungskoeffizienten μ_s , desto kleiner kann der Wert des Objektwinkels α_o sein, ohne dass die Kraftschlussbedingung verletzt wird.

Tabelle 4.1 zeigt die Haftreibungskoeffizienten für einige Materialpaare, entnommen aus [Murray 94]. Nimmt man etwa eine Kombination aus gummibeschichteten Fingerspitzen und einem metallischen Objekt mit $\mu_s = 1.0$ an, würde dies in einem minimalen Objektwinkel $\alpha_{o,min} = 90^\circ$ resultieren, um einen (planaren antipodischen) Kraftschlussgriff mit zwei Fingern zu erzeugen. Fette und Verunreinigungen können jedoch die Reibung vermindern und damit $\alpha_{o,min}$ erhöhen. Auch legen Beobachtungen am menschlichen Vorbild ([Iberall 86],[Cutkosky 89]) die Vermutung nahe, dass Menschen beim Greifen eher größere Objektwinkel bevorzugen. Zusätzlich hat die Einführung einer unteren Schranke für den Objektwin-

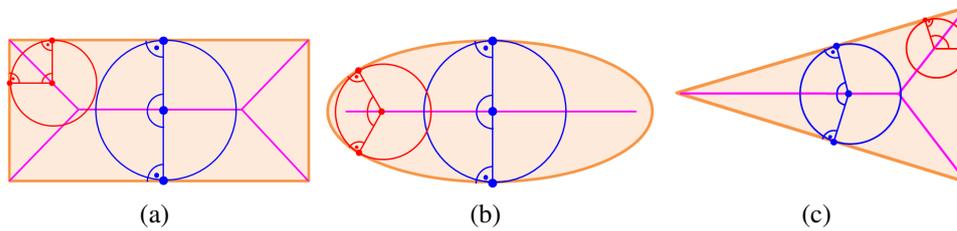


Abbildung 4.4: Geometrische Betrachtungen zur Wahl einer unteren Schranke für den Objektwinkel α_o . In einem Rechteck beschreiben mediale Kugeln mit $\alpha_o = 90^\circ$ (rot) Ecken, während Kugeln mit $\alpha_o = 180^\circ$ (blau) Länge und Breite (bzw. Dicke) des Rechtecks beschreiben (a). In einer Ellipse hat nur die genau im Zentrum eingeschriebene mediale Kugel den Objektwinkel $\alpha_o = 180^\circ$, während α_o schrumpft, je weiter man sich vom Zentrum wegbewegt (b). In einem Dreieck liegen die Kugeln mit den größten Objektwinkeln auf demjenigen Zweig der Medialen Achse (pink), der mit derjenigen Ecke des Dreiecks mit dem kleinsten Innenwinkel verbunden ist (c).

kel den positiven Nebeneffekt, dass hierdurch mögliche Instabilitäten aus der MA entfernt werden [Sud 05], wie bereits in Abschnitt 3.2.2 beschrieben wurde.

Abbildung 4.4 zeigt zweidimensionale Querschnitte einiger grundlegender dreidimensionaler Formen in orangener Farbe. Die jeweils zugehörige MA ist pink eingezeichnet, sowie je zwei der medialen Kugeln in rot und blau. In Abbildung 4.4a entfernt das Verwerfen von Kugeln mit $\alpha_o \leq 90^\circ$ Kugeln wie die rote. Hierdurch werden Ecken und Kanten des Objektes aus dem Gitter medialer Kugeln entfernt, während jedoch die zentrale Symmetrieebene erhalten bleibt. Generell beschreiben Kugeln mit kleinen Objektwinkeln eher Oberflächendetails eines Objektes, wie Ecken und Kanten. Kugeln mit großen Objektwinkeln beschreiben dagegen eher die lokale Dicke des Objektes an der jeweiligen Stelle und vermitteln einen Eindruck darüber, welches Volumen das Objekt an dieser Stelle belegt.

Würde man versuchen, Kugeln mit $\alpha_o = 90^\circ$ wie die rote in Abbildung 4.4a mit zwei Fingern zu greifen, hätte dies zwei Kontaktnormalen zur Folge, die zueinander in einem rechten Winkel stehen. Ein solcher Griff kann nur unter hohen Haftreibungskoeffizienten kraftschlüssig sein. Somit erscheint es sinnvoll, Kugeln mit kleinen Objektwinkeln nicht zum Generieren von Griffkandidaten zu verwenden.

4.2.2 Geometrische Betrachtungen zum Objektwinkel

Auf der anderen Seite stellt sich die Frage, warum nicht ausschließlich Kugeln mit $\alpha_o = 180^\circ$ für die Greifplanung betrachtet werden sollten, da diese am vielversprechendsten für die Erzeugung von Kraftschlussgriffen sind. Warum dies nicht sinnvoll ist, soll im Folgenden erläutert werden. In Abbildung 4.4b liegen alle Kugeln der MAT auf der zentralen Symmetrieebene. Die blaue Kugel in der Mitte besitzt einen Objektwinkel von $\alpha_o = 180^\circ$. Je weiter man sich jedoch von der Mitte entfernt, desto kleiner wird α_o , wie am Beispiel der roten Kugel sichtbar wird. Wenn also nur Kugeln mit $\alpha_o = 180^\circ$ für die Greifplanung verwendet würden, würden dadurch alle Kugeln außer der in Abbildung 4.4b eingezeichneten blauen Kugel verworfen. Dies wäre allerdings aus folgendem Grund zu restriktiv für die Greifplanung: Es würde Größe und Form des Objektes deutlich verändern in der Hinsicht, dass das Objekt für den Greifplaner von allen Seiten in gleicher Weise greifbar erscheinen würde. Ohne diese Kugeln zu verwerfen, erscheint es hingegen sinnvoll, das Objekt von rechts oder von links zu greifen. Das Verwerfen von Kugeln mit $\alpha_o < 180^\circ$ würde die zentrale Symmetrieebene des Objektes für den Greifplanungsalgorithmus wie eine Symmetrieachse aussehen lassen, was zur Auswahl einer anderen Methode zur Erzeugung von Griffkandidaten führen würde (siehe Abschnitt 4.4).

4.2.3 Eine untere Schranke für den Objektwinkel

Um eine sinnvolle untere Schranke für die Objektwinkel von für die Greifplanung zu verwendenden medialen Kugeln zu finden, erscheint es zweckmäßig, das einfachste denkbare Polygon, ein Dreieck, zu betrachten (siehe Abbildung 4.4c). In einem Dreieck liegen alle einbeschriebenen medialen Kugeln auf den drei Zweigen der MA, die zu den Ecken des Dreiecks führen. Die Kugeln mit den größten Objektwinkeln liegen auf demjenigen Zweig der MA, der zu derjenigen Ecke des Dreiecks mit dem kleinsten Innenwinkel führt. Ein Beispiel hierfür ist die blaue Kugel in Abbildung 4.4c. Diese Kugeln haben Objektwinkel $\alpha_o > 120^\circ$. Kugeln mit $\alpha_o < 120^\circ$ hingegen liegen auf denjenigen Zweigen der MA, die zu den Ecken mit den größten Innenwinkeln führen. Ein Extremfall ist ein gleichseitiges Dreieck, in dem alle Kugeln einen Objektwinkel von $\alpha_o = 120^\circ$ haben. Daher ergibt sich als sinnvolle untere Schranke für den Objektwinkel ein Wert von $\alpha_{o,min} = 120^\circ$, und zwar aus folgenden Gründen:

- Hierdurch werden Ecken und Kanten des Objektes entfernt bzw. für die Greifplanung verworfen, d.h. es werden durch den Greifplaner keine auf

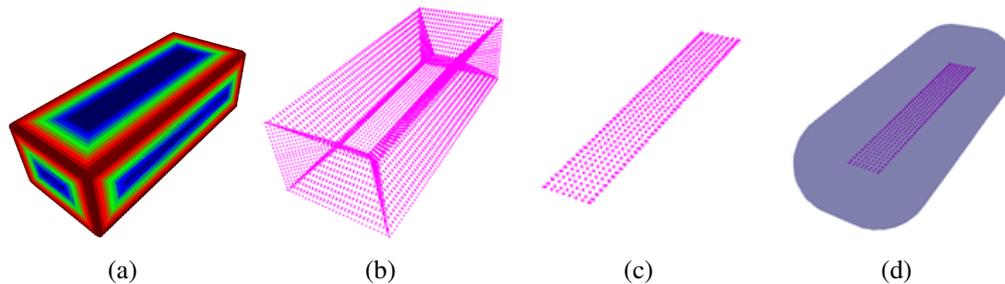


Abbildung 4.5: Das Verwerfen medialer Kugeln mit kleinen Objektwinkeln. Ein quaderförmiges Beispielobjekt (a) und seine mediale Achse (b). Nach dem Verwerfen von Kugeln mit $\alpha_o \leq \alpha_{o,min} = 120^\circ$ bleiben nur auf der zentralen Symmetrieebene liegende Kugeln übrig (c). Durch die Kugeln auf der zentralen Symmetrieebene bleiben die Informationen über die Symmetrieeigenschaften und die lokale Dicke des Objektes erhalten, während Ecken und Kanten für den Greifplaner nicht mehr sichtbar sind (d).

rechtwinklige Kanten des Objektes gerichtete Anrückrichtungen generiert. Gleichzeitig bleiben die zentralen Symmetrieebenen für weitere Analysen erhalten.

- Die für den Greifplaner sichtbare Größe und Form des Objektes ändert sich nicht zu sehr.
- Im Falle von dreidimensionalen Formen mit einem dreiecksförmigen Querschnitt ist garantiert, dass mindestens einer oder maximal alle drei Zweige der MA für weitere Analysen erhalten bleiben. Hierbei werden diejenigen Zweige der MA mit den größten Objektwinkeln, und damit mit der höchsten Wahrscheinlichkeit für Kraftschlussgriffe bevorzugt.

Eine Illustration für ein quaderförmiges Objekt ist in Abbildung 4.5 zu sehen. Abbildung 4.6 zeigt die Wirkung des Herausfilterns von Kugeln mit kleinen Objektwinkeln bei einigen komplizierteren Objekten mit vielen Oberflächendetails. In der ersten Spalte sind die Objekte mit allen medialen Kugeln abgebildet, in der zweiten Spalte nur diejenigen medialen Kugeln mit einem Objektwinkel $\alpha_o \geq 120^\circ$.

4.2.4 Die Rolle des Kugelradius

Bis jetzt lag der Fokus auf der Auswahl von medialen Kugeln mit solchen Objektwinkeln, dass durch das Einklemmen dieser Kugeln zwischen den Fingern auf gegenüberliegenden Seiten des Objektes Kontakte mit der Hand entstehen und dadurch das Zustandekommen eines Kraftschlussgriffes ermöglicht wird.

Jedoch ist die Art und Weise, wie ein Objekt gegriffen werden kann, auch durch die Kinematik und die Größe der Roboterhand relativ zur Größe des Objektes eingeschränkt. Der Radius r einer medialen Kugel liefert insbesondere bei Kugeln mit großem Objektwinkel hierfür nützliche Informationen, da er die lokale Dicke des Objektes an einer beliebigen Stelle beschreibt.

Zu große Kugeln

Der Radius r_{max} der größten Kugel, die von einer Hand gerade noch mit einem Kraftschlussgriff gegriffen werden kann, kann auf einfache Weise bestimmt werden. Kugeln, die zu groß für die jeweils betrachtete Hand sind können somit zwar weiterhin für die Analyse der Symmetrieeigenschaften eines Objektes verwendet werden, jedoch kann für solche Kugeln das Erzeugen und Testen von Griffkandidaten übersprungen und der damit verbundene Rechenaufwand eingespart werden.

Zu kleine Kugeln

In ähnlicher Weise können manche Kugeln zu klein sein, um für das Greifen interessant zu sein, z.B. weil die Hand im Vergleich zu groß ist oder weil an anderer Stelle im Objekt Kugeln mit größeren, für die Hand passenderen, Radien vorliegen, die besser zum Greifen geeignet sind. In diesem Fall kann eine untere Schwelle r_{min} für den Kugelradius eingeführt werden, sodass keine Griffkandidaten für Kugeln mit $r < r_{min}$ generiert werden. Darüber hinaus tragen kleine Kugeln in manchen Fällen stark zu den Oberflächendetails eines Objektes bei. Auch dann kann es sinnvoll sein, diese Kugeln nicht für die Erzeugung von Griffkandidaten zu verwenden, um stattdessen eher Griffe auf größeren Kugeln im Objekt zu erzeugen. Außerdem spielt hier die Präferenz des Nutzers eine Rolle. Für die Planung von Kraftgriffen kommen eher größere Kugeln in Frage, für die Planung von Präzisionsgriffen dagegen eher kleinere.

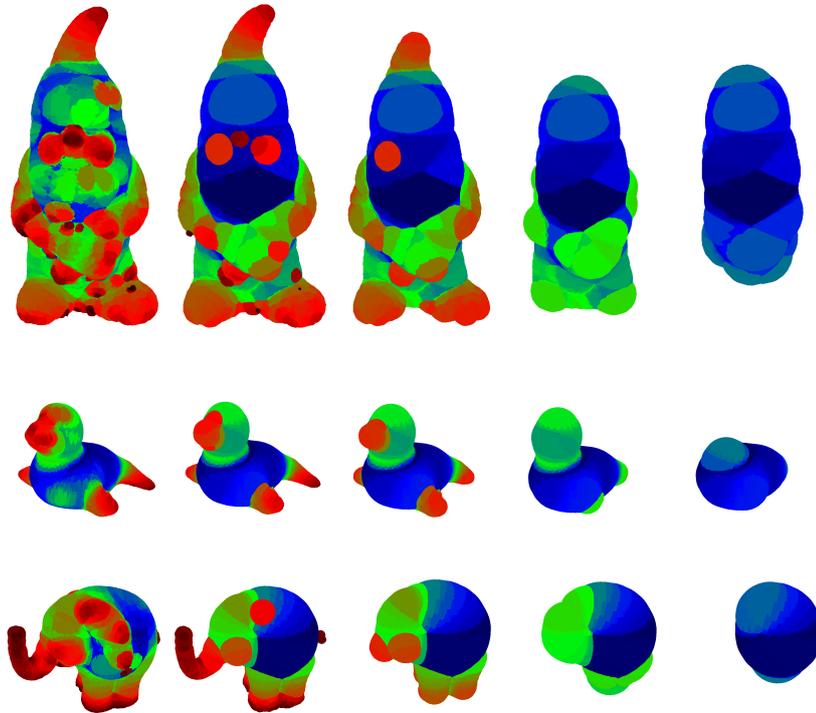


Abbildung 4.6: Die Auswirkungen des Herausfilterns medialer Kugeln mit bestimmten Objektwinkeln und Radien. Erste Spalte: Objekte mit allen Kugeln. Zweite Spalte: Nur Kugeln mit Objektwinkel $\alpha_o \geq 120^\circ$. Dritte bis fünfte Spalte: Zusätzliches Verwerfen von Kugeln unterhalb eines Minimalradius $r_{o,min}$, abhängig von der größten im Objekt vorkommenden Kugel mit Radius $r_{o,max}$. Dritte Spalte: $r_{o,min} = 0,3r_{o,max}$, vierte Spalte: $r_{o,min} = 0,5r_{o,max}$, fünfte Spalte: $r_{o,min} = 0,7r_{o,max}$.

Die Spalten drei bis fünf von Abbildung 4.6 zeigen die Auswirkungen des Herausfilterns medialer Kugeln mit Radien unterhalb eines Minimalradius $r_{o,min}$, abhängig von der größten im Objekt vorkommenden Kugel mit Radius $r_{o,max}$. Bei Herausfiltern von Kugeln mit einem Radius von weniger als 30% des im jeweiligen Objekt vorkommenden Maximalradius verliert nur der Elefant seinen Rüssel, während die anderen Objekte hauptsächlich Oberflächendetails verlieren (dritte Spalte). Werden Kugeln mit weniger als 50% (vierte Spalte) oder 70% (fünfte Spalte) des im Objekt vorkommenden Maximalradius herausgefiltert, wird die Form deutlich stärker vereinfacht.

4.3 Analyse lokaler Objektsymmetrieeigenschaften

Nachdem im vorigen Abschnitt die Bedeutung von Objektwinkel α_o und Radius r einer medialen Kugel für das Greifen betrachtet wurde, soll im Folgenden die Erzeugung von Griffkandidaten basierend auf den lokalen Symmetrieeigenschaften eines Objektes beschrieben werden.

Algorithmus 1 : CandidateGrasps($G, \alpha_{o,min}, r_N, r_{max}, r_{min}, r_{o,min}, \rho_a, \rho_p, c_{steps}$)

Eingabe: Gitter medialer Kugeln G , minimaler Objektwinkel $\alpha_{o,min}$, Suchradius r_N , maximaler Kugelradius r_{max} , minimale Kugelradien r_{min} und $r_{o,min}$, Achsen-Schwellwert ρ_a , Ebenen-Schwellwert ρ_p , Kreisunterteilung c_{steps}

Ausgabe: Menge von Griffkandidaten CG

```

1:  $G' \leftarrow G.\text{GetSpheresFromGrid}(\alpha_{o,min}, r_{o,min})$ 
2:  $CG \leftarrow \{\}$ 
3: while  $G'.\text{HasSpheres}()$  do
4:    $s \leftarrow G'.\text{GetNextSphere}(r_{min}, r_{max})$ 
5:    $s_N \leftarrow G'.\text{GetSpheresInNeighborhood}(s, r_N)$ 
6:    $(\lambda_1, \lambda_2, \vec{e}_1, \vec{e}_2) \leftarrow \text{PCA}(s_N)$ 
7:    $\rho_N \leftarrow \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$ 
8:   if  $(\rho_N \leq \rho_a)$  then
9:      $CG_{new} \leftarrow \text{GenerateSymAxisCandidateGrasps}(s, e_1)$ 
10:     $CG.\text{add}(CG_{new})$ 
11:   else if  $(\rho_a < \rho_N < \rho_p)$  then
12:      $CG_{new} \leftarrow \text{GenerateSymPlaneCandidateGrasps}(s, e_1)$ 
13:      $CG.\text{add}(CG_{new})$ 
14:   else
15:     continue
16:   end if
17: end while
18: return  $CG$ 

```

In Algorithmus 1 wird ein Überblick über den in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Greifplanungsalgorithmus gegeben. Die Grundidee des Verfahrens besteht darin, für das Greifen geeignete Kugeln aus dem Gitter auszuwählen, mittels Hauptkomponentenanalyse [Dunteman 89] die Symmetrieeigenschaften einer lokalen Umgebung jeder Kugel zu schätzen und anschließend darauf basierend Griffkandidaten zu generieren. Wie bereits im vorigen Abschnitt erwähnt und be-

gründet, werden nur mediale Kugeln mit einem Objektwinkel von $\alpha_o \geq 120^\circ$ für die Erzeugung von Griffkandidaten verwendet. In einem ersten Schritt werden zunächst die anderen Kugeln aus dem Gitter G herausgefiltert (Algorithmus 1, Zeile 1). Gleichzeitig können zusätzlich kleine Kugeln mit einem Radius von $r < r_{o,min}$ verworfen werden, falls weitere Oberflächendetails des Objektes eliminiert werden sollen. Die in diesem Schritt herausgefilterten Kugeln beeinflussen weder Symmetrieanalyse noch Griffkandidatenerzeugung, worauf weiter unten noch ausführlicher eingegangen werden soll. Die Kugeln der reduzierten Kugelmenge G' werden sequentiell für die Greifplanung betrachtet, wobei eventuelle benutzerdefinierte Schranken r_{min} und r_{max} für den Kugelradius, die von der Handgröße und der Entscheidung für Kraft- oder Präzisionsgriffe abhängen, beachtet werden. Kugeln in G' , welche die Schranken r_{min} oder r_{max} verletzen, haben zwar weiterhin Einfluss auf die Symmetrieanalyse; jedoch werden für diese Kugeln keine Griffkandidaten generiert (Algorithmus 1, Zeile 4).

Um die lokalen Symmetrieeigenschaften des Objektes um eine Anfragekugel $s \in G'$ herum zu schätzen, werden alle Kugeln $s_N \in N$ betrachtet, wobei N eine kugelförmige Umgebung mit Suchradius r_N um die Anfragekugel s herum bezeichnet (Algorithmus 1, Zeile 5). Wie in Abschnitt 3.4.3 beschrieben, kann der Zugriff auf diese benachbarten Kugeln im Gitter durch Betrachtung der die Anfragekugel s enthaltenden Zelle und benachbarter Zellen im Gitter erfolgen. Die Bestimmung der lokalen Symmetrieeigenschaften jeder Umgebung N geschieht mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse (engl. principal component analysis bzw. principal components analysis, kurz: PCA) [Dunteman 89] auf den Kugelmittelpunkten der s_N . Anschaulich dient die PCA dazu, herauszufinden, ob die Form des Objektes an einer gegebenen Stelle eher flach (einem oblaten Ellipsoid entsprechend) oder eher länglich (einem prolaten Ellipsoid entsprechend) ist, und wie die Ausdehnung der Form an der betrachteten Stelle orientiert ist. Die PCA liefert als Ergebnis die ersten beiden Eigenwerte λ_1 und λ_2 sowie die zugehörigen Eigenvektoren \vec{e}_1 und \vec{e}_2 (Algorithmus 1, Zeile 6). Dies wird in Abbildung 4.7 veranschaulicht. Der erste Eigenvektor \vec{e}_1 gehört zum größten Eigenwert λ_1 und zeigt in Richtung der größten Varianz der Kugelmittelpunkte innerhalb der lokalen Umgebung N um die Kugel s . Der zweite Eigenvektor \vec{e}_2 gehört zum zweitgrößten Eigenwert λ_2 und zeigt, senkrecht zu \vec{e}_1 ausgerichtet, in Richtung der zweitgrößten Varianz. Abhängig vom Ergebnis der PCA kommen später zwei unterschiedliche Methoden zur Erzeugung von Griffkandidaten zum Einsatz. Zu diesem Zweck wird zunächst das Verhältnis ρ_N der beiden Eigenwerte λ_1 und λ_2 (Algorithmus 1, Zeile 7) berechnet:

$$\rho_N = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (4.5)$$

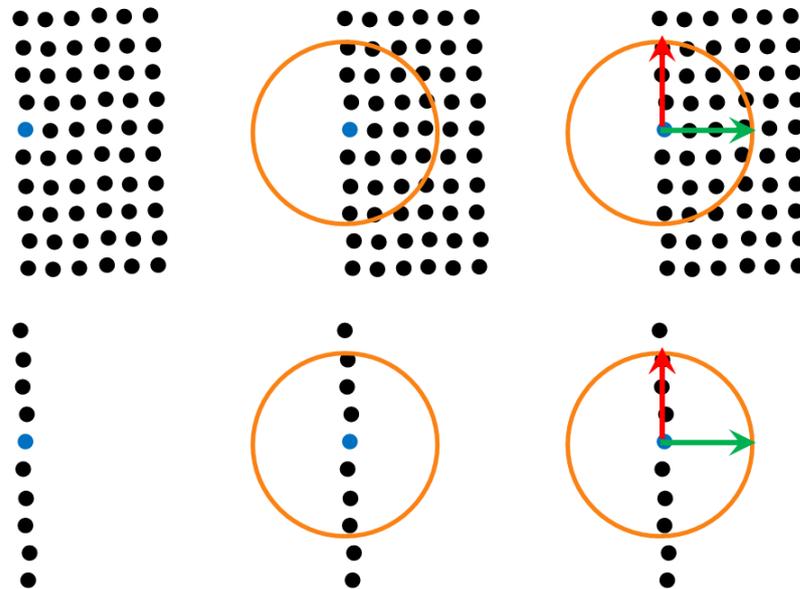


Abbildung 4.7: Analyse der Symmetrieeigenschaften einer lokalen Umgebung um eine Anfragekugel. Obere Reihe: eine lokale Symmetrieebene; untere Reihe: eine lokale Symmetrieachse. Die schwarzen Punkte stehen für die Mittelpunkte medialer Kugeln. Der blaue Punkt ist der Mittelpunkt der Anfragekugel s . Der orangefarbene Kreis mit Radius r_N beschreibt die Größe der lokalen Umgebung N , die bei der Symmetrieanalyse betrachtet werden soll. Der rote und der grüne Pfeil symbolisieren die ersten beiden Eigenvektoren (\vec{e}_1, \vec{e}_2) , die durch Hauptkomponentenanalyse auf den Kugelmittelpunkten der lokalen Umgebung N ermittelt werden. **Der erste Eigenvektor \vec{e}_1 zeigt in Richtung der lokalen Symmetrieachse oder ist parallel zum Rand der lokalen Symmetrieebene ausgerichtet. Der zweite Eigenvektor \vec{e}_2 steht senkrecht auf dem Rand der lokalen Symmetrieebene bzw. auf der Richtung der lokalen Symmetrieachse (untere Reihe).**

Die Ergebnisse der PCA für ein Beispielobjekt sind in Abbildung 4.8 mit vergrößerten Details dargestellt. Abbildung 4.9 zeigt einen Überblick über die Ergebnisse für weitere Testobjekte. Der Wert von ρ_N beschreibt, in welchem Verhältnis die Varianzen entlang der ersten beiden Eigenvektoren zueinander stehen. ρ_N (und damit die Färbung des jeweiligen Kugelmittelpunktes in den Abbildungen 4.8 und 4.9) hängt stark davon ab, wo und auf welchen Teilen der durch die MA beschriebenen Strukturen die jeweiligen Kugelmittelpunkte liegen. Es werden empirisch zwei Schwellwertkonstanten ρ_a und ρ_p eingeführt, um eine Kugel s in eine der folgenden drei Kategorien einzuordnen:

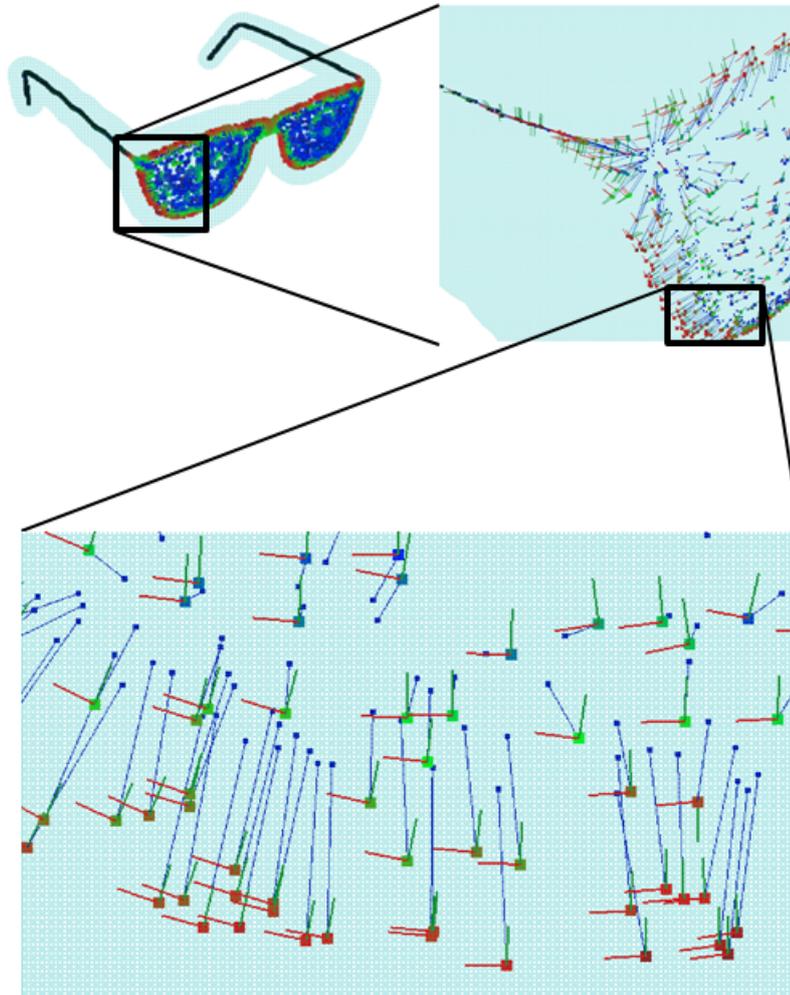


Abbildung 4.8: Ergebnis der Symmetrieanalyse lokaler Teile eines Beispielobjektes. Vollständiges Objekt (oben links), vergrößerte Details (oben rechts und unten). Jeder große Punkt stellt den Mittelpunkt einer Kugel s dar, wobei die verwendete Farbskala von schwarz über rot und grün bis blau reicht, für wachsende Werte von ρ_N . Die mit den großen Punkten verbundenen kurzen roten und grünen Linien stellen den ersten (rot) und zweiten Eigenvektor (grün) dar. Ein kleiner blauer Punkt, der über eine dünne blaue Linie mit einem großen Punkt verbunden ist, stellt den Schwerpunkt der Kugelmittelpunkte in der jeweiligen lokalen Umgebung N um die Kugel s dar. Die hellblaue Fläche im Hintergrund verdeutlicht die Größe der betrachteten lokalen Umgebungen. \vec{e}_1 ist parallel zum Rand einer lokalen Symmetrieebene orientiert oder zeigt in die Richtung einer lokalen Symmetrieachse.

1. **Kugeln im Inneren lokaler Symmetrieebenen:** Weicht der zweite Eigenwert λ_2 nicht zu stark vom ersten Eigenwert λ_1 ab, dann ist die Varianz der Kugelmittelpunkte in N in Richtung der ersten beiden Eigenvektoren \vec{e}_1 und \vec{e}_2 ähnlich. In diesem Fall wird angenommen, dass die Kugelmittelpunkte der s_N auf einer durch \vec{e}_1 und \vec{e}_2 definierten lokalen Symmetrieebene liegen, und zwar im Inneren der Ebene. Für $\rho_N \geq \rho_p$ wird eine Kugel in diese Kategorie einsortiert.
2. **Kugeln am Rande lokaler Symmetrieebenen:** Am Rande lokaler Symmetrieebenen ist die Varianz in Richtung des ersten Eigenvektors \vec{e}_1 deutlich größer als diejenige entlang des zweiten Eigenvektors \vec{e}_2 , somit wird der zweite Eigenwert λ_2 kleiner. Der erste Eigenvektor \vec{e}_1 zeigt in diesem Fall in Richtung des Randes. Für $\rho_a < \rho_N < \rho_p$ wird eine Kugel in diese Kategorie einsortiert.
3. **Kugeln auf lokalen Symmetrieachsen:** Geht die Varianz entlang des zweiten Eigenvektors und damit auch der zweite Eigenwert λ_2 gegen Null, wird angenommen, dass die Kugelmittelpunkte der s_N auf einer lokalen Symmetrieachse liegen, die in Richtung des ersten Eigenvektors \vec{e}_1 zeigt. Für $\rho_N \leq \rho_a$ wird eine Kugel in diese Kategorie einsortiert.

4.4 Erzeugung von Griffkandidaten

Für das hier vorgestellte Verfahren zur Greifplanung werden Griffkandidaten durch einen Anrückpunkt P_g , eine Anrückrichtung P_a , eine Handorientierung P_o und eine Handvorformung Θ_{start} beschrieben.

- Der Anrückpunkt P_g ist ein Punkt in bzw. auf dem Objekt, dem sich die Hand während der Greifplanung nähert.
- Die Anrückrichtung P_a ist derjenige Vektor, entlang dessen sich die Hand dem Objekt nähert.
- Die Handorientierung P_o ist eine imaginäre Achse, um die sich die Finger der Hand, ausgehend von einer parallelen Vorformung, während des Greifens schließen.
- Die Handvorformung Θ_{start} beschreibt eine offene Handkonfiguration, aus der sich die Finger während des Greifens schließen.



Abbildung 4.9: Ergebnis der Symmetrieanalyse für weitere Testobjekte. Farbgebung wie in der vorigen Abbildung, abhängig von ρ_N . Alle Kugeln haben einen Objektwinkel von mindestens 120° . Es wurde nicht nach Kugelradien gefiltert. Längliche Objektteile sind meist schwarz (sehr kleine Werte von ρ_N), die Ränder lokaler Symmetrieflächen sind rot (weisen kleine Werte von ρ_N auf), die Symmetrieflächen ändern ihre Farbe von den Rändern zum Inneren hin über gelb und grün zu blau (große Werte von ρ_n). Reihenfolge der untersuchten Objekte von links oben nach rechts unten: Spielzeugmonster-Actionfigur, Stuhl, Amphore, Giraffe, Ameise, Tisch, Teekanne, Fisch, Vogel und Büste.

Anrückpunkt P_g und Anrückrichtung P_a definieren die Zielposition der Hand eindeutig bis auf die Entfernung des Handkoordinatensystems zum Objekt ent-

lang der Anrückrichtung P_a . Der verbleibende Freiheitsgrad, die Entfernung des Handkoordinatensystems zum Objekt, wird auch als Grifftiefe (engl. standoff) [Berenson 07] oder Griffpunkttiefe (engl. grasp point depth) [Geidenstam 09] bezeichnet.

Anrückrichtung P_a und Handorientierung P_o definieren die Zielorientierung der Hand vollständig. Im Folgenden bezeichnet außerdem Θ_{start} immer eine parallele, offene Handkonfiguration, bei der die Finger parallel zueinander orientiert sind und der Daumen den anderen Fingern gegenübersteht.

Ein Überblick über die Erzeugung von Griffkandidaten wird in Algorithmus 1 gegeben. Abhängig vom Ergebnis der PCA kommen unterschiedliche Methoden zur Erzeugung von Griffkandidaten für eine mediale Kugel s zum Einsatz.

4.4.1 Mediale Kugeln auf einer lokalen Symmetrieachse

Im Falle einer lokalen Symmetrieachse wird eine Menge $A = \{a_i\}$ von Anrückrichtungen senkrecht zu dieser Symmetrieachse generiert, wobei $|A| = c_{steps}$ gilt (siehe Algorithmus 1, Zeile 8-10). Die Grundidee hierbei ist, dass die Hand sich beim Greifen in solcher Weise dem Objekt nähern soll, dass die Finger sich beim Schließen um die lokale Symmetrieachse wickeln können, da hierdurch die Chance für das Entstehen eines Kraftschlussgriffs besteht. Die Vorgehensweise ist kurz in Algorithmus 2 zusammengefasst und soll im Folgenden genauer beschrieben werden.

Sei $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ das Koordinatensystem, in dem die zu betrachtende lokale Symmetrieachse verläuft. (bzgl. dessen die Symmetrieachse angegeben wird) Sei $v_{symAxis}$ ein Einheitsvektor, der in Richtung dieser lokalen Symmetrieachse zeigt und aus dem ersten Eigenvektor \vec{e}_1 der Hauptkomponentenanalyse gewonnen werden kann.

Im Folgenden soll ohne Beschränkung der Allgemeinheit davon ausgegangen werden, dass die Symmetrieachse parallel zur z -Achse des Koordinatensystems verläuft, also $\vec{v}_{symAxis} = \vec{z}$. Ist dies nicht der Fall, so kann folgendermaßen ein neues Koordinatensystem $(\vec{x}_{new}, \vec{y}_{new}, \vec{z}_{new})$ erzeugt werden, in dem dann $\vec{v}_{symAxis} = \vec{z}_{new}$ gilt:

$$\vec{x}_{new} = \vec{v}_{symAxis} \times \vec{z} \quad (4.6)$$

$$\vec{y}_{new} = \vec{x}_{new} \times \vec{v}_{symAxis} \quad (4.7)$$

$$\vec{z}_{new} = \vec{v}_{symAxis} \quad (4.8)$$

Wenn \vec{z} die Richtung der lokalen Symmetrieachse beschreibt, dann müssen Anrückrichtungen der Hand, die senkrecht zu dieser Symmetrieachse verlaufen sollen, in einer Ebene mit dem Normalenvektor \vec{z} liegen. Wenn für den Vollkreis c_{steps} verschiedene Anrückrichtungen in gleichmäßigen Winkelabständen erzeugt werden sollen, ergibt sich der Winkel α_{step} zwischen zwei benachbarten Anrückrichtungen zu

$$\alpha_{step} = \frac{2\pi}{c_{steps}} \quad (4.9)$$

Die Anrückrichtungen \vec{a}_i ergeben sich dann als Verbindungsvektoren zwischen dem Mittelpunkt $s.center$ der betrachteten Kugel s und den Punkten p_i auf einem Kreis in einer Ebene senkrecht zur Symmetrieachse:

$$\vec{a}_i = p_i - s.center \quad (4.10)$$

Die Punkte p_i ergeben sich durch

$$p_i = s.center + \vec{x} \cdot \cos\phi_i + \vec{y} \cdot \sin\phi_i, \quad (4.11)$$

wobei

$$\phi_i = k_i \cdot \alpha_{step}, \quad \phi_i \in [0, 2\pi), \quad k_i \in \mathbb{N}. \quad (4.12)$$

Für jede Anrückrichtung $\vec{a}_i \in A$ wird dann ein Griffkandidat cg_1 mit $P_a = \vec{a}_i$ erzeugt, wobei der Mittelpunkt der Anfragekugel s als Anrückpunkt P_g und die Richtung $\vec{v}_{SymAxis}$ der lokalen Symmetrieachse als Handorientierungsvektor P_o dient. Zusätzlich kann ein zweiter Griffkandidat cg_2 erzeugt werden, indem statt der Handorientierung P_o die Handorientierung $-P_o$ verwendet wird, was eine 180°-Drehung der Hand um die Anrückrichtung im Vergleich zu cg_1 bewirkt.

4.4.2 Mediale Kugeln auf dem Rand einer lokalen Symmetrieebene

Liegt die Anfragekugel s auf dem Rand einer lokalen Symmetrieebene, werden Griffkandidaten erzeugt, deren Anrückrichtung P_d senkrecht auf dem Rand steht. Die Grundidee hierbei ist, die Hand während des Greifens so zu positionieren und zu orientieren, dass der Daumen und die anderen Finger das Objekt auf gegenüberliegenden (opponierenden) Seiten kontaktieren, sodass das Objekt durch die Finger eingeklemmt wird und hierdurch die Chance für einen Kraftschlussgriff entsteht (siehe auch Abschnitt 4.2). Die Vorgehensweise ist kurz in Algorithmus 3 zusammengefasst und wird im Folgenden detailliert beschrieben.

Algorithmus 2 : GenerateSymAxisCandidateGrasps($s, \vec{v}_{SymAxis}, c_{steps}$)

Eingabe: Mediale Kugel s , Richtung $\vec{v}_{SymAxis}$ einer lokalen Symmetrieachse, Kreisunterteilung c_{steps}

Ausgabe: Menge von Griffkandidaten CG

```

1: if  $\vec{v}_{SymAxis} \neq \vec{z}$  then
2:    $(\vec{x}_{new}, \vec{y}_{new}, \vec{z}_{new}) = \text{GenerateNewCoordinateFrame}(\vec{v}_{SymAxis}, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ 
3:    $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}) = (\vec{x}_{new}, \vec{y}_{new}, \vec{z}_{new})$ 
4: end if
5:  $\alpha_{step} = \frac{2\pi}{c_{steps}}$ 
6:  $\phi_i = \text{ComputeAngles}(\alpha_{step})$ 
7: for all  $\phi_i$  do
8:    $p_i = s.center + \vec{x} \cdot \cos\phi_i + \vec{y} \cdot \sin\phi_i$ 
9:    $\vec{a}_i = p_i - s.center$ 
10: end for
11: for all  $\vec{a}_i \in A$  do
12:    $P_g \leftarrow s.center$ 
13:    $P_o \leftarrow \vec{v}_{SymAxis}$ 
14:    $P_a \leftarrow \vec{a}_i$ 
15:    $cg_1 \leftarrow (P_g, P_a, P_o)$ 
16:    $cg_2 \leftarrow (P_g, P_a, -P_o)$ 
17:    $CG.add(cg_1)$ 
18:    $CG.add(cg_2)$ 
19: end for
20: return  $CG$ 

```

Seien \vec{v}_1 und \vec{v}_2 zwei Einheitsvektoren, welche sich aus den ersten beiden Eigenvektoren \vec{e}_1 und \vec{e}_2 der Hauptkomponentenanalyse (siehe Abschnitt 4.3) ergeben und mit dem Mittelpunkt $s.center$ der Anfragekugel s eine Ebene aufspannen.

\vec{e}_1 ist parallel zum Rand der lokalen Symmetrieebene orientiert, während \vec{e}_2 senkrecht auf dem Rand steht. Um das Objekt zu greifen, muss sich die Hand dem Rand der Symmetrieebene von der dem Objekt abgewandten Seite des Randes nähern. Um die dem Objekt abgewandte und die dem Objekt zugewandte Seite des Randes und somit das Vorzeichen der Anrückrichtung zu bestimmen, kann der Schwerpunkt CoG der Mittelpunkte $centers$ der in der lokalen Umgebung N enthaltenen Menge von Kugeln S betrachtet werden:

$$CoG = \text{mean}(S.centers) \quad (4.13)$$

Algorithmus 3 : GenerateSymPlaneCandidateGrasps($s, S, \vec{v}_1, \vec{v}_2$)

Eingabe: Mediale Kugel s , Richtungsvektoren \vec{v}_1, \vec{v}_2 einer lokalen Symmetrieebene, Kugelmenge S in einer lokalen Umgebung N um s

Ausgabe: Menge von Griffkandidaten CG

```

1:  $CoG = \text{mean}(S.\text{centers})$ 
2:  $\vec{v}_{CoG} = CoG - s.\text{center}$ 
3:  $\gamma = \angle(\vec{v}_2, \vec{v}_{CoG})$ 
4: if ( $\gamma \leq 90^\circ$ ) then
5:    $P_a \leftarrow (-1) \cdot \vec{v}_2$ 
6: else
7:    $P_a \leftarrow \vec{v}_2$ 
8: end if
9:  $P_g \leftarrow s.\text{center}$ 
10:  $P_o \leftarrow \vec{v}_1$ 
11:  $cg_1 \leftarrow (P_g, P_a, P_o)$ 
12:  $cg_2 \leftarrow (P_g, P_a, -P_o)$ 
13:  $CG.\text{add}(cg_1)$ 
14:  $CG.\text{add}(cg_2)$ 
15: return  $CG$ 

```

Der Verbindungsvektor

$$\vec{v}_{CoG} = CoG - s.\text{center} \quad (4.14)$$

zwischen Schwerpunkt und Mittelpunkt $s.\text{center}$ der Anfragekugel s zeigt in Richtung der dem Objekt zugewandten Seite des Randes. Falls für den von \vec{v}_2 und \vec{v}_{CoG} eingeschlossenen Winkel γ die Beziehung

$$\gamma \geq 90^\circ \quad (4.15)$$

gilt, dann wird als Anrückrichtung $\vec{a} = -\vec{v}_2$ verwendet, ansonsten $\vec{a} = \vec{v}_2$. Der Vektor \vec{v}_{CoG} ist in Abbildung 4.7 jeweils als lange dünne dunkelblaue Linie eingezeichnet. Ein Griffkandidat cg_1 ergibt sich dann mit $P_d = \vec{a}$ und $P_o = \vec{v}_1$, ein zweiter Griffkandidat cg_2 mit selber Anrückrichtung aber alternativer Handorientierung $-P_o$.

4.4.3 Mediale Kugeln im Inneren einer lokalen Symmetrieebene

Mediale Kugeln, die im Inneren einer lokalen Symmetrieebene liegen, sind möglicherweise für die Hand nicht erreichbar. Daher werden für diese Kugeln keine Griffkandidaten generiert.

4.4.4 Sonderfälle

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Verfahren zur Erzeugung von Griffkandidaten auf der Grundlage lokaler Symmetrieachsen bzw. -ebenen sind für die meisten Formen, die in menschlichen Alltagsumgebungen vorkommen, anwendbar. Es existieren einige Sonderfälle dreidimensionaler Körper mit sehr speziellen Symmetrieeigenschaften, die aufgrund der besonderen Struktur ihrer jeweiligen medialen Achse eine zusätzliche Betrachtung erfordern. Die meisten dieser Sonderfälle sind von eher mathematischem Interesse; nur wenige tauchen als Gebrauchsgegenstände in menschlichen Alltagsumgebungen auf. Sie wurden für die Untersuchungen und Experimente in der vorliegenden Arbeit nicht gesondert berücksichtigt, sollen aber an dieser Stelle kurz erwähnt werden:

Einzelne Kugeln

Ein Objekt, das aus einer einzelnen Kugel besteht, hat beliebig viele Symmetrieebenen und Symmetrieachsen. Die in den Abschnitten 4.4.1 und 4.4.2 beschriebenen Ansätze greifen in diesem Fall nicht. Zur Abhilfe können jedoch einfach beliebig viele auf den Kugelmittelpunkt hin gerichtete Anrückrichtungen für die Hand generiert werden, mit beliebigen Handorientierungen.

Körper, bei denen die MAT aus einer einzigen medialen Kugel mit großem Objektwinkel und vielen medialen Kugeln mit kleinen Objektwinkeln besteht

Hierzu zählen alle Körper mit einer eindeutigen Inkugel, die alle Begrenzungsflächen des Körpers berührt, z.B. die platonischen Körper [Adam 94], die catalanischen Körper [Wenninger 83], bestimmte Prismen mit regelmäßigen Polygonen als Grundfläche, deren Höhe dem Durchmesser des Inkreises der Grundfläche entspricht, sowie der Grenzfall eines Zylinders, dessen Höhe seinem Durchmesser gleicht. Vermutlich zählen hierzu auch die archimedischen Körper und einige Antiprismen.

Durch das in Abschnitt 4.2 vorgeschlagene Herausfiltern medialer Kugeln mit kleinen Objektwinkeln bleibt u.U. nur noch eine einzige mediale Kugel s_0 mit großem Objektwinkel übrig. Bei einfachen Beispielen solcher Körper, z.B. bei Würfeln, kann durch eine zusätzliche Betrachtung der Oberflächenberührungspunkte von s_0 Abhilfe geschaffen werden. Gibt es Paare (p_1, p_2) von Berührungspunkten, die in einem 180° -Winkel bzgl. des Kugelmittelpunktes zueinander stehen, können einfach Anrückrichtungen in der Ebene erzeugt werden, welche normal zur Verbindungsgerade zwischen p_1 und p_2 liegt, mit Handorientierungen, die sicherstellen, dass die beiden virtuellen Finger der Hand das Objekt in p_1 und p_2 berühren können.

Für viele solche Körper gilt jedoch: Je mehr Flächen sie haben, desto besser approximieren sie die Form einer Kugel. In diesen Fällen kann man einen solchen Körper wie eine einzelne Kugel behandeln, mit beliebigen auf den Kugelmittelpunkt gerichteten Anrückrichtungen und beliebigen Handorientierungen.

Körper, bei denen alle medialen Kugeln mit großen Objektwinkeln auf einer einzigen Achse oder Raumkurve liegen

Hierzu zählen beispielsweise Prismen mit regelmäßigen Polygonen als Grundfläche, deren Höhe größer als der Durchmesser des Inkreises der Grundfläche ist. Beispiele für solche Objekte sind Getränketetrapaks mit quadratischer Grundfläche, sowie Bananen. Durch das Herausfiltern medialer Kugeln mit kleinen Objektwinkeln erscheint ein solches Objekt für den Greifplanungsalgorithmus wie ein (evtl. gekrümmter) Zylinder, für den eine zentrale Symmetrieachse bzw. -linie angenommen wird und dementsprechend problemlos Griffkandidaten generiert werden, wie in Abschnitt 4.4.1 beschrieben. Soll zusätzlich sichergestellt werden, dass die beiden virtuellen Finger das Objekt auf gegenüberliegenden Seiten berühren (und nicht evtl. auf Kanten), können, wie im vorigen Punkt beschrieben, gegenüberliegende Paare von Oberflächenberührungspunkten identifiziert werden und für die Erzeugung von Anrückrichtungen und Handorientierungen ausgenutzt werden.

Auch hier gilt: Je mehr Seiten das Grundflächenpolygon besitzt, desto besser approximiert der Körper einen (evtl. gekrümmten) Zylinder und kann ohne Zusatzuntersuchungen als solcher behandelt werden.

4.4.5 Ergebnisse der Griffkandidaten-Erzeugung

Abbildung 4.10 zeigt die generierten Griffkandidaten für die Objekte, die bereits in Abbildung 4.9 betrachtet wurden. Die Mittelpunkte der für die Erzeugung von Griffkandidaten betrachteten Kugeln sind in gleicher Weise eingefärbt wie in Abbildung 4.9. Die Griffkandidaten sind als Linien abgebildet, welche die jeweilige Anrückrichtung P_a der Hand repräsentieren. Griffkandidaten, die von lokalen Symmetrieebenen herkommen, sind als grüne Anrückrichtungen eingezeichnet, während Griffkandidaten, die von lokalen Symmetrieachsen herkommen, als orangene Anrückrichtungen eingezeichnet sind. Die Handorientierung P_o eines Griffkandidaten wird jeweils durch eine kurze magentafarbene Linie am Ende einer Anrückrichtung angedeutet. Rosa Punkte repräsentieren die Mittelpunkte derjenigen Kugeln, die zu groß sind, um mit der ARMAR-III-Hand gegriffen zu werden. Daher wurden für diese Kugeln keine Griffkandidaten generiert. Dies ist beispielsweise der Fall für den Torso des Spielzeugmonsters, der Giraffe, der Ameise, des Fisches, sowie für den Hohlkörper der Amphore und der Teekanne und für große Teile der Büste.

Abbildung 4.11 zeigt die Wahlmöglichkeiten für den Benutzer durch Einschränkung der Kugelradien. Durch Einführung von Unter- oder Obergrenzen für die betrachteten Kugelradien kann nicht nur die Handgröße im Vergleich zur lokalen Dicke des Objektes berücksichtigt werden, sondern auch eine Beschränkung der Greifplanung auf bestimmte Teile des Objektes erreicht werden.

4.5 Das Testen von Griffkandidaten

In den vorangegangenen Abschnitten wurde die Erzeugung von Griffkandidaten auf der Basis des Gitters medialer Kugeln mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse beschrieben, wobei für jeden Griffkandidaten jeweils ein Anrückpunkt, eine Anrückrichtung und eine Handorientierung generiert wurde (siehe Abschnitt 4.4). Um den Greifplanungsprozess abzuschließen, müssen nun noch folgende Parameter bestimmt werden:

- Die finale Handpose P_{final} ,
- die finale Handkonfiguration Θ_{final} und
- die Kraftschlussbewertung f_c , die die Qualität des Griffes beschreibt.

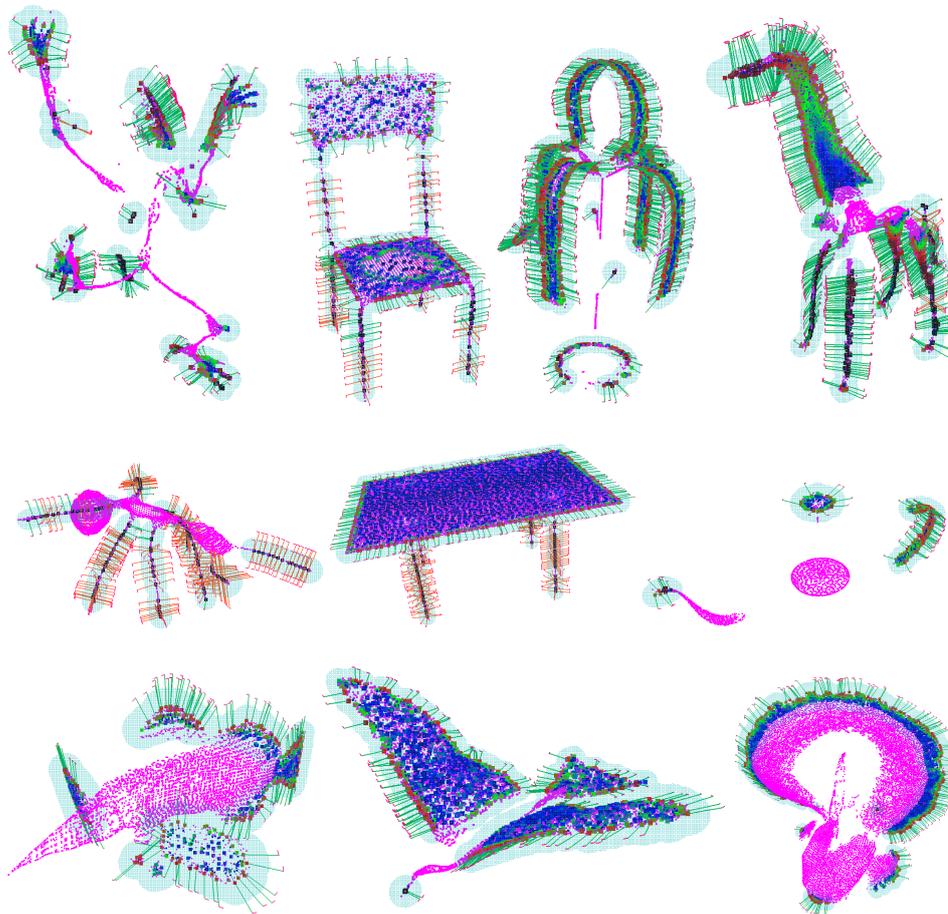


Abbildung 4.10: Generierte Griffkandidaten für die in Abbildung 4.9 betrachteten Objekte. Die Griffkandidaten sind als Linien abgebildet, welche die jeweilige Anrückrichtung P_a der Hand repräsentieren. Griffkandidaten, die von lokalen Symmetrieebenen herkommen, sind als grüne Anrückrichtungen eingezeichnet, während Griffkandidaten, die von lokalen Symmetrieachsen herkommen, als orangene Anrückrichtungen eingezeichnet sind. Die Handorientierung P_o eines Griffkandidaten wird jeweils durch eine kurze magentafarbene Linie am Ende einer Anrückrichtung angedeutet. Rosa Punkte repräsentieren die Mittelpunkte derjenigen Kugeln, die zu groß sind, um mit der ARMAR-III-Hand gegriffen zu werden. Abbildungen für Fisch, Ameise, Vogel: Nachdrucke aus [Przybylski 11a], ©2011 IEEE

Für Kraftgriffe und Präzisionsgriffe kommen hierbei unterschiedliche Methoden zum Einsatz.

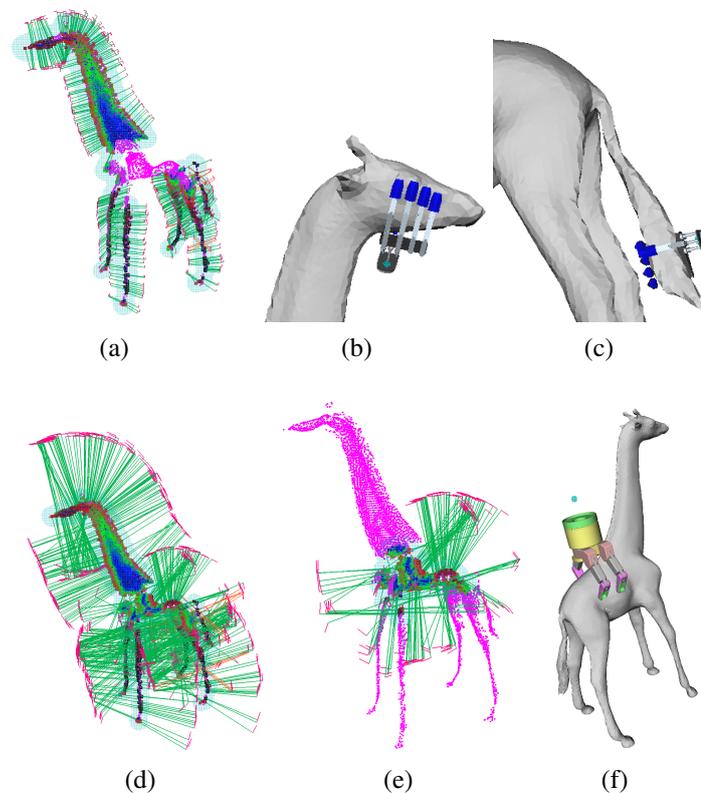


Abbildung 4.11: Einschränkung der betrachteten Kugelradien bei der Greifplanung. Für die Giraffenfigur in Originalgröße (a) werden nur Griffkandidaten für die Extremitäten generiert (b),(c). Bei einer auf 25% herunterskalierte Giraffe kann auch der Torso gegriffen werden (d). Durch Einführung einer Untergränze für die betrachteten Kugelradien kann die Erzeugung von Griffkandidaten auf den Torso beschränkt werden (e),(f). Nachdruck aus [Przybylski 11a], ©2011 IEEE

4.6 Die Berechnung von Kraftgriffen

Für Kraftgriffe wird eine Methode ähnlich zu der von Berenson [Berenson 07] vorgestellten verwendet. Ein Überblick über das Verfahren ist in Algorithmus 4 gegeben.

Die beiden Hauptunterschiede zum Verfahren in [Berenson 07] bestehen in der Parametrierung der Handorientierung P_o und dem Algorithmus für das Schließen der Finger. Wie bereits in Abschnitt 2.6 ausgeführt, werden in [Berenson 07] Griffkandidaten allein basierend auf den Oberflächennormalen des Objektes generiert. In diesem Fall sind jedoch nur der Anrückpunkt und die Anrückrichtung

Algorithmus 4 : SimulatePowerGrasp($hand, obj, cg, \Delta s, \Delta \alpha, m_{max}, \Theta_{max}$)

Eingabe: Roboterhand $hand$, Objekt obj , Griffkandidat cg , lineare Schrittweite Δs , Winkelschrittweite $\Delta \alpha$, Anzahl Durchgänge m_{max} , Gelenklimits Θ_{max}
Ausgabe: Finale Handpose P_{final} , finale Handkonfiguration Θ_{final} , Kraftschlussbewertung fc

```

1:  $hand.Open()$ 
2:  $P_{start} \leftarrow \text{GenerateStartPose}(cg.P_g, cg.P_a, cg.P_o)$ 
3:  $hand.SetTo(P_{start})$ 
4: while Collision( $hand, obj$ ) do
5:    $hand.Retract(\Delta s)$ 
6: end while
7:  $\Theta_{final} = \text{CloseFingersFast}(hand, obj, \Delta \alpha, m_{max}, \Theta_{max})$ 
8:  $cp \leftarrow \text{ContactPoints}(hand, obj)$ 
9:  $fc \leftarrow \text{TestForceClosure}(cp)$ 
10:  $P_{final} \leftarrow hand.GetHandPose()$ 
11: return ( $P_{final}, \Theta_{final}, fc$ )

```

eindeutig bestimmt, nicht jedoch die Handorientierung. In [Berenson 07] wird die Handorientierung eines Griffkandidaten bestimmt, indem die kürzeste Rotation berechnet wird, die nötig ist, um die Hand, ausgehend von der Handpose beim letzten getesteten Griffkandidaten, so zu orientieren, dass die Handflächen-Richtung mit der Anrückrichtung zusammenfällt und die Handinnenseite zum Objekt hingewandt ist, Zusätzlich können dem Verfahren sogenannte Rollwinkel als Parameter übergeben, die allerdings nur zu einer zusätzlichen Rotation der Hand um die Anrückrichtung führen.

Im Gegensatz dazu ist bei der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Methode die Handorientierung eindeutig durch die lokalen Symmetrieeigenschaften des Objektes bestimmt.

4.6.1 Bestimmung der Handpose

Die Orientierung eines Griffkandidaten gc ist durch zwei Einheitsvektoren P_a für die Anrückrichtung und P_o für den Handorientierungsvektor gegeben. Sie kann

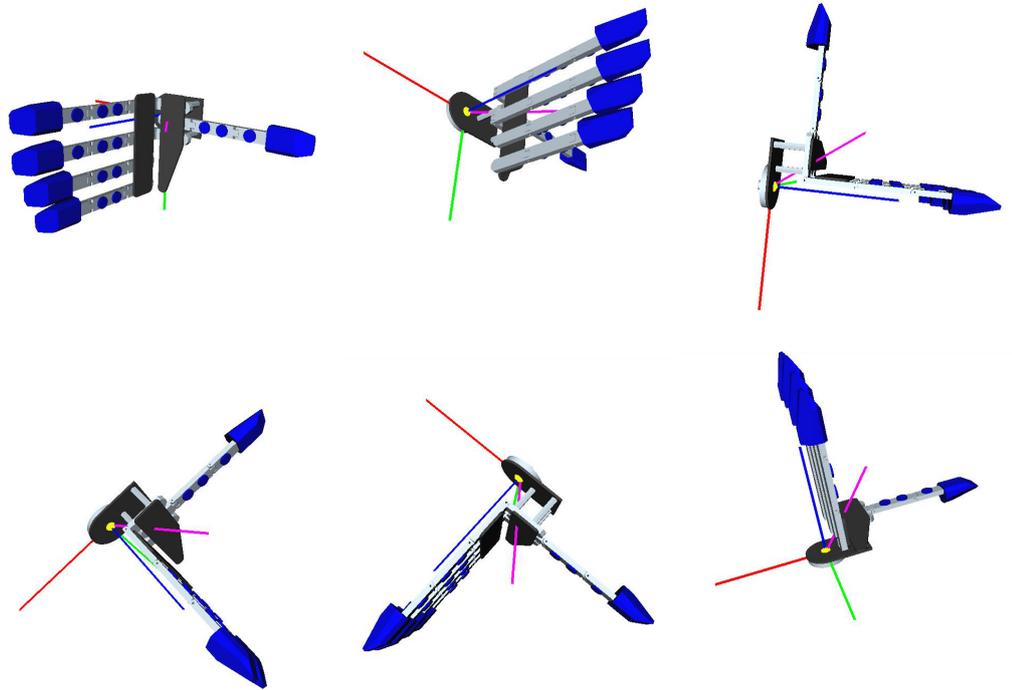


Abbildung 4.12: Koordinatensystem der ARMAR-III-Hand, aus verschiedenen Perspektiven betrachtet. x -, y - und z -Achse in rot, grün und blau. Die Richtung \vec{v}_{Palm} der Handfläche ist in magenta eingezeichnet.

wie folgt als Matrix A_{gc} ausgedrückt werden:

$$A_{gc} = \left(\begin{array}{c|c|c} \vec{x}_2 & \vec{y}_2 & \vec{z}_2 \end{array} \right) \quad (4.16)$$

mit

$$\vec{z}_2 = -P_a \quad (4.17)$$

$$\vec{x}_2 = P_o \times \vec{z}_2 \quad (4.18)$$

$$\vec{y}_2 = \vec{z}_2 \times \vec{x}_2. \quad (4.19)$$

Um einen Griffkandidaten gc zu simulieren, muss die Hand entsprechend relativ zum Objekt orientiert und positioniert werden. Die Handpose relativ zu einem Basiskoordinatensystem wird ausgedrückt durch die Transformation vom Basiskoordinatensystem in das Handkoordinatensystem. Im Falle der ARMAR-III-Hand

liegt das Handkoordinatensystem im Handgelenk an der Stelle, an der die Hand mit dem Unterarm des Roboters verbunden ist. Die Lage des Koordinatensystems ist in Abbildung 4.12 veranschaulicht, wobei der Ursprung durch eine gelbe Kugel gekennzeichnet ist und die Koordinatenachsen x, y und z in rot, grün und blau dargestellt sind. Zusätzlich ist die Handflächenrichtung \vec{v}_{Palm} in magenta eingezeichnet. Im Falle der ARMAR-III-Hand wurde die Handflächenrichtung mit

$$\vec{v}_{Palm} = \frac{1}{\sqrt{0,74}} \begin{pmatrix} -0,5 \\ 0 \\ 0,7 \end{pmatrix} \quad (4.20)$$

gewählt. Als Orientierungsachse der Hand \vec{v}_{Ori} wird die negative y -Achse verwendet:

$$\vec{v}_{Ori} = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.21)$$

Das Ziel besteht nun zunächst darin, die Hand so auszurichten, dass

$$\vec{v}_{Palm} \parallel P_a \quad (4.22)$$

$$\vec{v}_{Ori} \parallel P_o \quad (4.23)$$

gilt, also Handflächenrichtung \vec{v}_{Palm} parallel zur Anrückrichtung P_a des Griffkandidaten gc und Orientierungsachse \vec{v}_{Ori} der Hand parallel zur Orientierung P_o des Griffkandidaten gc verlaufen. Außerdem soll die Handflächenrichtung \vec{v}_{Palm} zum Objekt hin zeigen. Dies kann folgendermaßen erreicht werden:

Ein neues Koordinatensystem $\vec{x}_3, \vec{y}_3, \vec{z}_3$, dessen z -Achse der Handflächenrichtung \vec{v}_{Palm} entspricht, kann erzeugt werden durch

$$\vec{z}_3 = \vec{v}_{Palm} \quad (4.24)$$

$$\vec{x}_3 = \vec{v}_{Ori} \times \vec{z}_3 \quad (4.25)$$

$$\vec{y}_3 = \vec{z}_3 \times \vec{x}_3 \quad (4.26)$$

und führt zur Rotationsmatrix

$$A_{PalmOrientation} = \left(\begin{array}{c|c|c} \vec{x}_3 & \vec{y}_3 & \vec{z}_3 \end{array} \right) \quad (4.27)$$

Die Orientierung A_{ori} der Hand bezüglich des Objektkoordinatensystems ergibt sich dann zu

$$A_{ori} = A_{gc} \cdot A_{PalmOrientation} \quad (4.28)$$

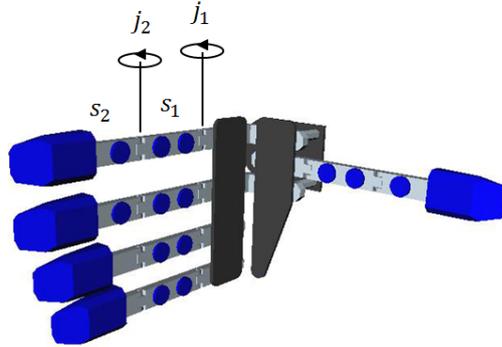


Abbildung 4.13: Gelenkachsen und Segmente der ARMAR-III-Hand

Durch Kombination mit dem Griffzielpunkt P_g des Griffkandidaten ergibt sich die Startpose P_{Start} der Hand bezüglich des Objektkoordinatensystems mit der homogenen Matrix

$$P_{Start} = \left(\begin{array}{ccc|c} & & & P_g \\ & A_{ori} & & \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right). \quad (4.29)$$

Um einen Griffkandidaten cg zu simulieren, wird die Hand zunächst in die Vorformungs-Konfiguration Θ_{start} gebracht und an die Startpose P_{start} relativ zum Objekt gesetzt. Dies führt zunächst zu gegenseitiger Durchdringung zwischen der Hand und dem Dreiecksnetz der Objektoberfläche. Anschließend wird die Hand entlang der Anrückrichtung P_d iterativ in Entfernungsschritten Δs vom Objekt zurückbewegt, bis keine gegenseitige Durchdringung mehr mit der Objektoberfläche vorliegt. Damit steht die Endpose P_{final} der Hand fest. Im nächsten Schritt wird die endgültige Handkonfiguration bestimmt, indem die Hand um das Objekt herum geschlossen wird.

4.6.2 Das Schließen der Hand

In der vorliegenden Arbeit wird ein auf Intervallschachtelung basierendes Verfahren zum Schließen der Finger benutzt. Gegenüber dem Verfahren von Berenson [Berenson 07], in dem die Finger zuerst mit einer großen und anschließend mit einer reduzierten Winkelschrittweite in nur zwei Durchläufen geschlossen werden, kann durch Verwendung der Intervallschachtelung ein schnelleres Schließen der Finger bei gleichzeitig erhöhter Genauigkeit der Handendkonfiguration Θ_{final} und der Kontaktpunkte zwischen Hand und Objekt erzielt werden.

Algorithmus 5 : CloseFingersFast($hand, obj, \Delta\alpha, m_{max}, \Theta_{max}$)

Eingabe: Roboterhand $hand$, Objekt obj , Winkelschrittgröße $\Delta\alpha$, Anzahl Durchgänge m_{max} , Gelenklimits Θ_{max}
Ausgabe: Handendkonfiguration Θ_{final}

```

1: for all  $f_i \in hand.fingers$  do
2:   for all  $j_k \in f_i.flexionJoints$  do
3:      $m = 0$ 
4:     while ( $m < m_{max}$ ) do
5:       if ( $j_k.value > \theta_k \in \Theta_{max}$ ) then
6:         break
7:       end if
8:        $collision = False$ 
9:       for all  $s_l \in f_i.SegmentsAffectedByJoint(j_k)$  do
10:         $collision = collision \& CheckCollision(s_l, obj)$ 
11:      end for
12:      while ( $\neg collision$ ) do
13:         $j_k.value = j_k.value + \Delta\alpha$ 
14:        for all  $s_l \in f_i.SegmentsAffectedByJoint(j_k)$  do
15:           $collision = collision \& CheckCollision(s_l, obj)$ 
16:        end for
17:      end while
18:      if ( $m_{max} - m > 1$ ) then
19:         $j_k.value = j_k.value - \Delta\alpha$ 
20:         $m = m + 1$ 
21:         $\Delta\alpha = \frac{\Delta\alpha}{2}$ 
22:      end if
23:    end while
24:  end for
25: end for
26:  $\Theta_{final} \leftarrow hand.GetJointAngleVector()$ 
27: return  $\Theta_{final}$ 

```

Das Verfahren ist in Algorithmus 5 skizziert. Es wird jeder Finger einzeln geschlossen, wobei die Flexionsgelenke in der Reihenfolge von proximal nach distal betrachtet werden, d.h. von dem dem Handteller am nächsten liegenden Gelenk zur Fingerspitze hin.

Falls das Gelenk j_k des Fingers f_i noch nicht den Gelenkansschlag erreicht hat,

werden zunächst alle Segmente s_l des Fingers, die durch j_k bewegt werden, auf Kollision mit dem Objekt getestet. Solange noch keine Kollision mit dem Objekt vorliegt, wird das aktuelle Gelenk j_k iterativ um Winkelschritte $\Delta\alpha$ geschlossen, wobei nach jeder Iteration erneut alle Fingersegmente, die durch j_k bewegt werden, auf Kollision mit dem Objekt geprüft werden. Welche Segmente von der jeweiligen Gelenkachse bewegt werden, ist in Abbildung 4.13 für die ARMAR-III-Hand veranschaulicht, die pro Finger zwei Gelenkachsen j_1 und j_2 sowie zwei Segmente besitzt, das proximale Segment s_1 und das distale Segment s_2 . Bei Bewegung der proximalen Achse j_1 sind die Segmente s_1 und s_2 betroffen, bei Bewegung der distalen Achse j_2 nur das Segment s_2 . Sobald eine Kollision auftritt, wird das Gelenk wieder um einen Winkelschritt $\Delta\alpha$ geöffnet. Anschließend wird die nächste Iteration des Schließvorgangs mit halbiertem Schrittweite $\frac{\Delta\alpha}{2}$ durchgeführt, bis erneut eine Kollision zwischen einem der bewegten Segmente und dem Objekt auftritt. Nach m_{max} Iterationen für das Gelenk j_k wird das nächste Gelenk j_{k+1} betrachtet, bis alle Flexionsgelenke des Fingers betrachtet wurden. Durch die Halbierung der Schrittweite $\Delta\alpha$ nach jeder Iteration ergibt sich bereits nach $m_{max} = 10$ Iterationen eine Schrittweite von $\Delta\alpha_{10} = 2^{-10}\Delta\alpha_0$, wobei bei jeder weiteren nach der ersten Iteration maximal zwei Schließbewegungen mit anschließendem Kollisionstest und eine Öffnungsbewegung des jeweiligen Gelenks nötig sind.

Nach dem Schließen aller Finger steht die finale Handkonfiguration Θ_{final} fest. Zum Schluss werden die Kontaktpunkte cp zwischen dem Oberflächennetz des Objektes und der Hand bestimmt und der Griff auf Kraftschluss untersucht, indem das verbreitete ε -Maß für Kraftschluss [Ferrari 92] berechnet wird.

4.7 Die Berechnung von Präzisionsgriffen

Im vorigen Abschnitt wurden die Berechnung der finalen Handpose und der finalen Handkonfiguration für Kraftgriffe betrachtet, indem die Hand entlang der Anrückrichtung vom Objekt zurückgezogen wurde, bis keine Interpenetration mehr vorlag, und anschließend die Finger um das Objekt geschlossen wurden, um eine maximale Anzahl an Kontakten zwischen der Hand und dem Objekt zu erzeugen.

Für Präzisionsgriffe ist diese Methode jedoch nicht anwendbar. Im Gegensatz zu Kraftgriffen liegt bei Präzisionsgriffen das Hauptziel darin, die Manipulation des Objektes innerhalb der Hand zu ermöglichen. Daher soll nicht die Anzahl der Kontakte zwischen Hand und Objekt maximiert werden, sondern stattdessen sollen Kontakte zum Objekt an wohldefinierten Stellen der Hand hergestellt werden,

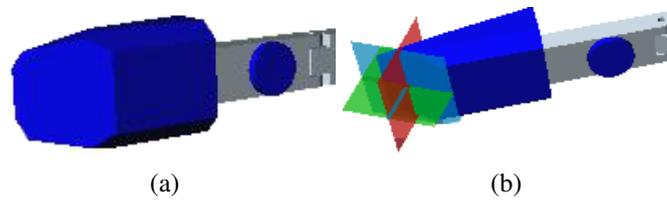


Abbildung 4.14: Distales Fingersegment der ARMAR-III-Hand (a). Vordefinierter Kontaktpunkt auf der Fingerspitze im Schnittpunkt der roten, blauen und grünen Ebene (b).

nämlich an den distalen Segmenten der am Griff beteiligten Finger (siehe Abbildung 4.14).

Hierdurch stellt sich das zusätzliche Problem, die Grifftiefe zu bestimmen, also diejenige Entfernung, die die Hand entlang der Anrückrichtung bewegt werden muss, bis die finale Handposition erreicht worden ist. Bei Kraftgriffen wird die geöffnete Hand bis zum Kontakt mit dem Objekt bewegt; somit hat die Grifftiefe den Wert null. Bei Präzisionsgriffen hingegen ist die Grifftiefe von null verschieden.

In der Greifplanung wird für die Hand üblicherweise ein Referenzkoordinatensystem verwendet, welches im Handgelenk liegt. Die Posen der distalen Fingersegmente relativ zu diesem Referenzkoordinatensystem hängen jedoch von der Vorwärtskinematik der Hand ab, und damit auch von der lokalen Dicke des Objektes an der zu greifenden Stelle. Aus diesem Grund müssen die finale Handpose und die finale Handkonfiguration gleichzeitig bestimmt werden. Greifplanungsalgorithmen versuchen üblicherweise, dies zu vermeiden, da hierzu die Berechnung der inversen Kinematik notwendig ist. Stattdessen besteht ein verbreiteter Ansatz darin, die Grifftiefe als freien Parameter zu behandeln ([Miller 03],[Berenson 07]) und dem Benutzer zugänglich zu machen. Der Benutzer muss dann experimentell geeignete Parameterwerte für jedes Objekt finden oder jeden Griffkandidaten mit einer Menge verschiedener Griff Tiefen testen, was zusätzlichen Simulationsaufwand bedeutet. Eine Ausnahme diesbezüglich stellt die Arbeit [Geidenstam 09] dar, in der ein Neuronales Netz zum Einsatz kommt, um die Grifftiefe abhängig von den Projektionen der Objektoberfläche auf die Seitenflächen des umgebenden Quaders zu bestimmen.

In [Przybylski 12a] wurde eine einfache und effektive iterative Methode zur Bestimmung der Grifftiefe (und damit auch zur Bestimmung von P_{final} und Θ_{final}) vorgestellt. Die grundlegende Idee für den hier beschriebenen Ansatz besteht

Algorithmus 6 : $\text{SimulatePrecisionGrasp}(hand, obj, cg, s, \Delta\tau)$

Eingabe: Roboterhand $hand$, Objekt obj , Griffkandidat cg , mediale Kugel s ,
Winkelschrittweite $\Delta\tau$

Ausgabe: Finale Handpose P_{final} , finale Handkonfiguration Θ_{final} ,
Kraftschlussbewertung fc

```

1:  $hand.Open()$ 
2:  $hand.MoveToInitialOpposition(\Delta\tau)$ 
3:  $hand.MoveToPreshape(\Delta\tau, s)$ 
4:  $T_g \leftarrow \text{ComputeGraspCenterTransform}()$ 
5:  $P_{start} \leftarrow \text{ComputeStartPose}(T_g, s, cg)$ 
6:  $hand.SetTo(P_{start})$ 
7: if  $\text{Collision}(hand, obj)$  then
8:   break
9: else
10:   $(P_{final}, \Theta_{final}, cp) \leftarrow \text{RefineHandPoseAndConfiguration}(hand, obj)$ 
11:   $fc \leftarrow \text{TestForceClosure}(cp)$ 
12: end if
13: return  $(P_{final}, \Theta_{final}, fc)$ 

```

darin, sowohl das Wissen über die gewünschten Kontaktpositionen auf den distalen Fingersegmenten im Greifplanungsalgorithmus auszunutzen, als auch die räumlichen Beziehungen zwischen den am Griff beteiligten Fingern und der Position medialer Kugeln mit großen Objektwinkeln. Außerdem soll durch Ausnutzung der kinematischen Struktur der Roboterhand die explizite Berechnung der inversen Kinematik (IK) der Hand vermieden werden. Im Folgenden werden prismatische Dreifingerpräzisionsgriffe betrachtet, wie sie in der Cutkosky-Grifftaxonomie [Cutkosky 89] definiert wurden.

Ein Überblick über die Methode wird in Algorithmus 6 und in Abbildung 4.15 gegeben. Die Methode beginnt damit, die Hand aus einer offenen Konfiguration (siehe Abbildung 4.15a) durch Schließen der DIP-Gelenke in eine Konfiguration der initialen Opposition zu bewegen, in der die angestrebten Kontaktflächen auf den beteiligten Fingern sich gegenüberstehen und parallel zueinander ausgerichtet sind (siehe Abbildung 4.15b). Von dieser Konfiguration aus wird die Hand in eine Vorformung gebracht, die abhängig von der Größe der zu greifenden Kugel ist (siehe Abbildung 4.15c). Aus der Vorformung der Hand wird dann die Griffzentrumstransformation bestimmt (siehe Abbildung 4.15d), die zur Berechnung der Startpose der Hand relativ zum Objekt dient (siehe Abbildung 4.15e). Pose und

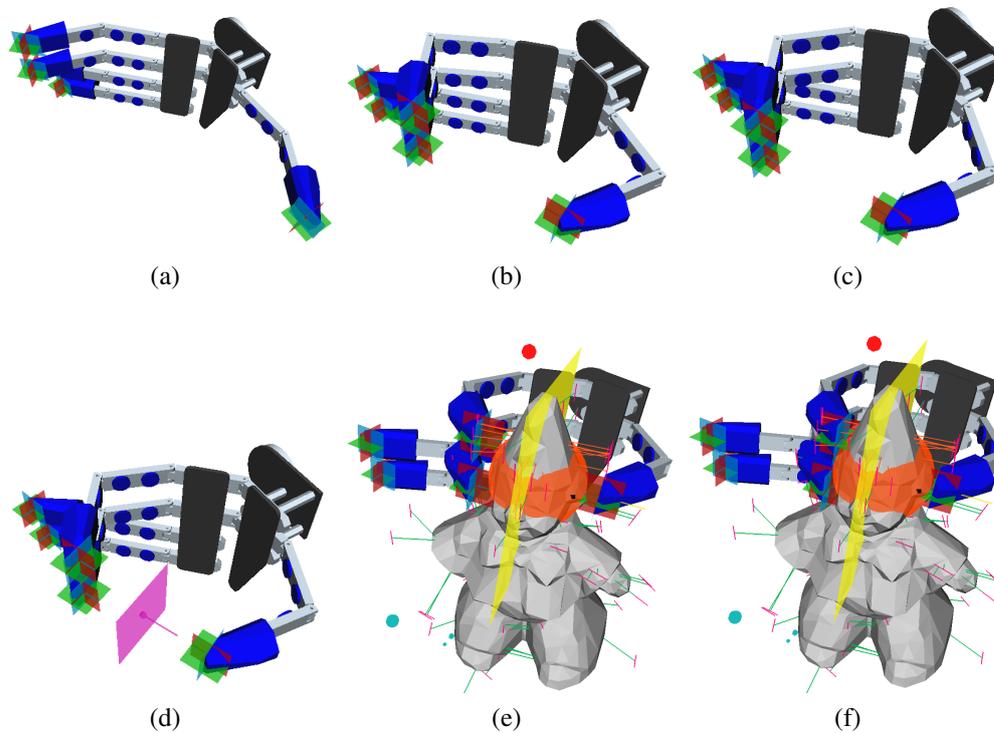


Abbildung 4.15: Schritte der Methode zur Planung von Präzisionsgriffen. Geöffnete Hand mit vordefinierten Kontaktpunkten an den distalen Fingersegmenten (a), Handkonfiguration mit initialer Opposition, bei der die angestrebten Kontaktnormalen parallel zueinander orientiert sind (b), vom zu greifenden Kugelradius r abhängige Vorformung der Hand (c), Griffzentrum (pink) zwischen den opponierenden Fingern (d), Hand in der Startpose P_{start} , wobei die zu greifende Kugel (orange) bereits im Griffzentrum der Hand liegt (e), Hand in finaler Pose und Konfiguration mit Kontakt zwischen distalen Fingersegmenten und Objekt (f).

Konfiguration der Hand werden anschließend iterativ verfeinert, bis alle beteiligten Finger Kontakt zum Objekt haben (siehe Abbildung 4.15f) und der dadurch entstandene Griff auf Kraftschluss getestet werden kann.

4.7.1 Vorformung und Startpose der Hand

Wie im Fall der Kraftgriffe, werden auch die Präzisionsgriffe aus Griffkandidaten generiert, die mit Hilfe der MAT gewonnen wurden. Zur Planung von Präzisionsgriffen werden jedoch zusätzlich an den distalen Fingersegmenten Punkte

definiert, an denen während des Greifens Kontakt zwischen Finger und Objekt hergestellt werden soll (siehe Abbildung 4.14). Zu Beginn des Verfahrens befindet sich die Hand in einer offenen Konfiguration (siehe Abbildung 4.15a).

Initiale Opposition

In einem ersten Schritt werden die am Griff beteiligten Finger in eine Konfiguration mit initialer Opposition der angestrebten Kontaktpunkte gebracht, d.h. dass die angestrebten Kontaktnormalen parallel zueinander sind und alle in einer Ebene liegen, die durch die angestrebten Kontaktpunkte definiert wird. Der Grundgedanke hierbei ist, dass es bei einem weiteren Schließen der Finger unter gleichzeitiger Beibehaltung der relativen Posen der angestrebten Kontaktpunkte zueinander (mit Ausnahme der Öffnungsdistanz zwischen opponierenden Fingern) wahrscheinlich ist, dass die Finger entgegengesetzte Kräfte auf das Objekt ausüben können, wenn sich ein geeigneter Teil des Objektes zwischen den betrachteten Fingern befindet (siehe Abbildungen 4.15b und 4.16).

Im Falle der ARMAR-III-Hand ist das Erreichen einer Handkonfiguration mit initialer Opposition auf einfache Weise möglich, indem schrittweise die beteiligten Finger geschlossen werden und der Winkel zwischen der Normale des beteiligten angestrebten Kontaktpunktes auf dem distalen Daumenglied und den entsprechenden Normalen auf den distalen Segmenten der anderen Finger berechnet wird. Sind diese Normalen parallel, ist die Konfiguration mit initialer Opposition erreicht.

Vorformung der Hand

In einem zweiten Schritt werden die Finger in eine Vorformungs-Konfiguration Θ_{pre} bewegt, die durch die Öffnungsdistanz d_{pre} zwischen den opponierenden Fingern charakterisiert ist. Die Öffnungsdistanz d_{pre} hängt wiederum vom Radius r der zu greifenden Kugel ab:

$$d_{pre} = 2 \cdot k \cdot r \quad (4.30)$$

Hierbei ist $k > 1.0$ eine zu wählende Konstante. Während die Finger sich in die Vorformungs-Konfiguration bewegen, wird die Opposition zwischen den Fingern aufrechterhalten. Da die ARMAR-III-Hand in jedem Finger i zwei konsekutive Gelenkachsen $j_{i,1}$ und $j_{i,2}$ für die Flexion besitzt, kann diese Bewegung unter Aufrechterhaltung der Opposition erreicht werden, indem die Achsen $j_{i,1}$ und $j_{i,2}$

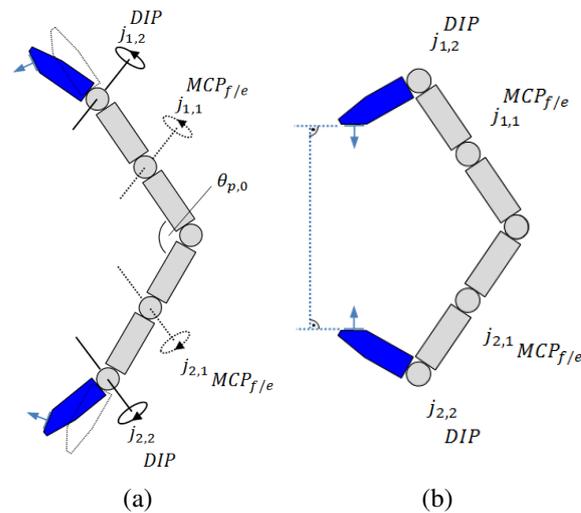


Abbildung 4.16: Bewegung der Hand in eine Konfiguration mit initialer Opposition zwischen den angestrebten Kontaktflächen. Links: Bewegung der DIP-Gelenke der beteiligten Finger. Bei Bedarf können zusätzlich die MCP-f/e-Gelenke bewegt werden. Rechts: Die Hand in initialer Opposition mit sich gegenüberstehenden, parallel zueinander ausgerichteten angestrebten Kontaktflächen.

einfach in entgegengesetzter Richtung um den gleichen absoluten Winkel $\Delta\tau_1$ bewegt werden (siehe Abbildung 4.17a). Die Finger werden solange inkrementell bewegt, bis die Öffnungsdistanz d_{pre} erreicht ist (siehe Abbildung 4.17b).

Bestimmung der Griffzentrumstransformation

Es ist leicht ersichtlich, dass die Hand in dieser Konfiguration für einen vielversprechenden Griff relativ zum Objekt so plaziert werden muss, dass sich der zu greifende Teil des Objektes genau zwischen den opponierenden Fingern befindet, bevor die Finger sich schließen. Dieser Punkt zwischen den opponierenden Fingern soll hier *Griffzentrum* und die Koordinatentransformation vom Handgelenk (siehe Abbildung 4.18) zum Griffzentrum *Griffzentrumstransformation* T_g genannt werden. T_g kann aus der aktuellen Handkonfiguration mit Hilfe der Vorwärtskinematik $A_{Fwd}(Thumb)$ des Daumens berechnet werden:

$$T_g = A_{ce} \cdot A_{Fwd}(Thumb) \quad (4.31)$$

Der Daumen bietet sich hierfür an, da er an jedem Oppositionsgriff beteiligt ist. In Gleichung (4.31) bezeichnet A_{ce} die Koordinatentransformation vom angestrebten

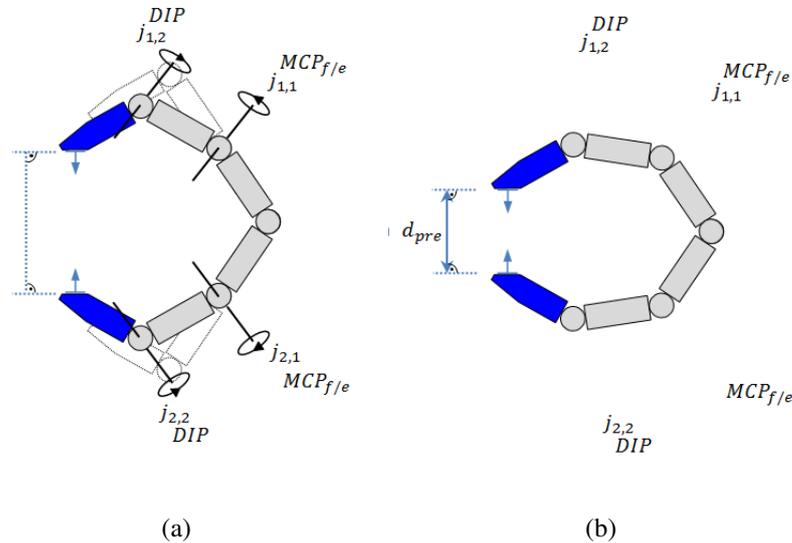


Abbildung 4.17: Bewegung der Hand in die Vorformungs-Konfiguration. Links: Durch entgegengesetztes Bewegen der DIP- und MCP-f/e-Gelenke jedes Fingers können die angestrebten Kontaktflächen aufeinander zu bewegt werden, während ihre parallele Orientierung erhalten bleibt. Rechts: Die Vorformungs-Konfiguration der Hand ist erreicht, wenn der Abstand zwischen den angestrebten Kontaktflächen den Wert d_{pre} erreicht hat, welcher vom Durchmesser der zu greifenden Kugel abhängt.

Kontaktpunkt zum Griffzentrum, welche eine Translation \vec{t} mit $|\vec{t}| = 0.5d_{pre}$ ist. Das Griffzentrum ist in Abbildung 4.18a durch einen Punkt im Zentrum der pinken Ebene dargestellt. Mit Hilfe von T_g kann die Startpose P_{start} der Hand relativ zum Objekt berechnet werden, sodass der Mittelpunkt der zu greifenden Kugel zwischen den opponierenden Fingern liegt.

4.7.2 Verfeinerung von Handpose und -konfiguration

Die Abbildungen 4.18b und 4.18c zeigen die Hand in der Startpose am Objekt. Da bei der Erzeugung jedes Griffkandidaten nur ein Teil des Objektes betrachtet wird, kommt es beim Testen der Griffkandidaten in der Startpose P_{start} in manchen Fällen zu Kollisionen zwischen der Hand und anderen Teilen des Objektes, wodurch der Griff undurchführbar wird. In einem solchen Fall wird der Griffkandidat verworfen und mit der Simulation des nächsten Kandidaten fortge-

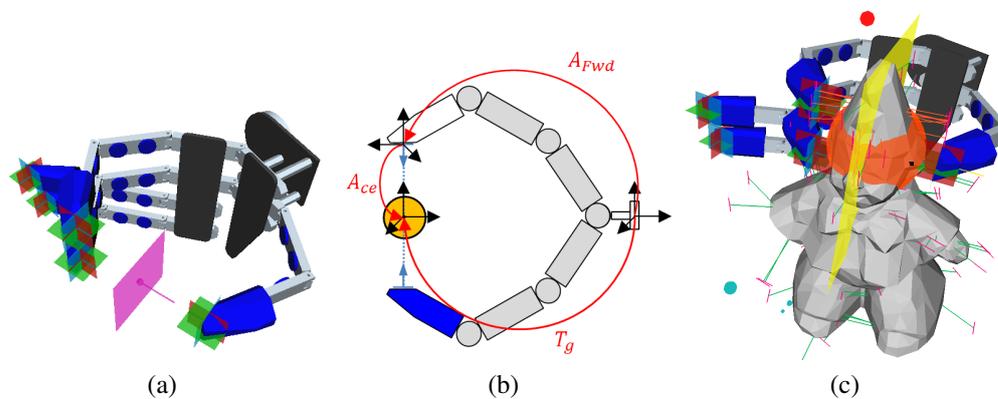


Abbildung 4.18: Das Griffzentrum ist der Punkt genau zwischen den angestrebten Kontaktpunkten auf den Fingerspitzen, hier lila eingezeichnet(a). Die Griffzentrumstransformation T_g setzt sich zusammen aus der Vorwärtskinematik A_{Fwd} vom Handgelenk zum angestrebten Kontaktpunkt auf der Fingerspitze und der Transformation A_{ce} von der Fingerspitze zum Griffzentrum (b). Nach der Berechnung von T_g kann die Hand an einer Startpose relativ zum Objekt positioniert werden, sodass die zu greifende Kugel genau zwischen den angestrebten Kontaktpunkten auf den Fingerspitzen liegt (c).

fahren. In der Startpose P_{start} befindet sich die Hand bereits nahe an ihrer Endpose P_{final} und -konfiguration Θ_{final} , aber es liegt noch kein Kontakt zwischen den Fingern und dem Objekt vor. In einem letzten Schritt werden die am Griff beteiligten Finger schrittweise weiter geschlossen. Dies geschieht, wie beim Anfahren der Vorformungskonfiguration, erneut durch entgegengesetztes Bewegen des DIP - und $MCP_{f/e}$ -Gelenkes jedes Fingers, sodass die Parallelität zwischen den Oberflächennormalen an den angestrebten Kontaktpunkten auf den Fingern weiterhin beibehalten wird (siehe Algorithmus 7). Zusätzlich wird während des Schließens der Finger die Handpose iterativ so korrigiert, dass die zu greifende Kugel zwischen den angestrebten Kontaktpunkten auf den Fingerspitzen bleibt.

Korrektur der Handpose

Wenn die Finger um einen Winkelschritt $\Delta\sigma$ geschlossen werden, ändert sich die Position der distalen Fingersegmente und damit auch die Position der angestrebten Kontaktpunkte relativ zum Griffzentrum um eine Translation

$$\vec{t}_{\Delta\sigma} = \vec{t}_{close} + \vec{t}_{offset}. \quad (4.32)$$

Algorithmus 7 : RefineHandPoseAndConfiguration($hand, obj, \Delta\sigma$)**Eingabe:** Roboterhand $hand$, Objekt obj , Winkelschrittweite $\Delta\sigma$ **Ausgabe:** Finale Handpose P_{final} , finale Handkonfiguration Θ_{final} ,
Kontaktpunkte cp

```

1: while !Collision( $hand, obj$ ) do
2:    $P_{Thumb,before} \leftarrow A_{Fwd}(Thumb)$ 
3:   CloseFinger( $Thumb, \Delta\sigma$ )
4:   CloseFinger( $Index, \Delta\sigma$ )
5:   CloseFinger( $Middle, \Delta\sigma$ )
6:    $P_{Thumb,after} \leftarrow A_{Fwd}(Thumb)$ 
7:    $\vec{t}_{offset} \leftarrow \text{CalculateOffset}(P_{Thumb,before}, P_{Thumb,after})$ 
8:    $hand.Retract(-\vec{t}_{offset})$ 
9:    $P_{Thumb,before} \leftarrow P_{Thumb,after}$ 
10: end while
11: while !Collision( $Thumb, obj$ ) do
12:   CloseFinger( $Thumb, \Delta\sigma$ )
13: end while
14: while !Collision( $Index, obj$ ) do
15:   CloseFinger( $Index, \Delta\sigma$ )
16: end while
17: while !Collision( $Middle, obj$ ) do
18:   CloseFinger( $Middle, \Delta\sigma$ )
19: end while
20:  $P_{final} \leftarrow hand.GetPose()$ 
21:  $\Theta_{final} \leftarrow hand.GetJointAngleVector()$ 
22:  $cp \leftarrow \text{ContactPoints}(hand, obj)$ 
23: return ( $P_{final}, \Theta_{final}, cp$ )

```

In Gleichung (4.32) beschreibt die Komponente \vec{t}_{close} die Translation eines distalen Fingersegmentes zum Griffzentrum hin, während die Komponente \vec{t}_{offset} die Translation des distalen Fingersegmentes parallel zur Handanrückrichtung P_a beschreibt (siehe Abbildung 4.19a). Als Resultat der Translationsbewegung \vec{t}_{offset} liegt die zu greifende Kugel nicht mehr zwischen den angestrebten Kontaktpunkten. Um diesen Effekt auszugleichen, wird die Hand nach jedem Schließen der Finger um den Winkelschritt $\Delta\sigma$ um $-\vec{t}_{offset}$ in die Gegenrichtung bewegt (siehe Abbildung 4.19b). \vec{t}_{offset} kann hierbei mit Hilfe der Vorwärtskinematik des Daumens vor ($P_{Thumb,before}$) und nach ($P_{Thumb,after}$) dem Schließen der Finger um $\Delta\sigma$

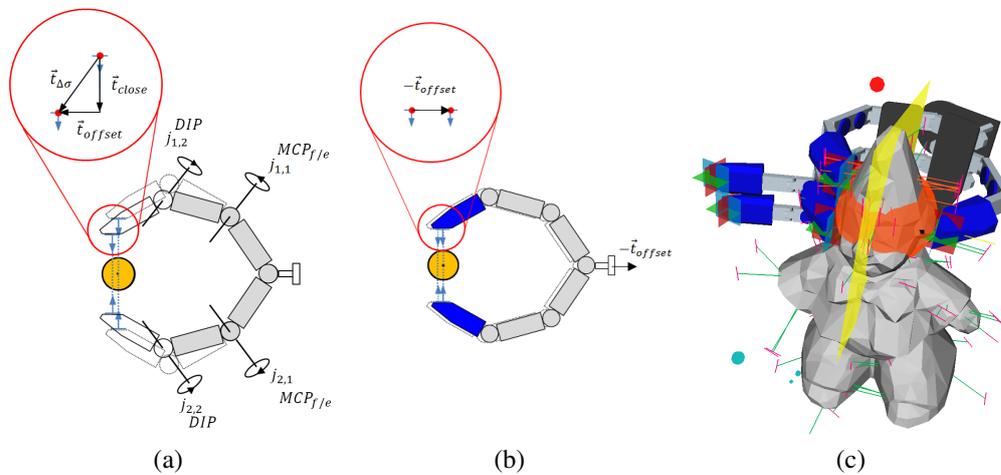


Abbildung 4.19: Korrektur der Handpose beim Schließen der Finger. Durch gegensätzliches Bewegen der DIP- und MCP-f/e-Gelenke der beteiligten Finger um den Winkel $\Delta\sigma$ bewegen sich die angestrebten Kontaktflächen um $\vec{t}_{\Delta\sigma}$, wodurch die zu greifende Kugel nicht mehr zwischen den Kontaktflächen im Griffzentrum liegt (a). Durch Zurückziehen der Hand um $-\vec{t}_{offset}$ kann erreicht werden, dass die zu greifende Kugel wieder genau zwischen den Kontaktflächen liegt (b). Die endgültige Handpose und -konfiguration (c).

berechnet werden. Sobald der erste Finger in Kollision mit dem Objekt ist, werden keine weiteren Korrekturbewegungen mehr ausgeführt. Stattdessen werden alle anderen beteiligten Finger weiter geschlossen (siehe Algorithmus 7, Zeile 11-19), bis sie in Kollision mit dem Objekt stehen. Der resultierende Griff mit der endgültigen Handpose und -konfiguration ist in Abbildung 4.19c zu sehen. Die gegriffene Kugel ist orange und der Illustration wegen leicht vergrößert dargestellt. Ihr Mittelpunkt liegt in der gelb eingezeichneten Ebene, deren Ebenenvektoren durch Anrückrichtung und Orientierungsvektor der Hand beschrieben sind. Endpose P_{final} und Endkonfiguration Θ_{final} der Hand werden gespeichert und anschließend, wie bereits für die Kraftgriffe beschrieben, die tatsächlichen Kontaktpunkte zwischen der Hand und dem Oberflächennetz des Objektes bestimmt und der Griffkandidat auf Kraftschluss getestet.

4.8 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde ein Greifplanungsverfahren vorgestellt, das auf der in Kapitel 3 vorgestellten Objektrepräsentation – dem Gitter medialer Kugeln – basiert und deren Eigenschaften ausnutzt. Es wurde erklärt, wie die in der Mediale-Achse-Transformation enthaltenen Symmetrieeigenschaften von Objekten mittels Hauptkomponentenanalyse lokaler Umgebungen medialer Kugeln extrahiert werden können und wie mit Hilfe dieser Informationen sowohl Kraft- als auch Präzisionsgriffe geplant werden können.

Im nächsten Kapitel werden Experimente und Ergebnisse in der Simulation und auf dem humanoiden Roboter ARMAR-III gezeigt.

Kapitel 5

Experimente und Ergebnisse

In diesem Kapitel werden Experimente zur Evaluation des in Kapitel 4 vorgestellten Greifplanungsverfahrens gezeigt. In Abschnitt 5.1 werden Experimente zur Planung von Kraft- und Präzisionsgriffen für eine Vielzahl von Testobjekten unterschiedlicher Formen und Größen gezeigt. In Abschnitt 5.2 wird die Ausführung der geplanten Griffe auf dem humanoiden Roboter ARMAR-IIIb demonstriert. Abschnitt 5.3 schließt das Kapitel mit einer kurzen Zusammenfassung ab.

5.1 Simulationsexperimente

Für die Auswertung des Greifplanungsverfahrens wurden Vergleichstests durchgeführt, in denen der Oberflächennormalenplaner [Berenson 07] als Referenz verwendet wurde.

5.1.1 Implementierung

Der überwiegende Teil des vorgestellten Verfahrens wurde in Python implementiert und setzt auf der Simulationsumgebung OpenRAVE [Diankov 08] auf. Nur für die Berechnung der konvexen Hülle, die für die Kraftschluss tests nötig ist, wurde die Bibliothek Qhull [Barber 96] verwendet, welche in C++ implementiert ist.

Um die Mediale-Achse-Transformation (MAT) zu berechnen, wurde zunächst mit Hilfe der Software *Tight Cocone* [Dey 03a] die Mediale Achse (MA) auf einer

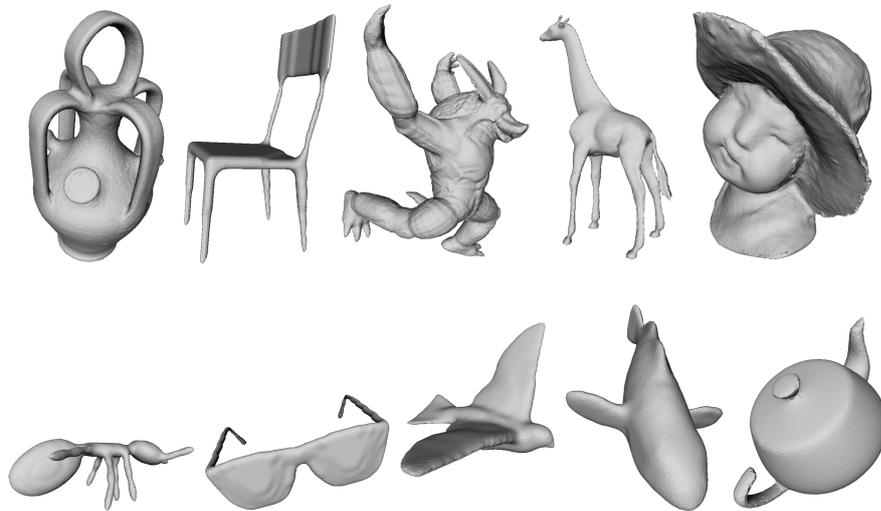


Abbildung 5.1: Objektset 1: Objektmodelle aus dem Chen Mesh Segmentation Benchmark [Chen 09].

Oberflächen-Punktwolke des jeweiligen Objektes berechnet und dann ein einfaches auf Nächster-Nachbar-Suche basierendes Verfahren für die Rekonstruktion der Kugelradien der MAT verwendet [Przybylski 11a].

5.1.2 Handmodell und Testobjekte

Für die Experimente kam ein Simulationsmodell der ARMAR-III-Hand [Asfour 06], einer Fünffingerhand mit elf Freiheitsgraden, zum Einsatz. Die Breite jedes Fingers beträgt 2,0cm, und die Breite der Hand vom Zeigefinger bis zum kleinen Finger beträgt 9,3cm.

Für die Experimente wurden zwei verschiedene Objektsets verwendet. Objektset 1 enthält zehn Objekte aus dem Chen Mesh Segmentation Benchmark [Chen 09] und wird in Abbildung 5.1 gezeigt. Objektset 2 besteht aus Styroporobjekten aus dem Bastelmarkt, deren Oberflächennetze mit Hilfe eines 3D-Laserscanners ([Kasper 07],[Becher 06]) erzeugt wurden (siehe Abbildung 5.2).

5.1.3 Parameterwahl

Im Folgenden werden kurz diejenigen Parameterwerte beschrieben, die für alle Simulationsexperimente gleich gewählt wurden.



Abbildung 5.2: Objektset 2: mit Hilfe eines 3D-Laserscanners ([Kasper 07], [Becher 06]) erzeugte Objektmodelle.

In allen Experimenten wurde ein Punkt-Kontaktmodell mit Coulomb-Reibung verwendet und eine Haftreibungszahl von $\mu_s = 0,5$ angenommen.

Für den in der vorliegenden Arbeit verwendeten MAT-basierten Greifplaner wurde angenommen, dass die größte mit der ARMAR-III-Hand stabil greifbare Kugel einen Durchmesser von 9,4cm aufweist. Wie bereits in Abschnitt 4.2.3 begründet, wurden nur Kugeln mit Objektwinkel $\alpha_o \geq 120^\circ$ für die Erzeugung von Griffkandidaten verwendet. Ferner wurden in allen Experimenten die Schwellwertkonstanten $\rho_a = 0,01$ und $\rho_p = 0,4$ verwendet, um zwischen Kugeln auf lokalen Symmetrieachsen, auf dem Rand lokaler Symmetrieebenen und im Inneren lokaler Symmetrieebenen zu unterscheiden (siehe Abschnitt 4.3). Bei der Erzeugung von Griffkandidaten für Kugeln auf lokalen Symmetrieachsen wurde $c_{steps} = 4$ gewählt, d.h. für den Vollkreis wurden vier Anrückrichtungen im Abstand von jeweils 90° generiert. Abhängig vom jeweiligen Experiment wurden jeweils unterschiedliche Werte für den Suchradius r_N und den minimalen vom Greifplaner betrachteten Kugelradius $r_{o,min}$ getestet und die Ergebnisse verglichen. Durchschnittlich wurden für jede Parameterkombination des MAT-Planers ca. 300 Griffkandidaten pro Objekt erzeugt und getestet.

Im Falle des Oberflächennormalenplaners [Berenson 07] wurde das dort beschrie-

bene auf einem umhüllenden Quader basierende Abtastverfahren benutzt, um Anrückpunkte und Anrückrichtungen für die Objekte zu generieren. Hierbei wurden jeweils vier verschiedene Rollwinkel pro Anrückrichtung erzeugt, wobei die Rollwinkel in 90° -Intervallen inkrementiert wurden. Der Abtast-Parameter wurde so gewählt, dass für jedes Objekt insgesamt 300 bis 500 Griffkandidaten pro Experiment erzeugt und getestet wurden. Sofern bei den einzelnen Experimenten nicht anders angegeben, wurde der Parameter für die Grifftiefe auf 0,0cm gesetzt, d.h. die Finger der Hand wurden geschlossen, sobald keine Durchdringung mit dem Objekt mehr vorlag, aber die Hand wurde nicht weiter entlang der Anrückrichtung vom Objekt zurückgezogen.

5.1.4 Experiment 1: Kraftgriffe auf großen Objekten

Im ersten Experiment wurden Kraftgriffe für die Objekte aus Objektset 1 generiert. Die meisten dieser Objekte sind komplexe Objekte, die als Kompositionen einfacherer Formen betrachtet werden können, und besitzen eine relativ glatte Oberfläche mit wenigen Details. Jedoch sind die betrachteten Objekte groß im Vergleich zur Hand, weshalb sie nicht auf beliebige Weise gegriffen werden können. Stattdessen muss der Greifplaner geometrisch sinnvolle Anrückpunkte, Anrückrichtungen und Handorientierungen generieren.

Für den MAT-basierten Planer wurde ein Suchradius von $r_N = 0,06\text{m}$ verwendet. Hierdurch wird erreicht, dass der für die Symmetrieanalyse und Generierung von Griffkandidaten betrachtete Teil des Objektes mit der Größe der Hand vergleichbar ist, was für die Erzeugung von Kraftgriffen sinnvoll erscheint. Es werden alle Kugeln betrachtet, die nicht zu groß sind, um von der Hand gegriffen zu werden.

Tabelle 5.1 enthält die Ergebnisse des Experiments. Bilder einiger resultierender Griffe sind in Abbildung 5.3 zu sehen. Der MAT-basierte Greifplanungs-Algorithmus findet zuverlässig greifbare Teile des Objektes. Für die meisten Objekte resultiert deutlich mehr als die Hälfte der getesteten Griffkandidaten in Kraftschlussgriffen, durchschnittlich fast in drei von vier Fällen. Der MAT-basierte Planer generiert beispielsweise viele intuitiv anmutende Griffe an den Beinen und der Lehne des Stuhls, sowie an den Henkeln der Amphore und der Teekanne, weil die lokale Dicke der Objekte an den entsprechenden Stellen gut zur Größe der Hand passt. Es werden auch Griffe für die Büste gefunden, die nur an der Hutkrempe gegriffen werden kann. Im Gegensatz dazu generiert der Oberflächennormalenplaner viele Griffkandidaten an Stellen, an denen sich die Finger nicht um das Objekt herum schließen können, was im Vergleich zum MAT-basierten Planer die niedrige Ausbeute an Kraftschlussgriffen erklärt.

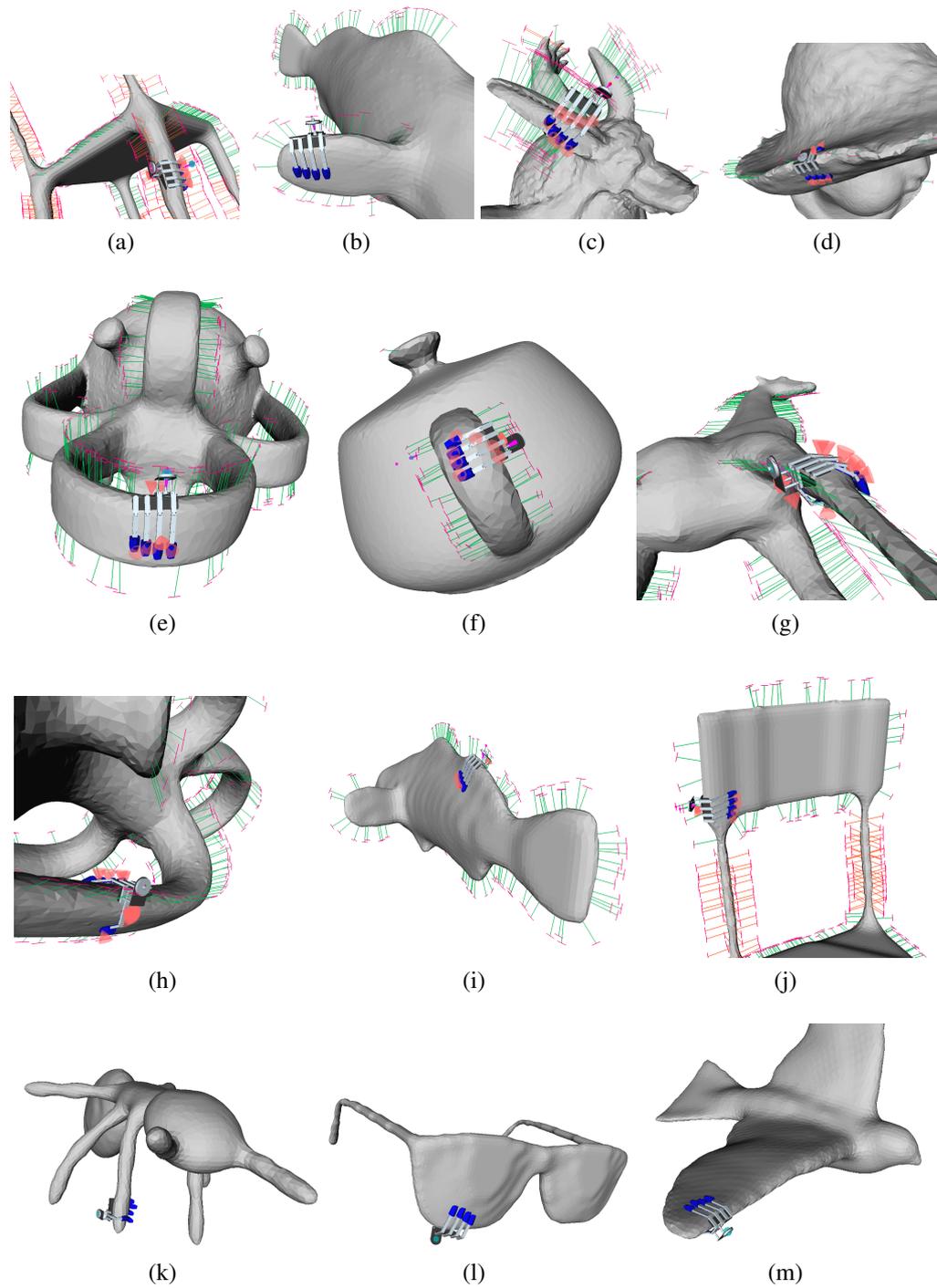


Abbildung 5.3: Einige kraftschlüssige Kraftgriffe für die großen Objekte aus Objektset 1.

Tabelle 5.1: Experiment 1, Kraftgriffe auf großen Objekten: Anteil der Kraftschlussgriffe an der Gesamtzahl erzeugter Griffkandidaten

Planer-Typ	MAT	[Berenson 07]
$r_{o,min}$	0,0	-
r_N	0,06m	-
Brille	67,1%	14,1%
Ameise	95,3%	15,3%
Stuhl	88,0%	14,4%
Fisch	57,3%	0,8 %
Vogel	66,8%	2,7 %
Monster	63,0%	4,7 %
Büste	41,6%	0,0 %
Amphore	75,7%	3,6 %
Teekanne	87,5%	1,9 %
Giraffe	89,5%	20,0%
Durchschnitt	73,2%	7,7 %

5.1.5 Experiment 2: Kraftgriffe auf handgroßen Objekten

Im zweiten Experiment wurden Griffe für die Objekte in Objektset 2 generiert. Diese Objekte sind von ihrer Größe her vergleichbar zur Hand; die meisten der Objekte sind zwischen 10 und 15cm groß, etwas größer sind der Hund mit 22cm und der Gartenzwerg mit 27cm. Die Objekte sind eher kompakt, viele weisen aber dafür deutliche Oberflächendetails auf.

Im Falle des MAT-basierten Planers wurden zwei unterschiedliche Werte für den Suchradius getestet, $r_N = 0,01m$ und $r_N = 0,03m$. Größere Werte wurden nicht getestet, da dies in den meisten Fällen dazu geführt hätte, dass bei der Hauptkomponentenanalyse das ganze Objekt betrachtet würde, was dem Grundgedanken des Teilebasierten Greifens widerspräche. Zusätzlich wurden Kugeln herausgefiltert, welche klein im Vergleich zur größten im Objekt vorhandenen Kugel (mit dem Radius $r_{o,max}$) sind. Hierdurch kann erreicht werden, dass der Planer sich bei der Erzeugung der Griffkandidaten auf die für Kraftgriffe besonders interessanten größeren Kugeln im Objekt konzentriert, während die Oberflächendetails, zu denen vor allem die kleineren Kugeln beitragen, weniger berücksichtigt werden (siehe hierzu auch die Abschnitte 4.2.4 und 4.3).

Die Auswirkungen des Herausfilterns medialer Kugeln mit bestimmten Objektwinkeln und Radien sind in Abbildung 5.4 am Beispiel des Clown-Objektes verdeutlicht. Ein Wert von $r_{o,min} = 0,5r_{o,max}$ bedeutet hier beispielsweise, dass nur Kugeln mit mindestens dem halben Radius der größten im betrachteten Objekt vorkommenden Kugel berücksichtigt werden. Bei $r_{o,min} = 0,3r_{o,max}$ ist die Form des Objektes noch weitgehend erhalten, jedoch mit deutlich weniger Oberflächendetails. Bei $r_{o,min} = 0,5r_{o,max}$ zeigen sich deutlichere Vereinfachungen an den Extremitäten und bei $r_{o,min} = 0,7r_{o,max}$ bleibt nur noch der Torso der Figur übrig, in dem die größten Kugeln liegen.

Abbildung 5.5 zeigt beispielhaft Anrückrichtungen für das Clown-Objekt in Abhängigkeit unterschiedlicher Parameterwerte für den minimalen Kugelradius $r_{o,min}$ und den Suchradius r_N . In der oberen Reihe beträgt der Suchradius $r_N = 1,0\text{cm}$, in der unteren $r_N = 3,0\text{cm}$. Der minimale Kugelradius $r_{o,min}$ nimmt von $r_{o,min} = 0$ (erste Zeile) über $r_{o,min} = 0,3r_{o,max}$ (zweite Zeile), $r_{o,min} = 0,5r_{o,max}$ (dritte Zeile) bis $r_{o,min} = 0,7r_{o,max}$ (vierte Zeile) zu. Der kleinere Suchradius bewirkt eine stärkere Variation bei den Anrückrichtungen, während der größere Suchradius eher zu Ballungen von ähnlichen Anrückrichtungen auf den einzelnen Teilen des Objektes führt. Das Verwerfen kleinerer Kugelradien bei der Erzeugung von Griffkandidaten führt zu einer Konzentration von Anrückrichtungen auf dem Torso des Objektes, der die größte lokale Dicke aufweist.

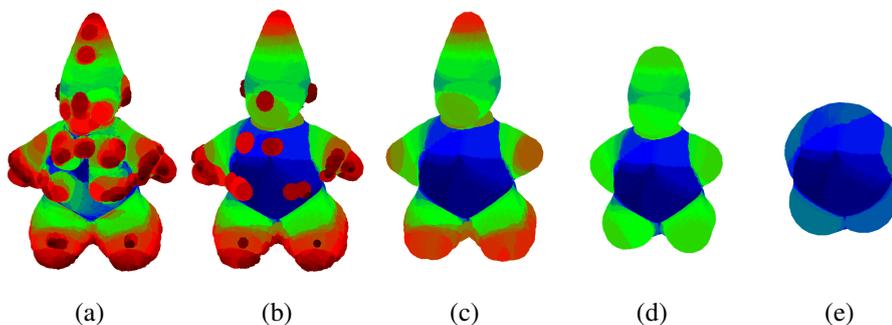


Abbildung 5.4: Die Auswirkungen des Herausfilterns medialer Kugeln mit bestimmten Objektwinkeln und Radien am Beispiel des Clown-Objektes. Alle Kugeln (a), nur Kugeln mit Objektwinkel $\alpha_o \geq 120^\circ$ (b). (c) bis (e): Zusätzliches Verwerfen von Kugeln unterhalb eines Minimalradius $r_{o,min}$, abhängig von der größten im Objekt vorkommenden Kugel mit Radius $r_{o,max}$. $r_{o,min} = 0,3r_{o,max}$ (c), $r_{o,min} = 0,5r_{o,max}$ (d), $r_{o,min} = 0,7r_{o,max}$ (e). Nachdruck aus [Przybylski 12b], ©2012 IEEE.

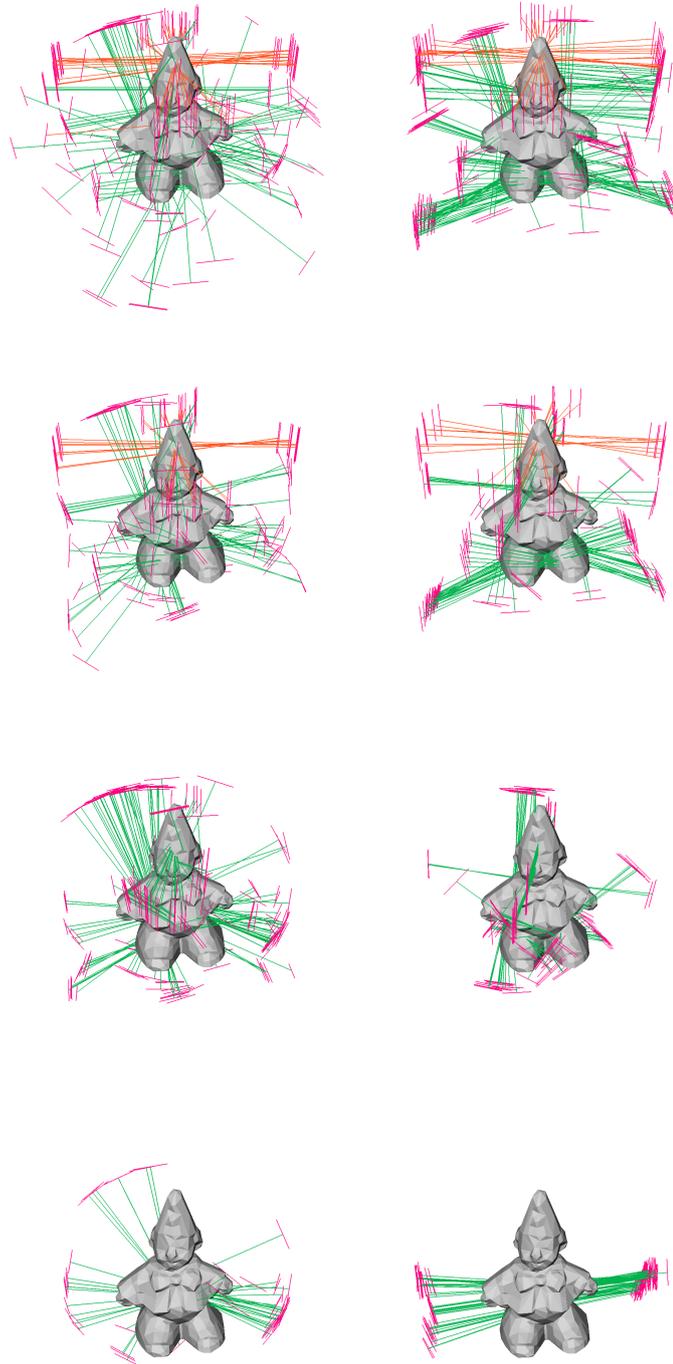


Abbildung 5.5: Für das Clown-Objekt generierte Anrückrichtungen, abhängig von verschiedenen Parameterwerten für Suchradius r_N und minimalen Kugelradius $r_{o,min}$. Linke Spalte: $r_N = 1,0$ cm. Rechte Spalte: $r_N = 3,0$ cm. Erste Zeile: Keine untere Schranke für den Kugelradius. Zweite Zeile: $r_{o,min} = 0,3r_{o,max}$. Dritte Zeile: $r_{o,min} = 0,5r_{o,max}$. Vierte Zeile: $r_{o,min} = 0,7r_{o,max}$. Nachdruck aus [Przybylski 12b], ©2012 IEEE.

Tabelle 5.2: Experiment 2: MAT-Planer, kleiner Suchradius. Anteil der Kraftschlussgriffe an der Gesamtzahl getesteter Griffkandidaten

Planertyp	MAT			
	$r_{o,min}$	$0,3r_{o,max}$	$0,5r_{o,max}$	$0,7r_{o,max}$
r_N	0,01m	0,01m	0,01m	0,01m
Clown	56,8%	52,1%	72,8%	90,7%
Elefant	42,7%	58,0%	69,7%	68,8%
Fisch	61,2%	71,0%	89,6%	91,5%
Gartenzwerg	34,6%	37,3%	53,9%	64,6%
Hund	43,8%	53,8%	51,1%	45,6%
Sitzende Katze	31,4%	52,5%	85,0%	77,3%
Liegende Katze	60,2%	64,7%	67,0%	69,1%
Mond	37,1%	40,2%	44,5%	50,5%
Seehund	65,9%	71,2%	77,6%	89,3%
Stern	24,4%	34,8%	43,1%	60,7%
Durchschnitt	45,8%	53,6%	65,4%	70,8%

Die Ergebnisse des Experiments sind in den Tabellen 5.2, 5.3 und 5.4 zu sehen. Die Tabellen 5.2 und 5.3 enthalten die Ergebnisse für den MAT-basierten Planer für einen kleinen und einen großen Wert des Suchradius r_N . Tabelle 5.4 enthält zum Vergleich die Ergebnisse des Oberflächennormalenplaners [Berenson 07].

Die durchschnittliche Leistung des MAT-basierten Greifplaners ist zunächst ungefähr mit der Leistung des Oberflächennormalenplaners vergleichbar, verbessert sich allerdings schrittweise auf eine Ausbeute von bis zu 80,2% Kraftschlussgriffen, wenn bei der Erzeugung von Griffkandidaten nur größere Kugelradien berücksichtigt werden und ein größerer Suchradius von $r_N = 0,03m$ verwendet wird. Für $r_{o,min} = 0,7r_{o,max}$ und $r_N = 0,03m$ werden beispielsweise für den Elefanten keine Griffkandidaten am Rüssel generiert, und für Objekte wie den Gartenzwerg werden nur Griffkandidaten erzeugt, die den Körper umfassen. Die Bilder einiger resultierender Griffe sind in Abbildung 5.6 zu sehen.

Der Oberflächennormalenplaner erzielt durchschnittlich eine Ausbeute von 53,4% Kraftschlussgriffen unter den generierten Griffkandidaten. Dies ist durch die Größe der Testobjekte erklärbar. Da die meisten der Testobjekte gut in die Hand passen, hängt das Zustandekommen von Kraftschlussgriffen vor allem davon ab, ob die Handorientierung es erlaubt, dass die Finger der Hand sich während

Tabelle 5.3: Experiment 2: MAT-Planer, großer Suchradius. Anteil der Kraftschlussgriffe an der Gesamtzahl getesteter Griffkandidaten

Planertyp	MAT			
	$r_{o,min}$	$0,3r_{o,max}$	$0,5r_{o,max}$	$0,7r_{o,max}$
r_N	0,03m	0,03m	0,03m	0,03m
Clown	41,1%	50,4%	74,6%	94,2 %
Elefant	51,1%	76,9%	78,3%	95,6 %
Fisch	64,6%	79,6%	92,2%	97,1 %
Gartenzwerg	33,6%	35,2%	62,9%	81,6 %
Hund	30,5%	50,5%	52,3%	47,9 %
Sitzende Katze	22,8%	71,1%	99,0%	92,3 %
Liegende Katze	45,2%	64,0%	74,1%	57,5 %
Mond	45,5%	46,3%	46,6%	53,1 %
Seehund	64,6%	70,9%	76,7%	83,1 %
Stern	35,2%	39,3%	43,8%	100,0%
Durchschnitt	43,4%	58,4%	70,1%	80,2 %

Tabelle 5.4: Experiment 2: Oberflächennormalenplaner [Berenson 07]: Anteil der Kraftschlussgriffe an der Gesamtzahl getesteter Griffkandidaten

Planertyp	[Berenson 07]
Clown	62,5%
Elefant	77,1%
Fisch	70,7%
Gartenzwerg	29,4%
Hund	34,6%
Sitzende Katze	68,3%
Liegende Katze	57,8%
Mond	30,7%
Seehund	53,7%
Stern	49,5%
Durchschnitt	53,4%

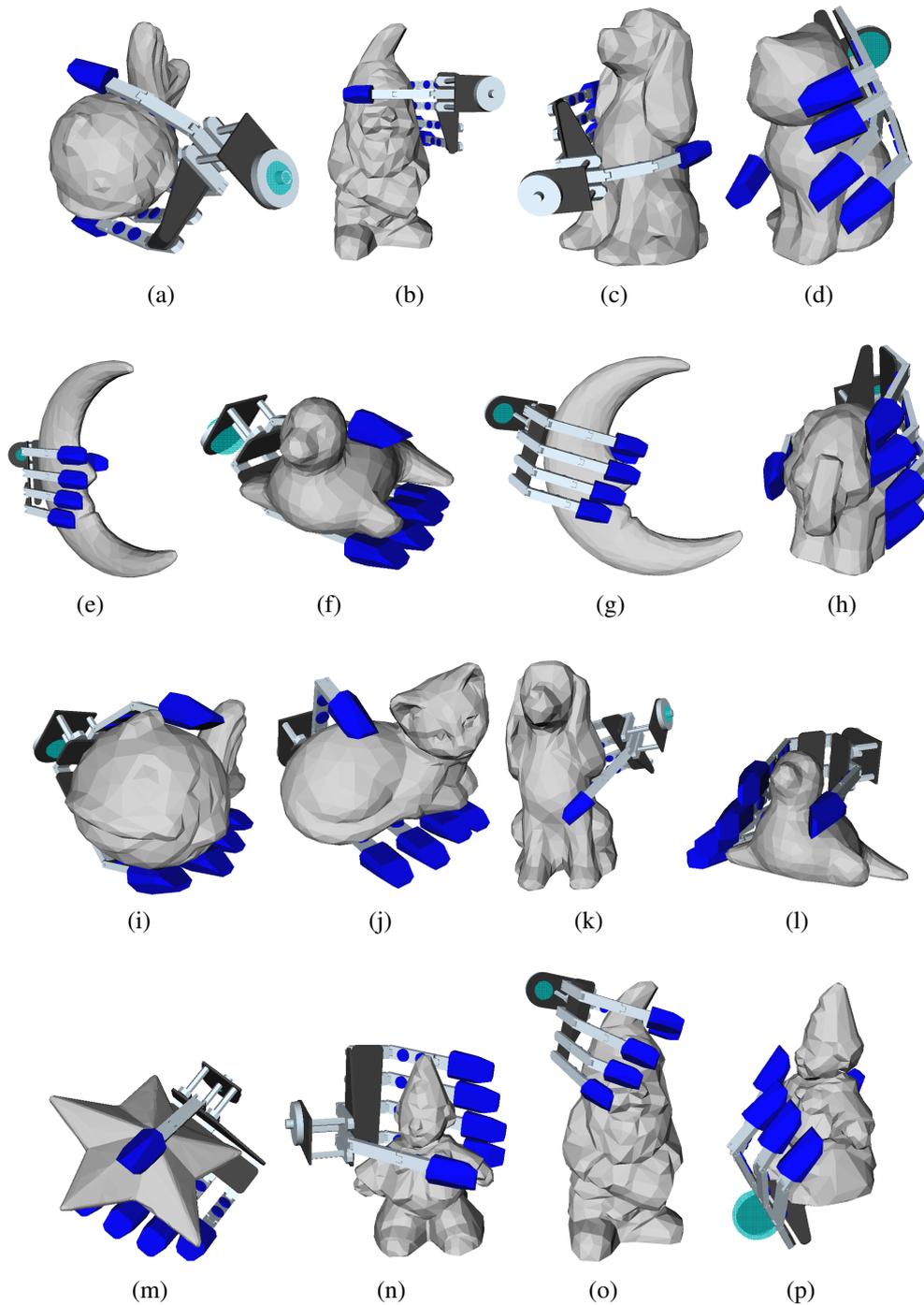


Abbildung 5.6: Einige Beispiele für kraftschlüssige Kraftgriffe für handgroße Objekte aus Objektset 2. Abbildungen (g) bis (o) sind Nachdrucke aus [Przybylski 11a], ©2011 IEEE

des Greifens um das Objekt herum schließen können.

5.1.6 Experiment 3: Präzisionsgriffe

Im dritten Experiment wurden prismatische Dreifingerpräzisionsgriffe [Cutkosky 89] generiert. Als Testobjekte dienten fünf Objekte aus Objektset 2 in ihrer Originalgröße und zwei Objekte aus Objektset 1, die auf 25% ihrer Originalgröße herunterskaliert wurden, um das Finden von Präzisionsgriffen zu ermöglichen.

Für den MAT-basierten Greifplaner wurden erneut zwei unterschiedliche Suchradien und zwei unterschiedliche Werte für den minimalen zu betrachtenden Kugelradius $r_{o,min}$ getestet. Im Unterschied zum vorhergehenden Kraftgriff-Experiment wurden jedoch vor der Greifplanung nicht so viele kleinere Kugeln herausgefiltert, da diese speziell für Präzisionsgriffe von Bedeutung sind. Es wurde eine Vorformungsöffnungsdistanz d_{pre} in Höhe von 200% des Durchmessers der jeweils zu greifenden Kugel verwendet, d.h. $k = 2$ in Gleichung (4.30).

Für den Oberflächennormalenplaner wurden weitgehend dieselben Einstellungen verwendet wie in den vorangehenden Experimenten, bis auf die Anzahl der beteiligten Finger und die Grifftiefe. In diesem Experiment wurden beim Greifen nur der Daumen, der Zeige- und der Mittelfinger geschlossen, um Dreifingergriffe zu erzeugen, während die anderen Finger in geöffneten Konfigurationen blieben. Die durch den Oberflächennormalenplaner generierten Griffkandidaten wurden mit Griffiefen von 5.0cm und 7.0cm getestet. Diese Werte wurden empirisch ermittelt und führen unter der Annahme, dass die Heuristik des Oberflächennormalenplaners sinnvolle Werte für Griffpunkt P_g , Anrückrichtung P_a und Handorientierung P_o generiert, in der Regel dazu, dass die Finger der ARMAR-III-Hand das Objekt auf gegenüberliegenden Seiten kontaktieren und ein kraftschlüssiger prismatischer Dreifingerpräzisionsgriff entsteht.

Wie Tabelle 5.5 entnommen werden kann, erzielte der MAT-basierte Greifplaner im Durchschnitt eine etwa viermal so große Ausbeute an Kraftschlussgriffen wie der Oberflächennormalenplaner. Der Oberflächennormalenplaner erzielte besonders für die verkleinerten Versionen der Giraffe und der Brille niedrige Ausbeuten an Kraftgriffen. Dies ist dadurch erklärbar, dass diese Objekte trotz des Herunterskalierens etwas größer als die Hand sind, wodurch einige Teile der Objekte nicht aus beliebigen Richtungen und mit beliebigen Handorientierungen greifbar sind. Dies trifft ebenso auf das Mond-Objekt zu. Der Fisch hingegen passt sehr gut in

Tabelle 5.5: Experiment 3, Präzisionsgriffe: Anteil der Kraftschlussgriffe an der Gesamtzahl getesteter Griffkandidaten

Planertyp	MAT				[Berenson 07]
	0,0		0,3 $r_{o,max}$		
$r_{o,min}$	0,01m		0,03m		-
r_N	0,01m		0,03m		-
Clown	27,7%	15,8%	41,3%	29,9%	10,8%
Elefant	4,3 %	5,9 %	2,3 %	3,8 %	15,9%
Fisch	40,3%	24,7%	46,8%	29,6%	27,2%
Mond	83,0%	91,6%	84,2%	92,3%	5,3 %
Seehund	59,8%	58,7%	67,1%	61,1%	10,8%
Brille 25%	85,0%	88,7%	84,5%	88,7%	3,1 %
Giraffe 25%	36,1%	47,1%	19,0%	18,7%	9,4 %
Durchschnitt	48,0%	47,5%	49,3%	46,3%	11,8%

die ARMAR-III-Hand. Hierdurch ergeben sich kaum Einschränkungen für mögliche Anrückrichtungen und Handorientierungen, woraus sich auch die recht guten Ergebnisse des Oberflächennormalenplaners in diesem Fall erklären. Die Ergebnisse für den Elefanten sind aus anderen Gründen interessant. Der Elefant passt, wie der Fisch, gut in die Hand. Der MAT-basierte Planer erzeugte viele Griffkandidaten am Rüssel des Elefanten. Diese führten jedoch in vielen Fällen nicht zu Kraftschlussgriffen, weil die Hand an ihrer Startpose P_{start} in Durchdringung mit dem Torso des Elefanten stand. Beobachtungen bei allen Simulationsexperimenten insgesamt zeigten, dass dies im Falle von Präzisionsgriffen speziell bei komplexen verzweigten Objekten häufiger vorkam. Üblicherweise wurde die Mehrheit der gescheiterten Präzisionsgriffe nicht durch unpassende Fingerplatzierung relativ zu greifbaren Teilen des Objektes verursacht, sondern durch gegenseitige Durchdringung zwischen nicht betrachteten Teilen der Hand (d.h. Handteller, unbeteiligte Finger) und anderen Teilen des Objektes. Es sollte möglich sein, dieses Problem durch weitere Verfeinerung der für die Griffkandidaten-Erzeugung verwendeten Heuristiken zu lösen, indem z.B. nur solche Griffkandidaten generiert werden, bei denen die Hand sich dem Objekt aus einer dem Objektschwerpunkt abgewandten Richtung nähert.

Einige Beispiele für resultierende Präzisionsgriffe sind in Abbildung 5.7 zu sehen. Der orange eingezeichnete Bereich bei einigen der abgebildeten Griffe repräsentiert den sichtbaren Teil der Oberfläche der jeweils gegriffenen medialen Kugel,

Tabelle 5.6: Durchschnittliche Rechenzeiten für Symmetrieanalyse und Griffkandidatenerzeugung für eine einzelne Kugel.

	$r_N = 0,01m$	$r_N = 0,03m$	$r_N = 0,06m$
$r_{o,min} = 0,0$	0,016s	0,037s	0,006s
$r_{o,min} = 0,3r_{o,max}$	0,013s	0,035s	-
$r_{o,min} = 0,5r_{o,max}$	0,013s	0,027s	-
$r_{o,min} = 0,7r_{o,max}$	0,011s	0,024s	-

wobei deren Radius für die Visualisierung um 20% vergrößert wurde.

5.1.7 Rechenzeiten

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Simulationsexperimente wurden auf einem handelsüblichen Laptop-Rechner mit Intel-Core-i7-M620-Prozessor mit 2,67 GHz Taktfrequenz und 4,0 GB Arbeitsspeicher unter dem Betriebssystem Ubuntu 11.04 durchgeführt. An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass keine besonderen Anstrengungen unternommen wurden, das durch den Mehrkernprozessor gegebene Parallelisierungspotenzial auszunutzen. Aus diesem Blickwinkel betrachtet, dürften die Rechenzeiten, die in diesem Abschnitt aufgeführt werden, eher konservativ sein. Die durchschnittliche benötigten Rechenzeiten, um die lokale Umgebung einer medialen Kugel zu untersuchen und daraus Griffkandidaten zu generieren, sind für verschiedene Belegungen der Parameter r_N und $r_{o,min}$ in Tabelle 5.6 aufgeführt. Diese Rechenzeiten spiegeln vor allem den Rechenaufwand für den Zugriff auf benachbarte Kugeln im Gitter medialer Kugeln (siehe Abschnitt 3.4.3) und die Hauptkomponentenanalyse auf deren Mittelpunkten (siehe Abschnitt 4.3) wider.

Im Falle eines Suchradius von $r_N = 0,03m$ enthält die lokale Umgebung einer Kugel mehr Kugeln als bei $r_N = 0,01m$, wodurch die Erzeugung von Griffkandidaten etwas länger dauert. Der sehr kleine Wert für $r_N = 0,06m$ ist nicht direkt mit den anderen Ergebnissen vergleichbar, da $r_N = 0,06m$ nur für die Objekte in Objektset 1 in ihrer Originalgröße verwendet wurde, welche im Vergleich niedriger aufgelöste Oberflächennetze und daher auch eine niedrigere Dichte medialer Kugeln aufweisen. Wie zu erwarten, fallen die Rechenzeiten für steigende Werte von $r_{o,min}$, da in diesem Fall in den lokalen Umgebungen weniger Kugeln betrachtet werden.

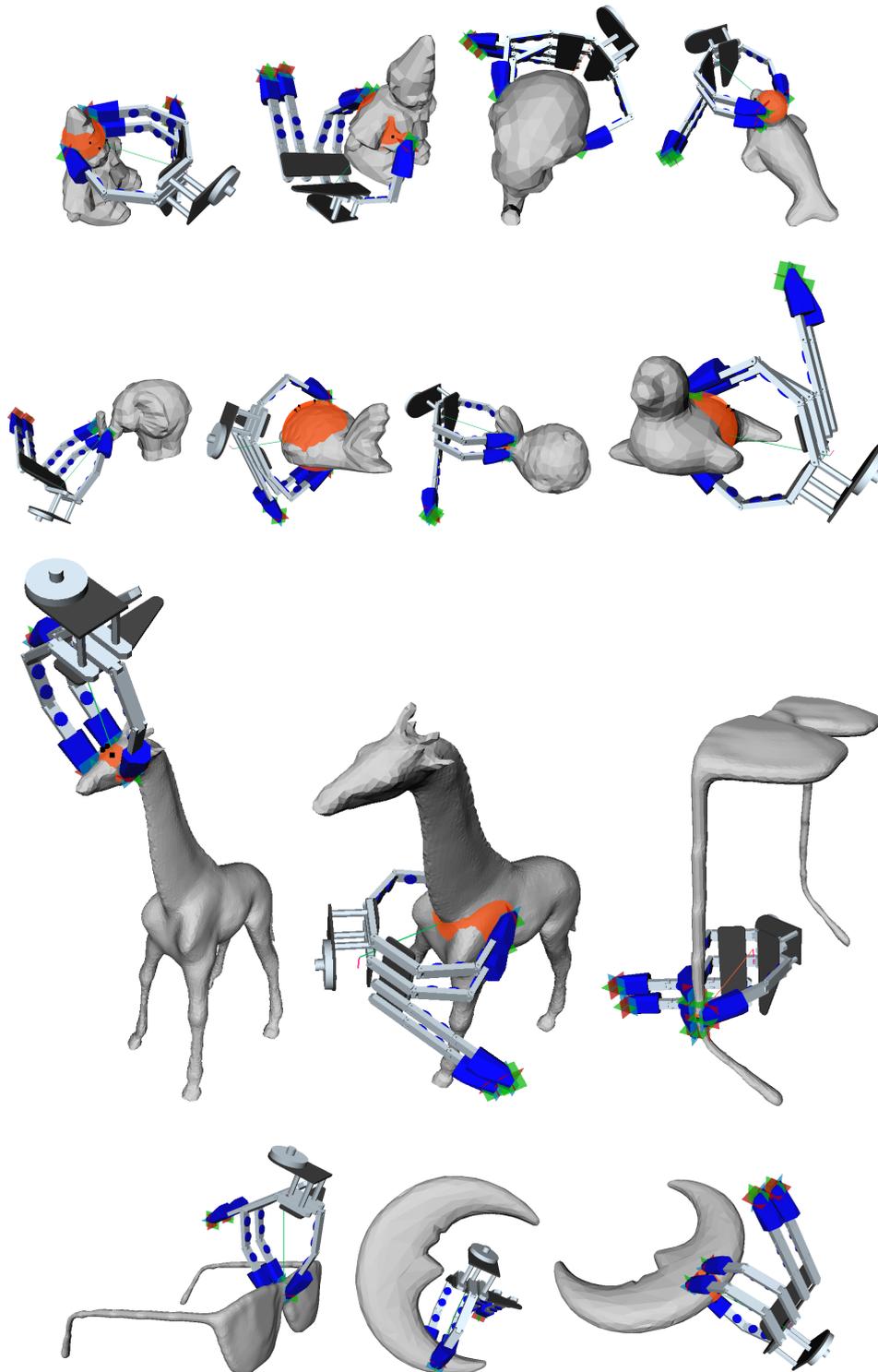


Abbildung 5.7: Einige Beispiele für kraftschlüssige Präzisionsgriffe, die durch den MAT-basierten Greifplaner gefunden wurden.

Tabelle 5.7: Durchschnittliche Testzeiten pro Griffkandidat.

	MAT	[Berenson 07]
Kraftgriffe auf großen Objekten	0.87s	0.71s
Kraftgriffe auf handgroßen Objekten	0.56s	0.82s
Präzisionsgriffe	0.19s	0.35s

Die durchschnittlichen für den Test eines Griffkandidaten benötigten Zeiten sind in Tabelle 5.7 aufgeführt. Die Testzeit für jeden Griffkandidaten setzt sich aus der Zeit für das Schließen der Finger inklusive der dabei durchgeführten Kollisionstests und der Zeit für den Kraftschlusstest [Ferrari 92] zusammen.

Im Falle der Kraftgriffe für große Objekte in Experiment 1 ist der Oberflächennormalenplaner etwas schneller. Dies ist durch die Erzeugung vieler Griffkandidaten auf flachen Teilen der Objekt Oberfläche bedingt. In diesem Fall können sich die Finger innerhalb weniger Iterationen schließen, bis jeweils Kontakt zum Objekt auftritt. Dies führt außerdem oft nur zu wenigen Kontakten an Daumen, Zeigefinger und Mittelfinger, weil Ring- und kleiner Finger etwas kürzer sind, und kleinere Kontaktanzahlen führen wiederum zu schnelleren Kraftschlussberechnungen. Der MAT-basierte Planer hingegen generiert mehr Griffkandidaten an Stellen, an denen sich die Finger um das Objekt schließen können, wodurch mehr Kontaktpunkte entstehen.

Bei den Kraftgriffen für die handgroßen Objekte in Experiment 2 ist der MAT-basierte Planer etwas schneller, weil durch das Fingerschließen mittels Intervallschachtelung (siehe Abschnitt 4.6.2) weniger Iterationen und daher weniger Kollisionstests nötig sind.

Im Falle der Präzisionsgriffe in Experiment 3 ist erneut der MAT-basierte Planer etwas schneller, und zwar wegen folgender Zeiteinsparungen: Das Bewegen der Finger in die Vorformungskonfiguration kann ohne Kollisionstests erfolgen. Außerdem ist nur ein einmaliger Kollisionstest zwischen Objekt und allen Teilen der Hand nötig, um zu prüfen, ob die Hand an der Startpose P_{start} vor dem Schließen der Finger bereits in Durchdringung mit dem Objekt steht.

5.2 Greifexperimente auf dem humanoiden Roboter ARMAR-IIIb

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Ergebnisse von Simulationsexperimenten zur Erzeugung von Kraftschlussgriffen gezeigt. Im Folgenden wird die Ausführung solcher Griffe auf dem humanoiden Roboter ARMAR-IIIb [Asfour 06] und entsprechende Experimente beschrieben, wie schon in [Przybylski 12b] präsentiert.

5.2.1 Griffausführung auf ARMAR-IIIb

Wegen Einschränkungen durch die Umwelt und Erreichbarkeitsbedingungen können nicht alle geplanten Griffe in jeder Situation ausgeführt werden.

Objektlokalisierung

Die kinematische Erreichbarkeit eines Griffes hängt ab von der Objektpose in der Szene relativ zum Roboter, welche mit Methoden der Objektlokalisierung [Azad 09] bestimmt wird. Sobald die Objektpose bekannt ist, können die geplanten Griffe vom objektzentrierten Koordinatensystem in das Plattform-Koordinatensystem des Roboters transformiert werden, um sie anschließend auszuführen.

Etappen der Anrückbewegung

Das Ausführen eines Griffes auf ARMAR-IIIb erfolgt in drei Schritten: Zunächst wird die Hand an eine Pre-Grasp-Pose relativ zum Objekt bewegt, dann im zweiten Schritt zur finalen Handpose, wo im dritten Schritt schließlich die Finger um das Objekt herum geschlossen werden. Die Pre-Grasp-Pose ist notwendig, um eine kollisionsfreie Bewegung der Hand zur finalen Greifpose sicherstellen zu können, ohne dass das zu greifende Objekt durch unerwünschte Kollisionen zwischen Hand und Objekt weggeschoben, verdreht oder umgeworfen wird. Die Greifpose schließlich ist die finale Handpose relativ zum Objekt, die durch den Greifplaner generiert wird. Die Pre-Grasp-Pose kann aus der Greifpose generiert werden, indem die Hand entlang der Handanrückrichtung um eine kurze Distanz vom Objekt weg bewegt wird.

Erreichbarkeitstests und visuell überwachte Ausführung

Kinematisch unerreichbare Griffe können mit Hilfe der in [Vahrenkamp 09] vorgestellten Methode der Erreichbarkeitsverteilungen (engl.: Reachability Spaces) identifiziert und herausgefiltert werden. Die verbleibenden erreichbaren Griffe können dann auf dem Roboter ausgeführt werden. Um Ungenauigkeiten in der Objektposenschätzung und der Ausführung der Armbewegungen auszugleichen, wird der in [Vahrenkamp 08] beschriebene Visual Servoing Ansatz verwendet, bei dem sowohl Objektpose als auch Endeffektorpose kontinuierlich beobachtet werden, um die Hand erst zur Pre-Grasp-Pose und anschließend zur finalen Greifpose zu bewegen. Sobald die Hand die Greifpose relativ zum Objekt erreicht hat, werden die Finger geschlossen und das Objekt anschließend hochgehoben.

5.2.2 Experimente

Einige geplante Kraftgriffe für die in Abbildung 5.8a gezeigten Objekte aus Objektset 2 wurden auf ARMAR-IIIb ausgeführt. Die einzelnen Schritte der Griff-

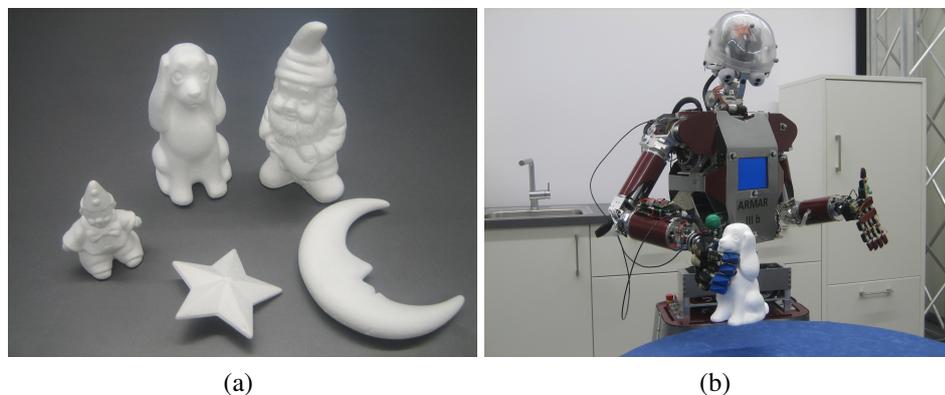


Abbildung 5.8: Testobjekte für die Greifexperimente (a). ARMAR-IIIb greift ein Objekt (b). Nachdrucke aus [Przybylski 12b], ©2012 IEEE.

ausführung sind in Abbildung 5.9 durch ARMARs Kamerabilder und eine virtuelle Repräsentation der Szene illustriert. Für die Ausführung der Griffe wurde das jeweilige Testobjekt auf einem Tisch vor dem Roboter positioniert (Abbildung 5.9, erste Zeile). Im Falle des Mondes und des Sterns wurde das Objekt mit Draht auf einem kleinen Stück Karton befestigt, um eine aufrechte Position des Objektes zu gewährleisten. Die zweite Zeile von Abbildung 5.9 zeigt

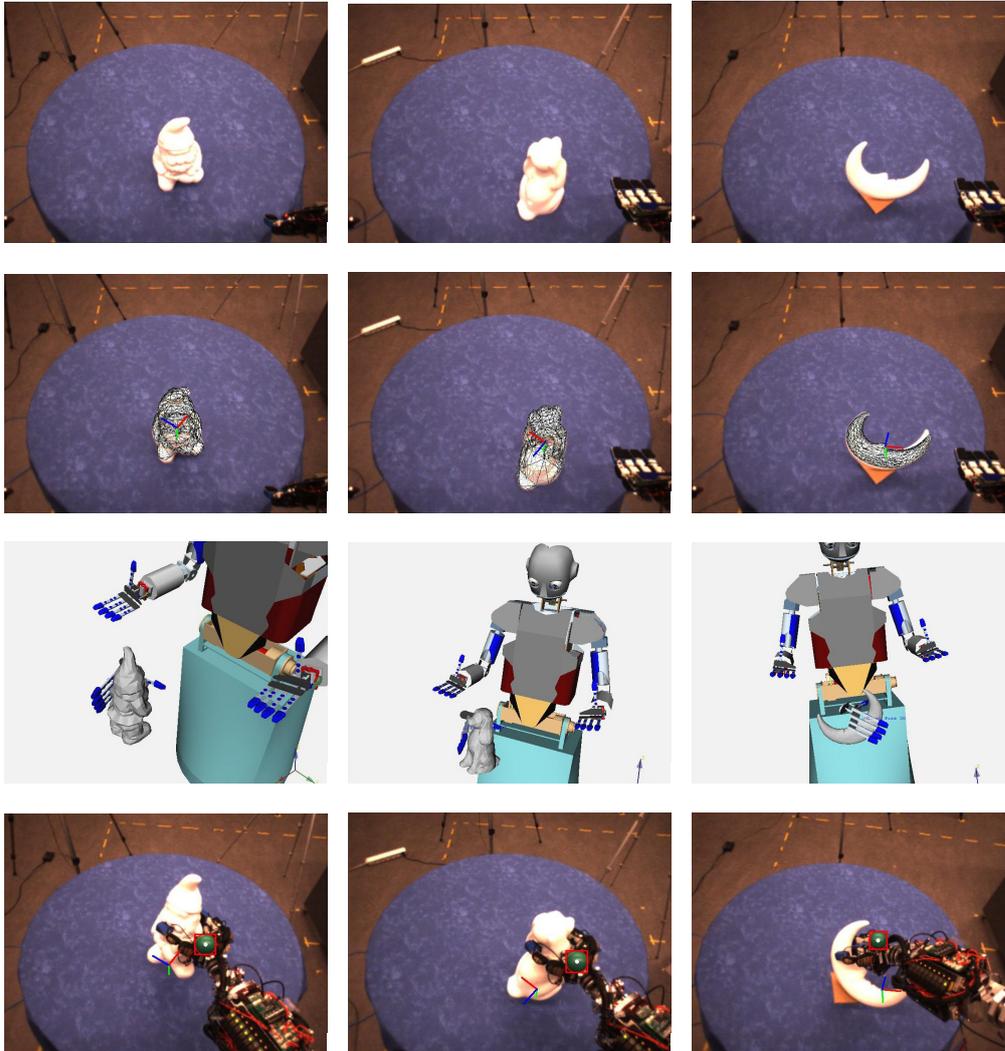


Abbildung 5.9: Schritte der Griffausführung. Erste Zeile: Das Testobjekt auf dem Tisch vor dem Roboter. Zweite Zeile: Objektkoordinatensystem mit überlagertem Objektoberflächennetz. Dritte Zeile: Ausgewählter Griff. Vierte Zeile: ARMAR greift das Objekt und hebt es hoch. Nachdrucke aus [Przybylski 12b], ©2012 IEEE.

die Lokalisierung [Azad 09] des jeweiligen Objektes in ARMARs Kamerabil-
dern mit einer überlagerten Darstellung eines Drahtgittermodells des Objektes.
Nach Transformation der Griffe vom Objektkoordinatensystem ins Plattformkoo-
ordinatensystem des Roboters und Herausfiltern kinematisch unerreichbarer Griffe
[Vahrenkamp 09] blieben einige durchführbare Griffe übrig. Die dritte Zeile von
Abbildung 5.9 zeigt einige dieser Griffe, die für die Ausführung ausgewählt wur-
den. Die vierte Zeile von Abbildung 5.9 zeigt das jeweils gegriffene Objekt nach
dem Anrücken der Hand, Schließen der Finger und abschließendem Hochheben.

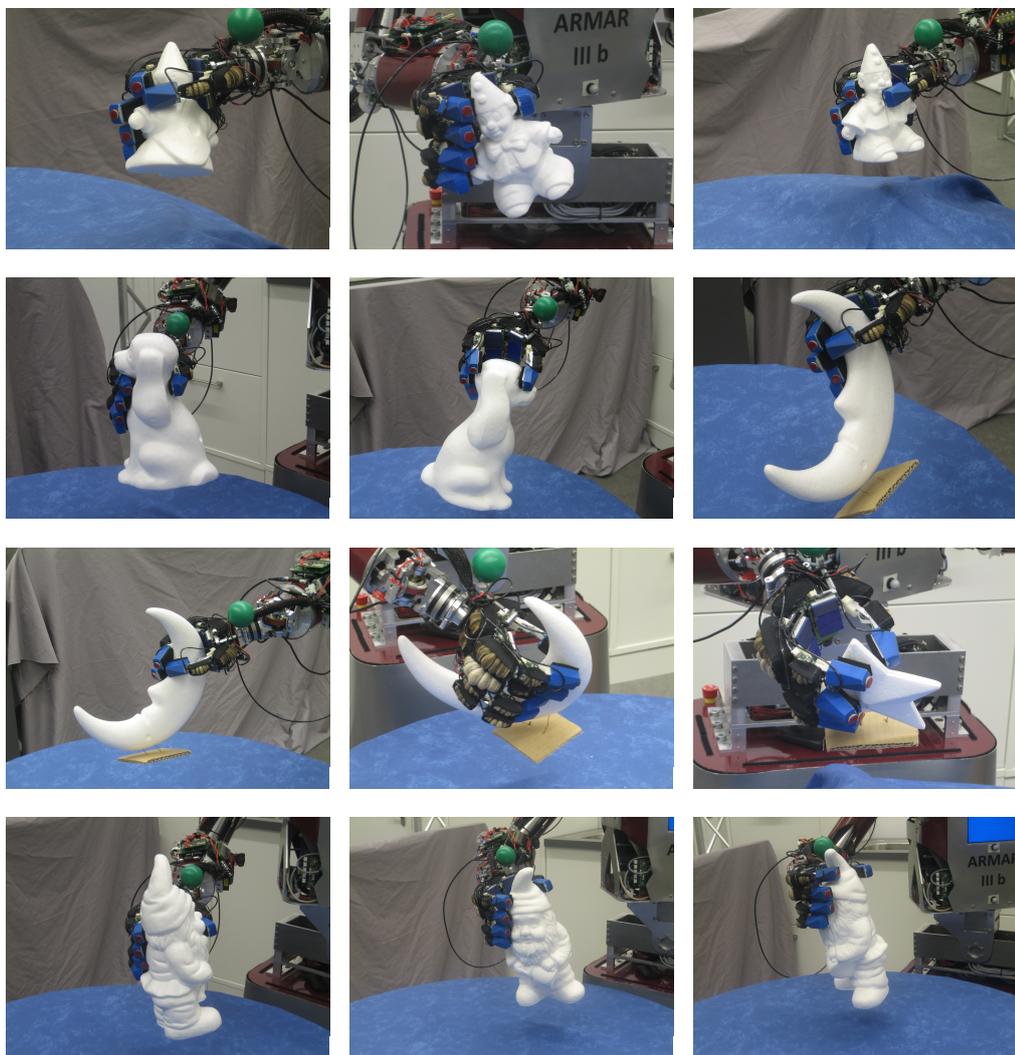


Abbildung 5.10: Einige Beispielgriffe, die während der Experimente ausgeführt wurden. Nachdrucke aus [Przybylski 12b], ©2012 IEEE.

Ergebnisse und Bewertung

In den Experimenten war ARMAR in der Lage, alle Testobjekte zu greifen. Einige der resultierenden Griffe sind in Abbildung 5.10 zu sehen.

Es muss erwähnt werden, dass trotz der Nutzung von Visual Servoing für die Armbewegung die Handpose relativ zum Objekt mit einer Restungenauigkeit behaftet ist, da sowohl Hand- als auch Objektpose visuell bestimmt werden. Hinzu kommt, dass durch die pneumatische Aktuierung der Finger die finalen Fingerposen und damit auch die Kontakte zwischen den Fingern und dem Objekt von denjenigen Werten abweichen, die vom Greifplaner in der Simulation berechnet wurden. Diese beiden Umstände führten im Experiment dazu, dass das zu greifende Objekt in manchen Fällen durch die Handfläche oder die Finger ein Stück verschoben oder während des Schließens der Finger etwas gedreht wurde.

Andererseits zeigen die Experimente, dass der in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Ansatz zur Greifplanung robust genug ist, um zumindest teilweise Ungenauigkeiten in Sensorik und Aktorik des Roboters zu kompensieren. Da der Greifplaner bei Bedarf so parametrisiert werden kann, dass er nur Griffe für die von der Größe her am besten greifbaren Kugeln im Objekt generiert, fällt die begrenzte Genauigkeit des Roboters nicht mehr so sehr ins Gewicht. Besitzt das Objekt an der zu greifenden Stelle eine passende lokale Dicke, muss die Hand nur noch so positioniert werden, dass das Objekt beim Schließen der Finger zwischen dem Daumen und den anderen Fingern eingeklemmt wird, was trotz der begrenzten Genauigkeit von Sensorik und Aktorik meist möglich ist.

5.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde das in Kapitel 4 vorgestellte MAT-basierte Greifplanungsverfahren evaluiert. In Simulationsexperimenten wurden für zwei Sets von Testobjekten Griffe für die ARMAR-III-Hand geplant. Hierbei wurden Kraftgriffe für große und handgroße Objekte sowie prismatische Präzisionsgriffe erzeugt. In allen Experimenten diente der Oberflächennormalenplaner [Berenson 07] als Referenz. Im Vergleich zu diesem konnte der in der vorliegenden Arbeit vorgestellte MAT-basierte Greifplaner im Durchschnitt eine deutlich höhere Ausbeute an Kraftschlussgriffen erzielen. Ferner wurde in einem weiteren Experiment die Ausführung der geplanten Griffe auf dem humanoiden Roboter ARMAR-IIIb gezeigt, der trotz begrenzter Genauigkeit von Sensorik und Aktorik in der Lage war, alle Testobjekte zu greifen.

Kapitel 6

Weitere Untersuchungen und Anwendungen

Im vorangegangenen Kapitel wurden die neu entwickelten Methoden der Greifplanung in der Simulation und auf dem humanoiden Roboter ARMAR-III evaluiert. In diesem Kapitel werden zwei Beispiele diskutiert, in denen die Greifplanungsmethoden ebenfalls zur Anwendung kamen und für weitere Untersuchungen verwendet wurden. Dies sind zum einen die zweihändige Greifplanung und zum anderen die Griffauswahl anhand menschlicher Griffdaten.

6.1 Zweihändige Greifplanung

6.1.1 Einleitende Betrachtungen

Während die einhändige Greifplanung bereits seit Jahrzehnten Gegenstand der Forschung ist, wurde das Problem der zweihändigen Greifplanung kaum betrachtet. Die bislang einzige dem Autor bekannte Arbeit, die dieses Gebiet zumindest streift, wurde in [Berenson 08] präsentiert, in der die zweihändige Greifplanung als Spezialfall der einhändigen Greifplanung gesehen wird, bei dem die beiden geöffneten Hände zusammen mit der dazwischen liegenden sie verbindenden kinematische Kette als ein großer virtueller Endeffektor behandelt werden. Die Einschränkungen durch die Armkinematik in Bezug auf die Erreichbarkeit, die bei zweihändigen Griffen eine noch weit größere Rolle spielen als beim einhändigen Greifen, werden zwar auch für zweihändige Robotersysteme behandelt, jedoch kaum im Zusammenhang mit Greifplanung. Beispielsweise wird in [Berenson 09]

unter anderem auf die Bedeutung geschlossener kinematischer Ketten bei der Bahnplanung eingegangen. In [Vahrenkamp 09] wird die effiziente Planung von Übergabebewegungen (engl. hand-over motions) unter Ausnutzung von Erreichbarkeitsinformationen behandelt. In [Zacharias 10] wird die Verwendung von Erreichbarkeitsinformationen für zweihändige Aktionen betrachtet, jedoch mit einem Hauptaugenmerk auf der Aktionsplanung (engl. Task planning), nicht auf der Greifplanung.

Gestützt auf frühere Untersuchungen zur Erreichbarkeitsanalyse [Vahrenkamp 09] wird im Folgenden ein Verfahren zur zweihändigen Greifplanung vorgestellt, das eine Anwendung bzw. Erweiterung des in Kapitel 4 vorgestellten einhändigen Greifplaners im Hinblick auf zweihändiges Greifen darstellt und die Manipulabilität einer kinematischen Konfiguration als zusätzliches Maß für die Qualität eines zweihändigen Griffes verwendet (siehe auch [Vahrenkamp 11]). Hierzu wird das Konzept der Manipulabilitäts-Cluster eingeführt, welche die Beweglichkeit der kinematischen Kette zwischen beiden Händen beschreibt, während die Hände an ihren Griffposen bleiben. Die Manipulabilität ist bedeutsam, weil ein zweiarmiges Robotersystem durch beidhändiges Greifen zusammen mit dem gegriffenen Objekt eine geschlossene kinematische Kette bildet, die die Beweglichkeit des Gesamtsystems deutlich einschränkt. Im möglichst zu verhindernden Extremfall kann es dazu kommen, dass nach dem beidhändigen Greifen das gegriffene Objekt durch den Roboter nur noch weiter bewegt werden kann, indem Gelenke außerhalb der geschlossenen kinematischen Kette oder die Basis des Roboters bewegt werden.

6.1.2 Grundidee

Zweihändige Greifplanung erfordert im Vergleich zur einhändigen Greifplanung die Lösung zusätzlicher Teilprobleme:

- das Finden gültiger Griffposen für beide Hände,
- die Bestimmung der zweihändigen Griffqualität und
- die Sicherstellung der zweihändigen Erreichbarkeit der beiden Griffposen.
- die Sicherstellung einer gewissen Manipulabilität des Griffes, sodass der Roboter, nachdem er das Objekt mit beiden Händen gegriffen hat, noch beweglich genug ist, es zu bewegen.

Die Planung zweihändiger Griffe kann realisiert werden, indem mit Hilfe der in den Kapiteln 3 und 4 vorgestellten Methoden zunächst einhändige Griffe erzeugt werden, die anschließend unter Verwendung von Methoden der Erreichbarkeitsanalyse (engl.: reachability analysis) zu zweihändigen Griffen kombiniert werden (siehe Algorithmus 8). Die resultierenden zweihändigen Lösungen bestehen aus den Griffposen beider Hände und einer Lösung der inversen Kinematik (IK) der kinematischen Kette der Arme. Hierdurch wird sichergestellt, dass mindestens eine IK-Lösung existiert und beide Griffposen erreichbar sind. Die IK-Lösung wird in solcher Weise lokal optimiert, dass die Manipulabilität der Armgelenke maximiert wird (siehe Abschnitt 6.1.6). Zusätzlich zu dieser exemplarischen IK-Lösung wird die Größe eines Manipulabilitäts-Clusters berechnet, der eine Näherung derjenigen Posen des Punktes zwischen den Schultern des Zwei-Arm-Systems darstellt, für die IK-Lösungen existieren. Diese Informationen können anschließend während einer Online-Anfrage verwendet werden, um auf effiziente Weise Ganzkörper-IK-Lösungen zu berechnen.

Die kinematische Struktur zweihändiger Roboter

Im Zusammenhang mit zweihändigen Greifaufgaben erscheint es sinnvoll, die kinematische Struktur eines zweihändigen Roboters in zwei Teile zu unterteilen. Der erste Teil umfasst die kinematische Kette, welche die beiden Endeffektoren des Roboters miteinander verbindet und seine Manipulationsfähigkeiten beschreibt. Für die Positionierung der Roboterplattform und die Haltung des Torsos werden die restlichen Gelenke des Roboters verwendet.

Abbildung 6.1 zeigt die Zerlegung der Kinematik des humanoiden Roboters ARMAR-III in ein Hand-Arm-System, welches von der linken Hand über den linken Arm, die linke Schulter, die rechte Schulter und den rechten Arm bis hin zur rechten Hand reicht, sowie die Roboterbasis, welche die mobile Plattform und den Torso des Roboters ohne die Arme umfasst. Die beiden kinematischen Ketten sind durch ein virtuelles Gelenk in der Mitte zwischen den beiden Schultern - *Center of Arms (CoA)* genannt - miteinander verbunden (siehe Abbildung 6.1).

Erreichbarkeitsanalyse Ein wesentlicher Vorteil einer solchen Zerlegung besteht darin, dass die zweiarmige Manipulabilität durch Vorberechnung in einem Offline-Schritt analysiert werden kann, um IK-Anfragen in der Online-Phase zu beschleunigen. Hierzu wird die kinematische Erreichbarkeit einer Hand in Bezug auf eine gegebene Pose der anderen Hand durch ein diskretisiertes 6D-Erreichbarkeitsvolumen mit weiteren Zusatzinformationen approximiert. Diese

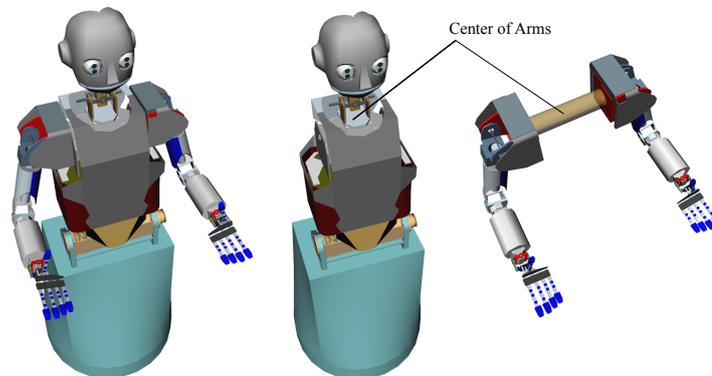


Abbildung 6.1: Der humanoide Roboter ARMAR-III (links) und seine Zerlegung in zwei kinematische Strukturen (Mitte und rechts). Nachdruck aus [Vahrenkamp 11], ©2011 IEEE.

Repräsentation erlaubt Rückschlüsse auf die Wahrscheinlichkeit, dass für eine gegebene Pose eine IK-Lösung existiert [Badler 93, Diankov 10]. Die 6D-Voxel der Erreichbarkeitsrepräsentation werden erzeugt, indem die Gelenkwinkel zufällig gesampelt werden und jeweils die resultierende Pose der Hand bestimmt wird.

Im Folgenden wird die linke Hand als Basisgelenk und die rechte Hand als Endeffektor des Hand-Arm-Systems betrachtet, und die Erreichbarkeit der dadurch resultierenden kinematischen Kette betrachtet. Abbildung 6.2a zeigt einen Schnitt durch die 3D-Visualisierung der Erreichbarkeit dieser Kette. Die Farbintensität ist hierbei proportional zur Wahrscheinlichkeit, dass eine IK-Lösung für die Pose der rechten Hand existiert, wenn die linke Hand in ihrer aktuellen Pose fixiert ist. Eine Erreichbarkeitsrepräsentation für die kinematische Kette zwischen der mobilen Plattform und dem virtuellen Center-of-Arms-Gelenk (siehe Abbildung 6.2b) wird generiert und verwendet, um mit geringem Aufwand entscheiden zu können, ob ein zweihändiger Griff für die Plattform erreichbar ist.

6.1.3 Das Finden von Griffkandidaten für den ersten Endeffektor

Griffkandidaten für einen einzelnen Endeffektor können, wie in Kapitel 4 beschrieben, auf einfache Weise direkt aus dem Gitter medialer Kugeln abgeleitet werden (siehe Abbildung 6.3a). Die Pose des ersten Endeffektors für einen

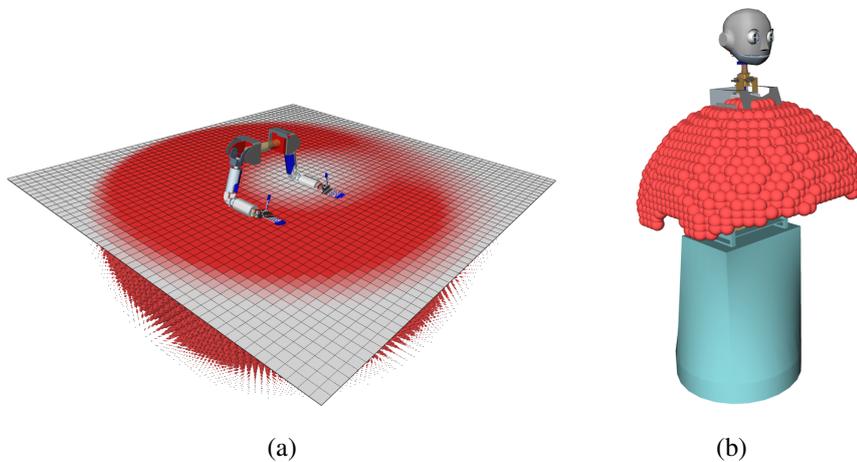


Abbildung 6.2: Ein Schnitt durch die Erreichbarkeitsrepräsentation der kinematischen Kette mit 14 Bewegungsfreiheitsgraden zwischen linker und rechter Hand von ARMAR-III (a). Die Erreichbarkeit der kinematischen Kette mit vier Bewegungsfreiheitsgraden, die das Yaw-Gelenk der Plattform über die drei Hüftgelenke mit dem festen Koordinatensystem *Center of Arms* verbindet (b). Nachdruck aus [Vahrenkamp 11], ©2011 IEEE.

zweihändigen Griff kann bestimmt werden durch zufälliges Auswählen eines einhändigen Griffkandidaten, der bei geöffneter Hand nicht zu einer Durchdringung zwischen dieser und dem Objekt führt (siehe Algorithmus 8, Zeile 1).

6.1.4 Das Finden von Griffkandidaten für den zweiten Endeffektor

Alle Griffkandidaten können nun nach ihrer Erreichbarkeit für den zweiten Endeffektor bezüglich der Griffpose des ersten Endeffektors gefiltert werden (siehe Algorithmus 8, Zeile 3) sodass nur noch die erreichbaren Griffkandidaten für die weiteren Verarbeitungsschritte verbleiben (siehe Abbildung 6.3b). Da die Erreichbarkeitsinformationen in diskretisierter Form vorliegen, können zunächst nur solche Kandidaten aussortiert werden, die mit großer Wahrscheinlichkeit nicht erreichbar sind. Für die verbleibenden Kandidaten muss die Erreichbarkeit für den zweiten Endeffektor jedoch zusätzlich durch Bestimmung einer IK-Lösung überprüft werden. Da diese IK-Lösung jedoch ohnehin in späteren Verarbeitungsschritten benötigt wird, entsteht durch die Suche nach einer IK-Lösung kein unnötiger zusätzlicher Rechenaufwand. Um nicht einen speziell auf den vorliegen-

Algorithmus 8 : PlanBimanualGrasp(CG, RI)**Eingabe:** Menge von Griffkandidaten CG , Erreichbarkeitsinformationen RI **Ausgabe:** Zweihändige Griffkonfiguration (cg_1, cg_2, IK, mc)

```

1:  $cg_1 \leftarrow CG.RandomCandidate()$ 
2:  $P_{g,1} \leftarrow ComputeEEFPose(cg_1)$ 
3:  $CG_2 \leftarrow ReachableCandidates(P_{g,1}, RI, CG)$ 
4: while ( $|CG_2| > 0$ ) do
5:    $cg_2 \leftarrow CG_2.RandomCandidate()$ 
6:    $CG_2.RemoveCandidate(cg_2)$ 
7:    $P_{g,2} \leftarrow ComputeEEFPose(cg_2)$ 
8:    $IK \leftarrow SearchIKSolution(P_{g,1}, P_{g,2})$ 
9:   if ( $IK \ \&\& \ !Collision(IK)$ ) then
10:     $cp_1 \leftarrow ContactPoints(CloseHand1(P_{g,1}))$ 
11:     $cp_2 \leftarrow ContactPoints(CloseHand2(P_{g,2}))$ 
12:    if ( $ForceClosure(cp_1 \cup cp_2)$ ) then
13:       $IK \leftarrow OptimizeManipulability(IK, P_{g,1}, P_{g,2})$ 
14:       $mc \leftarrow ManipulabilityCluster(IK, P_{g,1}, P_{g,2})$ 
15:      if ( $mc.volume > 0$ ) then
16:        return  $(cg_1, cg_2, IK, mc)$ 
17:      end if
18:    end if
19:  end if
20: end while
21: return NULL

```

den Roboter angepassten IK-Löser entwickeln zu müssen, kann ein auf der Pseudoinversen der Jacobi-Matrix basierendes Gradientenabstiegsverfahren verwendet werden, welches keine Analyse der kinematischen Struktur des Roboters voraussetzt. Da ein solcher Ansatz in lokalen Minima stecken bleiben kann, können IK-Lösungen übersehen werden und dadurch manche zweihändige Griffe nicht gefunden werden. Diese durch lokale Minima bedingten Effekte können reduziert werden, indem viele Samples erzeugt werden und die Startkonfiguration für die Suche nach IK-Lösungen zufällig variiert wird. Wenn eine IK-Lösung für beide Arme gefunden ist (siehe Algorithmus 8, Zeile 8), kann diese auf Kollisionen überprüft und der resultierende zweihändige Griff analysiert werden.

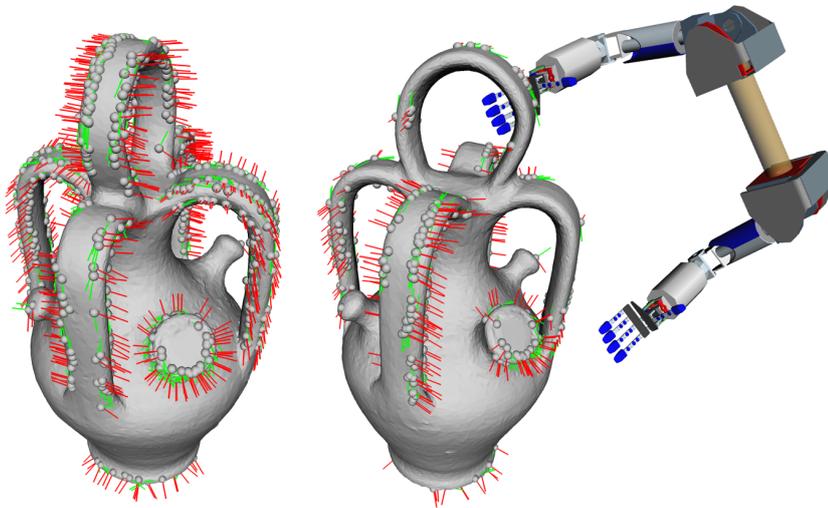


Abbildung 6.3: Eine Menge von 300 Griffkandidaten mit zugehörigen Anrückrichtungen, abgebildet als rote Linien (links). Mit Hilfe der Erreichbarkeitsinformationen kann eine Menge von für die linke Hand erreichbaren Kandidaten bestimmt werden (rechts). Nachdruck aus [Vahrenkamp 11], ©2011 IEEE.

6.1.5 Griffqualität

Die Bewertung der Qualität eines zweihändigen Griffes geschieht zunächst analog zum einhändigen Fall. Es werden beide Hände geschlossen, die Kontaktpunkte zwischen jeder Hand und dem Objekt bestimmt, und die Vereinigung der Kontaktmengen beider Hände mittels Analyse des Grasp Wrench Space auf Kraftschluss geprüft. Hierzu wird, wie bereits im einhändigen Fall, das übliche ε -Maß für Kraftschluss [Ferrari 92] berechnet, für das die sechsdimensionale konvexe Hülle über den Kontaktpunkten und -normalen betrachtet wird, und der Abstand zwischen dem Ursprung des Grasp Wrench Space und der nächsten Facette der konvexen Hülle als Maß dafür dient, wie gut der Griff Störungen durch extern einwirkende Kräfte und Momente widerstehen kann. Bei Vorliegen einer Griffkonfiguration mit Kraftschluss kann durch Maximierung der Manipulabilität eine Lösung für den zweiarmigen Griff bestimmt werden.

6.1.6 Maximierung der Manipulabilität

Ein weitverbreitetes Maß für die Manipulabilität einer Konfiguration q ist der sogenannte Manipulabilitätsindex $m(J)$, der von Yoshikawa in [Yoshikawa 85] ein-

geführt wurde und von der Jacobi-Matrix J abhängt:

$$m(J) = \sqrt{\det(JJ^T)} \quad (6.1)$$

Um eine Aussage über die Manipulabilität eines zweiarmigen Systems zu machen, können die Manipulabilitätsindizes für den linken und den rechten Arm getrennt betrachtet werden. Hintergrund hierfür ist, dass möglichst flexible kinematische Konfigurationen gefunden werden sollen, welche eine möglichst hohe Beweglichkeit beider Endeffektoren sicherstellen.

Dieses Maß für die Manipulabilität soll maximiert werden (siehe Algorithmus 9). Sei J_1 die Jacobi-Matrix des Arms mit dem ersten Endeffektor und J_2 die Jacobi-Matrix des Arms mit dem zweiten Endeffektor. Zunächst werden alle Kombinationen möglicher Bewegungsschritte Δ_x des Center-of-Arms-Gelenks in allen sechs Freiheitsgraden des kartesischen Raumes erzeugt (Algorithmus 9, Zeile 7). Für jedes dieser Δ_x werden Jacobi-basierte Bewegungen durchgeführt. Zunächst wird die kinematische Kette zwischen dem CoA-Gelenk und dem ersten Endeffektor betrachtet (Algorithmus 9, Zeile 9). Wenn die Gelenkansschläge (engl.: joint limits) eine Bewegung in die gegebene Richtung zulassen, wird im nächsten Schritt versucht, den zweiten Endeffektor in seine Griffpose $P_{g,2}$ zurück zu bewegen. Wenn die kinematische Struktur die dafür nötigen Bewegungen erlaubt und die Manipulabilität beider Arme dadurch erhöht werden kann, ist eine bessere IK-Lösung gefunden (Algorithmus 9, Zeilen 14-17). Das Bewegen des CoA-Gelenks unter Aufrechterhaltung bzw. Wiederherstellung der Griffposen beider Endeffektoren mit anschließender erneuter Auswertung der Manipulabilität wird wiederholt, bis die Manipulabilität ein lokales Maximum erreicht (Algorithmus 9, Zeile 23). Ein Beispiel für das Ergebnis des Optimierungsprozesses ist in Abbildung 6.4 zu sehen.

6.1.7 Manipulabilitäts-Cluster

Nach Ausführung der oben beschriebenen Optimierung kann eine IK-Lösung für beide Arme mit lokal maximierter Manipulabilität zusammen mit der zweihändigen Griffkonfiguration abgelegt werden. Eine weitere Aussage über die Qualität einer zweiarmigen IK-Lösung kann gemacht werden, indem die Gesamtmenge aller möglichen Posen des CoA-Gelenks bestimmt wird, bei denen die beiden Endeffektoren in ihren jeweiligen Griffposen verbleiben. Das sechsdimensionale Volumen, das durch all diese CoA-Posen abgedeckt wird, soll als

Algorithmus 9 : OptimizeManipulability($IK, P_{g,1}, P_{g,2}$)**Eingabe:** Konfiguration IK beider Arme, Posen $P_{g,1}, P_{g,2}$ beider Hände**Ausgabe:** Konfiguration IK_{best} am lokalen Maximum der zweiarmigen Manipulabilität

```

1:  $P_{CoA} \leftarrow \text{ForwardKinematics}(IK)$ 
2:  $m_1 \leftarrow \sqrt{\det(J_1 J_1^T)}$ 
3:  $m_2 \leftarrow \sqrt{\det(J_2 J_2^T)}$ 
4:  $IK_{best} \leftarrow IK$ 
5: while (!Timeout()) do
6:    $\Delta_{best} \leftarrow \{0, 0, 0, 0, 0, 0\}^T$ 
7:   for all ( $\Delta_x \in \{-\delta, 0, \delta\}^6$ ) do
8:      $P'_{CoA} \leftarrow \text{MoveCartesianPose}(P_{CoA}, \Delta_x)$ 
9:     if (MoveJointToPose( $J_1, P'_{CoA}$ )) then
10:      if (MoveJointToPose( $J_2, P_{g,2}$ )) then
11:         $m'_1 \leftarrow \sqrt{\det(J_1 J_1^T)}$ 
12:         $m'_2 \leftarrow \sqrt{\det(J_2 J_2^T)}$ 
13:        if ( $(m'_1 \geq m_1) \ \& \ (m'_2 \geq m_2) \ \& \ (m'_1 + m'_2 > m_1 + m_2)$ ) then
14:           $IK_{best} \leftarrow \text{GetJointValues}()$ 
15:           $m_1 \leftarrow m'_1$ 
16:           $m_2 \leftarrow m'_2$ 
17:           $\Delta_{best} \leftarrow \Delta_x$ 
18:        end if
19:      end if
20:    end if
21:  end for
22:  if ( $\Delta_{best} == \{0, 0, 0, 0, 0, 0\}^T$ ) then
23:    return  $IK_{best}$ 
24:  end if
25: end while
26: return  $IK_{best}$ 

```

Manipulabilitäts-Cluster bezeichnet werden. Eine einfache, aber effektive Methode zur Bestimmung des Volumens eines Manipulabilitäts-Clusters besteht darin, das CoA-Gelenk in allen sechs Freiheitsgraden des kartesischen Raumes soweit zu bewegen, bis die Gelenkanschlüsse die korrekte Repositionierung der beiden Endeffektoren gemäß der ursprünglich berechneten Griffposen verhindern.

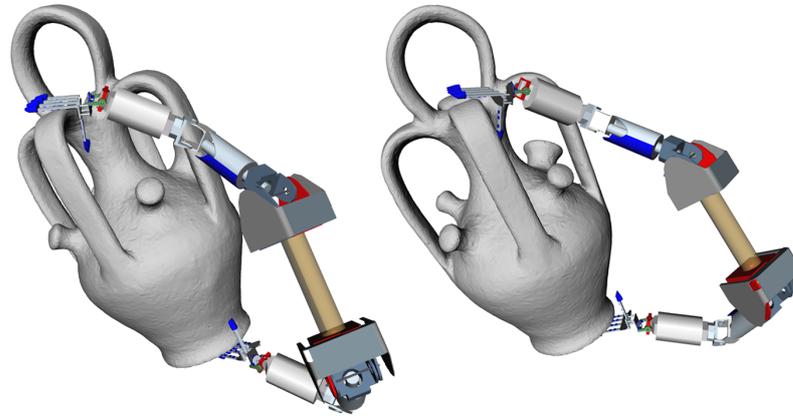


Abbildung 6.4: Eine zueihändige Griffkonfiguration (links) und die zugehörige Konfiguration mit optimierter Manipulabilität (rechts). Nachdruck aus [Vahrenkamp 11], ©2011 IEEE.

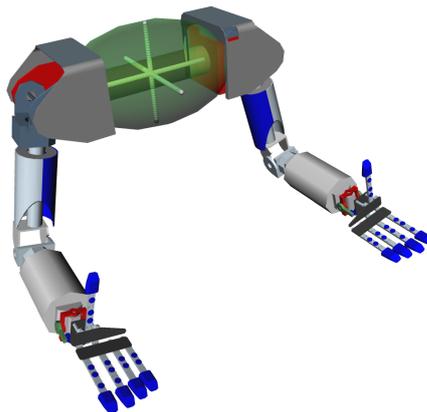


Abbildung 6.5: Eine 3D-Visualisierung der approxmierten 6D-Manipulabilitäts-Cluster für das Center-of-Arms-Gelenk. Die Linien veranschaulichen die möglichen Bewegungen entlang der drei Achsen des lokalen Koordinatensystems. Nachdruck aus [Vahrenkamp 11], ©2011 IEEE.

Eine dreidimensionale Visualisierung eines Manipulabilitäts-Clusters ist in Abbildung 6.5 zu sehen. Der Bewegungsspielraum in den drei Achsen des CoA-Koordinatensystems kann durch einen Ellipsoid approximiert werden.

Durch Analyse des Volumens eines Manipulabilitäts-Clusters ergibt sich somit also die Möglichkeit, das CoA-Gelenk im Raum zu bewegen, während die beiden Endeffektoren an ihren Griffposen bleiben. Ein Volumen nahe Null bedeutet, dass die Manipulabilität und somit die Qualität des zueihändigen Griffes sehr einge-

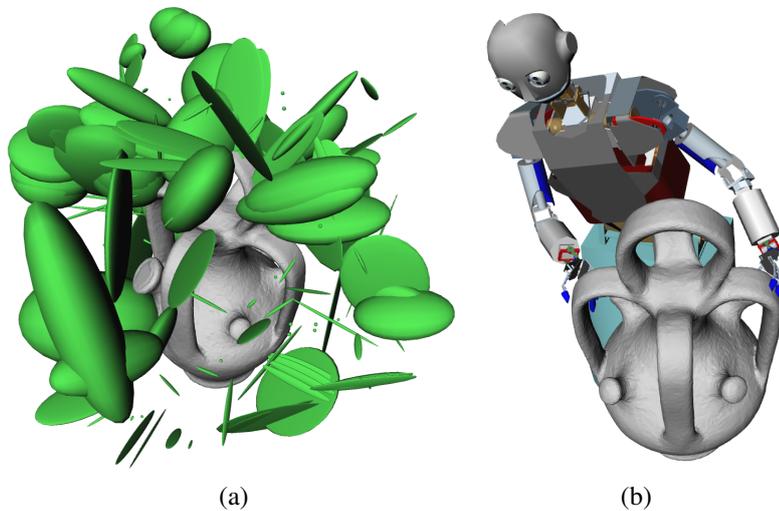


Abbildung 6.6: Manipulabilitäts-Cluster für 250 geplante zweihändige Griffe (a). Eine exemplarische Ganzkörperlösung für die Inverse Kinematik des humanoiden Roboters ARMAR-III (b). Nachdruck aus [Vahrenkamp 11], ©2011 IEEE.

schränkt ist. Manipulabilitäts-Cluster mit einem Volumen von Null werden daher vom Planer verworfen (siehe Algorithmus 8, Zeile 15).

6.1.8 Ergebnisse

Der vorgestellte Ansatz zur Planung zweihändiger Griffe wurde anhand zweier großer Objekte, einer Amphore und eines Fahrrads, evaluiert.

Amphore

Im ersten Experiment wurden zweihändige Griffe für eine große Amphore generiert. Abbildung 6.6a zeigt eine 3D-Visualisierung der sechsdimensionalen Manipulabilitäts-Cluster für 250 Griffkonfigurationen. Die Griffkonfigurationen können anschließend verwendet werden, um Ganzkörperlösungen der IK zu erzeugen. Eine Ganzkörperlösung kann gefunden werden, indem zunächst eine für die kinematische Kette des Torsos erreichbare (siehe Abbildung 6.2b) zweihändige Griffkonfiguration ausgewählt wird und dann die CoA-Gelenke beider kinematischer Teilstrukturen - der Arme und des Torsos - aufeinander zu bewegt werden. Eine exemplarische IK-Lösung ist in Abbildung 6.6b zu sehen.

Tabelle 6.1: Laufzeitmessungen

Durschnitt über 100 Durchläufe	Amphore	Fahrrad
Insgesamt:		
Planung eines zweihändigen Griffes	821 ms	5321 ms
Getestete zweihändige Griffkandidaten	1399	10232
Griffkandidaten bis gültiges Ergebnis	1,9	3,7
Pro Griffhypothese:		
Manipulabilitäts-Cluster-Berechnung	79 ms	52 ms
Kraftschlussberechnungen	22 ms	17 ms
Kollisionsdetektion	2,5 ms	0,9 ms

Die Gesamtlaufzeit für den vorgestellten Ansatz wurde durch Mittelung über die Planungszeit für 100 zweihändige Griffe bestimmt, wobei auch die Laufzeiten einzelner Verarbeitungsschritte analysiert wurden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.1 dargestellt. Die für die Generierung einhändiger Griffkandidaten mittels der Methoden aus Kapitel 4 benötigte Zeit ist hierin nicht enthalten. Vielmehr wurde davon ausgegangen, dass die einhändigen Griffkandidaten bereits vorliegen, um auf diese Weise nur noch den zusätzlichen Zeitaufwand für das Finden zweihändiger Griffe zu erfassen. Wie in Tabelle 6.1 zu sehen ist, wurde die Zeit zur Planung einer zweihändigen Griffkonfiguration mit durchschnittlich weniger als einer Sekunde gemessen. Dieser Wert schließt auch den Zeitaufwand für die Kraftschlussberechnungen, die Manipulabilitätsoptimierung und die Erzeugung der Manipulabilitäts-Cluster ein. Die Zeit zur Erzeugung eines Manipulabilitäts-Clusters betrug durchschnittlich 79ms. Hier ist zu berücksichtigen, dass teilweise mehr als ein Manipulabilitäts-Cluster generiert werden muss, bis ein gültiges Ergebnis vorliegt, da Cluster mit dem Volumen Null verworfen werden. Im Durchschnitt dauerte das Testen einer zweihändigen Konfiguration auf Kollisionen 2,5ms und es mussten 1,9 solche Konfigurationen erzeugt werden, um ein gültiges Ergebnis zu erhalten. Insgesamt wurden 1399 zweihändige Griffkandidaten getestet. Der Großteil davon wurde wegen Kollisionen oder unerlaubter Gelenkbewegungen während der IK-Suche verworfen.

Fahrrad

Die deutlich kompliziertere Struktur des Fahrrads führte zu einer im Vergleich zur Amphore längeren Planungszeit von durchschnittlich 5,3 Sekunden (siehe Tabel-

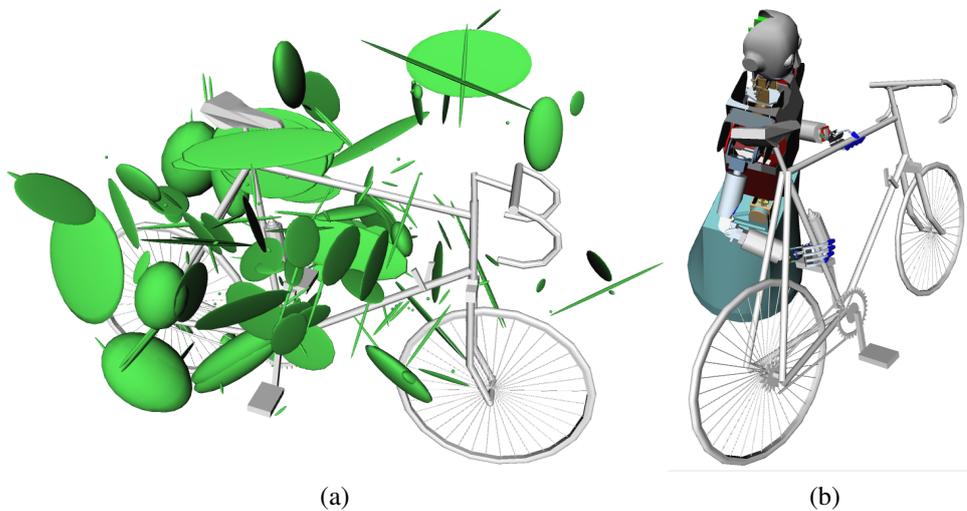


Abbildung 6.7: Die zweihändige Erreichbarkeit des Fahrrads wird durch 250 Manipulabilitäts-Cluster repräsentiert, die durch den Greifplaner generiert wurden (a). Der humanoide Roboter ARMAR-III verwendet einen geplanten Griff, um das Fahrrad mit beiden Händen zu halten (b). Nachdruck aus [Vahrenkamp 11], ©2011 IEEE.

le 6.1). Da viele Griffkonfigurationen in Kollisionen resultieren, mussten insgesamt mehr Griffhypothesen generiert und getestet werden. An dieser Stelle muss auch bemerkt werden, dass wegen des dünnen Rohrs des Fahrradrahmens bei vielen Griffhypothesen nicht genügend Kontakte zwischen Händen und Objekt entstanden, um Kraftschluss zu erreichen. Abbildung 6.7 zeigt die Manipulabilitäts-Cluster von 250 geplanten zweihändigen Griffen auf der linken und einen beispielhaften solchen Griff auf der rechten Seite.

6.1.9 Bewertung

In den vorangegangenen Abschnitten wurde ein Verfahren zur zweihändigen Greifplanung beschrieben, welches durch Kombination mehrerer Einzelkomponenten realisiert wurde, unter konsequenter Ausnutzung von Vorberechnungen zur Reduktion des Rechenaufwands in der Online-Planungsphase. Mittels des in Kapitel 4 vorgestellten Greifplaners wurden zunächst einhändige Griffkandidaten generiert, die anschließend in einem zweiten Schritt zu zweihändigen Griffen kombiniert wurden, wobei die hierfür nötigen Erreichbarkeitstests durch Verwendung der vorberechneten Erreichbarkeitsäume [Vahrenkamp 09] beschleunigt wurden.

Um die eingeschränkte Beweglichkeit der durch die beiden Arme und das gegriffene Objekt entstandenen geschlossenen kinematischen Kette nach dem Greifen zu verbessern, wurde außerdem zusätzlich eine Optimierung der Manipulabilität durchgeführt.

Insgesamt konnte so eine Reduktion der Komplexität des Gesamtproblems durch Zerlegung in Teilprobleme erreicht werden. Somit wurde gezeigt, dass das Gitter medialer Kugeln als Objektrepräsentation (siehe Kapitel 3) und der darauf basierende Greifplaner (siehe Kapitel 4) als Komponenten in einem größeren System zum Finden zweihändiger Griffkonfigurationen verwendet werden können.

6.2 Griffauswahl anhand menschlicher Griffdaten

Der Fokus der in den Kapiteln 3 bis 5 vorgestellten Methoden und Experimente lag vor allem darauf, vielversprechende Griffkandidaten aus der Form des Objektes zu extrahieren, sodass unter diesen eine möglichst hohe Ausbeute an Kraftschlussgriffen erzielt werden kann. Als Ergebnis liegt für das jeweils betrachtete Objekt nun eine Menge solcher Kraftschlussgriffe vor.

Eine der eigentlichen Greifplanung (siehe Kapitel 4) nachgelagerte Frage, die im Folgenden angerissen werden soll, besteht darin, welcher dieser geplanten Griffe für die Ausführung auf dem realen Roboter ausgewählt werden soll. Ein mögliches Kriterium hierfür besteht in der kinematischen Erreichbarkeit der Griffpose in der jeweiligen Situation. Allerdings bleiben auch nach dem Aussortieren unerreichbarer Griffe oft noch viele durchführbare Griffe übrig, unter denen gewählt werden kann.

Im Folgenden soll auf die Möglichkeit eingegangen werden, sich bei der Auswahl geeigneter Griffe am menschlichen Vorbild zu orientieren. Da humanoide Roboter bereits in ihrer Gestalt dem Menschen nachempfunden sind, teils aus Gründen der Anpassung an die menschliche Umgebung, teils wegen einer vermuteten höheren Akzeptanz für menschenähnliche Maschinen durch den Menschen, erscheint der Gedanke naheliegend, auch bei der Auswahl geeigneter Griffe Beobachtungen am Menschen einfließen zu lassen. Basierend auf diesen Überlegungen wurden in Kooperation mit Psychologen der Ludwig-Maximilians-Universität München Greifexperimente mit menschlichen Probanden durchgeführt und analysiert (siehe auch [Przybylski 11b]).

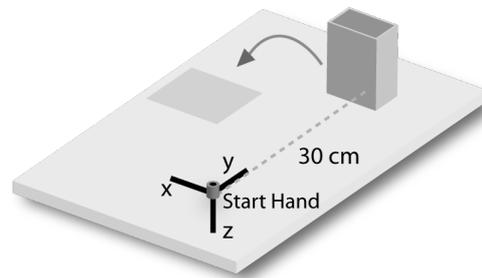


Abbildung 6.8: Experimentalaufbau für das Sammeln menschlicher Griffdaten. Das Objekt sollte gegriffen und im dunkelgrau schattierten Bereich abgelegt werden. Nachdruck aus [Przybylski 11b], ©2011 IEEE.

6.2.1 Grundidee

Um menschliche Griffdaten für die Griffauswahl nutzen zu können, wurden zunächst im Experiment bei Testpersonen während des Greifvorgangs die Fingerpositionen am zu greifenden Objekt aufgezeichnet. Um die so gewonnenen Messdaten in Beziehung zu den durch den Greifplaner generierten Griffen zu setzen, ist darüber hinaus die Definition eines Distanzmaßes nötig, mit dessen Hilfe der menschenähnlichste Griff identifiziert werden kann.

6.2.2 Akquise menschlicher Griffdaten

Für das Sammeln menschlicher Griffdaten wurden Testpersonen unter definierten Versuchsbedingungen mithilfe eines elektromagnetischen Tracking-Systems beim Greifen zweier einfacher Testobjekte, eines zylinder- und eines quaderförmigen Objektes, beobachtet. Hierzu wurde die in Abbildung 6.8 gezeigte Versuchsanordnung verwendet, bei der das Objekt an einer definierten Position auf einem Tisch vor der Testperson plazierte wurde. Auf den Fingernägeln der zum Greifen verwendeten Hand wurden die Sensoren des Tracking-Systems angebracht. Ein zusätzlicher Sensor wurde am Handgelenk angebracht. Die so vorbereiteten Testpersonen wurden instruiert, ausgehend von einer Startposition der Hand 30cm vor dem jeweiligen Objekt, das Objekt mit der rechten Hand von der Seite zu greifen und links diagonal neben seiner ursprünglichen Position wieder abzustellen. Die Anzahl der zu verwendenden Finger, die Wahl der Kontaktpunkte am Objekt sowie die Geschwindigkeit des Greifvorgangs blieben hierbei der jeweiligen Testperson überlassen. Insgesamt wurde jedes der beiden Testobjekte von fünf rechtshändigen Testpersonen jeweils zehnmal gegriffen. Die auf diese Weise gewonnenen

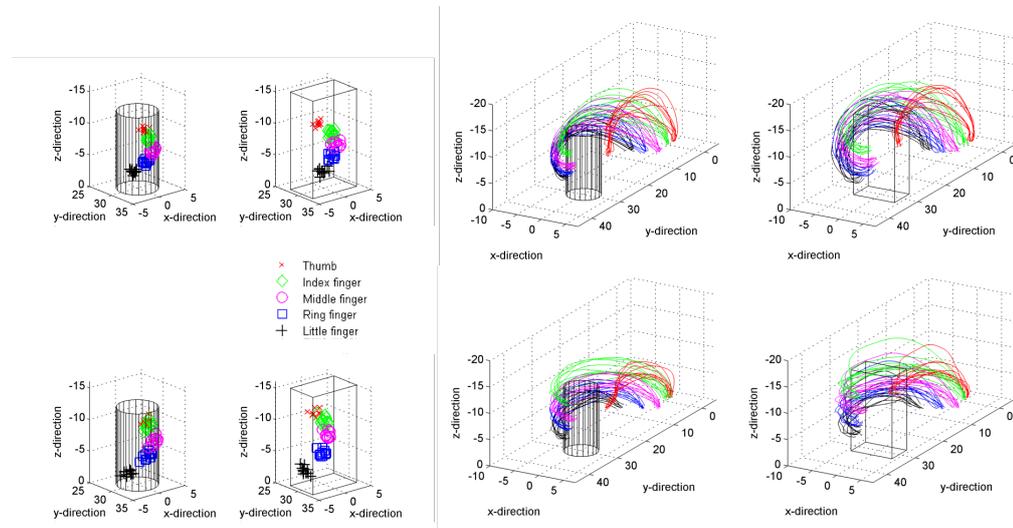


Abbildung 6.9: Endpositionen (erste und zweite Spalte) und Trajektorien (dritte und vierte Spalte) der Fingerspitzen zweier Teilnehmer. Nachdruck aus [Przybylski 11b], ©2011 IEEE.

zeitlichen Positionsdaten der Fingerspitzen wurden mit einem Butterworth-Filter zweiter Ordnung gefiltert und aus dem Filterergebnis die Geschwindigkeiten der Finger ermittelt. Start und Ende der Bewegung wurden mittels eines Geschwindigkeitsschwellwertes von $0,1\text{m/s}$ für den Handgelenksensor bestimmt. Die auf diese Weise gewonnenen Messdaten sind für zwei Versuchsteilnehmer in Abbildung 6.9 dargestellt. In jeder Zeile der Abbildung sind jeweils die Daten eines Probanden visualisiert: links die Endpositionen, rechts die Trajektorien der Fingerspitzen. Aus den Daten kann entnommen werden, dass jeder Versuchsteilnehmer für sich betrachtet sehr konsistent bei der Wahl der Kontaktpunkte am Objekt war.

6.2.3 Ähnlichkeit zwischen menschlichen und geplanten Griffen

Um Aussagen über die Ähnlichkeit zweier Griffe machen zu können, muss ein Abstandsmaß gefunden werden, anhand dessen Griffe verglichen werden können. Hierzu bietet sich die Betrachtung der Fingerspitzen-Endposition am Objekt während eines Griffes an. Jeder menschliche Griff h in den aufgezeichneten menschlichen Griffdaten enthält die finalen Fingerspitzenpositionen p_{h_i} auf dem Objekt für jeden Finger i . Jeder durch den Greifplaner generierte Kraftschlussgriff g aus

dem Greifplaner besteht aus der finalen Handpose p_w und dem finalen Gelenkwinkelvektor q der Fingergelenke:

$$g = (p_w, q) \quad (6.2)$$

Mit Hilfe der Vorwärtskinematik $FwdKin()$ der simulierten Roboterhand kann aus der Handpose p_w und dem Gelenkwinkelvektor q für den Finger i die Fingerspitzenposition p_{g_i} berechnet werden:

$$p_{g_i} = FwdKin(p_w, q_i) \quad (6.3)$$

Es bietet sich an, zur Bewertung der Ähnlichkeit zwischen einem geplanten Griff g und einem menschlichen Griff h jeweils die Fingerspitzenpositionen aller Finger in einem 15-dimensionalen Vektor zusammenzufassen und dann die euklidische Distanz d_{eucl} zwischen g und h zu bestimmen:

$$d_{eucl}(g, h) = \sqrt{\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^3 (p_{g_{i,j}} - p_{avg(h)_{i,j}})^2} \quad (6.4)$$

Eine alternative und abgeschwächte Form des Vergleichs ergibt sich, wenn nur jeweils eine Koordinatenkomponente der Fingerspitzenpositionen für den Vergleich verwendet wird:

$$d_z(g, h) = \sqrt{\sum_{i=1}^5 (p_{g_{i,z}} - p_{avg(h)_{i,z}})^2} \quad (6.5)$$

verwendet werden. In Gleichung (6.5) bezeichnet $p_{g_{i,z}}$ die z -Komponente der i -ten Fingerspitzenposition des Griffes g . $p_{avg(h)_{i,z}}$ bezeichnet die z -Komponente der i -ten Fingerspitzenposition des Durchschnitts aller Griffe h einer menschlichen Testperson. Die z -Achse des Koordinatensystems ist hierbei senkrecht zur Tischebene orientiert (siehe Abb. 6.8).

6.2.4 Experimentelle Evaluation auf dem humanoiden Roboter ARMAR-III

Die Auswahl und Ausführung der nach dem oben eingeführten Ähnlichkeitskriterium bewerteten Griffe wurde auf dem Roboter ARMAR-IIIb getestet. Für die Evaluation mit Greifplanung, Bewertung und Ausführung der Griffe wurden eine zylindrische Salzdose und eine quaderförmige Müslischachtel verwendet. Das Modell der Salzdose wurde mit Hilfe eines 3D-Laserscanners

([Kasper 07],[Becher 06]) erzeugt, während die Müslischachtel von Hand modelliert wurde. Die Griffe für die Objekte wurden mittels der in Kapitel 4 vorgestellten Methode geplant. Für die Bewertung der durch den Greifplaner generierten Griffe wurden die Messdaten einer einzelnen Person verwendet, da die Mittelung der Fingerspitzenpositionen über mehrere Testpersonen hinweg in der Regel nicht zu sinnvollen Ergebnissen führt. Für die hier beschriebenen Experimente wurden die Daten verwendet, die in der oberen Reihe von Abbildung 6.9 zu sehen sind. Um die menschlichen Griffdaten für die in der Größe abweichenden vom Roboter zu greifenden Testobjekte anwenden zu können, wurden die menschlichen Griffdaten bezüglich des Schwerpunkts des ursprünglichen Objektes auf die neue Objektgröße hochskaliert. Für die hier durchgeführten Experimente wurde ferner angenommen, dass alle Objekte von greifbarer Größe sind, sodass durch den Skalierungsschritt keine undurchführbaren Griffe entstehen.

Bewertung nach dem Ähnlichkeitskriterium

Die durch das Greifplanungsverfahren generierten Kraftschlussgriffe für die beiden Testobjekte wurden mit dem in Formel (6.5) eingeführten Ähnlichkeitskriterium bewertet. Abbildung 6.10 zeigt die Ergebnisse des Greifplanungs- und Bewertungsschrittes. Grüne und orangene Linien zum Objekt stehen für Anrückrichtungen der Hand. Magentafarbene Linien am Ende der Anrückrichtungen zeigen die jeweilige Handorientierung an, welche als eine imaginäre Achse gesehen werden kann, um die sich die Finger der Hand, ausgehend von einer parallelen Vorformung, beim Greifen schließen. Für die Müslischachtel generierte der Greifplaner Griffe, deren Anrückrichtungen und Handorientierungen durch die zentrale Symmetrieebene des Objektes definiert sind. Für die Salzdose wurden Griffe mit Anrückrichtungen senkrecht und Handorientierungen waagrecht zur zentralen Symmetrieachse des Objektes generiert. Die schwarzen Kugeln zeigen die Fingerspitzenpositionen aus den menschlichen Greifexperimenten an, nachdem diese in das Objektkoordinatensystem transformiert und auf die Größe des Objektes hochskaliert wurden. Die auf den Anrückrichtungen gelegenen purpurnen Kugeln beschreiben die endgültigen Positionen des Handgelenks während der Greifplanung. Die Größe dieser Kugeln ist invers zum Wert des jeweiligen d_z -Ratings (siehe Gleichung (6.5)), d.h. die größten Kugeln repräsentieren diejenigen Griffe mit dem niedrigsten d_z -Rating, also mit der größten Ähnlichkeit zu den Daten der menschlichen Greifexperimente.

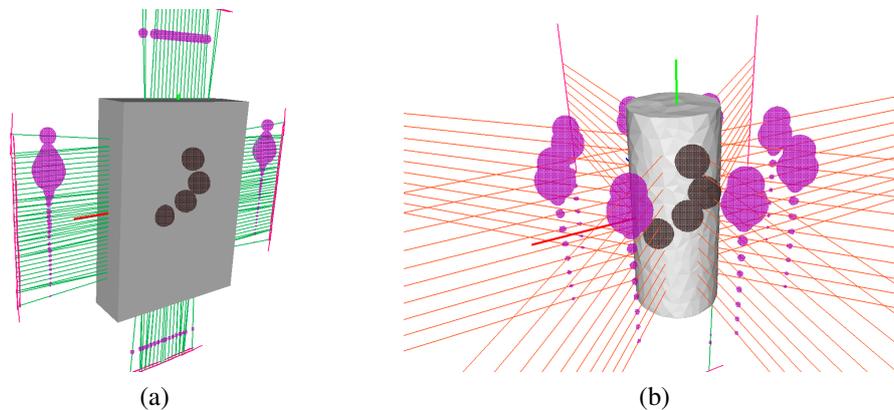


Abbildung 6.10: Ergebnisse der Greifplanungs- und Bewertungsprozedur für die Müslibox (links) und die zylindrische Salzdose (rechts). Grüne und orangefarbene Linien beschreiben Anrückrichtungen der Hand an das Objekt. Magentafarbene Linien am Ende der Anrückrichtungen zeigen die jeweiligen Handorientierungsvektoren an. Schwarze Kugeln zeigen die gemittelten Positionen der Fingerspitzen während der Greifexperimente am Menschen. Purpurne Kugeln an den Anrückrichtungen veranschaulichen die jeweils finale Position des Handgelenks während der Greifplanung. Je größer die purpurnen Kugeln, desto größer die Ähnlichkeit der jeweiligen Griffe zu den Daten aus den Greifexperimenten am Menschen, unter Verwendung des vorgeschlagenen Ähnlichkeitskriteriums. Nachdruck aus [Przybylski 11b], ©2011 IEEE.

Auswahl und Ausführung der Griffe

Nach dem oben beschriebenen Bewertungsschritt liegt für jedes der beiden Testobjekte eine Anzahl von Kraftschlussgriffen vor, die gemäß ihrer Ähnlichkeit zu den menschlichen Griffdaten bewertet wurden und theoretisch direkt auf ARMAR ausgeführt werden können. In der Praxis hängt die Ausführbarkeit von Griffen jedoch stark von der Pose des Objektes relativ zum Roboter ab, sodass zunächst die Objektpose bestimmt und abhängig davon unerreichbare Griffe herausgefiltert werden müssen.

Für die Greifexperimente wurde das jeweilige Testobjekt auf einem Tisch vor dem Roboter plaziert und mit ARMARs Stereokamerasystem lokalisiert. Für die Bestimmung der Objektpose wurde der in [Azad 07] beschriebene Ansatz für texturierte Objekte verwendet. Dieser Ansatz erkennt das Objekt zunächst mit Hilfe von 2D-Merkmalsskorrespondenzen, führt dann eine 2D-Lokalisierung mittels skaleninvarianter Merkmalstransformation (SIFT) durch, und berechnet schließ-

lich basierend auf den Ergebnissen der 2D-Lokalisierung eine Schätzung der 6D-Pose.

Nach Bestimmung der Objektpose wurden die Griffe aus dem Objektkoordinatensystem in ARMARs Plattformkoordinatensystem transformiert und zusätzlich nach dem Ähnlichkeitskriterium in Formel (6.5) sortiert. Für die Griffe in der nach absteigender Ähnlichkeit sortierten Liste wurde die kinematische Erreichbarkeit getestet [Vahrenkamp 09]. Sobald ein erreichbarer Griff gefunden wurde, wurde dieser von ARMAR ausgeführt. Die Greifbewegung wurde mittels Visual Servoing ausgeführt [Vahrenkamp 08], wie bereits bei den Greifexperimenten in Kapitel 5 beschrieben.

Die einzelnen Schritte der Griffbewertung, -auswahl und -ausführung für die beiden Testobjekte sind in den Abbildungen 6.11 und 6.12 veranschaulicht. Die erste Reihe von Abbildung 6.11 zeigt ARMAR bei der Lokalisierung des Testobjektes auf dem Tisch. Die zweite Reihe zeigt die Aktualisierung der Objektpose in der Simulationsumgebung. In der dritten Reihe sind alle durch den Greifplaner generierten Griffposen und Pre-Posen dargestellt, und die vierte Reihe zeigt den ersten kinematisch erreichbaren Griff. Abbildung 6.12 zeigt ARMAR beim Erreichen der Pre-Pose (erste Reihe), beim Erreichen der finalen Griffpose (zweite Reihe), nach dem Schließen der Hand (dritte Reihe), und schließlich beim Hochheben des Objektes (vierte Reihe).

6.2.5 Diskussion

Die Ergebnisse der obigen Experimente zeigen, dass menschliche Griffdaten verwendet werden können, um durch einen Greifplaner generierte Griffe nach ihrer Menschenähnlichkeit zu bewerten und so die Auswahl von Griffen für die Ausführung auf einem Roboter zugunsten menschenähnlicher Griffe zu beeinflussen. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse der Beobachtungen am menschlichen Vorbild, dass der in dieser Arbeit vorgestellte auf Objektsymmetrieeigenschaften basierende Ansatz zur Greifplanung Griffe produziert, die auch intuitiv vom Menschen gewählt werden. Die menschlichen Griffdaten deuten darauf hin, dass Objektsymmetrieeigenschaften die Menschen bei der Wahl ihrer Griffe beeinflussen.

Dennoch zeigt der untersuchte Bewertungsansatz einige Einschränkungen, die im Folgenden diskutiert werden sollen. Als möglicher Kritikpunkt kann die Wahl des Ähnlichkeitskriteriums (Formel (6.5)) gesehen werden, welches nur Abweichungen entlang der z -Achse des Objektkoordinatensystems, d.h. Variationen der Höhe, in der das Objekt gegriffen wird, berücksichtigt, während Variationen der

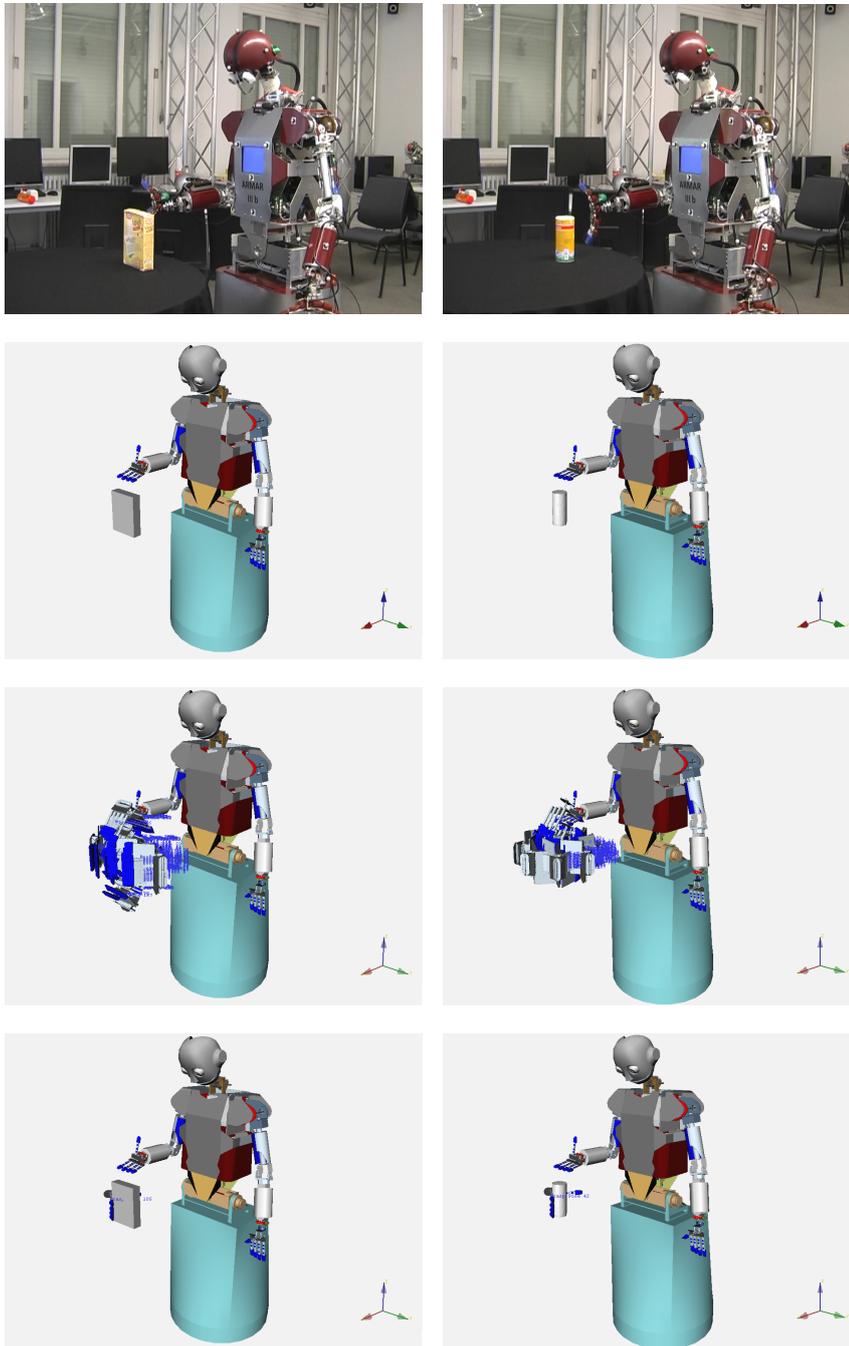


Abbildung 6.11: Griffbewertung und -auswahl. Objektlokalisierung (erste Reihe), Aktualisierung der Objektpose in der Simulationsumgebung (zweite Reihe), alle durch den Greifplaner generierten Griffe (dritte Reihe), Auswahl des ersten kinematisch erreichbaren Griffes (vierte Reihe). Nachdruck aus [Przybylski 11b], ©2011 IEEE.

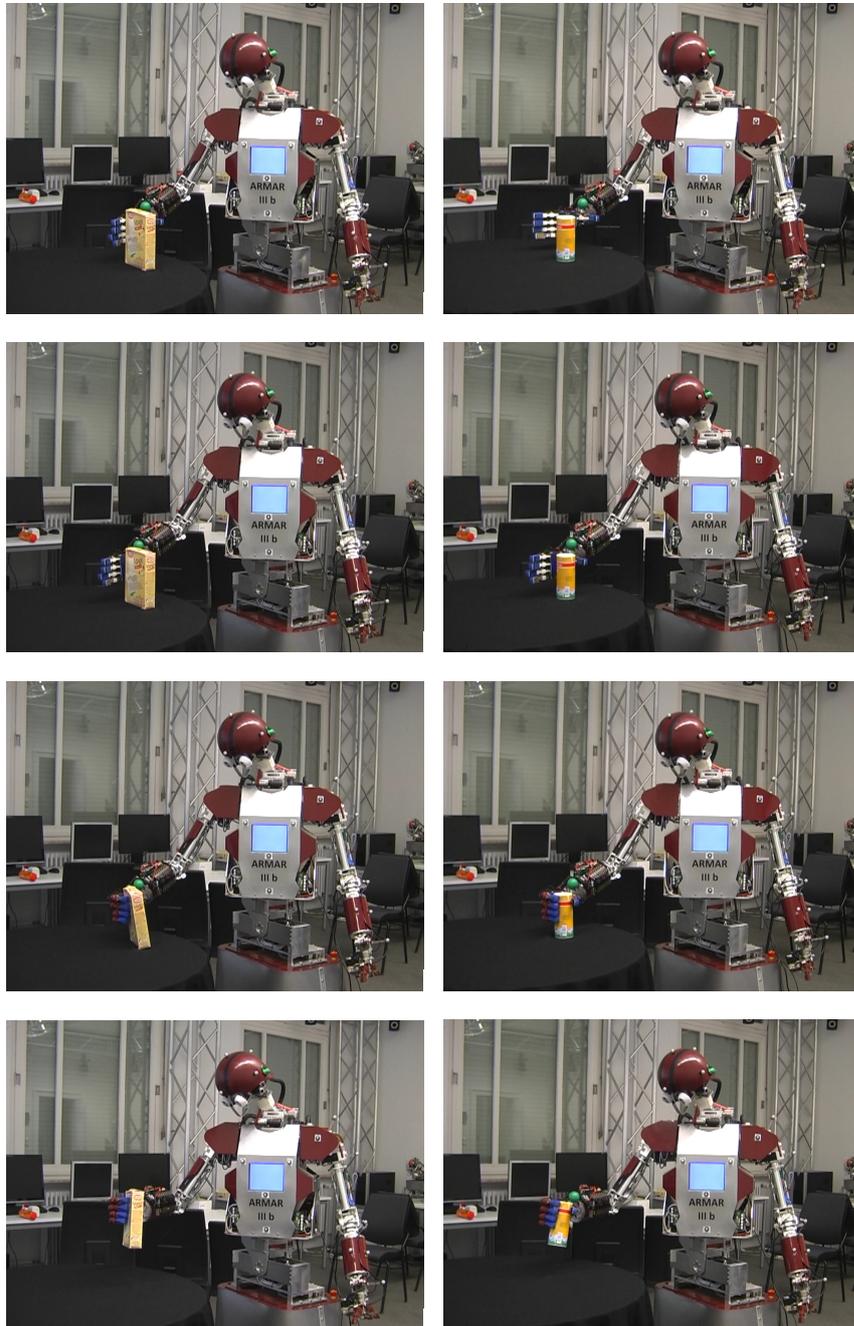


Abbildung 6.12: Griffausführung auf ARMAR-III. Die Hand in der Pre-Pose (erste Reihe) und in der Griffpose (zweite Reihe). Schließen der Hand (dritte Reihe) und Hochheben des Objektes (vierte Reihe). Nachdruck aus [Przybylski 11b], ©2011 IEEE.

Richtungen, aus denen das Objekt gegriffen wird, nicht einfließen. Man könnte argumentieren, dass eher ein Kriterium basierend auf der vollständigen euklidischen Distanz (siehe Formel (6.4)) verwendet werden sollte. Während der Experimente wurde diese Option auch in Betracht gezogen. Allerdings zeigte sich, dass ein solches Kriterium im Falle sehr symmetrischer Objekte, insbesondere bei der zylindrischen Salzdose, zu restriktiv wäre, aus folgendem Grund: Die durch den Greifplaner generierten Griffe beziehen sich auf das Objektkoordinatensystem, welches die Objektsymmetrieeigenschaften nicht widerspiegelt. Wird das auf dem Tisch vor dem Roboter stehende zylindrische Objekt um seine Symmetrieachse gedreht, dann ändert sich dadurch die Objektpose, und die menschenähnlichsten Griffe auf Basis eines euklidischen Ähnlichkeitskriteriums können plötzlich auf der Rückseite des Objektes liegen, wo sie für den Roboter unerreichbar sind. Abgesehen davon ergaben sich aus den Experimenten eine Reihe weiterer interessanter Fragen.

Objekte mit komplexeren Formen

Die Wahl zweier einfach geformter Objekte – einer Box und eines Zylinders – für die Greif-Experimente am Menschen ist psychologisch motiviert und erlaubt außerdem ein einfaches Hoch- und Runterskalieren der menschlichen Griffdaten auf Objekte ähnlicher Form, aber unterschiedlicher Größe. Jedoch stellt sich die Frage, wie mit komplexer geformten Objekten umgegangen werden soll. Denkbar sind in diesem Zusammenhang beispielsweise Griffe am Henkel eines Krugs oder am Rand einer Salatschüssel. Ein anderes Beispiel ist die klassische Kaffeetasche. Sie kann von oben gegriffen werden, von mehreren Seiten, am Henkel oder am Rand, wobei einige Finger in die Tasse hineingreifen. Dies führt zur zweiten Frage.

Mögliche Auswirkungen einer alternativen Instruierung der Testpersonen bei den menschlichen Greifexperimenten

Wie sehen die Daten aus, welche man als Ergebnis menschlicher Greifexperimente erwarten kann, wenn man den Testpersonen nicht vorschreibt, auf welche Weise sie die Testobjekte greifen sollen? Für die Experimente der oben beschriebenen Untersuchung wurden die Testpersonen explizit angewiesen, die Objekte von der Seite zu greifen. Die Daten jeder einzelnen Testperson weisen wenig Streuung bezüglich der finalen Fingerspitzenpositionen auf (siehe Abbildung 6.9). Wenn

die Testpersonen aufgefordert werden, selbst zu wählen, wie sie die Testobjekte greifen möchten, und wenn die Testobjekte komplexere Formen haben, ist zu erwarten, dass die so gewonnenen Griffdaten deutlich mehr Streuung aufweisen. In diesem Zusammenhang erscheinen zwei unterschiedliche Ergebnisse denkbar, die jeweils verschiedene Herangehensweisen bei der Auswertung der Daten erfordern: Entweder die Daten enthalten deutliche Cluster oder nicht.

Im Falle des Vorhandenseins von Clustern erscheint es denkbar, dass ähnliche Griffe zum selben Cluster gehören, beispielsweise ein Cluster für die Griffe am Henkel einer Kaffeetasse, ein anderer Cluster für Griffe von oben, und so weiter. In diesem Fall kann das weiter oben vorgeschlagene Ähnlichkeitskriterium mit verschiedenen Clustern in den menschlichen Messdaten verwendet werden, abhängig von der Art, auf welche der Roboter ein Objekt greifen soll. So würde man beispielsweise nur die menschlichen Griffe des Clusters *Henkelgriffe* als Referenz zur Bewertung von Griffen aus dem Greifplaner verwenden, wenn der Roboter eine Tasse am Henkel greifen soll.

Zwei weit schwierigere Fälle dürften das Vorkommen von sehr unregelmäßig geformten Clustern oder das komplette Fehlen von Clustern sein. In beiden Fällen würden die Daten eine deutliche Streuung aufweisen, was zur dritten Frage führt.

Umgang mit großen Streuungen in den menschlichen Griffdaten

Wie muss ein Kriterium für Menschenähnlichkeit beschaffen sein, um mit großen Streuungen in menschlichen Griffdaten umgehen zu können? In den oben beschriebenen Experimenten wurde ein Ansatz gewählt, welcher ein Abstandsmaß zwischen je einem geplanten Griff und dem Durchschnitt der Griffdaten einer einzelnen Testperson berechnet. Dieser Ansatz basiert auf der Annahme, dass die Berechnung des Durchschnitts mehrerer menschlicher Griffe zu einem gültigen Durchschnittsgriff führt. Dies muss jedoch nicht immer der Fall sein. Man betrachte hierzu beispielsweise eine große Salatschüssel, die bei einhändigem Greifen nur am Rand gegriffen werden kann, aber die Testperson greift möglicherweise während der Experimente den Rand an vielen verschiedenen Stellen. In diesem Fall erscheint die Berechnung des Durchschnitts über die aufgenommenen Griffe fragwürdig, da diese nicht zu gültigen Durchschnittsgriffen führen würde.

In derartigen Fällen erscheint die Verwendung von Methoden des Maschinellen Lernens sinnvoll. Mit deren Hilfe könnte die Menschenähnlichkeit eines Griffes abhängig davon bewertet werden, ob *irgendein* menschlicher Griff im Raum der beobachteten Griffe für dieses Objekt innerhalb einer gegebenen Entfernung zum Anfragegriff liegt.

6.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden zwei Beispiele diskutiert, in denen die in Kapitel 4 vorgestellten Greifplanungsmethoden zur Anwendung kamen und für weitere Untersuchungen verwendet wurden: die zweihändige Greifplanung und die Griffauswahl anhand menschlicher Griffdaten.

Bei der zweihändigen Greifplanung wurden die mit dem MAT-basierten Greifplaner (siehe Kapitel 4) generierten Griffkandidaten verwendet, um zweihändige Griffe für ARMAR-III zu planen. Hierzu wurde die kinematische Struktur von ARMAR-III in ein Teilsystem für Arme und Hände und ein Teilsystem für Torso und Plattform zerlegt. Für das Zweiarmsystem wurden kinematisch erreichbare Paare einhändiger Griffkandidaten identifiziert, wobei zusätzlich die Manipulabilität der Lösung der inversen Kinematik lokal optimiert wurde. Das Verfahren wurde anhand einer Amphore und eines Fahrrads als Testobjekte evaluiert.

Für die Griffauswahl anhand menschlicher Griffdaten wurden Greifexperimente mit menschlichen Testpersonen durchgeführt, um mit den so gewonnenen Daten die Menschenähnlichkeit von durch den Greifplaner erzeugten Griffen bewerten zu können. Hierzu wurde ein Distanzmaß vorgeschlagen, welches die Fingerspitzenpositionen der geplanten Griffe am Objekt in Beziehung setzt zu denen der Testpersonen. Als Ergebnis konnte ARMAR-III automatisch den gemäß dieser Griffdaten menschenähnlichsten Griff auswählen und ausführen.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war die Extraktion wesentlicher für das Greifen wichtiger geometrischer Eigenschaften aus der Form von Objekten, um auf diese Weise das Problem der Greifplanung einfacher lösen zu können. Hiermit sollte ein Beitrag zur Entwicklung eher analytisch orientierter Greifplanungsverfahren geleistet werden, im Gegensatz zu den zur Zeit dieser Dissertation sehr verbreiteten Verfahren, die Kraftschlussgriffe durch exzessives Testen beinahe zufällig generierter Griffkandidaten mit oft nur geringer Ausbeute erzeugen.

Das Ergebnis ist ein Greifplanungsverfahren basierend auf der Extraktion lokaler Symmetrieeigenschaften aus der Objektform – das nach bestem Wissen des Autors erste Greifplanungsverfahren auf Basis der Mediale-Achse-Transformation überhaupt.

Im Folgenden werden die Beiträge der vorliegenden Arbeit kurz zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungsarbeiten gegeben.

7.1 Wissenschaftliche Beiträge der Arbeit

Die Auswertung der Mediale-Achse-Transformation (MAT) stellt einen vielversprechenden Ansatz zur Lösung von Greifplanungsproblemen dar. In der vorliegenden Arbeit wurde ein umfangreiches Rahmenwerk entwickelt, um auf der MAT basierende Greifplanungsmethoden zu untersuchen. Im Kern steht hierbei das auf der MAT basierende Gitter medialer Kugeln als eine Objektrepräsentation, welche für die Greifplanung wesentliche lokale Objektsymmetrieeigenschaften

dem Greifplaner direkt zugänglich macht. Darauf aufbauend wurde ein Greifplanungsverfahren entwickelt, das diese Objektsymmetrieeigenschaften zur Erzeugung von Griffkandidaten verwendet, aus denen wiederum Kraft- und Präzisionsgriffe berechnet werden. Die entwickelten Verfahren wurden in Simulationsexperimenten mit einem etablierten Greifplanungsverfahren verglichen. Durch den Greifplaner generierte Griffe wurden außerdem in Greifexperimenten auf dem humanoiden Roboter ARMAR-III ausgeführt.

Auf der Grundlage der oben beschriebenen Methoden wurde außerdem die Planung zweihändiger Griffe untersucht und der Frage nachgegangen, wie menschliche Griffdaten für die Auswahl möglichst menschenähnlicher Griffe zur Ausführung auf einem humanoiden Roboter verwendet werden können.

Die beiden wissenschaftlichen Hauptbeiträge der vorliegenden Arbeit sind das Gitter medialer Kugeln als Objektrepräsentation für die Greifplanung und der darauf basierende Greifplanungsalgorithmus:

- **Das Gitter medialer Kugeln – eine Objektrepräsentation für die Greifplanung.** Mit dem Gitter medialer Kugeln wurde eine spezielle Objektrepräsentation für die Greifplanung vorgestellt, die auf der Mediale-Achse-Transformation (MAT) [Blum 67] basiert. Die MAT ist ein vollständiger Formdeskriptor (engl.: complete shape descriptor) und stellt beliebig geformte Objekte mit beliebiger Genauigkeit durch Einbeschreiben maximal großer Kugeln dar. Das Gitter medialer Kugeln erlaubt den effizienten Zugriff auf lokale Teile der Objektgeometrie und ermöglicht die einfache Extraktion wichtiger Griffparameter wie Anrückpunkt, Anrückrichtung, Orientierungsvektor und Vorformung der Hand aus der MAT. Durch das Vorliegen der Kugelradien in der MAT ist außerdem eine für das Greifen mit einer gegebenen Roboterhand wichtige Einschätzung der lokalen Dicke an jeder Stelle des Objektes möglich.

Das Gitter medialer Kugeln erlaubt es, das Greifen nahezu beliebig geformter Objekte auf das Greifen einzelner medialer Kugeln zu reduzieren.

- **Ein Greifplanungsalgorithmus basierend auf lokalen Objektsymmetrieeigenschaften.** In dieser Arbeit wurde ein im Bereich des Teilebasierten Greifens angesiedelter Greifplanungsalgorithmus vorgestellt, der auf dem Oppositionsprinzip basiert und die in der MAT enthaltenen Objektsymmetrieeigenschaften für die Planung von Kraftschlussgriffen ausnutzt. Die einzige von der Roboterhand für diesen Algorithmus zu erfüllende Anforderung besteht darin, dass sie zwei opponierbare virtuelle Finger besitzen

muss, was für alle dem Autor bekannten Hände der Fall ist. Der hier entwickelte Algorithmus vermeidet im Gegensatz zu bisher bekannten Verfahren das durch grobe Approximation der Objektgeometrie bedingte frühzeitige Entfernen vielversprechender Griffkandidaten, da die MAT ein vollständiger Formdeskriptor ist, welcher beliebige Formen mit beliebiger Genauigkeit darstellen kann.

Im Zuge der Entwicklung wurde zunächst ein Zusammenhang zwischen dem Objektwinkel greifbarer medialer Kugeln und einer für den Kraftschluss notwendigen Bedingung hergeleitet. Darauf aufbauend wurde ein Verfahren erdacht, welches mittels Hauptkomponentenanalyse geometrisch sinnvolle Griffkandidaten aus dem Gitter medialer Kugeln extrahiert. Die Forderung nach geometrischer Sinnhaftigkeit ist in diesem Zusammenhang so zu verstehen, dass eine gegebene Roboterhand zum Zwecke des Greifens zwingend in solcher Weise bezüglich eines Objektes positioniert und orientiert werden muss, dass der jeweils zu greifende Teil des Objektes zwischen den beiden virtuellen Fingern der Roboterhand liegt. Auf diese Weise kann durch das Schließen der Finger in vielen Fällen ein Kraftschlussgriff erzielt werden.

Aus den mittels Hauptkomponentenanalyse extrahierten Griffkandidaten wurden Kraft- und Präzisionsgriffe berechnet, wobei für die Präzisionsgriffe ein Algorithmus entwickelt wurde, der im Gegensatz zu den meisten bisher bekannten Verfahren auch die Grifftiefe berechnet.

Die hier entwickelten Ansätze zur Greifplanung wurden für zahlreiche unterschiedlich geformte Objekte gegen ein anderes etabliertes, auf Oberflächennormalen basierendes Greifplanungsverfahren evaluiert. Hierbei konnte gezeigt werden, dass das auf der MAT basierende Greifplanungsverfahren Ausbeuten an Kraftschlussgriffen von bis zu 80% erreicht und insbesondere Vorteile bei im Vergleich zur Hand großen Objekten bietet, da es nur an von der Dicke her greifbaren Teilen der Objekte Griffkandidaten generiert. Für solche Objekte werden außerdem allein aufgrund der geometrischen Gegebenheiten viele Griffe an Henkeln gefunden. Das vorgestellte Verfahren findet außerdem auf effiziente Weise viele Präzisionsgriffe für kleine Objekte. Greifexperimente auf dem humanoiden Roboter ARMAR-III zeigten zudem die Ausführbarkeit der geplanten Griffe auf einem realen Roboter.

Auf der Grundlage des oben beschriebenen Gitters medialer Kugeln und des darauf basierenden Greifplaners wurden zusätzliche Untersuchungen durchgeführt, die zu weiteren Beiträgen führten.

- **Ein Algorithmus zur Planung zweihändiger Griffe basierend auf der Kombination einhändiger Griffkandidaten.** Aufbauend auf dem neuentwickelten Greifplaner wurde ein Verfahren zur zweihändigen Greifplanung entwickelt, das zweihändige Griffkonfigurationen für ARMAR-III durch Kombination einhändiger Griffkandidaten generiert. Zu diesem Zweck wurde die kinematische Struktur von ARMAR-III in zwei Teilsysteme zerlegt: eine durch die Arme gebildete kinematische Kette zwischen beiden Händen und eine kinematische Kette zur Beschreibung der Beweglichkeit von Torso und Plattform. Für das Zweiarmsystem wurden kinematisch erreichbare Paare einhändiger Griffkandidaten gefunden und zusätzlich die Manipulabilität der Lösung der inversen Kinematik lokal optimiert, um eine verbesserte Beweglichkeit der durch das Greifen entstandenen geschlossenen kinematischen Kette nach dem Greifen zu erreichen. Ganzkörperlösungen für die inverse Kinematik wurden gefunden, indem Lösungen für das Zweiarmsystem mit Lösungen für das Plattformsystem kombiniert wurden. Das Verfahren wurde anhand mehrere Testobjekte erfolgreich in der Simulation evaluiert.
- **Ein Verfahren zur Griffauswahl anhand menschlicher Griffdaten.** Ebenfalls aufbauend auf dem neuentwickelten Greifplaner wurde untersucht, wie menschliche Griffdaten ausgewertet werden können, um die Auswahl eines Griffes aus einer Menge geplanter Griffe zu erleichtern. Basierend auf den Ergebnissen von Greifexperimenten mit menschlichen Probanden wurde hierfür ein Distanzmaß entwickelt, welches die Fingerspitzenpositionen der durch den Greifplaner generierten Griffe in Beziehung zu den Fingerspitzenpositionen der Testpersonen in den menschlichen Griffdaten setzt. In Experimenten auf ARMAR-III konnte gezeigt werden, dass der humanoide Roboter auf diese Weise in der Lage ist, aus einer Vielzahl von möglichen Griffen automatisch den menschenähnlichsten zu wählen und auszuführen.

7.2 Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden Algorithmen vorgestellt, die für das Greifen wichtige lokale Symmetrieeigenschaften aus der Objektgeometrie extrahieren und diese verwenden, um das Problem der Greifplanung auf einfachere Weise zu lösen. In zukünftigen Forschungsarbeiten können, gestützt auf die hier vorgestellten Methoden und Ergebnisse, weiterführende Fragestellungen untersucht werden.

7.2.1 Weitere Griffe aus den Taxonomien

Eine mögliche Erweiterung liegt in der Planung weiterer Griffe aus den gängigen Griff-taxonomien. In der vorliegenden Arbeit wurden Methoden entwickelt, um auf effiziente Weise Kraftgriffe mit paralleler Vorformung der Hand sowie prismatische Dreifingerpräzisionsgriffe zu planen. Komplexere Fragestellungen ergeben sich, wenn beispielsweise sphärische Präzisionsgriffe geplant werden sollen, oder Präzisionsgriffe für Hände mit komplexeren, dem Menschen nachempfundenen Daumenkinematiken, bei denen der Daumen beim Schließen im Gegensatz zu ARMAR-III nicht mehr automatisch auf den Zeige- oder Mittelfinger trifft. Hier kann eine aktivere Betrachtung der Daumenkinematik beim Schließen der Hand erforderlich werden.

7.2.2 Dynamiksimulation

Interessante Fragestellungen eröffnen sich auch im Bereich der Dynamik. Bei den meisten bisherigen Greifplanungsverfahren wird angenommen, dass das Objekt statisch ist, sich also während des Schließens der Hand und bei Kontakten zwischen Fingern und Objekt nicht bewegt. Mit den Methoden der vorliegenden Arbeit kann auf einfache Weise berechnet werden, an welcher Stelle, aus welcher Richtung und mit welcher Handorientierung ein gegebenes Objekt gegriffen werden kann. Durch die Integration einer realitätsnahen Dynamiksimulation könnte zusätzlich genauer untersucht werden, welche Konsequenzen Ungenauigkeiten in der Handpose oder beim Schließen der Finger haben. Denkbar ist beispielsweise, dass sich das zu greifende Objekt durch geschickte Ansteuerung der Finger trotz ungenauer Aktorik in eine Pose relativ zur Hand bewegen lässt, in der ein stabiler Griff vorliegt.

7.2.3 Unbekannte Objekte

Eine weitere Herausforderung liegt im Umgang mit teilweise bekannten oder unbekanntem Objekten. Greifplanung befasst sich per definitionem immer mit vollständig bekannten Objekten. Jedoch werden mittlerweile Szenarien denkbar, in denen der Roboter das für die Greifplanung notwendige Objektmodell selbst generiert, indem beispielsweise verschiedene Teilansichten des Objektes fusioniert werden. Gelingt dies, könnte die komplette Verarbeitungskette von der Modellakquisition über die Greifplanung bis hin zur Ausführung der Griffe direkt auf dem

Roboter realisiert werden, was einen weiteren Schritt auf dem Weg zu autonomen Service-Robotern bedeuten würde.

7.3 Schlussbetrachtung

7.3.1 Das Ergebnis

Der in dieser Arbeit vorgestellte geometriebasierte Ansatz zur Greifplanung basiert auf Griff-taxonomien aus mehreren Jahrzehnten Forschung, auf dem Oppositionsprinzip, dem Prinzip des teilebasierten Greifens und der Kraftschluss-theorie.

Der vorgestellte Ansatz widerlegt die in der letzten Dekade in der Community vorherrschende Meinung, dass die geometrische Form von Objekten zu kompliziert sei, um sie für die Greifplanung auszunutzen, und dass zeitaufwendiges schlichtes Durchprobieren beinahe zufällig generierter Griffkandidaten ein besserer Ansatz sei, um Griffe zu planen. Stattdessen zeigt diese Arbeit, dass, ausgehend von einer geeigneten Objektrepräsentation, einfache geometrische Überlegungen ausreichen, um auf effiziente Weise Kraftschlussgriffe zu generieren. Hierdurch wird eine signifikante Reduktion des Planungsaufwands gegenüber bisherigen Verfahren erreicht.

Im Widerspruch zu einer weiteren verbreiteten Meinung, dass Greifen allein durch Kräfte charakterisiert und die geometrische Form eines zu greifenden Objektes nur von sekundärem Interesse sei, wurde im Rahmen der Arbeit auf einschlägige, etablierte Ergebnisse der Kraftschluss-theorie ([Nguyen 88],[Murray 94]) verwiesen, welche das Kraftschlussprinzip und damit Greifplanung im Kern als ein geometrisches Problem beschreiben. Darüber hinaus wurde ein Zusammenhang zwischen dem Objektwinkel greifbarer medialer Kugeln und einer für Kraftschluss notwendigen Bedingung hergeleitet. In Übereinstimmung mit jenen Arbeiten ([Nguyen 88],[Murray 94]) wurde in der vorliegenden Arbeit gezeigt, dass, zumindest im Falle bekannter Objekte, ein erfolgreicher Kraftschlussgriff das Ergebnis einer sorgfältigen Analyse der geometrischen Form des Objektes ist.

Die vorliegende Arbeit verwendet auch keine aufwendigen Verfahren aus dem Bereich des Maschinellen Lernens, wie dies im Bereich des Greifens aktuell weit verbreitet ist. Stattdessen ist das Wissen verschiedener menschlicher Greiftaxonomien in die Entwicklung des hier vorgestellten Greifplanungsverfahrens eingeflossen, kombiniert mit einfachen geometrischen Überlegungen, basierend auf dem Konzept der Mediale-Achse-Transformation [Blum 67], welches seit fast einem halben Jahrhundert bekannt ist.

Somit wurde gezeigt, dass der Greifplanungsalgorithmus selbst einfach und elegant wird, wenn eine passende Repräsentation der Objektgeometrie zugrunde liegt.

Die Arbeit kann als ein exemplarischer Schritt weg von Brute-Force-Methoden und hin zu zukünftigen vollständig analytischen Verfahren zur Lösung des Problems der Greifplanung gesehen werden.

7.3.2 ... und wie es zu der Idee kam

Ich begann meine Beschäftigung mit dem Thema Greifplanung im Sommer 2008 mit einem eingehenden Studium der einschlägigen Fachliteratur, beginnend bei der Forschung der 1980er und 1990er Jahre, die viele geometriebasierte Ansätze zur Greifplanung für 2D-Objekte beschreibt, bis hin zu den modernen simulationsbasierten Ansätzen, die ungefähr um die Jahrtausendwende mit Vorstellung des Simulators GraspIt! auftauchten.

Nach einem halben Jahr der Literaturrecherche sammelte ich erste Erfahrungen bezüglich des Greifens mit ARMAR-III, als ein Kollege aus Stockholm unser Institut besuchte und seinen boxbasierten Greifplanungsansatz auf ARMAR-III integrieren und evaluieren wollte. Die Experimente, die nach einiger Zeit gut funktionierten, zeigten allerdings, dass die Zerlegung eines Objektes in eine Menge einhüllender Quader für viele Objekte zu eher unbefriedigenden Lösungen führte, weil sie die Verkörperung des Roboters nicht ausreichend berücksichtigt. Es kam zu Diskussionen mit den Kollegen, dass es wahrscheinlich sehr schwierig werden würde, mit ARMAR beispielsweise den zylindrischen Pfannenstiel zu greifen, weil eine Zerlegung in Quader hier nur zu sehr wenigen Griffkandidaten führen würde, die außerdem für den Roboter meist kinematisch nicht erreichbar sein würden. Auch würde man mit der Boxzerlegung, je nach Parameterwahl, vermutlich zu wenige oder gar keine Griffkandidaten am Rand der Pfanne finden, obwohl aus menschlicher Sicht hier beliebig viele Griffe möglich sein müssten.

Auch zeigten die Erfahrungen beim Greifen mit ARMAR, dass das Anfahren einer gewünschten Handpose nur mit begrenzter Genauigkeit möglich war, was ebenfalls für die Ansteuerung der Finger galt. Dies führte auch zu der Erkenntnis, dass es für ein gegebenes Objekt vor allem wichtig ist, herauszufinden, wo die Hand hinbewegt werden muss, aus welcher Richtung und mit welcher Orientierung sie sich dem Objekt nähern sollte. Wenn das Objekt nicht zu dick ist, sollte es im Grunde ausreichen, sicherzustellen, dass sich das Objekt vor dem Schließen der Finger zwischen dem Daumen und den restlichen Fingern von ARMARs Hand

befindet. Dann sollte sich in den meisten Fällen durch das Schließen der Hand ein stabiler Griff einstellen.

Nach weiteren Monaten der Literaturrecherche und des Nachdenkens folgte eine Phase der Verwirrung, weil man mir zwischenzeitlich die gutgemeinten Ratschläge gegeben hatte, ich solle doch besser menschliche Greifbewegungen auswerten, um diese zur Dimensionsreduktion des Problems der Greifplanung zu verwenden, oder ein menschliches Handmodell inklusive Weichgewebesimulation zu erstellen, um dadurch das menschliche Greifen besser zu verstehen.

So fuhr ich im Sommer 2009 in den Urlaub, immer noch ohne eine gute Idee. Irgendeinen unüberlegten Schnellschuss wagen, nur um ein Paper einreichen zu können, wollte ich nicht. Ich hatte mir in den Kopf gesetzt, das Problem zu lösen, oder zumindest einen Lösungsansatz für das Problem zu finden, der besser als die bisherigen Ansätze funktionieren sollte.

Wie sollte man aus menschlichen Greifbewegungen darauf schließen können, ob ein Griff für ein gegebenes Objekt stabil sein würde oder nicht? Insbesondere bei der unendlichen Vielfalt möglicher Formen und Größen der Objekte? Auch die Idee der Entwicklung eines menschlichen Handmodells mit Weichgewebesimulation schien nicht zum Problem der Greifplanung zu passen.

Am vielversprechendsten schienen noch die simulationsbasierten Greifplanungsmethoden basierend auf GraspIt! und OpenRAVE zu sein. Hier verwendet man ein geometrisches Modell des Objektes und ein geometrisches und kinematisches Modell der Hand, generiert nach unterschiedlichen Heuristiken Griffkandidaten und testet diese in der Simulation auf Kraftschluss. Die nach diesem Prinzip funktionierende Approximation des Objektes durch umhüllende Quader zur Planung von Griffen erwies sich bei den Experimenten mit ARMAR-III als eher grob und führte nur zu wenigen ausführbaren Griffen. Ein allein auf Oberflächennormalen basierendes Greifplanungsverfahren hingegen verlegte sich stärker auf das schlichte Durchtesten vieler Griffkandidaten, aber mit eher geringer Ausbeute an Kraftschlussgriffen.

Das eigentliche Problem schien vor allem darin zu bestehen, das anscheinend niemand wusste, wie man mit der Form des Objektes umgehen sollte. Im Grunde ist das zunächst ein Widerspruch: Da man ein geometrisches Modell des Objektes und ein geometrisches und kinematisches Modell der Hand besitzt, besitzt man im Grunde auch vollständiges Wissen über das Problem. Alle Daten liegen vor; es gibt keine Unbekannten. Und dennoch sollte die beste Lösung darin bestehen, nach groben Faustregeln Hunderte oder Tausende Griffkandidaten zu generieren und durchzutesten, in der Hoffnung, dass ein kleiner Teil davon kraftschlüssig ist?

Genau dies schien aber der vorherrschende Konsens zu sein. Seit dem Erscheinen von GraspIt! hatte sich ein Großteil der Community auf das Simulieren und Testen von Griffkandidaten verlegt, teilweise auch in Verbindung mit Ansätzen des Maschinellen Lernens. Die genauere Analyse der Objektgeometrie hatte man kurzerhand für unlösbar oder zu schwierig erklärt, mit den älteren analytischen Ansätzen aus den 1980er und 1990er Jahren beschäftigte sich kaum noch jemand.

Bei genauerer Betrachtung stellte sich das Problem folgendermaßen dar: Die Beschreibung der Objektgeometrie liegt üblicherweise als Oberflächennetz vor, also als eine Menge von Dreiecken. Aus dieser Menge von Dreiecken direkt abzuleiten, wo die Hand für einen erfolgreichen Griff hinzubewegen ist, ist tatsächlich schwierig.

Da mir das Problem aber auch im Urlaub keine Ruhe ließ, saß ich eines Tages mit Notizblock und Bleistift am Pool meines Ferienhotels auf Teneriffa und machte mir Gedanken, warum es so schwierig sein sollte, beispielsweise Griffe für eine Banane zu finden, während es für den Menschen doch absolut intuitiv erscheint, die Banane einfach mit der Hand zu umschließen. Ich skizzierte grob die Hauptausdehnungsrichtung in die Zeichnung der Banane auf meinem Notizblock, als ersten Anhaltspunkt für Anrückrichtung der Hand, Handorientierung und Anrückpunkt. Das schien zu grob zu sein. Besser sollte man die Banane in der Mitte in zwei Stücke teilen, und für jeden Teil der Banane wieder die Hauptausdehnungsrichtungen einzeichnen. Schon besser, aber immer noch zu grob. Man müsste die Banane rekursiv in immer kleinere Stücke zerlegen und die Hauptausdehnungsrichtungen einzeichnen. Wenn man dies oft genug wiederholt, erhält man am Ende eine gekrümmte Linie im Inneren der Banane. Die Skizze der Banane mit der gekrümmten Linie erinnerte mich daran, dass ich solche Strukturen schon früher gesehen hatte.

Aus dem Urlaub zurückgekommen, stöberte ich in meinen Vorlesungsunterlagen aus dem Studium. Im Wintersemester 2005/06 hatte ich die Vorlesung *Medizinische Simulationssysteme* gehört, damals gehalten von Gunther Sudra und Dominik Fritz. In einer der Veranstaltungen war ein Verfahren zur Rekonstruktion von Oberflächenmodellen aus Punktwolken vorgestellt worden. Ein Zwischenschritt dieses Verfahrens bestand in der Berechnung der *Medialen Achse*. Auf einer der Vorlesungsfolien war ein zweidimensionales Objekt mit seiner Medialen Achse abgebildet. Die Banane mit der eingezeichneten gekrümmten Linie hatte mich genau an diese Abbildung erinnert. Das war ein Glücksfall. Es schien unmittelbar klar zu sein, dass man unter Verwendung der Medialen Achse viel leichter zu aus geometrischer Sicht sinnvollen Griffkandidaten für ein Objekt kommen müsste. Man müsste die Hand nur um die gekrümmte Linie im Inneren der Banane schlie-

ßen, dann sollten die meisten derartigen Griffe – eine passende Größe der Banane im Vergleich zur Hand vorausgesetzt – stabil sein.

Eine kurze Recherche im Internet ergab, dass tatsächlich noch niemand auf die Idee gekommen war, die Mediale Achse auf das Problem der Greifplanung anzuwenden. Eine weitere Recherche zeigte allerdings, dass die Berechnung der Medialen Achse ein eigenes Forschungsgebiet für sich darstellt. Die Berechnung erschien algorithmisch als zu anspruchsvoll, um den nötigen Implementierungsaufwand für das Durchführen erster Tests zu riskieren. Nach weiterer Suche stieß ich auf das Tool Tight Cocone von Professor Tamal Dey an der Ohio State University, welches die Mediale Achse berechnet. Eine Mail an Professor Dey führte zu den Zugangscodes, um das Tool herunterladen und testen zu können.

Erste Tests über den Jahreswechsel 2009/10 und ein Programmiermarathon bis März 2010 führten zu einem ersten Paper auf der IROS 2010 [Przybylski 10], das die Realisierbarkeit des Konzepts zeigte. Das Auftauchen immer neuer Sonderfälle zeigte aber auch, dass die Mediale Achse allein noch nicht ausreichte, sondern dass man stattdessen die komplette Mediale-Achse-Transformation auswerten müsste, inklusive der Kugelradien und Objektwinkel. Ein von Grund auf neu entwickelter Ansatz führte zu einem Paper auf der IROS 2011 [Przybylski 11a], welches das Fundament für den Inhalt der vorliegenden Ausarbeitung bildet.

Das Ergebnis dieser Arbeit ist der Entscheidung zu verdanken, trotz aller gutgemeinter Ratschläge von Dritten dennoch letztendlich nur der eigenen Intuition zu folgen, sowie meinen Betreuern, die mich gewähren ließen, obwohl ich ihre Geduld auf eine harte Probe gestellt habe.

Hätte man rückblickend anders vorgehen sollen? Nein. Ein Problem lösen zu wollen, das man nicht verstanden hat, wird kaum zum Erfolg führen. Schnellschüsse bergen die Gefahr, dass man Probleme löst, die andere schon gelöst haben oder an Problemen scheitert, an denen andere bereits gescheitert sind. Die Entscheidung, trotz aller Widerstände beharrlich einen Schritt nach dem anderen zu machen und sich nicht beirren zu lassen, hat sich als richtig erwiesen.

Anhang A

Softwarekomponenten und Systemaspekte

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden diverse Softwarekomponenten für die Greifplanung entwickelt, deren Aufbau und Zusammenspiel im Folgenden kurz beschrieben wird. Abbildung A.1 zeigt den Aufbau des Frameworks und das Zusammenwirken mit anderen Komponenten.

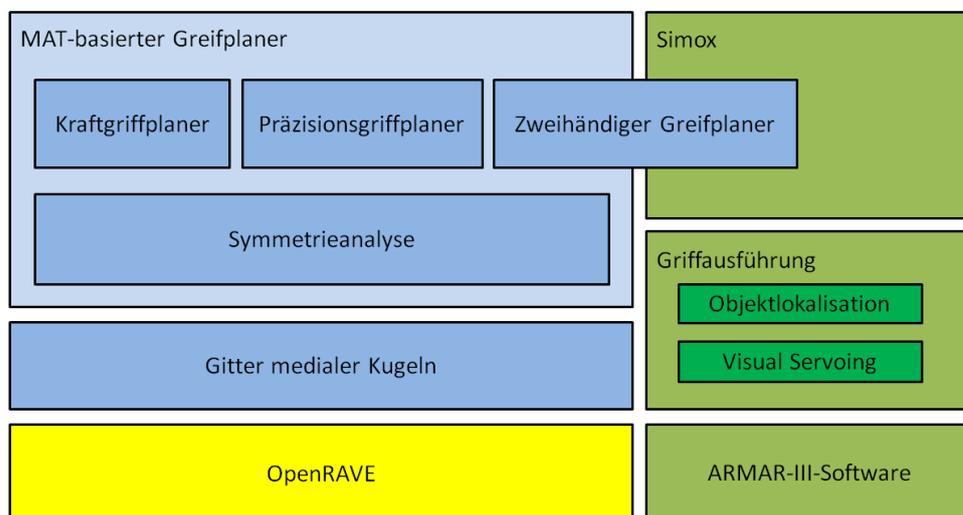


Abbildung A.1: Die für die vorliegende Arbeit entwickelten Softwarekomponenten (in Blautönen).

Die blauen Felder repräsentieren hierbei die für diese Arbeit neu entwickelten

Komponenten. Die restlichen Felder stehen für die bereits vorhandenen Systemkomponenten.

Die neuentwickelten Greifplanungskomponenten basieren größtenteils auf dem Simulations-Framework OpenRAVE [Diankov 08]. Dieses stellt Funktionalität für die geometrische und kinematische Modellierung von Robotern und Objekten sowie für die Bewegungsplanung zur Verfügung. Die Abhängigkeit der neuentwickelten Komponenten von OpenRAVE-Funktionalität wurde schlank gehalten, um den Wartungsaufwand bei OpenRAVE-Updates zu begrenzen. Die Verwendung von OpenRAVE-Funktionalität beschränkt sich auf

- die Visualisierung von Roboter- und Objektmodellen,
- die Berechnung der Vorwärtskinematik,
- die Bestimmung der Kontaktpunkte und -normalen zwischen Roboterhand und Objekt sowie
- die Visualisierung einfacher geometrischer Primitive: Punkte, Linien, Dreiecke, Kugeln.

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die neuentwickelten Komponenten gegeben, welche größtenteils in Python implementiert wurden:

- Das **Gitter medialer Kugeln** als Objektrepräsentation: Hierfür wurde ein einfaches suchbasiertes Verfahren zur Rekonstruktion der Mediale-Achse-Transformation (MAT) aus der Medialen Achse (MA) und einer Oberflächenpunktwolke des Objektes entwickelt (Details siehe [Przybylski 11a]). Hierzu gehören auch Methoden zur Bestimmung der optimalen Gitterabmessungen, um einen möglichst niedrigen Aufwand für Nachbarschaftszugriffe zu erreichen.
- Der **MAT-basierte Greifplaner** besteht aus der Symmetrieanalyse, dem Kraftgriffplaner, dem Präzisionsgriffplaner und dem zweihändigen Greifplaner.
 - Die **Symmetrieanalyse** extrahiert mithilfe der Hauptkomponentenanalyse die lokalen Symmetrieeigenschaften eines Objektes aus dem Gitter medialer Kugeln und generiert daraus Griffkandidaten, die von den darauf aufbauenden Greifplanern verwendet werden.

-
- Der **Kraftgriffplaner** berechnet aus den Griffkandidaten Kraftgriffe. Hierzu wurde ein Vorwärtsansatz implementiert, der eine Pose der Hand mit Kontakt, jedoch ohne Durchdringung mit dem Objekt ermittelt. Um die Anzahl der nötigen Kollisionstests zu reduzieren, wurde ein Intervallschachtelungsverfahren zum Schließen der Finger implementiert.
 - Der **Präzisionsgriffplaner** berechnet aus den Griffkandidaten parallele Dreifingerpräzisionsgriffe für die ARMAR-III-Hand durch iterative Bestimmung von Handpose und -konfiguration. In diesem Zusammenhang wurden Algorithmen und Datenstrukturen implementiert, um an verschiedenen Punkten der Handoberfläche Kontaktpunkte zu definieren, Entfernungen und Orientierungen dieser Kontaktpunkte relativ zueinander zu berechnen und die Finger der Hand mit bestimmten Randbedingungen bezüglich der Entfernungen und Orientierungen der gewünschten Kontaktpunkte zueinander zu bewegen.
 - Der **zweihändige Greifplaner** besteht aus zwei Teilen. Auf dem Gitter medialer Kugeln werden einhändige Griffkandidaten generiert und im xml-Format ausgegeben. Die darauf basierende Berechnung zweihändiger Griffkonfigurationen für die Kinematik des Handarmsystems und die Optimierung der Manipulabilität dieser Konfigurationen sind im Simox-Framework [Vahrenkamp 10] umgesetzt.

Die durch den Kraftgriffplaner und den Präzisionsgriffplaner berechneten Griffe können in einem Simox-kompatiblen xml-Format ausgegeben werden, um sie innerhalb von Simox visualisieren und auf ARMAR-III ausführen zu können. Ein Griff besteht hierbei aus einer finalen Griffpose und einer Pre-Grasp-Pose relativ zum Objekt, jeweils kombiniert mit einer Handkonfiguration und einem Namensstring. Zur finalen Griffpose und -konfiguration gehört außerdem eine Kraftschlussbewertung.

Für die Ausführung der geplanten Griffe im Rahmen der Greifexperimente auf ARMAR-III wurden keine zusätzlichen Komponenten entwickelt. Stattdessen wurden hierfür die bereits vorhandenen Komponenten verwendet, welche das Greifen mithilfe von Methoden der Objektlokalisierung und des Visual Servoing ermöglichen.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Die Griff-taxonomie von Cutkosky. Nachdruck aus [Cutkosky 89], ©1989 IEEE.	11
2.2	Verschiedene Oppositionstypen: pad opposition (links), palm opposition (Mitte) und side opposition (rechts). Nachdruck aus [Iberall 97], ©1997 IJRR/Sagepub	12
2.3	Eigengriffe für fünf unterschiedliche Handmodelle. Nachdruck aus [Ciocarlie 07], ©2007 IEEE.	16
2.4	Handkonfiguration für das Greifen einer Maus, mit Kontaktpunkten an Hand und Objekt sowie Kontaktnormalen auf der Objektoberfläche (a)+(b), Griff für eine Colaflasche, angepasst auf eine Reinigungsmittelflasche (c), Griff für eine Glühbirne, angepasst auf eine Sprühflasche (d). Nachdruck aus [Li 07], ©2007 IEEE.	18
2.5	Geodätische Kreise um einen Oberflächenpunkt auf einer Tasse (a), zwei stabile Griffe für dieses Objekt (b). Nachdruck aus [Li 11], ©2011 IEEE.	20
2.6	Der diskretisierte Arbeitsraum des Zeigefingers als Gitter und als volumetrische Approximation durch Kugeln (a), einige Beispielgriffe für eine Pferdefigur (b). Nachdruck aus [Saut 12], ©2012 Elsevier.	21
2.7	Zerlegung eines Erlenmeyerkolbens in die Grundkörper Kegel und Zylinder mit den zugehörigen Anrückrichtungen für die Hand (links), ein Griff für das Objekt (rechts). Nachdruck aus [Miller 03], ©IEEE 2003	23
2.8	Schrittweise Approximation eines Weinglases (ganz links) durch einen Binärbaum aus Superquadranten. Nachdruck aus [Goldfeder 07], ©IEEE 2007	24

2.9	Schrittweise Approximation des Stanford-Häschens (ganz links) durch minimal-umgebende Quader. Nachdruck aus [Huebner 08], ©IEEE 2008	24
2.10	Reeb-Graph der Klasse von oktopusartigen Objekten (links), sowie generierte Beispielgriffe für zwei verschiedene Oktopusobjekte. Nachdruck aus [Aleotti 10], ©IEEE 2010	25
3.1	Links: Approximation einer zylinderförmigen Salzdose mit einem minimal-umhüllenden Quader. Mitte: Aus dem Quader generierte Anrückrichtungen für die Salzdose. Rechts: Ausführung eines Griffes durch ARMAR. Nachdrucke aus [Huebner 09], ©2009 IEEE	32
3.2	Die Mediale Achse einiger einfacher zweidimensionaler Formen, in lila eingezeichnet.	36
3.3	Zwei einfach geformte und zwei komplexe Objekte zusammen mit ihrer jeweiligen Medialen Achse.	37
3.4	Obere Zeile: Voronoi-Graph einer gepunkteten zweidimensionalen Kontur. Untere Zeile: Approximation der Medialen Achse durch die vollständig innerhalb der Kontur liegenden Ecken und Kanten des Voronoi-Graphen. Nachdruck aus [Attali 96], ©1996 IEEE	38
3.5	Links: Mediale Achse einer zweidimensionalen Kontur. Mitte und rechts: Ausbildung zusätzlicher Zweige bei verrauschten Eingabedaten. Nachdruck aus [Miklos 10], ©2010 ACM	39
3.6	Der Zusammenhang zwischen Mediale-Achse-Transformation, Oppositionsprinzip und Greifplanung: Der von der Hand anzufahrende Anrückpunkt am bzw. im Objekt muss <i>zwischen</i> möglichen Kontaktpunkten der Finger mit dem Objekt liegen und die lokale Dicke des Objektes (d.h. der Kugeldurchmesser) muss kleiner als der Abstand zwischen zwei Fingern bei geöffneter Hand sein. . . .	41
3.7	Das Gitter medialer Kugeln für einige in dieser Arbeit verwendete Testobjekte aus dem <i>Chen mesh segmentation benchmark</i> [Chen 09]. Die Kugeln sind abhängig von ihrer Größe eingefärbt, von dunkelrot für die kleinsten Kugeln über grün bis dunkelblau für die größten Kugeln. Abbildungen (b) bis (e) sind Nachdrucke aus [Przybylski 11a], Abbildung (i) ist ein Nachdruck aus [Vahrenkamp 11], ©2011 IEEE	47

- 3.8 Das Gitter medialer Kugeln für einige digitalisierte Testobjekte aus Styropor. Die Kugeln sind abhängig von ihrer Größe eingefärbt, von dunkelrot für die kleinsten Kugeln über grün bis dunkelblau für die größten Kugeln. Abbildungen (a) bis (c) sind Nachdrucke aus [Przybylski 11a], ©2011 IEEE 48
- 4.1 Grundidee des Greifplanungsverfahrens: Die Symmetrieebene eines Objektes soll zwischen Daumen und restlichen Fingern eingeklemmt werden (a),(b). Bei Objekten mit einer Symmetrieachse soll diese durch die Finger umschlossen werden (c),(d). Nachdruck aus [Przybylski 10], ©2010 IEEE 52
- 4.2 Überblick über die einzelnen Schritte des Algorithmus zur Greifplanung. Gitter medialer Kugeln, basierend auf der Mediale-Achse-Transformation; Kugeln eingefärbt abhängig von ihrem Radius (a), Analyse lokaler Symmetrieeigenschaften des Objektes (b), auf Basis der Symmetrieanalyse generierte Griffkandidaten (c), ein resultierender Kraftschlussgriff (d). Abbildungen (a) und (c) sind Nachdrucke aus [Przybylski 11a], ©2011 IEEE 53
- 4.3 Die Beziehung zwischen der Kraftschlussbedingung eines antipodischen Zweifingergriffes und dem Objektwinkel einer medialen Kugel. Im Falle eines Kraftgriffes verläuft die grüne Gerade, welche die beiden Kontaktpunkte miteinander verbindet, innerhalb beider Reibungskegel (a). Der Grenzfall, in dem die Verbindungsgerade auf der Oberfläche der Reibungskegel verläuft (b). Ein Beispiel, in dem die Verbindungsgerade außerhalb der Reibungskegel verläuft (c). Die Kontaktkonfigurationen in (b) und (c) führen nicht zu Kraftschlussgriffen. 55
- 4.4 Geometrische Betrachtungen zur Wahl einer unteren Schranke für den Objektwinkel α_o . In einem Rechteck beschreiben mediale Kugeln mit $\alpha_o = 90^\circ$ (rot) Ecken, während Kugeln mit $\alpha_o = 180^\circ$ (blau) Länge und Breite (bzw. Dicke) des Rechtecks beschreiben (a). In einer Ellipse hat nur die genau im Zentrum einbeschriebene mediale Kugel den Objektwinkel $\alpha_o = 180^\circ$, während α_o schrumpft, je weiter man sich vom Zentrum wegbewegt (b). In einem Dreieck liegen die Kugeln mit den größten Objektwinkeln auf demjenigen Zweig der Medialen Achse (pink), der mit derjenigen Ecke des Dreiecks mit dem kleinsten Innenwinkel verbunden ist (c). 57

- 4.5 Das Verwerfen medialer Kugeln mit kleinen Objektwinkeln. Ein quaderförmiges Beispielobjekt (a) und seine mediale Achse (b). Nach dem Verwerfen von Kugeln mit $\alpha_o \leq \alpha_{o,min} = 120^\circ$ bleiben nur auf der zentralen Symmetrieebene liegende Kugeln übrig (c). Durch die Kugeln auf der zentralen Symmetrieebene bleiben die Informationen über die Symmetrieeigenschaften und die lokale Dicke des Objektes erhalten, während Ecken und Kanten für den Greifplaner nicht mehr sichtbar sind (d). 59
- 4.6 Die Auswirkungen des Herausfilterns medialer Kugeln mit bestimmten Objektwinkeln und Radien. Erste Spalte: Objekte mit allen Kugeln. Zweite Spalte: Nur Kugeln mit Objektwinkel $\alpha_o \geq 120^\circ$. Dritte bis fünfte Spalte: Zusätzliches Verwerfen von Kugeln unterhalb eines Minimalradius $r_{o,min}$, abhängig von der größten im Objekt vorkommenden Kugel mit Radius $r_{o,max}$. Dritte Spalte: $r_{o,min} = 0,3r_{o,max}$, vierte Spalte: $r_{o,min} = 0,5r_{o,max}$, fünfte Spalte: $r_{o,min} = 0,7r_{o,max}$ 61
- 4.7 Analyse der Symmetrieeigenschaften einer lokalen Umgebung um eine Anfragekugel. Obere Reihe: eine lokale Symmetrieebene; untere Reihe: eine lokale Symmetrieachse. Die schwarzen Punkte stehen für die Mittelpunkte medialer Kugeln. Der blaue Punkt ist der Mittelpunkt der Anfragekugel s . Der orangene Kreis mit Radius r_N beschreibt die Größe der lokalen Umgebung N , die bei der Symmetrieanalyse betrachtet werden soll. Der rote und der grüne Pfeil symbolisieren die ersten beiden Eigenvektoren (\vec{e}_1, \vec{e}_2) , die durch Hauptkomponentenanalyse auf den Kugelmittelpunkten der lokalen Umgebung N ermittelt werden. **Der erste Eigenvektor \vec{e}_1 zeigt in Richtung der lokalen Symmetrieachse oder ist parallel zum Rand der lokalen Symmetrieebene ausgerichtet. Der zweite Eigenvektor \vec{e}_2 steht senkrecht auf dem Rand der lokalen Symmetrieebene bzw. auf der Richtung der lokalen Symmetrieachse (untere Reihe).** 64

- 4.8 Ergebnis der Symmetrieanalyse lokaler Teile eines Beispielobjektes. Vollständiges Objekt (oben links), vergrößerte Details (oben rechts und unten). Jeder große Punkt stellt den Mittelpunkt einer Kugel s dar, wobei die verwendete Farbskala von schwarz über rot und grün bis blau reicht, für wachsende Werte von ρ_N . Die mit den großen Punkten verbundenen kurzen roten und grünen Linien stellen den ersten (rot) und zweiten Eigenvektor (grün) dar. Ein kleiner blauer Punkt, der über eine dünne blaue Linie mit einem großen Punkt verbunden ist, stellt den Schwerpunkt der Kugelmittelpunkte in der jeweiligen lokalen Umgebung N um die Kugel s dar. Die hellblaue Fläche im Hintergrund verdeutlicht die Größe der betrachteten lokalen Umgebungen. \vec{e}_1 ist parallel zum Rand einer lokalen Symmetrieebene orientiert oder zeigt in die Richtung einer lokalen Symmetrieachse. 65
- 4.9 Ergebnis der Symmetrieanalyse für weitere Testobjekte. Farbgebung wie in der vorigen Abbildung, abhängig von ρ_N . Alle Kugeln haben einen Objektwinkel von mindestens 120° . Es wurde nicht nach Kugelradien gefiltert. Längliche Objektteile sind meist schwarz (sehr kleine Werte von ρ_N), die Ränder lokaler Symmetriefflächen sind rot (weisen kleine Werte von ρ_N auf), die Symmetriefflächen ändern ihre Farbe von den Rändern zum Inneren hin über gelb und grün zu blau (große Werte von ρ_n). Reihenfolge der untersuchten Objekte von links oben nach rechts unten: Spielzeugmonster-Actionfigur, Stuhl, Amphore, Giraffe, Ameise, Tisch, Teekanne, Fisch, Vogel und Büste. 67
- 4.10 Generierte Griffkandidaten für die in Abbildung 4.9 betrachteten Objekte. Die Griffkandidaten sind als Linien abgebildet, welche die jeweilige Anrückrichtung P_a der Hand repräsentieren. Griffkandidaten, die von lokalen Symmetrieebenen herkommen, sind als grüne Anrückrichtungen eingezeichnet, während Griffkandidaten, die von lokalen Symmetrieachsen herkommen, als orangefarbene Anrückrichtungen eingezeichnet sind. Die Handorientierung P_o eines Griffkandidaten wird jeweils durch eine kurze magentafarbene Linie am Ende einer Anrückrichtung angedeutet. Rosa Punkte repräsentieren die Mittelpunkte derjenigen Kugeln, die zu groß sind, um mit der ARMAR-III-Hand gegriffen zu werden. Abbildungen für Fisch, Ameise, Vogel: Nachdrucke aus [Przybylski 11a], ©2011 IEEE 75

- 4.11 Einschränkung der betrachteten Kugelradien bei der Greifplanung. Für die Giraffenfigur in Originalgröße (a) werden nur Griffkandidaten für die Extremitäten generiert (b),(c). Bei einer auf 25% herunterskalierte Giraffe kann auch der Torso gegriffen werden (d). Durch Einführung einer Untergrenze für die betrachteten Kugelradien kann die Erzeugung von Griffkandidaten auf den Torso beschränkt werden (e),(f). Nachdruck aus [Przybylski 11a], ©2011 IEEE 76
- 4.12 Koordinatensystem der ARMAR-III-Hand, aus verschiedenen Perspektiven betrachtet. x -, y - und z -Achse in rot, grün und blau. Die Richtung \vec{v}_{Palm} der Handfläche ist in magenta eingezeichnet. 78
- 4.13 Gelenkachsen und Segmente der ARMAR-III-Hand 80
- 4.14 Distales Fingersegment der ARMAR-III-Hand (a). Vordefinierter Kontaktpunkt auf der Fingerspitze im Schnittpunkt der roten, blauen und grünen Ebene (b). 83
- 4.15 Schritte der Methode zur Planung von Präzisionsgriffen. Geöffnete Hand mit vordefinierten Kontaktpunkten an den distalen Fingersegmenten (a), Handkonfiguration mit initialer Opposition, bei der die angestrebten Kontaktnormalen parallel zueinander orientiert sind (b), vom zu greifenden Kugelradius r abhängige Vorformung der Hand (c), Griffzentrum (pink) zwischen den opponierenden Fingern (d), Hand in der Startpose P_{start} , wobei die zu greifende Kugel (orange) bereits im Griffzentrum der Hand liegt (e), Hand in finaler Pose und Konfiguration mit Kontakt zwischen distalen Fingersegmenten und Objekt (f). 85
- 4.16 Bewegung der Hand in eine Konfiguration mit initialer Opposition zwischen den angestrebten Kontaktflächen. Links: Bewegung der DIP-Gelenke der beteiligten Finger. Bei Bedarf können zusätzlich die MCP-f/e-Gelenke bewegt werden. Rechts: Die Hand in initialer Opposition mit sich gegenüberstehenden, parallel zueinander ausgerichteten angestrebten Kontaktflächen. 87

- 4.17 Bewegung der Hand in die Vorformungs-Konfiguration. Links: Durch entgegengesetztes Bewegen der DIP- und MCP-f/e-Gelenke jedes Fingers können die angestrebten Kontaktflächen aufeinander zu bewegt werden, während ihre parallele Orientierung erhalten bleibt. Rechts: Die Vorformungs-Konfiguration der Hand ist erreicht, wenn der Abstand zwischen den angestrebten Kontaktflächen den Wert d_{pre} erreicht hat, welcher vom Durchmesser der zu greifenden Kugel abhängt. 88
- 4.18 Das Griffzentrum ist der Punkt genau zwischen den angestrebten Kontaktpunkten auf den Fingerspitzen, hier lila eingezeichnet(a). Die Griffzentrumstransformation T_g setzt sich zusammen aus der Vorwärtskinematik A_{Fwd} vom Handgelenk zum angestrebten Kontaktpunkt auf der Fingerspitze und der Transformation A_{ce} von der Fingerspitze zum Griffzentrum (b). Nach der Berechnung von T_g kann die Hand an einer Startpose relativ zum Objekt positioniert werden, sodass die zu greifende Kugel genau zwischen den angestrebten Kontaktpunkten auf den Fingerspitzen liegt (c). . 89
- 4.19 Korrektur der Handpose beim Schließen der Finger. Durch gegensätzliches Bewegen der DIP- und MCP-f/e-Gelenke der beteiligten Finger um den Winkel $\Delta\sigma$ bewegen sich die angestrebten Kontaktflächen um $\vec{t}_{\Delta\sigma}$, wodurch die zu greifende Kugel nicht mehr zwischen den Kontaktflächen im Griffzentrum liegt (a). Durch Zurückziehen der Hand um $-\vec{t}_{offset}$ kann erreicht werden, dass die zu greifende Kugel wieder genau zwischen den Kontaktflächen liegt (b). Die endgültige Handpose und -konfiguration (c). 91
- 5.1 Objektset 1: Objektmodelle aus dem Chen Mesh Segmentation Benchmark [Chen 09]. 94
- 5.2 Objektset 2: mit Hilfe eines 3D-Laserscanners ([Kasper 07], [Becher 06]) erzeugte Objektmodelle. 95
- 5.3 Einige kraftschlüssige Kraftgriffe für die großen Objekte aus Objektset 1. 97

- 5.4 Die Auswirkungen des Herausfilterns medialer Kugeln mit bestimmten Objektwinkeln und Radien am Beispiel des Clown-Objektes. Alle Kugeln (a), nur Kugeln mit Objektwinkel $\alpha_o \geq 120^\circ$ (b). (c) bis (e): Zusätzliches Verwerfen von Kugeln unterhalb eines Minimalradius $r_{o,min}$, abhängig von der größten im Objekt vorkommenden Kugel mit Radius $r_{o,max}$. $r_{o,min} = 0,3r_{o,max}$ (c), $r_{o,min} = 0,5r_{o,max}$ (d), $r_{o,min} = 0,7r_{o,max}$ (e). Nachdruck aus [Przybylski 12b], ©2012 IEEE. 99
- 5.5 Für das Clown-Objekt generierte Anrückrichtungen, abhängig von verschiedenen Parameterwerten für Suchradius r_N und minimalen Kugelradius $r_{o,min}$. Linke Spalte: $r_N = 1,0\text{cm}$. Rechte Spalte: $r_N = 3,0\text{cm}$. Erste Zeile: Keine untere Schranke für den Kugelradius. Zweite Zeile: $r_{o,min} = 0,3r_{o,max}$. Dritte Zeile: $r_{o,min} = 0,5r_{o,max}$. Vierte Zeile: $r_{o,min} = 0,7r_{o,max}$. Nachdruck aus [Przybylski 12b], ©2012 IEEE. 100
- 5.6 Einige Beispiele für kraftschlüssige Kraftgriffe für handgroße Objekte aus Objektset 2. Abbildungen (g) bis (o) sind Nachdrucke aus [Przybylski 11a], ©2011 IEEE 103
- 5.7 Einige Beispiele für kraftschlüssige Präzisionsgriffe, die durch den MAT-basierten Greifplaner gefunden wurden. 107
- 5.8 Testobjekte für die Greifexperimente (a). ARMAR-IIIb greift ein Objekt (b). Nachdrucke aus [Przybylski 12b], ©2012 IEEE. . . . 110
- 5.9 Schritte der Griffausführung. Erste Zeile: Das Testobjekt auf dem Tisch vor dem Roboter. Zweite Zeile: Objektlokalisierung mit überlagert dargestelltem Objektoberflächennetz und Objektkoordinatensystem. Dritte Zeile: Ausgewählter Griff. Vierte Zeile: ARMAR greift das Objekt und hebt es hoch. Nachdrucke aus [Przybylski 12b], ©2012 IEEE. 111
- 5.10 Einige Beispielgriffe, die während der Experimente ausgeführt wurden. Nachdrucke aus [Przybylski 12b], ©2012 IEEE. 112
- 6.1 Der humanoide Roboter ARMAR-III (links) und seine Zerlegung in zwei kinematische Strukturen (Mitte und rechts). Nachdruck aus [Vahrenkamp 11], ©2011 IEEE. 118

-
- 6.2 Ein Schnitt durch die Erreichbarkeitsrepräsentation der kinematischen Kette mit 14 Bewegungsfreiheitsgraden zwischen linker und rechter Hand von ARMAR-III (a). Die Erreichbarkeit der kinematischen Kette mit vier Bewegungsfreiheitsgraden, die das Yaw-Gelenk der Plattform über die drei Hüftgelenke mit dem festen Koordinatensystem *Center of Arms* verbindet (b). Nachdruck aus [Vahrenkamp 11], ©2011 IEEE. 119
- 6.3 Eine Menge von 300 Griffkandidaten mit zugehörigen Anrückrichtungen, abgebildet als rote Linien (links). Mit Hilfe der Erreichbarkeitsinformationen kann eine Menge von für die linke Hand erreichbaren Kandidaten bestimmt werden (rechts). Nachdruck aus [Vahrenkamp 11], ©2011 IEEE. 121
- 6.4 Eine zweihändige Griffkonfiguration (links) und die zugehörige Konfiguration mit optimierter Manipulabilität (rechts). Nachdruck aus [Vahrenkamp 11], ©2011 IEEE. 124
- 6.5 Eine 3D-Visualisierung der approximierten 6D-Manipulabilitäts-Cluster für das Center-of-Arms-Gelenk. Die Linien veranschaulichen die möglichen Bewegungen entlang der drei Achsen des lokalen Koordinatensystems. Nachdruck aus [Vahrenkamp 11], ©2011 IEEE. 124
- 6.6 Manipulabilitäts-Cluster für 250 geplante zweihändige Griffe (a). Eine exemplarische Ganzkörperlösung für die Inverse Kinematik des humanoiden Roboters ARMAR-III (b). Nachdruck aus [Vahrenkamp 11], ©2011 IEEE. 125
- 6.7 Die zweihändige Erreichbarkeit des Fahrrads wird durch 250 Manipulabilitäts-Cluster repräsentiert, die durch den Greifplaner generiert wurden (a). Der humanoide Roboter ARMAR-III verwendet einen geplanten Griff, um das Fahrrad mit beiden Händen zu halten (b). Nachdruck aus [Vahrenkamp 11], ©2011 IEEE. . . 127
- 6.8 Experimentalaufbau für das Sammeln menschlicher Griffdaten. Das Objekt sollte gegriffen und im dunkelgrau schattierten Bereich abgelegt werden. Nachdruck aus [Przybylski 11b], ©2011 IEEE. 129
- 6.9 Endpositionen (erste und zweite Spalte) und Trajektorien (dritte und vierte Spalte) der Fingerspitzen zweier Teilnehmer. Nachdruck aus [Przybylski 11b], ©2011 IEEE. 130

- 6.10 Ergebnisse der Greifplanungs- und Bewertungsprozedur für die Müslibox (links) und die zylindrische Salzdose (rechts). Grüne und orangefarbene Linien beschreiben Anrückrichtungen der Hand an das Objekt. Magentafarbene Linien am Ende der Anrückrichtungen zeigen die jeweiligen Handorientierungsvektoren an. Schwarze Kugeln zeigen die gemittelten Positionen der Fingerspitzen während der Greifexperimente am Menschen. Purpurne Kugeln an den Anrückrichtungen veranschaulichen die jeweils finale Position des Handgelenks während der Greifplanung. Je größer die purpurnen Kugeln, desto größer die Ähnlichkeit der jeweiligen Griffe zu den Daten aus den Greifexperimenten am Menschen, unter Verwendung des vorgeschlagenen Ähnlichkeitskriteriums. Nachdruck aus [Przybylski 11b], ©2011 IEEE. 133
- 6.11 Griffbewertung und -auswahl. Objektlokalisierung (erste Reihe), Aktualisierung der Objektpose in der Simulationsumgebung (zweite Reihe), alle durch den Greifplaner generierten Griffe (dritte Reihe), Auswahl des ersten kinematisch erreichbaren Griffes (vierte Reihe). Nachdruck aus [Przybylski 11b], ©2011 IEEE. . . 135
- 6.12 Griffausführung auf ARMAR-III. Die Hand in der Pre-Pose (erste Reihe) und in der Griffpose (zweite Reihe). Schließen der Hand (dritte Reihe) und Hochheben des Objektes (vierte Reihe). Nachdruck aus [Przybylski 11b], ©2011 IEEE. 136
- A.1 Die für die vorliegende Arbeit entwickelten Softwarekomponenten (in Blautönen). 151

Tabellenverzeichnis

4.1	Haftreibungszahlen für unterschiedliche Materialpaare, entnommen aus [Murray94].	56
5.1	Experiment 1, Kraftgriffe auf großen Objekten: Anteil der Kraftschlussgriffe an der Gesamtzahl erzeugter Griffkandidaten	98
5.2	Experiment 2: MAT-Planer, kleiner Suchradius. Anteil der Kraftschlussgriffe an der Gesamtzahl getesteter Griffkandidaten	101
5.3	Experiment 2: MAT-Planer, großer Suchradius. Anteil der Kraftschlussgriffe an der Gesamtzahl getesteter Griffkandidaten	102
5.4	Experiment 2: Oberflächennormalenplaner [Berenson 07]: Anteil der Kraftschlussgriffe an der Gesamtzahl getesteter Griffkandidaten	102
5.5	Experiment 3, Präzisionsgriffe: Anteil der Kraftschlussgriffe an der Gesamtzahl getesteter Griffkandidaten	105
5.6	Durchschnittliche Rechenzeiten für Symmetrieanalyse und Griffkandidatenerzeugung für eine einzelne Kugel.	106
5.7	Durchschnittliche Testzeiten pro Griffkandidat.	108
6.1	Laufzeitmessungen	126

Literaturverzeichnis

- [Adam 94] P. Adam, A. Wyss. *Platonische und archimedische Körper, ihre Sternformen und polaren Gebilde*. Haupt, 2. Auflage, 1994.
- [Aleotti 10] J. Aleotti, S. Caselli. Grasp Synthesis by 3D Shape Segmentation Using Reeb Graphs. Tagungsband: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Workshop on Grasp Planning and Task Learning by Imitation*, 2010.
- [Amenta 01a] N. Amenta, S. Choi, R. K. Kolluri. The Power Crust. Tagungsband: *Proceedings of the sixth ACM symposium on Solid modeling and applications*, Seiten 249–266. ACM, 2001.
- [Amenta 01b] N. Amenta, S. Choi, R. K. Kolluri. The Power Crust, Unions of Balls, and the Medial Axis Transform. Tagungsband: *Computational Geometry: Theory and Applications*, Band 19, Seiten 127–153, 2001.
- [Amenta 99] N. Amenta, M. Bern. Surface Reconstruction by Voronoi Filtering. *Discrete & Computational Geometry*, 22:481–504, 1999.
- [Asfour 06] T. Asfour, K. Regenstein, P. Azad, J. Schröder, A. Bierbaum, N. Vahrenkamp, R. Dillmann. ARMAR-III: An Integrated Humanoid Platform for Sensory-Motor Control. Tagungsband: *IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, Seiten 169–175, 2006.
- [Attali 09] D. Attali, J.-D. Boissonnat, H. Edelsbrunner. *Mathematical Foundations of Scientific Visualization, Computer Graphics, and Massive Data Exploration*, Kapitel Stability and Computation of Medial Axes: A State-of-the-Art Report, Seiten 109–125. Mathematics and Visualization. Springer Berlin Heidelberg, 2009.

- [Attali 96] D. Attali, A. Montanvert. Modeling Noise for a Better Simplification of Skeletons. Tagungsband: *Proceedings of the International Conference on Image Processing*, Band 3, Seiten 13–16 vol.3, 1996.
- [Azad 07] P. Azad, T. Asfour, R. Dillmann. Stereo-based 6D Object Localization for Grasping with Humanoid Robot Systems. Tagungsband: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Seiten 919–924, San Diego, USA, October 2007.
- [Azad 09] P. Azad, T. Asfour, R. Dillmann. Accurate Shape-based 6-DoF Pose Estimation of Single-colored Objects. Tagungsband: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Seiten 2690–2695, 2009.
- [Badler 93] N. I. Badler, C. B. Phillips, B. L. Webber. *Simulating Humans: Computer Graphics Animation and Control*. Oxford University Press, New York, Oxford, 1993.
- [Balasubramanian 10] R. Balasubramanian, Ling Xu, P.D. Brook, J.R. Smith, Y. Matsuoka. Human-Guided Grasp Measures Improve Grasp Robustness on Physical Robot. Tagungsband: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seiten 2294–2301, 2010.
- [Barber 96] C. B. Barber, D. P. Dobkin, H. Huhdanpaa. The Quickhull Algorithm for Convex Hulls. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 22(4):469–483, 1996.
- [Becher 06] R. Becher, P. Steinhaus, R. Zöllner, R. Dillmann. Design and Implementation of an Interactive Object Modelling System. Tagungsband: *International Symposium on Robotics*, 2006.
- [Bentley 75] J. L. Bentley. Multidimensional Binary Search Trees used for Associative Searching. *Communications of the ACM*, 18(9):509–517, Sept. 1975.
- [Bentley 80] J. L. Bentley, B. W. Weide, A. C. Yao. Optimal Expected-Time Algorithms for Closest Point Problems. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 6:563–580, 1980.
- [Berenson 07] D. Berenson, R. Diankov, K. Nishiwaki, S. Kagami, J. Kuffner. Grasp Planning in Complex Scenes. Tagungsband: *IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, Seiten 42–48, 2007.

- [Berenson 08] D. Berenson, S. S. Srinivasa. Grasp Synthesis in Cluttered Environments for Dexterous Hands. Tagungsband: *IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, Seiten 189–196, 2008.
- [Berenson 09] D. Berenson, J. Chestnutt, S.S. Srinivasa, J.J. Kuffner, S. Kagami. Pose-Constrained Whole-Body Planning using Task Space Region Chains. Tagungsband: *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, Seiten 181–187. IEEE, 2009.
- [Bicchi 00] A. Bicchi, V. Kumar. Robotic Grasping and Contact: A Review. Tagungsband: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seiten 348–353, 2000.
- [Biederman 87] I. Biederman. Recognition-by-Components: A Theory of Human Image Understanding. *Psychological Review*, 94(2):115–147, April 1987.
- [Blum 67] H. Blum. *Models for the Perception of Speech and Visual Form*, Kapitel A transformation for extracting new descriptors of shape, Seiten 362–380. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1967.
- [Brandt 94] J. W. Brandt. Convergence and Continuity Criteria for Discrete Approximations of the Continuous Planar Skeletons. Tagungsband: *CVGIP: Image Understanding*, Band 59, Seiten 116–124, 1994.
- [Bruck 07] J. Bruck, J. Gao, A. Jiang. MAP: Medial Axis Based Geometric Routing in Sensor Networks. *Wireless Networks*, 13(6):835–853, 2007.
- [Chazal 05] F. Chazal, A. Lieutier. The lambda-Medial Axis. *Graphical Models*, 67(4):304–331, July 2005.
- [Chen 09] X. Chen, A. Golovinskiy, T. Funkhouser. A Benchmark for 3D Mesh Segmentation. *ACM Transactions on Graphics*, 28:73:1–73:12, 2009.
- [Ciocarlie 07] M. Ciocarlie, C. Goldfeder, P. Allen. Dimensionality Reduction for Hand-Independent Dexterous Robotic Grasping. Tagungsband: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Seiten 3270–3275, 2007.
- [Ciocarlie 08] M. Ciocarlie, S. Clanton, M. Spalding, P. Allen. Biomimetic Grasp Planning for Cortical Control of a Robotic Hand. Tagungsband: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Seiten 2271–2276, 2008.

- [Cutkosky 86] M. Cutkosky, P. Wright. Modeling Manufacturing Grips and Correlations with the Design of Robotic Hands. Tagungsband: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Band 3, Seiten 1533 – 1539, 1986.
- [Cutkosky 89] M.R. Cutkosky. On Grasp Choice, Grasp Models, and the Design of Hands for Manufacturing Tasks. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 5(3):269 –279, 1989.
- [Dey 02] T.K. Dey, W. Zhao. Approximate Medial Axis as a Voronoi Subcomplex. Tagungsband: *ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*, Seiten 356–366, 2002.
- [Dey 03a] T.K. Dey, S. Goswami. Tight cocone: A Water-Tight Surface Reconstructor. Tagungsband: *Proceedings of the eighth ACM symposium on Solid modeling and applications*, Seiten 127–134. ACM, 2003.
- [Dey 03b] T.K. Dey, H. Woo, W. Zhao. Approximate Medial Axis for CAD Models. Tagungsband: *Proceedings of the eighth ACM symposium on Solid modeling and applications*, Seiten 280–285. ACM, 2003.
- [Dey 04a] T.K. Dey, W. Zhao. Approximate Medial Axis as a Voronoi Subcomplex. *Computer-Aided Design*, 36(2):195 – 202, 2004.
- [Dey 04b] T.K. Dey, W. Zhao. Approximating the Medial Axis from the Voronoi Diagram with a Convergence Guarantee. *Algorithmica*, 38:179–200, 2004.
- [Diankov 08] R. Diankov, J. Kuffner. OpenRAVE: A Planning Architecture for Autonomous Robotics. Technischer Bericht CMU-RI-TR-08-34, Robotics Institute, 2008.
- [Diankov 10] R. Diankov. *Automated Construction of Robotic Manipulation Programs*. Dissertation, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, September 2010.
- [Dunteman 89] G. H. Dunteman. *Principal Components Analysis*. Sage Publications, 1989.
- [Feix 09] T. Feix, R. Pawlik, H.-B. Schmiedmayer, J. Romero, D. Kragic. A Comprehensive Grasp Taxonomy. Tagungsband: *Robotics Science and Systems: Workshop on understanding the human hand for advancing robotic manipulation*, 2009.

- [Ferrari 92] C. Ferrari, J. Canny. Planning Optimal Grasps. Tagungsband: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seiten 2290 – 2295 vol.3, 1992.
- [Ficuciello 11] F. Ficuciello, G. Palli, C. Melchiorri, B. Siciliano. Experimental Evaluation of Postural Synergies during Reach To Grasp with the UB Hand IV. Tagungsband: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Seiten 1775 –1780, 2011.
- [Ficuciello 12] F. Ficuciello, G. Palli, C. Melchiorri, B. Siciliano. Planning and Control during Reach To Grasp using the Three Predominant UB Hand IV Postural Synergies. Tagungsband: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seiten 2255 –2260, 2012.
- [Foskey 03] M. Foskey, M. C. Lin, D. Manocha. Efficient Computation of a Simplified Medial Axis. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 3(4):274–284, 2003.
- [Gabicchine 11] M. Gabicchine, A. Bicchi, D. Prattichizzo, M. Malvezzi. On the Role of Hand Synergies in the Optimal Choice of Grasping Forces. *Autonomous Robots*, 31:235–252, 2011.
- [Geidenstam 09] S. Geidenstam, K. Hübner, D. Banksell, D. Kragic. Learning of 2D Grasping Strategies from Box-Based 3D Object Approximations. Tagungsband: *Robotics: Science and Systems Conference (RSS)*, 2009.
- [Giesen 09] J. Giesen, B. Miklos, M. Pauly, C. Wormser. The Scale Axis Transform. Tagungsband: *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on Computational Geometry*, Seiten 106–115, 2009.
- [Goldfeder 07] C. Goldfeder, C. Lackner, R. Pelosof, P. K. Allen. Grasp Planning via Decomposition Trees. Tagungsband: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seiten 4679 –4684, 2007.
- [Goldfeder 09a] C. Goldfeder, M. Ciocarlie, H. Dang, P. K. Allen. The Columbia Grasp Database. Tagungsband: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seiten 1710 –1716, 2009.
- [Goldfeder 09b] C. Goldfeder, M. Ciocarlie, J. Peretzman, H. Dang, P. K. Allen. Data-Driven Grasping with Partial Sensor Data. Tagungsband: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Seiten 1278 –1283, 2009.

- [Goussous 09] F. Goussous, T. Marler, K. Abdel-Malek. A New Methodology for Human Grasp Prediction. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 39(2):369–380, 2009.
- [Haralick 92] R. Haralick, L. Shapiro. *Computer and Robot Vision*, Band 1. Addison-Wesley, New York, 1992.
- [Held 01] M. Held. VRONI: An Engineering Approach to the Reliable and Efficient Computation of Voronoi Diagrams of Points and Line Segments. *Computational Geometry: Theory and Applications*, 18:95–123, 2001.
- [Hisada 02] M. Hisada, A. G. Belyaev, T. L. Kunii. A Skeleton-Based Approach for Detection of Perceptually Salient Features on Polygonal Surfaces. *Computer Graphics Forum*, 21:689–700, 2002.
- [Hoffman 84] D. D. Hoffman, W. A. Richards. Parts of Recognition. *Cognition*, 18(1-3):65–96, 1984.
- [Huebner 08] K. Huebner, S. Ruthotto, D. Kragic. Minimum Volume Bounding Box Decomposition for Shape Approximation in Robot Grasping. Tagungsband: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seiten 1628–1633, 2008.
- [Huebner 09] K. Huebner, K. Welke, M. Przybylski, N. Vahrenkamp, T. Asfour, D. Kragic, R. Dillmann. Grasping known objects with humanoid robots: A box-based approach. Tagungsband: *Advanced Robotics, 2009. ICAR 2009. International Conference on*, Seiten 1–6, 2009.
- [Iberall 86] T. Iberall, G. Bingham, M. A. Arbib. Opposition Space as a Structuring Concept for the Analysis of Skilled Hand Movements. *Experimental Brain Research Series*, 15:158–173, 1986.
- [Iberall 97] T. Iberall. Human Prehension and Dexterous Robot Hands. *The International Journal of Robotics Research*, 16(3):285–299, 1997.
- [Jähne 97] B. Jähne. *Digital Image Processing*. Springer, Berlin, 4. Auflage, 1997.
- [Kamakura 80] N. Kamakura, M. Matsuo, H. Ishii, F. Mitsuboshi, Y. Miura. Patterns of Static Prehension in Normal Hands. *The American Journal of Occupational Therapy*, 34(7):437–445, 1980.
- [Kamakura 89] N. Kamakura. *Te no ugoki, Te no katachi* (auf Japanisch), 1989.

- [Kasper 07] A. Kasper, R. Becher, P. Steinhaus, R. Dillmann. Developing and Analyzing Intuitive Modes for Interactive Object Modeling. Tagungsband: *International Conference on Multimodal Interfaces*, Seiten 74–81, 2007.
- [Lam 92] L. Lam, S.-W. Lee, C.Y. Suen. Thinning Methodologies - A Comprehensive Survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(9):869–885, 1992.
- [Latombe 91] J.-C. Latombe. *Robot Motion Planning*. Kluwer Academic, Boston, 1991.
- [Li 07] Y. Li, J. L. Fu, N. S. Pollard. Data-Driven Grasp Synthesis Using Shape Matching and Task-Based Pruning. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 13(4):732–747, 2007.
- [Li 11] Yi Li, J.-P. Saut, J. Cortes, T. Simeon, D. Sidobre. Finding Enveloping Grasps by Matching Continuous Surfaces. Tagungsband: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seiten 2825–2830, 2011.
- [Miklos 10] B. Miklos, J. Giesen, M. Pauly. Discrete Scale Axis Representations for 3D Geometry. Tagungsband: *ACM SIGGRAPH 2010 papers*, Seiten 101:1–101:10, 2010.
- [Miller 03] A.T. Miller, S. Knoop, H. I. Christensen, P. K. Allen. Automatic Grasp Planning Using Shape Primitives. Tagungsband: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Band 2, Seiten 1824 – 1829, 2003.
- [Miller 04] A. T. Miller, P. K. Allen. Graspit! A Versatile Simulator for Robotic Grasping. *IEEE Robotics Automation Magazine*, 11(4):110 – 122, 2004.
- [Murray 94] R. M. Murray, S. S. Sastry, Z. Li. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, USA, 1. Auflage, 1994.
- [Napier 56] J. Napier. The Prehensile Movements of the Human Hand. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 38B(4):902–913, 1956.
- [Nguyen 88] V.-D. Nguyen. Constructing Force-Closure Grasps. *International Journal of Robotics Research*, 7(3):3–16, 1988.

- [Prattichizzo 10] D. Prattichizzo, M. Malvezzi, A. Bicchi. On Motion and Force Controllability of Grasping Hands with Postural Synergies. Tagungsband: *Robotics Science and Systems (RSS)*, 2010.
- [Przybylski 10] M. Przybylski, T. Asfour, R. Dillmann. Unions of Balls for Shape Approximation in Robot Grasping. Tagungsband: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Seiten 1592–1599, 2010.
- [Przybylski 11a] M. Przybylski, T. Asfour, R. Dillmann. Planning Grasps for Robotic Hands using a Novel Object Representation based on the Medial Axis Transform. Tagungsband: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Seiten 1781–1788, 2011.
- [Przybylski 11b] M. Przybylski, R. Gilster, T. Asfour, H. Deubel, R. Dillmann. Human-Inspired Selection of Grasp Hypotheses for Execution on a Humanoid Robot. Tagungsband: *IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, Seiten 643–649, 2011.
- [Przybylski 12a] M. Przybylski, T. Asfour, R. Dillmann. A Grasp Planning System for Precision Grasps based on the Medial Axis Transform. Tagungsband: *International Conference on Cognitive Systems (CogSys)*, 2012.
- [Przybylski 12b] M. Przybylski, M. Wächter, T. Asfour, R. Dillmann. A Skeleton-Based Approach to Grasp Known Objects with a Humanoid Robot. Tagungsband: *IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, Seiten 376–383, 2012.
- [Reuleaux 76] F. Reuleaux. *The Kinematics of Machinery*. Macmillan, 1876 (Neuveröffentlichung durch Dover, 1963).
- [Roa 12] M. A. Roa, M. J. Argus, D. Leidner, C. Borst, G. Hirzinger. Power Grasp Planning for Anthropomorphic Robot Hands. Tagungsband: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seiten 563–569, 2012.
- [Romero 10] J. Romero, T. Feix, H. Kjellstroem, D. Kragic. Spatio-Temporal Modeling of Grasping Actions. Tagungsband: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Seiten 2103–2108, 2010.
- [Santello 98] M. Santello, M. Flanders, J. F. Soechting. Postural Hand Synergies for Tool Use. *The Journal of Neuroscience*, 18(23):10105–10115, 1998.

- [Saut 12] J.-P. Saut, D. Sidobre. Efficient Models for Grasp Planning with a Multi-Fingered Hand. *Robotics and Autonomous Systems*, 60(3):347 – 357, 2012.
- [Schlesinger 19] G. Schlesinger. *Ersatzglieder und Arbeitshilfen*, Kapitel Der mechanische Aufbau der künstlichen Glieder, Seiten 21–600. Springer-Verlag, Berlin, Deutschland, 1919.
- [Shimoga 96] K. B. Shimoga. Robot Grasp Synthesis Algorithms: A Survey. *The International Journal of Humanoid Robotics*, 15(3):230–266, 1996.
- [Sud 05] A. Sud, M. Foskey, D. Manocha. Homotopy-Preserving Medial Axis Simplification. Tagungsband: *Proceedings of the 2005 ACM symposium on Solid and physical modeling*, Seiten 39–50, 2005.
- [Taylor 55] C. L. Taylor, R. J. Schwarz. The Anatomy and Mechanics of the Human Hand. *Artificial Limbs*, 2(2):22–35, 1955.
- [Thakur 09] A. Thakur, A. G. Banerjee, S. K. Gupta. A Survey of CAD Model Simplification Techniques for Physics-Based Simulation Applications. *Computer-Aided Design*, 41(2):65–80, 2009.
- [Vahrenkamp 08] N. Vahrenkamp, S. Wieland, P. Azad, D. Gonzalez-Aguirre, T. Asfour, R. Dillmann. Visual Servoing for Humanoid Grasping and Manipulation Tasks. Tagungsband: *IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, Seiten 406–412, 2008.
- [Vahrenkamp 09] N. Vahrenkamp, D. Berenson, T. Asfour, J. Kuffner, R. Dillmann. Humanoid Motion Planning for Dual-Arm Manipulation and Re-Grasping Tasks. Tagungsband: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Seiten 2464–2470, 2009.
- [Vahrenkamp 10] N. Vahrenkamp, T. Asfour, R. Dillmann. Simox: A Simulation and Motion Planning Toolbox for C++. Technischer Bericht, Institute for Anthropomatics, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 2010.
- [Vahrenkamp 11] N. Vahrenkamp, M. Przybylski, T. Asfour, R. Dillmann. Bimanual Grasp Planning. Tagungsband: *IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, Seiten 493–499, 2011.
- [Wenninger 83] M. J. Wenninger. *Dual Models*. Cambridge University Press, 1983.

-
- [Xue 08] Z. Xue, J. M. Zoellner, R. Dillmann. Automatic Optimal Grasp Planning Based on Found Contact Points. Tagungsband: *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Seiten 1053 –1058, 2008.
- [Yoshikawa 85] T. Yoshikawa. Manipulability of Robotic Mechanisms. *The International Journal of Robotics Research*, 4(2):3–9, 1985.
- [Zacharias 10] F. Zacharias, D. Leidner, F. Schmidt, C. Borst, G. Hirzinger. Exploiting Structure in Two-armed Manipulation Tasks for Humanoid Robots. Tagungsband: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Seiten 5446 –5452, 2010.