

Robotik I: Einführung in die Robotik

Greifplanung

Tamim Asfour

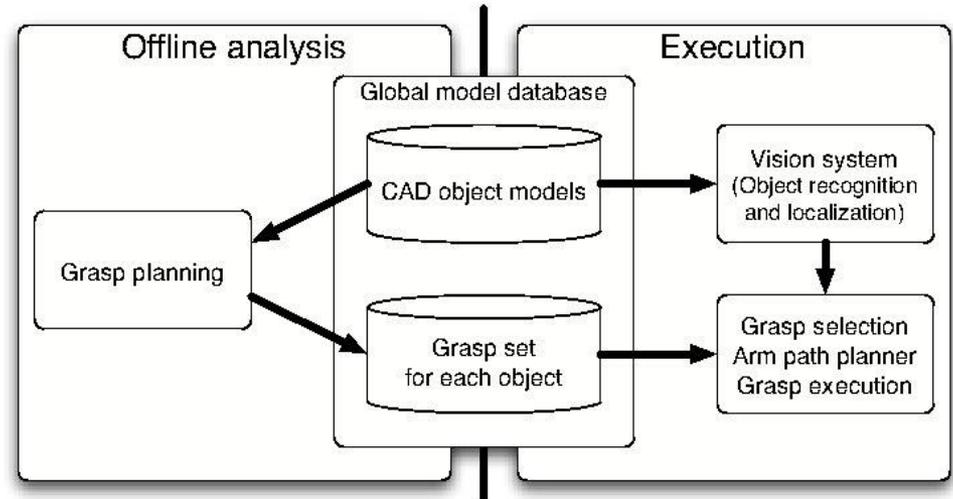
KIT-Fakultät für Informatik, Institut für Anthropomatik und Robotik (IAR)
Hochperformante Humanoide Technologien (H²T)



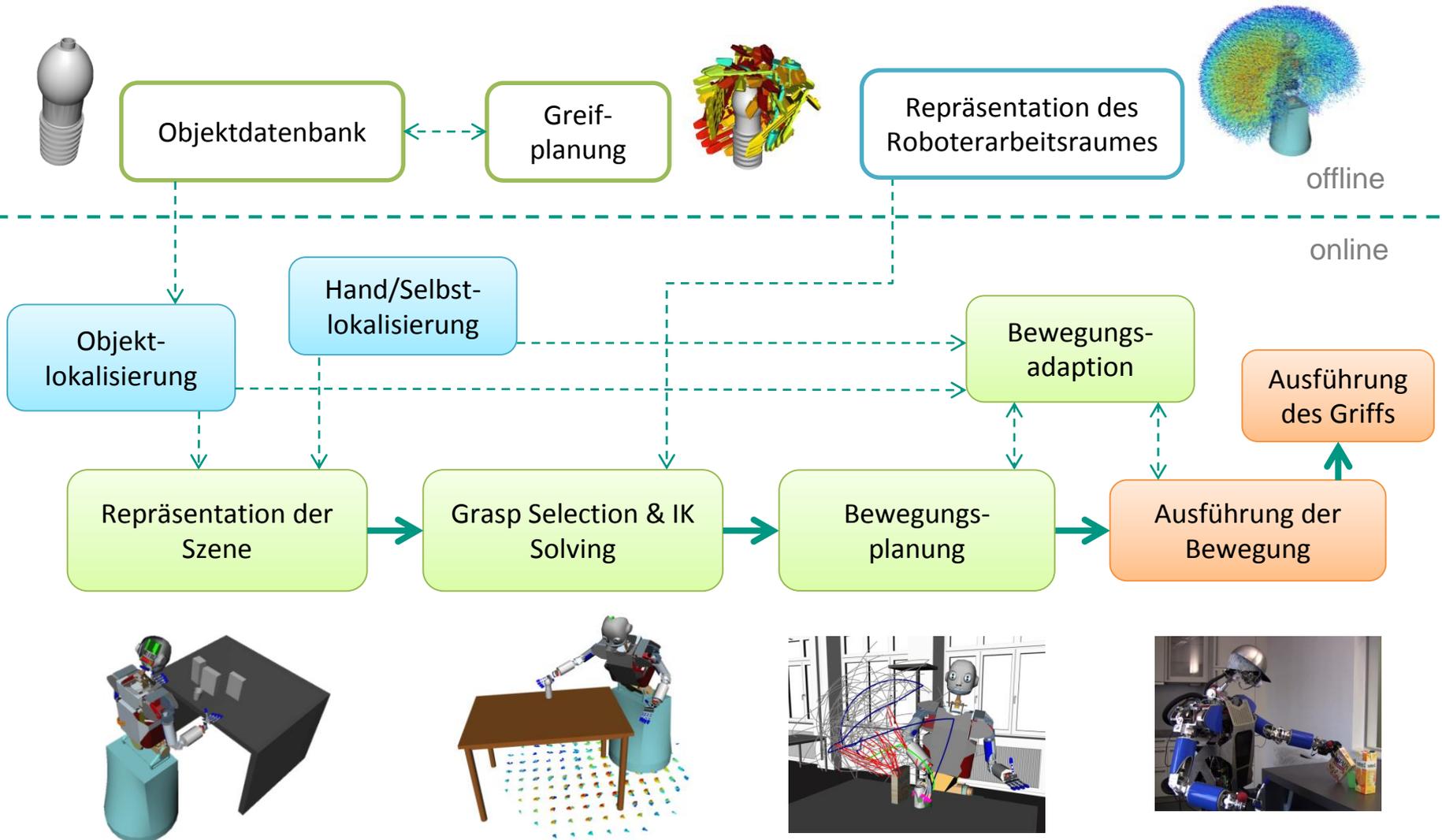
Inhalt

- Einleitung
- Grundlagen
- Griff taxonomien
- Kontaktmodelle
- Griffanalyse
- Greifplanung
- Greifen mit ARMAR-III

Motivation Grasping bei ARMAR

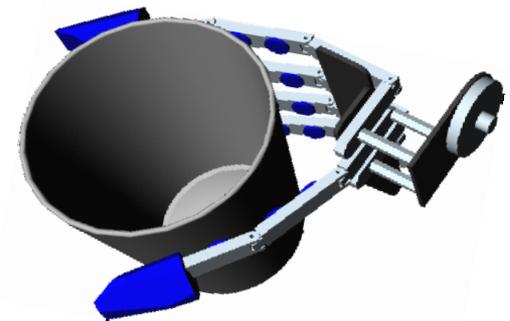
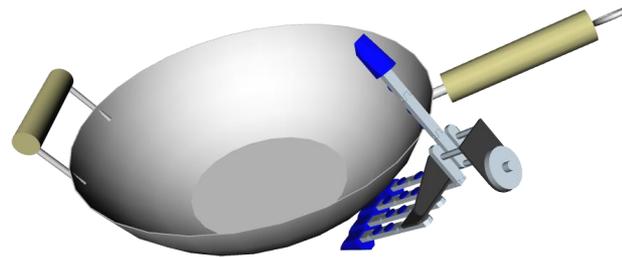


Motivation: Die ARMAR – Grasping Pipeline

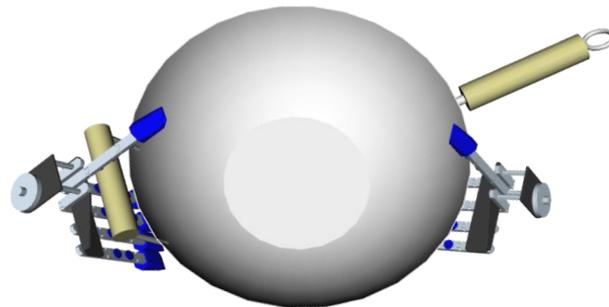


Motivation: 3D-Objektmodelle mit Griffen

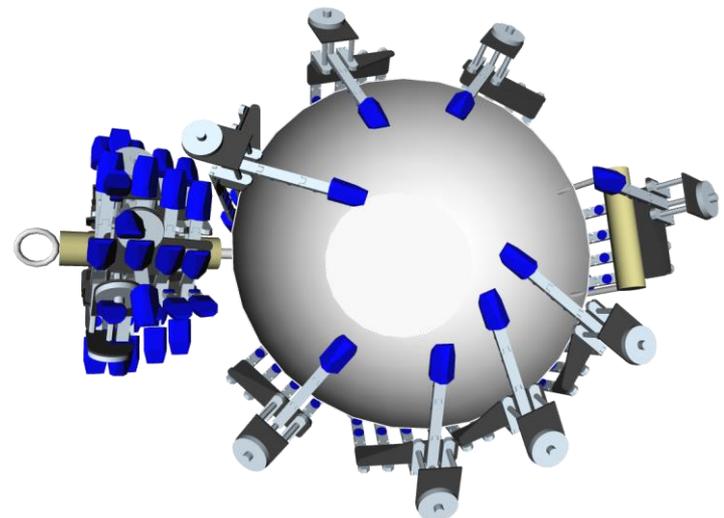
- Einhändige Griffe



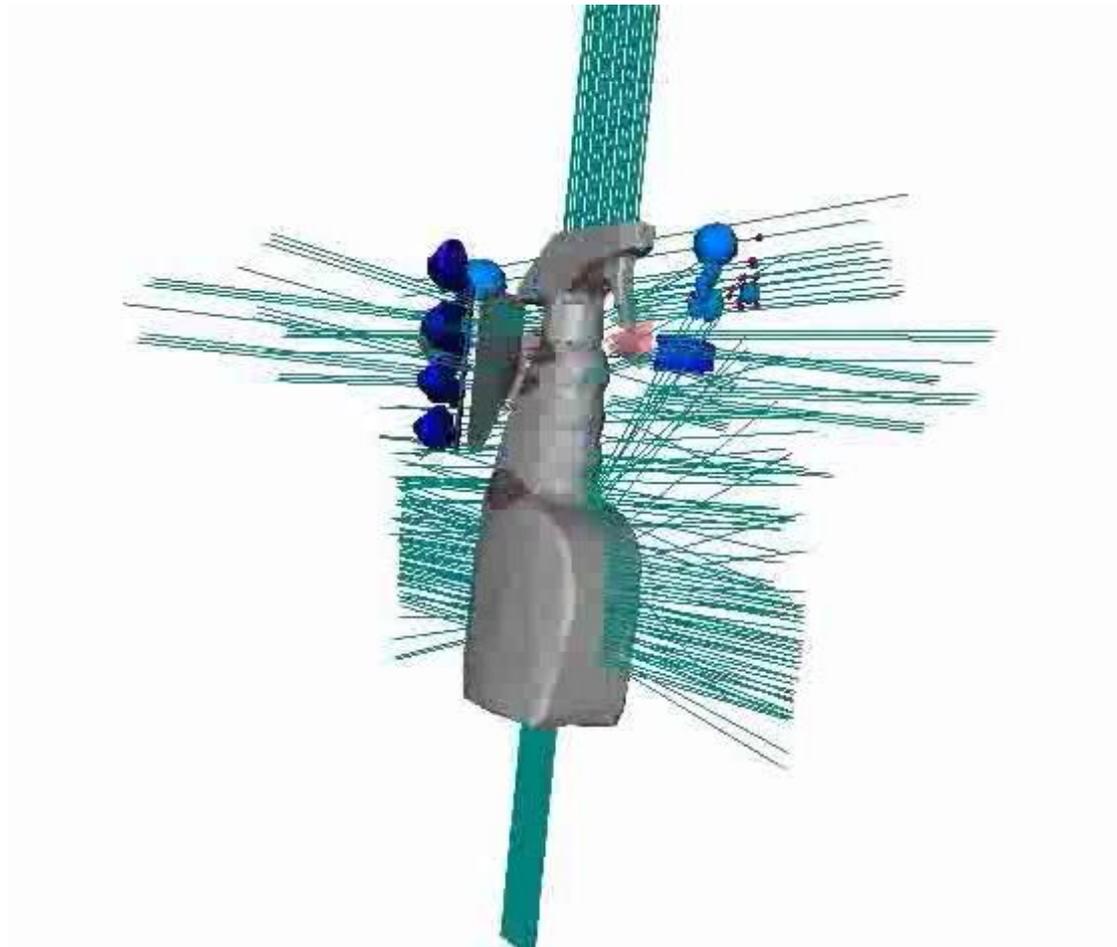
- Zweihändige Griffe



- Verschiedene Griffvarianten



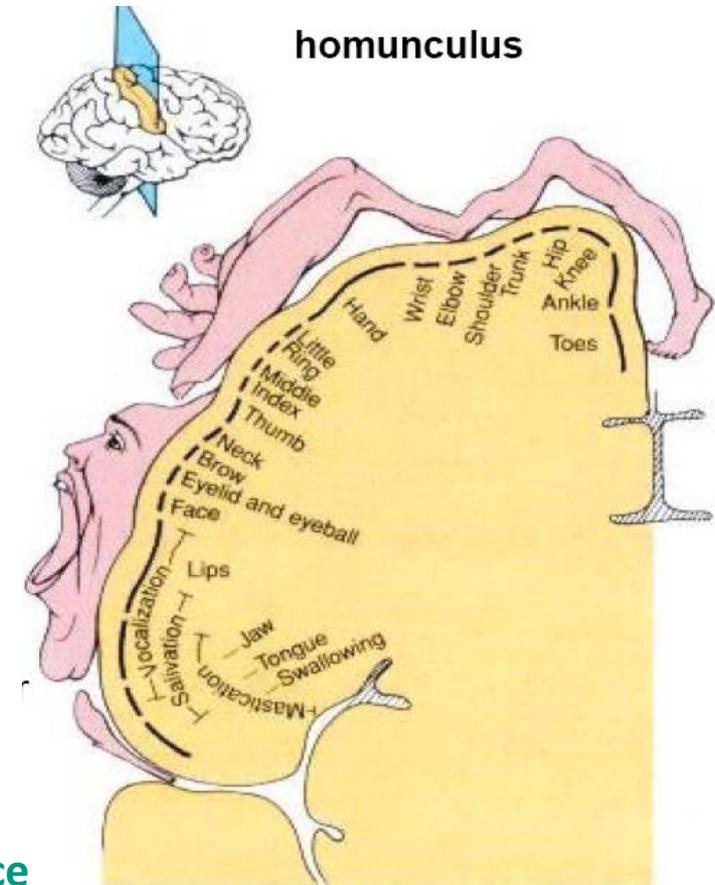
Wie können Griffe generiert werden?



Das Greifen

- Als Control-Problem
 - Vieles ist bekannt

- Kognitive Aspekte des Greifens
 - Sehr wenig bekannt



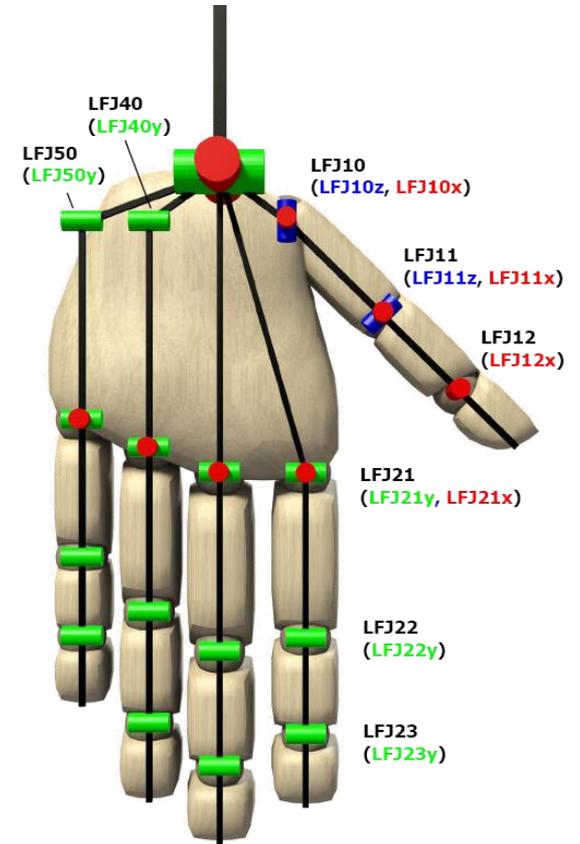
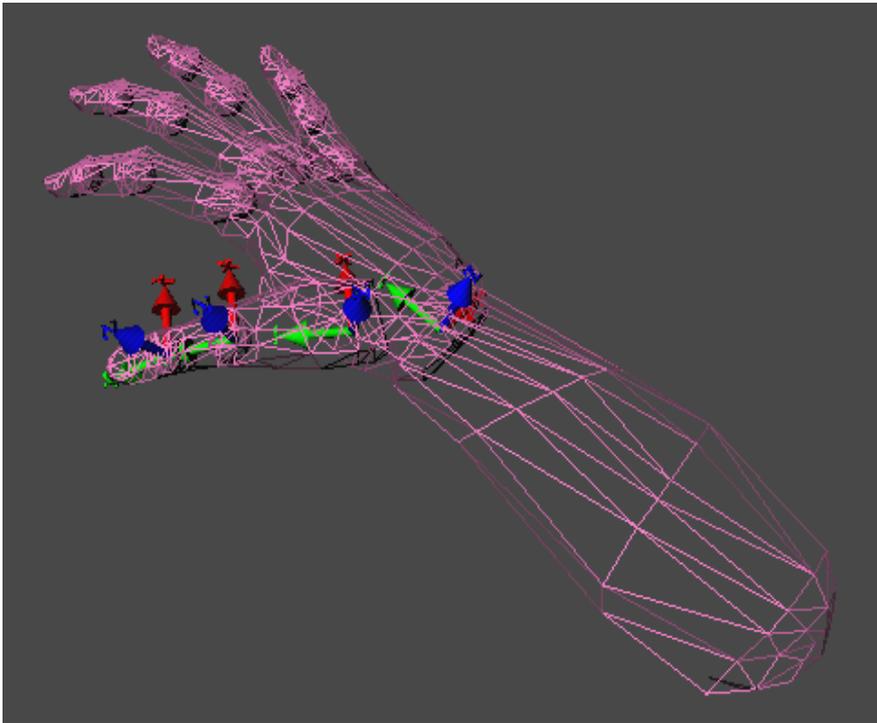
Understanding hands = Understanding Intelligence

Die menschliche Hand

- 27 Knochen
- Insgesamt 27 Bewegungsfreiheitsgrade.
 - 3 DoF Flexion/Extension pro Finger
 - 1 DoF Abduktion/Adduktion pro Finger
 - 5 DoF Daumen:
 - 3 DoF Flexion/Extension
 - 2 DoF Abduktion/Adduktion
 - 6 DoF für die Handwurzel (Handfläche)
- Modellierung:
 - Kinematische Modell
 - Flächenbasiertes Geometriemodell

U. Schmidt, Hans-Martin; Lanz. *Chirurgische Anatomie der Hand*. Stuttgart, New York, 2003. Georg Thieme Verlag

Kinematisches Modell



Flächenbasiertes Geometriemodell

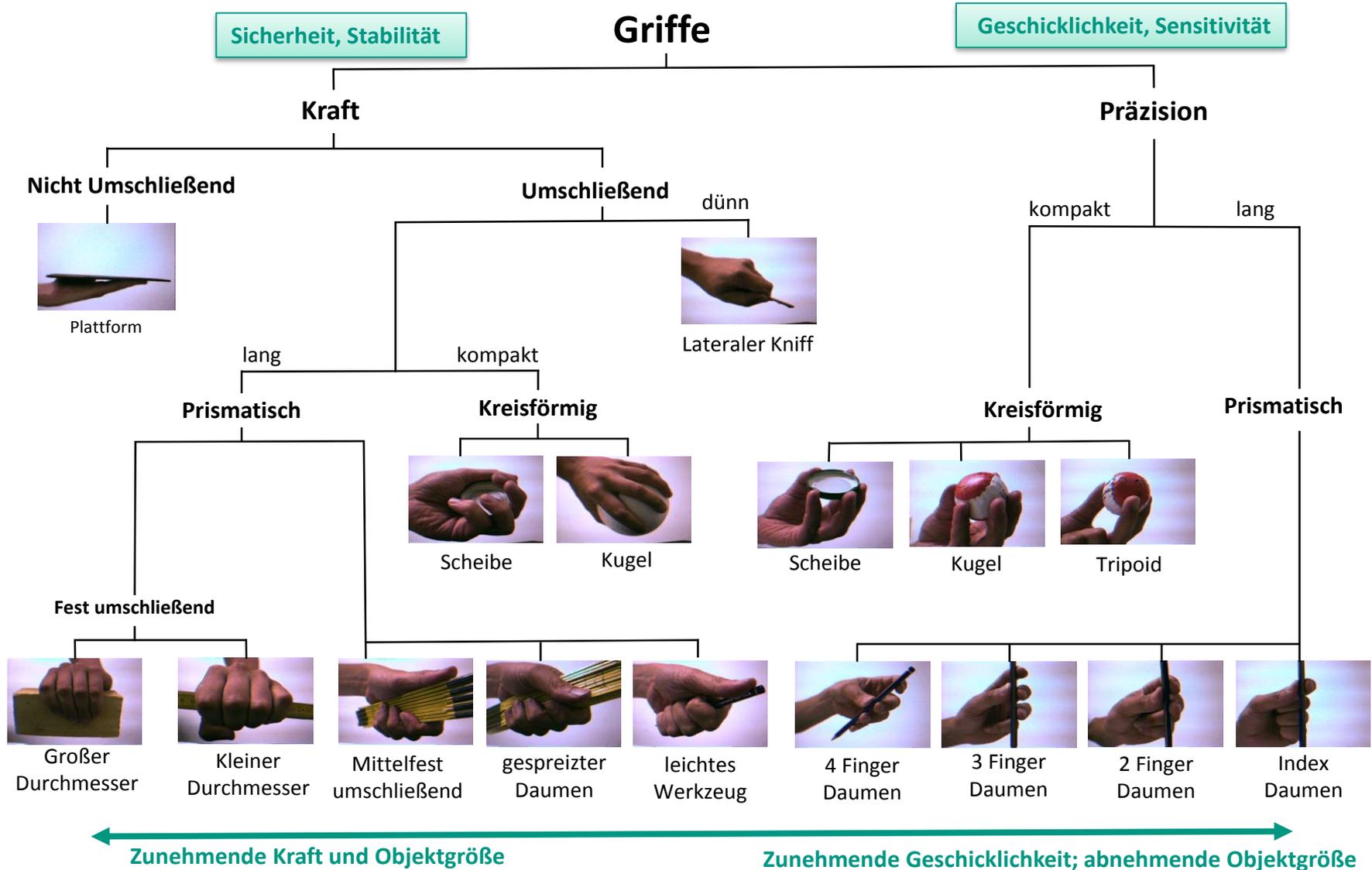


Komplexität des Problems reduzieren

- Durch die Einführung von Taxonomien
- **Grifftaxonomie**
 - Vereinfachung der Griffsynthese (Kontaktpunkte auf dem Objekt)
 - Benchmark für die Evaluation von Roboterhänden
 - Grundlagen für das Design von Roboterhänden
 - Einsatz bei der autonomen Greifplanung
- **Cutkosky Grifftaxonomie**
 - 16 einzelne **Griffarten**
 - **Hierarchiebaum**: Griffarten werden zu Gruppen zusammengefasst
 - Erste Ebene: Unterscheidung in **Kraft-** und **Präzisionsgriffe**

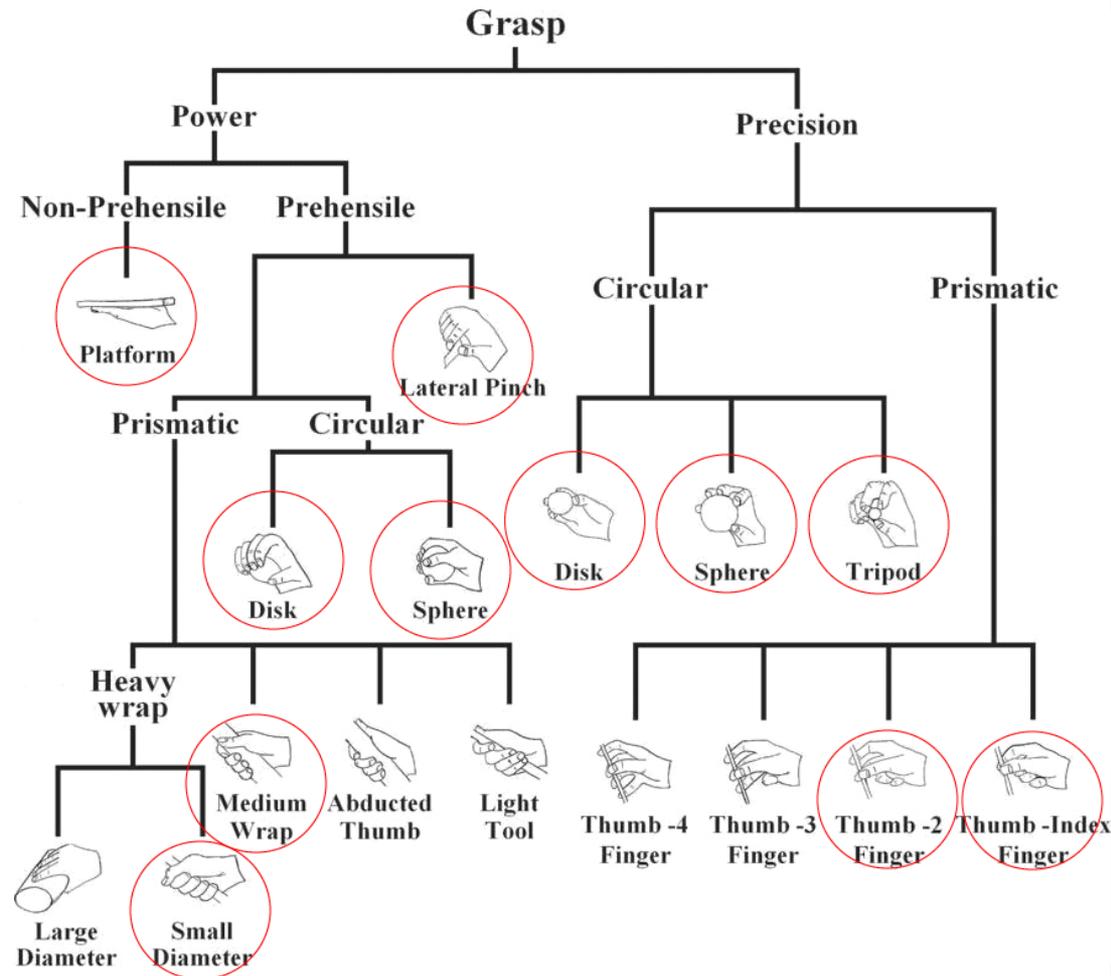
Mark Cutkosky, *On Grasp Choice, Grasp Models, and the Design of Hands for Manufacturing Tasks*.
IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 5, no. 3, pp. 269 – 279, 1989

Cutkosky Griff-taxonomie



Cutkosky Griff-taxonomie

- Kraft- und Präzisionsgriffe
- Aus der Beobachtung von Aktivitäten von Mechanikern
- Fokus auf die Verwendung von Werkzeugen

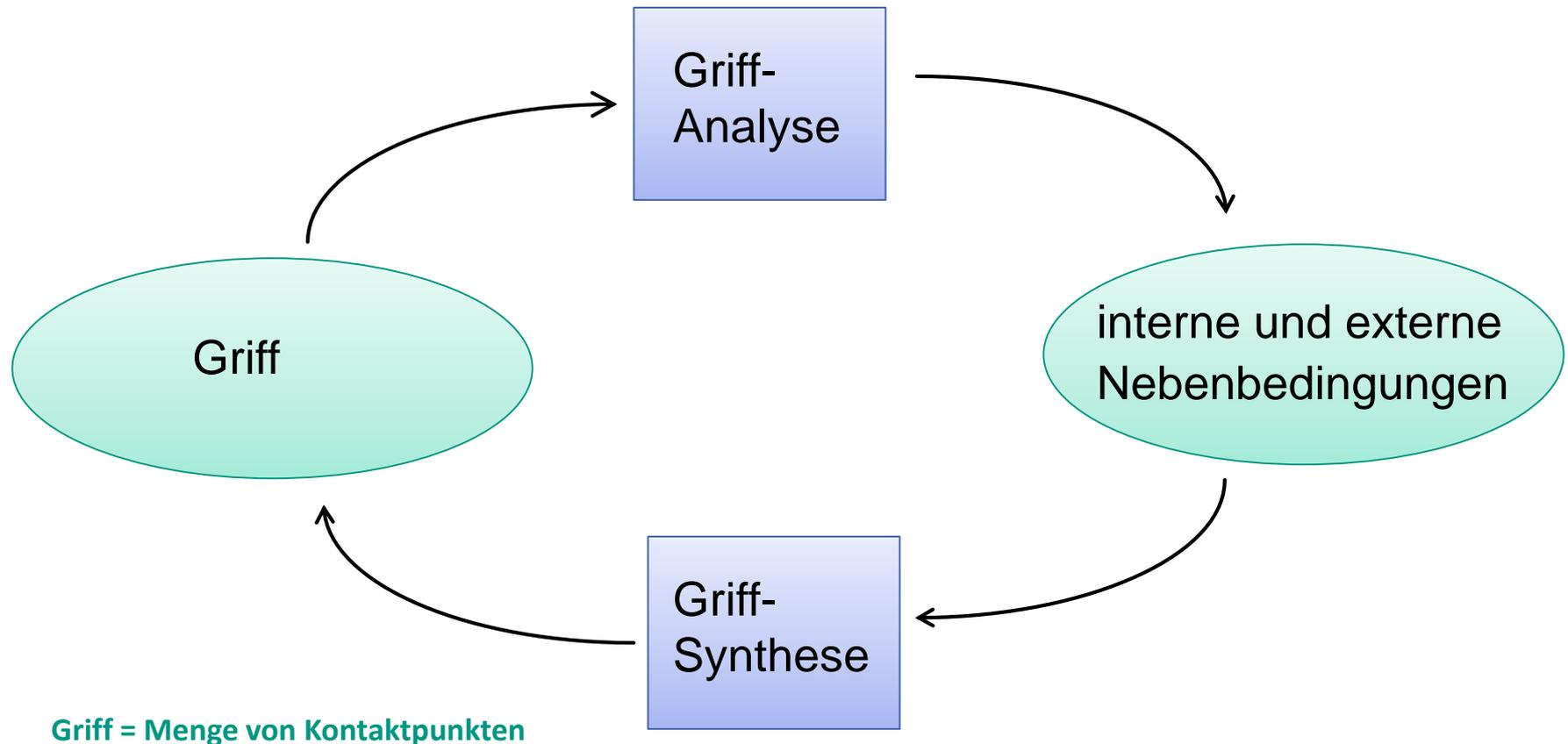


Mark Cutkosky, *On Grasp Choice, Grasp Models, and the Design of Hands for Manufacturing Tasks*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 5, no. 3, pp. 269 – 279, 1989

Weitere Griff-taxonomien

- Kamakura Taxonomie
- Feix Taxonomie
- Bullock and Dollar Taxonomie
- Mehr dazu in Robotik-II

Greifanalyse und Greifsynthese



K.B. Shimoga, *Robot Grasp Synthesis Algorithms: A Survey*. The International Journal of Robotics Research June 1996 15: 230-266

Greifanalyse und Greifsynthese

■ Griff

- Eine **Menge von Kontaktpunkten** auf der Oberfläche eines Objekts, die potentielle Bewegungen des Objekts unter dem Einfluss externer Kräfte einschränken/kompensieren

■ Greifanalyse

- **Gegeben:** Objekt und ein Griff als Menge von Kontaktpunkten
- **Gesucht:** Aussagen zur Stabilität des Griffs unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen

■ Greifsynthese

- **Gegeben:** Objekt und eine Menge von Nebenbedingungen
- **Gesucht:** Eine Menge von Kontaktpunkten

Wichtige Faktoren für die Generierung von Griffen bzw. Griffhypothesen

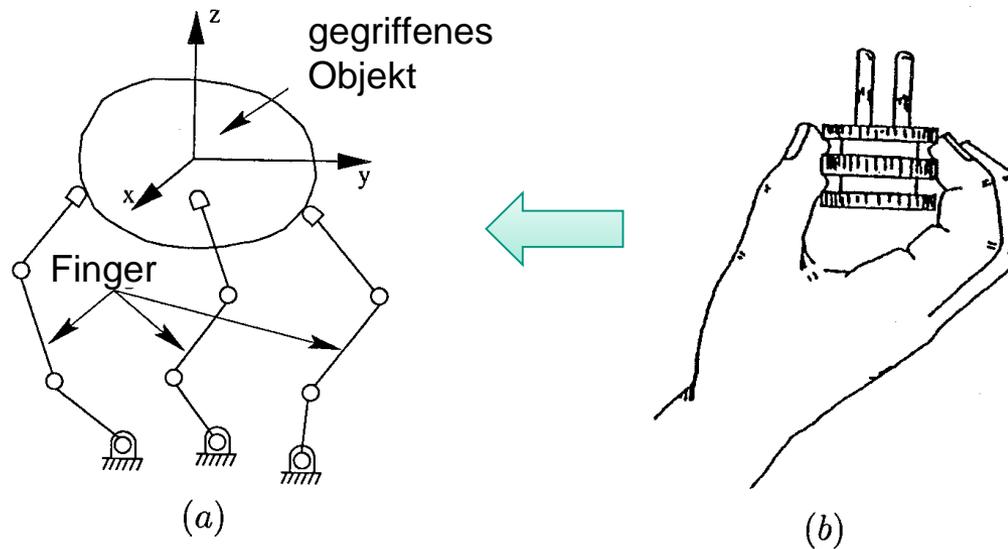
- Handkinematik
- Griffrepräsentation
- Vorwissen über das Objekt
- Greifsynthese: analytisch, datengetrieben
- Verfügbare Merkmale: 2D, 2.5D 3D, visuell, haptisch, ...
- Aufgabe



Jeannette Bohg, Antonio Morales, Tamim Asfour, Danica Kragic, *Data-Driven Grasp Synthesis - A Survey*. IEEE Tran. on Robotics, pp. 289-309, vol. 30, no. 2, 2014

Fingerspitzengriff - Modell

- Das Fingerspitzengriff-Modell vereinfacht die Algorithmen zur Synthese möglicher Griffe eines Objektes, da nur eine geeignete Anordnung der Kontaktpunkte auf der Oberfläche der zu greifenden Objektes bestimmt werden muss.
- Ein gravierender Nachteil liegt in der Nichtbeachtung fundamentaler Nebenbedingungen des Greifvorgangs, wie z.B. der Kollisionsfreiheit und Zugänglichkeit eines Griffes (Anfahr-/Abrückbewegung).



Fingerspitzenkontakte mit der Objektoberfläche

Man unterscheidet verschiedene Fingerspitzenkontakte zur Objektoberfläche mit folgenden Annahmen:

■ Punktkontakt ohne Reibung

Eine an einem Punktkontakt ohne Reibung auf eine Fläche eines Objektes angreifende Kraft wirkt ausschließlich **normal** zur Fläche

■ Starrer Punktkontakt mit Reibung

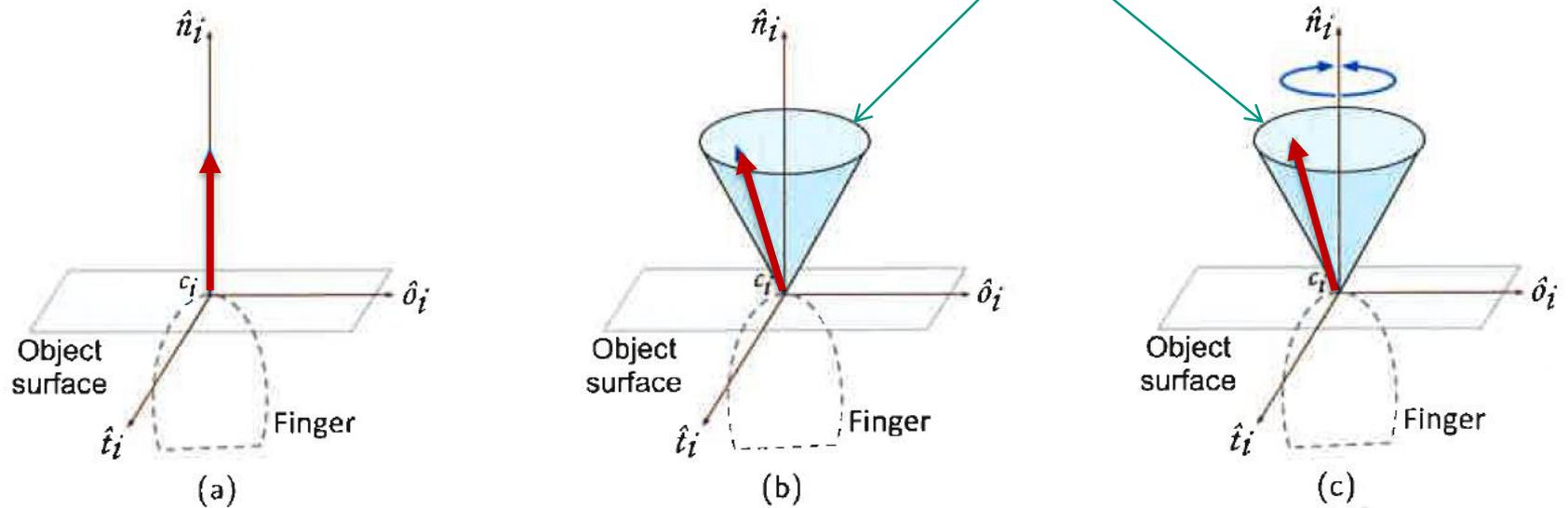
Eine an einem starren Punktkontakt mit Reibung auf eine Fläche eines Objektes angreifende Kraft wirkt sowohl **normal** als auch **tangential** zur Fläche. Die beiden Kräfte sind über das Coulombsche Reibungsgesetz miteinander verknüpft

■ Nicht starrer Punktkontakt mit Reibung (Soft-Kontakt)

Eine an einem nicht starren Punktkontakt mit Reibung auf eine Fläche eines Objektes angreifende Kraft wirkt sowohl **normal** als auch **tangential**. Zusätzlich wirken auch **axiale** Momente. Es gilt ebenfalls das Coulombsche Reibungsgesetz

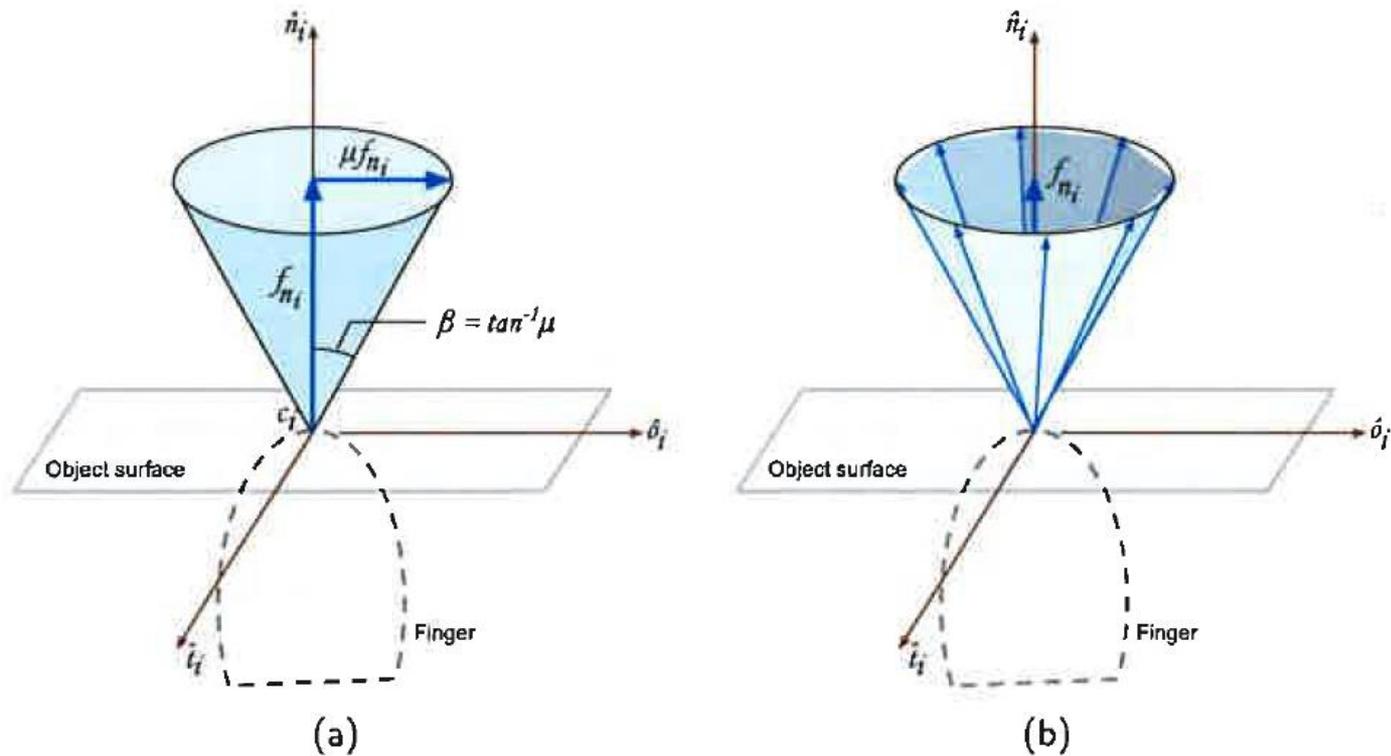
Kontaktmodelle

Reibungskegel



- a) Kontakt ohne Reibung (existiert nicht in der Robotik!)
- b) Kontakt mit Reibung
- c) Soft-Kontakt

Approximation des Reibungskegels



- a) Kontinuierliche Darstellung
- b) Approximierte Darstellung durch das einbeschriebene Polyeder

Wrenchvektor

■ Wrenchvektor

Die in einem Kontaktpunkt \mathbf{p}_i wirkenden Kräfte f_i und Momente τ_i mit $i \in \{x, y, z\}$ können zu einem Vektor zusammen gefasst werden. Solch ein Vektor wird im folgenden als **Wrenchvektor \mathbf{w}** bezeichnet (wrench: engl.: drehen, winden).

Für diesen gilt:

■ für einen planaren Griff: $\mathbf{w} = (f_x, f_y, f_z)^T \in R^3$

■ für einen räumlichen Griff: $\mathbf{w} = (f_x, f_y, f_z, \tau_x, \tau_y, \tau_z)^T \in R^6$

Wrenchvektor

- In Abhängigkeit vom Typ des i -ten Kontaktpunktes folgen Wrenchvektoren, welche die am Kontaktpunkt wirkenden **normalen (n)** und **tangentialen (t) Kräfte** und die am Kontaktpunkt wirkenden **axialen Momente (θ)** beschreiben
- Diese werden im folgenden mit ${}^i\mathbf{w}_n$, ${}^i\mathbf{w}_t$, ${}^i\mathbf{w}_\theta$ bezeichnet.
Die dazu korrespondierenden Skalare werden durch ${}^i c_n$, ${}^i c_t$, ${}^i c_\theta$ spezifiziert.

Greifmatrix

Die Wrenchvektoren können für einen räumlichen Griff als Spaltenvektoren einer $6 \times 3m$ Matrix G dargestellt werden:

$$G = \left[{}^1\mathbf{w}_n, {}^1\mathbf{w}_t, {}^1\mathbf{w}_\theta, \dots, {}^m\mathbf{w}_n, {}^m\mathbf{w}_t, {}^m\mathbf{w}_\theta \right] \in R^{6 \times 3m}$$

m ist die Anzahl der Kontaktpunkte

Die Matrix G repräsentiert die geometrischen und physikalischen Eigenschaften eines Fingerspitzengriffes und wird im folgenden als **Greifmatrix** bezeichnet.

Für die Skalare erhält man den Vektor:

$$\vec{c} = \left({}^1c_n, {}^1c_t, {}^1c_\theta, \dots, {}^m c_n, {}^m c_t, {}^m c_\theta \right) \in R^{3m}$$

Gleichgewichtsgriff

Ein Griff wird als **Gleichgewichtsgriff** bezeichnet, wenn die Summe aller Kräfte f_i und Momente τ_i , die auf das gegriffene Objekt wirken, gleich Null ist.

Definition

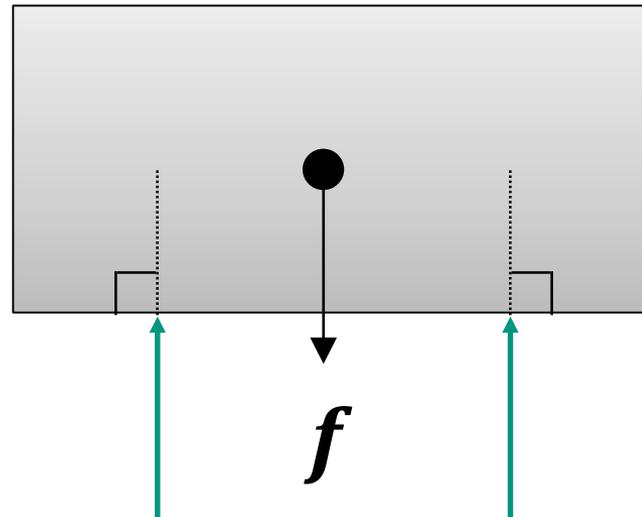
Ein durch eine Greifmatrix G spezifizierter Griff, auf den eine externe Kraft und ein externes Moment $\mathbf{e} = (f_x, f_y, f_z, \tau_x, \tau_y, \tau_z)^T \in R^6$ ausgeübt werden, wird als **Gleichgewichtsgriff** bezeichnet, falls:

1. $\forall i \in \{1, \dots, m\} \quad : \quad {}^i c_n \geq 0, \quad {}^i \mu_t * {}^i c_n \geq |{}^i c_t|, \quad {}^i \mu_\theta * {}^i c_n \geq |{}^i c_\theta|$

2. $\exists \mathbf{c} \in R^{3m}, \mathbf{c} \neq \mathbf{0} \quad : \quad \mathbf{G} \cdot \mathbf{c} + \mathbf{e} = \mathbf{0}$

${}^i \mu_t, {}^i \mu_\theta \in R$ bezeichnen die **Coulombschen Reibungskoeffizienten** am i -ten Kontaktpunkt, die die Größe der wirkenden Tangentialkräfte bzw. axialen Momente in Abhängigkeit vom Betrag der wirkenden korrespondierenden Normalkräfte nach oben begrenzen.

Beispiel



Gleichgewichtsgriff eines Objektes basierend auf zwei starren Punktkontakten ohne Reibung

Auf das Objekt wirkt eine am Objektschwerpunkt angreifende externe Kraft f

Kraftgeschlossene Griffe

- Während der Transferbewegung und der Ausführung einer Greifoperation ist ein gegriffenes Objekt verschiedenen externen Kräften und Momenten ausgesetzt.
- Die Stabilität eines Griffes erfordert, dass das gegriffene Objekt im Kräftegleichgewicht bleibt. Dies bedeutet, dass die Kräfte und Momente, die durch die Handfinger auf das gegriffene Objekt ausgeübt werden, sämtliche externen Kräfte und Momente kompensieren müssen.
- Sind die externen Kräfte wie z.B. Störkräfte im Voraus nicht bekannt, bietet sich das kraftgeschlossene Greifen zur Erreichung eines stabilen Griffes an.

Kraftgeschlossene Griffe

- Ein durch eine Greifmatrix G spezifizierter Griff ist **kraftgeschlossen**, falls:

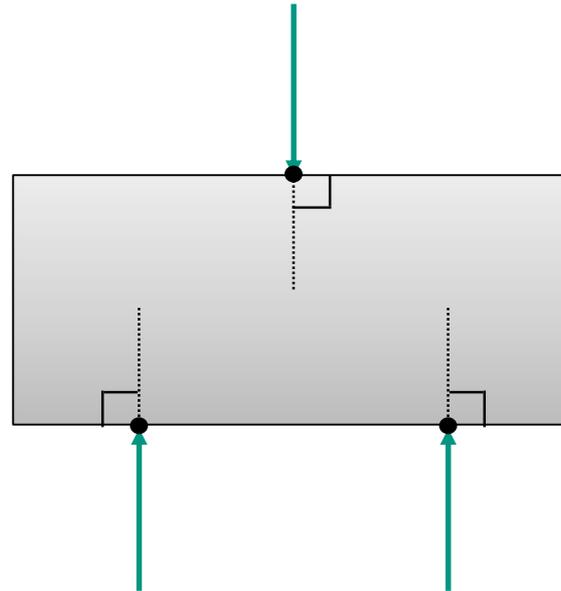
$$\forall \mathbf{e} = (f_x, f_y, f_z, \tau_x, \tau_y, \tau_z)^T \in R^6$$

$$\exists \mathbf{c} \in R^{3m}, \mathbf{c} \neq \mathbf{0} \quad : \quad \mathbf{G} \cdot \mathbf{c} + \mathbf{e} = \mathbf{0}$$

Anzahl benötigter Kontaktpunkte

- Für die minimale Anzahl der benötigten Kontaktpunkte eines kraftgeschlossenen Fingerspitzengriffes gilt Folgendes:
 - **Kraftgeschlossenheit basierend auf Punktkontakten ohne Reibung**
Vorausgesetzt, dass das zu greifende Objekt keine Rotationssymmetrie besitzt, benötigt ein planarer, kraftgeschlossener Griff mindestens **4 Kontaktpunkte**. Werden beliebige 3D-Objekte betrachtet, so werden höchstens **12 Kontaktpunkte** benötigt. Wird die Klasse der zu greifenden Objekte auf Polyeder eingeschränkt, so gilt eine generelle obere Grenze von **7 Kontaktpunkten**.
 - **Kraftgeschlossenheit basierend auf Punktkontakten mit Reibung**
Jedes planare Objekt kann durch einen auf **3 Kontaktpunkten** basierenden Fingerspitzengriff kraftgeschlossen gegriffen werden. Für den räumlichen Fall gilt eine untere Grenze von **4 Kontaktpunkten**.

Beispiel



Kraftgeschlossener Griff eines Objektes basierend auf drei nicht starren Punktkontakten mit Reibung.

Formgeschlossene Griffe

- Ein formgeschlossener Griff unterliegt stärkeren Einschränkungen als ein kraftgeschlossener Griff, da für jeden Kontaktpunkt ausschließlich die **Nichtdurchdringungseigenschaften** co-linear zum korrespondierenden externen Oberflächen-Normalvektor berücksichtigt werden.
- Somit ist die Formgeschlossenheit eines Griffes nur von der Position der Kontaktpunkte auf der Oberfläche des zu greifenden Objektes und den korrespondierenden externen Oberflächen-Normalvektoren abhängig.
- **Es werden weder Normal- oder Tangentialkräfte noch Drehmomente, die u.a. aufgrund von Reibung auftreten könnten, berücksichtigt.**

Formgeschlossene Griffe

- Die zu den Kontaktpunkten korrespondierenden externen Oberflächen-Normalvektoren spezifizieren die **Kontaktgeometrie** des Fingerspitzengriffs. Diese kann durch folgende modifizierte Greifmatrix $\hat{G} \in R^{3 \times m}$ ausgedrückt werden:

$$\hat{G} = [{}^1\mathbf{w}_n, {}^2\mathbf{w}_n, \dots, {}^m\mathbf{w}_n]$$

- Für einen formgeschlossenen, planaren Griff sind **mindestens 4 Kontaktpunkte** erforderlich. Bei beliebigen, 3D-Objekten erhöht sich die Anzahl auf mindestens **7 Kontaktpunkte**.

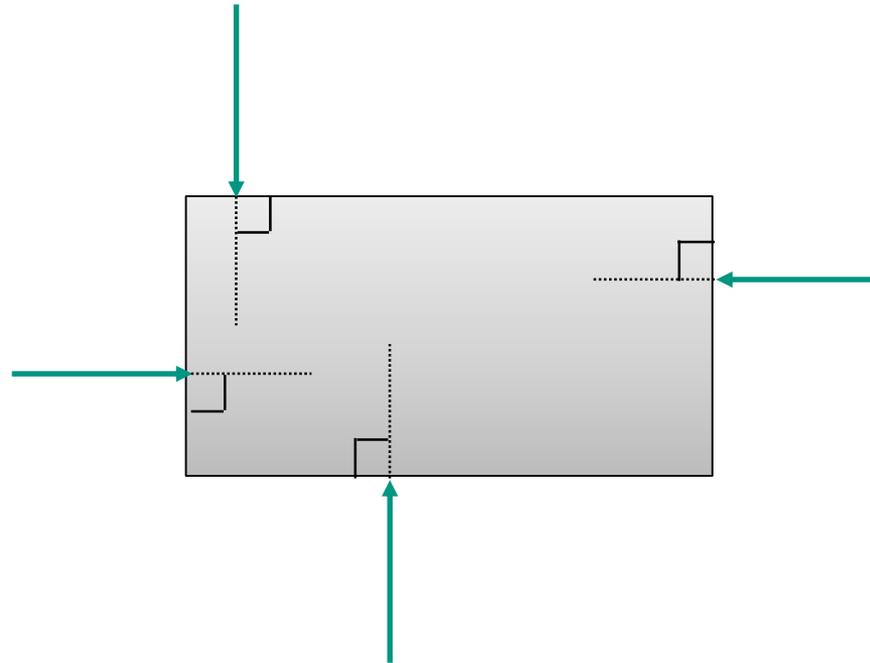
Definition

- Ein durch eine modifizierte Greifmatrix \hat{G} spezifizierter Griff ist **formgeschlossen**, falls:

$$\forall \mathbf{e} = (f_x, f_y, f_z, \tau_x, \tau_y, \tau_z)^T \in R^6$$

$$\exists \mathbf{c} \in R^6 : \quad \hat{G} \cdot \mathbf{c} + \mathbf{e} = 0$$

Beispiel



Formgeschlossener Griff eines Objekts

Kraft- und Formschlüssige Griffe

- **Kraftschluss:** Die Kinematik der Hand kann aktiv Kräfte erzeugen, um einer externen Störung zu widerstehen
- **Formschluss:** Die Kontakte an sich verhindern, dass sich das Objekt bewegen kann
- **Formschluss ist eine stärkere Bedingung als Kraftschluss** und wird oft bei der Ausführung von Kraftgriffe (Power Grasps, siehe Cutkosky) verwendet
- **Kraftschluss ist mit weniger Kontaktpunkten möglich** und wird deshalb bei **Präzisionsgriffen** verwendet. Er erfordert jedoch eine Regelung der intern auftretenden Kräfte bei einem Griff.
- Die Analyse von **formschlüssigen Griffen** erfolgt basierend auf die **Geometrie**.

Stabile Griffe

- Bisher wurde vorausgesetzt, dass die Kontaktpunkte eines Griffes durch starre Finger hervorgerufen werden. In der Realität ist dies jedoch nicht der Fall und oft nicht wünschenswert.
- Zur Modellierung von Fingerkräften, die durch ihre Nachgiebigkeit kleine Änderungen von der Nominallage des gegriffenen Objektes kompensieren können, führt man eine **Potentialfunktion V** ein:

$$V: R^6 \rightarrow R$$

- Die Potentialfunktion V spezifiziert die im Griff gespeicherte potentielle Energie in Abhängigkeit von Lage und Orientierung des gegriffenen Objektes.

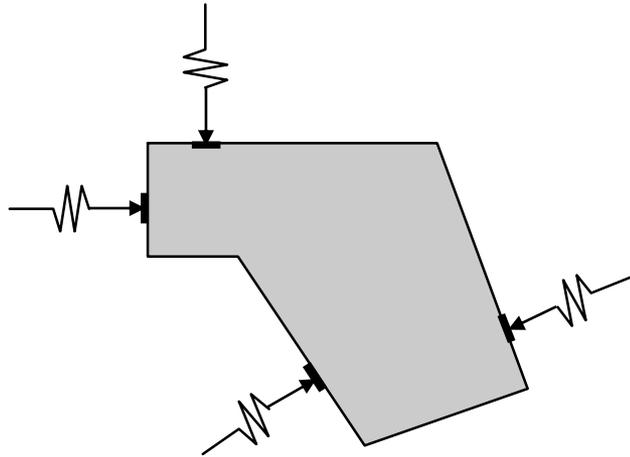
Definition

- Wird die in einem Gleichgewichtsgriff eines Objektes gespeicherte potentielle Energie über eine Potentialfunktion V spezifiziert und beschreibt $\delta \mathbf{q} = (\delta_x, \delta_y, \delta_z, \delta_\alpha, \delta_\beta, \delta_\gamma) \in R^6 \neq 0$ eine infinitesimale Lageänderung des gegriffenen Objektes und δV die daraus resultierende **Veränderung der potentiellen Energie**, so ist der Griff stabil, falls:

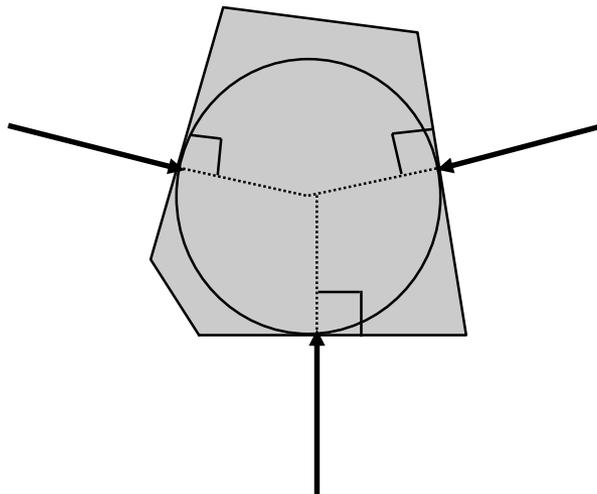
$$\forall \delta \mathbf{q} \in R^6 \quad : \quad \delta V > 0$$

- Berücksichtigt man obige Definition, so wird ein Gleichgewichtsgriff eines Objektes als instabil klassifiziert, wenn eine infinitesimale Lageänderung existiert, für die die daraus resultierende Veränderung der potentiellen Energie kleiner als Null ist.

Beispiele

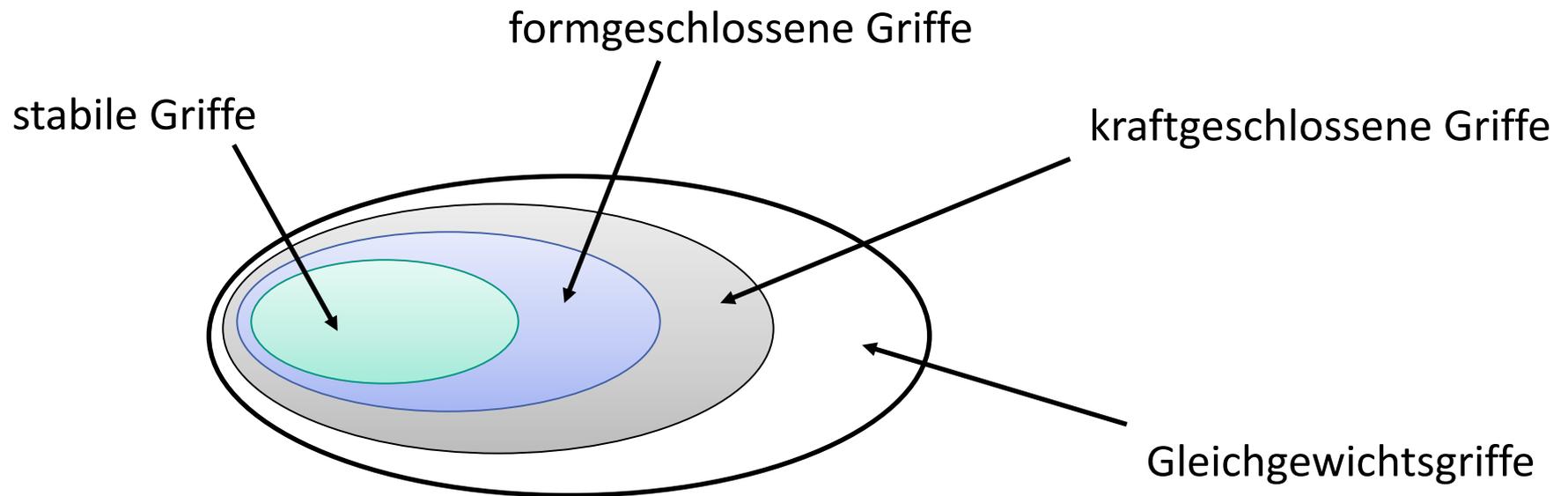


Stabiler und kraftgeschlossener Griff eines Polygons basierend auf 4 nicht starren Punktkontakten mit Reibung



Stabiler Dreiecksgriff eines Polygons, der jedoch nicht kraftgeschlossen ist

Mengentheoretische Darstellung der Griffhierarchie



Klassifikation von Greifplanungssystemen

Greifplanungssysteme können nach folgenden Kriterien klassifiziert werden:

- Kriterium 1: Typ des verwendeten **Greifers** (Zweifinger-, Dreifinger-, Mehrfingergreifer,...)
- Kriterium 2: Typ der zugrunde liegenden **Greifplanungsalgorithmen**. Geometrisch basiert (Berücksichtigung von CAD-Daten), physikalisch basiert (auftretende Kräfte und Momente),...
- Kriterium 3: Typ der zu greifenden **Objekte** (Polygone, Polyeder,...)
- Kriterium 4: Typ der zu manipulierenden **Szenen**. Deterministisch, d.h. Lage und Orientierung aller Objekte in der Szene bekannt oder nicht deterministisch
- Kriterium 5: Einsatz von **Sensorik**. Keine Sensorik, taktile Sensorik, visuelle Sensorik,...

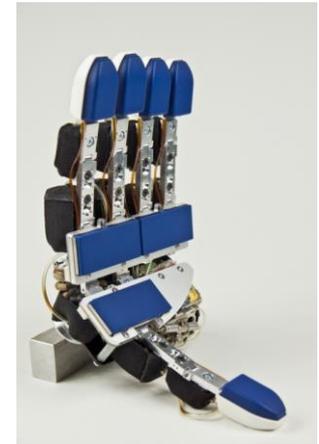
Suchraum

- Soll ein zulässiger Griff geplant werden, so beträgt die Dimension des Suchraums für den physikalischen als auch für den geometrischen Ansatz $6 + n$
 - 6 Parameter für die Position und Orientierung der Hand im Raum
 - n Anzahl der Konfigurationsparameter der Handfinger

- Bei einem Parallelbackengreifer hat der Suchraum die Dimension 7 (1 für den Greifer + 6)

- Bei der ARMAR-III Hand
 - Suchraum hat die Dimension 14 (8 für die Hand + 6)

- Menschliche Hand
 - Suchraum hat die Dimension 27 (21 für die Hand + 6)



Objektklassen für das Greifen

■ Bekannte Objekte (known objects)

- Bekannte Objektgeometrie (d.h. wir haben ein komplettes Objektmodell)
- Ansatz: Verwende einen Greifplaner, der mit bekannten Objektgeometrien arbeitet
- Domäne für klassische Greifplanung
- **Schwierig**

■ Bekannte Objektklasse (familiar objects)

- Konkrete Objektgeometrie ist nicht bekannt (z.B. "Objekt ist vom Typ Flasche")
- Ansatz: Übertrage Wissen von bekannten Klassenelementen auf das zu greifende Objekt
- **Schwieriger**

■ Unbekannte Objekte (unknown objects)

- Weder Objektgeometrie, noch Objektklasse sind bekannt
- Probleme (u.a.)
 - Verarbeiten von (unvollständigen) Sensordaten (Stereo Vision, RGB-D, Laserscans, haptische Daten)
 - Segmentierung des Objektes vom Hintergrund
 - Erstellen eines (teilweisen) Objektmodells
- Ansätze (u.a.)
 - Sensorfusion
 - Objekt verschieben
- **Am schwierigsten!**

Aktuelle Algorithmen zur Griffsynthese

■ Voraussetzungen

- Definition der Handkinematik
- Kontaktmodell (meist: Punktkontakt mit Reibung)
- Objektmodell (meist: vollständig bekannt)

■ Algorithmen zur Griffsynthese bei bekannten Objekten

- Übersichtsartikel:
J. Bohg, A. Morales, T. Asfour and D. Kragic, Data-Driven Grasp Synthesis – A Survey, IEEE Transactions on Robotics, Vol. 30, No. 2, pp. 289 - 309, 2014
- Randomisierte Verfahren mittels Vorwärtsplanung
[Diankov 2010, Berenson et al. 2007, Vahrenkamp et al. 2011]
- Griffsynthese auf Teilobjekten [Goldfelder et al. 2007, Huebner et. al 2008, ...]
 - Darstellung der Objekte durch (approximierte) Teilobjekte
 - Synthese von Griffen auf den Objektteilen
- Greifplanung über die Mediale Achse [Przybylski et al. 2010]
- Griffsynthese basierend auf Eigengrasps [Bicchi et al. 2011]
- Greifplanung Independent Contact Regions [Roa et al. 2009]
- ...

Griffsynthese durch Vorwärtsplanung

■ Ansatz

- Planung in Simulation
- Bestimmung von Anfahrtpunkt und Anfahrtsrichtung
- Hand nähert sich dem Objekt, bis es zu ein Kontakt detektiert wird
- Finger schließen sich um das Objekt, bis Kontakt hergestellt ist
- Evaluation der Kontakte zwischen Hand und Objekt
 - Interessant: Ist der Griff **kraftgeschlossen**?

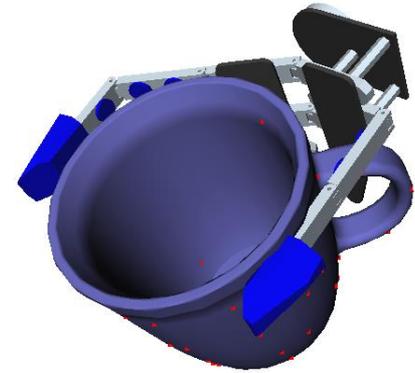
■ Vorteile

- Vorwärtsplanung ist ähnlich zur Ausführung eines Griffs auf einem realen Roboter
- Griffe, die erfolgreich in der Simulation evaluiert wurden, können mit hoher Wahrscheinlichkeit auch mit einem realen Roboter durchgeführt werden

Griffsynthese durch Vorwärtsplanung

Algorithmus

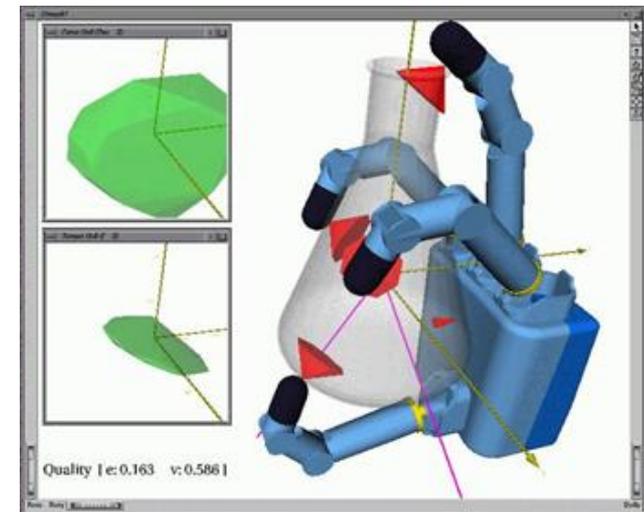
1. Lade Hand- und Objektmodell in eine Simulationsumgebung
2. Erzeuge Griffkandidaten
 - Bestimme Näherungsrichtung der Hand zum Objekt
 - Bestimme Orientierung der Hand
 - Bestimme Handkonfiguration (beginnend mit der geöffneten Hand)
 - Nutze Heuristiken für die Erzeugung von Griffkandidaten (Reduktion des Suchraumes)
3. Evaluation der Griffkandidaten
 - Bewege die Hand entlang der Näherungsrichtung bis zu Kontakt mit dem Objekt
 - Schließe die Hand bis Kontakt mit dem Objekt
 - Bestimme die Kontaktpunkte
 - Bestimme die Griffqualität (**Kraftschluss-Metrik**)



Griffqualität (Kraftschluss-Metrik)

- Prinzip: Wie gut kann ein Griff externen Kräften widerstehen?

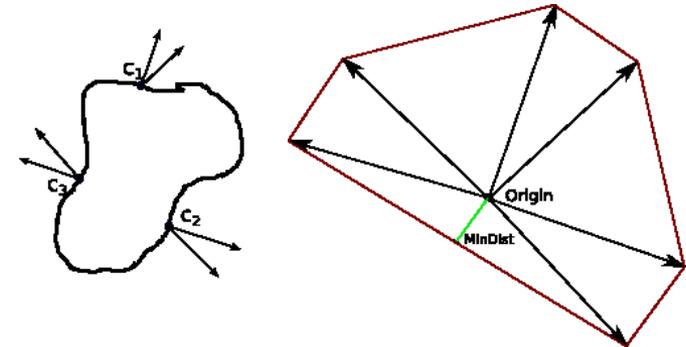
- Ansatz
 - Bestimme Kontaktpunkte und Kontaktnormalen zwischen Hand und Objekt
 - Bestimme den Reibungskegel an jedem Kontaktpunkt (Öffnungswinkel des Kegels hängt von den Reibungskoeffizienten ab)
 - Berechne den **Grasp Wrench Space** (GWS, 6D) als konvexe Hülle über alle Reibungskegel
 - Die minimale Distanz vom Zentrum zum Rand des GWS ist ein Maß für die Stabilität des Griffs



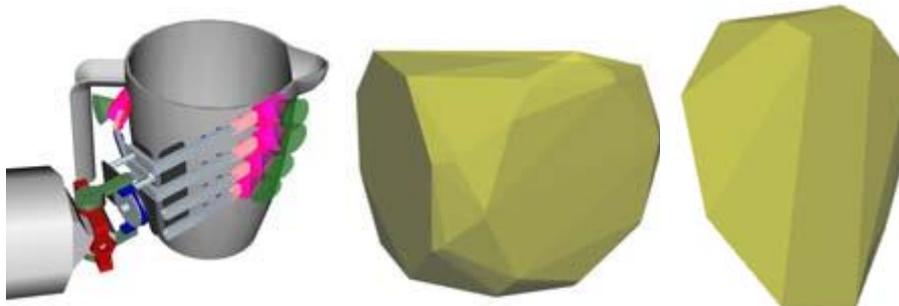
- **Rot:** Reibungskegel
- **Grün:** Projektionen des GWS

Grasp Wrench Space

- Grasp Wrench Space (GWS):
Konvexe Hülle über die Vereinigung aller Kontakt-Wrenches
- Qualitätsmaß
 - Kraftschluss (force closure):
GWS enthält Ursprung
 - Volumen (V): Volumen des GWS
 - Epsilon (ϵ): größter einschließende Kugel, bzw. kleinste Distanz ϵ vom Ursprung zum Rand des GWS



2D Beispiel mit 3 Kontakten (Kraft)



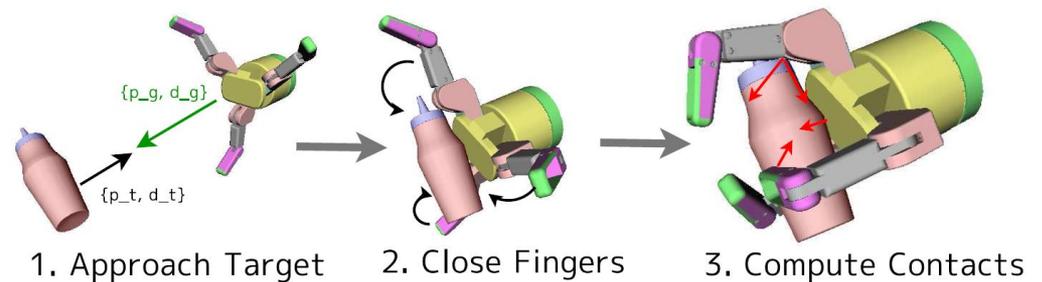
Visualisierungen des GWS für einen Griff

N. Vahrenkamp, T. Asfour and R. Dillmann,
Simultaneous Grasp and Motion Planning, IEEE Robotics
 and Automation Magazine, Vol. 19, No. 2, pp. 43 - 57,
 June, 2012

Zufallsbasierte Vorwärts-Greifplanung

Ablauf

1. Randomisierte Erzeugung von Greifhypothesen
 - Position und Orientierung der Hand (bzgl. des Objektes)
 - Konfiguration der Finger
2. Kontaktermittlung
3. Evaluation der Hypothesen
 - Kraftschluss
 - Kollision
 - Robustheit



R. Diankov, *Automated construction of robotic manipulation programs*, Ph.D. dissertation, Carnegie Mellon University, Robotics Institute, Aug 2010.

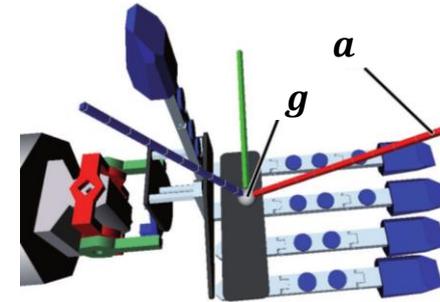
Dmitry Berenson, Rosen Diankov, Koichi Nishiwaki, Satoshi Kagami, and James Kuffner, *Grasp Planning in Complex Scenes*, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids07), December, 2007.

N. Vahrenkamp, M. Kröhnert, S. Ulbrich, T. Asfour, G. Metta, R. Dillmann and G. Sandini, *Simox: A Robotics Toolbox for Simulation, Motion and Grasp Planning*, International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS), pp. 585 - 594, 2012

Zufallsbasierte Vorwärts-Greifplanung (2)

Handmodell

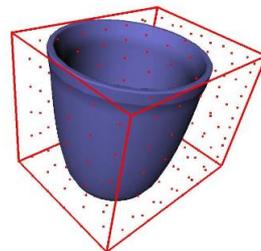
- **Grasp Center Point (GCP)**
 - Definiert das Zentrum g sowie die Anfahrtsrichtung a für einen Grifftyp



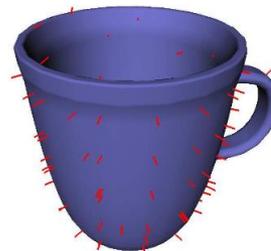
GCP Definition der ARMAR-III Hand für einen Kraftgriff

Erzeugung von Greifhypothesen

- Bestimmung der **Anfahrtsrichtung**:
 - Zufällige Auswahl eines Oberflächenpunktes p
 - Ermittlung der Oberflächennormalen n



1. Find Surface Points



2. Approach Directions from Surface Normals

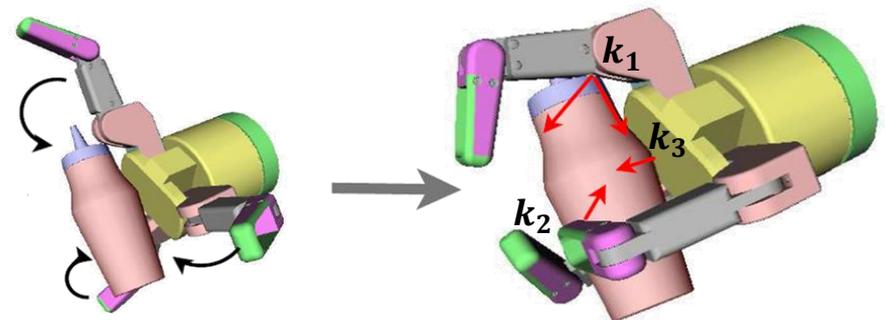
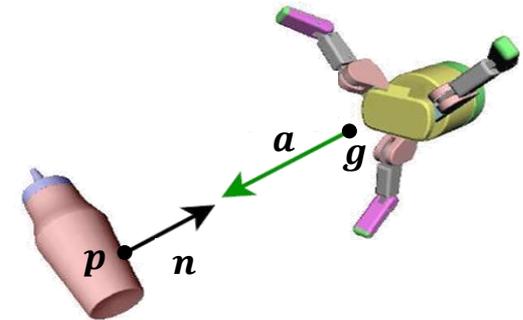


3. Sample Around Normals

Zufallsbasierte Vorwärts-Greifplanung (III)

Bestimmung der Greifhypothese

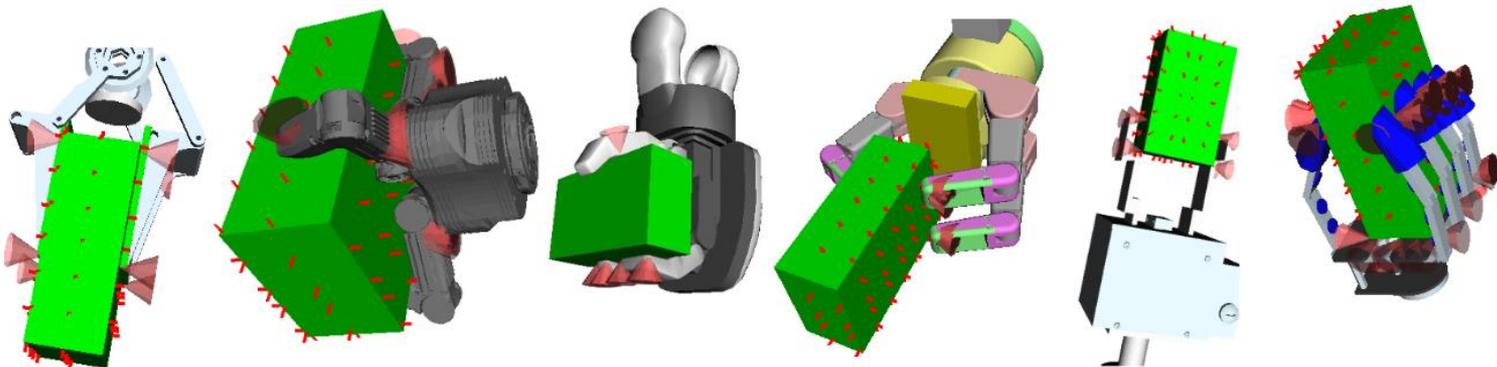
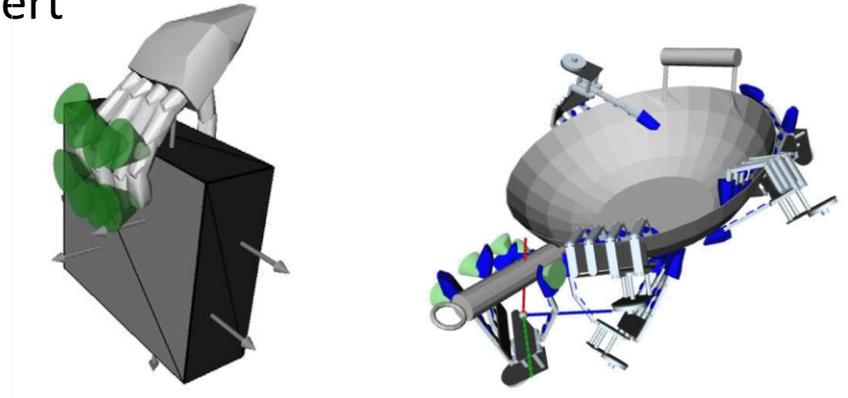
- Positionierung der Hand
 - Position der Hand: g liegt auf Halbgerade, welche durch p und n definiert wird
 - Ausrichtung der Handorientierung, so dass a und n kollinear sind.
Der freie Parameter (Orientierung um a) wird zufällig gewählt.
- Kontaktermittlung
 - Bewegung der Hand entlang a zum Objekt
 - Schließen der Finger
 - Ermittlung von n Kontaktpunkten k_1, \dots, k_n



Zufallsbasierte Vorwärts-Greifplanung (III)

Analyse der Greifhypothese

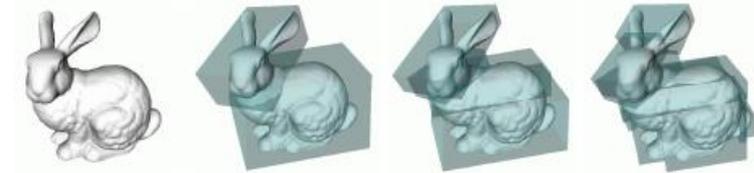
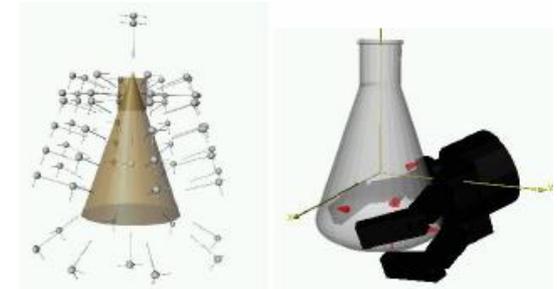
- Kontaktpunkte k_1, \dots, k_n werden analysiert
 - Kraftschluss
 - Griffqualität (V, ϵ, \dots)
- Valide Griffe werden gespeichert
- Greifhypothesen mit unzureichenden Eigenschaften werden verworfen



Griffsynthese auf Teilobjekten

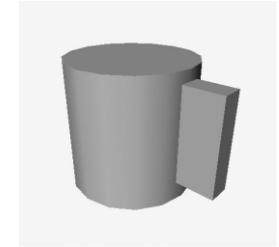
- Frage: Wie können **gute Griffkandidaten** erzeugt werden?

- Ansätze für verschiedene Unterteilungsverfahren
 - **Formprimitive (shape primitives)**
Manuelle Unterteilung in Primitive (z.B. Boxen, Zylinder, Kugeln, Kegel etc.)
 - **Box-Dekomposition**
Automatische Unterteilung (nur Boxen)
 - **Superquadriken**
Automatische Unterteilung
 - **Mediale-Achse-Transformation**
Nur Kugeln
 - **Oberflächennormalen**



Greifplanung mit Formprimitiven (1)

- Objekte werden durch einfache **Formprimitive** (shape primitives) dargestellt
- Für jedes Formprimitiv sind unterschiedliche **Greifstrategien** vordefiniert. (inklusive Startpunkt und Anrückrichtung)



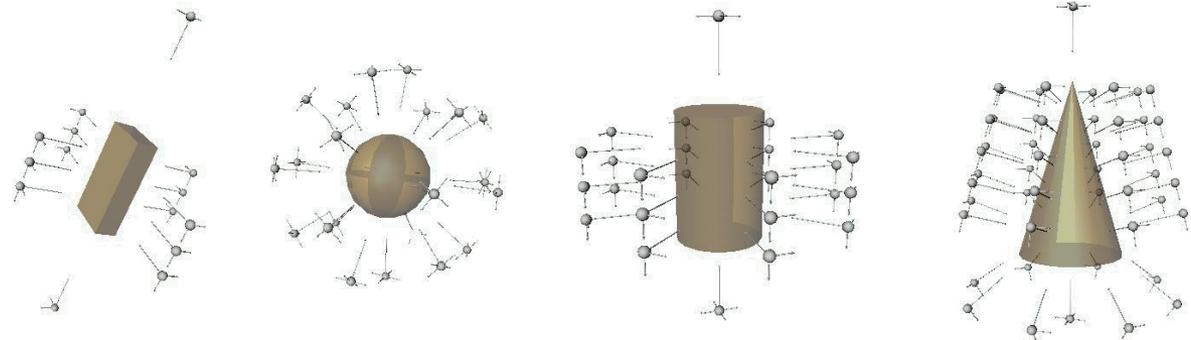
- **Vorwärtssimulation** des Greifprozesses:
 - Der Startpunkt definiert die initiale Greiferposition
 - Basierend auf der Anrückrichtung wird der Greifer zum Objekt bewegt bis ein Kontakt ermittelt wird
 - Kontaktpunkte werden durch Schließen des Greifers bestimmt
 - Evaluation der Kontakte über den GWS Ansatz

A. T. Miller, S. Knoop, H. I. Christensen, and P. K. Allen, *Automatic Grasp Planning Using Shape Primitives*, in IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation (ICRA), 2003, pp. 1824–1829.

Greifplanung mit Formprimitiven (2)

■ Greifstrategien

- Box
- Kugel
- Zylinder
- Kegel



■ Parameter

- Anzahl paralleler Unterteilungen (Boxen, Seiten von Zylinder und Kegel)
 - Anzahl Kreisunterteilungen (Kugel, Seiten von Zylinder und Kegel)
 - Anzahl Handorientierungen (um die Anfahrtsrichtung)
 - Spiegelung der Griffe (bei seitensymmetrischen Primitiven)
- Die Parameter werden automatisch aus den Objektdimensionen bestimmt.

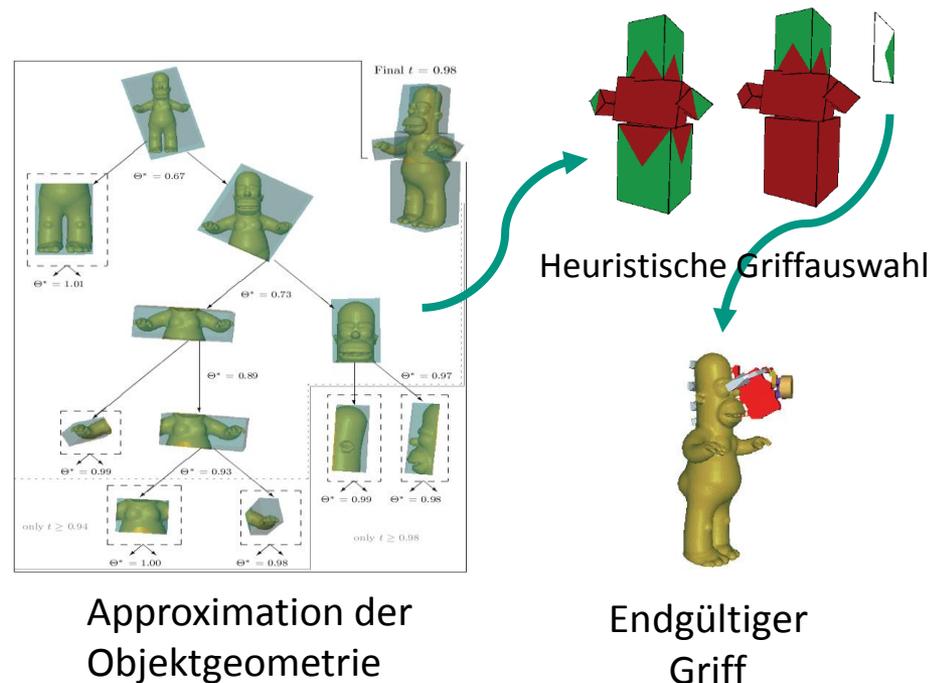
Greifplanung mit Formprimitiven (3)

Ergebnisse



Greifen bekannter Objekte: Ein Box-basierter Ansatz

- **Approximation** der Objektgeometrie durch Boxen (box decomposition)
- **Griffhypothesen** für Boxen erzeugen
- **Evaluation** der Griffhypothesen in Graspl!



Greifen bekannter Objekte: Ein Box-basierter Ansatz

■ Haushaltsobjekte mit bekannter Geometrie

■ Aus der **KIT ObjectModels Web Database**

<http://h2t-projects.webarchiv.kit.edu/Projects/ObjectModelsWebUI/>

■ Objektrepräsentation

- 3D Punktwolken (Stereobilder, mehrere Objektansichten)
- (Texturierte) Meshes

■ Approximation der Objektgeometrie durch Box-Dekomposition

■ Effizienter **Minimum Volume Bounding Box** (MVBB) Algorithmus

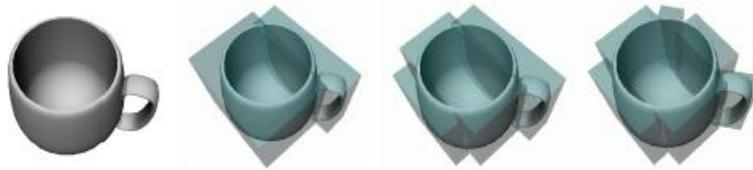
[Barequet and Har-Peled, 2001]

■ Basierend auf Punktwolken

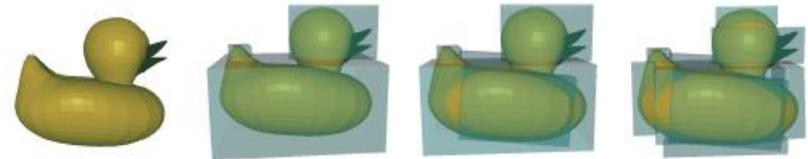
K. Huebner, S. Ruthotto and D. Kragic, *Minimum Volume Bounding Box Decomposition for Shape Approximation in Robot Grasping* In 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2008)

Huebner, K., Welke, K., Przybylski, M., Vahrenkamp, N., Asfour, T., Kragic, D., and Dillmann, R. *Grasping Known Objects with Humanoid Robots: A Box-Based Approach*. In 14th International Conference on Advanced Robotics, 2009

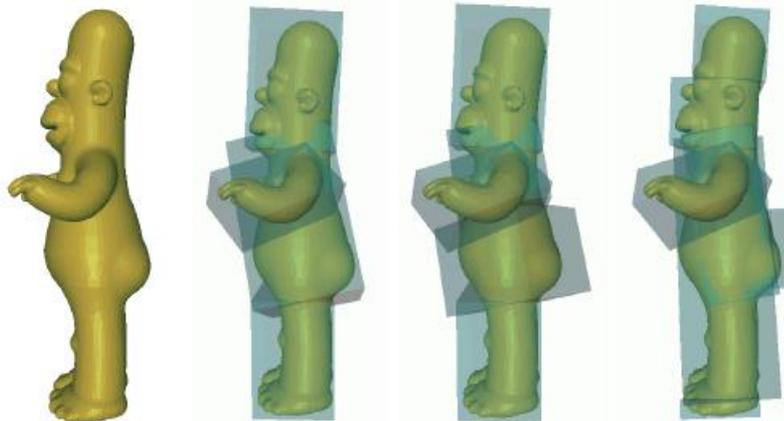
Unterteilungsalgorithmus: Von Punkten zu Boxen



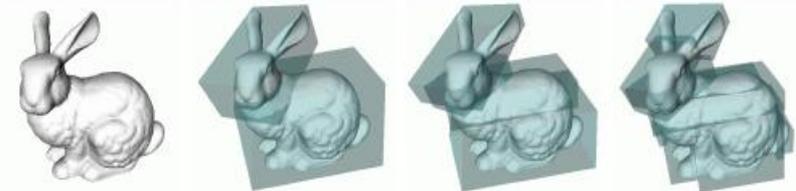
(a) Mug (model): MVBBs (2,3,5) produced with $t=0.90, 0.94, 0.98$.



(b) Duck (model): MVBBs (3,5,9) produced with $t=0.90, 0.94, 0.98$.



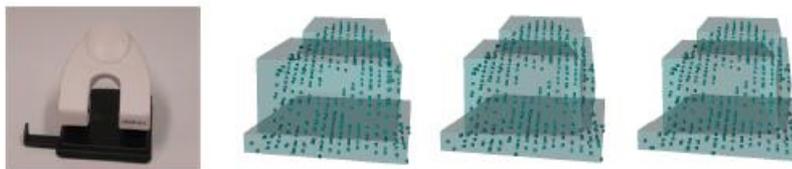
(c) Homer (model): MVBBs (4,5,7) produced with $t=0.90, 0.94, 0.98$.



(d) Bunny (model): MVBBs (2,4,11) produced with $t=0.90, 0.94, 0.98$.



(e) Stapler (scan): MVBBs (2,2,2) produced with $t=0.90, 0.94, 0.98$.



(f) Puncher (scan): MVBBs (3,4,4) produced with $t=0.90, 0.94, 0.98$.



(g) Notebook (scan): MVBBs (3,4,6) produced with $t=0.90, 0.94, 0.98$.

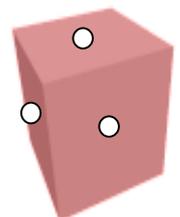
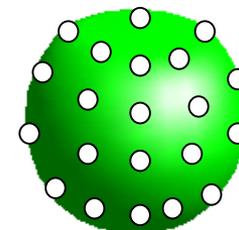
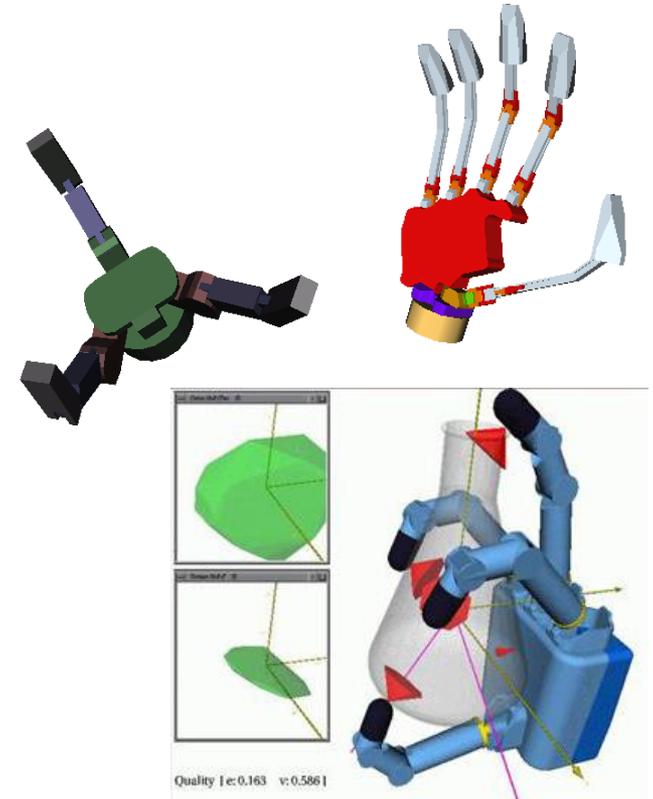
Details in [Huebner et al., 2008]

Erzeugen von Griffhypothesen: Von Boxen zu Griffen

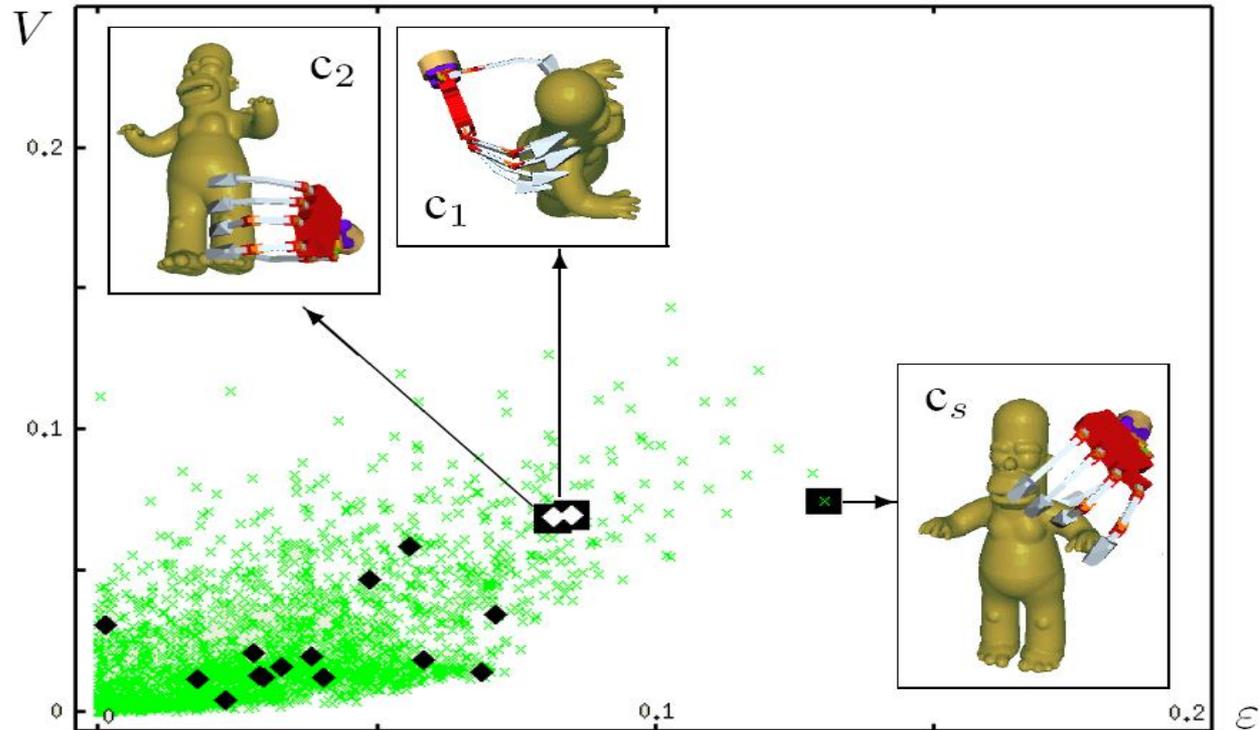
- Jede Box hat sechs Seitenflächen, welche jeweils **vier Griffhypothesen** implizieren
 - **Griffpunkt**: Mittelpunkt der Seitenfläche
 - **Griffrichtung**: Entlang der Normale der Seitenfläche
 - **Handorientierung**: Vier Möglichkeiten, orientiert an den Kanten der Fläche
- Über die Größen der Seitenflächen können unmögliche Griffe direkt ausgeschlossen werden
 - z.B. Seitenfläche ist größer als die Handöffnung
- Griffhypothesen für **blockierte** oder **verdeckte** Seitenflächen können durch einfache geometrische Berechnungen verworfen werden

Evaluation

- Experimentelle Evaluation durch Simulationsumgebung **Graspt!** [Miller et al., 2004]
- Zwei verwendete Handmodelle
 - Barrett Technologies (3 Finger, 4 DOF)
 - TUAT/Karlsruhe Humanoid Hand (5 Finger, 8 DOF)
- Zwei Qualitätsmaße
 - V : Volumen des GWS
 - ε : Größte Kugel im GWS
- Zwei Verfahren wurden verglichen
 - Spherical: Griffhypothesen aus 22104 Punkten auf Kugeloberfläche
 - Box: Griffhypothesen aus Box-Unterteilung



Evaluation



✕ Sample of spherical grasp

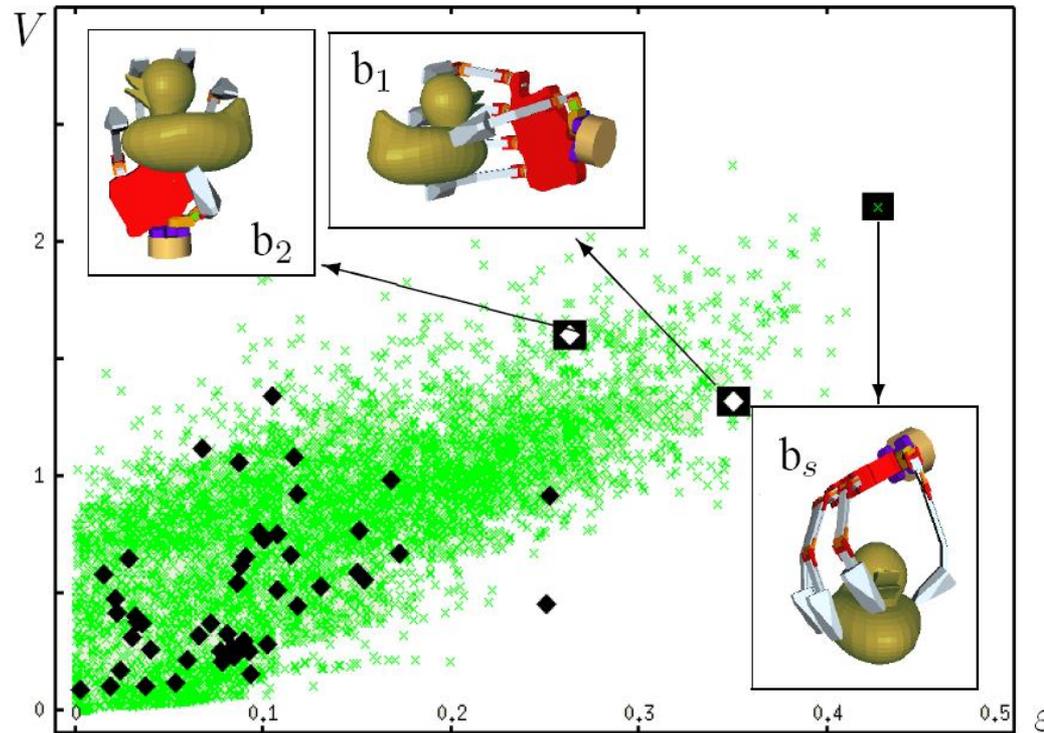
✕ "Best" spherical grasp

◆ Sample of box grasp

◆ "Best" box grasp(s)

Box-Dekomposition erzeugt **wenige, aber qualitativ hochwertige** Griffhypothesen

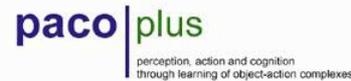
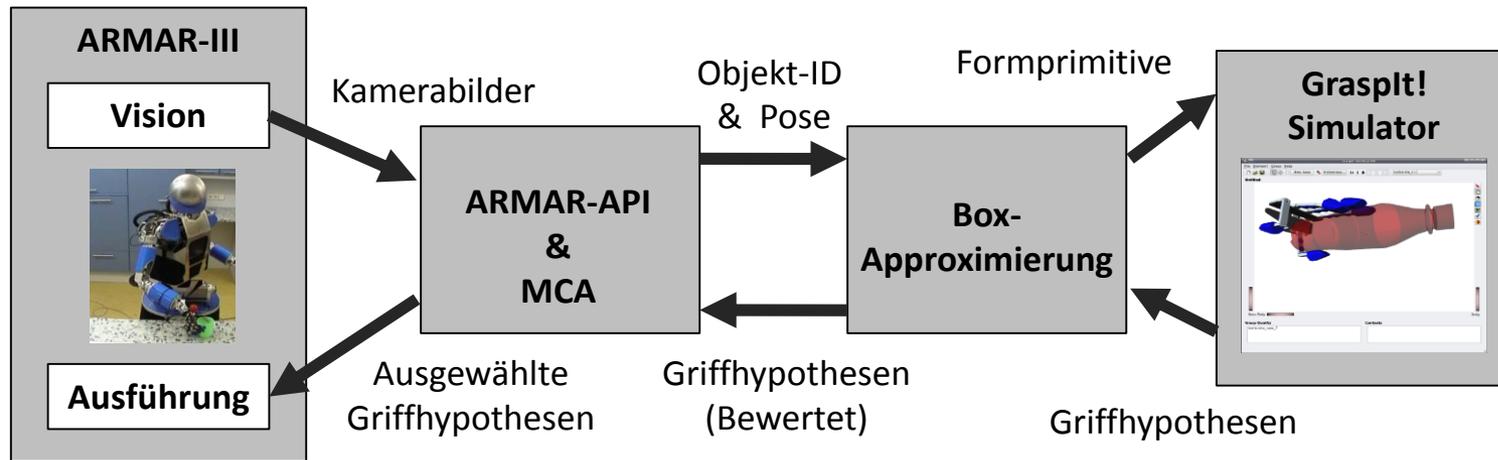
Evaluation



- × Sample of spherical grasp
- ⊠ "Best" spherical grasp
- ◆ Sample of box grasp
- ◊ "Best" box grasp(s)

Box-Dekomposition erzeugt **wenige, aber qualitativ hochwertige** Griffhypothesen

Evaluation auf ARMAR-III



Grasping Objects using Box Decomposition on
the Humanoid Robot ARMAR-III



University of Karlsruhe
M. Przybylski, K. Welke, T. Asfour,
R. Dillmann

Kungliga Tekniska Högskolan
K. Hübner, D. Kragic



March 2009

Ergebnisse

- **Exakte Form** ist nicht notwendig, um Griffe zu erzeugen
- Objekte könne durch **vereinfachte Formen** (Boxen) besser verarbeitet werden. Hierzu können **Punktwolken** der Oberflächen verwendet werden.
- Einfache **Parametrisierung** der Algorithmen
- Evaluation: Der **Box-Dekomposition** Ansatz erzeugt Griffe, welche mit einem humanoiden Roboter erfolgreich ausgeführt werden können.

Greifplanung mit Superquadriken

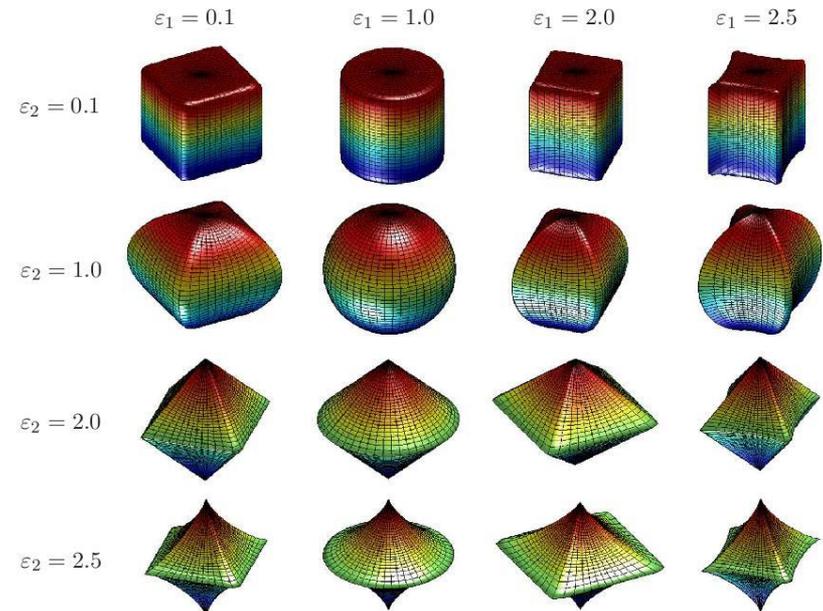
Superquadrik

- Parametrisierbare Funktionen definieren die Form des geometrischen Objektes
- Eine an den Koordinatenachsen ausgerichtete Superquadrik im Ursprung des Koordinatensystems wird durch fünf Parameter mit folgender Gleichung beschrieben:

$$X(\eta, \omega) = \begin{pmatrix} a_1 \cos^{\epsilon_1}(\eta) \cos^{\epsilon_2}(\omega) \\ a_2 \cos^{\epsilon_1}(\eta) \sin^{\epsilon_2}(\omega) \\ a_3 \sin^{\epsilon_1}(\eta) \end{pmatrix}$$

für $-\frac{\pi}{2} \leq \eta < \frac{\pi}{2}$ und $-\pi \leq \omega < \pi$.

Die Parameter a_1, a_2, a_3 beschreiben die Größe der Superquadrik in Richtung der drei Raumachsen. Die Exponenten $\epsilon_1, \epsilon_2 \in [0,1]$ bestimmen die Schärfe des Kantenverlaufs.



C. Goldfeder, P. K. Allen, C. Lackner, and R. Pelosoff, *Grasp Planning Via Decomposition Trees*, in IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), 2007, pp. 4679–4684.

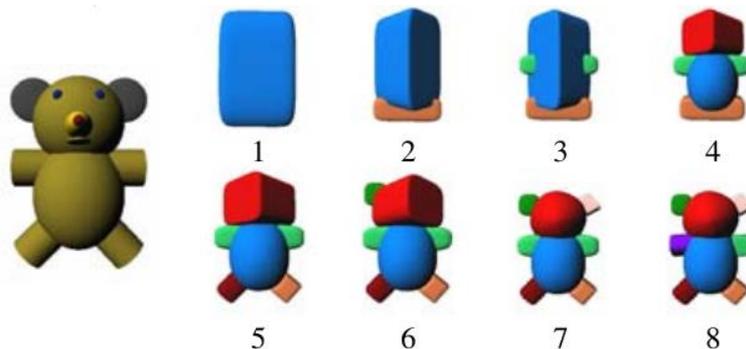
Greifplanung mit Superquadriken (II)

Objektdarstellung über Superquadriken

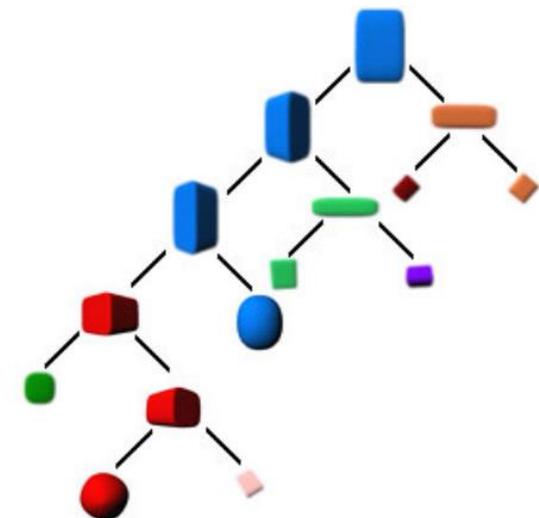
- Objektoberfläche wird als Punktwolke dargestellt
- Ermittle Superquadrik deren Oberfläche die Punktwolke am besten darstellt (Nichtlinearer Optimierungsalgorithmus, z.B. Levenberg-Marquardt)

Decomposition Tree

- Verfeinere die Approximation schrittweise
 - Suche Superquadrik mit größtem Fehler zur Punktwolke
 - Teile die zugehörige Punktwolke
 - Erstelle zwei Superquadriken
- Speichere Resultate für jeden Approximationsschritt im **Decomposition Tree**



Superquadriken von 8 Dekompositionsschritten



Decomposition Tree

Greifplanung mit Superquadriken (III)

Greifplanung

- Für jede Superquadrik werden **Greifhypothesen** erzeugt
 - Gleichverteilte Anfahrtpunkte und Anfahrtsrichtungen relative zur Oberfläche der entsprechenden Superquadrik

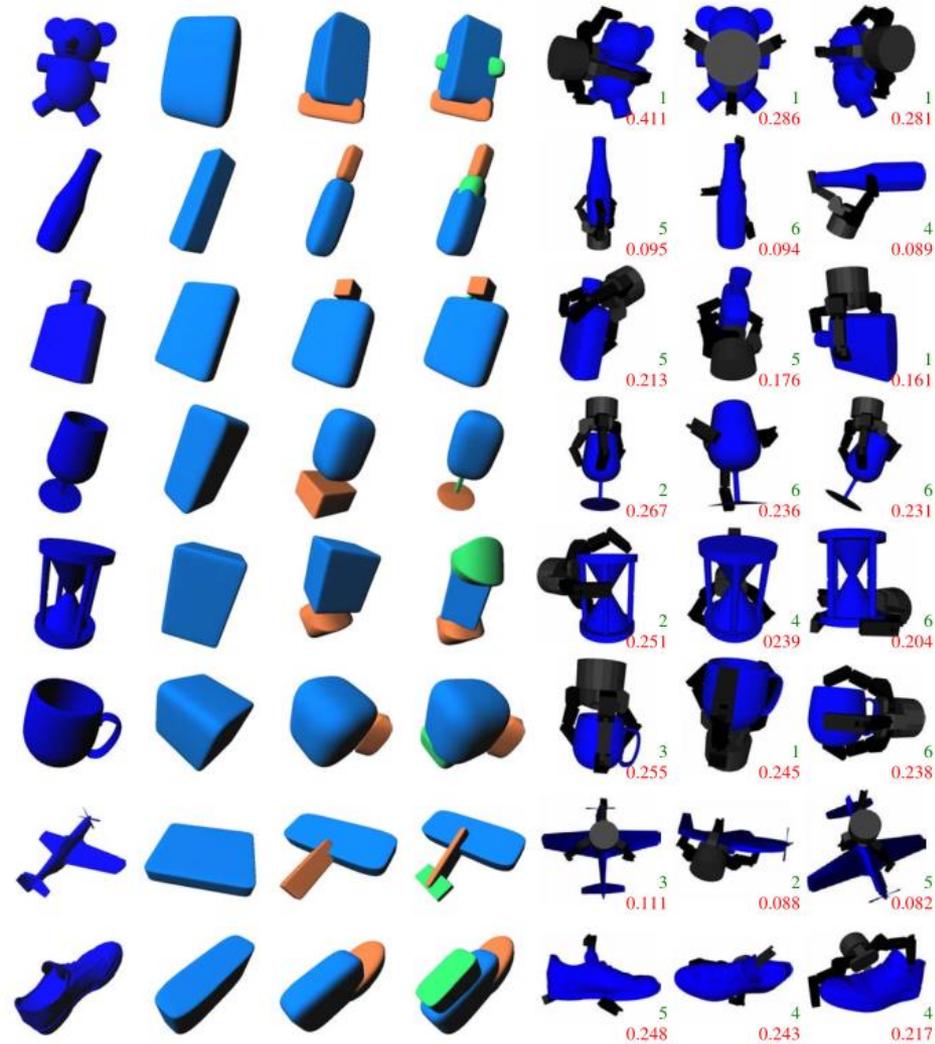
- **Evaluation** der Greifhypothesen mittels GWS Ansätzen
 - **Detailliertes Objektmodell** (3D Mesh)

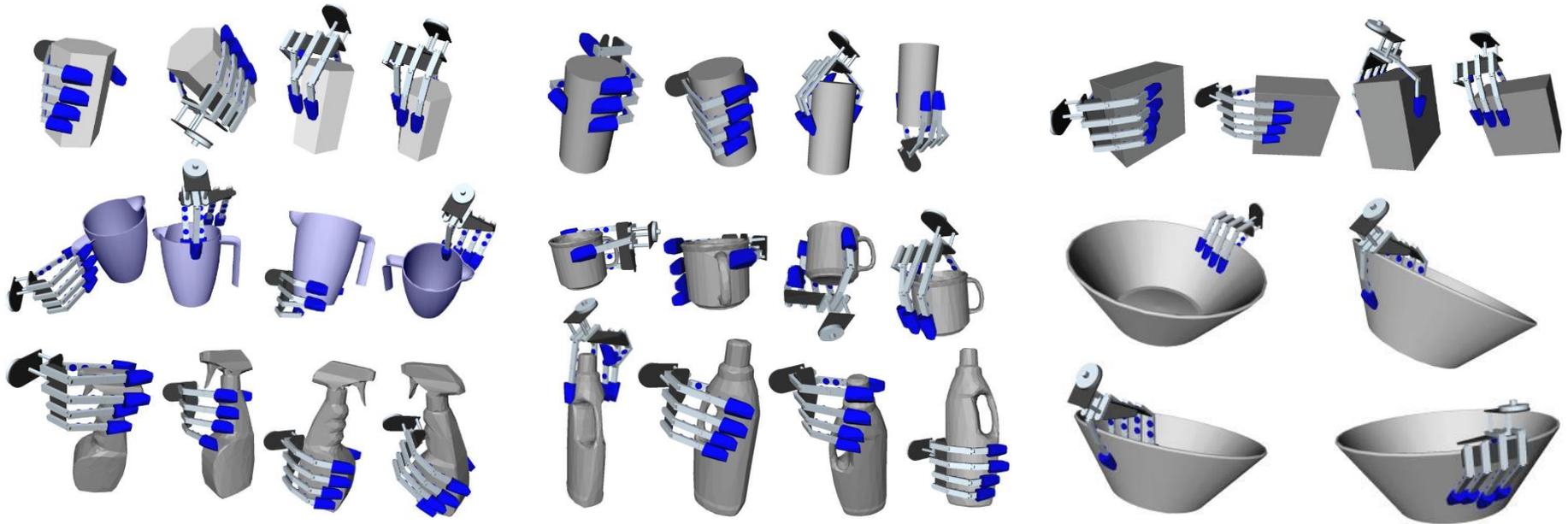
- Für **alle Ebenen** des Decomposition Trees
 - Greifplanung auf groben sowie feinen Strukturen des Objektes



Greifplanung mit Superquadriken (IV)

Resultate





GRIFFPLANUNG MIT MEDIALEN ACHSEN

Motivation

- **Stand der Forschung:** Algorithmen zur Griffplanung in Simulationsumgebungen
 - Griffhypothesen werden auf Stabilität untersucht
 - Effizienz hängt von den Heuristiken zur Erzeugung von Griffhypothesen ab
- **Ziel:** Verbesserung der Effizienz von Griffplanungs-Algorithmen, indem nur „geometrisch sinnvolle“ Griffe untersucht werden müssen
- **Ansatz:** Verwende **lokale Symmetrien** der Objektgeometrie
 - Die Repräsentation des Objektes ist wichtig
 - Dreiecksnetz (Mesh): Zu niedriges Abstraktionsniveau
 - Mediale Achse als Objektrepräsentation

Przybylski, M., Asfour, T. & Dillmann, R. *Unions of Balls for Shape Approximation in Robot Grasping*. 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010

Przybylski, M., Wächter, M., Asfour, T. & Dillmann, R. *A Skeleton-based Approach to Grasp Known Objects with a Humanoid Robot*, IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), pp. 376 - 383, 2012

Griffplanung mit medialen Achsen

- Mediale Achse [Blum67]
 - Objektform wird approximiert über **enthaltene Kugeln** mit maximalem Durchmesser
 - Enthaltene Kugeln müssen die Objekthülle an zwei oder mehr Punkten berühren
- Die mediale Achse ist die Vereinigung der **Mittelpunkte aller enthaltenen Kugeln**
- Die mediale Achse beschreibt das **topologische Skelett** des Objekts
- Vorteile:
 - Gute Approximation der Objektgeometrie
 - Details bleiben erhalten
 - Gute Beschreibung der Symmetrien

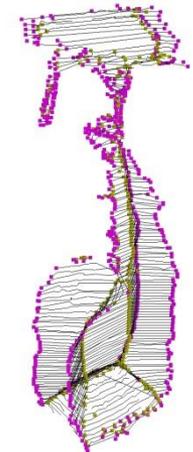
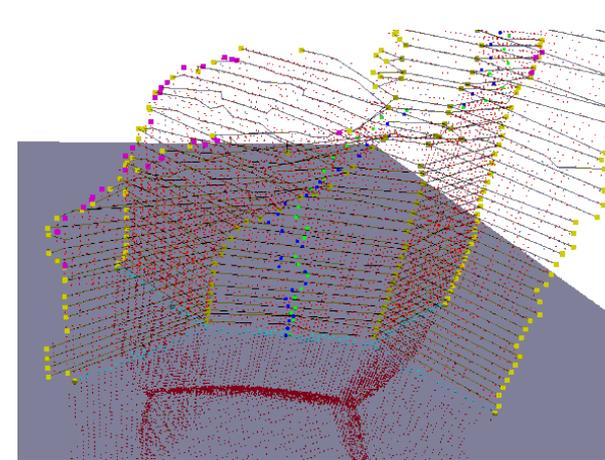
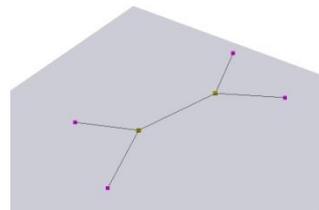
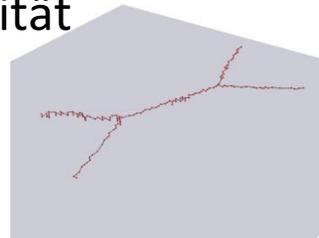
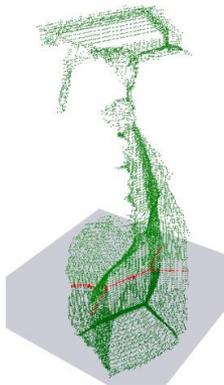
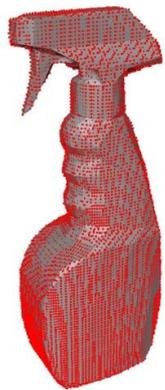
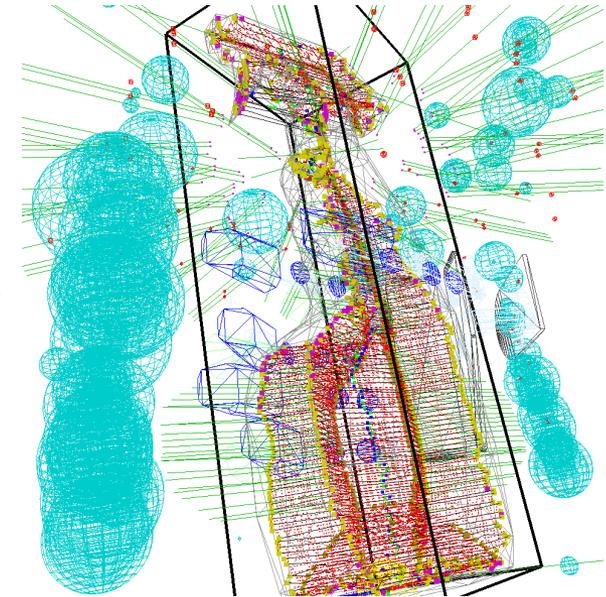


*H. Blum, **Models for the Perception of Speech and Visual Form.** Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1967, A transformation for extracting new descriptors of shape, pp. 362–380.*

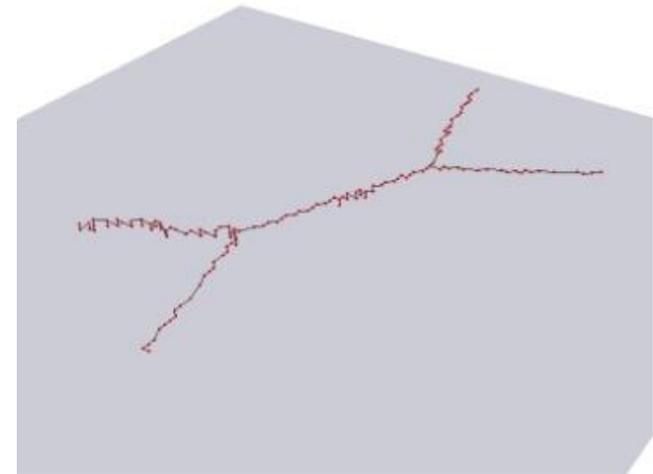
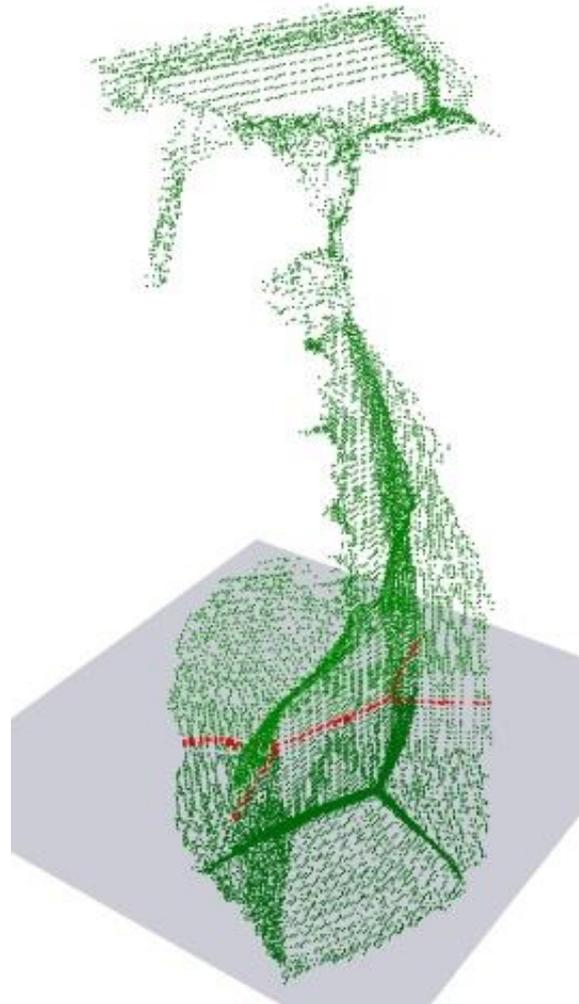
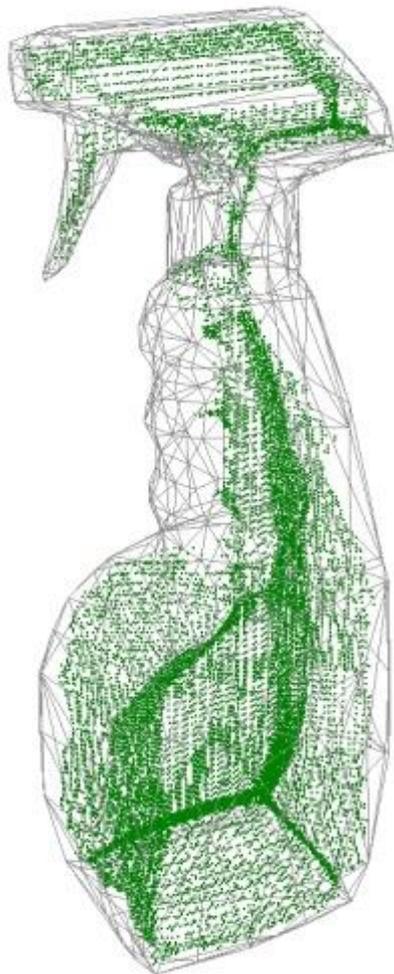
Griffplanung mit medialen Achsen

Algorithmus

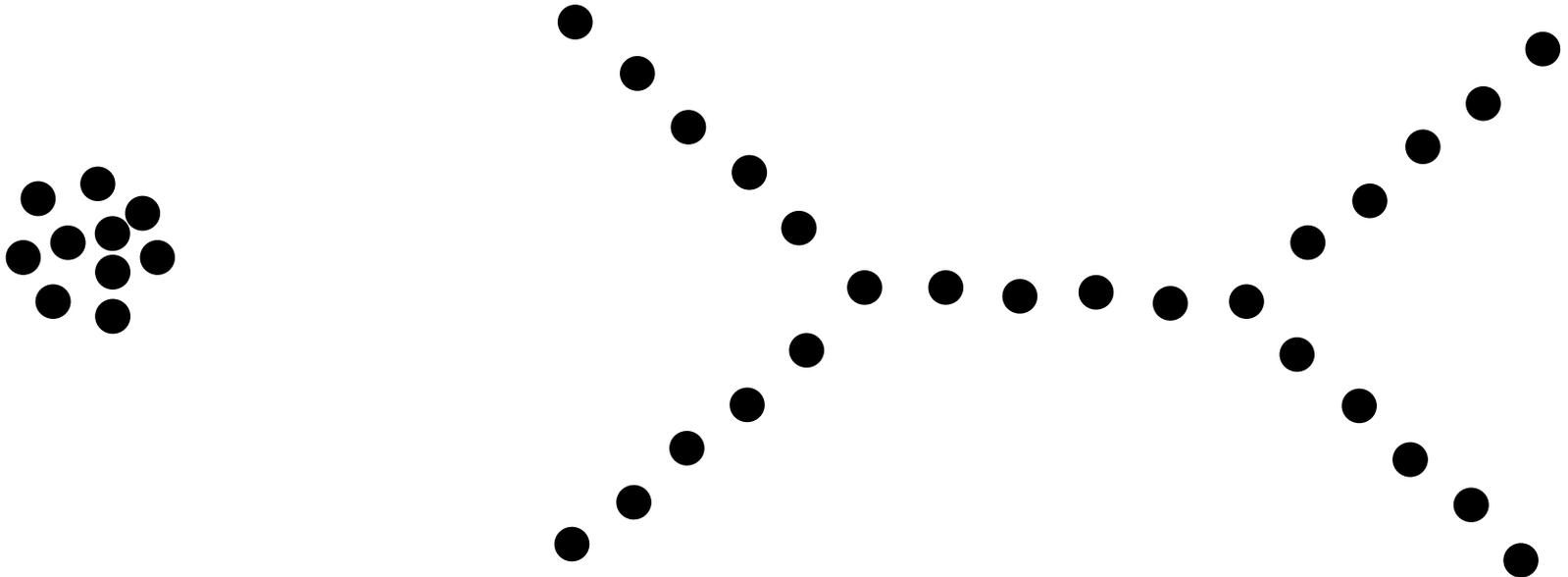
1. Abtasten der Objektoberfläche
2. Berechnen der medialen Achse
3. Analyse der Querschnitte der medialen Achse
 - Minimum Spanning Tree (MST)
 - Clustern
 - Konvexe Hülle
4. Erzeuge Griffhypothesen
5. Evaluiere Griffstabilität



Analyse der Querschnitte der medialen Achse

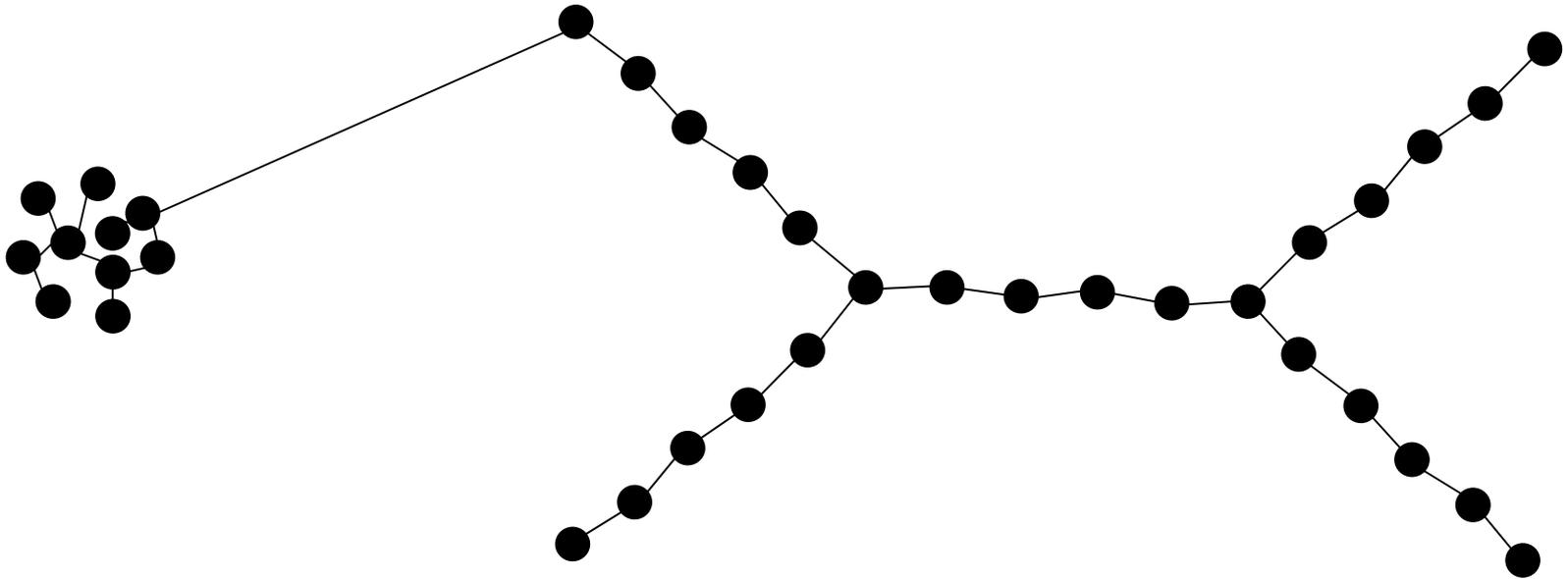


Analyse eines Querschnitts der medialen Achse I



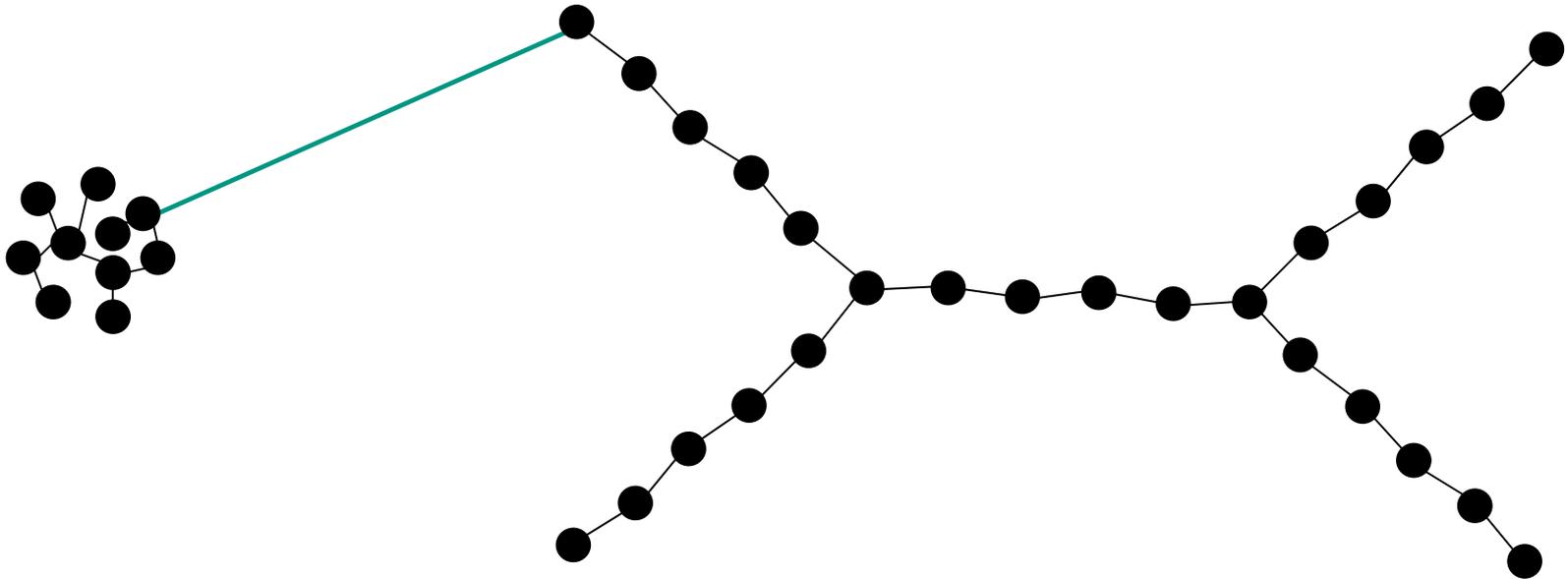
- Mediale Achse repräsentiert als Punktwolke
- Wir suchen
 - Die Nächste-Nachbarn-Beziehungen
 - Verzweigungspunkte
- Ansatz: **Minimum Spanning Tree (MST)**

Analyse eines Querschnitts der medialen Achse II



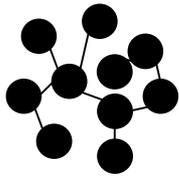
- **Schritt 1:** Bestimmung des MST
- Ergebnis: Alle Punkte sind mit ihren jeweils nächsten Nachbarn verbunden

Analyse eines Querschnitts der medialen Achse III

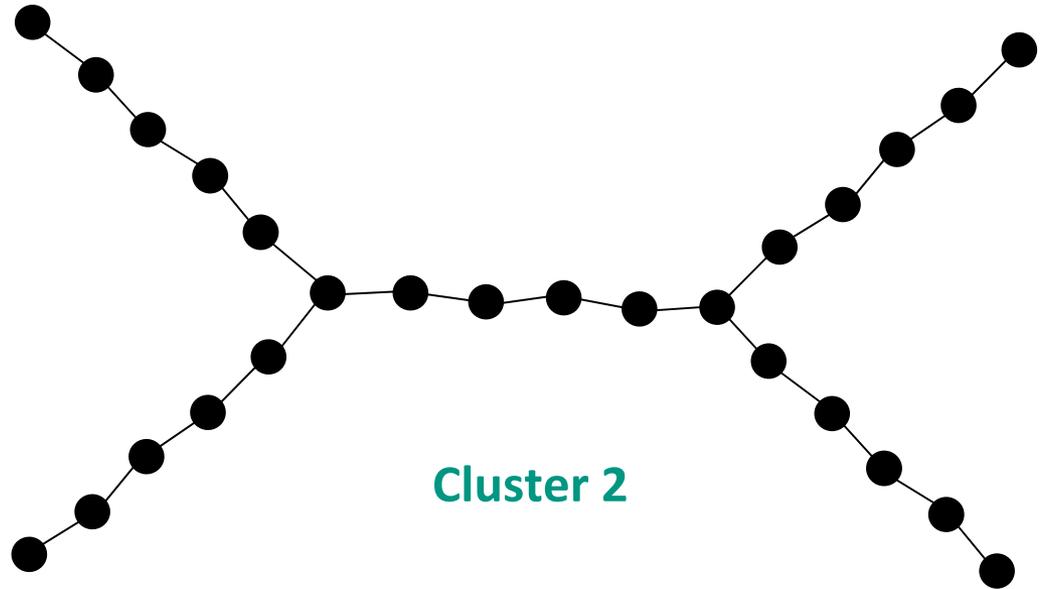


- **Schritt 2:** Entferne Kanten, die länger sind als ein Grenzwert d_{cut}
- Ergebnis: Unterteilung der medialen Achse in zusammengehörige Cluster

Analyse eines Querschnitts der medialen Achse III



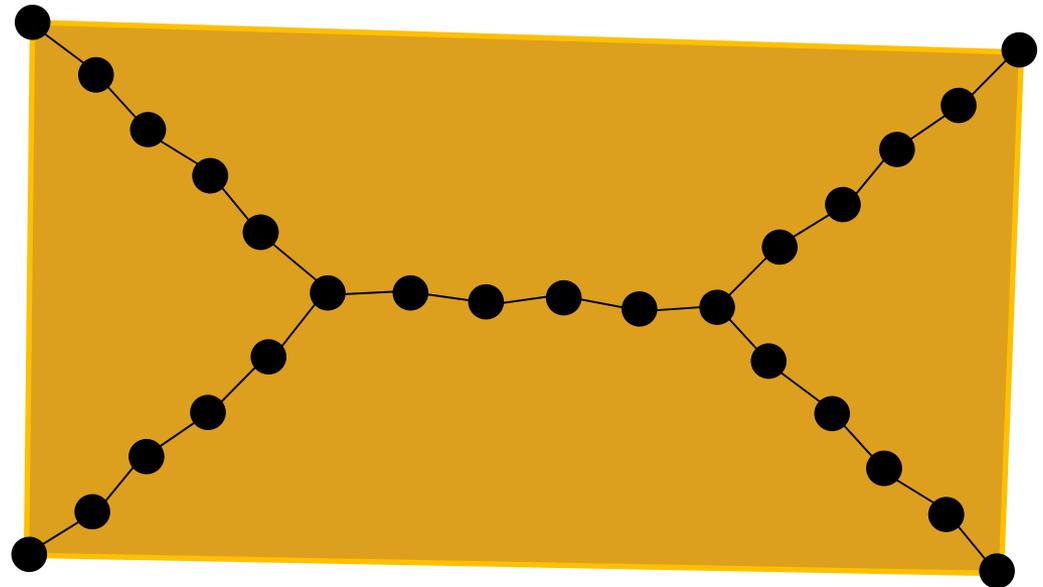
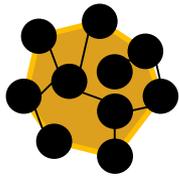
Cluster 1



Cluster 2

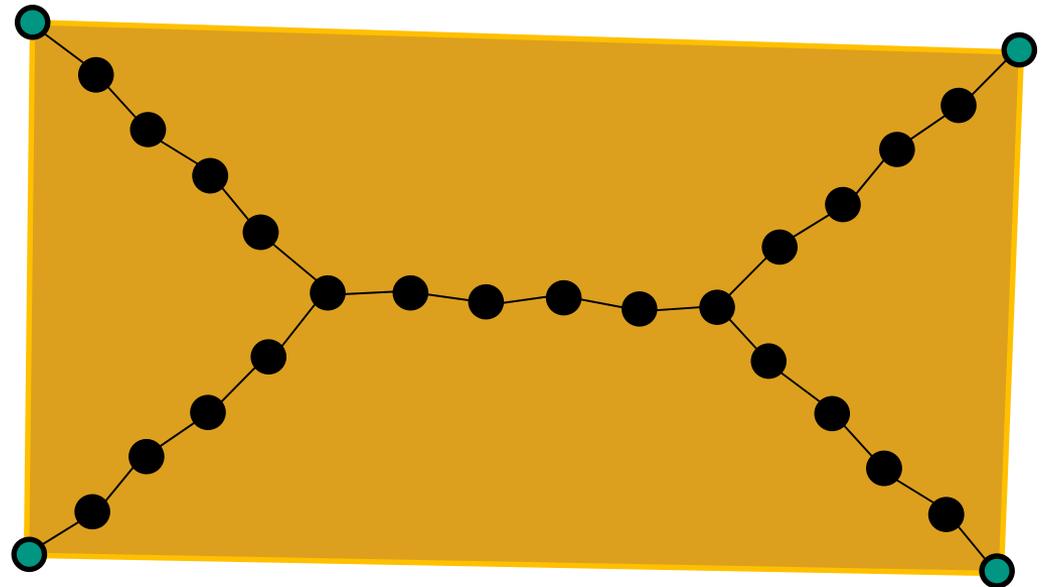
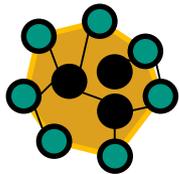
- **Schritt 2:** Entferne Kanten, die länger sind als ein Grenzwert d_{cut}
- Ergebnis: Unterteilung der medialen Achse in zusammengehörige Cluster

Analyse eines Querschnitts der medialen Achse IV



- **Schritt 3:** Berechne für jedes Cluster
 - **Volumen der konvexen Hülle**
 - Randpunkte der konvexen Hülle
 - Verzweigungspunkte des MST
 - Masseschwerpunkt

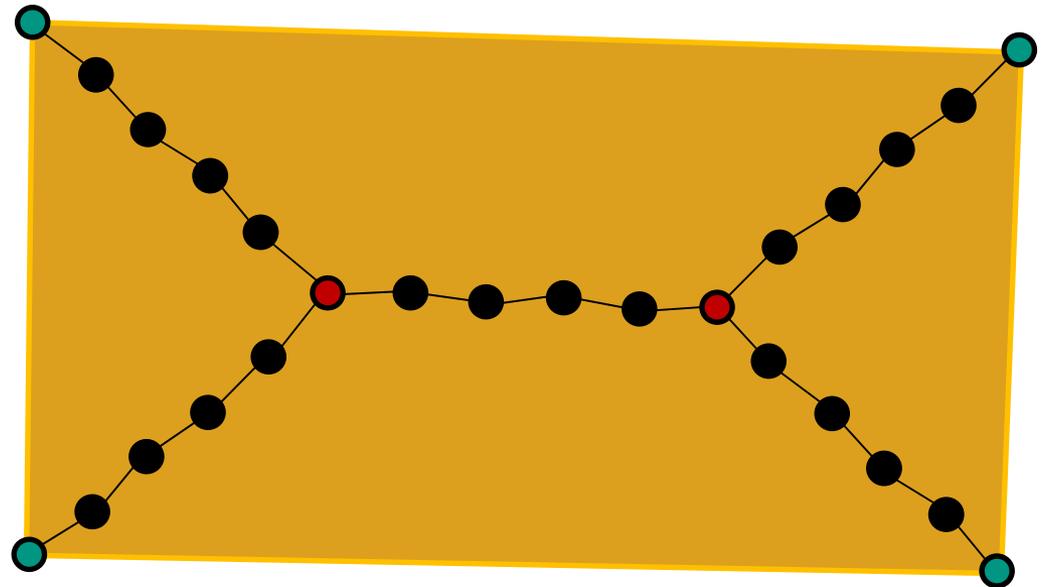
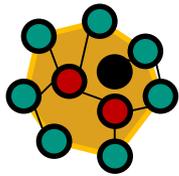
Analyse eines Querschnitts der medialen Achse V



■ Schritt 3: Berechne für jedes Cluster

- Volumen der konvexen Hülle
- **Randpunkte der konvexen Hülle**
- Verzweigungspunkte des MST
- Masseschwerpunkt

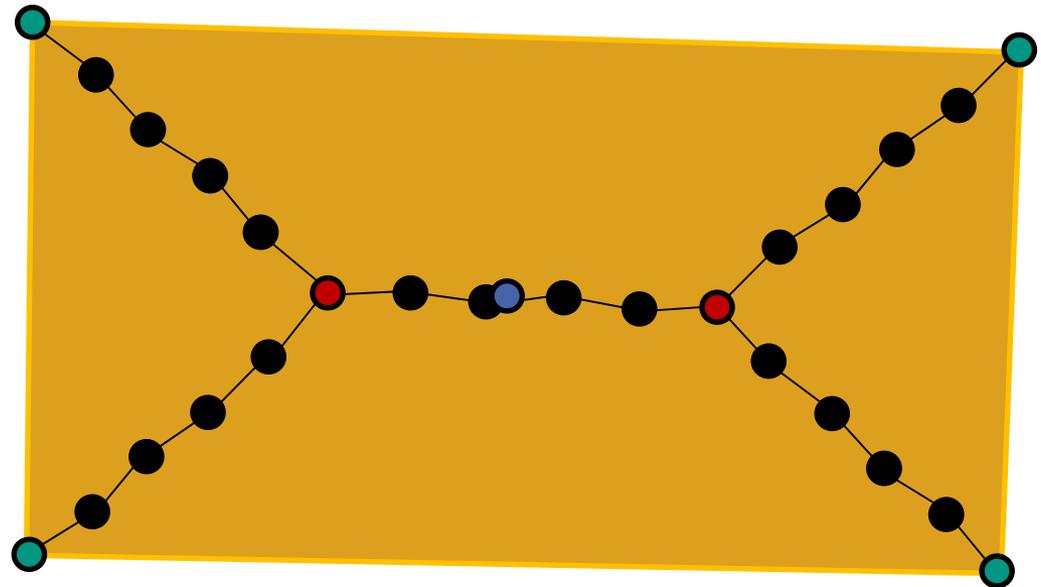
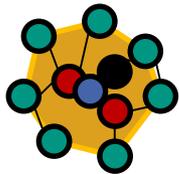
Analyse eines Querschnitts der medialen Achse VI



■ Schritt 3: Berechne für jedes Cluster

- Volumen der konvexen Hülle
- Randpunkte der konvexen Hülle
- **Verzweigungspunkte des MST**
- Masseschwerpunkt

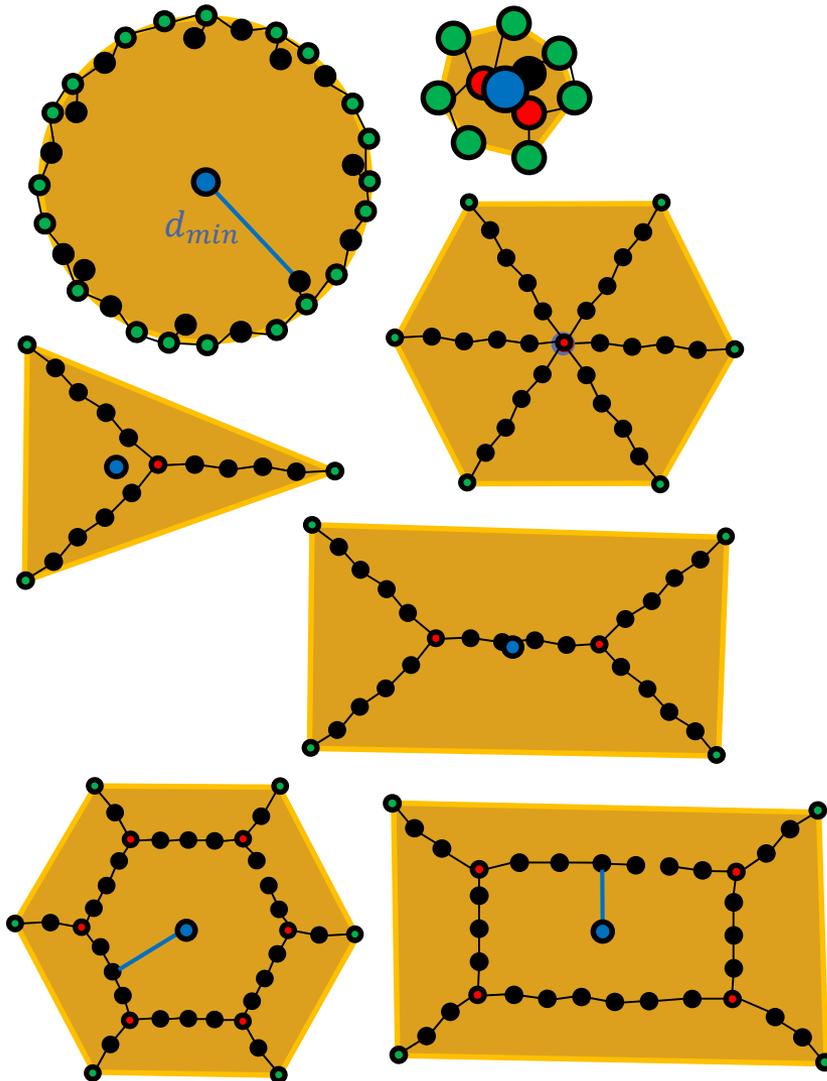
Analyse eines Querschnitts der medialen Achse VII



■ Schritt 3: Berechne für jedes Cluster

- Volumen der konvexen Hülle
- Randpunkte der konvexen Hülle
- Verzweigungspunkte des MST
- **Masseschwerpunkt**

Analyse der gefundenen Cluster



■ Kreis / Ring

- Große Distanz zwischen Masseschwerpunkt und nächstem Punkt der medialen Achse
- Viele Punkte auf dem Rand der konvexen Hülle

■ Element einer Symmetrieachse

- Geringes Volumen der konvexen Hülle
- Wenige Punkte auf dem Rand der konvexen Hülle

■ Stern

- Genau ein Verzweigungspunkt

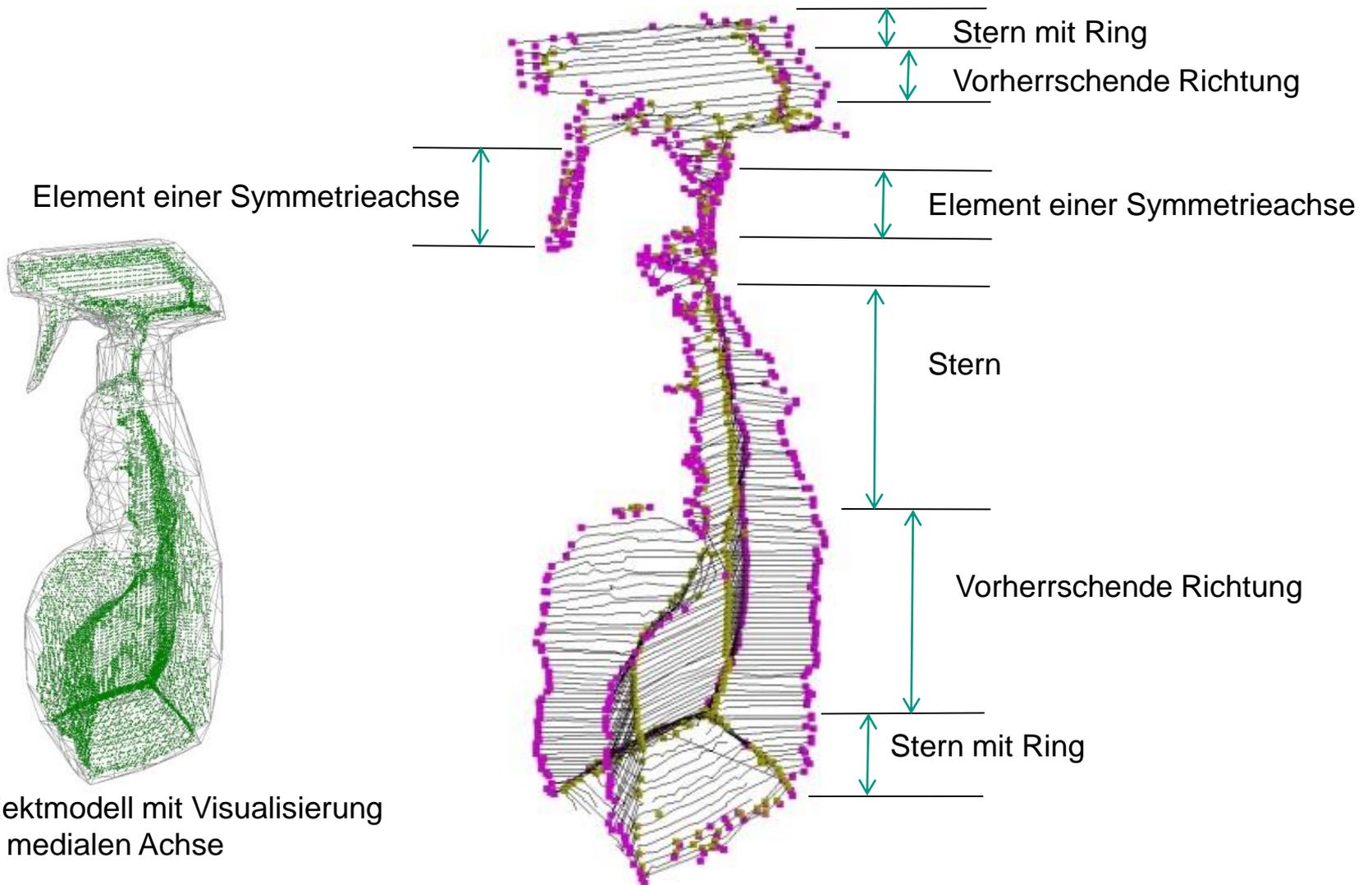
■ Vorherrschende Richtung

- Genau zwei Verzweigungspunkte

■ Stern mit Ring

- Große Distanz zwischen Masseschwerpunkt und nächstem Punkt der medialen Achse

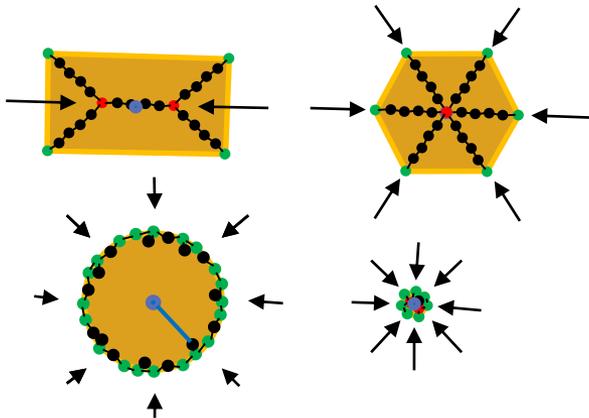
Beispiel: Analyse der medialen Achse



Objektmodell mit Visualisierung der medialen Achse

Heuristiken zur Erzeugung von Griffhypothesen I

- Näherungsrichtung der Hand
 - Verzweigungspunkte des MST
 - Spitzen eines Sterns
 - Symmetrieachsen
 - Rand offener Objekte

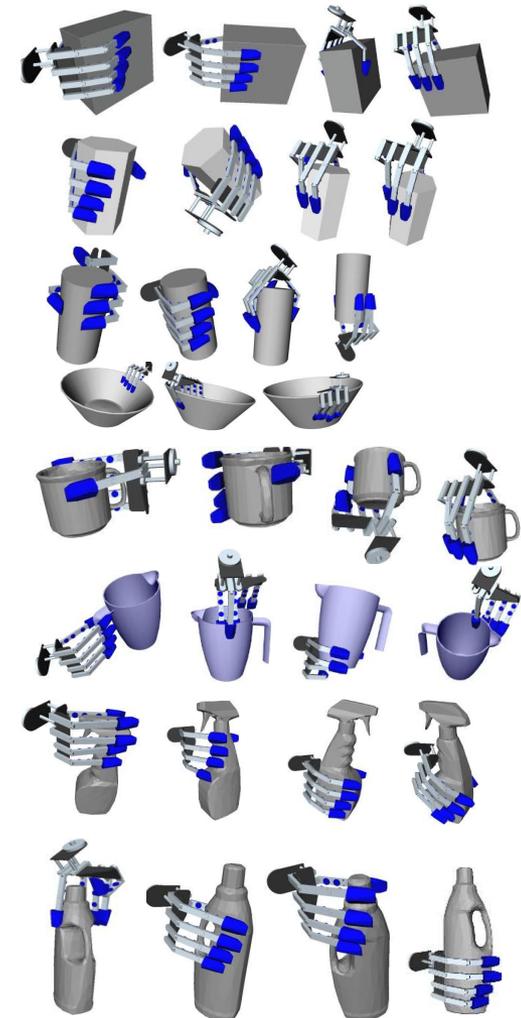
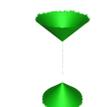


- Rollwinkel der Hand
 - Lokale Symmetrieachsen
 - Lokale Symmetrieebenen
- Für komplexere Objekte
 - Wende Kombination dieser Regeln an

Objekt

Mediale Achse

Typische Griffe

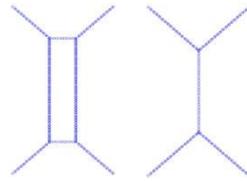
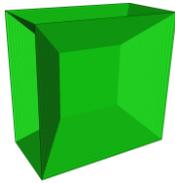


Heuristiken zur Erzeugung von Griffhypothesen II

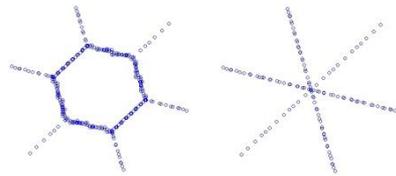
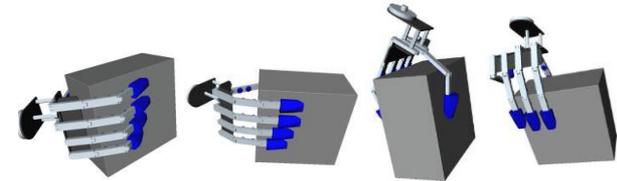
Mediale Achse

Querschnitt

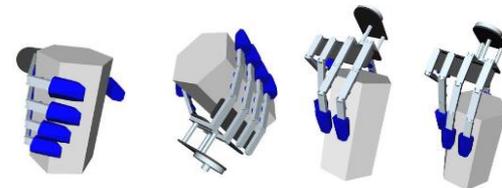
Heuristik und Griffhypothesen



- Greife Verzweigungspunkte des MST
- Rollwinkel der Hand nach Symmetrieebenen ausrichten



- Greife Sternspitzen
- Rollwinkel der Hand nach Symmetrieebenen ausrichten

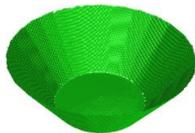
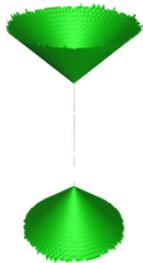


Heuristiken zur Erzeugung von Griffhypothesen III

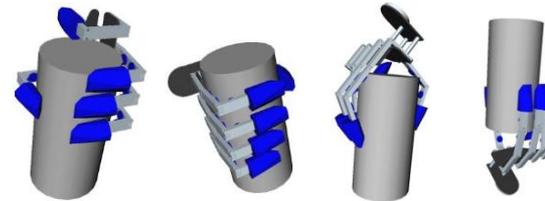
Mediale Achse

Querschnitt

Heuristik und Griffhypothesen



- Greife Kreis und Symmetrieachse aus verschiedenen Richtungen
- Rollwinkel der Hand nach Symmetrieachse ausrichten



- Objekte mit Öffnungen: Greife den Rand der Öffnung

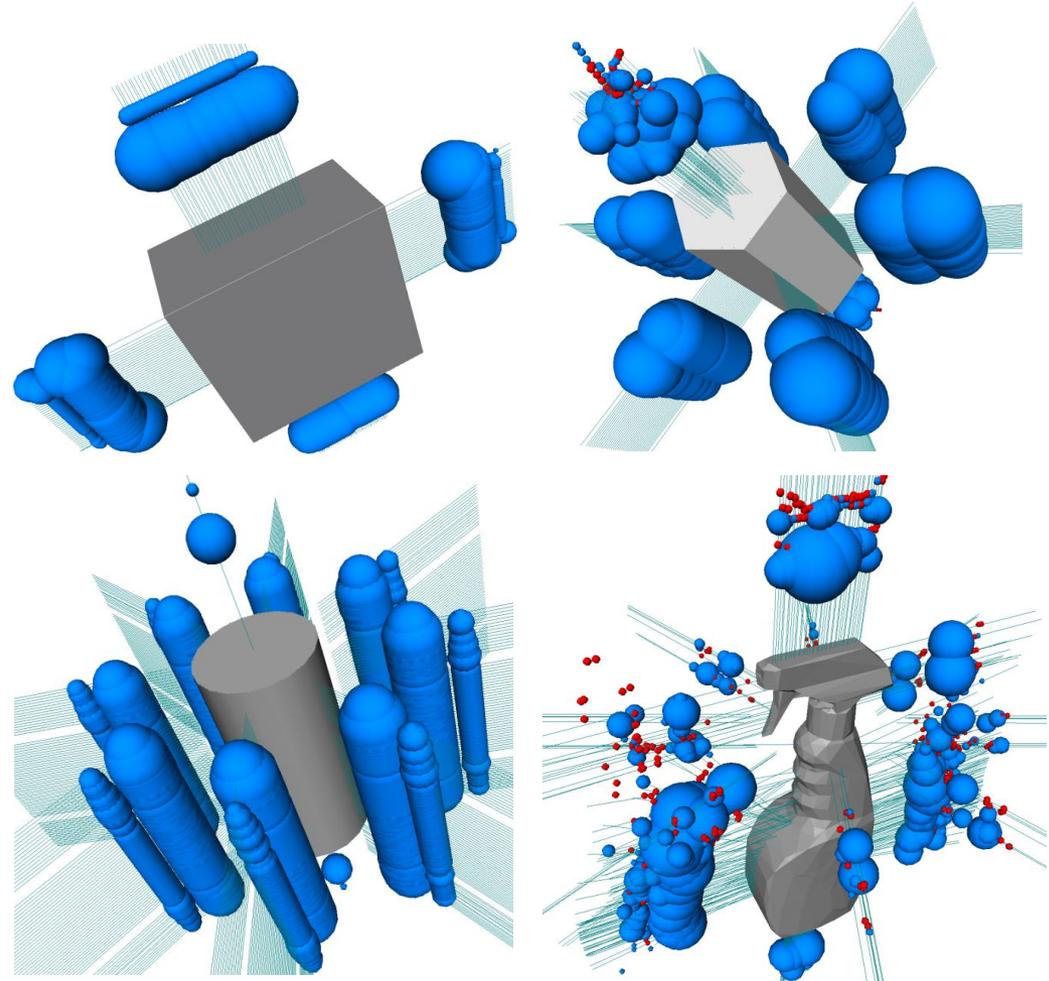


Ergebnisse: Qualität des Griffs (Kraftschluss)

- **Blaue Kugeln:**
stabile Griffe
- **Rote Kugeln:**
instabile Griffe

- **Position der Kugel:**
Position des Handgelenks
während des Griffs

- **Durchmesser der Kugel:**
Maß für die Stabilität
(Größte Kugel = stabilster
Griff)

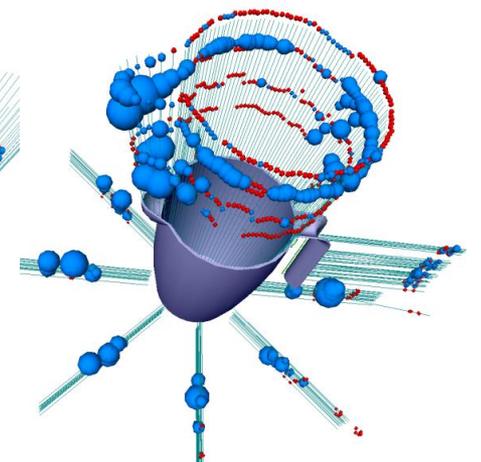
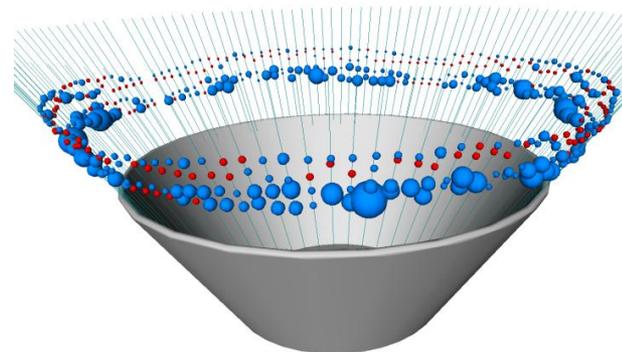
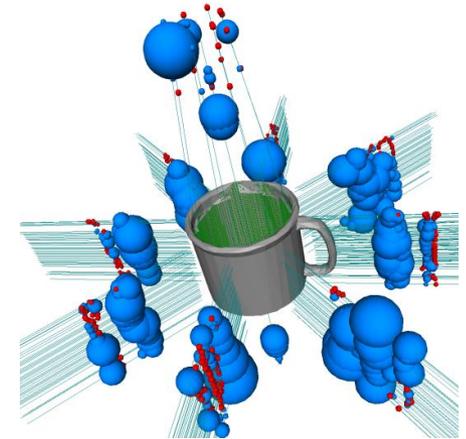
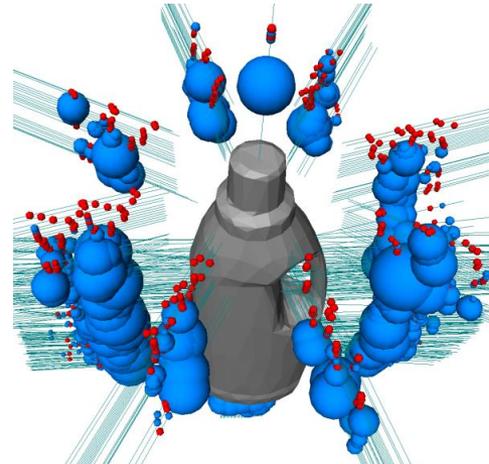


Ergebnisse: Qualität des Griffs (Kraftschluss)

- **Blaue Kugeln:**
stabile Griffe
- **Rote Kugeln:**
instabile Griffe

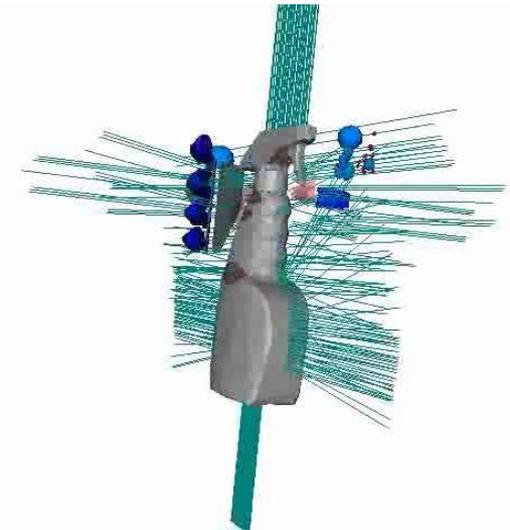
- Position der Kugel:
Position des Handgelenks
während des Griffs

- Durchmesser der Kugel:
Maß für die Stabilität
(Größte Kugel = stabilster
Griff)



Ergebnisse: Effizienz

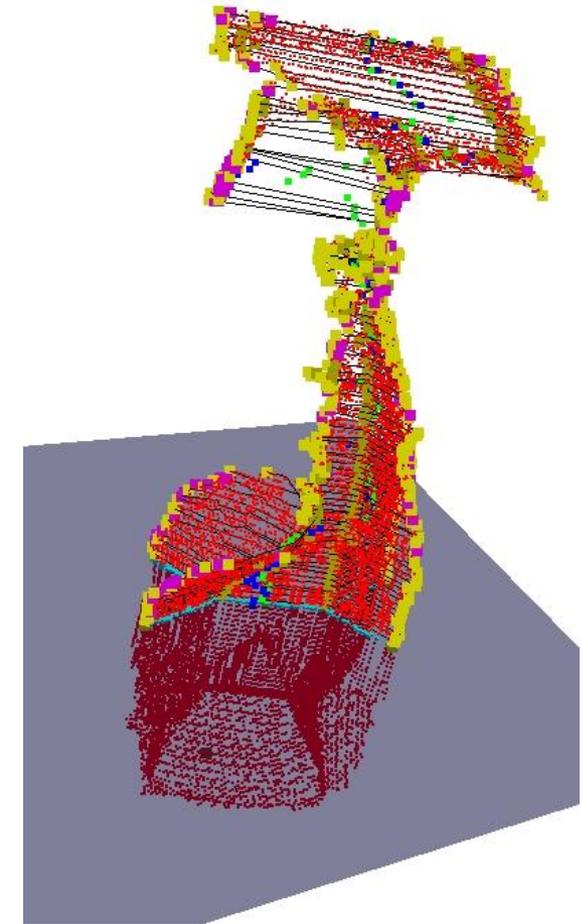
- Vergleich mit auf Flächennormalen basierendem Greifplaner [Berenson07]
 - Anzahl der generierten möglichen Griffe
 - Stabile Griffe
- Ergebnis:
 - Planung basierend auf medialer Achse ist effizienter



Objects	MA-based planner		Surface normals planner	
	Candidates	Stable	Candidates	Stable
→ Bread box	632	86.2%	13440	15.5%
Prismatic box	1344	90.7%	8512	36.0%
Salt can	2144	96.9%	7904	45.7%
Detergent	1996	65.9%	12672	26.2%
Spray	1304	55.1%	11200	21.2%
Cup	1428	59.5%	6688	37.0%
Pitcher	1124	47.0%	15504	25.9%
→ Salad bowl	504	68.5%	13648	4.5%

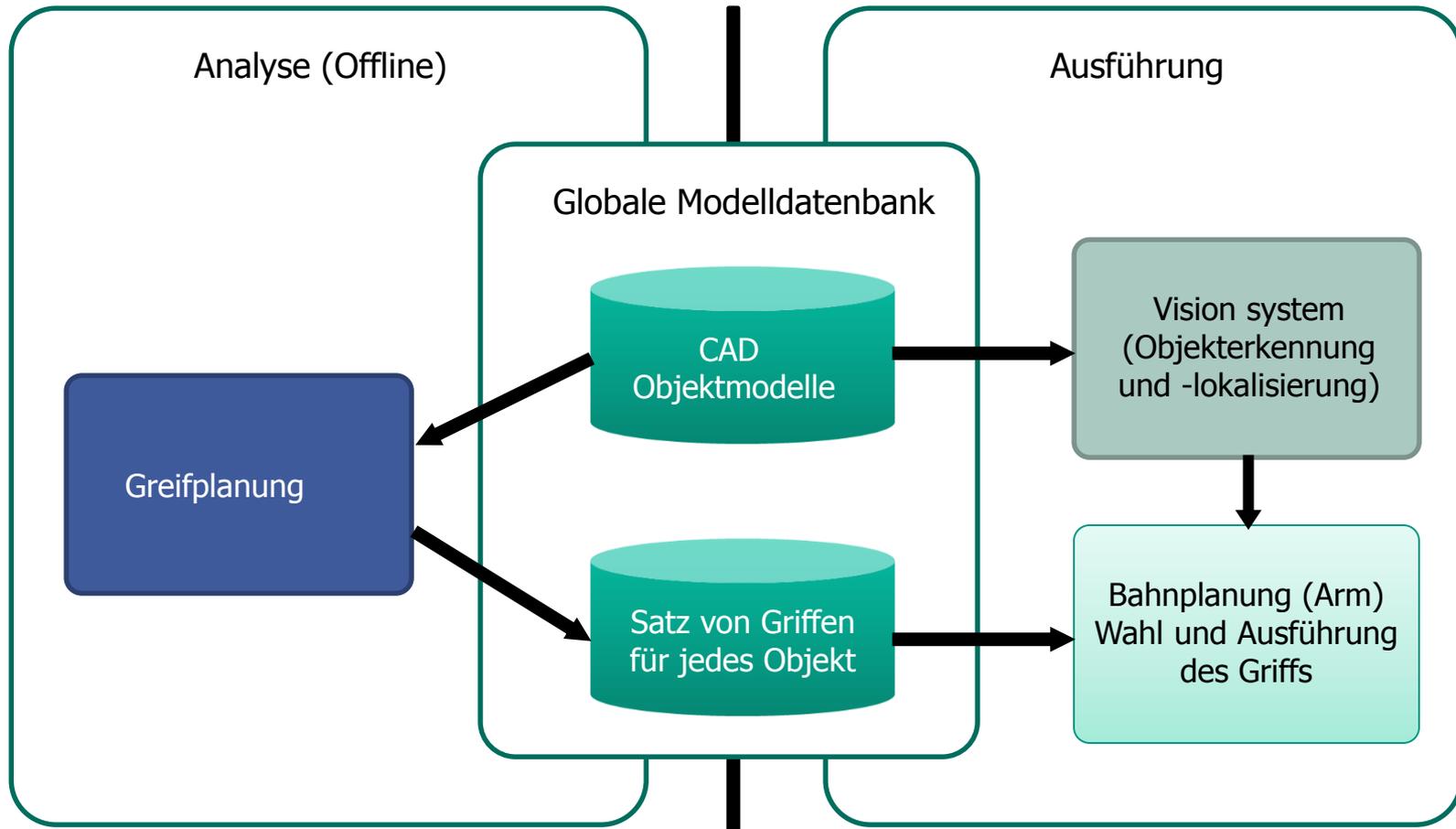
Zusammenfassung:

- Die mediale Achse enthält Informationen über Struktur und Geometrie des Objekts
- Generierung möglicher Griffe mit Heuristiken
 - Einbeziehung von Objektsymmetrie
 - Mögliche Griffe sind geometrisch “sinnvolle”
 - Hoher prozentualer Anteil von stabilen Griffen
 - Resultierende Griffe wirken “natürlich”
- Genaue Approximation der Objektgeometrie
 - Mögliche Griffe werden nicht durch eine schlecht approximierte Objektgeometrie beeinflusst
- Erweiterbares Konzept
 - Erweiterbarer Satz von Heuristiken um mögliche Griffe zur generieren



Greifen mit ARMAR

ARMAR – System zum Manipulieren und Greifen



ARMAR – Objektrepräsentation

■ Objekte aus dem Haushalt



Representation	Source	Usage
Point cloud	Object Modeling Center	Grasping based on box decomposition
Triangle mesh	Point cloud, simplified	Collision detection and visualization
Textured mesh	Additional textures	Visualization (vision simulation possible)
Vision data	Real images, synth. views	Object detection and localization

<https://h2t-projects.webarchiv.kit.edu/Projects/ObjectModelsWebUI>

- 3D Daten
 - Laserscanner Minolta "VI-900"
 - Aktive Triangulation
 - Auflösung: 640 x 480
 - Genauigkeit: kleiner 0.2 mm
 - Verschiedene Formate / Auflösungen
- Farbbilder einer Stereokamera
 - Allied Vision Technologies "Marlin 145C2,,
 - 1392 x 1038 Pixel
- XML Repräsentation
 - Meta - Daten
 - Parser



Object Modeling Center

Raptor
–
Rapid Textured Object Generator

- Generierung von 3D- Punktwolken mit Laserscanner
- Post-processing mittels Triangulation in hochaufgelösten Meshes
- Speicherung in verschiedenen Formaten(Open Inventor, VRML, Wavefront)
- Generierung von verschiedenen Objektansichten mittels Stereokameras

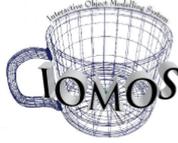
Entwickelt im Sonderforschungsbereich 588 "Humanoide Roboter"

Web
database



<https://h2t-projects.webarchiv.kit.edu/Projects/ObjectModelsWebUI>

KIT ObjectModels Web Database



KIT ObjectModels Web Database

Object Models of Household Items

Home

Show all

Search

Statistics

Information

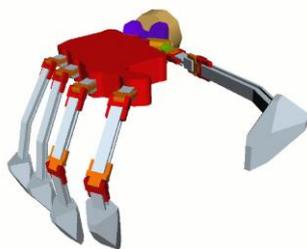
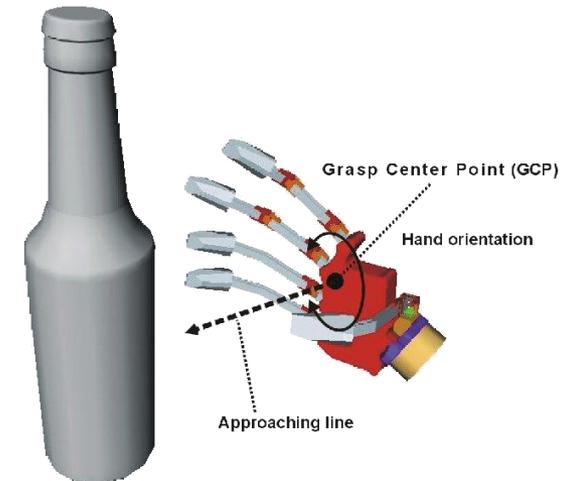
Publications & Contributors

Project all SFB588 Desire Grasp Dexmart Misc

Preview	Name	Info	Last modified	Downloads				Tags	
	OrangeMarmelade	ID: 1 ClassID: 16	2011-11-14 11:45:45	 <small>2010-10-01 15:21:20</small>	 <small>2010-10-01 15:21:35</small>	 <small>2010-10-01 15:25:59</small>	 <small>2010-10-01 15:25:41</small>	 <small>2011-11-14 11:45:45</small>	tin, metal, cylindric
	BlueSaltCube	ID: 2 ClassID: 30	2011-11-14 11:45:35	 <small>2010-10-01 14:51:49</small>	 <small>2010-10-01 14:52:20</small>	 <small>2010-10-01 14:54:19</small>	 <small>2010-10-01 14:55:49</small>	 <small>2011-11-14 11:45:55</small>	cardboard, box, blue
	YellowSaltCube	ID: 3 ClassID: 18	2010-11-24 10:03:05	 <small>2010-10-01 14:43:10</small>	 <small>2010-10-01 14:43:30</small>	 <small>2010-10-01 14:45:57</small>	 <small>2010-10-01 14:47:32</small>	 <small>2010-11-24 10:03:05</small>	cardboard, box, yellow
	FruitTea	ID: 4 ClassID: 13	2010-11-24 10:09:01	 <small>2010-10-01 21:52:29</small>	 <small>2010-10-01 21:53:00</small>	 <small>2010-10-01 21:54:56</small>	 <small>2010-10-01 21:56:27</small>	 <small>2010-11-24 10:09:01</small>	cardboard, box
	GreenSaltCube	ID: 5 ClassID: 17	2011-11-14	 <small>2010-10-01 15:21:20</small>	 <small>2010-10-01 15:21:35</small>	 <small>2010-10-01 15:25:59</small>	 <small>2010-10-01 15:25:41</small>	 <small>2011-11-14 11:45:45</small>	tin, metal, cylindric

ARMAR – Offline Griffanalyse

- Mögliche Griffe werden offline für jedes Objekt berechnet und zusammen mit dem Objekt gespeichert
- Definition eines Griffs:
 - **Griffmittelpunkt** auf dem Objekt an dem der tool center point (TCP) ausgerichtet werden soll
 - **Ansatz-Vektor** beschreibt den Winkel mit dem sich die Hand dem Griffmittelpunkt nähert
 - **Orientierung des Handgelenks** der Roboterhand
 - **Initiale Fingerkonfiguration**
- Evaluierung in Simulation



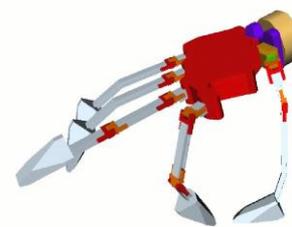
Haken



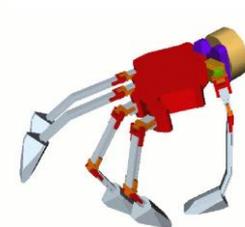
Zylindrisch



Kugelförmig



Pinzettengriff



Dreifingergriff

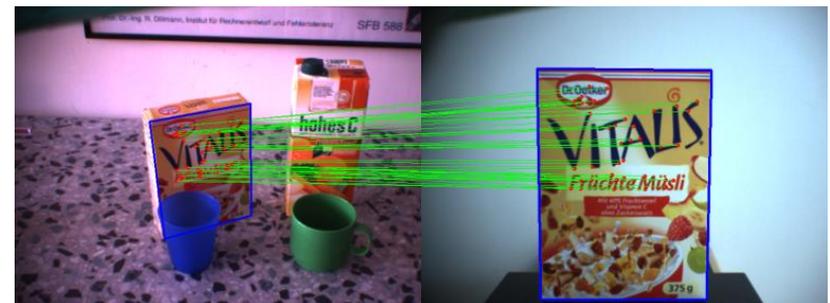
ARMAR – Objekterkennung und -lokalisierung

■ Farbige Objekte (IROS 2006, IROS 2009)

- Segmentierung nach Farbe
- Ansichtsbasierte Erkennung mit globalem Ansatz
- Modellbasierte Generierung der Ansichten
- Kombination von stereo vision und gespeicherten Orientierungsinformationen für 6D Posenschätzung

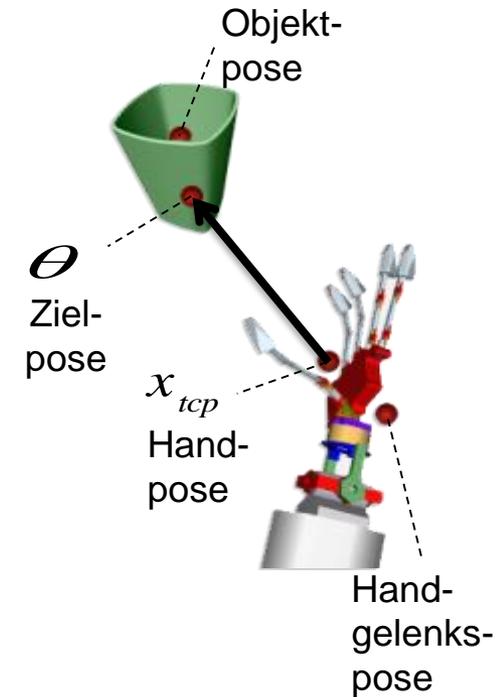
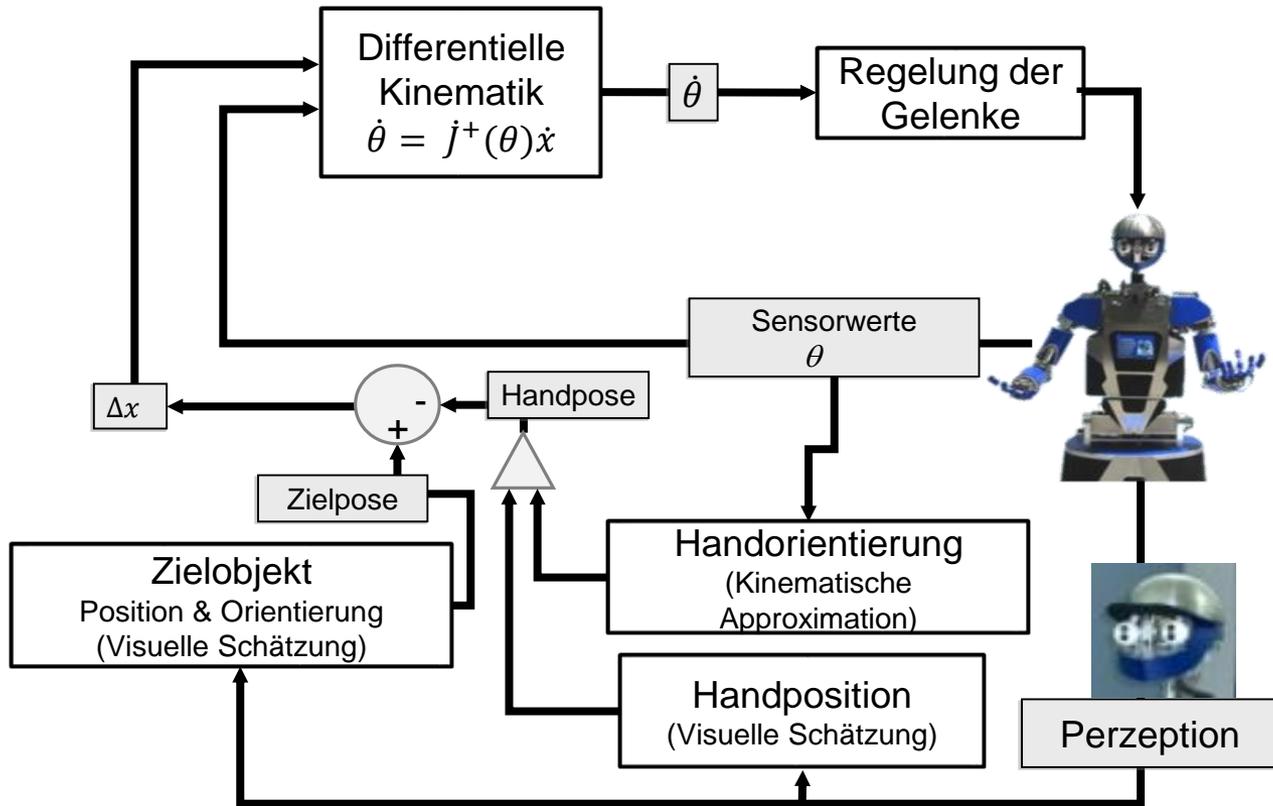
■ Texturierte Objekte (Humanoids 2006, IROS 2009)

- Erkennung mittels lokaler Eigenschaften
- Berechnung von konsistenten Eigenschaften in Bezug auf die Objektpose mit Hough-Transformation
- 2D-Lokalisierung mit Bildpunktkorrespondenzen
- 6D-Posenschätzung mittels stereo vision



Correspondences between learned view and view in scene

ARMAR - Ausführung: Positionsbasiertes Visual Servoing

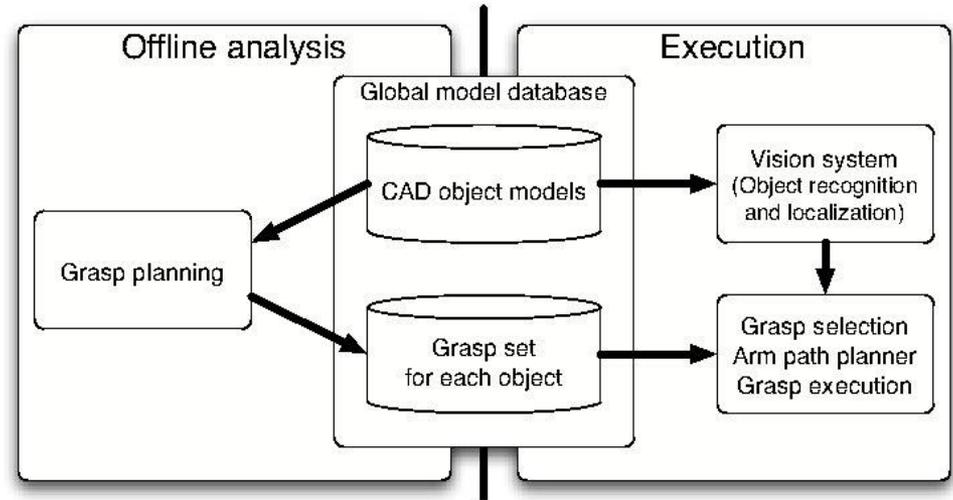
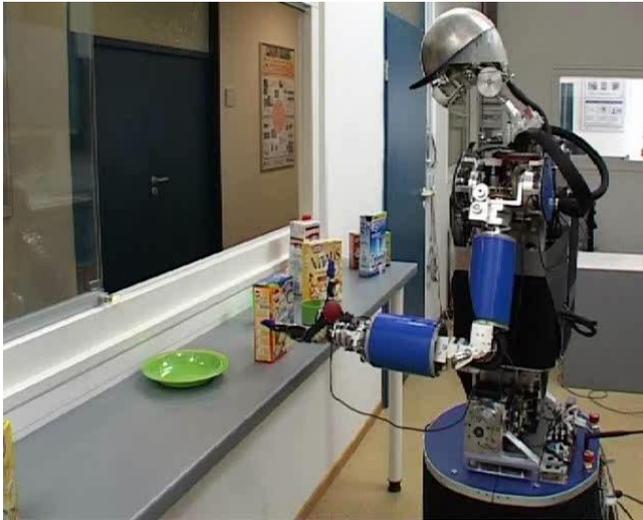


$$\dot{\theta} = j^+(\theta)\dot{x}$$

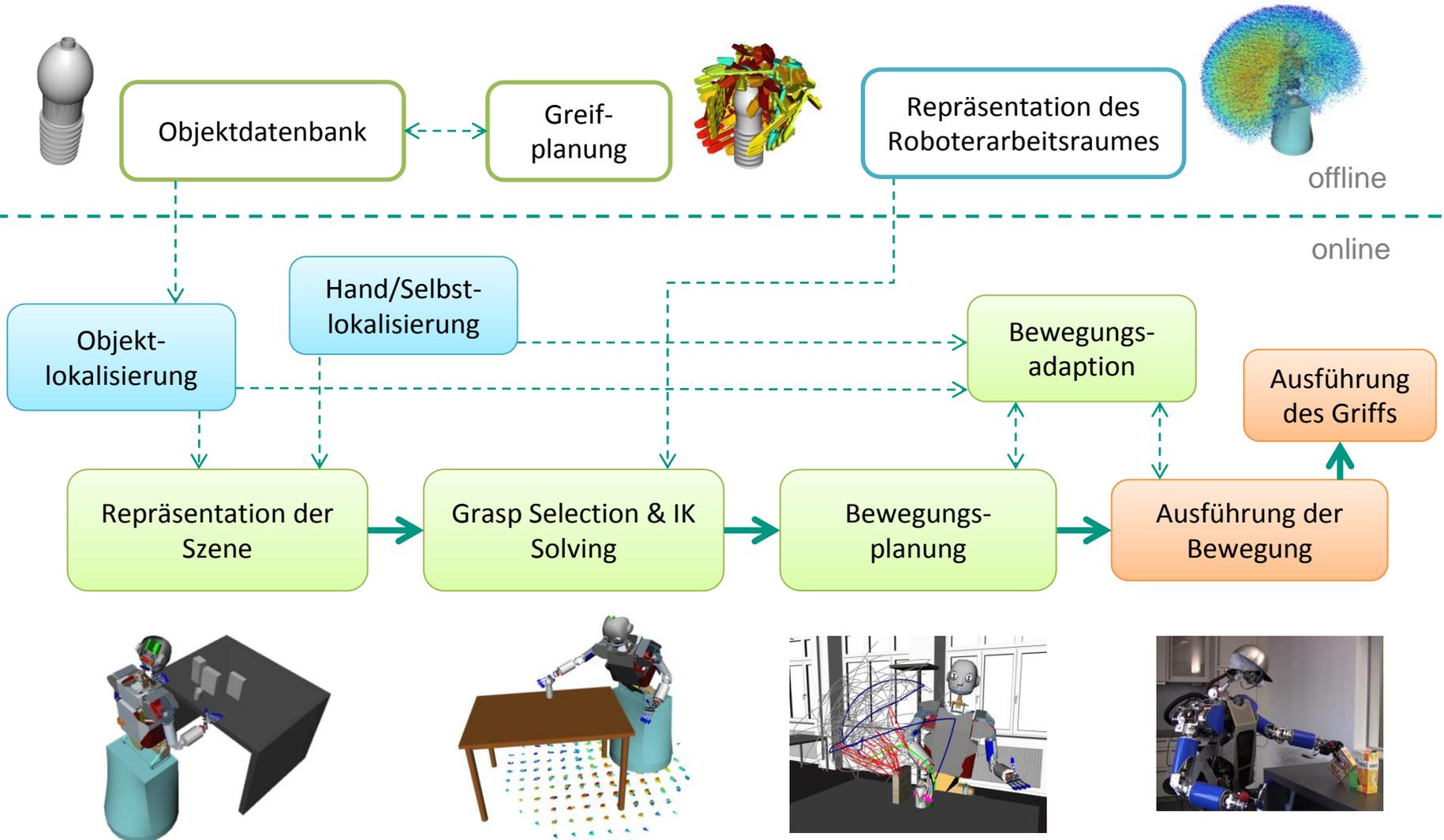
$$\delta^t = x_{vision}^t - x_{kinematic}^t$$

$$x_{tcp}^{t+1} = x_{kinematic}^{t+1} + \delta_{tcp}^t$$

ARMAR - Visual Servoing and Grasping

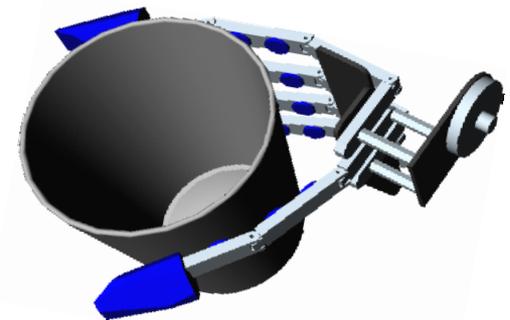
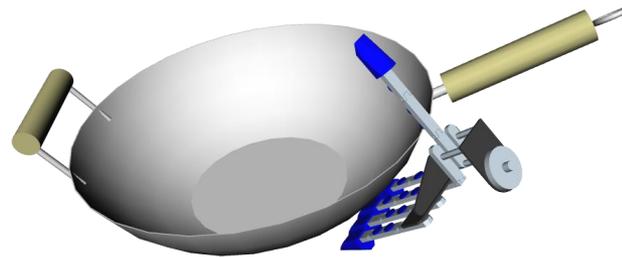


ARMAR – Grasping Pipeline

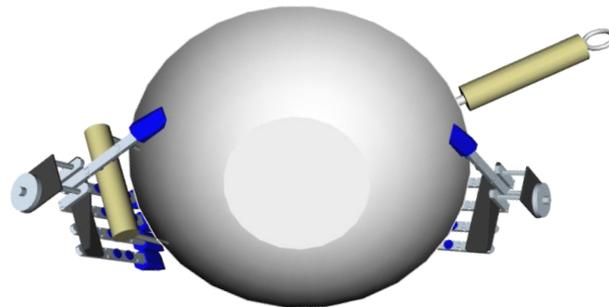


3D-Objektmodelle mit Griffinformationen

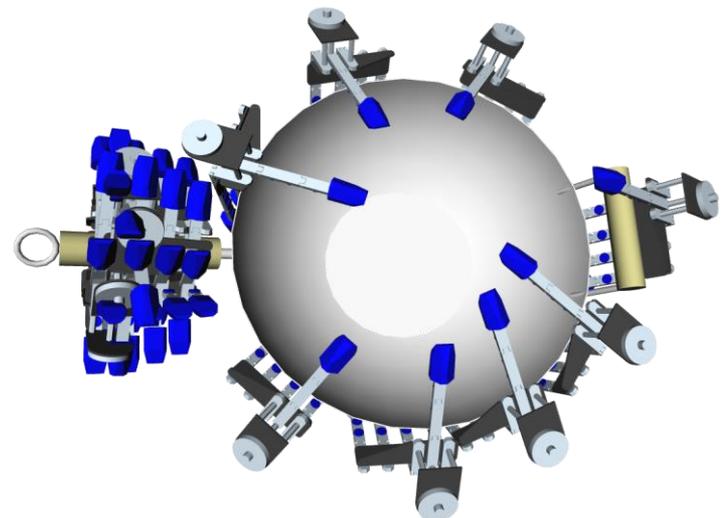
- Einhändige Griffe



- Zweihändige Griffe



- Verschiedene Griffvarianten



Posturale Synergien and Eigengrasps

Stellungssynergien

- Fragen:
 - Wie greifen Menschen?
 - Kontrollieren sie jeden Freiheitsgrad ihrer Hände einzeln?
- Antwort aus Experimenten zum menschlichen Greifen
 - *"Experimental evidence indicates that the simultaneous motion and force of the fingers are characterized by coordination and covariation patterns that reduce the number of independent degrees of freedom to be controlled."* (Bicchi et al., 2011)
- Mit anderen Worten:
 - Nicht alle Fingergelenke werden beim Greifen unabhängig voneinander bewegt
 - Die Bewegung der Fingergelenke korreliert stark
 - Griffbewegungen werden dominiert durch Synergien in einem (niedrigdimensionalen) **Stellungsraum** (*posture space*)
- Was sind **Stellungssynergien** (*postural synergies*)?
 - *"Postural synergies are the correlation of degrees of freedom in patterns of more frequent use"* (Bicchi et al., 2011)

Stellungssynergien: Experiment

- Probanden führten Greifbewegungen für 57 verschiedene Objekte durch
- Es wurden keine realen Objekte gezeigt, die Probanden sollten sich die Objekte vorstellen und ihre Hand in eine passende Greifstellung bewegen

Antonio Bicchi, Marco Gabiccini, Marco Santello. *Modelling natural and artificial hands with synergies*, Philosophical Transactions of the Royal Society B, 366: 3153-3161 (2011)

Table 1. List of objects used in the task

1. Apple	30. Hammer
2. Banana	31. Ice cube
3. Baseball	32. Iron
4. Beer bottle	33. Jar lid
5. Beer mug	34. Kitchen knife
6. Brick	35. Knob of a lid
7. Bucket	36. Knob of a stove
8. Calculator	37. Light bulb
9. Chalk	38. Milk carton
10. Cherry	39. Needle
11. Chinese tea cup	40. Notebook
12. Cigarette	41. Pen
13. Circular ashtray	42. Playing card
14. Coffee mug	43. Rope
15. Comb	44. Scissors
16. Compact disc	45. Screwdriver
17. Computer mouse	46. Stapler
18. Dictionary	47. Sugar cone
19. Dinner plate	48. Teaspoon
20. Dog dish	49. Telephone handset
21. Door key	50. Tennis racket
22. Door knob	51. Toothbrush
23. Drawer handle	52. Toothpick
24. Egg	53. Turtle
25. Espresso cup	54. Umbrella
26. Fishing rod	55. Wafer
27. Frisbee	56. Wrench
28. Frying pan	57. Zipper
29. Hair dryer	

Stellungssynergien: Experiment

- Die Handbewegungen wurden über einen Handschuh mit 15 Sensoren aufgezeichnet (CyberGlove)
- Messrate: 120 Hz
- Jede Handstellung wird über eine Gelenkwinkelkonfiguration eines Modells der menschlichen Hand mit 15 DOF beschrieben

Circular ashtray



Frying pan



Zipper



Computer mouse



Light bulb



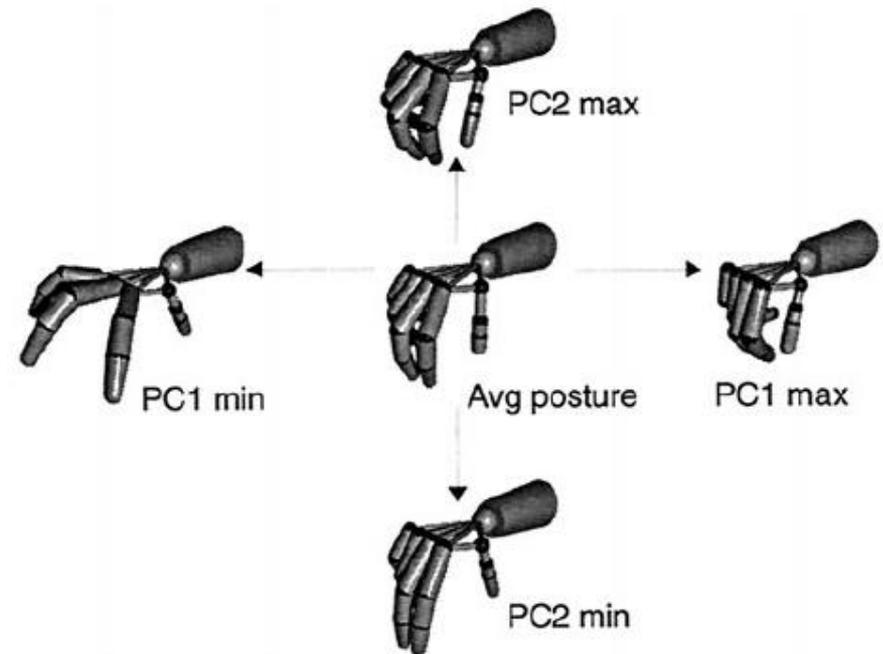
Beer mug



Stellungssynergien: Ergebnisse

■ Hauptkomponentenanalyse

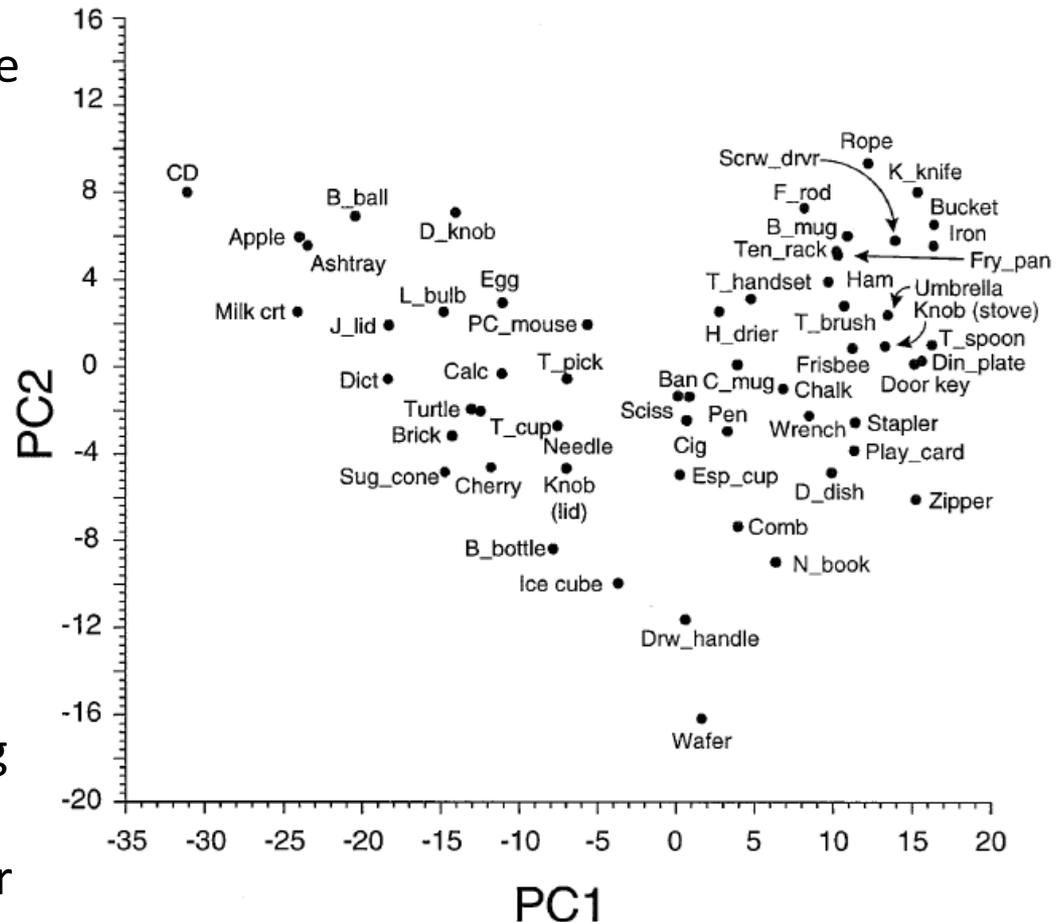
- Beim Greifen bewegt sich die Hand in einem niedrigdimensionalen Unterraum
- Mit den **ersten beiden Hauptkomponenten** kann **80%** der Varianz in den Daten beschrieben werden
- Mit den **ersten drei Hauptkomponenten** kann **97%** der Varianz in den Daten beschrieben werden



- Stellungssynergien aus den ersten beiden Hauptkomponenten (**PC1** und **PC2**)
- Die Handstellung im Schnittpunkt der Hauptachsen ist die mittlere Handstellung der 57 aufgenommenen Griffe
- Die Abbildungen wurden mit gleichbleibender Handorientierung erzeugt

Stellungssynergien: Ergebnisse

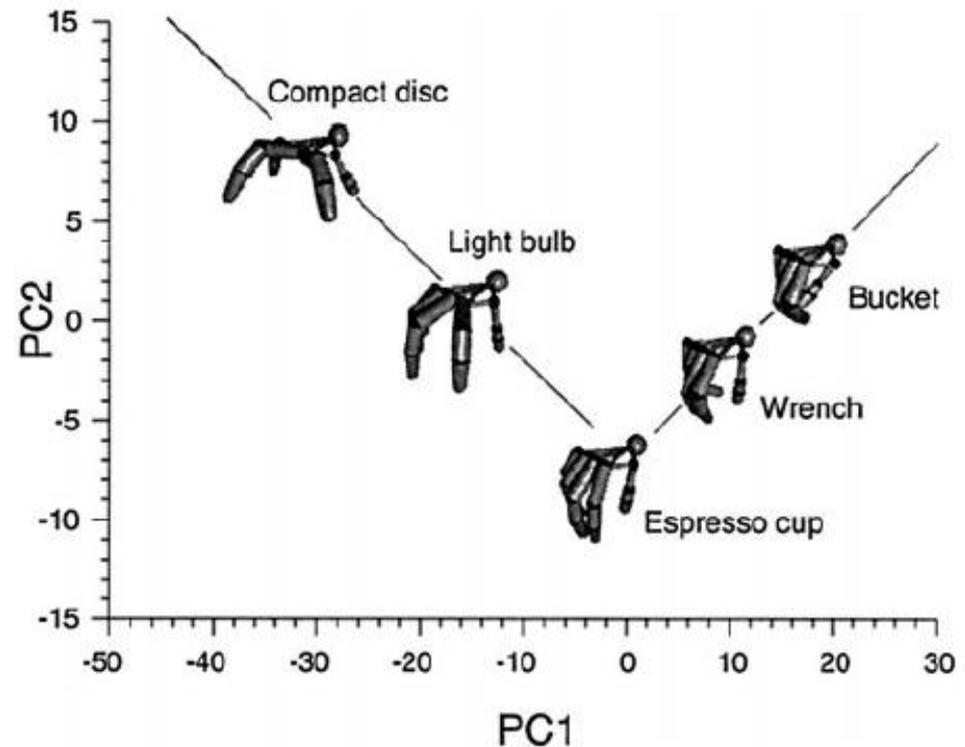
- Verteilung der Handstellungen in der Ebene der ersten beiden Hauptkomponenten
- Zeigt die Koeffizienten der ersten beiden Hauptkomponenten für jeden der 57 Griffe eines Probanden
- Auffällig: Keine Gruppierung sowie Verteilung der Koeffizienten entlang zweier Hauptachsen



Stellungssynergien: Ergebnisse

■ Hauptkomponentenanalyse

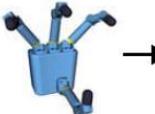
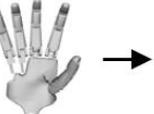
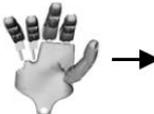
- Beim Greifen bewegt sich die Hand in einem niedrigdimensionalen Unterraum
- Mit den **ersten beiden Hauptkomponenten** kann **80%** der Varianz in den Daten beschrieben werden
- Mit den **ersten drei Hauptkomponenten** kann **97%** der Varianz in den Daten beschrieben werden



Interpolation zwischen verschiedenen Handstellungen

Eigengrasps zur Greifsynthese

- Der Eigengrasp Ansatz kann auch zur Griffsynthese verwendet werden (Details siehe Ciocarlie et al. 2007)

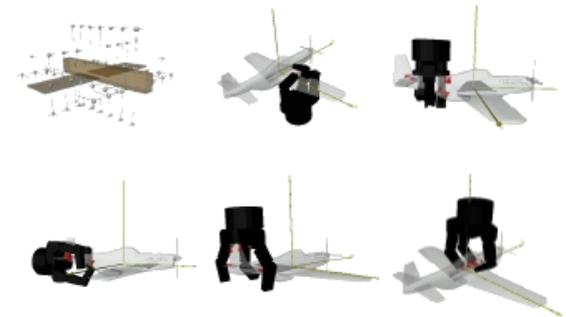
Model	DOFs	Eigengrasp 1			Eigengrasp 2		
		Description	min	max	Description	min	max
Gripper	4	Prox. joints flexion			Dist. joints flexion		
Barrett	4	Spread angle opening			Finger flexion		
DLR	12	Prox. joints flexion Finger abduction			Dist. joints flexion Thumb flexion		
Robonaut	14	Thumb flexion MCP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

Matei Ciocarlie, Corey Goldfeder, Peter Allen. *Dimensionality reduction for hand-independent dexterous robotic grasping*, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), (2007)

Software

■ GraspIt!

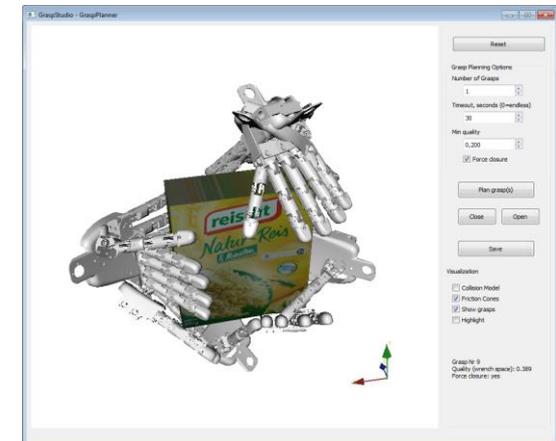
- Entwickelt von Columbia University Robotics Group
- C++ Source Code: <http://graspit-simulator.github.io/>



■ Simox

- Entwickelt von H2T, KIT
- C++ Source Code: <https://gitlab.com/Simox/simox>
- Dokumentation: <https://gitlab.com/Simox/simox/wikis>

- VirtualRobot: Robot Simulation
- Saba: Motion Planning Library
- GraspStudio: Grasp Planning Library



ZUSATZMATERIAL

Medial Axis Planner: Limitations

- Problems with slice structures
 - For complex objects, there are too many different kinds of slice structures, and each one has to be considered separately.
 - Too many parameters, heuristics, threshold constants...
- Better solution (Grid of medial spheres):
 - Consider complete medial axis transform (MAT = spheres including radii)
 - No slicing of the MA
 - Instead: Principal component analysis of sphere centers in a local environment around a query sphere
 - Only two cases for candidate grasp generation:
 - Spheres located on local symmetry axis → generate candidate grasps
 - Spheres located on the rim of local symmetry plane → generate candidate grasps
 - Spheres located inside a local symmetry plane (not interesting for grasping)

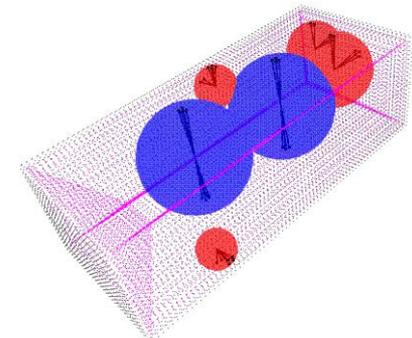
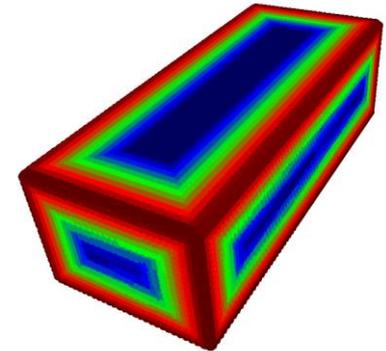
Grid of medial spheres grasp planner

- Based on the medial axis transform → Contains object's symmetry properties
- **In addition:** efficient access to spheres in local neighborhood (grid-based spatial indexing):

$$\begin{pmatrix} i_x \\ i_y \\ i_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lfloor n_x(x - x_{min}) / (x_{max} - x_{min}) \rfloor \\ \lfloor n_y(y - y_{min}) / (y_{max} - y_{min}) \rfloor \\ \lfloor n_z(z - z_{min}) / (z_{max} - z_{min}) \rfloor \end{pmatrix}$$

- Attributes of each sphere:

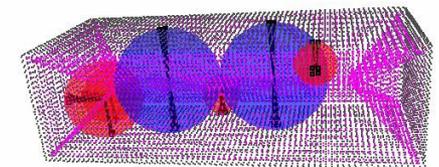
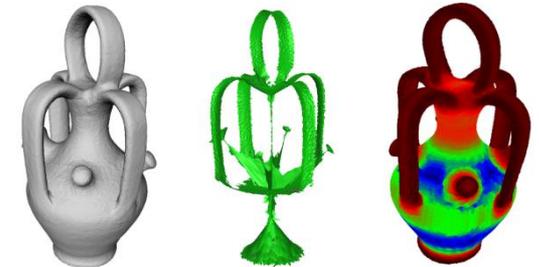
- Center
- Radius
- Points where the sphere touches the object's surface
- Object angle: maximum angle included by the sphere's center and two surface points touched by the sphere.
- Example:
 - Blue spheres: object angle $\sim 180^\circ$
 - Red spheres: object angle $\sim 90^\circ$



Object representation for grasp planning

■ *Grid of medial spheres*

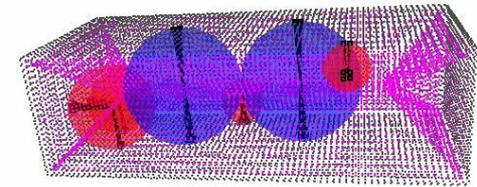
- Based on the Medial Axis Transform (MAT) [Blum67]
- Contains object's symmetry properties
- Additional: efficient access to spheres in local neighborhood
- Attributes of each sphere:
 - Center
 - Radius
 - Points where the sphere touches the object's surface
 - Object angle: maximum angle defined by the sphere's center and two surface points touched by the sphere



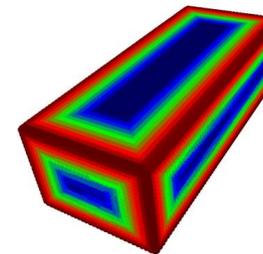
Blue spheres: object angle $\sim 180^\circ$
 Red spheres: object angle $\sim 90^\circ$

Selecting spheres for grasp planning

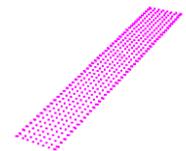
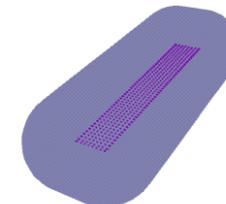
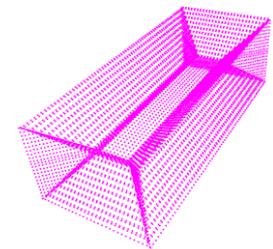
- Which spheres are important for grasp planning?
- Rough structure (occupied volume) vs. surface details of the object
- Goals:
 - Exploit local symmetry planes / axes for grasp planning
 - Generate grasps with two opposed virtual fingers
- Main parameters:
 - Object angle
 - Sphere radius
- Grasp planning:
 - Consider only spheres with object angle $\geq 120^\circ$
 - This removes edges and corners of the object
 - Symmetry planes and axes are preserved



Grid of medial spheres

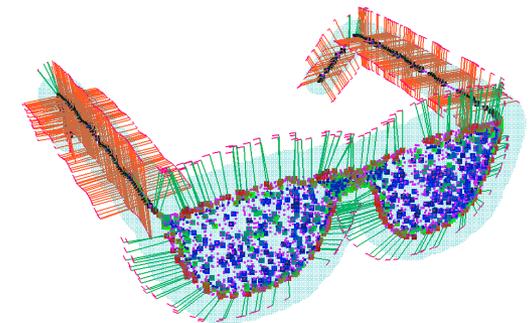
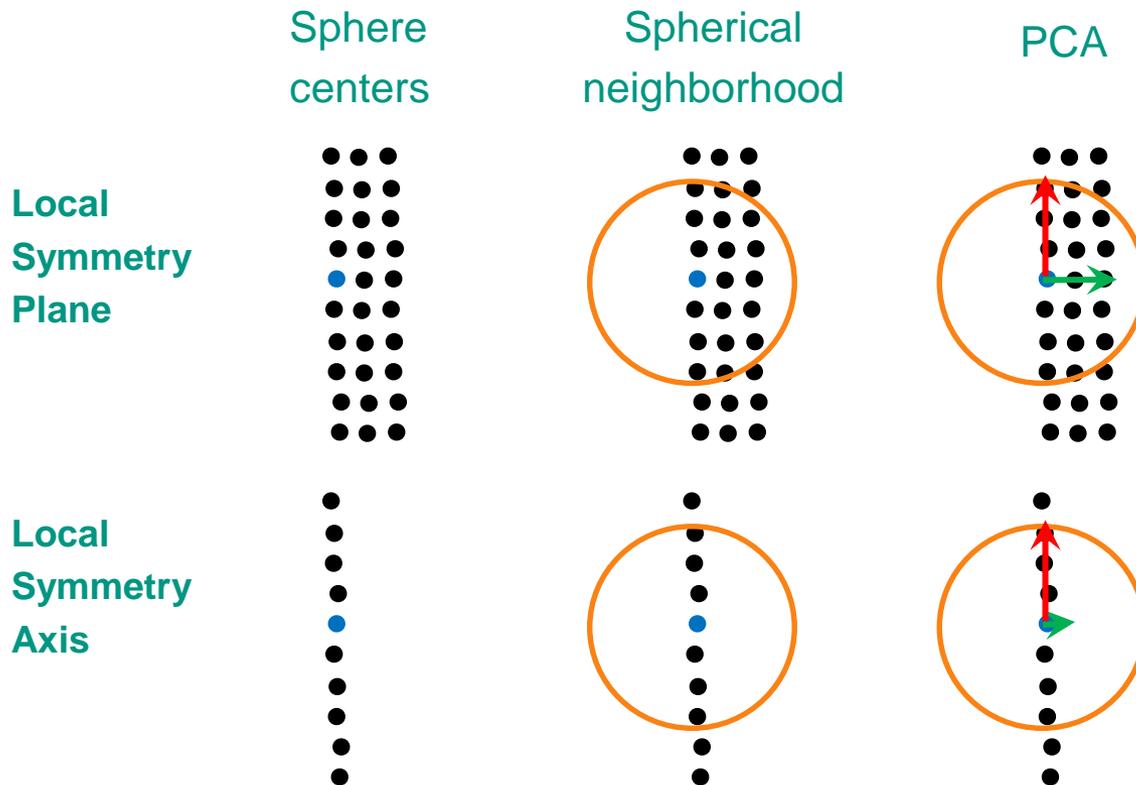
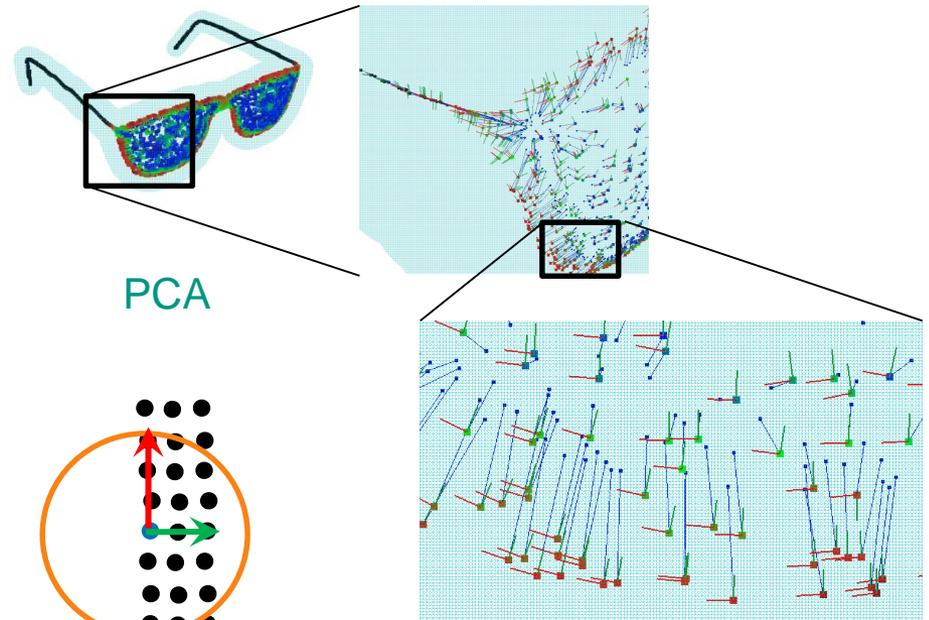


Medial Axis



Grasp planning algorithm using MAT and PCA

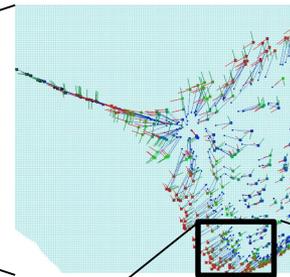
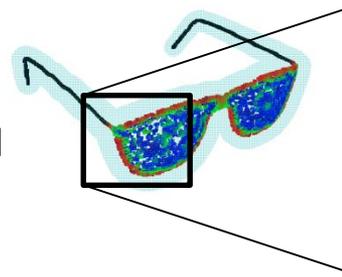
Estimate symmetry properties of sphere centers in each sphere's local neighborhood



Hand approach directions

Analyzing an object's symmetry properties

- Estimate symmetry properties of sphere centers in each sphere's local neighborhood



- Principal Component Analysis:

- Directions of eigenvectors
- Ratio of eigenvalues

$$\rho_{ev} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$$

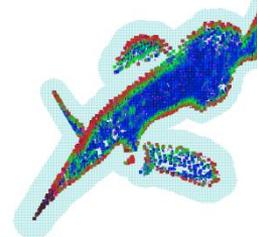
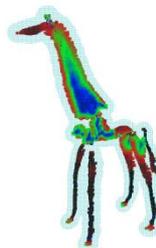
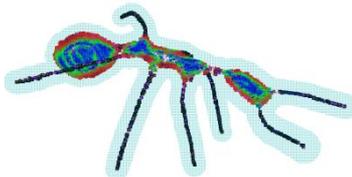
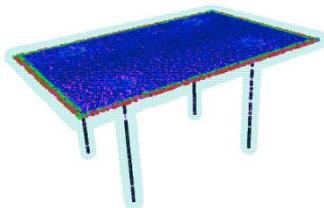
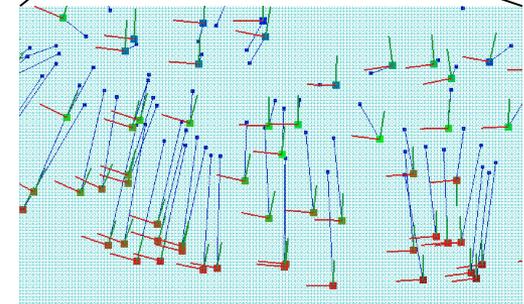
- Classification of spheres:

- On local symmetry axis
- On local symmetry plane
 - At the rim
 - Inside the plane

$$\rho_{ev} \leq \rho_{axis}$$

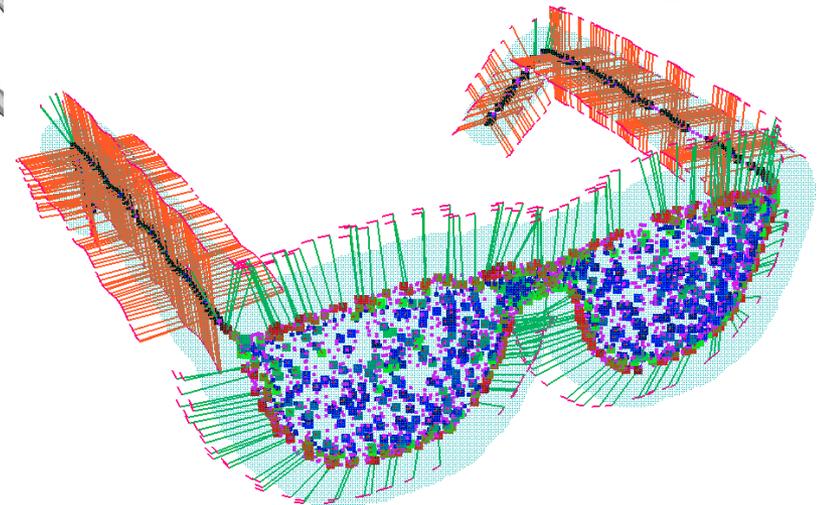
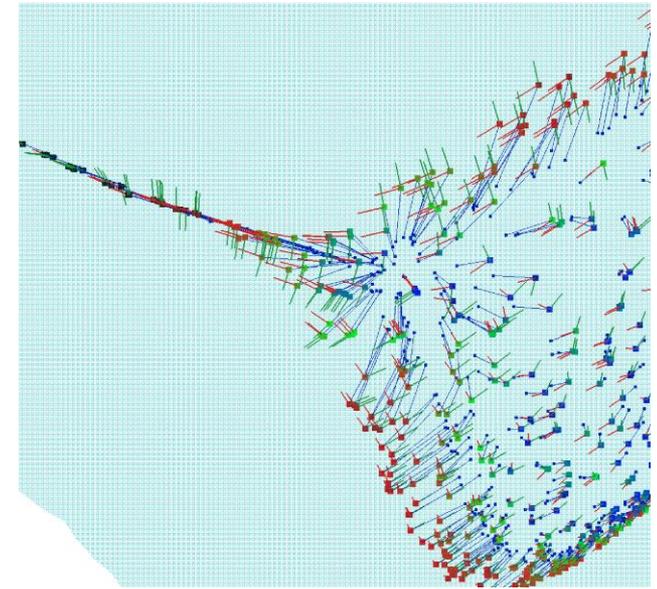
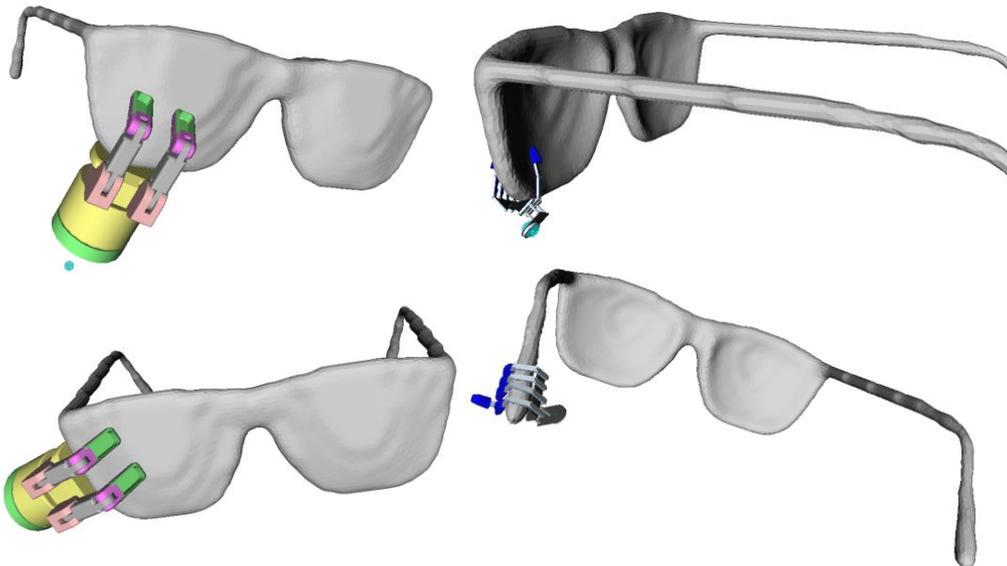
$$\rho_{axis} \leq \rho_{ev} \leq \rho_{plane}$$

$$\rho_{ev} > \rho_{plane}$$

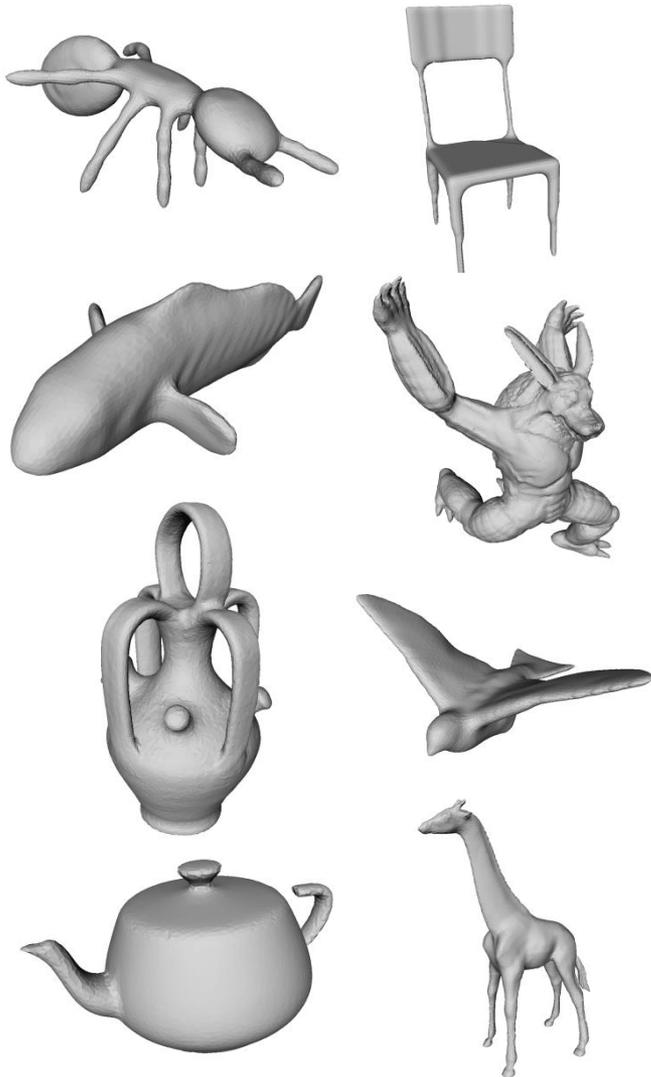


Generating candidate grasps

- Symmetry axis
 - Hand approach directions perpendicular to local symmetry axes
- Rim of symmetry plane
 - Hand approach directions perpendicular to local symmetry planes

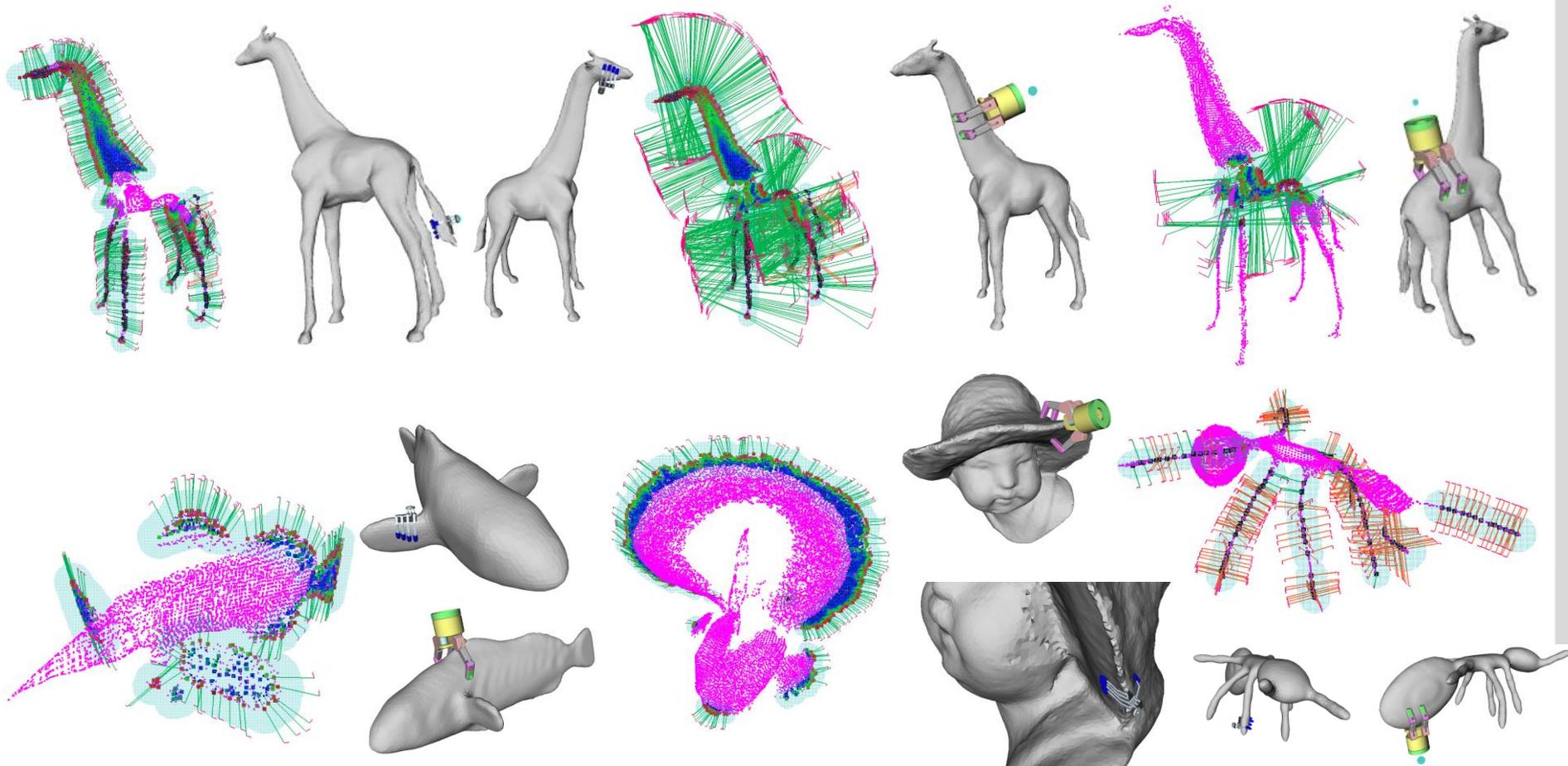


Candidate grasps: some examples

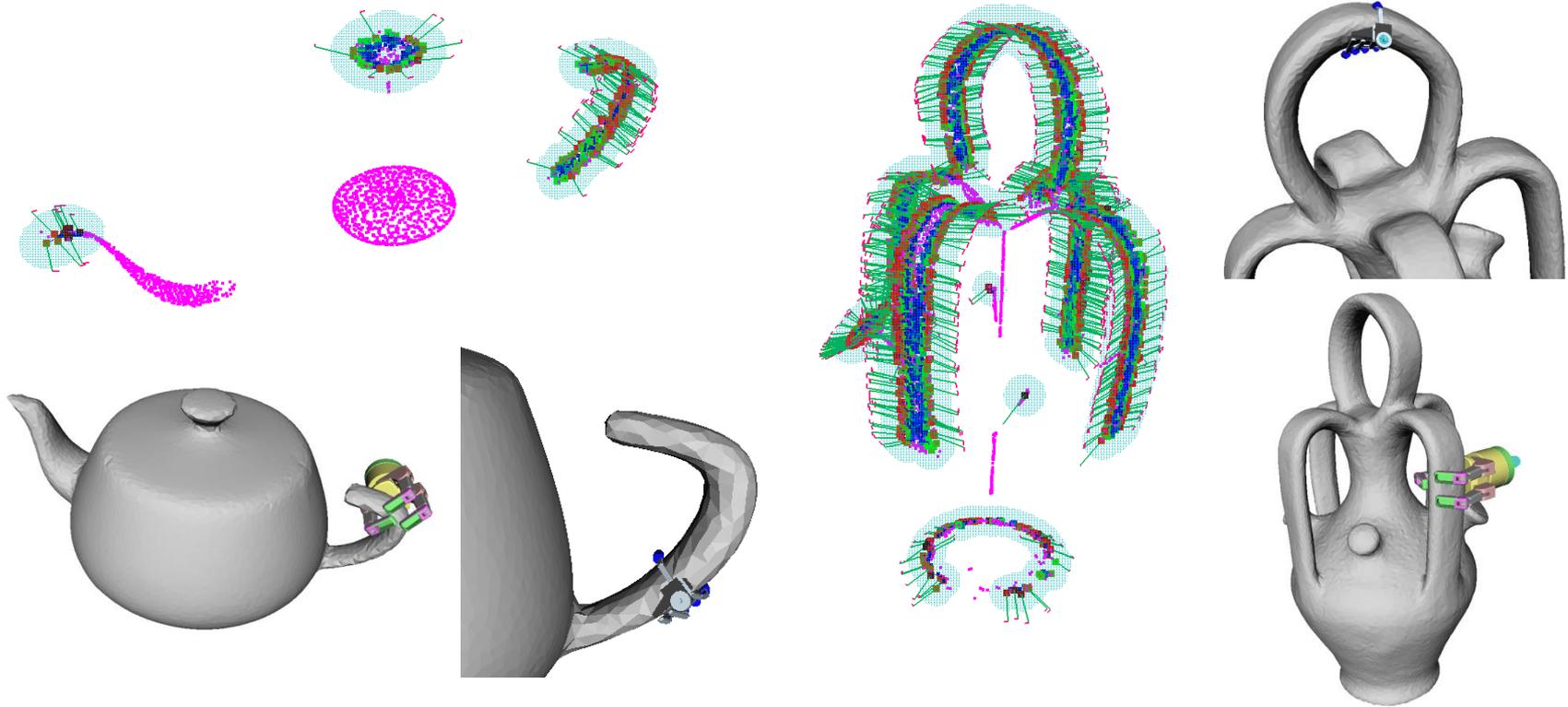


Advantages: Hand size vs. Object size

- Respect maximum sphere diameter graspable by the robot hand
- Optional: do not generate grasps for „small“ spheres



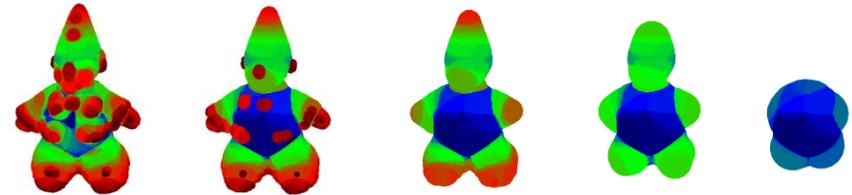
Advantages: Grasps on handles



- For big objects, the algorithm finds many grasps at the handles
 - Simply due to geometric considerations, as the hollow bodies are too big to grasp
 - No semantic knowledge (task dependency) necessary

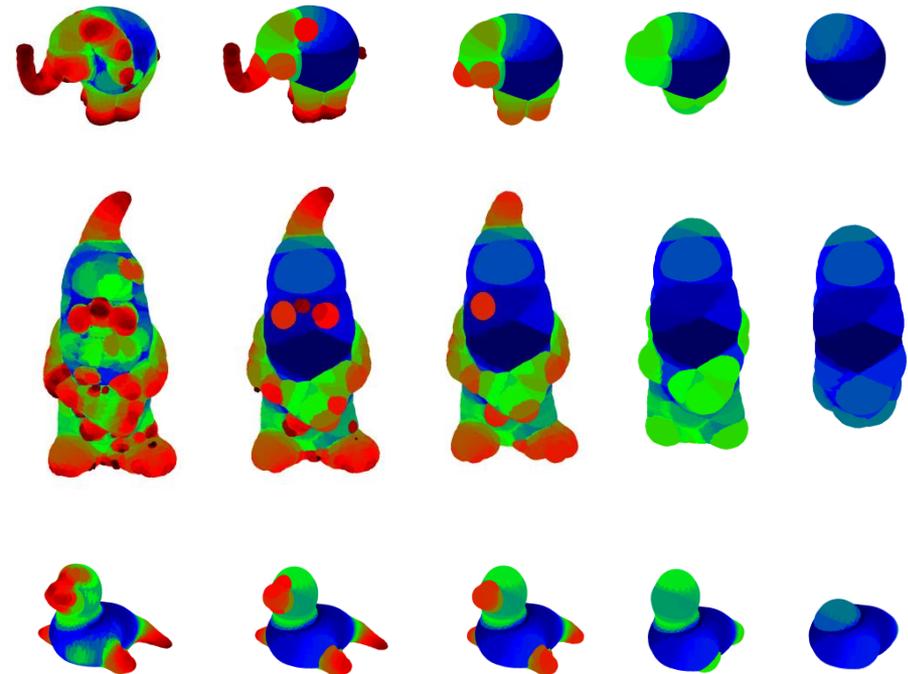
Dealing with surface details

- Surface details might disturb the planner.
 - Example: We don't want to plan grasps for the lawn gnome's nose.



- Solution: Discard small spheres and spheres with small object angles

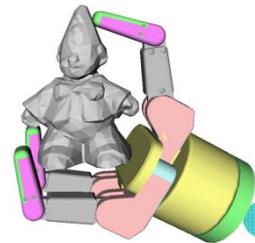
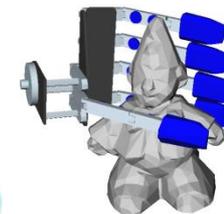
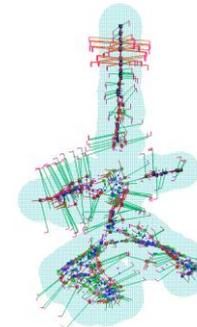
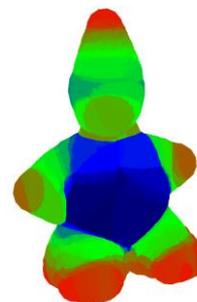
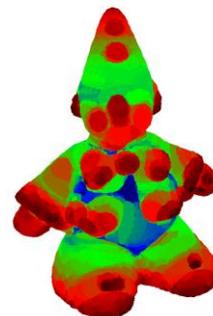
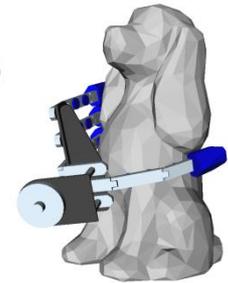
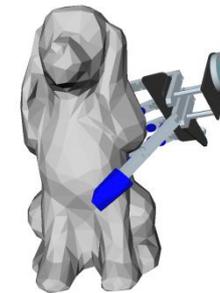
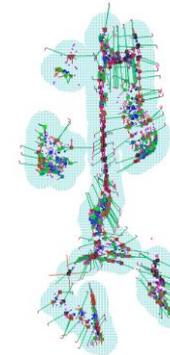
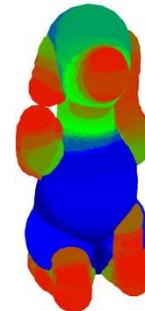
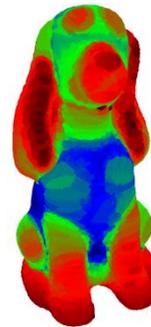
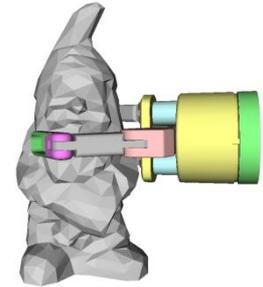
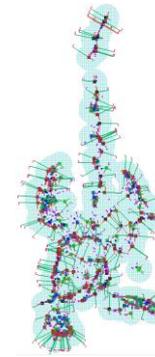
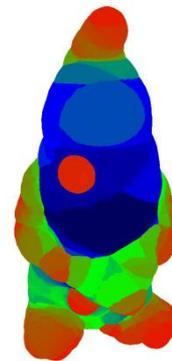
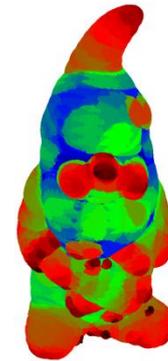
- Column 1: All spheres
- Column 2: Only spheres with object angle $\geq 120^\circ$
- In addition: Discard spheres with small radii compared to biggest sphere in the object:
 - Column 3: $r < 0.3r_{max}$
 - Column 4: $r < 0.5r_{max}$
 - Column 5: $r < 0.7r_{max}$



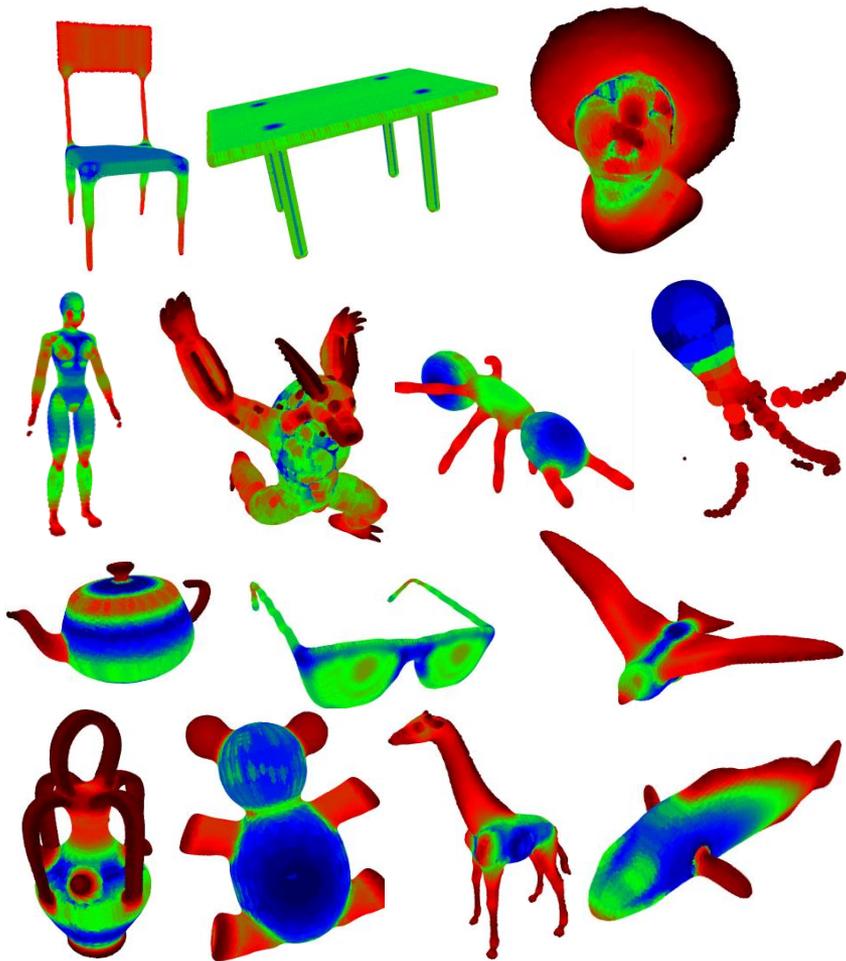
(r_{max} : Radius of the biggest sphere in the object)

Advantages: Surface details

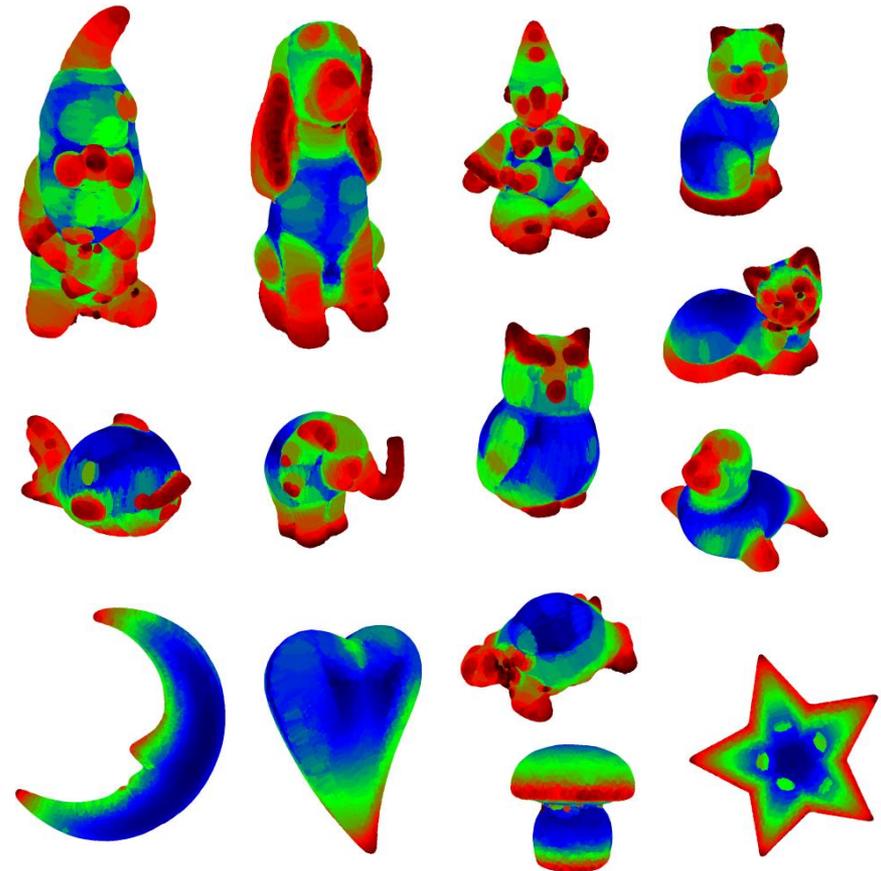
- How to deal with surface details?
- Solution: discard „small“ spheres
- Planner considers only rough geometry of the object.



Object sets for testing

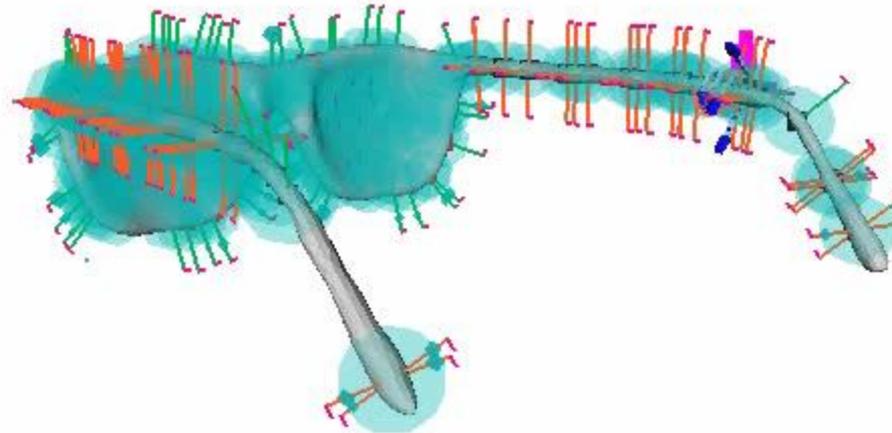


■ Chen Mesh Segmentation Benchmark
[Chen2009]



■ Real objects

Force-closure testing



Results

Chen benchmark

Objects	ARMAR-III hand		Barrett hand	
	scale 1.0	scale 0.5	scale 1.0	scale 0.5
1 Female doll	71.3%	54.6%	53.13%	37.9%
41 Glasses	93.9%	7.8%	73.7%	10.7%
81 Ant	94.4%	71.1%	61.3%	45.7%
101 Chair	89.6%	49.2%	73.9%	72.2%
125 Octopus	53.7%	55.2%	26.9%	44.7%
141 Table	91.9%	92.5%	94.6%	85.0%
161 Teddy	100.0%	83.3%	86.7%	51.2%
225 Fish	76.5%	83.3%	68.4%	81.1%
245 Bird	75.0%	68.3%	75.0%	65.6%
290 Monster	70.5%	64.7%	67.8%	38.2%
305 Bust	50.0%	70.0%	100.0%	92.9%
361 Vase	76.8%	65.3%	69.6%	55.1%
379 Tea kettle	78.9%	63.2%	75.7%	31.3%
390 Giraffe	85.5%	68.3%	71.4%	56.0%

Real objects

Objects	ARMAR-III hand	Barrett hand
1001 Clown	63.5%	61.2%
1002 Elephant	75.3%	76.0%
1003 Owl	78.0%	68.2%
1004 Spheric fish	59.0%	78.3%
1005 Lawn gnome	53.1%	57.7%
1006 Heart	89.0%	77.0%
1008 Dog	63.7%	69.2%
1009 Sitting cat	64.9%	59.5%
1010 Lying cat	80.7%	80.7%
1012 Moon	58.9%	64.4%
1013 Mushroom	80.0%	55.5%
1014 Turtle	57.1%	70.3%
1015 Seal (Seehund)	73.5%	59.2%
1016 Star	44.4%	66.7%

Experiments:

Hand models:

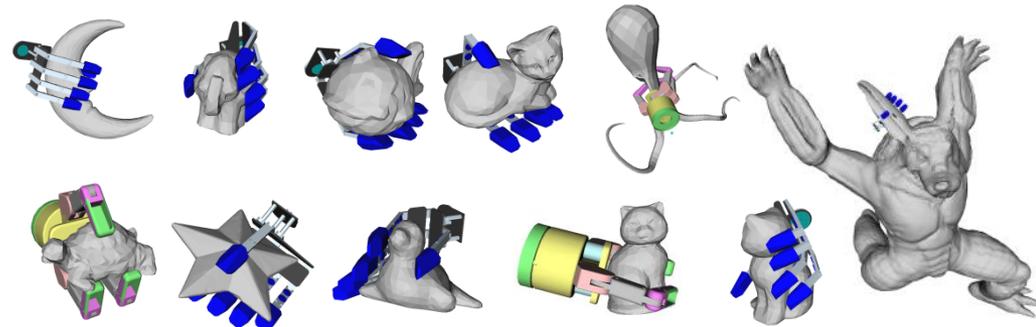
- ARMAR-III
- Barrett

Object models:

- Chen benchmark
 - 100% scaled objects
 - 50% scaled objects
- Real objects

Results:

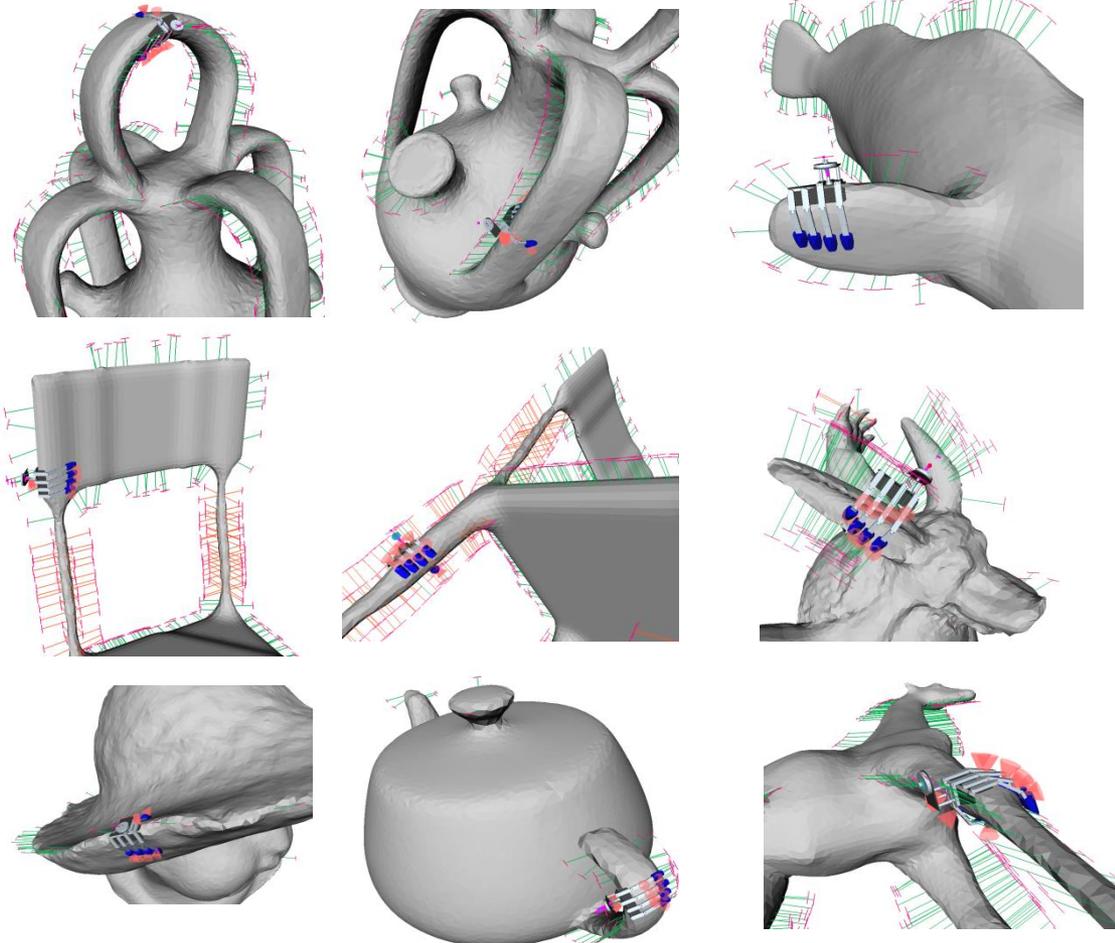
- Mostly >50% of the generated candidates are force-closure grasps



Results (Power grasps for big objects)

Comparison to method based on surface normals [Berenson07]

Planner type	MAT	Berenson [34]
$r_{o,min}$	0.0	n.a.
r_N	0.06m	n.a.
Glasses	67.1%	14.1%
Ant	95.3%	15.3%
Chair	88.0%	14.4%
Fish	57.3%	0.8 %
Bird	66.8%	2.7 %
Monster	63.0%	4.7 %
Bust	41.6%	0.0 %
Vase	75.7%	3.6 %
Tea kettle	87.5%	1.9 %
Giraffe	89.5%	20.0%
Average	73.2%	7.7 %



Summary

- *Grid of medial spheres* object representation:
 - Based on the medial axis transform
 - Volumetric approximation
 - Arbitrary level of detail
 - Symmetry properties as part of the object representation

- Grasp planning algorithm:
 - For arbitrarily shaped objects
 - Generates geometrically meaningful candidate grasps
 - Further advantages:
 - Hand size and object size considered
 - Grasps on handles simply due to geometric considerations
 - Surface details can be ignored, if necessary
 - High ratio of force-closure grasps

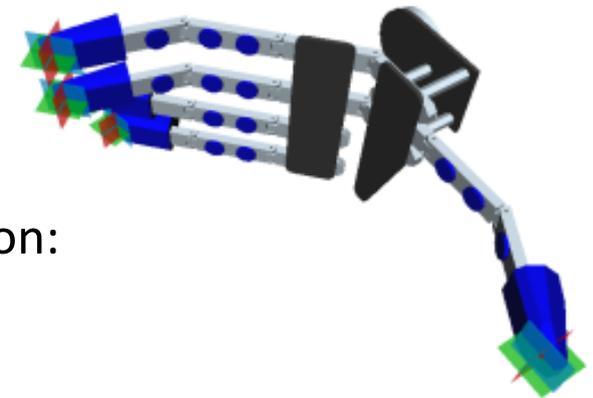
Planning precision grasps

■ Problem:

- Planning precision grasps requires simultaneous determination of hand pose and finger joint angle

■ Idea:

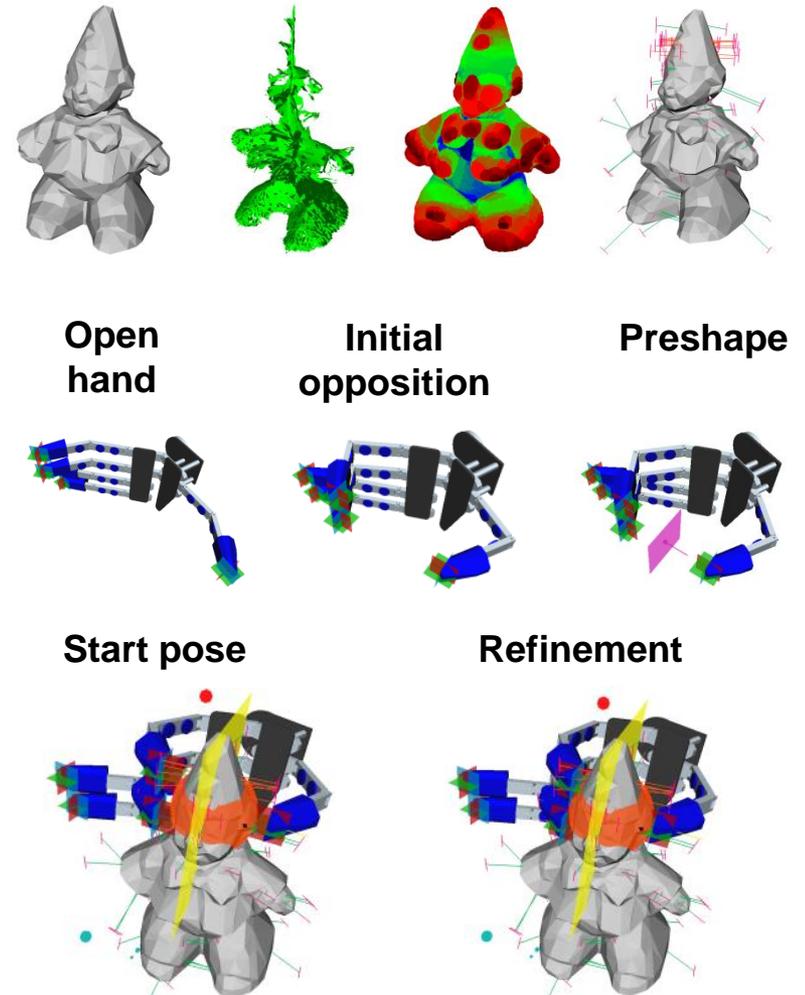
- Define desired contact areas at fingertips
- Preshape and first guess for hand pose based on:
 - Object symmetry information
 - Contact areas
- Refine hand pose and configuration while closing the fingers



Algorithm: Planning precision grasps

1. Generate candidate grasps using the Medial Axis Transform (MAT).
 - Move hand to a configuration with initial opposition of predefined parallel contact areas.
 - Move the hand to the preshape configuration.
 - Extract grasp center transformation
 - Set hand to start pose
 - Discard candidate, if the hand is initially in collision with object.
3. Refinement of hand pose and configuration:
 - Close fingers, while maintaining parallel orientation of desired contact areas on the fingertips.
 - Compensate for translational fingertip movement by moving the TCP in the opposite direction.
4. Test for force-closure

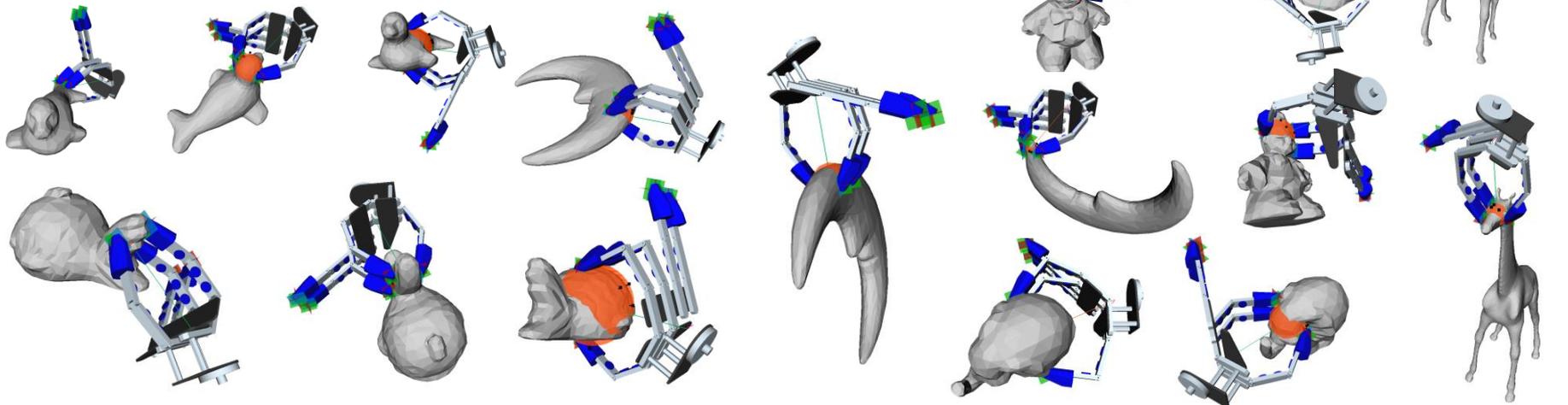
Candidate grasp generation based on MAT



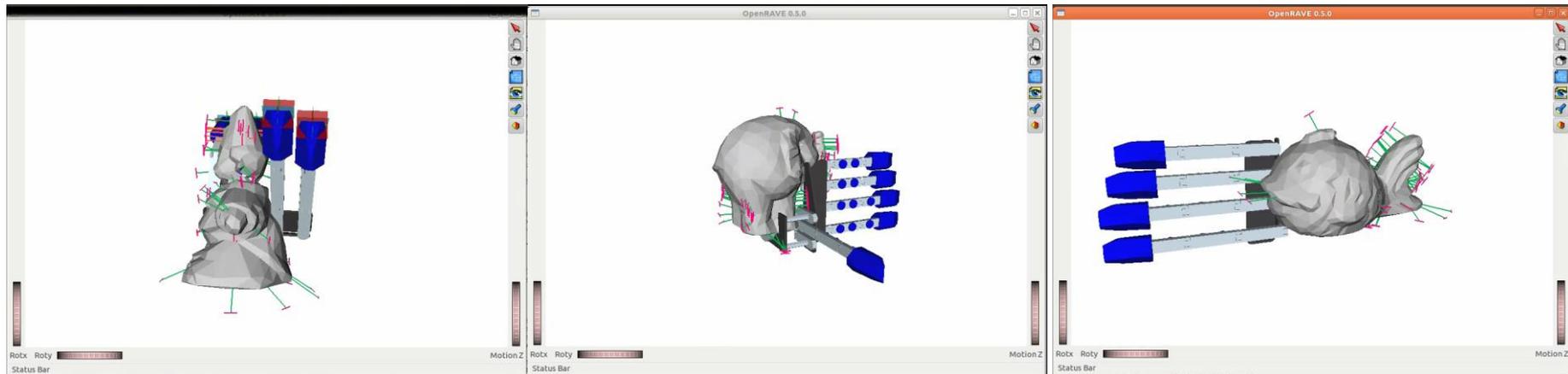
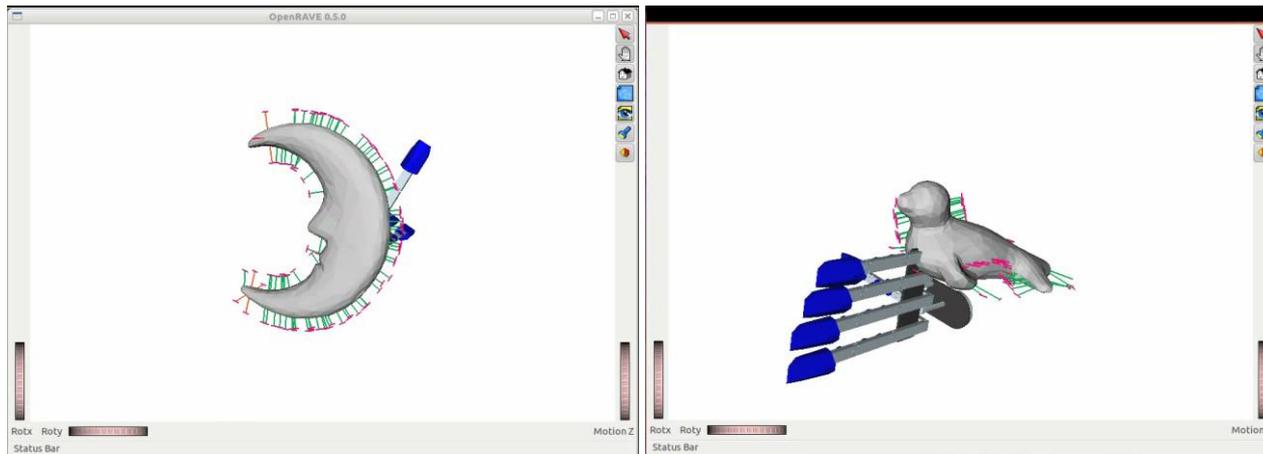
Results (Precision grasps)

Comparison to method based on surface normals [Berenson07]

Planner type	MAT				Berenson [34]
	0.0		0.3 $r_{o,max}$		
$r_{o,min}$	0.0		0.3 $r_{o,max}$		n.a.
r_N	0.01m	0.03m	0.01m	0.03m	n.a.
Clown	27.7%	15.8%	41.3%	29.9%	10.8%
Elefant	4.3 %	5.9 %	2.3 %	3.8 %	15.9%
Spheric fish	40.3%	24.7%	46.8%	29.6%	27.2%
Moon	83.0%	91.6%	84.2%	92.3%	5.3 %
Seal	59.8%	58.7%	67.1%	61.1%	10.8%
Glasses 25%	85.0%	88.7%	84.5%	88.7%	3.1 %
Giraffe 25%	36.1%	47.1%	19.0%	18.7%	9.4 %
Average	48.0%	47.5%	49.3%	46.3%	11.8%



Results: Planning precision grasps (II)



Execution on ARMAR-IIIb

