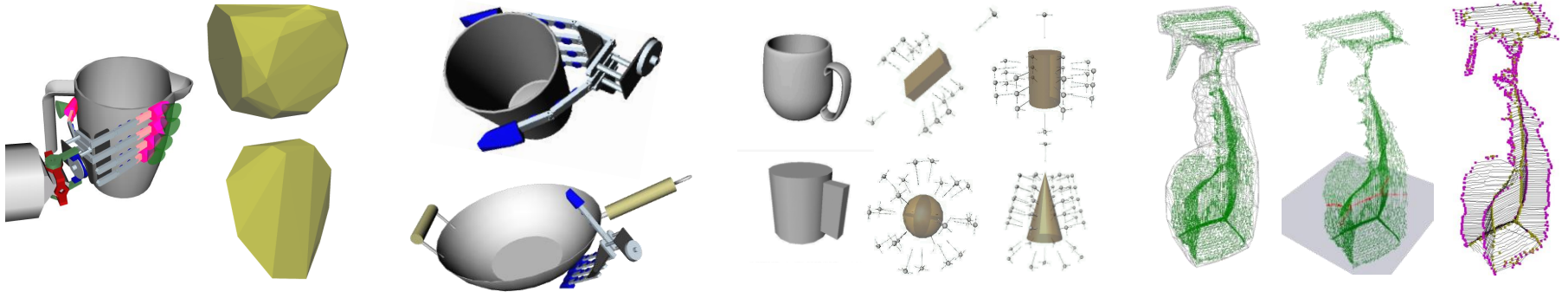


Robotik I: Einführung in die Robotik

Kapitel 8 – Grundlagen des Greifens

Tamim Asfour

<http://www.humanoids.kit.edu>



Inhalt

- Motivation
- Grifftaxonomien
- Kontaktmodelle und Grasp-Wrench-Space
- Greifplanung und Griffsynthese
- Beispiele: Greifen mit ARMAR

■ Motivation

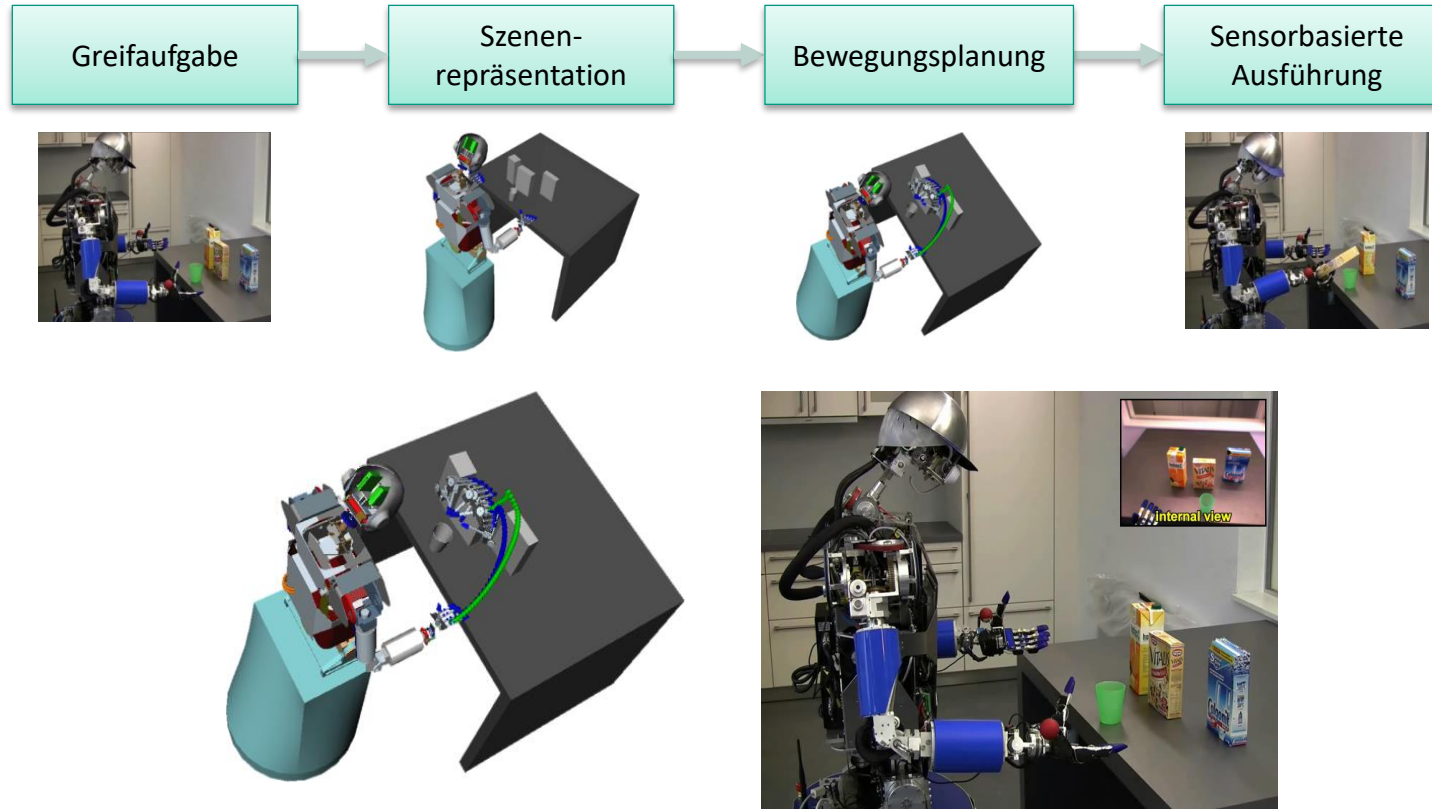
■ Grifftaxonomien

■ Kontaktmodelle und Grasp-Wrench-Space

■ Greifplanung und Griffsynthese

■ Beispiele: Greifen mit ARMAR

Motivation



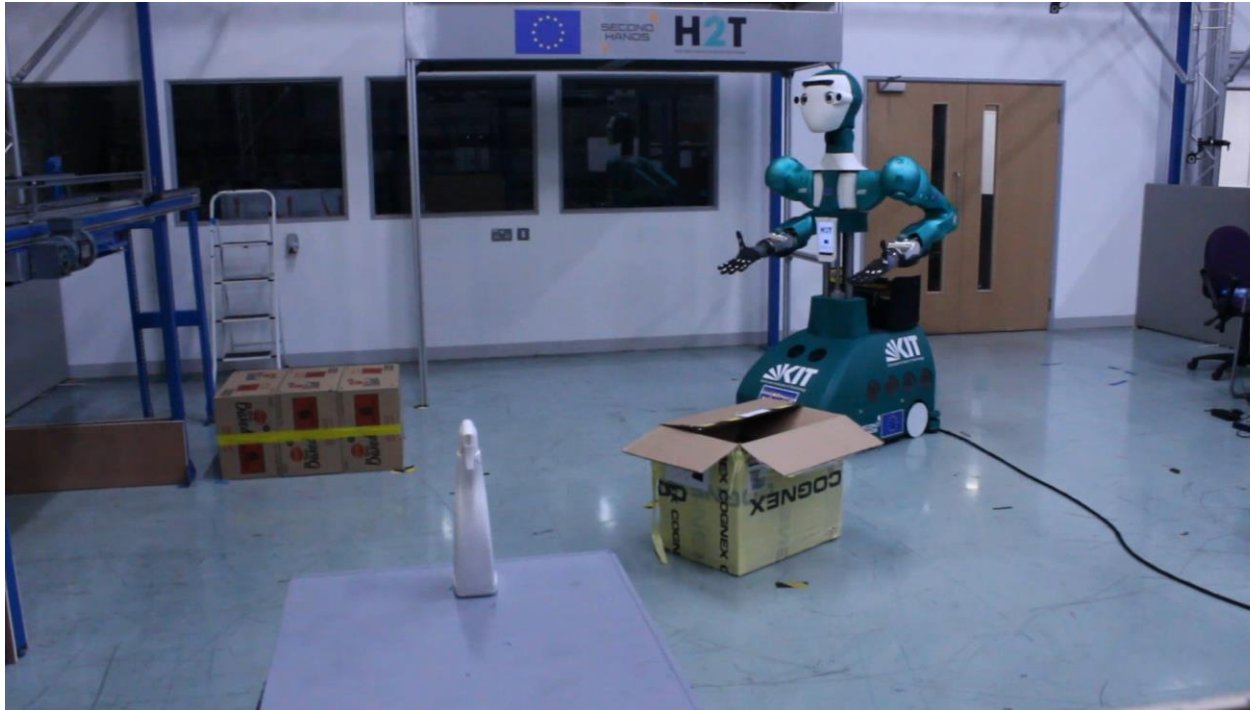
Motivation – Greifen



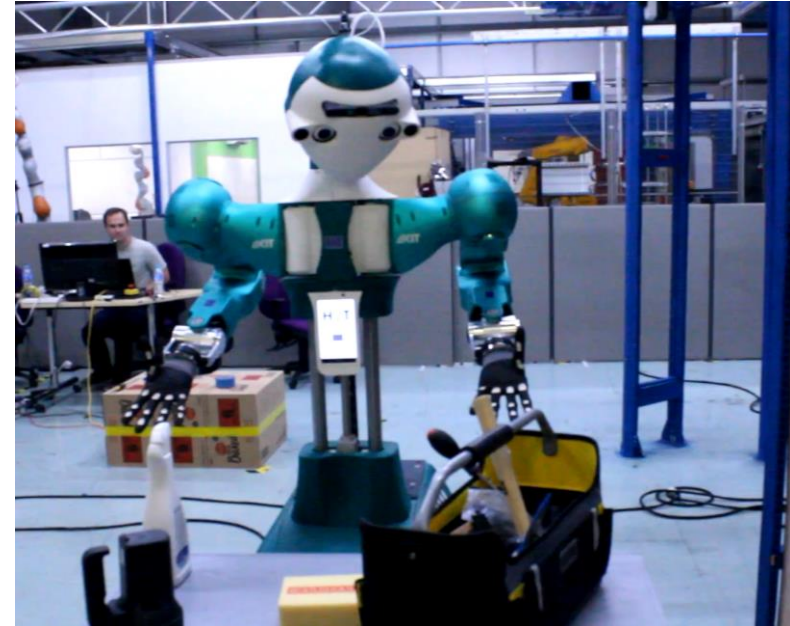
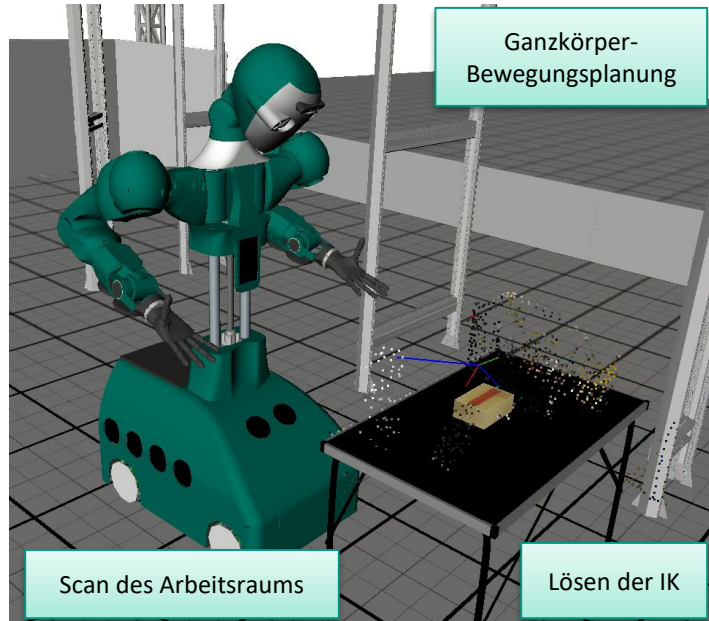
Motivation – Mobile Manipulation



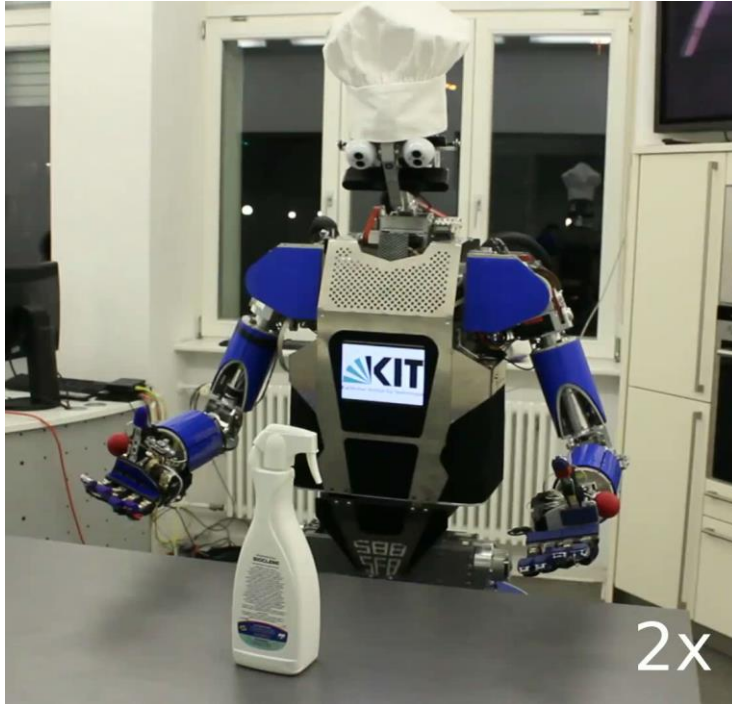
Motivation – Mobile Manipulation



Motivation – Greifen in teilweise unbekannten Umgebungen

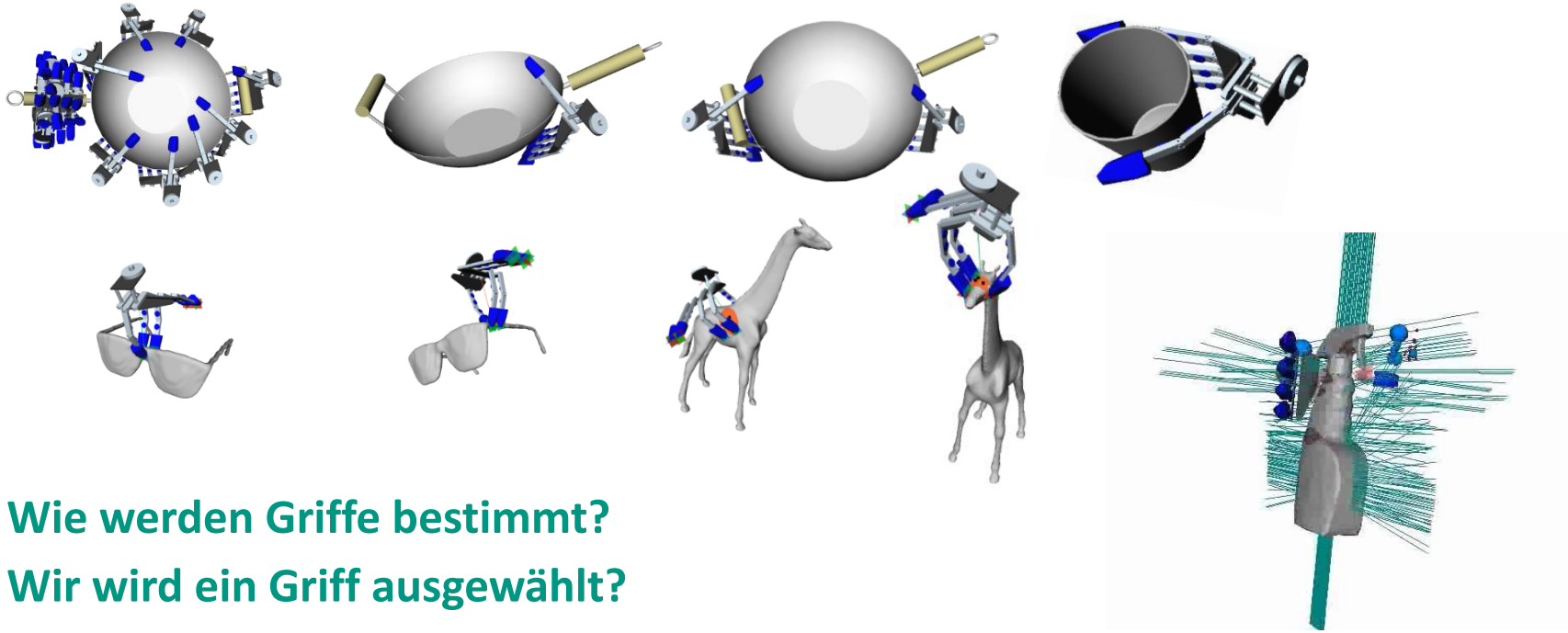


Motivation – Umgreifen



Motivation – Bestimmung und Auswahl von Griffen

■ Unendliche Griffmöglichkeiten eines Objekts



■ Wie werden Griffe bestimmt?

■ Wie wird ein Griff ausgewählt?

Motivation – Bestimmung und Auswahl von Griffen

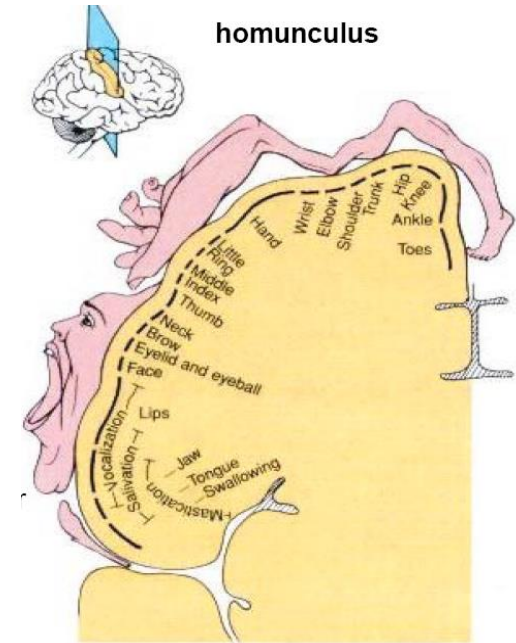
- Welche Information ist entscheidend ?
 - Geometrie/Form der Objekte
 - Interaktionskräfte zwischen Finger und Objekt
 - Kinematik der Hand

- Greifen bedeutet Kontakt zwischen Hand und Objekt

- Vorlesung Robotik I
 - Grundlagen des Greifens **bekannter** Objekte
- Vorlesung Robotik II
 - Fortgeschrittene Methoden des Greifens (ähnlicher und unbekannter) Objekte

Motivation – Greifen beim Menschen

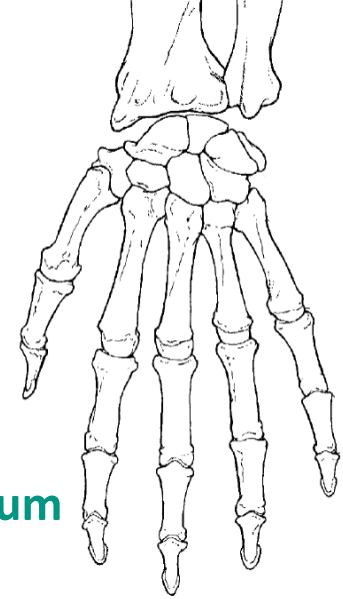
- Greifen als Reglungs- und Steuerungsproblem
 - Vieles ist bekannt
- Kognitive Aspekte des Greifens
 - Wenig ist bekannt
 - Großer Teil des menschlichen Kortex ist der Hand gewidmet
 - **Understanding hands = Understanding Intelligence (?)**



<https://harmonicresolution.com/homunculus1.jpeg>

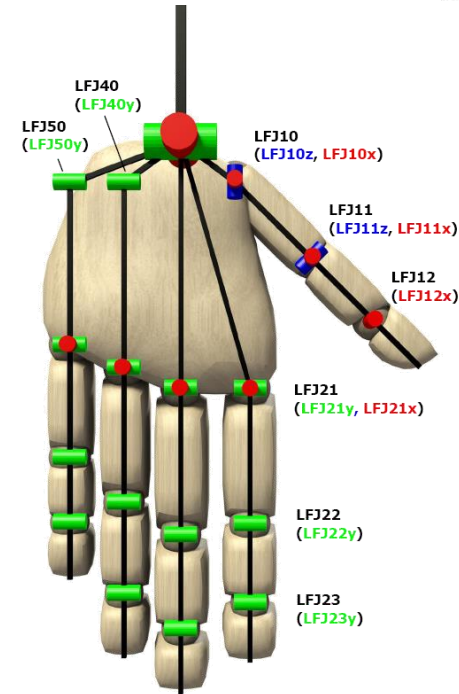
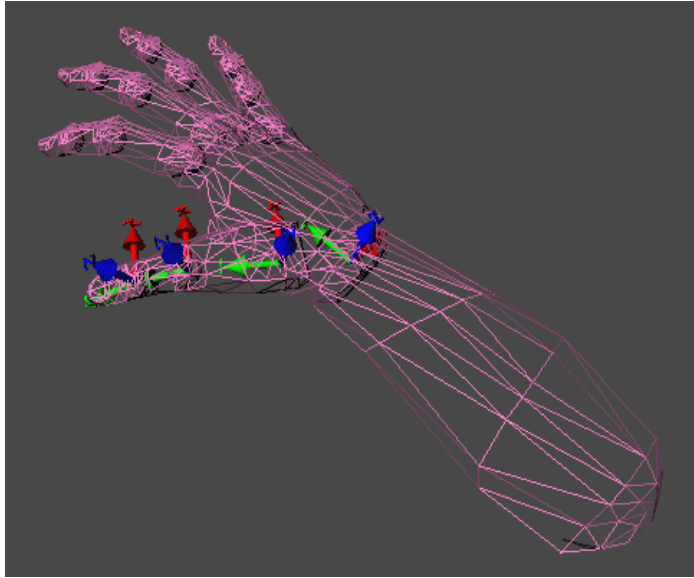
Die menschliche Hand

- 27 Knochen
- 21 Bewegungsfreiheitsgrade (DoF)
 - 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)
- **Insgesamt: $21 + 6 = 27$ DoF $\Rightarrow$ hochdimensionaler Konfigurationsraum**
- Modellierung:
 - Kinematische Modell
 - Flächenbasiertes Geometriemodell



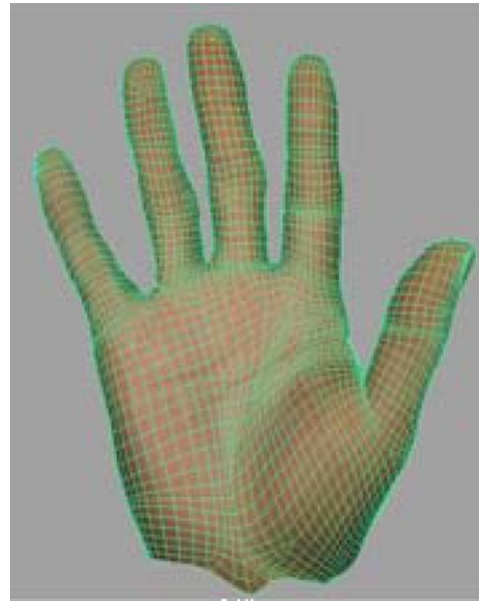
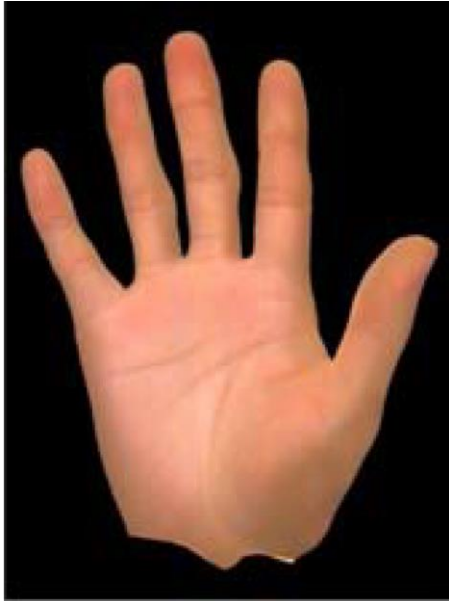
U. Schmidt, Hans-Martin; Lanz. Chirurgische Anatomie der Hand. Stuttgart, New York, 2003. Georg Thieme Verlag

Kinematisches Modell



C. Mandery, Ö. Terlemez, M. Do, N. Vahrenkamp, T. Asfour, Unifying Representations and Large-Scale Whole-Body Motion Databases for Studying Human Motion, IEEE Transactions on Robotics 2016

Flächenbasiertes Geometriemodell



*T. Rhee, U. Neumann, J. P. Lewis. Human hand modeling from surface anatomy. Symposium on Interactive 3D Graphics and Games (I3D '06), 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1145/1111411.1111417>*

MMM Model

Die menschliche Hand

- Hochdimensionaler Konfigurationsraum
- Wie kann man die Komplexität des Problems reduzieren?
 - Einschränkung/Strukturierung des Konfigurationsraum durch die Einführung von Griffkategorien → **Grifftaxonomien**

Inhalt

- Motivation
- **Grifftaxonomien**
- Kontaktmodelle und Grasp-Wrench-Space
- Greifplanung und Griffsynthese
- Beispiele: Greifen mit ARMAR

Komplexität des Problems reduzieren

- Durch die Einführung von Taxonomien

■ Grifftaxonomie

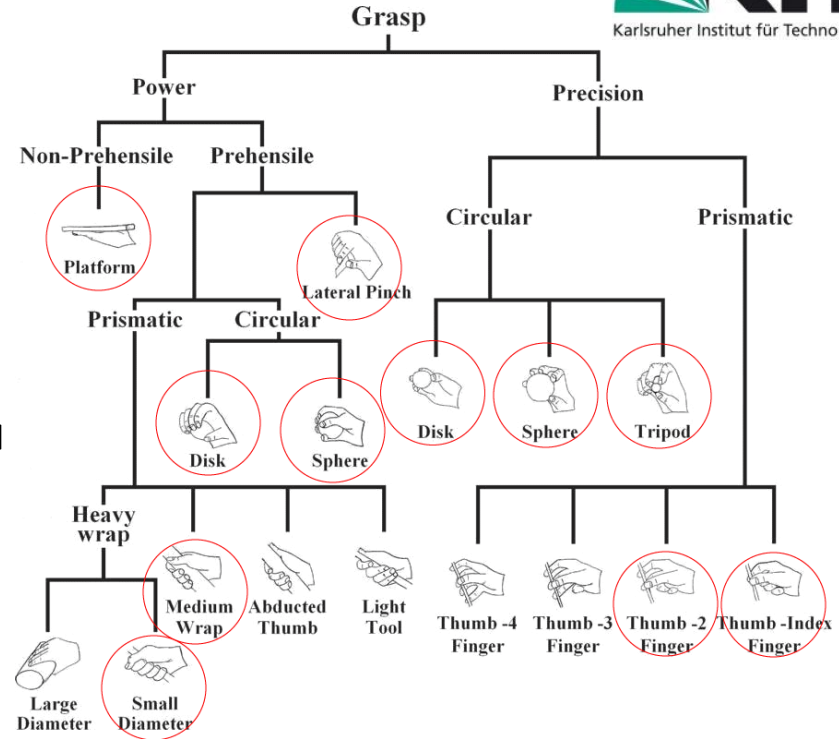
- Vereinfachung der Griffsynthese (Bestimmung von Kontaktpunkte auf dem Objekt)
- Grundlagen für das Design von Roboterhänden
- Evaluierung von Roboterhänden
- Unterstützung der autonomen Greifplanung

■ Bekannte Grifftaxanomien

- In Robotik I: Cutkosky Taxonomie
- In Robotik II: Weitere Taxonomien
 - Kamakura Taxonomie, Feix Taxonomie, Bullock and Dollar Taxonomie, KIT Whole-Body Grasp Taxonomie

Cutkosky Grifftaxonomie

- **16 Griffarten**, die sich durch Form des zugreifenden Objekts und Konfiguration der Hand (Fingerstellung) unterscheiden
- **Hierarchiebaum**: Griffarten werden zu Gruppen zusammengefasst
- Oberste Ebene: Unterscheidung in **Kraft-** und **Präzisionsgriffe**



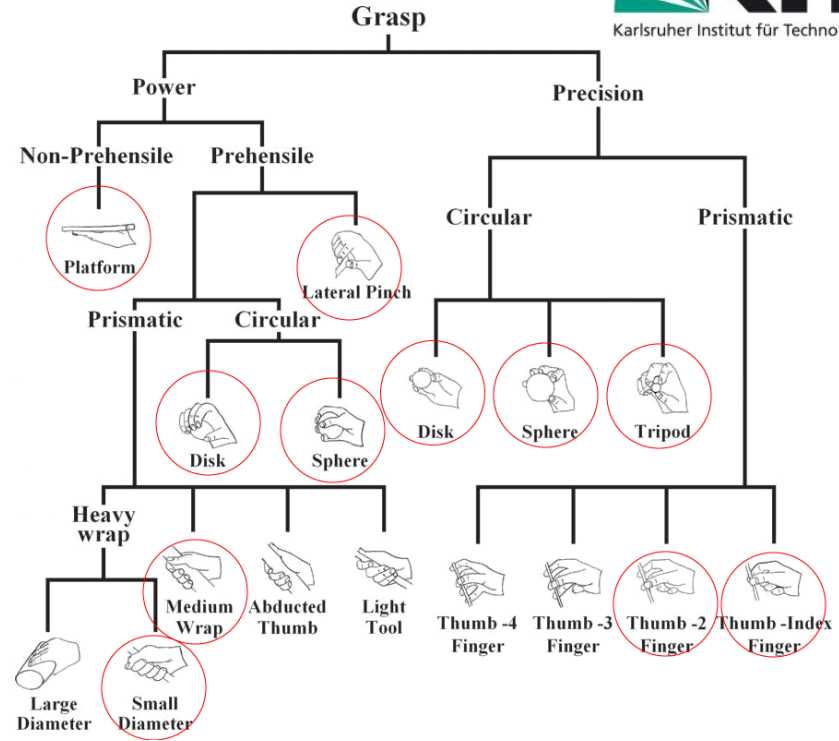
Mark Cutkosky, *On Grasp Choice, Grasp Models, and the Design of Hands for Manufacturing Tasks*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 5, no. 3, pp. 269 – 279, 1989

Cutkosky Griff-taxonomie

■ Kraft- und Präzisionsgriffe

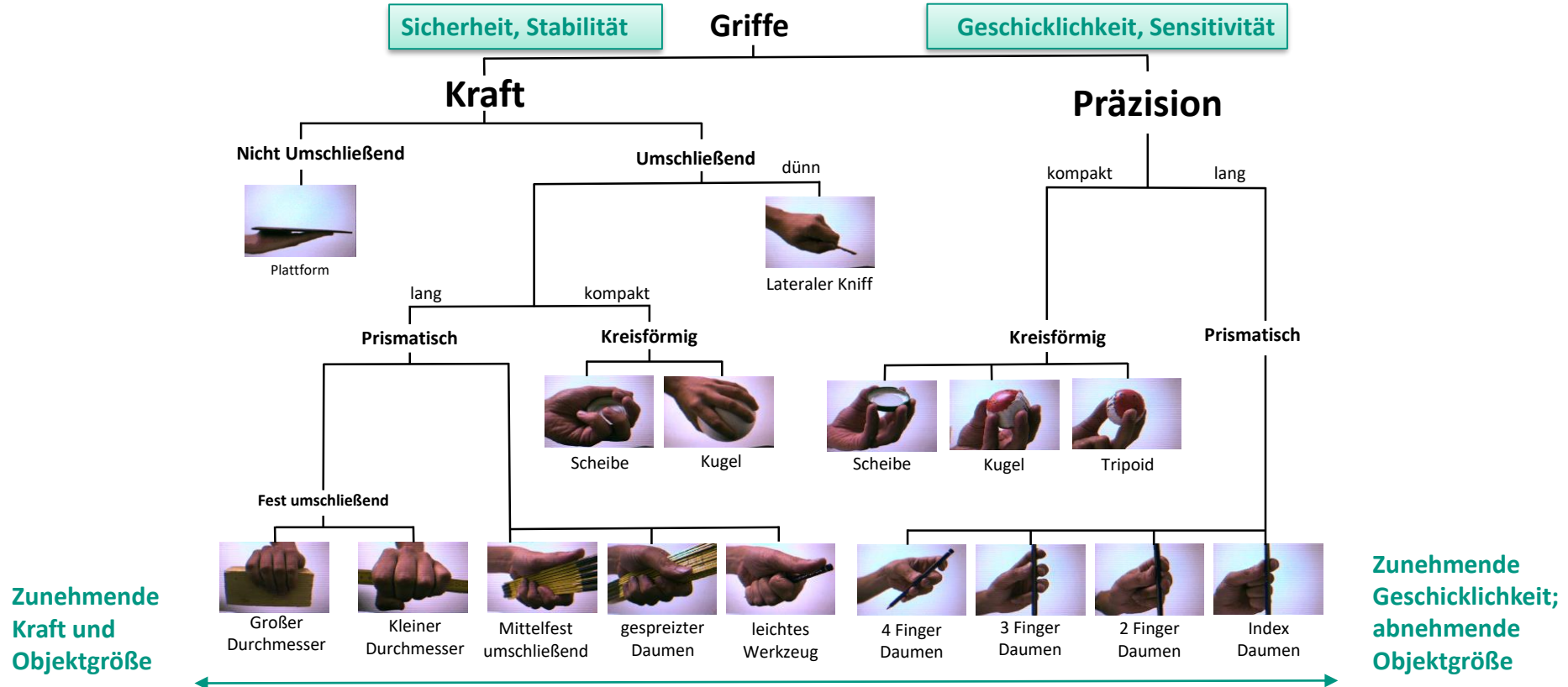
■ Aus der Beobachtung von Aktivitäten von Mechanikern

■ 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

Cutkosky Grifftaxonomie



Weitere Griff-taxonomien

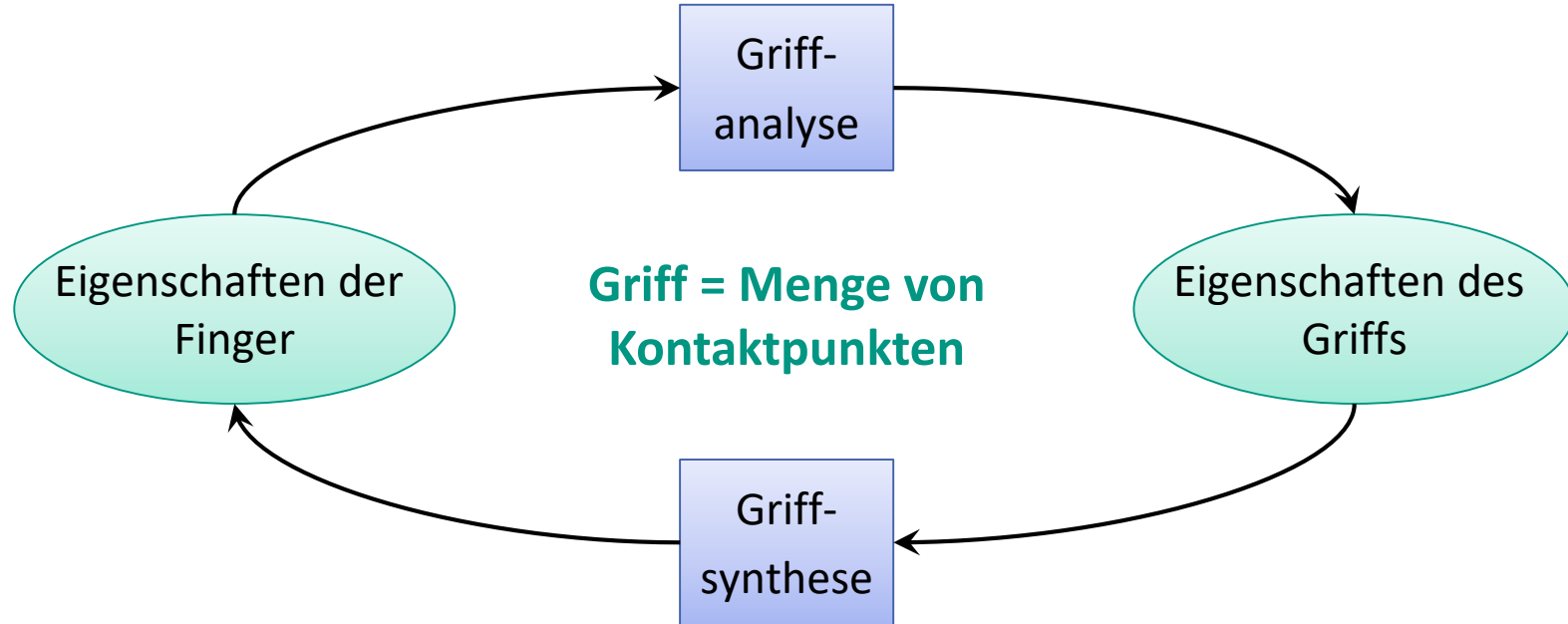
- Kamakura Taxonomie
- Feix Taxonomie
- Bullock and Dollar Taxonomie
- KIT Whole-Body Grasp Taxonomie
- Mehr dazu in Robotik-II im SS

Wichtige Faktoren für die Generierung von Griffen

- Handkinematik
- Griffrepräsentation
- Vorwissen über das Objekt
- Griffsynthese: 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



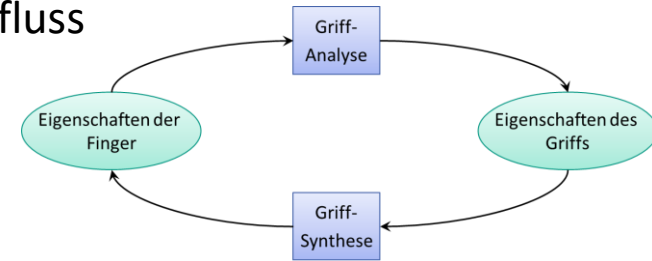


Shimoga, K.B., "Robot Grasp Synthesis Algorithms: A Survey."
The International Journal of Robotics Research (1996): 15 230-266

Griffanalyse und Griffsynthese

■ Griff:

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



■ Griffanalyse

- **Gegeben:** Objekt und ein Griff als Menge von Kontaktpunkten
- **Gesucht:** Aussagen zur Qualität/Stabilität des Griffs

■ Griffsynthese

- **Gegeben:** Objekt und ein Griff (mit bestimmten Eigenschaften)
- **Gesucht:** Eine Menge von Kontaktpunkten

Inhalt

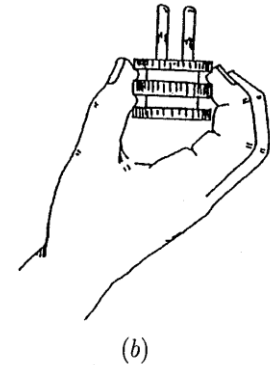
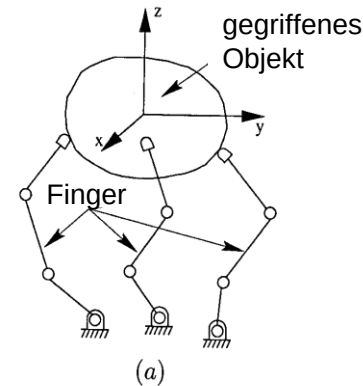
- Motivation
- Grifftaxonomien
- **Kontaktmodelle und Grasp-Wrench-Space**
- Greifplanung und Griffsynthese
- Beispiele: Greifen mit ARMAR

Fingerspitzengriffmodell

Modell: **Griff = Menge von Kontaktpunkten** auf Objektoberfläche

⇒ Nur Anordnung der Kontaktpunkte auf Oberfläche muss bestimmt werden.

- **Vorteil:** Vereinfacht Algorithmen zur Synthese möglicher Griffe eines Objekts.
- **Nachteil:** Ignoriert fundamentale Nebenbedingungen des Greifvorgangs.
 - Kollisionsfreiheit (Finger, Hand, Arm, ...)
 - Zugänglichkeit eines Griffes (Anfahr-/Abrückbewegung)



Kontaktmodelle

Man unterscheidet verschiedene Modelle des Fingerspitzenkontakts mit der Objektoberfläche:

Punktkontakt ohne Reibung

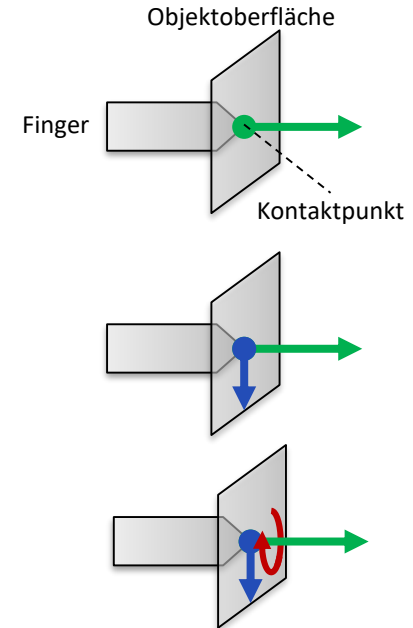
- Kraft wirkt ausschließlich **normal** zur Objektoberfläche.

Starrer Punktkontakt mit (Haft-)Reibung

- Kraft wirkt sowohl **normal** als auch **tangential** zur Objektoberfläche.
- Beide Kräfte sind über das Coulombsche Reibungsgesetz miteinander verknüpft.

Nicht starrer Punktkontakt mit Reibung (Soft-Kontakt)

- Kraft wirkt sowohl **normal** als auch **tangential** zur Objektoberfläche.
- Zusätzlich wirken auch **axiale Momente** um die Normale am Kontaktpunkt.
- Es gilt ebenfalls das Coulombsche Reibungsgesetz.

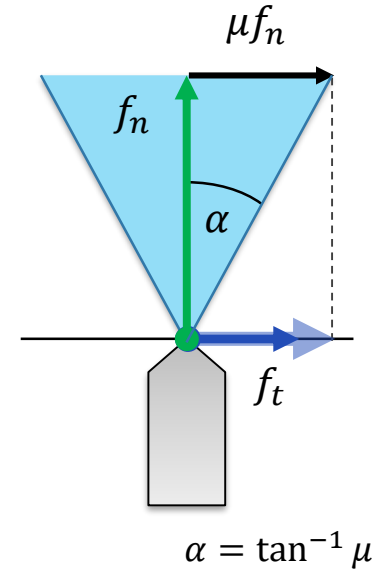


Kontaktmodelle: Coulombsches Reibungsgesetz

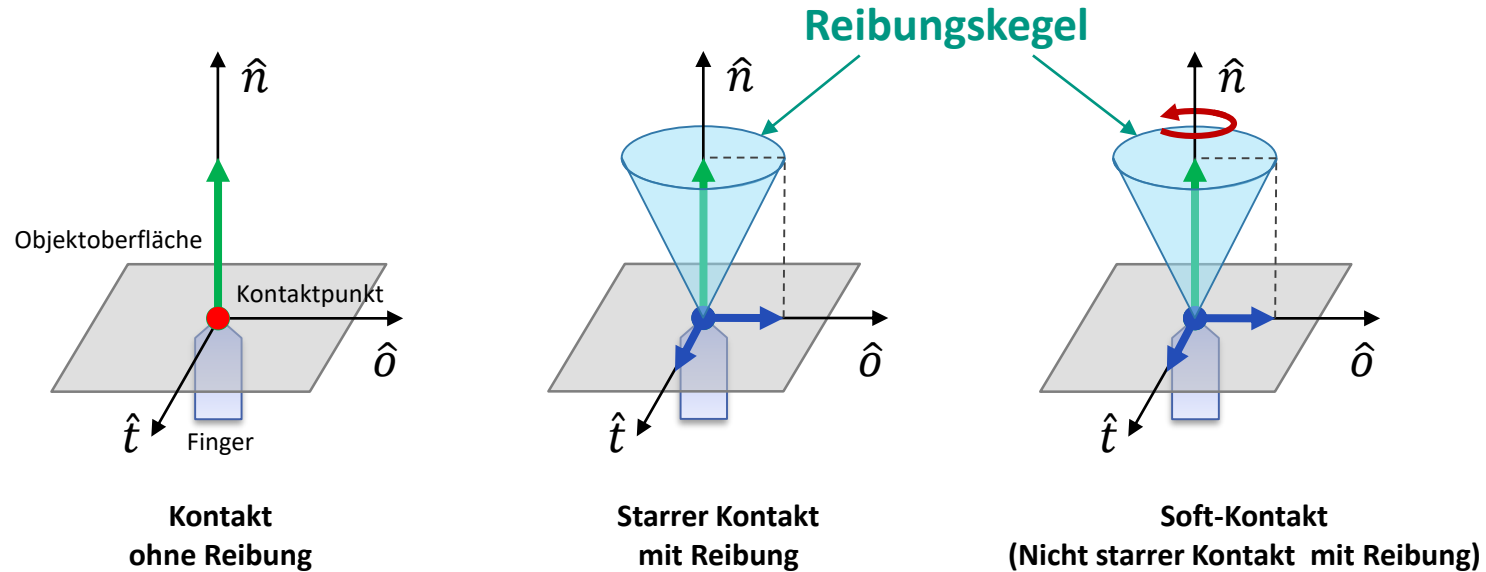
- Experimentelles Gesetz
- Beschreibt Verhältnis von **tangentialer Kraft** f_t zu **normaler Kraft** f_n :

$$f_t \leq \mu \cdot f_n$$

- **Reibungskoeffizient** $\mu > 0$ (abhängig von beteiligten Materialien)
- Wenn Kontakt ruht:
 - $f_t = f_e < \mu \cdot f_n$
 - Tangentiale Kraft wirkt entgegen ausgeübter Kraft f_e .
- Wenn Kontakt gleitet:
 - $f_t = \mu \cdot f_n$
 - Tangentiale Kraft wirkt entgegen Bewegungsrichtung.



Kontaktmodelle: Geometrische Interpretation



- Die Kräfte, die mit Reibung erzeugt werden können, liegen innerhalb eines Kegels (Reibungskegel), d.h. sie erfüllen (mit Normalen in +z-Richtung):

$$\sqrt{f_x^2 + f_y^2} \leq \mu f_z \quad (f_z \geq 0)$$

Wrench

Die in einem Kontaktpunkt p wirkenden **Kräfte** $\mathbf{f} = (f_x \ f_y \ f_z)$ und **Momente** $\boldsymbol{\tau} = (t_x \ t_y \ t_z)$ können zu einem **Wrench** $\mathbf{w}$ (verallgemeinerte Kraft) zusammengefasst werden.

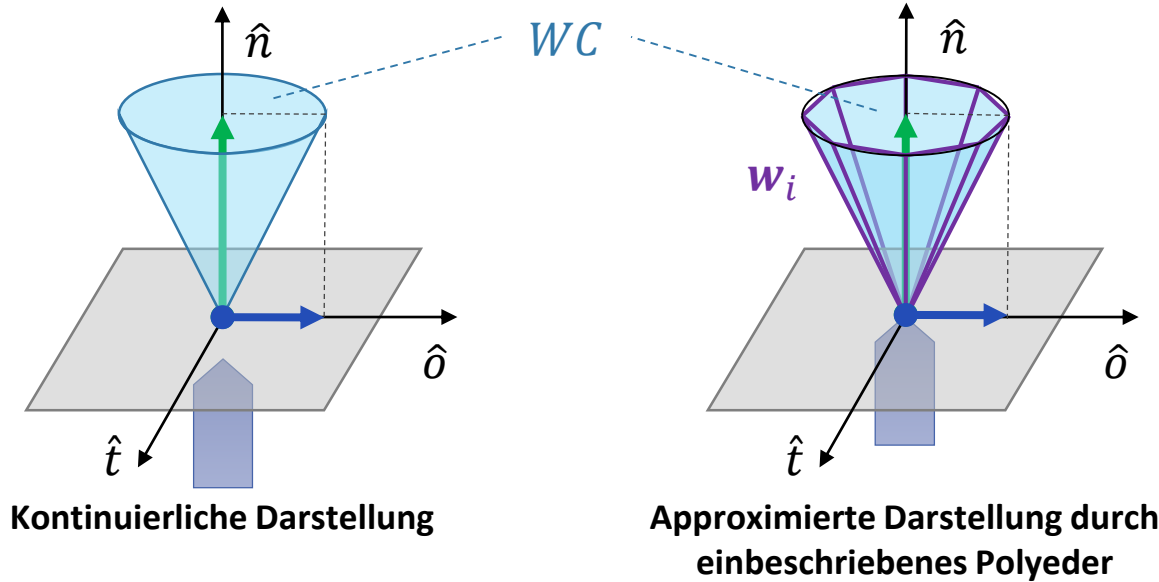
■ Planarer Wrench (2D) : $\mathbf{w} = (f_x \ f_y \ \tau_z)^T \in R^3$

■ Räumlicher Wrench (3D) : $\mathbf{w} = (f_x \ f_y \ f_z \ \tau_x \ \tau_y \ \tau_z)^T \in R^6$



engl. *wrench*

Kontaktmodelle: Approximation des Reibungskegels

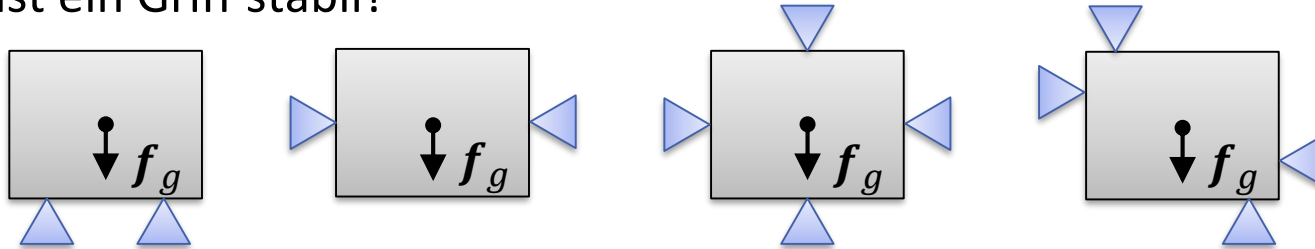


Der **Reibungskegel (Wrench Cone)** $WC \subseteq \mathbb{R}^6$ ist die positive lineare Hülle (pos) der w_i :

$$WC = \text{pos}(\{w_1, \dots, w_n\}) = \{\sum_{i=1}^n k_i w_i \mid k_i \geq 0\}$$

Stabilität eines Griffs

- Wir wollen Objekte stabil greifen, d.h. so dass sie sich relativ zur Hand nicht bewegen.
- Wann ist ein Griff stabil?



⇒ Verschiedene Konzepte von Stabilität:

- Gleichgewichtsgriff
- Kraftgeschlossener Griff
- Formgeschlossener Griff
- Qualitätsmaße

Gleichgewichtsgriff

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

⇔ Das Objekt ruht.

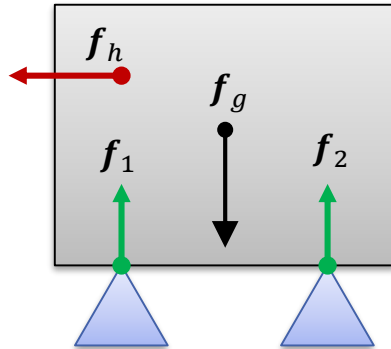
⇔ Die durch Kontakte ausgeübten Wrenches $\mathbf{w}_i$ widerstehen exakt den externen, auf das Objekt wirkenden Wrenches $\mathbf{w}_{\text{ext}}$.

$$\Leftrightarrow \mathbf{w}_{\text{ext}} + \sum_i \mathbf{w}_i = 0$$

Gleichgewichtsgriff: Beispiel

Gleichgewichtsgriff: Die durch Kontakte ausgeübten Wrenches widerstehen exakt den externen auf das Objekt wirkenden Wrenches.

$$\Leftrightarrow \mathbf{w}_{\text{ext}} + \sum_i \mathbf{w}_i = 0 \quad \mathbf{w}_{\text{ext}} = \begin{pmatrix} \mathbf{f}_{\text{ext}} \\ \tau_{\text{ext}} \end{pmatrix}$$



Punktkontakte ohne Reibung

$$\left. \begin{array}{l} \blacksquare \mathbf{f}_{\text{ext}} = \mathbf{f}_g \\ \blacksquare \mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2 = -\mathbf{f}_g \\ \blacksquare \tau_{\text{ext}} = 0, \quad \tau_1 = -\tau_2 \end{array} \right\} \Rightarrow \mathbf{w}_{\text{ext}} + \sum_{i=1}^2 \mathbf{w}_i = 0$$

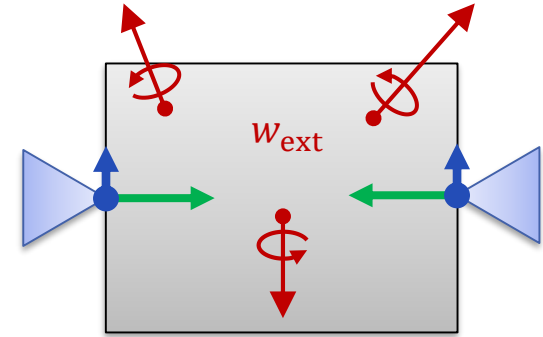
■ Was, wenn $\mathbf{f}_{\text{ext}} = \mathbf{f}_g + \mathbf{f}_h$?

■ $\Rightarrow$ Griff nicht mehr im Gleichgewicht.

Kraftgeschlossene Griffe (I)

- **Frage:** Kann der Griff **beliebigen externen Wrenches** entgegenwirken?
 - Objekt muss (relativ zur Hand) im Kräftegleichgewicht bleiben.
 - Nötig, um Objekt sinnvoll manipulieren zu können.

- **Annahme:** Kontakte können beliebig große Kräfte ausüben.
- Frage dann: Kann der Griff **beliebige Wrenches** erzeugen?
- Betrachte im folgenden starre Punktkontakte mit Reibung.



Kraftgeschlossene Griffe (II)

- **Annahme:** Kontakte können beliebig große Kräfte ausüben.
- Frage dann: Kann der Griff **beliebige Wrenches** erzeugen?

Seien $\mathbf{w}_{i1}, \dots, \mathbf{w}_{im} \in \mathbb{R}^6$ die Vektoren, die den Reibungskegel von Kontakt i approximieren.

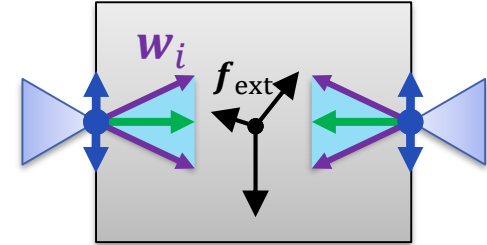
Der **Reibungskegel** $WC_i \subseteq \mathbb{R}^6$ ist die positive lineare Hülle der $\mathbf{w}_{ij}$:

$$WC_i = \text{pos}(\{\mathbf{w}_{i1}, \dots, \mathbf{w}_{im}\}) = \{\sum_{j=1}^m k_j \mathbf{w}_{ij} \mid k_j \geq 0\}$$

WC_i ist die Menge der Wrenches, die Kontakt i erzeugen kann.

Die **Gesamtmenge der Wrenches** WC , die durch alle Kontakte erzeugt werden können, ist die positive lineare Hülle der einzelnen WC_i :

$$WC = \text{pos}(\{WC_i\}) = \{\sum_i \sum_{j=1}^m k_{ij} \mathbf{w}_{ij} \mid k_{ij} \geq 0\}$$



Starre Punktkontakte
mit Reibung

WC: Wrench Cone

Kraftgeschlossene Griffe (III)

Die Gesamtmenge der Wrenches, die durch alle Kontakte erzeugt werden können, ist die positive lineare Hülle der einzelnen WC_i : $WC = \text{pos}(\{WC_i\}) = \{\sum_i \sum_{j=1}^m k_{ij} \mathbf{w}_{ij} \mid k_{ij} \geq 0\}$

Der Griff ist **kraftgeschlossen**, wenn WC eine Kugel mit Radius $\varepsilon > 0$ um den Ursprung enthält. (Dann ist auch $WC = \mathbb{R}^d$, da WC eine lineare Hülle ist.)

⇒ **Dann können Wrenches in alle Richtungen (Dimensionen des Wrench-Raums) erzeugt werden.**

Annahme: Kontakte können beliebig große Kräfte ausüben.

⇒ Beliebige große Wrenches können erzeugt werden.

⇒ Beliebigen externen Wrenches kann widerstanden werden ⇒ kraftgeschlossener Griff

Es können sehr große Normalkräfte nötig sein, um die nötigen Tangentialkräfte zu erzeugen.

Kraftgeschlossene Griffe: Beispiel in 2D (I)

- Zwei Kontakte mit Positionen $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$ und Normalen $\hat{\mathbf{n}}_1, \hat{\mathbf{n}}_2$

- $\mathbf{p}_1 = (0 \ 3)^T \quad \hat{\mathbf{n}}_1 = (0 \ -1)^T$

- $\mathbf{p}_2 = (0 \ -3)^T \quad \hat{\mathbf{n}}_2 = (0 \ 1)^T$

- Beide Kontakte haben Reibungskoeffizient $\mu > 0$.

- Einheitskraft: $f_i^n := 1 \Rightarrow f_i^t = \mu f_i^n = \mu$

- $\mathbf{f}_{11} = (-\mu \ -1)^T, \mathbf{f}_{12} = (\mu \ -1)^T$

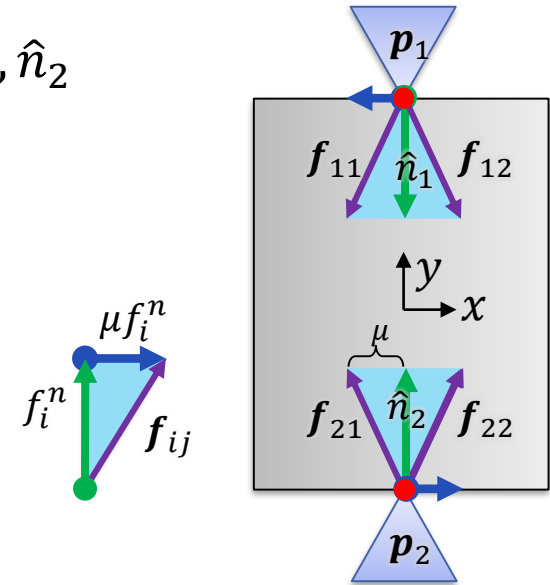
- $\mathbf{f}_{21} = (-\mu \ 1)^T, \mathbf{f}_{22} = (\mu \ 1)^T$

- Zugehörige Momente: $\tau_{ij} = \mathbf{d}_i \times \mathbf{f}_{ij}$

- Hier: $\mathbf{d}_i = \mathbf{p}_i$, da Ursprung im Objektschwerpunkt.

- $\tau_{11} = 3\mu, \quad \tau_{12} = -3\mu$

- $\tau_{21} = -3\mu, \quad \tau_{22} = 3\mu$



2D Kreuzprodukt:

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = a_1 b_2 - a_2 b_1$$

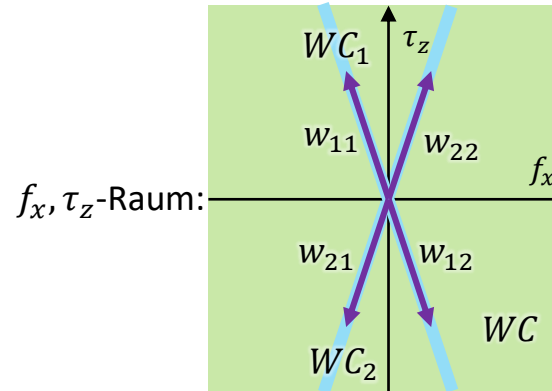
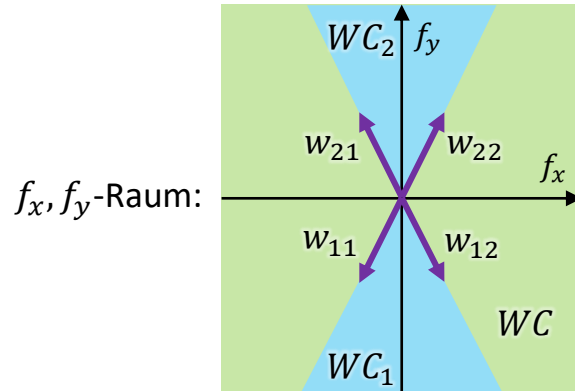
Kraftgeschlossene Griffe: Beispiel in 2D (II)

■ Wrenches (Kanten der Reibungskegel):

$$\blacksquare \mathbf{w}_{11} = (-\mu \quad -1 \quad 3\mu)^T, \quad \mathbf{w}_{12} = (\mu \quad -1 \quad -3\mu)^T$$

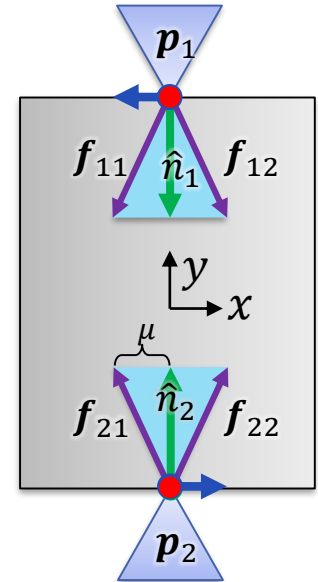
$$\blacksquare \mathbf{w}_{21} = (-\mu \quad 1 \quad -3\mu)^T, \quad \mathbf{w}_{22} = (\mu \quad 1 \quad 3\mu)^T$$

■ Projektionen des 3D Wrench-Raums auf Unterräume:



■ Reibungskegel spannen zusammen $\mathbb{R}^3$ auf.

■ $\Rightarrow$ **Griff ist kraftgeschlossen.**



Greifmatrix (I)

Seien $\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_m \in \mathbb{R}^6$ die Wrenches, die die Reibungskegel **aller Kontakte** aufspannen.
Die **Greifmatrix** G enthält die Wrenches aller Reibungskegel als Spalten:

$$G = \begin{pmatrix} \mathbf{w}_1 & \dots & \mathbf{w}_m \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times m}$$

Für ein $\mathbf{k} \in \mathbb{R}^m$ ist $\mathbf{w} = G \cdot \mathbf{k} \in \mathbb{R}^6$ eine Linearkombination der Wrenches in G .

Der Griff kann einem externen Wrench $\mathbf{w}_{\text{ext}} \in \mathbb{R}^6$ widerstehen, wenn

- es ein $\mathbf{k} = (k_1 \dots k_m) \in \mathbb{R}^m$ mit $k_j \geq 0$ gibt,
- sodass $G \cdot \mathbf{k} + \mathbf{w}_{\text{ext}} = 0$

(Dann ist $-\mathbf{w}_{\text{ext}}$ in der positiven linearen Hülle der $\mathbf{w}_j$.)

Greifmatrix (II)

Die **Greifmatrix** G enthält die Wrenches aller Reibungskegel als Spalten:

$$G = \begin{pmatrix} \mathbf{w}_1 & \dots & \mathbf{w}_m \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times m}$$

Der Griff kann **beliebigen** externen Wrenches $\mathbf{w}_{\text{ext}} \in \mathbb{R}^6$ widerstehen, wenn

- G vollen Rang hat, d.h. $\text{rang}(G) = 6$, und
- es ein $\mathbf{k} = (k_1 \quad \dots \quad k_m) \in \mathbb{R}^m$ mit $k_j > 0$ gibt, sodass $G \cdot \mathbf{k} = \mathbf{0}$.

Dann ist der zu G gehörige Griff **kraftgeschlossen**. (engl.: *force-closure*)

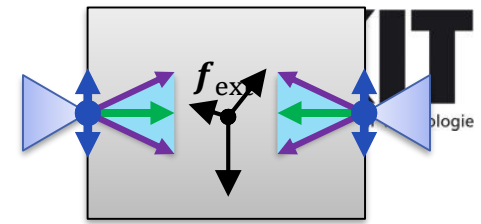
Formgeschlossene Griffe

Frage: Was, wenn keine Reibung existiert?

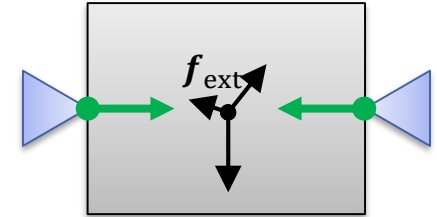
- → Punktkontakte ohne Reibung
- Dann: Kontakte wirken nur noch Kräfte entlang ihrer Normalen

Kann der Griff dann **weiterhin** beliebigen externen Wrenches entgegenwirken?

- Wenn ja, ist der Griff **formgeschlossen**.
 - Ähnlich zu kraftgeschlossenen Griffen, ...
 - aber **nur Kräfte entlang der Normalen** berücksichtigt.
 - Formschluss (engl. *form-closure*) ist eine strengere Bedingung als Kraftschluss.



Starre Punktkontakte
mit Reibung



Starre Punktkontakte
ohne Reibung

Form-geschlossen = **Kraft-**geschlossen
ohne Reibung

Formgeschlossene Griffe: Beispiel in 2D (I)

- Zwei Kontakte mit Positionen $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$ und Normalen $\hat{\mathbf{n}}_1, \hat{\mathbf{n}}_2$

- $\mathbf{p}_1 = (0 \quad 3)^T$ $\hat{\mathbf{n}}_1 = (0 \quad -1)^T$

- $\mathbf{p}_2 = (0 \quad -3)^T$ $\hat{\mathbf{n}}_2 = (0 \quad 1)^T$

- Keine Reibung $\Rightarrow$ nur zwei Kräfte:

- $\mathbf{f}_1 = (0 \quad -1)^T$, $\mathbf{f}_2 = (0 \quad 1)^T$

- Zugehörige Momente: $\tau_i = \mathbf{d}_i \times \mathbf{f}_i$

- Hier: $\mathbf{d}_i = \mathbf{p}_i$, da Ursprung im Objektschwerpunkt.

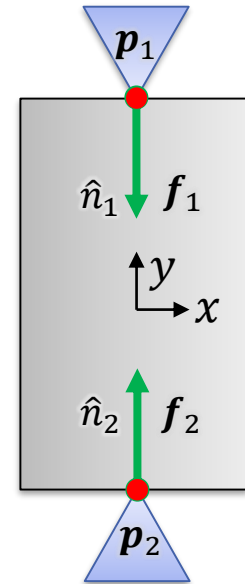
- $\tau_1 = 0 \cdot (-1) - (-1) \cdot 0 = 0$, $\tau_2 = 0$ (analog)

- Erzeugte Wrenches: $(\mathbf{w}_i = (f_x \quad f_y \quad \tau_z)^T)$

- $\mathbf{w}_1 = (0 \quad -1 \quad 0)^T$, $\mathbf{w}_2 = (0 \quad 1 \quad 0)^T$

- Kontakte können weder Kräfte entlang der x -Achse noch Drehmomente um z -Achse aufbringen.

- $\Rightarrow$ **Griff ist nicht formgeschlossen.**



Formgeschlossene Griffe: Beispiel in 2D (II)

- Verschiebe Kontakte, füge zwei weitere hinzu:

- $\mathbf{p}_1 = (-1 \ 3)^T, \quad \mathbf{f}_1 = (0 \ -1)^T$

- $\mathbf{p}_2 = (1 \ -3)^T, \quad \mathbf{f}_2 = (0 \ 1)^T$

- $\mathbf{p}_3 = (-2 \ 2)^T, \quad \mathbf{f}_3 = (1 \ 0)^T$

- $\mathbf{p}_4 = (2 \ -2)^T, \quad \mathbf{f}_4 = (-1 \ 0)^T$

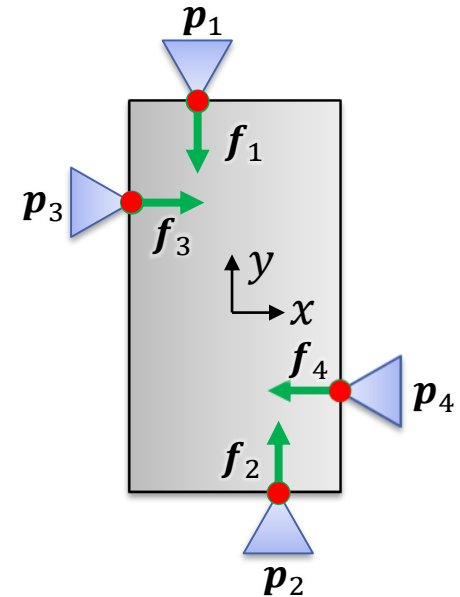
- Erzeugte Momente und Wrenches:

- $\tau_1 = 1 \quad \Rightarrow \mathbf{w}_1 = (0 \ -1 \ 1)^T$

- $\tau_2 = 1 \quad \Rightarrow \mathbf{w}_2 = (0 \ 1 \ 1)^T$

- $\tau_3 = -2 \quad \Rightarrow \mathbf{w}_3 = (1 \ 0 \ -2)^T$

- $\tau_4 = -2 \quad \Rightarrow \mathbf{w}_4 = (-1 \ 0 \ -2)^T$



- $\Rightarrow WC = \text{pos}(\{\mathbf{w}_i\}) = \mathbb{R}^3$, d.h. die $\mathbf{w}_i$ spannen den Wrench-Space vollständig auf.

- $\Rightarrow$ **Griff ist formgeschlossen.**

Dimension der Greifmatrix

Die **Greifmatrix** G enthält die Wrenches aller Reibungskegel als Spalten:

$$G = \begin{pmatrix} \mathbf{w}_1 & \cdots & \mathbf{w}_m \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times m}$$

- m ist abhängig von der Anzahl n von Kontakten und dem Kontaktmodell.

Starrer Punktkontakt ohne Reibung:

- **2D & 3D:** Jeder Kontakt erzeugt genau einen Wrench. $\Rightarrow m = n$

Starrer Punktkontakt mit Reibung:

- **2D:** Reibungsdreieck durch genau zwei Wrenches aufgespannt. $\Rightarrow m = 2n$
- **3D:** Reibungskegel durch k Wrenches approximiert (z.B. $k = 8$). $\Rightarrow m = kn$

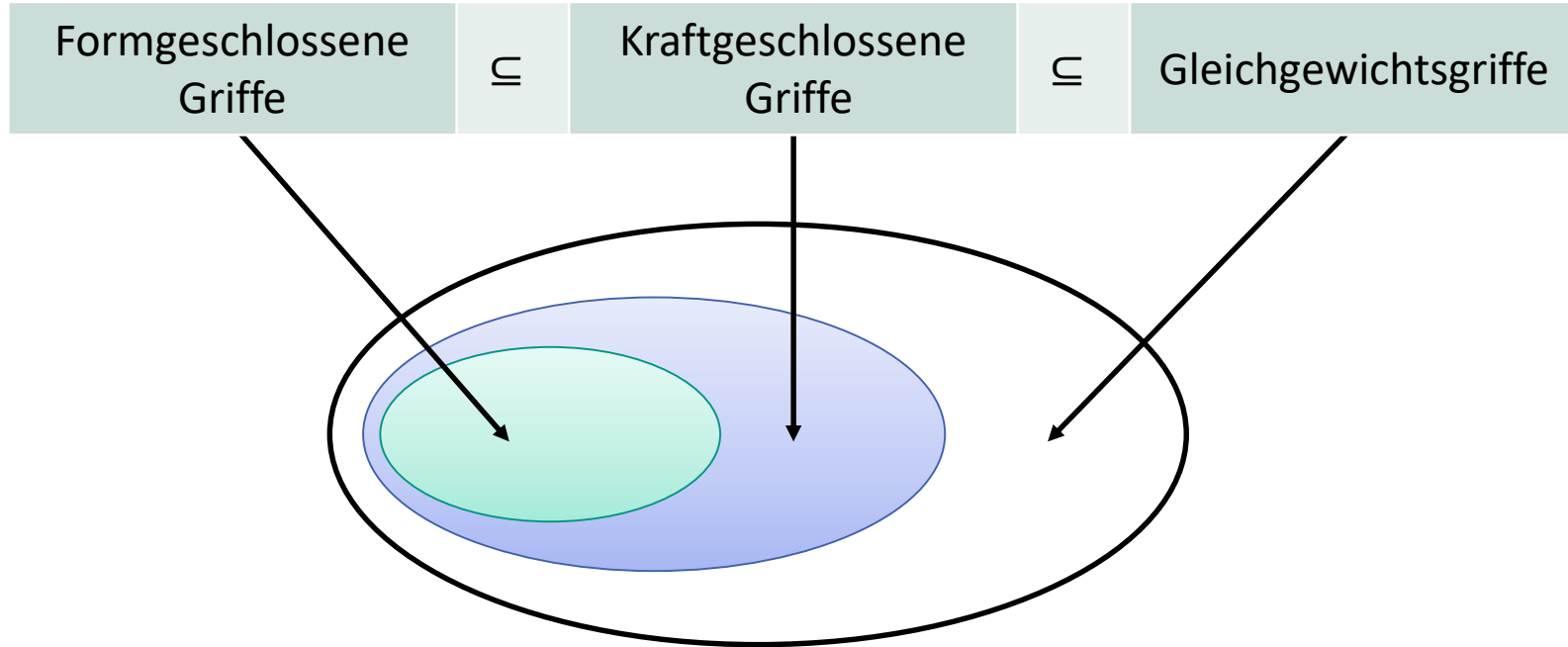
Anzahl benötigter Kontakte

Im Allgemeinen gilt: **Um $\mathbb{R}^d$ positiv aufzuspannen, sind $d + 1$ Vektoren nötig.**

	Planar (Wrench-Space: $\mathbb{R}^3$)	Räumlich (Wrench-Space: $\mathbb{R}^6$)
Formschluss (ohne Reibung)	- Mindestens 4 Kontakte - Maximal 6 Kontakte	- Mindestens 7 Kontakte - Maximale Anzahl: - Beliebige Objekte: 12 - Polyeder: 7
Kraftschluss (mit Reibung)	- Mindestens 2 Kontakte - Maximal 3 Kontakte	Mindestens 4 Kontakte

- Es gibt „*exceptional objects*“, z.B. der Kreis in 2D oder die Kugel in 3D, die nicht formgeschlossen (ohne Reibung) gegriffen werden können.

Mengentheoretische Darstellung der Griffhierarchie



Kraft- und Formgeschlossene Griffe

Kraftschluss:

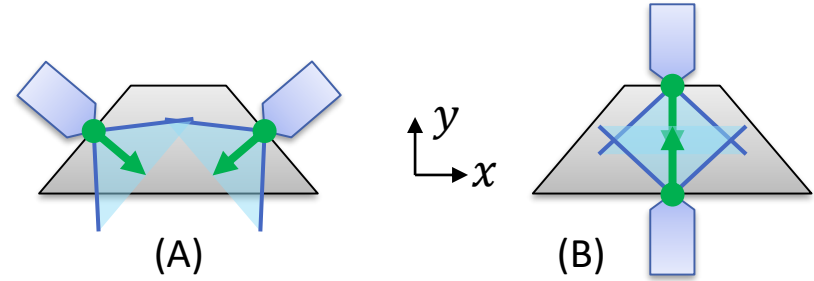
- Die Kinematik der Hand kann aktiv Kräfte erzeugen, um einer externen Störung zu widerstehen.
- Reibungskräfte wirken mit.

Formschluss:

- Die Kontakte verhindern, dass sich das Objekt bewegen kann.
- Es werden keine Reibungskräfte benötigt / berücksichtigt.
- Kraftschluss ist mit **weniger Kontaktpunkten** möglich und wird deshalb bei **Präzisionsgriffen** (engl. *precision grasps*) verwendet. Er erfordert jedoch eine Regelung der intern auftretenden Kräfte bei einem Griff.
- Formschluss ist eine **stärkere Bedingung** als Kraftschluss und wird oft bei der Ausführung von **Kraftgriffen** (engl. *power grasps*) verwendet.

Griffqualität

- Betrachte Griffe (A) und (B):
- Welcher der Griffe ist **kraftgeschlossen**?
 - (A) und (B)
- Sind beide Griffe **gleich gut**?
 - Mit (A) müssen sehr große Normalkräfte aufgebracht werden, um Reibungskräfte in y -Richtung zu erzeugen.
 - Mit (B) ist es einfacher, Kräfte in alle Richtungen zu wirken.
- Wie kann man das **quantifizieren**?



Griffqualität: Griff (A)

Positionen und Normalkräfte

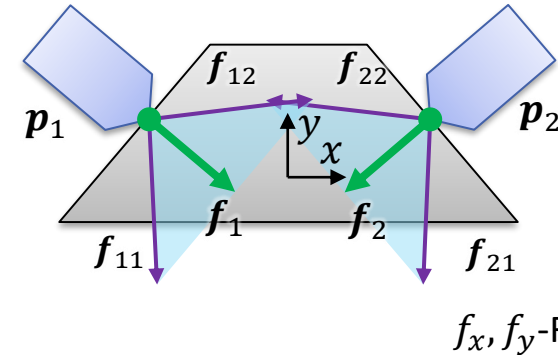
$$\begin{aligned} \blacksquare \quad \mathbf{p}_1 &= (-4 \quad 1)^T, & \mathbf{f}_1^n &= \frac{1}{\sqrt{2}}(1 \quad -1)^T \\ \blacksquare \quad \mathbf{p}_2 &= (4 \quad 1)^T, & \mathbf{f}_2^n &= \frac{1}{\sqrt{2}}(-1 \quad -1)^T \end{aligned}$$

$\mu = 1.1$, Reibungskräfte $f_{ij} = f_i^n + \mu \cdot f_i^{t_j}$

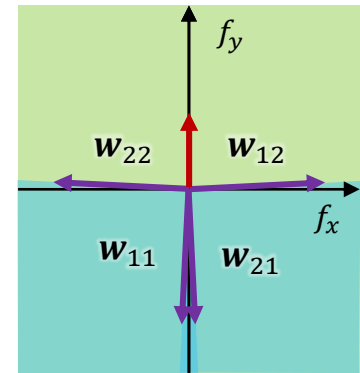
$$\begin{aligned} \blacksquare \quad f_{11} &= \frac{1}{\sqrt{2}}(-0.1 \quad -2.1)^T, & f_{12} &= \frac{1}{\sqrt{2}}(2.1 \quad 0.1)^T \\ \blacksquare \quad f_{21} &= \frac{1}{\sqrt{2}}(0.1 \quad -2.1)^T, & f_{22} &= \frac{1}{\sqrt{2}}(-2.1 \quad 0.1)^T \end{aligned}$$

Erzeugte Momente und Wrenches:

$$\begin{aligned} \blacksquare \quad \tau_{11} &= \frac{8.5}{\sqrt{2}} \Rightarrow \mathbf{w}_{11} = \frac{1}{\sqrt{2}}(-0.1 \quad -2.1 \quad 8.5)^T = (-0.0707 \quad -1.48 \quad 6.01)^T \\ \blacksquare \quad \tau_{12} &= \frac{-2.5}{\sqrt{2}} \Rightarrow \mathbf{w}_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}(2.1 \quad 0.1 \quad -2.5)^T = (1.48 \quad \mathbf{0.0707} \quad -1.76)^T \\ \blacksquare \quad \tau_{21} &= \frac{-8.5}{\sqrt{2}} \Rightarrow \mathbf{w}_{21} = \frac{1}{\sqrt{2}}(0.1 \quad -2.1 \quad -8.5)^T = (0.0707 \quad -1.48 \quad -6.01)^T \\ \blacksquare \quad \tau_{22} &= \frac{2.5}{\sqrt{2}} \Rightarrow \mathbf{w}_{22} = \frac{1}{\sqrt{2}}(-2.1 \quad 0.1 \quad 2.5)^T = (-1.48 \quad \mathbf{0.0707} \quad 1.76)^T \end{aligned}$$



f_x, f_y -Raum



Griffqualität: Griff (B)

Positionen und Normalenkräfte

- $p_1 = (0 \ 2)^T$, $f_1^n = (0 \ -1)^T$

- $p_2 = (0 \ -1)^T$, $f_2^n = (0 \ 1)^T$

■ $\mu = 1.1$, Reibungskräfte $f_{ij} = f_i^n + \mu \cdot f_i^{tj}$

- $f_{11} = (-1.1 \ -1)^T$, $f_{12} = (1.1 \ -1)^T$

- $f_{21} = (-1.1 \ 1)^T$, $f_{22} = (1.1 \ 1)^T$

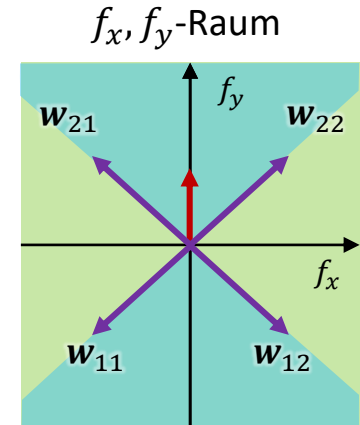
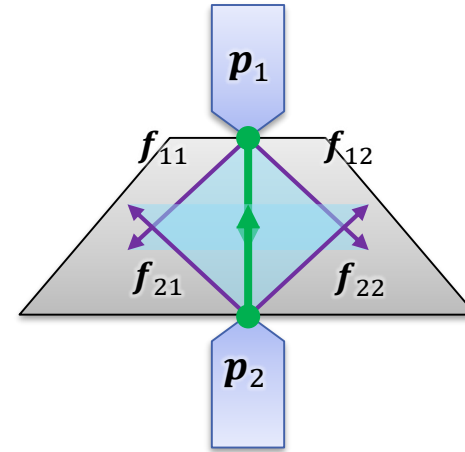
■ Erzeugte Momente und Wrenches:

- $\tau_{11} = 2.2 \Rightarrow w_{11} = (-1.1 \ -1 \ 2.2)^T$

- $\tau_{12} = -2.2 \Rightarrow w_{12} = (1.1 \ -1 \ -2.2)^T$

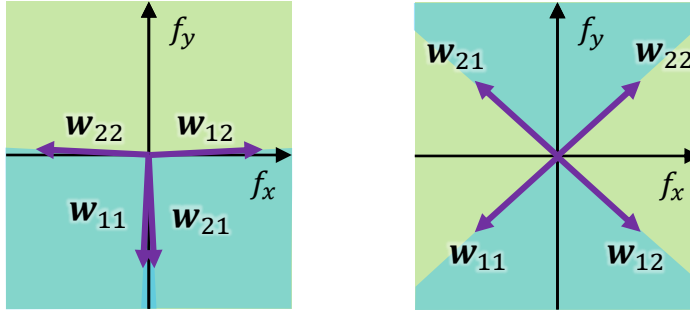
- $\tau_{21} = -1.1 \Rightarrow w_{21} = (-1.1 \ 1 \ -1.1)^T$

- $\tau_{22} = 1.1 \Rightarrow w_{22} = (1.1 \ 1 \ 1.1)^T$



Griffqualität: Grasp-Wrench-Space

Vergleiche f_x, f_y -Ebenen der Wrench-Räume:

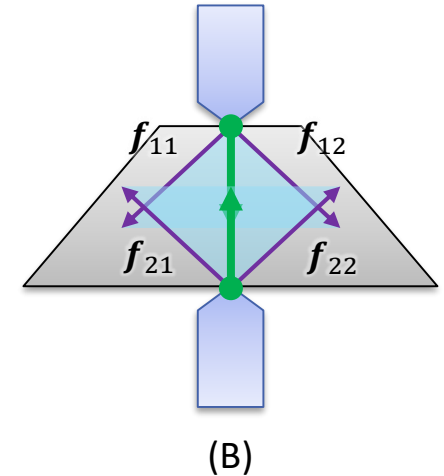
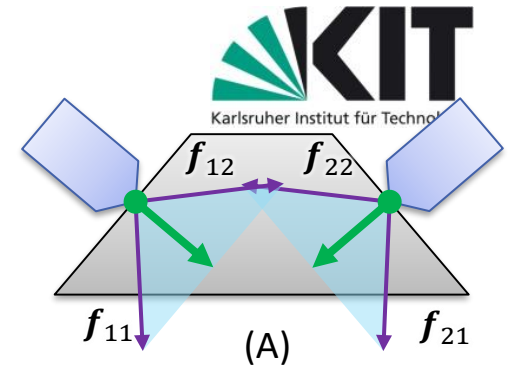


Wie kann Wrench $\mathbf{w} = (0 \quad 1 \quad 0)^T$ erzeugt werden?

■ (A) z.B: $\mathbf{w} = 7.1 \mathbf{w}_{12} + 7.1 \mathbf{w}_{22}$

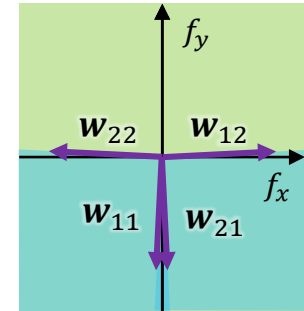
■ (B) z.B: $\mathbf{w} = 0.5 \mathbf{w}_{21} + 0.5 \mathbf{w}_{22}$

⇒ (B) Benötigt weniger Kraft, um denselben Wrench zu erzeugen

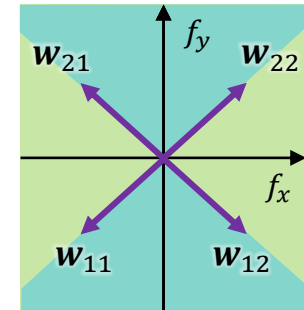


Griffqualität: Grasp-Wrench-Space-Metrik

- Kraftgeschlossenheit bedeutet, dass beliebige Wrenches erzeugt werden können, wenn beliebig große Kräfte aufgebracht werden können.
- Was, wenn ...
 - manche Wrenches „schwierig“ zu erzeugen sind?
 - nicht beliebig große Kräfte aufgebracht werden können?
- Bisherige Bedingung für Koeffizienten der Kräfte: $k_i \geq 0$
- Jetzt: Gedachte obere Schranke: $k_i \in [0, f_{\max}]$
- $\Rightarrow$ Reibungskegel sind nicht mehr unendlich
- $\Rightarrow$ Aus linearer Hülle wird **konvexe Hülle**



(A)



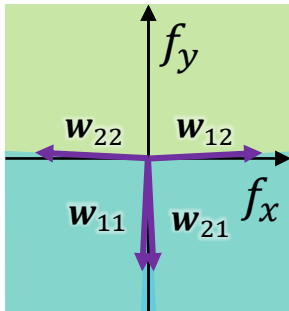
(B)

Griffqualität: Grasp-Wrench-Space

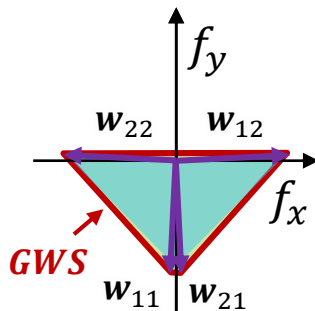
Seien $\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_m \in \mathbb{R}^6$ die Vektoren, die die Reibungskegel aller Kontakte approximieren.

Der **Grasp-Wrench-Space** GWS ist die **konvexe Hülle** der $\mathbf{w}_i$

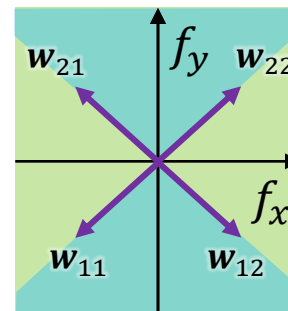
$$GWS = \text{conv}(\{\mathbf{w}_i\}) = \left\{ \sum_{i=1}^m k_i \mathbf{w}_i \mid k_i \geq 0 \text{ und } \sum_{i=1}^m k_i = 1 \right\}$$



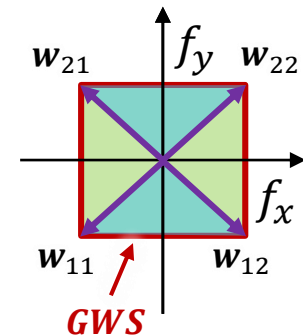
Lineare Hülle



Konvexe Hülle

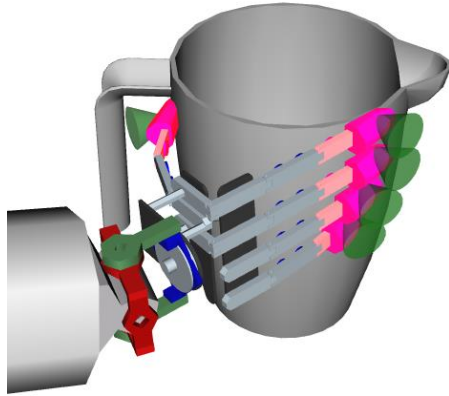


Lineare Hülle

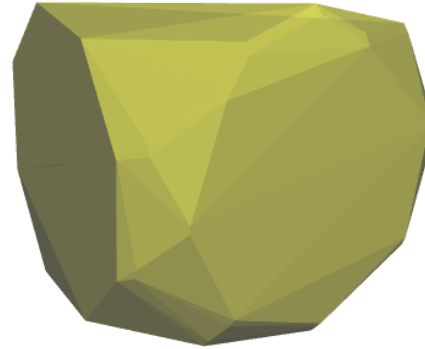


Konvexe Hülle

Visualisierung des Grasp-Wrench-Space in 3D



Griff im
kartesischen Raum



Kraft-Unterraum
des GWS



Drehmoment-Unterraum
des GWS

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

Griffqualität: Grasp-Wrench-Space

Der **Grasp-Wrench-Space** GWS ist die konvexe Hülle der $\mathbf{w}_i$

$$GWS = \text{conv}(\{\mathbf{w}_i\}) = \{\sum_{i=1}^m k_i \mathbf{w}_i \mid k_i \geq 0 \text{ und } \sum_{i=1}^m k_i = 1\}$$

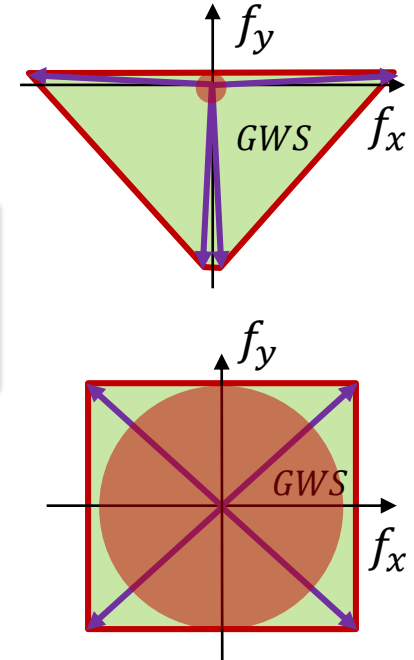
Wie könnte man mit Hilfe des GWS ein **Maß für die Qualität** eines Griiffs definieren?

Die **ε -Metrik** ist der **Radius der größten Kugel** um den Ursprung des GWS , die noch vollständig in GWS enthalten ist.

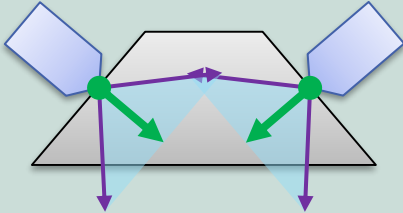
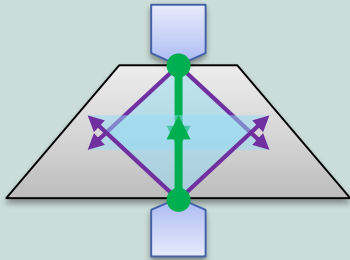
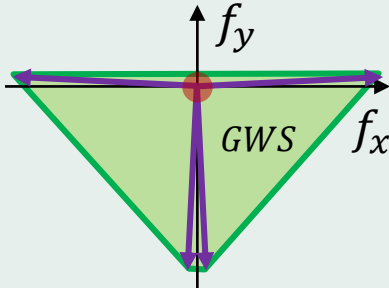
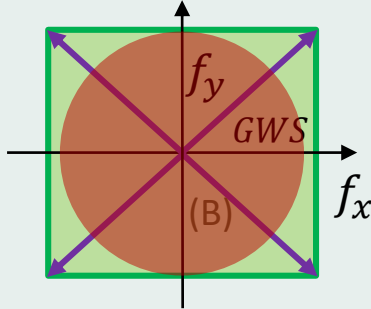
Sie wird manchmal auch Grasp-Wrench-Space-Metrik genannt.

Intuition:

- ε ist die Stärke des kleinsten Wrenchs, der den Griff bricht.
- Der Griff widersteht allen Wrenches, deren Stärke unter ε ist.
- Wenn $\varepsilon > 0$, ist der Griff kraftgeschlossen.
- Je größer ε , desto „stabiler“ ist der Griff.



Grasp-Wrench-Space-Metrik: Beispiele

Griff	(A)	(B)
2D Arbeitsraum		
f_x, f_y -Ebene des Grasp-Wrench-Space mit ε -Kugel um Ursprung		
ε_{xy} -Metrik in f_x, f_y -Raum	$\varepsilon_{xy} = 0.0707$	$\varepsilon_{xy} = 1$

Grasp-Wrench-Space-Metrik: Bemerkungen

Problem 1: Kräfte und Drehmomente haben verschiedene Einheiten.

- ε -Metrik über ganzen GWS definiert, d.h. Kräfte und Drehmomente.
- Wie skaliert man Kräfte zu Drehmomenten?

Mögliche Lösung:

- Wähle charakteristische Länge r des Objekts (z.B. größte Ausdehnung).
- Konvertiere Drehmomente τ zu Kräften τ/r .

Problem 2: Drehmomente hängen von Wahl des Bezugspunkts (OKS) ab.

- Damit hängt auch ε -Metrik von Wahl des Bezugspunkts ab.

Mögliche Lösung:

- Wähle Ursprung des OKS nahe des geometrischen Zentrums oder Schwerpunkts.

Grasp-Wrench-Space-Metrik: Bemerkungen

Problem 3: Betrachte diesen Griff

- ε -Metrik liefert sehr guten Wert.
- Aber: Ungenauigkeiten bei Ausführung kann zu sehr schlechtem Griff führen.

Mögliche Lösung:

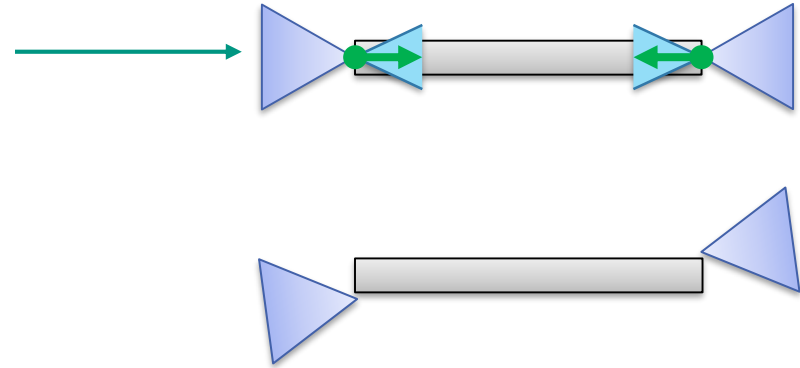
- Berechne ε -Metrik mehrfach für zufällig oder systematisch perturbierte Objektposen.

Option 1:

- Wähle Minimum, 10. Perzentil, Median, ... der ε -Metrik der zufälligen Posen

Option 2:

- Verwende Anteil der Griffe, deren $\varepsilon > 0$ (kraftgeschlossen) → „Griff-Erfolgsrate“



Grasp-Wrench-Space-Metrik: Zusammenfassung

Die ε -Metrik ...

- ist eine allgemeine und weit verbreitete **Qualitätsmetrik für Fingerspitzengriffe**
- modelliert, wie **widerstandsfähig** ein Griff gegenüber externen Wrenches ist
- kann verwendet werden, um Griffe auf **Kraftschluss** zu prüfen
- benötigt **Modellwissen**
 - Geometrie der Finger und Objekt, Reibungskoeffizienten, Kontaktpositionen und -normalen

Der optimale Griff hängt auch von der **Anwendung** ab!

- Bestimmte Kräfte treten überwiegend oder ausnahmslos auf
- Objekt muss auf bestimmte Art und Weise manipuliert werden
- Objekt muss übergeben oder für eine Aufgabe (z.B. hämmern) verwendet werden
- → Das wird in der grundlegenden ε -Metrik nicht berücksichtigt

Metriken für Griffqualität sind ein **aktuelles Forschungsthema**!

Inhalt

- Motivation
- Grifftaxonomien
- Kontaktmodelle und Grasp-Wrench-Space
- **Greifplanung und Griffsynthese**
- Beispiele: Greifen mit ARMAR

Klassifikation von Greifplanungssystemen

Greifplanungssysteme können nach folgenden Kriterien klassifiziert werden:

- Typ des verwendeten **Greifers** (Zweifinger-, Dreifinger-, Mehrfingergreifer, ...)
- Typ der zugrunde liegenden **Greifplanungsalgorithmen**
 - Geometrie-basiert (Verwendung von CAD-Daten)
 - Physik-basiert (auftretende Kräfte und Momente)
- Typ der Geometrie des zu greifenden **Objekte** (Polygone, Polyeder, beliebige Geometrie...)
- Typ der zu manipulierenden **Szenen**
 - Bekannt: Lage und Orientierung aller Objekte in der Szene bekannt
 - (Teilweise) unbekannt: Es kommen unbekannte Objekte an unbekannten Posen vor
- Typ der **Sensorik** (Keine Sensorik, taktile Sensorik, visuelle Sensorik, ...)

Suchraum des Greifens

- Soll ein zulässiger Griff geplant werden, so beträgt **die Dimension des Suchraums** (für den physikalischen als auch für den geometrischen Ansatz)

$$6 + n$$

- 6 Freiheitsgrade für die Position und Orientierung der Hand im Raum
 - n Anzahl der Konfigurationsparameter der Handfinger
- Parallelbackengreifer:
Suchraum der Dimension 7 (1 für den Greifer + 6)
- ARMAR-III Hand:
Suchraum der Dimension 14 (8 für die Hand + 6)
- Menschliche Hand:
Suchraum der 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*)

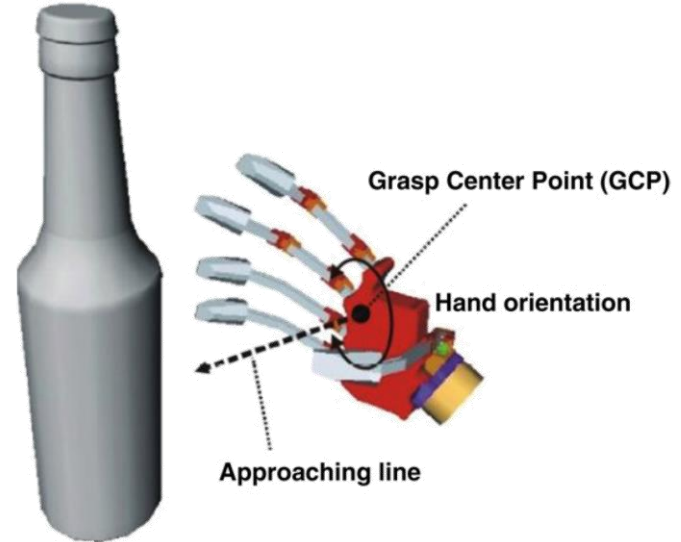
- Konkrete Objektgeometrie ist nicht bekannt (z.B. nur „Objekt ist vom Typ Flasche“)
- Ansatz: Übertrage Wissen von bekannten Klassenelementen auf das zu greifende Objekt
- **Schwieriger**

Unbekannte Objekte (*unknown objects*)

- Weder Objektgeometrie noch Objektklasse sind bekannt
- Probleme (u.a.)
 - Umgehen mit unvollständige/lückenhaften Sensordaten (Stereo Vision, RGB-D, Laserscans, haptische Daten)
 - Segmentierung des Objektes vom Hintergrund
 - Erstellen eines (teilweisen) Objektmodells
- Ansätze (u.a.)
 - Sensorfusion
 - Interaktive Perzeption (Objekt verschieben)
- **Am schwierigsten!**

Definition eines Griffes

- Ein Griff kann definiert werden durch
 - **Griffmittelpunkt** auf dem Objekt, an dem der Tool Center Point (TCP) ausgerichtet werden soll (Anfahrtpunkt)
 - **Annäherungsvektor** beschreibt den Winkel mit dem sich die Hand dem Griffmittelpunkt nähert (Anfahrtsrichtung)
 - **Orientierung des Handgelenks** der Roboterhand
 - **Initiale Fingerkonfiguration (pre-shape)**



Algorithmen zur Griffsynthese

Voraussetzungen

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

Algorithmen zur Griffsynthese bei bekannten Objekten

- **Übersichtsartikel (Survey):** 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 Objektteilen** [Goldfelder et al. 2007, Huebner et. al 2008, ...], Darstellung der Objekte durch (approximierte) Objektteilen (object parts), Synthese von Griffen auf den Objektteilen
- Greifplanung über die **Mediale Achse oder Skeleton der Objekte** [Przybylski et al. 2010, Vahrenkamp et al. 2018]
- Griffsynthese basierend auf **Eigengrasps** [Ciocarlie et al. 2007, Bicchi et al. 2011, ...]
- Greifplanung basierend auf **Independent Contact Regions** [Roa et al. 2009]
- ...

Griffsynthese durch Vorwärtsplanung (I)

Ansatz

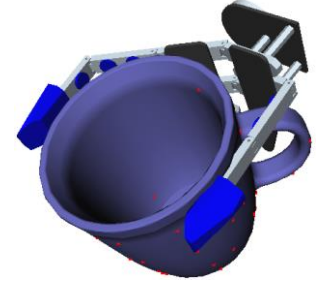
- Planung in Simulation
 - Bestimmung von Anfahrtpunkt und Anfahrtsrichtung
 - Hand nähert sich dem Objekt, bis ein Kontakt detektiert wird
 - Finger schließen sich um das Objekt, bis Kontakt hergestellt ist
 - Evaluation der Kontakte zwischen Hand und Objekt
- Interessant: Ist der Griff **kraftgeschlossen**?

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 (z.B. ε -/GWS-Metrik)

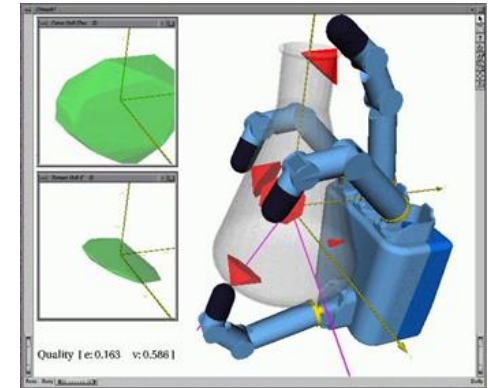


Griffqualität (Kraftschluss-Metrik)

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

■ Ansatz

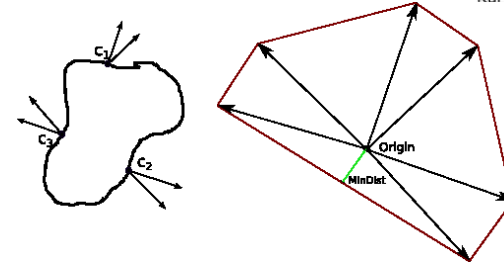
- Bestimme Kontaktpunkte und Kontaktnormalen zwischen Hand und Objekt
- Bestimme den Reibungskegel an jedem Kontaktpunkt (Öffnungswinkel des Kegels hängt von den Reibungskoeffizienten ab)
- Berechne den **Grasp Wrench Space** (GWS, 6D) als konvexe Hülle über alle Reibungskegel
- **ϵ -Metrik:** Die minimale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



- Rot: Reibungskegel
- Grün: Projektionen des GWS

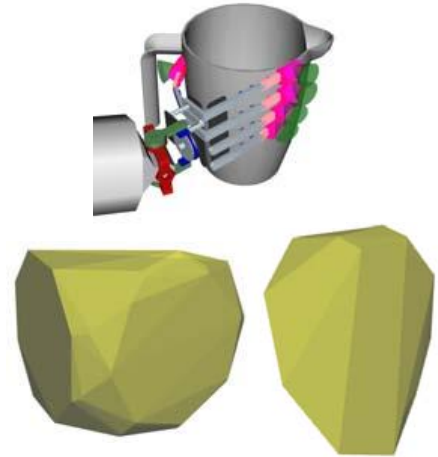
Grasp Wrench Space

- Grasp Wrench Space (GWS):
Konvexe Hülle über die Vereinigung aller Kontakt-Wrenches



2D Beispiel mit 3 Kontakten (Kraft)

- Qualitätsmaß
 - Kraftschluss (force closure):
GWS enthält Ursprung
 - Volumen (V): Volumen des GWS
 - Epsilon (ε): größte einschließende Kugel,
bzw. kleinste Distanz ε vom Ursprung zum Rand des GWS

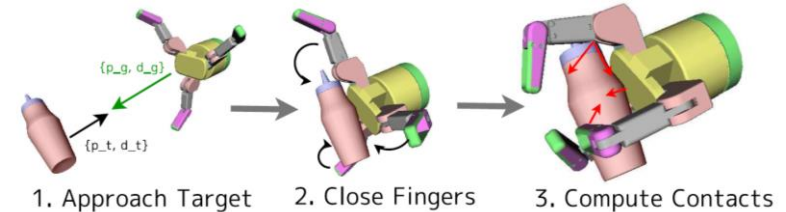


N. Vahrenkamp, T. Asfour and R. Dillmann, *Simultaneous Grasp and Motion Planning*, IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol. 19, No. 2, pp. 43 - 57, June, 2012

Zufallsbasierte Vorwärts-Greifplanung (I)

Ablauf:

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



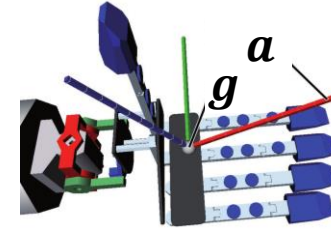
1. R. Diankov, *Automated construction of robotic manipulation programs*, Ph.D. dissertation, Carnegie Mellon University, Robotics Institute, Aug 2010.
2. Dmitry Berenson, Rosen Diankov, Koichi Nishiwaki, Satoshi Kagami, and James Kuffner, *Grasp Planning in Complex Scenes*, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids07), December, 2007.
3. 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 (II)

Handmodell

■ Grasp Center Point (GCP):

Definiert das Zentrum g sowie die
Anfahrtsrichtung a für einen Grifftyp

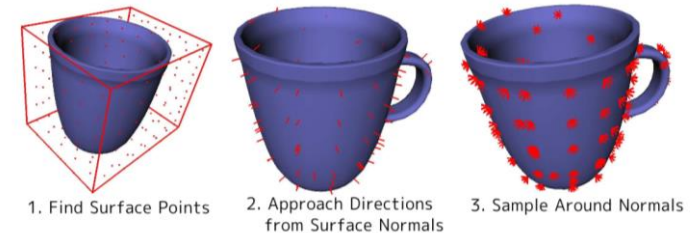


Definition des GCPs der ARMAR-III
Hand für einen Kraftgriff

Erzeugung von Griffhypothesen

■ Bestimmung der Anfahrtsrichtung:

- Zufällige Auswahl eines Oberflächenpunktes p
- Ermittlung der Oberflächennormalen n

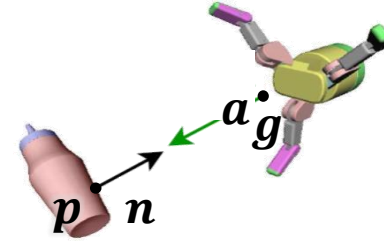


Zufallsbasierte Vorwärts-Greifplanung (III)

Bestimmung der Griffhypothese

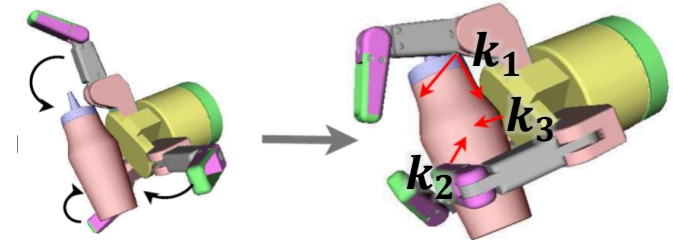
■ Positionierung der Hand

- Position der Hand: $\mathbf{g}$ liegt auf Halbgerade, welche durch $\mathbf{p}$ und $\mathbf{n}$ definiert wird
- Ausrichtung der Handorientierung, so dass $\mathbf{a}$ und $\mathbf{n}$ kollinear sind. Der freie Parameter (Handorientierung um $\mathbf{a}$) wird zufällig gewählt.



■ Kontaktermittlung

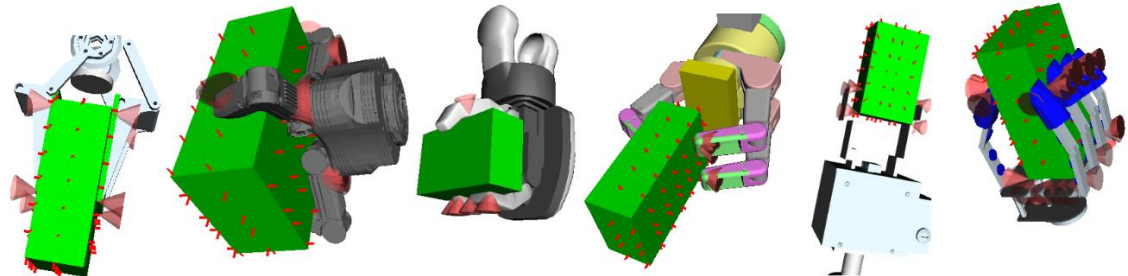
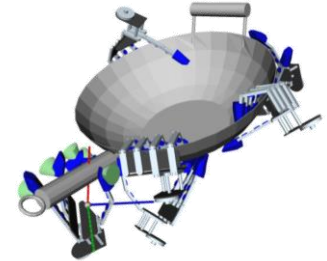
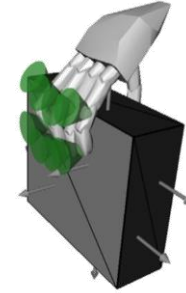
- Bewegung der Hand entlang $\mathbf{a}$ zum Objekt
- Schließen der Finger
- Ermittlung von n Kontaktpunkten $\mathbf{k}_1, \dots, \mathbf{k}_n$



Zufallsbasierte Vorwärts-Greifplanung (III)

Analyse der Griffhypothese

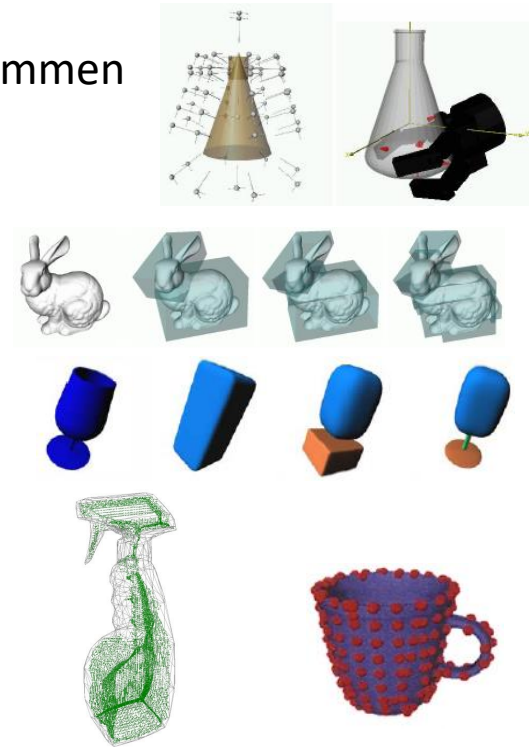
- Kontaktpunkte $k_1, \dots, k_n$ werden analysiert
 - Kraftschluss
 - Griffqualität ($V, \varepsilon, \dots$)
- Valide Griffe werden gespeichert
- Griffhypothesen mit unzureichenden Eigenschaften werden verworfen



Griffsynthese auf Objektteilen

- Komplexe Objektgeometrie: Schwierige Griffberechnung
- **Ausweg:** **Gute Griffkandidaten** auf Teilen eines Objekts bestimmen
- Ansätze für verschiedene Objektapproximationen

Formprimitive (shape primitives)	Manuelle Unterteilung in Primitive (Boxen, Zylinder, Kugeln, Kegel, usw.)
Box-Dekomposition	Automatische Unterteilung (nur Boxen)
Superquadriken	Automatische Unterteilung
Mediale-Achse-Transformation	Nur Kugeln
Oberflächennormalen	



Greifplanung mit Formprimitiven (I)

- Objekte werden durch einfache **Formprimitive** (*shape primitives*) dargestellt
- Für jedes Formprimitiv werden unterschiedliche **Greifstrategien** vordefiniert.
(inklusive Startpunkt und Anrückrichtung)
- **Vorwärtssimulation** (wie vorher):
 - Der Startpunkt definiert die initiale Handposition
 - Basierend auf der Anrückrichtung wird die Hand zum Objekt bewegt bis ein Kontakt ermittelt wird
 - Kontaktpunkte werden durch Schließen der Hand bestimmt
 - Evaluation der Kontakte über den GWS-Ansatz

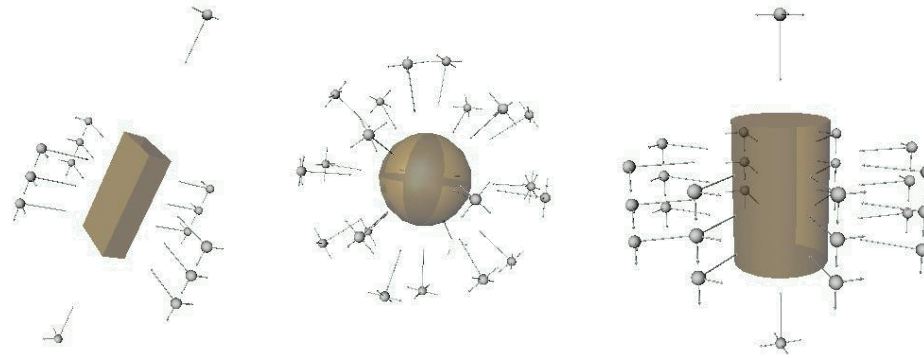


A. T. Miller, S. Knoop, H. I. Christensen, and P. K. Allen, *Automatic Grasp Planning Using Shape Primitives*, in IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation (ICRA), 2003, pp. 1824–1829.

Greifplanung mit Formprimitiven (II)

■ Greifstrategien

- Box
- Kugel
- Zylinder
- Kegel



■ Parameter

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

Greifplanung mit Formprimitiven – Ergebnisse



-

Heuristische Griffauswahl

Endgültiger Griff

Greifen bekannter Objekte: Ein Box-basierter Ansatz (II)

■ 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) Dreiecksnetze (*Meshes*)

■ Approximation der Objektgeometrie durch Box-Dekomposition

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

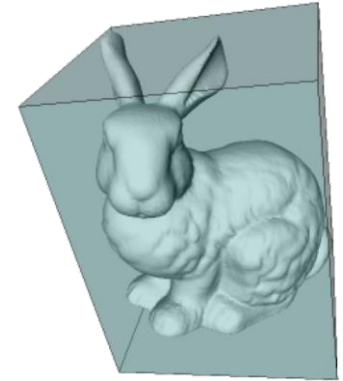
[Barequet and Har-Peled, 2001]

■ Basierend auf Punktwolken

1. 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)
2. 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

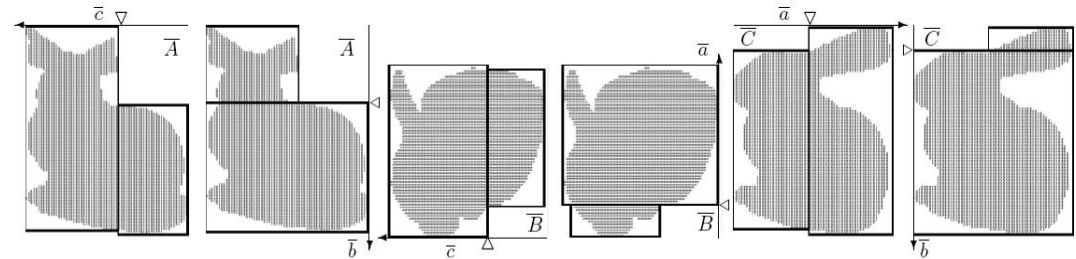
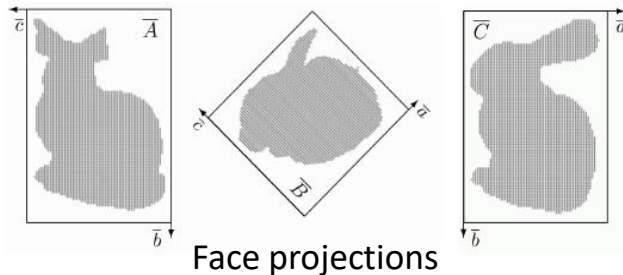
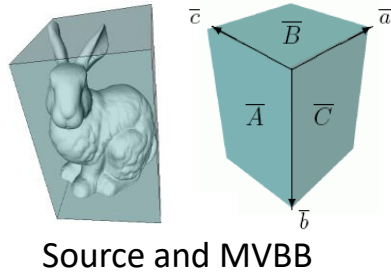
Dekompositionsalgorithmus: Von Punkten zu Boxen (I)

- Effizienter Algorithmus zur Berechnung der *Minimum Volume Bounding Box (MVBB)* von Barequet und Har-Peled (2001)
- Nimmt eine **3D Punktwolke** mit n Punkten und berechnet die MVBB mit Komplexität $O(n \log n + n/\varepsilon^3)$ (ε : GWS-Metrik für kraftgeschlossene Griffe)
- **Benötigt**: Ein Teilungskriterium, um die Wurzel der MVBB in eine Menge von kleineren Boxen zu unterteilen, die die Form **genauer** approximieren.
- **Ansatz**:
 - Prüfe die 6 flächenparallele Ebenen des MVBB auf die Minimierung des umschlossenen Volumens.
 - Teile die Punktwolke iterativ und fitte zwei neue Kind-Boxen.



Dekompositionsalgorithmus: Von Punkten zu Boxen (II)

- Reduziert das Problem des Teilens eines 3D-Quaders durch eine oberflächenparallele Ebene auf das Teilen eines 2D-Rechtecks durch eine kantenparallele Linie

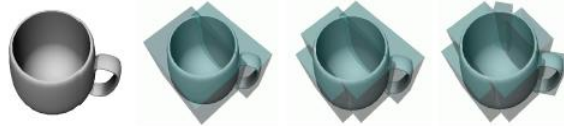


$$\theta_1(\bar{A}, \bar{c}, i_1) = 0.84 \quad \theta_2(\bar{A}, \bar{b}, i_2) = 0.84 \quad \theta_3(\bar{B}, \bar{c}, i_3) = 0.92 \quad \theta_4(\bar{B}, \bar{a}, i_4) = 0.92 \quad \theta_5(\bar{C}, \bar{a}, i_5) = 0.93 \quad \theta_6(\bar{C}, \bar{b}, i_6) = 0.94$$

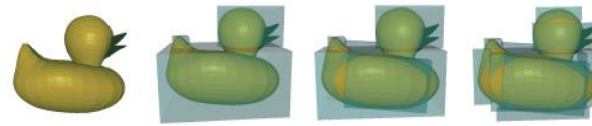
Fig. 4. Best cuts along the six box directions and cut positions i marked by triangles. The corresponding volume values $\theta(\bar{F}, \bar{f}, i)$ are presented below.

K. Huebner and D. Kragic, "Selection of robot pre-grasps using box-based shape approximation," 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2008, pp. 1765-1770.

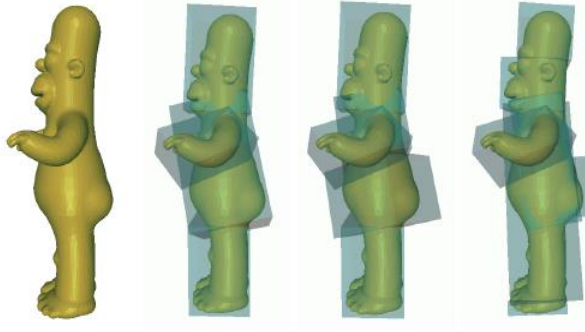
Dekompositionsalgorithmus: Von Punkten zu Boxen (III)



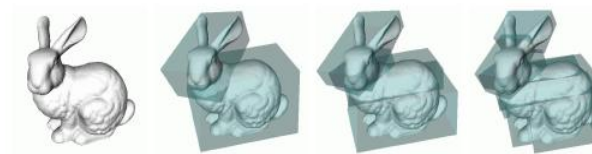
(a) Mug (model): MVBBs (2,3,5) produced with $t=0.90, 0.94, 0.98$.



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



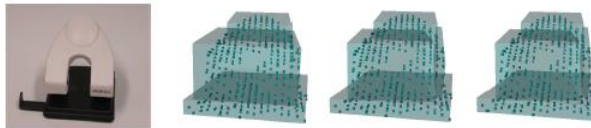
(c) Homer (model): MVBBs (4,5,7) produced with $t=0.90, 0.94, 0.98$.



(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 $t=0.90, 0.94, 0.98$.

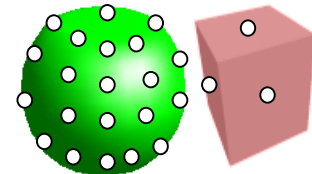
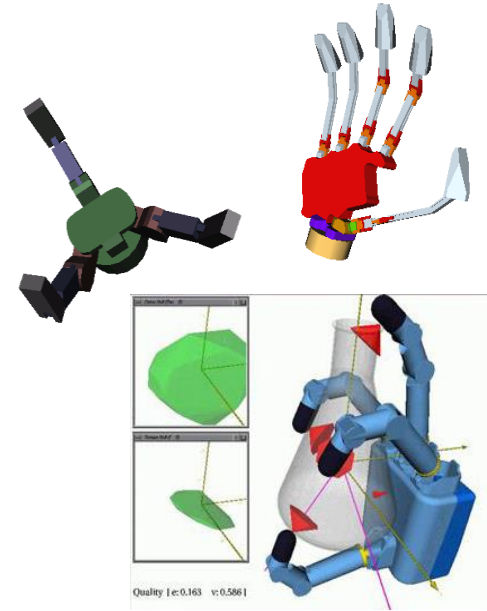
Details in [Huebner et al., 2008]

Erzeugen von Griffhypothesen: Von Boxen zu Griffen

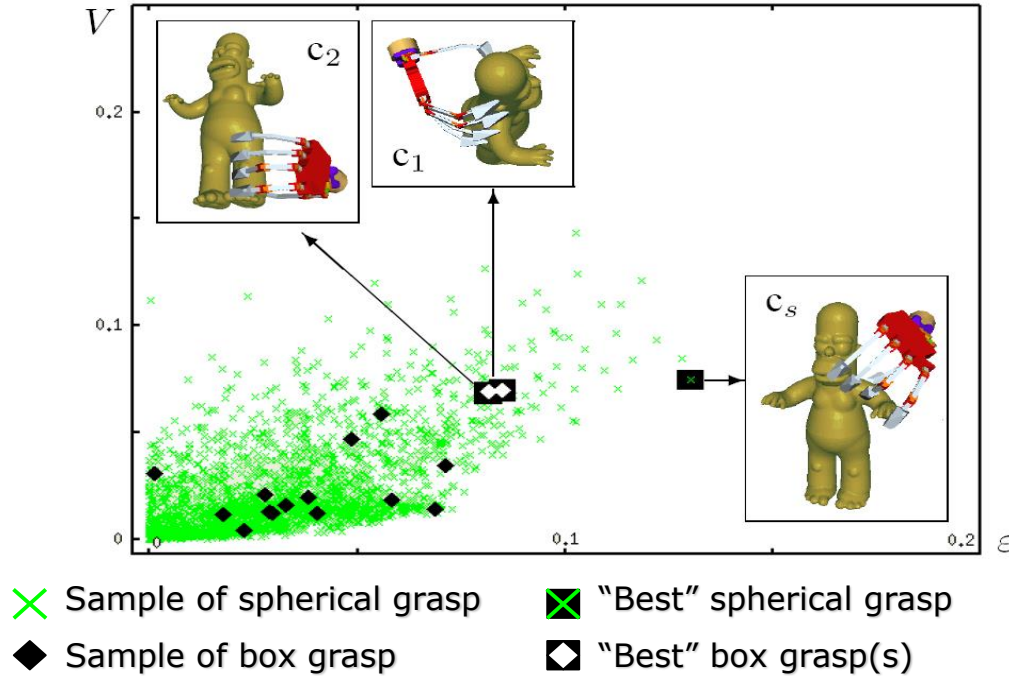
- Jede Box hat sechs Seitenflächen, welche jeweils **vier Griffhypothesen** implizieren
 - **Griffpunkt**: Mittelpunkt der Seitenfläche
 - **Griffrichtung**: Entlang der Normale der Seitenfläche
 - **Handorientierung**: Vier Möglichkeiten, orientiert an den Kanten der Fläche
- Über die Größen der Seitenflächen 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 (I)

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

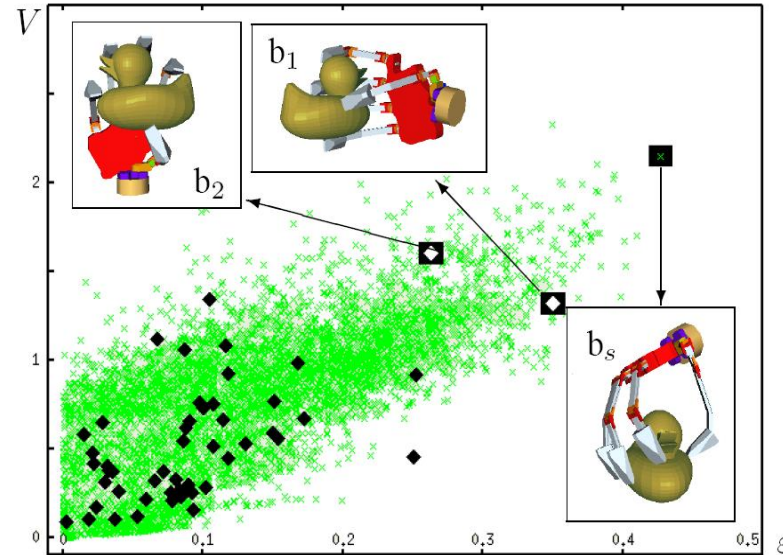


Evaluation (II)



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

Evaluation (III)



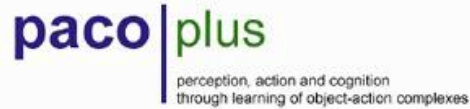
✕ Sample of spherical grasp

✕ "Best" spherical grasp

◆ Sample of box grasp

◆ "Best" box grasp(s)

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



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



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

Kungliga Tekniska Höskolan
K. Hübner, D. Kragic



March 2009

Dekompositionsalgorithmus: Ergebnisse

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

Greifplanung mit Superquadriken (I)

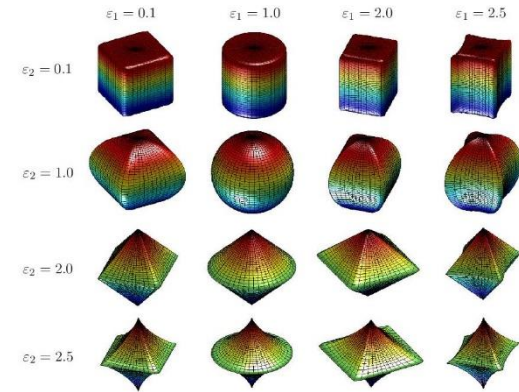
Superquadrik:

- 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:

$$X(\eta, \omega) = \begin{pmatrix} a_1 \cos^{\varepsilon_1}(\eta) \cos^{\varepsilon_2}(\omega) \\ a_2 \cos^{\varepsilon_1}(\eta) \sin^{\varepsilon_2}(\omega) \\ a_3 \sin^{\varepsilon_1}(\eta) \end{pmatrix}$$

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 $\varepsilon_1, \varepsilon_2 \in [0,1]$ bestimmen die Schärfe des Kantenverlaufs.



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

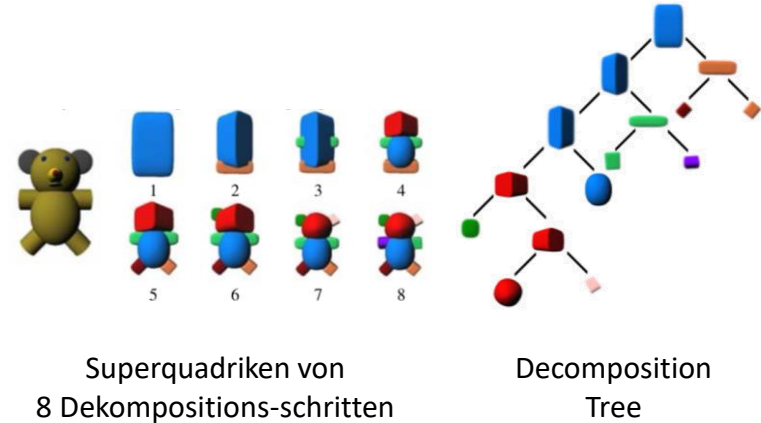
Greifplanung mit Superquadriken (II)

Objektdarstellung mit Superquadriken

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

Decomposition Tree

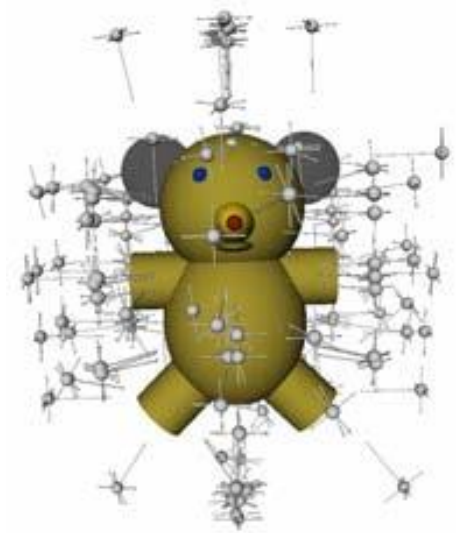
- Verfeinere die Approximation schrittweise
 - Suche Superquadrik mit größtem Fehler zur Punktwolke
 - Teile die zugehörige Punktwolke
 - Erstelle zwei neue Superquadriken
- Speichere Resultate für jeden Approximationsschritt im **Decomposition Tree**



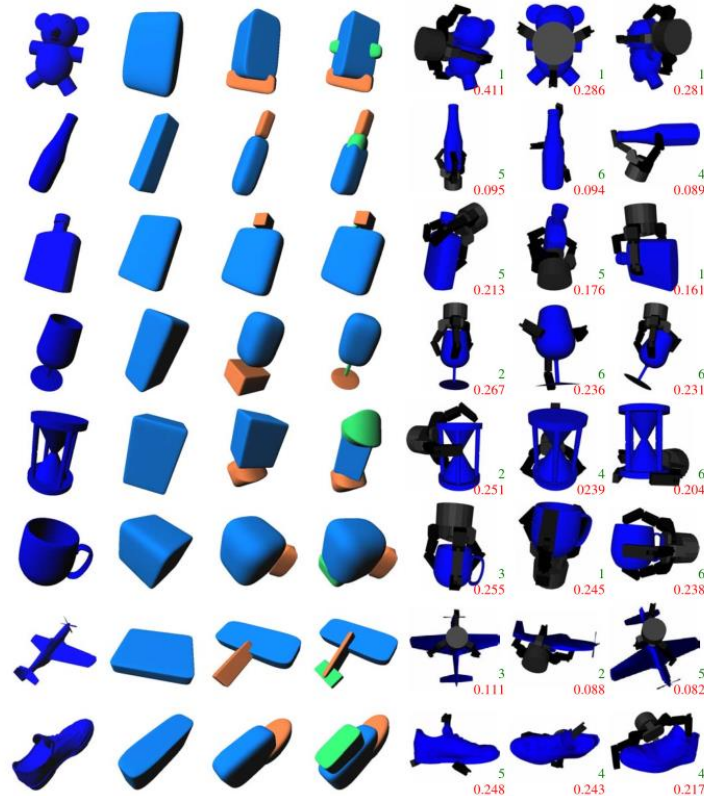
Greifplanung mit Superquadriken (III)

Greifplanung

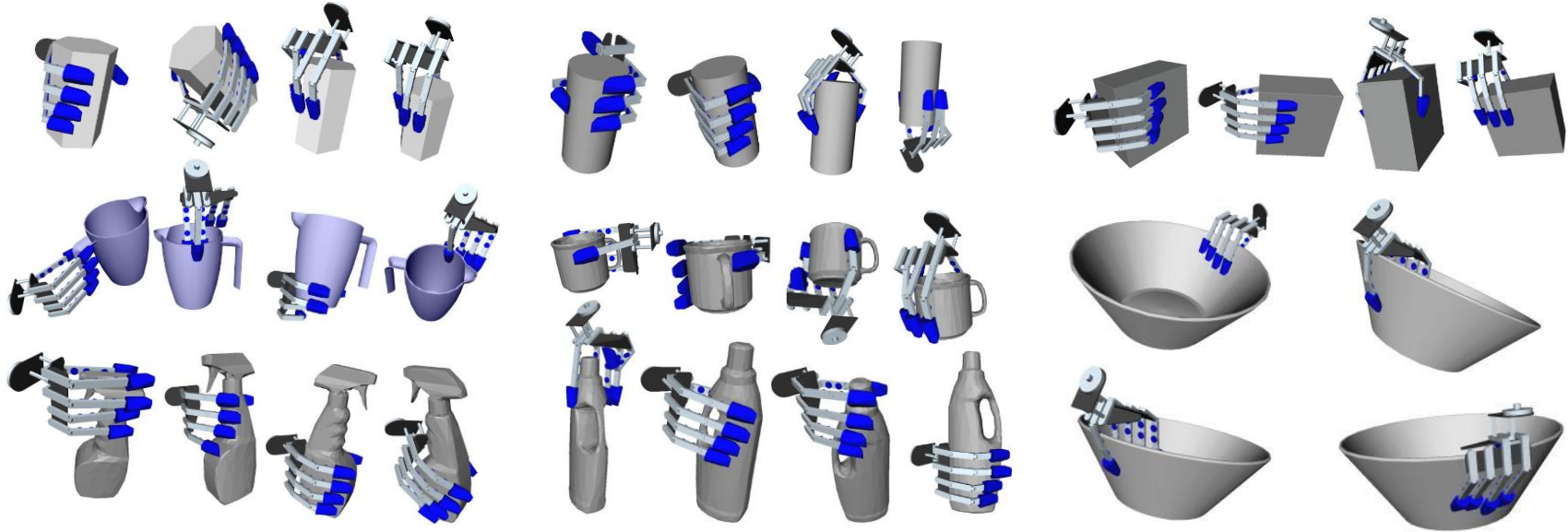
- Für jede Superquadrik werden **Griffhypothesen** erzeugt. Gleichverteilte Anfahrtspunkte und Anfahrtsrichtungen relative zur Oberfläche der entsprechenden Superquadrik
- **Evaluation** der Griffhypothesen mittels GWS-Ansätzen. **Detailliertes Objektmodell** (3D Mesh)
- Für **alle Ebenen** des Decomposition Trees: Greifplanung auf groben sowie feinen Strukturen des Objektes



Greifplanung mit Superquadriken – Ergebnisse



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:** Nutze **lokale Symmetrien** der Objektgeometrie.
Die Repräsentation des Objektes ist wichtig
 - Dreiecksnetz: Zu niedriges Abstraktionsniveau
 - **Mediale Achse als Objektrepräsentation**

1. 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
2. Przybylski, M., Wächter, M., Asfour, T. & Dillmann, A *Skeleton-based Approach to Grasp Known Objects with a Humanoid Robot*, IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), pp. 376 - 383, 2012

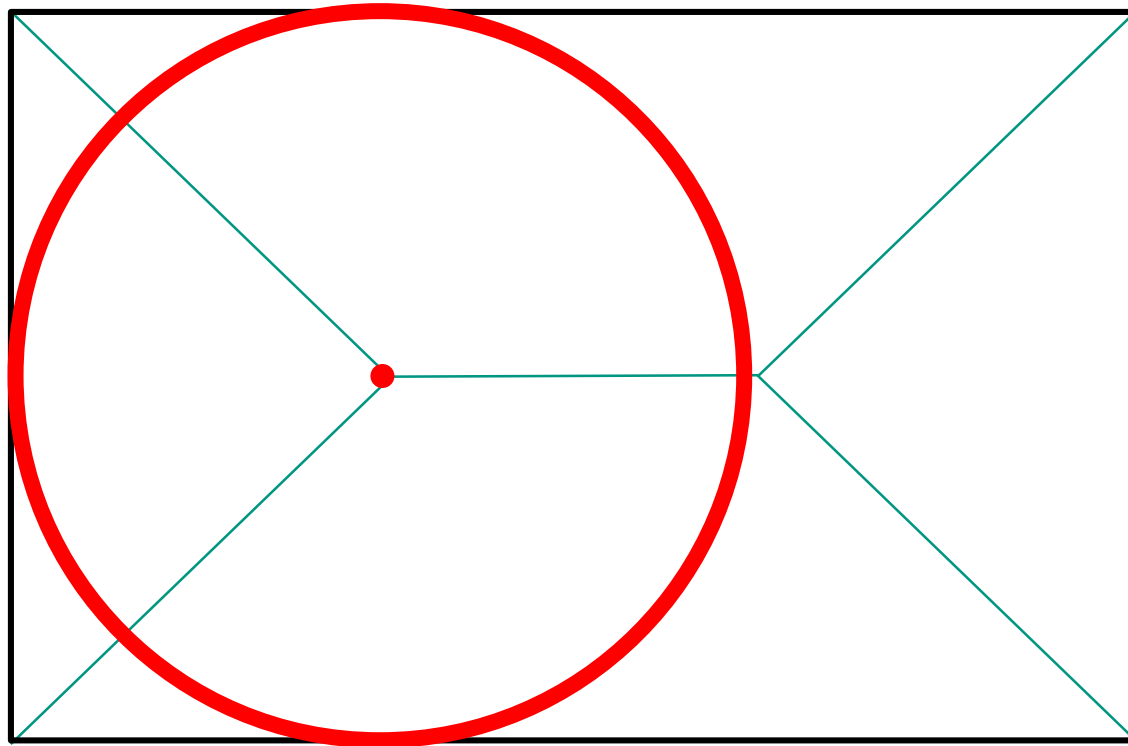
Griffplanung mit medialen Achsen

- Mediale Achse (Blum 1967)
 - Objektform wird approximiert über **enthaltene Kugeln** mit maximalem Durchmesser
 - Enthaltene Kugeln müssen die Objekthülle an **mindestens zwei** Punkten berühren
- Die mediale Achse ist definiert als 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

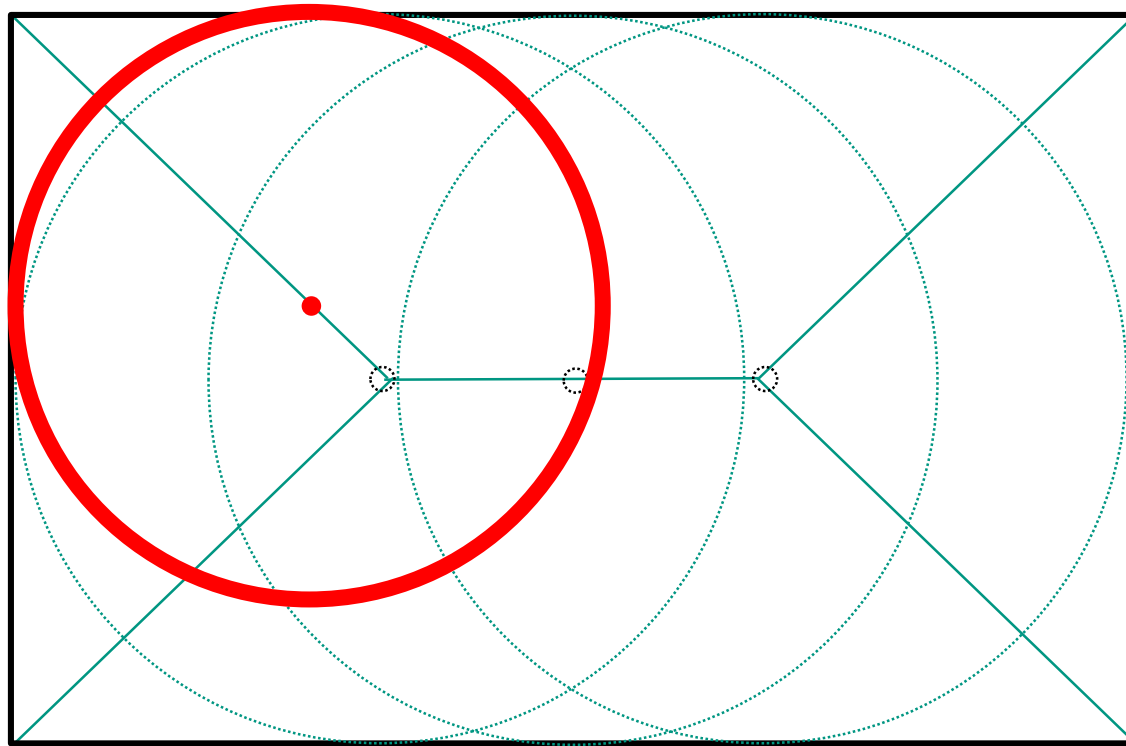


H. Blum, Models for the Perception of Speech and Visual Form. A transformation for extracting new descriptors of shape, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1967, pp. 362–380.

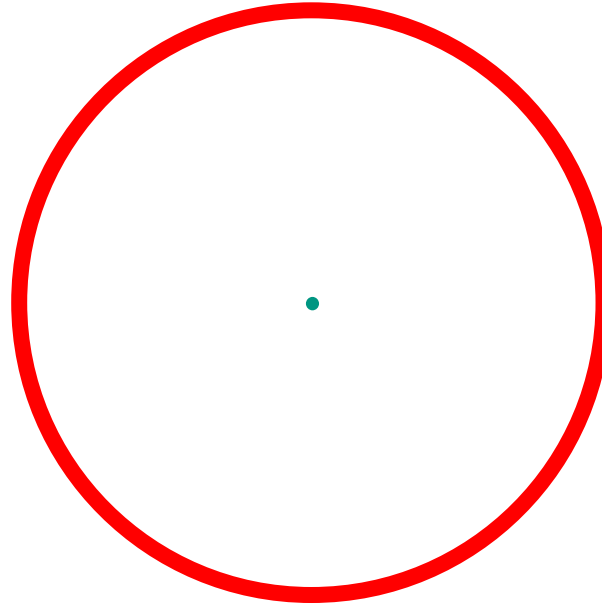
Beispiel: Mediale Achsen G_1



Beispiel: Mediale Achsen G_1

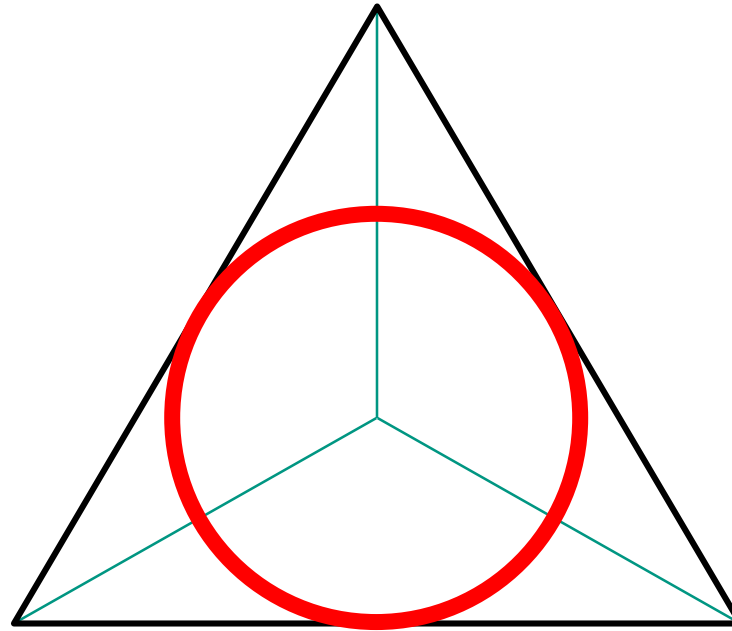


Beispiel: Mediale Achsen G_2



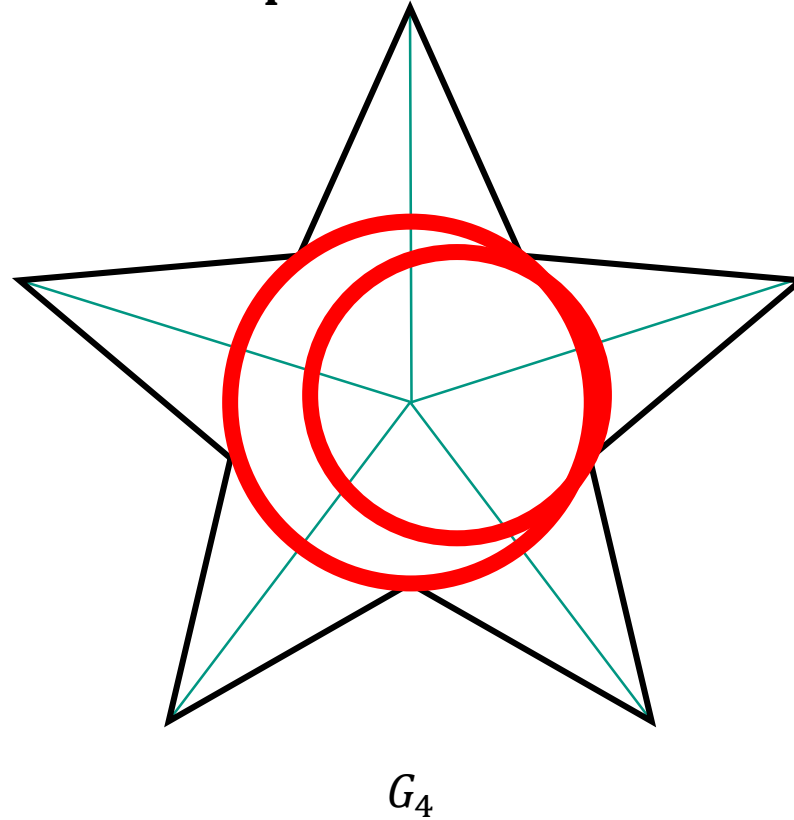
G_2

Beispiel: Mediale Achsen G_3

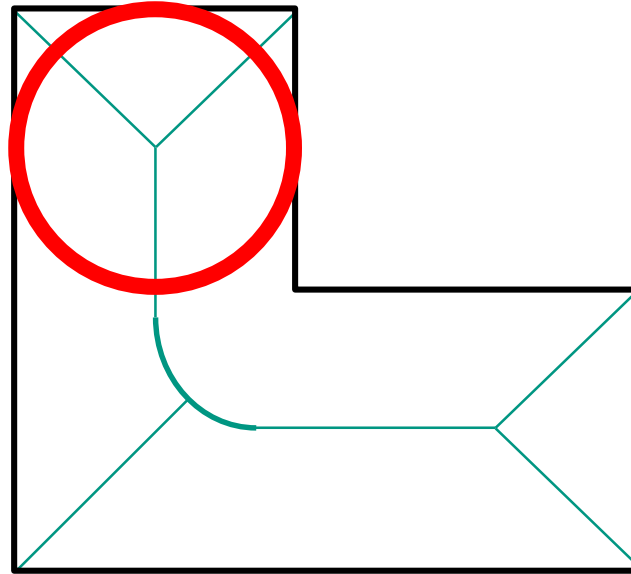


G_3

Beispiel: Mediale Achsen G_4

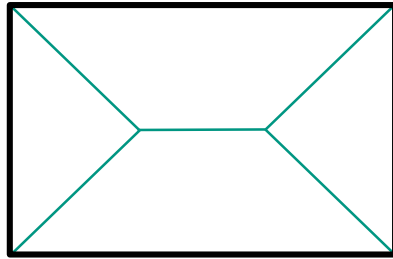
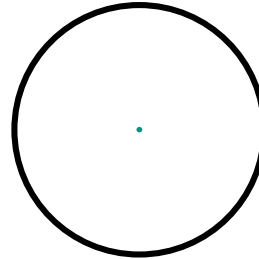
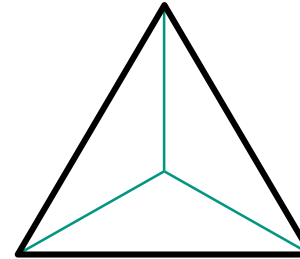
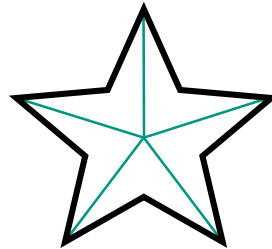
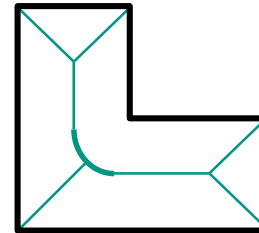


Beispiel: Mediale Achsen G_5



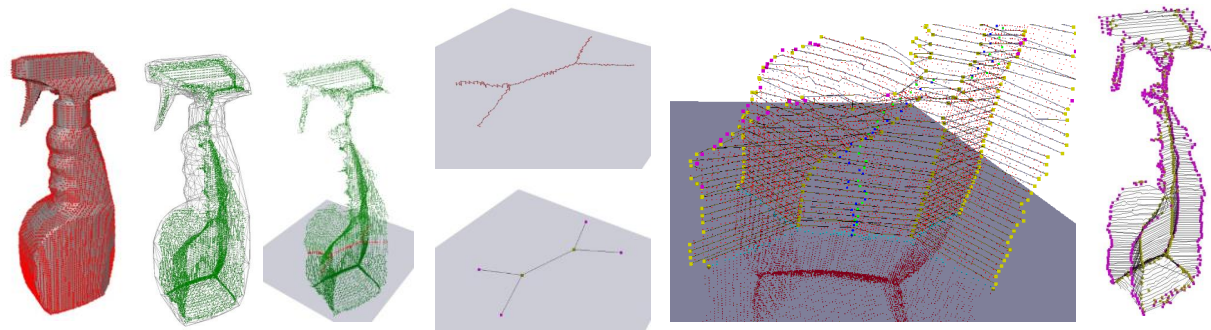
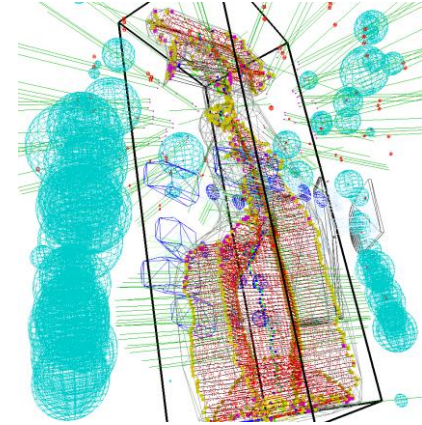
G_5

Beispiel: Mediale Achsen $G_1 \dots G_5$

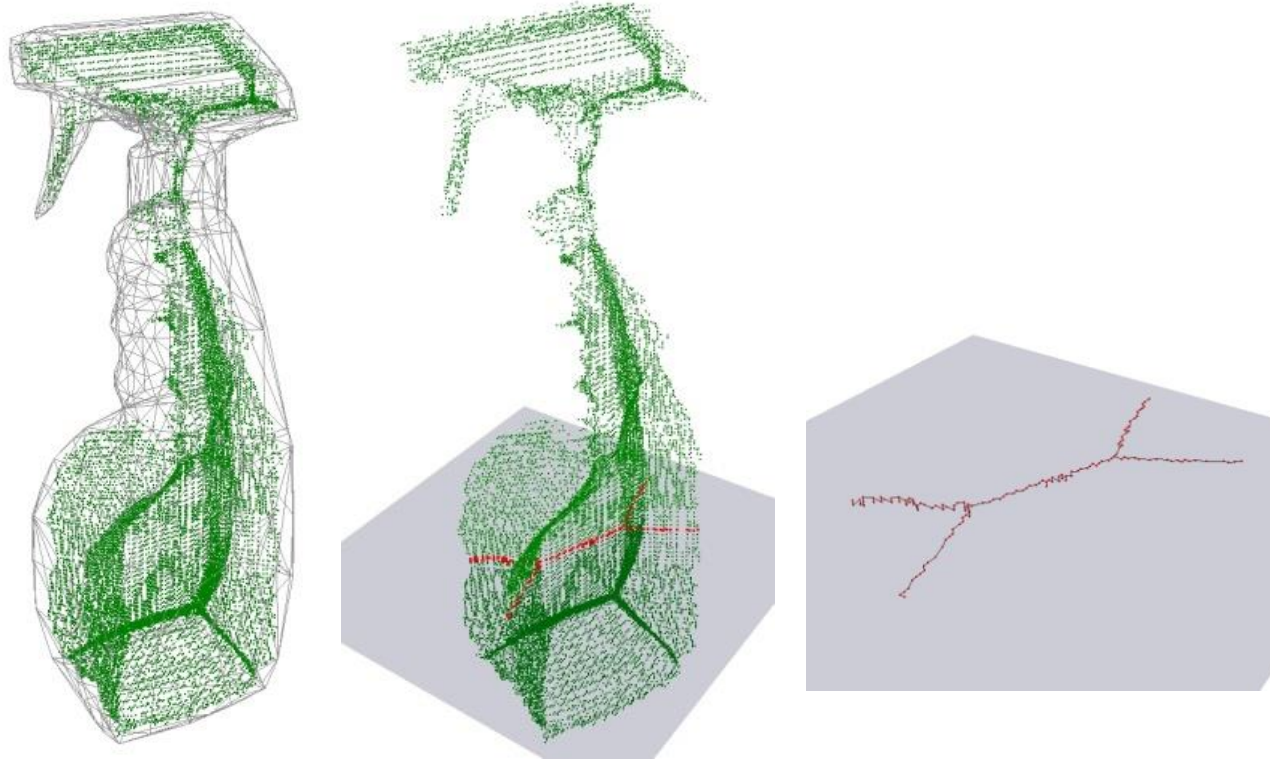

 G_1

 G_2

 G_3

 G_4

 G_5

Griffplanung mit medialen Achsen – Algorithmus

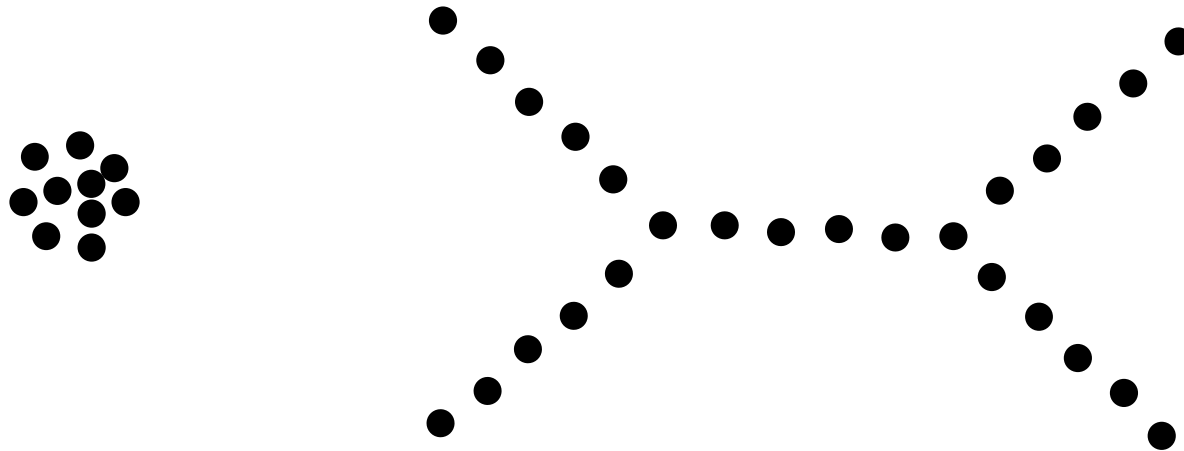
1. Abtasten der Objektoberfläche
2. Berechnen der medialen Achse
3. Analyse der Querschnitte der medialen Achse
 - Minimum Spanning Tree (MST)
 - Clustern
 - Konvexe Hülle
4. Erzeuge Griffhypothesen
5. Evaluiere Griffstabilität



Analyse der Querschnitte der medialen Achse

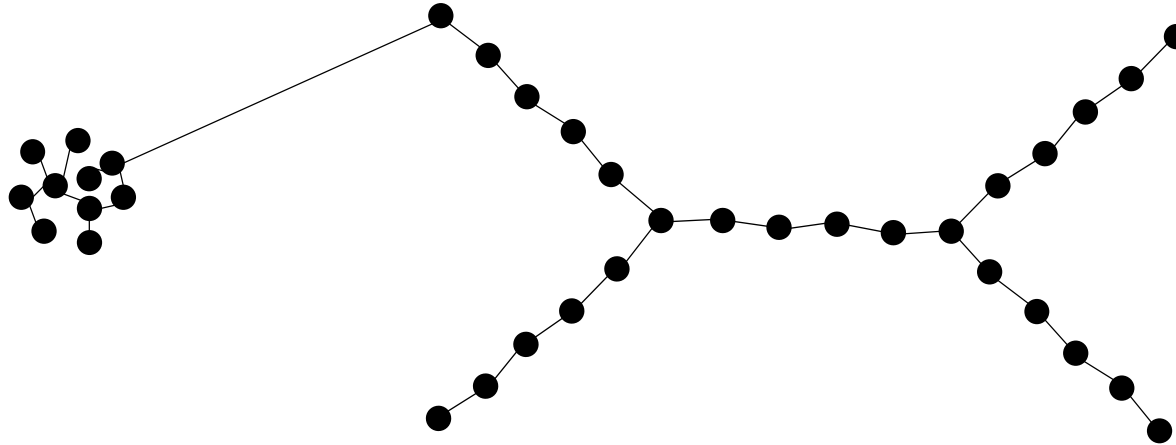


Analyse eines Querschnitts der medialen Achse I



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

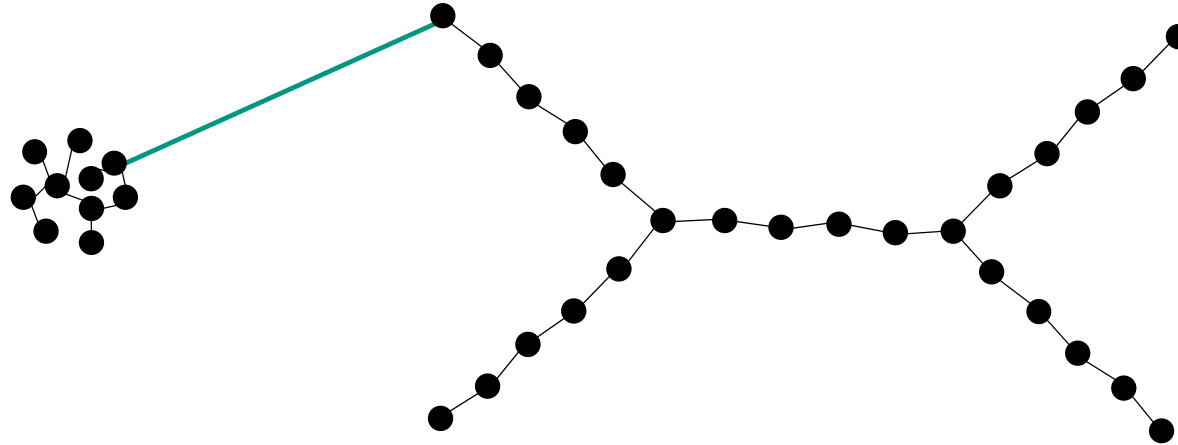
Analyse eines Querschnitts der medialen Achse II



■ **Schritt 1:** Bestimmung des MST

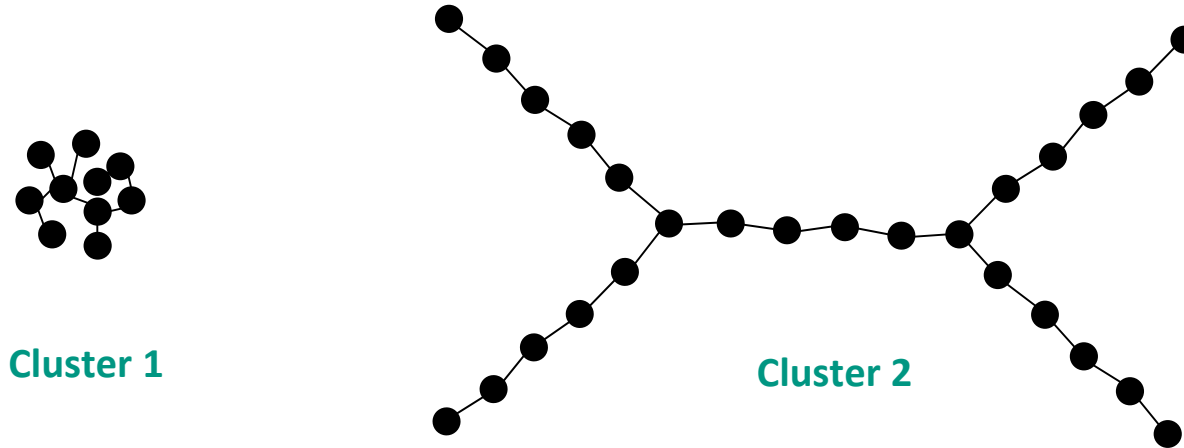
■ **Ergebnis:** Alle Punkte sind mit ihren jeweils nächsten Nachbarn verbunden

Analyse eines Querschnitts der medialen Achse III

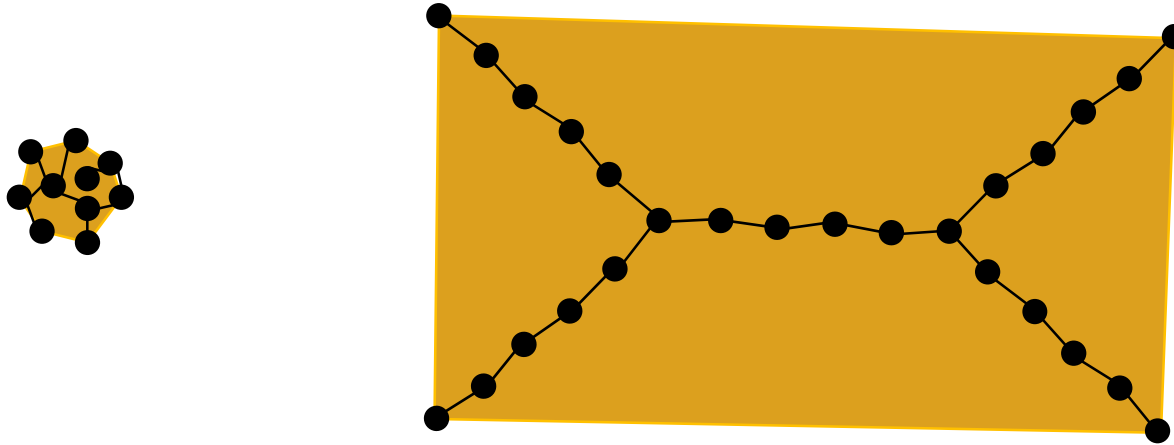


- **Schritt 2:** Entferne Kanten, die länger sind als ein Grenzwert d_{cut}
- Ergebnis: Unterteilung der medialen Achse in zusammengehörige Cluster

Analyse eines Querschnitts der medialen Achse III



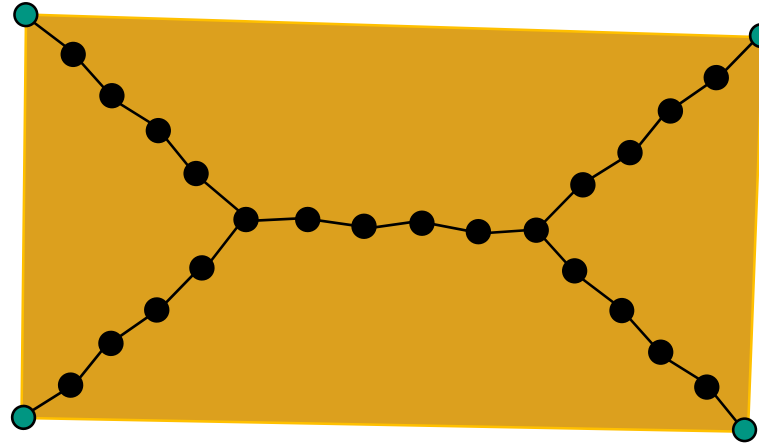
- **Schritt 2:** Entferne Kanten, die länger sind als ein Grenzwert d_{cut}
- Ergebnis: Unterteilung der medialen Achse in zusammengehörige Cluster



■ Schritt 3: Berechne für jedes Cluster

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

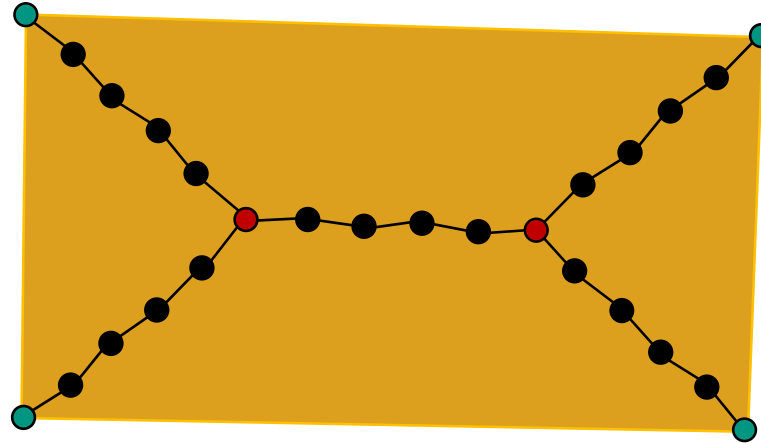
Analyse eines Querschnitts der medialen Achse V



■ Schritt 3: Berechne für jedes Cluster

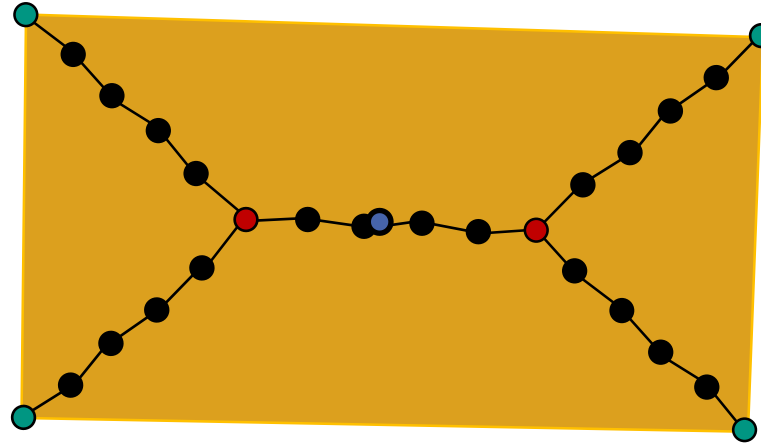
- Volumen der konvexen Hülle
- **Randpunkte der konvexen Hülle**
- Verzweigungspunkte des MST
- Masseschwerpunkt

Analyse eines Querschnitts der medialen Achse VI



■ Schritt 3: Berechne für jedes Cluster

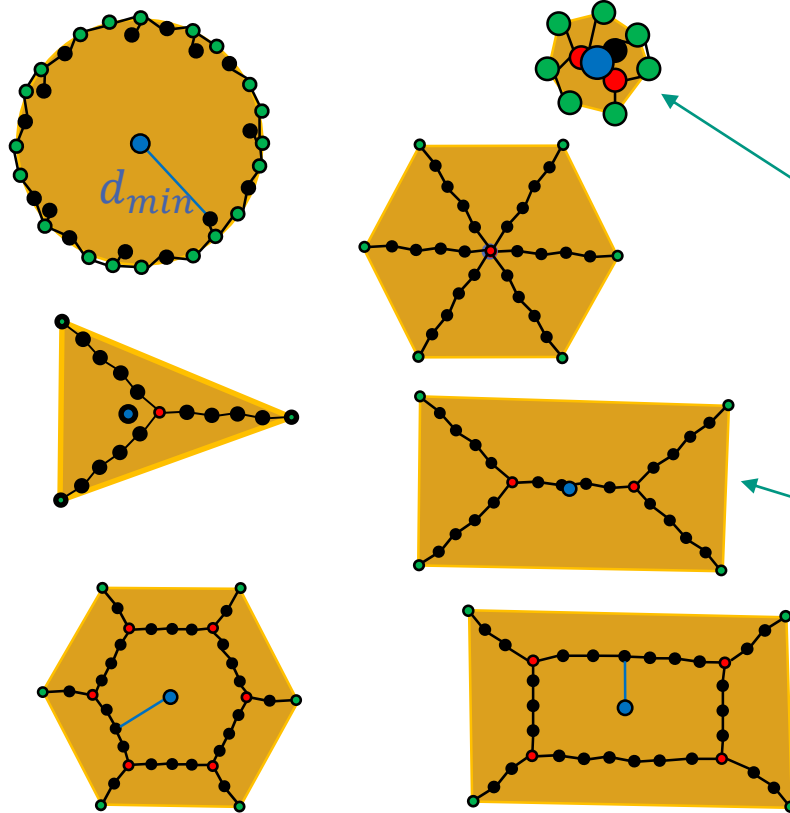
- Volumen der konvexen Hülle
- Randpunkte der konvexen Hülle
- **Verzweigungspunkte des MST**
- Masseschwerpunkt



■ Schritt 3: Berechne für jedes Cluster

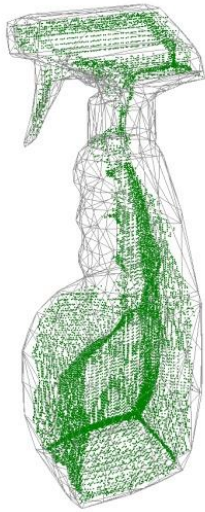
- Volumen der konvexen Hülle
- Randpunkte der konvexen Hülle
- Verzweigungspunkte des MST
- **Masseschwerpunkt**

Analyse der gefundenen Cluster



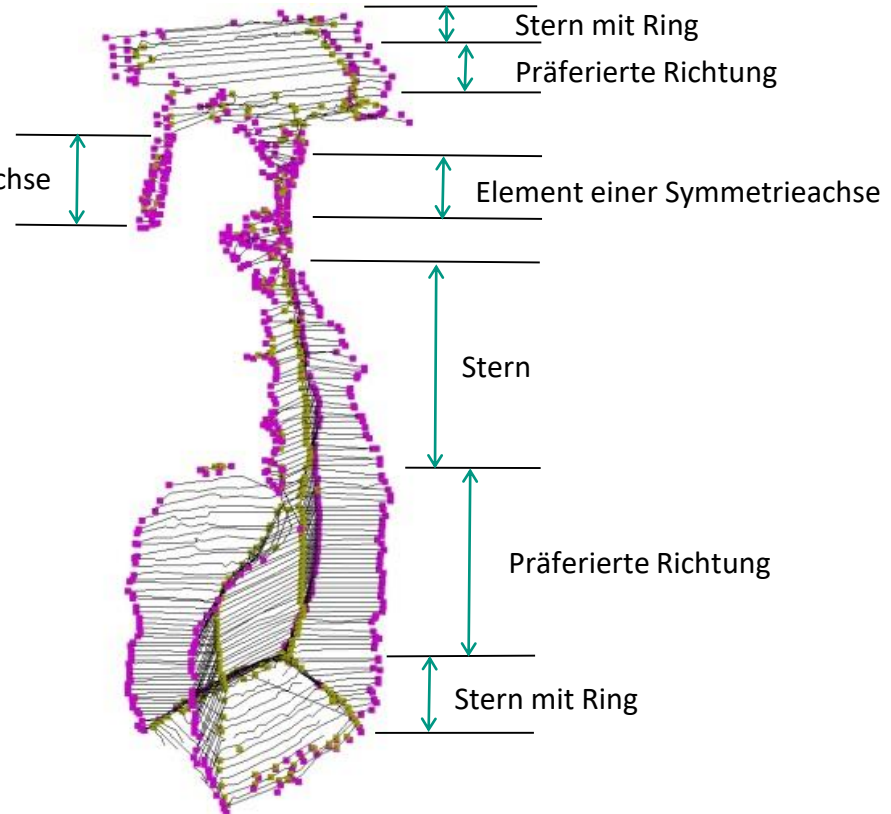
- **Kreis / Ring**
 - Große Distanz zwischen Masseschwerpunkt und nächstem Punkt der medialen Achse
 - Viele Punkte auf dem Rand der konvexen Hülle
- **Element einer Symmetrieachse**
 - Geringeres Volumen der konvexen Hülle
 - Weniger Punkte auf dem Rand der konvexen Hülle
- **Stern**
 - Genau ein Verzweigungspunkt
- **Präferierte 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

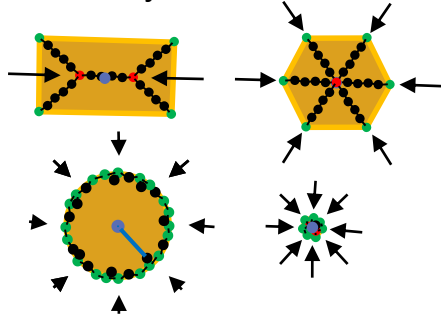
Element einer Symmetrieachse



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

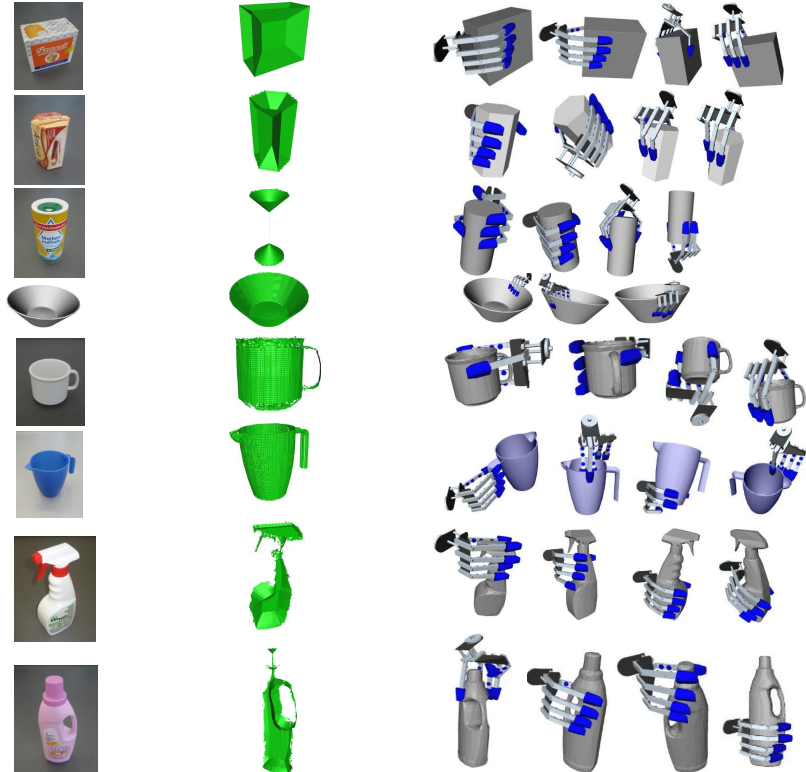
■ Für komplexere Objekte

- Wende Kombination dieser Regeln an

Objekt

Mediale Achse

Typische Griffe

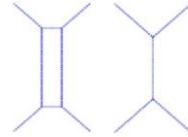
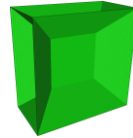


Heuristiken zur Erzeugung von Griffhypothesen (II)

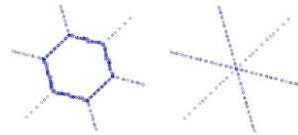
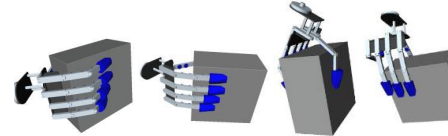
Mediale Achse

Querschnitt

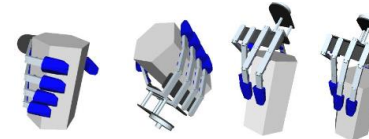
Heuristik und Griffhypothesen



- Annähern an Verzweigungspunkte des MST
- Rollwinkel der Hand nach Symmetrieebenen ausrichten

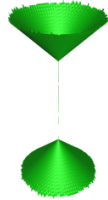


- Annähern an Sternspitzen
- Rollwinkel der Hand nach Symmetrieebenen ausrichten



Heuristiken zur Erzeugung von Griffhypothesen (III)

Mediale Achse

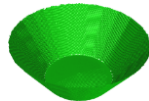
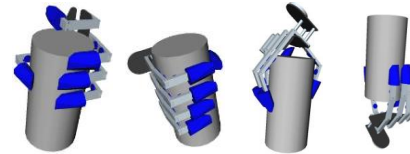


Querschnitt



Heuristik und Griffhypothesen

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



- Objekte mit Öffnungen: Annähern an den Rand der Öffnung

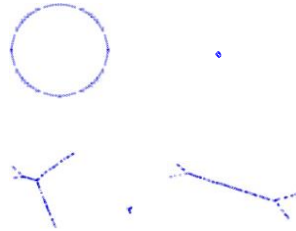


Heuristiken zur Erzeugung von Griffhypothesen (IV)

Mediale Achse

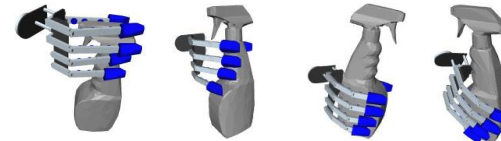
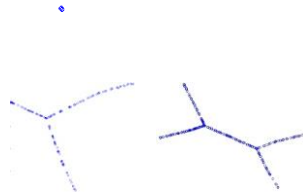
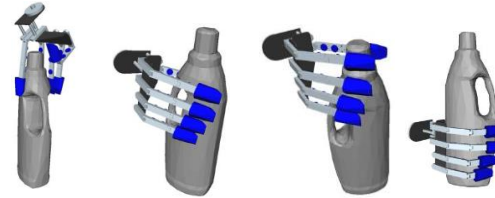


Querschnitt



Heuristik und Griffhypothesen

- Komplexe Objekte: Kombination von Heuristiken



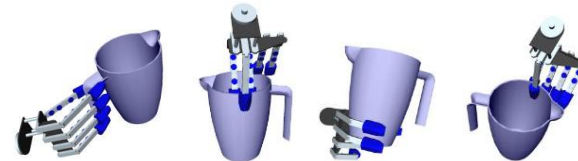
Heuristik zur Greifgenerierung (V)

Mediale Achse

Querschnitt

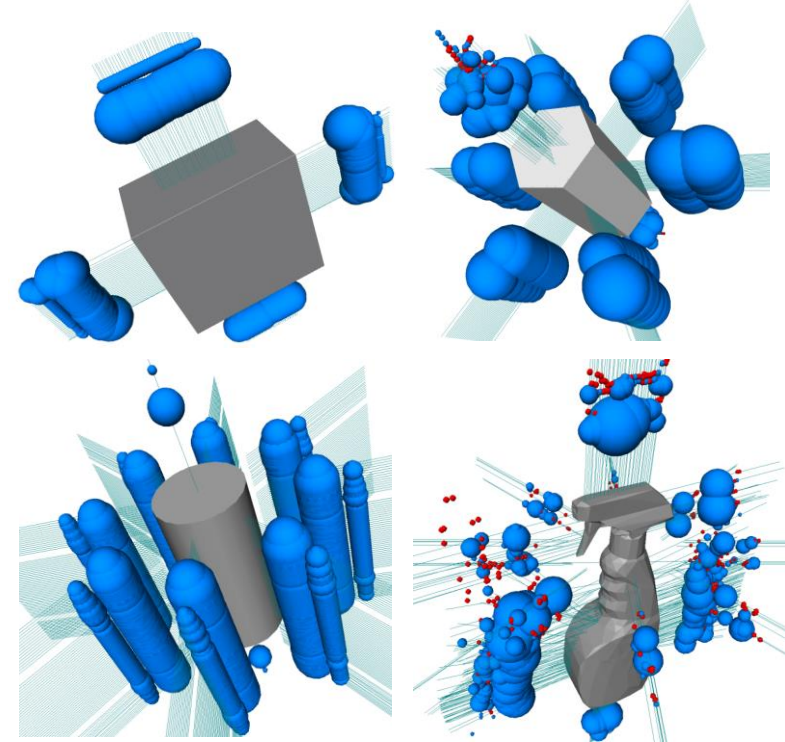
Heuristik und Griffhypothesen

- Komplexe Objekte: Kombination von Heuristiken



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)

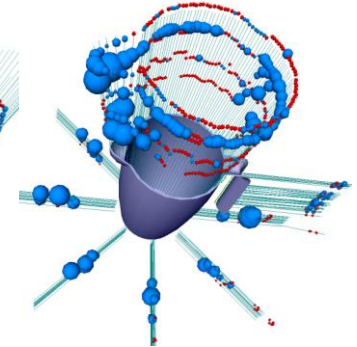
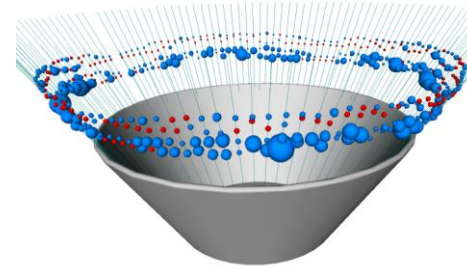
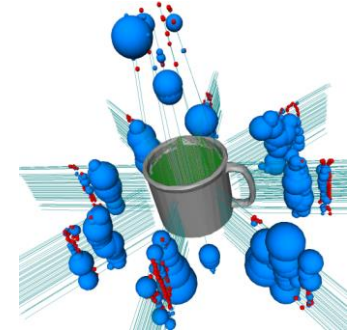
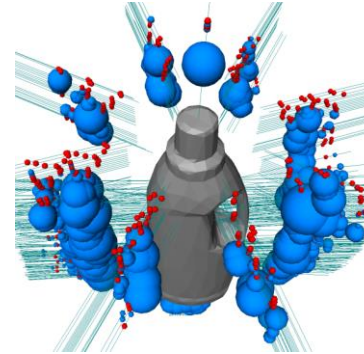


Ergebnisse: Qualität des Griffs (Kraftschluss)

- **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)



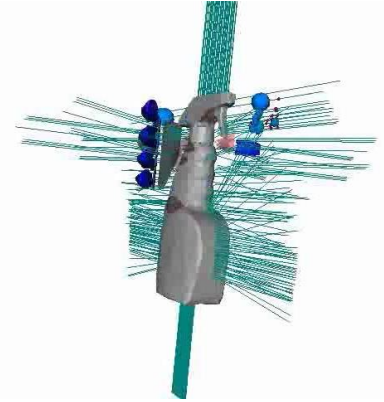
Ergebnisse: Effizienz

■ Vergleich mit auf Flächennormalen basiertem Greifplaner [Berenson07]

- Anzahl der generierten möglichen Griffe
- Stabile Griffe

■ Ergebnis:

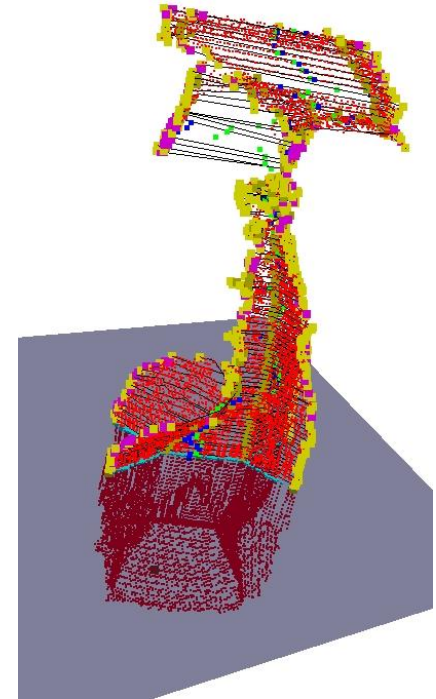
- Planung basierend auf medialer Achse ist effizienter



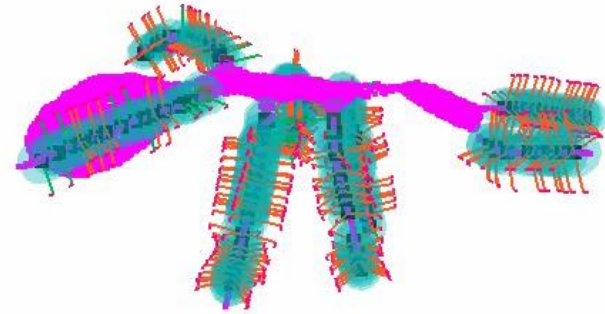
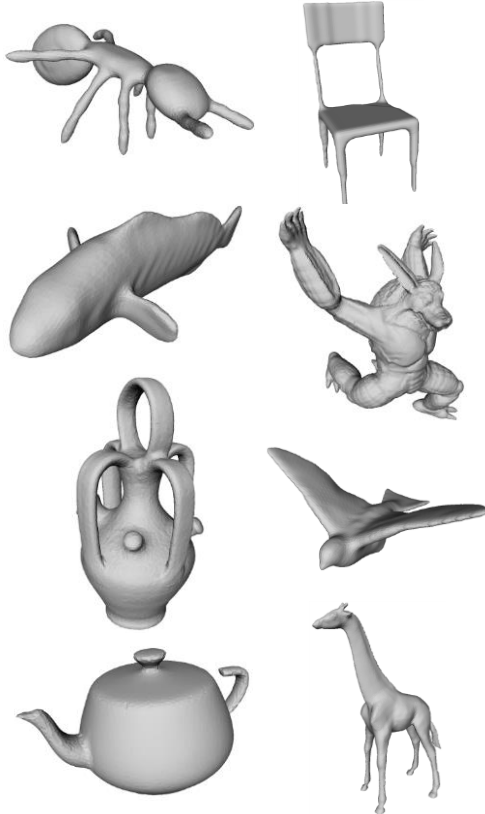
Objects	MA-based planner		Surface normals planner	
	Candidates	Stable	Candidates	Stable
Bread box	632	86.2%	13440	15.5%
Prismatic box	1344	90.7%	8512	36.0%
Salt can	2144	96.9%	7904	45.7%
Detergent	1996	65.9%	12672	26.2%
Spray	1304	55.1%	11200	21.2%
Cup	1428	59.5%	6688	37.0%
Pitcher	1124	47.0%	15504	25.9%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

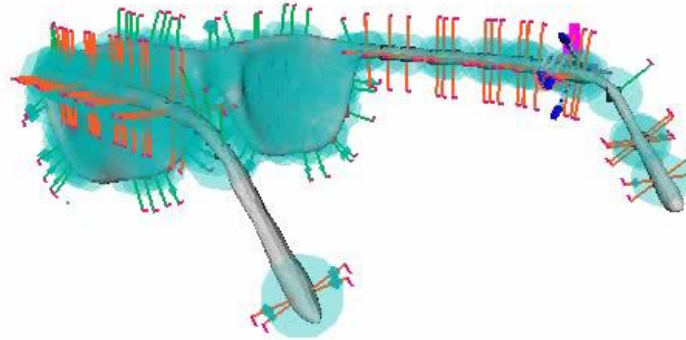
Zusammenfassung:

- 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



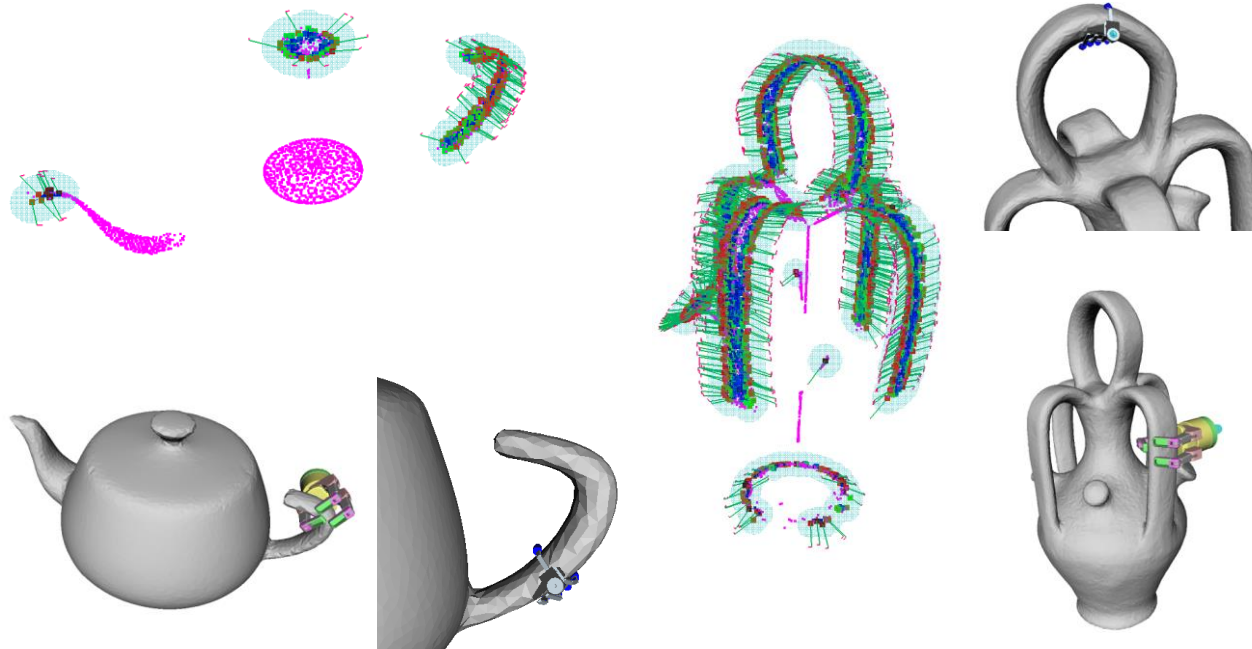
Erweiterungen





Mehr als 50% der Griffe sind kraftgeschlossen

Erweiterungen: Griffe an Griffen

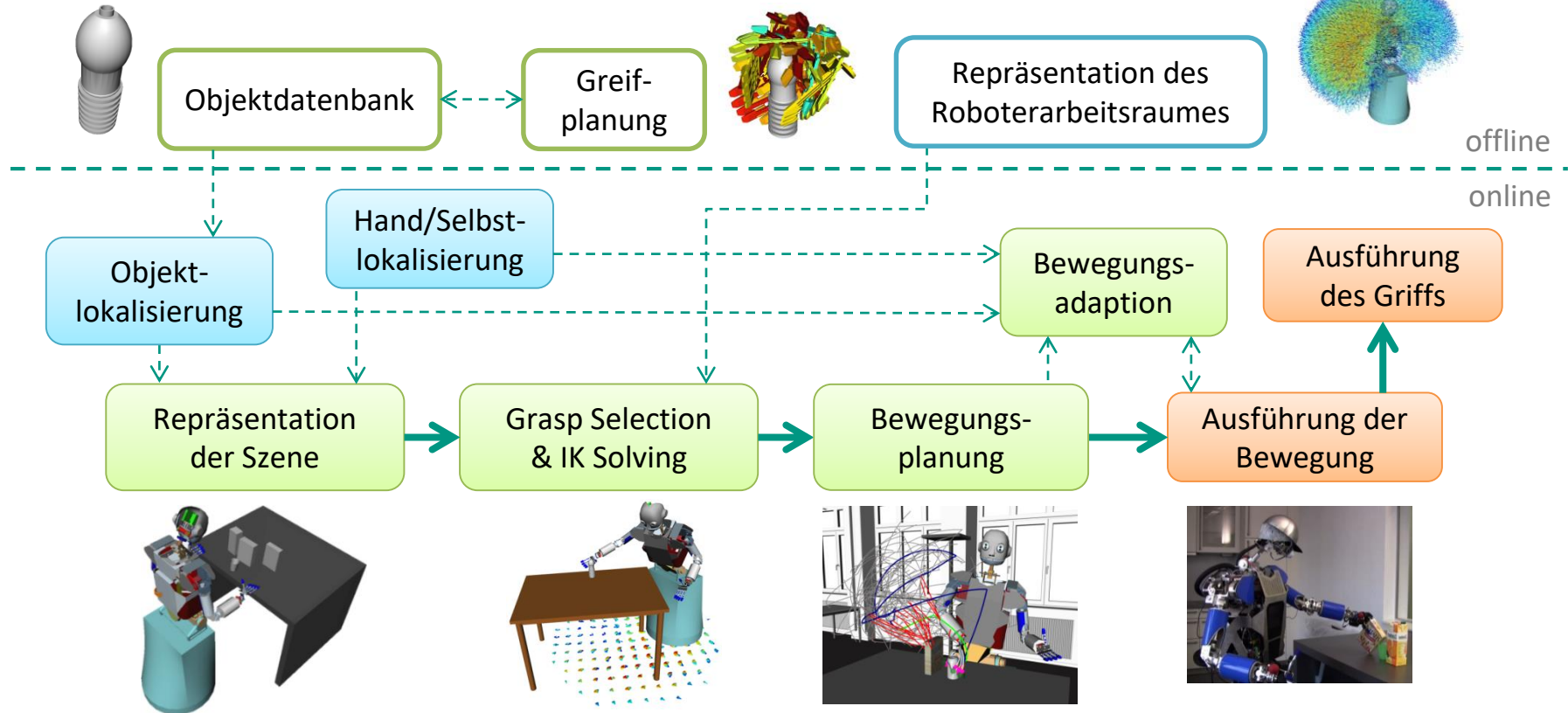


Inhalt

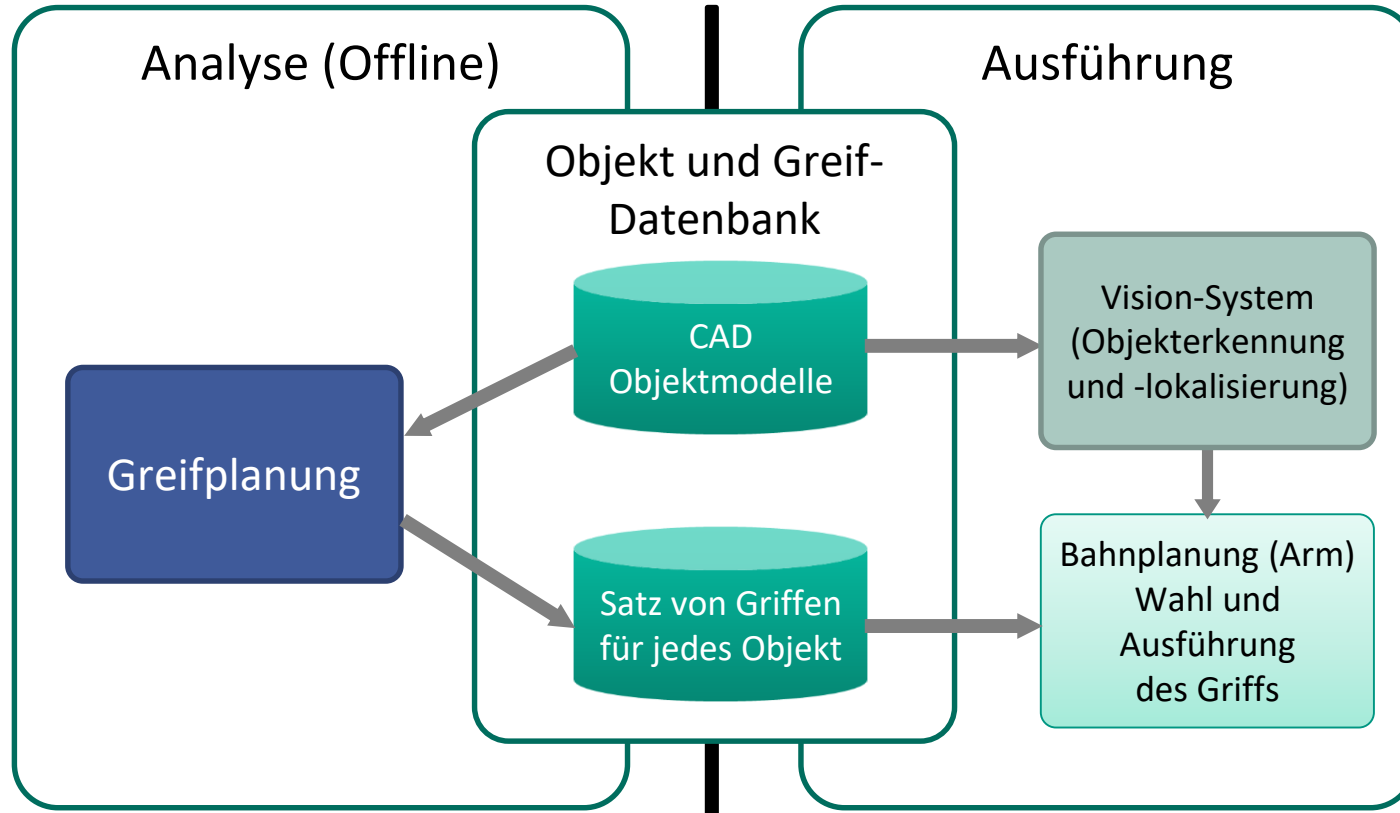
- Motivation
- Griff-taxonomien
- Kontaktmodelle und Grasp-Wrench-Space
- Greifplanung und Griffsynthese
- **Beispiele: Greifen mit ARMAR**

Greifen mit ARMAR

Die ARMAR-Grasping Pipeline (bekannte Objekte)



ARMAR – Greifen bekannter Objekte



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, synthetic views	Object detection and localization

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

■ 3D Daten

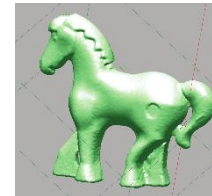
- Laserscanner Minolta „VI-900“
- Aktive Triangulation
- Auflösung: 640 x 480 Pixel
- Genauigkeit: < 0.2 mm
- Verschiedene Formate / Auflösungen

■ Farbbilder einer Stereokamera

- Allied Vision Technologies „Marlin 145C2“
- Auflösung: 1392 x 1038 Pixel

■ XML Repräsentation

- Metadaten
- Parser

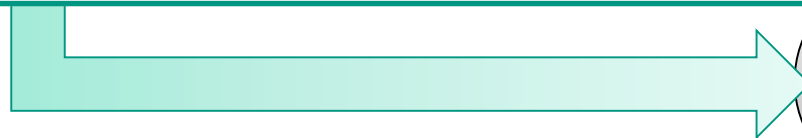


Object Modeling Center

Raptor
–
Rapid Textured Object Generator

- Generierung von 3D-Punktwolken mit Laserscanner
- Nachverarbeitung mittels Triangulation in hochauflösten Dreiecksnetzen
- Speicherung in verschiedenen Formaten (Open Inventor, VRML, Wavefront)
- Generierung von verschiedenen Objektansichten mittels Stereokameras

Entwickelt im Sonderforschungsbereich 588 „Humanoide Roboter“

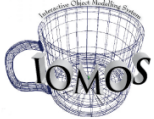


Web
Datenbank



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

KIT Object Models Database



KIT ObjectModels Web Database

Object Models of Household Items

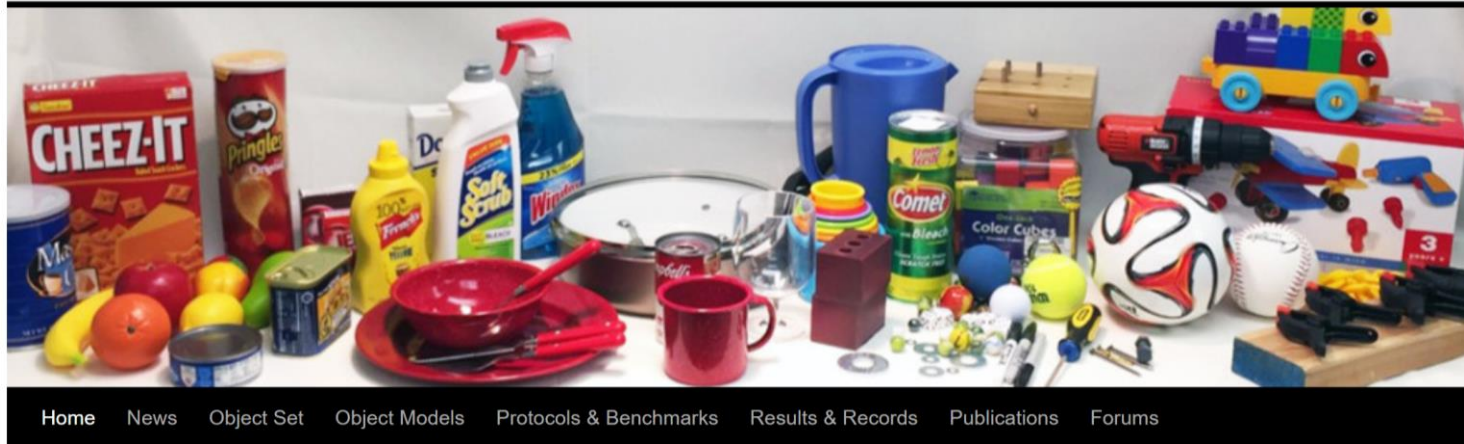
[Home](#)
[Show all](#)
[Search](#)
[Statistics](#)
[Information](#)
[Publications & Contributors](#)

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					tin, metal, cylindric
	BlueSaltCube	ID: 2 ClassID: 30	2011-11-14 11:45:35					cardboard, box, blue
	YellowSaltCube	ID: 3 ClassID: 18	2010-11-24 10:03:05					cardboard, box, yellow
	FruitTea	ID: 4 ClassID: 13	2010-11-24 10:09:01					cardboard, box
	OrangeSaltCube	ID: 5 ClassID: 30	2011-11-14					cardboard, box



YCB Benchmarks – Object and Model Set

- Yale-CMU-Berkeley (YCB) Object and Model set
<https://www.ycbbenchmarks.com>



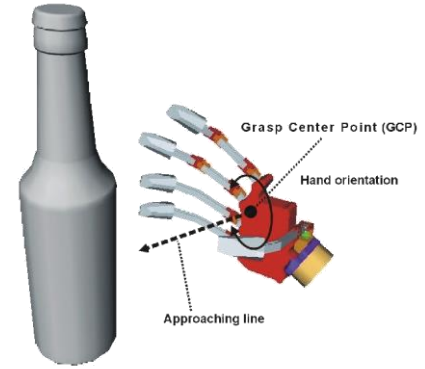
Berk Calli, Aaron Walsman, Arjun Singh, Siddhartha Srinivasa, Pieter Abbeel, and Aaron M. Dollar, Benchmarking in Manipulation Research: The YCB Object and Model Set and Benchmarking Protocols, IEEE Robotics and Automation Magazine, pp. 36 – 52, Sept. 2015.

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
- **Annäherungsvektor** beschreibt den Winkel mit dem sich die Hand dem Griffmittelpunkt nähert
- **Orientierung des Handgelenks** der Roboterhand
- **Initiale Fingerkonfiguration**



- Evaluierung in Simulation



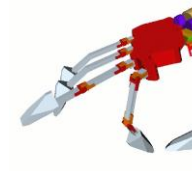
Haken



Zylindrisch



Kugelförmig



Pinzettengriff



Dreifingergriff

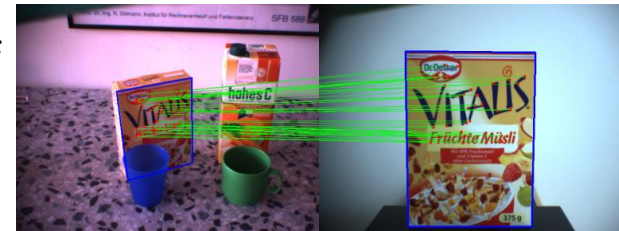
ARMAR – Objekterkennung und -lokalisierung

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

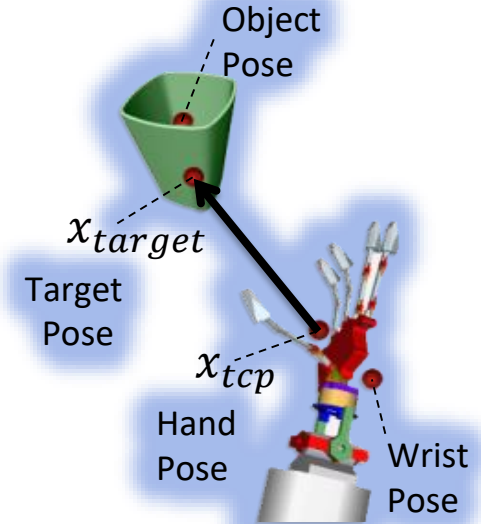
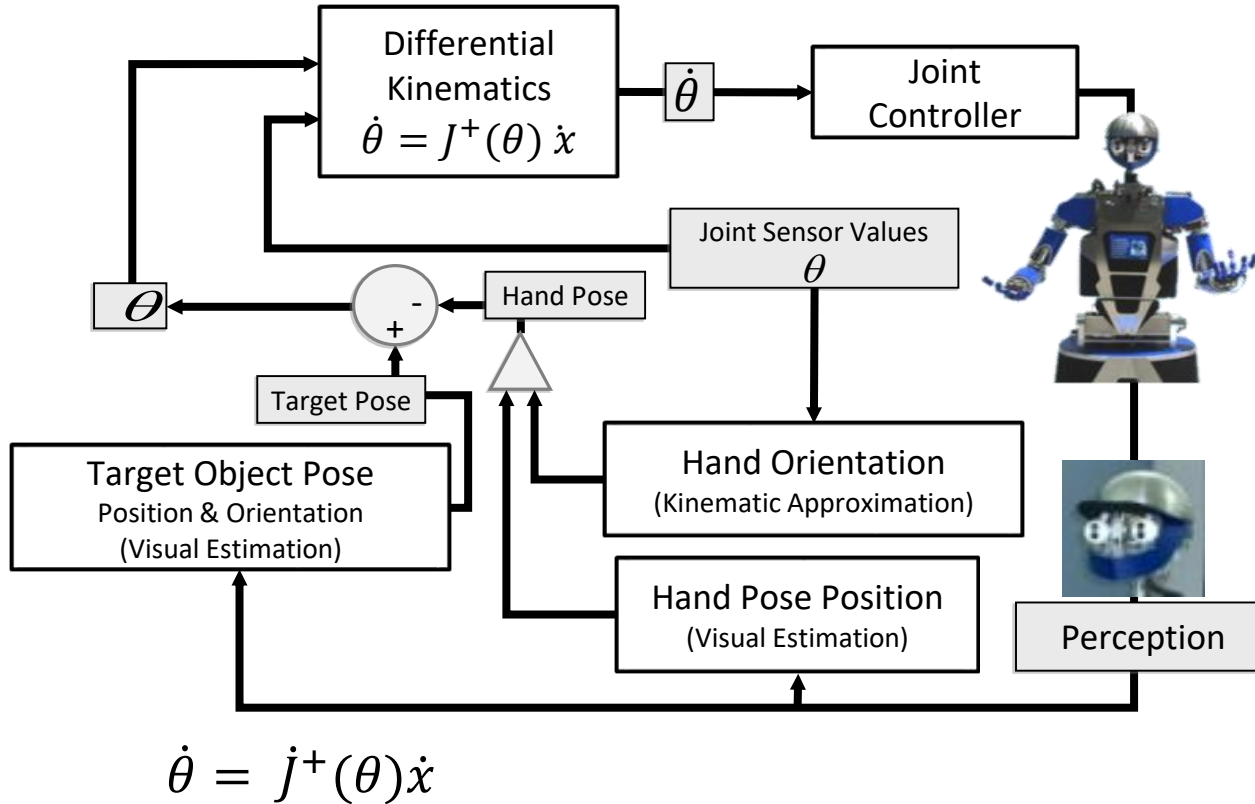
Texturierte Objekte (Humanoids 2006, IROS 2009)

- 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



Korrespondenzen zwischen gelernter
Ansicht und Ansicht in Szene

ARMAR – Ausführung: Positionsbasiertes Visual Servoing



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

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

ARMAR-III in der RoboKITchen

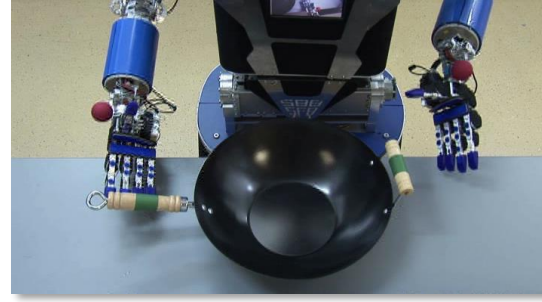


45-minütige Aufgabe, mehr als 3100 Mal seit 3. Februar 2008



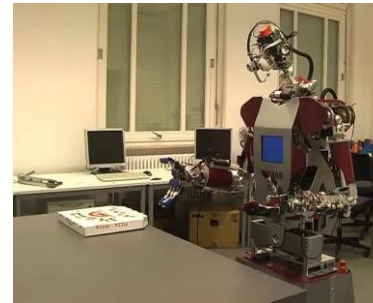
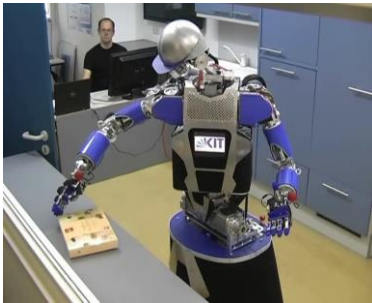
Fortgeschrittene Greiffähigkeiten

■ Zweihändiges (*bimanual*) Greifen und Manipulation



RAM 2012
IROS 2011
Humanoids 2010
Humanoids 2009
RAS 2008

■ Pre-Grasp Manipulation



Aufgabenspezifisches, Teilbasiertes Greifen

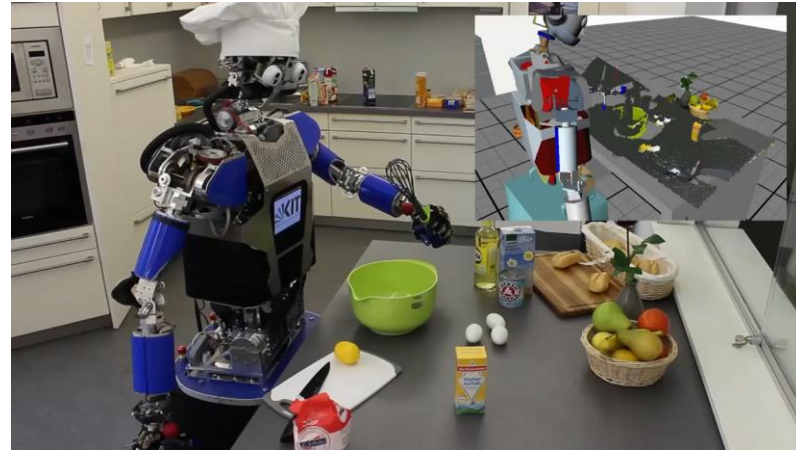
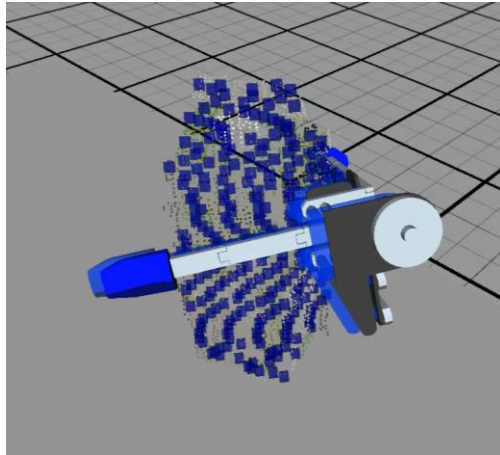
■ Ähnliche Objekte (*familiar objects*)

Vahrenkamp, N., Westkamp, L., Yamanobe, N., Aksoy, E. E. and Asfour, T., Part-based Grasp Planning for Familiar Objects, Humanoids 2016



Greifen von Unbekannten Objekten (I)

- Tiefes CNN trainiert mit Tiefenbildern und 6D Griff-Informationen
- Während der Ausführung nur Tiefenbilder

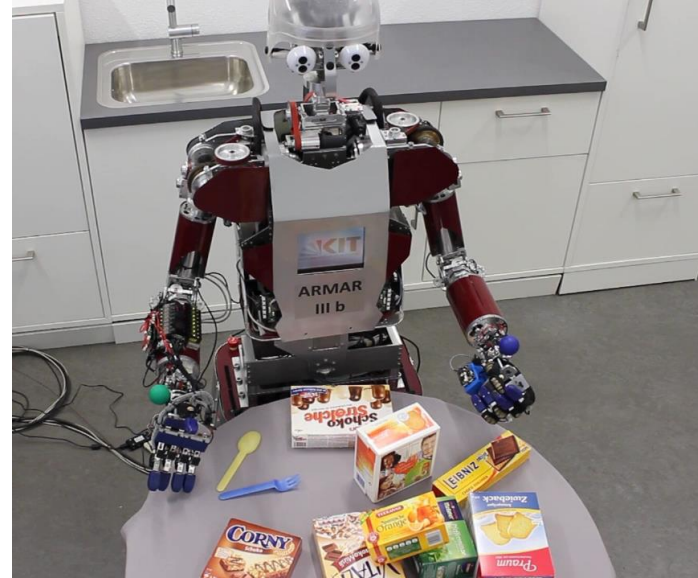


Schmidt, P., Vahrenkamp, N., Wächter, M. and Asfour, T., *Grasping of Unknown Objects using Deep Convolutional Neural Networks based on Depth Images*, ICRA 2018

Greifen von Unbekannten Objekten (II)

- Aktive Wahrnehmung
(*active perception*) zur
Entdeckung, Segmentierung
und Lernen von Objekten

Schiebener, D., Ude, A. and Asfour, T., *Physical Interaction for Segmentation of Unknown Textured and Non-textured Rigid Objects*, ICRA 2014



Initial object hypotheses

Generate **hypotheses** based on
Color, **Geometric primitives**
and **Saliency**

Hypothesis 49 is chosen
for verification by pushing

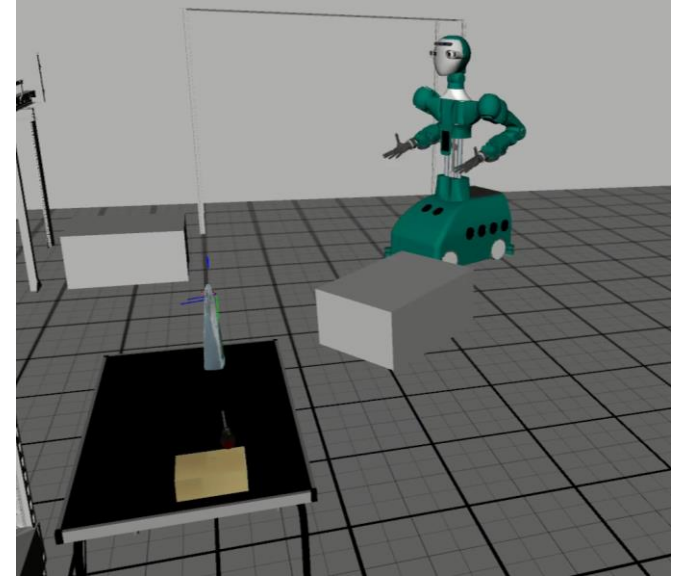


Grasping and Manipulation Pipeline: Methoden



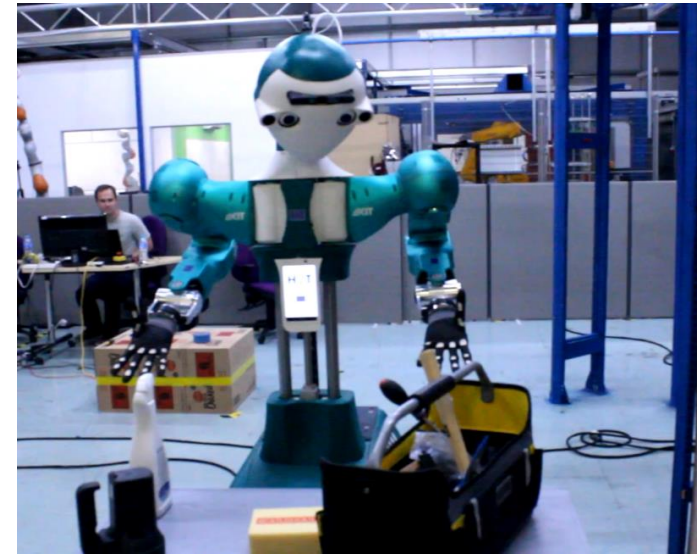
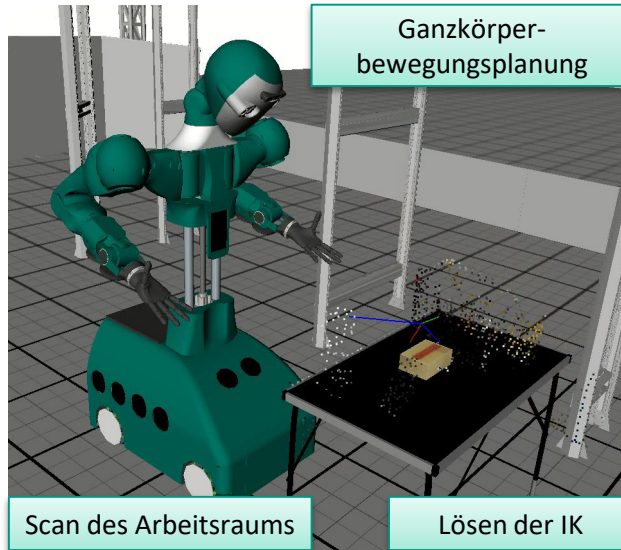
Video zur Visualisierung verlangsamt

Ausführung in Bekannten Umgebungen



Ausführung in Teilweise Bekannten Umgebungen

- Basierend auf Umgebungsmodellen und Punktwolken



Video zur Visualisierung verlangsamt

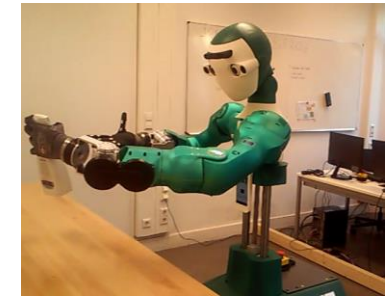
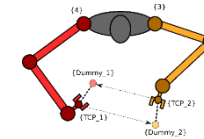
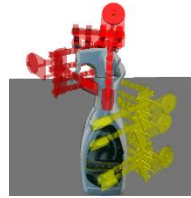
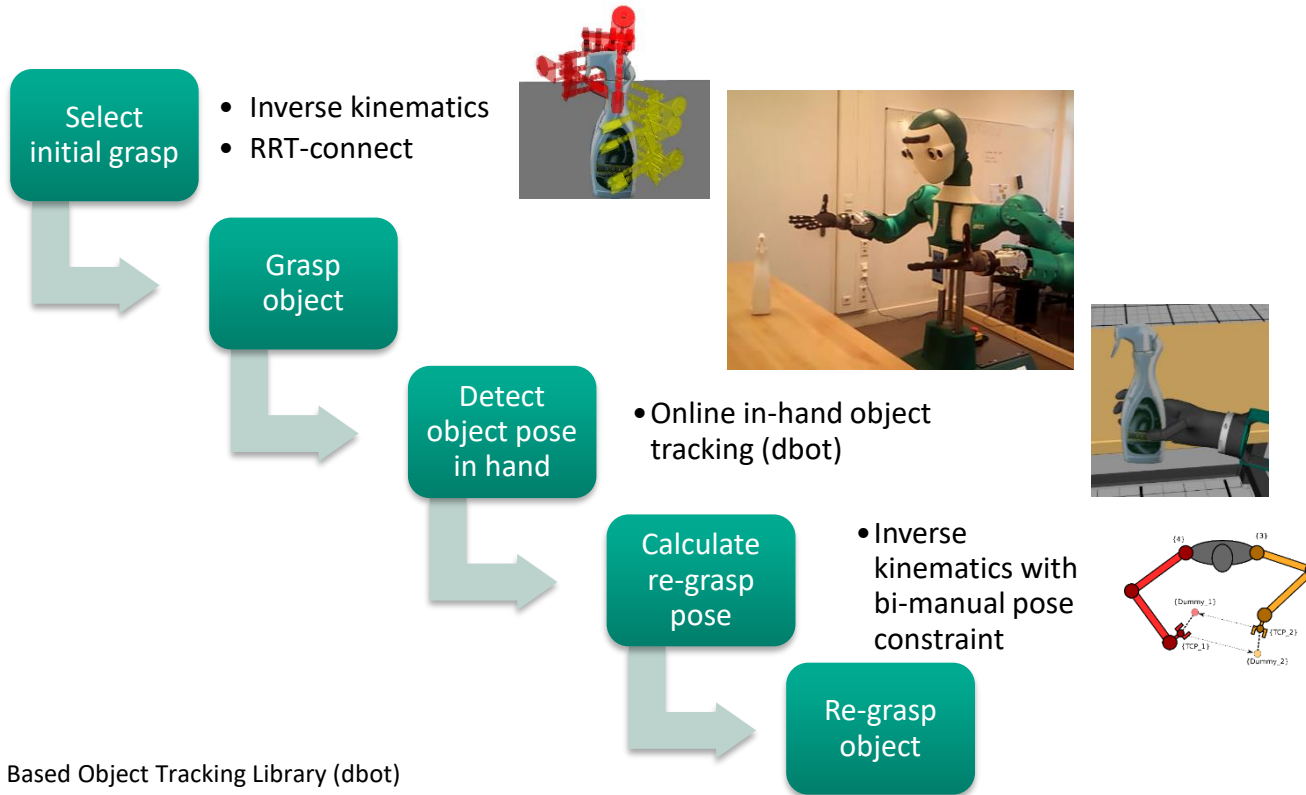
Verstehen von *Perception-Action Relations*

- **Affordanz-basierte Manipulation:** Roboter muss Aktionen/ Interaktionsmöglichkeiten (Affordanzen) in unbekannten Umgebungen verstehen



Pohl, C., Hitzler, K., Grimm, R., Zea, A., Hanebeck, U. D. and Asfour, T., *Affordance-Based Grasping and Manipulation in Real World Applications*, IROS 2020

Umgreifen, Übergabe

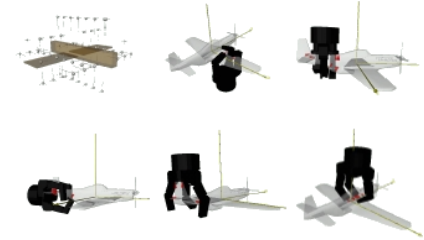


Depth Based Object Tracking Library (dbot)
<https://github.com/bayesian-object-tracking/dbot>

Software

■ GraspIt!

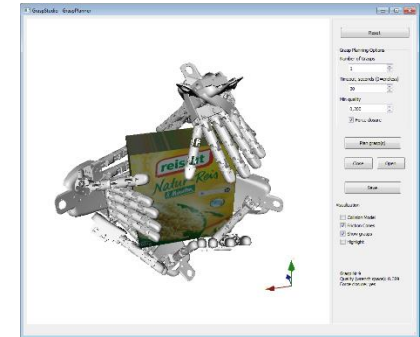
- Entwickelt von Columbia University Robotics Group
- C++ Source Code: <http://graspit-simulator.github.io/>



■ 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



Vielen Dank!

- Greifen ist nach wie vor ein ungelöstes Problem in der Robotik
- Mehr zum Thema Greifen in der Vorlesung Robotik-II (SS)

ZUSATZMATERIAL

Medial Axis Planner: Limitations

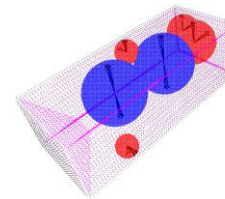
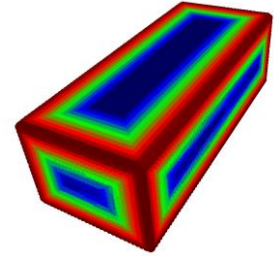
- Problems with slice structures
 - For complex objects, there are too many different kinds of slice structures, and each one has to be considered separately.
 - Too many parameters, heuristics, threshold constants...
- Better solution (Grid of medial spheres):
 - Consider complete medial axis transform (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
 $\Rightarrow$ Contains object's symmetry properties
- In addition: efficient access to spheres in local neighborhood (grid-based spatial indexing):

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

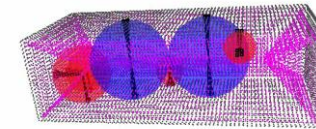
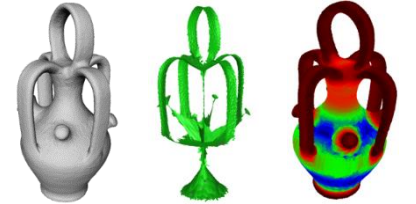
- Attributes of each sphere:
 - Center, radius, points where the sphere touches the object's surface
 - Object angle: maximum angle included by the sphere's center and two surface points touched by the sphere.
 - Example:
 - Blue spheres: object angle $\sim 180^\circ$
 - Red spheres: object angle $\sim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



Object representation for grasp planning

■ *Grid of medial spheres*

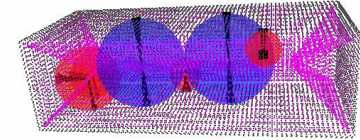
- Based on the Medial Axis Transform (MAT) [Blum67]
- Contains object's symmetry properties
- Additional: efficient access to spheres in local neighborhood
- Attributes of each sphere:
 - Center
 - Radius
 - Points where the sphere touches the object's surface
 - Object angle: maximum angle defined by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



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

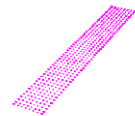
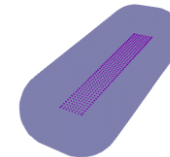
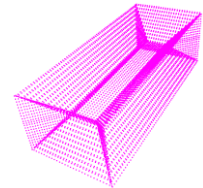
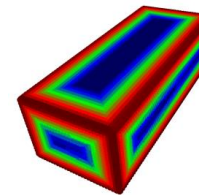
Selecting spheres for grasp planning

- 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



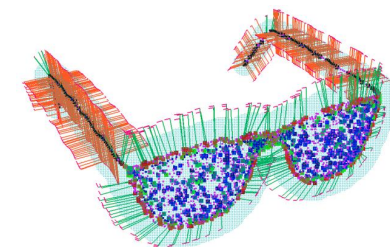
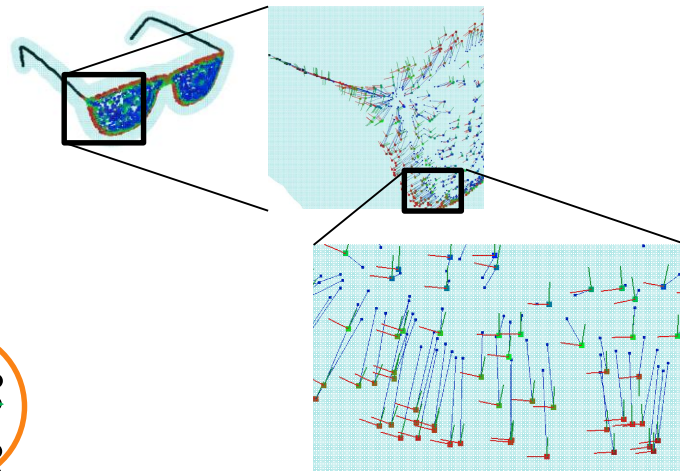
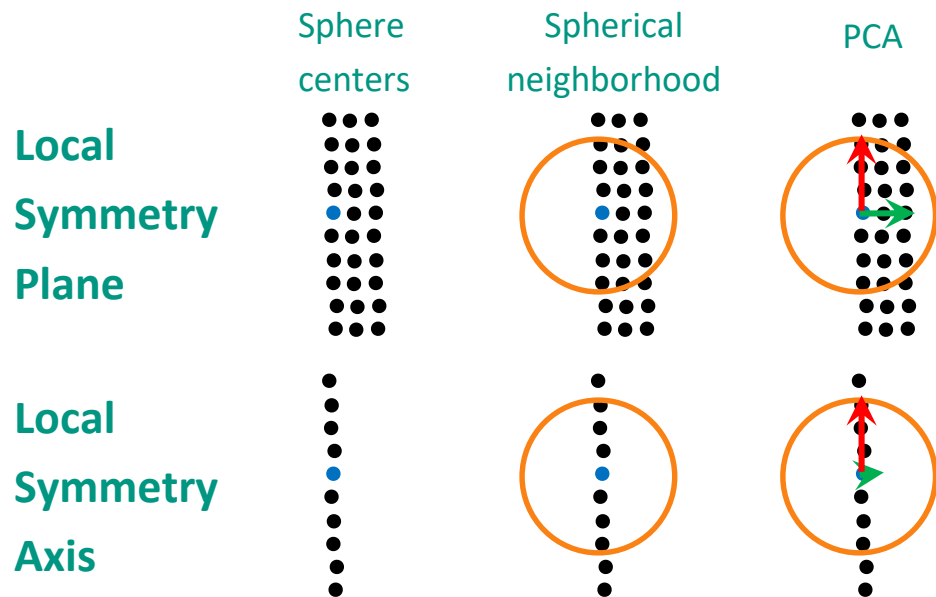
Grid of medial spheres

Medial Axis



Grasp Planning Algorithm Using MAT and PCA

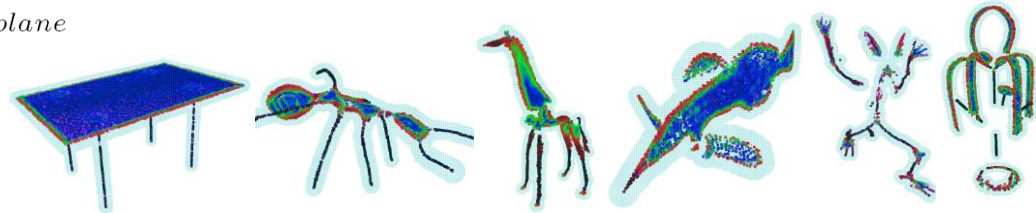
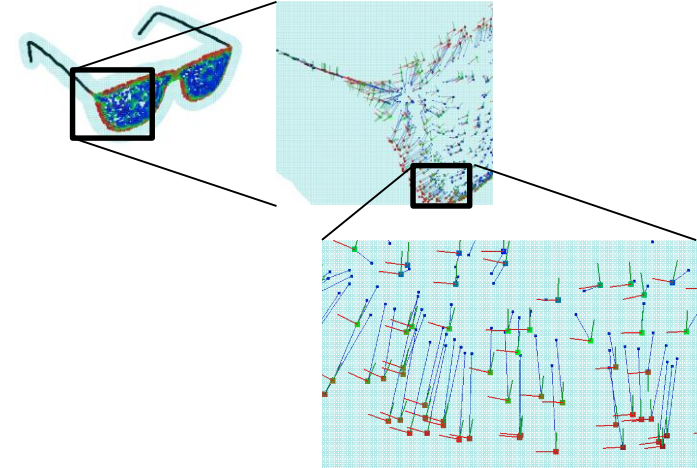
Estimate symmetry properties of sphere centers in each sphere's local neighborhood



Hand approach directions

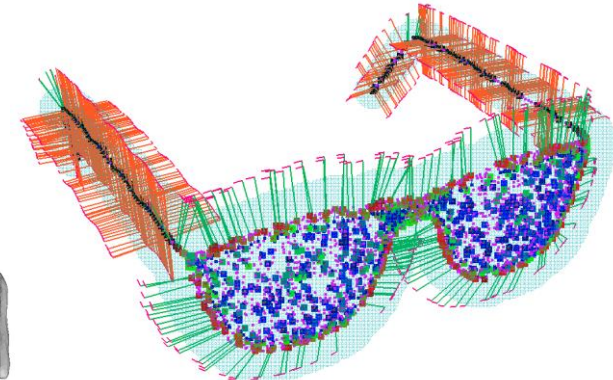
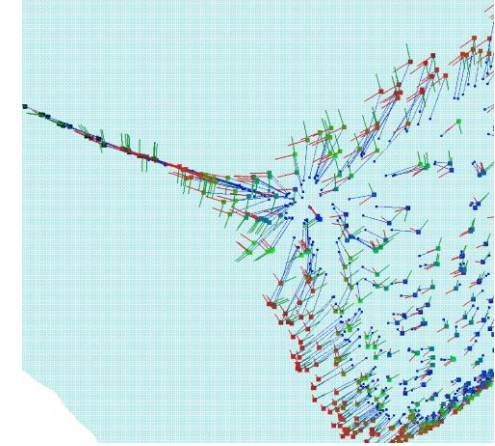
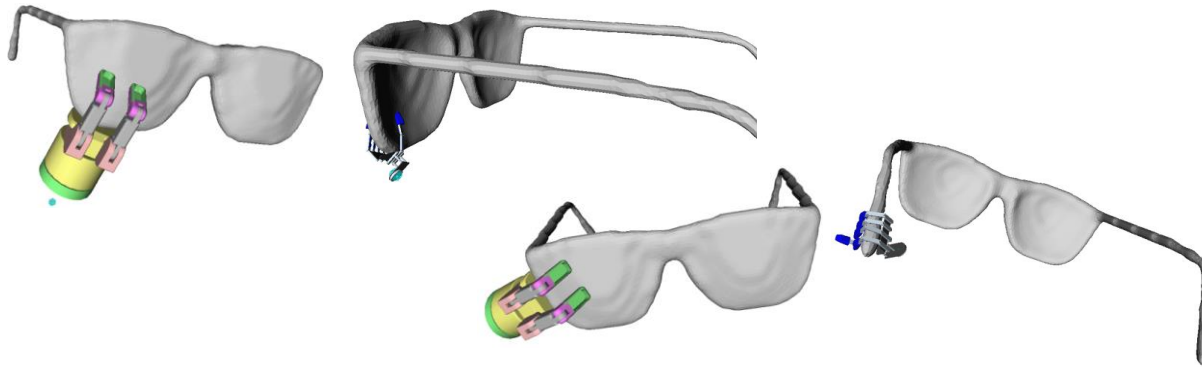
Analyzing an Object's Symmetry Properties

- 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 $\rho_{ev} \leq \rho_{axis}$
 - On local symmetry plane
 - At the rim $\rho_{axis} \leq \rho_{ev} \leq \rho_{plane}$
 - Inside the plane $\rho_{ev} > \rho_{plane}$

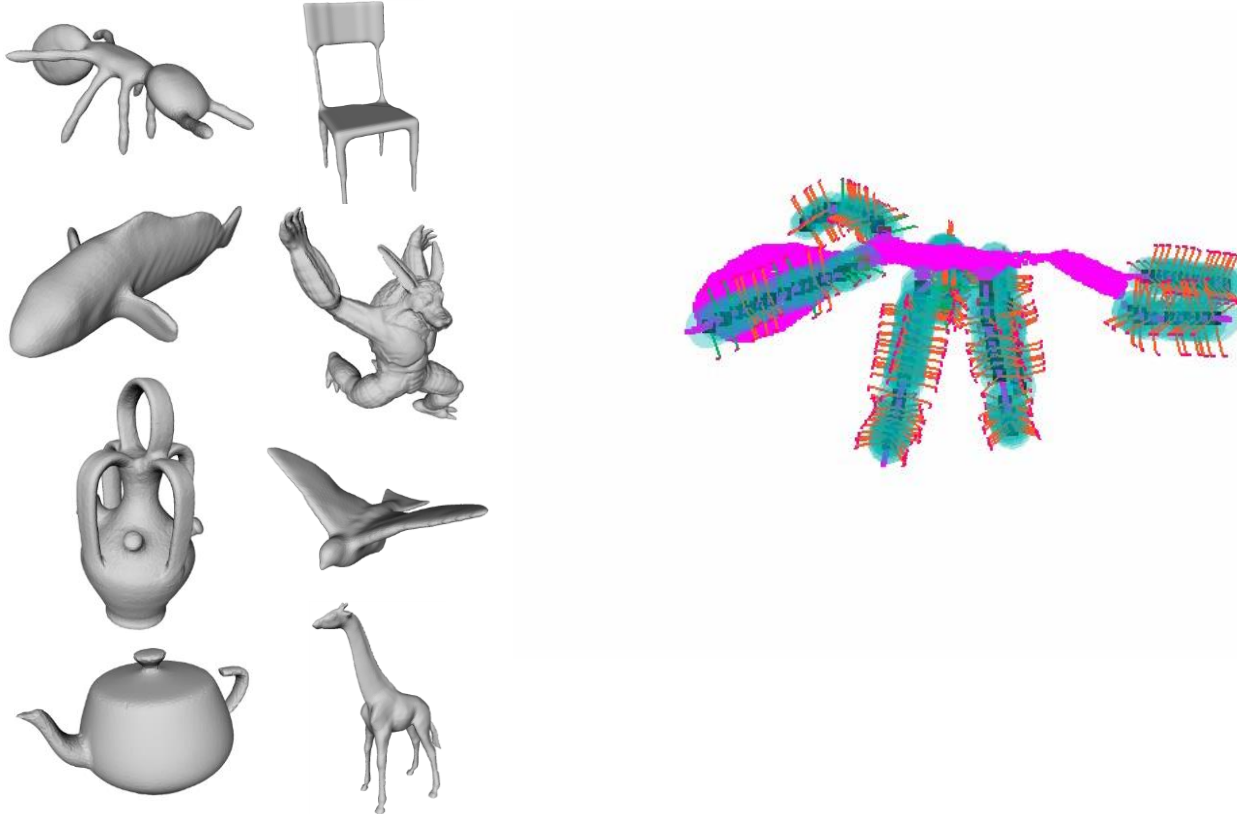


Generating Candidate Grasps

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

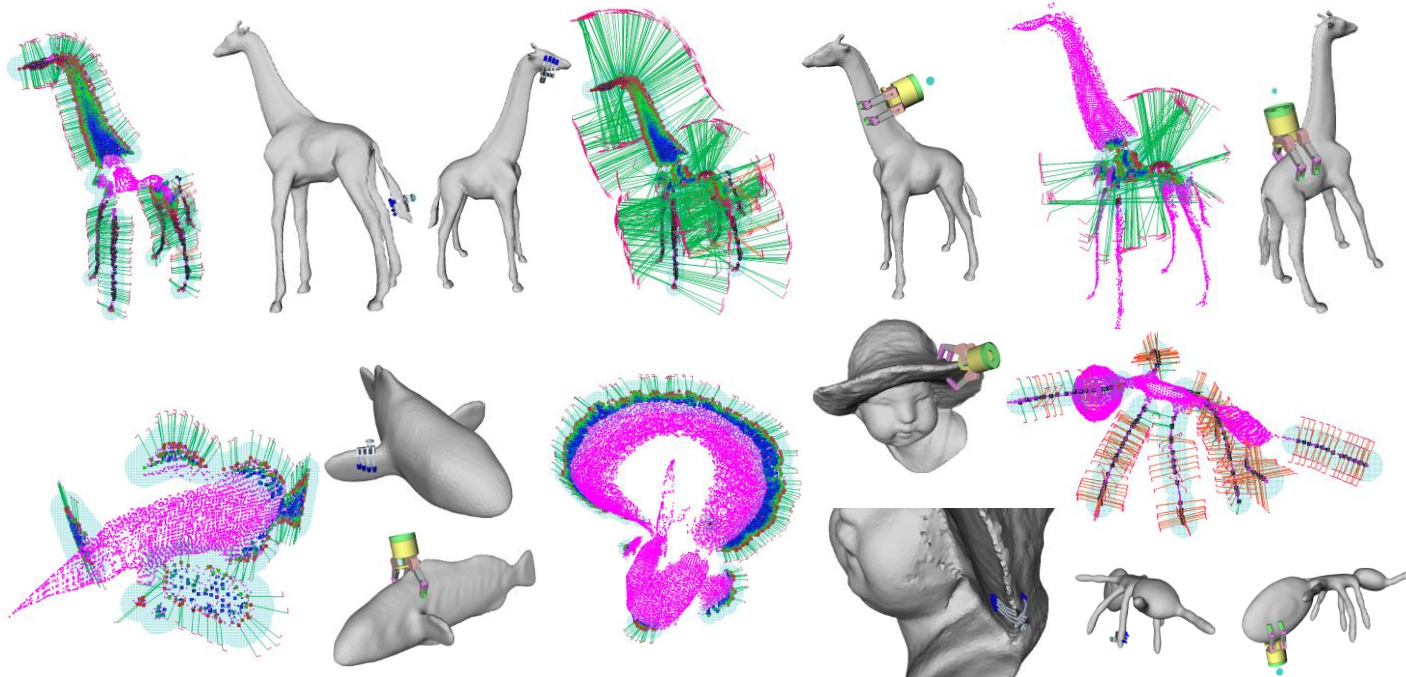


Candidate Grasps: Some Examples

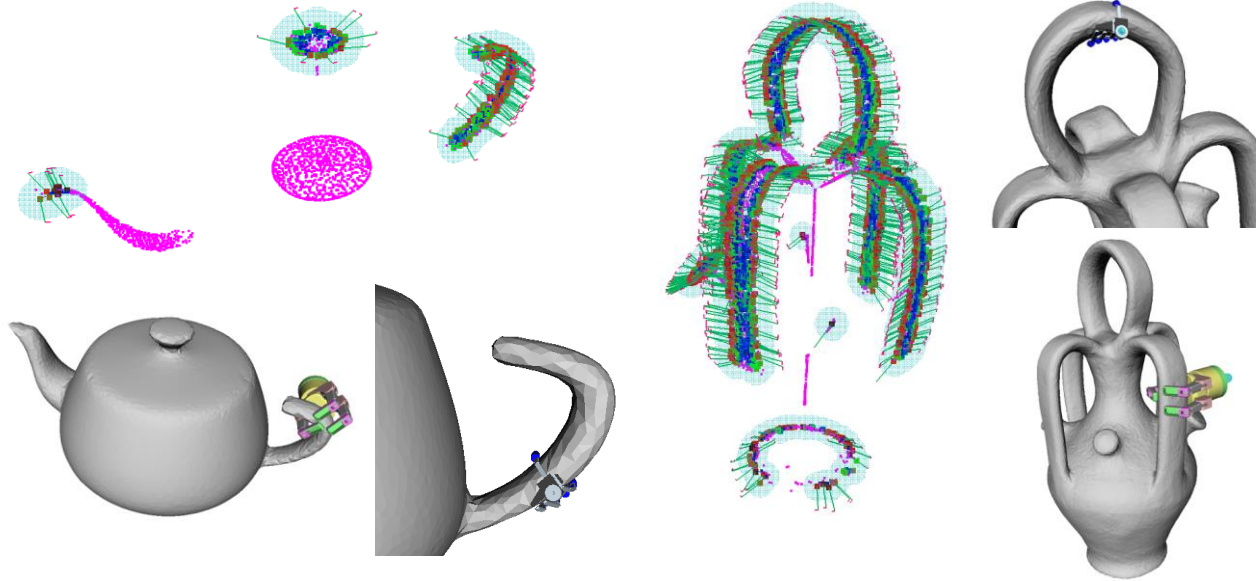


Advantages: Hand Size vs. Object Size

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



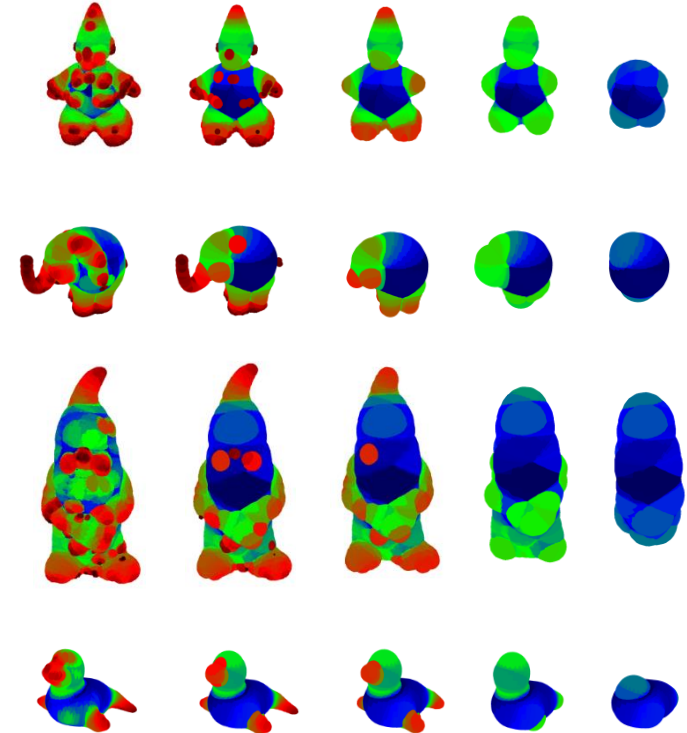
Advantages: Grasps on Handles



- 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

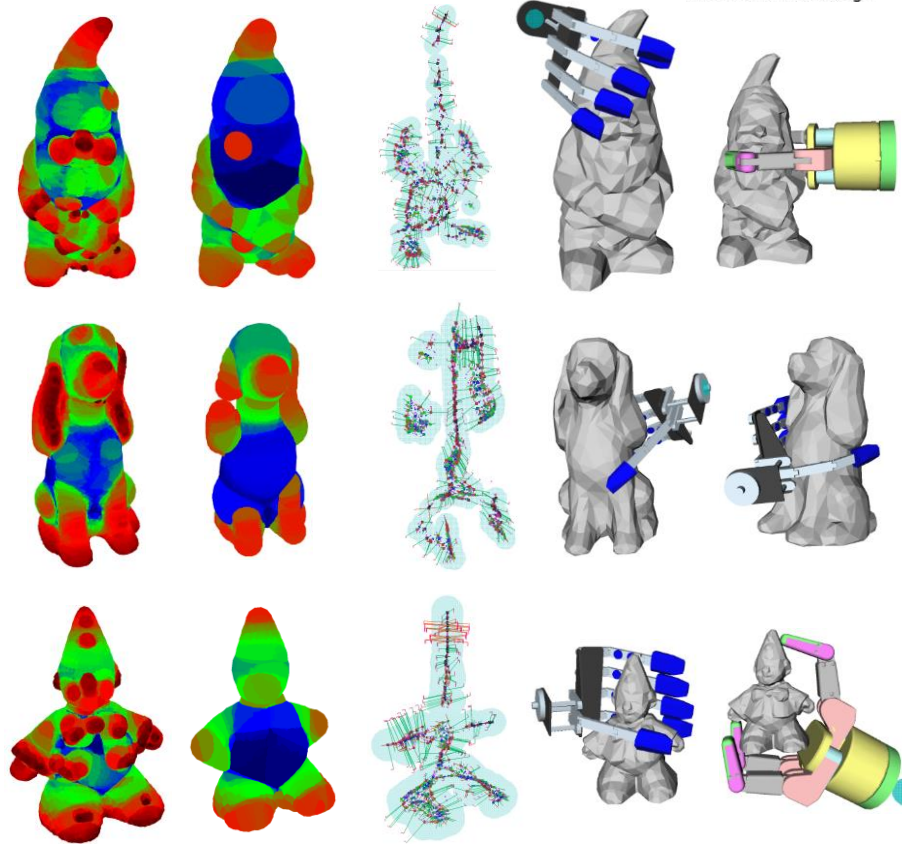
Dealing with Surface Details

- 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: $r < 0.3 r_{max}$
 - Column 4: $r < 0.5 r_{max}$
 - Column 5: $r < 0.7 r_{max}$
 - (r_{max} : Radius of the biggest sphere in the object)

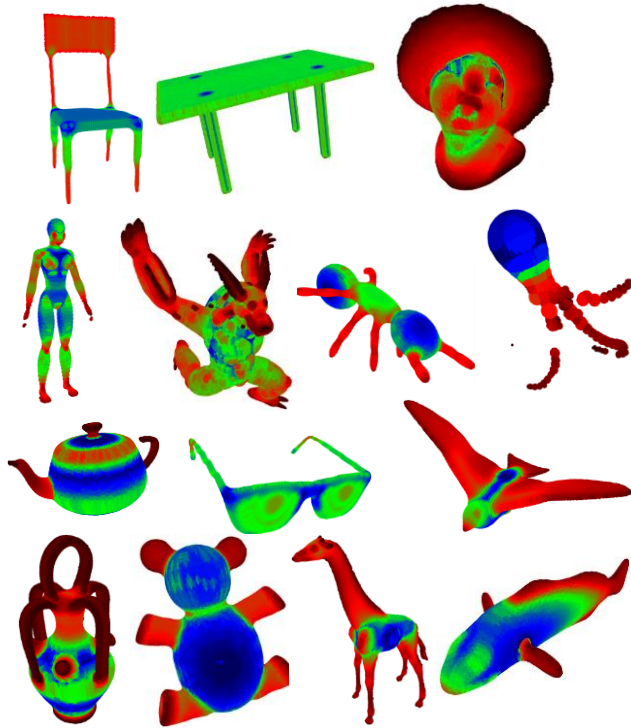


Advantages: Surface Details

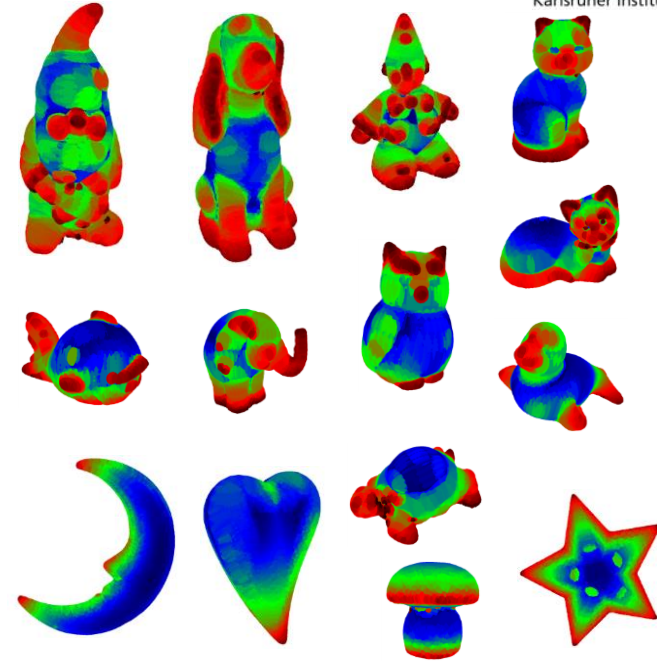
- How to deal with surface details?
- Solution: discard “small” spheres
- Planner considers only rough geometry of the object



Object Sets for Testing

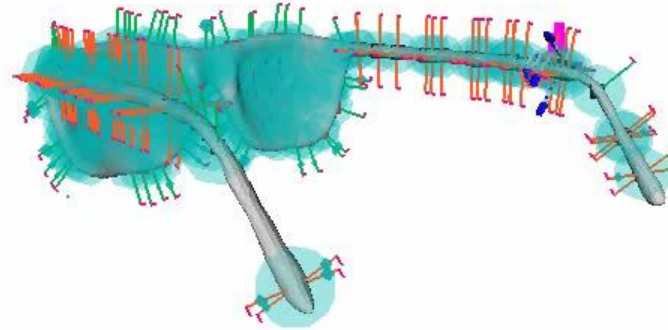


■ Chen Mesh Segmentation Benchmark
[Chen2009]



■ 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

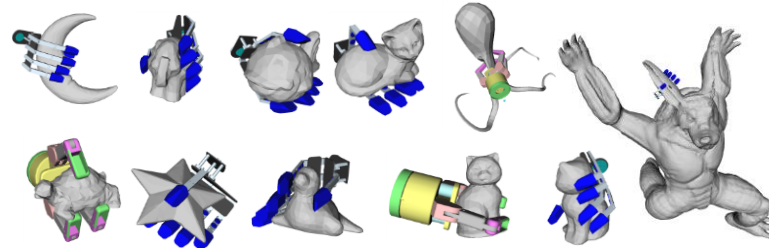
Objects	ARMAR-III hand	Barrett hand
1001 Clown	63.5%	61.2%
1002 Elephant	75.3%	76.0%
1003 Owl	78.0%	68.2%
1004 Spheric fish	59.0%	78.3%
1005 Lawn gnome	53.1%	57.7%
1006 Heart	89.0%	77.0%
1008 Dog	63.7%	69.2%
1009 Sitting cat	64.9%	59.5%
1010 Lying cat	80.7%	80.7%
1012 Moon	58.9%	64.4%
1013 Mushroom	80.0%	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:

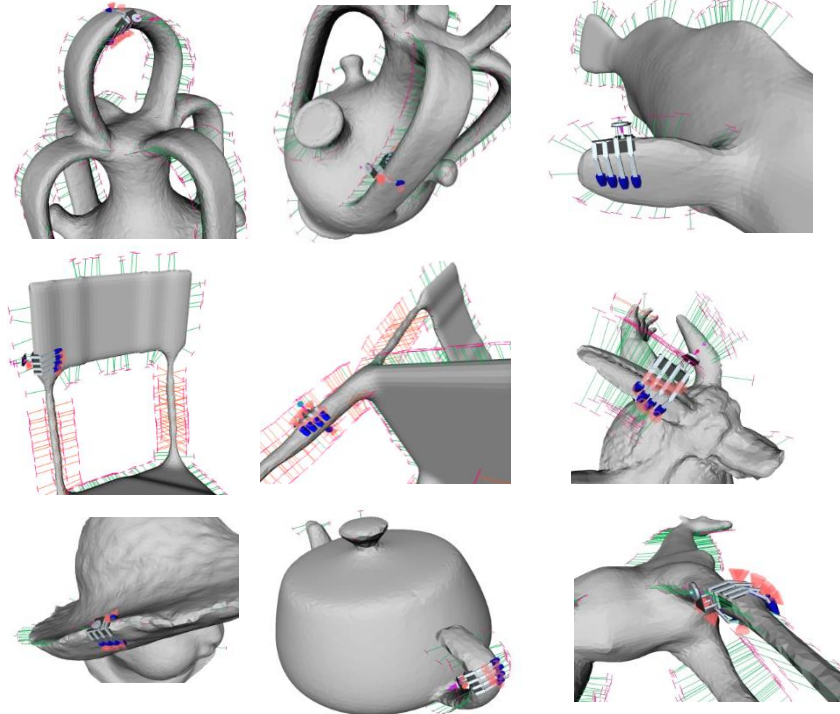
- Most (> 50%) of the generated candidates are force-closure grasps



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

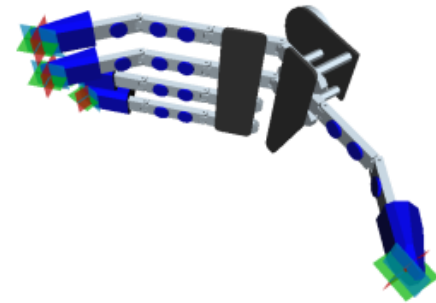
Planning precision grasps

■ Problem:

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

■ Idea:

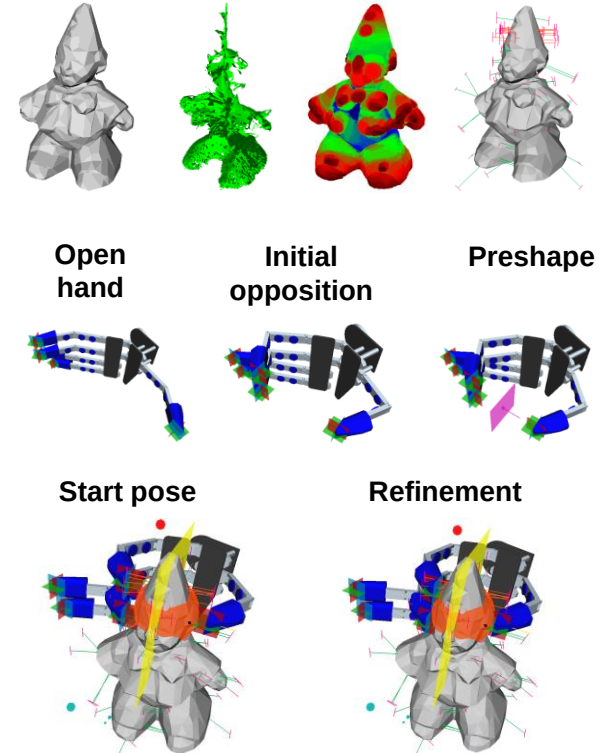
- Define desired contact areas at fingertips
- Preshape and first guess for hand pose based on:
 - Object symmetry information
 - Contact areas
- Refine hand pose and configuration while closing the fingers



Algorithm: Planning precision grasps

1. Generate candidate grasps using the Medial Axis Transform (MAT).
2. Compute preshape and first guess for hand pose:
 - 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

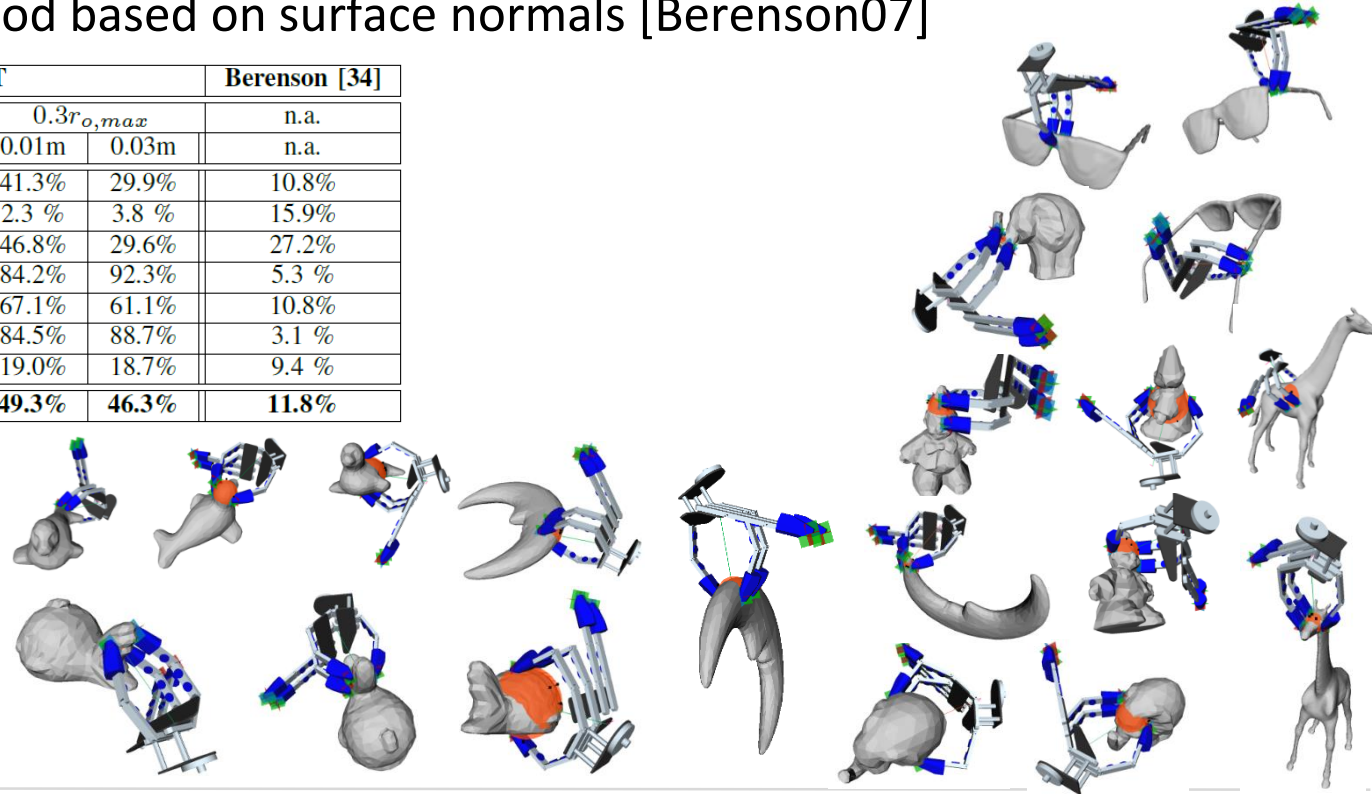
Candidate grasp generation based on MAT



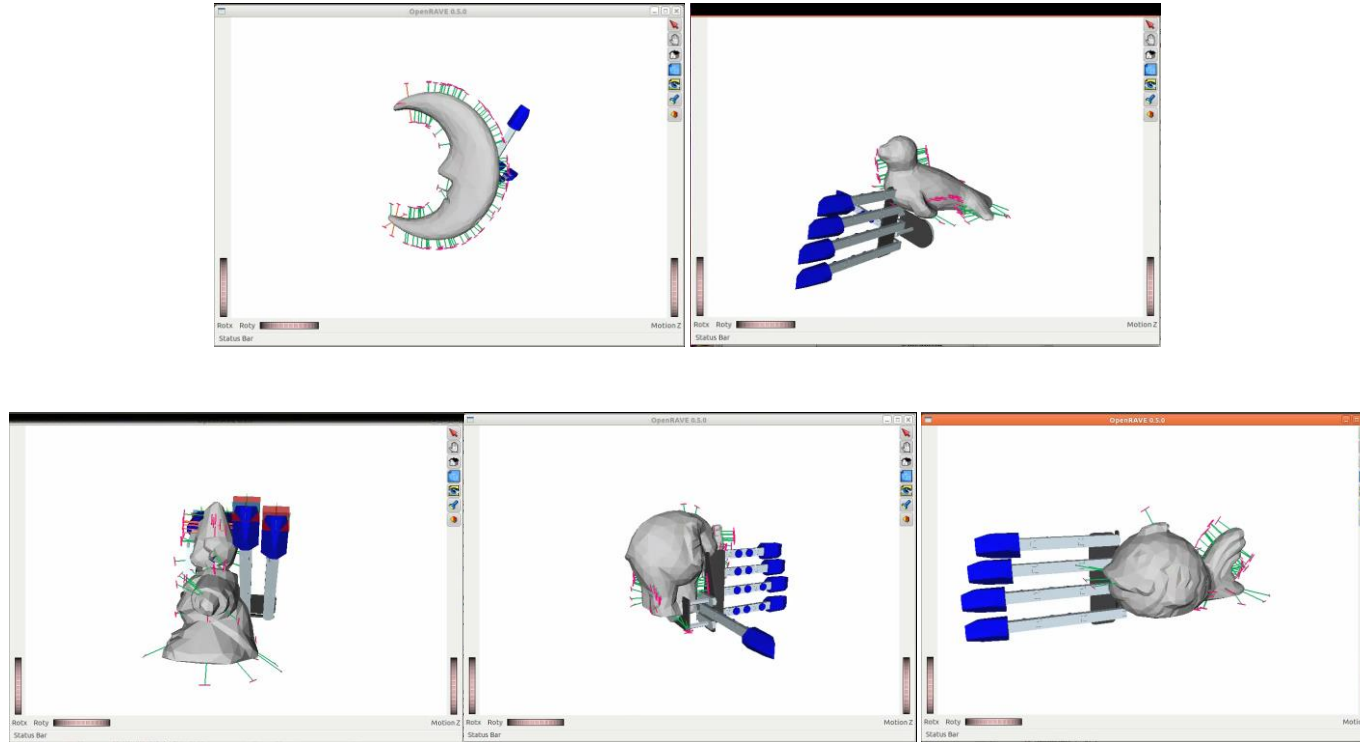
Results (Precision Grasps)

Comparison to method based on surface normals [Berenson07]

Planner type	MAT				Berenson [34]
$r_{o,min}$	0.0		$0.3r_{o,max}$		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 (Precision Grasps) (II)



Execution on ARMAR-IIIb

