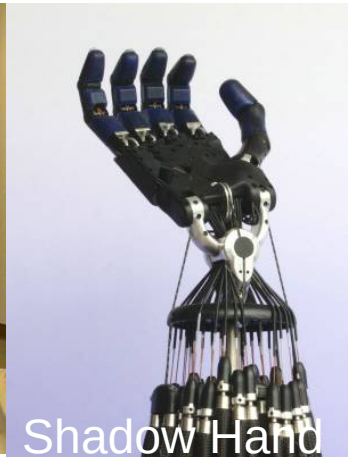
Mehrfingrige Hände

Thomas Wimböck

Stand der Technik - Hände

- Roboterhände mit beeindruckender Beweglichkeit
- Oftmals problematische Handhabung wegen ausgelagerter Antriebseinheiten <-> Modularität
- Fingerleistung (Kraft x Geschwindigkeit)
- Sensorik

UTAH/MIT Hand


Shadow Hand

NASA Robonaut

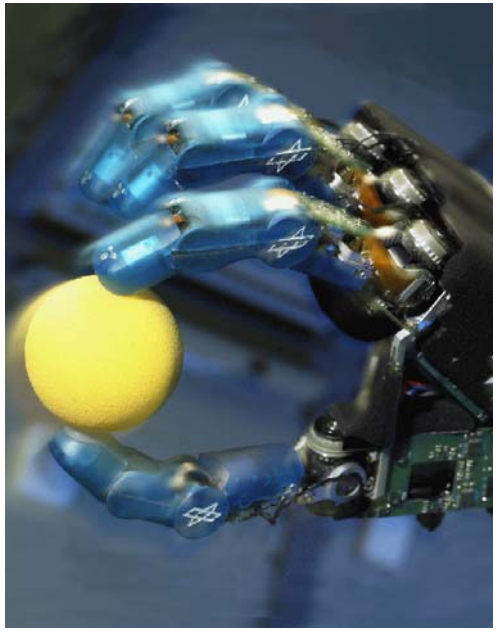
UB Hand III

Twendy-One

Gifu Hand III

Grifftypen

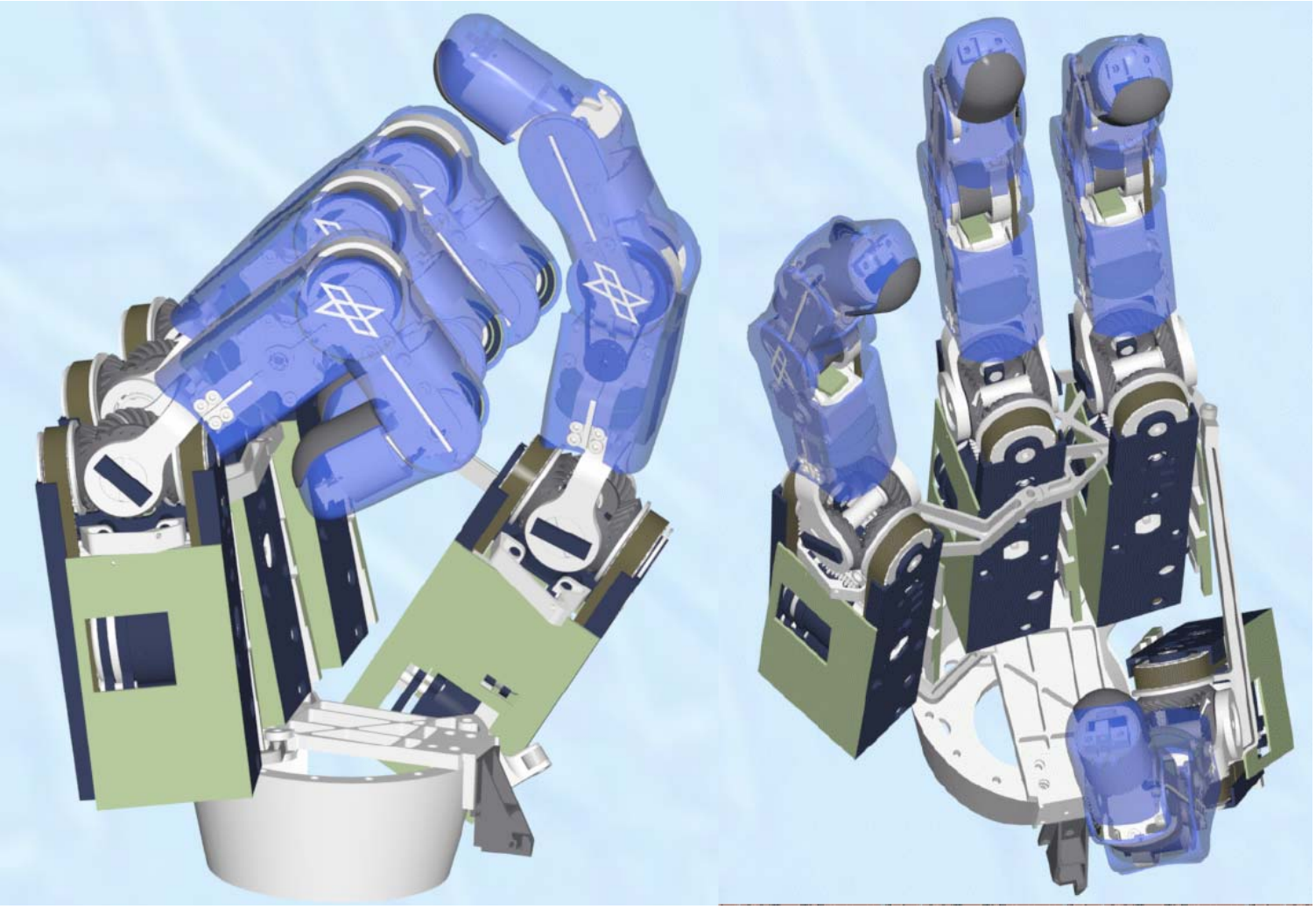
Präzisionsgriff -
Nur Fingerspitzen



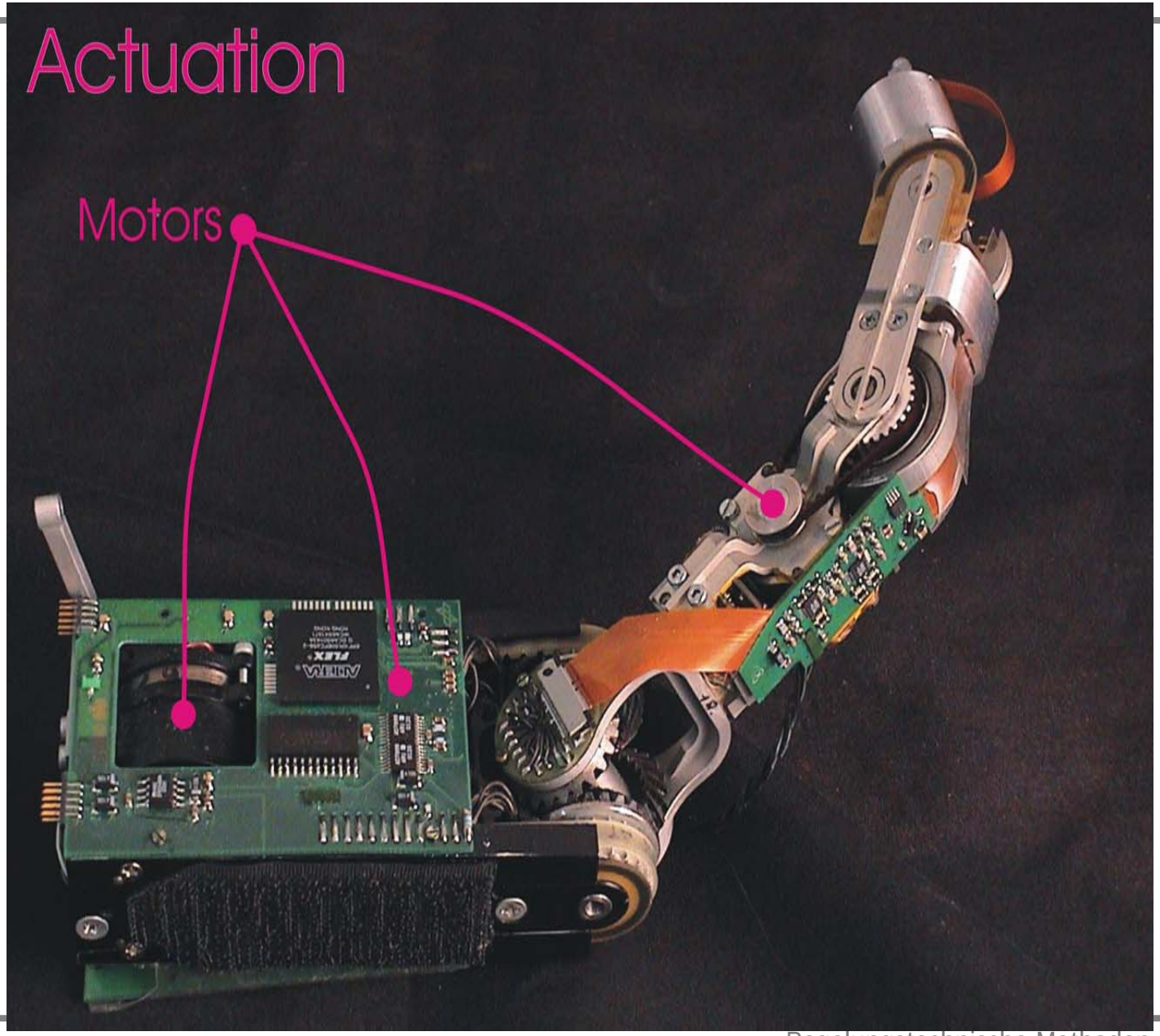
Kraftgriff

Trade-off: Beweglichkeit versus Stabilität

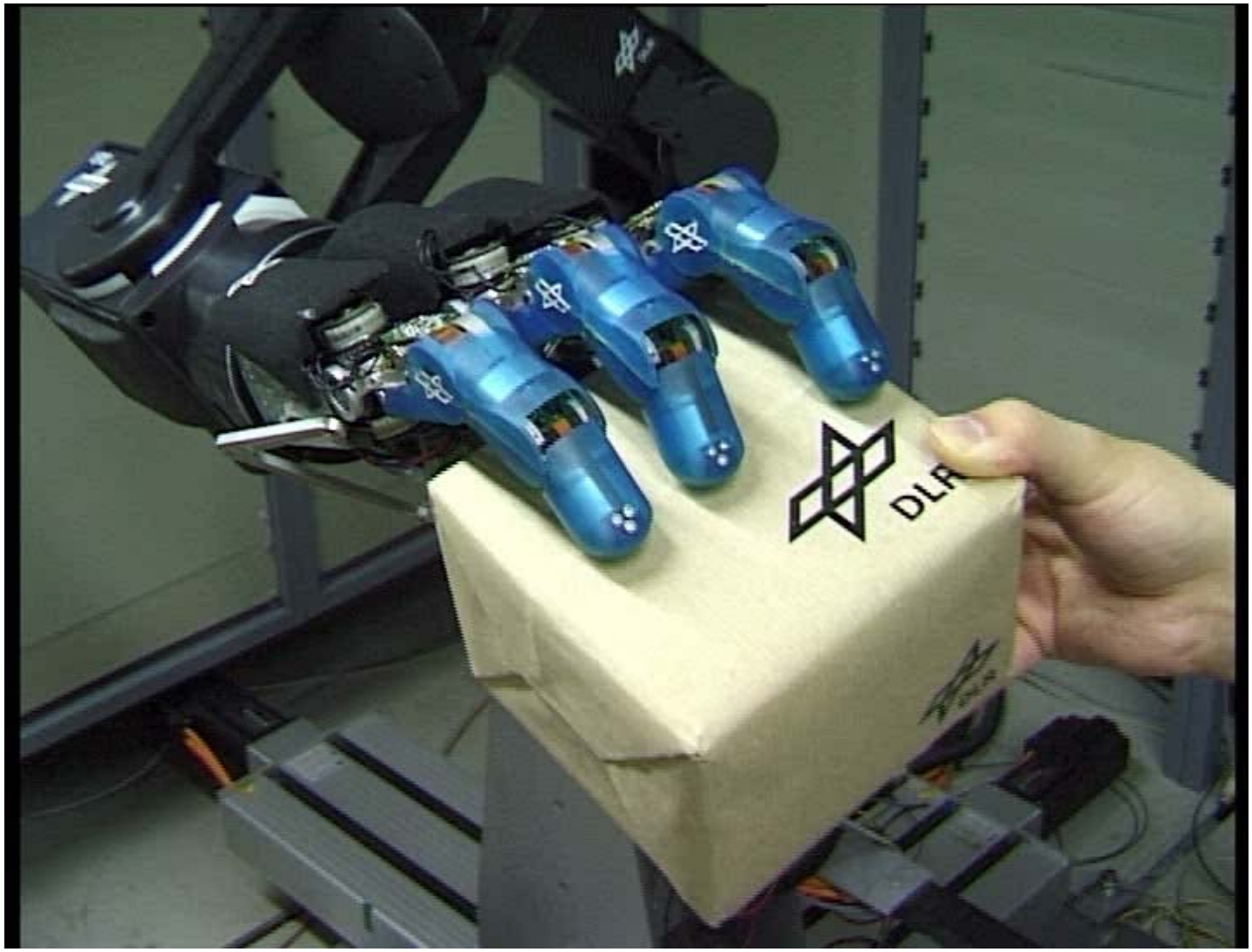
Opponierbarer Daumen



The complete Finger

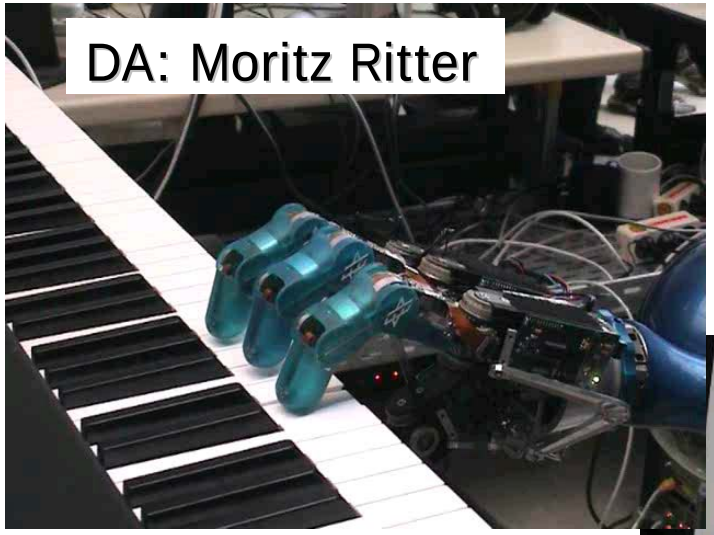


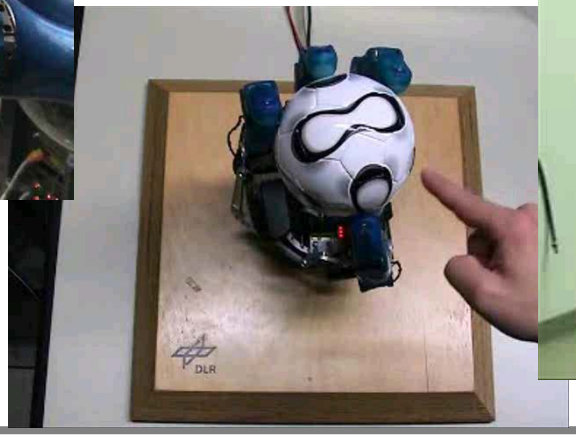
Steifigkeitsregelung



Impedanzregelung

- Interaktion mit der Umwelt:
  - Gelenkimpedanzregelung
  - Synergiekoordinaten Imp.-Reg.
  - Kartesische Impedanzregelung
  - Objekt Impedanzregelung



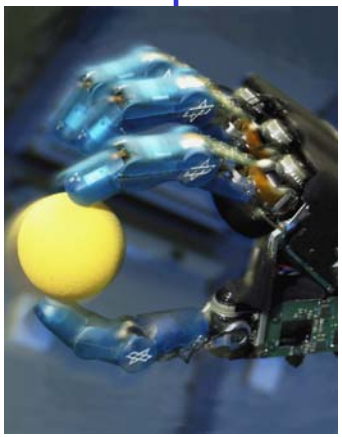


Kinematik mehrfingriger Hände

Griffplanung: Auswahl eines Griffes, der in der Lage sein sollte:

- Den auf das Objekt in beliebiger Richtung wirkenden Kräften zu widerstehen – kraftschlüssiger Griff.
- Das Objekt in beliebige Richtung zu bewegen: manipulierbarer Griff

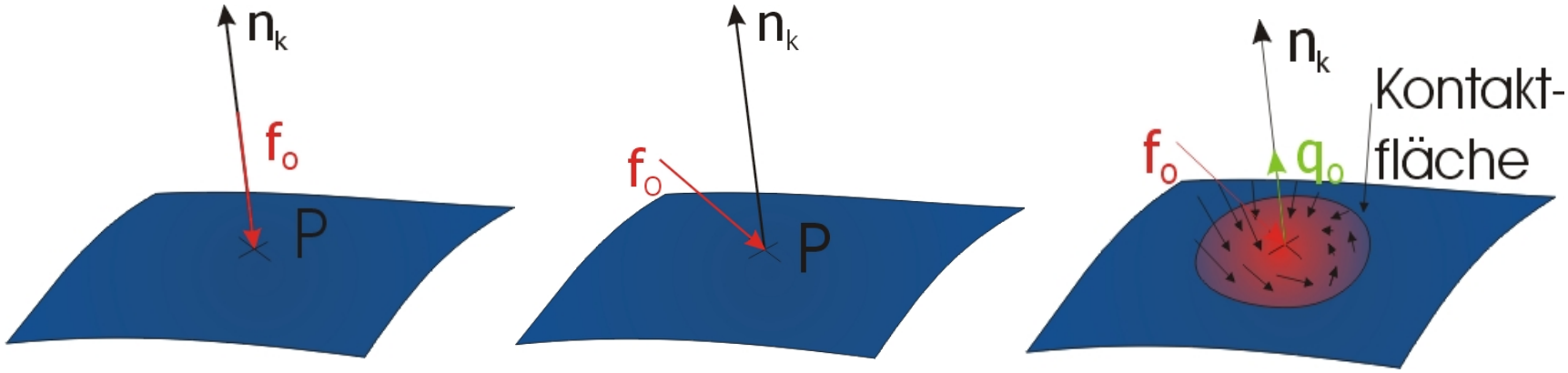
Behandlung von Präzisionsgriffen



Annahmen:

- Kontaktpunkt auf dem Objekt ist bekannt (oder kann gemessen werden).
- Kontaktpunkt ändert sich nicht während der Bewegung.
- Objekt und Finger sind Starrkörper
- Genaues geometrisches Modell des Objektes (und der Hand) ist vorhanden.

Kontaktmodelle für Fingerkontakte



Punktkontakt ohne Reibung	Punktkontakt mit Reibung	„Weicher Finger“
Bsp.: Nadelspitze auf Glas	Bsp.: Stift auf Papier	Bsp.: Menschlicher Finger auf Holz

Kontaktkoordinatensystem: z-Achse entlang der Oberflächennormale n_k

Weitere Kontaktmodelle (jeweils ohne/mit Reibung):

- Linienkontakt,
- Flächenkontakt

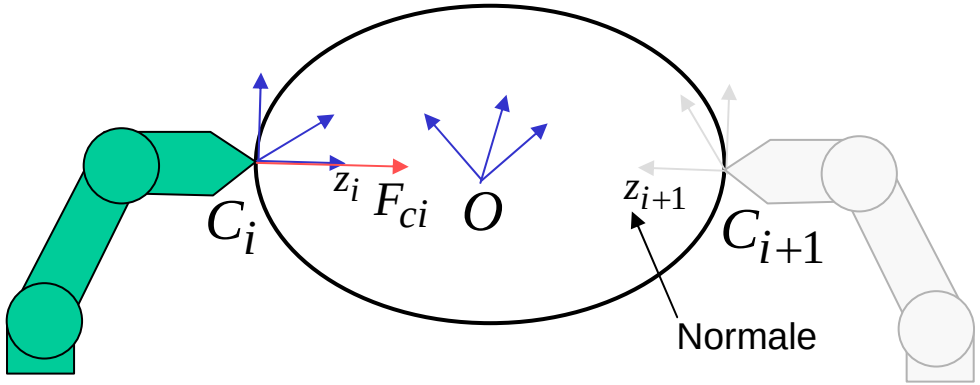
Kontaktmodelle

- Punktkontakt ohne Reibung

$$F_{ci} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} f_{ci}, \qquad f_{ci} \in \mathbb{R}_+$$

Selektions-
Matrix B

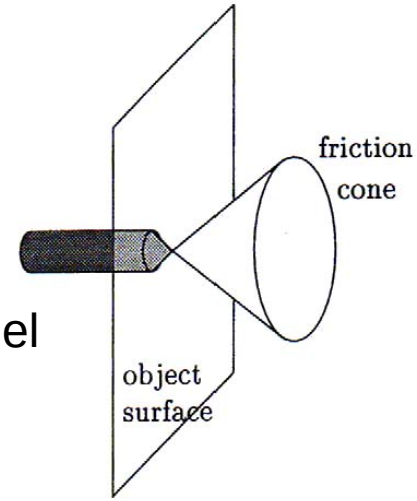
Nur Kraft in Normalrichtung

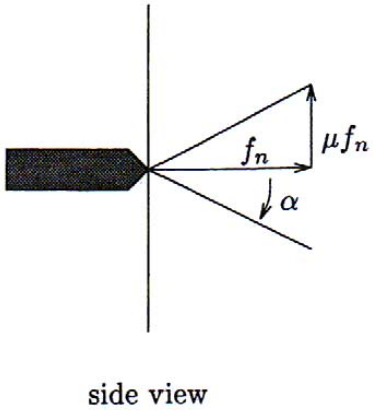


- Punktkontakt mit Coulomb Reibung

$$F_{ci} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} f_{ci}, \qquad f_{ci} \in FC_{ci}$$

Reibkegel





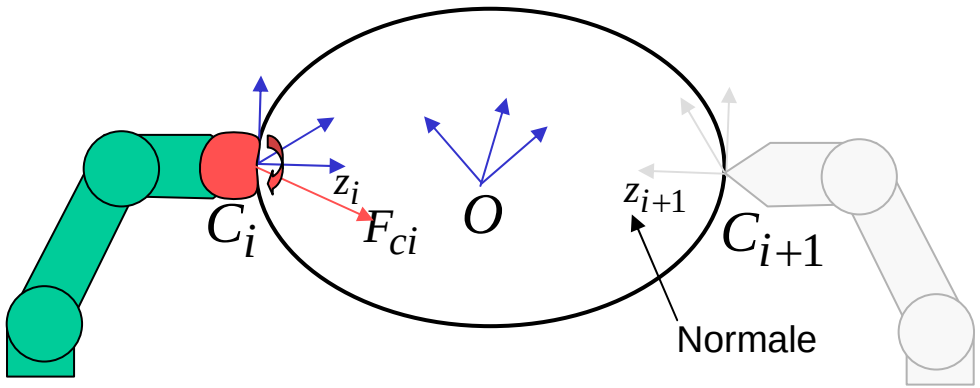
$$FC_{ci} = \left\{ f \in \mathbb{R}^3 : f_3 \in \mathbb{R}_+, \sqrt{f_1^2 + f_2^2} < \mu f_3 \right\}$$

Reibkoeffizient

Kontaktmodelle

- Weicher Kontakt (soft Finger)

$$F_{ci} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} f_{ci}, \qquad f_{ci} \in FC_{ci}$$



$$FC_{ci} = \left\{ f \in \mathbb{R}^4 : f_3 \in \mathbb{R}_+, \sqrt{f_1^2 + f_2^2} < \mu f_3, |f_4| \le \gamma f_3 \right\}$$

Reibkoeffizient Kräfte

Reibkoeffizient Torsion

Der Kontakt kann auch Torsionskräfte entlang der Oberflächennormale übertragen

Allgemein:

$$F_{ci} = B_{ci} f_{ci}, \qquad f_{ci} \in FC_{ci}$$

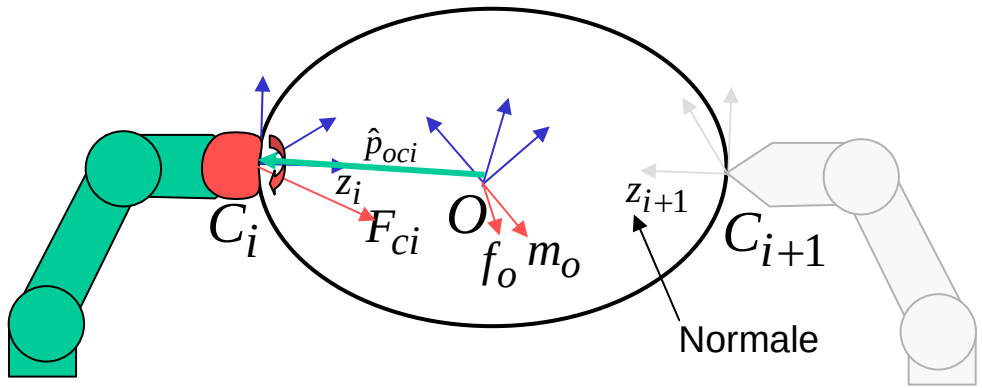
Selektionsmatrix (Wrench Basis)

Reibkegel

Greifmatrix

Beitrag der Kontaktkraft F_{ci}
im Objektkoordinatensystem O:

$$F_{oi} = \begin{bmatrix} f_o \\ m_o \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} R_{ci}^o & 0 \\ \hat{p}_{oci} R_{ci}^o & R_{ci}^o \end{bmatrix}}_{G_i} B_{ci} f_{ci}$$



Der gesamte Wrench im Objekt-Koordinatensystem ist

$$F_o = \sum_{i=1}^{k} G_i f_{ci} = \underbrace{[G_1, \cdots, G_k]}_{G} \underbrace{\begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_k \end{bmatrix}}_{f_c} = G f_c \qquad FC = FC_{c1} \times \cdots \times FC_{ck}$$

Zusammengefasst:

$$\boxed{F_o = G f_c, \qquad f_c \in FC}$$

Greifmatrix

Beispiel: Punktkontakt ohne Reibung

$$F_{oi} = \begin{bmatrix} R_{ci}^{o} & 0 \\ \hat{p}_{oci} R_{ci}^{o} & R_{ci}^{o} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} f_{ci}, \quad f_{ci} \in \mathbb{R}_{+} \qquad R_{ci}^{o} = [x_i, y_i, z_i]$$

Durch ausmultiplizieren folgt:

$$F_{oi} = \begin{bmatrix} z_i \\ \hat{p}_{oci} z_i \end{bmatrix} f_{ci}$$

Normale

Hebelarm $p_{oci} \times z_i$

Skizze an der Tafel

Die Greifmatrix ist dann:

$$F_o = \underbrace{\begin{bmatrix} z_1 & \cdots & z_k \\ \hat{p}_{oc1} z_1 & & \hat{p}_{ock} z_k \end{bmatrix}}_{G} \begin{bmatrix} f_{c1} \\ \vdots \\ f_{ck} \end{bmatrix} = G f_c$$

Kraftschlüssiger Griff

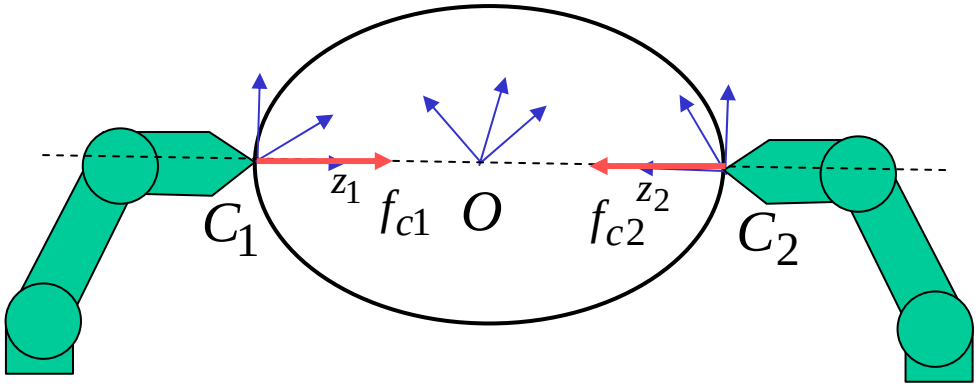
Ein Griff ist kraftschlüssig (force closure) wenn für jedes externe Wrench F_e der Griff eine entgegengesetzte Objektkraft erzeugen kann und die Reibungnsnebenbedingungen erfüllt sind.

$$\boxed{Gf_c = -F_e, \qquad f_c \in FC}$$

Definition:
Eine Greifkraft $f_N = f_c$ wird interne Kraft genannt, wenn es keine Objektkraft erzeugt:

$$\boxed{Gf_N = 0, \quad f_N \in FC}$$

Beispiel:



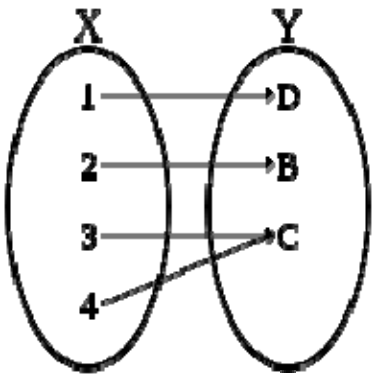
Satz (ohne Beweis – Murray & al.):
Ein Griff ist kraftschlüssig wenn und nur wenn G surjektiv ist und der Griff eine interne Kraft zulässt, bzw. $G(FC) = \Re^p$ p=3 im planaren und 6 im räumlichen Fall

Kraftschlüssiger Griff

Satz (ohne Beweis – Murray & al.):
Ein Griff ist kraftschlüssig wenn und nur wenn G surjektiv ist und der Griff eine interne Kraft zulässt.

Bzw. $$G(FC) = \Re^6$$

Surjektivität (*surjektiv*) oder Rechtstotalität (*rechtstotal*; in der Sprache der Relationen) ist eine Eigenschaft einer mathematischen Funktion. Sie bedeutet, dass jedes Element der Zielmenge *mindestens* einmal als Funktionswert angenommen wird, also mindestens ein Urbild hat. Eine surjektive Funktion wird auch als Surjektion bezeichnet



Überprüfung kraftschlüssiger Griffe

Im Allgemeinen ein schwieriges Problem, abhängig vom Reibkegel

(Schlegl, Buss & al.)

Für Punktkontakt ohne Reibung, einfache Lösung:

$$F_o = \underbrace{\begin{bmatrix} z_1 & \cdots & z_k \\ \hat{p}_{oc1} z_1 & & \hat{p}_{ock} z_k \end{bmatrix}}_{G} \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_k \end{bmatrix} = G f_c, \quad f_c \in \mathbb{R}_+$$

Satz (Murray & al.):
Gegeben sei ein Punktkontakt ohne Reibung. G_i seinen die Spalten der Greifmatrix. Folgende Aussagen sind äquivalent:

1. Der Griff ist kraftschlüssig.
2. Jede Objektkraft $F_o \in \mathbb{R}^p$ kann durch positive Linearkombination von G_i erzeugt werden.
$$F_o = \sum G_i f_{ci}, \quad \forall F_o \in \mathbb{R}^p$$
3. Die konvexe Hülle aller G_i enthält eine Umgebung des Ursprungs.

p=3 im planaren und 6 im räumlichen Fall

Beispiel

Im planaren Fall ist

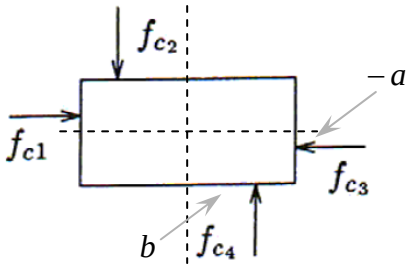
$$Fo = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ m_z \end{bmatrix}$$

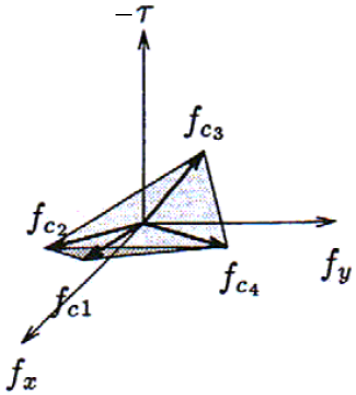
oder einfach

$$Fo_3 = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ m_z \end{bmatrix}$$

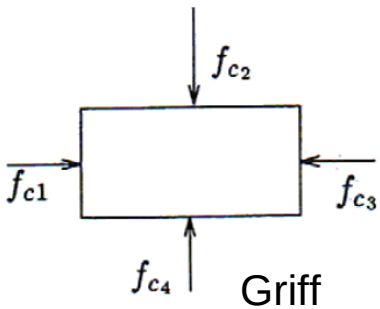
Und entsprechend die Greifmatrix

$$G_3 = \begin{bmatrix} z_{x1} & ,\cdots, & z_{xk} \\ z_{y1} & ,\cdots, & z_{yk} \\ (\hat{p}_{oc1} z_1)_z & ,\cdots, & (\hat{p}_{oc1} z_1)_z \end{bmatrix}$$

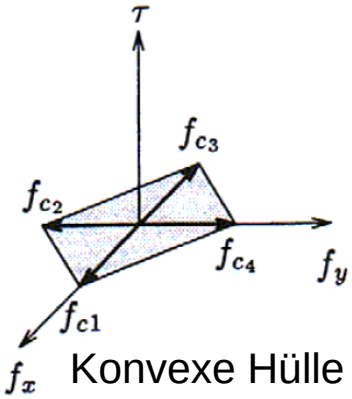




$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ -a & b & -a & b \end{bmatrix}$$



Griff



Konvexe Hülle

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

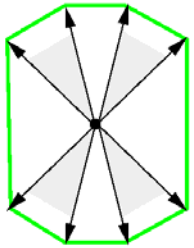
Übersicht: Generierung optimaler Griffe

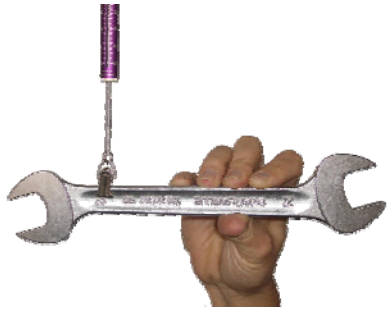
(Wo sollte ich die Finger am besten platzieren?)

Die verfügbaren Kräfte an den Fingerspitzen sind begrenzt. Unter dieser Voraussetzung will man einen „optimalen“ Griff bezüglich möglicher Störungen generieren.

Fragestellungen:

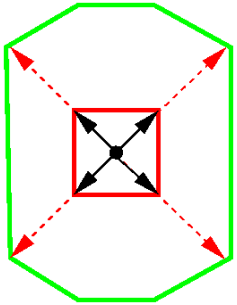
1. Was kann der Griff ?
   Grasp Wrench Space





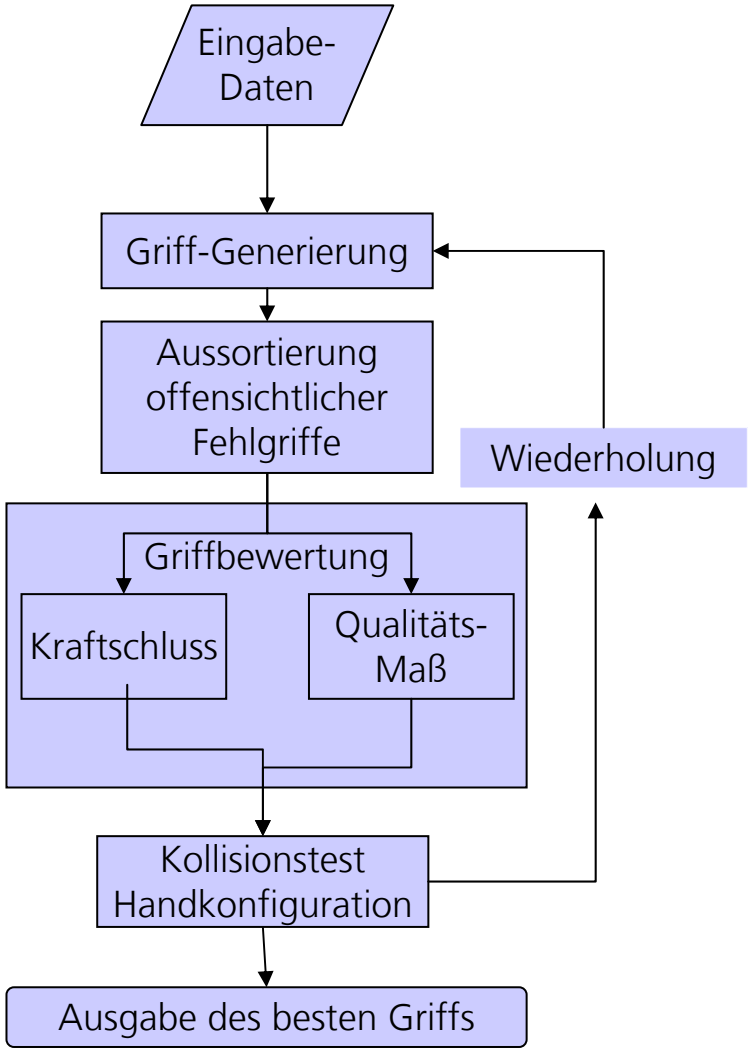
1. Was soll der Griff können ?
   Task Wrench Space

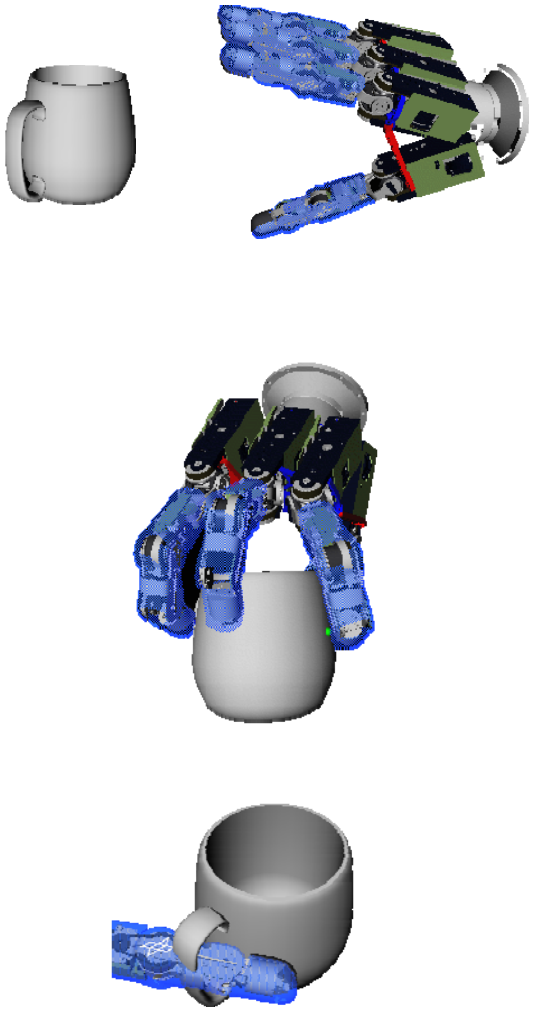
1. Kann er mehr als er soll ?
   Qualitätsmaß



Übersicht: Griffplanung

(Ch. Borst & al. 2003)



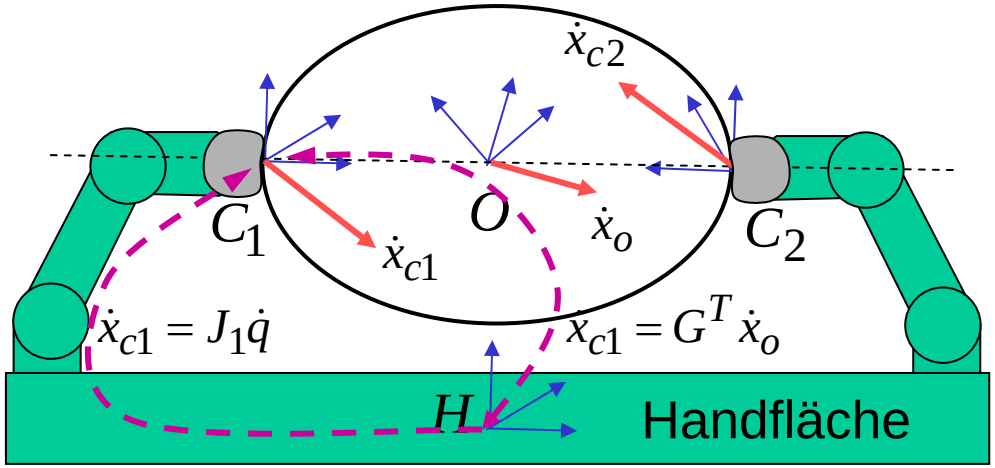


Differentielle Fingerkinematik

Dualität Vektor - Kovektor:

$$F_o = G f_{ci}$$

$$\dot{x}_c = G^T V_o$$



Durch Berechnung der Geschwindigkeit $\dot{x}_c$ über Finger und Objekt (in lokalen Koordinaten):

$$\boxed{J\dot{q} = G^T \dot{x}_o}$$

Ein Griff ist durch J, G, FC vollständig beschrieben.

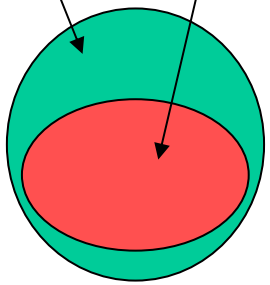
Bemerkung: - Durch die Benutzung der Selektionsmatrizen B sind die Geschwindigkeiten der passiven Gelenke bereits beseitigt, man kann also direkt die Objektgeschwindigkeit aus der Gelenkgeschwindigkeit der Finger berechnen. (im Gegensatz zur allgemeinen parallelen Kinematik)

Manipulierbarkeit

$$J\dot{q} = G^T \dot{x}_o$$

durch Finger erreichbare Geschwindigkeiten

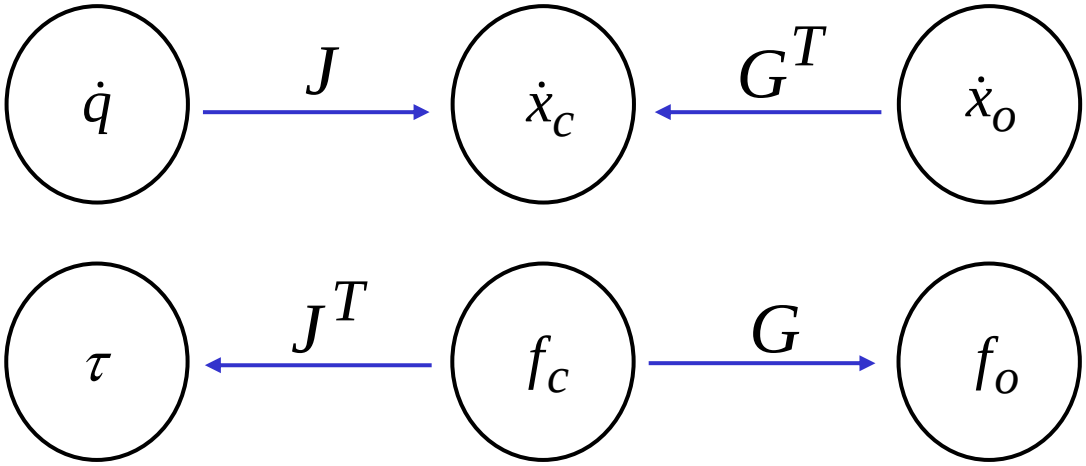
$\dot{x}_c' = \mathrm{Im}\{J\}$



für eine beliebige Bewegung des Objektes notwendige Geschwindigkeiten $\dot{x}_c = \mathrm{Im}\{G^T\}$

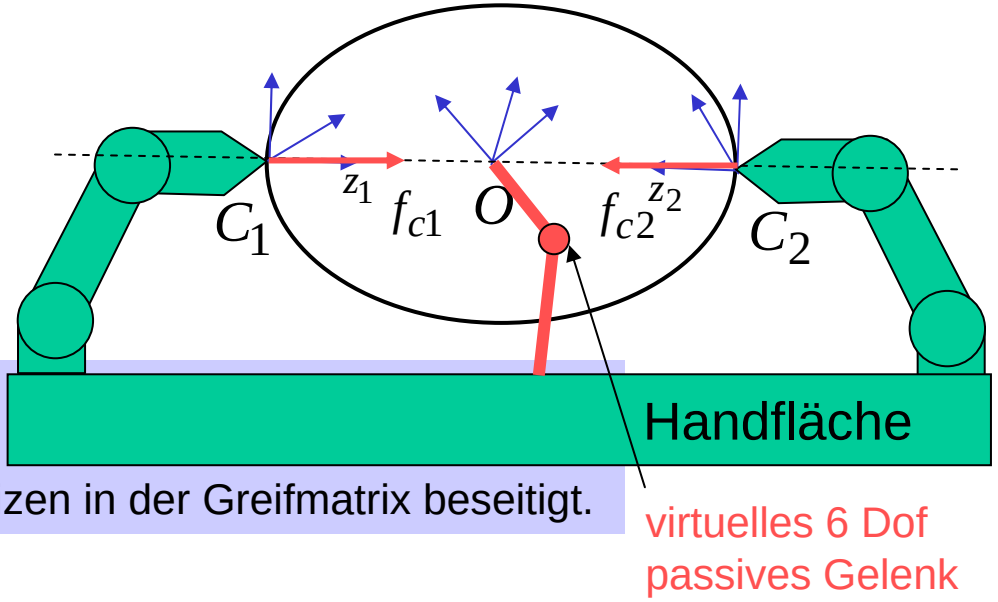
Manipulierbarkeit: $\mathrm{Im}\{G^T\} \subset \mathrm{Im}\{J\}$

Transformationen von Kräften und Geschwindigkeiten:



Handdynamik

Auftrennen am Kontaktpunkt,
die Zwangskräfte $\lambda = f_{ci}$.



passives Gelenk: das virtuelle Objektgelenk
aktive Gelenke: Fingergelenke

Bemerkung: die passiven Freiheitsgrade am Kontaktpunkt (z.B. Rotationen beim Punktkontakt) sind durch die Selektionsmatrizen in der Greifmatrix beseitigt.

$$\tau_f = \overbrace{M_f(q)\ddot{q} + C_f(q,\dot{q})\dot{q} + g_f(q)}^{\tau_{Ba}} + J^T\lambda$$

$$0 = \underbrace{M_o(x)\ddot{x} + C_o(x,\dot{x})\dot{x} + g_f(x)}_{\tau_{Bp}} - G\lambda$$

mit $\dot{q} = J^{-1}G^T\dot{x}_o$
differentielle Zwangsbedingung

Durch ausdrücken von λ aus der ersten Gleichung und Einsetzen folgt die Objektdynamik:

ohne Herleitung

$$\boxed{M(w)\ddot{x} + C(w)\dot{x} + g(w) = F_o}$$

$$F_o = GJ^{-T}\tau$$

$$w = \begin{bmatrix} q \\ x_o \end{bmatrix}$$

Zusatzfolie: Handdynamik

Bemerkung: Die hier abgeleitete Handdynamik gilt unter folgenden Annahmen:

1. Der Griff ist kraftschlüssig und manipulierbar.
2. Die Kontaktkräfte sind innerhalb des Reibkegels.
3. J ist invertierbar (nichtsingulär und nichtredundant)

allgemein: $$\boxed{M(w)\ddot{x} + C(w)\dot{x} + g(w) = F_o}$$

$$M(w) = M_o + G\left(JM_f^{-1}J^T\right)^{-1}G^T \qquad \left(= M_o + A^T M_f A\right)$$

$$F_o = A^T \tau$$

$$g(w) = g_o + A^T g_f$$

$$C(w,\dot{w}) = C_o + A^T C_f A + A^T M_f \frac{d}{dt}(A)$$

mit

$$A^T = GJ^{T\#}$$

$$J^{\#} = M_f^{-1}J^T(JM_f^{-1}J^T)^{-1}$$ dynamisch konsistente Pseudoinverse

Handregelung

$$\boxed{M(w)\ddot{x} + C(w)\dot{x} + g(w) = F_o}$$

Es können alle Regler die für redundante Systeme entwickelt wurden, auch zur Regelung der Hand angewandt werden.

Z.B. Entkopplungsregelung:

$$F_o = M(w)\left(\ddot{x}_d + c_1\dot{e} + c_2 e\right) + C(w)\dot{x} + g(w)$$

$$e = x_d - x$$

Dynamik der geschlossenen Reglerschleife:

$$\ddot{e} + c_1\dot{e} + c_2 e = 0$$

Die Gelenk-Sollmomente in den Fingern sind dann:

$$\tau = J^T G^{\#} F_o$$

Um sicherzustellen, dass die Kontaktkräfte f_c im Reibkegel liegen, muss der Regler zusätzliche interne Kräfte enthalten.

$$\boxed{\tau = J^T G^{\#} F_o + J^T f_N}$$

Generierung von Kontaktkräften

- Ist die Greifmatrix nicht quadratisch, stellt sich die Frage nach der Verteilung der Objektkraft F_o auf einzelne Finger:

$$f_{co} = G^{\#} F_o$$

f_{co} nicht eindeutig, abhängig von der Wahl von $G^{\#}$

- Die internen Kräfte f_N sind so zu wählen, dass $f_c = f_{co} + f_N \in FC$

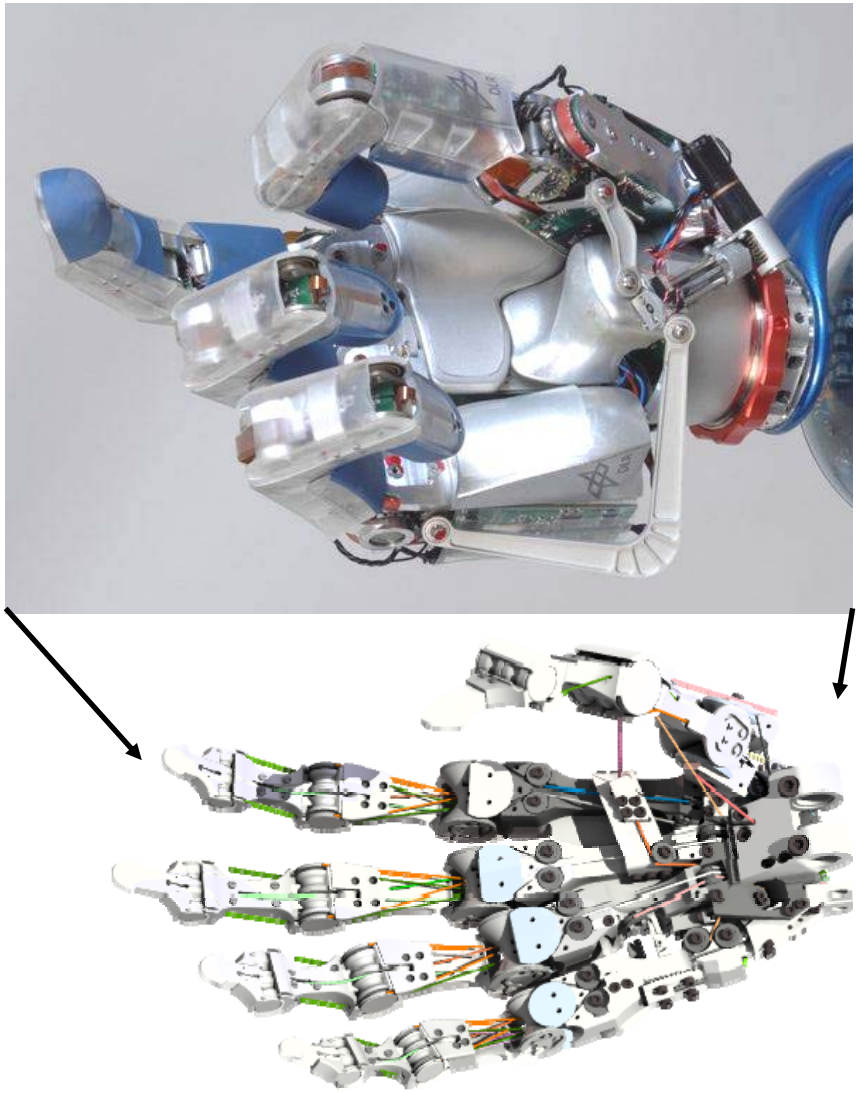
alternative Problemformulierung:
Gegeben die auf das Objekt wirkenden externen Kräfte F_o, finde die minimalen Kontaktkräfte f_c, so dass die Kontaktkräfte im Reibkegel liegen:

$$G f_c = F_o, \quad f_c \in FC$$

Das Problem kann als konvexes Optimierungsproblem formuliert werden und numerisch gelöst werden.

=> einziges globales Minimum! (Schlegl, Buss & al.,'97)

- **Passivitätsbasierter Ansatz:** Generierung der internen Kräfte und der Objektkräfte mit Hilfe von Potentialen und virtuellen Federn

What‘s next?
From DLR Hand IIb to the integrated hand arm system

- Robot hand with size and force similar to the human one
  - Relocation of motors via tendons.
  - Variable stiffness elements.
- Critical tendon routing
  - Nonlinearity vs. Workspace/Friction.
  - Joint coupling.
- Challenges:
  - Size and maximum integration density
  - Modeling and optimization of the mechanism
  - A controller to set joint position and stiffness independently.
  - „Reasonably bio-inspired“