






Virtuelle Realität Haptik

G. Zachmann
Clausthal University, Germany
cg.in.tu-clausthal.de

Nicht-visuelle Displays

- Haptik = Berührungs- und Kraftsinn (griech. *haptesthai* = berühren)
- *Force-Feedback* = Kraftrückkopplung
- Was wird dargestellt ("gerendert"):
 - Kräfte auf Hand / Arm des Users ausgeben
 - Oberflächenbeschaffenheit darstellen (rau, Maserung, Gummi, ...)
 - Formen darstellen (z.B. à la Nagelbrett)
Frage: wie liegt der neue Rasierer in der Hand?
- Anwendungsfelder:
 - Trainig in der minimalinvaiven Chirurgie (Arzt fühlt mehr, als dass er sieht)
 - Spiele? (erhöht Präsenz)
 - Industrie: Virtuelle Montagesimulation (verbessert *User-Performance* beim Greifen und Plazieren), Design (Fühlen der Oberfläche)

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 11/12 Haptik 2

Anwendung: Training in der minimalinvasiven Chirurgie



The slide contains three images. The top-left image shows a virtual simulation of a surgical procedure with a 3D anatomical model. The top-right image shows a real surgical operation in progress. The bottom-right image shows a surgeon using a haptic interface for training, with a monitor displaying a 3D model.

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 11/12 Haptik 3

Menschliche Haptik

- Taktile Information:
 - Sensoren in der Haut
 - Details einer Form, Textur, Reibungswiderstand, ...
 - *Human Factors* der Fingerkuppe:
 - 0.15 mm bei Position eines Punktes
 - 1 mm räumliche Auflösung (Trennung 2er Punkte)
 - Wahrnehmbarkeitsschwelle: 0.06 Mikron Grat, bzw. 2 Mikron Punkt
 - Zeitliche Auflösung: 1 kHz (vergl. Auge!)
- Kinaesthetische (propriozeptive) Information:
 - Sensoren in den Muskeln
 - Großräumige Form, Federwiderstand, ...
 - *Human Factors*:
 - 2 bzw. 1 Grad (Finger bzw. Schulter)
 - 0.5-2.5 mm (Finger)

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 11/12 Haptik 4

Panoptikum haptischer Geräte (*Force-Feedback*)

CyberForce

(movie)

Phantom

Sarcos (movie)

CyberForce

"Maglev" (magnetic levitation device)

Tsukuba (movies)

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation — WS 11/12

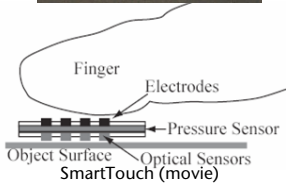



Haptik 5

Two-Handed Multi-Fingers Haptic Interface Device: SPIDAR-8

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation — WS 11/12

Haptik 6

Taktile Displays



CyberTouch







AURA INTERACTOR

Feelix

Finger Electrodes
Object Surface Pressure Sensor Optical Sensors
SmartTouch (movie)

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation — WS 11/12 Haptik 7

Andere Displays




Flogiston


G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation — WS 11/12 Haptik 8

Freiheitsgrade

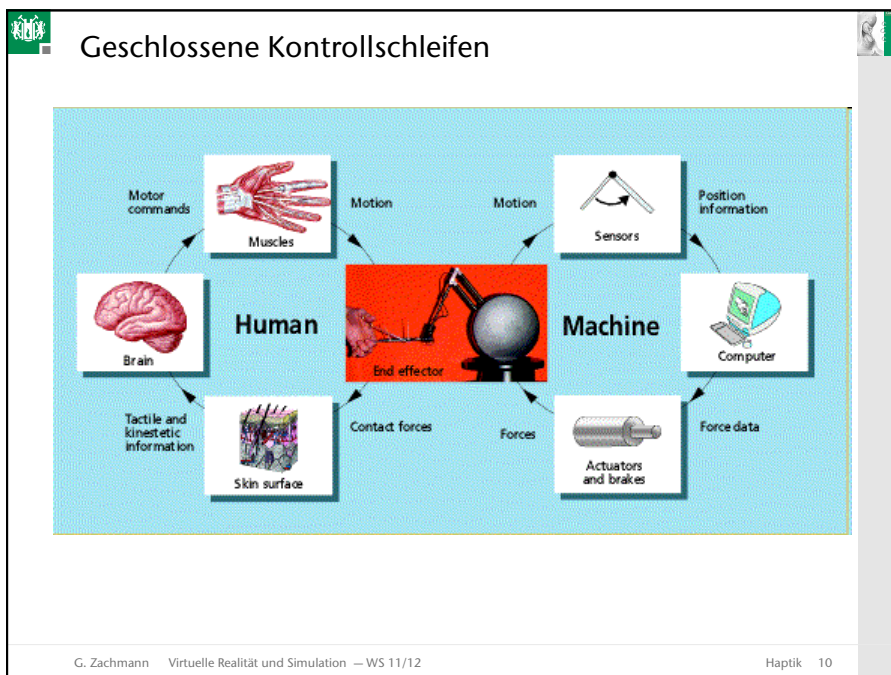
- Anzahl darstellbarer DOFs, typ. ≤ 6 bei *Force-Feedback*
- Anzahl innerer DOFs (~ Gelenke u.ä.)



Cybernet



G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 11/12
Haptik 9



Human factors in der Kontrollschleife

- Reflexzeiten:
 - Muskelreflex: 30 millisecc
 - Rückenmarkreflex: 70 millisecc
 - Bewußte Aktion: ?
- Bandbreite der menschlichen Krafterzeugung:
 - 1-2 Hz bei unerwarteten Signalen
 - 2-5 Hz bei periodischen Signalen
 - 5 Hz bei gelernten Trajektorien
 - 10 Hz bei Reflexen
- Kräfte:
 - Max. 50-100 N
 - Typ. 5-15 N (Manipulation und Exploration)

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 11/12 Haptik 11

Software-technische Anbindung

- Haptisches Gerät =
 - Sensor (z.B. Kraft, Position) +
 - Aktuator (z.B. Beschleunigung, Kraft)
 → logische Geräte
- System:

```

graph LR
    subgraph VR_System [VR-System ~ 30 Hz]
        Synch[Synch.]
        Primitive_VR[Primitive]
    end
    subgraph Haptik_Modul [Haptik-Modul >>60 Hz]
        Pos[Pos.]
        Kollision[Kollisiondetektion]
        Primitive_H[Primitive]
    end
    subgraph Server [Server ≥1000 Hz]
        Hapt_Pr[Hapt. Primitiv]
        Ger_Ste[Gerätesteuerung]
        Position[Position]
    end
    Haptik_Roboter((Haptik-Roboter))

    VR_System --> Haptik_Modul
    Haptik_Modul --> Server
    Server --> Haptik_Roboter
    Haptik_Roboter --> Server
    Server --> Haptik_Modul
  
```

- Haptisches Primitiv = Ebene, Kugel, etc.

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 11/12 Haptik 12

Haptisches Rendering

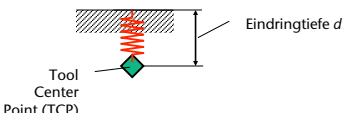
- "Dynamisches" Objekt = vom User gegriffenes Objekt; Endeffektor des haptischen Gerätes ist daran gekoppelt
- "Penalty"-Ansatz: ausgegebene Kraft hängt ab von Eindringtiefe des dynamischen Objektes
- Dynamische Modelle:
 - Impedanz-Ansatz (*impedance approach*): haptisches Gerät liefert Position, Simulation berechnet daraus Kräfte
 - Admittanz-Ansatz (*admittance approach*): haptisches Gerät liefert Kräfte, Simulation berechnet daraus neue Position
 - Jeweils mit Kollisionsüberprüfung durch Simulation
- Anforderungen:
 - 1000 Hz
 - Konstante *Update-Rate*

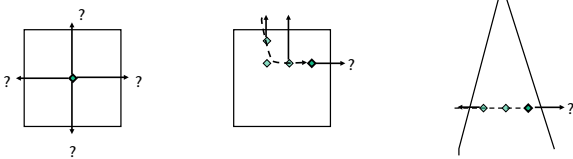
G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 11/12 Haptik 13

Surface Contact Point (nur 1 Punkt ...)

- Rückstellkraft über *Hooke'sches Gesetz*:

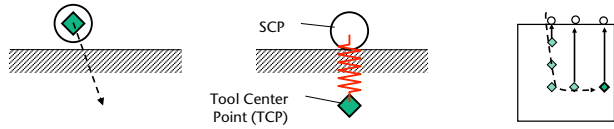
$$F = k \cdot d$$


- Frage: Welches ist die Eindringtiefe?
 - Naïve Methode: ordne jedem inneren Punkt eine Eindringtiefe und eine Rückstellrichtung zu
 - Problem: die Historie wird ignoriert



G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 11/12 Haptik 14

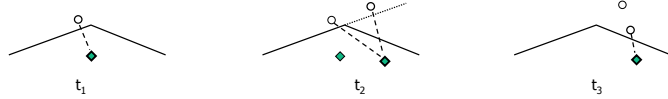
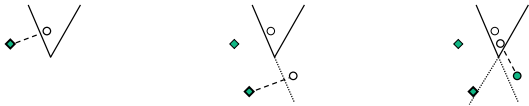
- Fazit: man braucht die Historie
- Idee: repräsentiere Historie als "Surface Contact Point" (SCP)



- Bestimmung der Constraints:
 - Iteriere max 3x:
 - bestimme Polygon p , das $\overline{SCP^{t-1}TCP^t}$ schneidet;
 - bestimme SCP^t , das Abstand minimiert und auf $\text{support}(p)$ liegt;
 - wiederhole mit $TCP^t := SCP^t$
 - Numerische Stabilität: SCP "anheben"
 - Zeitliche Kohärenz → nur Polygone in der Nachbarschaft betrachten

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 11/12 Haptik 15

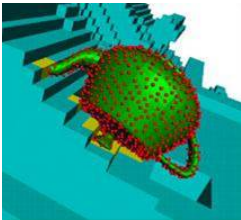
- SCP \mathbf{x} berechnen:
 - minimiere $\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_{TCP}\|^2$
 - unter den Bedingungen $\mathbf{n}_i \mathbf{x} - d_i = 0, \quad i \in [1, n], \quad n \leq 3$

Lagrange'sche Multiplikatorenregel liefert triviales LGS, das man "festverdrahtet" lösen kann.
- Beispiel des Algos für eine konvexe Kante:
 
- Beispiel konkave Kante:
 

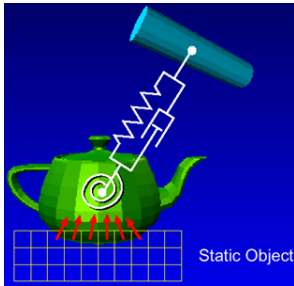
G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 11/12 Haptik 16

Voxels and Points (viele Punkte ...)

- Keine Polygone:
 - bewegtes Obj = Points
 - Rest der Szene = Voxels



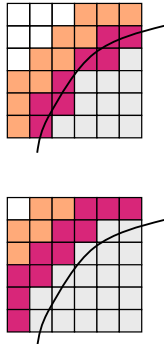
- Generelle Idee:
 1. Bestimme Kräfte für alle eingedrungenen Punkte
 2. Bestimme Gesamtkraft für dynamisches Objekt
 3. Bestimme Kraft für haptisches Gerät



G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 11/12 Haptik 17

Voxel-Map

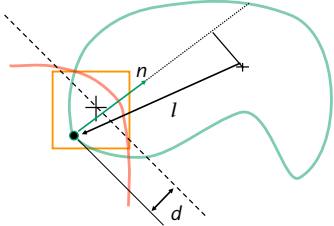
- Voxmap = Distanzfeld
- Erzeugung:
 - Scan-Konvertierung der Oberfläche → Voxel, die von Oberfläche geschnitten werden
 - Breadth-first search vom Rand des "Universums" → alle Voxel außerhalb
 - Restliche Voxel = innen
 - Berechne für jedes der inneren Voxel den minimalen Abstand zur Oberfläche
 - Alternative: Abstand von der Oberfläche nach innen propagieren mittels Chamfer-Methode



G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 11/12 Haptik 18

Kraft in 1 Punkt

- Kraft / Drehmoment aus 1 Punkt:
 - Richtung der Kraft = Punktnormale
 - Eindringtiefe = Abstand von Punkt zu Ebene durch Voxelmittelpunkt und Punktnormale
 - Kraft $\mathbf{F} = k_v \mathbf{n}$
 - Drehmoment $\mathbf{M} = \mathbf{l} \times \mathbf{F}$
- Warum nicht *Voxel-Normale*?
 - Richtung wäre nicht abhängig von Objekt-Rotation
 - Unstetigkeit auch in der Krafrichtung, wenn Objekt transliert



G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 11/12 Haptik 19

Die "virtuelle Kopplung"

- 6-DOF Feder/Dämpfer-System
- Kräfte zwischen Handle und dyn. Obj.:

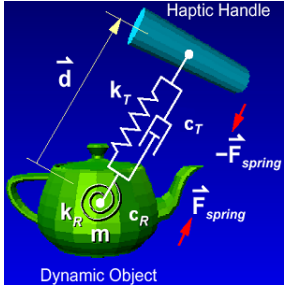
$$\mathbf{F} = k_T \mathbf{d} - c_T \mathbf{v}$$

$$\mathbf{M} = k_R \theta - c_R \omega$$

wobei

k_T, c_T = transl. Steifigkeit / Viskosität
 k_R, c_R = rot. Steifigkeit / Viskosität
 \mathbf{d}, θ = transl./rot. Auslenkung
 \mathbf{v}, ω = transl./rot. Geschwindigkeit

- Details:
 - Alle Vektoren im Handle-Koordinatensystem (oder dyn. Obj.)
 - Werte von \mathbf{v} nur die Komponente entlang \mathbf{d} aus
 - Setze Viskosität auf 0, falls \mathbf{v} vom Handle wegzeigt



G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 11/12 Haptik 20

Bewegung des dynamischen Objektes

- Gesamtkraft auf das dynamische Objekt

$$F = F_{Feder} + \frac{1}{N} \sum_{i=1 \dots N} F_i$$
 analog für die Drehmomente
- Integriere *Newton-Euler* Bewegungsgleichungen mit

$$F = ma$$

$$M = J\alpha + \omega \cdot J\omega$$
 wobei
 - F, M = Kraft, Drehmoment im Schwerpunkt
 - a, α = Transl.-, Rot.-Beschleunigung
 - m, J = Masse, Trägheitstensor
 - ω = Drehgeschwindigkeit
- Voraussetzung: konstantes Δt oder im voraus bekannt

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 11/12 Haptik 21

Algo Zusammenfassung

1. Kollision checken
2. Kräfte und Drehmomente aus jedem Punkt bestimmen
3. Gesamtkraft des dynamischen Objektes bestimmen
4. Neue Beschleunigungen für das dynamische Objekt bestimmen
5. Neue Position bestimmen
6. Kräfte für das haptische Gerät bestimmen

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 11/12 Haptik 22



Reibung für 1 Punkt

- Modell:
 - Oberfläche = Membran
 - Tool = lateral flexibler Stift
- Kräfte:
 - Normal:

$$F_N = k_N \zeta d$$
 - Lateral:

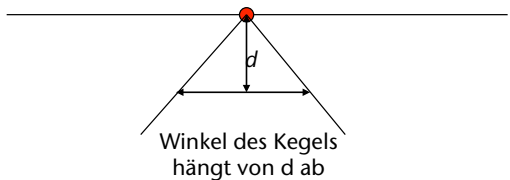
$$F_L = k_L \zeta l$$
- Point of Attachment:
 - Punkt auf Oberfläche, wo Erstkontakt stattgefunden hat
 - Bzw., Kontaktpunkt mit realem Tool durch Simulation festgelegt

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 11/12 Haptik 24

▪ Reibungskraft:

$$F_R = c_F \cdot F_N = c_F \cdot k_N \cdot d$$

▪ "Cone of friction":
Übergang zwischen statischer Reibung und kinetischer Reibung

$$F_N > F_R \Leftrightarrow k_L \cdot l > c_f \cdot k_N \cdot d$$


Winkel des Kegels hängt von d ab

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 11/12 Haptik 25



G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation – WS 11/12 Haptik 26