

Aktuelle Forschung in der Biomechanik



Martin Mössner

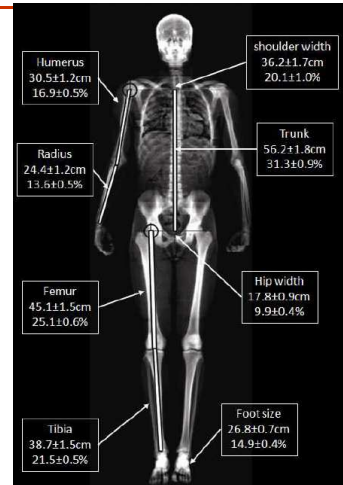
martin.moessner@uibk.ac.at
25. April 2024

Segmentdaten

Segmentdaten

Röntgen Absorptionsmessungen
z.B.: Stöggl (2010)

Körperdimensionen
Körperzusammensetzung
Fettanteil, Knochendichte



Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

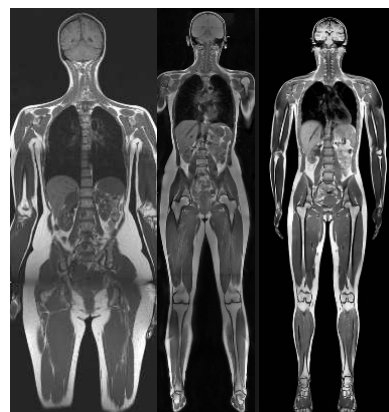
137

Masse: m – Trägheitsmoment: I

Kennt man die Dichteverteilung eines Körpers, so kann man m und I bestimmen (z.B. mit MRI):

ρ_i Dichte des Teilvolumens V_i
(Grauwerte),
 $m_i = \rho_i \cdot V_i$ Masse im Volumen V_i ,
 r_i Normalabstand des Volumens V_i
zur Drehachse

Gesamtmasse $m = \sum_i m_i$
Trägheitsmoment $I = \sum_i m_i r_i^2$

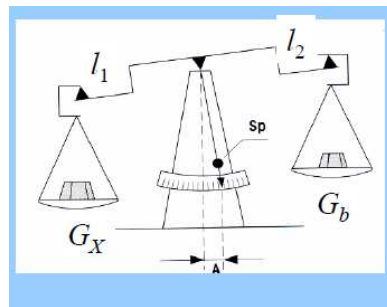


Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

138

Messung: Masse

Gebräuchliche Ausführungen von Waagen:



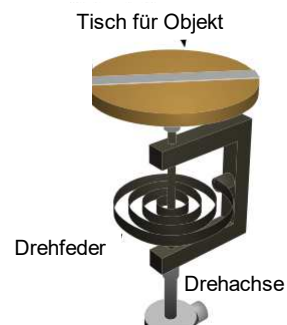
Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

139

Messung: Trägheitsmoment

Drehwaage zur Bestimmung
des Trägheitsmoments:

Man legt Objekt auf Tisch, sodass
Drehachse des Objekts mit Tisch
Übereinstimmt und misst die
Schwingungsdauer der Drehschwingung.
Dann ist das Trägheitsmoment gleich



$$I = k \cdot \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \quad T \text{ Schwingungsdauer}$$

$$M = -k \cdot \varphi \dots \text{Rückstellmoment der Drehfeder}$$

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

140

Segmentdaten

Masse:
$$M = \int_V \rho \, dV \approx \sum_i m_i$$

Schwerpunkt:
$$x_s = \frac{1}{M} \int_V \rho \, x \, dV \approx \frac{1}{M} \sum_i m_i \, x_i$$

Relative Schwerpunktslage:
$$\eta = \frac{x_s}{L}$$

Trägheitsmoment:
$$I = \int_V \rho \, r^2 \, dV \approx \sum_i m_i \, r_i^2$$

Segmentdaten

Beispiel: Unterschenkel
Modell: quadratischer Quader
Messung: Länge L, Umfang → Breite a

$$M = \rho \cdot a^2 \cdot L \quad \eta = L/2 \quad I = M \cdot (a^2 + L^2) / 12$$

$$a = 0.09 \, \text{m}, \quad L = 0.36 \, \text{m}, \quad \rho = 1200 \, \text{kg/m}^3$$
$$\rightarrow M = 3.5 \, \text{kg}, \quad \eta = 0.18 \, \text{m}, \quad I = 0.040 \, \text{kg m}^2$$

Segmentdaten

Experimentell: Zerlegen, Wägen, Drehwaage

→ Clauser: Regressionsgleichungen

→ van den Bogert: Pferd

Rechnerisch: Lege Geometrie fest und berechne Integrale

→ Hanavan: Hanavan-Modell

→ Yeadon:

→ Hatze: Humanoid-Modell

→ ...

Segmentdaten

aus Kaps et al. 2000

Segment	Masse [kg]	Trägheitsmoment [kgm ²]
Rumpf-Kopf-Arme	45,1	2,5853
beide Oberschenkel	13,7	0,2912
beide Unterschenkel	5,72	0,0858
beide Füße und Skischuhe	7,5	0,1
beide Ski	6	2,0034

Tab. 1: Massen und Trägheitsmomente der Segmente um die transversale Schwerpunktsachse.

Segmentmassen

	Relatives Gewicht			TSP- Verhältnis	
	Fischer	Bernstein		Fischer	Bernstein
	m	m	w		
Kopf	0,0706	0,0672	0,0812	0,40	
Rumpf	0,4270	0,4630	0,4390	0,40	0,440
Oberschenkel	0,1158	0,1221	0,1286	0,44	0,386
Unterschenkel	0,0527	0,0465	0,0484	0,42	0,413
Fuß	0,0179	0,0146	0,0129	0,44	
Oberarm	0,0336	0,0265	0,0260	0,47	0,466
Unterarm	0,0228	0,0182	0,0182	0,42	0,412
Hand	0,0084	0,0070	0,0055		

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

145

Segmentmassen

Körpermodell von
Hanavan (1964)

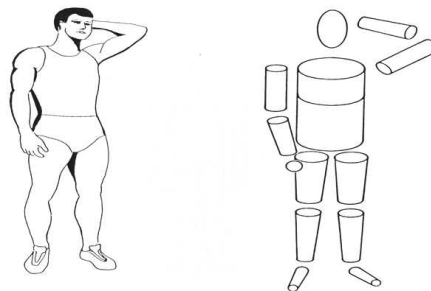
15 geometrische Segmente:

Kopf (Ellipsoid)

Rumpf (ell. Zylinder)

Arme, Beine, Füße (Kegelstümpfe)

Hand (Kugel)



Größen werden durch anthropometrische Messungen festgelegt.
Liefert Teilmassen und Trägheitsmomente der Segmente.

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

146

Körpermodelle: Hanavan-Skifahrer

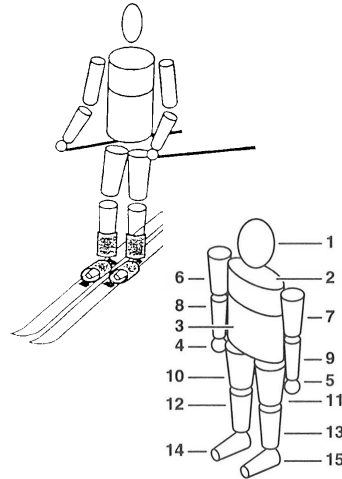
Segmentmodell nach Hanavan + Ski

15 starre Segmente für
Skifahrer und Skier

42 anthropometrische Messungen

Segmente sind Zylinder
Kegelstümpfe, ...

siehe z.B.: Diplomarbeit Oberacher



Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

147

Teilmassen der Körpersegmente

Multiple Regressionsgleichungen für die Segmentmassen

Clauser et al. (1969)

$$\begin{aligned}
 m_{\text{Kopf}} &= 0.104 \cdot U_K + 0.015 \cdot m - 2.189 \\
 m_{\text{Rumpf}} &= 0.349 \cdot m + 0.423 \cdot L_R + 0.229 \cdot U_B - 35.460 \\
 m_{\text{Oberarm}} &= 0.007 \cdot m + 0.092 \cdot U_{OA} + 0.050 \cdot L_{OA} - 3.101 \\
 m_{\text{Unterarm}} &= 0.081 \cdot U_H + 0.052 \cdot U_{UA} - 1.650 \\
 m_{\text{Hand}} &= 0.029 \cdot U_H + 0.075 \cdot B_{HG} + 0.031 \cdot B_H - 0.746 \\
 m_{\text{Oberschenkel}} &= 0.074 \cdot m + 0.123 \cdot U_{OS} + 0.0027 \cdot D_{HF} - 4.216 \\
 m_{\text{Unterschenkel}} &= 0.111 \cdot U_{US} + 0.047 \cdot L_K + 0.074 \cdot U_{KN} - 4.208 \\
 m_{\text{Fuss}} &= 0.003 \cdot m + 0.048 \cdot U_{KN} - 0.027 \cdot L_F - 0.869
 \end{aligned}$$

m Körpermasse (kg), L_R Rumpflänge (cm), L_{OA} Oberarmlänge (cm), L_K Kniehöhe (cm), L_F Fusslänge (cm), U_K Kopfumfang (cm), U_B Brustkorbumfang (cm), U_{OA} Oberarmumfang (cm), U_{UA} Unterarmumfang (cm), U_H Handgelenkumfang (cm), U_{OS} Oberschenkelumfang (cm), U_{US} Unterschenkelumfang (cm), U_{KN} Knöchelumfang (cm), B_{HG} Handgelenksbreite (cm), B_H Handbreite (cm), D_{HF} Hautfaltendicke (cm)

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

148

Segmentmodell von de Leva

Körper wird in 12 Segmente zerlegt:

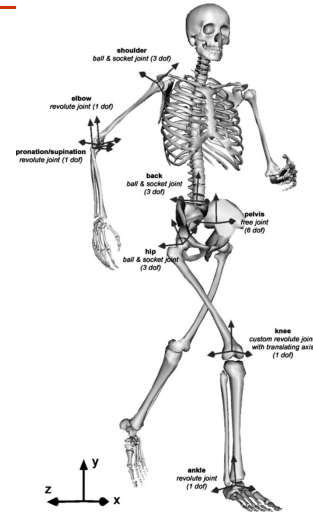
- Fuß, Unterschenkel, Oberschenkel,
- Hüfte, oberer Rumpf mit Kopf,
- Oberarm, Unterarm

Gelenke:

- 1 – 6 Freiheitsgrade

Segmente:

- Masse (m)
- relative Schwerpunktslage (η)
- Trägheitsmoment (I)



Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

149

Körpermodelle

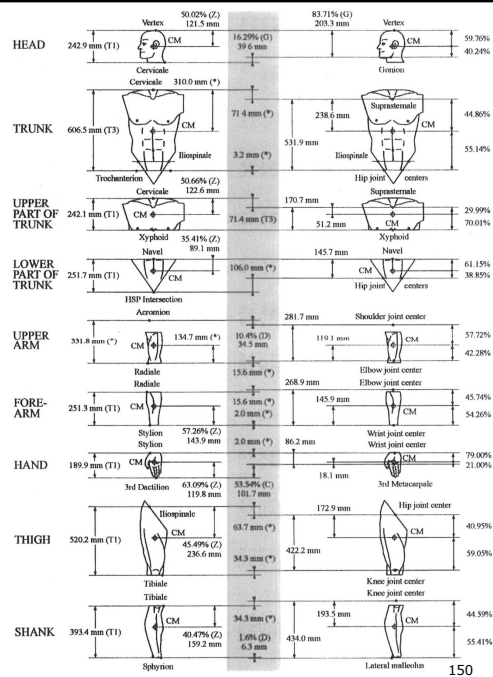
de Leva (1996)

Segmentmodell

Verbesserung des
Hanavan Modells

Röntgenscans von
jungen Europäern

Eckpunkte durch äußere
anatomische Punkte
festgelegt (Liste)



Aktuelle Forsch

150

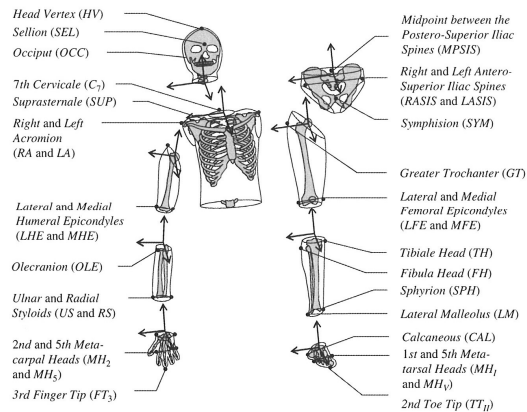
Körpermodelle

Dumas et al. (2007)

Segmentmodell
ähnlich de Leva

Daten:

Wright Patterson Air Base
Verbindung zu Anatomie
und Skelett
Unterscheidet
Männer und Frauen



Segmentmodell von de Leva

De Leva (1996): Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia

Beispiel: Unterschenkel (female/male)

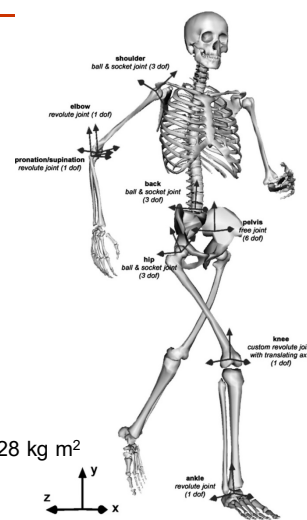
$$\lambda = 0.249 / 0.249, \quad \mu = 0.048 / 0.043$$

$$\eta = 0.558 / 0.554, \quad \rho = 0.267 / 0.249$$

$$L_{US} = \lambda L, \quad M_{US} = \mu M, \quad zSP_{US} = \eta L_{US}$$

$$I_{US} = (\mu M) \cdot (\rho L_{US})^2 \quad (I_{US} \text{ bzgl SP!})$$

Frau: $L = 1.60 \text{ m}, M = 52 \text{ kg}$
 $L_{US} = 0.398 \text{ m}, M_{US} = 2.50 \text{ kg}, zSP_{US} = 0.222 \text{ m}, I_{US} = 0.028 \text{ kg m}^2$

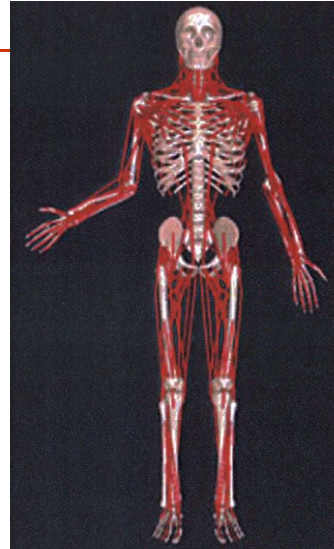


Körpermodelle

Ganzkörpermodell

SIMM Software Package
MusculoGraphics, Inc
Motion Analysis Corporation

3D Skelett
Alle wesentlichen Muskel
Bewegungssimulation



Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

153

Körpermodelle

Hirota (2002)
University of North Carolina
Dissertation

Modellierung des Knies
Skelett, Muskel, Sehnen,
Bänder, Bindegewebe
FE-Ansatz
Kontakt zwischen den
Weichteilen
Bewegungssimulation



Aktuelle Forschung in der B

154