

Aktuelle Forschung in der Biomechanik



Martin Mössner

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



Muskelgetriebene Simulationen

Muskelgetriebene Simulationen

... in der modernen Biomechanik werden menschliche Bewegungen aller Art durch muskelgetriebene Simulationen studiert.

Vorgangsweise:

Bewegungsgleichungen, dazu notwendig:

Segmentmodell des Menschen

wirkende Kräfte

Validierung der Lösung

Variation der Lösung

3D-Bewegungsgleichungen

$$M \cdot v' = \sum F_i$$

Newton Gleichungen

$$I \cdot \omega' + \omega \times (I \cdot \omega) = \sum T_i$$

Euler Gleichungen

M Masse

F_i Kräfte

I Trägheitsmoment

T_i Drehmomente

s Position

$v = s'$ Geschwindigkeit

$a = v'$ Beschleunigung

φ Drehwinkel

ω Winkelgeschwindigkeit

α Winkelbeschleunigung

+ Gleichungen, welche Gelenke beschreiben

Für jedes Gelenk

Beschreibung der
Gelenkseigenschaften

Hüfte: Kugelgelenk
Knie: spezielles
Scharniergelenk
Sprunggelenk: normales
Scharniergelenk

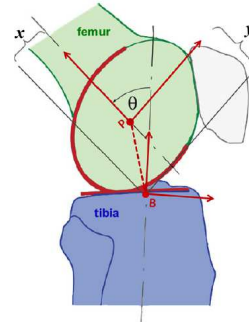


Fig. 6 Schematic of the human knee joint (adapted from Delp et al. [35]). Due to the rolling and sliding of the non-circular femoral condyles (oval fixed in the femur, parent P) on the tibia plateau (body, B), the joint does not operate as a simple pin. In this model, the tibia has one rotational degree-of-freedom, θ , but translates in the plane of rotation (x, y) with respect to the femur

Bewegungsgleichungen

Inverse Dynamik:

Die Bewegung wird gemessen. Daraus werden Geschwindigkeiten und Beschleunigungen bestimmt. Die Bewegungsgleichungen liefern dann die Kräfte und Momente in den Gelenken. Aus den Gelenkmomenten werden die Muskelkräfte bestimmt.

Vorwärtsdynamik:

Äußere Kräfte (Boden, Luftwiderstand) werden modelliert oder durch Messwerte vorgegeben. Die Position und Geschwindigkeit zur Startzeit wird vorgegeben. Lösen der Bewegungsgleichungen liefert Kinematik sowie Momente und Kontaktkräfte in den Gelenken und die Muskelkräfte.

Segmentmodell von de Leva (1996)

Körper wird in Segmente zerlegt:

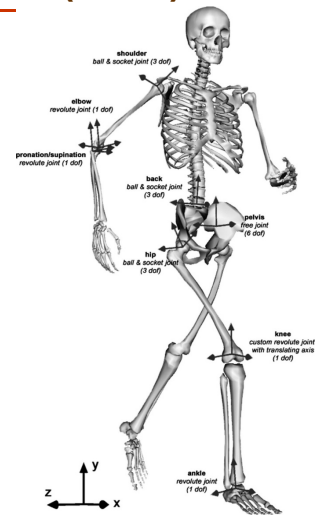
Fuß, Unterschenkel, Oberschenkel,
Hüfte, oberer Rumpf mit Kopf,
Oberarm, Unterarm

Gelenke:

1 – 6 Freiheitsgrade

Segmente:

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



Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

62

Segmentmodell: Anpassung an Probanden

Segmentdaten werden durch Körpergröße (L), und Masse (M) des Probanden skaliert (de Leva 1996).

Beispiel: Unterschenkel (Frau/Mann)

$$\lambda = 0.249 / 0.249, \quad \mu = 0.048 / 0.043, \quad \eta = 0.558 / 0.554, \quad \rho = 0.267 / 0.249$$

$$L_{US} = \lambda L, \quad M_{US} = \mu M, \quad zSP_{US} = \eta L_{US}, \quad I_{US} = (\mu M) \cdot (\rho L_{US})^2 \quad (I_{US} \text{ bzgl. SP!})$$

Frau: $L = 1.60 \text{ m}$, $M = 52 \text{ kg}$

$$L_{US} = 0.398 \text{ m}, \quad M_{US} = 2.50 \text{ kg}, \quad zSP_{US} = 0.222 \text{ m}, \quad I_{US} = 0.028 \text{ kg m}^2$$

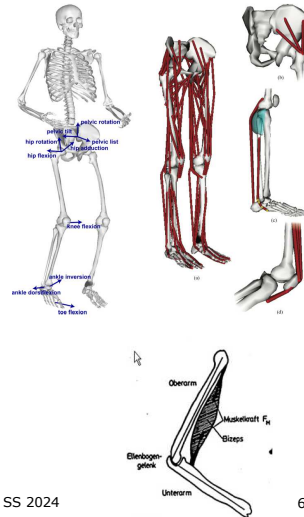
Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

63

Kräfte / Drehmomente

Gewichtskraft
Luftwiderstand
Bodenreaktionskraft
Reibung
Muskel/Sehnenkraft
Gelenkskräfte

Drehmomente ergeben sich aus Kräften,
die durch Hebelarm angreifen $T = r \times F$



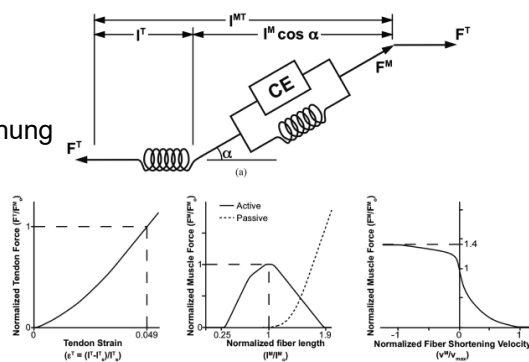
Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

64

Muskelgetriebene Simulationen: Muskelmodell

Verformungswiderstand
Sehne, Bindegewebe

Isometrische Maximalkraft
Kraft-Längenbeziehung
Kraft-Geschwindigkeitsbeziehung
Aktivierung



Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

65

Muskelgetriebene Simulationen: Formeln

Muskellänge:

$$L_M = l_0 + r_1 \phi, \quad V_M = r_1 \dot{\phi}$$

Muskelfaser (Länge, Dehngeschwindigkeit): $L_K = (L_M - L_S) / \cos \phi, \quad V_K = V_M / \cos \phi$

Kraft-Längen Beziehung:

$$F_{ISO}(L_K) = F_{MAX} \cdot \exp\left(-\left(\frac{L_K - L_{Kopt}}{W \cdot L_{Kopt}}\right)^2\right)$$

Kraft-Geschwindigkeit Beziehung:

$$G(V_K) = \frac{V_{MAX} + V_K}{V_{MAX} - V_K / A} \quad G(V_K) = \frac{G_{MAX} \cdot V_K + V_{MAX} \cdot B}{V_K + V_{MAX} \cdot B}$$

Kraft Sehne, Muskelbauch:

$$F_S(L_S) = \begin{cases} 0 & L_S < L_{S0} \\ k_S \cdot (L_S - L_{S0})^2 & L_S > L_{S0} \end{cases} \quad F_B(L_B) = \begin{cases} 0 & L_B < L_{B0} \\ k_B \cdot (L_B - L_{B0})^2 & L_B > L_{B0} \end{cases}$$

Muskelfaserkraft:

$$F_M = F_S = (F_K + F_B) \cos \phi, \quad F_K = F_{ISO}(L_K) G(V_K) a$$

Aktivierung:

$$\frac{da}{dt} = (u - a)(u / T_{rise} + (1 - u) / T_{fall})$$

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

66

Muskelgetriebene Simulationen: Daten

Muskel-Parameter

Rajagopal et al. (2016)

Konsistente Muskeldaten
für eine Person, d.h.

keine Zusammenstellung
aus Daten verschiedener
Personen

Muscle	Abbreviation	Optimal force (N)	Optimal fiber length (cm)	Tendon slack length (cm) ^a	Pennation angle (°)
Adductor brevis	addbrv	626	10.3	3.5 ^b	6.6
Adductor longus	addlng	917	10.8	13.2	7.9
Adductor magnus ^c					
Adductor magnus (distal)	addmagDist	597	17.7	8.7 ^b	11.2
Adductor magnus (medial)	addmagMed	597	15.6	21.6	9.6
Adductor magnus (middle)	addmagMid	597	13.8	4.7 ^b	11.9
Adductor magnus (proximal)	addmagProx	597	10.6	4.0 ^b	17.8
Biceps femoris long head	bfb	1313	9.8	32.5	10.1
Biceps femoris short head	bfsa	557	11.0	10.6 ^b	15.1
Extensor digitorum longus ^c	edl	603	6.9	36.9	12.5
Extensor hallucis longus ^c	ehl	286	7.5	32.7	11.3
Flexor digitorum longus	fdl	423	4.5	37.9	12.9
Flexor hallucis longus	flh	908	5.3	35.4	14.8
Gastrocnemius lateral head	gaslat	1575	5.9	37.6	12.0
Gastrocnemius medial head	gasmed	3116	5.1	39.9	9.5
Gluteus maximus ^d					
Gluteus maximus (superior)	glmax1	984	14.7	4.9 ^b	20.3
Gluteus maximus (middle)	glmax2	1406	15.7	6.8 ^b	21.0
Gluteus maximus (inferior)	glmax3	948	16.7	7.0 ^b	21.9
Gluteus medius ^d					
Gluteus medius (anterior)	glmed1	1093	7.3	5.6 ^b	18.1
Gluteus medius (middle)	glmed2	765	7.3	6.5 ^b	18.1
Gluteus medius (posterior)	glmed3	871	7.3	6.5 ^b	18.1
Gluteus minimus ^d					
Gluteus minimus (anterior)	glmin1	374	6.8	1.6 ^b	10.0
Gluteus minimus (middle)	glmin2	395	5.6	2.6 ^b	0.0
Gluteus minimus (posterior)	glmin3	447	3.8	5.1	1.0
Gauche	gac	281	22.8	17.2 ^b	9.9
Iliacus	ilacus	1021	10.7	9.6 ^b	16.0
Peroneus brevis ^d	perbrv	521	4.5	14.8	11.8
Peroneus longus ^d	perlong	1115	5.1	33.2	14.2
Piriformis	piri	1030	2.6	11.5	10.0
Psoas	psoas	1427	11.7	10.0 ^b	12.3
Rectus femoris	refem	2192	7.6	44.9	12.4
Sartorius	sart	289	40.3	12.4 ^b	1.5
Semimembranosus	semimem	2201	6.9	34.8	14.6
Semitendinosus	semiten	591	19.3	24.7	13.8
Soleus	soleus	6195	4.4	27.7	21.9
Tensor fasciae latae	tfalae	411	8.5	45.0	3.0
Tibialis anterior	tiban	1227	6.8	24.1	11.2
Tibialis posterior	tibpost	1730	5.8	28.1	13.0
Vastus intermedius	vastint	1697	9.9	20.2	3.6
Vastus lateralis	vastlat	5149	9.9	22.1	14.5
Vastus medialis	vastmed	2748	8.7	20.0	24.2

Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

67

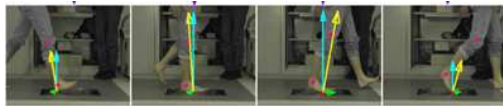
Muskelgetriebene Simulationen: Messdaten

Messdaten:

- Kinematik mittels optischem System (z.B. Vicon)
- Bodenreaktionskräfte (z.B. Kistler Platten, Druckmesssohlen)
- Muskelaktivität (z.B. EMG)

Verwendung:

- inverse Dynamik, Validierung



Muskelgetriebene Simulationen: Ergebnisse

Kinematik (Position, Geschwindigkeit, Winkel, ...)

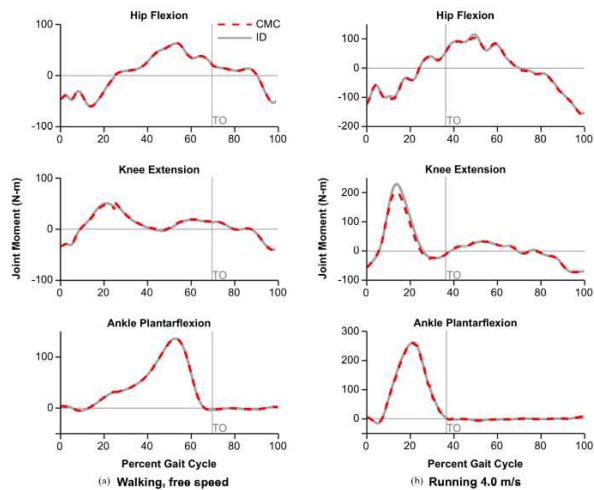
Bewegungsanimation

externe Kräfte (Bodenreaktionskraft)

interne Kräfte (Muskelkräfte, Sehnenkräfte, Gelenksbelastung)

Muskelgetriebene Simulationen: Ergebnisse

Gelenkmomente

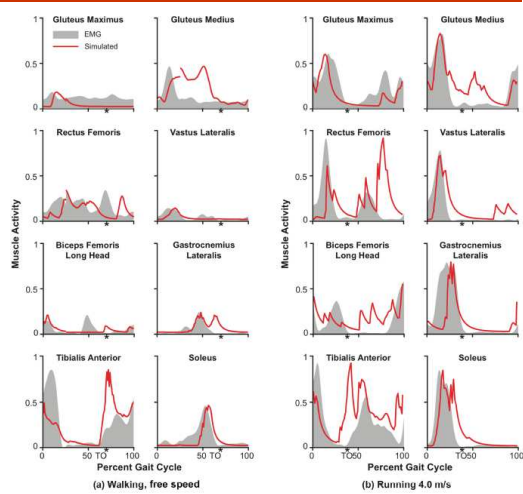


Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

70

Muskelgetriebene Simulationen: Ergebnisse

Muskelaktivität



Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

71

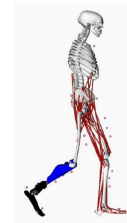
Muskelgetriebene Simulationen: Vorteile

Information welche Muskel wie zu einer Bewegung beitragen
(z.B.: Beitrag des Gastrocnemius beim Laufen).

Vergleich von gesunder mit pathologischer Bewegung
(z.B.: Landung nach Niedersprung mit und ohne Kreuzband).

Parametervariation
(z.B.: Variation der isometrischen Muskelkraft,
Verschiedene Dämpfung von Schuhen).

Studium des Einflusses von Hilfsmitteln
(z.B.: Unterstützung des Gehens mittels Stock/Krücke,
Bewegung mit Prothesen)



Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

72

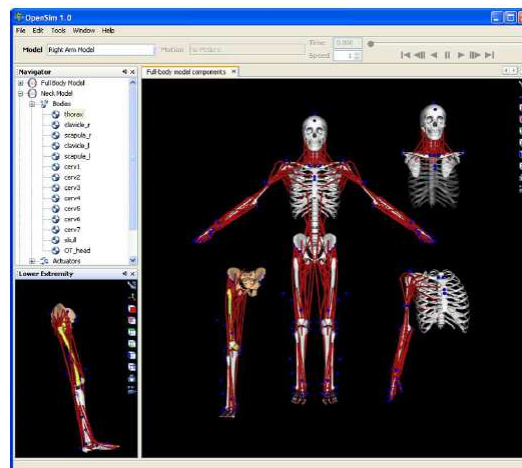
Muskelgetriebene Simulationen: Software: OpenSim, SimTk

OpenSim

<http://opensim.stanford.edu/>

SimTk

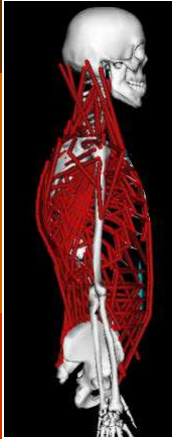
<https://simtk.org>



Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024

73

OpenSim: Musculoskeletal Simulation



Beispiele:

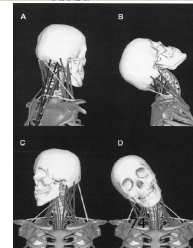
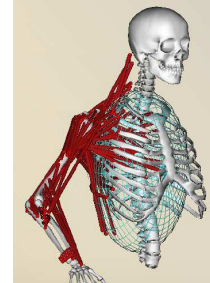
Laufen: Hamner et al. (2010,2013)

Schulter: Chadwick et al. (2013)

Nacken: Vasavada et al. (1998)

Rumpf: Bruno et al. (2017a,b)

...



Aktuelle Forschung in der Biomechanik, SS 2024