

Literatuurverslag over spier-skelet-modellen

Citation for published version (APA):

Sol, E. J. (1980). *Literatuurverslag over spier-skelet-modellen*. (DCT rapporten; Vol. 1980.010). Technische Hogeschool Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1980

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

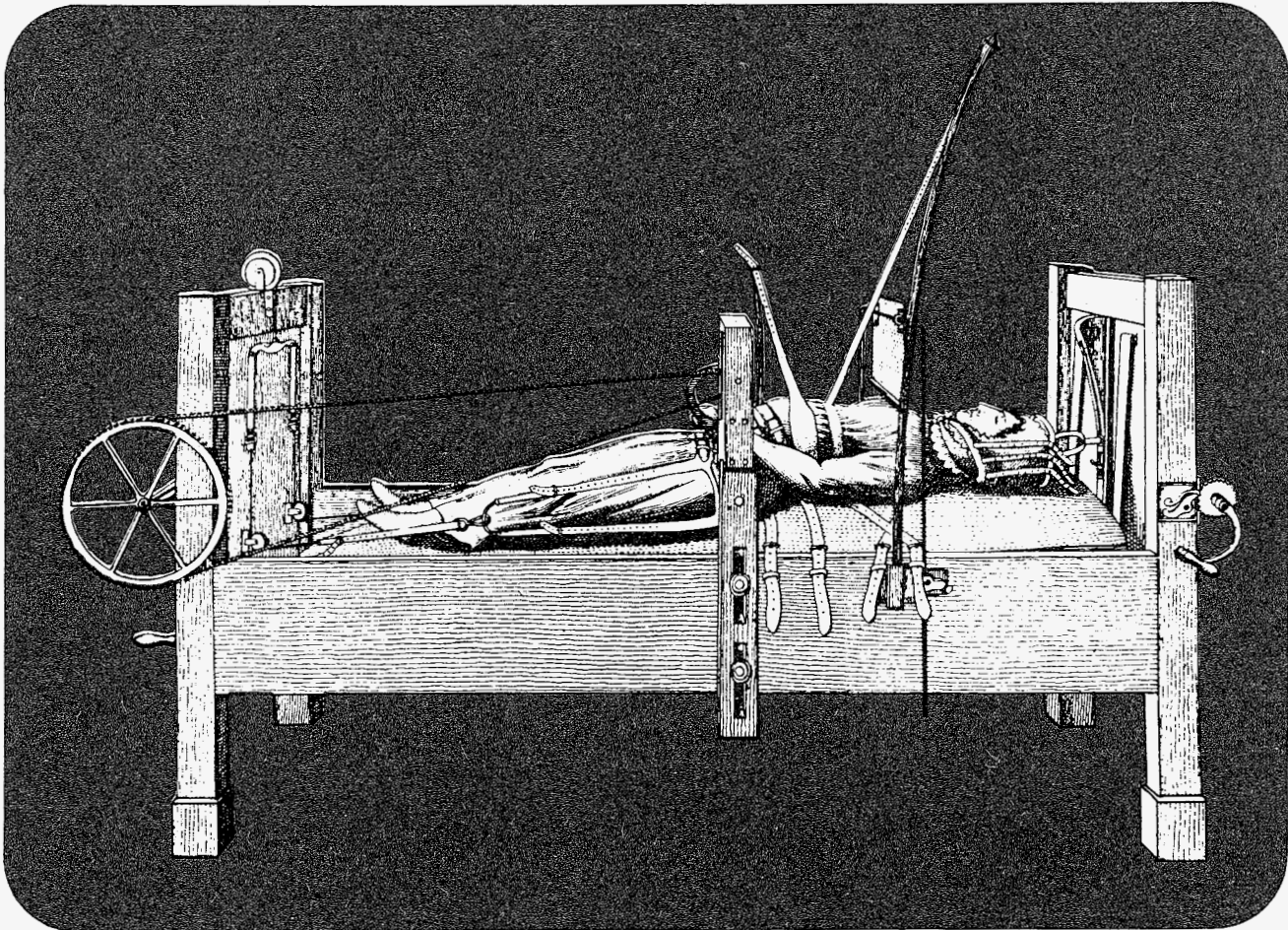
Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Biomedische Techniek



SAMENVATTING

Dit rapport is het resultaat van een literatuurstudie naar modellen van het spier-skelet-stelsel. Spier-skelet-modellen zijn mechanica modellen waarmee krachten en bewegingen in het spier-skelet-stelsel of bewegingsapparaat van de mens en/of dier bestudeerd worden.

In dit rapport ligt de nadruk op zogenaamde dynamika modellen waar bewegingen als functie van de tijd en de gevolgen hiervan (krachten e.d.) een essentieel rol spelen. Met behulp van de theorie over stelsels van starre lichamen worden dergelijke modellen opgezet en doorgerekend. Een interessante methode om hiervoor toegepast te worden is gebaseerd op het werk van Wittenburg.

In chronologische volgorde worden een aantal belangrijke publicaties in het kort besproken. Daaruit blijkt dat er een grote variatie omtrent opbouw, hypothesen, werkwijze en doel van onderzoeken bestaat.

Tot slot wordt aandacht besteed aan de problemen bij het onderzoek met bovengenoemde modellen. Deze worden in twee groepen verdeeld. Ten eerste zijn er de problemen met het verkrijgen van de invoergegevens voor de modellen, ten tweede de problemen m.b.t. de verificatie van de modellen.

Indeling

1 Inleiding	1
2 Dynamica methoden	3
2.1 inleiding	3
2.2 algemeen	5
2.3 Lagrange methoden	6
2.4 Newton-Euler methoden	8
2.5 Enkele op zich zelf staande artikelen	10
3 Spier-skelet-modellen	13
4 Problemen m.b.t. spier-skelet-modellen	22
4.1 problemen met "invoer" gegevens	22
4.2 problemen m.b.t. verificatie experimenten	27
5 Slot	30
Literatuurlijst	31

Dankwoord

Els van Bommel wil ik bedanken voor het typewerk,
Thijs Seroo voor zijn korrekties en
Rik Huiskes voor de stage die ik enige tijd geleden onder
zijn leiding uitgevoerd heb en waarvan de resultaten in
hoofdstuk 3 verwerkt zijn.

1. Inleiding

Zowel op medisch terrein (orthopaedie, anatomie, revalidatie) als op de gebieden van diergeneeskunde en sportbeoefening bestaat belangstelling voor het spier-skelet-stelsel. Dit geldt ook voor de biomechanica. Doordat de biomechanica methoden uit de mechanica toepast op biologische systemen wordt het spier-skelet-stelsel van uit een ander gezichtspunt bekeken dan bij bovengenoemde terreinen gebruikelijk is.

Dit verslag is van uit een biomechanica gezichtspunt geschreven en tracht een overzicht te geven van de literatuur over modellen van het spier-skelet-stelsel. Gezien het dynamisch karakter hiervan zal veel aandacht aan dynamica modellen geschonken worden.

Konden aanvankelijk in de biomechanica eenvoudige methoden toegepast worden, voor wetenschappelijk onderzoek gebruikt men tegenwoordig geavanceerde methoden. Een voorbeeld is de berekening van de sterkte en stijfheid van botten en bot/kunstgewrichten met behulp van de eindige elementen methode. Dit geldt ook voor modellen voor het spier-skelet-stelsel. Bij de bestudering van dit stelsel, ook wel bewegingsapparaat genoemd, gaat men er ook toe over gebruik te maken van ingewikkelde modellen voor de analyse van bewegingen en krachten.

Men past dynamica theorieën toe over stelsels van starre, gekoppelde lichamen. In het begin waren het modellen welke eenvoudige, met de hand opgestelde bewegingsvergelijkingen (vgl'n) bevatten. Deze vgl'n zijn 2^e orde differentiaalvgl'n die m.b.v. een rekenmachine opgelost kunnen worden. Werd eertijds het rekenwerk te moeilijk dan verwaarloosde men de massatraagheidskrachten waardoor eenvoudig op te lossen algebraïsche i.p.v. differentiaal vgl'n ontstonden. Vooral voor modellen waar meerdere onderdelen geschematiseerd waren, was deze zogenoemde quasi-statika methode de enige oplossing.

In situaties waarin bewegingen voorkomen, kan men de massatraagheidskrachten niet zonder meer verwaarlozen. Bij snelle bewegingen worden deze zelfs relatief groot. In hoofdstuk 2 worden een aantal dynamika theorieën beproven die voor ingewikkelde modellen (meer dan 1 onderdeel) de bewegingsvgl'n m.b.v. een computer opstellen en uitrekenen.

In hoofdstuk 3 worden de belangrijkste publicaties over de biomechanica van het spier-skelet-stelsel beschreven. In de meeste publicaties worden modellen beschreven waarvoor de bewegingsvlg'n nog met de hand opgesteld zijn. Het zwaartepunt van de onderzoeken ligt veelal meer op het experimentele vlak dan op het theoretisch, modelmatige vlak. Door de werkgroep "Biomechanica en medische instrumentatie" van de afdeling Werktuigbouwkunde TH Eindhoven wordt in het project spier-skelet-stelsel aandacht aan modelvorming besteed.

Om enig inzicht te krijgen op de problematiek van dit soort modellen wordt in hoofdstuk 4 dieper op deze materie ingegaan. Daaruit blijkt dat er nog veel gegevens onbekend zijn, terwijl bij de verificatie van een model moeilijk oplosbare problemen naar voren komen.

Na hoofdstuk 5 (Slot) volgt een literatuurlijst.

2. Dynamica methoden

2.1. Inleiding

Wanneer men heden ten dage zinvol onderzoek wil verrichten op het terrein van de biomechanica kan men zich niet meer beperken tot eenvoudige analyses. Veelal blijken biologische systemen dermate ingewikkeld te zijn dat men besluit om met modellen te gaan werken.

Dit gebeurt ook voor het spier-skelet-stelsel. In deze tak bestudeert men bewegingen en krachten in het bewegingsapparaat van mens en dier. De wiskundige modellen die hiervoor ontwikkeld zijn (en worden), baseert men op de dynamica theorieën van Newton-Euler ($F = ma$ en $M = \dot{D}$) of Lagrange. In de werkgroep spier-skelet-stelsel is gekozen voor het ontwikkelen en toepasbaar maken van zo'n dynamica theorieën voor stelsels van starre, gekoppelde lichamen. Op basis van deze theorie is het mogelijk een model van een mens, dier of onderdeel hiervan op te stellen waarbij bewegingen of krachten bepaald kunnen worden. In dit hoofdstuk zal ik de belangrijkste publicaties en ontwikkelingen over dit soort theorieën op een rij zetten. Ter verduidelijking geef ik eerst een voorbeeld van een systeem dat volgens de verschillende methoden uitgewerkt is. Beschouw een enkelvoudige slinger (zie fig. 1).

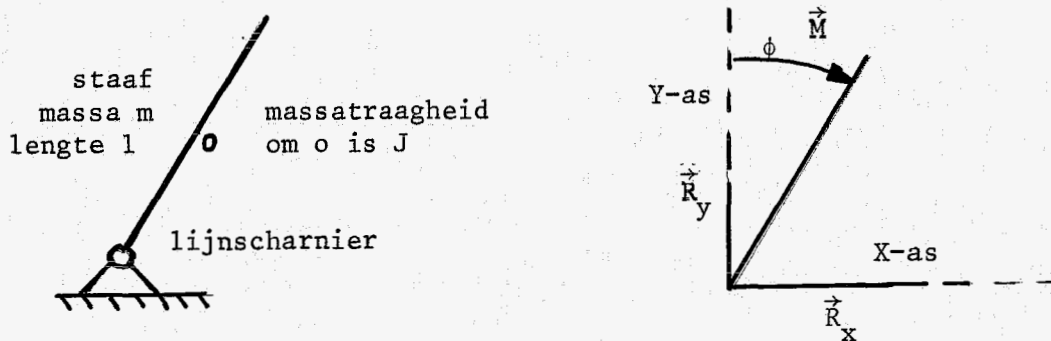


Fig. nr. 1. Enkelvoudige slinger + afspraken.

Newton-Euler methode

2-DIM model \rightarrow 3 vgl'n

$$2 \text{ Newton vgl'n} \quad \Sigma F_x = m\ddot{x}, \quad \Sigma F_y = m\ddot{y}$$

$$1 \text{ Euler vgl.} \quad \Sigma M_0 = \dot{D}_0$$

3 onbekenden R_x, R_y, ϕ

beginvoorwaarden $\phi = \phi_0, \dot{\phi} = \dot{\phi}_0$

1. $R_x = m\ddot{x}$

2. $R_y - g \cdot m = m\ddot{y}$

3. $(R_y \sin \phi - R_x \cos \phi) \ell/2 = J \ddot{\phi}$

extra $\phi = \phi_0, \dot{\phi} = \dot{\phi}_0$ op $t = t_0$

$$x^2 + y^2 = (\ell/2)^2$$

$$x = \frac{\ell}{2} \sin \phi, y = \ell/2 \cos \phi$$

Lagrange methode

2-DIM model, één graad van vrijheid

kies gegeneraliseerde coördinaten: ϕ

1 vgl. $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \phi} = U$

$$T = \frac{1}{2} m \left(\frac{\ell}{2} \cos \phi \dot{\phi} \right)^2 + \frac{1}{2} m \left(\frac{\ell}{2} \sin \phi \dot{\phi} \right)^2 + \frac{1}{2} J \dot{\phi}^2$$

$$U = m g \frac{\ell}{2} \cos \phi$$

vgl.: $(\frac{1}{4} m \ell^2 + J) \ddot{\phi} = m g \frac{\ell}{2} \cos \phi$

$$\begin{aligned} \phi &= \phi_0 \\ \dot{\phi} &= \dot{\phi}_0 \end{aligned} \quad \text{op } t = t_0$$

Hieruit blijkt dat de Lagrange methode direct één bewegingsvgl. geeft (bij x graden van vrijheid worden dat x vgl'n), terwijl met de Newton-Euler 3 vgl'n gevonden worden. Bij n lichamen, 2-dimensionaal worden dat $3n$ vgl'n, een aantal dat veelal groter is dan het aantal graden van vrijheid. Dit is het grote voordeel van de Lagrange methode. Het nadeel is echter dat de termen minder doorzichtig zijn dan bij de Newton-Euler methode. Er bestaat een derde methode welke beide voordelen combineert. Die methode maakt gebruik van virtuele gegeneraliseerde coördinaten (en het principe van d'Alembert). De verderop genoemde Wittenburg methode is hierop gebaseerd.

2.2. Algemeen

De dynamica literatuur kunnen wij verdelen in twee stromen: de Newton-Euler stroom en de Lagrange stroom. Het betreft hier stromingen die nog geen 15 jaar geleden gestart zijn. Voor die tijd waren theorie^{ën} over de dynamica van starre, gekoppelde lichamen tamelijk zinloos daar men nimmer de theorie kon gebruiken of toepassen. Door de opkomst van de computer is hier verandering in gekomen. Het oplossen van grotere stelsels ($n > 2$) 2e orde differentiaal vgl'n is tegenwoordig geen al te groot probleem meer. Het probleem zit nu alleen nog maar in de theorie en methode voor het opstellen van de dynamica vgl'n zelf. Onderstaande publicaties handelen over dit aspect.

Een goed overzichtsartikel is afkomstig van Paul (1975). De Newton-Euler methode staat hier eenvoudig en duidelijk beschreven, de Lagrange methode, waar meer aandacht aan geschonken wordt, is minder duidelijk. Paul besteedt tevens aandacht aan het numeriek oplossen van het stelsel bewegingsvergelijkingen en het berekenen van de reactiekrachten in de koppelingen (los snijden, virtuele arbeid en Lagrange multiplikatoren). Ook Renaud (1975) geeft een overzicht van de verschillende methoden. Hij doet dit aan de hand van gepubliceerde artikelen van de verschillende onderzoekers. Dit is een van de beste overzichten, het is nagenoeg compleet, maar als gevolg van de notatie nogal lastig te lezen. Magnus (1977) geeft een overzicht van de twee principes, maar hij blijft uiterst oppervlakkig.

2.3. Lagrange methoden

Handelden de eerste publicaties over de Newton-Euler methode, in het begin van de jaren 70 was men hoofdzakelijk met Lagrange methoden bezig. Omdat de Wittenburg methode van oorsprong een Newton-Euler methode is en ik meer aandacht aan deze methode wil schenken besteed ik eerst enige aandacht aan methoden gebaseerd op de Lagrange-vergelijkingen, de zogenaamde Lagrange methoden.

De bekendste naam op dit gebied is Uicker (1967). Samen met Sheth ontwikkelde hij het IMP programmapakket (Sheth en Uicker, 1972). Dit programma is geschikt als "computer-aided-design" programma, het kan allerlei statische, kinematische en dynamische analyses van mechanismen uitvoeren, maar had een gebrekkige uitvoer. Soortgelijke programma's zijn afkomstig van Chace en Smith (Zie Paul, 1975 (lit. 2.2)). Ook Wittenburg heeft dergelijke programmatuur ontwikkeld (Wittenburg, 1968), waarvan alleen beschrijvingen in het Duits zijn. Paul en Renaud, vorige paragraaf, hebben ook zelf Lagrange programma's gemaakt. Madymo, het letselpreventieprogramma van TNO Delft, is ook op de Lagrange methode gebaseerd (Maltha en Dacchetti, 1978 en Mengelers, 1979). (zie ook fig. 2).

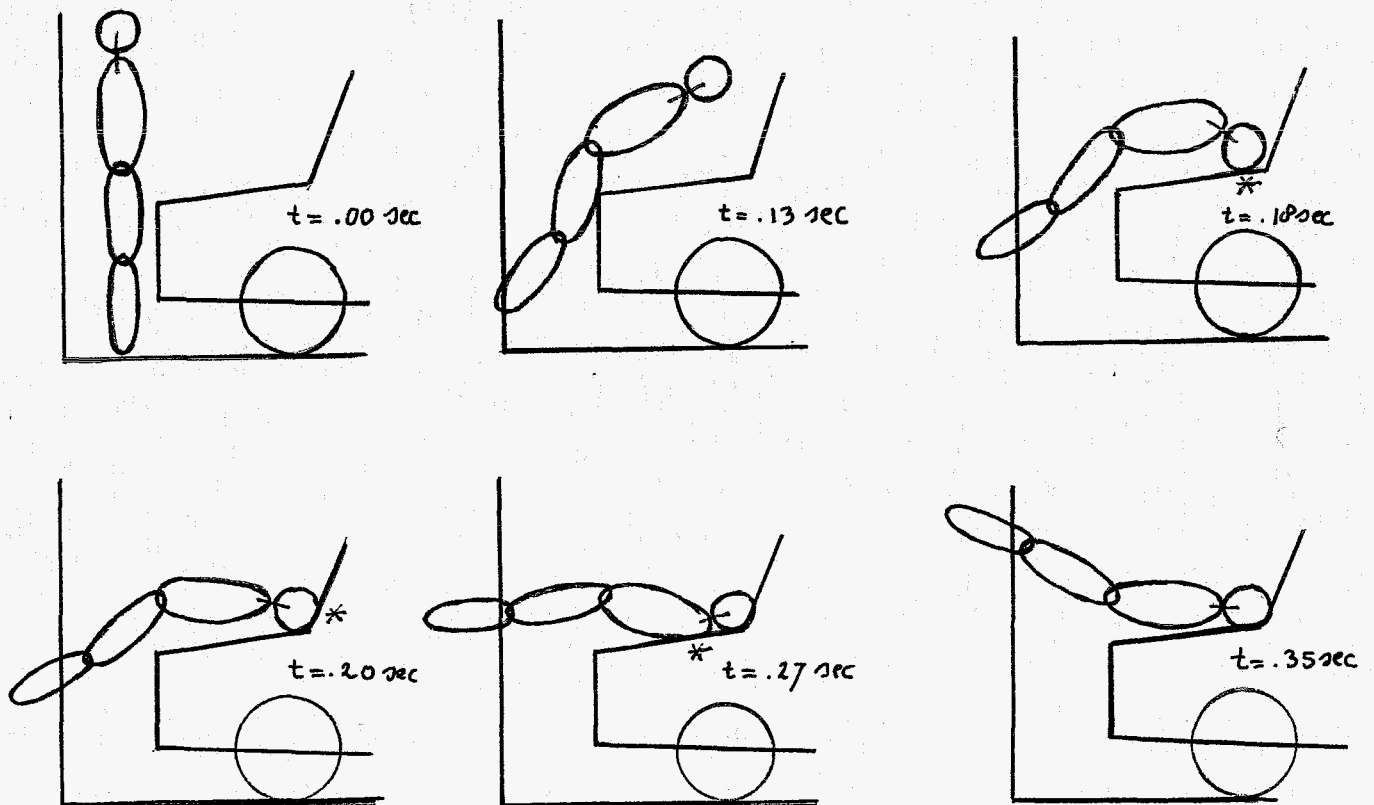


Fig. 2. Voorbeeld van resultaten van MADYMO (uit Maltha, 1978).

Programma's uit deze hoek zijn nagenoeg allemaal op Lagrange gebaseerd. (King en Chou, 1976).

In 1973 promoveerde Orlandeo op een werk wat als basis diende voor het programma ADAMS (Orleando et al., 1977). Dit programma is gebaseerd op de Lagrange vergelijkingen en maakt intensief gebruik van Lagrange multiplikatoren, teneinde de rekentijd voor het integratieproces zoveel mogelijk te verminderen. M.b.v. deze Lagrange multiplikatoren construeert dit programma ijle matrices welke gecombineerd met methoden voor het integreren van stijve differentiaalvgl'n in vergelijking met volle matrices en Runge Kutta methoden een forse reductie van de rekentijd zou geven.

Voordeel van Lagrange is het geringe aantal op te lossen bewegingsvgl'n (aantal gelijk aan aantal vrijheidsgraden). Bij de Newton-Euler methode is dit aantal veelal een stuk groter (aantal gelijk aan $6 * n$, met n aantal lichamen waaruit het systeem is opgebouwd).

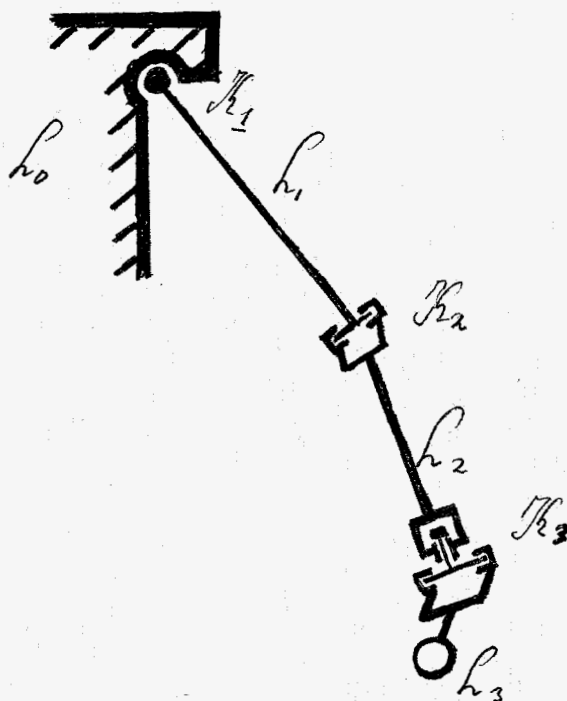
Nadeel van de Lagrange methode is het opstellen van de Lagrangiaan, een term waarin de kinetische energie in zit. Het opstellen van deze term is in vergelijking met de Newton-Euler methode een lastig en bovenal ondoorzichtig proces. Bij het veranderen van het door te rekenen systeem verandert er zoveel dat men opnieuw de Lagrangiaan moet opstellen. De Newton-Euler methode heeft dit bezwaar niet.

2.4. Newton-Euler methoden

Een van de eerste publicaties over de dynamica van n starre lichamen is afkomstig van Hooker and Margulies (1965, 1970). In de eerste publicatie worden $6n$ 2e orde differentiaalvgl'n, de bewegingsvgl'n, opgesteld. Omdat zij enkel met rotaties werken, worden dit $3n$ scalaire vgl'n of n vectorvgl'n. In al dit soort gevallen verstaan wij onder n het aantal lichamen. In de tweede publicatie reduceert Hooker het aantal vgl'n van $6n$ tot een aantal vgl'n gelijk aan het aantal vrijheidsgraden.

Roberson en Wittenburg hadden in (1966) hiervoor een soortgelijk verhaal geschreven. Op basis van de daar geformuleerde vgl'n wordt in 1970 in een publicatie de resultaten van een rekenprogramma gepresenteerd. In die tijd werd bijzonder aardig werk verricht door Andrews en Kesavan (1975). Zij gebruiken een benadering zoals die in de systeem theorie ontwikkeld is, waarbij zij deze theorie voor 3-dimensionale (3-D) structuur uitgebreid hebben. In 1974 verscheen er een werk van Gupta die specifiek een programma schreef om de dynamische reactiekrachten in een mechanisme te bepalen.

Pas in 1977 kwam Wittenburg met een uitwerking van een methode gebaseerd op de virtuele arbeid. Hierbij zijn de $6n$ vergelijkingen van Newton-Euler en de variatie van de gegeneraliseerde coördinaten van belang. In feite wordt hier het principe van d'Alembert toegepast. Na een zeer uitgebreide uitwerking van kinematische grootheden worden deze ingevuld in de virtuele arbeid, waarna een stelsel van f bewegingsvgl'n over blijft, f is het aantal gegeneraliseerde coördinaten = aantal vrijheidsgraden. (zie fig. 3).



3 lichamen $L_1 - L_3$
 3 koppelingen $K_1 - K_3$
 $K_1 =$ bolscharnier
 $K_2 =$ lijnscharnier
 $K_3 =$ kardankoppeling

3-dimensionaal $6n = 18, n = 3$
 $f = 6$

fig. 3. Voorbeeld voor een model van de arm (uit Wittenburg, 1977).

Met behulp van de virtuele arbeid welke in de verbindingen verricht wordt, kunnen m.b.v. deze methode ook veren en dempers e.d. in beschouwing genomen worden. Door middel van Lagrange multiplicatoren kunnen ook voorgeschreven bewegingen, kinematisch gesloten ketens en niet-holonome verbindingen geanalyseerd worden (Wittenburg, 1977 en Wittenburg-werkgroep, 1979). In mijn afstudeerwerk staat een uitwerking van de Wittenburg methode met virtuele arbeid, de Newton-Euler methode en de Lagrange methode waaruit blijkt dat alle drie de methoden op het zelfde principe $A\ddot{q} = B$ stelsel bewegingsvgl'n uitkomen (Sol, 1979).

2.5. Enkele op zich zelf staande artikelen

2.5.1. Historie en ontwikkeling

Zoals reeds verteld is, zat men vroeger met het probleem dat de differentiaalvgl'n nauwelijks op te lossen waren. Soms is het nog analytisch mogelijk, maar voor stelsel met meer dan één lichaam wordt dit zeer snel onmogelijk. Vandaar dat er toendertijd geen behoefte was aan methoden voor stelsel met meer dan 1, 2 starre lichamen. Alleen Fischer (1906) heeft een uitwerking gegeven voor de Lagrange vgl'n van een stelsel met meerdere lichamen (hier $n = 3$). Toen in de 60 jaren de computer zijn intrede deed, kon men wel de vergelijkingen oplossen. Het opstellen van deze vgl'n ging nog met de hand. Dit is een specifieke mechanica klus, maar voor grotere stelsels ($n > 2$) wordt dit zelf voor de vakman een onmogelijke opdracht. De kans dat er fouten gemaakt worden is dan zeer reëel geworden daar de formules bijzonder lang worden. Het is de ruimtevaart-hoek geweest waar men aandacht begon te schenken aan theorieën voor stelsels. Dit resulteerde in de werken van Fletcher, (et. al., 1963), Hooker en Marglies (1965) en Roberson en Wittenburg (1966). (laatste 2 zie § 2.4).

Tegenwoordige publicaties besteden veel aandacht aan computer aspecten. Zo is het boek van Wittenburg (1977) van het begin af aan opgezet om relaties te vinden die goed te programmeren zijn. Orlandea (1977, zie lot. § 2.3) heeft ondermeer veel aandacht geschonken aan het verminderen van rekentijd voor het integratieproces van de bewegingsvgl'n.

Bij al deze methoden wordt m.b.v. de theorie een aantal relaties afgeleid. Deze relaties zijn dan eenvoudig te programmeren in programma's die bij een gegeven invoer de gewenste uitvoer in de vorm van bewegingen van het systeem en reactiekrachten in de koppelingen geven. Vrij recent zijn echter een paar artikelen gepubliceerd die volgens een andere methode te werk gaan. Hierbij worden m.b.v. de computer de bewegingsvgl'n opgesteld. Als resultaat verkrijgt men voor een gewenst stelsel alle relaties in formulevorm uitgevoerd. Dergelijke methodieken noemt men wel "symbolen manipulaties" (rechtstreekse vertaling van "symbolic manipulation"). Levison, 1977, Schiehler en Kreuser, 1977).

De gebruikelijke programma's zullen per integratiestap (Δt) steeds m.b.v. de invoergegevens en de gegevens van de vorige stap de vgl'n moeten opstellen en oplossen. Bij bovengenoemde methode zijn de vgl'n reeds opgesteld en moeten per integratiestap slechts ingevuld en opgelost worden. Voordeel van deze methode is dat het invullen vele malen sneller gaat dan het opstellen van de vgl'n, maar het nadeel is dat het opstellen van de vgl'n m.b.v. zo'n symbolen manipulatieprogramma zeker voor ingewikkelder systemen ($n > 2$) zeer specifieke kennis vereist.

2.5.2. Buitenbeentje

Vanuit de hoek van de kunstmatige ledematen is Vukobratovic erg actief. Hij publiceert erg veel over dynamica theorieën voor programmatuur om bewegende constructies door te rekenen. De methode(n) die hij voorstaat verandert(en) nogal eens, zij doen ad-hoc achtig aan. Uit zijn publicaties blijkt wel duidelijk dat hij reeds resultaten geboekt heeft alsmede precies weet wat de moeilijke gebieden zijn. (Vukobratovic, 1978, zie ook fig. 4).

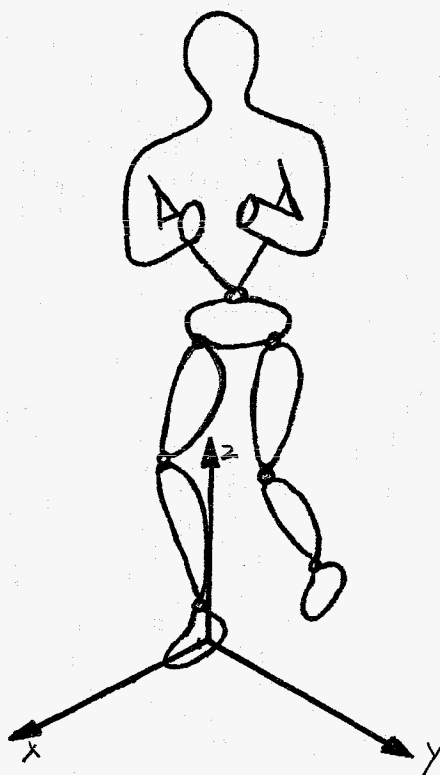


fig. 4. Voorbeeld model voor gangbeeld onderzoek (Vukobratovic, 1978).

2.5.3. Randpublicaties

Enkele vrij recente ontwikkelingen zijn wederom afkomstig uit de ruimtevaart. Het blijkt steeds meer dat de rigid-body benadering voor satellieten niet correct is. Vandaar dat men in deze hoek steeds meer met non-rigid bodies te werk gaat (Denk vooral aan het uitklappen van grote zonnepanelen in de ruimte). (Boland, et. al. 1977). Een andere recente ontwikkeling is het toepassen van "graphics" bij de uitvoer van berekeningen. Zeker voor niet-technische geschoolden is het interpreteren van visuele uitvoer te verkiezen boven getalsmatige uitvoer. Vanuit de biomechanica zijn een aantal publicaties over dit onderwerp geschreven (Boysen et. al., 1977; Riley, 1977). Hierin worden de bewegingen van het menselijk lichaam d.m.v. een computer voor een aantal achtereenvolgende standen getekend.

3. Spier-skelet-modellen

Onderstaand verhaal geeft een chronologisch beeld van de belangrijkste publicaties op het terrein van de spier-skelet-modellen.

Braune en Fischer (Fischer, 1906) waren de eersten die iets aan dynamica modellen gedaan hebben. Zij stelden met de hand Lagrange vergelijkingen op voor 2 of 3 gekoppelde starre lichamen. Deze waren destijds zo ingewikkeld dat ze niet numeriek uitgerekend zijn. In 1935 publiceerde Bernstein een uitgebreid werk over zijn studies van de dynamica van het gangbeeld (literatuur zelf niet gevonden, wel verwijzingen). Wat dynamica modellen betreft, wijden Nubar en Contini 1961 als eersten een artikel aan het bewegingsgedrag onder de voorwaarde dat het energie verbruik in de spieren minimaal is.

Pas in 1968 komen Beckett en Chang met een artikel waarin een eenvoudig 2-D model opgesteld en doorgerekend wordt. Met behulp van de Lagrange vgl'n bepalen zij de bewegingsvergelijkingen (2 stuks). Uit deze vergelijkingen en ingevulde geometrie en massa gegevens berekenen zij hoekverdraaiingen en gewrichtsmomenten. Uiteindelijk bepalen zij het energieverbruik en stellen dat voor ieder individu bij een bepaalde loopsnelheid, opgebouwd uit een ritme en een staplengte, een minimale hoeveelheid energie verbruikt wordt.

In 1969 werd door Chaffin een 2-D model opgesteld waarmee de grote lichaamsbewegingen gesimuleerd worden. (zie fig. 5). Uiteindelijk gaat hij niet dynamisch rekenen, maar verwaarloost hij de massatraagheidseffecten en rekt het probleem quasi-statisch door. Quasi-statisch wil zeggen dat een dynamisch

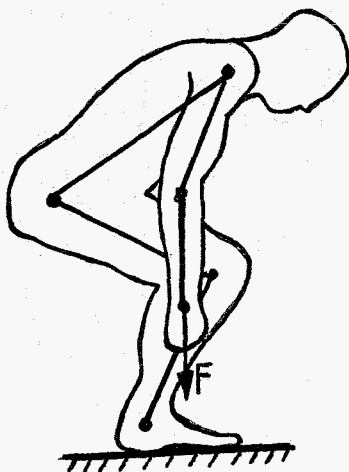


Fig. 5. Gewichtheffen naar (een gedeelte van) het model van Chaffin (1969).

probleem uitgerekend wordt door een reeks van statische berekeningen van opeenvolgende standen.

In 1970 publiceerden Kane en Schen een artikel over de mogelijkheid om in vrije val of in de ruimte de stand van het eigen lichaam te veranderen. Op basis van hun sterk vereenvoudigd model van de mens tonen zij aan dat zoiets inderdaad mogelijk is. Hun analyses zijn in eerste instantie bedoeld voor gewichtsloze astronauten. In 1971 kwamen Huston en Passaerello met een soortgelijk model.

Een van de uitgebreidste, gepubliceerde theoretische onderzoeken is afkomstig van Chow en Jacobson (1971). In hun artikel is zeer uitvoerig uitgelegd hoe zij een stelsel van 5 niet-lineaire, gekoppelde 2e orde differentiaalvergelijkingen met de hand opstellen. Daarna beschrijven zij hoe de meest optimale oplossing door hun bepaald is. Wanneer een been van de ene plaats naar de andere plaats gaat, kan dat op oneindig veel manieren of wegen. Van deze manieren, trajecten genoemd, is er één die de minste inspanning of tijd kost. Deze wordt door hun langs theoretische weg bepaald. Tot slot geven zij nog aan wat de numerieke problemen bij het oplossen van de bewegingsvergelijkingen met gegeven optimaliseringscondities zijn. Daarbij presenteren zij ook de door hun berekende verplaatsings-, snelheids- en versnellingsgrafieken alsmede de berekende grondreacties. Het is geen eenvoudig artikel, maar wel één van de beste tot nu toe gepubliceerde artikelen.

In 1972 publiceerden Townsend en Seireg een artikel over het optimale verloop, traject, van de benen bij het lopen. Er wordt door hun veel aandacht geschonken aan het opbouwen van de trajecten en de bijbehorende controle en sturingskrachten. Dit is één van de eerste artikelen waar men op basis van pure mechanica beschouwingen uitspraken doet over de arbeid en het energieverbruik in de onderste extremiteiten.

In 1973 stelden Chao en Rim voor om bij gegeven dynamica modellen de generaliseerde krachten en momenten via een iteratief proces te bepalen. Het normale procédé gaat als volgt: bewegingen (standen en posities) meten, afgeleiden (versnellingen) bepalen en via model de krachten berekenen. Probleem is dat het bepalen van de afgeleide met grote fouten gepaard gaat. (zie tabel 1).

t(sec)	ϕ	$\dot{\phi}$	$\ddot{\phi}$
0.0	72 \pm 1	-	-
0.1	80 \pm 1	80 \pm 14	-
0.2	86 \pm 1	60 \pm 14	200 \pm 200
0.3	90 \pm 1	40 \pm 14	200 \pm 200

$\phi_i = \bar{\phi}_i + 2 \epsilon_\phi$, $\bar{\phi}_i$ is gemeten hoek (graden).

ϵ_ϕ is fout in meting, (normaal verdeeld)

$\dot{\phi}_i = \frac{\phi_i - \phi_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$ = een formule (veel gebruikt) om de eerste afgeleide te bepalen.

$$(2\epsilon_\phi)^2 = \left(\frac{2\epsilon_\phi}{\Delta t}\right)^2 + \left(\frac{2\epsilon_\phi}{\Delta t}\right)^2 \rightarrow 2\epsilon_\phi = \sqrt{\left(\frac{1}{.1}\right)^2 + \left(\frac{1}{.1}\right)^2} = 14$$

$\ddot{\phi}_i = \frac{\dot{\phi}_i - \dot{\phi}_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$ = een formule om de tweede afgeleide te bepalen.

Tabel 1. Voorbeeld: Bepalen afgeleiden.

Chao en Rim volgden echter een omgekeerde weg: eerst veronderstelden zij een kracht en (of een moment), berekenden de afgeleiden, integreerden deze en vergelijken ze vervolgens met de gemeten waarden. Daarna brachten zij correcties aan, waarna zij een betere benadering trachten te vinden. Nadeel van deze methode is dat ze veel te veel rekentijd kost.

In 1974 geven Roberts en Thompson een model voor de niet-lineaire dynamica responsie van een aap ten gevolge van een stootbelasting. Met dit 2-D, 12 graden van vrijheid model zetten zij een met de hand opgestelde Lagrange analyse op. Hoewel hun methode tamelijk ingewikkeld is, hebben zij op een interessante manier hun model opgebouwd en getest.

Pas in 1975 wordt het eerste quasi-statische model gepresenteerd waarin duidelijk spieren en botten in terug te vinden zijn. (Seireg en Arrikar, 1975). Alle spieren van de onderste extremititeiten worden gemodelleerd als lijnelementen. Aan de hand van EMG signalen wordt het model aan de werkelijkheid getoetst. De analyse is nog quasi-statisch, via "free-body-diagram" (lossnijden van lichamen). (zie fig. 6).

In latere artikelen worden een aantal andere delen van het lichaam met verbeterde hypothese doorgerekend.

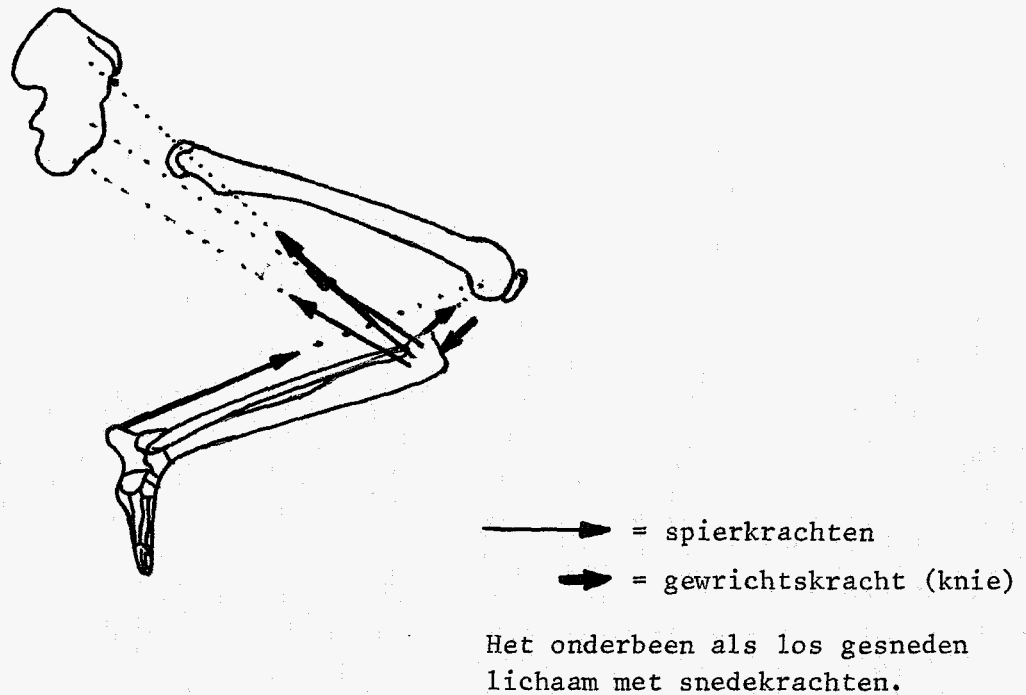
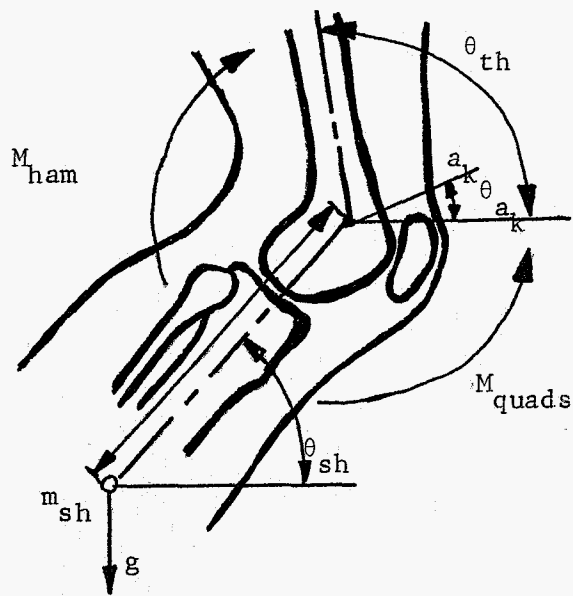


Fig. 6. Voorbeeld: een aantal krachten op het onderbeen tijdens het buigen (flexie).

Rond 1975 verschenen er meer publicaties over de theorie van het loopgedrag. Cappozo (et. al., 1975) publiceerde een interessant stuk waarin vooral de theorie van de statistische verwerking van de meetgegevens beschreven staat. Townsend en Tsai (1976) geven een model voor het trap op en af lopen van een uit staven opgebouwd figuur. In 1977 kwam Maillardet met een artikel waarin een eenvoudig model van het been beschreven staat. In dit model is hij in staat om de belangrijkste spieren aan te brengen en een kniegewricht met een veranderend rotatiepunt (2-D). Op basis van een aantal mechanische criteria stelt hij een optimaliseringsstrategie op om vervolgens een aantal uitspraken over het spiergedrag te maken. Een andere bekende naam uit het looponderzoek is Winter. (Winter en Roberson, 1978). (zie fig. 7). Van zijn groep zijn reeds meerdere belangrijke publicaties bekend, ondermeer de toepassing van digitale filter methoden voor de analyse van de bewegingen (Pezzach et. al., 1977).

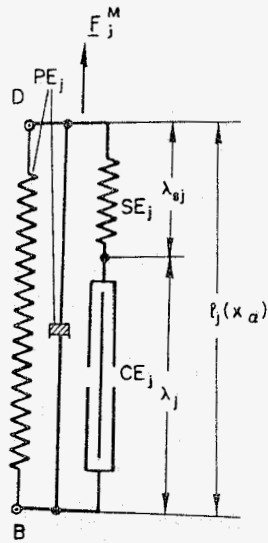


$$I_{sh} \ddot{\theta}_{sh} = M_{quads} - M_{ham} + m_{sh} \cdot r_{sh} \cdot g \cdot \cos \theta_{sh} + m_{sh} \cdot r_{sh} \cdot a_k \cdot \sin(\theta_{a_k} - \theta_{sh})$$

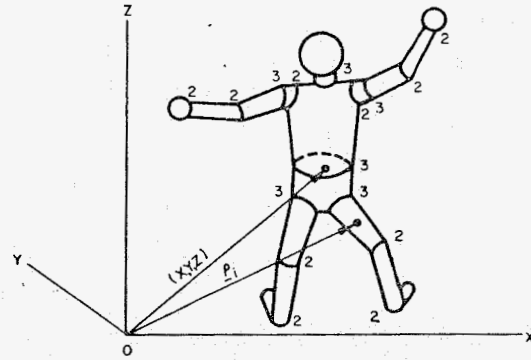
Fig. 7. Knie gedurende zwaai fase.
(Winter en Roberson, 1978).

Op het gebied van letselpreventie onderzoek hebben King en Chou een goed overzicht geschreven (King en Chou, 1976). Hierin worden niet alleen computermodellen beschouwd, maar ook de resultaten van allerlei onderzoeken van hoofd/hals, rug/borst, e.d.. In 1978 wordt door Aleskinsky en Zatsiorsky een artikel gepresenteerd met een 15-lichamen model van de lopende mens. Hierin zitten starre lichamen en wrijvingsloze bolscharnieren. Met gemeten parameters van het gangbeeldonderzoek beschrijven zij dan de berekende krachten en momenten in de gewrichten. Hun methode komt geheel overeen met de dynamica analyses van gekoppelde, starre lichamen. Er worden geen afzonderlijke spieren bestudeerd.

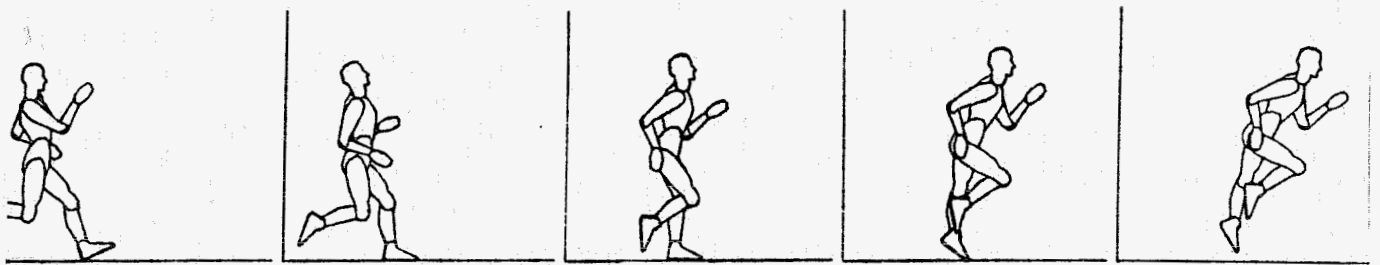
Tot nu toe heb ik nog geen melding gemaakt van het werk van Hatze. (1976, 1977, 1979). (Ook fig. 8). In het eerste werk geeft hij met behulp van een Lagrange beschouwing, met de hand, een analyse van het schopgedrag van een been. Als aandrijfkraft modelleert hij de belangrijkste spieren van het been. Deze spieren worden op hun beurt door middel van controle parameters (zenuwen) gestimuleerd. Met behulp van optimaliseringsprincipe



Spijermodel.



In onderdelen gescheiden menselijke lichaam. Nummers vrijheidsgraden in gewrichten.



Simulatie van een sprong. (tijdsinterval .04 sec)

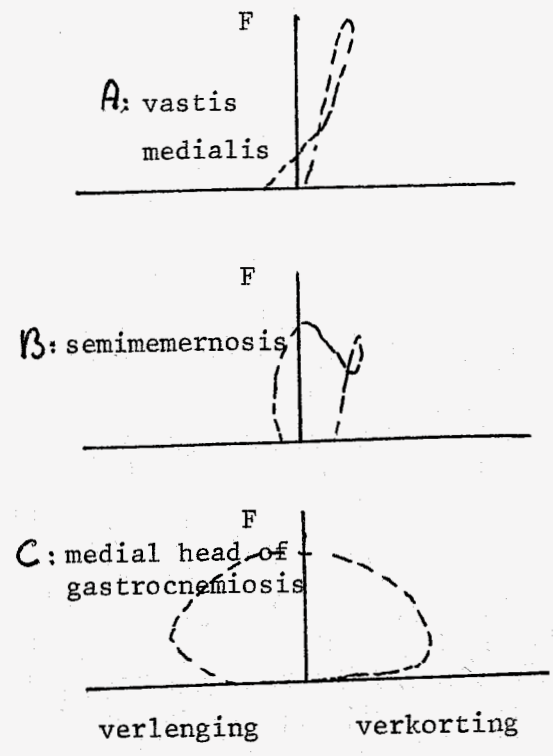
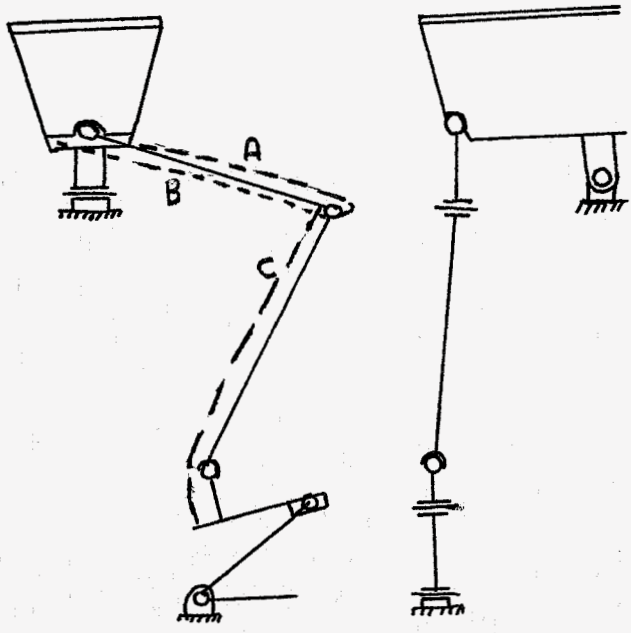
Fig. 8. Werk van Hatze (1978, 1979).

(minimale energie of tijd) berekent hij de meest optimale beweging. Hierbij hanteert hij uiterst geavanceerde wiskundige technieken. Uiteindelijk toetst Hatze deze theorie met experimenten, waaruit hij concludeert dat de gevonden theoretisch berekende trajecten zeer dicht bij de experimenteel gevonden trajecten komen.

Overigens van uit "structural mechanics" oogpunt bezien, is het een interessant artikel.

Tot nu toe heb ik enkel aan de mechanica/dynamica aspecten aandacht geschonken. In het volgende hoofdstuk zal blijken dat er nog een groot aantal problemen in deze onderzoekstak aan te wijzen zijn. Dit zijn meestal problemen die zich specifiek bij biologische systemen voordoen. Aan het opstellen van de bewegingsvgl'n schenkt men dan weinig aandacht en voor zover dit dan gedaan wordt betroffen het meestal recht-toe-recht-aan oplossingen.

Vooraf wanneer men meerdere lichaamsdelen in beschouwing wil nemen, is men genoodzaakt meer aandacht aan het opstellen van de bewegingsvgl'n te moeten besteden. Er wordt in de literatuur reeds verwezen naar programmapakketten om dit met computers te doen (zie eerste hoofdstuk). Hatze (1977) heeft reeds een eigen Lagrange methode. Orin et. al. (1979) verwijst eveneens naar programmapakketten als IMP, VECNET e.d. Bij zijn (hun) publicatie(s) wordt verwezen naar het werk van Vukobratovic daar het werk specifiek gericht is op de ontwikkeling van kunstmatige ledematen. In een nog niet gepubliceerd werk van Hatze (1979) verwijst hij ook naar "symbolic manipulation" en het werk van Wittenburg. Ook Williams en Seireg (1979) verwijzen naar IMP en DRAM, als algemene programmapakketten voor het opstellen van de bewegingsvgl'n. Het artikel handelt over dit soort methoden, het modelleren van inwendig, voorgeschreven krachten en momenten en past dit toe op het spier-skelet-stelsel. Uit het artikel (juli 1979) blijkt dat de schrijver reeds in 1976 (Ph D thesis, Williams) met dit soort werk bezig was. (zie fig. 9).



A: Model voor fietser

B: resultaten voor belangrijkste spieren

Fig. 9. Resultaat van Williams and Seirig (1979).

4. Problemen m.b.t. spier-skelet-modellen

Bij het bestuderen van biologische systemen wordt men geconfronteerd met een aantal problemen. Zo blijkt van het bewegingsapparaat van mens of dier nog niet veel (kwantitatief) bekend te zijn. Daarbij komt ook nog het probleem dat biologische systemen veel meer variatie vertonen en minder duidelijk te schematiseren zijn dan technische systemen. Een derde probleem is de complexiteit van zo'n systeem. Er zijn zoveel parameters die een rol (kunnen) spelen dat het geen eenvoudige zaak is om zo'n systeem te beschrijven of te schematiseren.

Wanneer men dan een onderzoek verricht op dit terrein en daarbij gebruik maakt van mathematische modellen, blijkt het vinden van de (experimenteel te bepalen) invoer gegevens een groot struikelblok te zijn. Bij het verifiëren van het model met de werkelijkheid wordt men wederom met deze problematiek van het vinden van waarden voor allerlei biologische parameters geconfronteerd. In dit hoofdstuk zal ik deze problematiek splitsen in problemen m.b.t. de invoergegevens en problemen m.b.t. de verificatie van modellen.

4.1. Problemen met invoer gegevens

Tot de eerste gegevens die voor dynamica modellen nodig zijn, behoren de massa's, de massatraagheden, de zwaartepunten en de koppelingspunten. Een aantal gegevens zijn reeds 5 à 25 jaar geleden bepaald (Dempster, 1955 en Drillis, Contini, 1965). (zie fig. 10). Het bepalen van deze gegevens komt voort uit de behoefte aan betere en meer kwantitatieve gegevens van het bewegingsapparaat. Daar de meeste modellen voor de mens gemaakt zijn, is hier iets meer over bekend. (Zie bijv. Hatze (1979) die voor ieder individuele mens een werkende methode heeft voor het bepalen van de genoemde grootheden).

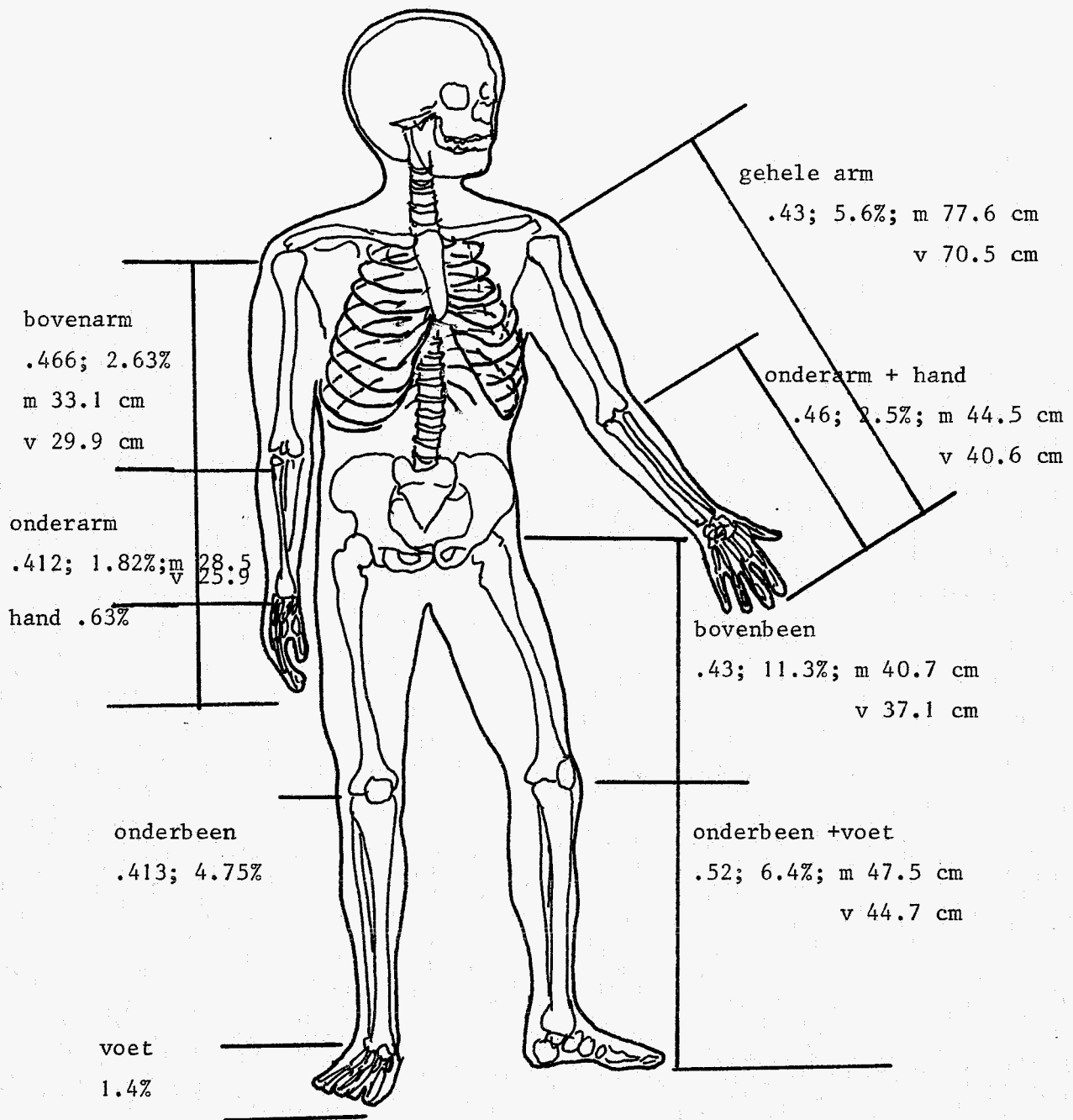


Fig. 10: massaverdeling:

getal (1) lengte massamiddelpunt tot proximale gewricht gedeeld door totale lengte van segment.

(2) procent van totale lichaamsgewicht.

(3,4) gemiddelde lengte van segment. 3 = man, 4 = female.

Overgenomen uit Walker (1977).

Eén van de moeilijker gegevens is de gewrichtskinematica. Zo kunnen koppelingspunten m.b.v. Hatze, 1979 bepaald worden, maar deze punten zullen echter voor verschillende standen variëren. Voordat dit soort invloeden in modellen opgenomen kunnen worden moet eerst meer bekend zijn over de gewrichtskinematica. Hiervoor worden op het ogenblik goede meettechnieken ontwikkeld (Selvik methode). Deze en soortgelijke methoden werken m.b.v. röntgen technieken en men bereikt hiermee grote nauwkeurigheden. Een van de grootste voordelen van deze methode voor dynamicamodellen is de software methoden welke een uitvoer geven die direct in een dynamica programma gebruikt kan worden (positievectoren en rotatiematrices t.o.v. lokale bases of globale basis (Selvik, 1974)).

Naast de röntgentechnieken om de gewrichtskinematica te bepalen, gebruikt men ook wel technieken om het gewrichtsoppervlak te bepalen. (Wismans, 1980; Scherrer, P.K. and Hillberry, B.M. 1979). Met de bekende vorm van de gewrichtsoppervlakken en de veronderstelling dat de indrukking beperkt is, kan men uitspraken doen over de contactpunten c.q. de gewrichtskinematica.

Waar men met beide methoden naar toe wil is onder meer het bepalen van een model voor een bepaald gewricht. Sommigen kunnen als lijn- of bolscharnier geschematiseerd worden, anderen zullen ingewikkelder zijn. Voor het bepalen van de grootheden welke voor spier-skelet-modellen belangrijk zijn, ben ik van mening dat röntgenmethoden (zoals Selvik) de beste resultaten geven.

Bij biomechanica analyses van het bewegingsapparaat gaat men steeds meer toe over om ook de spieren te modelleren. Het modelleren van ligamenten laat men (nog) buiten beschouwing, daar deze slechts in extreme standen actief zouden worden. Voor de spieren (en ligamenten) moet dan het een en ander over de aanhechtingsplaatsen, ligging e.d. bekend zijn. Het blijkt echter dat hier nog een groot gebrek aan kwantitatieve anatomische kennis over is. (Jensen en Davy, 1975; Amis et. al 1979). Mogelijkerwijs kan de computer tomografie scanning hier op korte termijn een uitkomst bieden (Bulche, et. al 1979).

Ook is er weining aandacht geschonken aan de modellering van de geometrisch ingewikkelder spieren en ligamenten. Waar ... aan gedacht zou kunnen worden is het vastleggen van een aantal basiselementen, waaruit m.b.v. elementen methode-achtige technieken ingewikkelde structuren opgebouwd kunnen worden. (denk aan stijfheidsmatrices, evt. niet-lineair. Slavenburg 1976).

Een ander probleem is de onbekende eigenschappen van spieren en ligamenten m.b.t. kracht-weg relaties. Globaal gesproken zijn spieren te onderscheiden in een passief deel en een actief deel. Het actieve deel van de spieren en ligamenten gedragen zich als visco-elastische elementen en zullen alleen krachten en momenten geven na verlenging en verdraaiing. (werk van Hill, Fung(1968), Glantz(1977). Frisen(1969), Hayes en Hatze(1977)). Het actieve deel van de spieren kan afhankelijk van uitwendige parameters een kracht genereren. Het modelleren hiervan zal nog voor grote problemen zorgen. Hof(1980) stelt m.b.t. dit laatste punt dat het mogelijk is om het EMG-signaal tot een lineaire maat voor de kracht in een spier om te werken. Anderen (bijv. Hatze, 1978) trachten ook zo'n relatie op te stellen, maar doen dit via andere wegen waardoor zij tot onderling afwijkende conclusies komen. Probleem hierbij is waarschijnlijk het feit dat ieder op een andere, niet gestandaardiseerde manier het EMG-signaal meet en bewerkt. (Hatzé 1979, to be published, zie ook paragraaf 4.2).

Tot zover de beschrijving van de onderdelen van het spier-skelet-stelsel, hierna volgen enkele alinea's over problemen bij het verkrijgen van de invoergegevens van het systeem als één geheel.

Een van de bekendste onderzoeksgebieden van de biomechanica van het bewegingsapparaat is het gangbeeld onderzoek.

Hierboven werd het een en ander over de kinematica van twee botstukken t.o.v. elkaar gezegd, in dat soort onderzoekingen wordt dit veel globaler benaderd daar men slechts geïnteresseerd blijkt te zijn in de bewegingen van het gehele lichaam. Via allerlei fotografische technieken tracht men de posities en standen van lichaamsdelen vast te leggen. Door middel van meerdere beelden op verschillende tijdstippen genomen, tracht men uitspraken te doen over de bewegingen. Probleem hierbij is dat men dan voor bijv. het bepalen van de versnellingen 2x moet differentiëren. Tot voor kort gaf dit aanleiding tot grote numerieke fouten. Met behulp van digitale filtertechnieken voor het verwerken van gegevens, het toepassen van differentieschema's, "curve fitting" m.b.v. splines e.d. is men tegenwoordig zover dat er redelijk nauwkeurige meetresultaten verkregen kunnen worden (Pezzach, 1977, Soudan 1979, Woltring, 1977). (zie ook tabel 1 uit vorige hoofdstuk).

Bij dit gangbeeld onderzoek meet men aldus de bewegingen, waarna met behulp van een (dynamica) model de krachten berekend kunnen worden. Nu kan men ook het omgekeerde doen doordat men eerst de krachten bepaald en hiervoor de bijbehorende bewegingen berekend. Bij stelsels van starre, gekoppelde lichamen zijn zelfs combinaties mogelijk. Het grote probleem is echter de koppeling tussen de (voorgeschreven spier-) krachten met het model voor het bepalen van de bewegingen of de uitkomsten (krachten) van het model t.g.v. een bepaalde beweging met de krachten in de spieren en gewrichten. Hoe dit probleem precies in elkaar zit zal in de volgende paragraaf nader bestudeerd worden. Voor het bepalen van invoerwaarden voor een model dat uit de krachten de bewegingen berekend kan ik slechts opmerken dat men alleen uitwendige krachten met de omgeving kan meten, maar niet de inwendige spierkrachten.

4.2. Problemen m.b.t. verificatie experimenten

Met een mathematisch, dynamica model en de bekende bewegingen zou het mogelijk moeten zijn om uitspraken over de krachten te doen. Hierbij moeten een aantal veronderstellingen gemaakt worden die niet eenvoudig geverifieerd kunnen worden. Zo is een van de grote problemen het meten van de krachten in de spieren en de gewrichten.

Met de tot nu toe meest gebruikte modellen kan men dan de momenten over de gewrichten (lijn of bolscharnier) berekenen. Het is juist de overgang van deze gewrichtsmomenten naar de krachten in de spieren die voor veel problemen zorgt. De spieren lopen op enige afstand van het (instante) rotatiepunt (lijn) en zorgen zodoende voor een moment (spierkracht * arm). Uit de op te stellen momentvergelijking volgen drie skalaire evenwichtsvgl'n waarin veelal meer dan 3 onbekende (spier)krachten in voorkomen. Dit stelsel vgl'n heeft alleen een eenduidige oplossing wanneer er extra condities toegevoegd worden. Daar men (tot nu toe) niet beschikt over deze extra condities, tracht men via een andere weg tot een oplossing te komen.

In veel onderzoeken hanteert men optimaliseringscriteria voor het vinden van een oplossing. Met deze criteria, ook wel kostenfuncties genoemd, tracht men die combinatie van actieve spieren te vinden die de minste inspanning zou kosten. Als eersten formuleerden Nubar en Contini in 1961 de minimale totale gewrichtsmomenten als kostenfunctie. Zij veronderstelden dat de momentarm ten alle tijden constant zou zijn, een veronderstelling die zeker niet correct is. Cappozzo en Pedotti (1974) namen de warmteproductie in de spieren als lineaire maat voor de spierkracht. Ook deze veronderstelling kan niet correct zijn. Volgens experimentele gegevens van anderen zou hier een niet-lineaire verband gelden. Voorts kunnen spieren (elastische) energie (veer eigenschap) opslaan (negatieve arbeid verrichten) terwijl dat niet in hun model kon.

Seireg en Arvikar(1975) gebruiken een kostenfunctie met de som van de minimale totale spierkracht plus een constante maal de totale gewrichtsmomenten. Ook zij kwamen tot de conclusie dat hun principe goed moest zijn daar "the results showed excellent agreement with typical EMG patterns for all the major muscles". Echter tegenwoordig gebruiken de laatste auteurs de minimale totale spierspanning i.p.v. hun "excellente" spierkracht (Williams en Seirig, 1979). De spierspanning is gedefinieerd als de spierkracht gedeeld door de fysiologische doorsnede van de spier. De meeste recente publicaties maken overigens gebruik van de spierspanningen. Men gaat er van uit dat er een maximale toelaatbare spanning in een spier kan optreden waarbij de verhouding spierkracht/fysiologisch doorsnede onder deze maximaal toelaatbare waarde moet blijven. In een recente publicatie van Crowninshield (1978) wordt zelfs een afgeleide grootheid hiervan als kosten grootheid gebruikt.

Toch worden in de literatuur bedenkingen tegen deze methoden geuit. (correspondentie Hatze 1979, Hardt 1978). Hardt (1978) laat in zijn publicatie de vergelijkingen tussen enerzijds de minimale kracht en de minimale spier energie en anderzijds EMG signalen zien, waarbij duidelijk blijkt dat een groot aantal spieren op een ander moment actief zijn dan het model voorspelt.

Een andere methode is het elimineren van bepaalde onbekende spierkrachten door te stellen dat volgens EMG analyses de spier niet actief is en dus een (bekende) kracht gelijk aan nul heeft. In een aantal gevallen ziet men kans zoveel onbekende spierkrachten te elimineren dat er een oplosbaar stelsel ontstaat. Wanneer dit net niet lukt, hanteert men wel een andere truc door te stellen dat een bepaalde groep spieren dezelfde kracht zal leveren. (Berme, 1974, Barbenel, 1972).

Voor mij is het nog maar de vraag of beide methoden de juiste oplossing zullen geven. Zo kunnen voorspanningen in spieren niet gemodelleerd worden. Vooral in het been zullen t.g.v. de stabiliteitsfunctie spieren onder voorspanning staan. Voorbeeld: sommige topsporters hebben zeer slappe, uitgerekte enkelbanden. Hoewel het enkelgewricht dan instabiel zou moeten zijn, blijkt hier niets van. Deze mensen hebben namelijk zo'n goede spier "tonus" dat zij geen last zouden hebben van instabiliteitsproblemen.

In spier-skelet-modellen zal hier rekening mee gehouden moeten worden. Met begrippen uit de meet en regel-techniek moet het mogelijk zijn door middel van sturings-, regelings-parameters de (neurologische, elektrische) activiteit in de spieren te beschrijven. De enige die dit tot nu toe tracht te doen is Hatze. Reeds in 1975 deed hij dit voor een eenvoudig systeem (het schopgedrag van het been).

Aan de hand van sturingsparameters wordt een aantal spieren aangesproken. Met zijn spiermodel wordt dan een kracht genegeerd welke tot gevolg heeft dat het spier-skelet-stelsel (het dynamisch model) gaat bewegen. Door middel van eenvoudige experimenten controleert hij de voorspelde bewegingen met de werkelijke bewegingen. In feite is dit vergelijken met het gangbeeld onderzoek de omgekeerde weg. Overigens sluit deze methode goed aan bij de Wittenburg-methode omdat de belastingen in het dynamica model ingevoerd wordt en hiermee de bewegingen berekend worden.

Echter deze strategie heeft ook zijn zwakke punten. Zo is het mij nog steeds niet duidelijk hoe Hatze precies aan zijn sturingsparameters komt. Bij het schopgedrag van het been voldeed de voorspelde beweging aan het criterium dat het been in de kortste tijd van beginstand naar eindstand ging. Hoe zo'n criterium er in andere situaties uit ziet is nog onbekend. Hoewel er aan hogere sturingsniveau's (centraal zenuwstelsel) te denken valt, ben ik van mening dat voor het onderzoek naar krachten en bewegingen in het spier-skelet-stelsel deze sturingsparameters het beste direct aan redelijk te meten spieractiviteiten gekoppeld zouden moeten worden.

5. Slot

De aanleiding tot deze literatuurstudie was het feit dat wij meer wilden weten wat er in de literatuur bekend is over spier-skelet-modellen. Het blijkt dat de theorie hiervoor gedeeltelijk bekend, de praktijk voor eenvoudige gevallen hier reeds mee werkt en zich vooral concentreert op het oplossen van de daarbij optredende problemen.

Voor spier-skelet-modellen kan men de theorie voor stelsels van starre, gekoppelde lichamen hanteren. (hoofdstuk 2). Deze zal dan aangepast moeten worden aan een aantal lastige eisen die aan dergelijke modellen gesteld worden. Zo moet de theorie, de methode geschikt zijn om ingewikkelde koppelingen te schematiseren want een knie is bijvoorbeeld niet zo maar als een lijnscharnier te schematiseren. Tevens moet de theorie geschikt zijn om de veelheid en de verscheidenheid aan spieren stuk voor stuk aan te kunnen. De huidige theorieën, i.h.b. die van Wittenburg, kunnen dit in principe wel, maar het zal nog het nodige werk en tijd kosten alvorens dit uitgewerkt is.

Uit het overzicht van de biomechanica literatuur (hoofdstuk 3) blijkt dat men druk bezig is met allerlei onderzoeken op het gebied van het spier-skelet-stelsel, in het bijzonder het gangbeeld onderzoek.

Men besteedt daar veel aandacht aan de problemen m.b.t. de bewegingsregistratie en de interpretatie van de EMG-signalen (hoofdstuk 4).

Het is te verwachten dat men over enige tijd deze problemen voor eenvoudige gevallen opgelost heeft. Wanneer men in staat is om in principe te verklaren wat er bij een eenvoudig model gebeurt, kan men overgang naar ingewikkelder modellen. Rond die periode zullen dergelijke modellen beschikbaar dienen te zijn.

Op dit ogenblik is over dergelijke modellen nog slechts weinig gepubliceerd. (Seireg & Arvikar, Hatze). Maar uit congres verslagen, titels van papers, opmerkingen in publicaties heb ik de indruk dat er steeds meer belangstelling hiervoor ontstaat.

- Amis, A.A., Dowson, D. and Wright, V.
 "Muscle strengths and musculo-skeletal geometry of the upper limbs". ENGINEERING IN MEDICINE, IMechE, 1979, VOL 8, NO 1, P 41-48
- Andrews, G.C. and Kesavan, H.K.
 "The vector-network model: a new approach to vector dynamics". MECHANISM AND MACHINE THEORY, 1975, VOL 10, P 57-75
- Barbenel, J.C.
 "The biomechanics of the temporomandibular joint: a theoretical study". J.BIOMECHANICS, 1972, VOL 5, P 251-256
- Beckett, R. and Chang, K.
 "An evaluation of the kinematics of gait by minimum energy". J.BIOMECHANICS, 1968, VOL 1, P 147-159
- Berme, N., Paul, J.P. and Purves, W.K.
 "A biomechanical analysis of the metacarpophalangeal joint". J.BIOMECHANICS, 1977, VOL 10, P 409-412
- Bernstein, N.A. et. al
 "Biodynamics of locomotion". VIEW, MOSCOW 1
- Boland, P., Samin, J.C. and Willems, P.Y.
 "On the stability of interconnected deformable bodies". In: Magnus, K. "Dynamics of multibody systems, 1977, SPRINGER-VERLAG, BERLIN
- Boysen, J.P., Francis, P.R. and Thomas, R.A.
 "Interactive computer graphics in the study of human body planar motion under free fall conditions". J.BIOMECHANICS, 1977, VOL 10, P 783-787
- Bulcke, J.A., Termote, J.-L., Palmers, Y. and Crolla, D.
 "Computed tomography of the human skeletal muscular system". NEURORADIOLOGY, 1979, VOL 17, P 127-136
- Cappozzo, A. and Pedotti, A.
 "Modelling biological systems by optimization methods". In: Rose, J. (ed.), "ADVANCES IN CYBERNETICS AND SYSTEMS", 1973, GORDON & BREACH SCIENCES PUBL, NEW YORK
- Cappozzo, A., Leo, T. and Pedotti, A.
 "A general computing method for the analysis of human locomotion". J.BIOMECHANICS, 1975, VOL 8, P 307-320
- Chaffin, D.B.
 "A computerized biomechanical model-development of and use in studying gross body actions". J.BIOMECHANICS, 1969, VOL 2, P 429-441

- Chao, E.Y. and Rim, K.
 "Application of optimization principles in determining the applied moments in the human leg". J. BIOMECHANICS, 1973, VOL 6, P 497-510
- Chow, C.K. and Jacobson, D.H.
 "Studies of human locomotion via optimal programming". MATHEMATICAL BIOSCIENCES, 1971, VOL 10, P 239-306
- Crowninshield, R.D.
 "Use of optimization techniques to predict muscle force". J. OF BIOMECHANICAL ENGINEERING, 1978, VOL 100, P 88-92
- Dempster, W.T.
 "Space requirements of the seated operator. Geometrical, kinematic and mechanical aspects of the body with special reference to the limbs". WADC TECHNICAL REPORT 55-159, WRIGHT-PATTERSON AIR FORCE BASE OHIO, 1955
- Drillis, R., Contini, R. and Bluestein, M.
 "Body segment parameters, a survey of measurement techniques". ARTIFICIAL LIMBS, 1964, VOL 8, P 44-66
- Fischer, D
 "Theoretische Grundlagen für eine Mechanik der lebenden Körper". TG TEUBNER, BERLIN, 1906
- Fletscher, H.J. et al
 "Dynamics analysis of a two body gravitationally oriented satellite". BELL SYST. TECH. J., 1963, VOL 42, P 2239-2266
- Frisen, M., Magi, M., Sonnerup, L. and Viidik, A.
 "Rheological Analysis of soft collagenous tissue". J. BIOMECHANICS, 1969, VOL 2, P 13-20
- Fung, Y.-C. B.
 "Biomechanics, its scope, history and some problems of continuum mechanics in physiology". APPLIED MECHANICS REVIEW, 1968, VOL 21, NO 1, P 1-20
- Glantz, S.A
 "A 3-element description for muscle with viscoelastic passive elements". J. BIOMECHANICS, 1977, VOL 10, P 5-20
- Gupta, V.K.
 "Dynamic analysis of multi rigid body systems". J. OF ENGIN. FOR INDUS. (T. ASME SERIE B), 1974, VOL 96, NO 3, P 886-892
- Hardt, D.E.

"Determining muscle forces in the leg during normal human walking: an application and evaluation of optimization methods". J. OF BIOMECHANICAL ENGINEERING (T. ASME), 1978, VOL 100, P 72-78

Hatze, H.

"The complete optimization of a human motion" MATHEMATICAL BIOSCIENCES, 1976, VOL 28, P 99-135

Hatze, H.

"A complete set of control equations for the human musculo-skeletal system" J. BIOMECHANICS, 1977, VOL 10 P 799-805

Hatze, H.

"Neuro-musculo skeletal control systems modelling: a critical survey of recent developments". TO BE PUBLISHED

Hatze, H.

"A model for the computational determination of parameter values of anthropomorphic segments". CSIR, TWISK 79, PRETORIA

Hayes, K.C. and Hatze, H.

"Passive visco-elastic properties of the structures spanning the human elbow joint". EUROPEAN J. OF APPLIED PHYSIOLOGY, 1977, VOL 37, P 265-274

Hight, T.K., Piziali, R.L. and Nagel, D.A.

"A dynamical, nonlinear finite element model of a human leg". J. BIOMECHANICAL ENGINEERING (T. ASME), 1979, VOL 101, P 176-184

Hof, A.L.

"EMG to force processing", Ph D Thesis, RU GRONINGEN, 1980

Hooker, W.W.

"A set of r dynamical attitude equations for an arbitrary n -body satellite having r rotational degree of freedom". AIAA JOURNAL, 1970, VOL 8, NO 7, P 1205-1207

Huston, R.L. and Passerello, C.E.

"On the dynamics of a human body model". J. BIOMECHANICS, 1971, VOL 4, P 396-378

Jensen, R.H. and Davy, D.T.

"An investigation of muscle lines of action about the hip: a centroid line approach vs the straight line approach". J. BIOMECHANICS, 1975, VOL 8, P 103-110

Kane, T.R. and Scher, M.P.

"Human self-rotation by means of limbs movement".
J. BIOMECHANICS, 1970, VOL 3 P 39-49

King, A.L. and Chou, C.C.

"Mathematical modelling, simulation and experimental testing of biomechanical systems crash response".
J. BIOMECHANICS, 1976, VOL 9, P 301-317

Levinson, D.A.

"Equations of motion for multiple rigid-bodies systems via symbolic manipulation". J. SPACECRAFT AND ROCKETS, 1977, VOL 14, NO 8, P 479-487

Magnus, K

"The multibody approach for mechanical systems". SOLID MECHANICS ARCHIVES, 1977, VOL 2, P 187-204

Maillardet, F.J

"The swing phase of locomotion". ENGINEERING IN MEDICINE, ImechE, 1977, VOL 6, NO 3 & 4, P 67-75 & 101-106

Maltha, J. and Bacchetti, A.C.

"MADYMO: a general purpose mathematical dynamical model for crash victim simulation". RAPPORT TNO, AFD. LETSELPREVENTIE, 1978, DELFT, NR 753012-C

Mengelers, J.H.J.

"De theoretische achtergrond van een mathematisch dynamisch model (MADYMO) voor een systeem van starre lichamen". RAPPORT TNO, AFD LETSELPREVENTIE, 1979, DELFT, NR 700150006

Vubar, Y. and Contini, R.

"A minimal principle in biomechanics".
BULL. MATH. BIOPHYS., 1961, VOL 23, P 377-390

Orlandea, N., Chace, M.A. and Calahan, D.A.

"A sparsity-oriented approach to the dynamic analysis and design of mechanical systems-part 1 and part 2". J. OF ENGIN. FOR INDUS. (T. ASME SERIE B), 1977, VOL 98, P 773-784

Paul, B

"Analytical dynamics of mechanisms—a computer oriented overview". MECHANISM AND MACHINE THEORY, 1975, VOL 10, P 481-507

Pezzack, J.C., Norman, R.W. and Winter, D.A.

"An assessment of derivative determining techniques used for motion analysis". J. BIOMECHANICS, 1977, VOL 10, P 377-382

- Reber, J.G. and Goldsmith, W.
 "Analysis of large head-neck motions". J. BIOMECHANICS,
 1979, VOL 12, P 211-222
- Renaud, M
 "Contribution a l etude de la modelisation et de la
 commande des systems mecaniques articules". Ph D Thesis,
 UNIVERSITE PAUL SABATIER, TOULOUSE, 1975
- Roberson, R.E. and Wittenburg, J.
 "A dynamical formalism for an arbitrary number of
 interconnected rigid bodies, with reference to the
 problem of satellite control". 1966, 3 RD IFAC CONGRESS,
 LONDON, PROCEEDINGS, P 46 D 1-9
- Roberts, S.B. and Thompson, R.B.
 "On the non-linear dynamic response of the rhesus to
 impact". J. BIOMECHANICS, 1974, VOL 7, P 523-544
- Scherrer, P.K. and Hillberry, B.M.
 "Piecewise mathematical representation of articular
 surfaces". J. BIOMECHANICS, 1979, VOL 12, P 301-311
- Schiehlen, W.O. and Kreuzer, E.J.
 "Symbolic computerized derivation of equations of
 motion". In: Magnus, K. "Dynamics of multibody systems,
 1977, SPRINGER-VERLAG, BERLIN
- Seireg, A. and Arvikar, R.J.
 "The prediction of muscular load sharing and joint
 forces in the lower extremities during walking".
 J. BIOMECHANICS, 1975, VOL 8, P 89-102
- Selvik, G
 "A rontgen stereophotogrammetric method for the study of
 the kinematics of the skeletal system". Ph D Thesis, AV
 CENTRALEN, LUND (SWEDEN), 1974
- Sheth, P.N. and Uicker, J.J. jr
 "IMP (Integrated Mechanisms Program), a computer-aided
 design analysis system for mechanisms and linkage". J.
 OF ENGIN. FOR INDUS (T. ASME), 1972, P 454-464
- Slavenburg, A.
 "Modelvorming van gewrichtsbanden". RAPPORT TH E., GROEP
 WTM, 1976, NR WE 76-10
- Sol, E. J.
 "Dynamika van stelsel gekoppelde, starre lichamen".
 RAPPORT TH E, GROEP WTM, 1979, NR WE 79-09
- Soudan, K. and Dierckx, P.

"Calculation of derivatives and fouriercoefficients of human data, while using spline functions".
J.BIOMECHANICS, 1979, VOL 12, P 21-26

Townsend, M.A. and Seireg, A.
"The synthesis of bipedal locomotion". J.BIOMECHANICS,
1972, VOL 5, P 71-83

Townsend, M.A. and Tsai, T.C.
"Biomechanics and modelling of bipedal climbing and descending". J.BIOMECHANICS, 1976, VOL 9, P 227-239

Dicker, J.J. jr
"Dynamic force analysis of spatial linkages". J. APPLIED MECHANICS (T. ASME), 1967, P 418-424

Vukobratovic, M.
"Dynamics of active articulated mechanisms and synthesis of artificial motion". MECHANISM AND MACHINE THEORY, 1978, VOL 13, P 1-56

Walker, P.S.
"Human joint and their artificial replacements". 1977,
BANNERSTONE HOUSE, SPRINGFIELD, ILL.

Williams, R.J. and Seireg, A
"Interactive modeling and analysis of open or closed loop dynamic systems with redundant actuators". J. OF MECHANICAL DESIGN, 1979, VOL 101, P 407-416

Winter, D.A. and Robertson, D.G.E.
"Joint torque and energy patterns in normal gait". BIOLOGICAL CYBERNETICS, 1978, VOL 29, P 137-142

Wismans, J.
"A 3-dimensional mathematical model of the human knee joint". Ph D Thesis, TH EINDHOVEN, 1980

Wittenburg, J.
"Die Differentialgleichungen der Bewegung für eine Klasse von Systemen starrer Körper in Gravitationsfeld". INGENIEUR ARCHIV, 1968, VOL 37, P 221-242

Wittenburg, J.
"Die numerische bestimmung stabiler Gleichgewichtslagen von Vielkörper-Satelliten Systemen". INGENIEUR ARCHIV, 1970, VOL 39, P 201-208

Wittenburg, J
"Dynamics of systems of rigid bodies". BG TEUBNER, STUTTGART, 1977

Wittenburg-werkgroep

Interne geschriften, TH EINDHOVEN, Groep WTM, 1978/1979

Woltring, H.J.

"Measurement and control of human movement". Ph D
Thesis, KU NIJMEGEN, 1977