

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/259975532>

# In perspectief: Het belang van de biomechanica voor bewegingssturing

Article · April 2010

---

CITATIONS

2

READS

217

## 1 author:



**Jurjen Bosga**

Radboud University

**30** PUBLICATIONS **248** CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

## Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Solution Space as a Health Indicator of the Human Movement System [View project](#)



Paramedisch herstel van de motoriek [View project](#)

## **In perspectief: Het belang van de biomechanica voor bewegingssturing**

### **Auteur**

Jurjen Bosga

Dr. J. Bosga, MT, PT

werkzaam in de eerstelijnsgezondheidszorg te Doorn.

[bosga@fysioheuvelrug.nl](mailto:bosga@fysioheuvelrug.nl), [www.fysioheuvelrug.nl](http://www.fysioheuvelrug.nl)

### **Trefwoorden:**

Biomechanica, vrijheidsgraden, redundantie, motorische controle

### **Samenvatting**

In dit artikel worden allereerst een aantal begrippen zoals vrijheidsgraden, motorische leerfasen volgens Bernstein, redundantie management, exploitatie van de biomechanica van het bewegingsapparaat en het amplitude-frequentie paradigma toegelicht. Vervolgens wordt aan de hand van een tweetal experimenten inzicht gegeven welke neuromotorische strategieën mensen hanteren om de vele vrijheidsgraden van het bewegingssysteem te benutten bij het uitvoeren van repeterende doelgerichte bewegingstaken. Hierna worden de resultaten van beide onderzoeken besproken, dit aan de hand van een aantal informatiemanagement principes waarop het neuromotorisch systeem aangestuurd kan worden. Ten slotte is beschreven hoe boven vermeldde inzichten vanuit de cognitieve neurowetenschappen zich vertalen naar een fysiotherapeutische bijdrage aan het herstel na een totale knie vervanging.

### **Leerdoelen**

Na het lezen van dit artikel:

- weet u op basis van welke principes de vrijheidsgraden in het bewegingssysteem georganiseerd kunnen worden;
- bent u op de hoogte van de motorische leerfasen volgens Bernstein;
- kunt u het belang van de biomechanische krachten voor het menselijk gedrag inschatten;
- weet u wat in biologische systemen onder coördinatie wordt verstaan;

- krijgt u inzicht in het belang van fundamenteel motorisch onderzoek voor de onderbouwing van fysiotherapie;

## **1. Inleiding**

Met ogenschijnlijk veel gemak bepaalt het menselijk brein, vanuit een inkomende stroom van overvloedige sensorische informatie, de perceptuele consequenties van onze gewenste acties. Anders gezegd, het brein stelt vast hoe de toekomstige handeling eruit gaat zien of aan gaat voelen. Tegen de achtergrond van deze perceptie-actie koppeling zijn mensen in staat om te bewegen. Dit doen wij door geschikte lichaamsconfiguraties (houdingen) uit een overvloedig (redundant) aanbod te selecteren<sup>1</sup>. Tegelijkertijd worden de complexe biomechanische eigenschappen van het bewegingsapparaat, door sterk vertakte circuits in het centraal zenuwstelsel (CZS), gecontroleerd of benut om de intentie van onze actie te volbrengen. Juist de overvloed aan manieren waarop wij ons gestelde doel kunnen bereiken verhoogt de betrouwbaarheid en flexibiliteit van het perceptuo-motor systeem bij de uitvoering van onze dagelijkse activiteiten<sup>2</sup>.

In de volgende secties worden eerst een aantal belangrijke begrippen binnen het domein van de bewegingssturing inzichtelijk gemaakt.

## **2. Vrijheidsgraden**

Hoe mensen de overvloed aan vrijheidsgraden (mogelijkheden) van hun bewegingsapparaat aansturen en benutten om een bewegingstaak op verschillende manieren uit te voeren, is een belangrijk onderzoeksthema uit de cognitieve neurowetenschappen en één van de belangrijkste vragen die de fysiotherapeutische discipline zich zou moeten stellen. Neem bijvoorbeeld de fysiotherapeutische bijdrage aan het herstel na een totale knie vervanging (TKP) als chirurgische behandelingsoptie voor gevorderde osteoartritis van het kniegewricht. De preoperatieve symptomen bestaan uit pijn, stijfheid, verlies aan bewegelijkheid en verminderde belastbaarheid van het kniegewricht. Postoperatief zijn alle preoperatieve symptomen verdwenen en mag de geopereerde knie gewoonlijk binnen 24 uur na de operatie volledig worden belast. Toch zijn patiënten terughoudend om meteen na de operatie, zonder een ondersteunend hulpmiddel, te staan en te lopen. Omdat een deel van de vrijheidsgraden van het kniegewricht (joint play) als gevolg van de osteoarthritis waren "bevroren" en door de knie vervanging plotseling zijn "vrijgemaakt", moeten de vrijgekomen vrijheidsgraden eerst

opgenomen worden in grotere stabiele coördinatiestructuren alvorens zonder hulpmiddelen te kunnen staan en lopen.

### 2.1. Motorische leerfasen volgens Bernstein

Nicholai Bernstein<sup>3</sup> was één van de eerste die begreep dat het proces van het (her)leren van een motorische taak een gefaseerde reorganisatie van de vrijheidsgraden van het bewegingssysteem vereist. Bernstein stelde dat eerst een deel van de vrijheidsgraden wordt geëlimineerd waardoor de uitvoering aanvankelijk onhandig, stijfjes en niet vloeiend verloopt maar waarbij het doel wel wordt bereikt. Vervolgens worden vrijheidsgraden geleidelijk in het neuromotorisch systeem geherintroduceerd en in grotere coördinatiestructuren (synergieën) opgenomen. In de laatste fase wordt de taak meer economisch uitgevoerd, in die zin dat de biomechanische krachten (zoals reactieve, wrijving en inertiaële krachten) worden geëxploiteerd (benut) waardoor een efficiënt, flexibele en betrouwbare krachtige taakuitvoering kan ontstaan.

### 2.2. Redundantie management

Sinds Bernstein's observaties, zijn een aantal verschillende benaderingen uit de literatuur bekend die aangeven op basis van welke principes de vrijheidsgraden in het bewegingssysteem georganiseerd (gemanaged) kunnen worden te weten:

- het terugbrengen van vrijheidsgraden tot die welke strikt noodzakelijk zijn om een taak uit te voeren (*eliminatie*);
- de tijdelijke koppeling van de biomechanische vrijheidsgraden in bewegingssynergieën (*coördinatie*);
- het toepassen van optimalisatieprincipes van bewegingssturing (*optimalisatie*);
- het benutten van de biomechanische eigenschappen van het bewegingsapparaat (*exploitatie*);
- dat taken gedefinieerd kunnen worden door hun inperkingen (constraints) en dat het relatieve belang van deze inperkingen, afhankelijk van de bewegingsdoelen, kan variëren, bijvoorbeeld: gratie, snelheid of accuratesse (*allocatie*);
- de benadering dat actieplannen hiërarchisch gestructureerd zijn (*delegatie*).

Het vervolg van dit artikel richt zich primair op het in de praktijk onderbelichte onderzoeksprincipe dat aangeeft hoe mensen de biomechanica van hun bewegingsapparaat exploiteren.

### 2.3. Exploitatie van de biomechanica

De dynamische systeembenadering, een ontwikkeling uit de jaren 1980, is voor het domein van motorische controle bijzonder belangrijk. Het uitgangspunt van deze benadering is dat bewegingssturing beschouwd kan worden als een zelforganiserend proces dat door interacties tussen de mens, taak, en omgeving, zich in de tijd ontwikkelt. Hierdoor werden wetenschappers, die het bewegingsplan als een zuiver symbolische weergave van een informatieverwerkingsproces beschouwden, uitgedaagd een meer biologisch en fysisch realistisch beeld van motorische controle en planning te formuleren. In overeenstemming met deze ontwikkeling hebben bijvoorbeeld Meulenbroek & Thomassen in een schrijftaak aangetoond dat de elastische eigenschappen van spieren en pezen van de arm van invloed zijn op de uitvoering van opeenvolgende pennestreken.<sup>4</sup> Esther Thelen vond dat zuigelingen in



staat zijn passieve krachten, zoals inertie tengevolge van de zwaartekracht, efficiënter te benutten naarmate het vaardigheidsniveau van hun reik- en grijpbewegingen toeneemt en daardoor minder afhankelijk wordt van actief gegenereerde krachten.<sup>5</sup> Recent heeft Dounskaia in de "Leading Joint Hypothesis" verdedigd<sup>6</sup> dat reik- en grijpbewegingen actief ingezet worden vanuit de schouder, van waaruit ook de grootste verplaatsing van de hand naar het doel wordt veroorzaakt. Bewegingen van de elleboog en pols bestaan daarentegen uit een combinatie van passieve mechanische krachten (interactive torques) veroorzaakt door de ingezette beweging vanuit de schouder, en actieve correcties op

deze passieve component. Hiermee wordt Bernstein's invloedrijke mening ondersteund dat adaptief motorisch gedrag geen weerstand biedt, maar juist de biomechanische eigenschappen van het bewegingsapparaat benut<sup>7</sup> (zie b.v. figuur 1).

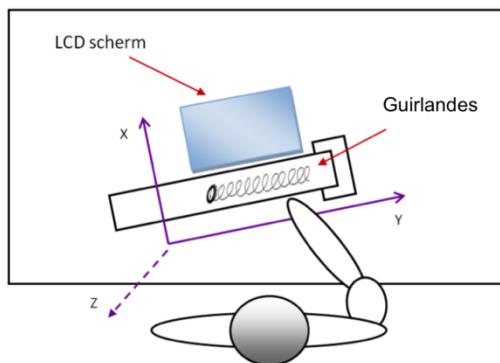
#### 2.4 Amplitude-frequentie paradigma

Het is bekend dat een klok langzamer tikt wanneer men de slinger van de klok langer maakt en dat de klok sneller tikt wanneer men de slinger korter maakt. Door de slinger langer te maken zal de uitslag (amplitude) van de slinger groter worden en daardoor zal het tempo (frequentie) van de slinger automatisch afnemen en visa versa. De amplitude-frequentie paradigma staat voor deze inverse (tegengestelde) mechanische relatie tussen bewegingsuitslag en bewegingsfrequentie, en blijkt ook van toepassing te zijn op menselijk

gedrag. Gewoonlijk worden grote bewegingsuitslagen van de arm met een lage bewegingsfrequentie vanuit de schouder of elleboog uitgevoerd, terwijl kleine bewegingsuitslagen van de arm met een hogere bewegingsfrequentie vanuit de pols of vingers worden uitgevoerd.<sup>8,9</sup> Door aan mensen te vragen snelle schouder- of langzame polsbewegingen te maken, wordt van hen verlangd om bij het uitvoeren van deze bewegingen af te zien van de natuurlijke inverse mechanische amplitude-frequentie relatie. Om deze bewegingen uit te voeren moet dan gebruikt worden gemaakt van een minder natuurlijke bewegingsstrategie die vermoedelijk meer aandacht vereist, d.w.z. grotere eisen stelt aan de cognitieve verwerkingscapaciteit.<sup>10,11</sup>

## 2.5. Onderzoeksvraag

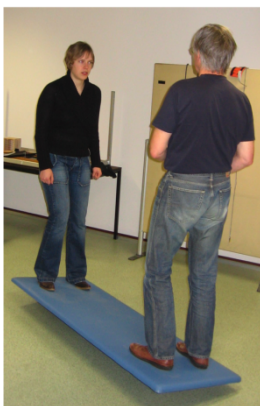
In een tweetal onderzoeken<sup>12,13</sup> is het amplitude-frequentie paradigma toegepast om inzicht krijgen in neuromotorische strategieën, die de deelnemers hanteren bij het uitvoeren van repeterende doelgerichte bewegingstaken, wanneer zij tegelijkertijd geconfronteerd worden met opgelegde amplitudes en frequenties (parameters). De focus in deze onderzoeken is gericht op de mate waarin deelnemers de biomechanica van het bewegingsapparaat exploiteren of de mate waarin zij er juist tegenin gaan.



## 3. Experimenten

In het eerste experiment (zie figuur 2) werd aan 12 deelnemers gevraagd om doorgaande lussen te schrijven (guirlandes) met een opgelegde combinatie van hoogte (amplitude: 3, 6, 9, 12, of 15 mm) en tempo (frequentie: 1, 2, 3, 4, of 5 Hz.).

In het tweede experiment (zie figuur 3) moesten 28 deelnemers, alleen of samen, op een



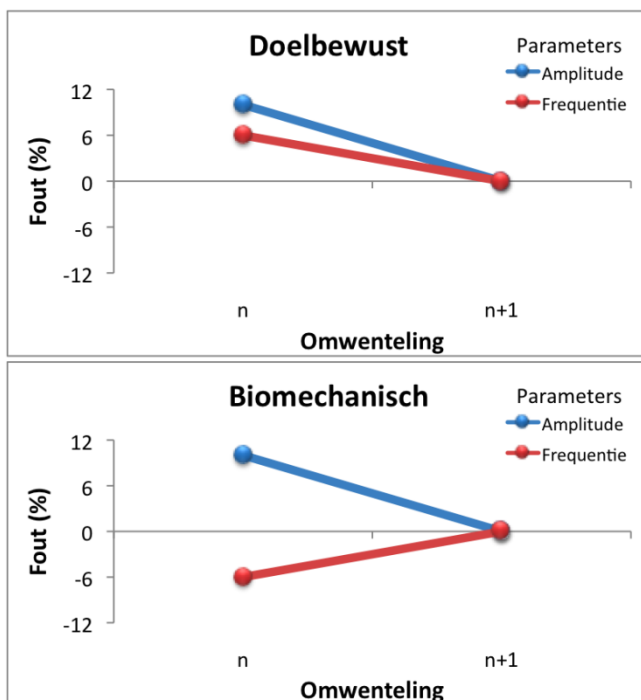
wiebelplank staan en zijwaarts heen en weer schommelen met een vereiste combinatie van zijwaartse bewegingsuitslag (amplitude: 8, 18 of 28 graden) en tempo (frequentie: 0.4, 0.6 of 0.8 Hz.).

### 3.1. Mogelijke uitkomstmaten

Theoretisch kan voor beide experimenten, na iedere geschreven lus of zijwaartse heen-en-weer beweging (omwenteling), worden bepaald in

welke mate de uitkomst *niet* voldoet aan de vereiste bewegingsuitslag en het vereiste tempo (parameterfouten). Daarna kan in de daaropvolgende omwenteling bepaald worden in welke mate en op welke wijze deelnemers in staat zijn de gemaakte de parameters te veranderen om zo de fouten te corrigeren (zie ook figuur 4). Op basis van deze beschouwingen kunnen theoretisch na elke fout vier types mogelijke parameter veranderingen worden gedefinieerd, te weten:

1. een verandering die een toename van de parameterfouten veroorzaakt (*Drift*);
2. een verandering van slechts één parameter (bewegingsuitslag of tempo) die slechts één parameterfout corrigeert (*Enkelvoudig*);
3. een verandering van beide parameters (bewegingsuitslag en tempo) die tegen de inverse mechanische amplitude-frequentie relatie is gericht met correctie van beide parameterfouten (*Doelbewust*);
4. een verandering van beide parameters (bewegingsuitslag en tempo) die conform de inverse mechanische amplitude-frequentie relatie verloopt met correctie van beide parameterfouten (*Biomechanisch*).



Stel (figuur 4 bovenste paneel) dat een deelnemer na een bepaalde omwenteling (n) een fout maakt waarbij zowel de bewegingsuitslag te groot is en het tempo te hoog ligt en dat bij de volgende omwenteling (n+1) de fout is gecorrigeerd. Dit betekent dat een deelnemer een beweging heeft gemaakt waarbij de bewegingsuitslag *verkleind* en het tempo *verlaagd* is ten opzichte van de vorige beweging. Deze parameter veranderingen gaan tegen de inverse mechanische amplitude-frequentie relatie

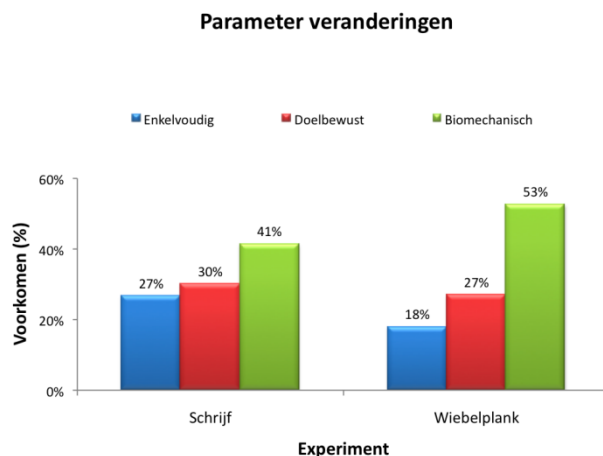
in, en veronderstelt een bewegingsstrategie die tegen de biomechanica van het bewegingsapparaat is gericht (Doelbewust).

Stel (figuur 4 onderste paneel) dat een deelnemer na een bepaalde omwenteling (n) een fout maakt waarbij de bewegingsuitslag te groot is en het tempo te laag ligt en dat bij de volgende

omwenteling (n+1) de fout ook is gecorrigeerd. Dit betekent dat een deelnemer een corrigerende beweging heeft gemaakt waarbij de bewegingsuitslag *verkleind* en het tempo *verhoogd* is. Deze parameter veranderingen verlopen conform de inverse mechanische amplitude-frequentie relatie en veronderstelt een bewegingsstrategie die wel gericht is op het benutten van de biomechanica van het bewegingsapparaat (Biomechanisch).

### 3.2. Resultaten

In de resultaten sectie worden eerst de gemiddelde uitkomstmaten over alle deelnemers voor beide experimenten (pooled mean group) gepresenteerd. Vervolgens wordt aandacht besteed aan de invloed van de factoren Mens (deelnemers) en Taak (schrijftaak en wiebelplanktaak) op de bewegingskenmerken (uitkomstmaten). Tenslotte zullen de resultaten worden getoond wanneer de deelnemers de wiebelplanktaak alleen (solo) of als tweetal (paar) uitvoeren (factor Omgeving). In alle tabellen wordt onder de Ratio variabele BM/DB de verhouding verstaan tussen het aantal biomechanische (BM) en doelbewuste (DB) bewegingen die deelnemers uitvoeren. De Ratio variabele is indicatief voor de bewegingsstrategie die deelnemers hanteren. Bij een Ratio > 1 geldt dat de biomechanische strategie vaker voorkomt dan de doelbewuste strategie en bij een Ratio < 1 geldt dat de biomechanische strategie minder vaak voorkomt dan de doelbewuste strategie. Als de Ratio gelijk is aan 1, dan doen de biomechanische en doelbewuste strategieën zich even vaak voor.



#### 3.2.1. Pooled Mean Group

Figuur 5 laat zien dat deelnemers in beide experimenten overwegend de biomechanica van hun bewegingsapparaat exploiteren (Biomechanisch; gemiddeld  $\pm 47\%$ ), men in circa 29% van alle correcties doelbewust tegen deze eigenschappen ingaan (Doelbewust), en men gemiddeld in ongeveer 22% van alle correcties een beweging maken waarin de correcties slechts gedeeltelijk worden hersteld (Enkelvoudig).

#### 3.2.2. Factor Mens



Tabel 1 laat zien dat de deelnemers aan het schrijf experiment overwegend een biomechanische strategie hanteren (Ratio: Gemiddelde=1,40; SD=0,10; Min=1,28; Max=1,59). Tabel 2 laat zien dat ook bij het experiment met de wiebelplank nagenoeg alle deelnemers een voorkeur vertonen voor een biomechanische strategie, maar dat de spreiding tussen de deelnemers relatief groot is (Ratio: Gemiddelde=2,18; SD=0,62; Min=1,02; Max=3,60).

### 3.2.3. Factor Taak

Als wij de schrijf- (tabel 1) en wiebelplanktaak (tabel 2) onderling vergelijken dan kunnen wij zien dat de deelnemers in de wiebelplanktaak (Ratio: Gemiddelde=2,18; SD=0,62) vaker de biomechanica van het bewegingsapparaat exploiteren dan deelnemers in de schrijftaak (Ratio: Gemiddelde=1,40; SD=0,10).

### 3.2.4. Factor Omgeving

Tabel 2 toont de resultaten wanneer de deelnemers de wiebelplanktaak solo uitvoeren, terwijl tabel 3 de resultaten weergeeft wanneer dezelfde deelnemers de wiebelplanktaak als paar uitvoeren. In de solo uitvoering van de taak (Ratio: Gemiddelde=2,18; SD=0,62; Min=1,02; Max=3,60) wordt de biomechanica van het bewegingsapparaat vaker geëxploiteerd met een relatief grotere spreiding tussen de deelnemers dan wanneer de taak als paar wordt uitgevoerd (Ratio: Gemiddelde=1,93; SD=0,38; Min=1,56; Max=2,69).

## 4. Discussie

In de volgende secties worden de resultaten van beide onderzoeken aan de hand van een aantal informatiemangement principes van bewegingssturing van het neuromotorisch systeem besproken.

### 4.1. Strategie

De resultaten van beide experimenten laten zien dat de biomechanische exploitatie van het bewegingsapparaat een prominente neuromotorische strategie is bij het uitvoeren van repeterende doelgerichte bewegingstaken. Deze natuurlijke bewegingsstrategie is relatief minder belastend voor de cognitieve verwerkingscapaciteit omdat mensen hierbij de aandacht slechts hoeven te richten op het veranderen van één parameter. Immers, de andere parameter wordt quasi-automatisch veranderd doordat het CZS gebruik maakt van de inverse mechanische amplitude-frequentie relatie die tussen beide parameters bestaat. Hierbij wordt verondersteld dat bewegingen door het neuromotorische systeem relatief eenvoudig

gecontroleerd kunnen worden, omdat deze aanpak het aantal te controleren parameters reduceert.

Een opmerkelijk aantal corrigerende bewegingen (29%) is toe te schrijven aan een minder natuurlijke bewegingsstrategie (doelbewuste strategie) die tegen de biomechanica van het bewegingsapparaat ingaat. Deze aanpak vereist aandacht voor de uitvoering van beide parameter veranderingen en vraagt relatief meer van de cognitieve verwerkingscapaciteit. In 22% van de gevallen wordt een strategie gehanteerd waarin slechts één parameterfout wordt gecorrigeerd (enkelvoudige strategie). Het veranderen van slechts één parameter is een begrijpelijke aanpak om onder tijdsdruk te presteren omdat de deelnemers in ieder geval één parameterfout kunnen herstellen.

#### 4.2. Coördinatie

Binnen de dynamische systeembenadering van bewegingssturing worden de biomechanische eigenschappen (constraints) van het bewegingsapparaat beschouwd als noodzakelijke voorwaarden bij het tot stand komen van coördinatie patronen. De inperkingen kanaliseren namelijk het proces van zelforganisatie waardoor bepaalde coördinatie patronen kunnen ontstaan.

In biologische systemen wordt onder coördinatie verstaan dat onderdelen van het bewegingssysteem in ruimte en tijd worden georganiseerd. In het domein van motorische controle kan coördinatie macroscopisch worden beschreven in termen van de ordening van het lichaam of lichaamsdelen ten opzichte van de omgeving en gebeurtenissen, of in termen van lichaamsconfiguraties in relatie tot een taak. In de visie van Bernstein is het hiërarchisch niveau van de spier-gewricht koppelingen verantwoordelijk voor de vorming van synergieën van grote groepen motor-units en verschillende bewegingspatronen.<sup>14</sup> Binnen deze context is de tijdelijke koppeling van motor-units en gewrichten in motorische synergieën naar voren gebracht als een perceptuo-motor strategie waarmee het CZS redundantie kan oplossen.<sup>15</sup>

#### 4.3. Dynamiek

In het algemeen is het, net als met pianospelen, vrijwel onmogelijk om zonder oefening de handen onafhankelijk van elkaar te bewegen. Het CZS hanteert een strategie waarbij de handbewegingen aanvankelijk op een bepaalde manier zijn gekoppeld (gecoördineerd). De dynamiek van een systeem is in een bepaalde situatie blijikbaar mede afhankelijk van de natuurlijke geneigdheid (tendens) die binnen een systeem operationeel is (intrinsic dynamics). In de twee beschreven experimenten komt de dynamiek van het bewegingssysteem tot uiting

in de natuurlijke geneigdheid die deelnemers vertonen om de inverse mechanische amplitude-frequentie relatie te benutten. Motorisch leren, ofwel het ontdekken of creëren van nieuwe coördinatie patronen om vaardigheden aan te leren of leren te verbeteren, speelt zich af tegen een achtergrond van bestaande coördinatie patronen en vaardigheden.

#### 4.4. Mens, Taak en Omgeving

Welke factoren zijn nu van invloed op die natuurlijke geneigdheid die mensen vertonen? Anders gesteld, in welke mate speelt de factor Mens, Taak of Omgeving een rol in het voorkeursgedrag die deelnemers in onze experimenten vertonen?

De voorkeur voor een bepaalde aanpak tijdens het uitvoeren van doelgerichte repeterende bewegingen, varieert sterk tussen mensen. In het wiebelplank experiment (tabel 2) maakt proefpersoon 2 bijna evenveel gebruik van een biomechanische- als van een doelbewuste strategie (Ratio=1,02). Proefpersoon 25 hanteert daarentegen drie keer vaker een biomechanische- dan een doelbewuste strategie (Ratio=3,06). In de taakuitvoering zal proefpersoon 2 zijn aandacht overwegend moeten verdelen over beide parameter veranderingen, terwijl proefpersoon 25 voornamelijk aandacht hoeft hebben voor slechts één parameter verandering. De invloed van de factor Taak (tabel 1 en 2) op de bewegingskenmerken laat zien dat de deelnemers vaker een voorkeur vertonen voor een biomechanische strategie tijdens de wiebelplanktaak dan tijdens de schrijftaak. Verder zien wij (tabel 2 en 3) dat bewegingen meer natuurlijk verlopen als de deelnemers de wiebelplanktaak alleen uitvoeren dan met z'n tweeën (factor Omgeving).

Samengevat, in deze experimenten zijn de factor Mens, Taak en Omgeving van invloed op de aanpak die deelnemers hebben om de vrijheidsgraden in hun neuromotorisch systeem te coördineren teneinde de taak te realiseren. Echter, dit impliceert niet dat coördinatie door één factor alleen bepaald wordt. Coördinatie ontstaat door interacties tussen de mens, taak en omgeving.

### 5. Implementatie

In het volgende voorbeeld van een fysiotherapeutische bijdrage aan het herstel na een totale knie vervanging gebruiken wij de motorische leerfasen volgens Bernstein en de verschillende benaderingen van redundantie management als leidraad.

Zoals gezegd, ten gevolge van een gevorderde osteoarthritis, zijn een deel van de vrijheidsgraden van het kniegewricht "bevroren" en worden door de knie vervanging plotseling "vrijgemaakt". Door de cocontractie van agonistische en antagonistische

spiergroepen rondom het kniegewricht aanvankelijk toe te laten, kan een deel van de vrijheidsgraden van het kniegewricht worden geëlimineerd (*eliminatie*), waardoor de knie in ieder geval gecontroleerd kan worden bewogen. Vervolgens kan, met behulp van een harnas of trapezevest, gebruik gemaakt worden van een schommelbord om bewegingen van de knie in een vrije oefenvorm uit te voeren. Hiermee kunnen de vrijheidsgraden geleidelijk en gecontroleerd in het motorisch systeem worden geherintroduceerd om in grotere coördinatie structuren opgenomen te worden (*coördinatie*). De schommelbewegingen zorgen er ook voor dat er vertrouwen ontstaat om de geopereerde knie te belasten. Hierna kunnen de uitslag- en frequentie combinaties worden opgelegd en gevarieerd, met als doel de motorische prestaties te verhogen. Naast het faciliteren van de balans in staande positie en de transfers naar verschillende houdingen, zal de loopafstand vergroot moeten worden, waarbij de knie tijdens de staan- en zwaai fase (*delegatie*) een andere taak is toebedeeld. Langzaam lopen faciliteert een doelbewust gecontroleerd bewegingspatroon (*allocatie*). Wanneer echter hogere loopsnelheden geëist worden, zal de patiënt gedwongen worden om te leren profiteren van de biomechanica van zijn motorisch systeem (*exploitatie*), waardoor een efficiënt, flexibel betrouwbaar en krachtig looppatroon kan ontstaan.

In het algemeen is het herstel na een TKP afhankelijk van o.a. het vermogen de vrijheidsgraden van het neuromotorisch systeem te reorganiseren (motorisch leren). Met name zal het resultaat afhangen van de mate waarin patiënten de biomechanica van de prothese kunnen benutten tegen een achtergrond van bestaande coördinatie patronen en vaardigheden als gevolg van de preoperatieve geschiedenis. Sommigen doen dit beter dan anderen. Veranderingen in de taak, taakeisen of omgevingsfactoren kanaliseren het proces van zelforganisatie waardoor een verandering van coördinatie patronen kunnen ontstaan die een gunstige uitwerking kunnen hebben op het vaardigheidsniveau.

## **6. Conclusie**

Hoewel mensen de biomechanische eigenschappen van hun bewegingsapparaat heel goed weten te benutten, tonen de resultaten van de twee experimenten aan dat bewegingsmodellen, die alleen rekening houden met de biomechanica van het bewegingsapparaat, het menselijk gedrag slechts ten dele kunnen verklaren.

Het identificeren van de factoren die ten grondslag liggen aan de neuromotorische strategieën die mensen in hun taakuitvoering hanteren, is noodzakelijk om inzicht te verkrijgen in mechanismen die bepalend zijn voor de transitie van een natuurlijke geneigdheid naar nieuwe coördinatie patronen om complexe vaardigheden te leren of leren te verbeteren. Dit vormt een

cruciaal aspect in de fysiotherapie bij het ontwikkelen van doeltreffende interventieprocedures.

**Www.physios.nl**

Bijlage 1 . Verklarende woordenlijst

## Referenties

1. Rosenbaum DA, Meulenbroek RG, Jansen C & Vaughan J. Posture based motion planning: Applications to grasping. *Psychol Rev* 2001;108:709–734.
2. Bosga J, Meulenbroek R. De betekenis van de flexibiliteit van het neuromotorische systeem voor de fysiotherapie. *Neuropraxis* 2009;3:61-65.
3. Bernstein N. *The coordination and regulation of movements*. Oxford: Pergamon Press; 1967.
4. Meulenbroek RGJ & Thomassen AJWM. Exploitation of elasticity as a biomechanical property in the production of graphic stroke sequences. *Acta Psychol* 1993;82:313-327.
5. Thelen E. Bernstein's legacy for motor development: How infants learn to reach. In M. L. Latash (Ed.), *Progress in motor control* (pp. 267-288). Human Kinetics; 1998.
6. Dounskaia N. The internal model and the leading joint hypothesis: implications for control of multi-joint movements. *Exp Brain Res* 2005;166:1–16.
7. Bernstein NA. On dexterity and its development. In M. Latash & M. T. Turvey (Eds.), *Dexterity and its development* (pp. 3–244). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum;1996.
8. Rosenbaum DA, Slotta JD, Vaughan J & Plamondon R. Optimal movement selection. *Psychol Res* 1991;2:86-91.
9. Vaughan J, Rosenbaum DA, Diedrich FJ & Moore CM. Cooperative selection of movements: The Optimal Selection model. *Psychol Res* 1996;58:254-273.
10. Zelaznik HN, Spencer RMC & Ivry RB. Dissociation of explicit and implicit timing in repetitive tapping and drawing movements. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 2002;28:575-588.
11. Swinnen SP & Wenderoth N. Two hands, one brain: Cognitive neuroscience of bimanual skill. *Trends Cog Sci* 2004;8:18-25.

12. Bosga J, Meulenbroek RGJ & Rosenbaum DA. Deliberate control of continuous motor performance. *J Mot Behav* 2005;37(6):437-46.
13. Bosga J, Meulenbroek RGJ & Cuijpers RH. Interpersonal movement coordination in jointly moving a rocking board. In N. Gantchev and G.N. Gantchev (Eds.), *Proceedings of Motor Control Conference MCC2007*, (pp. 36-43). Sophia: Academic Publishing House; 2007.
14. D'Avella A, Saltiel P & Bizzi E. Combinations of muscle synergies in the construction of a natural motor behavior. *Nat Neurosci* 2003;6:300-308.
15. Turvey MT. Action and perception at the level of synergies. *Hum Mov Sci* 2007;26: 657-697.

### **Bijschrift Figuren**

**Figuur 1.** Oscar Pistorius, de bekendste gehandicapte sporter ter wereld, is een mengvorm van mens en techniek.

**Figuur 2.** Bovenaanzicht van het schrijf experiment. De schrijfrichting komt overeen met de Y-as van een X, Y, Z coördinaten systeem. De deelnemers (N=12) moesten doorgaande lussen schrijven (guirlandes) die overeen kwamen met het voorbeeld op het LCD scherm. Het opgelegde tempo werd ook nog met een akoestisch signaal aangegeven. Iedere deelnemer voerden 100 trials uit. 51555 omwentelingen werden geanalyseerd.

**Figuur 3.** Zijaanzicht van het wiebelplank experiment. De deelnemers (N=28) moesten zijwaartse heen en weer bewegingen uitvoeren conform de opgelegde voorbeeld op een LCD schermen. Het vereiste tempo werd ook nog met een akoestisch signaal aangegeven. Iedere deelnemer voerden 108 trials van 30 seconden elk. 19734 omwentelingen werden geanalyseerd.

**Figuur 4.** Het lijndiagram in het bovenste paneel (Doelbewust) laat voor een willekeurige omwenteling (n) een amplitudefout (te groot) en frequentiefout (te hoog) zien en de correctie van de parameterfouten (amplitude en frequentie) in de daarop volgende omwenteling (n+1). Het lijndiagram in het onderste paneel (Biomechanisch) laat voor een willekeurige omwenteling (n) een amplitudefout (te groot) en frequentiefout (te laag) zien en de correctie van de parameterfouten (amplitude en frequentie) in de daarop volgende omwenteling (n+1).

**Figuur 5.** Dit kolomdiagram laat de incidentie (voorkomen) in percentages zien voor drie parameter veranderingen (Enkelvoudig, Doelbewust en Biomechanisch) in beide experimenten (Schrijftaak en Wiebelplanktaak).

**Tabel 1.** Individuele resultaten van de schrijf taak die laten zien hoe vaak elke deelnemer (PP) een biomechanische (BM in procenten) of doelbewuste (DB in procenten) strategie gebruikt en de Ratio variabele die een indicatie is voor de gevolgde strategie (zie resultaten tekst voor uitleg over Ratio; Gemiddelde=1,40; SD=0,10; Min=1,28; Max=1,59).

| <b>PP</b> | <b>BM (%)</b> | <b>DB (%)</b> | <b>Ratio</b> | <b>PP</b> | <b>BM (%)</b> | <b>DB (%)</b> | <b>Ratio</b> |
|-----------|---------------|---------------|--------------|-----------|---------------|---------------|--------------|
| pp1       | 41            | 30            | 1,37         | pp7       | 46            | 30            | 1,52         |
| pp2       | 40            | 30            | 1,32         | pp8       | 39            | 28            | 1,41         |
| pp3       | 39            | 27            | 1,44         | pp9       | 43            | 28            | 1,52         |
| pp4       | 41            | 30            | 1,35         | pp10      | 42            | 31            | 1,34         |
| pp5       | 45            | 34            | 1,31         | pp11      | 39            | 29            | 1,35         |
| pp6       | 43            | 27            | 1,59         | pp12      | 38            | 30            | 1,28         |

**Tabel 2.** Individuele resultaten van de wiebelplanktaak die laten zien hoe vaak elke deelnemer (PP) een biomechanische (BM in procenten) of doelbewuste (DB in procenten) strategie gebruikt en de Ratio variabele die indicatief is voor de gevolgde strategie (zie resultaten tekst voor uitleg over Ratio; Gemiddelde=2,18; SD=0,62; Min=1,02; Max=3,60).

| <b>PP</b> | <b>BM (%)</b> | <b>DB (%)</b> | <b>Ratio</b> | <b>PP</b> | <b>BM (%)</b> | <b>DB (%)</b> | <b>Ratio</b> |
|-----------|---------------|---------------|--------------|-----------|---------------|---------------|--------------|
| pp1       | 50            | 32            | 1,55         | pp15      | 41            | 38            | 1,07         |
| pp2       | 41            | 40            | 1,02         | pp16      | 56            | 22            | 2,53         |
| pp3       | 54            | 24            | 2,26         | pp17      | 66            | 21            | 3,16         |
| pp4       | 52            | 23            | 2,25         | pp18      | 63            | 24            | 2,63         |
| pp5       | 51            | 24            | 2,15         | pp19      | 54            | 28            | 1,93         |
| pp6       | 44            | 25            | 1,73         | pp20      | 54            | 27            | 1,98         |
| pp7       | 51            | 20            | 2,52         | pp21      | 54            | 30            | 1,80         |
| pp8       | 52            | 24            | 2,19         | pp22      | 62            | 28            | 2,20         |
| pp9       | 43            | 34            | 1,26         | pp23      | 64            | 22            | 2,97         |
| pp10      | 58            | 22            | 2,58         | pp24      | 64            | 22            | 2,95         |
| pp11      | 55            | 24            | 2,26         | pp25      | 65            | 18            | 3,60         |
| pp12      | 57            | 26            | 2,14         | pp26      | 59            | 27            | 2,19         |
| pp13      | 49            | 24            | 2,07         | pp27      | 59            | 20            | 2,97         |
| pp14      | 46            | 32            | 1,43         | pp28      | 52            | 29            | 1,75         |

**Tabel 3.** Resultaten voor de gezamenlijk uitgevoerde wiebelplanktaak die laten zien hoe vaak elk tweetal (Paar) een biomechanische (BM in procenten) of doelbewuste (DB in procenten) strategie gebruiken en de Ratio variabele die een indicatie is voor de gevolgde strategie (zie resultaten tekst voor uitleg over Ratio; Gemiddelde=1,93; SD=0,38; Min=1,56; Max=2,69).

| <b>Paar</b> | <b>BM (%)</b> | <b>DB (%)</b> | <b>Ratio</b> | <b>Paar</b> | <b>BM (%)</b> | <b>DB (%)</b> | <b>Ratio</b> |
|-------------|---------------|---------------|--------------|-------------|---------------|---------------|--------------|
| p1          | 49            | 30            | 1,67         | p8          | 48            | 29            | 1,64         |
| p2          | 47            | 30            | 1,57         | p9          | 57            | 29            | 1,95         |
| p3          | 47            | 25            | 1,90         | p10         | 60            | 24            | 2,53         |
| p4          | 45            | 23            | 1,98         | p11         | 58            | 29            | 1,99         |
| p5          | 48            | 29            | 1,66         | p12         | 62            | 23            | 2,69         |
| p6          | 48            | 30            | 1,61         | p13         | 59            | 24            | 2,46         |
| p7          | 49            | 27            | 1,79         | p14         | 52            | 33            | 1,56         |

### **Verklarende woordenlijst**

**Amplitude** = Bewegingsuitslag.

**Biomechanica** = Het toepassen van de natuurkundige mechanica bij het bestuderen van bewegingen van levende wezens.

**Chaostheorie** = Populaire benaming voor het gebied binnen de wiskunde dat het gedrag van bepaalde dynamische systemen (systeemtheorie) onderzoekt.

**Exploitatie** = Uitbuiten.

**Frequentie** = Tempo van beweging.

**Hypothesis** = In de wetenschap is een hypothese een stelling die (nog) niet bewezen is en dient als het beginpunt van een theorie, een verklaring of een afleiding.

**Omwenteling** = Één keer dat een voorwerp om een as draait.

**Paradigma** = Samenhangend stelsel van modellen en theorieën.

**Parameter** = Een onbekende of variabele (in dit artikel amplitude of frequentie) die in de uiteindelijke toestand van een systeem een waarde toegekend krijgt.

**Prioriteren** = Bepalen wat het belangrijkste is en dus het eerst moet gebeuren.

**Redundant** = Overvloedig.



**Torque** = Het Engelse woord voor impuls is *momentum*, niet te verwarren met het Nederlandse woord moment, dat in het Engels *torque* heet (en daarmee lijkt op het Nederlandse woord torsie, dat het gevolg kan zijn van een moment).

**Vrijheidsgraad** = *Degree of freedom*; Onafhankelijke parameter waarmee een aspect van een fysisch systeem wordt vastgelegd.

**Zelforganisatie** = Proces waarbij in een chaotisch systeem spontaan structuren ontstaan.