

VU Research Portal

Stabiliteit in menselijk bewegen. Deel 3: een dynamisch perspectief

van Dieen, J.H.

published in

Physios

2012

[Link to publication in VU Research Portal](#)

citation for published version (APA)

van Dieen, J. H. (2012). Stabiliteit in menselijk bewegen. Deel 3: een dynamisch perspectief. *Physios*, 4(4), 42-48.

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

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

E-mail address:

vuresearchportal.ub@vu.nl

Stabiliteit in menselijk bewegen

*Deel 3: een dynamisch perspectief**

Jaap van Dieën

Prof. dr. J. H. van Dieën, Interfacultair Onderzoeksinstituut MOVE, Faculteit der Bewegingswetenschappen, Vrije Universiteit Amsterdam

Samenvatting

Dit artikel beschrijft de bijdragen van feedback en anticipatie aan de controle van het menselijk bewegen. Feedbackcontrole berust op de waarneming van positie en snelheid van bewegen door sensoren zoals de spierspoeltjes, verwerking van de informatie in het zenuwstelsel en spieractivatie ter correctie van geconstateerde afwijkingen van de beoogde toestand. Wanneer een verstoring verwacht wordt en het effect van de verstoring voorspelbaar is, treedt anticipatie op in de vorm van activatie van die spieren die de verstoring tegengaan. Bij minder voorspelbare verstoringen bestaat anticipatie uit cocontractie van spieren. Regeling van de stabiliteit van houding en beweging op basis van deze mechanismen heeft als voordeel dat spieren alleen geactiveerd worden wanneer dat nodig is. Bovendien kan de spieractiviteit precies worden aangepast aan de grootte en richting van optredende verstoringen. De verschillende mechanismen kunnen hierbij elkaar aanvullen en compenseren.

Leerdoelen

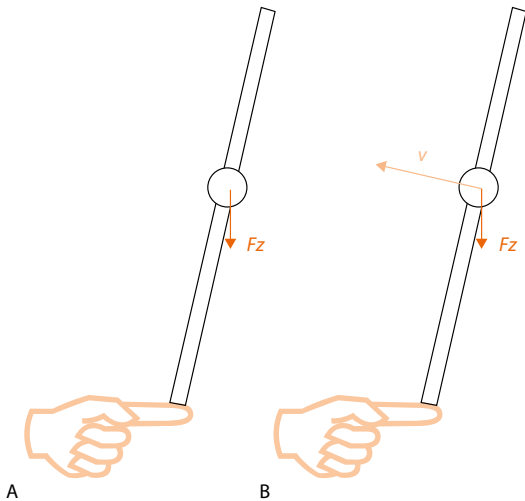
Na het bestuderen van dit artikel:

- ▶ kunt beschrijven wat de bijdrage is van feedback aan de controle van gewrichtspositie en -beweging;
- ▶ heeft u inzicht in het effect van de gain en tijdvertraging van een feedbacklus op de controle van gewrichtspositie en -beweging;
- ▶ kunt u beschrijven wat de belangrijkste eigenschappen zijn van biologische sensoren die een rol spelen in de feedbackcontrole van gewrichtspositie en -beweging.
- ▶ kent u de belangrijkste neurale mechanismen die een rol spelen in de feedbackcontrole van gewrichtspositie en -beweging.
- ▶ kunt u de rol beschrijven van anticipatie in de controle van gewrichtspositie en -beweging.

Inleiding

Aan het einde van het vorige artikel (in *Physios* 2012, nr. 3) werden de beperkingen van een statische benadering van de stabiliteit van menselijke houding en beweging besproken. Hierin kwam naar voren dat enige cocontractie van spieren ter weerszijden van een gewricht veelal noodzakelijk is om de gewrichtsstand te handhaven of de gewrichtsbeweging uit te voeren zoals gepland. Dat komt doordat er onvermijdelijk minimale mechanische verstoringen optreden. In meer biomechanische taal: het is noodzakelijk het gewricht te stabiliseren, waarvoor voldoende stijfheid en demping noodzakelijk zijn. De controle over bewegingen kan verder worden opgevoerd door het niveau van cocontractie van de spieren rond het gewricht te verhogen. Hierdoor wordt de snelheid van herstel na een verstoring (*performance*) groter, evenals de maximale verstoring die kan worden weerstaan (*robustness*). Cocontractie is echter energetisch inefficiënt en bovendien belemmeren een hoge mate van stijfheid en demping van de spieren het bewegen. Gelukkig beschikt de mens over aanvullende mechanismen om houding en beweging te controleren, namelijk feedbackcontrole en anticipatie. Het derde deel van deze reeks gaat uitgebreid in op hoe deze mechanismen bijdragen aan stabiliteit.

* Dit artikel is een vervolg op de artikelen 'Stabiliteit deel 1: een mechanisch perspectief' en 'Stabiliteit deel 2: een biologisch perspectief', verschenen in *Physios* 2012, nr. 2 resp. 3.



Figuur 1 Een stok wordt gebalanceerd op de top van een vinger. Het zwaartepunt van de stok ligt rechts van de vingertop en de stok heeft een snelheid van 0 (A). Om de stok in balans te houden moet de vinger naar rechts worden bewogen. Op een ander moment heeft de stok dezelfde positie, maar een snelheid (v) naar links (B). Als de snelheid laag is moet de hand nog steeds naar rechts bewegen, maar als de stok snel naar links beweegt, moet de hand ook naar links bewegen om de stok in balans te houden. (Naar Reeves et al., 2011.)

Feedbackcontrole

Feedbackcontrole is de actieve correctie van afwijkingen van de geplande houding of beweging op basis van de waarneming van deze afwijkingen. Dit betekent dat de actuele toestand van het gewricht door sensoren wordt waargenomen, dat deze informatie vervolgens wordt overgebracht naar het centraal zenuwstelsel (CZS) en dat het CZS op basis van deze informatie de aansturing van de spieren aanpast. Door dit proces wordt het verschil tussen geplande en daadwerkelijke toestand zoveel mogelijk geminimaliseerd. Zoals uit figuur 1 is op te maken moet er informatie over zowel positie als snelheid beschikbaar zijn om een segment te stabiliseren ten opzichte van de zwaartekracht. Om deze reden wordt expliciet onderscheid gemaakt in positiefeedback en snelheidsfeedback.

Het voordeel van feedbackcontrole is dat (extra) spieractivatie pas optreedt als deze nodig is, namelijk in reactie op een verstoring. Dit in tegenstelling tot stabilisering door middel van cocontractie, waarbij de spieractivatie continu hoog genoeg moet zijn om (eventuele) verstoringen tegen te gaan. Het nadeel van feedbackcontrole is dat de reactie niet onmiddellijk na de verstoring aanwezig is, maar pas na enige tijd optreedt. Dat is anders dan het effect van de stijfheid

en demping van ligamenten en reeds actieve spieren, waarbij geen tijd verloopt tussen het optreden van de verstoring en het genereren van krachten en momenten die de verstoring tegengaan.

Feedbacklus

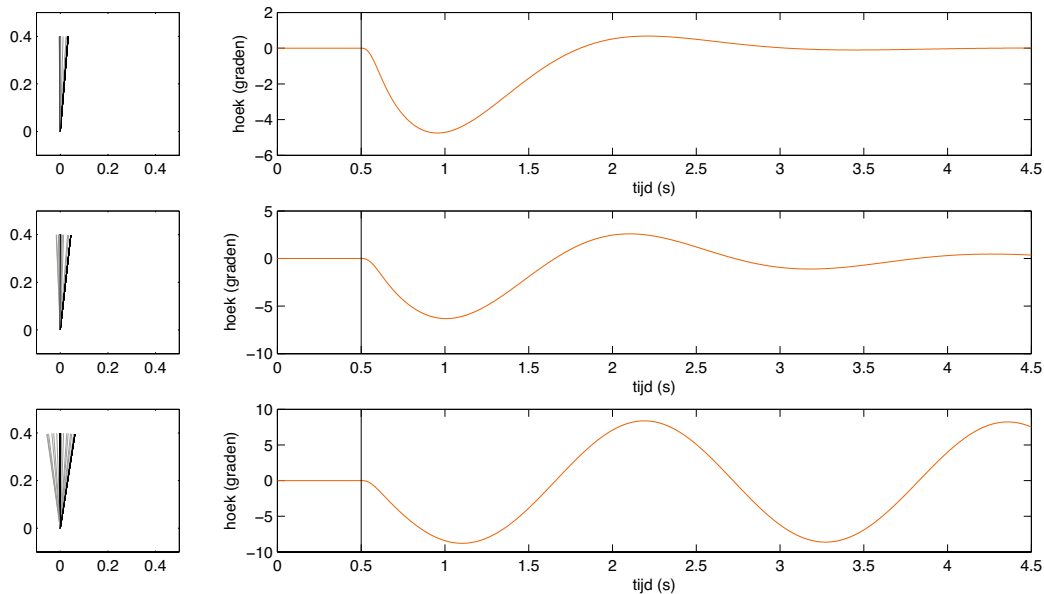
Ongeacht de context is er bij feedbackcontrole altijd sprake van de zogenaamde feedbacklus. Een feedbacklus bestaat ten minste uit een sensor om het te controleren proces te meten, een communicatielijn om de informatie van de sensor over te brengen naar een 'controller', die vervolgens correcties plant en deze laat uitvoeren door een 'actuator'. Bij de controle van het menselijk bewegen zijn mechanoreceptoren en het visuele en vestibulaire systeem de sensoren, is het perifere zenuwstelsel de communicatielijn, is het centrale zenuwstelsel de controller en zijn de spieren de effectoren.

Een belangrijk kenmerk van een feedbacklus is de vertraging die optreedt tussen verstoring en correctie. Deze vertraging ontstaat door:

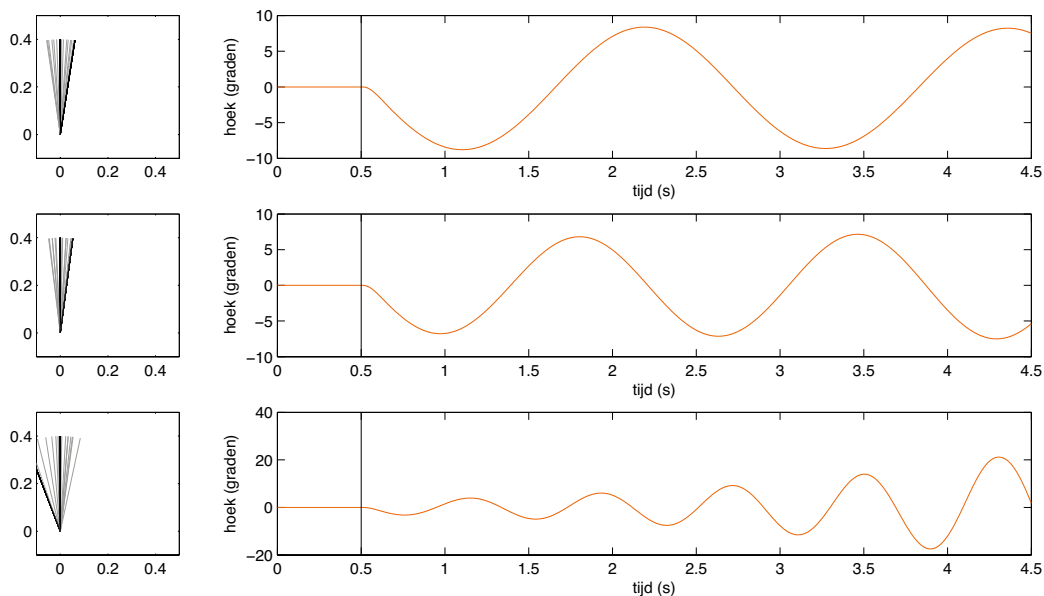
- de tijd nodig is om informatie van sensoren in de periferie over te brengen naar het CZS (zenuwgeleiding);
- deze informatie te verwerken en een respons te genereren;
- de correctie in aansturing naar de spieren over te brengen (zenuwgeleiding);
- de tijd die nodig is om spierkracht te genereren.

De effecten van stijfheid en demping op een verstoring zijn in het eerste artikel van deze serie besproken. In figuur 2 worden de effecten van de vertraging van een feedbacklus getoond in reactie op een inwerkende verstoring. De figuur laat duidelijk zien dat de snelheid van herstel (performance) afneemt bij een toenemende vertraging. Als de vertraging nog groter wordt, is het systeem niet langer stabiel.

Een ander belangrijk kenmerk van een feedbacklus is de feedback-*gain*. Dit begrip staat voor de verhouding tussen de grootte van de correctie en de afwijking in de toestand waar die correctie op volgt. De feedback-*gain* voor positiefeedback kan bijvoorbeeld uitgedrukt worden als de toename in spierkracht per centimeter afwijking in spierlengte (of per graad afwijking in gewrichtshoek). De feedbackgain van positiefeedback is dus analoog aan de stijfheid. In het eerste artikel in deze reeks werd spierstijfheid immers gedefinieerd als



Figuur 2 De reactie van een omgekeerde slinger gestabiliseerd door positie- en snelheidsfeedback op een kortdurende kleine verstoring die optreedt op $t=0,5$ s (zwarte verticale lijn in panelen aan de rechterkant). De vertraging van de feedback neemt toe van de bovenste naar de onderste panelen. De panelen links illustreren de stand van de slinger in de ruimte, waarbij de zwarte lijnen de onverstoorde toestand en de maximale uitwijking weergeven en de grijze lijnen de oriëntaties op willekeurige tijdstippen na de verstoring. De panelen rechts geven de hoek van de slinger met de verticaal als functie van de tijd weer. Merk op dat de schaling van de y-as van de panelen rechts verschillend is.



Figuur 3 De reactie van een omgekeerde slinger gestabiliseerd door positie- en snelheidsfeedback op een kortdurende kleine verstoring die optreedt op $t=0,5$ s (zwarte verticale lijn in panelen aan de rechterkant). Anders dan in figuur 2 is de vertraging constant (gelijk aan die in het onderste paneel van figuur 2), maar nu neemt de feedbackgain toe van de bovenste naar de onderste panelen. De panelen links illustreren de stand van de slinger in de ruimte, waarbij de zwarte lijnen de onverstoorde toestand en de maximale uitwijking weergeven en de grijze lijnen de oriëntaties op willekeurige tijdstippen na de verstoring. De panelen rechts geven de hoek van de slinger met de verticaal als functie van de tijd weer. Merk op dat de schaling van de y-as van de panelen rechts verschillend is.

de verandering in kracht in de spier gedeeld door de lengteverandering in die spier als gevolg van de verstoring. Voor snelheidsfeedback is de gain analoog aan

de demping. Het verschil met stijfheid en demping is, zoals gezegd, dat de verandering in kracht bij feedback pas enige tijd na de verstoring optreedt.

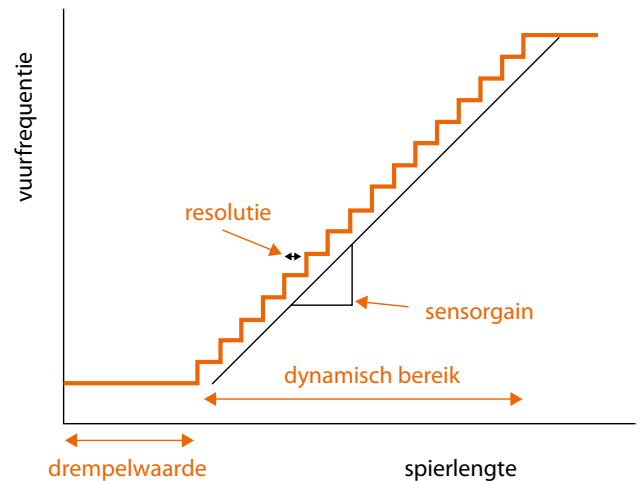
Figuur 3 laat zien dat een toename van de feedbackgain in enige mate de vertraging kan compenseren (middelste paneel). Gegeven een bepaalde vertraging, is er echter een maximale feedbackgain die nog stabiliserend kan werken. Dit is te verklaren doordat een toename van de feedbackgain voor positiefeedback overeenkomt met een toename van de stijfheid. In het eerste artikel van deze serie is al beschreven dat verplaatsingen als gevolg van een verstoring een hogere frequentie zullen krijgen wanneer de stijfheid van stabiliserende structuren hoger wordt (zie figuur 4 in deel 1). Bij een hogere stijfheid zullen correcties die met een bepaalde vertraging worden uitgevoerd door de hogere frequentie op een gegeven moment 'te laat' zijn en juist de verplaatsingen versterken in plaats van tegengaan (onderste paneel van figuur 3).

Belang van sensoren voor feedbackcontrole

Een voorwaarde voor feedbackcontrole is dat de toestand van het te controleren systeem kan worden gemeten. Voor de controle van het menselijk bewegen is dus de proprioceptie, de waarneming van houding en beweging, cruciaal. Het menselijk lichaam bevat verschillende typen mechanoreceptoren in verschillende weefsels en structuren, die proprioceptieve informatie kunnen verschaffen. Over het belang van de verschillende typen sensoren is veel gediscussieerd. Sommige auteurs stelden dat receptoren in de spieren (spierspoeltjes) het belangrijkste zijn,^{2,3} anderen benadrukten de receptoren in de gewrichten,⁴ en weer anderen de receptoren in de huid.⁵ Inmiddels is er een redelijke consensus over het idee dat de spierspoeltjes de belangrijkste bron van proprioceptieve informatie vormen,⁶ waarbij de overige receptoren als aanvullend worden beschouwd. Hierbij moet worden opgemerkt dat dit gebaseerd is op experimenten gericht op het schatten van de bijdrage van deze receptoren aan de bewuste gewaarwording van houding en beweging. De resultaten daarvan zijn niet noodzakelijk geldig voor de bijdrage aan bewegingssturing waarbij juist de onbewuste registratie een belangrijke rol speelt.

Spierspoeltjes

Spierspoeltjes leveren zowel informatie over de spierlengte (via type-II-afferenten) als over de snelheid van de spierlengteverandering (via type-Ia-afferenten) en dus indirect over de gewrichtsstand en de hoeksnelheid van bewegen.

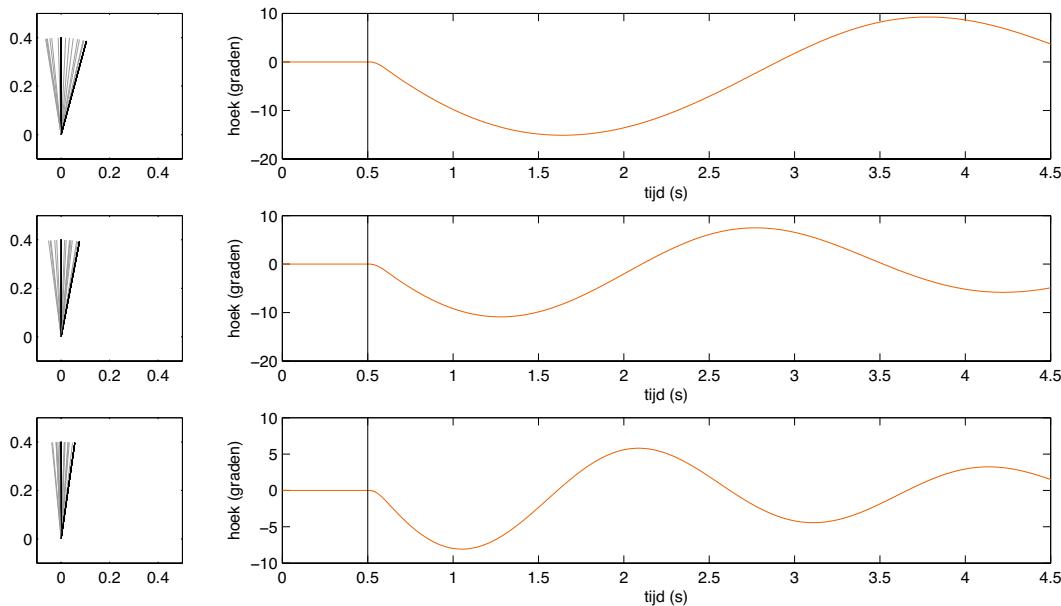


Figuur 4 Schematische input-outputrelatie van een sensor, in dit geval een sensor die de spierlengte waarneemt. Het dynamisch bereik is het bereik van de input (bijvoorbeeld spierlengte) dat de sensor codeert in de output (de vuurfrequentie van het afferente neuron). De sensorgain is de gemiddelde toename in vuurfrequentie per eenheid toename van spierlengte. De drempelwaarde is de spierlengte boven het rustniveau waarbij de sensor gaat vuren. De resolutie is 1 gedeeld door de toename van de spierlengte die de vuurfrequentie met 1 eenheid (puls per seconde) doet toenemen en die bepaalt dus hoe precies de verschillen in spierlengte kunnen worden waargenomen.

Zoals alle perifere mechanoreceptoren dragen de spierspoeltjes informatie over aan het ruggenmerg in de vorm van verschillen in vuurfrequentie van de afferente zenuwen. Een groot deel van de afferente zenuwen van de spierspoeltjes maakt in het ruggenmerg direct contact met de alfa-motorneuronen. Deze feedbacklus vormt de basis van de bekende rekreflex. Omdat het aantal synapsen een belangrijke factor is in de vertraging die optreedt in de transmissie van informatie in het zenuwstelsel, leveren deze spierspoeltjes de snelst mogelijke feedback. De vertraging is dan minimaal zo'n 25 ms, waarbij de vertraging die optreedt tussen elektrische activatie en krachtleverantie in de spier niet is meegenomen. De vertraging is groter voor meer distaal gelegen spieren omdat de afstand tot het ruggenmerg langer is en er dus meer tijd nodig is voor de afferente en efferente zenuwgeleiding.

Kwaliteit van de sensor

Behalve de vertraging, die samenhangt met de transmissie en verwerking van sensorische informatie, is de kwaliteit van de sensor zelf een belangrijke factor voor de kwaliteit van de feedbackcontrole. Figuur 4 illustreert de belangrijkste karakteristieken van een sensor die spierlengte registreert. Van belang is dat de karakter-



Figuur 5 De reactie van een omgekeerde slinger, gestabiliseerd door snelle en langzame positie- en snelheidsfeedbacklussen op een kortduurende kleine verstoring die optreedt op $t=0,5$ s (zwarte verticale lijn in panelen aan de rechterkant). Alleen de gain van de trage feedbacklus neemt toe van de bovenste naar de onderste panelen. Te zien is dat daardoor de slinger sneller wordt gestabiliseerd. De panelen links illustreren de stand van de slinger in de ruimte, waarbij de zwarte lijnen de onverstoorde toestand en de maximale uitwijking weergeven en de grijze lijnen de oriëntaties op willekeurige tijdstippen na de verstoring. De panelen rechts geven de hoek van de slinger met de verticaal als functie van de tijd weer. Merk op dat de schaling van de y-as van de panelen rechts verschillend is.

ristieken van de spierspoeltjes kwalitatief minder worden als gevolg van veranderingen in het biochemisch milieu in een spier die zijn geassocieerd met vermoeidheid en pijn.^{7,8} De karakteristieken van mechanoreceptoren in ligamenten blijken te verslechteren bij langdurige rek.⁹ Deze veranderingen in de sensor-eigenschappen lijken te bestaan uit een verhoging van de sensorgain en de vuurdrempel en een verlaging van de resolutie en het dynamisch bereik. Dit zou de basis kunnen vormen voor het afnemen van de accuratesse van de proprioceptie bij vermoeidheid,^{10,11} en die ook bij patiënten met pijnklachten wordt gevonden.^{12,13,14,15}

Visuele en vestibulaire informatie

Behalve perifere (spinale) feedback op basis van proprioceptieve informatie speelt ook feedback op basis van vestibulaire en visuele informatie een belangrijke rol bij de sturing van houding en beweging.¹⁶ Deze feedbacklussen maken gebruik van neurale paden in het brein (meer synapsen) en zijn daardoor veel trager (met vertragingen van meer dan 100 ms). De verwachting is dus dat deze bijdrage niet erg effectief is. Niettemin blijkt het gebruik van tragere feedback parallel aan snelle feedback de controle te kunnen verbeteren, zoals in figuur 5 wordt geïllustreerd. Visuele en vestibulaire feedback kunnen tot op zekere hoogte ook het ontbre-

ken van proprioceptieve feedback compenseren. Van een patiënt met totale uitval van de proprioceptie is bekend dat hij dankzij visuele compensatie, weliswaar met veel inspanning en met lage snelheid, toch basale bewegingstaken kan uitvoeren.¹⁷

Centrale verwerking van informatie

Vestibulaire en visuele informatie wordt verwerkt in hogere centra van het CZS. Dat levert weliswaar een grotere vertraging op, maar heeft als voordeel dat de informatie op een geavanceerdere manier 'geïnterpreteerd' kan worden. Vestibulaire en visuele informatie wordt hierbij geïntegreerd met proprioceptieve informatie.^{16,18,19} Centrale verwerking van informatie biedt veel meer flexibiliteit dan eenvoudige perifere feedbacklussen (reflexen). Uit onderzoek blijkt dat de verschillende informatiebronnen in het CZS worden gewogen op basis van hun betrouwbaarheid. Dit heeft bijvoorbeeld tot gevolg dat proprioceptieve informatie over de stand van de enkel minder wordt gebruikt wanneer iemand op een instabiele ondergrond staat, bijvoorbeeld een oefentol.²⁰ Ook blijken individuen met rugpijn de proprioceptieve informatie van spierspoeltjes in de rugspieren minder te gebruiken,²¹ mogelijk omdat deze informatiebron als minder betrouwbaar wordt geclassificeerd.

Rol van spieren als actuatoren

De spieren vormen als de actuatoren de laatste schakel in de feedbackcontrole, zij voeren de geplande correcties uit. Houding en beweging worden door sensoren waargenomen. Afwijkingen van geplande houding en beweging worden door het CZS geconstateerd en omgezet in een commando om correcties uit te voeren. Deze correcties komen tot stand door de kracht die de spieren op het lichaamsdeel uitoefenen. Daardoor zijn de spieren mede bepalend voor de vertragingen en gains van de besproken feedbacklussen. De spieren dragen bij aan de vertraging omdat er tijd zit tussen de excitatie van de spier (zichtbaar als het ontstaan van een elektromyografisch signaal) en het uiteindelijke mechanisch effect van de spiercontractie, de uitoefening van kracht op het bot. Deze vertraging wordt de *electromechanical delay* (EMD) genoemd en is afhankelijk van een scala aan factoren. Zo is de EMD kleiner als het activatieniveau hoger is en als de spierlengte groter is op het moment dat de spier extra wordt geactiveerd. De EMD is ook kleiner naarmate de stijfheid van de spierpees hoger is.^{22,23,24,25,26}

Voor het functioneren van de feedbackcontrole is het natuurlijk ook van belang hoe snel de spierkracht kan opbouwen en hoeveel kracht de spier überhaupt kan leveren. Daarom spelen factoren zoals de dwarsdoorsnede en het vezeltype van de spier een rol. De maximale spierkracht en de snelheid waarmee een spierkracht kan opbouwen hangen overigens sterk met elkaar samen,²⁷ en beide worden door krachttraining bevorderd.

De eigenschappen van elementen in een feedbacklus beïnvloeden elkaar: hoe slechter de kwaliteit van de sensorische informatie of hoe trager deze informatie wordt verwerkt, hoe groter de correcties die na een gegeven verstoring moeten worden gedaan en dus hoe meer spierkracht daarvoor nodig is en/of hoeveel minder tijd er beschikbaar is om de benodigde kracht te genereren.

Controle op basis van anticipatie

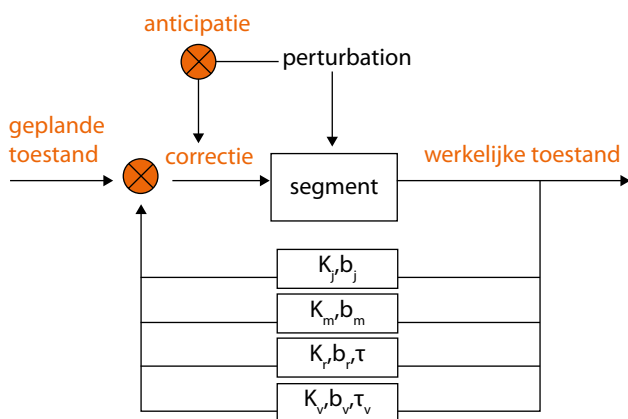
Sommige verstoringen van houding en beweging zijn voorspelbaar. Wanneer iemand bijvoorbeeld in rechtopstaande houding een arm heft, verstoort dit het evenwicht van de romp en het hele lichaam. Omdat deze verstoring door het individu zelf wordt geïnitieerd, is specifieke anticipatie hierop mogelijk en het is

aangetoond dat in een dergelijke situatie de spieren die deze verstoring tegengaan – de rompextensoren en de kuitspieren – geactiveerd worden vóór de spieren die de arm heffen. Bij deze anticipatie treedt een kleine achterwaartse beweging op van het hele lichaam. De verplaatsing van het zwaartepunt die zou optreden door de armheffing, wordt door deze achterwaartse beweging bij voorbaat teniet gedaan.^{28,29,30} Deze acties worden vaak aangeduid met de term ‘anticipatoire posturale adaptatie’ (APA).

APA's zijn natuurlijk alleen mogelijk als de grootte en de richting van de verwachte mechanische verstoring kunnen worden ingeschat. Niettemin treden ook specifieke APA's op wanneer de grootte of richting van de verstoring nog niet bekend is. Een voorbeeld hiervan is een actie die afhankelijk is van een extern object waarvan de eigenschappen pas bekend worden tijdens de actie, zoals bij het optillen van een doos.^{31,32,33,34} Wanneer iemand een doos moet optillen, kan hij de massa en de lokatie van het zwaartepunt van de doos natuurlijk op basis van visuele informatie inschatten, maar hij ervaart de werkelijke massa en de positie van het zwaartepunt pas als de doos van de grond is. Niettemin gebruiken we in dergelijke situaties APA's op basis van eerder ervaringen, waarschijnlijk vanwege de efficiëntie hiervan. Verkeerde voorspellingen kunnen echter leiden tot verlies van de controle over de beweging.^{35,36} Wanneer iemand (bewust) onzeker is over de eigenschappen van een object,³¹ of wanneer de gevolgen van een vergissing ernstig kunnen zijn,³⁷ worden de APA's onderdrukt en wordt in plaats daarvan cocontractie gebruikt als voorbereiding op een verwachte verstoring.

Complementariteit van stabiliserende systemen

In het menselijk bewegingsapparaat werken stijfheid en demping van gewrichtsstructuren en actieve spieren, parallel aan verschillende feedbacklussen om het effect van verstoringen op houding en beweging te beperken. Daarnaast wordt anticipatie gebruikt om de effecten van verwachte verstoringen tegen te gaan (figuur 6). Daarom zijn voor de stabiliteit en de kwaliteit van de controle van houding en beweging zowel de passieve gewrichtsstructuren en de spieren als het perifere en centrale zenuwstelsel van belang. In een beroemde en vaak geciteerde serie artikelen over de stabiliteit van de wervelkolom heeft Panjabi benadrukt dat deze



Figuur 6 Schematische representatie van een aantal parallelle mechanismen om houding en beweging te controleren, bestaand uit stijfheid en demping van gewrichtsstructuren (K_j, b_j) en spieren (K_m, b_m), reflexfeedback (K_r, b_r, τ) en visuele feedback (K_v, b_v, τ_v) alsmede anticipatoire correcties. De geplande toestand wordt verstoord, resulterend in een verstoorde, werkelijke toestand, die gecorrigeerd wordt door een verandering in het moment door spieren en gewrichtsstructuren uitgeoefend op het lichaamsdeel.

parallele systemen niet geïsoleerd moeten worden beschouwd.^{38,39} Het functioneren van het bewegingsapparaat hangt af van al deze systemen en beperkingen in één systeem kunnen worden gecompenseerd door andere. Hoewel hieruit veel geciteerd wordt, wordt de boodschap van deze artikelen nog te weinig ter harte genomen, in het onderzoek noch in de klinische praktijk. In deel 4 van deze serie zal verder worden ingegaan op de interactie van deze systemen en de gevolgen hiervan in de context van aandoeningen van het bewegingsapparaat.

Literatuur

- 1 Reeves NP, Narendra KS, Cholewicki J. Spine stability: lessons from balancing a stick. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 2011;26(4):325-30.
- 2 Goodwin GM, McCloskey DI, Matthews PB. The contribution of muscle afferents to kinaesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralysing joint afferents. *Brain* 1972;95(4):705-48.
- 3 Goodwin GM, McCloskey DI, Matthews PB. The persistence of appreciable kinaesthesia after paralysing joint afferents but preserving muscle afferents. *Brain Res* 1972;37(2):326-9.
- 4 Ferrell WR, Gandevia SC, McCloskey DI. The role of joint receptors in human kinaesthesia when intramuscular receptors cannot contribute. *J Physiol* 1987;386:63-71.
- 5 Edin BB, Abbs JH. Finger movement responses of cutaneous mechanoreceptors in the dorsal skin of the human hand. *J Neurophysiol* 1991;65(3):657-70.
- 6 Smetacek V, Mechsner F. Making sense. *Nature* 2004;432(7013):21.
- 7 Pedersen J, Ljubisavljevic M, Bergenheim M, Johansson H. Alterations in information transmission in ensembles of primary muscle spindle afferents after muscle fatigue in heteronymous muscle. *Neuroscience* 1998;84(3):953-9.

Voor de volledige literatuurlijst wordt verwezen naar www.physios.nl.

Kernpunten

- Het verhogen van stijfheid en demping door cocontractie is energetisch inefficiënt en in dynamische situaties is een hoge stijfheid ongewenst.
- Feedback en anticipatie spelen daarom een belangrijke rol bij de controle van houding en beweging.
- Feedback is de correctie van houding en beweging op basis van de waarneming van afwijkingen van de geplande toestand.
- Feedback vereist waarneming van houding en beweging met behulp van sensoren, overdracht van deze informatie naar het centraal zenuwstelsel, waar de activatie van spieren wordt aangepast om correcties te genereren.
- De gains van positieve feedback en van snelheidsfeedback zijn analoog aan stijfheid en demping van actieve spieren.
- De kwaliteit van de feedbackcontrole wordt in belangrijke mate bepaald door de vertraging die in de feedbacklus optreedt.
- Feedbackcontrole van houding en beweging is gebaseerd op geïntegreerde proprioceptieve, visuele en vestibulaire informatie.
- Anticipatie op verstoringen van houding en beweging bestaat uit specifieke activatie van spieren wanneer de verstoring voorspelbaar is en uit cocontractie wanneer deze niet of minder voorspelbaar is.
- Intrinsieke stijfheid en demping van gewrichtsstructuren en actieve spieren, in combinatie met feedbackcontrole op basis van diverse sensorische systemen en anticipatie, vormen parallele controlemechanismen die elkaar onderling kunnen compenseren.

Relevante artikelen in het Physiosarchief

- ▶ Dieën J van. Stabiliteit in menselijk bewegen. Deel 1: een mechanisch perspectief. *Physios* 2012-2: 4-12.
- ▶ Dieën J van. Stabiliteit in menselijk bewegen. Deel 2: een biologisch perspectief. *Physios* 2012-3: 37-44.

www.physios.nl

- ▶ De volledige literatuurlijst