



Auteur(s): dr. D. Kistemaker
Titel: Minimalisatie van energie tijdens bewegen
Jaargang: 28
Maand: december
Jaartal: 2010

Deze online uitgave mag, onder duidelijke bronvermelding, vrij gebruikt worden voor (para-) medische, informatieve en educatieve doeleinden en ander niet-commercieel gebruik.

Zonder kosten te downloaden van: www.versus.nl

Minimalisatie van energie tijdens bewegen

dr. D.A. Kistemaker

*Dinant Kistemaker
Motor Control Lab
University of Western Ontario
London, Ontario, Canada*

Inleiding

Het vakgebied van de bewegingssturing houdt zich bezig met de vraag hoe het centrale zenuwstelsel (CZS) positie en bewegingen stuurt. Een vraag die met name moeilijk te beantwoorden is vanwege de *kinematische* en *mechanische redundantie* van het spierskeletstelsel.^{Bernstein, 1967.} Kinematische redundantie betekent strikt genomen dat een systeem meer vrijheidsgraden heeft dan een doelhouding of het doel van een beweging. Ons skeletstelsel kent heel veel botten en gewrichten en heeft daarmee dus heel veel vrijheidsgraden. Een voorbeeld van kinematische redundantie zien we bijvoorbeeld bij het aanwijzen van iets met het puntje van onze vinger op een computerscherm: je kunt dat in principe doen met oneindig veel combinaties van scapulahoek, schouderhoek, ellebooghoek, polshoek, etc., zolang je vingertop zich maar op de juiste plek bevindt. Een ander voorbeeld is het reiken naar een kopje op de tafel. We kunnen dit op allerlei manieren doen: door onze hand in een rechte lijn naar het kopje te laten bewegen of via een willekeurig ander pad. Het fenomeen dat je een taak op oneindig veel manieren kan uitvoeren, wordt *kinematische redundantie* genoemd. Mechanische redundantie (binnen het spierskeletstelsel) betekent dat je rond een gewricht meer spieren hebt dan nodig voor een gegeven doel-moment. Dus, een gegeven benodigd moment rond een gewricht legt niet precies vast hoeveel kracht de spieren rond dat gewricht moeten leveren. Een voorbeeld: Stel je wilt een kopje vasthouden met een horizontaal gehouden onderarm. Om ervoor te zorgen dat het kopje plus onderarm niet gaat bewegen moet er een flecterend moment rond de elleboog gegenereerd worden. Stel dat het moment van het kopje plus onderarm precies 1 Nm is. Als er maar één spier over het ellebooggewricht zou lopen, zijn we snel klaar. Deze spier moet dan precies -1Nm leveren. Als je twee spieren hebt rond een gewricht (in werkelijkheid hebben bijna alle gewrichten veel meer dan twee spieren) is het aantal combinaties van de spiermomenten die samen precies -1Nm opleveren oneindig. Het fenomeen dat een doel-moment op oneindig veel manieren kan worden bewerkstelligd, wordt *mechanische redundantie* genoemd.

Ondanks dat een bepaalde beweging op oneindig veel manieren kan worden uitgevoerd, zowel qua kinematica als spieraansturing, laat experimenteel onderzoek zien dat wanneer je een proefpersoon, bijvoorbeeld, reikbewegingen laat uitvoeren, deze dat altijd op nagenoeg identieke wijze doet. Nog interessanter is het dat wanneer je meerdere proefpersonen meet, zij het allemaal op ongeveer dezelfde manier doen. Dit geldt zowel voor de kinematica (b.v. gemeten in termen van hoekuitslagen als functie van de tijd) als spieraansturing (b.v. gemeten in termen van electromyografie; EMG). Dus, ondanks de oneindige hoeveelheid manieren om een bepaald doel te bereiken, blijkt het CZS er in het algemeen voor te kiezen dit maar op één manier te doen. De vraag hoe en op basis waarvan het CZS deze beweging/spieraansturing "kiest", zijn twee hoofdvragen binnen bewegingssturing.

Hoewel het moeilijk te begrijpen is hoe het CZS het spierskeletstel aanstuurt, zijn er uiteraard genoeg redenen te bedenken waarom het handig is dat wij redundantie in ons spierskeletstelsel hebben. Uiteraard kunnen we daardoor hele complexe bewegingen uitvoeren. Ook komt het bijvoorbeeld goed van pas als een gewricht pijn doet: je kan ook je kopje oppakken zonder rotatie van het ellebooggewricht. En mensen zijn verbluffend goed in staat heel snel hun houding/bewegingspatroon en spiersturing aan te passen aan pijn. Een andere reden waarom gedacht wordt dat het handig is om redundantie te hebben is minimalisatie van energiekosten; het onderwerp van dit artikel.

Er wordt in de literatuur vaak gesuggereerd dat het CZS bewegingen zo aanstuurt dat energie wordt geminimaliseerd. Echter, hiervoor is geen direct bewijs. In dit artikel wordt een recent onderzoek besproken dat op basis van experimenten en computermodellen probeert een antwoord te krijgen op deze vraag. Kistemaker et al., 2010

Methoden

In alle experimenten werd aan proefpersonen gevraagd reikbewegingen te maken terwijl zij het handvat van een robotarm vasthielden (zie figuur 1). Deze robotarm kan heel nauwkeurig de positie van het handvat meten en de kracht die de persoon op het handvat uitoefent. Daarnaast kan de robotarm, aangestuurd door een computer, zelf ook krachten leveren op de hand van de proefpersoon. De arm van de proefpersoon werd ondersteund door een soort luchtkussens met gaatjes (het principe van de hovercraft) dat ervoor zorgde dat de proefpersonen nagenoeg wrijvingsloos hun arm in het horizontale vlak konden bewegen. Het zicht werd geblokkeerd door een spiegel die vlak boven de robotarm was opgehangen. Daarnaast werd het experiment in het donker uitgevoerd. Recht boven de spiegel en net boven het hoofd van de proefpersoon, was een lcd scherm opgehangen (niet opgenomen in figuur 1). Via dit scherm was het mogelijk om objecten in de spiegel te projecteren die de proefpersonen konden zien.



Figuur 1 Experimentele opstelling, zie tekst.

Aan de proefpersonen werd gevraagd om van de startpositie, die als rode cirkel werd geprojecteerd (zie figuur 1), te bewegen naar de 30 cm verder gelegen doelpositie (groene cirkel). Alleen als het robohandvat zich in één van de cirkels bevond werd een klein puntje op de spiegel geprojecteerd die de positie van het handvat aangaf. Dus tijdens de beweging zelf kon de proefpersoon niet zien waar het handvat zich bevond. Wanneer de proefpersoon het doel bereikt had, versprong het doel van kleur om feedback te geven over de timing. Als er te langzaam werd bewogen (langer dan 500ms) werd het doel groen, te snel (korter dan 300ms) rood of goed getimed blauw. Na 2 seconden wisselden start- en beginpositie om en moest de proefpersoon naar de nieuwe doelpositie bewegen; proefpersonen moesten dus afwisselend een inwaartse en uitwaartse beweging maken.

Overzicht onderzoek

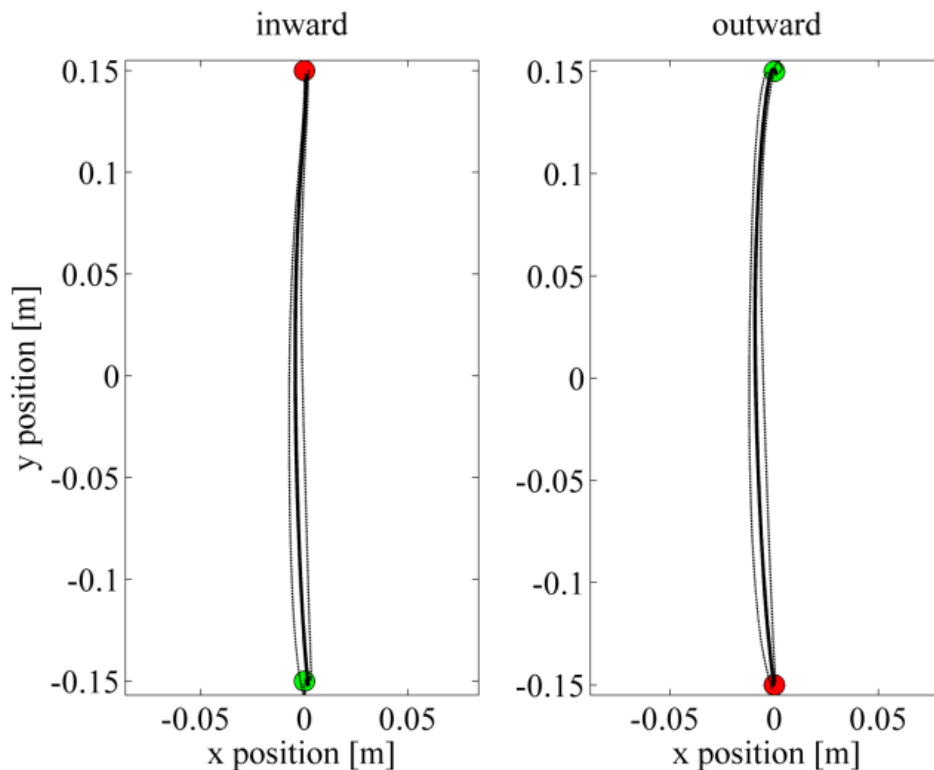
Als eerste werden metingen verricht zonder dat de robot zelf kracht leverde. Vanaf nu wordt dat bewegen in het nulveld genoemd. Deze conditie is om te zien hoe mensen in een normale situatie van a naar b bewegen. Zoals vaker beschreven in de literatuur, bleek het dat alle proefpersonen in een nagenoeg rechte lijn naar het doel bewogen. Daarna was er een conditie waarin de robot op een hele speciale manier kracht ging leveren (later wordt uitgelegd hoe precies) en wel zodanig dat de meest energetische manier om het doel te bereiken via een boog was. Vanaf nu wordt dit bewegen in het krachtenveld genoemd. De vraag was of mensen nadat ze gewend waren aan het krachtenveld zouden gaan bewegen zoals ze dat normaal (in het nulveld) doen, of dat ze volgens een pad gaan bewegen dat minder energie kost.

Resultaten

Experiment 1

In figuur 2 staan de gemiddelde handpaden van 6 proefpersonen weergegeven na 150 oefentrials in het nulveld. De paden zijn licht gekromd, wat in overeenstemming is met de literatuur. De volgende

stap was het opleggen van een krachtenveld met de robotarm, zodanig dat het voorspelde minimale energiepad sterk afwijkt van de gemiddelde paden van de proefpersonen weergegeven in figuur 2. Opmerking: de proefpersonen werden op geen enkele wijze geïnformeerd over hoe zij het doel moesten bereiken. Alleen werd, zoals eerder gezegd, na elke beweging informatie gegeven of zij binnen de gestelde tijd van 400-500 ms het doel bereikt hadden.



Figuur 2 Gemiddelde handpaden van proef-personen in het nulveld. De robot leverde dus geen kracht op de hand van de proefpersoon.

Krachtenveld

Wat wordt er precies bedoeld met een krachtenveld? Daarmee wordt bedoeld dat de robot tijdens de beweging krachten op de hand uitoefent die op enige manier afhangen van de positie en beweging van de hand. Zo kan bijvoorbeeld de robot een kracht uit te oefenen die afhangt van de snelheid van de hand. De robot meet de snelheid en levert een kracht zodanig dat hoe sneller de proefpersoon beweegt, hoe harder de robot tegen de hand duwt. Een dergelijk krachtenveld wordt ook wel een visceus krachtenveld genoemd. Maar welk krachtenveld moet gekozen worden om ervoor te zorgen dat het minimale energiepad afwijkt van het pad in een nulveld? Dat bleek nog niet zo makkelijk.

Voordat het gebruikte krachtenveld wordt uitgelegd, eerst een paar opmerkingen over de specifieke eisen van het minimale energie pad. Je kan je voorstellen dat je de robot kan programmeren zodanig dat het heel veel kracht kost om een bepaald pad *niet* te volgen. De robot geleidt dan domweg de beweging als het ware zoals in een rails. Het volgen van een dergelijk pad is weliswaar energetisch optimaal, maar natuurlijk niet erg interessant omdat in dat geval de robot de beweging in feite dicteert. Het krachtenveld moest zodanig zijn dat er een duidelijk van een normaal traject afwijkend minimaal energie pad werd gemaakt, maar zodanig dat de proefpersonen dat "zelf" moesten vinden en besturen. Uit Figuur 2 blijkt dat de handpaden licht naar links gekromd zijn en mede daarom werd er voor gekozen om een minimaal energie pad te maken dat naar rechts gekromd was.

Om er voor te zorgen dat de robot nooit de hand van de proefpersoon naar of van het minimale energiepad geleidt, werd de robot zodanig geprogrammeerd dat deze nooit krachten in x-richting (= voor-achterwaarts) levert:

$$F_x = 0$$

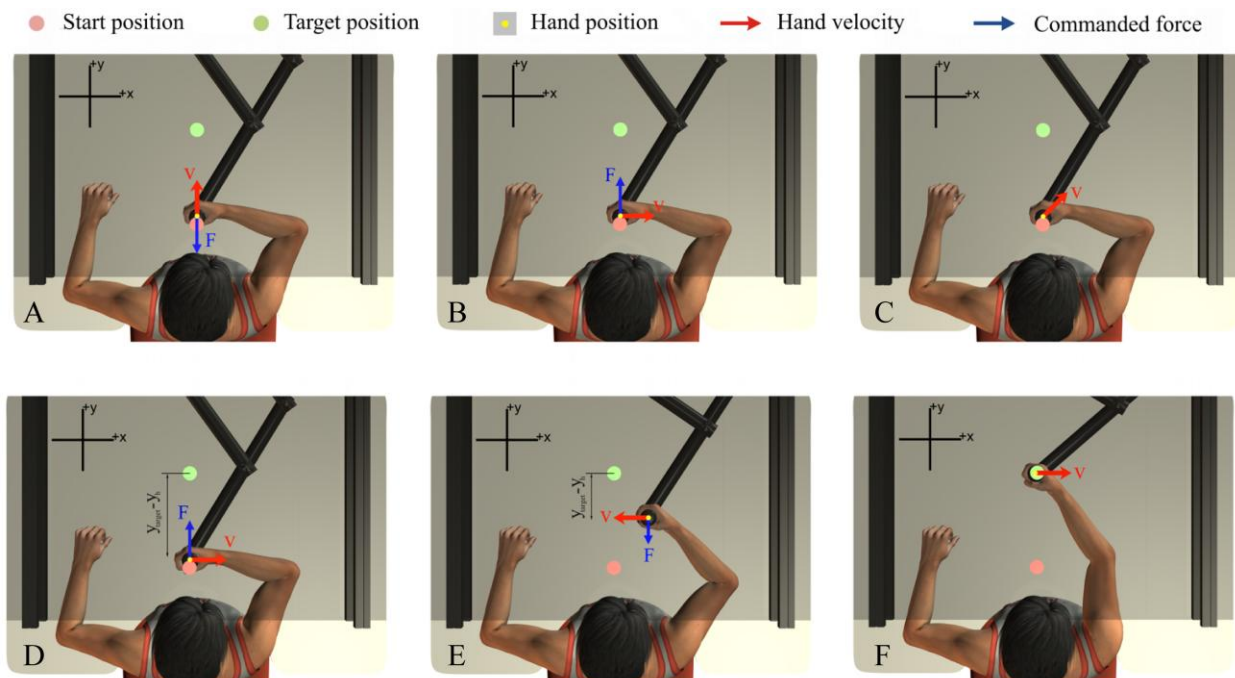
De kracht van de robot op de hand in de *y*-richting (= zijwaarts) hing af van de snelheid waarmee de hand in *y*-richting (\dot{y}) werd bewogen en wel zo dat hoe sneller de proefpersoon bewoog hoe harder de robot tegenwerkte:

$$F_y = -150 \cdot \dot{y}$$

Met een dergelijk krachtenveld werd het wel moeilijker om te bewegen (de robot werkt immers de proefpersonen tegen), maar het optimale pad zal nauwelijks veranderen. De kracht van de robot in *y*-richting werd ook afhankelijk gemaakt van de snelheid van de hand in *x*-richting (\dot{x}):

$$F_y = -150 \cdot \dot{y} + 150 \cdot \dot{x}$$

Deze tweede term zorgde ervoor dat wanneer de proefpersoon naar rechts bewoog, de robot de hand naar voren duwde. Beide termen samen zorgen voor iets interessants! Stel, een proefpersoon beweegt met 0.5 m/s naar voren. De robot levert dan een negatieve *y*-kracht van $-150 \cdot 0.5 = -75\text{N}$ (zie figuur 3A). Wanneer de proefpersoon met 0.5 m/s naar rechts beweegt, levert de robot een positieve *y*-kracht van $150 \cdot 0.5 = +75\text{N}$ (zie figuur 3B). Als de proefpersoon dit tegelijkertijd zou doen levert de robot dus geen kracht op de hand: $-150 \cdot 0.5 + 150 \cdot 0.5 = 0\text{N}$ (figuur 3C).



Figuur 3. Uitleg krachtenveld. Zie tekst.

Dus, wanneer een proefpersoon precies even snel naar voren als naar rechts beweegt (anders gezegd precies onder 45 graden naar rechtsvoor), levert de robot geen kracht op de hand. Zoals eerder gezegd, als een proefpersoon recht naar het doel zou bewegen, zou de robot wel weerstand bieden. Met een dergelijk krachtenveld lijkt het voordelig om in het begin naar rechtsvoor te bewegen. Echter, wanneer de proefpersoon in het begin in deze richting beweegt, moet hij/zij uiteraard later weer naar linksvoor bewegen om het doel te bereiken. En dan zou de robot dus dubbel tegenwerken (en een snelheid naar voren en een snelheid naar links). Met een dergelijk krachtenveld zou het dus weinig zin hebben om naar rechts te bewegen aangezien de robot dan later, wanneer er naar links bewogen wordt, evenveel tegenwerkt. Om dit te voorkomen werd de *y*-kracht ook nog eens afhankelijk gemaakt van de afstand van de hand tot de doelpositie in *y*-richting:

$$F_y = (-150 \cdot \dot{y} + 150 \cdot \dot{x}) \cdot |0.3 - y|$$

Wat doet deze term? Welnu, deze laatste term zorgt ervoor dat kracht van de robot lager is naarmate de proefpersoon dichterbij het doel komt. Een voorbeeld om dit uit te leggen: stel, een proefpersoon beweegt aan het begin precies naar rechts met een snelheid van 0.5m/s. In dat geval zal de robot een positieve y-kracht (dus de hand in de richting van het doel duwen) leveren van:

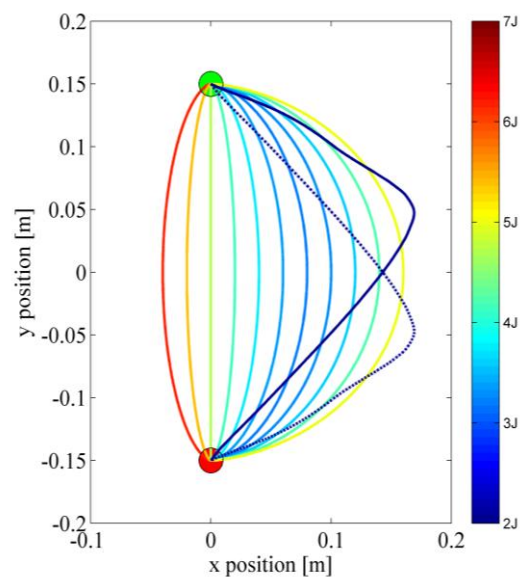
$$F_y = (-150 \cdot 0 + 150 \cdot 0.5) \cdot |0.3 - 0| = 22.5N$$

Wanneer de proefpersoon halverwege de beweging (y positie = 0.15 m) met dezelfde snelheid precies naar links beweegt, dan zal de robot een negatieve y-kracht leveren (dus de hand in de richting van het doel *weg*duwen) van:

$$F_y = (-150 \cdot 0 + 150 \cdot -0.5) \cdot |0.3 - 0.15| = -11.25N$$

Dus als de proefpersoon in het begin naar rechts beweegt, helpt de robot. Wanneer de proefpersoon in een later stadium naar links beweegt, werkt de robot tegen maar minder dan deze in het begin hielp. Het valt daarom te verwachten dat het minimale energiepad in dit krachtenveld een traject zal zijn dat in het begin naar rechtsvoor wijst en in een later stadium weer naar linksboven afbuigt, richting het doel. Met behulp van de computer werd het minimale energiepad berekend. Het handpad waarvoor geldt dat de proefpersoon zo min mogelijk energie aan de robot levert staat weergegeven in Figuur 4.

Het krachtenveld heeft nog een belangrijk eigenschap: het is namelijk zo gemaakt dat ook voor elke kleine aanpassing van het handpad naar rechts er in principe minder energie nodig is om de beweging te voltooien. Om dit inzichtelijk te maken wordt in figuur 4 de energie voor verschillende paden weergegeven. Deze paden (technisch gezien gaat het hier om zogenaamde “minimal jerk” paden; paden waarvoor geldt dat de derde tijdsafgeleide van de positie naar de tijd (of de afgeleide van versnelling) minimaal is. Het is gebleken dat menselijke bewegingen redelijk nauwkeurig te beschrijven zijn met dit soort paden.) zijn met de computer gemaakt en hebben verschillende uitwijking in x-richting. Voor deze mogelijke paden wordt berekend hoeveel energie het een proefpersoon zou kosten om *in het krachtenveld* via dat pad naar het doel te bewegen. In figuur 4 is de hoeveelheid energie weergegeven in de vorm van een kleur. Rood betekent veel energie en blauw weinig energie. In de rechterkant van het figuur staat de precieze kleurschaling. Het meest linkse pad lijkt op wat proefpersonen doen wanneer zij in de vrije ruimte (of in het nulveld) naar het doel bewegen. Als proefpersonen de beweging een klein beetje meer naar rechts zouden uitvoeren, dan zou het bewegen minder energie kosten. Als ze nog een beetje meer naar rechts zouden gaan nog weer minder. Dit blijft gelden, tot het minimum is bereikt. Deze eigenschap werd gemaakt om twee redenen. Ten eerste heeft dit tot gevolg dat het hierdoor makkelijker wordt om het minimale energie pad te vinden. Daarnaast hoeft een proefpersoon niet helemaal precies het minimale energiepad te volgen om minder energie te gebruiken; alle kleine verschuivingen naar recht zouden al helpen.

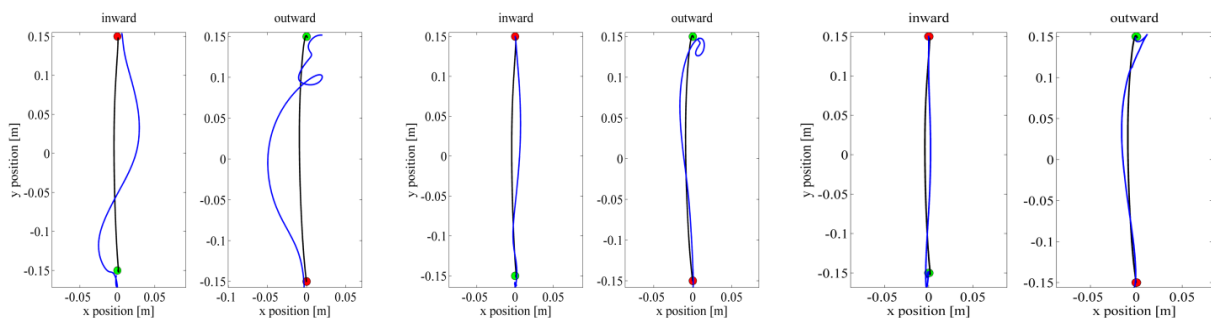


Figuur 4. Zie tekst.

Zoals eerder besproken is de vraag: *beweegt een proefpersoon na training in het zojuist besproken krachtenveld zoals in het nulveld, of beweegt hij/zij zodat er minder energie nodig is om het doel te bereiken?*

Bewegen in het krachtenveld

De eerste keer dat proefpersonen in het krachtenveld bewogen, hadden zij moeite het doel te bereiken laat staan “normaal” te bewegen. In Figuur 5A worden de eerste 2 bewegingen (uitwaarts en inwaarts) van een proefpersoon in het krachtenveld weergegeven. De proefpersonen moeten wennen aan het krachtenveld en dus hun spieren anders aansturen dan wanneer de robot geen kracht levert (nulveld). Echter, na een paar keer oefen (in figuur 5B en C staan de handpaden na 5 en 10 trials) lukte het alle proefpersonen om consistente bewegingen uit te voeren.

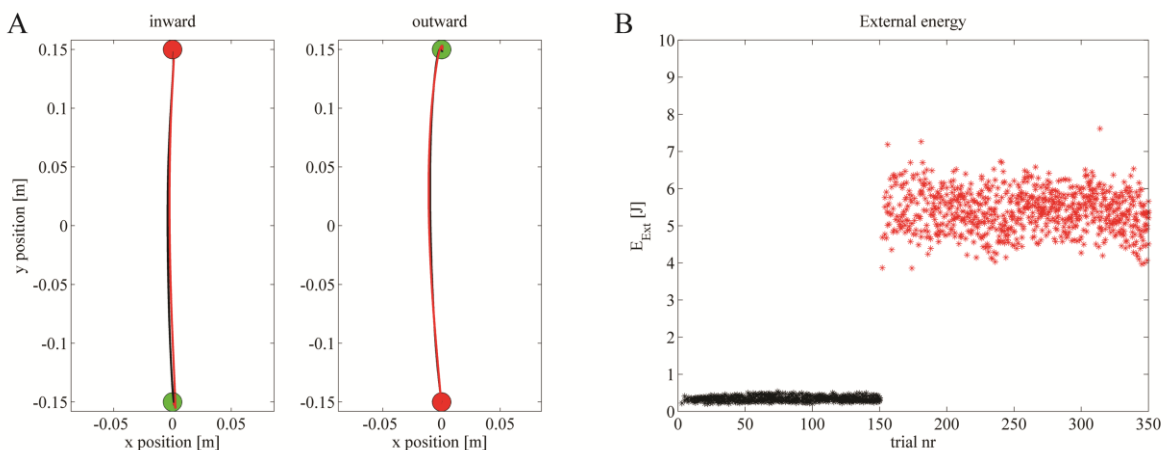


Figuur 5. A-C Eerste keer bewegen in het krachtenveld, de vijfde keer en de tiende keer. Na ongeveer 15 oefenbewegingen maakten de proefpersonen consistente reikbewegingen.

In figuur 6A staan de gemiddelde handpaden na 150 oefentrials in het nulveld (zwart) en de gemiddelde handpaden aan het einde van 200 bewegingen in het krachtenveld (rood). Het bleek dat proefpersonen niet bewegen met een handpad dat lijkt op het minimale energiepad. Sterker nog: het bleek dat proefpersonen helemaal hun handpaden niet aanpasten! In figuur 5B staat de hoeveelheid externe energie weergegeven die de proefpersonen per trial hebben geleverd (externe energie = energie geleverd aan de omgeving; in dit geval de robot); in het zwart voor bewegingen in het nulveld en in het rood voor bewegingen in het krachtenveld. Uit de figuur valt op te maken dat proefpersonen niet leren om met minder energie te bewegen. Proefpersonen leveren aan het begin van de oefensessie evenveel energie als aan het eind van de oefensessie. (Bewegen volgens het minimale energiepad kost ongeveer 2.5 J.)

Conclusie experiment 1

Proefpersonen bewegen na oefening in een krachtenveld zoals zij dat deden in een nulveld en verschuiven hun trajecten dus niet in de richting van het voorspelde minimale energie traject. Hierdoor verbruiken zij veel *meer* energie dan nodig is.



Figuur 6) De gemiddelde handpaden van de laatste 10 bewegingen in het nulveld (zwart) en het krachtenveld (rood) zijn nagenoeg identiek. B) De hoeveelheid extern geleverde energie per trial voor alle succesvolle trials in het nulveld (rood) en in het krachtenveld (zwart). Uit dit figuur blijkt tevens dat proefpersonen over de trials niet gaan bewegen via handpaden die minder energie kosten: bewegingen gemaakt in het begin van de oefensessie kosten evenveel energie als die aan het einde van de sessie.

Experiment 2

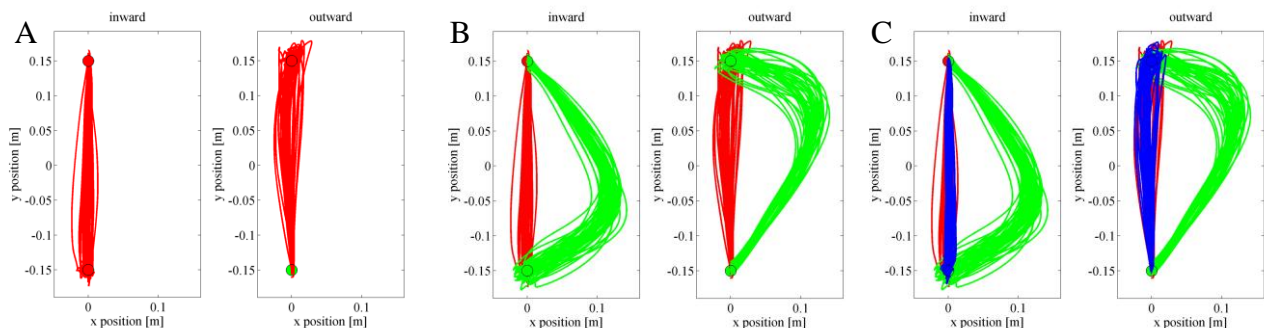
Wat zou er gebeuren als proefpersonen wordt gevraagd om naar het doel te bewegen via het minimale energiepad en ze daarna te vragen om te bewegen zoals ze willen? Dit was de vraag in het tweede experiment. Het tweede experiment zag er als volgt uit:

- 1) Laat proefpersonen doelgerichte reikbewegingen (zoals in exp. 1) maken zoals in het krachtenveld zonder enige instructie.
- 2) Projecteer het minimale energiepad en laat proefpersonen reikbewegingen maken in het krachtenveld maken langs dit pad.
- 3) Verwijder de projectie van het minimale energiepad en laat proefpersonen reikbewegingen maken wederom zonder enige instructie.

De vraag luidt:

Gaan mensen na training in het krachtenveld met het minimale energiepad hun zelfgekozen handpaden aanpassen?

In figuur 7 staan voor 1 proefpersoon de laatste 50 paden van elk van de drie oefensessies. Figuur 7A laat de vertrouwde licht naar links gekromde handpaden zien. Figuur 7B toont de handpaden wanneer de proefpersoon werd gevraagd het op de spiegel geprojecteerde minimale energiepad te volgen (zie voor dat pad de blauwe lijnen in figuur 4). Het bleek dat de proefpersonen al na ongeveer 15 oefentrials het minimale pad konden volgen. Let wel, er werd geen enkele informatie gegeven hoe goed ze het pad volgden. Het enige dat de proefpersonen te zien kregen was het minimale energiepad, de start- en doelpositie en de doelpositie die van kleur veranderde om aan te geven of de beweging goed getimed was (tussen 300 en 500 ms). Uiteraard werd de proefpersonen vooraf ook niet verteld om wat voor soort onderzoek het ging en werd niet verteld wat voor soort pad werd afgebeeld. In figuur 7C staan de laatste 50 handpaden weergegeven van de derde sessie waarin zij zelf mochten bepalen hoe ze naar het doel bewogen.



Figuur 7. A) De laatste 50 handpad (zwart) in de eerste trainingssessie van 1 proefpersoon in het krachtenveld (rood). B) Het minimale energiepad (groen) en de laatste 50 handpaden (rood) in de tweede trainingssessie van 1 proefpersoon als gevraagd wordt het minimale energiepad te volgen. C) De laatste 50 handpaden (blauw) in de derde trainingssessie na de oefensessie met het minimale energiepad.

In figuur 8A staan de gemiddelde handpaden van alle proefpersonen na de eerste oefensessie in het krachtenveld (zwart), na de tweede oefensessie in het krachtenveld met het minimale energiepad (rood) en na de derde oefensessie in het krachtenveld (blauw). Het bleek dat proefpersonen na oefening in het krachtenveld waarbij hen gevraagd wordt het minimale energiepad te volgen, gewoon weer bewegen zoals als daar vóór, dus zoals zij zouden bewegen in een nulveld, hoewel ze zonder problemen via het minimale energiepad zouden kunnen bewegen. In Figuur 8C wordt de geleverde energie per beweging voor alle succesvolle bewegingen weergegeven. Hieruit blijkt dat de proefpersonen best met minder energie konden bewegen, maar als zij zelf mochten kiezen ze liever bewegen zoals in een nulveld. Het maakte het CZS blijkaar niet uit dat daar ongeveer twee keer zoveel energie voor nodig was.

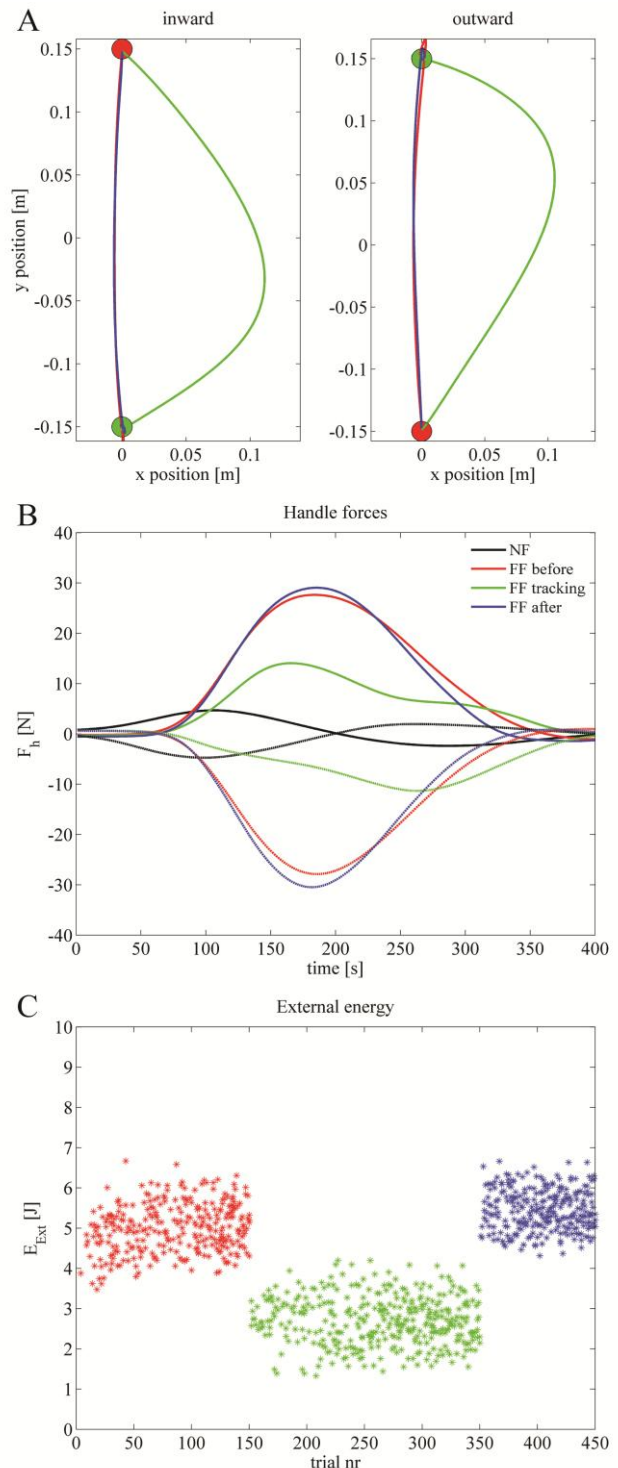
Experiment 3

Hoewel het er niet op lijkt dat proefpersonen leren om met minder energie door het krachtenveld te bewegen, kan iemand het argument aandragen dat ze gewoon niet lang genoeg hebben geoefend in het krachtenveld. Met 100 Canadese dollars in het vooruitzicht werden 2 studenten bereid gevonden het volgende te doen:

- 1) 300 reikbewegingen maken in het nulveld
- 2) 1350 reikbewegingen maken in het krachtenveld
- 3) 300 reikbewegingen maken via het minimale energie pad in het krachtenveld
- 4) 300 reikbewegingen maken in het krachtenveld

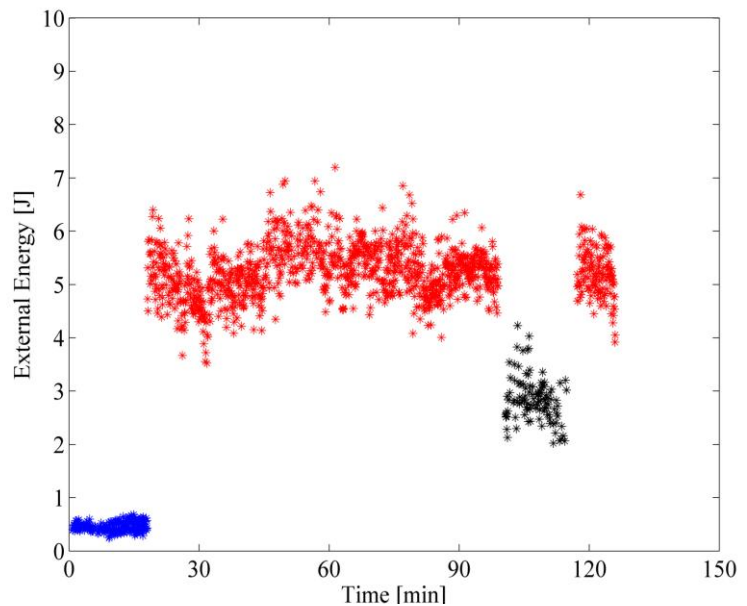
De vraag luidde:

Veranderen proefpersonen na langdurige oefening in het krachtenveld hun handpad zodanig dat zij energetisch efficiëntere bewegingen gaan maken?



Figuur 8. A) De gemiddelde handpaden van alle proefpersonen aan het einde van de drie condities: vrij te kiezen handpad (rood) in het krachtenveld, volg het minimale energie pad (groen) en vrij te kiezen handpad. B) Gemiddelde krachten op de robot gedurende de drie condities. C) Energie geleverd aan de robot tijdens de drie condities voor *alle* geslaagde reikbewegingen.

In Figuur 9 staat voor elke beweging de hoeveelheid externe energie die de proefpersonen leverden om een beweging te maken. In het blauw staat de hoeveelheid energie per trial voor bewegingen in het nulveld, in het rood die voor de bewegingen in het krachtenveld, in het zwart die voor bewegingen via het minimale energiepad in het krachtenveld en weer in het rood die voor bewegingen in het krachtenveld. Uit deze resultaten blijkt dat proefpersonen zelfs na langdurige oefening in het krachtenveld hun handpaden *niet* gingen aanpassen zodat zij minder externe energie hoefden te leveren. Ook uit dit figuur blijkt tevens dat proefpersonen veel minder energie nodig hadden om via het minimale energiepad de reikbeweging uit te voeren dan wanneer ze dat deden via hun zelfgekozen paden.



Figuur 9. Extern geleverde energie door proefpersonen voor de vier verschillende sessies. Zie tekst.

DISCUSSIE

Als mensen een nieuwe taak willen leren, bijvoorbeeld het putten van een golfbal, kan na verloop van tijd het CZS adequate spierpatronen genereren om een club (al dan niet geheel succesvol) tegen een bal aan te laten slaan. Gezien de complexiteit van ons spierskeletstelsel is dit geen eenvoudige taak. In dit onderzoek werd de vraag behandeld of het CZS spierpatronen genereert op basis van het minimaliseren van energieverbruik. Dit werd gedaan door mensen bewegingen te laten maken terwijl zij een handvat van een robot moesten vasthouden. De robot leverde krachten op de hand van de proefpersonen zodanig dat er een minimaal energiepad ontstond dat afweek van het pad dat proefpersonen normaal gesproken nemen. Uit de resultaten bleek dat proefpersonen in een krachtenveld *niet* hun bewegingen aanpassen zodanig dat zij minder energie verbruiken. In het laatste deel van dit artikel, worden de bevindingen besproken.

Het zou kunnen zijn dat het volgen van het minimale energie pad erg moeilijk is. Het lijkt echter uitgesloten dat dit de reden is waarom mensen hun bewegingen niet aanpassen. Experiment 2 liet namelijk zien dat proefpersonen in het krachtenveld vrij eenvoudig kunnen bewegen volgens het minimale energiepad en dat zij dan inderdaad met veel minder energie de reikbeweging kunnen voltooien. Echter, als zij werden vrijgelaten om te bewegen zoals zij dat wilden, bewogen zij vervolgens in het krachtenveld via paden die nagenoeg recht zijn en daardoor veel meer energie kosten. Daarnaast hoefden de proefpersonen ook niet geheel volgens het minimale energie pad te bewegen om minder energie te verbruiken om het doel te bereiken: een beetje meer naar rechts vermindert de energie ook (zie ook figuur 4 en bijbehorende tekst). Proefpersonen laten echter in werkelijkheid geheel geen verandering van hun handpad zien. Al met al valt er dus niet anders te concluderen dan dat het CZS energiekosten niet minimaliseert.

Het lijkt ook uitgesloten dat het verschil in energieverbruik voor rechte paden en het minimale energie pad te klein zou zijn om "interessant te zijn" voor het CZS. Het verschil in geleverde energie tussen de

vrij gekozen handpaden en het minimale energie pad is ongeveer 5 keer zo veel als een beweging in het nulveld kost (nulveld was de conditie waarin de robot geen enkele kracht leverde). Dus, de winst die proefpersonen konden halen door via het minimale energie pad te bewegen was ongeveer 5 keer

Intermezzo. Een oplettende lezer zou kunnen opmerken dat in dit artikel iets onder de tafel wordt geschoven: de metabole energie van spieren. In de analyse werd als maat van de energiekosten van de proefpersoon de hoeveelheid externe energie gebruikt die werd geleverd aan de robothandvat. Echter, de totale metabole energie is niet gelijk aan de extern geleverde energie. Immers, het skelet moet ook afgeremd worden, en dat kost energie. Daarnaast is het zo dat niet alleen het leveren van mechanische energie metabole energie kost, ook spelen allerlei fysiologische processen daarbij een rol, zoals de Ca^{2+} pomp in een spier, 'maintenance heat', contractiesnelheid, etc. De metabole energie kan erg afwijken van de extern geleverde energie (b.v. wanneer je een gewicht omhoog houdt, is de externe geleverde energie nul, maar intern wordt er, uiteraard, door de spieren wel degelijk energie verbruikt). Als we willen weten of het CZS energieverbruik minimaliseert, moet er dus eigenlijk gekeken worden naar het totale metabole energieverbruik. Het voert voor de huidige doeleinden te ver om dieper in te gaan op de argumentatie dat het in dit geval wel degelijk zin heeft om alleen naar externe geleverde energie te kijken, maar in het kort komt het hierop neer. Met behulp van een zeer gedetailleerd model van de menselijke arm ^{Kistemaker et al. 2006} werd de geleverde hoeveelheid metabole energie uitgerekend van bewegingen die gelijk waren aan die van de proefpersonen. Voor dit soort reikbewegingen bleek dat verreweg de grootste voorspeller van de energie geleverd door de spieren de hoeveelheid energie is die wordt geleverd aan de robot (dit komt omdat er weinig cocontractie is en er nagenoeg geen isometrische contracties optreden). Aangezien de proefpersonen geen enkele aanpassing aan hun beweging maken, kan niet anders geconcludeerd worden dat het CZS ook geen intern geleverde energie minimaliseert. Daarnaast is er uitgerekend dat het model veel minder metabole energie verbruikt indien het wordt opgedragen het minimale energiep pad te volgen.

de hoeveelheid energie die een beweging kost in de vrije ruimte. Dit betekent dat als de energiewinst tijdens dit experiment te laag zou zijn om "interessant te zijn" voor het CZS, dit zeker ook geldt voor alle dagelijkse armbewegingen.

Als het inderdaad waar is dat het CZS niet zelf energie minimaliseert, waar het in dit onderzoek dus alle schijn van heeft, wil dat nog niet zeggen dat alle bewegingen die wij dagelijks uitvoeren onnodig veel energie kosten. Het is zeer wel mogelijk dat evolutionaire druk ervoor gezorgd heeft dat er CZSs zijn geselecteerd die bewegingen sturen met zo min mogelijk verbruik van energie. Als voorbeeld kijken we naar het lopen van de mens. Bij proefpersonen wordt de energieconsumptie gemeten (via zuurstofopname) bij verschillende loopsnelheden. Als proefpersonen vrij een snelheid mogen kiezen, kiezen zij voor die snelheid die inderdaad de minste energie kost. ^{Zarrugh et al., 1974} Dit zou kunnen inhouden dat evolutie ervoor gezorgd heeft dat wij een CZS hebben dat spieractivatiepatronen genereert dat minimale energiekosten met zich meebrengt. Het grote verschil is dan dat het CZS dus niet "zelf uitzoekt" (of uit *kan* zoeken) welk activatiepatroon het energieverbruik minimaliseert. Dit zou dus ook kunnen gelden voor armbewegingen die proefpersonen maken zonder dat zij het robothandvat vasthouden (computersimulaties met het armmodel lijken inderdaad aan te tonen dat 'gewone' reikbewegingen (in het nulveld) een minimale hoeveelheid energie kosten). Echter, zodra mensen interacteren met hun omgeving en nieuwe bewegingen aanleren, zoals bijvoorbeeld tijdens het slaan van een spijker met een hamer, lijkt het CZS niet geïnteresseerd in energiekosten maar wellicht in andere aspecten, zoals maximalisatie van snelheid, nauwkeurigheid en stabiliteit.

LITERATUUR

Bernstein N. The Coordination and Regulation of Movements. Oxford: Pergamon, 1967

Kistemaker DA, Wong JD, and Gribble PL. The Central Nervous System does not minimize energy cost in arm movements. J of Neurophysiol. In Press.

Kistemaker DA, Van Soest AJ, and Bobbert MF. Is equilibrium point control feasible for fast goal-directed single-joint movements? J Neurophysiol 95: 2898-2912, 2006.

Zarrugh MY, Todd FN, and Ralston HJ. Optimization of energy expenditure during level walking. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 33: 293-306, 1974.