

Leren en exploreren

Topsporters oefenen heel veel om hun prestaties te verbeteren. Wat gebeurt er nu precies tijdens dat oefenen? Het antwoord op deze vraag hangt af van wat je doet bij het oefenen. Met krachttraining en duurtraining vergroot je de spierkracht en het uithoudingsvermogen. Hier bespreken we het leren om een doelgerichte beweging, zoals het nemen van een vrije trap of het werpen van een dart, nauwkeurig uit te voeren. Wat gebeurt er met een beweging zoals het gooien van een dart als je deze vele malen herhaalt? We laten zien dat je door het herhalen niet op één plan uitkomt dat je steeds herhaalt, maar dat je blijft zoeken naar betere manieren om de beweging uit te voeren.

Jeroen B.J. Smeets en Rob van Beers

Leren van je fouten

Om een beweging te maken stuurt het zenuwstelsel actiepotentialen (motorcommando's) naar de spieren die ervoor zorgen dat de spieren samen-trekken. Dit complexe proces, waarbij vele gebieden van de hersenen betrokken zijn, vereenvoudigen we als fysici tot een proces dat uit twee elementen bestaat: planning en uitvoering. In de planning berekent je brein de benodigde activatie van de spieren om de taak succesvol uit te voeren. In de uitvoering wordt deze activatie omgezet in vuurpatronen van motorische zenuwcellen in het ruggenmerg en activatie van de spieren. De vraag die centraal staat in dit artikel is: wat gebeurt er met de planning als je een beweging herhaalt?

Het is te verwachten dat iemand leert

van een fout die in een vorige beweging gemaakt is, wanneer de beweging wordt herhaald. Een eenvoudig model voor het leren van fouten is als volgt: als het eindpunt p^n van de in beweging n geplande beweging naast het doel ligt, wordt het geplande eindpunt p^{n+1} in de volgende beweging aangepast om voor deze fout, e^n , te compenseren:

$$p^{n+1} = p^n - B e^n \quad [1]$$

Als de fout in de uitvoering het verschil zou zijn tussen het geplande eindpunt en de doelpositie, dan zou deze met correctiefactor $B=1$ volledig weggewerkt zijn. Echter, de beweging zal meestal niet precies op het geplande eindpunt komen, maar er iets naast, omdat bij het uitvoeren van de beweging altijd wat onnauwkeurigheden (motorische ruis, r_{mot}^n) geïntroduceerd worden [1]. De fout bestaat dus uit het verschil tussen de doelpositie (D) en het eindpunt van de geplande beweging met daarbij opgeteld een afwijking veroorzaakt door de motorische ruis:

$$e^n = p^n + r_{\text{mot}}^n - D \quad [2]$$

Een fout heeft dus twee bijdragen (een fout in de planning en het gevolg van motorische

ruis), maar de hersenen weten niet hoe groot deze twee afzonderlijke bijdragen zijn, omdat alleen hun som wordt waargenomen. Om de volgende keer nauwkeuriger te bewegen moet er alleen gecorrigeerd worden voor de planningsfout. De ruis is namelijk onvoorspelbaar en zal in de volgende beweging waarschijnlijk anders uitvallen. Om de planning te verbeteren is het daarom raadzaam om niet te compenseren voor de hele fout, maar voor een deel ervan. De correctiefactor B moet dus kleiner zijn dan 1. Het resultaat hiervan is een ongeveer exponentiële leercurve.

Het is de vraag of deze theorie precies beschrijft wat er gebeurt wanneer iemand een beweging meerdere malen uitvoert. Dit is getest in een experiment waarin proefpersonen dertig

Jeroen Smeets studeerde experimentele natuurkunde in Utrecht en promoveerde daar bij de afdeling Fysica van de mens. Na een postdoc en U(H)D-positie bij de afdeling Neurowetenschappen van het Erasmus MC werd hij in 2006 hoogleraar bij de afdeling Bewegingswetenschappen van de Vrije Universiteit in Amsterdam.

j.b.j.smeets@vu.nl



Rob van Beers studeerde experimentele natuurkunde in Utrecht en promoveerde in 1998 aan de TU Delft. Na aanstellingen bij het University College London, het Erasmus MC en de Universiteit Utrecht is hij sinds 2009 verbonden aan de afdeling Bewegingswetenschappen van de Vrije Universiteit in Amsterdam, waar hij nu UD is.

r.j.van.beers@vu.nl



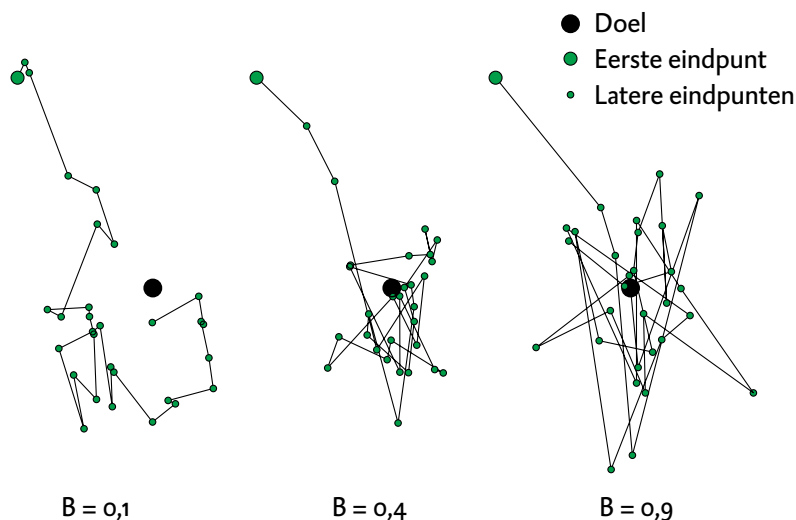
keer achter elkaar hun vinger snel naar dezelfde stip op de tafel bewogen. Ze konden hun hand tijdens de beweging niet zien, maar zagen na elke beweging wel welke fout ze gemaakt hadden [2]. Het bleek dat de gevonden leercurve het best wordt beschreven door een correctiefactor $B \approx 0,4$. In een reeks waarin iedere volgende beweging een correctie bevat voor een afwijking in de vorige beweging door motorische ruis (zoals in vergelijkingen 1 en 2), is er een negatieve correlatie tussen de eindpunten van opeenvolgende bewegingen (als de afwijking in beweging n naar rechts is, is de verwachte afwijking in beweging $n+1$ naar links). In de gemeten eindpunten was deze negatieve correlatie tussen opeenvolgende eindpunten niet aanwezig, maar deze waren niet gecorreleerd. Het model in vergelijkingen 1 en 2 is dus niet compleet.

Exploreren

Naast de motorische ruis en de foutcorrecties moet er nog een derde factor zijn die een rol speelt. Een goede beschrijving van de uitkomst van het experiment kunnen we krijgen door aan te nemen dat de planning niet alleen verandert door een correctie, maar dat er ook autonome variaties zijn in je plan die onafhankelijk zijn van de fout in de vorige beweging. Deze exploratie modelleren we door planningsruis r_{pl}^n toe te voegen:

$$p^{n+1} = p^n - B e^n + r_{pl}^n \quad [3]$$

Door bij elke beweging een kleine willekeurige variatie toe te voegen aan het vorige plan gaat het geplande eindpunt, als je niet ook correcties zou maken, een random walk uitvoeren, met een positieve correlatie tussen de eindpunten van opeenvolgende bewegingen. In werkelijkheid corrigeer je de planning van elke beweging echter voor de fout in de vorige beweging. Bij een kleine correctiefactor (linker paneel van figuur 1) overheerst het random walk-gedrag, waarbij het eindpunt door de correcties ook langzaam naar het doel beweegt. In dit geval vinden we in simulaties een positieve correlatie tussen opeenvolgende eindpunten. Bij een grote correctiefactor (rechter paneel in figuur 1) is het eindpunt na twee keer corrigeren toevallig al heel dicht bij het doel, maar springt het eindpunt bij volgende bewegingen



Figuur 1 Simulatie van de eindpunten van dertig opeenvolgende bewegingen naar hetzelfde doel voor drie waarden van de correctiefactor B . De variantie in de planningsruis is 25% van die in de motorische ruis.



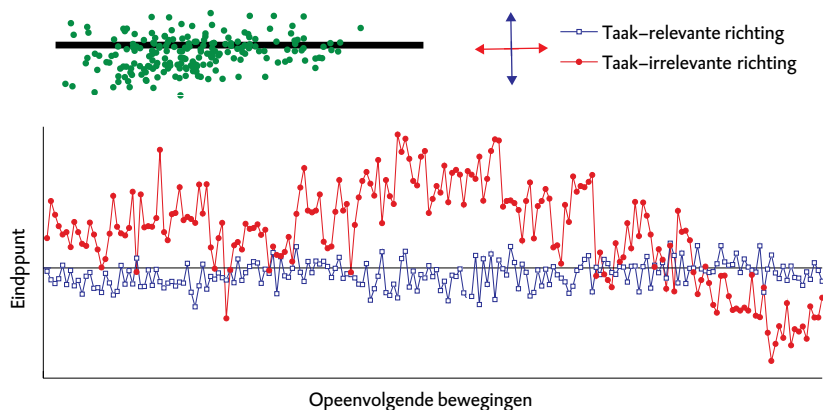
Figuur 2 Drie keer de triple 20 bij darts is goed voor 180 punten. Foto: © Kenneth Browning | Dreamstime.com.

sterk heen en weer over het doel heen omdat correcties in je plan compenseren voor de gevolgen van de motorische ruis, die elke keer anders zijn. In dit geval is er een negatieve correlatie tussen opeenvolgende eindpunten. Hiertussen ligt een optimale correctiefactor, waarbij de gemiddelde fout nul is, terwijl de spreiding (variantie) in de eindpunten de kleinst mogelijke waarde aanneemt (middelste paneel in figuur 1). Voor dit model geldt dat als de variantie in de planningsruis 25% is van die van de motorische ruis, een correctiefactor van $B = 0,4$ de optimale correctiefactor is. Deze optimale correctiefactor komt precies overeen met het niet gecorreleerd zijn van opeenvolgende eindpunten, zoals experimenteel waargenomen [2].

Op zoek naar de optimale correctie

Je kunt op heel veel verschillende ma-

nieren bewegen om hetzelfde doel te bereiken. Er zijn meer vrijheidsgraden voor het uitvoeren van een beweging dan variabelen die voor het uitvoeren van een taak van belang zijn: het vrijheidsgradenprobleem [3]. Als voorbeeld beschouwen we het werpen van een dartpijl naar de triple 20, een horizontaal vakje boven in het dartboard (zie figuur 2). Het belangrijkste voor de taak is dat de dart eindigt op de juiste verticale positie: een kleine afwijking naar boven of beneden levert een fout op. Je kunt wel wat meer naar links of naar rechts mikken in dit balkje zonder dat je zult missen. Er zijn echter meer vrijheidsgraden: je kunt de dart heel snel bijna recht vooruit gooien, of wat langzamer via een boogje. Welke combinatie werkt, hangt af van de positie waar de dart wordt losgelaten. De combinatie van positie, richting en snelheid van de dart wordt bepaald door de positie, richting en snelheid



Figuur 3 Boven: de verdeling van de eindpunten (groen) van één reeks van bewegingen naar een balkje (zwart). Onder: het tijdsverloop van de twee componenten van het eindpunt. De correlatie tussen de eindpunten van opeenvolgende bewegingen is 0,81 in de taak-irrelevante richting en 0,02 in de taak-relevante richting.

van de hand op het moment van loslaten. Hier zit een derde niveau van vrijheidsgraden: dezelfde beweging van de hand in de ruimte kan worden gerealiseerd door een beweging van de elleboog waarbij de pols stil wordt gehouden, door een beweging van de pols waarbij de elleboog stil wordt gehouden of door combinaties van pols- en elleboogbeweging.

Meerdere parameters van de beweging kunnen aangepast worden als de dart te hoog uitkomt: je kunt zowel iets langzamer gooien, de bewegingsrichting van je hand naar beneden aanpassen of de beweging iets lager of verder van het dartbord uitvoeren. Het is daarom niet eenvoudig om op basis van een fout in een eerdere beweging te bepalen wat er moet veranderen om de volgende keer zo veel mogelijk kans te hebben het doel te raken. Zou hierin een verschil tussen experts en beginnende darters kunnen zitten? Dit blijkt inderdaad het geval te zijn: bij experts en beginnende darters is niet alleen de grootte van de variaties in het eindpunt anders, maar ook de structuur van deze variaties. Beginnende darters hebben een duidelijk negatieve correlatie tussen opeenvolgende eindpunten, terwijl bij de experts deze correlatie precies nul is, de optimale waarde [4]. Dit betekent dat experts de optimale correctiefactor B gebruiken, terwijl beginners te grote correcties maken.

Vrijheidsgraden en leren

Variabelen die van belang zijn voor het uitvoeren van een taak worden in het model anders behandeld dan alle andere vrijheidsgraden, omdat er voor deze taakvariabelen een fout e^n bestaat

waarvoor je corrigeert. Samen met de random walk in de planning zorgt deze foutcorrectie dat opeenvolgende waarden van deze variabelen niet gecorreleerd zullen zijn. De andere (irrelevante) vrijheidsgraden worden niet voor een dergelijke fout gecorrigeerd en de random walk in de planning van deze variabelen zal in de bewegingen terug te zien zijn als vergelijking 3 klopt: een positieve correlatie tussen opeenvolgende waarden. Voor de taakvariabelen zal er wel correctie zijn en dus geen correlatie tussen opeenvolgende waarden. Deze voorspelling van het model hebben we getest voor verschillende soorten vrijheidsgraden in een drietal experimenten [5].

Een eerste experiment is eenzelfde aanwijsexperiment als hierboven, maar nu moesten de proefpersonen een balkje aantikken, vergelijkbaar met de triple 20 bij darts. Hierbij is de horizontale positie een irrelevante vrijheidsgraad, terwijl de verticale positie relevant is voor de taak. Het is dus niet verrassend dat de proefpersonen veel minder spreiding vertonen in de taak-relevante dan in de taak-irrelevante richting (figuur 3). Belangrijker is dat de structuur van de variaties verschilt voor de twee richtingen: geen correlatie tussen opeenvolgende posities in de taak-relevante richting en een grote positieve correlatie tussen opeenvolgende posities in de taak-irrelevante richting. In twee volgende experimenten testten we andere soorten vrijheidsgraden: variaties in het verdelen van de beweging over verschillende lichaamsdelen en variaties in snelheid van bewegen. In beide experimenten vonden we eenzelfde patroon: geen correlatie tussen opeenvolgende waar-

den van de taakvariabele en een positieve correlatie voor opeenvolgende waarden van variabelen die andere vrijheidsgraden beschrijven.

Conclusie

We kunnen concluderen dat wanneer we een beweging herhalen, we het plan voor de beweging altijd iets aanpassen, zelfs als de beweging goed was. Dit lijkt misschien tegen-intuïtief, waarom zou je een goed bewegingsplan veranderen? Wij denken dat je continu probeert een goed plan te vervangen door een beter plan. Bij het beschrijven van de vrijheidsgraden bij darten hebben we aangegeven dat er veel verschillende bewegingsplannen zijn die gemiddeld op het doel uitkomen. Niet al deze plannen zijn even effectief. Sommige zullen heel gevoelig zijn voor een kleine fout, bijvoorbeeld in het loslaten van een dart of in de positie van de dart op het moment van loslaten, terwijl andere plannen meer robuust zullen zijn [6]. Dartexperts willen niet alleen een plan dat ze gemiddeld op het doel brengt, maar ook een dat weinig variatie rond het doel oplevert. Door de beweging elke keer aan te passen (maar wel zo dat het gemiddelde resultaat op het doel blijft door fouten gedeeltelijk te corrigeren) kun je exploreren welk bewegingsplan het minst gevoelig is voor de onontkoombare variaties in de uitvoering. Omdat je lichaam steeds verandert als gevolg van vermoeidheid, groei en dergelijke, en ook de externe omstandigheden niet constant zijn, weet je nooit zeker of je plan optimaal is en zal je dus je hele leven blijven doorgaan met exploreren en leren.

Referenties

- 1 C.M. Harris en D.M. Wolpert, *Signal-dependent noise determines motor planning*. *Nature*, **394**, 780-784 (1998).
- 2 R.J. van Beers, *Motor learning is optimally tuned to the properties of motor noise*. *Neuron*, **63**(3), 406-417 (2009).
- 3 J.B.J. Smeets, *Spieren en vrijheidsgraden*. *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde*, **65**, 48-48 (1999).
- 4 R.J. van Beers, Y. van der Meer en R.M. Veerman, *What autocorrelation tells us about motor variability: insights from dart throwing*. *PLoS ONE*, **8**(5), e64332 (2013).
- 5 R.J. van Beers, E. Brenner en J.B.J. Smeets, *Random walk of motor planning in task-irrelevant dimensions*. *Journal of Neurophysiology*, **109**(4), 969-977 (2013).
- 6 J.B.J. Smeets, M.A. Frens en E. Brenner, *Throwing darts: timing is not the limiting factor*. *Experimental Brain Research*, **144**(2), 268-274 (2002).