

# VU Research Portal

## Stabilizing bimanual coordination: Changes in interlimb interactions

de Boer, B.J.

2013

### **document version**

Publisher's PDF, also known as Version of record

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

### **citation for published version (APA)**

de Boer, B. J. (2013). *Stabilizing bimanual coordination: Changes in interlimb interactions*.

### **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](mailto:vuresearchportal.ub@vu.nl)

# Samenvatting

## Stabiliseren van bimanuele coördinatie:

### Veranderingen in tussenledemaatinteracties

Tijdens het uitvoeren van ritmische bewegingen van twee handen (bimanuele coördinatie) wordt de stabiliteit van de coördinatie bepaald door de koppeling tussen de handen. In dit proefschrift is bimanuele coördinatie onderzocht door middel van ritmische flexie-extensie bewegingen van de twee handen, waarbij de handen met dezelfde frequentie bewegen. Bij een voldoende lage bewegingsfrequentie kunnen zonder specifieke training twee coördinatiepatronen stabiel worden uitgevoerd: in-fasecoördinatie (spiegelsymmetrische bewegingen van de handen) en tegenfasecoördinatie (bewegingen van de handen in dezelfde richting). Op hogere frequenties kan alleen het in-fasepatroon stabiel worden uitgevoerd. Dit verschil in coördinatieve stabiliteit is onder meer onderzocht vanuit het perspectief van de coördinatie dynamica, waarin benadrukt wordt hoe bimanuele patronen ontstaan als gevolg van de koppeling tussen de handen. Bimanuele coördinatie kan worden begrepen op basis van het Haken-Kelso-Bunz-model (HKB-model), dat bestaat uit twee niet-lineair gekoppelde niet-lineaire oscillatoren. Vanuit dit perspectief wordt bimanuele coördinatie bestudeerd aan de hand van de relatieve fase tussen de oscillatoren ( $\Phi$ ) en de variabiliteit hiervan, die een maat voor de coördinatieve stabiliteit. Het HKB-model beschrijft de stabiele uitvoering van in-fase ( $\Phi=0^\circ$ ) en tegenfasecoördinatie ( $\Phi=180^\circ$ ), evenals de rol van bewegingsfrequentie: als de bewegingsfrequentie geleidelijk wordt verhoogd, neemt de stabiliteit van tegenfase geleidelijk af totdat bij een kritieke frequentie een plotselinge overgang (transitie) plaatsvindt van tegenfase- naar in-fase-coördinatie. Uitbreidingen van het model bleken bovendien een accurate beschrijving te geven van de invloed van specifieke factoren, zoals het verschil in de ongekoppelde frequenties (eigenfrequenties) van de gecoördineerde ledematen en handvoorkeur. Omdat het HKB-model geen informatie verschaft over mogelijke onderliggende processen, heeft vervolgonderzoek zich in toenemende mate gericht op het verband tussen dit model en de onderliggende structuren en processen.

Aangezien bimanuele coördinatie bepaald wordt door de koppeling tussen de handen, is het relevant om de bijdragen van de onderliggende bronnen van tussenledemaatinteractie aan de stabiliteit van de coördinatie te achterhalen. In de

literatuur zijn verschillende bronnen van koppeling tussen de handen geopperd, die de bimanuele coördinatie kunnen beïnvloeden. Door gebruik te maken van een bestaande methode, richtte het in dit proefschrift beschreven onderzoek zich op drie functioneel gedefinieerde bronnen van tussenledemaatinteractie. De eerste bron, *geïntegreerde timing*, weerspiegelt de processen die gerelateerd zijn aan ‘open-loop’ timing van de stuursignalen van beide handen die het intentionele bimanuele patroon specificeren, zonder rekenschap te geven van mogelijke aanpassingen die gebaseerd zijn op feedback over de bewegingsuitvoering (afferente <sup>10</sup> feedback). De tweede bron, *foutcorrectie*, verwijst naar intentionele correcties van waargenomen fouten in het coördinatiepatroon (c.q. de relatieve fase) op basis van kinesthetische<sup>11</sup> informatie, resulterend in stabilisatie van het bimanuele coördinatiepatroon. *Fase-aantrekking*, ten slotte, weerspiegelt niet-intentionele invloeden van afferentie van de andere hand, die zich uiten in aantrekking tot bepaalde faserelaties tussen de handen. Deze tussenledemaatinteracties kunnen worden onderscheiden op basis van twee eigenschappen: intentionaliteit (d.w.z., of een bepaald bimanueel coördinatiepatroon wordt nagestreefd of niet) en afhankelijkheid van afferentie. Zowel geïntegreerde timing als foutcorrectie zijn intentioneel, terwijl alleen foutcorrectie en fase-aantrekking afhankelijk zijn van afferentie.

De veranderingen in de stabiliteit van bimanuele coördinatie die optreden als gevolg van taakgerelateerde parameters zoals bewegingsfrequentie en –amplitude, leren en ontwikkeling, moeten gepaard gaan met veranderingen in tussenledemaatinteracties. Het doel van het in dit proefschrift beschreven onderzoek was daarom om te achterhalen hoe veranderingen in de stabiliteit van de coördinatie voortvloeien uit veranderingen in de onderliggende tussenledemaatinteracties. Het onderzoek richtte zich hierbij op veranderingen in stabiliteit en tussenledemaatinteracties op zowel korte (variatie in taakparameters als frequentie en amplitude) als langere tijdschalen (leren en ontwikkeling). In de hoofdstukken 2, 4 en 5 worden alle drie interactiebronnen onderzocht, terwijl in Hoofdstuk 3 alleen fase-aantrekking wordt onderzocht.

Hoofdstuk 2 presenteert een onderzoek waarin werd onderzocht hoe veranderingen in coördinatieve stabiliteit als gevolg van veranderingen in de bewegingsfrequentie samenhangen met veranderingen in de onderliggende bronnen van tussenledemaatinteractie. Om de relatieve bijdragen van deze bronnen aan de coördinatieve stabiliteit te onderzoeken, werden vijf verschillende taken bestaande uit passieve en actieve bewegingen systematisch vergeleken. Deze taken waren zo gekozen, dat de mate waarin de interactiebronnen een rol speelden verschilden. Ten

---

<sup>10</sup> Afferentie: de aanvoer van neurale signalen naar het zenuwstelsel toe die sensorische informatie bevatten.

<sup>11</sup> Kinesthesie: de waarneming van de eigen beweging.

eerste, bij unimanuele coördinatie met een auditieve metronoom (taak UN) zijn geen bronnen van tussenledemaatinteractie betrokken. Ten tweede, tijdens unimanuele coördinatie met de metronoom in de aanwezigheid van tijd-verschoven passieve bewegingen van de andere hand (taak UNm), wordt de actieve hand aangetrokken tot in-fase- of tegenfasecoördinatie met de passieve hand. Door taken UNm en UN te vergelijken kan de bijdrage van fase-aantrekking onderzocht worden. Tijdens de derde taak werden de bewegingen van de actieve hand gecoördineerd met passieve bewegingen van de andere hand. Omdat de handen niet zichtbaar waren, moesten de actieve handbewegingen afgestemd worden op basis van kinesthetische informatie over de bewegingen van de passieve hand (het zogenoemde 'kinesthetic tracking', KT). Op basis van deze signalen werd het coördinatiepatroon gestabiliseerd door middel van foutcorrectie. Door de uitvoering van deze taak te vergelijken met die van taak UNm kon de stabiliserende bijdrage van foutcorrecties worden vastgesteld. Bovendien werd de robuustheid van het foutcorrectieproces onderzocht door de invloed van een afleidend auditieve signaal te bestuderen. Hiertoe werd de kinesthetische volgtaak uitgevoerd zowel in de aanwezigheid van een tijd-verschoven metronoomsignaal (KTa) als zonder een dergelijk signaal (KT). Ten slotte, tijdens actieve bimanuele coördinatie (taak AB) voerden proefpersonen actieve bewegingen van beide handen uit in een gespecificeerd patroon, zodat coördinatieve stabiliteit in deze taak ook werd bepaald door geïntegreerde timing van de bimanuele aansturingssignalen. De bijdrage van geïntegreerde timing werd onderzocht door taak AB te vergelijken met taak KT, omdat in taak KT alleen fase-aantrekking en foutcorrectie betrokken waren terwijl in taak AB alle drie de bronnen van tussenledemaatinteractie aan de stabiliteit konden bijdragen. Omdat foutcorrecties minder prominent aanwezig bleken te zijn in taak AB, werd geïntegreerde timing ook onderzocht door AB te vergelijken met UNm.

In Hoofdstuk 2 werd de invloed van bewegingsfrequentie op de tussenledemaatinteracties bestudeerd door deze vijf taken systematisch te vergelijken voor zowel in-fase- als tegenfasecoördinatie, uitgevoerd op drie verschillende bewegingsfrequenties. De hoogste frequentie was gelijk aan de kritieke frequentie zoals vastgesteld voor elke proefpersoon: de frequentie waarop de uitvoering van het tegenfasepatroon niet langer stabiel was en een overgang plaatsvond naar het in-fasepatroon. Resultaten bevestigden dat bimanuele coördinatie werd gestabiliseerd door elk van de drie tussenledemaatinteracties, waarbij het verschil in stabiliteit tussen in-fase en tegenfase vooral te wijten was aan verschillen in de stabiliserende werking van geïntegreerde timing. Bovendien bleek geïntegreerde timing op zichzelf voldoende om in-fase en tegenfase stabiel uit te voeren op lage bewegingsfrequenties, terwijl de invloed van

foutcorrectie prominenter zichtbaar werd als het moeilijkere tegenfasepatroon werd uitgevoerd met een hoge frequentie. Deze resultaten suggereerden dat in de buurt van de kritieke frequentie 'open-loop' motorische sturing niet voldoende was om coördinatieve stabiliteit te waarborgen, waardoor een overgang plaatsvond naar een vorm van 'closed-loop' sturing waarbij fouten in de relatieve fase gecorrigeerd werden met behulp van kinesthetische afferente informatie. De bijdrage van fase-aantrekking werd niet beïnvloed door de bewegingsfrequentie. Hoewel tijdens de volgtaak de ene hand passief werd bewogen, werd voor deze hand toch gecoördineerde spieractiviteit waargenomen. Deze bevinding suggereerde dat foutcorrecties effectiever konden worden uitgevoerd indien naar beide handen sturingssignalen werden gestuurd. Het lijkt waarschijnlijk dat op deze manier een bimanueel referentiekader werd gegenereerd, op basis waarvan sensorische verwachtingen konden worden opgesteld waarmee de actuele afferente signalen werden vergeleken.

Aangezien zowel empirische resultaten als theoretische overwegingen hebben gesuggereerd dat de effecten van fase-aantrekking groter zijn naarmate de bewegingen met een grotere amplitude worden uitgevoerd, werd in Hoofdstuk 3 de relatie tussen bewegingsamplitude en fase-aantrekking onderzocht. De centrale vraag hierbij was of de sterkte van fase-aantrekking beïnvloed werd door de amplitude als zodanig of door de amplituderelatie tussen de handen. Om dit te onderzoeken werd een gepubliceerde dataset nader geanalyseerd en vergeleken met de resultaten van een nieuw experiment. In beide experimenten werd de sterkte van fase-aantrekking bepaald in termen van de mate waarin de coördinatie van unimanuele bewegingen met een metronoom werd beïnvloed door de aanwezigheid van passieve bewegingen van de andere hand. Hiertoe werden taken UN en UN<sub>m</sub> vergeleken. In het eerste experiment werd de passieve hand met twee verschillende amplitudes bewogen zonder instructies met betrekking tot de bewegingsamplitude van de actieve hand. Deze actieve hand bleek in beide condities met dezelfde amplitude te bewegen. Hierdoor werd de amplituderelatie tussen de handen beïnvloed. Voor de kleine amplitude was de relatie tussen de amplitude van passieve en actieve hand 1:1.9 en voor de grote amplitude 1:1. In het tweede experiment werd de passieve hand met dezelfde amplitudes bewogen, maar ditmaal moest de actieve hand met een overeenkomstige amplitude bewegen. De amplituderelatie tussen de handen was dus 1:1 voor beide condities. De resultaten gaven aan dat de sterkte van fase-aantrekking alleen beïnvloed werd door een verandering in de amplituderelatie tussen de handen, en niet door amplitude op zich. Deze resultaten toonden aan dat fase-aantrekking niet alleen afhankelijk was van de sterkte van afferente signalen (afhankelijk van de bewegingsamplitude), maar ook van de vatbaarheid van de actieve hand voor

externe invloeden.

In Hoofdstuk 4 werden veranderingen in tussenledemaatinteracties op een langere tijdschaal onderzocht door de invloed van het leren van een nieuw coördinatiepatroon op de tussenledemaatinteracties te bestuderen. Proefpersonen leerden een nieuw coördinatiepatroon uit te voeren ( $\Phi = 90^\circ$ ) en veranderingen in bimanuele coördinatie werden gerelateerd aan de veranderingen in de onderliggende bijdragen van geïntegreerde timing, foutcorrectie en fase-aantrekking. Hiertoe voerden proefpersonen vier taken uit waarin de drie tussenledemaatinteracties in verschillende mate aanwezig waren: taak AB, KT, UNm en UN. Leereffecten werden onderzocht voor in-fase- en tegenfasecoördinatie, het geleerde coördinatiepatroon ( $\Phi = 90^\circ$ ) en het spiegelsymmetrische patroon ( $\Phi = 270^\circ$ ). Daarnaast werd de invloed van het richten van de aandacht onderzocht door drie situaties te vergelijken: een interne aandachtsfocus, een externe focus van aandacht sterk gerelateerd aan de bewegingen van de handen, en een externe focus van aandacht die verder was verwijderd van de handbewegingen. De resultaten toonden aan dat het leren van de  $90^\circ$ -faserelatie leidde tot veranderingen in de bijdragen van geïntegreerde timing en foutcorrectie, terwijl er geen verandering plaatsvond in de fase-aantrekking. De verandering in de bijdrage van geïntegreerde timing aan  $90^\circ$  ging vooraf aan de veranderingen in foutcorrectie. Bovendien nam de mate van foutcorrectie alleen toe in situaties waarbij geïntegreerde timing ook bijdroeg aan de stabiliteit en nauwkeurigheid van het coördinatiepatroon. Deze resultaten gaven aan dat foutcorrecties het meest effectief waren wanneer op basis van geïntegreerde timing een bimanueel referentiefraam kon worden gevormd waarmee de actuele kinesthetische feedback kon worden vergeleken. De resultaten waren vergelijkbaar voor de drie groepen met een verschillende aandachtsfocus. De uitvoering van het  $270^\circ$ -coördinatiepatroon verbeterde later dan de uitvoering van het geoefende  $90^\circ$ -patroon. Dit resultaat gaf aan dat de generalisatie van het geoefende patroon langzamer verliep dan het leren van het patroon zelf.

Veranderingen in tussenledemaatinteracties werden onderzocht op de langste tijdschaal in Hoofdstuk 5, waarin de veranderingen tijdens de ontwikkeling van de bimanuele coördinatie van kind tot volwassene onder de loep werd genomen. Hiertoe werden vier groepen vergeleken: 6/7-jarigen, 10/11-jarigen, 14/15-jarigen en jongvolwassenen. Niet alleen werd de temporele koppeling tussen de handen onderzocht voor de taken AB, KT, UNm en UN, ook werd de spatiële koppeling tussen de handen onderzocht door middel van een bimanuele lijn-cirkel-tekentaak. Ondanks een verbetering in de temporele coördinatietaak over alle leeftijdsgroepen (dankzij een toename in de koppelingssterkte, die tot uiting kwam in een toegenomen correlatie

tussen de cyclusduur van beide handen), veranderde de relatieve bijdrage van de drie bronnen van tussenledemaatinteractie nauwelijks over de leeftijden. Alleen de mate van foutcorrectie (zoals vastgesteld door middel van de foutcorrectie-correlatie) verbeterde met de ontwikkeling, wat duidde op een beter gebruik van kinesthetische feedback met toenemende leeftijd. Daarnaast toonden de resultaten aan dat in-fase- en tegenfasecoördinatie tegelijkertijd verbeterden over de bestudeerde leeftijdsgroepen. Dit duidde erop dat het verschil in stabiliteit tussen in-fase en tegenfase waarschijnlijk al voor de leeftijd van 6/7 jaar was ontstaan. De uitvoering van de tekentaak verbeterde in termen van vloeiendheid en consistentie over alle leeftijdsgroepen. Spatiële koppeling van de handen verbeterde vooral na de leeftijd van 14/15 jaar, aangezien de volwassenen een minder sterke afname in hun prestatie vertoonden dan de kinderen wanneer tegelijkertijd twee verschillende vormen werden getekend in vergelijking met het tekenen van twee dezelfde vormen en het tekenen met één hand. De volwassenen lieten dus minder interferentie zien tussen de bewegingen van de handen dan de kinderen tijdens het tekenen van twee verschillende vormen. Uit een vergelijking met neurologische en neurofysiologische studies, bleek dat onze resultaten overeenkwamen met de achterwaartse richting van myelinisatie<sup>12</sup> van het corpus callosum, waarvan het voorste gedeelte betrokken lijkt bij de temporele koppeling en het achterste deel bij de spatiële koppeling van bimanuele bewegingen.

In Hoofdstuk 6 werden de belangrijkste bevindingen van het proefschrift en de implicaties ervan besproken. Een cruciale algemene observatie was dat de veranderingen in de bijdragen van de verschillende tussenledemaatinteracties onafhankelijk bleken te zijn van de tijdschaal waarover deze veranderingen plaatsvonden. De verschillen in de bijdragen van de drie tussenledemaatinteracties leken met name samen te hangen met de intentie om een specifiek bimanueel patroon uit te voeren, aangezien vooral de bijdragen van geïntegreerde timing en foutcorrectie veranderden op zowel korte als langere tijdschalen, terwijl weinig verandering werd waargenomen voor fase-aantrekking. Een andere interessante observatie was de hechte relatie tussen geïntegreerde timing en foutcorrectie, die werd gevonden voor veranderingen in coördinatieve stabiliteit op zowel een korte tijdschaal (frequentie) als een langere tijdschaal (leren). Deze relatie werd geïnterpreteerd als een indicatie van een vorm van predictieve sturing, die vooral tijdens moeilijkere coördinatie-taken gebruikt leek te worden. Hierbij zou een kopie van het stuursignaal dat naar de handen gaat (een efferentiekopie) gebruikt worden om sensorische voorspellingen te maken, waarmee de actuele sensorische feedback

---

<sup>12</sup> Myelinisatie: een proces waarbij de stof myeline gevormd wordt rondom zenuwvezels, waardoor signalen sneller vervoerd worden.

vergeleken kan worden. Vervolgens werden in Hoofdstuk 6 enkele theoretische aannames ten aanzien van tussenledemaatinteracties besproken, die de basis vormden voor de gebruikte methodologie en werd ingegaan op de beperkingen hiervan. Tot slot werden enkele suggesties geopperd voor toekomstig onderzoek, geïnspireerd door de gevonden resultaten met betrekking tot de rol van geïntegreerde timing, foutcorrectie en fase-aantrekking bij de stabilisatie van bimanuele coördinatie.