

University of Groningen

Synergies and end-effector kinematics in upper limb movements

Tuitert, Inge

DOI:
[10.33612/diss.98793947](https://doi.org/10.33612/diss.98793947)

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:
2019

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

Tuitert, I. (2019). *Synergies and end-effector kinematics in upper limb movements*. [Thesis fully internal (DIV), University of Groningen]. University of Groningen. <https://doi.org/10.33612/diss.98793947>

Copyright

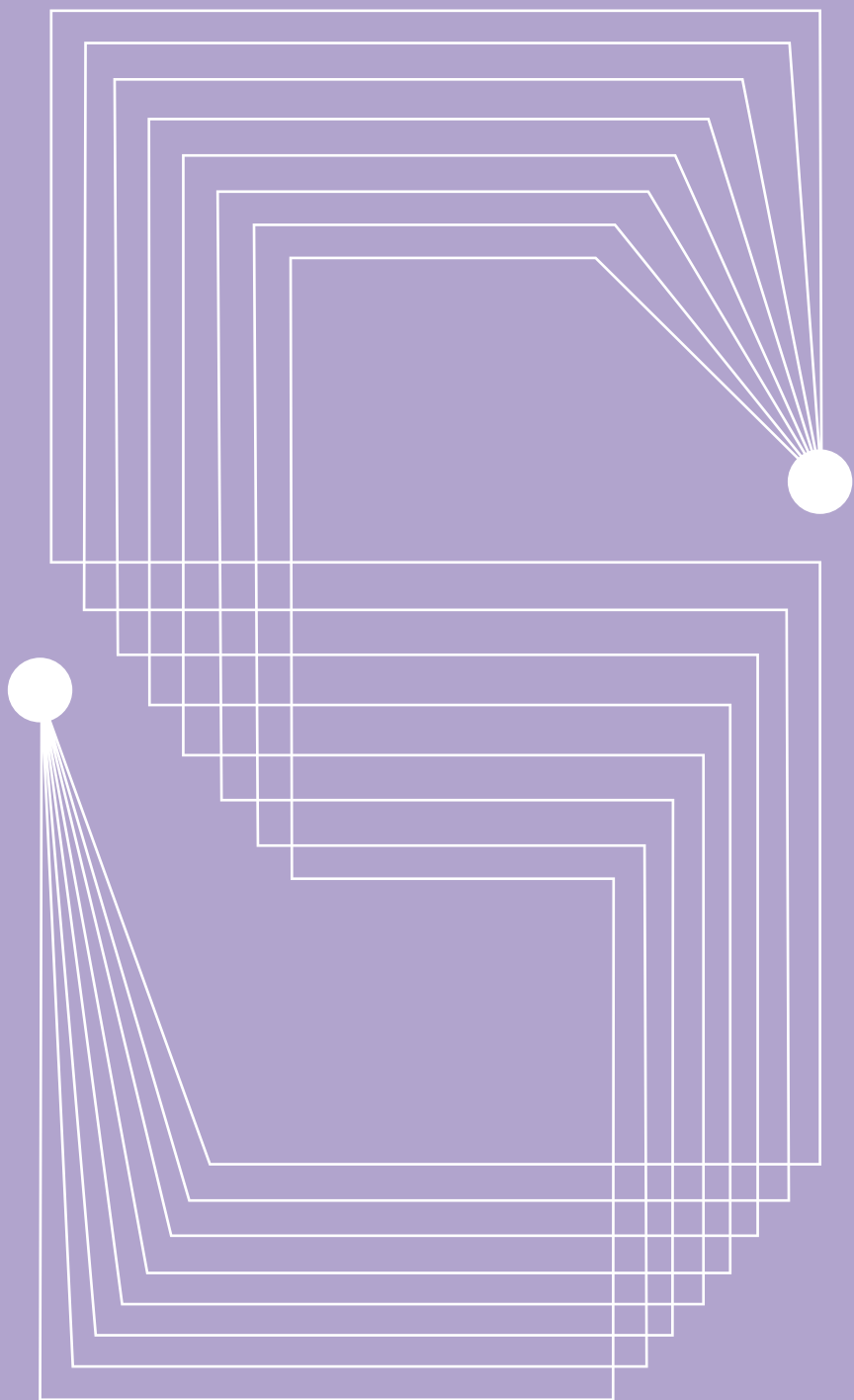
Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

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.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.



APPENDICES

Summary

Samenvatting

Résumé étendu

About the author

Dankwoord

Summary

When humans perform movements repeatedly, they are never completely the same. This is possible because many degrees of freedom (DOF) of the human motor system are involved when performing a motor action. In most cases, the number of DOF involved exceeds the minimum necessary to complete the motor task at hand. To illustrate this, think of a planar arm with three joints keeping the end-effector at a target. Here, the three joint angles describe the joint configuration of the arm, while two coordinates describe the position of the end-effector in the plane. Because the number of DOF at joint level exceeds that at end-effector level, various joint angle configurations result in the same end-effector position. It is proposed that synergies coordinate these redundant DOF. A synergy is defined as the temporary linking of DOF into task-specific units. Kay (1988) described the emergence of a synergy as the first step of a two-step constraining process. In this first step, the interactions amongst environment, organism, and task constraints temporarily link the independent DOF into a synergy. In the second step, the constraints act on the synergy, resulting in the specific behavior. In this thesis I aimed to gather more understanding on how the redundant DOF are coordinated by focusing on synergies and their role in specific behavior.

The first step of the two-step process, the emergence of synergies, was assessed using the uncontrolled manifold (UCM) analysis. This method partitions variability in DOF across multiple trials into two types of variability: variability that does not affect the end-effector position (V_{ucm}) and variability that does affect the end-effector position (V_{ort}). The variability in DOF should be structured such that V_{ucm} is larger than V_{ort} to accomplish a given task. In the present thesis, a larger V_{ucm} than V_{ort} is interpreted as the consequence of the emergence of a synergy, which corresponds to the first step of the two-step process. Moreover, the second step, the emergence of the specific behavior, was assessed using end-effector kinematics.

When using the UCM analysis to assess synergies, one important step is the creation of the linear model. A linear model relates changes in elemental variables to changes in performance variables. In multi-joint reaching, for example, the linear model relates changes in joint angle configurations to changes in 3D end-effector position. In chapter 2, I compared two methods to create a linear model, the analytical method and the regression method, to examine which method is most suitable. The main result revealed that the relation between measured and estimated (i.e., based on the model) fingertip-position deviation from the mean of individual trials was stronger if the model was created using the regression method compared to the analytical method. Therefore, I recommend using the regression method to create the linear model in UCM analysis when assessing multi-joint synergies.

In chapters 3, 4, and 5 I examined the influence of task constraints on the following aspects: 1) synergies, 2) end-effector kinematics, and 3) both synergies and end-effector kinematics, respectively. Chapter 3 focused on the first step of the constraining process, the emergence of a synergy. Here, I examined whether changes in task constraints during practice in pointing enhance a characteristic of a synergy, the so-called flexibility. Flexibility is defined as the variations in (one) DOF which are compensated for in other DOF such that the performance remains close to constant. Flexibility was quantified using the ratio of V_{ucm}



and V_{ort} , where a larger ratio implies a higher flexibility. The task constraint manipulation during practice was obstacle height, that is, while pointing the participant had to move the hand over an obstacle that varied in height. The goal of this practice phase was an enlargement of the exploited joint angle range, which was expected to lead to an increase in flexibility of the synergy. However, the comparison of pre and post practice, comprising one obstacle of intermediate height not included in the practice phase, revealed that the ratio of V_{ucm} and V_{ort} did not change, implying that flexibility was not affected by the practice phase. Importantly, V_{ucm} decreased from pretest to posttest, which suggests a decrease in the employment of joint angle configurations after practice. That is, the task constraint manipulation led to the usage of less different joint angle configurations within the synergy after practice, implying a slight change in the first step of the two-step process.

The second step of the constraining process, the further constraining of the synergy resulting in specific behavior, was assessed using horizontal curvature in chapter 4. Horizontal curvature was defined as the curvature of the trajectory of the end-effector in the horizontal plane. In this chapter on reaching, I examined the task constraint lifted height of the fingertip by focusing on two questions: 1) does a systematic increase in the height of the surface over which the end-effector has to move lead to a gradual increase in horizontal curvature in constrained movements (i.e., fingertip constrained to the surface), and 2) does a relation exist between the height to which the end-effector was lifted and horizontal curvature in unconstrained movements (i.e., fingertip not constrained to the surface). This was done using three experimental conditions: constrained movements over vertically curved surfaces that differed in height, constrained movements over a flat surface, and unconstrained movements. In constrained movements, a strong linear relation between height of the curved surface and horizontal curvature was found. However, the relation between lifted height of the end-effector and horizontal curvature was weak for unconstrained movements. These results indicated that the task constraint lifted height in the constrained condition systematically affected the second step of the two-step constraining process: the end-effector kinematics.

The results of chapters 3 and 4 indicated that at the separate levels (synergy and end-effector kinematics), a change of task constraints had an effect on the step of the process acting at that level. The next step was to analyze both steps of the two-step process concurrently, to examine whether different task constraints affect different levels of the process. This was done in chapter 5, where I tested whether the task constraint differences between manual reaching and manual lateral interception with three angles of approach, affected synergies, end-effector kinematics, or both. The results statistically confirmed systematic differences in end-effector kinematics between tasks and amongst conditions. This offered the possibility to examine whether these different kinematic end-effector patterns emerged from the constraining at the first or the second step of the two-step process. A variation on an adapted version of the UCM method was used to compare the synergies between conditions, that is, comparing the clusters of joint angle configurations. The results revealed that in reaching and interception toward the same target (arrival) position different synergies were used, whereas interception conditions that differed in angle of approach, were performed with similar synergies. Importantly, interception movements to the same target arrival position where objects approached with different angles of approach were performed with



similar synergies but different end-effector kinematics. These results suggest that some constraints, such as timing and guidance, creating the differences between reaching and interception, are mainly involved in the first step of the process, that is, the emergence of a synergy. Whereas other constraints, such as angle of approach, mainly influence the second step of the process.

The results of this thesis demonstrated that some constraints are mainly involved in the first step of the process, whereas other constraints mainly influence the second step of the process. That is, different task constraints are involved in each step of the two-step constraining process, suggesting that a two-step process is at play to coordinate the redundant DOF. Future research should further unravel this two-step constraining process to gain more understanding on the coordination of the redundant DOF.



Samenvatting

Als je een motorische handeling herhaaldelijk uitvoert, is deze nooit precies hetzelfde. Dit is mogelijk omdat gedurende het uitvoeren van motorische acties veel vrijheidsgraden, zoals gewrichten en spieren, van het motorische systeem betrokken zijn. In de meeste gevallen is het aantal betrokken vrijheidsgraden groter dan het minimum aantal vrijheidsgraden wat nodig is om de motorische taak uit te voeren. Dit resulteert in veel verschillende oplossingen voor een motorische taak. Denk aan het aanwijzen van een punt op tafel, dit kun je doen met heel veel verschillende houdingen van je arm terwijl je vingertop op hetzelfde punt op tafel blijft. Om het overvloedige aantal vrijheidsgraden te coördineren worden synergiën voorgesteld. Een synergie wordt gedefinieerd als het tijdelijke linken van vrijheidsgraden in taak specifieke eenheden. Kay (1988) beschreef een synergie als de eerste stap van een tweestapsproces als gevolg van de interacties tussen de omgeving, het organisme en de taak factoren. In de tweede stap, de factoren interacteren met de synergie, wat resulteert in het specifieke gedrag. Dit proefschrift streeft naar meer inzicht in hoe de overvloedige vrijheidsgraden worden gecoördineerd door te focussen op synergiën en hun rol in specifiek gedrag.

Het analyseren van de eerste stap van het tweestapsproces, het vormen van een synergie, werd onderzocht met behulp van de 'uncontrolled manifold' (UCM) analyse. Deze methode verdeelt de variabiliteit in vrijheidsgraden over verschillende repetities in twee types van variabiliteit: variabiliteit welke geen effect heeft op de eind-effector positie (V_{ucm}) en variabiliteit welke wel effect heeft op de eind-effector positie (V_{ort}). De variabiliteit moet zo gestructureerd zijn dat V_{ucm} groter is dan V_{ort} om de taak uit te voeren. In dit proefschrift wordt een V_{ucm} welke groter is dan V_{ort} geïnterpreteerd als de consequentie van het vormen van een synergie, wat correspondeert met de eerste stap van het tweestapsproces. Daarnaast werd de tweede stap van het proces, het voort komen van het specifieke gedrag, onderzocht aan de hand van end-effector kinematica, zoals het snelheidspatroon van de vingertop tijdens wijzen.

Wanneer de UCM analyse wordt gebruikt voor het analyseren van synergiën is het schatten van het lineaire model een belangrijke stap in de analyse. Een lineair model relateert veranderingen in elementaire variabelen aan veranderingen in uitkomst variabelen. In reiken kan een lineair model bijvoorbeeld de veranderingen gewrichtshoek configuraties relateren aan veranderingen in de 3D positie van de vingertop. In hoofdstuk 2 heb ik twee methoden vergeleken om een lineair model te schatten, de analytische methode en de regressie methode, om te onderzoeken welke methode het meest geschikt is. Het belangrijkste resultaat liet zien dat de relatie tussen gemeten en geschatte (gebaseerd op het lineaire model) vingertop positie afwijking van het gemiddelde van individuele repetities het sterkst was als het model geschat was met behulp van de regressie methode. Daarom raad ik aan om de regressie methode te gebruiken om het lineaire model te schatten voor UCM analyse bij taken waarbij veel gewrichten betrokken zijn om synergiën te analyseren.

In hoofdstukken 3, 4 en 5 heb ik de invloed van taak factoren op de volgende aspecten onderzocht: 1) synergiën, 2) eind-effector kinematica, en 3) synergiën en eind-effector kinematica. Hoofdstuk 3 ging over de eerste stap van het proces, het vormen van een synergie. In dit hoofdstuk heb ik onderzocht of veranderingen in taak factoren tijdens oefening een

karakteristiek van een synergie, de zogenoemde flexibiliteit, bevorderen. Flexibiliteit is gedefinieerd als de variaties in (een) vrijheidsgra(a)d(en) welke gecompenseerd worden in andere vrijheidsgraden zodat de prestatie bijna hetzelfde blijft en wordt gekwantificeerd als de ratio van V_{ucm} en V_{ort} , waarbij een hoger ratio een hogere flexibiliteit impliceert. De taak factor manipulatie gedurende de oefenfase was obstakel hoogte. Proefpersonen moesten wijsbewegingen maken over obstakels die varieerden in hoogte. Het doel van deze oefenfase was het vergroten van de geëxploiteerde gewrichtshoek gebied. We verwachten dat deze oefenfase zou leiden tot een vergrote flexibiliteit van een synergie. De vergelijking van voor en na de oefenfase, waarbij een gemiddelde obstakelhoogte werd gebruikt die niet voorkwam in de oefenfase, liet zien dat de ratio van V_{ucm} en V_{ort} niet veranderde. Dit impliceert dat de flexibiliteit niet beïnvloed werd door de oefenfase. Daarnaast werd V_{ucm} lager na de oefenfase dan ervoor, wat suggereert dat er een verkleining is van gebruikte gewrichtshoek gebied na de oefenfase. Samenvattend leidt de taak factor manipulatie tot het gebruik van minder verschillende gewrichtshoek configuraties binnen een synergie na de oefenfase, wat impliceert dat er een kleine verandering is in de eerste stap van het tweestapsproces.

Het onderwerp van hoofdstuk vier was de tweede stap van het proces, het verder beperken van de synergie wat resulteert in het specifieke gedrag. Dit werd onderzocht aan de hand van horizontale kromming, wat gedefinieerd is als de kromming van het eind-effector traject in het horizontale vlak. Gebruikmakend van een reiktaak onderzocht ik de taak factor opgetilde hoogte van de vingertop door middel van twee vragen: 1) leidt een systematische verhoging van de hoogte van de oppervlakte tot een graduele verhoging van horizontale kromming in bewegingen waarbij de vingertop niet opgetild mag worden, en 2) is er een relatie tussen de hoogte tot waar de vingertop wordt opgetild en horizontale kromming als de vingertop wel opgetild mag worden. Dit werd getest met behulp van drie experimentele condities: reikbewegingen waarbij de vingertop niet opgetild mag worden over een platte ondergrond en over een verticaal gekromde ondergrond welke verschilden in hoogte, en reikbewegingen waarbij de vingertop wel opgetild mag worden. In reikbewegingen waarbij de vingertop niet opgetild mag worden is er een sterke relatie tussen de hoogte van het gekromde oppervlak en horizontale kromming. De relatie tussen de hoogte van de opgetilde vingertop en horizontale kromming was echter zwak. Deze resultaten duiden aan dat de taak factor hoogte van de opgetilde vinger wanneer de vingertop niet opgetild mag worden systematisch de tweede stap van het proces beïnvloed: de eind-effector kinematica.

De resultaten van hoofdstuk 3 en 4 impliceren dat op de verschillende niveaus veranderingen in taak factoren een effect hebben op de stap van het proces welke werkt op dat niveau. De volgende stap is het gelijktijdig analyseren van beide stappen van het proces om te onderzoeken of verschillende taak factoren verschillende niveaus van het proces beïnvloeden. Dit was het onderwerp van hoofdstuk 5 waar ik onderzocht heb of taak factoren verschillen tussen reiken en interceptie met drie invalshoeken invloed hadden op synergiën, eind-effector kinematica of beide. De kinematische resultaten bevestigden systematische verschillen in eind-effector kinematica tussen taken en tussen condities binnen een taak. Dit geeft de mogelijkheid om te onderzoeken of deze verschillende eind-effector patronen voort kwamen uit de eerste of tweede stap van het proces. Een variatie op de aangepaste versie van de UCM methode werd gebruikt om synergiën, clusters van gewrichtshoek gebieden, te vergelijken tussen condities. De resultaten lieten zien dat in



reiken en interceptie naar dezelfde doel (aankomst) positie verschillende synergiën werden gebruikt, terwijl interceptie condities met verschillende invalshoeken werden uitgevoerd met dezelfde synergiën. Een belangrijke bevinding is dat interceptie bewegingen naar dezelfde doel aankomst positie met verschillende invalshoeken van het doel werden uitgevoerd met dezelfde synergiën maar andere eind-effector kinematica. Deze resultaten suggereren dat sommige taak factoren vooral betrokken zijn bij de eerste stap van het proces, het vormen van de synergie. Terwijl andere taak factoren zoals invalshoek van het object vooral betrokken zijn bij de tweede stap van het proces.

Samenvattend laten de resultaten van dit proefschrift zien dat sommige taak factoren vooral betrokken zijn bij de eerste stap van het tweestapsproces, terwijl andere taak factoren vooral invloed hebben op de tweede stap van het proces. Anders gezegd, verschillende taak factoren zijn betrokken in elke stap van het tweestapsproces, wat suggereert dat het tweestapsproces een rol speelt bij de coördinatie van overtallige vrijheidsgraden. Toekomstig onderzoek moet dit tweestapsproces verder ontrafelen om zo meer inzicht te krijgen over de coördinatie van overtallige vrijheidsgraden.



Résumé étendu

Lorsque des êtres humains exécutent des mouvements de manière répétée, ceux-ci ne sont jamais complètement les mêmes. Cela s'explique par le fait que de nombreux degrés de liberté (DDL) du système moteur humain sont impliqués dans l'exécution d'un acte moteur. Dans la plupart des cas, le nombre de DDL mis en jeu excède le minimum nécessaire pour exécuter la tâche motrice à accomplir. Il suffit de penser, par exemple, à un bras plan avec trois articulations maintenant l'effecteur final sur une cible. Les trois angles articulaires décrivent la configuration articulaire du bras, alors que deux coordonnées décrivent la position de l'effecteur final dans le plan. Comme le nombre de DDL au niveau articulaire excède le nombre de DDL au niveau de l'effecteur final, plusieurs configurations d'angle articulaire conduisent à la même position de l'effecteur final. Pour coordonner ces DDL redondants, des synergies sont souvent proposées. Une synergie est définie comme une liaison temporaire de DDL au sein d'unités spécifiques à une tâche. Kay (1988) a décrit l'émergence d'une synergie comme étant la première étape d'un processus contraignant en deux étapes dû aux interactions entre l'environnement, l'organisme et les contraintes de la tâche. Au cours de la seconde étape, les contraintes agissent sur la synergie, entraînant le comportement spécifique. Cette thèse a pour but de mieux comprendre la coordination des DDL redondants en se concentrant sur les synergies et leur rôle dans les comportements spécifiques.

La première étape du processus en deux étapes, l'émergence des synergies, a été évaluée au moyen de l'analyse de « l'Uncontrolled Manifold » (UCM). Cette méthode divise la variabilité des DDL dans les essais multiples en deux types de variabilité : une variabilité qui n'affecte pas la position de l'effecteur final (V_{ucm}) et une variabilité qui affecte la position de l'effecteur final (V_{ort}). La variabilité des DDL devrait être structurée de façon à ce que V_{ucm} soit supérieur à V_{ort} pour accomplir une tâche donnée. Dans la présente thèse, un V_{ucm} supérieur à V_{ort} est interprété comme la conséquence de l'émergence d'une synergie, ce qui correspond à la première étape du processus en deux étapes. En outre, la seconde étape, l'émergence du comportement spécifique, a été évaluée à l'aide de la cinématique de l'effecteur final.

Lors de l'utilisation de l'analyse UCM pour évaluer les synergies, une étape importante est la création du modèle linéaire. Un modèle linéaire relie les variations de variables élémentaires aux variations de variables de performance. Dans une extension pluri-articulaire, par exemple, le modèle linéaire relie les variations de configuration des angles articulaires aux variations de position 3D de l'effecteur final. Le chapitre 2 compare deux méthodes de création de modèle linéaire, la méthode analytique et la méthode de régression, afin de déterminer la méthode la plus adaptée. Le résultat principal est que la relation entre la déviation de la position du bout du doigt mesurée et estimée (c.-à-d. basée sur le modèle) à partir de la moyenne des essais individuels était plus forte lorsque le modèle était créé avec la méthode de régression qu'avec la méthode analytique. Par conséquent, il est recommandé d'utiliser la méthode de régression pour créer le modèle linéaire dans les analyses UCM lors de l'évaluation des synergies pluri-articulaires.

Les chapitres 3, 4 et 5 sont consacrés à l'influence des contraintes de la tâche sur les aspects suivants : 1) les synergies, 2) la cinématique de l'effecteur final, et 3) les synergies et la cinématique de l'effecteur final. Le chapitre 3 est dédié à la première étape du processus



contraignant, l'émergence d'une synergie. Il étudie si des changements dans les contraintes de la tâche pendant la pratique du pointage améliorent une caractéristique de la synergie, à savoir la flexibilité, définie comme les variations de (un) DDL qui sont compensées par d'autres DDL de sorte que la performance reste presque constante. La flexibilité a été quantifiée en utilisant le ratio de V_{ucm} et de V_{ort} , un ratio plus élevé impliquant une augmentation de la flexibilité. La manipulation de la contrainte de la tâche pendant la phase pratique était la hauteur de l'obstacle, c'est-à-dire qu'en pointant, le participant devait mouvoir sa main par-dessus un obstacle qui variait en hauteur. Le but de cette phase pratique était un agrandissement de l'ensemble des angles articulaires utilisés, dont on s'attendait à ce qu'il entraîne une augmentation de la flexibilité de la synergie. La comparaison pré et post-pratique, qui ne comprenait pas d'obstacle de hauteur intermédiaire, a cependant montré que le ratio de V_{ucm} et de V_{ort} n'avait pas changé, ce qui implique que la flexibilité n'a pas été affectée par la phase pratique. Il est important de souligner que le V_{ucm} a baissé du pré-test au post-test, ce qui suggère une baisse de l'utilisation des configurations des angles articulaires après la phase pratique. C'est-à-dire que la manipulation de la contrainte de la tâche a mené à l'utilisation de configurations d'angles articulaires moins différentes dans la synergie après la phase pratique, impliquant un léger changement dans la première étape du processus en deux étapes.

La seconde étape du processus contraignant, la contrainte de la synergie entraînant un comportement spécifique, a été évaluée au chapitre 4 à l'aide de la courbure horizontale. La courbure horizontale a été définie comme la courbure de la trajectoire de l'effecteur final dans le plan horizontal. Ce chapitre sur l'atteinte étudie la hauteur d'élévation du bout du doigt de la contrainte de la tâche en se concentrant sur deux questions : 1) une augmentation systématique de la hauteur de la surface que doit franchir l'effecteur final entraîne-t-elle une augmentation graduelle de la courbure horizontale des mouvements contraints (c.-à-d., du bout du doigt contraint à la surface), et 2) existe-t-il une relation entre la hauteur à laquelle l'effecteur final a été élevé et la courbure horizontale des mouvements non contraints (c.-à-d. du bout du doigt non contraint à la surface) ? On a utilisé pour cela trois conditions expérimentales : des mouvements contraints de franchissement de surfaces incurvées verticalement qui variaient en hauteur, des mouvements contraints de franchissement d'une surface plane, et des mouvements non contraints. Pour les mouvements contraints, une forte relation linéaire a été établie entre la hauteur de la surface incurvée et la courbure horizontale. Cependant, la relation entre la hauteur d'élévation de l'effecteur final et la courbure horizontale était faible pour les mouvements non contraints. Ces résultats montrent que la hauteur d'élévation de la contrainte de la tâche dans la condition de contrainte affecte systématiquement la seconde étape du processus contraignant en deux étapes : la cinématique de l'effecteur final.

Les résultats des chapitres 3 et 4 ont montré qu'à des niveaux séparés, une modification des contraintes de la tâche affectait l'étape du processus agissant à ce niveau. L'étape suivante consiste à analyser simultanément les deux étapes du processus en deux étapes, pour déterminer si des contraintes de tâche différentes affectent des niveaux de processus différents. Cette analyse a été réalisée au chapitre 5 où l'on a étudié si les différences de contrainte de la tâche entre l'atteinte manuelle et l'interception latérale manuelle avec trois angles d'approche, affectaient les synergies, la cinématique de l'effecteur final ou

les deux. Les résultats ont statistiquement confirmé des différences systématiques au niveau de la cinématique de l'effecteur final entre les tâches et parmi les conditions. Cela a offert la possibilité de déterminer si les différents patrons cinématiques de l'effecteur final provenaient de la contrainte de la première ou de la seconde étape ou du processus en deux étapes. Une variante d'une version adaptée de la méthode UCM a été utilisée pour comparer les synergies entre les conditions, c'est-à-dire en comparant les clusters de configurations d'angles articulaires. Les résultats ont montré que des synergies différentes étaient utilisées pour l'atteinte et l'interception vers la même position cible (d'arrivée), alors que des conditions d'interception qui différaient au niveau de l'angle d'approche, étaient réalisées avec des synergies similaires. Il est à noter que les mouvements d'interception vers la même position cible (d'arrivée) où les objets étaient approchés avec des angles différents ont été réalisés avec des synergies similaires mais une cinématique de l'effecteur final différente. Ces résultats suggèrent que certaines contraintes, telles que le timing et le guidage, créant les différences entre l'atteinte et l'interception, sont principalement impliquées dans la première étape du processus, c'est-à-dire l'émergence d'une synergie, alors que d'autres contraintes, telles que l'angle d'approche, influencent principalement la seconde étape du processus.

Les résultats de cette thèse ont démontré que certaines contraintes sont principalement impliquées dans la première étape du processus, alors que d'autres contraintes influencent principalement la seconde étape du processus. En d'autres termes, des contraintes de tâche différentes sont impliquées dans chaque étape du processus contraignant en deux étapes, ce qui semble suggérer qu'un processus en deux étapes est à l'œuvre pour coordonner les DDL redondants. Des recherches futures devront encore préciser ce processus contraignant en deux étapes pour mieux comprendre la coordination des DDL redondants.





About the author

Inge Tuitert was born on October 11th 1990 in Deventer, the Netherlands. In 2009, she graduated from bilingual (English and Dutch) pre-university education (VWO) at the Isendoorn College in Warnsveld. Inge moved to Groningen to study Human Movement Sciences at the University of Groningen, where she obtained her Bachelor's degree in 2012 and her Master's degree in 2014. During her studies, Inge was treasurer of the board of study association *Studiosi Mobilae* and was chairman of the umbrella organization *Promove*, which aims to improve the curriculum of Human Movement Sciences. In addition, Inge organized multiple activities for the study association and was a student teacher involved in several Bachelor and Master courses. In 2014, Inge published an experimental study on motor control, which laid the foundation for her PhD project.

The following years Inge worked on her PhD-project, which was an international collaboration between University of Groningen and the Aix-Marseille University. Her PhD studies focused on joint angle synergies and end-effector kinematics in upper limb movements and the underlying coordination process. During the project, she paid regular visits to Aix-Marseille University. In addition to her research work, Inge gained educational experience by her involvement in student supervision and by giving several lectures in the first year Bachelor course on Motor Control.

Currently, Inge continues her career as a Human Movement Scientist as a researcher at the Neurology department and as a project coordinator at the Human Movement Sciences department of the University Medical Center Groningen.



Scientific output

Tuitert, I., Golenia, L., Bootsma, R.J., Bongers, R.M. Task constraints act at the level of synergies and at the level of end-effector kinematics in manual reaching and manual lateral interception. *Submitted*.

Tuitert, I., Valk, T.A., Otten, E., Golenia, L., Bongers, R.M. (2018). Comparing different methods to create a linear model for the uncontrolled manifold analysis. *Motor Control*, 23(2), 189-204.

Golenia, L., Schoemakers, M.M., Otten, E., **Tuitert, I., Bongers, R.M.** (2018) The development of consistency and flexibility in manual pointing during middle childhood. *Developmental Psychobiology* 60(5), 511-519.

Tuitert, I., Bootsma, R.J., Schoemaker, M.M., Otten, E., Mouton, L.J., Bongers, R.M. (2017). Does practicing a wide range of joint angle configurations lead to higher flexibility in a manual obstacle-avoidance target-pointing task? *PLoS ONE*, 12(7): e0181041.

Tuitert, I., Mouton, L.J., Schoemaker, M.M., Zaal, F.T.J.M., & Bongers, R.M. (2014) The effect of the height to which the hand is lifted on horizontal curvature in horizontal point-to-point movements. *Experimental Brain Research*, 232, 3211-3219.

Conference contributions

Tuitert, I., Bootsma, R.J., Bongers, R.M. Are synergies in lateral manual interception flexible. Poster presentation at *Progress in Motor Control, 2017, Miami, United States*.

Tuitert, I., Bootsma, R.J., Bongers, R.M. Does flexibility increase when the interception location of a moving target is uncertain in a manual interception task? Poster presentation at *Motor Control, 2016, Wisla, Poland*.

Tuitert I., Mouton, L.J., Bootsma, R.J., Otten, E., Schoemaker, M.M., Bongers, R.M. Does flexibility in manual pointing movements increase after practice? Oral presentation at *14th European Conference Ecological Psychology, 2016, Groningen, the Netherlands*.

Tuitert, I., Mouton, L.J., Bootsma, R.J., Otten, E., Schoemaker, M.M., Bongers, R.M. Can flexibility be increased in point-to-point movements? Poster presentation at *North American Society for Psychology of Sport and Physical Activity, 2016, Montreal, Canada*.

Tuitert, I., Mouton, L.J., Schoemaker, M.M., Bongers, R.M. Does flexibility increase through training? Oral presentation at *Association for Human Movement Sciences PhD day, 2015, Enschede, the Netherlands*.

Tuitert, I., Mouton, L.J., Schoemaker, M.M., Bongers, R.M. Can flexibility of reaching movements be increased through training? Oral presentation at *18th International Conference on Perception and Action, 2015, Minneapolis, United States*.



Dankwoord

C'est fini! Mijn proefschrift is klaar! Tijdens dit traject zijn er veel mensen die mij adviezen, hulp en ondersteuning hebben gegeven. Sommigen daarvan wil ik graag persoonlijk bedanken.

Allereerst wil ik mij richten tot dr. R.M. Bongers. Raoul, tijdens de mastercursus Motor Control heb jij mijn interesse gewekt voor het vakgebied, wat mij heeft geïnspireerd om aan dit project te beginnen. Je bevologenheid bracht mooie discussies over (extra) analyses en de interpretatie van onze bevindingen. Tijdens tegenslagen in het project gaf jij mij altijd het vertrouwen dat ik het kon. Dit heeft mij extra geholpen tijdens de laatste loodjes van mijn promotietraject. Ik ben daarom ook erg blij dat je op de valreep nog mijn eerste promotor geworden bent! Bedankt voor je betrokkenheid, je begeleiding en alles wat je mij hebt geleerd!

Voor het verwelkomen van mij in Marseille en het verkrijgen van de financiering voor dit project, wil ik mijn grote dank uitspreken aan prof. dr. R.J. Boostma. Beste Reinoud, je hielp mij met het opstarten van alle Franse administratieve onderdelen en je introduceerde mij de Franse traditie van wijn bij de lunch. Daarnaast heeft je kritische wetenschappelijk bijdrage aan de artikelen een grote bijdrage geleverd aan mijn proefschrift. Bedankt hiervoor!

Prof. dr. E. Otten, beste Bert, bedankt voor de inhoudelijke vrijheid die je mij hebt gegeven en de sturing op de momenten dat het nodig was. Jouw technische blik op de artikelen was van waarde voor het project.

Voor de adviezen en hulp aan het begin van het project wil ik dr. L.J. Mouton en dr. M.M. Schoemaker bedanken. Beste Noor, naast je inhoudelijke bedrage heb jij mij geleerd de broodnodige structuur aan te brengen in teksten en presentaties. Dit is van cruciale waarde voor een associatieve denker zoals ik, bedankt hiervoor! Beste Marina, jouw rust en kennis over motorische controle en ontwikkeling hebben geholpen tijdens het opzetten van dit project.

Ook wil ik graag mijn proefpersonen en studenten bedanken. De proefpersonen hebben het volgehouden om soms meerdaagse vrij saae experimenten te volbrengen, hulde hiervoor! De studenten die ik graag specifiek wil bedanken zijn Ester en Jasper, super bedankt voor jullie hulp bij het verzamelen van de data. Tijdens het data verzamelen wilde het niet meer zo nieuwe meetsysteem nog wel eens tegensputteren. Ik wil Wim, Emyl en Dirk van harte bedanken voor jullie 'magic hands' die ervoor zorgden dat het systeem het altijd snel weer deed. Daarnaast heb ik tijdens mijn promotietraject deelgenomen aan verschillende 'journal clubs' die mijn bredere wetenschappelijke ondersteuning hebben gestimuleerd, bedankt hiervoor!

Collega promovendi, bedankt voor de super fijne tijd! De leuke verhalen en discussies tijdens koffiepauzes en lunches maakten werkdagen net een beetje leuker. Ik heb genoten van de vele vrijdagmiddagborrels in de Dogs en de avonden op Noorderzon, special thanks to Sigrid hiervoor. Ook alle buitenland tripjes waren een feest met jullie: als 'one of the guys' naar Minneapolis, de roadtrips naar Polen en Antwerpen, de congressen in Montreal en Miami, en de heerlijke vakantie op Cuba met memorabele drankjes uit kokosnoten. Naast

mijn Nederlandse collega's wil ik ook mijn Franse collega's bedanken. I want to thank my French colleagues for the great times I had in Marseille, and special thanks for introducing me to l'apéro, which should not necessarily be followed by dinner! In het bijzonder Niek, jij zorgde er voor dat ik me welkom voelde in Marseille met jouw Twentse humor.

Verder wil ik mijn huidige collega's van het 'Next Move in Movement Disorders' team bedanken voor de gezelligheid, positiviteit, en met name de flexibiliteit die mij de mogelijkheid heeft gegeven om dit proefschrift af te ronden.

Het werken aan een proefschrift vereist ook de nodige ontspanning. Sinds het begin van mijn studietijd leveren mijn studievriendinnen 'de parels' hier een grote bijdrage aan. Ons jaarlijkse weekend weg, de parelvakanties ("het is... weekend!") en vele pareldagen hebben ervoor gezorgd dat ik aan ontspanning de afgelopen jaren niets tekort kwam. In het bijzonder wil ik de parels bedanken die samen met mij in het hoge noorden zijn gebleven voor alle borrels, etentjes en gezelligheid. Laura, ik waardeer je adviezen en Ariëlla, ik geniet van onze gezamenlijke liefde voor (slechte) films. Bedankt voor alles parels!

Ook wil ik mijn volleybalteams van de afgelopen jaren bedanken voor de sportieve en gezellige tijd! In het bijzonder wil ik Karin, Yaira en de harde kern bedanken. Karin, ik waardeer jou nuchtere kijk op de wereld enorm en Yaira, ik bewonder je wereldse plannen. Samen erg goed uit eten gaan is een mooie traditie geworden. Lieve harde kern, ik heb een hoop lol gehad tijdens onze uitjes naar Ameland en Keulen, de etentjes en borrels.

Samen opgroeien in een dorp scheidt een band die over tijd en door afstand niet verwaterd. Deze club 'vriendjes' wil ik bedanken voor hun nuchterheid, de gezellige etentjes en weekendjes weg.

Lieve Anne, ontspannen is iets wat ik met jou erg goed kan. Of het nou avondjes op de bank of wandelvakanties naar IJsland of Limburg waren. Ik waardeer onze vriendschap en hoop dat we nog veel kilometers samen zullen maken.

Lieve Anniek en Laura, bedankt dat jullie mijn paranimfen willen zijn. De afgelopen jaren hebben we samen de ups en downs van onze promotietrajecten gedeeld en zijn we naast collega's ook goede vriendinnen geworden. Anniek, ik bewonder je mentaliteit en je doorzettingsvermogen ontzettend. Laura, ik herinner mij onze leuke tijd in New York als de start van een mooie vriendschap!

Mark, bedankt voor je adviezen en de rust die je over je hebt! Ik bewonder hoe je in het leven staat en hoe weinig jij je laat beïnvloeden. Lieve Jan en Willy, pap en mam, zonder jullie had ik hier niet gestaan. Jullie hebben me gesteund, gemotiveerd en het vertrouwen gegeven om mijn promotie te starten en af te ronden. Dat het advies om het boerenbedrijf niet over te nemen zou leiden tot dit proefschrift hadden jullie natuurlijk niet verwacht, maar benadrukt hoe vrij jullie mij hebben gelaten in al mijn keuzes. Ik wil jullie alle drie bedanken voor sterke basis van ons gezin waar ik nog altijd heel fijn kan thuiskomen.

