

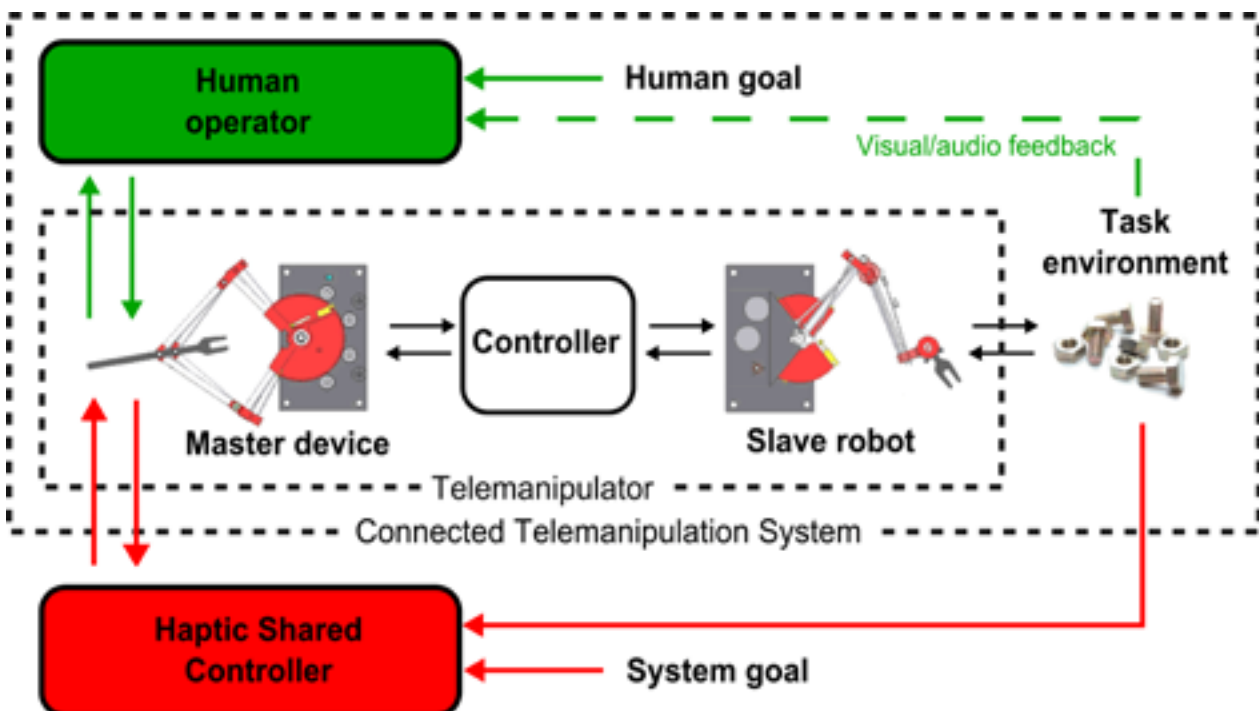
# Is the force with you?

## On the accuracy of human force perception

In haptische telemanipulatiesystemen worden de krachten die worden gemeten door de robot teruggekoppeld naar de mens, waardoor deze de interactiekrachten kan voelen en zijn taak beter kan uitvoeren. Tot nu toe wordt de menselijke krachtperceptie niet meegenomen bij het ontwerpen van haptische systemen, waarmee impliciet wordt aangenomen dat de menselijke krachtperceptie perfect is, en ervoor zorgt dat de specificaties van de master en slave robots erg nauwkeurig moeten zijn. Het doel van dit proefschrift is de belangrijkste factoren die de statische krachtperceptie beïnvloeden te identificeren en rekenkundige modellen die deze invloeden kunnen kwantificeren en voorspellen te ontwikkelen.

Haptische technologie wordt steeds vaker gebruikt om de mens-machine-interactie te verbeteren. Neem bijvoorbeeld de touchscreens van smartphones, die vibreren wanneer je ze aanraakt. Dit is een eenvoudige vorm van haptische feedback, maar stel je voor dat je een robot kunt aansturen en kunt voelen wat de robot

voelt als hij met de omgeving interacteert. Haptische telemanipulatiesystemen maken dit mogelijk. Hier stuurt een mens een slave robot (bijvoorbeeld een operatierobot) in een andere omgeving aan met behulp van een master robot (bijvoorbeeld een joystick) (afbeelding 1).

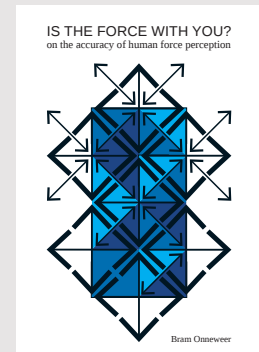


Afbeelding 1. Haptisch telemanipulatiesysteem met de feedbackpaden voor zowel visuele en auditieve signalen als de haptische (kracht)signalen (Boessenkool et al., 2012)



Dr.ir. Bram Onneweer  
Promotie: 23 maart 2016, TU Delft  
Prof. dr. Frans C.T. van der Helm (promotor)  
Dr.ir. Alfred C. Schouten (co-promotor)  
Dr.ir. Winfred Mugge (co-promotor)

Docent Mens en Techniek  
Bewegingstechnologie  
De Haagse Hogeschool  
bonneweer@gmail.com



## De menselijke krachtreproductiefout

Informatie over krachten worden opgenomen door de vervorming van de huid (tactiele sensoren) en door krachten in de spieren die trekken aan de spierpezen (Golgi Tendon Organs). Om de menselijke krachtperceptie te meten, hebben we statische krachtreproductie-experimenten uitgevoerd, waar aan proefpersonen werd gevraagd om actief een doelkracht en reproductiekracht te genereren met dezelfde hand. In dit proefschrift zijn de effecten van de verschillende factoren geanalyseerd met hetzelfde experimentele protocol. Proefpersonen werd gevraagd om series van twee opvolgende acties uit te voeren: oefen de op het scherm aangegeven kracht uit in de aangegeven grootte en richting (doelkrachtactie), oefen dezelfde krachtvector in grootte en richting uit zonder visuele ondersteuning (reproductieactie). De proefpersonen moesten door middel van een knop aangeven wanneer ze de doelkracht uitoefenden (doelkrachtactie) en wanneer ze geloofden dat ze de juiste reproductiekracht uitoefenden (reproductieactie). Het verschil tussen de krachten die uitgeoefend zijn tijdens de doelkrachtactie en de reproductieactie noemen we de krachtreproductiefout.

## Factoren die de krachtreproductiefout beïnvloeden

### Krachtniveau

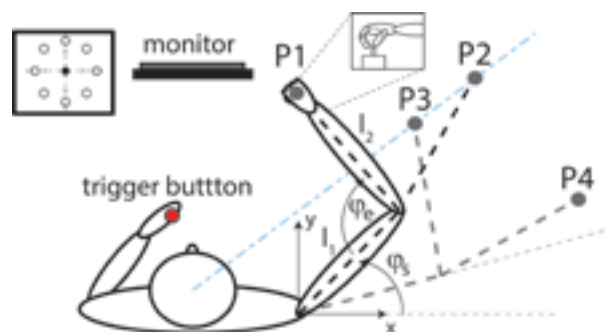
Het effect van krachtniveau op de krachtreproductiefout in één krachtrichting is geanalyseerd door proefpersonen het krachtreproductieprotocol op verschillende krachtniveaus (10N-160N, met stappen van 30N) uit te laten voeren tegen een vast handvat. Proefpersonen reproduceerden te hoge krachten voor lage krachtniveaus (<40N) en te lage krachten voor hoge krachtniveaus (>130N). Als de krachtreproductiefout veroorzaakt wordt door re-afferente terugkoppeling (door het centrale zenuwstelsel voorspelde sensorische informatie veroorzaakt door zelfgegenereerde krachten) zoals voorgesteld in literatuur (Shergill et al., 2003), dan zou de krachtreproductiefout moeten verdwijnen wanneer zowel de doelkracht als de reproductiekracht zelfgegenereerd zijn. In deze studie tonen we aan dat

de krachtreproductiefout afhangt van het krachtniveau en laten we zien dat de fouten in krachtreproductie niet te verklaren zijn door re-afferente terugkoppeling alleen.

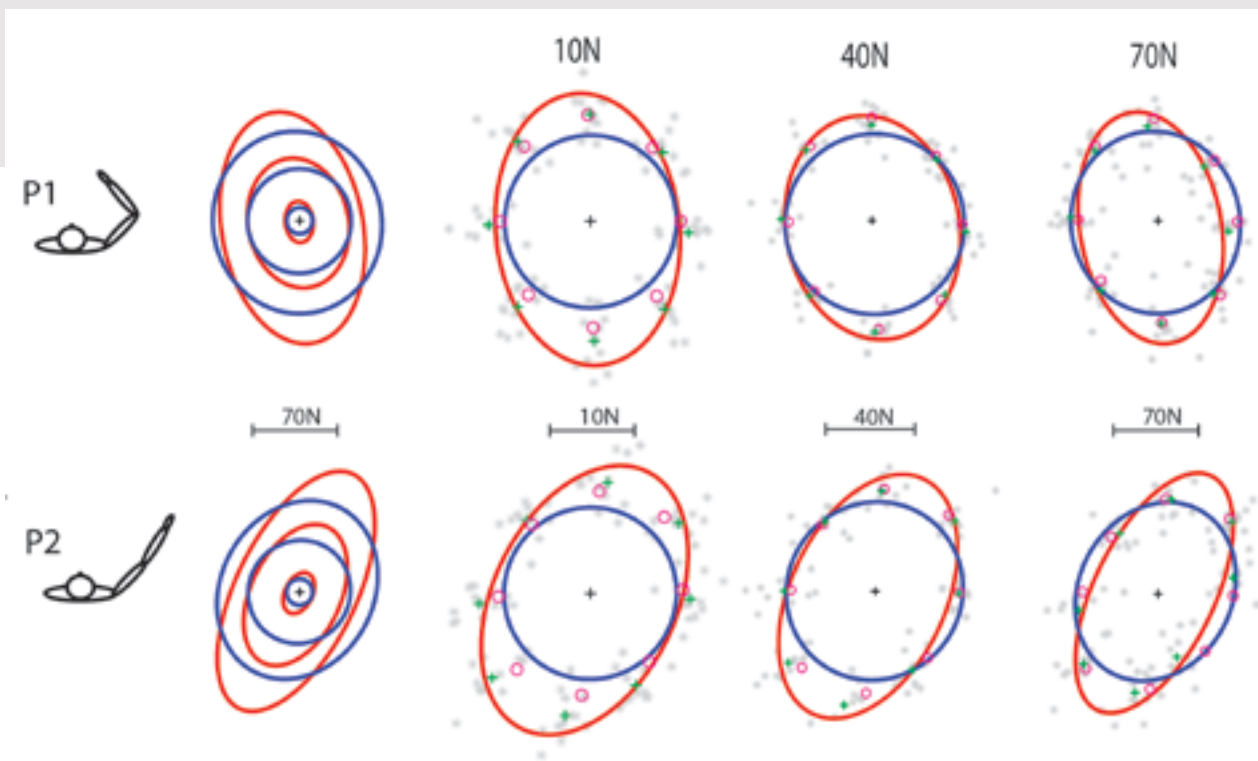
### Krachtrichting en houding van de arm

Voor de effecten van de krachtrichting en de houding van de arm op de krachtreproductiefout in het horizontale vlak, is het krachtreproductieprotocol uitgevoerd in acht krachtrichtingen en in vier armhoudingen op een krachtniveau van 10N (afbeelding 2). Door de gemeten reproductiekrachten in de acht richtingen is voor iedere armhouding een ellips gefit (afbeelding 3). Het verschil tussen de ellips (rood) en de doelkrachtcirkel (blauw) is de krachtreproductiefout. De resultaten laten zien dat de krachtreproductiefout afhangt van de richting van de kracht (afbeelding 3). De oriëntatie van de ellipsen hangt af van de houding van de arm. De minst nauwkeurige krachtrichting (de lange as van de ellips) staat voor alle armhoudingen in lijn met de schouder.

Voor alle vier de armhoudingen hebben we een model dat gewrichtsmomenten schaalte gefit op de data van de andere drie armhoudingen. Dit model beschrijft de gevonden reproductie-ellipsen met een grote nauwkeurigheid (afbeelding 3). Deze studie laat zien dat de krachtreproductiefout afhangt van krachtrichting en de armhouding. Het model gebruikt de oriëntatie (houding) van de arm en kan de



Afbeelding 2. Bovenaanzicht van de experimentele setup. De proefpersoon zat voor een monitor en voerde het krachtreproductieprotocol uit. P1-P4 geven de verschillende armhoudingen weer.



Afbeelding 3. Krachtreproductie-ellipsen (rood) en de doelkrachtcirkels (Blauw). De magenta cirkels zijn de uitkomsten van het schalingsmodel en de groene plussen de gemiddelde waarden van de proefpersonen.

krachtreproductiefouten verklaren door de momenten in de gewrichten te schalen; dit wijst er op dat de eindpunt-reproductiefouten ontstaan op gewrichtsniveau.

#### Krachtniveau in meerdere richtingen

Het effect van krachtniveau op de krachtreproductiefout in het horizontale vlak is geanalyseerd door drie groepen proefpersonen het krachtreproductieprotocol uit te laten voeren in acht krachtrichtingen en in twee armhoudingen (P1, P2; afbeelding 2) en verschillende krachtniveaus (groep 1: 10N; groep 2: 40N; groep 3: 70N). De resultaten laten zien dat de oriëntatie van de reproductie-ellipsen verandert met armhouding, maar niet met krachtniveau (afbeelding 3). Dit toont aan dat het effect van krachtrichting en van het krachtniveau op de krachtreproductiefout beïnvloed worden door de armhouding.

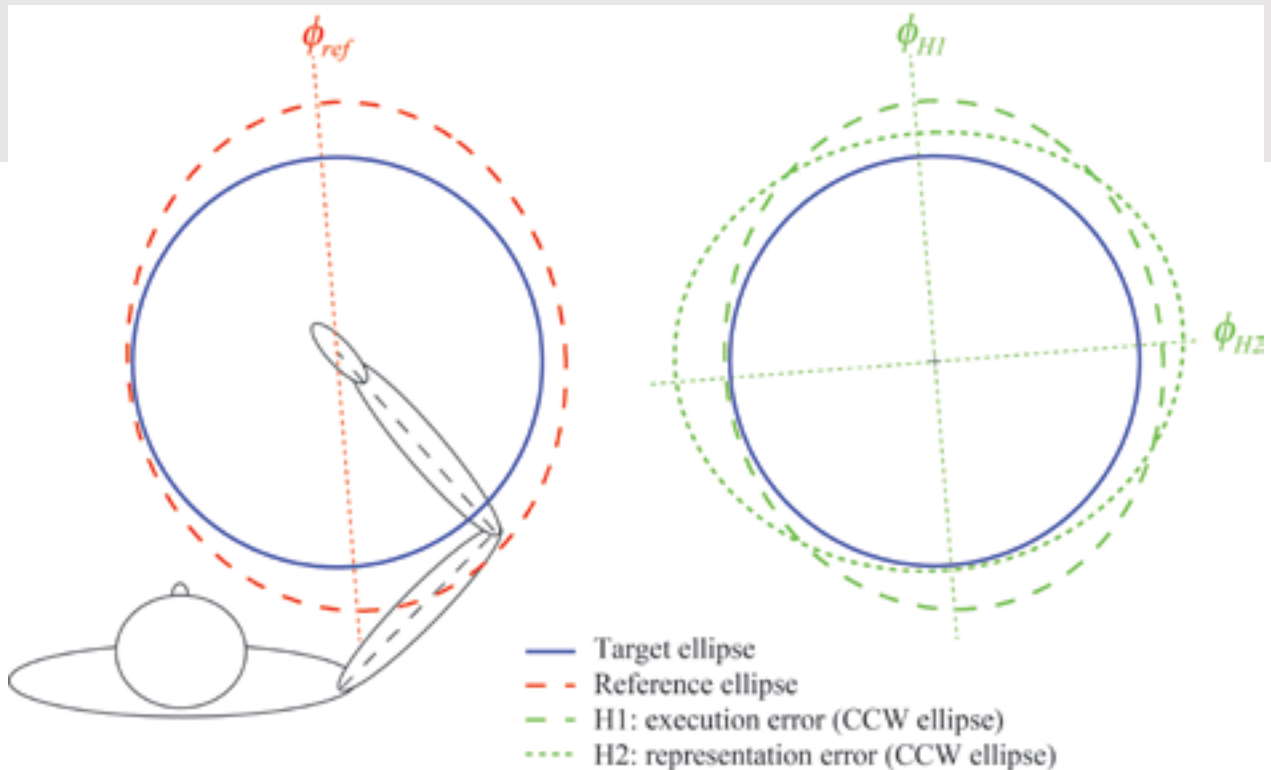
Daarnaast laten de resultaten zien dat het effect van krachtniveau op de krachtreproductiefout verandert met krachtrichting. Dat wil zeggen dat op hogere krachtniveaus de fouten in de richting van de schouder groter worden, terwijl ze in de richting loodrecht daarop kleiner worden. We hebben de effecten van krachtniveau in het horizontale

vlak meegenomen in het schalingsmodel door de schalingparameters afhankelijk te maken van de gewrichtsmomenten. Hierdoor kunnen we de krachtreproductiefouten in het horizontale vlak tussen 10N en 70N nauwkeurig voorstellen (afbeelding 3).

#### De oorsprong van de krachtreproductiefout

In deze studie onderzochten we waar de krachtreproductiefouten vandaan komen. Hiervoor hebben we een experiment bedacht om te bepalen of de systematische fouten worden veroorzaakt doordat mensen de verkeerde representatie van de kracht krijgen of doordat mensen de goede representatie verkeerd uitvoeren.

In dit experiment hebben we de proefpersonen gevraagd om de grootte van een kracht (5N en 15N) te reproduceren ofwel (1) in dezelfde richting (referentiereproductie) ofwel (2) in een 90°-tegen-de-klok-in-geroteerde richting (CCW-reproductie). We voorspelden dat wanneer de krachtreproductiefouten veroorzaakt worden door de verkeerde uitgeoefende kracht, de proefpersoon de juiste representatie van de kracht krijgt, maar deze verkeerd uitvoert in de



Afbeelding 4. Hypotheses om de oorzaak van de kracht-reproductie-fouten te vinden.

geroteerde richting (H1; afbeelding 4). De proefpersoon ervaart de doelkracht (blauwe cirkel) en oefent deze verkeerd uit in de geroteerde richting en maakt daarmee dezelfde fout als wanneer de kracht in de reproductierichting ervaren zou zijn. Dit resulteert dan in eenzelfde ellips als die voor de referentiereproducties gevonden is. Maar als de systematische fouten ontstaan door een verkeerde representatie van de kracht, dan voorspellen we dat de proefpersoon deze verkeerde representatie correct in de geroteerde richting reproduceert (H2; afbeelding 4). De proefpersoon ervaart de verkeerde kracht (rode reproductie-ellips) en reproduceert deze correct in de geroteerde richting waardoor de ervaren fout in de geroteerde richting wordt uitgevoerd. Dit resulteert dan in een 90°-geroteerde ellips. In onze resultaten vinden we geen rotatie voor de CCW-reproductie-ellips. Dit laat zien dat de representatie van de kracht goed is, maar de systematische fouten veroorzaakt worden tijdens het uitvoeren van de kracht. Deze resultaten laten ook zien dat het sensorimotorsysteem niet probeert hetzelfde gevoel (sensorische informatie) of dezelfde motorische aanstuursignalen te gebruiken, maar een interne representatie van de kracht maakt.

## Conclusies en richtlijnen

Aan de hand van de gevonden resultaten komen we tot drie overkoepelende conclusies:

- 1 Menselijke krachtperceptie omvat systematische fouten.
- 2 De systematische fouten in krachtperceptie ontstaan op gewrichtsniveau en zijn voorspelbaar.
- 3 De systematische fouten ontstaan tijdens het uitvoeren van krachten.

Met behulp van deze conclusies hebben we twee richtlijnen voor het ontwerpen van haptische systemen (H) en twee richtlijnen voor neurowetenschappen (N) opgesteld:

- H1 Neem de nauwkeurigheid van de menselijke krachtperceptie mee in het ontwerpproces om zo haptische apparaten betaalbaarder te maken. De menselijke krachtperceptie is niet perfect. Haptische systemen hoeven maar marginaal nauwkeuriger te zijn dan de menselijk perceptie. Deze kunnen hierdoor betaalbaarder worden, zodat ze voor meer toepassingen gebruikt kunnen worden.
- H2 Compenseer voor de systematische fouten in de menselijke krachtperceptie. Als we de fouten weten, kunnen we hiervoor compenseren. Met de

kennis dat de fouten ontstaan tijdens het uitvoeren en niet afhankelijk zijn van waar de kracht eerder ervaren is, kunnen we het schalingsmodel gebruiken om de fouten te voorspellen.

N1 De fouten die gemaakt worden in verschillende modaliteiten ontstaan in verschillende referentiekaders.

De gevonden resultaten geven aan dat mensen informatie van verschillende sensoren verwerken in verschillende referentiekaders. Zo wordt in literatuur gespeculeerd dat positie sense werkt in een egocentrisch kader en laten onze resultaten zien dat kracht sense op gewrichtsniveau kan worden verklaard.

N2 Het centrale zenuwstelsel vergelijkt niet zomaar de sensorische informatie of de aanstuursignalen voor de spieren om het lichaam aan te sturen. Het veranderen van de richting zorgt ervoor dat je andere spieren gebruikt en dus ook andere informatie gebruikt om je krachtschatting op te baseren. Dat de fout dezelfde blijft, suggereert dat de mens niet-sensorische informatie vergelijkt of dezelfde motorcommando's gebruikt om een kracht te reproduceren. De fouten worden dus in een hoger niveau in de hersenen veroorzaakt.

Het werk dat beschreven is in dit proefschrift geeft een nieuwe kijk op de nauwkeurigheid van de menselijke krachtperceptie, presenteert een model dat de krachtreproductiefouten kan voorspellen en maakt de eerste stappen in het ontrafelen van waar de fouten ontstaan.

**Referenties**

Boessenkool, H. et al. (2012). A Task-Specific Analysis of the Benefit of Haptic Shared Control During Tele-Manipulation. IEEE Transactions on Haptics, pp.1-1.  
 Shergill, S.S. et al. (2003). Two eyes for an eye: the neuroscience of force escalation. Science, 301(5630), p. 187.



© SINDS 2001 MAAKT EN BEWAAKT TROSSENLOS° UW MERK(EN), HOUDT ZE SCHERP EN LAAT ZE SCHITTEREN.

**IDENTITEIT/HUISSTIJL**  
**SIGNING /BEWEGWIJZERING**  
**INFOGRAPHICS**  
**VISUELE INSTRUCTIES**  
**REDACTIONELE VORMGEVING**



**trossenlos°**  
 GRAFISCHE COMMUNICATIE



Vijverhofstraat 47  
 3032 SB Rotterdam

info@trossenlos.nl  
 06 477 66 194