



HAL
open science

Généralisation de la Fonction de Redirection de la Main en Réalité Virtuelle

Benoît Geslain, Simon Besga, Flavien Lebrun, Gilles Bailly

► **To cite this version:**

Benoît Geslain, Simon Besga, Flavien Lebrun, Gilles Bailly. Généralisation de la Fonction de Redirection de la Main en Réalité Virtuelle. Actes de la 33e conférence internationale francophone sur l'Interaction Humain-Machine (IHM'22), AFIHM, Apr 2022, Namur, Belgique. 10.1145/3500866.3516381 . hal-03847553

HAL Id: hal-03847553

<https://hal.science/hal-03847553v1>

Submitted on 17 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Généralisation de la Fonction de Redirection de la Main en Réalité Virtuelle

Generalizing the Hand Redirection Function in Virtual Reality

Benoît Geslain

Sorbonne Université, CNRS, ISIR, SEGULA Technologies
benoit.geslain@isir.upmc.fr

Flavien Lebrun

Sorbonne Université, CNRS, ISIR, SEGULA Technologies
lebrun@isir.upmc.fr

Simon Besga

Sorbonne Université, CNRS, ISIR, SEGULA Technologies
sbesga.pro@protonmail.com

Gilles Bailly

Sorbonne Université, CNRS, ISIR, SEGULA Technologies
gilles.bailly@sorbonne-universite.fr

ABSTRACT

Visuo-haptic illusions, such as Hand Redirection, offer rich haptic feedback in Virtual Reality while using a limited number of physical objects. In this paper, we extend the design space for these illusions by generalizing the redirection function. A user study compares 6 redirection functions. Our results suggest that the redirection function has no influence on the illusion breakup. They also suggest that the designer can freely manipulate the redirection function for example to avoid collisions.

RÉSUMÉ

Les illusions visuo-haptiques, telles que la redirection de la main (Hand Redirection) offrent un retour haptique riche en réalité virtuelle bien qu'utilisant un nombre limité d'objets physiques. Dans cet article, nous élargissons l'espace de conception de ces illusions en généralisant la fonction de redirection. Une étude utilisateur compare 6 fonctions de redirections. Nos résultats suggèrent que la fonction de redirection n'a pas d'influence sur la rupture de l'illusion. Ils suggèrent également que le concepteur peut manipuler librement la fonction de redirection par exemple pour éviter des collisions.

CCS CONCEPTS

• **Human-centered computing** → **HCI design and evaluation methods**; **Virtual reality**.

KEYWORDS

Virtual Reality, Haptic Feedback, Visuo-haptic Illusion, Hand Redirection

MOTS CLÉS

Réalité Virtuelle, Retour Haptique, Illusion Visuo-haptique, Redirection de la Main

ACM Reference Format:

Benoît Geslain, Simon Besga, Flavien Lebrun, and Gilles Bailly. 2022. Généralisation de la Fonction de Redirection de la Main en Réalité Virtuelle:

IHM '22, April 5–8, 2022, Namur, Belgium

© 2022 Copyright held by the owner/author(s). Publication rights licensed to ACM. This is the author's version of the work. It is posted here for your personal use. Not for redistribution. The definitive version of record was published in *IHM '22: Proceedings of the 33rd Conference on Interaction Human-Machine*.

ACM ISBN 978-1-4503-9189-4/22/04.

<https://doi.org/10.1145/3500866.3516381>

Generalizing the Hand Redirection Function in Virtual Reality. In *IHM '22: Proceedings of the 33rd Conference on Interaction Human-Machine (IHM '22), April 5–8, 2022, Namur, Belgium*. ACM, New York, NY, USA, 9 pages. <https://doi.org/10.1145/3500866.3516381>

1 INTRODUCTION

Les illusions visuo-haptiques exploitent la dominance visuelle afin de tromper l'utilisateur pour enrichir son immersion en réalité virtuelle. Lorsqu'un conflit survient entre la vue et un autre sens (typiquement la proprioception), notre cerveau le résout généralement en faisant davantage confiance à la vue [5, 15]. La **redirection de la main** [2, 6] est l'une de ces illusions. Le principe est d'ajouter un décalage entre la main réelle et la main virtuelle de l'utilisateur. Ce décalage permet lorsque la main virtuelle atteint l'objet virtuel, que la main réelle atteigne l'objet physique correspondant. Cette cohérence sensorielle entre ce que voit l'utilisateur et ce qu'il touche permet par exemple d'interagir avec de nombreux objets virtuels bien qu'un nombre limité de props (objets physiques) soient présents dans l'environnement physique [14, 22]. Cependant lorsque le décalage entre la main réelle et virtuelle est trop important, il y a une incohérence sensorielle entre ce qui est perçu par la vision et par la proprioception. L'utilisateur détecte alors l'illusion [27] et l'immersion est dégradée.

Dans cet article, nous explorons l'espace de conception de la redirection de la main. Plus précisément, nous analysons les implémentations des différentes redirections de la main présentes dans la littérature et constatons qu'elles reposent sur une même fonction de redirection, *linéaire*, qui dépend uniquement 1) de la position de départ et 2) de la distance entre la position de l'objet physique et de l'objet virtuel correspondant¹.

Nous proposons de généraliser cette fonction de redirection en offrant plus de flexibilité sur la dynamique du décalage entre la main virtuelle et la main réelle. Plutôt que de considérer uniquement des fonctions de redirection linéaires (Polynômes de degré 1), nous considérons des polynômes de degré 2. Ceci permet de mieux contrôler la trajectoire de la main réelle pour atteindre la cible.

Nous réalisons ensuite une étude utilisateur. Nous comparons 6 nouvelles fonctions de redirection à celles utilisées dans la littérature. Les résultats montrent que ces nouvelles fonctions de redirection ne modifient pas la capacité de l'utilisateur à détecter

¹Une variante similaire repose sur l'angle entre les objets physiques et virtuels autour de la position de départ [32]

l'illusion. Cependant, elles offrent plus de flexibilité aux concepteurs en leur permettant de manipuler, sans détérioration de l'expérience utilisateur, la trajectoire de la main réelle.

2 ETAT DE L'ART

Nous discutons d'abord des illusions visuo-haptiques, sur lesquelles la technique *Redirection de la main* (Hand Redirection) s'appuie. Nous décrivons ensuite précisément comment la redirection de la main est implémentée et évaluée dans la littérature.

2.1 Illusions Visuo-haptiques

Les illusions visuo-haptiques manipulent la perception qu'un utilisateur a de son corps et/ou de son environnement en créant un conflit entre sa vue et sa proprioception. Ces illusions servent à améliorer le réalisme, l'espace d'interaction et/ou le retour multimodale en RV [1, 8]. Elles fonctionnent grâce à la dominance visuelle [15, 17]. Lorsque la vue entre en conflit avec un sens (ici la proprioception), elle a tendance à être privilégiée pour résoudre le conflit [10, 11]. Plusieurs techniques d'interaction en réalité virtuelle exploitent cette dominance visuelle. Par exemple en réduisant ou en augmentant les translations et rotations de la tête de l'utilisateur, on peut imperceptiblement manipuler la sensation de marcher en ligne droite [28, 30, 31]. Il est également possible de manipuler la représentation visuelle des objets virtuels ou l'avatar de l'utilisateur, par exemple pour altérer la perception du poids d'un objet [9, 20, 29], de sa taille [4] ou de la raideur d'un ressort [24].

2.2 Redirection de la main

La redirection de la main est une illusion visuo-haptique particulière où l'avatar de la main de l'utilisateur (main virtuelle) est progressivement décalée de sa main réelle au cours d'un mouvement [21]. Les deux mains (réelle et virtuelle) ne sont plus co-localisées ce qui crée une correspondance entre une surface ou un objet réel et une surface ou un objet virtuel décalé l'un de l'autre. Lorsque ce décalage n'est pas détecté, l'utilisateur favorise l'information provenant de sa vision (i.e la position de sa main virtuelle) pour estimer la position de sa main réelle. Une des applications principales de cette illusion est de créer une interaction où un seul objet physique sert de correspondance à plusieurs objets virtuels différents [7, 18, 25]. Par exemple, un utilisateur peut interagir avec trois cubes virtuels. Pour autant, il n'y a qu'un seul cube physique dans l'environnement réel. Au cours du mouvement vers un des cubes virtuels, la main virtuelle de l'utilisateur est redirigée de sorte que la main réelle atteigne le cube réel [2]. Cette illusion peut aussi être appliquée à l'interaction bi-manuelle [25] ou l'amélioration d'interface active [1]. Nous détaillons dans la section suivante l'implémentation de cette technique.

2.3 Implémenter la redirection de la main

Les techniques de redirection de la main comme Interpolated Reach [19] définissent la **Position de la Main Virtuelle** P_M^V par rapport à la **Position de la Main Réelle** P_M^R avec un **fonction linéaire** de la distance à la cible réelle comme illustré figure 1. Formellement, Han et al. la définissent ainsi [19] :

$$P_M^V = P_M^R + \Delta_M(d) \quad (1)$$

où Δ_M est le décalage entre la main réelle et virtuelle et dépend de la distance d entre la main réelle et la cible réelle, la distance D entre le point de départ et la cible réelle et le vecteur $\vec{\lambda} = P_C^V - P_C^R$ défini par les **Positions des Cibles Réelles et Virtuelles**:

$$\Delta_M(d) = \left(1 - \frac{d}{D}\right) \vec{\lambda} \quad (2)$$

Comme D et $\vec{\lambda}$ sont constants et indépendants de la position de la main, Δ_M est bien linéaire en fonction de d avec pour pente $-\frac{\|\vec{\lambda}\|}{D}$ et pour valeur à l'origine $\|\vec{\lambda}\|$ (correspondant à la distance entre la cible réelle et la cible virtuelle). On vérifie que lorsque $d = D$ (c.a.d lorsque la main réelle est à l'Origine), les mains virtuelle et réelle sont à la même position ($\Delta_M = 0$). Certains travaux [23, 32] décrivent le décalage entre la main réelle et la main virtuelle en fonction de l'angle créé par les cibles réelle et virtuelle autour de la position de départ, plutôt que D et $\vec{\lambda}$. Cependant les deux formalisations sont équivalentes (comme le montre la figure 1).

Dans cet article, nous généralisons l'équation 2 en considérant des fonctions polynomiales d'ordre supérieur (ordre 2) et étudions l'influence de Δ_M sur la capacité de l'utilisateur à détecter l'illusion.

2.4 Seuil de non détection

L'évaluation et la comparaison de ces techniques d'interaction consistent à estimer à partir de quand l'utilisateur détecte ou non l'illusion. Autrement dit il s'agit de calculer le décalage maximal – entre les cibles virtuelles et réelles – au delà duquel l'illusion est détectée par un individu et/ou une population. Typiquement, il s'agit de faire varier un paramètre, comme l'angle de redirection (figure 1-droite), et de déterminer la valeur du paramètre tel que l'illusion est détectée 75% du temps [32]. Cette valeur est alors le *seuil de détection* de l'illusion pour le paramètre étudié.

Plusieurs protocoles expérimentaux ont été proposés pour déterminer ce seuil de détection. Le plus utilisé est probablement le protocole de choix à deux alternatives forcées (2AFC) [3, 12, 16, 23, 26, 32] : à chaque essai le participant est exposé à l'illusion avec une valeur différente du paramètre étudié. À la fin de l'essai, le participant indique dans quelle direction il pense que la main virtuelle a été déplacée par rapport à la main réelle (et cela, même si aucune illusion a été exposée). Le participant fait donc un choix binaire (Gauche / Droite), qui lorsque répété suffisamment de fois, permet de déterminer la probabilité de détection de l'illusion pour un paramètre donné.

En résumé, de nombreuses implémentations de la redirection de la main ont été proposées qui reposent toujours sur une fonction de redirection linéaire. Dans cet article, nous généralisons les techniques de redirection de la main en considérant des fonctions non linéaires et nous les comparons à l'aide d'une étude utilisateur s'appuyant sur le protocole 2AFC.

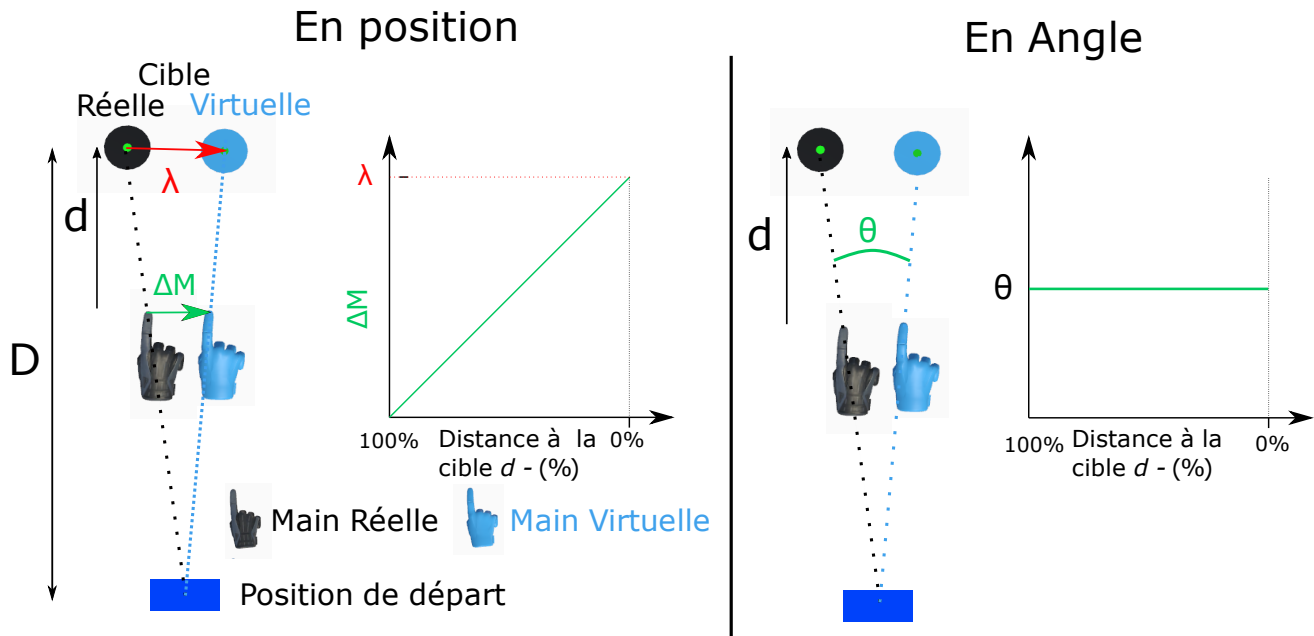


Figure 1: Fonctionnement traditionnel de la technique de redirection de la main en réalité virtuelle. À gauche, description du fonctionnement en "position". Le décalage δ_M entre la main virtuelle (bleue) et la main réelle (noire) dépend de la distance λ entre la cible réelle et virtuelle, la distance D entre la position de départ et la position d'arrivée (cible réelle) et la distance d qu'il reste à parcourir entre la main réelle et la cible réelle. Avec cette description, δ_M augmente linéairement en fonction de d . À droite, la description du fonctionnement en "angle" : la position de la main virtuelle est calculée en effectuant une rotation de la main réelle autour de la position de départ de l'angle θ créé par les cibles réelle et virtuelle. L'angle θ aussi appelé angle de redirection, est alors constant quelque soit d . Ces deux descriptions sont équivalentes lorsque l'on considère que les deux cibles sont sur le même cercle centré sur la position de départ.

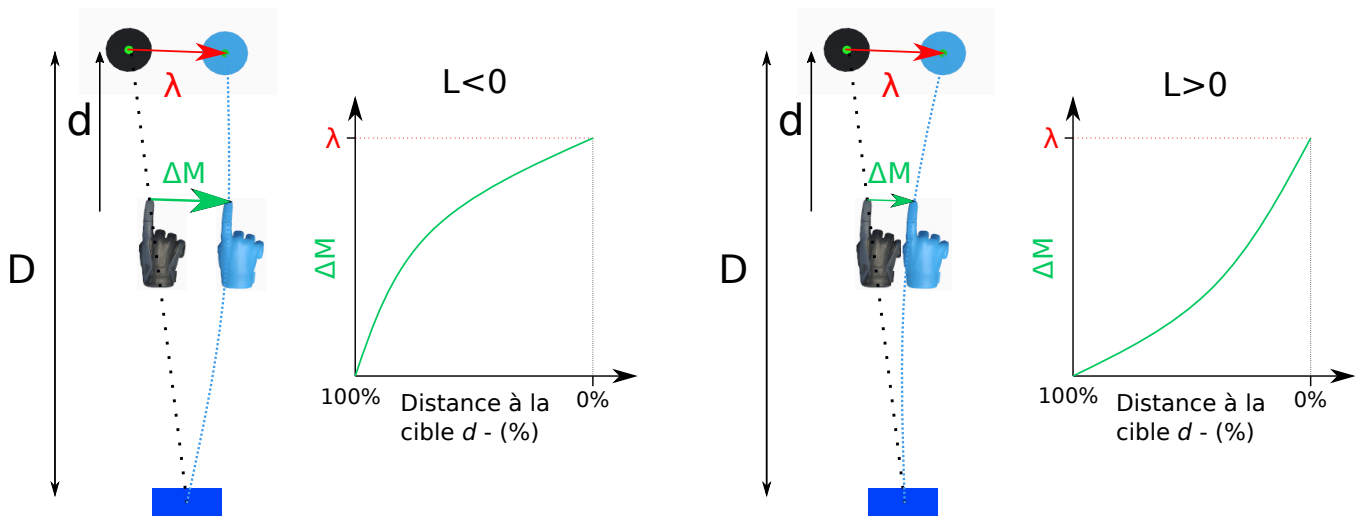


Figure 2: Représentation de la technique de redirection de la main avec une fonction polynomiale d'ordre 2. À gauche, la technique redirige la main de l'utilisateur surtout au début du mouvement ($L < 0$). À Droite, la technique redirige la main surtout à la fin du mouvement ($L > 0$). Les courbes sont les mêmes que celles à la figure 7.

3 GÉNÉRALISATION DE LA FONCTION DE REDIRECTION

L'équation 2 est un polynôme d'ordre 1 (linéaire) de la forme $f_1(d) = (a \times d + b)$. Nous généralisons cette équation :

$$\vec{\Delta}_M(d) = \begin{cases} f_n(d)\vec{\lambda} & \text{si } d < D \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3)$$

avec $f_n(d)$ un polynôme d'ordre n respectant les contraintes de continuité de la redirection de la main : $f_n(D) = 0$ et $f_n(0) = 1$. Ces fonctions polynomiales sont suffisamment générales et flexibles pour tester une grande variété de comportements. L'équation polynômiale d'ordre n est ainsi :

$$f_n(d) = \sum_{i=0}^n (a_i d^i) \quad (4)$$

Où a_i sont des coefficients à déterminer. Lorsque $n = 1$ (équation 2), on a donc $a_1 = -\frac{1}{D}$ et $a_0 = 1$ par les contraintes de continuité.

Dans cet article, nous étudions l'influence d'un polynôme d'ordre 2 sur la détection de l'illusion. Ce polynôme correspond au polynôme suivant :

$$\vec{\Delta}_M(d) = f_2(d)\vec{\lambda} = (a_2 d^2 + a_1 d + a_0)\vec{\lambda} \quad (5)$$

En pratique, nous écrivons le polynôme sous la forme d'une courbe de Bézier [13] qui permet de définir une courbe en manipulant des points de contrôle. Une courbe de Bézier est définie comme :

$$B(t) = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} (1-t)^{n-i} t^i \vec{P}_{C_i} \quad (6)$$

où n est le degré de la courbe de Bézier (ou l'ordre du polynôme) et \vec{P}_{C_i} sont les points de contrôle. Il faut $n + 1$ points de contrôle pour un polynôme d'ordre n . Ici, les points de contrôles permettent de contrôler visuellement la vitesse à laquelle le décalage est appliqué. Avec ce formalisme, l'implémentation courante (équation 2) correspond à un polynôme d'ordre 1 avec deux points de contrôle – (D , 0) et (0, 1) – correspondant aux points de départ et d'arrivée de la main virtuelle.

$$B(t) = (1-t)^2 \vec{P}_{C_0} + 2t(1-t) \vec{P}_{C_1} + t^2 \vec{P}_{C_2} \quad (7)$$

avec $B_x(t) = D - d$ et $B_y(t) = \|\vec{\Delta}_M\|$. C_0 et C_2 sont deux points de contrôle fixes qui correspondent au point de départ (P_O) et au point d'arrivée (P_C^V) de la main virtuelle et C_1 est un point de contrôle libre qui offre la liberté de définir différents comportements de la main virtuelle par rapport à la main réelle². Le comportement pour six points C_1 sont illustrés sur la Figure 4. Nous observons que pour $L < 0$, la main virtuelle a tendance à s'éloigner rapidement de la main réelle, tandis que pour $L > 0$, la main virtuelle a tendance à s'éloigner tardivement de la main réelle. Quel que soit le comportement, les mains virtuelles et réelles ont la même position de départ et sont éloignés d'une distance λ à l'arrivée.

²En pratique, comme la variable d'entrée est d (et non t), il est nécessaire d'exprimer t en fonction de d . Pour cela, nous déterminons la fonction inverse de B en résolvant deux équations à deux inconnues.

4 EXPÉRIENCE UTILISATEUR

L'objectif de cette expérience utilisateur est d'étudier l'influence de fonctions de redirection non-linéaires sur la détection d'illusion s'appuyant sur la redirection de la main. Nous nous limitons ici à l'utilisation de fonctions de redirection avec un polynôme d'ordre 2 pour définir la relation entre la distance à l'objet réel et le décalage entre la main réelle et virtuelle. Les différentes fonctions de redirection que nous comparons sont illustrées Figure 4. Le protocole expérimental est similaire à Lebrun et al. [23] où les participants réalisent une tâche de pointage en réalité virtuelle. À chaque répétition, les participants répondent à un choix à deux alternatives forcées (2AFC) à propos de la direction (Gauche/Droite) de la redirection ainsi qu'à la détection (Oui/Non) de l'illusion.

4.1 Participants et Apparatus

L'étude a été conduite sur 17 participants (7 hommes, 10 femmes), âgés de 20 à 29 (24 ans de moyenne; $std = 2.83$). Nous comptons 2 gauchers, 1 ambidextre et 14 droitiers. Tous les participants ont une vue normale ou corrigée lors de l'expérience. 3 participants ont une expérience régulière de la réalité virtuelle, 11 ont déjà eu au moins une expérience et 3 n'avaient jamais eu d'expérience en réalité virtuelle. Aucun participant ne possède de perturbations neuro-musculaires affectant la proprioception.

Les participants sont assis en face d'une table sur une chaise fixée. Ils portent un casque de RV HTC Vive Pro et un harnais à la main droite équipé d'un Vive Tracker (figure 3). La position et l'orientation de la main et du doigt de l'utilisateur sont suivies avec une précision de l'ordre du millimètre et de 0.3° .

Un marqueur haptique bleu est placé sur la table représentant la position de départ. Quatre cibles sont disposées en arc de cercle à 56cm de la position de départ. Elles sont décalées de 15° les unes des autres et centrées autour de l'axe profondeur. Cet écart angulaire est choisi pour être supérieur à l'amplitude de redirection maximale appliquée pendant l'expérience tout en limitant l'écart entre les cibles pour éviter leur identification. Les cibles ont été placées de sorte à être facilement atteignables par tous les participants tout en étant assis sur la chaise. Les cibles aux extrémités gauche et droite sont "factices" et les participants n'interagissent qu'avec les deux cibles centrales. Les cibles factices permettent de ne pas révéler l'illusion aux participants en montrant un environnement réel identique au virtuel.

La scène virtuelle, illustrée figure 3, est une copie de l'environnement réel. Elle est créée avec l'éditeur de jeu Unity3D. La scène virtuelle contient la table, le marqueur haptique, les deux cibles virtuelles ainsi qu'un avatar de la main droite de l'utilisateur. Lors d'un essai, seule la cible virtuelle est exposée au participant.

4.2 Design Expérimental

4.2.1 Tâche et Stimulus. L'expérience est une tâche de pointage avec un choix à deux alternatives forcées (2AFC): lorsque le doigt du participant est sur la position de départ, l'essai démarre et l'une des cibles virtuelles devient visible. Le participant touche alors la cible réelle puis revient à la position de départ. Nous avons demandé aux participants de se déplacer naturellement vers la cible et de réaliser l'aller-retour en environ 4s. Nous avons fait ce choix pour éviter les mouvements précipités tout en gardant

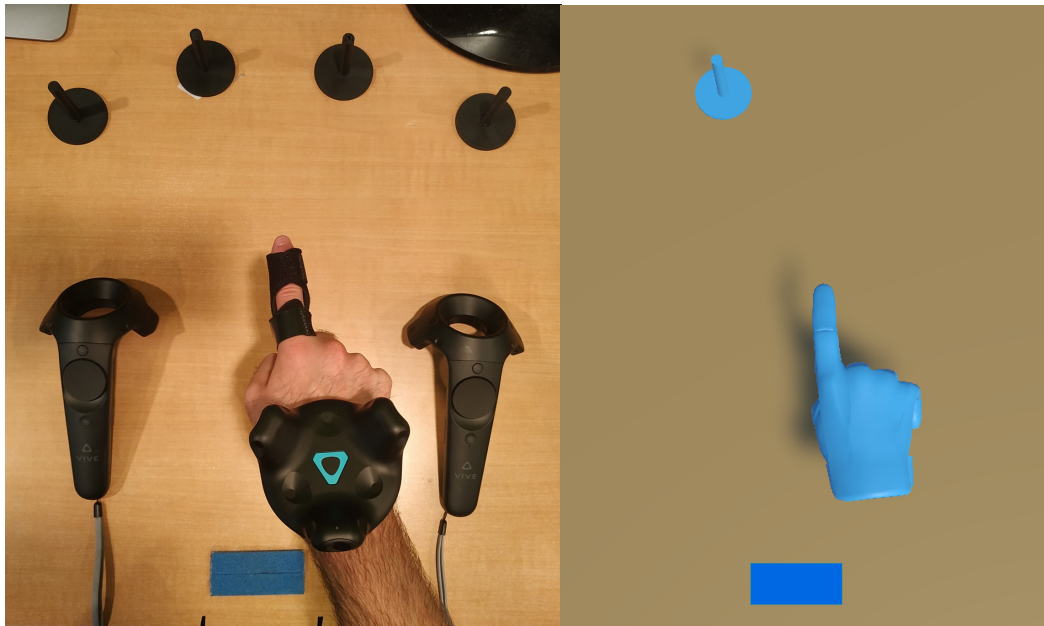


Figure 3: À gauche, la table expérimentale avec quatre cibles physiques et la main d'un participant équipée d'un tracker. Les contrôleurs Vive sont utilisés pour la calibration. À droite, la scène virtuelle avec une cible virtuelle et l'avatar de la main de l'utilisateur.

une certaine constance entre les participants. Le participant choisit ensuite si Oui ou Non, il a détecté l'illusion et enfin si sa main réelle est à Gauche ou à Droite de sa main virtuelle. L'ajout de cette première question à propos de la détection de l'illusion est une extension du protocole traditionnel 2AFC. Ce choix a été ajouté pour prendre en compte la spécificité de notre étude. Il nous semble possible, lorsque l'accélération est importante, de détecter l'illusion sans être en mesure d'identifier les positions relatives des mains réelle et virtuelle. Lorsqu'un participant fait une erreur avec les AMPLITUDES DE REDIRECTION maximales (14° et -14°), le sol devient rouge afin de le notifier. D'après des résultats préliminaires et la littérature sur la détection [32], les participants devraient toujours détecter la direction de redirection pour ces angles. Aucun retour d'information supplémentaire n'est fourni aux participants.

4.2.2 Conditions. Nous contrôlons trois variables indépendantes. La principale variable est la FONCTION DE REDIRECTION L qui représente l'éloignement de la courbe de redirection par rapport à la fonction linéaire. Elle a 7 valeurs: $L = -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3$ visibles sur la figure 4. En particulier, la valeur $L = 0$, correspond à la fonction de redirection linéaire qui est notre référence [19, 32].

La seconde variable est l'AMPLITUDE DE REDIRECTION θ . C'est l'angle créé par la cible réelle, la position de départ et la cible virtuelle. Nous avons considéré 9 valeurs: $-14^\circ, -10^\circ, -6^\circ, -2^\circ, 0^\circ, 2^\circ, 6^\circ, 10^\circ, 14^\circ$. Ces choix sont un compromis entre 1) avoir des valeurs qui couvrent un spectre suffisamment large et en particulier s'assurer que les valeurs extrêmes soient détectables par tous les participants; 2) avoir suffisamment de points pour effectuer une analyse psychométrique (voir plus bas) pour calculer le seuil de détection et 3) conserver une durée d'expérience raisonnable ($< 1h$).

La dernière variable est la position de la CIBLE PHYSIQUE, Gauche ou Droite, introduisant de la variabilité dans le mouvement réel.

4.2.3 Procédure. Les participants sont d'abord informés de l'objectif de l'étude et de la tâche qu'ils vont réaliser. Une attention particulière est apportée à l'explication de la méthode de redirection linéaire : "Une main virtuelle suit la position de votre main réelle. Lors de la tâche de pointage, un décalage est introduit graduellement entre vos mains virtuelle et réelle. La main virtuelle sera soit décalée à gauche soit à droite de votre main réelle". Les participants enfilent ensuite le casque de RV et le harnais. Ils ont l'occasion de se familiariser avec la redirection de la main en réalisant un entraînement de 4 répétitions pendant lesquelles leur main réelle est représentée en plus de la main virtuelle qui subit un décalage pour des angles de redirection linéaire de $-10^\circ, -2^\circ, 2^\circ$ et 10° . À la fin de chaque répétition, le participant est informé de la direction du décalage. Les participants réalisent ensuite l'expérience sans voir leur main réelle et sans retour à la fin de chaque essai. À la fin de l'expérience, les participants remplissent un questionnaire démographique.

4.2.4 Design. Cette étude utilise un design intra-sujet. Chaque participant réalise 2 répétitions de chaque combinaison des 9 AMPLITUDES DE REDIRECTION, 7 FONCTIONS DE REDIRECTION et 2 CIBLES PHYSIQUE, soit 2 blocs de 126 essais. Les différentes conditions sont pseudo-randomisées dans chaque bloc. En résumé le design expérimental est : 17 Participants \times 2 blocs \times 9 AMPLITUDES DE REDIRECTION \times 7 FONCTIONS DE REDIRECTION \times 2 CIBLES PHYSIQUE = 4284 répétitions.

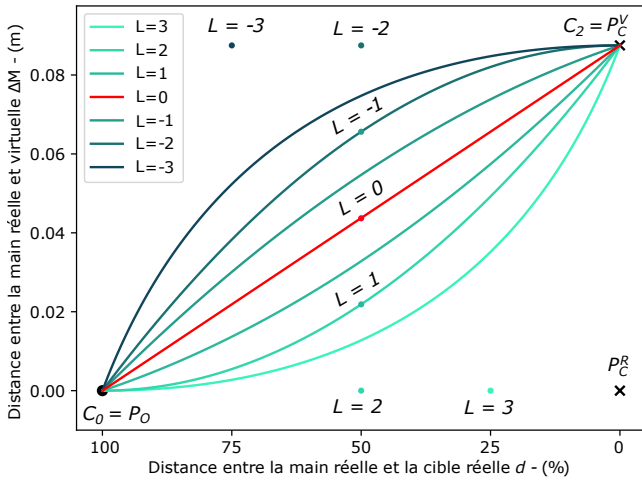


Figure 4: Le décalage entre les mains réelles et virtuelles en fonction de la distance entre la cible et la main réelle. La courbe rouge représente le cas linéaire $L = 0$. Les 6 autres courbes représentent les cas d'un polynôme du second degré. Au dessus de la courbe rouge, l'utilisateur est redirigé rapidement au début du mouvement ($L < 0$) tandis que en dessous de la courbe rouge, l'utilisateur est redirigé vers la fin du mouvement ($L > 0$). Ces courbes sont tracées dans le cas d'un décalage de 5° ou 8.75cm entre les cibles.

5 ANALYSE

L'analyse classique de ce type d'expérience (2AFC) consiste à représenter la courbe psychométrique de la population pour estimer le seuil de détection de l'illusion.

5.1 Courbe psychométrique

Une courbe psychométrique, Figure 5, est représentée formellement par une sigmoïde :

$$P(X) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{X-a}{b}}} \quad (8)$$

où a et b sont deux paramètres optimisés pour ajuster la courbe aux données empiriques. X est la variable que l'on teste et qui varie à chaque essai et $P(X)$ est la probabilité de répondre correctement à la tâche 2AFC pour le variable X . Dans notre cas, c'est la probabilité que le participant indique que sa main réelle était à GAUCHE de la main virtuelle, en fonction de l'AMPLITUDE DE REDIRECTION $P(X = \theta)$. Intuitivement, $P(\theta)$ est proche de 100% lorsque la main réelle est à gauche de la main virtuelle et a une grande amplitude ($\theta = 14^\circ$). $P(\theta)$ est proche de zéro lorsque la main réelle est à DROITE de la main virtuelle avec une grande amplitude ($\theta = -14^\circ$). $P(\theta)$ est proche de 50% lorsque $\theta = 0^\circ$.

5.2 Point d'Égalité Subjective

Le point d'égalité subjective PES est le point pour lequel les participants perçoivent le geste réel comme égal au geste virtuel. Il correspond au paramètre $a = PES$ de l'équation 8. À ce point, les participants choisissent aléatoirement la réponse au 2AFC. On s'attend à ce que PES soit proche de l'amplitude de redirection nulle.

5.3 Seuil de détection et intervalle de non-détection de l'illusion

La courbe psychométrique précédemment définie permet de déterminer les seuils de détection de l'illusion. En pratique, il s'agit de déterminer IND_G et IND_D tel que $P(\theta = IND_G) = 25\%$ et $P(\theta = IND_D) = 75\%$ [32]. On utilise donc la fonction réciproque de l'équation 8. L'intervalle de non-détection IND correspond alors à $IND = IND_D - IND_G$ et détermine la plage de valeurs de notre variable θ pour laquelle l'utilisateur ne détecte pas l'illusion. L'analyse principale de cet article vise à estimer comment l'intervalle de non-détection IND évolue avec les FONCTIONS DE REDIRECTION.

6 RÉSULTATS

6.1 Outliers

Nous avons retiré les participants de l'analyse lorsque l'une ou l'autre des conditions suivantes était vérifiée:

- L'intervalle de non-détection IND gauche ou droite pour la fonction de redirection linéaire ($L = 0$) est inférieur à -14° ou supérieur à 14° similairement à [3].
- Le pourcentage de réponse correcte est inférieur à 80% pour les angles 14° et -14° et pour la fonction de redirection linéaire ($L = 0$).

Ainsi 3 participants ont été exclus pour un intervalle de détection de 15.0° , 16.2° et 28.5° et un participant pour un taux de réponse correcte de 60%. Les résultats présentés ici sont donc ceux des 13 participants restants. Le design expérimental est donc : 13 Participants \times 2 blocks \times 9 AMPLITUDES DE REDIRECTION \times 7 FONCTIONS DE REDIRECTION \times 2 CIBLES PHYSIQUE = 3276 répétitions.

6.2 Influence de la Cible

Nous avons calculé l'intervalle de non-détection pour chacune des deux cibles physiques et fonction de redirection (IND). Une analyse Two-Way ANOVA (CIBLES PHYSIQUES \times FONCTION DE REDIRECTION) sur IND n'indique pas d'effet significatif de CIBLES PHYSIQUES ($F_{1,13} = 0.014$, $p > 0.05$), ni d'effets d'interaction ($F_{6,13} = 0.944$, $p > 0.05$).

6.3 Influence de la Fonction de Redirection sur la Détection

Une analyse One-Way ANOVA (FONCTION DE REDIRECTION) pour chaque AMPLITUDE DE REDIRECTION sur la question concernant la détection de l'illusion ne montre pas d'effet significatif.

6.4 Intervalle de Non-Détection

La figure 5 montre la courbe psychométrique pour chaque FONCTION DE REDIRECTION. Les barres verticales indiquent les intervalles de Non-Détection Gauche et Droite. Elles varient à gauche de -7.75° à -3.45° et à droite de 3.99° à 6.79° . L'intervalle de non-détection dans le cas linéaire $L = 0$ est de $IND = 9.42^\circ$ ($IND_G = -4.61^\circ$ et $IND_D = 4.81^\circ$).

Ces valeurs sont similaires aux résultats obtenus par Zenner *et al.* dans [32]. La distance entre l'origine et la cible est du même ordre de grandeur et leurs résultats sont très proches avec un $IND = 8.19^\circ$ ($IND_G = -4.38^\circ$, $IND_D = 3.81^\circ$). Les résultats présentés par [26]

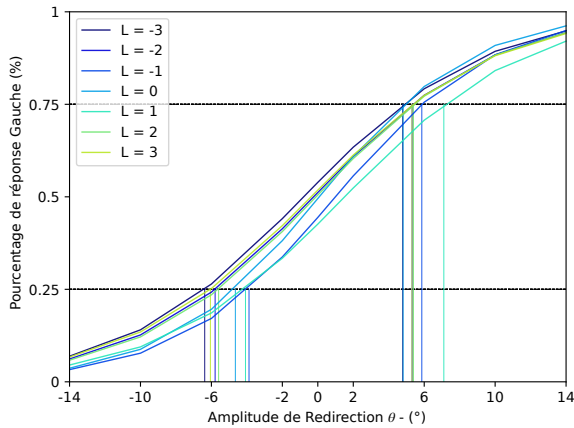


Figure 5: Courbe psychométrique pour chaque fonction de redirection en fonction de l'angle de redirection. Les deux lignes horizontales en pointillés représentent le taux de détection de l'illusion à 75% à gauche et à droite. Les lignes verticales représentent le croisement entre la courbe psychométrique et le taux de détection à 75%.

et [3] montrent des IND plus élevés (respectivement $IND = 26.7^\circ$ et $IND = 44.6^\circ$). Cependant, la distance entre l'origine et la cible réelle est beaucoup plus faible: de l'ordre de $20cm$ pour le premier et variable pour le deuxième: autour de $24cm \pm 7, 5cm$, contre $56cm$ dans notre étude.

La figure 7 représente les Intervalles de Non-Détection selon la fonction de redirection L . La zone autour de la courbe représente l'intervalle de confiance à 95% calculée avec la technique du Bootstrap à 1000 échantillons. La courbe semble constante ce qui indiquerait que l'intervalle de détection semble invariant par rapport à la fonction de redirection. Une analyse One-Way ANOVA de la FONCTION DE REDIRECTION sur l' IND ne révèle aucune différence significative: $F_{8,13} = 0.702, p > 0.05$. Un test d'équivalence réalisé sur toutes les paires de FONCTION DE REDIRECTION L , le Two One-sided T-test (TOST) confirme l'équivalence avec comme bornes basse -4° et haute $+4^\circ$ ($p < 0.05$). En revanche, le TOST ne permet pas de conclure sur l'équivalence des IND avec des bornes -2° et $+2^\circ$. Nous n'avons donc pas mis en évidence d'effet significatif de la FONCTION DE REDIRECTION sur la détection de l'illusion.

6.5 Point d'Égalité Subjective

La figure 7 représente le PES pour les différentes fonctions de redirection. Pour le cas linéaire $L = 0$, la PES vaut -0.877° . De même que pour l' IND , notre valeur de PES est similaire aux résultats obtenus par Zenner *et al.* [32], avec un $PES = -0.28^\circ$.

Une analyse Two-Way ANOVA (CIBLES PHYSIQUES \times FONCTION DE REDIRECTION) sur le PES n'indique pas d'effet significatif de CIBLES PHYSIQUES ($F_{1,13} = 2.859, p > 0.05$) ni d'effet d'interaction ($F_{6,13} = 1.751, p > 0.05$).

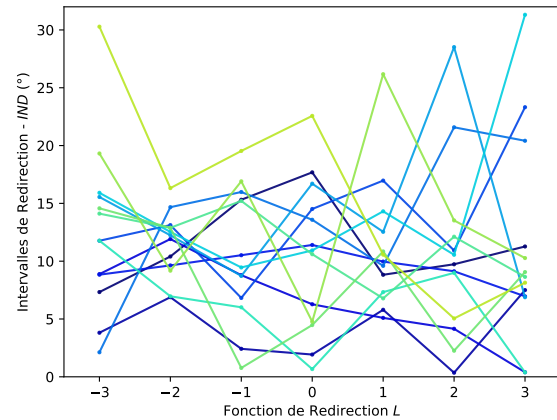


Figure 6: L'intervalle de Non-Détection par fonction de redirection L pour chaque participant.

6.6 Analyse par Participant

La figure 6 montre l'intervalle de non-détection pour chaque utilisateur (une couleur par participant) en fonction de la fonction de redirection. Nous n'observons pas de motif particulier tel que des groupes de comportements.

7 DISCUSSION

7.1 Synthèse

Cet article explore l'espace de conception des fonctions de redirection pour la technique de redirection de la main. Pour cela, nous avons généralisé l'implémentation courante et considéré des polynômes de degré 2. L'objectif principal de cette étude était alors d'étudier l'influence de différentes fonctions de redirection sur l'intervalle de non-détection de l'illusion. En particulier, nous avons considéré 6 fonctions de redirection (6 polynômes de degré 2) avec des dynamiques différentes : fort décalage au début ou à la fin du mouvement. Nos résultats ne montrent pas d'effet significatif de la fonction de redirection sur l'intervalle de détection. De plus, un Two-One Sided T-test (TOST) suggère l'équivalence des intervalles de non-détection pour les différentes fonctions de redirection.

Ce résultat semble surprenant de prime abord car il suggère que la détection de l'illusion se fait à l'échelle de l'essai, et non à l'échelle des ajustements moteurs pendant l'essai. En effet, des travaux précédents [2, 14] ont mis en évidence une correction à la fin du mouvement dans la trajectoire de la main réelle suggérant que l'utilisateur réalise d'abord un mouvement balistique, puis s'aperçoit du décalage entre la position prédite et la position perçue pour finalement ajuster son mouvement. Une de nos hypothèses était que la détection de l'illusion se passait juste avant cette phase d'ajustement. Si cela avait été le cas, les fonctions de redirection auraient modifié le moment durant lequel l'utilisateur détecte ce décalage. En effet, certaines fonctions de redirection auraient introduit seulement un faible décalage à la fin de la phase balistique alors que d'autres auraient introduit un décalage encore plus fort. Au contraire, nos résultats suggèrent que les fonctions de redirection

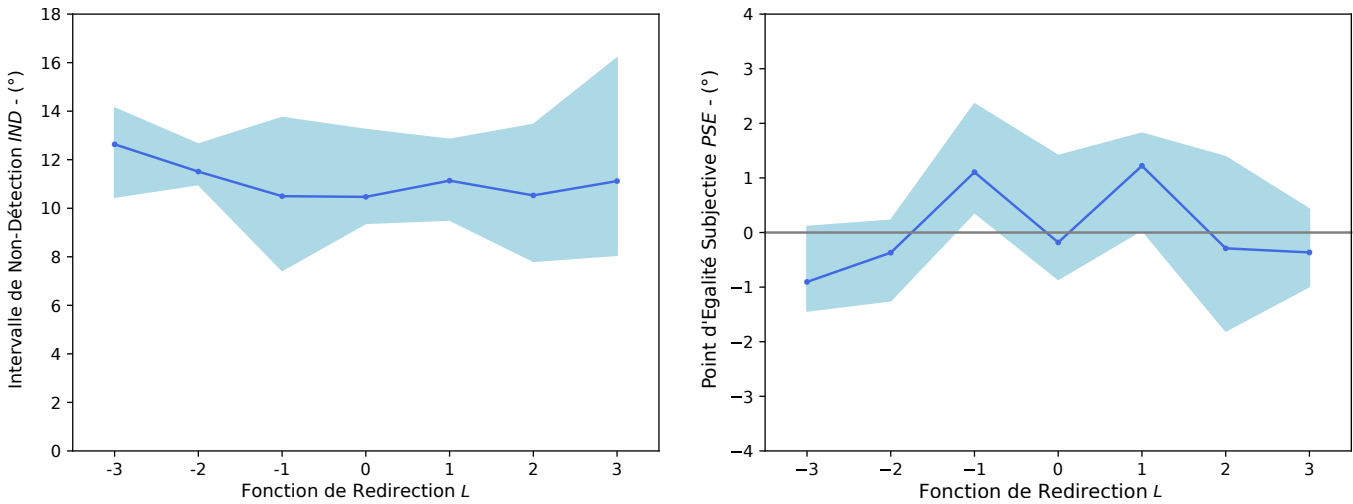


Figure 7: À gauche, intervalle de non-détection (*IND*) de l'illusion en fonction de la FONCTION DE REDIRECTION. À droite, centre des courbes psychométriques *PES* en fonction de la fonction de redirection. La zone colorée autour de la courbe représente les intervalles de confiance à 95%.

n'ont pas d'influence sur l'intervalle de non-détection de l'illusion suggérant que la fin de la phase de mouvement balistique n'a pas plus d'importance que les autres phases.

7.2 Travail Futur

Comme travail futur, nous envisageons plusieurs pistes de recherche. Tout d'abord, nous envisageons de faire passer l'étude à davantage d'utilisateurs pour tester la robustesse de nos résultats.

Nous envisageons également des dynamiques plus contrastées (bien qu'il reste peu de marge de manoeuvre comme illustré Figure 4) ainsi que la comparaison de polynômes de degré supérieur. Ces derniers permettent en particulier d'appliquer le décalage davantage au début et à la fin du mouvement et moins au centre du mouvement, là où la vitesse de déplacement est la plus élevée.

Il serait également intéressant d'étudier l'intervalle de non-détection en fonction de la distance entre le point de départ et la cible réelle. Les différentes études sur l'intervalle de non-détection suggèrent que c'est un facteur important bien qu'aucune étude systématique n'ait encore été menée. Cette étude compléterait bien la nôtre dans la mesure où il semble que le facteur clé pour expliquer la détection ou non de l'illusion soit la distance entre l'objet physique et l'objet virtuel et non l'angle ou la fonction de redirection.

7.3 Possibles Implications pour le Design

Nos résultats ont aussi des implications pour le design d'interaction. En effet, ils suggèrent que le concepteur peut utiliser différentes fonctions de redirection sans altérer l'intervalle de non détection de l'illusion. Ceci offre au concepteur plus de flexibilité pour contrôler la trajectoire de la main réelle. Par exemple, lorsque plusieurs objets physiques sont disponibles et risquent d'être heurtés accidentellement par la main, le concepteur peut modifier la fonction de redirection pour éviter que les obstacles physiques potentiels ne se retrouvent sur la trajectoire de la main réelle. En particulier, plusieurs techniques d'interaction en réalité virtuelle reposent sur

l'utilisation de robots pour délivrer du retour haptique. Il est envisageable de modifier la trajectoire de la main pour éviter un contact avec le robot.

8 CONCLUSION

Dans cet article, nous avons généralisé la fonction de redirection des techniques de redirection de la main en considérant des polynômes de degré 2 et avons comparé empiriquement l'influence de 6+1 fonctions de redirection. Les résultats suggèrent que la fonction de redirection n'a pas d'influence sur l'intervalle de non-détection de l'illusion, offrant ainsi plus de flexibilité aux concepteurs pour manipuler la trajectoire de la main.

9 REMERCIEMENTS

Nous voudrions remercier Inès Lacôte et Thierry Geslain pour leurs retours constructifs ainsi que les participants de l'expérience.

REFERENCES

- [1] Parastoo Abtahi and Sean Follmer. 2018. Visuo-Haptic Illusions for Improving the Perceived Performance of Shape Displays. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Montreal QC, Canada) (*CHI '18*). ACM, New York, NY, USA, Article 150, 13 pages. <https://doi.org/10.1145/3173574.3173724>
- [2] Mahdi Azmandian, Mark Hancock, Hrvoje Benko, Eyal Ofek, and Andrew D. Wilson. 2016. Haptic Retargeting: Dynamic Repurposing of Passive Haptics for Enhanced Virtual Reality Experiences. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (San Jose, California, USA) (*CHI '16*). ACM, New York, NY, USA, 1968–1979. <https://doi.org/10.1145/2858036.2858226>
- [3] Brett Benda, Shaghayegh Esmaili, and Eric D. Ragan. 2020. Determining Detection Thresholds for Fixed Positional Offsets for Virtual Hand Remapping in Virtual Reality. In *2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)* (Recife/Porto de Galinhas, 2020-11). IEEE, 269–278. <https://doi.org/10.1109/ISMAR50242.2020.00050>
- [4] Joanna Bergström, Aske Mottelson, and Jarrod Knibbe. 2019. Resized Grasping in VR: Estimating Thresholds for Object Discrimination. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (New Orleans LA USA, 2019-10-17). ACM, 1175–1183. <https://doi.org/10.1145/3332165.3347939>
- [5] Eric Burns, Sharif Razzaque, Abigail Panter, Mary C. Whitton, Matthew R. McCalus, and Frederick P. Brooks. 2005. The hand is slower than the eye: a quantitative

- exploration of visual dominance over proprioception. *IEEE Proceedings. VR 2005. Virtual Reality, 2005.* (2005), 3–10.
- [6] Lung-Pan Cheng, Eyal Ofek, Christian Holz, Hrvoje Benko, and Andrew D Wilson. 2017. Sparse haptic proxy: Touch feedback in virtual environments using a general passive prop. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 3718–3728.
- [7] Lung-Pan Cheng, Eyal Ofek, Christian Holz, Hrvoje Benko, and Andrew D. Wilson. 2017. Sparse Haptic Proxy: Touch Feedback in Virtual Environments Using a General Passive Prop. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Denver, Colorado, USA) (CHI '17). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 3718–3728. <https://doi.org/10.1145/3025453.3025753>
- [8] Inrak Choi, Evan Zhao, Eric J Gonzalez, and Sean Follmer. 2020. Augmenting Perceived Softness of Haptic Proxy Objects through Transient Vibration and Visuo-Haptic Illusion in Virtual Reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* (2020), 1–1. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2020.3002245>
- [9] L. Dominjon, A. Lecuyer, J. Burkhardt, P. Richard, and S. Richir. 2005. Influence of control/display ratio on the perception of mass of manipulated objects in virtual environments. In *IEEE Proceedings. VR 2005. Virtual Reality, 2005.* 19–25. <https://doi.org/10.1109/VR.2005.1492749>
- [10] Marc O. Ernst and Martin S. Banks. 2002. Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature* 415, 6870 (Jan. 2002), 429–433. <https://doi.org/10.1038/415429a>
- [11] Marc O. Ernst and Heinrich H. Bühlhoff. 2004. Merging the senses into a robust percept. *Trends in Cognitive Sciences* 8, 4 (April 2004), 162–169. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.02.002>
- [12] Shaghayegh Esmaeili, Brett Benda, and Eric D. Ragan. 2021. Detection of Scaled Hand Interactions in Virtual Reality: The Effects of Motion Direction and Task Complexity. In *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)* (Atlanta, GA, USA, 2020-03). IEEE, 453–462. <https://doi.org/10.1109/VR46266.2020.00066>
- [13] Julian J. Faraway, Matthew P. Reed, and Jing Wang. 2007. Modelling three-dimensional trajectories by using Bézier curves with application to hand motion. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)* 56, 5 (2007), 571–585. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9876.2007.00592.x> arXiv:<https://rss.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1467-9876.2007.00592.x>
- [14] Benoît Geslain, Gilles Bailly, Sinan Haliyo, and Corentin Duboc. 2021. Visuo-haptic Illusions for Motor Skill Acquisition in Virtual Reality. In *Spatial User Interaction*. Virtual Venue, United States. <https://doi.org/10.1145/3485279.3485291>
- [15] James J Gibson. 1933. Adaptation, after-effect and contrast in the perception of curved lines. *Journal of experimental psychology* 16, 1 (1933), 1.
- [16] Eric J Gonzalez and Sean Follmer. 2019. Investigating the Detection of Bimanual Haptic Retargeting in Virtual Reality. In *25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. 1–5.
- [17] Mar Gonzalez-Franco and Jaron Lanier. 2017. Model of Illusions and Virtual Reality. 8 (2017), 1125. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01125>
- [18] D. T. Han, M. Suhail, and E. D. Ragan. 2018. Evaluating Remapped Physical Reach for Hand Interactions with Passive Haptics in Virtual Reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 24, 4 (April 2018), 1467–1476. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2794659>
- [19] Dustin T. Han, Mohamed Suhail, and Eric D. Ragan. 2018. Evaluating Remapped Physical Reach for Hand Interactions with Passive Haptics in Virtual Reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 24, 4 (2018), 1467–1476. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2794659>
- [20] D. A. G. Jauregui, F. Argelaguet, A. Olivier, M. Marchal, F. Multon, and A. Lecuyer. 2014. Toward "Pseudo-Haptic Avatars": Modifying the Visual Animation of Self-Avatar Can Simulate the Perception of Weight Lifting. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 20, 4 (April 2014), 654–661. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2014.45>
- [21] Luv Kohli. 2010. Redirected Touching: Warping Space to Remap Passive Haptics. In *2010 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)* (Waltham, MA, USA, 2010-03). IEEE, 129–130. <https://doi.org/10.1109/3DUI.2010.5444703>
- [22] Luv Kohli, Eric Burns, Dorian Miller, and Henry Fuchs. 2005. Combining Passive Haptics with Redirected Walking. In *Proceedings of the 2005 International Conference on Augmented Tele-existence* (Christchurch, New Zealand) (ICAT '05). ACM, New York, NY, USA, 253–254. <https://doi.org/10.1145/1152399.1152451>
- [23] Flavien Lebrun, Sinan Haliyo, and Gilles Bailly. 2021. A Trajectory Model for Desktop-Scale Hand Redirection in Virtual Reality. In *IFIP Conference on Human-Computer Interaction*. Springer, 105–124.
- [24] Anatole Lécuyer, Sabine Coquillart, Abderrahmane Kheddar, Paul Richard, and Philippe Coiffet. 2000. Pseudo-haptic feedback: can isometric input devices simulate force feedback?. In *Proceedings IEEE Virtual Reality 2000 (Cat. No. 00CB37048)*. IEEE, 83–90.
- [25] Brandon J. Matthews, Bruce H. Thomas, Stewart Von Itzstein, and Ross T. Smith. 2019. Remapped Physical-Virtual Interfaces with Bimanual Haptic Retargeting. In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)* (Osaka, Japan, 2019-03). IEEE, 19–27. <https://doi.org/10.1109/VR.2019.8797974>
- [26] Nami Ogawa, Takuji Narumi, and Michitaka Hirose. 2020. Effect of Avatar Appearance on Detection Thresholds for Remapped Hand Movements. (2020), 1–1. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2020.2964758>
- [27] Gonçalo Padrao, Mar Gonzalez-Franco, Maria V. Sanchez-Vives, Mel Slater, and Antoni Rodriguez-Fornells. 2016. Violating body movement semantics: Neural signatures of self-generated and external-generated errors. *NeuroImage* 124 (2016), 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.08.022>
- [28] Sharif Razzaque, Zachariah Kohn, and Mary C. Whitton. 2001. Redirected Walking. In *Eurographics 2001 - Short Presentations*. Eurographics Association. <https://doi.org/10.2312/egs.20011036>
- [29] Majed Samad, Elia Gatti, Anne Hermes, Hrvoje Benko, and Cesare Parise. 2019. Pseudo-Haptic Weight: Changing the Perceived Weight of Virtual Objects By Manipulating Control-Display Ratio. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Glasgow, Scotland Uk) (CHI '19). ACM, New York, NY, USA, Article 320, 13 pages. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300550>
- [30] E. A. Suma, S. Clark, D. Krum, S. Finkelstein, M. Bolas, and Z. Warte. 2011. Leveraging change blindness for redirection in virtual environments. In *2011 IEEE Virtual Reality Conference* (2011-03). 159–166. <https://doi.org/10.1109/VR.2011.5759455> ISSN: 2375-5334.
- [31] Qi Sun, Anjul Patney, Li-Yi Wei, Omer Shapira, Jingwan Lu, Paul Asente, Suwen Zhu, Morgan Mcguire, David Luebke, and Arie Kaufman. 2018. Towards virtual reality infinite walking: dynamic saccadic redirection. 37, 4 (2018), 1–13. <https://doi.org/10.1145/3197517.3201294>
- [32] Andre Zenner and Antonio Krüger. 2019. Estimating Detection Thresholds for Desktop-Scale Hand Redirection in Virtual Reality. In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE, 47–55.