HAL
open science

Un périphérique pour la saisie réaliste d'objets avec retour tactile

Jean-Rémy Chardonnet, Jean-Claude Léon

To cite this version:

Jean-Rémy Chardonnet, Jean-Claude Léon. Un périphérique pour la saisie réaliste d'objets avec retour tactile. 5èmes Journées de l'Association Française de Réalité Virtuelle, Dec 2010, Orsay, France. inria-00534693

HAL Id: inria-00534693

https://inria.hal.science/inria-00534693v1

Submitted on 10 Dec 2010

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.

Un périphérique pour la saisie réaliste d'objets avec retour tactile

Jean-Rémy Chardonnet *
Laboratoire Jean Kuntzmann, INRIA Rhône-Alpes

Jean-Claude Léon †
Laboratoire G-SCOP, Grenoble INP

RÉSUMÉ

Nous présentons un prototype d'un périphérique immersif pour contrôler une main virtuelle avec une grande dextérité. Ce prototype est basé sur des résultats de tests utilisateurs réalisés sur des versions précédentes de notre périphérique, ainsi que sur l'analyse d'une tâche de saisie. Aussi simple à utiliser qu'une souris, il permet le contrôle simultané d'un grand nombre de degrés de liberté (ddl) et inclue un retour tactile. Les problèmes de conception, certains phénomènes physiques et/ou comportements physiologiques ainsi que la structure du périphérique sont tous étroitement liés et influencent de manière significative les interactions. Ces aspects sont exposés et analysés. Les objectifs correspondants incluent la réduction d'efforts pendant des mouvements de la main et des doigts virtuels liée à la forme du périphérique, au type de capteurs et à leur position, le retour d'informations multi-sensorielles pertinentes à l'utilisateur, la dextérité et la performance des manipulations effectuées. Un exemple de tâche de saisie montre l'effet de ce dispositif immersif pour réaliser des interactions efficaces et intuitives, permettant ainsi d'envisager des nouvelles perspectives d'interaction avec des scènes virtuelles.

Keywords: Périphérique d'interaction, réalité virtuelle, immersion, contrôle, manipulation, capteurs, retour tactile

Index Terms: H.5.2 [Information Interfaces]: User Interfaces—Input devices and strategies; I.3.7 [Computer Graphics]: Three-Dimensional Graphics and Realism—Virtual reality

1 INTRODUCTION

La saisie d'objets est une tâche quotidienne que l'on effectue machinalement. Pour réaliser de manière correcte une telle tâche, plusieurs paramètres tels que la forme, la masse, la texture de l'objet, sont importants et indiquent la manière la plus appropriée pour saisir l'objet. La réussite d'une tâche de saisie est donc conditionnée au nombre d'informations et à leur qualité retournés au cerveau. Cet article présente une extension du HandNavigator, périphérique immersif pour le contrôle d'une main virtuelle dans des environnements virtuels [6, 7]. Nous améliorons les prototypes précédents en incluant un retour tactile destiné à améliorer la dextérité de l'utilisateur et la sensation d'immersion dans les scènes virtuelles, ainsi qu'en repensant la conception du dispositif pour apporter un plus grand confort d'utilisation et une meilleure préhension du dispositif.

1.1 Travaux antérieurs

La saisie d'objets est une tâche difficile à analyser car il existe de nombreuses manières de la réaliser. En effet, en fonction des propriétés des objets, par exemple la forme, la taille, le matériau, la manière d'approcher notre main et nos doigts va différer. Pour le même objet, il peut y avoir plusieurs configurations possibles (voir Figures 1 et 9). De fait, l'imitation du mouvement de saisie dans les environnements virtuels n'est pas triviale en raison de ces possibilités. Cette diversité de configurations n'est cependant pas abordée par les outils actuels. En effet, chaque mouvement de la main et des doigts ne peut pas être contrôlé dans les environnements virtuels car la complexité des interfaces à mettre en œuvre augmente alors de manière significative. Néanmoins, des configurations naturelles de la main peuvent être atteintes si l'interface donne suffisamment de sensations immersives. Ces diversités de configurations de la main sont étroitement liées à la conception d'un périphérique approprié. Par l'intermédiaire d'un périphérique permettant la description de mouvements de la main, il est possible d'évoluer d'une validation qualitative d'une tâche de saisie à une validation quantitative où les configurations de la main peuvent être formalisées et quantifiées.

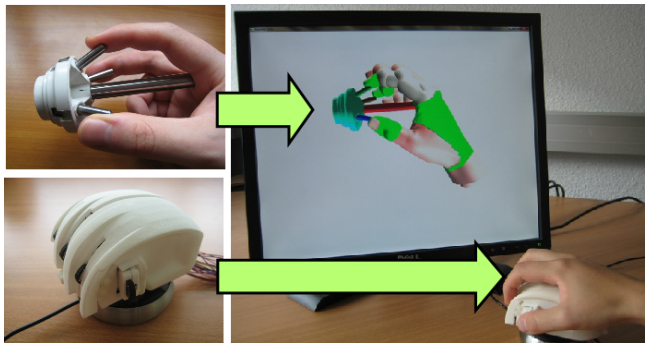


FIGURE 1: Différentes configurations de la main pour la saisie d'objet et prototype du HandNavigator intégrant un retour tactile.

De nombreuses solutions ont été proposées pour effectuer des tâches de manipulation générale dans des environnements virtuels, transformant des mouvements de main réelle en des mouvements de main virtuelle [4]. Les solutions correspondantes sont souvent basées sur des systèmes de capture optique de mouvements (par exemple par l'intermédiaire de caméras) [8, 23], ou bien sur des systèmes de capture mécanique de mouvements (par exemple des gants de données où les capteurs sont associés à un exosquelette recouvrant la main) [24]. Ces solutions permettent de nombreuses configurations de la main, générant ainsi de multiples possibilités pour bouger la main autour des objets et, par conséquent, pour les saisir. De plus, en termes d'échelle, le mouvement de la main virtuelle dans l'espace correspond exactement à celui de la main réelle. Cependant, ils possèdent plusieurs inconvénients majeurs. Ces systèmes requièrent une calibration préalable à leur utilisation, nécessitant une bonne connaissance technique du dispositif et un temps de préparation non négligeable. Leur capacité à créer une grande diversité de mouvements augmente sensiblement leur complexité mécanique et donc leur coût. Comme indiqué plus haut : non seulement leur calibration est délicate, mais leur utilisation l'est également. De fait, ces systèmes ne sont pas utilisables sur le champ, en particulier il est difficile de charger des configurations pré-enregistrées ou bien de les analyser pour des problèmes liés à l'accessibilité ou à des trajectoires, pour l'assemblage industriel par exemple. Il n'est pas possible d'interrompre à tout moment une tâche en cours sans perdre les données et les configurations actuelles. Le contact est difficile à interpréter même en incluant un retour à l'utilisateur, en particulier

*e-mail : jean-remy.chardonnet@inrialpes.fr
†e-mail : jean-claude.leon@grenoble-inp.fr

dans le cas de contacts continus tels que faire glisser son doigt sur une poutre sans décollement du contact. Les systèmes basés sur la vision rencontrent des problèmes d'occlusions. En effet, il y a souvent un point qui n'est pas visible par une caméra, par exemple si les doigts et la main de l'utilisateur cachent d'autres doigts, ou bien si les doigts sont cachés parce que la main est fermée. Pour résoudre ces problèmes, il est possible d'ajouter des caméras. Mais leur coût et l'espace nécessaire augmentent fortement, sans pour autant empêcher des configurations où les problèmes d'occlusions persistent. D'un point de vue de l'ergonomie, la réalisation de tâches de longue durée à main levée comme requis pour la capture de mouvement engendre rapidement une fatigue musculaire.

Des systèmes plus simples, conçus pour être intégrés à des environnements bureautiques, ont été proposés, par exemple le GlobeFish [10] ou bien le SpaceNavigator, pour réaliser de la manipulation 3D. Ils offrent un maximum de six degrés de liberté et une manipulation confortable car la main de l'utilisateur n'est pas dans une configuration de main levée. Ces dispositifs sont bien adaptés à des tâches de pointage. Leur principale limitation est leur nombre de degrés de liberté qui n'est pas approprié pour des tâches de manipulation plus complexes demandant plus de dextérité, telle qu'elle est requise par exemple pour des simulations d'assemblage. Des pavés multi-points ont été récemment proposés pour des périphériques portables et permettent des interactions plus complexes avec des environnements virtuels [15, 22, 13]. Leur grand avantage réside dans leur grande sensibilité, offrant alors une bonne ergonomie pour des tâches de longue durée. Cependant, ils sont conçus principalement pour des tâches en 2D.

Par ailleurs, certaines solutions intègrent un retour haptique [17, 3]. Ce retour peut être également présent sur des systèmes de plus grande taille et inclure un retour d'efforts, comme les bras haptiques utilisés par exemple pour interagir dans des simulations physiques (voir par exemple [1, 5]). Ces solutions augmentent le niveau d'information retourné à l'utilisateur et permettent donc de mieux tirer parti des avantages des capacités sensorielles cérébrales. Le retour haptique n'est perçu que lorsque l'utilisateur touche un objet virtuel mais est totalement ou presque absent lorsqu'il bouge librement dans l'espace, sans contact [16, 27]. Les systèmes haptiques actifs deviennent plus complexes si leur nombre de composantes de retour d'effort augmente (de nombreux dispositifs n'intègrent que deux, trois, ou bien six composantes de retour d'effort). Ces systèmes permettent à l'utilisateur de mieux ressentir les objets présents dans des scènes virtuelles, mais sont rarement utilisés par le grand public. Les principales raisons en sont le coût élevé de tels systèmes et leur présence principalement réduite à des entreprises ou des laboratoires. Une explication est que ces systèmes ont une complexité technologique qui nécessite une bonne connaissance du dispositif, et qu'ils ont des limitations, en particulier liées au réglage de paramètres, nécessaires pour obtenir des sensations raisonnables de modèles physiques, mais qui restent fastidieux et purement subjectifs.

Une dernière solution est d'apporter un retour passif. Ce retour peut être perçu comme une amélioration par rapport aux systèmes sans retour [14], et même s'il ne permet pas une immersion totale dans des environnements virtuels, il peut tromper les sens proprioceptifs de l'utilisateur [19] en utilisant des objets tels que des éponges ou une petite balle [27, 20]. L'avantage de cette solution est qu'elle est bon marché et simple à intégrer dans des dispositifs informatiques classiques.

1.2 Présentation globale

Contrairement aux travaux présentés précédemment, notre solution est basée sur un retour pseudo-haptique et une interaction à main nue. Nous présentons une extension du HandNavigator décrit dans [6, 7]. En particulier, des tests de validation des prototypes existants sont effectués par des utilisateurs sur des scénarios de saisie d'objets, aboutissant à la conception d'une nouvelle version du HandNavigator pour laquelle nous améliorons la prise en main du dispositif grâce à une forme plus ergonomique, des capteurs permettant une meilleure dextérité et une meilleure interaction, et l'intégration d'un retour à l'utilisateur pour une meilleure immersion, ce qui n'est pas le cas dans [6, 7].

La structure de l'article est la suivante. Nous exposerons la problématique liée à la diversité de configurations possibles pour la saisie d'objets. Nous présenterons ensuite les prototypes précédents et les résultats des tests de validation effectués avec ces prototypes, que nous analyserons en vue de la conception d'une nouvelle version. Puis, nous détaillerons le nouveau prototype. Nous montrerons enfin un exemple d'utilisation de ce prototype avant de conclure.

2 Problématique

La structure cinématique de notre main nous permet une grande diversité de configurations, parmi lesquelles nous choisissons la meilleure pour réaliser la tâche désirée. Cette aptitude à adapter les configurations de notre main aux objets améliore notre dextérité. La dextérité peut être définie ici comme la coordination entre les mains, les doigts et les yeux, ce qui implique l'aptitude à utiliser nos mains et nos doigts pour réaliser des activités de grande précision. Ainsi, le retour d'informations visuelle et tactile est un élément essentiel pour atteindre une bonne dextérité [25]. Plus précisement, le concept de dextérité est ici réduit à un ensemble de tâches que nous souhaitons accomplir avec notre périphérique. Celles-ci peuvent être résumées de la manière suivante :

- des mouvements indépendants ou non de chaque doigt virtuel dans le vide, le plus naturellement possible ;
- saisir des objets rigides le plus naturellement possible.

Pour se faire, nous devons nous intéresser à la cinématique permettant de contrôler de manière indépendante la position et l'orientation de la main, ainsi que le mouvement des doigts. La mobilité simultanée des mains et des doigts est nécessaire pour accomplir une grande variété de tâches lorsque l'utilisateur interagit, c'est-à-dire applique des efforts, sur le périphérique. Lorsque nous analysons le mouvement de préhension d'objets, nous pouvons le décomposer en trois étapes :

1. la main et les doigts de l'utilisateur bougent librement dans l'espace pour approcher l'objet à saisir. Durant cette étape, l'utilisateur adapte déjà la configuration de sa main pour que celle-ci épouse la forme de l'objet ;
2. la main et les doigts de l'utilisateur touchent l'objet à saisir. Ces contacts peuvent apparaître de manière séquentielle (la main bouge et les doigts touchent simultanément ou séquentiellement l'objet) ou progressivement (la main bouge pendant la fermeture des doigts). A partir de cette étape, le retour d'informations tactiles couplées à celles visuelles est primordial et va guider l'utilisateur à mener à bien la préhension de l'objet ;
3. l'utilisateur applique une pression sur les objets pour les maintenir. Cette pression dépend du frottement entre l'objet et la main et les doigts de l'utilisateur. Typiquement, un frottement faible sur des objets huilés requiert l'application de pressions importantes pour que les objets ne glissent pas. Là encore, l'information de toucher va permettre à l'utilisateur d'agir sur l'objet de manière appropriée. Durant cette étape, les configurations des doigts évoluent, créant ainsi différentes postures de la main.

Pour réaliser ces étapes, il est nécessaire de pouvoir contrôler de nombreux degrés de liberté. Dans les mondes virtuels, plusieurs de ces ddl peuvent être configurés en utilisant une cinématique inverse, permettant d'obtenir une grande variété de postures tout en réduisant le nombre de ddl à contrôler sur le périphérique. Le contrôle simultané d'un grand nombre de ddl est nécessaire pour réaliser

des tâches avec une grande dextérité. Par exemple, avec les périphériques actuels tels que les souris 2D ou 3D, le placement et la configuration de mannequins articulés virtuels sont complexes à accomplir car l'utilisateur n'a accès qu'à un très petit nombre de ddl par rapport au nombre de ddl de tout un mannequin. Généralement, l'utilisateur procède à des ajustements de manière itérative, et donc fastidieuse, pour obtenir des postures réalistes et naturelles.

En considérant ces éléments, le périphérique que nous souhaitons développer doit tenir compte des aspects suivants : (i) permettre le contrôle simultané d'un grand nombre de ddl, (ii) permettre à un utilisateur de réaliser des mouvements complexes, (iii) considérer des aspects liés à l'ergonomie pour éviter toute douleur ou fatigue musculaire qui réduit de manière drastique la dextérité de mouvements et ne permet pas une utilisation en mode prolongé (typiquement de quelques minutes à quelques heures), (iv) retourner à l'utilisateur des informations pertinentes de contacts, et (v) être bon marché, facile et rapide à utiliser, et sans calibration pour faciliter son intégration avec des périphériques standards.

3 Analyse des prototypes existants

3.1 Prototypes existants et tests

Nous présentons les prototypes du HandNavigator décrits dans [6, 7] et les tests utilisateurs réalisés avec ces prototypes. Le HandNavigator consiste en une souris 3D SpaceNavigator [1], surmontée d'une base où sont fixés des capteurs. Les prototypes présentés dans [6, 7] utilisent soit des capteurs de pression, soit des capteurs à molette appelés *trackball*, soit des capteurs linéaires appelés *scrollpad* (voir figure 2). Nous appellerons ces prototypes V2, V3t, V3s1 et V3s2 respectivement, classés par ordre chronologique.

Pour obtenir des retours sur la performance, l'utilisabilité, la contrôlabilité des prototypes et valider d'autres points liés à la perception humaine et aux capacités d'apprentissage, nous avons effectué des tests auprès d'utilisateurs totalement novices à ce type de périphérique en leur demandant d'essayer tous les prototypes selon le protocole suivant :

1. l'utilisateur manipule le HandNavigator pendant trois minutes sans aucune explication préalable d'utilisation. Pour ce faire, deux sous-tâches sont proposées :
   - l'utilisateur se concentre d'abord sur le mouvement de la main virtuelle (autrement dit sur le SpaceNavigator) et essaie d'atteindre une sphère verte fixe présente dans la scène virtuelle. Une sphère jaune attachée à la main aide l'utilisateur pour la réalisation de cette tâche de pointage. Lorsque les deux sphères se rencontrent (l'utilisateur a atteint la verte), la verte change de couleur ;
   - l'utilisateur se concentre ensuite sur le mouvement des doigts virtuels (autrement dit sur les capteurs). La main virtuelle est fixe dans la scène pour permettre à l'utilisateur d'agir librement sur les capteurs, et donc de bouger les doigts virtuels, sans créer une quelconque perturbation sur le SpaceNavigator.
2. lorsque la première partie est terminée, nous présentons à l'utilisateur une girafe dans la scène virtuelle, qu'il doit saisir (voir figure 3). Lorsque celle-ci est saisie, elle change de couleur. L'utilisateur doit répéter cette étape plusieurs fois. A chaque fois, nous chronométrons le temps nécessaire pour réussir cette étape, afin d'établir une courbe d'apprentissage d'adaptation aux différents prototypes.

A l'issue du test, nous demandons aux utilisateurs de remplir un tableau en notant de 0 à 4 plusieurs critères, sur le modèle de la table 1. De la même manière, nous observons les utilisateurs et évaluons leur comportement en remplissant un tableau en notant de 0 à 4 d'autres critères, sur le modèle de la table 2. Notons que,

1. http://www.3dconnexion.fr

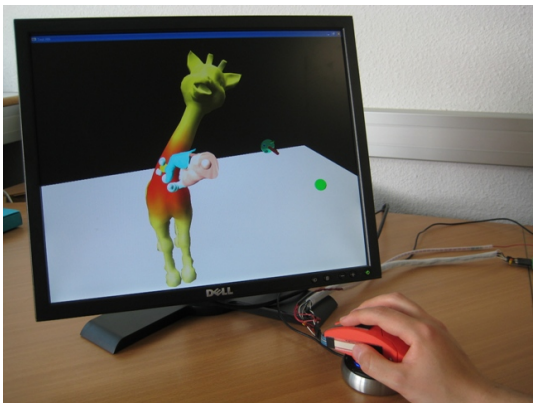


FIGURE 3: Saisie d'une girafe virtuelle.

TABLE 1: Questionnaire d'évaluation des prototypes.

Critère	V2	V3t	V3s1	V3s2
a. Facilité à bouger la main				
b. Mouvement des doigts				
c. Mouvement des doigts sans bouger la main				
d. Confort				
e. Positionnement des doigts sur les capteurs				
f. Facilité à utiliser les capteurs				
g. Taille du prototype				

contrairement à d'autres questionnaires présents dans la littérature (par exemple [26] ou le protocole NASA-TLX [12]) où la réalisation d'une tâche est évaluée, nous évaluons nos prototypes. Nous avons demandé à dix utilisateurs âgés de 20 à 25 ans, droitiers, gauchers, hommes, femmes, de réaliser ces tests. Aucun d'eux n'avait utilisé de SpaceNavigator, ni les capteurs montés sur le HandNavigator. Nous obtenons les résultats de la figure 4.

Nous remarquons que les prototypes sont de mieux en mieux notés, au fur et à mesure de leur évolution, en particulier au niveau du confort et de l'utilisabilité, ce qui montre que les utilisateurs ressentent moins de douleur ou de fatigue musculaire avec les derniers prototypes V3s1 et V3s2, en même temps qu'ils améliorent leurs performances. Si on considère les résultats de la figure 4(b), on s'aperçoit que le dernier prototype est moins bien compris que les autres prototypes, en particulier sur la manière de placer correctement sa main pour bouger la main et les doigts virtuels, et de ne pas créer de mouvements indésirés. Nous nous sommes aperçus qu'il s'agit d'un problème de positionnement du prototype sur le support. En effet, ce prototype nécessite d'être sur un plan incliné ou bien en contrebas d'une table ou d'un accoudoir de chaise par exemple, pour être efficace, ce qui n'était pas tout à fait le cas ici. En corrigeant ce problème, nous avons obtenu de meilleurs résultats.

TABLE 2: Questionnaire d'évaluation des testeurs.

Critère	V2	V3t	V3s1	V3s2
a. Changement de la position de la main pour bouger les doigts				
b. Positionnement intuitif de toute la main				
c. Doigts toujours positionnés correctement				
d. Utilisation simultanée de plusieurs capteurs				
e. Mouvements indésirés				

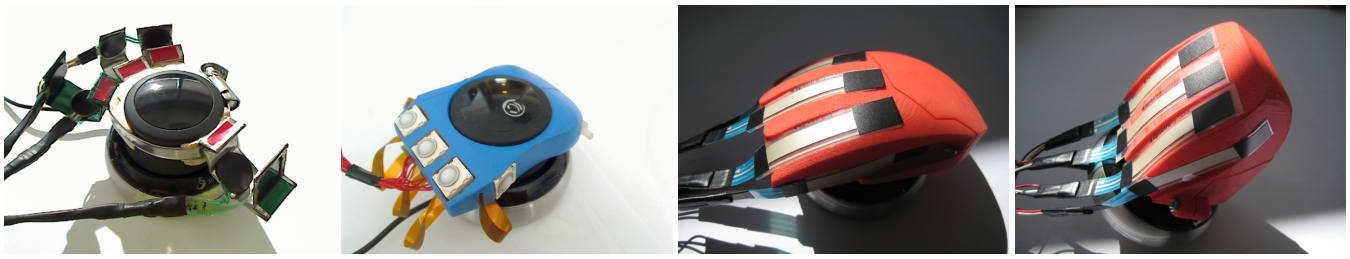
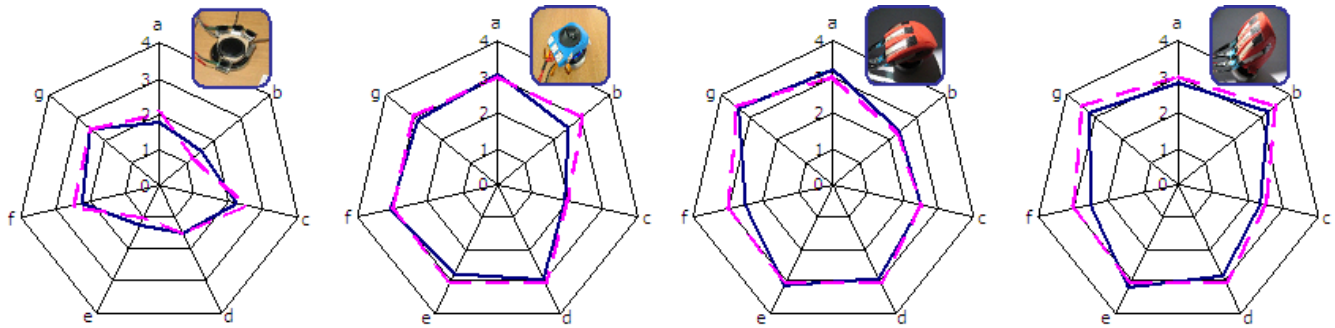
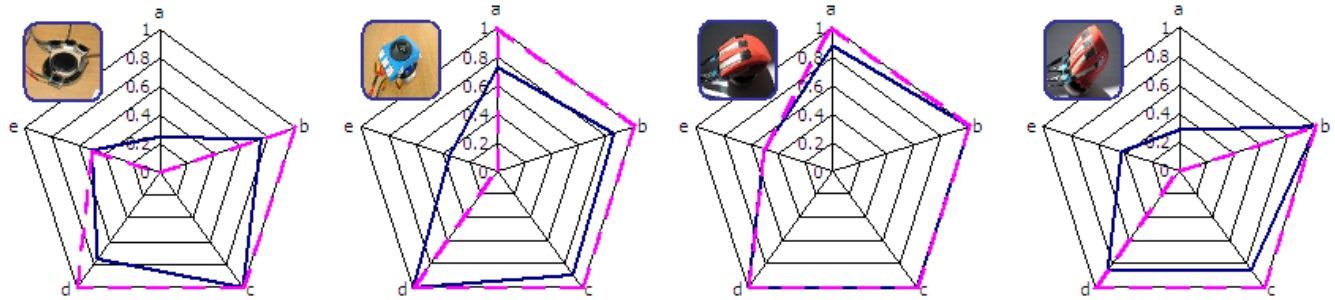


FIGURE 2: Prototypes existants du HandNavigator (de gauche à droite : V2, V3t, V3s1 et V3s2).



(a) Evaluation des prototypes. Les lettres correspondent aux critères de la table 1. En ligne continue, la moyenne. En ligne pointillée, la médiane.



(b) Evaluation des utilisateurs. Les lettres correspondent aux critères de la table 2. En ligne continue, la moyenne. En ligne pointillée, la médiane.

FIGURE 4: Résultats des tests utilisateurs.

Enfin, nous avons remarqué que d'une manière générale, les utilisateurs avaient du mal à effectuer un mouvement des doigts sans aucun mouvement indésiré de la main, et ce parce que les utilisateurs avaient tendance à inconsciemment aggriper leur main sur le dispositif et donc à se crisper dessus. Nous pensons qu'il s'agit d'un phénomène psychologique dû à la nouveauté du dispositif pour eux, créant du stress. Une utilisation prolongée des différents prototypes montre que cette crispation de la main disparaît peu à peu.

Nous avons également représenté les courbes d'apprentissage d'utilisation des prototypes en figure 5. Nous remarquons une adéquation entre les résultats plus qualitatifs de la figure 4(a) et le temps nécessaire à l'accomplissement de la tâche. Les prototypes V3s1 et V3s2 sont plus faciles à contrôler car après seulement trois essais, les utilisateurs arrivent à saisir la girafe en moins de 5s tandis qu'avec la version V2, le temps stagne aux alentours de 20s. Nous pouvons noter que le prototype V3s1 semble le plus intuitif et celui pour lequel les utilisateurs sont immédiatement le plus familier, ce qui est conforme avec les résultats de la figure 4. Notons également que pour les prototypes V3t et V3s2, le deuxième essai est le plus long. Nous pensons que les utilisateurs sont devenus trop confiants après le premier essai et de fait perdent leur concentration et donc le contrôle à ce moment-là.

3.2 Discussion

Les tests utilisateurs nous enseignent plusieurs points importants qui vont nous permettre de réaliser un nouveau prototype plus performant en termes de confort, de dextérité et de performance.

Le premier point est technologique et concerne les capteurs utilisés pour le mouvement des doigts. Pour être efficace et éviter des problèmes de fatigue et de création de mouvements parasites, il est nécessaire de considérer une gamme de capteurs qui permettent de ne pas avoir à décoller les doigts entre les mouvements d'ouverture et de fermeture des doigts virtuels. Une des principales raisons pour lesquelles le prototype V2 est mal évalué par les utilisateurs est qu'il nécessite ce décollement, de par la conception même des capteurs de pression. Les prototypes V3t, V3s1 et V3s2 n'ont pas ce problème. Le prototype V3t, qui utilise des molettes sphériques, ne nécessite pas de grands mouvements des doigts réels pour effectuer un grand mouvement des doigts virtuels car la course des doigts réels se résume à une simple rotation autour du centre des molettes, réduisant ainsi fortement les risques d'interférences avec le SpaceNavigator. Notons au passage que la force minimale néces-

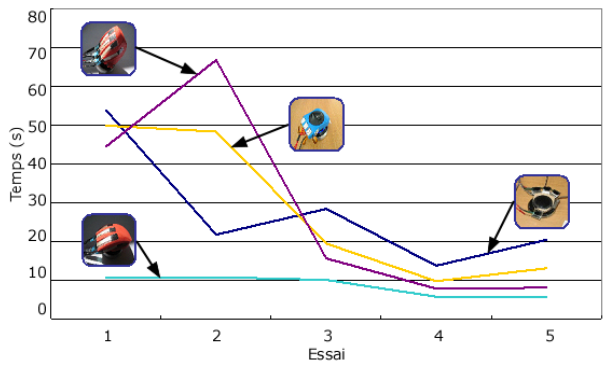


FIGURE 5: Courbes d'apprentissage d'utilisation des prototypes dans le cas du scénario de la figure 3. Les courbes n'évoluent pas significativement après cinq essais.

saire pour actionner les molettes sphériques est inférieure à celle pour actionner le SpaceNavigator (0,35N pour les molettes contre 0,4N). L'inconvénient de ces molettes est que le mouvement des doigts virtuels ne peut pas se faire de manière continue à cause de la course trop faible en rotation de ces capteurs. Par conséquent, l'utilisateur doit s'y reprendre à plusieurs fois avant d'atteindre la configuration des doigts désirée, ce qui, pour des tâches de longue durée (plusieurs dizaines de minutes), peut être source de fatigue musculaire. Les prototypes V3s1 et V3s2, qui utilisent des capteurs linéaires, permettent un mouvement continu des doigts. La difficulté avec ces capteurs est qu'il nécessite de parcourir une grande distance sur les capteurs pour faire bouger les doigts virtuels avec précision, et donc la probabilité de créer des interférences augmente. Nous voyons bien l'importance d'avoir des mouvements des doigts réels les plus petits possibles, ce que, à l'heure actuelle, peu de systèmes proposent. Pour cela, il existe une autre gamme de capteurs, non exploitée jusqu'à présent dans le cas du HandNavigator : les leviers mono-axe. Ces capteurs sont des interrupteurs, donc "tout ou rien", tels que ceux utilisés sur les appareils photo pour zoomer. Munis d'un ressort de rappel, ils permettent un contrôle en vitesse des doigts : il suffit de lâcher le capteur pour qu'il revienne à sa position initiale et que le doigt virtuel s'arrête, ce qui permet d'interrompre et de reprendre à tout moment une tâche sans perte de configurations des doigts, ni se soucier de la configuration initiale du capteur et donc du point mort du doigt virtuel.

Le deuxième point est lié à la neuro-psycho-physiologie. L'intérêt d'avoir le plus possible des petits mouvements des doigts réels pour effectuer des mouvements de plus grande amplitude des doigts virtuels n'est pas seulement mécanique. Il permet également de ne pas solliciter de manière excessive les muscles du bras et de l'avant-bras. Or, nous avons bien observé précédemment que les utilisateurs avaient tendance dès le départ à se crisper sur les prototypes. En réduisant l'activité musculaire, nous assurons ainsi un plus grand confort d'utilisation, couplé à une meilleure dextérité et de meilleures performances dans la réalisation de tâches. Par ailleurs, il n'est pas utile d'avoir des mouvements de la main et des doigts à l'échelle 1, comme c'est le cas avec les gants de données typiquement. D'une part, avec les technologies de capteurs utilisées, nous atteignons une dextérité et une résolution suffisamment fines. Par ailleurs, plusieurs études de psychologie et de neurologie montrent que pour une même tâche, entre une activité motrice (la réalisation effective de la tâche) et une activité cérébrale (l'imagination de sa réalisation), il n'y a pas beaucoup de différences dans le temps mis pour réaliser cette tâche [9, 18, 11]. Autrement dit, si l'utilisateur, sans bouger beaucoup sa main ni ses doigts mais simplement en voyant une scène virtuelle, imagine le mouvement à l'échelle 1 de la main et des doigts virtuels, il peut aboutir aux mêmes résultats en termes de temps de réalisation et de performances que s'il effectuait un mouvement à l'échelle 1 de sa main et de ses doigts réels, tout en sollicitant moins ses muscles. Enfin, d'autres études montrent que pour des tâches requiérant une grande précision et une grande dextérité, les mains sont les membres du corps humain les plus performants. En effet, les doigts, plus particulièrement le pouce, et la main occupent les zones du cerveau – les zones des cortex moteur et sensoriel – les plus développées en taille par rapport aux autres membres du corps [21, 2]. Il est donc important de particulièrement soigner le mode de saisie du dispositif et son confort d'utilisation pour permettre des performances et une dextérité accrues, y compris pour réaliser des tâches très complexes.

Enfin, puisque la main est essentielle dans la réalisation d'une tâche, il est naturel d'avoir un retour tactile lorsqu'on touche un objet. En effet, le simple fait de regarder un objet ne suffit pas, surtout dans un monde virtuel, à déterminer, d'une part la manière de saisir un objet car des paramètres tels que le frottement, la température ne peuvent être ressentis que s'il y a contact, et d'autres part si l'on est effectivement en contact avec un objet car des problèmes d'occlusion peuvent apparaître. Dans les environnements virtuels, ce sont des informations dont l'utilisateur peut avoir besoin pour mener à bien une tâche. Dans les tests utilisateurs menés précédemment, aucun des prototypes existants du HandNavigator ne possède un quelconque retour tactile, ce qui peut expliquer le temps mis pour saisir la girafe déformable (au minimum 5s), alors que celle-ci est proche (20cm) initialement de la main virtuelle. En situation réelle et à vitesse de déplacement égale, il ne faudrait qu'une seconde pour saisir la girafe. Le retour tactile permet donc d'accroître la dextérité de l'utilisateur. Comme nous l'avons rappelé dans l'introduction, il n'est pas nécessaire d'avoir un retour sophistiqué, donc onéreux, pour tromper les sens proprioceptifs. Nous privilégierons donc un retour pseudo-haptique.

Nous voyons que la conception d'un dispositif immersif va bien au-delà de considérations mécatroniques, mais doit prendre en compte également des problèmes plus généraux liés à la perception humaine et à l'activité neuro-psycho-physiologique.

4 NOUVEAU PROTOTYPE

4.1 Module individuel

Afin de valider les différents points énoncés ci-dessus, nous nous sommes intéressés à concevoir un module permettant de contrôler un seul doigt. Le module est représenté sur la figure 6. Il contient un capteur de type levier mono-axe, permettant le contrôle du doigt virtuel par une faible amplitude de mouvement du doigt réel, ainsi qu'un capteur de pression et un vibreur pour donner à l'utilisateur les sensations de toucher et de saisie d'un objet virtuel. Le levier mono-axe n'est actif que lorsque le mouvement du doigt est libre, c'est-à-dire lorsqu'il ne touche pas d'objet et bouge dans l'espace. Comme indiqué plus haut, contrairement aux autres capteurs linéaires, et comme il s'agit de capteurs "tout ou rien", ils ne nécessitent pas une grande course du doigt réel, réduisant fortement les risques de mouvements parasites du dispositif sur le SpaceNavigator et donc améliorant les performances de l'utilisateur. Le doigt est contrôlé en vitesse. Le vibreur n'est actionné que lorsque le doigt virtuel touche un objet virtuel ; il émet alors une vibration de courte durée (une demi-seconde). Le capteur de pression est quant à lui destiné à donner l'impression à l'utilisateur de réellement saisir l'objet virtuel et n'est actif que pendant la durée de la préhension de l'objet. En effet, le capteur de pression possède une sensibilité très faible comparée aux autres capteurs que nous avons testés [7], autrement dit, l'utilisateur doit appliquer des efforts importants (1N) par rapport au SpaceNavigator (0,4N) pour l'actionner. Par cette caractéristique intrinsèque au capteur, l'utilisateur est obligé d'exercer un effort important, comme il le ferait sur un objet réel qu'il

veut tenir. Par ailleurs, un ressort de rappel entre le levier mono-axe et le capteur de pression permet de bien séparer les deux capteurs et donc les deux modes (mouvement libre du doigt et mouvement contraint de saisie).

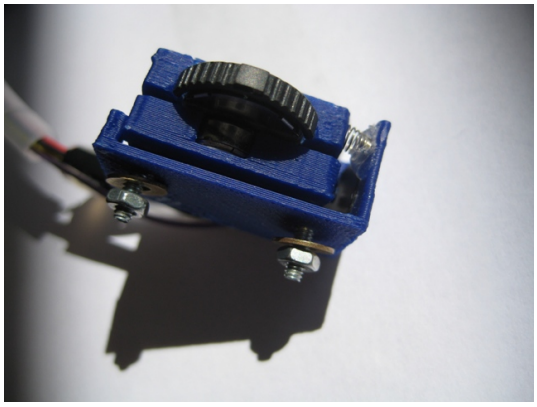


FIGURE 6: Module pour un doigt.

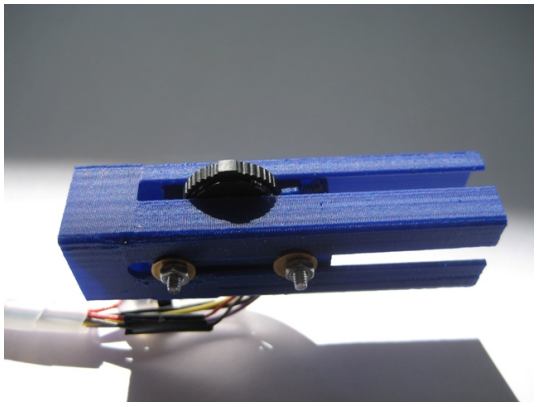


FIGURE 7: Module complet avec structure englobante.

Enfin, pour que ce module s'adapte à toutes les tailles de mains, nous l'avons placé dans une structure qui possède une fente et qui englobe tout le module. Ainsi, celui-ci peut coulisser dans cette fente. Une fois le réglage en position terminé, deux vis maintiennent le module (voir figure 7). L'intérêt de séparer le module de la structure englobante n'est pas seulement ergonomique. Cette indépendance du module permet également de ne pas propager la vibration dans toute la structure englobante, ce qui sera un point important pour le prototype complet.

Le module a été fabriqué grâce à une technique d'impression 3D. Des tests ont été effectués pour s'assurer du bon fonctionnement et de la cohérence de l'ensemble par rapport aux objectifs fixés.

4.2 Prototype complet

Le module a été généralisé pour inclure les autres doigts. Nous avons pour cela repensé la forme du prototype pour qu'elle soit agréable à prendre en main et pour qu'elle permette une meilleure interaction. Comme pour les prototypes précédents et pour les mêmes raisons liées à la cinématique de la main, nous avons intégré la possibilité de ne contrôler que quatre doigts. Chaque doigt comporte un module coulissant adaptable à différentes tailles de doigts et identique à celui présenté précédemment. Néanmoins, pour des raisons d'intégration et de montage des modules, nous les avons légèrement miniaturisés. Ainsi, grâce aux vibreurs individuels, lorsque l'utilisateur touche un objet virtuel, il peut tout de suite savoir quels doigts ont touché l'objet et réagir en conséquence. Le prototype final, nommé V4, est présenté sur la figure 8. Il a été fabriqué grâce à une technique de frittage laser de polymère. Cette technique permet la réalisation d'objets de formes très complexes tout en étant robustes. Nous avons essayé la technique d'impression 3D sur ce prototype, mais la forme étant beaucoup plus complexe que les prototypes précédents, nous avons rencontré des problèmes de limites machine, aboutissant à une version très fragile et mal réalisée.

FIGURE 8: Prototype complet V4.

5 DÉMONSTRATION

Nous montrons ici un exemple d'application de notre prototype. Il s'agit de positionner la main et les doigts virtuels sur un porte-satellite de robot ménager, en vue de sa saisie pour être assemblé dans le produit final. Comme le montre la figure 9, il existe plusieurs configurations possibles pour saisir cet objet. Les postures de la main virtuelle montrées sur la partie droite de la figure 9 ont été réalisées avec notre prototype. Nous remarquons que pour la dernière configuration, nous n'avons pas exactement la même configuration que pour le cas réel, en particulier au niveau du pouce. La raison vient de ce que nous ne contrôlons que la dernière phalange de chaque doigt. De ce fait il n'est pas possible de plier le pouce virtuel de la même manière que dans le monde réel. Pour résoudre ce problème, il faut intégrer d'une part des modèles cinématiques bio-mécaniques de la main et, d'autre part, des modèles de comportement physique et d'interaction plus réalistes.

Pour les deux autres cas, nous voyons que les configurations virtuelles sont très proches de celles réelles montrées sur la partie gauche de la figure. Nous avons ajouté des marqueurs visuels sur la main pour aider l'utilisateur, en particulier lorsqu'une partie

FIGURE 9: Différentes configurations possibles de la main et des doigts pour la saisie d'un porte-satellite.

de la main ou lorsqu'un doigt touche un objet virtuel, cette partie ou ce doigt change de couleur. Même si les vibrations ressenties par l'utilisateur lorsqu'un objet est touché permettent de mieux atteindre les configurations désirées, l'ajout de retours visuels permet d'accroître la dextérité de l'utilisateur. Nous avons chronométré le temps nécessaire pour atteindre la première configuration de la figure 9 dans le cas où il n'y a aucun retour visuel ni tactile, dans le cas où le seul retour à l'utilisateur est tactile, dans le cas où le seul retour à l'utilisateur est visuel, et enfin en couplant les deux retours visuel et tactile. En considérant que la main virtuelle a été déplacée à une vitesse de $0,2\text{m.s}^{-1}$ et que le porte-satellite est à une distance initiale de 70cm de la main virtuelle, nous obtenons les temps respectifs suivants : 24s, 12s, 12s et 10s. Notons qu'en situation réelle, pour la même vitesse de déplacement et la même distance, nous obtenons un temps de 7s. Nous voyons bien l'importance de retours multi-sensoriels puisque pour la même tâche, nous arrivons à doubler les performances de l'utilisateur entre le cas sans retour et celui avec retour. En effet, sans retour visuel ni tactile, il est nécessaire de modifier le point de vue de la caméra pour s'assurer que les doigts sont bien en contact avec l'objet. Nous observons que le retour tactile n'apporte pas plus de dextérité que celui visuel, sans doute car l'attention de l'utilisateur est retenue par l'apparition de marqueurs visuels, et que nous sommes dans un cas où il n'y a pas de problèmes d'occlusions. Cependant, la combinaison des deux retours visuel et tactile apporte un avantage dans la performance. Enfin, en effectuant une comparaison avec le prototype V3s1, qui, nous le rappelons, n'offre pas de retour tactile, pour la même tâche et dans les deux premiers cas de test indiqués ci-dessus, nous obtenons des temps de 29s et 19s respectivement. Les temps observés sont plus longs que ceux avec le prototype V4 car, comme nous l'avons mentionné plus haut, les capteurs du prototype V3s1 demandent des efforts plus élevés et une course des doigts plus grande, ce qui favorise des mouvements parasites. Par cette comparaison, nous montrons l'intérêt des capteurs utilisés dans le prototype V4, par rapport à ceux utilisés dans les prototypes précédents.

Contrairement aux cas très courants de manipulations d'objets complexes, tels que des mannequins articulés virtuels, avec une souris où chaque degré de liberté doit être manipulé un à un, le dispositif proposé réduit significativement le temps de configuration grâce à l'utilisation simultanée de plusieurs degrés de liberté disponibles sur le prototype.

6 CONCLUSION

Nous avons présenté un prototype d'un périphérique immersif permettant à un utilisateur de contrôler une main virtuelle et ses gestes. L'analyse de tests utilisateurs sur des versions précédentes de ce dispositif a permis la conception de cette nouvelle version permettant d'atteindre les objectifs de contrôle précis de postures de la main et de dextérité pour saisir des objets grâce à des retours multi-sensoriels tactile et visuel à l'utilisateur. Nous nous sommes penchés plus spécifiquement sur la mise en œuvre d'un retour tactile, jusqu'alors absent des versions précédentes pour accroître la sensation d'immersion et la qualité des interactions. Les études de forme, de technologies de capteurs ont conduit à des problématiques où les phénomènes physiques, les comportements psychologiques et la structure du dispositif influencent significativement l'interaction globale entre les mondes réel et virtuel. Grâce à la combinaison de plusieurs technologies de capteurs, notre prototype est capable de

transmettre à l'utilisateur des informations tactiles pertinentes sur les mouvements de la main et des doigts à effectuer, tout en conservant un confort d'utilisation. Comme les autres versions de notre périphérique, la nouvelle version est bon marché, plus facile à intégrer dans des environnements bureautiques que d'autres solutions proposées, et ne nécessite aucune calibration.

Il reste la mise en place de tests utilisateurs dans lesquels nous mesurerons l'activité musculaire du bras et de l'avant-bras, afin de valider de manière quantitative notre prototype.

Jusqu'à présent, nous avons utilisé le SpaceNavigator pour contrôler la position et l'orientation de la main mais il serait intéressant de reconsidérer la manière de créer les six degrés de liberté de la main. Dans le futur, nous étudierons d'autres dispositifs basés par exemple sur des souris sans fil ou des accéléromètres pour évaluer l'influence de cette technologie sur le comportement du dispositif.

Le HandNavigator a été conçu pour être intégré dans plusieurs applications, telles que la simulation physique, les procédés industriels ou la téléopération. Ces champs seront considérés dans le futur pour produire de nouvelles capacités d'interaction.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les élèves de l'Ecole Nationale Supérieure de l'Energie, de l'Eau et de l'Environnement (ENSE3, Grenoble INP) pour leur participation dans la réalisation du prototype.

RÉFÉRENCES

[1] J. Allard, S. Cotin, F. Faure, P.-J. Bensoussan, F. Poyer, C. Duriez, H. Delingette, and L. Grisoni. Sofa – an open source framework for medical simulation. In *Medecine Meets Virtual Reality*, pages 13–18, 2007.

[2] R. Balakrishnan and I. S. MacKenzie. Performance differences in the fingers, wrist, and forearm in computer input control. In *CHI*, pages 303–310, 1997.

[3] M. Bouzit, G. Burdea, G. Popescu, and R. Boian. The rutgers master ii-new design force-feedback glove. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 7 :2, June 2002.

[4] D. A. Bowman, E. Kruijff, J. J. Laviola, and I. Poupyrev. *3D User Interfaces : Theory and Pratice*. Addison-Wesley Educational Publishers Inc., 2004.

[5] J.-R. Chardonnet. *Real-time dynamic model for animation of polyarticulated objects in constrained environments with contact with friction and local deformations : application to humanoids and virtual avatars*. PhD thesis, Université de Montpellier II, 2009.

[6] J.-R. Chardonnet, A. D. C. Amaro, J.-C. Léon, D. Huyghe, and M.-P. Cani. Designing and evolving hands-on interaction prototypes for virtual reality. In S. Richir and A. Shirai, editors, *Virtual Reality International Conference (VRIC)*, Laval, France, April 7–9 2010.

[7] J.-R. Chardonnet and J.-C. Léon. Design of an immersive peripheral for object grasping. In *ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE)*, Montréal, Canada, August 15–18 2010.

[8] G. Dewaele, F. Devernay, and R. P. Horaud. Hand motion from 3d point trajectories and a smooth surface model. In *European Conference on Computer Vision*, pages 495–507, 2004.

[9] B. Dubuc. Le cerveau à tous les niveaux. `http://lecerveau.mcgill.ca/flash/a/a_06/a_06_p/a_06_p_mou/a_06_p_mou.html`.

[10] B. Froehlich, J. Hochstrate, V. Skuk, and A. Huckauf. The globefish and the globemouse : Two new six degree of freedom input devices for graphics applications. In *CHI*, 2006.

[11] I. M. Harris, G. F. Egan, C. Sonkkila, H. J. Tochon-Danguy, G. Paxinos, and J. D. G. Watson. Selective right parietal lobe activation during mental rotation - a parametric pet study. *Brain*, 123 :65–73, 2000.

[12] S. G. Hart and L. E. Stavenland. Development of nasa-tlx (task load index) : Results of empirical and theoretical research. In P. A. Hancock and N. Meshkati, editors, *Human Mental Workload*, chapter 7, pages 139–183. Elsevier, 1988.

[13] J. Hook, S. Taylor, A. Butler, N. Villar, and S. Izadi. A reconfigurable ferromagnetic input device. In *ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2009.

[14] B. E. Insko. Passive haptics significantly enhances virtual environments. Technical report, University of North Carolina, 2001.

[15] S. P. Jobs, S. Forstall, G. Christie, S. O. Lemay, S. Herz, M. van Os, B. Ording, G. Novick, W. C. Westerman, I. Chaudhri, P. L. Coffman, K. Kocienda, N. K. Ganatra, J. A. Wyld, J. Bush, F. A. Anzures, M. Matas, P. D. Marcos, C. J. Pisula, V. S. King, C. Blumenberg, F. R. Tolmasky, R.Williamson, A. M. J. Boule, and H. C. Lamiraux. Touchscreen device, method, and graphical user interface for determining commands by applying heuristics, 2008.

[16] R. S. Johansson. Sensory input and control of grip. In *Novartis Foundation Symposium*, pages 45–59, 1998.

[17] S. Kim, M. Ishii, Y. Koike, and M. Sato. Development of tension based haptic interface and possibility of its application to virtual reality. In *ACM symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pages 199–205, 2000.

[18] S. M. Kosslyn, G. J. Digirolamo, W. L. Thompson, and N. M. Alpert. Mental rotation of objects versus hands neural mechanisms revealed by positron emission tomography. *Psychophysiology*, 35 :151–161, 1998.

[19] A. Lecuyer, S. Coquillart, A. Kheddar, P. Richard, and P. Coiffet. Pseudo-haptic feedback : can isometric input devices simulate force feedback ? In *IEEE Virtual Reality*, pages 83–90, New Brunswick, NJ, March 18–22 2000.

[20] D. K. Pai, E. W. Vanderloo, S. Sadhukhan, and P. G. Kry. The tango : A tangible tangoreceptive whole-hand human interface. In *Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pages 141–147, 2005.

[21] W. Penfield and T. Rasmussen. *The Cerebral Cortex of Man : A Clinical Study of Localization of Function*. The Macmillan Company, 1950.

[22] I. Rosenberg and K. Perlin. The unmousepad - an interpolating multi-touch force-sensing input pad. In *ACM SIGGRAPH*, pages 1–9, 2009.

[23] M. Schlattman and R. Klein. Simultaneous 4 gestures 6 dof real-time two-hand tracking without any markers. In *ACM symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pages 39–42, 2007.

[24] D. J. Sturman, D. Zeltzer, and S. Pieper. Hands-on interaction with virtual environments. In *ACM SIGGRAPH Symposium on User interface software and technology*, pages 19–24, New-York, NY, 1989.

[25] A. Talati, F. J. Valero-Cuevas, and J. Hirsch. Visual and tactile guidance of dexterous manipulation tasks : an fmri study. *Perceptual and Motor Skills*, 101 :317–334, 2005.

[26] E. Wiese, J. H. Israel, A. Meyer, and S. Bongartz. Investigating the learnability of immersive free-hand sketching. In *ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Sketch-Based Interfaces and Modeling*, Annecy, France, 2010.

[27] S. Zhai, P. Milgram, and W. Buxton. The influence of muscle groups on performance of multiple degree-of-freedom input. In *CHI*, pages 308–315, 1996.