



HAL
open science

Hand Navigator : Prototypages de périphériques d'interaction pour le contrôle d'une main virtuelle

Jean-Rémy Chardonnet, André de Carvalho Amaro, Jean-Claude Léon,
Marie-Paule Cani

► To cite this version:

Jean-Rémy Chardonnet, André de Carvalho Amaro, Jean-Claude Léon, Marie-Paule Cani. Hand Navigator : Prototypages de périphériques d'interaction pour le contrôle d'une main virtuelle. 4ème Journées de l'Association Française de Réalité Virtuelle, Dec 2009, Lyon, France. inria-00431532

HAL Id: inria-00431532

<https://inria.hal.science/inria-00431532>

Submitted on 27 Nov 2009

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.

Hand Navigator : Prototypages de périphériques d'interaction pour le contrôle d'une main virtuelle

Jean-Rémy Chardonnet*

Laboratoire Jean Kuntzmann - INRIA Rhône-Alpes

Jean-Claude Léon‡

Laboratoire Jean Kuntzmann - INRIA Rhône-Alpes

Laboratoire G-SCOP, Grenoble INP

André de Carvalho Amaro†

Laboratoire Jean Kuntzmann - INRIA Rhône-Alpes

Marie-Paule Cani§

Laboratoire Jean Kuntzmann - INRIA Rhône-Alpes

ABSTRACT

Nous présentons plusieurs prototypes du Hand Navigator, un périphérique qui permet à un utilisateur d'interagir à travers une main avec un environnement virtuel avec une grande dextérité. Nos prototypes, qui sont aussi simples à tenir et à lâcher qu'une souris d'ordinateur, intègrent une grande variété de capteurs miniatures qui permettent le contrôle simultané d'un grand nombre de degrés de liberté. Pour aboutir à ces différentes versions, nous avons procédé à des études de technologies de capteurs couplées à des études ergonomiques. Ces analyses nous ont permis de mieux aborder les problématiques qui regroupent la génération des degrés de liberté et le découplage entre le dispositif de navigation de la main dans l'espace et les capteurs afin de choisir la forme et les technologies de capteurs les mieux adaptées à nos besoins. Avec les différents prototypes, nous sommes capables d'effectuer des tâches aussi complexes que ludiques, telles que la sculpture virtuelle. Le choix des capteurs et les technologies mises en œuvre montrent leur influence sur la dextérité de la main virtuelle et la diversité des configurations pouvant être abordées par un prototype.

Keywords: Périphérique d'interaction, réalité virtuelle, contrôle, manipulation, ergonomie, capteurs

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 manipulation d'objets virtuels par nos mains réelles est un grand défi pour la communauté de la réalité virtuelle. Il existe déjà de nombreux travaux pour permettre la réalisation d'une telle tâche mais quelle que soit la solution proposée, cela passe par un dispositif qui permet de transformer un mouvement réel en un mouvement virtuel. Les solutions correspondantes sont souvent basées sur des systèmes de capture de mouvements optique (par exemple par l'intermédiaire d'un réseau de caméras) [5, 12] ou bien mécanique (par exemple les gants de données où les capteurs sont associés à un exosquelette en contact avec la main) [13]. Certaines solutions intègrent un retour haptique [8, 2]. On peut également retrouver ce retour haptique dans des dispositifs à retour d'effort plus volumineux tels que des bras haptiques qui sont souvent utilisés dans le domaine de la simulation physique interactive (voir par exemple [1, 4]). Ces solutions permettent d'enrichir les informations

*e-mail : jean-remy.chardonnet@inrialpes.fr

†e-mail : andre.de-carvalho-amaro@inrialpes.fr

‡e-mail : jean-claude.leon@grenoble-inp.fr

§e-mail : marie-paule.cani@inrialpes.fr

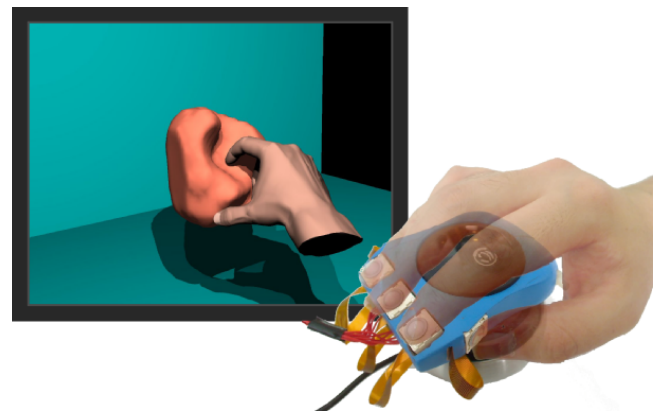


Figure 1: Hand Navigator : périphérique d'interaction pour contrôler une main virtuelle, appliqué à la sculpture virtuelle.

retournées à l'utilisateur et ainsi de mieux profiter des capacités sensorielles du cerveau.

Les inconvénients de ces solutions basées sur des systèmes de capture soit optique soit mécanique sont multiples. Il y a d'abord un problème de calibration qui doit être réalisée au début de chaque utilisation, autrement dit, cela nécessite une certaine connaissance du dispositif et un temps de préparation non négligeable, donc une utilisation qui n'est jamais immédiate. Les systèmes basés sur la vision souffrent par ailleurs de problèmes d'occlusions. En effet, il y a très souvent un point qui n'est pas visible par la caméra, par exemple si on a un doigt ou une main qui cache un autre doigt ou une autre main ou bien si les doigts sont cachés parce que la main est fermée. Pour remédier à ce problème, il est possible de rajouter plusieurs caméras. Cependant, le coût et la place nécessaire à l'installation du dispositif augmentent sensiblement et il reste toujours des situations pour lesquelles des problèmes d'occlusion apparaissent. Intrinsèquement, l'absence d'occlusion pour un dispositif optique impose une absence de contact avec des objets réels dans un domaine spatial d'autant plus important que l'on permet à une main réelle d'occuper un grand nombre de postures différentes. D'un point de vue ergonomique, un travail prolongé dans ces conditions de travail à "main levée" engendre rapidement une fatigue musculaire.

Avec les solutions intégrant un retour haptique, celui-ci n'est ressenti que si l'on est en contact avec un objet virtuel mais est absent ou quasi-inexistant lorsqu'on effectue des mouvements dans l'air et sans contact [7, 14]. Ces systèmes haptiques actifs sont d'autant plus complexes que le nombre de composantes d'efforts restitués est proche des 6 composantes. Ces systèmes, permettant une plus grande immersion dans le monde virtuel, sont cependant peu couramment utilisés par le grand public, les professionnels ou même des entreprises. Les principales raisons évoquées sont le coût

élevé d'un tel système, justifié par sa complexité technologique qui implique une certaine maîtrise du dispositif pour pouvoir l'installer et l'utiliser, et la difficulté à restituer fidèlement les sensations haptiques, due à la précision des modèles physiques implémentés et aux réglages qui sont souvent subjectifs.

Une autre solution est d'implémenter un retour haptique passif. Ce retour peut être perçu comme une amélioration par rapport à un dispositif sans retour [6], et permet de tromper les sensations proprioceptives de l'utilisateur [10] grâce à un intermédiaire tel qu'une éponge, une petite boule ou bien des vibreurs [14, 11]. L'avantage d'une telle solution est son coût peu élevé et sa facilité d'intégration avec des périphériques informatiques classiques.

Cet article présente une solution de ce type, qui étend le travail présenté dans [9] à la suite de nos études récentes sur les types de capteurs et sur l'ergonomie du dispositif.

2 OBJECTIFS

Notre but est de développer un périphérique permettant à un utilisateur de contrôler une main virtuelle dans un environnement virtuel avec sa main réelle, en utilisant un grand nombre de degrés de liberté pour réaliser des mouvements avec une bonne dextérité, tout en ayant un retour haptique passif. Notre périphérique doit être bon marché, facile à installer et à utiliser, et ne doit pas nécessiter de calibration afin de permettre une intégration simple avec les périphériques standard d'un ordinateur de bureau ou bien portable.

Nous voulons également considérer des problèmes liés à l'ergonomie pour permettre à un utilisateur de réaliser des mouvements complexes sans générer un niveau de fatigue musculaire qui réduit la dextérité d'un mouvement et ne permet pas un travail prolongé de plusieurs dizaines de minutes à quelques heures. Par conséquent, il est nécessaire d'intégrer des capteurs judicieusement choisis pour obtenir un contrôle des doigts virtuels satisfaisant.

Enfin, nous devons implémenter une interface logicielle modulaire, pour pouvoir intégrer facilement notre périphérique avec diverses applications. En particulier, cette interface doit posséder une modélisation assez complète d'une main, c'est-à-dire comportant un grand nombre de degrés de liberté pour obtenir des mouvements de mains réalistes et capables de réaliser des mouvements incorporant une certaine dextérité, et des modèles d'interactions pour un retour visuel de qualité.

3 PROBLÉMATIQUE

Pour réaliser un périphérique qui répond aux objectifs cités précédemment, nous devons résoudre deux problèmes importants :

- d'une part la manière de générer les degrés de libertés pour contrôler la main et les doigts virtuels ;
- et d'autre part, la manière de découpler les mouvements de la main et des doigts pour qu'ils n'interfèrent pas entre eux. Ceci s'inscrit dans le cadre d'une hypothèse où les tâches réalisées par une main virtuelle sont décomposées en deux catégories indépendantes :
 - mouvement du poignet seul ;
 - mouvement des doigts seuls.

Par ailleurs, le choix de la catégorie du périphérique à réaliser est également important et dépend des objectifs fixés. Un périphérique peut être classé de la manière suivante [3] :

- isotonique : le mouvement de l'effecteur est libre et peut être réalisé avec une résistance nulle ou très faible ;
- isométrique : le mouvement de l'effecteur est contraint et la force exercée sur l'effecteur est mesurée ;

- élastique : le mouvement de l'effecteur est libre et est réalisé avec une résistance qui augmente avec le déplacement.

Dans notre cas, nous chercherons à avoir un périphérique plutôt isométrique car nous souhaitons que l'utilisateur puisse contrôler une main virtuelle en utilisant sa main réelle dans un espace restreint.

3.1 Génération de degrés de liberté

La main virtuelle que nous souhaitons contrôler possède 26 degrés de liberté (voir figure 2(a)). Cela suppose le traitement d'un grand nombre d'informations. Dans notre cas, nous restreindrons certains degrés de liberté pour ne pas compliquer l'utilisation du périphérique que nous voulons développer. En particulier certaines phalanges pourront être contraintes par la cinématique de la main, de sorte que seul le bout des doigts sera contrôlé (voir figure 2(b)).

Le contrôle de la position et de l'orientation de la main virtuelle correspondant au mouvement du poignet seul peut se faire en utilisant un dispositif de navigation tel que le SpaceNavigatorTM de 3dConnexion¹. Ce dispositif permet de contrôler les six degrés de liberté d'un objet dans l'espace.

La plupart des articulations des doigts sont modélisées par des liaisons pivots, autrement dit des articulations à un degré de liberté. Par conséquent, pour permettre le contrôle de ces degrés de liberté, nous pouvons utiliser des capteurs élémentaires fournissant une seule grandeur physique.

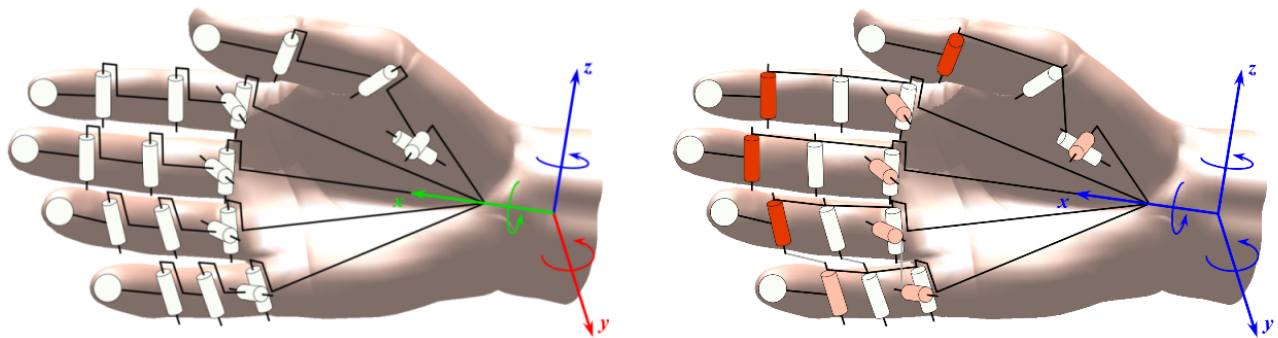
3.2 Découplage cinématique

La combinaison d'un dispositif tel que le SpaceNavigatorTM et de capteurs peut créer des interférences entre eux. En effet, ce que l'on souhaite est de pouvoir contrôler indépendamment la position et l'orientation de la main et le mouvement des doigts, comme on le fait naturellement avec notre main. Le souci d'utiliser le SpaceNavigatorTM est sa sensibilité aux moindres perturbations du fait de son comportement isométrique. En effet, le principe du SpaceNavigatorTM repose sur des ressorts qui se déforment lorsque l'utilisateur manipule le dispositif, et ces déformations sont mesurées puis converties en vitesse de déplacement dans les 6 axes. Autrement dit, la manière dont on va interagir avec les capteurs et la technologie des capteurs peuvent influencer plus ou moins le comportement du dispositif de navigation. Cette capacité à découpler correctement les deux mouvements est dépendante de la forme du périphérique, qui va permettre également à l'utilisateur d'avoir un certain confort d'utilisation, et de la technologie des capteurs, en particulier leurs propriétés mécaniques.

Meilleur sera le découplage, meilleure sera la dextérité. Du point de vue de l'interface, cette dextérité passe également par l'implémentation de contrôleurs adéquats. Les principaux contrôles que nous considérerons ici sont basés sur la vitesse ou sur la position. Le contrôle en vitesse permet à l'utilisateur d'effectuer un mouvement de la main et des doigts virtuels plus ou moins rapide en effectuant un faible mouvement avec sa main réelle. Par exemple, si on utilise un capteur de pression pour fermer un doigt, plus on appuie sur le capteur, plus vite le doigt se fermera. En revanche, un contrôle en position permet à l'utilisateur d'avoir un mouvement virtuel proportionnel au mouvement réel, et donc un contrôle plus intuitif et facile à utiliser. En reprenant l'exemple avec le capteur de pression, plus on appuie sur le capteur, plus le doigt se ferme. Il est important de noter que selon le type d'application que l'on veut faire avec le périphérique, on préférera implémenter l'un ou l'autre type de contrôle, et que celui-ci peut être modifié directement à partir du programme applicatif et s'adapter plus ou moins à un type de capteur donné.

La dextérité que nous recherchons doit permettre à l'utilisateur d'effectuer des tâches dans un premier temps simples, telles que

¹<http://www.3dconnexion.fr>



(a) Degrés de liberté de la main virtuelle : 6 pour le poignet et 4 pour chaque doigt (2 pour la première phalange et 2 liaisons pivot pour les deux autres de navigation). Il est à noter que la cinématique de la main virtuelle ne correspond pas exactement à celle de la main réelle. (b) Degrés de liberté contrôlés. En bleu, les degrés pilotés par un dispositif clair, les degrés qui peuvent être pilotés. Les traits gris clair entre l'annulaire et l'auriculaire indiquent qu'il est possible de coupler les deux doigts.

Figure 2: Cinématique de la main virtuelle.

manipuler des objets rigides, mais également des tâches plus complexes, telles que réaliser de la sculpture virtuelle en utilisant de la pâte à modeler virtuelle ou bien de la manipulation de formes, dans des configurations de la main virtuelle qui soient les plus naturelles possibles et proches de celles de la main réelle qui manipule le périphérique.

4 EVOLUTION DES PROTOTYPES

4.1 Prototypes initiaux

Un premier prototype, appelé V1, a été présenté dans [9]. Il est composé de deux parties : le SpaceNavigator™ déjà évoqué ci-dessus et qui permet de contrôler la position et l'orientation de la main virtuelle, et le Hand Navigator proprement dit (voir figure 3). Ce dernier permet le contrôle des doigts virtuels et est constitué d'un support composé d'une structure métallique légère sur lequel sont fixés des pétales métalliques pour chaque doigt qui possèdent une raideur faible de l'ordre du $N.mm^{-1}$ ². Chaque pétale possède deux capteurs de pressions, un pour l'ouverture et l'autre pour la fermeture des doigts. Chaque doigt est contrôlé séparément en vitesse : la vitesse d'ouverture-fermeture des doigts est une fonction de la pression exercée sur les capteurs. Ainsi, lorsque l'utilisateur n'appuie pas sur ces capteurs, les doigts virtuels restent fixes. Nous voyons alors le grand avantage que cela procure par rapport à d'autres dispositifs tels que les gants de données : l'utilisateur peut interrompre une tâche en cours pour réaliser une seconde tâche telle que téléphoner ou autre, et reprendre la tâche virtuelle au point où il l'avait arrêtée, sans perte d'information.

Un deuxième prototype appelé V2 a été réalisé sur la base du prototype V1 (voir figure 3). Avec ce prototype, nous avons tenté de prendre mieux en compte la forme de la main. Une des différences entre les prototypes V1 et V2 est la disposition des pétales autour du SpaceNavigator™. Dans le cas du prototype V1, les pétales sont uniformément répartis, permettant une répartition d'efforts homogène sur le SpaceNavigator™, c'est-à-dire la configuration des efforts appliqués est principalement centripète ce qui tend à produire une résultante de module faible et donc interagissant peu avec

²Cette raideur permet d'avoir un retour passif. Cependant, si l'on considère que les effets proprioceptifs ne sont pas importants cette raideur n'apporte rien de particulier au périphérique du point de vue sensation. Aussi un autre intérêt de cette raideur est d'aider à la compensation des efforts exercés sur le SpaceNavigator™ lorsqu'on appuie sur les capteurs (voir plus loin).



Figure 3: Prototypes V1 (à gauche) et V2 (à droite).

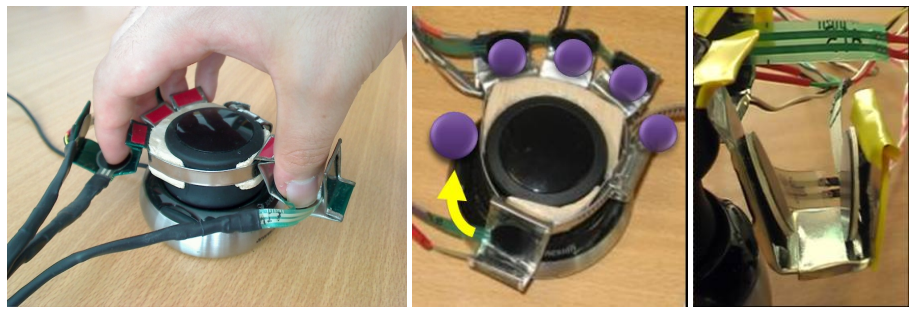
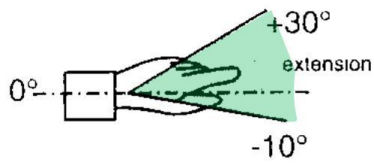
les efforts communiqués au SpaceNavigator™ pour contrôler la position de la main dans l'espace. L'inconvénient d'une telle disposition est la fatigue engendrée pour l'utilisateur pour placer les doigts. Ce problème a été partiellement corrigé dans la version V2. Nous développerons les problèmes d'ergonomie plus en détail dans la sous-partie suivante. Par ailleurs, les prototypes ne permettent de contrôler que quatre doigts. Ce choix résulte de plusieurs facteurs :

- (i) pour commander les capteurs, un boîtier de conversion analogique/numérique reliant le dispositif et l'ordinateur est utilisée, or celle-ci ne possède que huit entrées qui conviennent pour la commande de quatre doigts (avec deux capteurs par doigt) ;
- (ii) ensuite, en observant une main réelle, on peut s'apercevoir que généralement, le mouvement de l'annulaire et l'auriculaire sont liés ;
- (iii) enfin, pour réaliser les tâches courantes de la vie quotidiennes telles que saisir des objets, seuls quatre doigts suffisent.

4.2 Analyse ergonomique

Nous avons réalisé une étude ergonomique des prototypes V1 et V2. Cette analyse a permis de pointer les défauts du Hand Navigator mais aussi de réfléchir sur la forme des prototypes futurs qui tient compte des remarques sur la dextérité énoncées précédemment.

Les principales remarques sont les suivantes (voir figure 4) :



(a) Domaine angulaire recommandé pour la posture du poignet.

(b) Prise de main du Hand Navigator.

(c) La disposition des pétales n'est pas conforme à la disposition naturelle. (d) Mauvaise interaction entre les capteurs et l'ongle.

Figure 4: Analyse ergonomique.

- la posture de l'ensemble main-poignet : pour manipuler le Hand Navigator, l'utilisateur doit plier son poignet d'un angle important qui rend la posture du bras et de la main très inconfortable, et par conséquent, le mouvement de la main et des doigts difficile ;
- la prise de main : pour un utilisateur assis, la prise de main du Hand Navigator est trop haute, obligeant l'utilisateur à soulever son bras (ce qui entraîne une fatigue conséquente), ou bien à plier son poignet davantage (ce qui restreint davantage les mouvements de la main et des doigts) ;
- le positionnement des doigts : la disposition des pétales sur le prototype V2 ne correspond pas à la disposition des doigts sur une main et contribue à la fatigue de l'utilisateur et à la difficulté qu'il a pour bouger ses doigts. Par ailleurs, sur le prototype V2, il manque des indicateurs de couleur qui peuvent aider l'utilisateur à placer ses doigts correctement ;
- l'interaction entre les doigts et les capteurs : pour ouvrir les doigts virtuels, avec la disposition des capteurs de pression dans les pétales, l'utilisateur doit appuyer sur les capteurs correspondants avec son ongle, ce qui est particulièrement difficile à réaliser ;
- le retour d'efforts : l'utilisateur ne peut pas savoir si les doigts virtuels sont en contact ou non avec un objet virtuel car les capteurs de pression ne retournent aucune information haptique voire pseudo-haptique ;
- le retour visuel : le logiciel lié aux prototypes V1 et V2 n'intègre pas de limites angulaires pour la main virtuelle et la caméra virtuelle n'est pas fixe dans le repère de la main virtuelle. Par conséquent, l'utilisateur peut très vite perdre la référence de position et d'orientation entre la main virtuelle et sa main réelle.

A la suite de cette analyse, plusieurs formes ont été étudiées pour prendre en compte les remarques d'ergonomie précédentes, en particulier les problèmes de fatigue engendrés par la mauvaise posture de la main et le mauvais placement des doigts. Ici, nous conservons les mêmes capteurs, ceux-ci faisant l'objet d'une analyse approfondie dans la sous-partie suivante. Les différentes formes que nous avons étudiées sont les suivantes :

- la première forme est basée sur celle du prototype V2 : elle possède des pétales métalliques, mais cette fois-ci disposés selon la disposition naturelle des doigts (voir figure 5(a)). Ainsi, il n'est plus nécessaire d'avoir son

poignet cassé imposé par une prise de main trop haute. L'inconvénient est la perte d'équilibre statique des efforts autour du SpaceNavigator™. En effet, les pétales, aussi légers soient-ils, créent un moment qui est suffisamment élevé pour créer une perturbation sur le SpaceNavigator™ et qu'il est nécessaire de compenser. Par ailleurs, avec cette disposition, l'appui sur les capteurs de pression engendre un mouvement parasite du SpaceNavigator™ qu'il est difficile d'éviter. C'est typiquement une situation où le découplage entre le mouvement de la main et celui des doigts discuté plus haut est difficile. Par conséquent, nous n'avons pas retenu cette forme ;

- la deuxième forme est basée sur celle du SpaceNavigator™ : la structure englobe le dispositif de navigation pour permettre un placement très naturel des doigts et sans générer de fatigue (voir figure 5(b)). Une petite barre de maintien a été placée pour aider à la compensation des efforts lorsque l'utilisateur appuie sur les capteurs. Cette forme n'a cependant pas été retenue car il n'y a pas d'espace pour loger les capteurs ;
- la troisième forme est basée sur celle d'une souris d'ordinateur : cette forme corrige également les problèmes de postures du poignet mais aussi les problèmes d'interaction entre les capteurs et les doigts (voir figure 5(c)). Cette forme a également l'avantage d'être habituelle et donc facilement prise en main. Par ailleurs il est possible de compenser facilement les efforts générés par l'appui des doigts sur les capteurs. C'est cette forme que nous avons retenue pour le développement des prototypes suivants.

A travers cette analyse, nous voyons bien l'importance de la localisation des capteurs dans la conception du Hand Navigator.

4.3 Analyse technologique des capteurs

En parallèle de l'analyse ergonomique, nous avons effectué une analyse technologique des capteurs. Cette analyse est importante car la technologie de capteurs utilisée est très dépendante du choix de la forme, de l'application que l'on souhaite réaliser avec le Hand Navigator et donc du contrôle que l'on veut implémenter, comme nous l'avons mentionné plus haut. Comme nous avons décidé d'une nouvelle forme plus ergonomique pour notre dispositif, nous avons comparé différentes technologies de capteurs existantes pouvant s'adapter à cette forme et en considérant les critères suivants :

- l'utilisateur ne doit pas ressentir de fatigue pour bouger les doigts virtuels ;
- le découplage avec le dispositif de navigation doit être le plus élevé possible ;



(a) La première forme inspirée de celle du prototype V2.
 (b) La deuxième forme inspirée de celle du SpaceNavigator™.
 (c) La troisième forme inspirée de celle d'une souris d'ordinateur.

Figure 5: Analyse de la forme.

- le capteur doit être suffisamment léger, petit et sensible pour ne pas engendrer des mouvements parasites ;
- il peut intégrer un retour passif pour aider l'utilisateur à réaliser des mouvements fins ;
- enfin, le coût d'un capteur ne doit pas être trop élevé.

Nous avons donc testé (voir figure 6³) :

- le capteur de pression (voir figure 6(a)) : utilisé sur les prototypes initiaux V1 et V2, ces capteurs ont la particularité de fournir une résistance électrique qui varie quasi-linéairement en fonction de l'effort appliqué. Ainsi ce type de capteur est particulièrement adapté à un contrôle en vitesse, permettant, comme nous l'avons indiqué plus haut, d'interrompre à tout moment une tâche et de la reprendre telle quelle, tout en conservant la configuration de la main et des doigts. Nous avons cependant rencontré des difficultés liées à des problèmes de seuillage. En effet, pour que ces capteurs retournent une information, il est nécessaire de fournir un effort supérieur à une certaine valeur donnée par le constructeur, ce qui, dans notre cas, est problématique car l'utilisateur ne peut pas alors manipuler le dispositif avec précision et dextérité, en particulier, nous l'avons vu dans l'analyse ergonomique avec les prototypes initiaux, cela peut créer des mouvements parasites avec le SpaceNavigator™ ou bien créer une mauvaise interaction avec les doigts de l'utilisateur ;
- le pavé tactile (voir figure 6(b)) : appelé *touchpad*, il s'agit de la souris intégrée dans les ordinateurs portables. Ce dispositif répond bien aux critères de sensibilité et donc de découplage et de fatigue puisqu'un effort faible suffit à faire bouger les doigts virtuels. On peut noter qu'avec ce dispositif, nous pouvons simuler également le mouvement latéral des doigts. L'inconvénient est sa disponibilité sur le marché, en particulier de pavés multi-tactiles (qui prennent le mouvement de plusieurs doigts). Ainsi avec les pavés traditionnels, il n'est pas possible de contrôler chaque doigt séparément, autrement dit un seul doigt de l'utilisateur contrôle tous les doigts virtuels ;
- la molette sphérique (ou *trackball*) (voir figure 6(c)) : généralement utilisée sur les téléphones portables, ce capteur ne nécessite pas non plus un effort élevé pour renvoyer une

information. Par ailleurs, il intègre un retour qui peut être considéré comme passif car son actionnement provoque une impulsion mécanique audible. Il est à noter cependant que le signal fourni par ce capteur n'est pas de très bonne qualité et ne permet donc pas une réalisation des tâches virtuelles très fine ;

- le capteur linéaire (voir figure 6(d)) : ce capteur est proche du pavé tactile, à la différence près qu'il ne prend qu'un seul degré de liberté. Il s'agit d'une bonne alternative au pavé tactile car il permet de contrôler les doigts indépendamment. Son inconvénient est son prix élevé ;
- le levier mono-axe (voir figure 6(e)) : présent sur les appareils photo numériques pour effectuer un zoom. Ce capteur possède une position de repos et s'adapte donc bien à un contrôle en vitesse. Cependant il ne permet pas un contrôle continu.

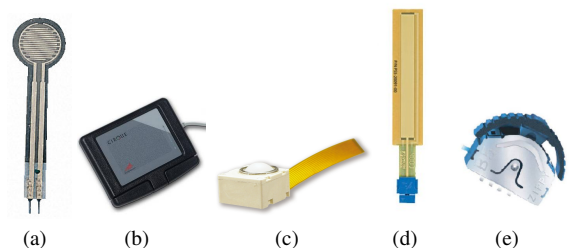


Figure 6: Différentes technologies de capteurs. De gauche à droite : capteur de pression, pavé tactile, molette sphérique, capteur linéaire, levier mono-axe.

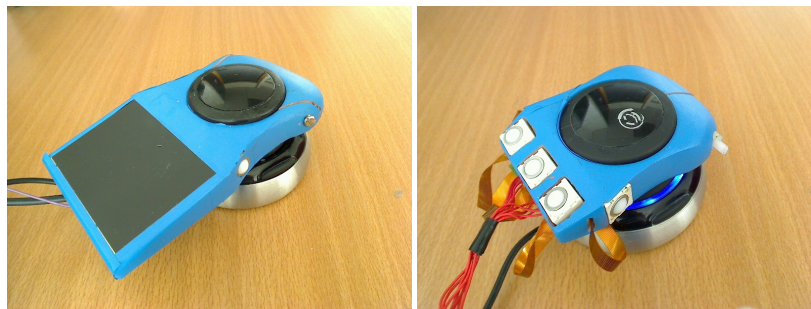
A travers ces différentes technologies, nous voyons bien que la dextérité que l'utilisateur pourra restituer dans l'environnement virtuel est très dépendante du type de capteurs. En particulier, la sensibilité du capteur et sa capacité à retourner des informations pertinentes à l'utilisateur sont importantes.

4.4 Prototypage de nouveaux périphériques

Avec toutes les considérations ergonomiques et technologiques énoncées ci-dessus, nous avons conçu plusieurs prototypes utilisant divers capteurs et nommés V3a (voir figure 5(c)), V3b et V3c (voir figure 7). Nous avons choisi une forme de souris d'ordinateur dans les trois cas, qui permet une certaine modularité avec différentes technologies de capteurs et une intégration aisée dans diverses applications.

Le prototype V3a intègre des capteurs de pression comme les prototypes initiaux. L'interaction avec les capteurs est plus aisée.

³Tirés respectivement de <http://radiospares-fr.rs-online.com>, <http://compitems.com>, <http://www.ck-components.com>, <http://www.spectrasymbol.com>, <http://www.zippy.com.tw>.



(a) Le prototype V3b intègre un pavé tactile pour les doigts et une molette sphérique de lettres sphériques. chaque côté pour le pouce.

Figure 7: Prototypes V3b et V3c.

Nous pouvons remarquer la présence d'une barre de maintien permettant d'aider l'utilisateur à compenser les efforts générés. Cette version permet un contrôle des doigts en vitesse, ce qui reste conforme à l'idée de départ du Hand Navigator.

Le prototype V3b intègre un pavé tactile classique (qui ne prend le mouvement que d'un seul doigt) pour le mouvement de tous les doigts à l'exception du pouce, et une molette sphérique pour actionner le pouce.

Le prototype V3c n'intègre que des molettes sphériques. La particularité de cette version est sa petite taille. Nous pouvons noter que, comme pour les prototypes initiaux, l'auriculaire et l'annulaire ne forment qu'un seul doigt.

Pour ces deux dernières versions, nous avons privilégié la simplicité d'utilisation et leur particularité technique est de ne pas nécessiter de grands efforts pour actionner les doigts virtuels car les capteurs utilisés sont sensibles ; par conséquent nous obtenons un bon découplage entre le SpaceNavigator™ et le Hand Navigator. Par ailleurs, leur forme est symétrique, permettant aux gauchers également de les utiliser. Enfin, il est possible de contrôler les doigts virtuels soit en vitesse, soit en position, même si ce dernier est plus adapté par rapport aux technologies des capteurs. En effet, même avec un contrôle en position, il est toujours possible d'interrompre une tâche en cours car la position retournée par le capteur reste fixe lorsque l'on n'y touche pas.

Enfin ces prototypes ont été fabriqués par strato-conception. Cette technologie permet d'obtenir des pièces rigides mais impose des contraintes sur les épaisseurs de parois compte tenu des efforts mis en jeu dans l'opération d'enlèvement de matière.

5 RÉSULTATS

Grâce à une analyse approfondie de l'ergonomie et des différentes technologies de capteurs, nous sommes en mesure de proposer une large palette de prototypes différents et intégrant des capteurs de petite taille. En présentant autant de prototypes, nous souhaitons montrer que nous sommes capables de répondre facilement et à moindre coût aux besoins d'un utilisateur. Les avantages de notre périphérique par rapport à d'autres solutions est son faible coût et son intégration aisée dans des environnements bureautiques.

Par ailleurs, une librairie en C++ a été créée pour permettre à un utilisateur d'interfacer sans effort et rapidement le Hand Navigator avec tous types d'applications, simplement en faisant appel à des fonctions pré-définies et qui retournent les informations voulues. Entre autres applications actuelles, nous avons la possibilité de réaliser de la sculpture virtuelle avec de la pâte à modeler (voir figure 8) ou bien de jouer avec des objets déformables.

Enfin, nous avons effectué un tableau comparatif entre les différentes versions de prototypes du Hand Navigator qui permet de

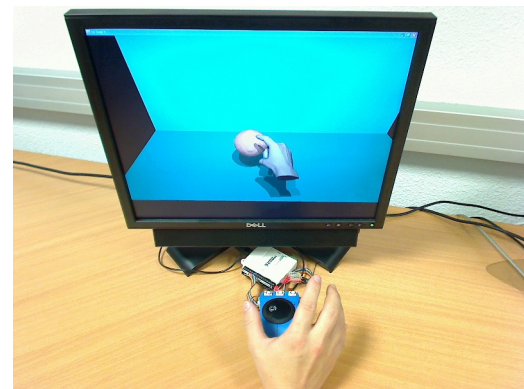


Figure 8: Sculpture virtuelle avec le prototype V3c.

Table 1: Comparaison des différents prototypes.

	V1	V2	V3a	V3b	V3c
Contrôle de la main	Vit.	Vit.	Vit.	Vit.	Vit.
Contrôle des doigts	Vit.	Vit.	Vit.	Pos.	Pos.
Facilité à tenir le dispositif	-	-	=	+	+
Confort	-	-	=	+	+
Retour passif	+	+	=	=	+
Réalisation de tâches	+	+	+	++	++
Compensation des efforts	+	=	+	++	++
Ergonomie	-	=	+	+	+

"-" = mauvais, "=" = moyen, "+" = bon et "++" = très bon.

mieux se rendre compte de l'évolution du Hand Navigator en terme de fonctionnalités (voir tableau 1).

Nous pouvons remarquer que nous avons mis l'accent sur le confort d'utilisation, donc son ergonomie, ainsi que la dextérité pour la réalisation de tâches complexes. Le retour passif présent sur les prototypes initiaux est dû à la faible rigidité des pétales métalliques. De par leur conception mécanique, nous pouvons considérer que le prototype V3c intègre un retour passif, ce qui n'est pas vraiment le cas avec le prototype V3b car le pavé tactile ne possède pas de telle capacité.

6 CONCLUSION ET EXTENSIONS

Nous avons présenté plusieurs versions d'un périphérique permettant de contrôler une main virtuelle, le Hand Navigator. Les études

successives menées ont permis de concevoir plusieurs prototypes qui augmentent la dextérité et la précision de manipulation.

Jusqu'à présent nous avons utilisé le SpaceNavigatorTM pour contrôler la position et l'orientation de la main. Dans le futur, nous allons étudier d'autres dispositifs basés sur des souris sans fil ou bien des accéléromètres.

Le retour passif n'a pas fait l'objet d'un travail particulier et approfondi. Cependant, nous avons des pistes pour intégrer un tel retour, comme l'intégration de vibreurs avec chaque capteur pour que, lorsqu'un utilisateur entre en contact avec un objet virtuel, il puisse le ressentir à travers une sensation nouvelle.

Le Hand Navigator est conçu pour s'insérer dans un grand nombre d'applications, telles que la simulation physique, la manipulation interactive de formes ou la télémanipulation. Pour les simulations physiques, le périphérique proposé pourrait davantage augmenter la sensation d'immersion dans le monde virtuel. La modélisation de formes pourrait être réalisée très naturellement grâce à une interaction manuelle. Enfin, les personnes possédant des déficiences motrices pourraient se servir du Hand Navigator pour commander un bras robotique qui les aiderait à saisir des objets.

ACKNOWLEDGEMENTS

Les auteurs aimeraient remercier l'entreprise Idenea pour l'analyse ergonomique et les élèves de 2^e année de Grenoble-INP/ENSE3 pour leur participation dans l'analyse technologique des capteurs. Ce projet est financé par GRAVIT.

REFERENCES

- [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] 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.
- [3] C. Chaillou and G. Casiez. Périphérique d'entrée hybride isotonique/élastique, 5 2005.
- [4] J.-R. Chardonnet, S. Miossec, A. Kheddar, H. Arisumi, H. Hirukawa, F. Pierrot, and K. Yokoi. Dynamic simulator for humanoids using constraint-based method with static friction. In *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pages 1366–1371, Kunming, China, December 17–20 2006.
- [5] 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.
- [6] B. E. Insko. Passive haptics significantly enhances virtual environments. Technical report, University of North Carolina, 2001.
- [7] R. S. Johansson. Sensory input and control of grip. In *Novartis Foundation Symposium*, pages 45–59, 1998.
- [8] 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.
- [9] P. G. Kry, A. Pihuit, A. Bernhardt, and M.-P. Cani. Handnavigator: Hands-on interaction for desktop virtual reality. In *ACM symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 2008.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.