



HAL
open science

Deux techniques uni-manuelles de manipulation avec contraintes pour la modélisation 3D sur TabletPC

Siju Wu, Aylen Ricca, Amine Chellali, Samir Otmane, Guillaume Moreau

► **To cite this version:**

Siju Wu, Aylen Ricca, Amine Chellali, Samir Otmane, Guillaume Moreau. Deux techniques uni-manuelles de manipulation avec contraintes pour la modélisation 3D sur TabletPC. Actes de la 28ième conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine, Oct 2016, Fribourg, Suisse. pp.8-18, 10.1145/3004107.3004112 . hal-01383696

HAL Id: hal-01383696

<https://hal.science/hal-01383696>

Submitted on 19 Oct 2016

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.

Deux techniques uni-manuelles de manipulation avec contraintes pour la modélisation 3D sur TabletPC

Siju Wu Aylene Ricca Amine Chellali Samir Otmane
 Université d'Evry-Val-d'Essonne - Laboratoire IBISC
 91080, Evry, France
 {siju.wu,aylen.ricca,amine.chellali,samir.otmane}@ibisc.fr

Guillaume Moreau
 Ecole Centrale de Nantes
 44000, Nantes, France
 guillaume.moreau@ec-nantes.fr

RÉSUMÉ

Dans les applications de modélisation 3D sur PC, la manipulation avec contraintes d'objets repose sur l'utilisation des widgets de transformation 3D. Cependant, ces widgets sont moins efficaces pour une utilisation sur des écrans tactiles en raison de la faible précision des dispositifs d'entrée et des problèmes d'occlusion. Dans ce papier, deux nouvelles techniques uni-manuelles de manipulation 3D sur TabletPC sont proposées. Basées sur l'identification des doigts, nos deux techniques associent l'index, le majeur et l'annulaire de la main dominante aux axes x, y et z du système de coordonnées. Après l'enregistrement de cette association axe-doigts, les utilisateurs peuvent effectuer différents gestes d'accords pour des manipulations avec contraintes sur les axes, sur les plans et des manipulations uniformes. Nous avons mené une étude préliminaire pour examiner l'apprenabilité et l'utilisabilité des gestes proposées. Les résultats indiquent que ces derniers peuvent être mémorisés rapidement. Certains gestes ont été jugés confortables et faciles à utiliser par les utilisateurs alors que d'autres nécessitent davantage d'investigations. Ces résultats permettent de donner des recommandations quant à la conception d'une technique uni-manuelle de manipulation avec contraintes qui peut être utilisée efficacement pour la modélisation 3D sur TabletPC.

Mots Clés

Interaction tactile ; manipulation 3D ; techniques d'interaction ; dispositifs mobiles.

ABSTRACT

In desktop 3D modeling applications, object manipulation relies on the use of standard transformation widgets. However, these widgets are less efficient on touchscreens due to the low accuracy of touch inputs, and also to the fingertip occlusion issue. In this paper, we propose two unimanual constrained manipulation techniques on TabletPCs. Based on finger identification, our techniques map the index, middle and ring fingers of the dominant

hand to the X, Y and Z axes of the coordinate system. After registering the axis-fingers mapping on the screen, users can perform different chording gestures to trigger axis-, plane-constrained or uniform manipulations. We have conducted a user study to examine the learnability and usability of the proposed gestures. The results indicate that these gestures can be memorized quickly after a short training period. Users found some gestures to be easy to use and comfortable while others require additional investigations. These findings permits to give recommendations for designing a unimanual constrained manipulation technique that can be used efficiently in a 3D modeling application on TabletPCs.

Author Keywords

Touch inputs; 3D manipulation; Interaction techniques; Mobile devices.

ACM Classification Keywords

H.5.2. Information Interfaces and Presentation: User Interfaces-Graphical user interfaces (GUI), Interaction styles; I.3.6. Computer Graphics: Methodology and Techniques-Interaction techniques.

INTRODUCTION

Dans de nombreuses applications commerciales actuelles de modélisation 3D, la manipulation d'objets avec contraintes repose sur l'utilisation de widgets 3D standards. Avec le développement prospère ces dernières années des dispositifs mobiles basés sur les interactions tactiles, de nouveaux besoins de manipulation d'objets 3D dans les environnements mobiles sont apparus. C'est le cas par exemple, d'un designer qui souhaiterait modéliser une scène 3D ou encore effectuer des ajustements sur une scène existante alors qu'il est sur le terrain. Cependant, la performance des widgets standards pour la manipulation d'objets se dégrade lorsqu'ils sont utilisés sur des dispositifs tactiles. En effet, la précision relativement faible des entrées tactiles a une influence significativement négative sur leurs performances [3]. De plus, en raison du problème d'occlusion du bout des doigts [26], il est difficile de spécifier correctement la contrainte de manipulation souhaitée. Dans la littérature, des techniques de manipulation avec contraintes sur des surfaces tactiles ont été proposées [1, 3, 8, 13, 15, 18]. Bien qu'elles permettent la manipulation de façon transparente, ces techniques ont encore quelques limitations [28].

Dans ce papier, nous proposons deux techniques uni-manuelles de manipulation 3D avec contraintes pour la modélisation 3D sur TabletPCs. Basées sur l'identification des doigts, ces techniques permettent

l'utilisation de l'index, du majeur et de l'annulaire pour spécifier respectivement les contraintes sur les axes X, Y et Z. Une fois la contrainte spécifiée, les utilisateurs peuvent utiliser leurs doigts pour faire des gestes spécifiques et déclencher les translations, les rotations et les changements d'échelle. Ces techniques intègrent la sélection des contraintes, permettent la détermination du mode de fonctionnement avec un seul geste, contribuent à améliorer la fluidité de l'interaction et permettent d'économiser l'espace limité de l'écran sur les dispositifs mobiles. Ce papier vise à présenter la logique de conception de ces techniques et une étude préliminaire menée avec des novices et des experts pour évaluer l'apprenabilité et l'utilisabilité des gestes proposés et de comparer leurs performances.

ETAT DE L'ART

Techniques de manipulation sur surfaces tactiles

Peu de solutions existent actuellement pour les manipulations avec contraintes sur des surfaces tactiles. La technique proposée par Schmidt et al. permet de dessiner différents traits pour déclencher différentes tâches de manipulations [24]. Bien que les utilisateurs aient un contrôle sur 9 degrés de liberté (DdL), la mémorisation de tous les gestes proposés reste difficile pour des utilisateurs novices. Kin et al. ont développé Eden, une interface tactile pour la construction de scènes d'animation [13]. Un ensemble de gestes est fourni pour réaliser les RST (Rotate-Scale-Translate)¹ d'une manière indépendante. Cependant, cette technique nécessite que l'utilisateur maintienne son doigt sur l'objet pendant la manipulation ce qui peut dégrader sa performance dans un environnement dense où plusieurs objets sont situés dans la même zone. Tbox [3] et Toucheo [9] sont deux techniques de manipulation basées-widget. Dans Tbox, un widget en forme de boîte couvrant l'objet sélectionné est affiché. Les utilisateurs peuvent alors effectuer les RST en interagissant avec les bords et les faces de cette boîte. Dans Toucheo, des objets flottants sont affichés au-dessus de l'écran tactile et un widget en forme de cercle est affiché juste en dessous de l'objet sélectionné. Le widget sert comme proxy de l'objet et les utilisateurs peuvent interagir avec, à l'aide de gestes simples. Une limitation de ces deux techniques est que les gestes doivent être réalisés à proximité de l'objet manipulé ce qui peut dégrader leur performance dans un environnement dense. De plus, certains de leurs gestes d'interaction sont bimanuels. Cependant, ces derniers sont difficiles à réaliser sur TabletPCs parce que la main non-dominante (MND) est généralement utilisée pour tenir le dispositif. Reisman et al. ont conçu une technique bimanuelle pour réaliser les RST sur écran tactile en proposant une extension des gestes de manipulation 2D classiques [22]. Wu et al. ont proposé une technique bimanuelle basée sur l'utilisation d'un menu de contraintes [28]. L'utilisateur peut spécifier la contrainte sur le menu avec la MND et déclencher la manipulation désirée avec la MD. Encore une fois, le besoin d'utiliser

la MND peut restreindre l'utilisation de ces deux dernières techniques dans un scénario mobile.

Au et al. ont conçu un ensemble de gestes de manipulation en utilisant deux doigts de la MD [1]. Les utilisateurs peuvent d'abord bouger deux doigts sur l'écran dans la direction parallèle à l'axe souhaité pour spécifier la contrainte, puis effectuer le geste correspondant pour déclencher la manipulation désirée. Contrairement à d'autres techniques, cette technique ne nécessite pas d'effectuer les gestes de manipulation sur l'objet sélectionné. Cependant, dans certains points de vue de la caméra, les projections de deux axes coïncident entre elles rendant difficile la sélection de la contrainte souhaitée.

Rousset et al. ont proposé TAV+ et Arcball+, deux techniques de manipulation 3D avec contraintes pour dispositifs mobiles en utilisant deux doigts d'une seule main [23]. Cependant, ces deux techniques se limitent au contrôle des 3 DdL de rotation. Liu et al. ont proposé un ensemble de gestes utilisant deux doigts pour une manipulation d'objet sur 6 DdL [15]. Cette technique permet d'utiliser uniquement la main dominante (MD) pour faire des translations et rotations 3D. Hancock et al. ont proposé une technique d'interaction tactile qui tire parti des caractéristiques physiques des objets 3D pour les manipuler [10]. Martinet et al. ont conçu de leur côté DS3, une technique de manipulation pour surfaces tactiles qui permet de séparer le contrôle des translations et des rotations en utilisant des gestes spécifiques [16]. Cependant, toutes ces techniques se limitent uniquement au contrôle de 6 DdL.

La précédente revue montre que certains problèmes d'interaction doivent encore être résolus afin d'avoir des techniques de manipulation mieux adaptées aux dispositifs mobiles. Ces problèmes sont liés au manque d'intuitivité des gestes, la nécessité d'utiliser la MND pour l'interaction, la dégradation des performances dans un environnement dense, les limitations liées à certains points de vue de la caméra ou encore le nombre limité de DdL contrôlés.

Identification des doigts

Afin d'élargir l'espace de conception de l'interaction tactile, certaines techniques proposées utilisent différents doigts pour interagir avec le contenu. En effet, Colley et Hakkila ont montré qu'associer les doigts à différentes fonctions était généralement positivement perçue par les utilisateurs [4]. Ainsi, Sugiura et Koseki ont tenté d'associer chaque doigt à une fonction différente [25]. Harrison et al. ont présenté de leur côté une technique permettant de déterminer si un contact est fait par les différentes parties de chaque doigt selon les sons produits lorsque ce doigt touche l'écran [11]. Chen et al. ont exploré de leur côté l'utilisation d'une Smartwatch pour identifier quelle partie du doigt est en contact avec l'écran tactile [2].

Plutôt que de considérer l'utilisation individuelle de chaque doigt, plusieurs études ont exploré l'amélioration des interactions tactiles à travers la réalisation de plusieurs contacts simultanément avec les doigts. Ces

¹ Rotation, Translation, et changement d'échelle

combinaisons de doigts sont souvent appelées "accords" ou "gestes d'accords" (*chording* en anglais). Lepinski et al. ont combiné l'utilisation des gestes d'accords avec un menu de marquage afin d'augmenter le nombre d'éléments du menu et d'éliminer le niveau de profondeur [14]. Pour faciliter la mémorisation des accords, Wagner et al. ont proposé le regroupement des gestes similaires en utilisant la correspondance catégorique (*categorical mapping*) [27]. Goguy et al., ont utilisé les accords comme raccourcis pour le contrôle continu des paramètres d'une table interactive [6]. Les utilisateurs peuvent d'abord réaliser un geste d'accord avec la MND pour déterminer la correspondance des commandes pour les doigts de la MD. Ensuite, un doigt de la MD est utilisé pour lancer la commande correspondante. Enfin, Marquardt et al. ont mis au point TouchID, une boîte à outils permettant aux concepteurs de proposer leurs propres gestes d'interaction basés sur l'utilisation de différentes parties de la main [17].

Tous les travaux mentionnés ci-dessus démontrent que l'identification des doigts et les gestes d'accords ouvrent une nouvelle voie pour les concepteurs afin de développer de nouvelles techniques d'interaction tactiles. Cependant, au meilleur de notre connaissance, aucun travail antérieur n'a proposé une technique de manipulation 3D sur surfaces tactiles basée sur l'identification des doigts. Donc, un de nos objectifs était d'explorer l'utilisation de ce concept pour concevoir de nouvelles techniques de manipulation tactiles.

CONCEPTION DES TECHNIQUES DE MANIPULATION

Processus de Conception

Afin de répondre aux exigences de l'interaction tactile, nous proposons et explorons deux nouvelles techniques de manipulation avec contraintes basées sur l'identification des doigts. Pour ce faire, et en suivant un processus de conception itératif, nous avons d'abord mené une analyse des tâches et des besoins. Cette analyse est basée sur l'analyse de l'état de l'art présenté plus haut, complétée par une discussion avec trois experts de l'utilisation des modèles 3D. Ceci a permis d'identifier et de décrire les sous-tâches de manipulation 3D avec contraintes et les exigences pour une nouvelle technique de manipulation sur dispositifs mobiles. Cette analyse des tâches et des besoins a été traduite par la suite, en choix de conception pour nos deux techniques de manipulation.

Analyse des tâches de manipulation 3D avec contraintes

Une manipulation d'objets en 3D nécessite de contrôler 9 DdL (3 translations, 3 rotations et 3 changements d'échelle). Notre analyse nous a permis de décomposer la tâche de manipulation 3D avec contraintes en plusieurs sous-tâches selon trois catégories : manipulations avec contraintes sur un axe, manipulations avec contraintes sur un plan et manipulations uniformes. Une manipulation avec contraintes sur un axe permet aux utilisateurs de faire la translation, la rotation et/ou le changement d'échelle d'un objet le long d'un axe principal du système de coordonnées (X, Y ou Z). Une manipulation avec contraintes sur un plan permet d'effectuer la translation et/ou le changement d'échelle de l'objet sur un plan défini

par deux axes principaux (XY, XZ ou YZ). Enfin, une manipulation uniforme ne permet de faire qu'un changement d'échelle uniforme sur les trois axes (XYZ).

Analyse des besoins

L'analyse des besoins a permis de dégager les exigences suivantes pour une nouvelle technique de manipulation 3D avec contraintes :

- Les utilisateurs doivent pouvoir effectuer les translations d'objets, les rotations et les changements d'échelle de manière indépendante sur les trois dimensions. Ainsi, la technique proposée devrait permettre la spécification des contraintes sur les axes et sur les plans ;
- Pour limiter les problèmes liés à l'occultation du bout du doigt et aux environnements denses, la manipulation ne doit pas être influencée par la position, l'orientation, la taille et la densité des objets. Ainsi, les utilisateurs devraient pouvoir toucher l'écran à n'importe quelle position pour déclencher les tâches de manipulation ;
- Le mode de fonctionnement devrait être modifiable d'une manière transparente. Ceci permettrait aux utilisateurs de se concentrer sur la tâche principale de manipulation sans être fréquemment interrompus par des tâches supplémentaires de contrôle du système ;
- La manipulation ne doit pas être affectée par les points de vue de la caméra. La nouvelle technique devrait donc fonctionner correctement indépendamment de la perspective choisie par l'utilisateur.

Défis de conception

Une des problématiques de conception des techniques d'interaction tactile est le nombre limité de gestes dans le vocabulaire de gestes tactiles [20]. En effet, pour répondre aux précédentes exigences, il est nécessaire de proposer un geste distinct pour chaque sous-tâche identifiée. Pour la manipulation 2D sur surface tactile, l'utilisateur peut réaliser les translations, rotations et mises à l'échelle en faisant respectivement glisser 1 doigt, tourner l'objet avec 2 doigts et en faisant un geste de pincement avec 2 doigts. Cependant, ces gestes classiques ne peuvent pas être utilisés pour contrôler les 9 DdL nécessaires à la manipulation 3D. Bien qu'il soit possible de proposer d'autres gestes 2D et les faire correspondre aux sous-tâches de manipulation 3D décrites précédemment, le défi est de trouver les métaphores appropriées permettant à l'utilisateur d'apprendre et de mémoriser facilement tous ces nouveaux gestes.

Logique de conception

Notre choix de la modalité d'entrée pour les nouvelles techniques de manipulation uni-manuelles s'est donc porté sur l'identification des doigts. Comme indiqué plus haut, certaines techniques d'interaction ont exploré l'utilisation de l'identification des doigts pour enrichir les possibilités d'interaction [6, 17, 25]. Ainsi, de nouveaux gestes de manipulation peuvent être proposés dans l'espace de conception fourni par l'identification des doigts de l'utilisateur. De plus, puisque Wagner et al. soutiennent que le regroupement de gestes d'accords similaires dans une même catégorie est utile pour réduire les informations que les utilisateurs doivent mémoriser

[27], nous avons décidé de regrouper les gestes en fonction des contraintes et des sous-tâches de manipulation. Ainsi, nous avons créé le concept du "*doigt d'axe*" dans lequel certains doigts de la main ont été associés à un des axes du système de coordonnées. Ainsi, nous avons associé respectivement l'index, le majeur et l'annulaire aux contraintes sur les axes X, Y et Z. Ces doigts ont été choisis parce ils sont adjacents dans la main. Puisque l'ordre des doigts est similaire à l'ordre conventionnel des trois principaux axes (x/y/z), notre hypothèse est que cela devrait aider les utilisateurs à se rappeler plus facilement des associations doigts-axes. Le pouce et l'auriculaire n'ont pas été utilisés comme doigts d'axe en raison de leurs limitations anatomiques. En effet, faire glisser le pouce et/ou l'auriculaire sur l'écran nous a semblé être moins confortable pour les utilisateurs. Pour manipuler les objets, l'utilisateur peut toucher l'écran avec un ou plusieurs doigts d'axe pour indiquer la contrainte, puis effectuer des gestes d'accords avec ces doigts pour déclencher la manipulation. Afin d'explorer l'efficacité de différents gestes d'accords possibles pour chaque sous-tâche de manipulation, deux techniques distinctes *Classic3D* et *Single3D* sont proposées.

Classic3D

Notre première technique, appelée *Classic3D*, a été conçue par une extension des gestes classiques de manipulation 2D. En effet, puisque faire glisser un doigt est une métaphore naturelle pour la translation d'un objet, nous avons réutilisé ce geste pour la translation avec contrainte sur un axe. Ainsi, pour faire une translation d'un objet sélectionné le long d'un axe principal, les utilisateurs doivent d'abord appuyer sur l'écran avec le doigt d'axe correspondant, puis le faire glisser dans la direction parallèle à celle de l'axe sélectionné (Figure 1(a)). Glisser le doigt dans l'autre direction permet de faire une translation de l'objet dans le sens inverse. Une fois qu'une direction est spécifiée, l'axe sélectionné est d'abord projeté sur le plan de l'écran, puis le mouvement du doigt est projeté sur ce même plan afin de calculer l'amplitude de translation de l'objet.

Nous avons suivi la même stratégie pour concevoir les gestes de rotation et de changement d'échelle. En effet, certaines techniques permettent de faire glisser un ou deux doigts dans la direction perpendiculaire à l'axe de projection pour faire tourner l'objet autour de ce dernier [1, 3, 28]. Ceci correspond à la métaphore de faire tourner un objet autour d'un pivot fixe. Ce geste a donc été réutilisé dans *Classic3D* pour contrôler la rotation de l'objet. Les utilisateurs peuvent toucher l'écran avec un doigt d'axe pour spécifier l'axe de rotation, puis faire glisser le doigt dans la direction perpendiculaire à cet axe afin de déclencher la rotation (Figure 1(b)).

Pour changer l'échelle le long d'un axe principal, un geste de pincement peut être réalisé à l'aide du pouce et du doigt d'axe choisi (Figure 1(c)). Il est inutile que ce geste soit réalisé dans la direction de l'axe sélectionné.

Single3D

Pour explorer d'autres métaphores de manipulation, nous proposons une deuxième technique appelée *Single3D*.

Les gestes de translation de *Single3D* sont exactement les mêmes que ceux de *Classic3D* (Figure 2(a)). En effet, nous avons jugé que glisser un doigt pour faire une translation était la métaphore la mieux adaptée pour cette tâche. Cependant, les gestes de rotation et de changement d'échelle ont été pensés différemment.

Ainsi, pour créer un nouveau geste de rotation, nous nous sommes basés sur une autre métaphore qui consiste à faire tourner le doigt sur l'écran en faisant des gestes circulaires. Cette métaphore pourrait en effet faciliter la mémorisation du geste de rotation et limiter les confusions possibles liées à la similitude entre les gestes de translation et de rotation dans *Classic3D*. L'utilisateur peut donc toucher l'écran avec un doigt d'axe pour spécifier l'axe de rotation, puis faire des gestes circulaires continus avec ce doigt pour contrôler la rotation (Figure 2(b)). La direction de rotation change en inversant la direction des gestes circulaires.

Bien que le geste de pincement soit une métaphore habituelle pour le changement d'échelle des objets en 2D, la combinaison du majeur ou de l'annulaire avec le pouce pour effectuer ce geste dans *Classic3D* peut s'avérer être moins confortable pour les utilisateurs. De plus, Ghomi et al. ont recommandé d'éviter l'utilisation des geste d'accords dans lesquels le majeur ou l'annulaire sont levés tandis que leurs voisins touchent la surface [5]. Dans certaines applications de modélisation 3D, les changements d'échelle dans une direction peuvent être réalisés en faisant glisser une barre de défilement. Les objets peuvent être agrandis (rétrécis) lorsque la barre de défilement est glissée dans le sens positif (négatif). Cependant, cette métaphore ne peut pas être utilisée directement pour le changement d'échelle d'objets parce que faire glisser un doigt sur un axe correspond au geste déjà utilisé pour la translation d'un objet. Ainsi pour faire une distinction entre le geste de translation et celui de changement de l'échelle, l'utilisateur doit faire un double-clic pour déclencher l'action de changement d'échelle d'un objet (Figure 2(c)). Une fois que l'utilisateur a effectué le double-clic avec le doigt d'axe choisi, il peut le faire glisser le long de la direction positive (négative) de l'axe pour augmenter (diminuer) la taille de l'objet.

Contraintes de plan et manipulations uniformes

Outre les contraintes d'axe, *Classic3D* et *Single3D* permettent également d'effectuer des manipulations avec contraintes sur un plan et des manipulations uniformes.

Pour la translation sur un plan, *Classic3D* et *Single3D* se basent sur le même geste qui consiste à toucher l'écran avec deux doigts d'axe pour choisir la contrainte de plan puis faire glisser les deux doigts ensemble pour déplacer l'objet dans le plan choisi (Figure 3(a)).

Avec *Classic3D*, les utilisateurs peuvent effectuer le geste de pincement avec le pouce et deux doigts d'axe pour redimensionner l'objet dans les deux directions spécifiées (Figure 3(b)). De même, en touchant l'écran avec les trois doigts d'axe et le pouce et en effectuant le geste de pincement, l'utilisateur peut changer l'échelle de l'objet d'une manière uniforme sur les trois axes.

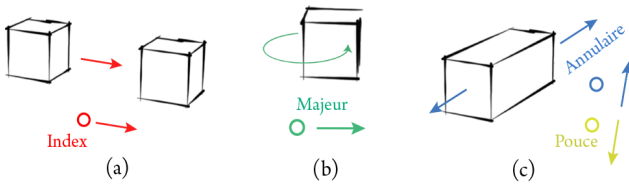


Figure 1 : les gestes de manipulations avec contraintes d'axe de Classic3D. (a) translation sur X ;(b) rotation sur Y ; (c) changement d'échelle sur Z.

Avec Single3D, les utilisateurs peuvent double-cliquer sur l'écran avec deux (ou trois) doigts d'axe pour déclencher un changement d'échelle avec contraintes de plan (ou un changement d'échelle uniforme) (Figure 4). Si les doigts sont glissés dans le sens positif de la direction du vecteur formé par la somme des vecteurs unitaires des axes sélectionnés, l'objet est agrandi. Sinon, il est rétréci.

PROTOTYPE DU SYSTEME

Dispositif d'identification des doigts

Pour explorer le concept d'identification des doigts pour la manipulation des objets en 3D, il est nécessaire de détecter les mouvements des doigts sur l'écran. Bien que certains dispositifs grand public, tels que le Samsung Galaxy S4, permettent de suivre les mouvements de la main dans l'air, il n'existe actuellement sur le marché aucune solution technique permettant l'identification des doigts. Dans la littérature, différentes solutions ont été proposées pour identifier les doigts en utilisant des techniques de vision par ordinateur [7, 14], en utilisant des dispositifs de suivi intégrés [6, 17], ou à l'aide des empreintes digitales [12, 25]. Dans ce travail, nous avons opté pour une solution à faible coût semblable à celle utilisée par Colley et Häkkinä [4] pour évaluer nos techniques. Celle-ci est basée sur l'utilisation du contrôleur de mouvement Leap Motion pour l'identification des doigts. Nous faisons l'hypothèse que le développement des technologies permettra dans un futur proche d'avoir des dispositifs mobiles commerciaux intégrant l'identification des doigts.

Comme on peut le voir sur la Figure 5, le contrôleur de mouvement Leap Motion a été installé à l'envers au-dessus d'un iPad air 2 et a été fixé sur un cadre métallique lui-même attaché à l'iPad. Puisque la performance du Leap Motion est sensible à la couleur de l'arrière-plan dans les images infrarouges, nous avons utilisé un fond de couleur noire pour avoir un arrière-plan d'image suffisamment sombre. Le suivi des doigts a été réalisé sur un Macbook Pro et les informations sur l'identification

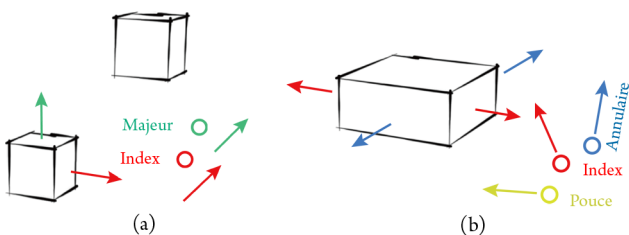


Figure 3 : gestes de manipulation avec contraintes de plan pour Classic3D. (a) translation sur XY ;(b) changement d'échelle sur XZ.

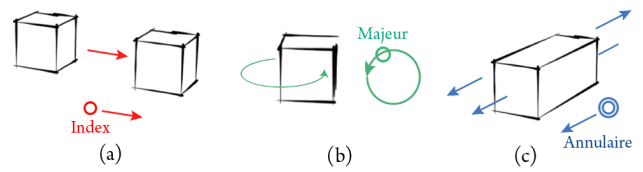


Figure 2 : les gestes de manipulations avec contraintes d'axe de Single3D. (a) translation sur X ;(b) rotation sur Y ; (c) changement d'échelle sur Z.

des doigts étaient transmises à l'iPad via une connexion réseau sans fil. Cette application client/serveur a été développée en utilisant Unity3D avec C#.

Application de démonstration

Pour évaluer nos nouvelles techniques de manipulation, nous les avons implémentées dans une application de modélisation 3D pour dispositifs mobiles que nous avons déjà utilisée dans le passé [28]. Cette application permet la réalisation de plusieurs tâches basiques de modélisation 3D telles que la génération de primitives, la sélection et manipulation de faces, l'extrusion de faces, ou encore la duplication d'objets. Elle a été développée sous Unity3D avec C#. Cependant, pour les besoins de l'évaluation (voir les détails dans la section suivante), seules des tâches de manipulation simples avec des contraintes d'axe ont été utilisées et seront présentées ici.

Il est à noter qu'une procédure de calibration a été mise en place afin de pouvoir localiser avec précision la position et l'orientation de l'écran tactile dans le repère du contrôleur Leap Motion. Ceci permet l'identification précise des doigts lorsqu'ils touchent l'écran tactile.

Aides visuelles pour la mémorisation des doigts d'axe

Afin de faciliter la mémorisation des doigts d'axe par les utilisateurs de nos techniques, nous avons opté pour l'affichage d'une aide visuelle sur l'écran. Tout d'abord, un code couleur (rouge, vert et bleu) a été associé respectivement à chacun des axes principaux (X, Y et Z). De plus, nous avons associé la couleur jaune au pouce pour signifier que ce doigt peut être combiné avec tous les autres pour réaliser certaines tâches. Enfin, des étiquettes portant le nom du doigt et sa couleur étaient affichées en haut de l'écran à gauche (Figure 5). Les positions des étiquettes les unes par rapports aux autres étaient choisies de telle sorte qu'elles rappellent les positions des doigts de la MD lorsqu'on les pose sur l'écran. L'affichage des positions pouvait être inversé selon la latéralité du participant (gaucher/droitier).

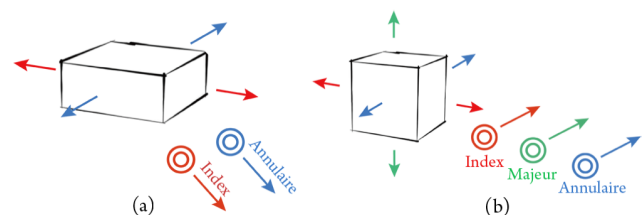


Figure 4 : gestes de manipulation avec contraintes de plan et manipulation uniforme pour Single3D. (a) changement d'échelle sur XZ ; (b) changement d'échelle uniforme.

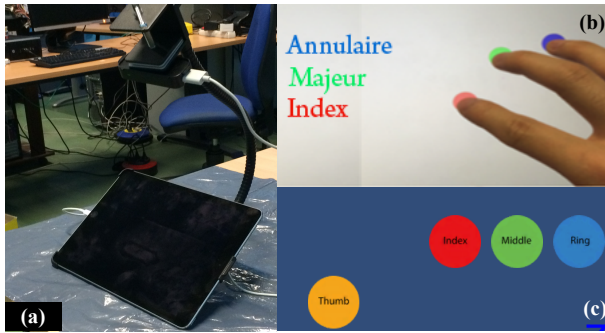


Figure 5 : prototype d'identification des doigts. (a) Le prototype consiste en une tablette tactile et un contrôleur Leap Motion installé à l'envers. (b) Le dispositif est en mesure d'identifier les doigts touchant l'écran tactile. Une aide visuelle pour la mémorisation des doigts d'axe.

ÉVALUATION DE CLASSIC3D ET SINGLE3D

Après la phase de conception et d'implémentation, nous avons mené une première étude expérimentale afin d'évaluer deux aspects de nos nouvelles techniques. Tout d'abord, nous avons voulu comparer l'apprenabilité des gestes. En effet, l'identification des doigts pour l'interaction est un concept encore inconnu pour le grand public. Par conséquent, il est nécessaire d'étudier si les utilisateurs peuvent apprendre rapidement les gestes proposés et s'approprier facilement les nouvelles techniques. Ensuite, nous avons étudié l'utilisabilité de ces gestes. Nos questions de recherche étaient donc : (1) est ce que les gestes associés aux deux techniques de manipulation uni-manuelles basées sur l'identification des doigts peuvent être appris rapidement ? et (2) est ce que les utilisateurs apprécient l'expérience d'interaction basée sur les gestes choisis ?

Participants

Vingt sujets non rémunérés (16 hommes et 4 femmes, de 22 à 37 ans) ont participé à cette étude. Tous utilisent quotidiennement les Smartphones pour un usage personnel. Un seul d'entre eux est gaucher. Douze sont novices en termes d'utilisation des logiciels de modélisation 3D sur PC tandis que les 8 autres utilisent ces logiciels fréquemment dans leur travail et ont été considérés comme experts.

Procédure expérimentale

Nous avons utilisé un design expérimental inter-intra sujet avec deux facteurs principaux : (i) Technique de manipulation avec deux niveaux : Classic3D/Single3D, et (ii) Expertise avec deux niveaux : expert/novice. Les participants devaient d'abord apprendre les gestes de chaque technique et les utiliser ensuite pour accomplir une série de tâches de manipulation. Les tâches consistaient en un ensemble de 3 translations avec contraintes d'axe, 3 rotations avec contraintes d'axe et 3 changements d'échelle avec contraintes d'axe (Figure 7). Nous n'avons pas demandé aux participants d'effectuer des tâches de docking 3D complexes afin de pouvoir évaluer chaque geste séparément. De plus, l'efficacité d'une tâche de docking complexe peut être affectée non seulement par la facilité d'utilisation de la technique, mais aussi par les habilités spatiales des participants. Ainsi, les participants ont effectué des tâches simples qui peuvent

être accomplies à l'aide d'un seul geste. Le protocole expérimental est inspiré de celui utilisé par Wagner et al. [27] avec certaines modifications pour pouvoir répondre à nos propres questions de recherche.

L'expérience a été divisée en 3 phases (Figure 6). Dans la phase 1, les participants ont appris successivement les gestes nécessaires pour faire 3 translations, 3 rotations et 3 changements d'échelle. Pour chaque tâche, ils ont réalisé 5 essais successifs pour apprendre le geste correspondant. Au début de chaque essai, un cube en 3D était affiché au centre de l'écran. Pour les tâches de translation, une cible était affichée dans la scène et les participants étaient invités à faire glisser le cube le plus près possible de la position de la cible (Figure 7 (a)). Pour les tâches de rotation, le cube était placé à l'intérieur d'une cible de plus grande taille. Les participants étaient invités à faire tourner le cube de telle sorte que sa face colorée soit le plus parallèle possible par rapport à la face colorée de la cible (Figure 7 (b)). Pour les tâches de changement d'échelle, une cible en forme de cuboïde plus large que le cube le long d'une direction principale était affichée dans la même position. Nous avons demandé aux participants d'élargir le cube dans la même direction jusqu'à ce qu'il soit aussi grand que la cible (Figure 7 (c)). Le cube ne pouvait être manipulé que lorsque le bon geste était effectué. Par exemple, si le participant devait faire une translation le long de l'axe x, les exécutions du geste de translation le long de l'axe y ou pour le faire pivoter autour de l'axe x étaient désactivées.

Avant chaque essai, un bouton de démarrage était affiché au centre de l'écran. Les participants devaient appuyer sur ce bouton pour démarrer l'essai. Une fois l'essai démarré, un message textuel décrivant l'objectif de l'essai était affiché en haut de l'écran. Pour expliquer comment les gestes de manipulation devaient être réalisés, des instructions audio et visuelles étaient fournies. Similaire à [5], deux instructions successives pour chaque tâche étaient fournies. Au début de chaque essai, la première instruction visait à expliquer quel doigt devait être pressé sur l'écran. Une fois cette opération effectuée correctement, une seconde instruction expliquant comment le doigt devait être bougé était fournie. Ces instructions étaient affichées une fois, mais les participants pouvaient cliquer sur un bouton pour les répéter (Figure 7).

Après la phase 1, les participants devaient accomplir dans la phase 2, un bloc d'essais pour mémoriser tous les gestes de manipulation. Chaque bloc se composait de 9 essais aléatoires, chacun associé à une tâche de manipulation. Comme dans la Phase 1, chaque participant devait réaliser le bon geste pour manipuler correctement le cube. Cependant, les instructions n'étaient plus fournies au début de chaque essai. Si un participant ne se souvenait plus du geste visé, il/elle était autorisé à utiliser un bouton d'aide pour obtenir les instructions.



Figure 6 : les 3 phases du processus expérimental.

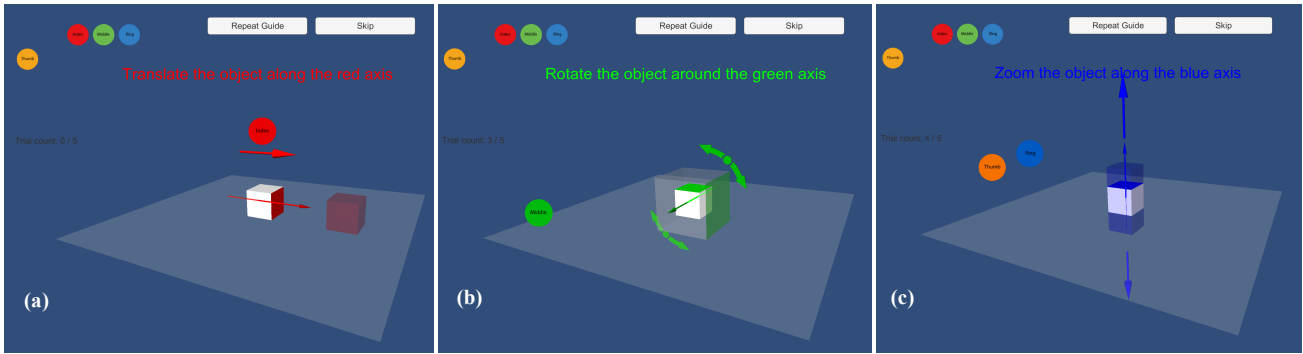


Figure 7 : les tâches de manipulation pour l'étude expérimentale. (a) translation, (b) rotation, (c) changement d'échelle.

Cette phase prenait fin lorsqu'un critère objectif de fin d'apprentissage était atteint. Ce critère était atteint lorsque les participants avaient accompli avec succès deux blocs d'essais successifs sans faire d'erreurs et sans cliquer sur le bouton d'aide. Une erreur était comptabilisée lorsque le geste effectué ne correspondait pas au geste visé dans l'essai actif.

Après le processus de mémorisation, les participants ont été autorisés à se reposer quelques instants. Ensuite, nous leur avons demandé d'accomplir 2 blocs d'essais dans la Phase 3. Comme pour la Phase 2, chaque bloc était composé de 9 différents essais. Pendant les essais, aucune instruction n'était fournie dans cette phase pour aider les utilisateurs à se rappeler des gestes. Une fois la session d'évaluation d'une technique terminée, les participants étaient invités à remplir un questionnaire pour évaluer cette technique, puis ils passaient à l'évaluation de la deuxième technique. Pour éliminer tout effet d'apprentissage dans cette expérience, l'ordre de présentation des techniques était contrebalancé. Ainsi, la moitié des participants a commencé l'expérience avec Classic3D puis Single3D alors que l'autre moitié a commencé avec Single3D puis Classic3D. L'ensemble de l'expérience durait en moyenne 40 minutes par participant.

Données collectées

Différentes mesures ont été enregistrées pour l'évaluation. Pour évaluer l'apprenabilité des gestes, le nombre de blocs nécessaires à chaque participant pour atteindre le critère objectif de fin d'apprentissage a été mesuré. Afin d'analyser l'efficacité de chaque technique, nous avons enregistré le temps d'achèvement pour chaque essai. Le calcul du temps d'achèvement commençait lorsque le bouton de démarrage était pressé et prenait fin lorsque le bouton de démarrage était affiché de nouveau pour le prochain essai.

En plus des mesures objectives, nous avons également collecté des données subjectives. Ainsi, après avoir accompli les tâches requises pour chaque technique, nous avons demandé aux participants de répondre à un questionnaire pour évaluer subjectivement la technique utilisée selon six critères à l'aide d'une échelle de Likert à 7 niveaux (de 1 -très mauvais à 7 -très bon). De plus, nous avons demandé aux participants d'évaluer le niveau de confort des différents mouvements des doigts.

Résultats

Critère objectif de fin d'apprentissage

Le test non-paramétrique de Wilcoxon montre qu'il n'existe aucun effet significatif de la technique de manipulation sur le nombre moyen de blocs nécessaire pour atteindre le critère objectif de fin d'apprentissage ($Z=-0.15, p>0.05$; $Z=-1.47, p>0.05$, respectivement pour les novices et les experts). Les novices ont eu besoin en moyenne de 3.81 ± 0.53 et 3.75 ± 0.57 blocs pour atteindre ce critère respectivement pour Classic3D et Single3D. De leur côté, les experts ont eu besoin en moyenne de 4.18 ± 1.99 et 3.00 ± 0.53 blocs pour atteindre ce critère, respectivement pour Classic3D et Single3D. Les comparaisons entre novices et experts à travers les tests non paramétriques de Mann Whitney ne montrent aucun effet significatif ni pour Clasic3D ni pour Single3D.

Temps d'achèvement

Le test-t ne montre aucun effet significatif de l'expertise sur le temps d'achèvement de la tâche de translation ($t_{(18)}=1.01, p>0.05$; Figure 8). Une ANOVA mixte (split-plot) montrent un effet significatif de la technique ($F_{(1,18)}=8.25, p=0.01$) et un effet marginal l'expertise ($F_{(1,18)}=3.12, p=0.09$) sur le temps d'achèvement de la tâche de rotation (Figure 8).

Enfin, l'ANOVA montre un effet significatif de la technique ($F_{(1,18)}=6.02, p=0.02$) sur le temps d'achèvement de la tâche de changement d'échelle (Figure 8). Aucun effet de l'expertise n'a été observé. Aucune interaction n'a également été observée.

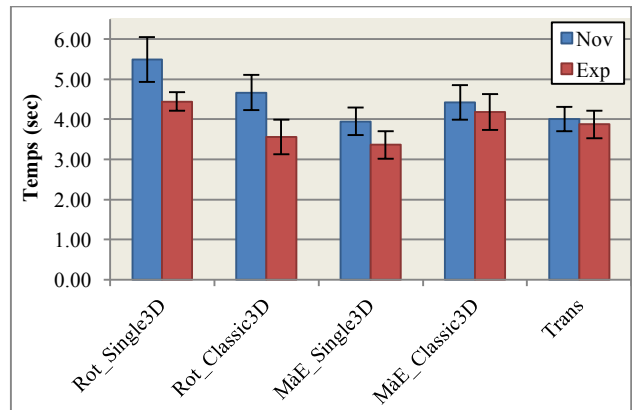


Figure 8 : Temps d'achèvement des différentes tâches de manipulation pour chaque technique selon l'expertise.

Critères	Classic3D	Single3D
Facilité d'apprentissage	5.9 (0.7)	5.9 (0.8)
Facilité d'utilisation	5.5 (1.3)	5.9 (0.8)
Confort d'utilisation - translations	6.3 (0.7)	6.3 (0.7)
Confort d'utilisation - rotations	5.1 (1.0)	5.7 (1.1)
Confort d'utilisation - changements d'échelle	5.7 (1.4)	6.1 (0.7)
Intuitivité de la technique	5.7 (0.8)	6.0 (0.7)

Tableau 1 : réponses des participants au questionnaire d'évaluation subjective.

Pour la performance des doigts dans chaque technique, une ANOVA mixte montre un effet significatif du doigt ($F_{(1,18)}=12.80$, $p=0.002$) sur le temps pour accomplir la tâche de translation. Aucun effet significatif de l'expertise n'est observé. Les comparaisons deux à deux avec corrections de Bonferroni montrent que les translations ont été réalisées plus rapidement (3.37 ± 0.95) avec l'index qu'avec le majeur (4.20 ± 1.01 ; $p<0.001$) et l'annulaire (4.27 ± 1.37 ; $p=0.002$). Aucune différence significative n'est observée entre les deux autres doigts. De plus, les tests ne montrent aucun effet significatif du doigt et de l'expertise sur le temps pour accomplir la tâche de rotation et la tâche de mise à l'échelle pour les deux techniques. Il est à noter que les comparaisons des performances individuelles de chaque doigt entre les deux techniques (index Vs index, par exemple) n'ont montré aucun effet significatif pour aucune des trois tâches.

Evaluation subjective

Le test de Wilcoxon ne montre aucun effet significatif de la technique sur aucun des critères d'évaluation (Tableau 1). De plus, le test de Mann Whitney ne montre aucun effet significatif de l'expertise sur aucun de ces critères.

Concernant le confort d'utilisation des différents doigts pour chaque geste (Figure 9), le test non paramétrique de Friedman montre un effet significatif du doigt utilisé sur le confort perçu du geste de translation ($\chi^2=28.43$, $p<0.001$), sur le confort perçu des mouvements circulaires ($\chi^2=26.95$, $p<0.001$) et sur le confort perçu du geste de pincement ($\chi^2=29.55$, $p<0.001$).

Les comparaisons deux à deux en utilisant le test de Wilcoxon avec correction de Bonferroni montrent que les participants ont jugé l'utilisation de l'index significativement plus confortable que celle du majeur pour le geste de translation ($z=2.94$, $p=0.002$), pour les mouvements circulaires ($z=2.64$, $p=0.008$) et pour le geste de pincement ($z=3.10$, $p=0.001$). De plus, les participants ont jugé l'utilisation de l'index significativement plus confortable que celle de l'annulaire pour le geste de translation ($z=3.73$, $p<0.001$), pour les mouvements circulaires ($z=3.73$, $p<0.001$) et pour le geste de pincement ($z=3.75$, $p<0.001$). Enfin, les participants ont jugé l'utilisation du majeur significativement plus confortable que celle de l'annulaire pour le geste de translation ($z=3.47$, $p=0.001$), pour les mouvements circulaires ($z=3.53$, $p<0.001$) et pour le geste de pincement ($z=3.23$, $p=0.001$). Aucune différence significative n'est observée entre les novices et les experts pour aucun des doigts.

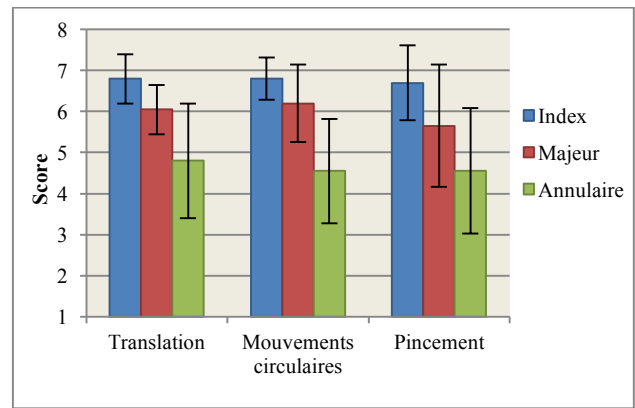


Figure 9 : résultats de l'évaluation subjective du confort de réalisation des différents gestes selon le doigt utilisé.

DISCUSSION

Dans ce papier, nous avons présenté deux techniques d'interaction, Classic3D et Single3D, pour la manipulation avec contraintes des objets 3D sur TabletPCs. Nous avons également présenté une étude expérimentale pour évaluer l'apprenabilité et l'intuitivité des gestes qui leur sont associés ainsi que l'efficacité de ces gestes pour les différentes tâches de manipulation 3D.

Outre la performance objective, nous voulions déterminer comment des utilisateurs novices et experts évalueraient subjectivement les gestes d'interaction choisis lors de la phase de conception et le degré de confort de l'utilisation des différents doigts pour effectuer ces gestes.

Apprenabilité des techniques

Bien que les résultats indiquent que les deux techniques requièrent un nombre de blocs légèrement différent pour être apprises correctement, aucune différence significative pour l'apprenabilité des deux techniques n'a été observée. Puisque la différence observée entre les deux techniques est très réduite, ces résultats suggèrent que les efforts cognitifs nécessaires pour se rappeler des gestes pour réaliser une tâche donnée pourraient être comparables. Cependant, comme la phase d'apprentissage nécessitait la mémorisation de tous les gestes en même temps, il est difficile de vérifier cette hypothèse en se basant uniquement sur ces données. Ainsi, les résultats de l'évaluation subjective nous donnent des indications supplémentaires. En effet, les participants ont convenu qu'aucune différence significative n'existe pour la facilité d'apprentissage des deux techniques avec des scores assez élevés (5.9). Ce résultat suggère que les deux techniques sont assez faciles à apprendre. Ceci laisse penser également que le choix des doigts d'axes et des métaphores d'interaction, combiné avec l'aide visuelle affichée sur l'écran ont positivement impacté la mémorisation des gestes nécessaires pour effectuer les différentes tâches de manipulation. Certains participants ont estimé que la correspondance entre les doigts et les axes principaux était facile à mémoriser ce qu'il leur a aidé à apprendre ces techniques assez rapidement. Enfin, aucune différence significative n'a été observée entre les novices et les experts. Ceci peut être expliqué par le fait que l'utilisation de différents doigts pour l'interaction tactile reste un concept nouveau pour tous ces utilisateurs. Ainsi, malgré une expertise

différente pour la manipulation d'objets 3D, le temps nécessaire à tous les utilisateurs pour mémoriser les gestes associés à ces deux techniques est non significativement différent.

Utilisabilité des technique

L'utilisabilité a été évaluée à travers trois critères ; la facilité d'utilisation, le confort d'utilisation, et l'intuitivité des gestes. Bien que les résultats n'indiquent aucune différence significative entre les deux techniques selon ces trois critères, les discussions avec les participants et les résultats des autres mesures nous ont donné davantage d'indications sur l'évaluation de l'utilisabilité des gestes.

Certains participants ont considéré que les mouvements circulaires avec le doigt étaient une meilleure métaphore pour la rotation des objets. Ils ont également estimé que glisser le doigt dans l'axe perpendiculaire à l'axe de rotation dans Classic3D prêtait parfois à confusion par rapport au geste de translation. D'ailleurs, le mouvement circulaire a été jugé plus confortable à réaliser bien que la différence avec le geste de Classic3D ne soit pas significative. Cependant, ceci n'est pas confirmé par l'analyse des résultats des temps d'achèvement de la tâche de rotation. La rotation avec Single3D a nécessité significativement plus de temps pour être réalisée que la rotation avec Classic3D, aussi bien pour les novices que pour les experts. Ceci peut être expliqué tout d'abord, par le fait que notre algorithme de détection des mouvements circulaires ne peut différencier le geste de dessin d'un cercle de celui de translation du doigt qu'une fois qu'un quart de cercle est tracé par l'utilisateur. Ainsi, les utilisateurs devaient attendre jusqu'à ce que le geste circulaire soit reconnu pour démarrer la rotation. De plus, parce qu'un mouvement circulaire est moins facile à contrôler qu'un mouvement linéaire [19], le rapport Control/Display pour la rotation de l'objet avec un mouvement circulaire a été fixé à une valeur assez élevée. Certains participants se sont plaints que le geste de rotation de Single3D était moins précis que celui de Classic3D. Par conséquent, la diminution du rapport Control/Display pourrait améliorer la performance de Single3D pour la rotation d'objets.

Pour les gestes de changement d'échelle, les résultats indiquent que Single3D a nécessité significativement plus de temps pour réaliser cette tâche, aussi bien pour les novices que pour les experts. Ceci peut être expliqué par le fait qu'un double clic soit nécessaire avant de commencer le mouvement du doigt qui permet le changement d'échelle. Cependant, certains participants ont fait remarquer que l'exécution des mouvements des gestes de pincement avec l'annulaire et le pouce étaient parfois gênants. En effet, ils ont éprouvé des difficultés pour trouver une position confortable de la main pour effectuer ce geste. Ceci est cohérent avec les résultats d'une étude récente [8]. D'ailleurs, ce geste a été jugé moins confortable bien que la différence avec le geste de Single3D ne soit pas significative. Certains autres participants ont relevé le fait que certaines positions de la main les empêchaient de voir une partie de l'écran lorsqu'ils réalisaient ce geste de pincement.

Il n'est pas surprenant de constater que le degré de confort de l'utilisation de l'annulaire soit inférieur à celui de l'index et du majeur. Ceci est encore plus marqué pour les mouvements circulaires (Single3D) et les gestes de pincement (Classic3D). Ceci peut s'expliquer par le fait que les participants ne soient pas habitués à utiliser ce doigt pour interagir sur un écran tactile. Cependant, ceci ne semble pas avoir eu d'influence sur la performance des doigts pour ces tâches. En effet, aucune différence significative n'a été observée entre les doigts pour réaliser ces tâches. Puisque ce doigt est utilisé plus facilement dans d'autres tâches du quotidien (taper sur un clavier, ou encore jouer des accords sur une guitare), nos résultats suggèrent qu'une phase d'apprentissage et d'adaptation plus longue pourrait permettre aux utilisateurs d'avoir plus de confort en utilisant ce doigt.

Différences experts/novices

Malgré la simplicité des tâches de docking utilisées, des différences significatives ont été observées entre les novices et les experts lors de la phase finale pour les tâches de rotation et de changement d'échelle. Ceci peut être expliqué par le fait que les utilisateurs experts soient déjà habitués à réaliser ces tâches dans leur travail. Ainsi, bien que les techniques d'interaction et les gestes utilisés soient nouveaux pour eux, ça ne les a pas empêché d'être plus performants que les novices pour réaliser ces tâches après la phase d'apprentissage. Ceci n'a cependant pas été le cas pour la tâche de translation. Ceci peut être expliqué par le fait que le geste de glisser le doigt pour faire une translation soit un geste intuitif et déjà connu et utilisé par tous les participants puisqu'ils ont tous rapporté une utilisation quotidienne des Smartphones. Ainsi, lors du test final, tous les participants ont été en mesure de réaliser cette tâche relativement rapidement.

Implications pour la conception

Les résultats de notre étude nous permettent de faire quelques choix de conception quant aux gestes à utiliser dans une technique de manipulation avec contraintes sur TabletPC basées sur l'identification des doigts.

Tout d'abord, l'utilisation des doigts d'axes est un choix satisfaisant pour une mémorisation facile des gestes de manipulation. Ceci est soutenu par les résultats des mesures objectives et subjectives de notre étude. Mais une phase d'apprentissage est nécessaire, aussi bien pour des utilisateurs novices que pour des utilisateurs experts, afin de correctement mémoriser les gestes définis.

Ensuite, le geste de translation choisi, basé sur la translation du doigt dans la direction de l'axe de translation semble également satisfaire tous les utilisateurs et peut donc être réutilisé directement dans une technique de manipulation 3D, basée sur l'identification des doigts.

Pour le geste de rotation, les mouvements circulaires semblent être plus intuitifs et plus facile à utiliser pour les utilisateurs. Cependant, certains réglages sont encore nécessaires afin d'améliorer leur performance et d'augmenter leur précision pour une utilisation plus optimale dans une technique de manipulation 3D basée sur l'identification des doigts.

Enfin, pour les gestes de changement d'échelle, les résultats sont un peu plus mitigés. D'un côté, le geste de pincement de Classic3D semble être moins confortable surtout en utilisant le pouce et l'annulaire. D'un autre côté, le double-clic nécessaire dans Single3D impacte négativement la performance des utilisateurs. Notre choix pour cette tâche se porte sur le geste de pincement qui nous semble plus intuitif puisqu'il se base sur une métaphore déjà connue par les utilisateurs. De plus, il a moins d'impact sur la performance de la tâche. Comme indiqué plus haut, nous faisons l'hypothèse qu'une phase d'apprentissage et d'adaptation plus longue permettrait aux utilisateurs de se sentir plus confortables en utilisant l'annulaire. Quelques réglages supplémentaires seraient également nécessaires afin d'optimiser la réalisation du geste et diminuer les effets d'occultation causés par certaines position de la MD pendant la manipulation. Cependant, d'autres études seront nécessaires afin de valider ce choix.

LIMITATIONS ET TRAVAUX FUTURS

En partant du constat que les techniques de manipulation d'objets avec contraintes, utilisées dans les applications de modélisation 3D, ne sont actuellement pas adaptées pour une utilisation optimale sur des dispositifs mobiles, nous avons présenté deux techniques de manipulation uni-manuelles pour TabletPC. En suivant un processus de conception itératif, une analyse de l'état de l'art et la participation d'utilisateurs experts nous ont permis d'identifier les tâches de manipulation à prendre en compte ainsi que les exigences que nos techniques doivent respecter.

Les techniques proposées nécessitent uniquement l'utilisation de la MD pour interagir avec l'environnement. Pour ce faire, elles se basent sur des gestes d'accords et sur l'identification des doigts afin d'étendre l'espace de conception de gestes tactiles et pouvoir ainsi contrôler les 9 DdL et les différentes contraintes de manipulations associées à ce type d'applications.

Les résultats de notre première évaluation de ces techniques montrent que leurs gestes sont relativement faciles à apprendre. Les résultats nous ont permis également de faire un certain nombre de choix quant aux gestes à utiliser pour chacune des tâches de manipulation.

Bien que les résultats suggèrent que les aides visuelles affichées permettent d'améliorer l'apprenabilité des techniques, ce facteur n'a pas été séparément et explicitement évalué. Il est donc nécessaire de faire des investigations plus profondes afin de déterminer son effet sur les performances des utilisateurs.

Notre évaluation était basée sur une tâche de docking 3D simplifiée, nécessitant d'effectuer une seule manipulation basique avec une contrainte d'axe à la fois. Afin de mieux juger de l'efficacité de nos techniques, il sera nécessaire dans le futur de les évaluer avec des tâches plus complexes dans lesquelles différentes tâches de manipulation basiques ainsi que des tâches de manipulation avec contraintes de plan et uniformes pourraient être combinées.

Alors que nos deux techniques ont été conçues pour fonctionner correctement indépendamment de la perspective choisie par l'utilisateur, nous n'avons proposé aucune technique de changement du point de vue dans ce travail. Il sera donc intéressant dans le futur d'associer nos techniques de manipulation à des techniques de navigation tactiles [28] ou encore à des techniques de changement automatique du point de vue de l'utilisateur selon le contexte d'utilisation [21]. Ceci permettra d'évaluer nos techniques dans des conditions plus proches d'un contexte d'utilisation réel.

Nos deux techniques ont été comparées entre elles afin de faire quelques choix de conception. Cependant, il sera nécessaire dans le futur de les comparer avec d'autres techniques de manipulation avec contraintes pour TabletPC. Une nouvelle technique basée sur nos choix de conception sera proposée et pourra être comparée à d'autres techniques de l'état de l'art. Par exemple, elle pourra être comparée à la technique de manipulation bi-manuelle récente basée sur l'utilisation d'un menu circulaire pour contrôler les contraintes [28]. En effet, cette technique a déjà montré sa supériorité par rapport à d'autres techniques de l'état de l'art et servira donc comme référence.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier toutes les personnes ayant participé à l'étude expérimentale.

BIBLIOGRAPHIE

1. Oscar Kin-Chung Au, Chiew-Lan Tai, and Hongbo Fu. 2012. Multitouch gestures for constrained transformation of 3d objects. In *Computer Graphics Forum*, Vol. 31. Wiley Online Library, 651–660.
2. Xiang'Anthony' Chen, Tovi Grossman, Daniel J Wigdor, and George Fitzmaurice. 2014. Duet: exploring joint interactions on a smart phone and a smart watch. In *Proceedings of the CHI'14 conference*. ACM, 159–168.
3. Aurélie Cohé, Fabrice Dècle, and Martin Hachet. 2011. tBox: a 3d transformation widget designed for touch-screens. In *Proceedings of the CHI'11 conference*. ACM, 3005–3008.
4. Ashley Colley and Jonna Häkkinä. 2014. Exploring finger specific touch screen interaction for mobile phone user interfaces. In *Proceedings of the 26th Australian CHI Conference on Designing Futures*. ACM, 539–548.
5. Emilien Ghomi, Stéphane Huot, Olivier Bau, Michel Beaudouin-Lafon, and Wendy E Mackay. 2013. Arpège: Learning multitouch chord gestures vocabularies. In *Proceedings of the ITS'2013 conference*. ACM, 209–218.
6. Alix Goguey, Géry Casiez, Thomas Pietrzak, Daniel Vogel, and Nicolas Roussel. 2014. Adoiraccourcix: Sélection de Commandes sur Ecrans Tactiles Multi-Points par Identification des Doigts. In *the proceedings of IHM'14*, ACM, 28–37.
7. Alix Goguey, Géry Casiez, Daniel Vogel, Fanny Chevalier, Thomas Pietrzak, and Nicolas Roussel. 2014. A three-step interaction pattern for improving discoverability in finger identification techniques. In *the proceedings of the UIST'14 conference*. ACM, 33–34.
8. Alix Goguey, Mathieu Nancel, Géry Casiez, Daniel Vogel. (2016) The Performance and Preference of Different Fingers and Chords for Pointing, Dragging, and Object Transformation. In *Proceedings of the CHI '16*, ACM, 4250–4261.
9. Martin Hachet, Benoit Bossavit, Aurélie Cohé, and Jean-Baptiste de la Rivière. 2011. Toucheo: multitouch and stereo combined in a seamless workspace. In *Proceedings of the 24th annual ACM*

- symposium on User interface software and tech of the UIST'11 conference. ACM, 587–592.
10. Mark Hancock, Thomas ten Cate, and Sheelagh Carpendale. 2009. Sticky tools: full 6DOF force-based interaction for multi-touch tables. In Proceedings of ITS '09. ACM, 133-140.
 11. Chris Harrison, Julia Schwarz, and Scott E Hudson. 2011. TapSense: enhancing finger interaction on touch surfaces. In Proceedings of the UIST'11 conference. ACM, 627–636.
 12. Christian Holz and Patrick Baudisch. 2010. The generalized perceived input point model and how to double touch accuracy by extracting fingerprints. In Proceedings of the CHI'10 conference. ACM, 581–590.
 13. Kenrick Kin, Tom Miller, Björn Bollensdorff, Tony DeRose, Björn Hartmann, and Maneesh Agrawala. 2011. Eden: a professional multitouch tool for constructing virtual organic environments. In Proceedings of the CHI'11 conference. ACM, 1343–1352.
 14. G Julian Lepinski, Tovi Grossman, and George Fitzmaurice. 2010. The design and evaluation of multitouch marking menus. In Proceedings of the CHI'10 conference. ACM, 2233–2242.
 15. Jingbo Liu, Oscar Kin-Chung Au, Hongbo Fu, and Chiew-Lan Tai. 2012. Two-Finger Gestures for 6DOF Manipulation of 3D Objects. In Computer Graphics Forum, Vol. 31. Wiley Online Library, 2047–2055.
 16. Anthony Martinet, Géry Casiez, G. & Laurent Grisoni. (2010). The Effect of DOF Separation in 3D Manipulation Tasks with Multi-touch Displays. In Proceedings of VRST'10. ACM, 111-118.
 17. Nicolai Marquardt, Johannes Kiemer, David Ledo, Sebastian Boring, and Saul Greenberg. 2011. Designing user-, hand-, and handpart-aware tabletop interactions with the TouchID toolkit. In Proceedings of the ACM ITS'11 conference. ACM, 21–30.
 18. Daniel Mendes. 2011. LTouchIt: LEGO Modeling on Multi-Touch Surfaces. Ph.D. Dissertation., Instituto Superior Técnico.
 19. Mathieu Nancel, Julie Wagner, Emmanuel Pietriga, Olivier Chapuis, and Wendy Mackay. 2011. Mid-air pan-and-zoom on wall-sized displays. In Proceedings of the CHI'11 conference. ACM, 177–186.
 20. Halla Olafsdottir and Caroline Appert. 2014. Multi-touch gestures for discrete and continuous control. In Proceedings of the 2014 International Working Conference on Advanced Visual Interfaces. ACM, 177–184.
 21. Michael Ortega. 2013. 3D object position using automatic viewpoint transitions. In Proceedings of the CHI'13 conference. ACM, 193-196.
 22. Jason L. Reisman, Philip L. Davidson, and Jefferson Y. Han. 2009. A screen-space formulation for 2D and 3D direct manipulation. In Proceedings of UIST'09. ACM, 69-78.
 23. Élisabeth Rousset, François Bérard, and Michaël Ortega. 2014. Two-finger 3d rotations for novice users: surjective and integral interactions. In Proceedings of the 2014 International Working Conference on Advanced Visual Interfaces. ACM, 217–224.
 24. Ryan Schmidt, Karan Singh, and Ravin Balakrishnan. 2008. Sketching and composing widgets for 3d manipulation. In Computer Graphics Forum, Vol. 27. Wiley Online Library, 301–310.
 25. Atsushi Sugiura and Yoshiyuki Koseki. 1998. A user interface using fingerprint recognition: holding commands and data objects on fingers. In Proceedings of the UIST'98 conference. ACM, 71–79.
 26. Daniel Vogel, Matthew Cudmore, Géry Casiez, Ravin Balakrishnan, and Liam Keliher. 2009. Hand occlusion with tablet-sized direct pen input. In Proceedings of the CHI'09 conference. ACM, 557–566.
 27. Julie Wagner, Eric Lecolinet, and Ted Selker. 2014. Multi-finger chords for hand-held tablets: Recognizable and memorable. In Proceedings of the CHI '14 conference. ACM, 2883–2892.
 28. Siju Wu, Amine Chellali, Samir Otmane, and Guillaume Moreau. 2015. TouchSketch: a touch-based interface for 3D object manipulation and editing. In Proceedings of the VRST'15 conference. ACM, 59–68.