



Étude de l'influence de la taille des sphères virtuelles de contrôle sur les rotations 3D

Axel Antoine, Sylvain Malacria, Daniel Vogel, Géry Casiez

► To cite this version:

Axel Antoine, Sylvain Malacria, Daniel Vogel, Géry Casiez. Étude de l'influence de la taille des sphères virtuelles de contrôle sur les rotations 3D. 33e conférence internationale francophone sur l'Interaction Humain-Machine (IHM'22), AFIHM, Apr 2022, Namur, Belgique. 10.1145/3500866.3516370 . hal-03847547

HAL Id: hal-03847547

<https://hal.science/hal-03847547>

Submitted on 17 Nov 2022

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

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

Étude de l'influence de la taille des sphères virtuelles de contrôle sur les rotations 3D

Studying the influence of the size of a virtual trackball on 3D rotations

Axel Antoine

Univ. Lille, CNRS, Inria, Centrale Lille, UMR 9189 CRISTAL
Lille, France
axel.antoine@univ-lille.fr

Daniel Vogel

Cheriton School of Computer Science, University of
Waterloo
Waterloo, Canada
dvogel@uwaterloo.ca

Sylvain Malacria

Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, UMR 9189 CRISTAL
Lille, France
sylvain.malacria@inria.fr

Géry Casiez*

Univ. Lille, CNRS, Inria, Centrale Lille, UMR 9189 CRISTAL
Lille, France
gergy.casiez@univ-lille.fr

ABSTRACT

Abstract. Rotating 3D objects on desktop computers with a mouse or a trackpad is a notoriously difficult task, especially for novice users. Techniques relying on a “virtual trackball” have been proposed in the literature and these continue to be used in most 3D software. While several studies were conducted to compare the performance of these techniques, none was focused on the intrinsic parameter of the radius of the virtual control sphere of the trackball. We present the results of a controlled study to investigate the influence of the radius of the control sphere on the performance and behavior of users in a 3D docking task. Surprisingly, the results do not suggest a significant effect of the size of the virtual control sphere on user performance. However, an analysis of user behavior suggests that it influences the user’s strategy for how they interact with the virtual trackball.

CCS CONCEPTS

• **Human-centered computing** → **Interaction techniques.**

KEYWORDS

Interaction technique, 3D rotations, virtual trackball

RÉSUMÉ

Resumé. La rotation d’objets 3D sur ordinateurs de bureau avec une souris ou un pavé tactile est une tâche connue pour sa difficulté, en particulier pour les utilisateurs débutants. Différentes techniques de sphères virtuelles ont été proposées dans la littérature pour faciliter cette tâche et ces techniques continuent d’être utilisées dans la plupart des logiciels 3D. Différentes études ont été réalisées dans la littérature afin de comparer la performance de ces techniques. Cependant aucune ne s’est intéressée à un paramètre intrinsèque

* Also with Institut Universitaire de France.

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

© 2022 Copyright held by the owner/author(s). Publication rights licensed to ACM. This is the author’s version of the work. The definitive version of record was published in IHM ’22: Proceedings of the 33rd Conference on l’Interaction Humain-Machine. ACM ISBN 978-1-4503-9189-4/22/04.
<https://doi.org/10.1145/3500866.3516370>

de ces techniques qui est le rayon de la sphère virtuelle de contrôle. Nous présentons dans cet article les résultats d’une étude contrôlée dans le but d’étudier l’influence du rayon de la sphère virtuelle sur les performances et le comportement des utilisateurs dans une tâche d’ancrage 3D. Les résultats de cette étude n’ont pas montré d’effet significatif de la taille de sphère virtuelle de contrôle sur les performances des utilisateurs. Cependant une analyse du comportement des utilisateurs montre que la taille de la sphère de contrôle peut influencer la stratégie des participants.

MOTS-CLÉS

Techniques d’interaction, rotations 3D, sphère virtuelle de contrôle

ACM Reference Format:

Axel Antoine, Sylvain Malacria, Daniel Vogel, and Géry Casiez. 2022. Étude de l’influence de la taille des sphères virtuelles de contrôle sur les rotations 3D. In *IHM ’22: Proceedings of the 33rd Conference on l’Interaction Humain-Machine (IHM ’22)*, April 5–8, 2022, Namur, Belgium. ACM, New York, NY, USA, 10 pages. <https://doi.org/10.1145/3500866.3516370>

1 INTRODUCTION

La manipulation d’objets est une tâche fondamentale dans les environnements 3D qui peut-être décomposée en deux sous-tâches : le positionnement et la rotation. Globalement, la manipulation directe d’objets dans l’espace 3D est reconnue comme difficile à effectuer à l’aide des dispositifs d’entrée standards d’ordinateurs de bureau tels qu’une souris ou touchpad [1, 10], probablement car ces dispositifs d’entrée ont été initialement conçus pour contrôler un curseur dans un espace à seulement deux dimensions.

La manipulation d’objets 3D sur ordinateurs de bureau est donc une tâche difficile qui nécessite d’adapter l’interaction utilisateur. L’approche la plus simple est probablement via la description de ses trois angles d’Euler (la précession, la nutation et la rotation propre). Ces valeurs peuvent généralement être définies directement dans les logiciels de modélisation 3D via une fenêtre de propriétés (par exemple, Blender permet de définir la rotation d’un objet selon les axes X, Y et Z en degrés ou radians). Cette technique peut s’avérer efficace quand la valeur à définir est connue à l’avance, ou quand la rotation n’est nécessaire que suivant un seul axe, mais elle montre

ses limites dès qu'il s'agit de définir des degrés de rotation plus complexes, c'est-à-dire selon deux ou trois axes simultanément.

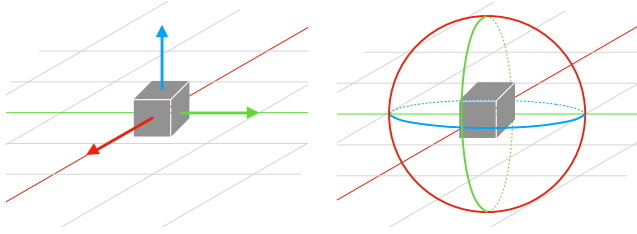


FIGURE 1: Illustration des widgets spécifiques pour manipuler la position et la rotation d'un objet dans Blender. (a) Le manipulateur 3D à 3-axes permet de modifier la position de l'objet selon un seul axe en cliquant sur la flèche correspondante. (b) Le manipulateur 3D à 3-cercles permet de modifier la rotation de l'objet selon un seul axe en cliquant sur le cercle correspondant.

Une autre approche consiste à utiliser un widget spécifique, un manipulateur 3-axes, visible dans la scène 3D. Ce widget, développé spécifiquement pour les interactions de bureau (à base de pointeur) est globalement disponible dans tous les logiciels de modélisation 3D (*p.ex.* Blender, Unity, Maya, etc.) et est positionné directement sur l'objet sélectionné. Cet objet existe en deux versions. La première version est utilisée pour contrôler la position de l'objet à l'aide de trois flèches, une pour chaque axe de translation (X, Y et Z), avec lesquels l'utilisateur peut interagir via un clic et un déplacement du pointeur souris pour modifier directement la position de l'objet [4] (*cf.* figure 1a). La deuxième version, qui est utilisée pour modifier l'orientation de l'objet, est quant à elle basée sur la technique *Overlapping slider* de Chen *et al.* [5] et appelée *Discrete Sliders* par Rybicki *et al.* [13]. Elle consiste à afficher trois cercles formant une sphère centrée sur l'objet représentant les 3 axes de rotation possibles (*cf.* figure 1b). Cliquer et déplacer le curseur de souris sur l'un de ces trois cercles permet de contrôler directement la rotation de l'objet sélectionné selon l'axe de rotation choisi dans la scène. Bien qu'apportant un contrôle direct et précis de la rotation de l'objet dans la scène, cette technique se limite toujours au contrôle d'un seul axe de rotation à la fois.

Afin de faciliter la manipulation des objets 3D – tâche jugée difficile pour des débutants [1, 10] – et pouvoir contrôler directement et simultanément plusieurs axes de rotation, des techniques spécifiques basées sur une sphère virtuelle (en anglais *virtual trackball*) ont été proposées dans la littérature [3, 5, 14]. Ces techniques associent les deux degrés de liberté du curseur souris aux trois degrés de liberté de rotation, en permettant de contrôler deux de ces trois axes de rotation de l'objet d'un seul mouvement. Le principe est de projeter la position du curseur de souris sur une sphère englobante de l'objet manipulé. Le déplacement du curseur de souris implique un delta entre les positions projetées sur la sphère, delta qui forme alors l'angle de la rotation à effectuer.

La sphère d'une *trackball* détermine donc non seulement la zone d'interaction disponible pour orienter l'objet, mais aussi la vitesse et la précision de la rotation de l'objet 3D. En effet, plus le diamètre de la sphère est petit, plus le déplacement de curseur nécessaire

pour effectuer une rotation d'un angle donné sera petit. Par conséquent, une sphère de petite taille peut réduire les déplacements de pointeur nécessaires car les rotations sont amplifiées par rapport à des sphères de plus grand diamètre, mais l'utilisateur pourrait manquer de précision. À l'inverse, une sphère de grande taille risque d'augmenter le nombre de débrayages nécessaires pour réaliser une rotation de grande amplitude, si l'utilisateur souhaite conserver le curseur dans une certaine zone de l'écran ou minimiser les déplacements physiques du dispositif de pointage.

Dans cet article, nous décrivons une étude menée en laboratoire dans le but de comprendre les facteurs impliqués lors de l'utilisation d'une *trackball* et l'impact qu'ils peuvent avoir sur le contrôle de rotations et le comportement de l'utilisateur dans une tâche de rotation 3D. En particulier, nous émettons l'hypothèse que la taille de sphère virtuelle utilisée par une *trackball* a un impact direct sur les performances de l'utilisateur. Les objectifs principaux de cette étude sont d'identifier et mesurer l'impact sur les performances et le comportement des utilisateurs de la taille de la sphère, et d'ouvrir la réflexion sur comment les techniques de *trackball* pourraient être adaptées pour ne plus dépendre de leur taille.

2 ÉTAT DE L'ART SUR LES TECHNIQUES DE ROTATION 3D VIA DES SPHÈRES VIRTUELLES

Trois approches différentes de techniques de rotation 3D via une sphère virtuelle sont majoritairement mentionnées dans la littérature : *Two-axis Valuator* [5], la *Trackball* [5] et l'*Arcball* [3, 14]. La différence entre ces techniques repose sur le fait qu'elles modifient le comportement de la rotation selon que l'utilisateur clique dans ou en dehors de la sphère virtuelle.

2.1 Interaction sur la sphère virtuelle

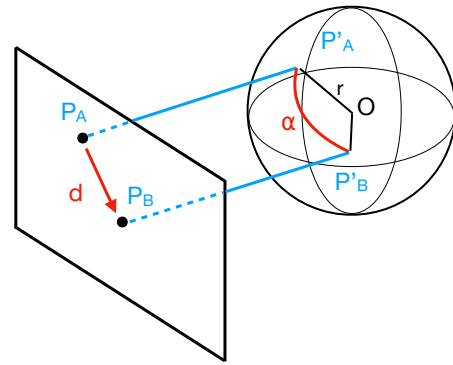


FIGURE 2: (a) L'angle de rotation α est calculé entre les points P'_A et P'_B , projections orthographiques sur la sphère des points P_A et P_B .

La technique *Two-axis Valuator*, est une version initiale introduite par Chen, où un déplacement du curseur de souris sur la sphère virtuelle se traduit par une rotation de l'objet selon l'axe X et Y proportionnellement au déplacement du curseur selon les axes X et Y [5]. Les techniques *Trackball* [5] et *Arcball* [3, 14] elles se basent sur un même principe qui est d'associer aux coordonnées

en deux dimensions sur le plan image du pointeur de la souris (point P), des coordonnées en trois dimensions dans l'espace 3D (point P'), tel que P' soit la projection orthographique du point P sur la sphère virtuelle de rayon r et de centre O . La rotation de l'objet 3D induite par le déplacement de la souris d'un point P_A vers un point P_B dans le plan image est alors calculée comme la plus petite rotation possible de la sphère du point P'_A vers le point P'_B dans l'espace 3D (cf. figure 2). La *Trackball* proposée par Chen décrit la rotation à effectuer avec des angles d'Euler [5], et est donc soumise à une hystérésis, c'est-à-dire, que le chemin inverse d'un mouvement de souris ne remet pas l'objet manipulé à sa rotation initiale. Les versions de l'*Arcball* proposées par Shoemake et Bell résolvent le problème d'hystérésis en décrivant les rotations à l'aide de quaternions [3, 14], définis par la rotation du vecteur unitaire $\overrightarrow{OP'_A}$ au vecteur $\overrightarrow{OP'_B}$ (cf. figure 2). Nous nous référons à l'article proposé par Henriksen pour une description mathématique approfondie de ces trois techniques de rotation [7].

Généralement, ces techniques utilisent une projection orthographique qui rend la moitié de la sphère virtuelle « visible » par projection, et permet ainsi une bijection parfaite entre les points 2D projetés et les points 3D sur la demi-sphère. Dans une projection perspective, seule une partie de la demi-sphère virtuelle est disponible pour la projection, à cause de la focale de la caméra, diminuant ainsi la surface d'interaction. La zone d'interaction et la surface de la sphère visible ont un impact sur le comportement de la rotation. En effet, si on reprend le schéma illustré figure 2 et pour deux points espacés à l'écran d'une distance donnée, plus le curseur de souris est proche du bord de la sphère, plus la longueur de l'arc défini par les deux projections successives des points sur la sphère virtuelle sera importante. Si la longueur d'arc augmente, alors la variation de l'angle de rotation augmente aussi et peut donner un certain effet « d'accélération » lorsque le curseur est proche du bord de la sphère.

2.2 Interaction en dehors de la sphère virtuelle

Les techniques *Two-axis Valuator*, *Trackball* et *Arcball* permettent une rotation selon l'axe Z (l'axe passant par le centre de la sphère et le point de vue) lorsque le curseur de souris se rapproche du bord de la sphère dans le plan image. Cette manipulation est délicate parce qu'il est difficile de suivre parfaitement la circonférence de la sphère, mais surtout parce que l'utilisateur contrôle alors plusieurs axes de rotation simultanément. Pour faciliter la rotation selon l'axe Z, ces techniques utilisent l'espace extérieur à la sphère. Ainsi, tout point situé en dehors de la sphère est projeté vers le point le plus proche de la circonférence [5, 14] permettant ainsi de contrôler uniquement la rotation selon l'axe Z.

Un autre problème dans les versions de la *Trackball* et de l'*Arcball* proposées par Chen [5] et Shoemake [14] est la discontinuité. En effet, si le curseur passe de l'intérieur de la sphère à l'extérieur (ou l'inverse), l'angle de rotation selon l'axe X et/ou Y passe d'une certaine valeur non nulle à une valeur nulle puisque la projection du point de la souris n'est plus sur la sphère, ce qui provoque une « discontinuité » dans la rotation [3, 7]. Pour supprimer cet effet, Bell a proposé de ne plus projeter le curseur de souris sur une sphère, mais sur une surface combinant une sphère et une hyperbole [3]. La surface composée permet alors une variation

continue de l'angle de rotation entre un curseur de souris passant de l'intérieur à l'extérieur de la sphère (ou l'inverse). Néanmoins, cette solution ne permet plus de contrôler uniquement la rotation de l'objet selon l'axe Z quand le curseur est en dehors de la sphère.

Certains logiciels 3D utilisent une tout autre approche dans le comportement de la rotation lors d'une interaction en dehors de la sphère. Par exemple, Blender¹ et Unity² permettent à l'utilisateur d'orienter un objet selon l'axe défini entre le centre de la sphère et le curseur de souris. Plus le curseur s'éloigne du centre de la sphère, plus l'objet tourne selon cet axe, permettant même d'effectuer plusieurs rotations complètes (supérieures à 360°) sans débrayages supplémentaires.

2.3 Comparaisons des sphères virtuelles

Plusieurs expérimentations ont été proposées dans la littérature pour comparer les différentes techniques de rotation 3D sur les performances des participants et leurs retours subjectifs dans des tâches d'orientation [2, 5, 8, 9, 13, 15]. Ces tâches affichent généralement deux objets 3D, un objet cible et un objet à manipuler. L'objectif est de faire correspondre l'orientation de l'objet à orienter avec celle de l'objet cible aussi précisément que possible en tournant l'objet 3D manipulé selon les trois axes de rotation, l'orientation de l'objet cible étant souvent définie de manière aléatoire [6, 15]. Chen n'a pas trouvé de différence significative entre les techniques *Two-Axis-Valuator* et *Trackball*, que ce soit pour le temps de réalisation ou la précision [5], de même qu'Hinckley *et al.* [8] entre la *Trackball* de Chen [5] et l'*Arcball* de Shoemake [14], ou que Zhao *et al.* [15] entre les techniques de Shoemake et Bell [3, 14]. Blade *et al.* [2] ont montré que les utilisateurs étaient statistiquement plus rapides et ont préféré utiliser les techniques *Two-Axis-Valuator* [5] et l'*Arcball* de Shoemake [14] que la *Trackball* [5] ou l'*Arcball* de Bell [3]. Plus récemment, Rybicki *et al.* [13] ont montré que leurs participants étaient plus précis en utilisant le manipulateur 3-axes (*Discrete Sliders* pour une rotation simple selon un seul axe de rotation). Ils ont montré aussi que les participants étaient significativement plus rapides pour effectuer une tâche de rotation complexe (plusieurs axes de rotation) avec les techniques basées sur une sphère virtuelle (*Arcball* et *Two-Axis-Valuator*). Encore une fois, aucune différence significative entre les deux techniques de sphères virtuelles n'a été trouvée.

Enfin, une notion peu abordée dans les articles est celle de fonction de transfert de rotation. Une telle fonction permet d'appliquer un gain (constant, linéaire, etc) entre l'amplitude de la rotation effectuée en entrée sur la sphère de contrôle et celle appliquée à l'objet 3D contrôlé. Poupyrev *et al.* ont proposé une modélisation du calcul du gain à appliquer sur un quaternion, permettant d'en changer son amplitude [11, 12] en utilisant la fonction *puissance* sans modifier l'orientation. Malheureusement, leur publication ne propose pas de comparaison de différentes fonctions.

¹Blender – <https://www.blender.org>

²Unity – <https://unity.com/fr>

3 ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE LA TAILLE DE LA SPHÈRE DE CONTRÔLE

Les diverses expérimentations proposées dans la littérature se sont principalement intéressées à la comparaison de différentes techniques de rotation 3D sur les performances des utilisateurs. Cependant, d'autres facteurs, qui n'ont pas été étudiés, peuvent aussi influencer les performances et le comportement de l'utilisateur, notamment la taille de la sphère de contrôle. La section suivante décrit donc l'étude que nous avons menée dans le but de déterminer l'influence de la taille de la sphère virtuelle de contrôle sur les performances et le comportement des utilisateurs lors d'une tâche de rotation 3D. Notre première hypothèse H1 est que la taille de la sphère virtuelle de contrôle a une influence directe sur les performances des utilisateurs. Notamment, sachant qu'une petite taille de sphère de contrôle devrait permettre des variations d'angles rapides avec un manque de précision, et qu'une grande taille de sphère devrait permettre une plus grande précision, mais une variation d'angle plus lente, alors, étant donné trois tailles de sphères, une petite, une moyenne, une grande, le temps de réalisation des tâches devrait être inférieur pour une taille de sphère moyenne vis-à-vis des petites et grandes tailles. Notre deuxième hypothèse H2, est que la taille de la sphère a une influence sur le comportement des utilisateurs lors d'une tâche de rotation. En effet, la taille de la sphère définit la variation d'angle de rotation, mais aussi la surface de la zone d'interaction affichée à l'écran. Nous supposons alors que plus la surface d'interaction est grande, plus les gestes des utilisateurs devraient être grands pour compenser la perte de vitesse de rotation.

3.1 Méthode d'expérimentation et dispositif

Dans le but de faire passer l'expérience à un maximum d'utilisateurs malgré la situation sanitaire liée à la pandémie du COVID-19, nous avons développé une application en ligne, en JavaScript, basée sur la librairie 3D Three.js³. L'application communique avec un serveur durant chaque expérience, ce qui permet de sauvegarder à intervalles réguliers les données collectées des participants.

L'expérience s'est déroulée à distance et donc, sans contrôle direct sur les dispositifs utilisés par les participants. La résolution, la taille et la définition des écrans utilisés peuvent alors varier. Néanmoins, afin que la taille physique (*c.-à-d.* affichée à l'écran) de la sphère virtuelle de contrôle soit identique pour chacun des participants lors de l'expérience, chaque participant devait calibrer l'application en faisant correspondre la taille d'un rectangle affiché à l'écran avec la taille d'une carte bancaire. Sachant que la taille d'une carte bancaire est fixe et connue, il est alors possible de déduire la densité de pixels de l'écran permettant ainsi d'uniformiser les tailles de sphères virtuelles entre les différents dispositifs. Néanmoins, puisque nous testons des tailles de sphères allant jusqu'à 200 mm, nous n'avons recruté que des participants disposant d'un écran d'au moins 15 pouces de diagonale afin que l'utilisateur puisse interagir avec l'intégralité de la sphère.

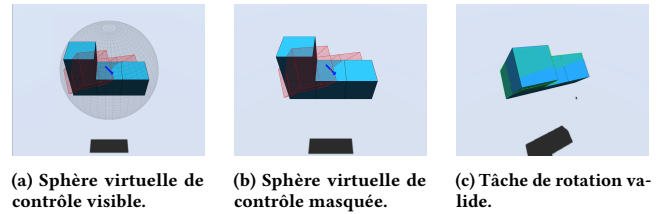


FIGURE 3: La tâche de rotation consistait à modifier l'orientation de l'objet bleu afin qu'elle corresponde à celle de l'objet cible en rouge transparent. La sphère virtuelle de contrôle (a) n'était pas visible pour l'utilisateur (b). L'objet cible passe en vert quand l'orientation de l'objet est sous le seuil de tolérance de la tâche (c). Enfin, une flèche bleue indiquait la direction de l'axe de rotation optimal pour effectuer la tâche (a) et (b).

3.2 Procédure d'expérimentation

Une fois connecté sur le site de l'expérience, une page d'accueil affichait les instructions aux participants qui indiquaient de réaliser une séquence de rotations 3D le plus rapidement possible. La tâche de rotation demandée était une tâche dite d'« ancrage » (*cf.* figure 3b), dont l'objectif est de faire correspondre l'orientation d'un objet manipulé avec celle d'un objet cible.

Dans notre cas, l'objet à manipuler est affiché en bleu et sans transparence dans la scène 3D, l'objet cible est quant à lui affiché en rouge et avec une certaine transparence afin de ne pas masquer l'objet manipulé (*cf.* figure 3b). Un retour visuel est donné à l'utilisateur quand la tâche est valide, c'est-à-dire, quand le seuil de tolérance est atteint, l'objet cible passe alors de couleur rouge à verte, et inversement si la tâche redevient invalide (*cf.* figure 3c). Chaque tâche de rotation est validée lorsque l'utilisateur relâche le bouton de la souris et que la différence d'orientation entre l'objet manipulé et l'objet cible (*c.-à-d.* la valeur de l'angle de la plus petite rotation à effectuer pour passer de l'objet manipulé à l'objet cible) est inférieure à un certain seuil de tolérance prédéfini en degrés (et donc que l'objet cible est affiché en vert). Une animation affichée avec les instructions permettait de visualiser la tâche à effectuer avant de commencer l'expérimentation. Après avoir lu les instructions de la tâche demandée, chaque participant a rempli un formulaire demandant son âge, son genre, le dispositif utilisé (souris ou pavé tactile) et enfin, s'il était familier avec les logiciels de modélisation 3D (*p.ex.* Blender, Maya, Unity, etc.).

La technique de rotation que nous avons utilisée est la technique proposée par Shoemake [14]. Néanmoins, nous nous intéressons dans cette étude principalement à l'influence de la taille de la sphère lorsque l'utilisateur interagit avec celle-ci. Par conséquent, contrairement à l'expérience conduite par Zhao *et al.* [15], nos tâches de rotation présentées aux participants ne nécessitaient pas de rotation selon l'axe Z pour être achevées. De ce fait, nous avons modifié la technique de rotation proposée par Shoemake en désactivant toute interaction en dehors de la sphère, et donc les rotations directes selon l'axe Z. Enfin, nous avons choisi de n'afficher ni sphère virtuelle de contrôle, ni les indicateurs visuels classiques pour décrire l'orientation d'un objet 3D tels que les principaux axes de rotation [15]. En effet, d'une part, la taille de la sphère virtuelle est un des facteurs que nous étudions et, d'autre part, les logiciels actuels qui

³Three.js – <https://threejs.org>

proposent un contrôle de rotation via une sphère virtuelle n'affichent pas cette sphère et ne délimitent donc pas visuellement la surface d'interaction disponible pour l'utilisateur.

Cependant, puisque nous nous intéressons uniquement aux performances et au comportement des participants lors d'une tâche de rotation, et en particulier à leurs performances d'un point de vue moteur, nous avons rajouté une flèche indiquant la direction optimale de la rotation à effectuer pour réaliser la tâche. Cette flèche aide les participants à savoir quel mouvement effectuer avec le curseur pour orienter l'objet, diminue la charge mentale requise et permet aux participants de se concentrer sur la charge motrice (voir la flèche bleue dans la figure 3b). La flèche, de taille fixe, est initialement visible au début de chaque tâche et se masque progressivement dès que le participant clique sur la sphère. Elle redevient visible dès que l'utilisateur relâche le bouton de la souris. Si la tâche n'est pas terminée en un seul mouvement de souris, la flèche est mise à jour et indique la nouvelle direction optimale à suivre pour réaliser la tâche.

3.3 Plan expérimental

L'expérience a suivi un protocole expérimental $4 \times 2 \times 2 \times 3 \times 4$ de type intra-sujets, composé des facteurs et niveaux suivants : 4 *tailles* de la sphère virtuelle de contrôle (50, 100, 150 et 200 mm), 2 *amplitudes* de la rotation à effectuer (35° et 70°), 2 *tolérances* de l'orientation finale (6° et 3°) et 3 *blocs* composés chacun de 4 *répétitions*. Chaque répétition nécessitait une rotation différente selon les axes X et/ou Y uniquement. Huit directions de rotation ont été prédéfinies et présentées dans l'ordre cyclique suivant : *Ouest, Est, Sud-Ouest, Nord-Est, Sud, Nord, Sud-Est* et *Nord-Ouest*, et ainsi de suite. De ce fait, chaque direction d'une tâche était diamétralement opposée à celle de la précédente. L'ordre des tailles de sphères virtuelles a été contrebalancé entre les participants. Nous avons choisi pour chaque taille de sphère virtuelle que les 4 combinaisons des facteurs *amplitude* et *tolérance* soient ordonnées de la plus facile (petite amplitude et grande tolérance) à la plus difficile (grande amplitude et petite tolérance) pour chaque participant. Les deux autres conditions intermédiaires ont été choisies de manière arbitraire car nous ne savions pas si augmenter l'amplitude rend la tâche plus difficile que réduire la tolérance. L'ensemble des facteurs donne ainsi un protocole expérimental de $4 \times 2 \times 2 \times 3 \times 4 = 192$ tâches de rotation par participant.

Entre chaque taille de sphère virtuelle, les participants devaient remplir un questionnaire leur demandant leur degré d'accord avec les trois affirmations suivantes : « *J'ai été rapide pour accomplir la tâche demandée* », « *J'ai été précis lors de la réalisation de la tâche demandée* » et « *J'ai trouvé la tâche demandée fatigante* ». La réponse à chaque question devait être choisie sur une échelle de Likert à 7 niveaux de « *Pas du tout d'accord* » (1) à « *Tout à fait d'accord* » (7). Enfin, les participants pouvaient faire une pause après les trois blocs réalisés pour chaque combinaison des facteurs *taille*, *amplitude* et *tolérance*, c'est-à-dire toutes les 12 tâches de rotation. Le temps moyen requis pour réaliser l'ensemble des 192 tâches de rotation était d'environ 35 minutes.

Afin de pouvoir analyser les données produites par les participants, la résolution de l'écran utilisé et les coordonnées de souris de l'utilisateur ont été enregistrées tout au long de l'expérience.

3.4 Résultats

24 participants (19 hommes, 4 femmes et 1 personne ne préférant pas répondre) ont participé à cette étude, avec un âge moyen de 28.7 ans ($\sigma = 8.5$). 20 participants ont utilisé une souris d'ordinateur et 4 un pavé tactile (interne ou externe). Parmi les 24 participants, seulement 8 ont déclaré être familiers avec des outils de modélisation ou de manipulation 3D.

Afin de ne pas tenir compte des temps de réalisation aberrants pour les tâches de rotation, dans lesquelles les utilisateurs ont éventuellement pu rencontrer des problèmes ou faire une pause au milieu de la tâche, nous avons supprimé pour chaque combinaison des facteurs *taille*, *amplitude* et *tolérance*, les tâches dont le temps de réalisation est quatre fois supérieur à l'écart-type de l'ensemble des tâches, soit un total de 103 tâches sur les 4608 tâches effectuées (2.2%).

Pour chacune des analyses des facteurs de l'expérience, nous avons utilisé des tests non-paramétriques (*i.e.* Aligned Rank Transform (ART) et les tests post-hoc associés) car la distribution des résidus était non normale et la transformation Box-Cox ne permettait pas de renormaliser les données. Les valeurs entre crochets indiquent les intervalles de confiance à 95% calculés via Bootstrap.

3.4.1 Temps de réalisation. Nous avons mesuré le temps requis par les participants pour chaque tâche de rotation entre le moment où la tâche est affichée et l'orientation validée. Les ARTs ont montré un effet significatif du facteur *bloc* ($F_{3,1117} = 4.9, p < 0.05$) suggérant un effet d'apprentissage. Une analyse post-hoc supplémentaire a montré une différence significative ($p < 0.05$) entre les blocs 1 (5.9s [5.2, 6.7]) et 2 (5.5s [4.9, 6.3]) et très significative ($p < 0.0001$) entre les blocs 1 et 3 (5.2s [4.6, 5.9]). Ceci représente des améliorations respectives de 7% et 12%, nous permettant de confirmer l'effet d'apprentissage et de ne considérer que les blocs 2 et 3 pour le reste des analyses statistiques dans les sections suivantes.

Contrairement à ce que nous attendions, les ARTs n'ont pas montré d'effet statistique significatif de la taille de la sphère sur le temps de réalisation de la tâche de rotation ($F_{3,729} = 4.9, p = 0.29$), ce qui ne nous permet donc pas d'accepter l'hypothèse H1 qui suppose que la taille de la sphère a une influence directe sur le temps de réalisation de la tâche de rotation. Néanmoins, et sans réelle surprise, nous avons trouvé des effets significatifs des facteurs *amplitude* ($F_{1,729} = 548.4, p < 0.001$) et *tolérance* ($F_{1,729} = 239.1, p < 0.001$) sur le temps de réalisation (*cf.* figure 4a). Les participants ont été 28% plus rapides avec une tolérance de 6° (4.5s [3.9, 5.1]) qu'avec une tolérance de 3° (6.2s [5.5, 7.1]). De même, ils ont été 39% plus rapides à réaliser la tâche de rotation avec une amplitude de 35° (4.1s [3.6, 4.6]) qu'avec une amplitude de 70° (6.7s [5.8, 7.6]).

Enfin, les ARTs ont montré une interaction significative entre les facteurs *amplitude* et *tolérance* ($F_{1,729} = 22.4, p < 0.001$) qui influent directement sur la difficulté de la tâche, mais aussi entre les facteurs *taille* et *amplitude* ($F_{3,729} = 9.4, p < 0.001$). La figure 4b illustre cette interaction et montre que le temps de réalisation a tendance à augmenter avec la taille de la sphère lorsque l'amplitude de la tâche de rotation est de 70° (50mm : 6.3s ; 100mm : 6.2s ; 150mm : 7.0s ; 200mm : 7.2s), et au contraire, diminuer lors que l'amplitude de la tâche est de 35° (50mm : 4.7s ; 100mm : 3.8s ; 150mm : 4.0s ; 200mm : 3.8s). De ce fait, la faible vitesse de rotation induite par une plus grande sphère semble influencer les performances des utilisateurs

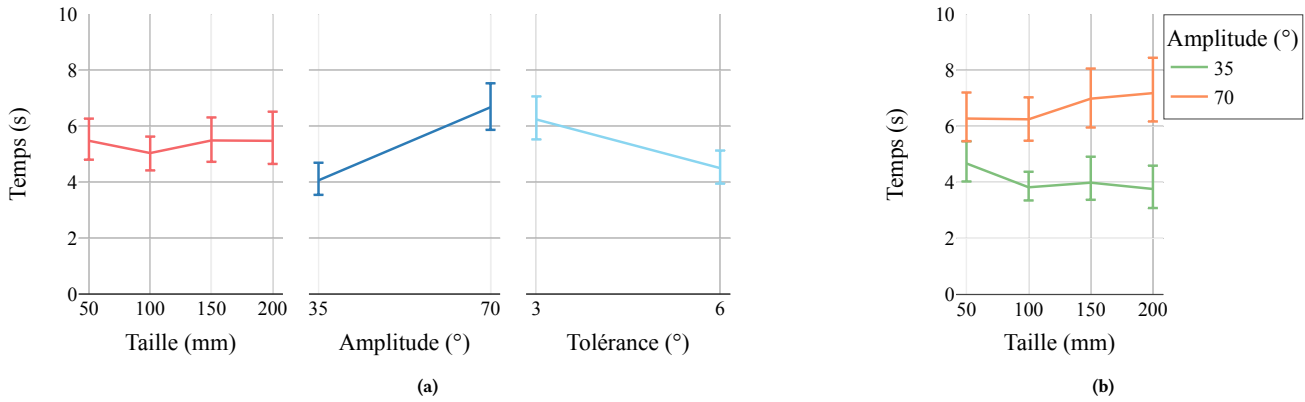


FIGURE 4: Moyenne des temps de réalisation des tâches de rotation pour les facteurs *taille*, *amplitude* et *tolérance* (a). Interaction des facteurs *taille* et *amplitude* sur le temps de réalisation (b). Les barres d'erreur représentent l'intervalle de confiance à 95% calculé via Bootstrap.

lorsqu'une grande rotation est requise (il faut plus de temps pour parcourir la distance) et semble améliorer les performances pour des petites rotations (gain de précision).

3.4.2 Nombre de mouvements de souris. Nous avons mesuré le nombre de mouvements du curseur de souris effectués par les participants dans chaque tâche de rotation, c'est-à-dire, le nombre de fois où ils ont cliqué, déplacé et relâché le bouton. Les ARTs ont montré un effet significatif des facteurs *taille* ($F_{3,729} = 3.4, p < 0.05$), *amplitude* ($F_{1,729} = 396.7, p < 0.001$) et *tolérance* ($F_{1,729} = 164.1, p < 0.001$) sur le nombre de mouvements (cf. figure 5a). L'analyse post-hoc du facteur *taille* montre un effet ($p < 0.05$) entre les tailles de sphères de 50mm (2.4 [2.0, 2.8]) et 100mm (2.1 [1.8, 2.6]). Un plus grand nombre de mouvements pour la taille de 50mm peut s'expliquer par la perte de précision des participants due à une vitesse de rotation plus grande, et donc, nécessitant plus de mouvements de corrections. Les participants ont effectué en moyenne 37% de mouvements de souris quand l'amplitude était de 70° (2.8 [2.4, 3.4]) que quand elle était de 35° (1.7 [1.5, 2.2]). De même, comme illustré figure 5a ils ont effectué 27% de mouvements en plus avec une tolérance de 3° (2.6 [2.2, 3.2]) qu'avec une tolérance de 6° (1.9 [1.6, 2.3]). Ceci peut s'expliquer par le fait qu'il est plus difficile de réussir la tâche de rotation lorsque la tolérance est plus faible et donc, peut nécessiter d'effectuer des mouvements supplémentaires pour corriger l'orientation de l'objet manipulé. Par ailleurs, les mesures ont montré une interaction entre les facteurs *taille* et *amplitude* ($F_{3,729} = 4.0, p < 0.01$) et entre les facteurs *amplitude* et *tolérance* ($F_{3,729} = 55.9, p < 0.001$). La figure 5b illustre cette interaction et montre que le nombre de mouvements augmente avec la taille de la sphère lorsque l'amplitude de la tâche de rotation est de 70°, mais diminue lorsque l'amplitude de la tâche est de 35°.

3.4.3 Variation d'angle. Nous avons mesuré la variation d'angle moyenne effectuée par chaque mouvement de souris, c'est-à-dire la valeur de l'angle entre l'orientation de l'objet au moment du clic de la souris et celle de l'objet lors du relâché du bouton de la souris. Les ARTs ont montré un effet significatif des facteurs *taille* ($F_{3,729} = 8.3, p < 0.001$), *amplitude* ($F_{1,729} = 776.5, p < 0.001$) et *tolérance* ($F_{1,729} = 197.4, p < 0.001$) sur la variation d'angle moyenne de

l'objet manipulé (cf. figure 6a). Une analyse post-hoc sur le facteur *taille* a principalement montré des différences entre les tailles de 50mm (34.6° [31.8, 37.2]) et 150mm (36.6° [31.7, 39.5]) et entre 50mm et 200mm (36.8° [31.8, 39.6]), indiquant les participants ont effectué des plus grandes rotations de l'objet avec les tailles de sphères les plus grandes, ce qui s'explique par l'augmentation de la zone d'interaction disponible pour effectuer la rotation. Les participants ont effectué une rotation 16% plus grande avec une tolérance de la tâche de 6° (39.0° [34.8, 41.5]) contre 3° (32.7° [29.0, 35.3]) et 30% plus grande lorsque l'amplitude était de 70° (42.9° [37.9, 46.7]) contre quand l'amplitude était de 35° (28.9° [25.7, 30.5]). Les mesures ont encore une fois montré une interaction entre les facteurs *amplitude* et *tolérance* ($F_{1,729} = 98.7, p < 0.001$). La figure 6b illustre cette interaction et montre que la variation d'angle moyenne de l'objet manipulé croît avec l'amplitude plus rapidement avec une tolérance de 6° qu'avec une tolérance de 3°. La différence de variation d'angle peut s'expliquer par le fait que les participants devaient à la fois effectuer de plus grandes rotations pour réaliser la tâche lorsque l'amplitude augmente, mais aussi utiliser de petites rotations de correction nécessaires pour valider la tâche lorsque la tolérance est faible.

3.4.4 Précision. La tâche de rotation demandée ne pouvait échouer, car les participants devaient nécessairement faire correspondre l'orientation des deux objets sous le seuil de tolérance. Néanmoins, il est possible de calculer la précision du participant en mesurant la valeur de l'angle entre l'orientation finale et validée effectuée par le participant et l'orientation cible (calculée via une différence de quaternion). Les ARTs ont montré un effet significatif des facteurs *amplitude* ($F_{1,729} = 55.7, p < 0.001$) et *tolérance* ($F_{1,729} = 2314.4, p < 0.001$) sur la précision des participants dans la tâche de rotation (cf. figure 7a). En effet, les participants ont été 47% plus précis avec une tolérance de 3° (2.0° [2.0, 2.2]) qu'avec une tolérance de 6° (3.9° [3.8, 4.0]) et 6% plus précis avec une amplitude de 35° (2.9° [2.8, 3.1]) qu'avec une amplitude de 70° (3.1° [3.0, 3.2]). Les mesures ont aussi montré une interaction entre les facteurs *taille* et *amplitude* ($F_{3,729} = 2.7, p < 0.05$), et entre *amplitude* et *tolérance* ($F_{1,729} = 9.3, p < 0.01$).

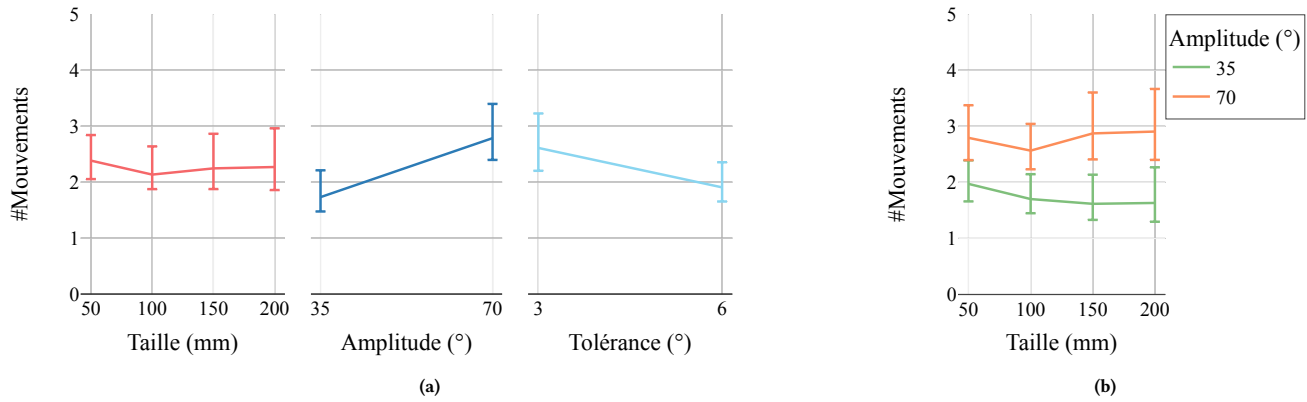


FIGURE 5: Moyenne du nombre de mouvements du curseur de la souris lors des tâches de rotation pour les facteurs *taille*, *amplitude* et *tolérance* (a). Interaction des facteurs *taille* et *amplitude* sur le nombre de mouvements (b). Les barres d'erreur représentent l'intervalle de confiance à 95% calculé via Bootstrap.

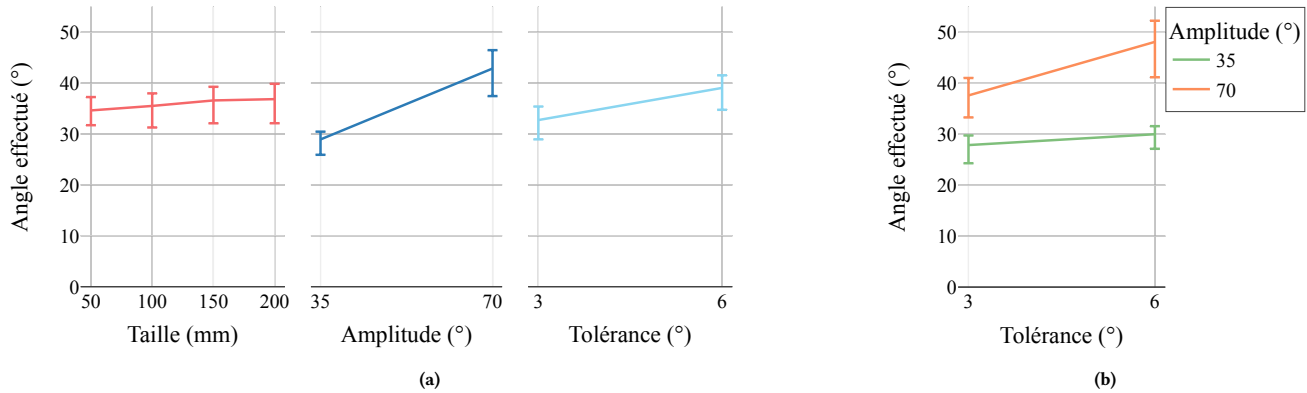


FIGURE 6: Moyenne des variations d'angles de l'objet manipulé effectuées par les participants lors des tâches de rotation pour les facteurs *taille*, *amplitude* et *tolérance* (a). Interaction des facteurs *taille* et *amplitude* sur la variation d'angle (b). Les barres d'erreur représentent l'intervalle de confiance à 95% calculé via Bootstrap.

La figure 7b illustre l'interaction *taille* × *amplitude* et montre que la précision augmente avec la taille de sphère pour une amplitude 70° (50mm : 3.0°; 100mm : 3.1°; 150mm : 3.1°; 200mm : 3.2°), et reste constante avec la taille de sphère pour une amplitude de 35° (2.9° pour toutes les tailles). Une explication possible est l'utilisation par les participants de plus grands gestes de rotations lorsque l'amplitude est élevée pour compenser la plus faible vitesse de rotation, entraînant donc une perte de précision.

3.4.5 Retours subjectifs des participants. Nous avons analysé les réponses des participants concernant leur rapidité, leur précision et leur niveau de fatigue lors des tâches de rotation grâce à un test de Friedman. L'analyse n'a montré aucun effet de la taille de la sphère sur les réponses des participants ni pour la rapidité ($p = 0.41$), la précision ($p = 0.40$) ou le niveau de fatigue ($p = 0.45$). Les réponses ont en moyenne été situées entre les valeurs *neutre* et *plutôt d'accord* de l'échelle de Likert à 7 valeurs proposée aux participants pour chacune des conditions (cf. figure 8).

DISCUSSION

Discussion des résultats

Comme attendu, l'amplitude et la tolérance de la tâche de rotation ont toutes deux eu un effet significatif sur les performances des participants, puisqu'elles correspondent ensemble à la difficulté de la tâche de rotation. Nous observons clairement l'impact la difficulté de la tâche sur les temps de réalisation (28% plus rapides pour la grande tolérance, 39% plus rapides pour la petite amplitude, figure 4) et le nombre de mouvements effectués (27% de mouvements en plus pour la petite tolérance, 37% de mouvements en plus pour la grande amplitude, figure 5).

Nous avons par ailleurs observé que la variation d'angle moyenne des mouvements de la souris croît avec l'amplitude plus rapidement avec une tolérance de 6° qu'avec une tolérance de 3°. Cette différence montre que les plus grands gestes effectués par les participants pour la grande amplitude sont compensés par un nombre de petits gestes de correction lorsque la tolérance est faible. Ceci se confirme

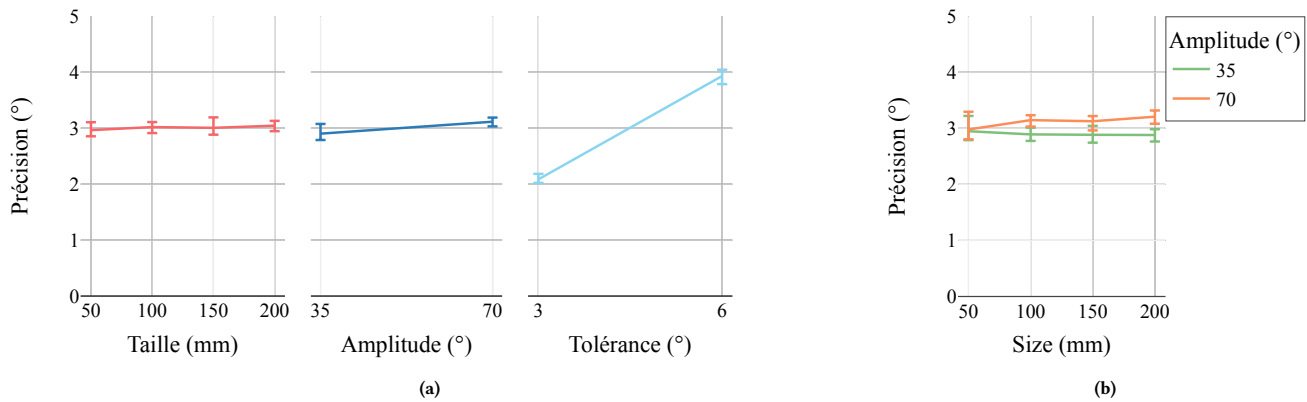


FIGURE 7: Précision moyenne des participants lors des tâches de rotation pour les facteurs *taille*, *amplitude* et *tolérance* (a). Interaction des facteurs *taille* et *amplitude* sur la précision (b). Les barres d'erreur représentent l'intervalle de confiance à 95% calculé via Bootstrap.

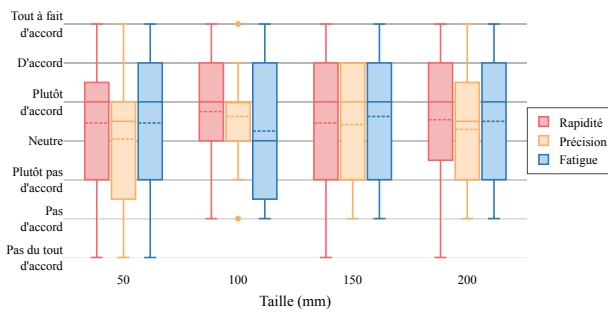


FIGURE 8: Retours subjectifs des participants sur l'estimation de leur rapidité, leur précision et leur niveau de fatigue des tâches de rotation sur une échelle de Likert à 7 valeurs (de *Pas du tout d'accord* à *Tout à fait d'accord*) pour les quatre tailles de sphère d'interaction.

lorsque nous observons la différence significative du nombre de mouvements en fonction de la tolérance. Les participants ont en effet effectué 27% de mouvements en plus pour la tolérance de 3° que celle de 6°. Les effets significatifs sur l'angle moyen effectué entre les tailles de 50mm et 150mm et entre 50mm et 200mm montrent que l'angle moyen effectué par les mouvements de souris augmente aussi avec la taille de la sphère (cf figure 6a). En effet, une plus grande sphère permet théoriquement aux utilisateurs d'effectuer de plus grands mouvements de rotation car la surface de rotation augmente.

Enfin, bien que nous n'ayons pas observé d'influence directe de la taille de la sphère sur la précision, les interactions entre les facteurs *taille* et *amplitude* sur le temps de réalisation (cf. figure 4b), le nombre de mouvements de la souris (cf. figure 5b) et la précision (cf. figure 7b) montrent que les participants, lorsque la taille de sphère augmente, sont légèrement de plus en plus rapides avec une petite amplitude et effectuent de moins en moins de mouvements, justifiant un gain de précision. À l'inverse, ils sont légèrement de plus en plus lents avec une grande amplitude et effectuent de plus en plus de mouvements, montrant la perte de vitesse de rotation entraînée par l'augmentation de la taille de la sphère.

En effet, plus la taille de la sphère augmente, plus la variation de rotation diminue pour un même déplacement de souris, compensant probablement le gain d'une surface d'interaction plus grande, et demandant plus de mouvements à effectuer. À l'inverse, plus la taille de sphère diminue, plus la variation de rotation augmente pour un même déplacement de souris, diminuant la précision et la surface d'interaction, et augmentant le nombre de mouvements nécessaires, ce qui explique l'effet observé entre les tailles de 50mm et 100mm, et la courbe en forme de U.

Ainsi, pour une plus grande taille de sphère virtuelle de contrôle, les utilisateurs ont plus de surface d'interaction, mais une vitesse de rotation plus faible. Ils effectuent donc plus de mouvements, plus grands, pouvant alors expliquer la non-présence d'un effet significatif de la taille de la sphère sur le temps de réalisation.

Stratégies de rotation

En raison de la situation sanitaire actuelle, l'étude que nous avons menée auprès de 24 participants s'est déroulée à distance, ne nous permettant pas de visualiser directement le comportement des participants lors des tâches de rotation, notamment les déplacements physiques de la souris des participants ou leurs doigts sur un pavé tactile. Nous avons observé dans notre étude que la taille de la sphère n'avait pas un impact direct sur les performances des utilisateurs lors des tâches de rotation que ce soit pour le temps de réalisation des tâches de rotations ou la précision. Cependant, les effets observés de la taille de la sphère sur le nombre de mouvements de la souris et la variation d'angle de ces mouvements suggèrent que les participants ont adopté des comportements et des stratégies de rotation différents. Ayant enregistré au cours de l'expérience tous les événements curseurs réalisés par chacun des participants pour chacune des tâches de rotation, il nous est possible de rejouer les mouvements réalisés dans l'application et d'étudier le comportement des participants.

Ainsi, en normalisant chaque mouvement de souris par rapport à la taille de la sphère, on observe par exemple sur la figure 9 que les mouvements de souris des participants P11, P8, et P23 adoptent une disposition spatiale complètement différente, illustrant 3 stratégies de rotation. P11 semble n'avoir effectué que des petits débrayages

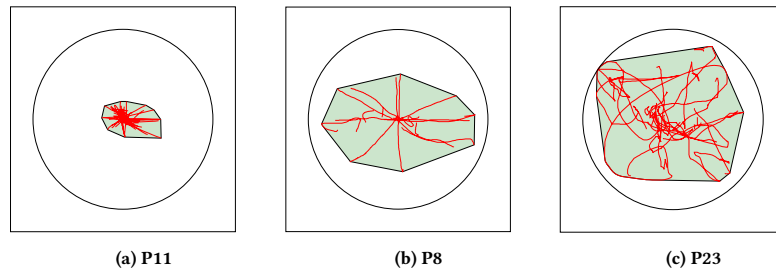


FIGURE 9: Visualisation des mouvements de souris, mis à l'échelle par rapport à la sphère d'interaction représentée par le cercle, pour les participants P11, P8 et P23 pour les tâches de rotation ayant une taille de sphère de 150mm, une amplitude 35° et une tolérance de 6°.

de souris centrés sur la sphère impliquant un grand nombre de mouvements pour réaliser les tâches de rotation (cf. figure 9a). P8 semble au contraire avoir effectué de larges mouvements (la surface de la sphère étant plus utilisée) selon les huit axes de rotation de la tâche, en déplaçant le curseur de souris du centre de la sphère vers l'extérieur (cf. figure 9b). Enfin, P23 ne semble pas avoir appliqué de stratégie spécifique. Ce participant semble avoir été « perdu » dans les rotations à effectuer puisque ses mouvements de souris ne suivent pas du tout les axes de rotations des tâches à effectuer (cf. figure 9c).

Les stratégies de rotation diffèrent entre les participants, mais aussi pour un seul participant entre plusieurs tailles de sphère. Par exemple, la figure 10 montre que le participant P19 a effectué des plus grands mouvements de souris pour une taille de sphère de 50mm que pour les tailles de 100, 150 et 200mm, ce qui est étonnant sachant que plus la taille de sphère est petite, plus les variations de rotation sont importantes. Ces visualisations suggèrent que la taille de sphère de contrôle aurait effectivement un impact, certes indirect, sur les performances et le comportement des utilisateurs qu'il conviendrait d'étudier plus en détails dans une future étude.

CONCLUSION

Nous avons présenté dans cet article un bref état de l'art des techniques actuelles de rotation sur ordinateurs de bureau qui utilisent des sphères virtuelles de contrôle. Les travaux existants se sont exclusivement intéressés à la comparaison des différentes techniques proposées dans la littérature en ayant recours à des expériences contrôlées. Nous avons conduit une première étude qui cherche à mesurer l'impact de la taille de la sphère virtuelle de contrôle sur les performances et le comportement des utilisateurs lors de tâches de rotation. Notre étude a donc comparé quatre valeurs de sphère (de 50mm à 200mm), basées sur une même technique de rotation 3D, qui est une version modifiée de la sphère virtuelle de contrôle proposée par Shoemake [14]. L'expérience contrôlée, menée à distance auprès de 24 participants n'a pas montré d'effet significatif de la taille de la sphère de contrôle sur les temps de réalisation des tâches de rotation, mais sur les autres facteurs tels que le nombre de mouvements de souris, la variation d'angle moyenne et la précision de la rotation, suggérant ainsi un éventuel impact de la taille de sphère sur le comportement des utilisateurs.

En effet, des résultats préliminaires, présentés par des visualisations en discussion de cet article, suggèrent que les participants auraient employé différentes stratégies pour réaliser les tâches de

rotation. Par exemple, effectuer de petits mouvements de rotations aux environs du centre de la sphère et débrayer beaucoup, ou alors effectuer de longs mouvements de rotation du centre vers l'extérieur de la sphère de contrôle. Nous pouvons aussi remarquer que beaucoup de participants ne semblent pas avoir appliqué de stratégies de rotation spécifiques, pouvant potentiellement expliquer la variance obtenue dans les temps de réalisation des tâches de rotations.

RÉFÉRENCES

- [1] Axel Antoine, Sylvain Malacria, Nicolai Marquardt, and Géry Casiez. 2019. Esquisse : Using 3D Models Staging to Facilitate the Creation of Vector-Based Trace Figures. In *Human-Computer Interaction – INTERACT 2019*, David Lamas, Fernando Loizides, Lennart Nacke, Helen Petrie, Marco Winckler, and Panayiotis Zaphiris (Eds.). Springer International Publishing.
- [2] Ragnar Bade, Felix Ritter, and Bernhard Preim. 2005. Usability Comparison of Mouse-Based Interaction Techniques for Predictable 3d Rotation, Vol. 3638. 138–150. https://doi.org/10.1007/11536482_12
- [3] G. Bell. [n.d.]. Bell's Trackball. ([n.d.]). http://members.tripod.com/professor_tom/index.html, 1988
- [4] Eric Allan Bier. 1987. Skitters and Jacks : Interactive 3D Positioning Tools. In *Proceedings of the 1986 Workshop on Interactive 3D Graphics* (Chapel Hill, North Carolina, USA) (I3D '86). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 183–196. <https://doi.org/10.1145/319120.319135>
- [5] Michael Chen, S. Joy Mountford, and Abigail Sellen. [n.d.]. A Study in Interactive 3-D Rotation Using 2-D Control Devices. In *Proceedings of the 15th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* (New York, NY, USA, 1988) (SIGGRAPH '88). ACM, 121–129. <https://doi.org/10.1145/54852.378497>
- [6] Tao Chen, Zhe Zhu, Ariel Shamir, Shi-Min Hu, and Daniel Cohen-Or. 2013. 3-sweep : Extracting editable objects from a single photo. *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 32, 6 (2013), 195.
- [7] K. Henriksen, J. Sparring, and K. Hornbaek. [n.d.]. Virtual trackballs revisited. 10, 2 ([n.d.]), 206–216. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2004.1260772>
- [8] Ken Hinckley, Joe Tullio, Randy Pausch, Dennis Proffitt, and Neal Kassell. 1997. Usability Analysis of 3D Rotation Techniques. In *Proceedings of the 10th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (Banff, Alberta, Canada) (UIST '97). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–10. <https://doi.org/10.1145/263407.263408>
- [9] Inés Jacob and Javier Oliver. 1996. Evaluation of Techniques for Specifying 3D Rotations with a 2D Input Device. In *Proceedings of the HCI'95 Conference on People and Computers X* (Huddersfield, United Kingdom) (HCI '95). Cambridge University Press, USA, 63–76.
- [10] Renate Kempf, Deb Galdes, and Mike Mohageg. 1996. 3D Style Guidelines. In *Indigo Magic™ User Interface Guidelines*, Christina Cary (Ed.). Silicon Graphic, Chapter 15.
- [11] Ivan Poupyrev, Suzanne Weghorst, and Sidney Fels. [n.d.]. Non-isomorphic 3D Rotational Techniques. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2000) (CHI '00). ACM, 540–547. <https://doi.org/10.1145/332040.332497>
- [12] Ivan Poupyrev, Suzanne Weghorst, Takahiro Otsuka, and Tadao Ichikawa. 1999. Amplifying Spatial Rotations in 3D Interfaces. In *CHI '99 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (Pittsburgh, Pennsylvania) (CHI EA '99). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 256–257. <https://doi.org/10.1145/632716.632874>
- [13] Steven Rybicki, Brian DeRenzi, and James Gain. 2016. Usability and Performance of Mouse-Based Rotation Controllers. In *Proceedings of the 42nd Graphics*

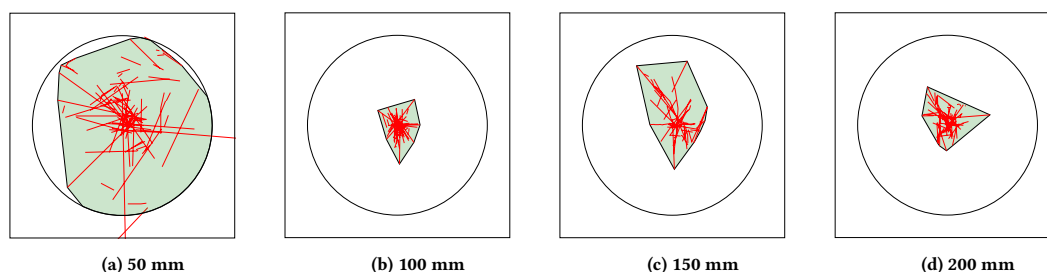


FIGURE 10: Visualisation des mouvements de souris, mis à l'échelle par rapport à la sphère d'interaction représentée par le cercle, pour le participant P19, pour les tâches de rotations ayant une amplitude de 35° , une tolérance de 3° et une taille de sphère de 50, 100, 150 et 200mm.

Interface Conference (Victoria, British Columbia, Canada) (*GI '16*). Canadian Human-Computer Communications Society, Waterloo, CAN, 93–100.

- [14] Ken Shoemake. [n.d.]. ARCBALL : A User Interface for Specifying Three-dimensional Orientation Using a Mouse. In *Proceedings of the Conference on Graphics Interface '92* (San Francisco, CA, USA, 1992). Morgan Kaufmann Publishers Inc., 151–156. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=155294.155312>

- [15] Yao Jun Zhao, Dmitri Shuralyov, and Wolfgang Stuerzlinger. [n.d.]. Comparison of multiple 3D rotation methods. In *2011 IEEE International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurement Systems Proceedings* (Ottawa, ON, Canada, 2011-09). IEEE, 1–5. <https://doi.org/10.1109/VEHIMS.2011.6053855>