

Fiche de lecture pour l'article :

Le retour haptique améliore l'apprentissage d'habilités motrices

Haptic Feedback Enhances Force Skill Learning

D. Morris, H. Tan, F. Barbagli, T. Chang, and K. Salisbury

Dans le contexte de la réalité virtuelle, l'interaction entre l'utilisateur et son environnement se fait par une perception d'un certain nombre d'informations, générées par un ordinateur, en réaction aux actions de l'utilisateur. Dans la plupart du temps ce retour d'informations est visuel (sur un écran). Cependant, il serait intéressant d'étudier les retours sensoriels autres que le retour visuel, notamment, le retour haptique (relatif au toucher). Ici les auteurs se limitent à une variante du retour haptique : celle du retour d'efforts (ou retour kinesthésique) relatif à la perception des forces de contact, de dureté, de poids et d'inertie d'un objet.

Le couplage des retours sensoriels, en particulier visuo-haptiques, intervient naturellement dans l'apprentissage de plusieurs habilités (impliquant des composantes sensorielles et motrices) comme l'écriture manuscrite ou encore l'apprentissage de tâches de télé-opération en chirurgie. En effet, le télé-opérateur réalise la plupart du temps ses actions avec à la fois un retour visuel de la scène et un retour haptique (le retour d'effort du bras maître). C'est le couplage entre les informations visuelles et haptiques qui lui permettraient de réaliser ces opérations avec un maximum d'efficacité.

Plusieurs travaux dans la littérature ont étudié l'intérêt de l'utilisation du retour haptique pour l'apprentissage dans un environnement virtuel notamment pour l'enseignement des habilités chirurgicales et l'apprentissage de trajectoires spatio-temporelles. D'autres études prétendent ne pas avoir un gain significatif dans l'apprentissage en utilisant le retour haptique comme pour le problème de l'apprentissage de l'assemblage manuel et l'apprentissage du contrôle de moteur. Cependant, peu sont les travaux qui ont montré la capacité du retour haptique pour enseigner une séquence précise de forces qui doit être appliquée lorsque l'utilisateur se déplace sur une trajectoire de l'espace. Ce type d'apprentissage est pertinent pour des problèmes sensibles à la force et guidés visuellement, en particulier, contenant plusieurs procédures chirurgicales.

L'objectif de cet article est alors d'étudier l'impact du retour haptique sur la capacité des utilisateurs d'apprendre, (en présence d'un retour haptique) et de reproduire, seuls, une habilité qui nécessite une composante motrice (effort exercé par l'utilisateur) et visuelle (effet de l'action de l'utilisateur). Cette habilité consiste en une séquence de forces que l'utilisateur doit être capable de les reproduire.

Pour ce faire, trois conditions expérimentales de l'apprentissage de ces séquences de forces ont été comparées : haptique, visuelle et visio-haptique. Après chaque phase d'apprentissage, chaque utilisateur est demandé de refaire la séquence de force qu'il a apprise. Et la qualité de l'apprentissage est mesurée par la précision de reproduction des forces. Une condition plus détaillée de ces conditions est présentée ci-dessous.

Les informations visuelles sont envoyées à l'apprenant via un écran placé en face de lui. Le retour haptique est présenté via un dispositif placé horizontalement sur une table en face de l'écran. Ce dispositif contient une sorte de stylet ou bras robotisé que l'utilisateur peut tenir avec sa main tout en laissant son coude posé sur la table.

Pendant la phase d'apprentissage, la main de l'utilisateur est déplacée passivement par le dispositif de gauche à droite suivant une courbe sinusoïdale située sur le plan perpendiculaire à celui de la table (la courbe de trajectoire est sur le plan défini par les axes  $X$  et  $Z$ ). Les forces que les sujets sont demandés d'apprendre doivent être exercées selon la direction de l'axe des  $Y$ , perpendiculairement au plan de la courbe de trajectoire de la main. L'amplitude de cette force en fonction du temps est aussi une courbe sinusoïdale (somme de sinusoïdes). Cette amplitude en fonction du temps est ce que nous appellerons désormais le modèle de forces ou d'efforts. Et c'est ce que les sujets doivent apprendre pour être capable de reproduire seuls. L'intérêt de déplacer passivement la main de l'apprenant selon une trajectoire sinusoïdale, c'est que cette trajectoire servira de référence pour le modèle de forces que l'utilisateur est censé apprendre.

Les conditions des expérimentations sont les suivantes :

Dans les conditions de l'apprentissage haptique, le dispositif haptique applique des forces selon l'axe des  $Y$  (perpendiculairement au plan du mouvement) directement sur la main de l'utilisateur et le sujet doit maintenir le

bras du dispositif dans le plan du mouvement de cette façon, il applique le modèle de force qu'il est supposé apprendre. Sur l'écran, seulement la trajectoire de la main du participant (sur le plan XZ) est affichée.

Dans les conditions de l'apprentissage visuel, aucune force n'est appliquée sur l'apprenant. Lorsque la main de l'utilisateur est déplacée le long de la trajectoire, une barre verticale affichée sur l'écran change de hauteur pour indiquer l'amplitude de la force cible ainsi que la position de la main de l'utilisateur sur la trajectoire.

Dans les conditions de l'apprentissage d'un couplage visio-haptique, comme dans le cas visuel, le dispositif haptique maintenu dans le plan XZ. Et la force cible courante est affichée également par une barre bleue. Toutefois, une autre barre verticale verte indique la force actuellement appliquée par le participant. Et les participants doivent alors faire correspondre les hauteurs de la barre bleue et verte.

Après chaque phase d'apprentissage sur un modèle de forces, les participants sont demandés de reproduire cette séquence de forces pour évaluer la qualité de leur apprentissage. Ces forces doivent être appliquées sur l'axe des Y en maintenant toujours la main du sujet avec dispositif haptique le long de la trajectoire sinusoïdale. Aucune force n'est appliquée sur le participant et seulement la position courante de sa main sur la trajectoire est affichée sur l'écran.

Les amplitudes des forces sont enregistrées au fur et à mesure du déroulement de chaque test pour des analyses ultérieures hors ligne. Pour chaque essai deux courbes de l'amplitude de la force en fonction du temps sont construites, l'une pour le modèle de force cible et l'autre pour le modèle de force appliqué. Si ces courbes sont similaires, le test devrait recevoir un score élevé pour l'apprentissage. Une façon de calculer ce score est de soustraire les deux courbes à chaque point et de calculer la racine carrée de la moyenne des carrés des erreurs (root-mean-squared-difference RMS). Cette approche est inadéquate à cause du décalage temporel qui existe entre les deux courbes. Pour pallier à ce problème, les auteurs ont utilisé une méthode d'affectation des scores plus robuste. Elle se base d'abord sur la programmation dynamique pour aligner les courbes (cela consiste à trouver une correspondance optimale entre chaque point d'une courbe avec un point dans l'autre) ensuite la courbe de la force appliquée est déformée sur la base de cet alignement. Des scores pondérés sont alors utilisés après alignement et déformation en utilisant la mesure RMS.

L'analyse des résultats montre que l'apprentissage d'un modèle de force avec un retour haptique seul est nettement moins efficace pour ce problème que l'apprentissage visuel seul. Les résultats démontrent également que les participants sont mieux capable de mémoriser des modèles de force lorsque ces modèles sont présentés à la fois visuellement et haptiquement, plutôt que via chaque modalité à part. Ceci est au contraire du résultat présenté par Srimathveeravalli et Thenkurussi [16], qui ont demandé aux participants de reproduire un modèle de force et une trajectoire positionnelle simultanément. Leur résultat montre qu'introduire une information de force dans un paradigme d'apprentissage de compétence a produit dans l'ensemble moins d'erreurs dans la reproduction de l'information positionnelle, mais, en total, plus d'erreurs pour reproduire les forces.

Comme perspectives pour cet article, les auteurs suggèrent d'explorer l'utilisation des informations haptiques seules pour améliorer l'apprentissage et de mener d'autres expérimentations pour explorer le rôle joué par les informations visuelles et haptiques dans le paradigme d'apprentissage visio-haptique. Et encore l'évaluation des capacités des utilisateurs pour transférer des compétences sensibles à l'effort, acquises dans un environnement de simulation, à l'environnement réel.