Indices vibrotactiles pour transmettre des informations directionnelles lors de l'exploration aveugle de graphiques numériques

Kaixing Zhao, Frédéric Rayar, Marcos Serrano, Bernard Oriola, Christophe Jouffrais

▶ **To cite this version:**

Kaixing Zhao, Frédéric Rayar, Marcos Serrano, Bernard Oriola, Christophe Jouffrais. Indices vibrotactiles pour transmettre des informations directionnelles lors de l'exploration aveugle de graphiques numériques. 31e conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM 2019), Dec 2019, Grenoble, France. pp.9:1-12, 10.1145/3366550.3372255 . hal-02381593

HAL Id: hal-02381593
https://hal.science/hal-02381593

Submitted on 26 Nov 2019

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.

Indices vibrotactiles pour transmettre des informations directionnelles lors de l'exploration aveugle de graphiques numériques

Vibrotactile Cues for Conveying Directional Information During Blind Exploration of Digital Graphics

Kaixing Zhao[1], Frédéric Rayar[1], Marcos Serrano[1], Bernard Oriola[2], Christophe Jouffrais[2,3]

[1] University of Toulouse – IRIT
Toulouse, France

[2] CNRS – IRIT
Toulouse, France
{firstname.lastname}@irit.fr

[3] CNRS – IPAL
Singapore, Singapore

ABSTRACT

Graphics are useful in many contexts of daily life (education, mobility, etc.) and spread widely in digital media. However, accessing to digital graphical information remains a challenging work to people with visual impairments. In this study, we were interested in the transmission of vibrotactile cues allowing users to explore digital graphics more easily and faster. We have designed a vibrotactile matrix fixed on the hand for presenting directional information. Two vibrotactile displays – Spatiotemporal Vibrotactile Pattern (SVP) and Apparent Tactile Motion (ATM) – were compared. A study with sixteen blindfolded participants examined the efficiency and user preferences of proposed interaction techniques and showed that the recognition accuracy with SVP is significantly better. Final study involving six participants with visual impairments confirmed the improvement of digital graphics exploration with vibrotactile directional cues.

CCS CONCEPTS

• **Human-centered computing → HCI theory, concepts and models**; **Pointing**; **Visualization techniques**.

KEYWORDS

interaction technique, non-visual interaction, blind, spatial cognition, digital map, digital graphic

RÉSUMÉ

Les graphiques sont utiles dans de nombreux contextes de la vie quotidienne (éducation, mobilité, etc.) et se répandent largement dans les médias numériques. Cependant, l'accès aux informations graphiques numériques reste un défi pour les personnes ayant une déficience visuelle. Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à la transmission d'indices vibrotactiles permettant à des utilisateurs de parcourir plus rapidement et plus facilement des graphiques numériques. Nous avons conçu une matrice vibrotactile fixée sur la main et permettant de présenter des informations directionnelles. Deux affichages vibrotactiles - *Spatiotemporal Vibrotactile Pattern* (SVP) et *Apparent Tactile Motion* (ATM) – ont été comparés. Une étude avec seize participants aux yeux bandés a examiné l'efficience et la préférence des utilisateurs avec les techniques proposées. Elle a montré que le taux de reconnaissance avec SVP est significativement meilleur. L'étude finale impliquant six participants ayant une déficience visuelle a confirmé l'amélioration de l'exploration de graphiques numériques grâce aux indices directionnels vibrotactiles.

MOTS CLÉS

techniques d'interaction, interaction non-visuelle, non-voyants, cognition spatiale, carte numérique, graphique numérique

INTRODUCTION

L'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) recense près de 1,3 milliard de personnes qui présentent une déficience visuelle dans le monde : 36 millions d'entre elles sont

IHM'19, December 10–13, 2019, Grenoble, France
© 2019 Copyright held by the owner/author(s). Publication rights licensed to ACM.
This is the author's version of the work. It is posted here for your personal use. Not for redistribution. The definitive Version of Record was published in *Actes de la 31e conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM'19), December 10–13, 2019, Grenoble, France.*
https://doi.org/10.1145/3366550.3372255.

aveugles [1]. En France, ils sont 1,7 million à souffrir d'une déficience visuelle, dont 932 000 malvoyants moyens (avec beaucoup de difficultés ou une incapacité totale à lire, écrire ou dessiner) et 270 000 malvoyants profonds et aveugles. Il apparaît que peu de personnes ayant une déficience visuelle (PDV) ont accès aux informations graphiques (cartes géographiques, graphes mathématiques, dessins, etc.), car ce matériel doit être adapté sous forme tactile. Cette adaptation repose sur des méthodes de transcription maitrisées par des professionnels [33] et les graphiques produits ne peuvent pas être modifiés facilement [17], ce qui les rend relativement rares. Le manque de confrontation à des représentations graphiques peut alors porter atteinte à la capacité à conceptualiser et à apprendre à partir de données graphiques, ce qui a un impact sur l'éducation et la mobilité, et donc sur l'autonomie et la qualité de vie des personnes ayant une déficience visuelle. Finalement, cela génère des défis professionnels importants et contribue certainement à des niveaux élevés de sous-emploi et de chômage [2].

Ces dernières années, de nombreuses études ont montré qu'il était possible de permettre aux PDV d'accéder aux informations graphiques numériques au moyen de techniques d'interaction haptiques et/ou sonores, ce qui permet de profiter des avantages des informations numériques (facilement modifiables [10] et interactives [4]). Parmi ces études, plusieurs travaux ont été menés pour concevoir des techniques d'interaction permettant de rendre les graphiques numériques accessibles [4], mais aussi pour étudier les stratégies utilisées pour explorer les graphiques physiques [5]. Les découvertes ont montré qu'il existe notamment des indices tactiles particulièrement importants lors de l'exploration de graphiques physiques. Par exemple, l'utilisateur perçoit instantanément l'orientation de la ligne en relief sous son doigt, ce qui permet d'orienter les mouvements de suivi de ligne dans le bon sens.

À l'inverse, les graphiques numériques affichés sur une surface interactive ne permettent pas d'obtenir ces indices tactiles, ce qui rend leur exploration particulièrement difficile. Tekli *et al.* [31] ont proposé une technique qui consiste à faire vibrer une tablette lorsque le doigt qui explore le diagramme est situé sur une ligne. Ils ont montré que les utilisateurs peuvent explorer des formes géométriques simples. Cependant, cette exploration est difficile car l'utilisateur perd souvent la ligne, en particulier car il n'a aucune information tactile sur l'orientation de celle-ci.

Notre objectif dans cette étude consistait à améliorer l'exploration de graphiques numériques, notamment en évitant les nombreux mouvements inutiles pour découvrir l'orientation d'un segment. Nous avons proposé plusieurs indices tactiles reflétant l'orientation d'un segment basés sur deux affichages vibrotactiles [29]: *Spatiotemporal Vibrotactile Pattern* (SVP) [8] et *Apparent Tactile Motion* (ATM) [16]. Nous avons réalisé une première étude expérimentale incluant seize participants avec les yeux bandés afin d'évaluer l'efficience des indices tactiles pour donner l'information directionnelle d'un segment, ainsi que la préférence des utilisateurs. Ensuite, nous avons mené une étude avec six participants ayant une déficience visuelle pour vérifier l'amélioration de l'exploration de graphiques numériques à l'aide des indices directionnels vibrotactiles.

Cet article présente deux contributions principales : 1) un ensemble d'indices vibrotactiles appliqués sur la main pour représenter des directions ; 2) deux expériences montrant que les informations vibrotactiles sur la main permettent d'améliorer l'exploration de graphiques numériques.

ETAT DE L'ART

Exploration non visuelle de graphiques numériques

Explorer et comprendre les informations graphiques telles que les diagrammes, les schémas et les cartes, est toujours une tâche difficile pour les personnes ayant une déficience visuelle. Ducasse *et al.* [10] ont proposé une classification des dispositifs interactifs permettant de parcourir des graphiques numériques. Ils ont distingué les dispositifs hybrides, incluant des composants physiques et numériques [6,11], et les dispositifs uniquement numériques [1,4]. Une des conclusions de cette revue de la littérature est que les graphiques uniquement numériques sont nettement plus faciles à manipuler et à afficher, mais souffrent de l'absence d'indices tactiles.

Concernant les modalités d'interaction utilisées, différents types de retour, par exemple auditifs [4], haptiques (y compris vibratoires) [25,31,32], ou multimodaux [14], ont été étudiés afin d'améliorer l'utilisabilité des graphiques numériques. Excepté [26] qui a utilisé des icônes tactiles dynamiques sous le doigt pour transmettre des informations directionnelles, aucune étude ne porte sur la présentation de la direction d'un segment numérique basée sur des indices vibrotactiles.

[2] http://www.euroblind.org/about-blindness-and-partial-sight/facts-and-figures

Transmission d'informations par SVP

Au-delà de l'accès aux graphiques, il existe une abondante littérature en IHM sur l'utilisation d'indices vibrotactiles [30]. Ils permettent de transmettre des informations non visuelles de manière discrète et privée [7, 21]. Ils peuvent aussi fournir des indices dans des tâches cognitives difficiles ([27] par exemple). Depuis quelques années, deux types d'affichages vibrotactiles connus sont apparus : *Spatiotemporal Vibrotactile Pattern* (SVP) [8] et *Apparent Tactile Motion* (ATM) [16].

SVP repose sur des ensembles de vibrations séquentielles ou simultanées appliquées sur différents vibreurs et a souvent été utilisé pour donner des notifications [3]. La Figure 1 montre deux types de SVP : séquentiel et simultané. SVP peut être contrôlé par plusieurs facteurs, par exemple la durée de stimulation, l'amplitude et le mode de vibration, etc.

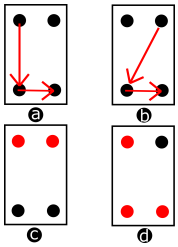

Figure 1. (a) et (b) SVP séquentiel, les flèches représentent l'ordre de vibreurs activés. Cette stimulation donne la sensation d'une vibration qui se déplace. (c) et (d) SVP simultané, les points rouges représentent les vibreurs activés. Cette stimulation donne la sensation d'une vibration « fantôme » intermédiaire générée entre les deux vibrations réelles.

Récemment, Chen *et al.* [8] ont étudié l'effet de la temporalité, de l'activité physique et de la charge cognitive sur la perception des SVP. Cette étude a confirmé la capacité de reconnaissance de SVP par les utilisateurs dans un environnement réel, et les résultats ont montré un taux de reconnaissance relativement élevé (89,7% en position assise, mais 72,4% en ajoutant une tâche cognitive parallèle). De même, Elvitigala *et al.* [12] ont mené une série d'études pour évaluer l'utilisabilité de l'affichage vibrotactile. Les résultats montrent que SVP est plus facilement perceptible sur la main que sur l'avant-bras, et suggèrent que ce canal d'information devrait être limité à deux bits simultanés.

Avant ces études fondamentales, diverses applications avaient été proposées. Par exemple, Yatani *et el.* [36] ont étudié la perception du SVP à travers un téléphone tenu dans la paume de la main. Meier *et al.* [22] ont évalué la perception de SVP à différents endroits du corps lors d'une tâche de navigation piétonne. Ils ont constaté que le pied permet d'obtenir des résultats prometteurs en termes de reconnaissance des formes vibrotactiles. Les travaux de [35] sont pertinents dans notre contexte car ils ont utilisé une matrice de 3x3 vibreurs situés à l'arrière d'un téléphone. Ce système portatif a été conçu pour aider les PDV à se diriger vers un lieu et à comprendre les relations spatiales existantes entre plusieurs lieux.

Cependant, bien qu'il y ait eu déjà des études sur la représentation des informations directionnelles avec SVP [3,35], les dispositifs sont relativement encombrants (basés sur 9 vibreurs) et n'ont pas été comparés avec d'autres techniques de l'état de l'art.

Transmission d'informations par ATM

ATM est une illusion tactile qui se produit lorsque deux ou plusieurs vibreurs sont activés en différé sur la peau et peut être contrôlé par deux facteurs : la durée de stimulation et la valeur de SOA (*Stimulus Onset Asynchrony*, i.e. intervalle de temps entre les deux stimuli). En comparaison avec SVP, il y a toujours des intersections des vibrations pour ATM (Figure 2). Bien qu'un grand nombre d'expériences perceptives aient été réalisées en psychologie [13], l'intérêt en IHM est apparu avec les travaux de Israr *et al.* [16]. Dans cette étude, ils ont proposé un algorithme qui provoque l'illusion de mouvements tactiles continus sur la peau, en se basant sur la présence de deux vibreurs éloignés de quelques centimètres. Leur proposition a combiné deux types d'illusions tactiles connues : le Mouvement Tactile Apparent [18] et la Sensation Fantôme [2,28] et a notamment déterminé la relation entre la valeur de SOA et la durée de vibration des deux vibreurs impliqués (Figure 2), celle-ci étant essentielle pour maintenir l'illusion. Les équations (1 – 3) montrent les relations découvertes :

$$\begin{cases} SOA + d' = T & (1) \\ SOA = 0.32\, d + 47.3 & (2) \\ d = d' & (3) \end{cases}$$

Ici, d et d' sont les durées de vibration des vibreurs de départ et d'arrivée, T est le temps total du mouvement. L'équation (3) assure la consistance de la vitesse du mouvement. La Figure 2 illustre un mouvement tactile apparent.

Basées sur leur étude, diverses applications ont été proposées pour transmettre différents types d'informations. Par exemple, FeelSleeve [34] crée des indices vibrotactiles pour améliorer l'expérience de lecture

des enfants. Ma *et al.* [21] ont proposé un bracelet vibrotactile qui génère des mouvements apparents pour avertir et guider le conducteur en fonction de l'état de la route dans la voiture autonome. Park *et al.* [24] ont étend l'algorithme de [16] en créant une Sensation Fantôme basée sur trois vibreurs placés sur la paume de la main, ce qui a amélioré la perception de la trajectoire et la stabilité de la vitesse. Bien qu'il existe de nombreuses applications basées sur l'ATM, aucune étude dédiée à la représentation des directions n'a encore été menée, surtout dans le contexte des technologies d'assistance pour les PDV.

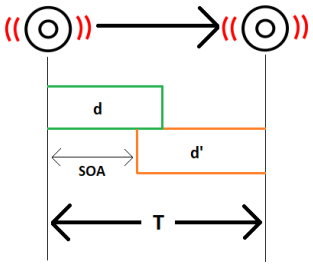

Figure 2. Chronogramme d'un mouvement tactile apparent. d et d' : les durées de vibration des vibreurs de départ et d'arrivée, T : le temps total du mouvement, SOA : intervalle de temps entre les deux stimuli. Cette stimulation donne la sensation d'une vibration qui se déplace entre les deux vibreurs.

Bilan de l'état-de-l'art

Sur la base de toutes ces études, notre objectif consistait à concevoir et évaluer des indices vibrotactiles sur le dos de la main, basés sur SVP et ATM, et permettant de transmettre l'information de direction d'un segment numérique. Le but final était de combler le manque d'indices tactiles pendant l'exploration des graphiques numériques et d'améliorer le temps et la performance d'exploration.

ESPACE DE CONCEPTION

Pour transmettre l'information directionnelle (8 directions cardinales), nous avons utilisé une matrice de quatre vibreurs sur la main. La raison principale pour choisir la main comme lieu de feedback repose sur les processus cognitifs impliqués dans le guidage de la main : si les indices tactiles sont appliqués sur d'autres parties du corps, l'utilisateur doit basculer mentalement du cadre de référence sensoriel (affichage tactile) au cadre de référence moteur (mouvement de la main). Avec l'affichage tactile fixé sur la main, ces deux cadres de référence se superposent. Ensuite, le dos de la main est généralement disponible et facile d'accès. En revanche, la paume est souvent en contact avec la surface en dessous, ce qui la rend moins adaptée pour connecter les capteurs car ils pourraient gêner l'exploration tactile des graphiques numériques. Nous avons aussi comparé plusieurs combinaisons de doigts stimulés. La proposition finale utilisant l'index et le pouce (ou l'index et l'annulaire) repose sur plusieurs observations : 1) le doigt spontanément utilisé pour suivre un segment numérique est l'index ; 2) en choisissant l'index et le pouce (ou l'index et l'annulaire), nous assurons une cohérence spatiale concernant la distance entre deux vibreurs.

De plus, l'utilisation de quatre vibreurs nous a permis de représenter huit directions et de ne pas dépasser la capacité optimale observée dans [12]. Afin de structurer les techniques d'interaction résultantes, nous avons articulé un espace de conception des retours vibratoires autour de trois variables :

1. **Disposition**. Cette variable représente la distribution spatiale des vibreurs sur la main. Nous avons utilisé deux dispositions courantes : la croix et le carré.

2. **Position**. Afin d'optimiser l'utilisation de l'espace disponible sur la main, nous avons utilisé deux positions différentes pour les vibreurs : sur le dos de la main et une combinaison entre le dos des doigts et le dos de la main. La Figure 3 montre les configurations résultantes en combinant la disposition et la position des vibreurs.

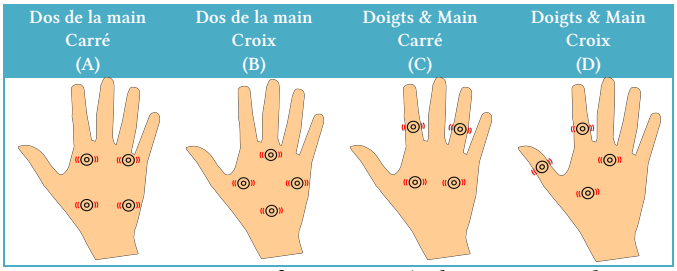

Figure 3. Les quatre configurations résultantes en combinant la disposition et la position des vibreurs.

3. **Méthode de stimulation**. Nous avons utilisé deux méthodes de stimulation vibrotactiles (SVP et ATM) permettant de donner des indices vibrotactiles dans huit directions.

La Figure 4 illustre la traduction des 8 directions possibles selon la disposition (carré ou croix) et la méthode de simulation (SVP ou ATM).

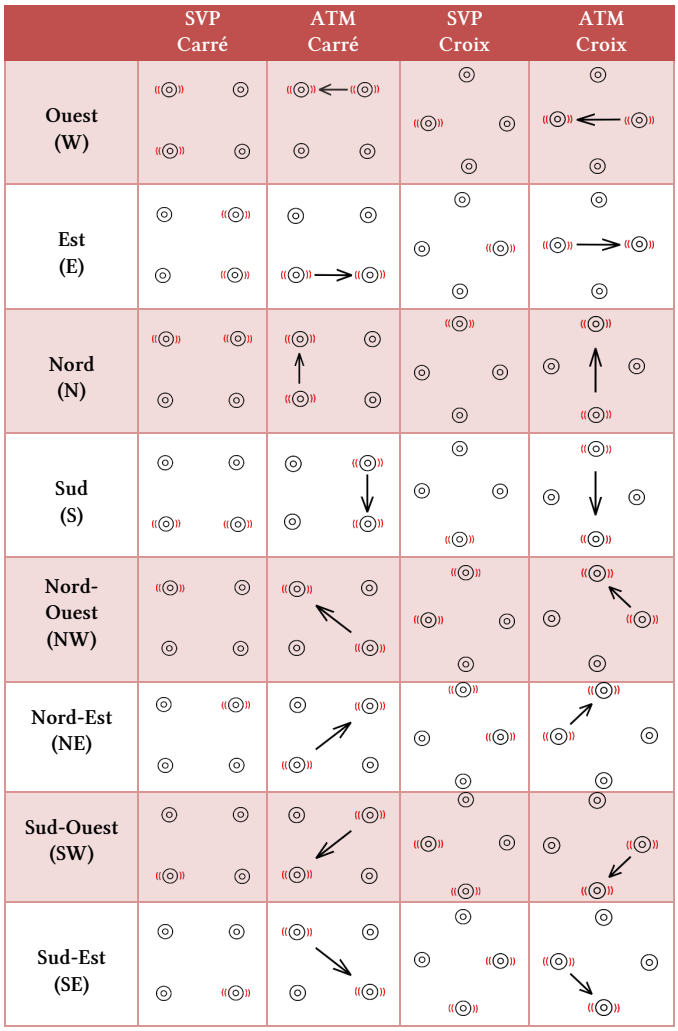

Figure 4. Illustration des 8 indices directionnels selon la disposition (carré ou croix) et la méthode de simulation (SVP ou ATM). La flèche illustre une perception de mouvement apparent entre deux vibreurs.

IMPLEMENTATION

Afin de mener nos expériences, nous avons développé un prototype dont nous détaillons ici les caractéristiques matérielles et logicielles.

Matériel

L'utilisation de gants est la solution la plus courante pour fixer des vibreurs sur la main [15,20]. Cependant, nous voulions évaluer les quatre configurations différentes (cf. Figure 3), ce qui nécessite de changer la position des vibreurs plusieurs fois pendant l'expérience. Aussi, nous avons décidé de ne pas utiliser ce type de gants. Inspirés par [23], nous avons collé les quatre vibreurs directement sur la peau. La Figure 5 montre le dispositif. Les vibreurs que nous avons utilisés sont du modèle RB-See-403, fabriqué par SeeedStudio. L'amplitude de vibration peut être contrôlée grâce à la modulation de largeur d'impulsion (PWM) d'une carte Arduino UNO. La relation entre la tension et l'amplitude étant linéaire autour de la plage de fonctionnement (2.5V à 3.5V), il est possible de modifier aisément l'amplitude.

Logiciel

Le dispositif était contrôlé par un programme Python qui nous permettait de changer facilement l'affichage vibrotactile. L'affichage de SVP était simple puisque tous les vibreurs peuvent être contrôlés indépendamment. L'affichage d'ATM a suivi les équations de [16]. Les valeurs d, d' et SOA étaient basées sur la durée totale de vibration T (dans notre cas, 200 ms), qui a été déterminée par notre étude pilote, comme expliqué dans la section suivante.

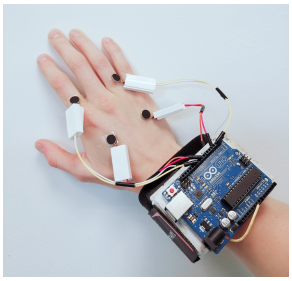

Figure 5 : Prototype vibrotactile sur la main.

ETUDE PILOTE : DUREE DE VIBRATION

Pour nous assurer que les indices vibrotactiles étaient efficaces et brefs, il était nécessaire de définir la durée optimale des vibrations. Nous avons donc mené une étude pilote pour étudier la relation entre la durée des vibrations et le taux de reconnaissance des indices avec les deux méthodes de stimulation. Nous avions pour objectif de trouver le seuil de durée le plus court permettant de reconnaître une vibration donnée avec le minimum d'erreurs.

Participants et tâches

Nous avons recruté 12 participants voyants de notre université (5 femmes et 7 hommes) âgés de 23 à 28 ans (M = 25, SD = 1,9). La tâche consistait à identifier 8 directions différentes avec les yeux bandés : nord, sud, ouest, est, nord-ouest, nord-est, sud-ouest et sud-est. La durée des indices vibrotactiles était variable (50 ms, 150 ms, 200 ms, 250 ms et 350 ms) et a été choisie selon deux critères : être supérieure ou égale aux durées perceptibles les plus courtes [19], et être la plus courte possible pour rendre la stimulation compatible avec un mouvement d'exploration d'un graphique numérique. Afin de garantir que le temps

d'expérience soit inférieur à une heure et puisse être représentatif, nous n'avons choisi que les configurations A et C. L'expérience a été séparée en deux blocs correspondant aux deux configurations. Pour chaque bloc, nous avons présenté aléatoirement les 8 directions avec les deux méthodes de stimulation et différentes durées. Pour chaque essai, la stimulation n'a été donnée qu'une seule fois et aucun retour n'a été donné aux participants. L'ordre de la méthode de stimulation et la durée ont été contrebalancés entre les utilisateurs. La durée totale de l'étude pilote était d'environ une heure.

Résultats

La Figure 6 montre que le taux moyen de reconnaissance des indices SVP et ATM (moyenne des deux configurations) atteint un plateau à partir d'une durée de 200 ms : en effet, le taux de reconnaissance atteint 83,9% à 200 ms pour SVP et 74,5% à 200 ms pour ATM. Nous avons donc pris cette valeur de 200 ms comme la durée totale de vibration, pour nos études suivantes.

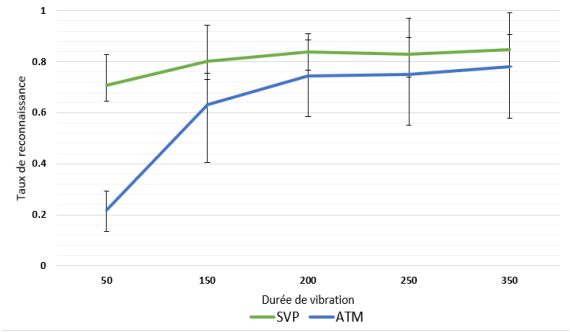

Figure 6. Taux de reconnaissance en fonction de la durée (en ms) des indices vibrotactiles pour SVP et ATM. Les barres d'erreur indiquent les intervalles de confiance à 95%.

PREMIERE ETUDE : RECONNAITRE UNE INFORMATION DIRECTIONNELLE

Les objectifs de cette étude étaient de déterminer la meilleure méthode de stimulation (SVP ou ATM) et la meilleure configuration des vibreurs (disposition et position) pour reconnaître des indices directionnels appliqués sur le dos de la main.

Participants et tâche

Nous avons recruté 16 participants voyants (6 femmes et 10 hommes) âgés de 21 à 31 ans (M = 25,1, SD = 2,7), sans déficience sensorielle ou motrice, dans notre laboratoire de recherche. Aucun de ces sujets n'avait participé à l'étude pilote. La tâche consistait à identifier la direction d'un stimulus vibrotactile appliqué sur la main, avec les yeux bandés, parmi les 8 directions cardinales possibles.

Plan d'expérience et procédure

Nous avons suivi un plan d'expérience intra-sujets 2 x 4 avec Méthode (SVP et ATM) et Configuration (A : Dos de la Main Carré, B : Dos de la Main Croix, C : Doigts-Main Carré et D : Doigts-Main Croix) comme facteurs (cf. Figure 3).

Suite aux résultats de l'étude pilote, nous avons utilisé des vibrations de 200 ms pour ATM et SVP. L'étude était composée de quatre blocs correspondant aux quatre configurations de vibreurs. L'ordre de ces blocs a été contrebalancé entre les utilisateurs en utilisant un carré latin. Pour chaque bloc, l'ordre des méthodes de stimulation (SVP ou ATM) a également été contrebalancé. Enfin, les huit directions ont été attribuées sur les différents essais en suivant un ordre aléatoire généré avant chaque bloc.

Avant chaque bloc de test, les participants se sont familiarisés avec la configuration des vibreurs et la méthode de stimulation correspondante. Pendant cette phase de familiarisation, les participants devaient reconnaître des stimuli générés dans les huit directions. L'expérimentateur donnait un feedback verbal (vrai ou faux, et la réponse correcte si faux) sur la direction du stimulus, et les participants pouvaient recommencer jusqu'à ce qu'ils soient confiants (ils pouvaient demander de répéter plusieurs fois le stimulus).

Durant la phase de test, les participants devaient reconnaître la direction du stimulus, à chaque essai, aussi vite que possible. Ils n'avaient le droit qu'à une seule réponse, et ne recevaient aucun retour. Les huit directions ont été répétées trois fois de manière aléatoire. Le nombre total d'essais était : 16 Participants * 2 Méthodes * 4 Configurations * 8 Directions * 3 Répétitions = 3 072.

Afin d'éviter un effet potentiel dû aux indices acoustiques ou visuels générés par les vibreurs, tous les participants devaient porter un casque diffusant du bruit blanc et mettre la main dans une boîte.

Variables mesurées

Nous avons mesuré le taux de reconnaissance pour chaque configuration. Nous avons également évalué la préférence des utilisateurs en demandant quelle est la méthode de stimulation qu'ils ont préféré à la fin de chaque bloc (efficacité subjective et satisfaction globale) et aussi quelle est la configuration qu'ils ont préféré à la fin de l'expérience (efficacité subjective et satisfaction globale).

Résultats

Le test de Shapiro-Wilk que nous avons effectué a montré que les taux de reconnaissance ne suivent pas une distribution normale ($p < .05$). Nous avons donc effectué un test de Friedman qui a montré une différence significative des taux en fonction des configurations ($X^2 = 59,7$; $p < .001$). Nous avons finalement utilisé des tests post-hoc (Wilcoxon Signed-Ranks pour Paired Samples) avec la correction de Bonferroni, qui ont révélé que pour chaque configuration, SVP est toujours statistiquement meilleur qu'ATM.

La Figure 7 illustre le taux de reconnaissance moyen en fonction des configurations. Elle montre que SVP a toujours une supériorité sur ATM, en particulier avec la configuration C qui a obtenu une précision de 92,7%. En détail, les taux de reconnaissance par configuration sont les suivants (SVP vs. ATM) : A (82,3% vs. 71,1%) ; B (76,0% vs. 66,4%) ; C (92,7% vs. 75,8%) et D (81,8% vs. 66,4%).

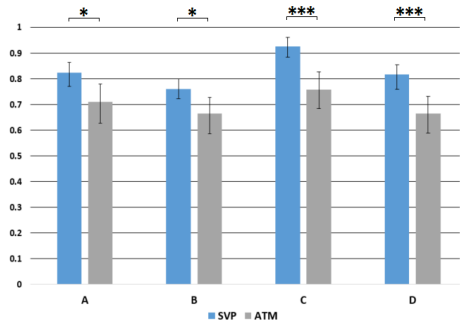

Figure 7. Taux de reconnaissance en fonction des configurations. Les barres d'erreur indiquent les intervalles de confiance à 95%. Les barres supérieures indiquent la significativité statistique (* < 0.05 ; * < 0.001).**

Pour illustrer les erreurs commises en fonction des directions, nous avons également calculé la matrice de confusion pour chaque configuration. Les Figures 8 et 9 montrent les distributions des réponses pour les 8 directions, avec les méthodes SVP et ATM respectivement.

L'observation de la Figure 8 sur la méthode SVP nous indique qu'avec la disposition carré (configuration A et C), les participants ont souvent confondu la direction N (Nord) et E (Est), avec en moyenne 19,7% de confusion. Avec la disposition en croix (configuration B et D), nous observons des confusions entre S (Sud) et soit N (Nord) soit E (Est), avec respectivement des moyennes d'erreurs de 23,8% et 11,6%.

Les matrices de confusion de la Figure 9 montrent quant à elles que les erreurs avec ATM, en plus d'être nombreuses (30,3% avec ATM vs. 17% avec SVP en fonction de confusion moyenne), sont plus distribuées entre les différentes directions. Les participants, peut-être moins confiants dans la direction ressentie, semblent donner une réponse plus aléatoire qu'avec SVP. Nous observons que les confusions les plus courantes sont en utilisant la disposition croix (configurations B et D), avec principalement des erreurs sur les directions S (Sud), W (Ouest) et NW (Nord-Ouest).

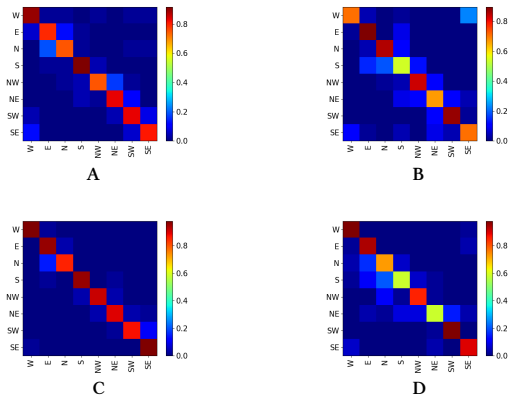

Figure 8. Matrices de confusion avec SVP pour chaque configuration. (L'axe vertical représente les réponses souhaitées)

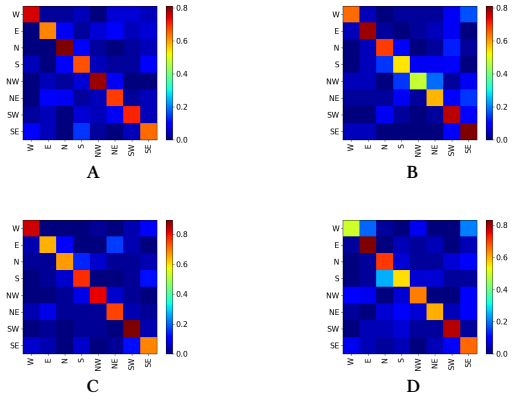

Figure 9. Matrices de confusion avec ATM pour chaque configuration. (L'axe vertical représente les réponses souhaitées)

En cohérence avec les taux de reconnaissance, les préférences subjectives ont montré que 8 participants sur 16 ont préféré la configuration C, et que 9 participants sur 16 ont pensé qu'elle était plus efficace pour représenter les directions (Figure 10). Il est également intéressant de noter qu'il y avait une différence de préférence entre les méthodes de stimulation : 12 participants sur 16 ont pensé que SVP était plus efficace et 10 participants ont préféré SVP globalement (Figure 11). Bien que 2 participants aient

préféré ATM, ils ont obtenu de meilleurs résultats avec SVP.

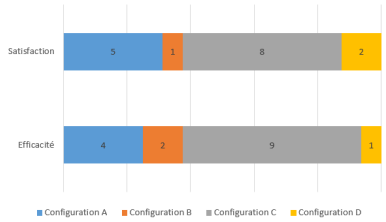

Figure 10. Efficacité subjective et satisfaction pour les quatre configurations. (N=16)

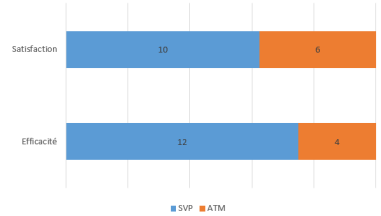

Figure 11. Efficacité subjective et satisfaction pour les deux méthodes de stimulation. (N=16)

SECONDE ETUDE : EXPLORER ET IDENTIFIER DES GRAPHIQUES GEOMETRIQUES ET NON-FIGURATIFS

Le but de cette expérience comportementale était de vérifier l'hypothèse générale selon laquelle les indices vibrotactiles directionnels améliorent les performances d'exploration et l'identification des graphiques numériques chez les personnes ayant une déficience visuelle. Cette expérience est toujours en cours et nous présentons ici les résultats préliminaires.

Participants

Nous avons recruté 6 participants ayant une déficience visuelle (PDV, 3 femmes et 3 hommes) âgés de 25 à 59 ans (M = 45,8 SD = 10,5) auprès de centres locaux d'éducation spécialisée. Aucun des PDV ne souffrait d'une déficience sensorielle ou cognitive associée.

Tableau 1. Description des participants

ID	Genre	Age	Description
DV1	M	27	Ingénieur, aveugle à 12 ans
DV2	M	54	Enseignant, aveugle à 12 ans
DV3	F	59	Enseignante, aveugle à la naissance
DV4	M	59	Ingénieur, aveugle à 6 ans
DV5	F	52	Enseignante, très basse vision depuis la naissance
DV6	F	25	Etudiante, très basse vision depuis la naissance

Tâche

Nous avons utilisé une tâche de type *Delayed-Matching-to-Sample (DMTS)* [9], qui consiste à comparer des paires de stimuli, et qui est largement utilisée dans les études de mémoire. Dans notre cas, nous avons demandé aux participants d'explorer et de comparer des paires de graphiques numériques composés de plusieurs segments (voir Figure 12). Plus précisément, pour chaque essai, le participant a d'abord exploré un stimulus « modèle », puis un stimulus « test » après un délai de 5 secondes. Lors de l'exploration du graphique test, le sujet devait prendre la décision (identique ou différent) aussi vite que possible. Par conséquent, l'exploration du graphique test n'était pas toujours complète. Nous avons demandé aux sujets d'explorer le modèle et le test aussi rapidement et précisément que possible.

Graphiques numériques

Les graphiques numériques étaient de deux types (Figure 12) : les formes géométriques (4 segments) et les formes non-figuratives (6 segments). Les formes non-figuratives sont théoriquement plus difficiles à reconnaître car elles ne correspondent à aucune forme connue.

Formes Géométriques : ces graphiques numériques sont des formes géométriques communes qui ont été sélectionnées selon trois critères : 1) Même complexité : tous les graphiques sélectionnés ont le même nombre de segments ; 2) Similaires : afin de concevoir une tâche DMTS qui ne soit pas trop simple, toutes les paires de graphiques ont au moins deux segments identiques (mais les sujets n'étaient pas au courant) ; 3) Communément utilisées : tous les graphiques sont connus pour les utilisateurs. Les stimuli utilisés comprenaient quatre quadrilatères : carré, rectangle, trapèze et parallélogramme.

Formes Non-figuratives : ces graphiques numériques sont des formes 2-D composées d'une combinaison de six segments (deux horizontaux, deux verticaux et deux obliques). Comme les formes géométriques, les paires étaient identiques ou similaires. Des paires similaires correspondent à des graphiques qui commencent avec les trois mêmes segments puis diffèrent sur un des segments suivants. Les sujets n'en étaient pas informés.

Techniques d'Interaction

Pour montrer que les indices directionnels vibrotactiles peuvent améliorer l'exploration tactile des graphiques numériques, cette étude a été conçue comme une étude

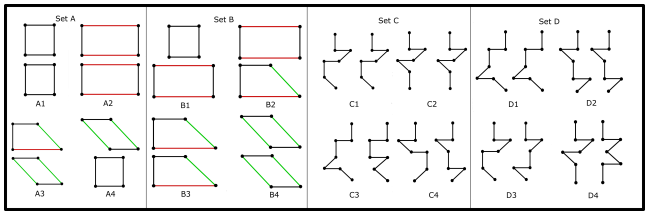

Figure 12. Sets A et B : paires de graphiques géométriques. Sets C et D : paires de graphiques non-figuratifs

comparative : nous avons comparé notre technique avec l'exploration tactile proposée par Tekli *et al.* [31]. Dans leur dispositif, la vibration de la tablette est déclenchée et reste active tant que le doigt reste en contact avec un segment du graphique numérique. Notre technique repose sur le même principe, auquel nous avons ajouté des indices de direction et de progression. En effet, la direction du segment est indiquée au début de chaque segment et l'indice de direction était répété deux fois (40% et 80% du segment) afin d'informer sur la longueur du segment.

Plan d'expérience et procédure

Nous avons suivi un plan d'expérience intra-sujets avec deux facteurs : la technique d'interaction (avec / sans indices vibrotactiles sur la main) et le type de graphiques (géométriques et non-figuratifs). Les deux types de graphiques ont été testés avec les deux techniques de façon pseudo-aléatoire, par bloc (bloc 1 : technique SVP ; bloc 2 : technique ATM). Pour éviter un effet d'ordre ou d'apprentissage, l'ordre des blocs était contrebalancé entre les sujets. Chaque bloc était composé de deux phases : familiarisation et test. Pendant la phase de familiarisation, les participants devaient identifier les huit directions représentées afin de se familiariser avec la technique ; puis devaient explorer des segments numériques (horizontaux, verticaux, obliques) sur une tablette. Ils pouvaient répéter les essais autant de fois qu'ils voulaient. Pendant la phase de test, les participants ont d'abord exploré les graphiques géométriques puis, ensuite, les graphiques non-figuratifs (ordre de difficulté croissante).

Dispositif expérimental

Ici, nous avons utilisé le même prototype que pour l'étude précédente et ajouté une tablette Samsung Galaxy Tab S4 (10,5 pouces, 1600*2560 px, 287 ppi) pour afficher les graphiques numériques. Pendant l'expérience, les participants étaient confortablement assis devant la tablette.

Variables mesurées

Nous avons enregistré le chemin du doigt pendant l'exploration de chaque graphique. Nous avons calculé la vitesse moyenne d'exploration (en cm/s) et le taux d'identification des paires. Au total, nous avons collecté 6 sujets * 2 techniques (tablette vs. tablette + indices) * 2 types de graphiques * 4 répétitions = 96 essais.

Résultats

Le nombre de participants étant encore trop réduit, nous reportons les résultats avec les intervalles de confiance, sans faire de statistiques inférentielles. Les vitesses moyennes d'exploration des graphiques géométriques avec et sans indices sont respectivement de 0,64 cm/s (IC [0,53, 0,77]) et 0,49 cm/s (IC [0,41, 0,62]). Pour les graphiques non-figuratifs, elles sont de 0,73 cm/s (IC [0,63, 0,85]) et 0.46 cm/s (IC [0,40, 0,51]) respectivement (Figure 13). Il est important de noter que pour tous les participants, l'exploration avec les indices vibrotactiles est plus rapide. Les taux d'identification pour les paires géométriques avec et sans indices sont de 75% (IC [45,8%, 87,5%]) et 70.8% (IC [45,8%, 83,3%]) respectivement. Pour les graphiques non-figuratifs, ils sont de 83.3% (IC [58,3%, 91,7%]) et 54.1% (IC [29,2%, 70,8%]) respectivement. La performance avec les indices directionnels vibrotactiles sur la main est donc toujours meilleure. Concernant les retours qualitatifs basés sur une échelle de Likert à cinq points, les six PDV étaient d'accord ou tout à fait d'accord pour dire que les indices directionnels vibrotactiles étaient faciles à utiliser et facilitaient beaucoup l'exploration des graphiques numériques sur la tablette. De plus, les verbatims enregistrés pendant l'expérience permettent de comprendre la sensation des participants. Par exemple, le participant 4 a dit « *Je comprends ! Je sais maintenant comment traduire les vibrations et c'est cool !* ».

DISCUSSION

Choix des indices vibrotactiles et amélioration de l'exploration

En accord avec les travaux de [8,12], nos résultats ont validé l'efficacité des indices vibrotactiles pour transmettre des informations directionnelles. De plus, ils montrent que la configuration la plus efficace pour représenter les directions sur la main est une matrice vibrotactile positionnée sur les doigts et le dos de la main en forme de carré. Enfin, la comparaison entre les deux méthodes de stimulation montre qu'il existe une différence : SVP offrant un taux de reconnaissance plus élevé que ATM. Une explication possible à l'efficacité de SVP par rapport à ATM peut tenir à la simplicité de cette stimulation, qui requiert moins d'efforts cognitifs.

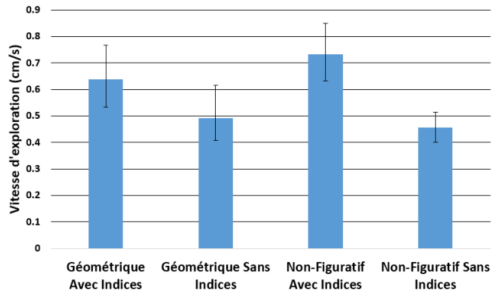

Figure 13. Vitesse moyenne d'exploration pour chaque condition. Les barres d'erreur indiquent les intervalles de confiance à 95%.

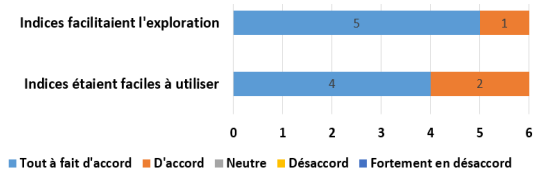

Figure 14. Retours qualitatifs de PDV sur les indices directionnels.

Concernant l'exploration de graphiques numérique, notre observation des résultats montre qu'elle est plus rapide et plus efficace (meilleur taux d'identification) avec les indices directionnels sur le dos de la main. Ces observations devront être confirmées par des statistiques inférentielles lorsqu'il y aura plus de sujets.

Limitations et travaux futurs

Le dispositif actuel permet de représenter huit directions cardinales. Par conséquent, il n'est utilisable qu'avec des graphiques simplifiés, ce qui est en général le cas avec les graphiques en relief utilisés par les PDV. Par exemple, dans centre spécialisé avec lequel on collabore, une carte fréquente est la carte de quartier. L'enseignement se base généralement sur les huit directions cardinales. Cette stimulation est également applicable pour les cartes géographiques qui simplifient souvent les contours complexes. Fournir plus de directions pourrait donner accès à des graphiques plus complexes, mais compliquera probablement la tâche d'exploration et augmentera la charge cognitive. Dans l'avenir, nous explorerons cette possibilité en intégrant des illusions tactiles plus fiables. Nous utiliserons alors des indices hybrides combinant SVP et ATM.

Applications

Lors de notre analyse des besoins dans un centre spécialisé pour jeunes déficients visuels, il est apparu que de nombreux types de graphiques incluant les cartes géographiques, les plans de quartier, les graphes mathématiques, sont utilisés quasiment quotidiennement dans les classes d'histoire, de géographie, de sciences, etc., mais aussi au cours des leçons en orientation et mobilité. En général, ces graphiques sont produits par le service d'adaptation des documents, sur un papier spécial (thermogonflant) avec des lignes en relief. Evidemment, de nombreuses personnes ayant une déficience visuelle nous ont confirmé qu'elles aimeraient avoir accès à des cartes et des plans dans de nombreuses situations quotidiennes (à la maison, en mobilité dans un bâtiment public ou dans un quartier inconnu, etc.), ce qui est très compliqué puisqu'on ne peut pas produire les graphiques en relief à la volée.

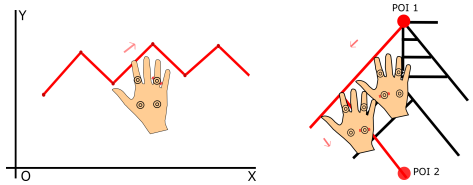

Figure 15. Un utilisateur explore un graphique mathématique (gauche) et un chemin entre deux points d'intérêt (POI) avec des indices directionnels vibrotactiles sur la main.

La Figure 15 illustre deux graphiques numériques illustrant un graphe mathématique et un plan de quartier simplifié. Tekli *et al.* [31] ont montré qu'il était possible d'explorer de tels graphiques numériques en s'appuyant sur la vibration de la tablette. Nos résultats montrent qu'on pourrait accélérer et faciliter l'exploration manuelle en fournissant des indices vibrotactiles concernant la direction des segments explorés.

CONCLUSION

Notre étude a confirmé l'intérêt des indices vibrotactiles, et notamment en utilisant une configuration en carré des vibreurs sur l'index, l'annulaire et le dos de la main, pour transmettre une information directionnelle. Les résultats ont montré un taux de reconnaissance de 92,7% et une très bonne satisfaction des utilisateurs pour la technique SVP utilisée dans cette configuration. Dans le cadre applicatif qui est le nôtre (l'exploration non-visuelle de graphiques numériques), nous suggérons que ces indices peuvent être utilisés pour faciliter l'exploration de différents types de graphiques numériques.

REMERCIEMENTS

Nous remercions tous les participants, le laboratoire « Cherchons pour Voir » et aussi China Scholarship Council.

REFERENCES

[1] Jérémy Albouys-Perrois, Jérémy Laviole, Carine Briant, and Anke M. Brock. 2018. Towards a Multisensory Augmented Reality Map for Blind and Low Vision People: a Participatory Design Approach. In Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18). ACM, New York, NY, USA, Paper 629, 14 pages. DOI: https://doi.org/10.1145/3173574.3174203

[2] David S. Alles. 1970. Information Transmission by Phantom Sensations. IEEE Trans. Man-Machine Syst. 11, 1 (1970), 85–91. DOI:https://doi.org/10.1109/TMMS.1970.299967

[3] Jessalyn Alvina, Shengdong Zhao, Simon T. Perrault, Maryam Azh, Thijs Roumen, and Morten Fjeld. 2015. OmniVib: Towards Cross-body Spatiotemporal Vibrotactile Notifications for Mobile Phones. In Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '15). ACM, New York, NY, USA, 2487-2496. DOI: https://doi.org/10.1145/2702123.2702341

[4] Sandra Bardot, Marcos Serrano, and Christophe Jouffrais. 2016. From tactile to virtual: using a smartwatch to improve spatial map exploration for visually impaired users. In Proceedings of the 18th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services (MobileHCI '16). ACM, New York, NY, USA, 100-111. DOI: https://doi.org/10.1145/2935334.2935342

[5] Sandra Bardot, Marcos Serrano, Bernard Oriola, and Christophe Jouffrais. 2017. Identifying how Visually Impaired People Explore Raised-line Diagrams to Improve the Design of Touch Interfaces. In Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '17). ACM, New York, NY, USA, 550-555. DOI: https://doi.org/10.1145/3025453.3025582

[6] Anke Brock, Samuel Lebaz, Bernard Oriola, Delphine Picard, Christophe Jouffrais, and Philippe Truillet. 2012. Kin'touch: understanding how visually impaired people explore tactile maps. In CHI '12 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '12). ACM, New York, NY, USA, 2471-2476. DOI: https://doi.org/10.1145/2212776.2223821

[7] Angela Chang, Sile O'Modhrain, Rob Jacob, Eric Gunther, and Hiroshi Ishii. 2002. ComTouch: design of a vibrotactile communication device. In Proceedings of the 4th conference on Designing interactive systems: processes, practices, methods, and techniques (DIS '02). ACM, New York, NY, USA, 312-320. DOI=http://dx.doi.org/10.1145/778712.778755

[8] Qin Chen, Simon T. Perrault, Quentin Roy, and Lonce Wyse. 2018. Effect of temporality, physical activity and cognitive load on spatiotemporal vibrotactile pattern recognition. In Proceedings of the 2018 International Conference on Advanced Visual Interfaces (AVI '18). ACM, New York, NY, USA, Article 25, 9 pages. DOI: https://doi.org/10.1145/3206505.3206511

[9] Picard Delphine, Samuel Lebaz, Christophe Jouffrais, and Catherine Monnier. "Haptic recognition of two-dimensional raised-line patterns by early-blind, late-blind, and blindfolded sighted adults." Perception 39, no. 2 (2010): 224-235.

[10] Julie Ducasse, Anke M Brock, and Christophe Jouffrais. 2018. Accessible Interactive Maps for Visually Impaired Users. In Mobility of Visually Impaired People. Springer, 537–584. DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-319-54446-5_17

[11] Julie Ducasse, Marc J-M Macé, Marcos Serrano, and Christophe Jouffrais. 2016. Tangible Reels: Construction and Exploration of Tangible Maps by Visually Impaired Users. In Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '16). ACM, New York, NY, USA, 2186-2197. DOI: https://doi.org/10.1145/2858036.2858058

[12] Don Samitha Elvitigala, Denys J. C. Matthies, Vipula Dissanayaka, Chamod Weerasinghe, and Suranga Nanayakkara. 2019. 2bit-TactileHand: Evaluating Tactons for On-Body Vibrotactile Displays on the Hand and Wrist. In Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference 2019 (AH2019). ACM, New York, NY, USA, Article 3, 8 pages. DOI: https://doi.org/10.1145/3311823.3311832

[13] Daniel Goldreich, and Jonathan Tong. Prediction, postdiction, and perceptual length contraction: a Bayesian low-speed prior captures the cutaneous rabbit and related illusions. Frontiers in psychology 4 (2013): 221.

[14] Cagatay Goncu and Kim Marriott. 2011. GraVVITAS: Generic Multi-touch Presentation of Accessible Graphics. In Proceedings of the 13th IFIP TC 13 Conference on Human-Computer Interaction (INTERACT '11), 30–48. DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-642-23774-4

[15] Sebastian Günther, Florian Müller, Markus Funk, Jan Kirchner, Niloofar Dezfuli, and Max Mühlhäuser. 2018. TactileGlove: Assistive Spatial Guidance in 3D Space through Vibrotactile Navigation. In Proceedings of the 11th PErvasive Technologies Related to Assistive Environments Conference (PETRA '18). ACM, New York, NY, USA, 273-280. DOI: https://doi.org/10.1145/3197768.3197785

[16] Ali Israr and Ivan Poupyrev. 2011. Tactile brush: drawing on skin with a tactile grid display. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '11). ACM, New York, NY, USA, 2019-2028. DOI: https://doi.org/10.1145/1978942.1979235

[17] R.D. Jacobson. 1998. Navigating maps with little or no sight: An audio-tactile approach. Proceedings of Content Visualization and Intermedia

[18] Jacob H. Kirman. 1983. Tactile apparent movement: The effects of shape and type of motion. Perception & Psychophysics. 34, 1 (1983), 96–102. DOI:https://doi.org/10.3758/BF03205902

[19] Hoshiyama, Minoru, Ryusuke Kakigi, and Yohei Tamura. Temporal discrimination threshold on various parts of the body. Muscle & Nerve: Official Journal of the American Association of Electrodiagnostic Medicine 29, no. 2 (2004): 243-247.

[20] Sreekar Krishna, Shantanu Bala, Troy McDaniel, Stephen McGuire, and Sethuraman Panchanathan. 2010. VibroGlove: an assistive technology aid for conveying facial expressions. In CHI '10 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '10). ACM, New York, NY, USA, 3637-3642. DOI: https://doi.org/10.1145/1753846.1754031

[21] Zhuoluo Ma, Yue Liu, Dejiang Ye, and Lu Zhao. 2019. Vibrotactile Wristband for Warning and Guiding in Automated Vehicles. In Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '19). ACM, New York, NY, USA, Paper LBW2220, 6 pages. DOI: https://doi.org/10.1145/3290607.3312819

[22] Anita Meier, Denys J. C. Matthies, Bodo Urban, and Reto Wettach. 2015. Exploring vibrotactile feedback on the body and foot for the purpose of pedestrian navigation. In Proceedings of the 2nd International Workshop on Sensor-based Activity Recognition and Interaction, ACM, 1–11. DOI:https://doi.org/10.1145/2790044.2790051

[23] Giulio Mori, Fabio Paternò, and Carmen Santoro. 2018. Towards understanding the usability of vibrotactile support for indoor orientation. In Proceedings of the 2018 International Conference on Advanced Visual Interfaces (AVI '18). ACM, New York, NY, USA, Article 76, 3 pages. DOI: https://doi.org/10.1145/3206505.3206584

[24] Jaeyoung Park, Jaeha Kim, Yonghwan Oh, and Hong Z Tan. 2016. Rendering moving tactile stroke on the palm using a sparse 2d array. In International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications. Springer, Cham, 47-56. DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-319-42324-1

[25] Thomas Pietrzak, Andrew Crossan, Stephen A. Brewster, Benoît Martin, and Isabelle Pecci. 2009. Exploring Geometric Shapes with Touch. In: Gross T. et al. (eds) Human-Computer Interaction – INTERACT 2009. INTERACT 2009. Lecture Notes in Computer Science, vol 5726. Springer, Berlin, Heidelberg, https://doi.org/10.1007/978-3-642-03655-2_18

[26] Thomas Pietrzak, Andrew Crossan, Stephen A. Brewster, Benoit Martin, and Isabelle Pecci. 2009. Creating Usable Pin Array Tactons for Nonvisual Information. IEEE Transactions on Haptics, 2(2), pp. 61-72

[27] Anil K. Raj, Steven J. Kass, and James F. Perry. 2012. Vibrotactile Displays for Improving Spatial Awareness. In Proceedings of the

Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. Sage CA: Los Angeles, 44, 1 (2012), 181–184. DOI:https://doi.org/10.1177/154193120004400148

[28] Jose V. Salazar Luces, Keisuke Okabe, Yoshiki Murao, and Yasuhisa Hirata. 2018. A Phantom-Sensation Based Paradigm for Continuous Vibrotactile Wrist Guidance in Two-Dimensional Space. IEEE Robotics and Automation Letters. 3, 1 (2018), 163–170. DOI:https://doi.org/10.1109/LRA.2017.2737480

[29] Choi Seungmoon, and Katherine J. Kuchenbecker. "Vibrotactile display: Perception, technology, and applications." Proceedings of the IEEE 101, no. 9 (2012): 2093-2104

[30] Brewster Stephen, and Lorna M. Brown. "Tactons: structured tactile messages for non-visual information display." In Proceedings of the fifth conference on Australasian user interface Volume 28, pp. 15-23. Australian Computer Society, Inc., 2004.

[31] Joe Tekli, Youssef Bou Issa, and Richard Chbeir. 2018. Evaluating touch-screen vibration modality for blind users to access simple shapes and graphics. *International Journal of Human-Computer Studies* 110, August 2017 (2018), 115–133. DOI:https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2017.10.009

[32] Steven A. Wall and Stephen A. Brewster. 2006. Tac-tiles: multimodal pie charts for visually impaired users. In Proceedings of the 4th Nordic conference on Human-computer interaction: changing roles (NordiCHI '06),. ACM, New York, NY, USA, 9-18. DOI: https://doi.org/10.1145/1182475.1182477

[33] Zheshen Wang, Baoxin Li, Terri Hedgpeth, and Teresa Haven. 2009. Instant tactile-audio map: enabling access to digital maps for people with visual impairment. In Proceedings of the 11th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility (Assets '09). ACM, New York, NY, USA, 43-50. DOI: https://doi.org/10.1145/1639642.1639652

[34] Nesra Yannier, Ali Israr, Jill Fain Lehman, and Roberta L. Klatzky. 2015. FeelSleeve: Haptic Feedback to Enhance Early Reading. In Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '15). ACM, New York, NY, USA, 1015-1024. DOI: https://doi.org/10.1145/2702123.2702396

[35] Koji Yatani, Nikola Banovic, and Khai Truong. 2012. SpaceSense: representing geographical information to visually impaired people using spatial tactile feedback. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '12). ACM, New York, NY, USA, 415-424. DOI: https://doi.org/10.1145/2207676.2207734

[36] Koji Yatani and Khai Nhut Truong. 2009. SemFeel: a user interface with semantic tactile feedback for mobile touch-screen devices. In Proceedings of the 22nd annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '09). ACM, New York, NY, USA, 111-120. DOI: https://doi.org/10.1145/1622176.1622198