

Travail de recherche sur la stimulation sensorielle par implants magnétiques



Présentation du stage recherche

Master *Sciences et Technologies*,
Mention *Informatique*,
Parcours IMAGINA

Auteur

Axel Fougues

Superviseurs

Abderrahmane Kheddar
Souhila Kaci

Lieu de stage

LIRMM UM5506 - CNRS, Université de Montpellier

Résumé

Pour ce stage de deuxième année de master, nous nous intéressons à la stimulation d'implants magnétiques sous-cutanés en tant qu'interface homme-machine en particulier dans le domaine du retour haptique. Les implants magnétiques sous-cutanés existent depuis plusieurs années et sont quasi-exclusivement utilisés dans le but de ressentir les champs magnétiques proches. Les petits aimants vibrent en présence d'un champ magnétique, stimulant les mécanorecepteurs du toucher environnants.

Dans un premier temps, nous expliquons le principe de base et le procédé d'implantation d'un SMI et nous examinerons les recherches précédentes sur leur sensibilité à une stimulation externe. Nous comparons ensuite notre idée aux appareils de retour haptique existants afin d'en déduire les points forts et les défauts de cette technologie. Enfin, nous explorons les pistes les plus prometteuses qui tireront au mieux profit de notre idée de départ.

Abstract

In the context of this masters thesis we will be experimenting with the stimulation of sub-dermal magnetic implants as a human-machine interface especially in the field of haptic feedback. Subdermal magnetic implants have existed for years and have mainly been used for giving the user the ability to sense nearby magnetic fields as the small magnets vibrate in proximity to the mechanoreceptors of touch.

In first place we will be explaining the functionality and implantation procedure of SMIs as well as examining the existing research on their sensitivity to external stimulation. We will also compare our idea to the existing haptic feedback devices in order to deduce the key advantages and disadvantages of the technology. Finally we will cover the most interesting leads to take full advantage of wireless SMI stimulation.

Table des matières

Introduction

De nos jours, l'interaction homme-machine se base presque intégralement sur les perceptions audio et visuelles par le biais d'écrans et de haut-parleurs. Pourtant, le corps humain est capable de percevoir l'information de multiples manières et avec l'émergence du biohacking et la démocratisation de la modification corporelle, il semble logique de se demander si ces nouvelles pratiques peuvent engendrer de nouvelles modalités d'interaction avec le monde du numérique. Ce stage est fondé sur des travaux de recherche et de développement personnels menés depuis 2019, étudiant la possibilité d'utiliser de petits implants magnétiques sous-cutanés comme une nouvelle entrée d'information artificielle du corps humain. Ces implants sont généralement implantés dans le bout des doigts pour donner à l'utilisateur un "sixième sens" : la capacité de percevoir les champs magnétiques. En effet sous l'effet d'un champ magnétique, un aimant est soumis à des forces qui dans notre cas vont stimuler les terminaisons sensorielles environnantes permettant ainsi à la personne implantée de "toucher" les champs magnétiques du bout des doigts. Les champs magnétiques étant facilement créés et manipulés, on ne peut s'empêcher d'imaginer une multitude de potentielles applications impliquant la stimulation artificielle volontaire de ces implants.

1.1 Glossaire

Un implant **sous-cutané** est placé dans la couche la plus profonde de la peau (1.5 à 2 mm), l'hypoderme, qui est principalement constitué de graisse.

Les **mecanorécepteurs** du toucher désignent les terminaisons nerveuses sensorielles présentes dans la peau et répondant à la déformation et à la vibration de celle-ci. Il existe 4 types regroupés en deux catégories, ceux à adaptation lente et ceux à adaptation rapide.

Un **SMI**, raccourci pour Subdermal Magnetic Implant ou implant magnétique sous-cutané.

M31 est le nom commun donné aux implants magnétiques les plus répandus (disque d'environ 3 mm de diamètre sur 1 mm d'épaisseur).

Le **biohacking** est un mouvement regroupant une grande variété de pratiques, toutes visant à améliorer ou modifier le vivant artificiellement. Le mouvement prône la popularisation de la recherche scientifique et regroupe aussi bien des biologistes que des informaticiens ou des nutritionnistes (amateurs ou professionnels).

En Science des Matériaux, la **biocompatibilité** désigne la capacité des matériaux à ne pas interférer avec le milieu biologique dans lequel ils sont utilisés.

Contextualisation des SMI

2.1 Conception d'un implant magnétique

Forme

L'implant étant placé sous la peau, il doit bien sur être petit. Le deuxième critère influant sur la dimension choisie est l'influence de la masse d'un objet sur la quantité d'énergie nécessaire pour le déplacer. En effet plus un aimant est de petite taille (et par conséquent moins massif) plus il sera facilement déplacé par des champs de faible intensité.

L'implant étant placé dans un milieu délicat, il est préférable d'éviter les creux et les coins afin d'éviter tout pincement ou frottement avec l'anatomie environnante. Cependant, sa rotation doit pouvoir provoquer une déformation des tissus environnants éliminant définitivement la sphère. Généralement, c'est une forme de disque qui est choisie, avec un pôle sur chaque face. Le M31 (petit disque de 3*1 mm) c'est imposé comme standard car il est facilement disponible sur le marché.

Force

L'impact d'un champ sur l'aimant est aussi défini par la force de l'aimant lui-même. Pour cette application, nous utilisons donc le type d'aimant permanent disponible le plus fort, le néodyme N52.

Revêtement

Le néodyme (tout comme la majorité des matériaux) n'est malheureusement pas bio-compatible et requiert un revêtement. Il s'agit là de la principale problématique en conception de SMIs, car le ratio masse non magnétique/masse totale doit à tout prix être minimisé afin d'optimiser le système. Le revêtement doit donc être le plus fin possible tout en garantissant une longue durée de vie face à l'usure. Avec contraintes de fabrication actuelles, les options envisageables sont les suivantes : silicone, verre, parylène et plus récemment en titane. Chacun ayant des avantages et des défauts inhérents.



FIGURE 2.1 : Image d'un des SMI les plus répandus (m31)

2.2 Processus d'implantation et choix de l'emplacement

Emplacement

Afin d'optimiser le ressenti, l'implant doit être posé dans une zone ayant une forte densité de terminaisons nerveuses sensorielles. Il se trouve que la zone du corps humain ayant la plus forte densité est la main en particulier le bout des doigts ce qui est aussi pratique lors de l'utilisation.

Initialement, ce type d'implant était placé dans le bout du doigt opposé à l'ongle comme on peut le voir dans [?]. Cependant, les pratiques ont depuis évolué et l'on préfère de nos jours le côté du doigt de manière à éviter les désagréments au quotidien (pincement de l'implant entre l'os et un objet tenu).

Implantation

L'opération de pose est relativement courte et peu intrusive car superficielle. Premièrement, une petite incision est faite sur le flanc du doigt puis à l'aide d'un petit outil, la peau est décollée de manière à former une poche de taille un peu supérieure à celle de l'implant. L'implant y est glissé et un point de suture optionnel peut être fait.

Dans de bonnes circonstances, le doigt peut à nouveau être utilisé normalement au bout d'une semaine. Cependant, l'encapsulation (reconstruction des tissus autour de l'implant) peut prendre de 3 à 6 mois. Ce n'est qu'au bout de cette période que l'implant sera le plus sensible.

2.3 Stimulation artificielle

La stimulation se fait par la création d'un champ magnétique autour de l'implant. Pour cela, nous utilisons un ou plusieurs électro-aimants. Il est ensuite possible de varier les paramètres suivants afin de varier le ressenti :

- La puissance du champ ou amplitude du signal.
- La nature du signal : sinusoïde, signal complexe, continu, etc.



FIGURE 2.2 : Image aux rayons-x de la main droite d’Axel (16/10/1019) montrant les deux SMI identiques au bout des doigts ainsi qu’un aimant plus large entre le pouce et l’index.



FIGURE 2.3 : Vue de côté aux rayons-x des deux SMIs d’Axel (16/10/1019).

- La fréquence, pour les signaux périodiques.

Ces variations permettent de communiquer de l'information à l'utilisateur par le biais du signal. Mais l'information est aussi spatiale, car le champ magnétique est continu dans l'espace et l'utilisateur peut le toucher et en explorer la forme.

2.4 Sensibilité aux stimuli

La sensibilité aux stimuli a été étudiée en détail par Harrison I. dans sa thèse sur le sujet [?] et l'article qui suivit [?]. Il est important de préciser cependant que le placement standard des implants ainsi que la force de ceux-ci ont évolué ces dernières années. Les résultats obtenus en 2018 devront donc être vérifiés à nouveau. Ces travaux en conjonction avec les recherches menées précédemment dans le cadre de ce projet et l'écriture de mon livre [?] nous fournissent une bonne base de connaissances sur la portée de sensibilité et la perception de différentes fréquences et signaux.

Pour résumer un SMI est sensible à des champs magnétiques alternatifs inférieurs à 0.03 mT (pour référence le champ magnétique terrestre est aux environs de 0.03-0.06 mT, cependant il n'est pas alternatif). Cela est bien meilleur que la sensibilité d'un aimant à la surface de la peau. Les basses fréquences sont généralement les mieux perçues (10-200 Hz).

Comparaison aux technologies existantes

Bien qu'encore peu utilisées au quotidien, de nombreuses technologies ont été développées dans le but de simuler le toucher. La vaste majorité utilise un système mécanique en contact avec la peau qui par pression, vibration ou électrostimulation induit une sensation à l'utilisateur. Cependant, ce type de système a le défaut de devoir être directement en contact avec la zone stimulée (sous la forme d'un gant par exemple) contraignant l'utilisateur et rendant l'expérience plus compliquée à mettre en place.

3.1 État de l'art du retour haptique sans contact

Il existe des technologies de retour haptique sans-contact, appelées "mid-air". Une première méthode repose sur des jets d'air comprimé cependant la faible précision et la taille du système requis la rendent peu pratique [?].

Une deuxième méthode utilise des ultrasons pour déformer la peau à distance [?]. Des émetteurs à ultrasons sont placés en grille et chaque émetteur est activé à un instant différent de manière à ce que leurs interférences créent un point focal à un endroit précis dans l'espace. La main de l'utilisateur est repérée par un système de suivi et l'intersection entre celle-ci et un objet virtuel est calculée. Le point focal est ensuite déplacé de manière à couvrir cette surface d'intersection.

L'énergie du point focal est suffisante pour déformer légèrement la peau, créant ainsi une sensation de toucher. Cette technique est relativement précise et est capable de simuler des textures et des formes variées [?]. Cependant, le retour fourni reste relativement faible et la portée est assez courte (10-20 cm) [?].

3.2 Contraintes et avantages des SMI

Par comparaison aux méthodes existantes, nous pouvons extraire les points forts et les défauts de notre technique à base d'implants. Bien sûr, nous prenons en compte la contrainte de devoir se faire poser un ou plusieurs implants. Ce pendant au vu des tendances [?] et du potentiel de ceux-ci, nous resterons optimistes quant à un futur où les implants (non-médicaux) sont répandus et acceptés.

Apports :

- Comme pour la méthode des ultrasons notre technique ne requière pas de contact physique.
- Notre méthode permet un retour de force haut (par opposition au retour faible des ultrasons).
- Le système est simple et de ce fait compacte, versatile et à échelle variable.
- Les champs magnétiques ne sont pas obstrués par la grande majorité des corps et matériaux (encore une fois par opposition aux ultrasons). Ils ne sont pas non plus perceptibles par les humains et la majorité des êtres vivants.

Contraintes :

- Les SMIs ne stimulent qu'en un seul point (chaque), par conséquent nous n'avons pas la résolution d'un système mécanique ou la possibilité de couvrir une zone comme le système à base d'ultrasons.
- La portée d'un champ magnétique est limitée. Un champ magnétique suit la loi du cube inversé(R^{-3}). Cela peut être compensé jusqu'à un certain point par un système plus puissant.

Continuité du stage et pistes à suivre

Au vu, des avantages et contraintes déduits précédemment nous avons décidé de nous concentrer sur les aspects nouveaux de cette méthode, notamment l'aspect compact et sans obstruction. Nous avons donc choisi de concevoir un système embarqué sous la forme d'un bracelet ou de bagues qui permettrait de stimuler les SMI tout en laissant à l'utilisateur sa mobilité et l'usage de sa main. Celui-ci sera utilisé afin de tester l'efficacité de cette technologie dans différents scénarios de feedback haptique et de substitution sensorielle :

4.1 Applications envisagées

Rendu haptique en VR et AR

Ce premier cas d'utilisation serait centré sur le retour haptique. Lors du contrôle d'un robot par exemple, une sensation précise de pression et peut-être même de texture pourrait être donnée par les SMI. C'est déjà l'un des axes majeurs du retour haptique notamment sur les robots médicaux. Un autre domaine similaire est le retour haptique dans un environnement XR où toucher un objet virtuel pourrait être rendu plus convaincant si l'utilisateur pouvait le sentir. Notre appareil pourrait être combiné avec un casque VR existant pour fournir ce type de feedback tout en laissant aux utilisateurs les mains libres pour le suivi de gestes ou l'utilisation de manettes.

Augmentation et substitution sensorielle

Lorsqu'elles sont considérées comme une alternative moins contraignantes que les entrées visuelles (écrans) ou audio (haut-parleurs), les SMI peuvent être envisagées comme une nouvelle voie de diffusion d'informations discrète des appareils numériques vers le cerveau.

Addition sensorielle basée sur des capteurs externes

Dans cette deuxième option, le dispositif pourrait être connecté à des capteurs de n'importe quel type créant ce que l'on appelle une substitution sensorielle. Un exemple courant est l'utilisation d'un capteur de distance à ultrasons pour aider à la navigation des

personnes aveugles. Dans cet exemple, un feedback est donné proportionnel à la distance entre la personne et l'obstacle. Créant ainsi un sens basique de l'écholocalisation. De la même manière, un microphone peut être utilisé pour les sourds.

Ce dernier exemple a été testé de manière approfondie en utilisant la vibration à la surface de la peau avec des résultats très concluants [?]. Avec de l'entraînement, des participants étaient capables de reconnaître et de différencier des sons comme de l'eau qui coule ou une musique. C'est un bon indicateur que des résultats similaires, sinon meilleurs, pourraient être obtenus avec les SMI. La piste intéressante est de penser à tous les "sens artificiels" possibles que l'on pourrait apprendre. L'implant transdermal «North Sense» est également un excellent exemple de ce qui peut être fait grâce à la substitution sensorielle. Créé et porté par Liviu Babitz, il informe en permanence l'utilisateur de son orientation par une vibration sur la poitrine. Au fil du temps, les utilisateurs ont déclaré être intuitivement conscients de leur orientation géographique sans prêter consciemment attention à l'implant.

Médias et sens numérique

Nous passons des heures à interagir avec le monde numérique et généralement, cette interaction engage pleinement au moins l'un de nos principaux sens, ce qui rend difficile ou impossible d'exécuter une autre tâche en même temps. Nous aimerions utiliser notre canal d'information auxiliaire pour libérer les mains, les oreilles et les yeux de l'utilisateur tout en continuant à leur transmettre de l'information.

Au niveau le plus élémentaire, par exemple, l'appareil est connecté au téléphone d'un utilisateur et relaie les notifications et la sonnerie via les SMI. À un niveau beaucoup plus avancé, des informations complexes (son, parole, directions) pourraient être transmises à l'utilisateur en continu sans l'empêcher de disposer de sa pleine capacité sensorielle (entendre, regarder, toucher) et de sa mobilité (utiliser ses mains) par opposition à un téléphone, des écouteurs ou un texte écrit. Ce concept peut être difficile à imaginer, mais en nous basant sur les recherches existantes sur la substitution sensorielle par le toucher [?] et des concepts comme la plasticité cérébrale, il devrait être possible dans une certaine mesure.

Enfin, en supposant qu'il soit effectivement possible de façonner le champ produit par des électro-aimants, le dispositif pourrait être utilisé comme affichage haptique portable. Cela pourrait être utilisé dans les trois cas d'utilisation pour créer l'illusion de mouvement ou même une stimulation SMI individuelle de base dans un environnement 3D sans suivi avancé des doigts.

4.2 Conception du dispositif

Afin de tester efficacement notre théorie et le caractère pratique de l'utilisation des SMI dans diverses circonstances, nous devons concevoir et créer un appareil stimulant les SMI. Le but du dispositif étant d'être capable de stimuler toute la plage de sensibilité des implants, il sera donc utilisable dans n'importe quel cas d'utilisation. Nous avons envisagé deux dispositions possibles des électro-aimants, l'une autour du poignet et l'autre autour des doigts (fines bagues). Cependant après avoir calculé, testé et mesuré la portée des champs produits nous en avons conclu que la disposition en bracelet ne serait pas pratique



FIGURE 4.1 : Extrait de [?], électro-aimant de stimulation de SMI sous forme de bague.



FIGURE 4.2 : Électro-aimant de stimulation de SMI sous forme de bague avec amplification embarquée issu de mes recherches personnelles.

de part la puissance nécessaire. La disposition en bagues est elle tout a fait faisable comme prouvé par le passé et nous cherchons actuellement des moyens d'optimiser sa puissance.

4.3 Perspectives du stage

Une fois l'appareil de stimulation fonctionnel, nous commencerons par définir la sensibilité des implants modernes afin de comparer nos résultats aux données existantes [?].

Puis nous pourrions commencer à tester les différentes applications envisagées en commençant par le rendu haptique/VR-AR. Pour cela nous allons créer des environnements simples en VR et se servir d'un suivi en temps réel de la main pour renvoyer le feedback

approprié. La principale difficulté sera de définir les signaux optimaux à envoyer pour le ressenti désiré. Nous devons prendre en compte la plage de fréquences discernables par l'implant ainsi que la nature non-linéaire de la sensibilité sur cette plage. Pour le rendu haptique, il faudra trouver les signaux s'approchant le plus de la sensation de toucher et de pression. Nous savons aussi que le ressenti de la texture est lié à la fréquence de vibration de la peau au contact de celle-ci. Il est donc aussi envisageable de simuler de la texture.

Pour l'addition sensorielle par des capteurs externes, il s'agira d'adapter la résolution du capteur à la résolution de l'implant de manière à procurer le maximum de détail. Dans l'exemple d'un capteur de distance, l'objectif serait de pouvoir naviguer dans un bâtiment de manière fluide sans la vue. Nous aurons donc besoin de traiter un flux constant d'information, et cela, en temps réel.

La dernière option, le "sens numérique" repose fortement sur de l'apprentissage à long terme. Si les délais du stage le permettent, nous mettrons en place les outils et le traitement de signal nécessaires et testerons des fonctionnalités simples et à court terme.

4.4 Conclusion

Avec la démocratisation et la recrudescence des technologies implantables il semble évident que celles-ci ont beaucoup à apporter dans le domaine de l'interaction homme machine. Au vu des recherches préalables faites par J. Hameed [?], I. Harrison [?] et moi-même [?] ainsi que de l'état de l'art du rendu haptique, il semble très probable que les SMIs offrent une solution différente, plus simple et plus pratique au problème du rendu haptique sans contact. Il reste encore à tester ce système dans des cas d'utilisation et des scénarios réels pour en définir les limites. Dans ce stage, nous nous intéressons surtout aux modalités de stimulation et à l'IHM. Il est cependant essentiel de mentionner que cette technologie pourrait énormément bénéficier de recherches dans le domaine médical, mécanique et physique notamment sur la conception de l'implant lui-même. Des avancées sur ce dernier sujet pourraient repousser les limites que nous allons définir.