

Septembre 2011

Tuteur INSA : Olivier PICCIN

Tuteur ETS : Vincent DUCHAINE

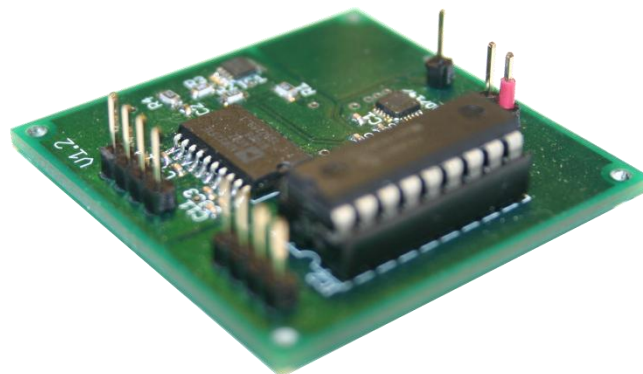
Etudiant MIQ5 : Damien POULET



Le génie pour l'industrie

PROJET DE FIN D'ETUDES

Restitution du sens du toucher par retour haptique :
Création d'un capteur tactile à partir de condensateurs



Condensé



Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg

PROJET DE FIN D'ETUDES

<u>Auteur</u> : Damien POULET	<u>Promotion</u> : MIQ 2011
<u>Titre</u> : Restitution du sens du toucher par retour haptique : Création d'un capteur tactile à base de condensateurs	<u>Soutenance</u> : Septembre 2011
<u>Structure d'accueil</u> : Ecole de Technologie Supérieure de Montréal	
Nb de volume(s) : 1 Nb de pages : 46 Nb de références bibliographiques : 7	
<p><u>Résumé</u> : Ce projet de fin d'étude vient en préambule d'un projet plus vaste prévu sur 3 ans impliquant plusieurs universités nord-américaines. Le but du projet global est le développement d'un retour haptique pour une prothèse de main sous-actionnée. Il comprendra entre autre le développement d'un capteur d'effort qui sera place au bout de chaque doigt de la main. Pendant la durée du PFE, des recherches ont été effectuées sur la structure d'un capteur à base de condensateurs. Une carte électronique a ensuite été développée autour d'un composant central : un convertisseur de capacitance en valeur numérique, l'AD7147. Le circuit imprimé est piloté par un PIC16F88 dont la tâche est la récupération des données de l'AD7147 pour les transmettre au circuit haptique placé en aval.</p>	
<p><u>Mots clés</u> : Retour haptique, instrumentation, AD7147, condensateur, main sous-actionnée</p>	
<p><u>Traduction</u>: This final project study is a preamble to a larger project planned over 3 years involving several North American universities. The purpose of the overall project is the development of a haptic a prosthetic under-actuated hand. It will include the development of a force sensor to be placed on each fingertip. During the PFE, research has been carried out on the structure of a capacitors based sensor. An electronic board was developed around a central component, a capacitance-to-digital converter, the AD7147. The circuit is controlled by a PIC16F88 whose task is to take the data from the AD7147 to transmit it to the haptic device located downstream.</p>	

Remerciements

Merci à Vincent Duchaine pour m'avoir aiguillé et dirigé tout le long du projet.

Merci à Olivier Piccin pour m'avoir donné un certain nombre d'axes de réflexion.

Merci à David Castonguay pour ses conseils en matière d'électronique.

Merci à Andy Yen pour son soutien pendant ce séjour au Québec.

Sommaire

Condensé.....	2
Remerciements	3
I. Introduction.....	5
II. Recherche documentaire et choix technologique	6
1. Recherche documentaire	6
2. Choix technologique.....	6
III. Partie mécanique	7
1. Conception ProEngineer.....	7
2. Modèle Matlab	11
3. Vers une structure différente.....	21
4. Test de la machine à découper au laser	22
IV. Electronique : conception d'un circuit imprimé.....	24
1. Introduction.....	24
2. Conception des composants	25
3. Conception itérative du circuit imprimé	26
4. Ecriture du code	32
V. Suivi	36
VI. Conclusion	36
Table des figures.....	37
Bibliographie.....	39
Annexes	40
Synthèse de l'analyse de documents traitant de la mise en œuvre de feedback haptique	40
Synthèse de l'analyse de documents traitants de capteurs de forces placés sur un doigt.....	43

I. Introduction

Ce projet a débuté avec le concours d'un étudiant au doctorat de l'université Laval, Québec. Celui-ci était militaire et a perdu sa main pendant son service. Il a contribué à la création d'une prothèse de main sous-actionnée pilotée via un harnais fixé au bras et à l'épaule. Par un mouvement du corps, la main peut se fermer ou s'ouvrir. Cette main a de bonnes performances, et permet à l'utilisateur de saisir au vol une balle qui lui est lancée, par exemple. Cependant, malgré de bons résultats, les informations ne transitent que dans un sens : l'utilisateur pilote la main, mais doit exercer un contrôle visuel permanent sur la prothèse. Il a donc été décidé d'implanter un dispositif de mesure d'efforts au niveau des doigts, ainsi qu'un retour haptique pour l'utilisateur, afin de pouvoir la commander plus efficacement et plus intuitivement.

Dans ce cadre, le PFE fait parti d'un projet plus vaste prévu sur 3 ans, et impliquant d'autres établissements nord-américains : l'Université Stanford en Californie, avec le professeur Mark Cutkosky, l'Université Laval à Québec, avec le professeur Clément Gosselin, l'École Polytechnique de Montréal avec le professeur Lionel Birglen et l'École de Technologie Supérieure de Montréal avec le professeur Vincent Duchaine.

Le projet global sera divisé en 4 parties : le développement continu de la mécanique de la main, dirigée par le professeur Clément Gosselin, la création et la mise en place de capteurs de force, la conception d'un dispositif de retour haptique et le développement de lois de commande.

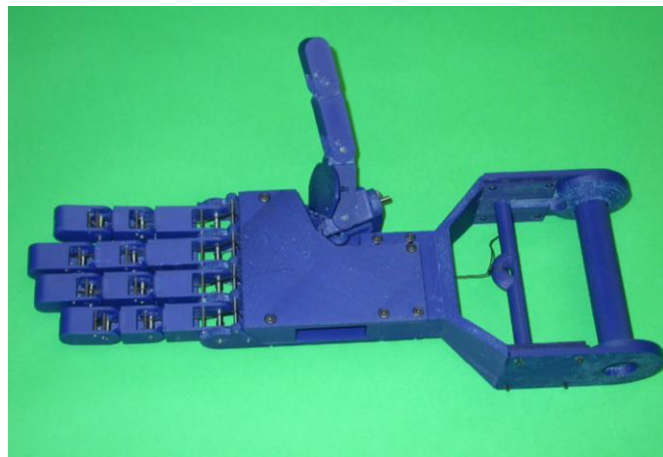


Figure 1 : Main sous actionnée

L'objectif du PFE est le développement du capteur de force. Un capteur sera placé, à terme, au bout de chaque doigt de la main. La première partie du travail à consister à investiguer différentes technologies et à effectuer un état de l'art de l'existant en matière de retour haptique. Un choix technologique à base de condensateur a été effectué, et un modèle ProEngineer de l'architecture a été créée et analysée. Basé sur les résultats obtenus, un modèle numérique a été mis au point via Matlab.

Enfin un circuit imprimé a été développé pour le traitement des informations collectés et la communication avec le circuit aval. Le composant principal est un convertisseur de capacitance en numérique : l'AD7147. Le circuit est intégralement piloté par un PIC16F88. Le développement de la carte électronique s'est fait de manière itérative et 2 versions ont vu le jour pendant toute la durée du PFE.

II. Recherche documentaire et choix technologique

1. Recherche documentaire

De nombreuses publications concernant le retour haptique et la technologie de capteurs ont été analysées et synthétisées (cf. annexes). Les technologies de retour haptique seront utilisées dans les recherches d'un autre étudiant travaillant sur le projet. Parmi toutes les technologies de capteurs, on distingue principalement les jauges de contraintes, utilisées universellement, les matériaux piézoélectriques, qui disposent de bonnes performances dynamiques, la mesure de capacitance et les capteurs de force par vision.

La technologie FSR (Force Sensing Resistor) avait été mise de côté au cours de l'analyse à cause de son manque de précision. Elle comporte tout de même les avantages d'un coût réduit et d'une facilité de mise en œuvre.

L'utilisation de jauges de contraintes a été exclue : elles fournissent un signal de quelques millivolts à quelques microvolts et nécessitent une amplification. Elles sont donc très sensibles au bruit. Elles sont de plus sensibles à la dérive. Cela implique de régulières calibrations.

2. Choix technologique

La technologie retenue a été la mesure de capacitance. Contrairement aux jauges de contraintes, elle est moins sensible au bruit, et est plus facile à mettre en œuvre qu'un matériau piézoélectrique ou un capteur par vision. La structure a été inspirée de l'article (nommée ci-après article de référence) « *Normal and Shear Force Measurement Using a Flexible Polymer Tactile Sensor With Embedded Multiple Capacitors* » de Hyung-Kew Lee, Jaehoon Chung, Sun-II Chang, et Euisik Yoon.

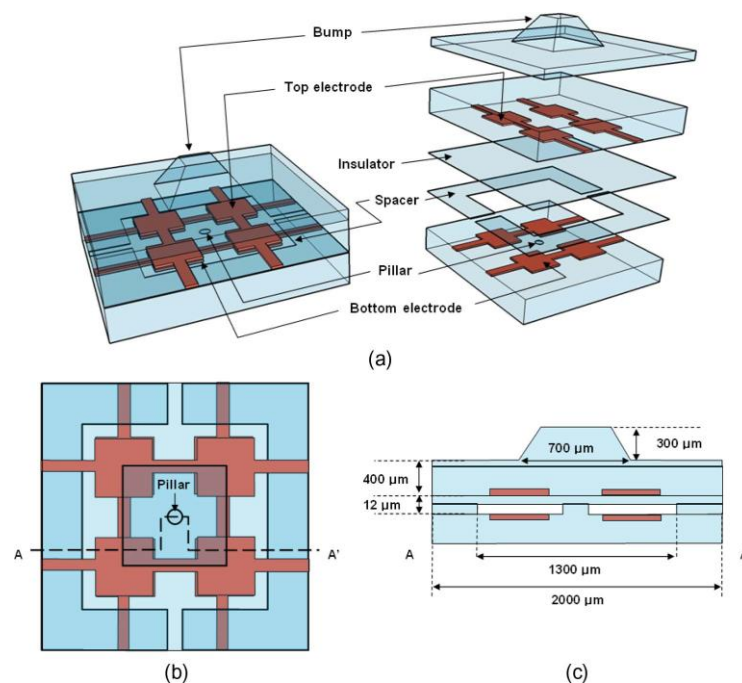


Figure 2 : Structure présentée dans la publication de référence

On distingue les 2 couches d'électrode, un isolant entre elles ainsi qu'une épaisseur d'air. Au centre de l'unité tactile (appelé taxel), il y a un pylône et sur le dessus du taxel, une bosse. Cette bosse et le pylône servent à retransmettre les forces tangentielles. Ainsi l'application d'une force tangentielle à la bosse induira une rotation au niveau du sommet du pylône. De fait, d'un côté du pylône, les 2 jeux d'électrodes se rapprocheront, tandis qu'elles s'éloigneront de l'autre côté. Le tout fera alors varier les capacitances. Une force normale, quant à elle, génèrera un appui similaire sur les 4 jeux de capacitances.

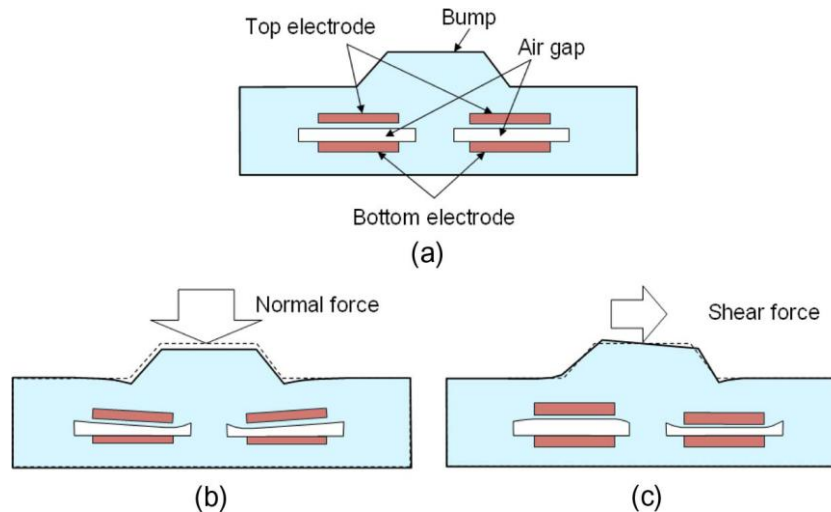


Figure 3 : Principe d'appui sur 4 condensateurs

III. Partie mécanique

1. Conception ProEngineer

a. Première itération : utilisation de la structure de la publication

Création

La structure globale du capteur du document de référence a été créée sous ProEngineer. Cela correspond au cas comprenant 4 taxels et une bosse. D'autres structures ont été créées à partir de celle-ci : une version comprenant 9 taxels et 4 bosses à la base jointive, ainsi qu'une version comprenant 16 taxels et 4 bosses disjointes.

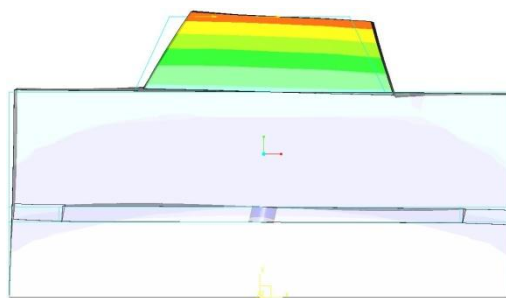


Figure 4 : 4 taxels, une bosse

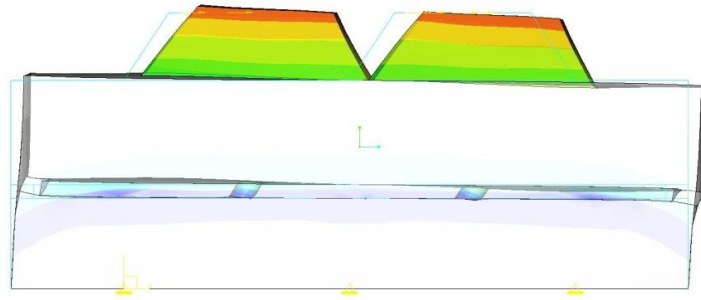


Figure 5 : 9 taxels, 4 bosses à la base jointive

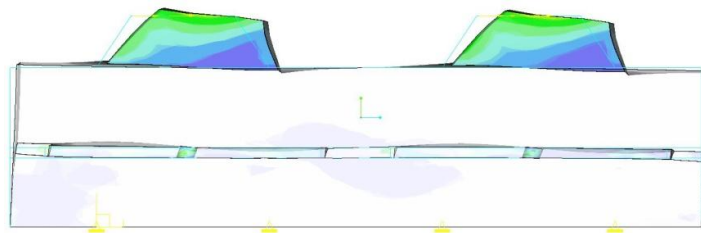


Figure 6 : 16 taxels, 4 bosses disjointes

Résultats

L'objectif est de pouvoir différencier un effort tangentiel d'un effort normal excentré. La solution à 16 taxels et 4 bosses disjointe aurait permis de faire cette différence. Il aura cependant fallu travailler sur 16 capacitances en parallèle.

Le fait de posséder 9 ou 16 taxels offre une redondance d'informations. Les inconnues sont au nombre de 5 et sont la force normale, l'effort tangentiel et les 3 coordonnées de localisation. Il s'est donc avéré que seuls 5 capacitances étaient alors nécessaires pour l'obtenir et avoir un système de 5 équations à 5 inconnues.

b. Seconde itération

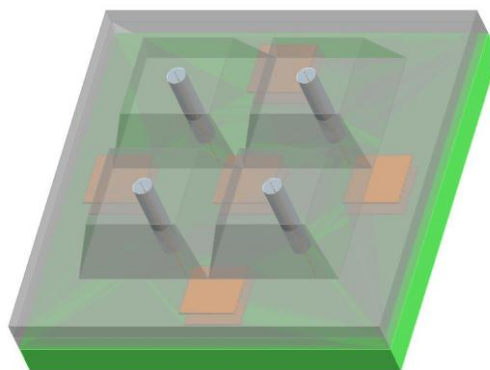


Figure 7 : Nouvelle structure

Les résultats précédents, ainsi que le fait que la structure présentée dans la publication n'était pas réalisable avec les moyens de l'ÉTS ont conduit à la création d'une nouvelle structure.

La structure utilisée sera plus simple de fabrication. La couche inférieure d'électrodes sera construite à même un circuit imprimé. Une couche de mousse de silicone compressible servira de diélectrique. Le second jeu d'électrode sera ensuite mis en place, puis recouvert d'une nouvelle épaisseur de mousse. Pour le pylône et la bosse, on utilisera la technologie SDM : un procédé d'usinage matériau par matériau.

Le pylône et la bosse doivent avoir une densité supérieure à mousse afin de créer un mouvement de rotation du à l'effort tangential. On utilisera donc du caoutchouc de silicone. Le mouvement de rotation a pour centre l'interface entre la mousse, la bosse et le pylône. Il a pour effet de rapprocher les électrodes d'un condensateur et de reculer les électrodes d'un autre. Ci-dessous deux coupes de la nouvelle structure. Sur les images, la mousse et les bosses sont transparentes pour une meilleure visualisation de l'allure globale.

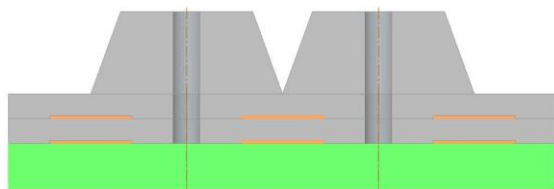


Figure 8 : Coupe plan médian

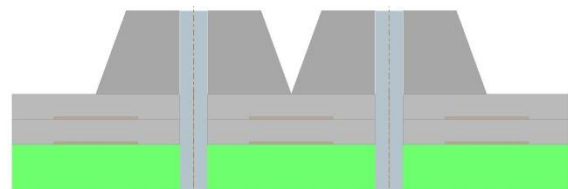


Figure 9 : Coupe au niveau des pylônes

Les électrodes sont des carrés de cuivre de 4 mm de côté. Ils sont séparés par une épaisseur de 0.9 mm de mousse. La capacité par défaut est donc de 354pF.

On suppose qu'une force est décomposable selon 2 composantes : la force normale et la force tangentielle. Les figures 8 et 9 illustrent la déformée (allure globale) et les contraintes (colorations) issues respectivement de l'application d'une force normal et d'une force tangentielle.

Les forces ont été appliquées uniformément sur le sommet des bosses. En effet, à cause de la taille et de la fonction du système on ne considère qu'un seul appui.

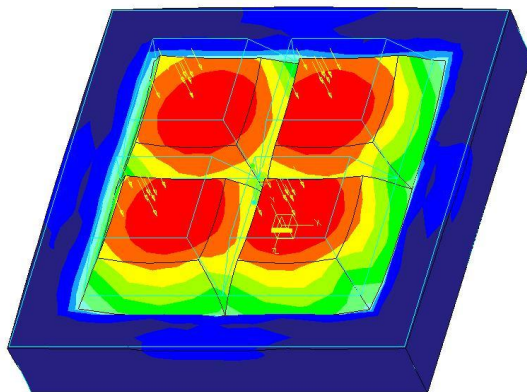


Figure 10 : Application d'une force normale

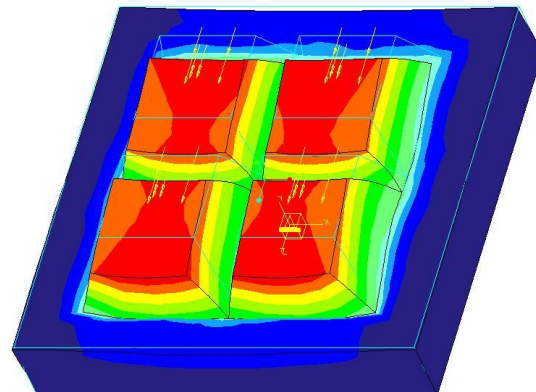


Figure 11 : Application d'une force tangentielle

Chacun des déplacements issus de l'application a été décomposé suivant l'axe vertical et l'axe horizontal. Cela permet de calculer la nouvelle valeur des capacités.

Les figures suivantes montrent les composantes de déplacement suivant les directions suscitées de la couche supérieure d'électrodes. Les électrodes inférieures sont liées au circuit imprimé et ne bougent pas.



Figure 12 : Déplacement horizontal issu d'une force normal



Figure 13 : Déplacements vertical issu d'une force normale

On remarque que lors d'un appui normal, les électrodes extérieures ont tendance à s'écartier du centre tout en s'affaissant à moitié.



Figure 14 : Déplacement horizontal issu d'une force tangentielle

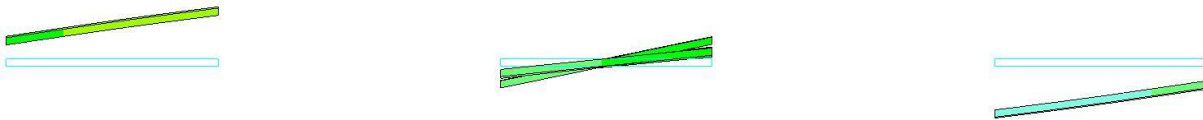


Figure 15 : Déplacements vertical issu d'une force tangentielle

Dans le cas de l'application d'une force tangentielle de gauche à droite, les électrodes se déplacement horizontalement de la même manière. On peut cependant observer que l'électrode de droites se déplace vers le bas (se rapprochant du circuit imprimé) tandis que celle de gauche se déplace vers le haut (s'en éloignant).

En supposant que le diélectrique est linéaire, l'écart entre les électrodes varie linéairement en fonction de la force appliquée. Si l'on normalise l'écart entre les électrodes par rapport à leur écart initial, on obtient les relations suivantes :

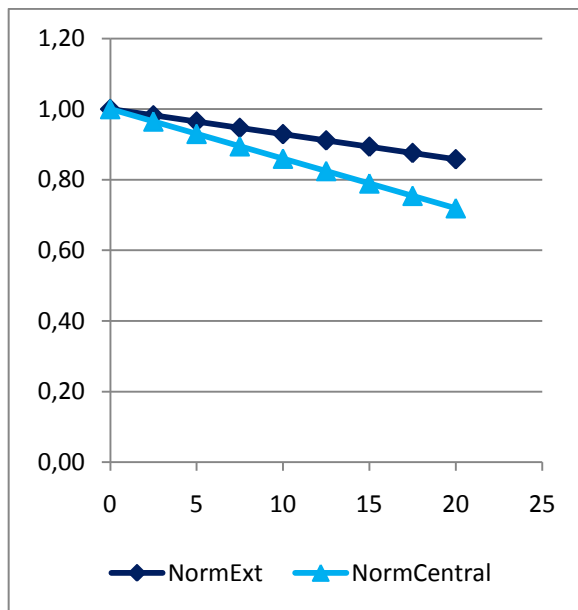


Figure 16 : Evolution de l'écart entre les électrodes dans le cas d'une force normale

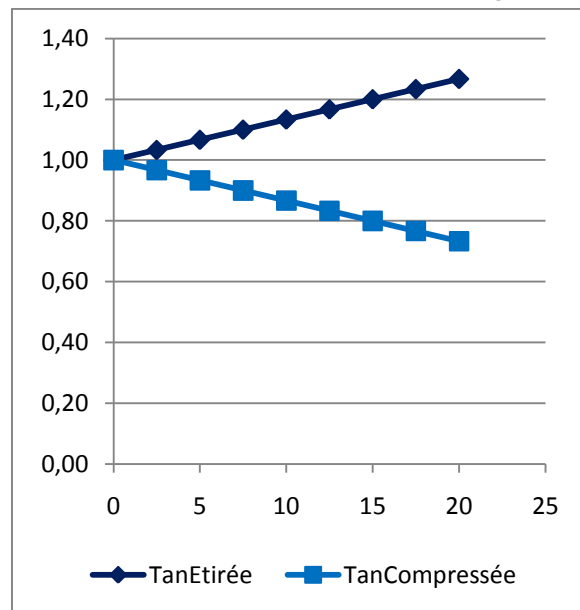


Figure 17 : Evolution de l'écart entre les électrodes dans le cas d'une force tangentielle

2. Modèle Matlab

Basé sur les résultats obtenus sous ProEngineer, un modèle mathématique a été créé sous Matlab. On rappelle la structure du système à modéliser :

- La première couche d'électrodes est placée à même le circuit imprimé
- Elle est recouverte par la première épaisseur de mousse servant de diélectrique
- La seconde couche d'électrodes est mises en place
- Et est recouverte par la seconde couche de mousse
- Sur laquelle est placée la bosse de silicone sur lequel la force est appliquée

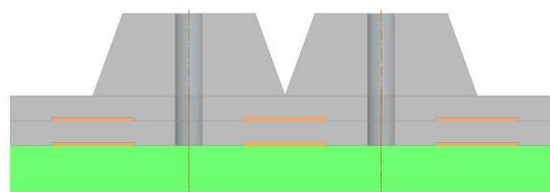


Figure 18 : Structure du capteur

Pour simplifier le modèle, on ne considère que 3 condensateurs placés comme montré Figure 24.

a. Modélisation des forces normales

On considère l'application d'une force F sur une des deux bosses. Trois systèmes sont alors à considérer :

- La fraction F_{NB} de la force F appliquée uniquement à la bosse. Il sera modélisé par une barre en équilibre sous l'action de 3 forces parallèles.

- La fraction F_{NT} de la force F appliquée à la mousse. Il sera modélisé par une barre en équilibre sous l'action de 4 forces parallèles.
- La réaction élastique de la mousse. Cela sera modélisé par 3 ressorts indépendants.

Les dimensions posées sont les suivantes :

- Abscisse de l'électrode de gauche : 0
- Abscisse de l'électrode centrale : x_1
- Abscisse de l'électrode de droite : x_2
- Abscisse du point d'application de la force F : x

On définit les constantes suivantes :

- k : raideur de la mousse (identique pour les 3 ressorts)
- α : fraction de F distribué uniquement sur la bosse ($0 < \alpha < 1$)

On définit alors $F_{NB} = \alpha F$ et $F_{NT} = (1-\alpha)F$.

Les forces résultantes sont les suivantes :

- Les indices 1, 2 et 3 correspondent respectivement à l'électrode de gauche, du milieu et de droite.
- F_i , $i \in \{1,2,3\}$ sont les résultantes à la force appliquée F
- F_{iB} , $i \in \{1,2,3\}$ correspond à la fraction de F_i appliqué à la bosse (premier système).
- F_{iT} , $i \in \{1,2,3\}$ correspond à la fraction de F_i appliqué à la mousse (second système).

On a de plus les 3 relations suivantes :

$$F_i = F_{iB} + F_{iT}, i \in \{1,2,3\}$$

Premier système

Deux cas sont à considérer :

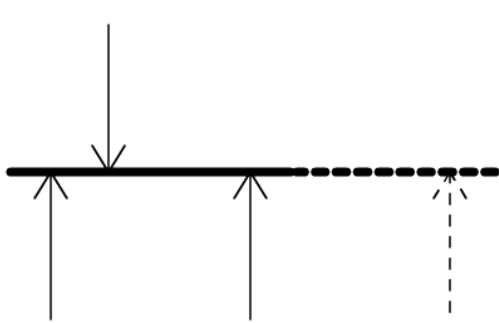


Figure 19 : Force appliquée à la bosse de gauches

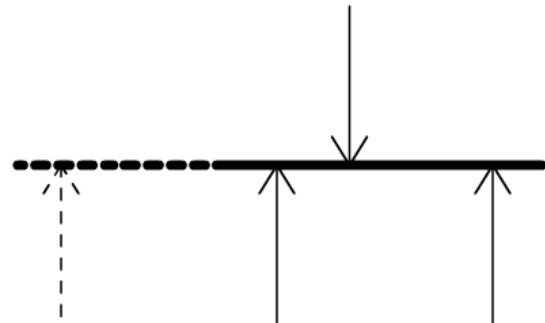


Figure 20 : Force appliquée à la bosse de droite

Il y a 3 inconnues à déterminer : F_{iB} , $i \in \{1,2,3\}$. Compte tenu de l'architecture particulière l'une d'entre elle sera obligatoirement nulle. De plus, le principe fondamental de la statique nous donne deux équations Il y a alors 2 équations à 2 inconnues.

Second système

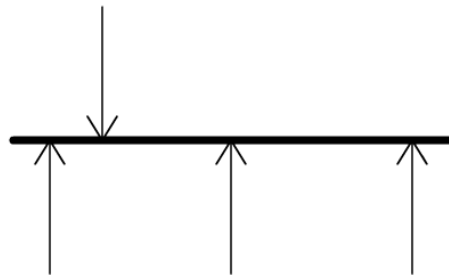


Figure 21 : Second système soumis à une force F_{NT}

Il y a 3 inconnues à déterminer : F_{iT} , $i \in \{1,2,3\}$. Le principe fondamental de la statique ne nous donne que 2 équations dans ce cas. Il faudra donc déterminer une solution particulière.

Troisième système

Nous avons les 3 équations suivantes :

$$F_i = F_{iB} + F_{iT} = k\Delta_i, i \in \{1,2,3\}$$

Ces relations introduisent 3 inconnues supplémentaires : les Δ_i , $i \in \{1,2,3\}$, et nous fourni 3 équations.

Enfin, nous disposons de la relation suivante :

$$F_{NB} = \alpha F \text{ et } F_{NT} = (1-\alpha)F$$

α est aussi inconnue.

Considérons tout d'abord le premier système.

Le principe fondamental de la statique nous permet de déterminer les efforts résultants dans les deux cas :

$$\begin{cases} x < x_1 & F_{1B} = F_{NB} \frac{x_1 - x}{x_1} & F_{2B} = F_{NB} \frac{x}{x_1} & F_{3B} = 0 \\ x > x_1 & F_{1B} = 0 & F_{2B} = F_{NB} \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} & F_{3B} = F_{NB} \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \end{cases}$$

Soit la solution particulière déterminée d'après des simulations ProEngineer :

- $x = x_1$
- $F = 20N$
- $F_1 = F_3$
- $\Delta l_1 = \Delta l_3 = 0.128 \text{ mm}$
- $\Delta l_2 = 0.253 \text{ mm}$

Les équations du premier système nous donnent les résultats suivants :

$$\begin{cases} F_{1B} = F_{3B} = 0 \\ F_{2B} = F_{NB} \end{cases}$$

On a alors :

$$F_{NT} = F_{2T} + 2F_{1T} = k\Delta l_1 + 2k\Delta l_1 - F_{NB}$$

D'où :

$$k = \frac{F}{\Delta l_2 + 2\Delta l_1} = 39.29 \text{ N/mm}$$

En appliquant le principe fondamental de la statique au second système, on obtient les équations suivantes :

$$\begin{cases} F_{1T} = \frac{(x_2 - x)F_{NT} + (x_1 - x_2)F_{2T}}{x_2} \\ F_{2T} = \frac{x F_{NT} - x_2 F_{3T}}{x_1} \\ F_{3T} = \frac{x F_{NT} - x_1 F_{2T}}{x_2} \end{cases}$$

On détermine alors la constante α à partir de la solution particulière :

$$\begin{cases} \alpha F + F_{2T} = k\Delta l_2 \\ F_{2T} = \frac{x_1(1 - \alpha)F - x_2 k\Delta l_1}{x_1} \end{cases}$$

D'où $\alpha = 0.497$

On en déduit que pour $x=x_1$, alors $F_{2T}=0$.

En considérant le second système pour $x = 0$ et $x = x_2$, on peut généraliser le fait que $F_{2T} = 0$, quelque soit x .

On peut alors modéliser le système dans Matlab. Les forces déduites des précédentes équations induisent un déplacement des électrodes supérieures. On peut alors calculer leur nouvelle valeur de capacitance.

Le schéma ci-dessous illustré l'évolution des capacitances en fonction du point d'application de la force. Le cas a été traité pour $x_1 = 7\text{mm}$ et $x_2 = 14\text{mm}$. Les courbes rouge, bleu et cyan représentent respectivement les capacitances des condensateurs de gauche, du milieu et de droite.

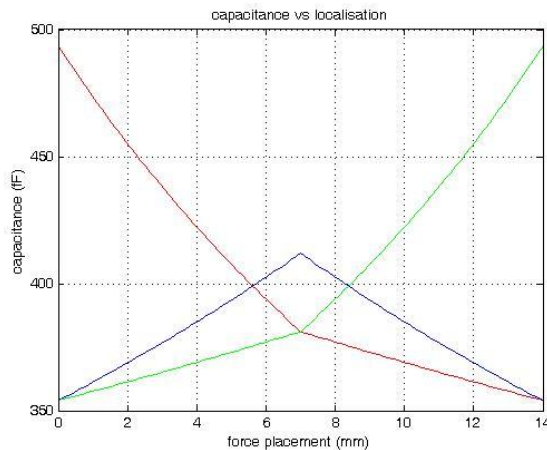


Figure 22 : Capacitance en fonction de la position de la force

La valeur à vide des capacitances est de 354 fF. On observe que lors d'un appui parfaitement au dessus du condensateur de droite ou de gauche, la valeur des deux autres reste la même. En se déplaçant vers le centre, la capacitance du condensateur du milieu augmente progressivement jusqu'à son maximum, quand la force est appliquée au dessus de lui. Elle redescend ensuite symétriquement. Quand la force est appliquée au centre, on a bien les valeurs des condensateurs de droite et de gauche identiques.

La modélisation est en grande partie satisfaisante : quand la force est appliquée en 0 alors il n'y a un grand déplacement pour la capacité de gauche. Cependant, le déplacement de celles du milieu et de droite est nul.

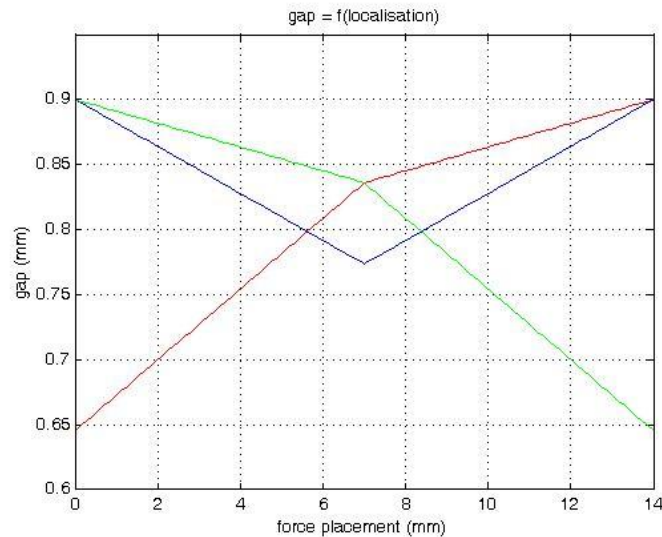


Figure 23 : Modélisation des écarts en fonction du point d'application de la force normale

L'absence de déplacement pour la capacité du milieu et celle de droit va à l'encontre de la modélisation à partir du second système : une poutre en appuis entre 4 forces parallèles. Cette simulation a été initiée pour déterminer l'impact d'une force sur les 3 électrodes. Ce modèle a donc été modifié pour correspondre à la représentation attendue.

Nous avons trouvé, pour tout x :

$$\begin{cases} F_{1T} = \frac{(x_2 - x)F_{NT} + (x_1 - x_2)F_{2T}}{x_2} \\ F_{2T} = \frac{0}{x_2} \\ F_{3T} = \frac{x F_{NT} - x_1 F_{2T}}{x_2} \end{cases}$$

A présent, on suppose que F_{2T} varie linéairement entre 0 et x_1 de la manière suivante :

$$\begin{cases} x = 0 & F_{2T} = F_{1T} = \frac{x_2 F_{NT} + (x_1 - x_2) F_{2T}}{x_2} \\ x = x_1 & F_{2T} = 0 \end{cases}$$

On en déduit, pour $0 < x < x_1$:

$$F_{2T} = \frac{-x_2 F_{NT}}{x_1(2x_2 - x_1)} x + \frac{x_2 F_{NT}}{2x_2 - x_1}$$

De même, pour $x = x_2$, on désire $F_{2T} = F_{3T}$. On trouve alors, pour $x_1 < x < x_2$:

$$F_{2T} = \frac{2x_2 F_{NT}}{x_2^2 - x_1^2} - \frac{x_2 F_{NT}}{x_2 - x_1}$$

Cela donne alors une valeur d'écart en fonction de la position de la force suivante :

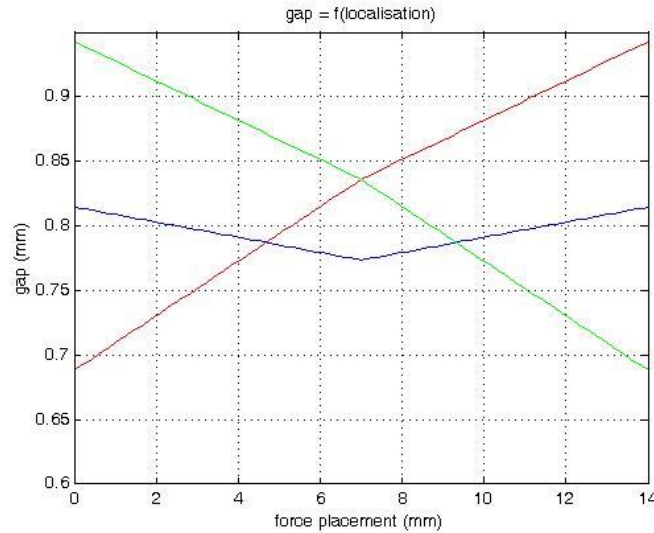


Figure 24 : Nouvelle modélisation

On remarque, que pour une force normale appliquée en $x = 0$, l'électrode de gauche est très pressée, l'électrode du centre l'est un peu moins et l'électrode de droite remonte légèrement.

La répartition des efforts le long de structure ne devrait pas permettre un écartement des électrodes du condensateur de droite. La force est normale, et l'absence d'un point de pivot physique implique que le seul déplacement autorisé est la compression.

On désire que le déplacement de l'électrode de droite soit nul quand $x = 0$, donc que la force appliquée soit nulle. On va donc considérer une relation linéaire de la forme suivante :

$$\begin{cases} x = 0 & F_{3T} = 0 \\ x = x_1 & F_{3T} = \frac{x_1(F_{NT} - F_{2T})}{x_2} \end{cases}$$

On en déduit, pour $0 < x < x_1$:

$$F_{3T} = \frac{F_{NT} - F_{2T}}{x_2} x$$

On fait de même pour F_{1T} , entre x_1 et x_2 . Pour $x_1 < x < x_2$, on a :

$$F_{1T} = \frac{F_{2T} - F_{NT}}{x_2} x + F_{NT} - F_{2T}$$

On obtient le graphe d'écart en fonction de la position suivant :

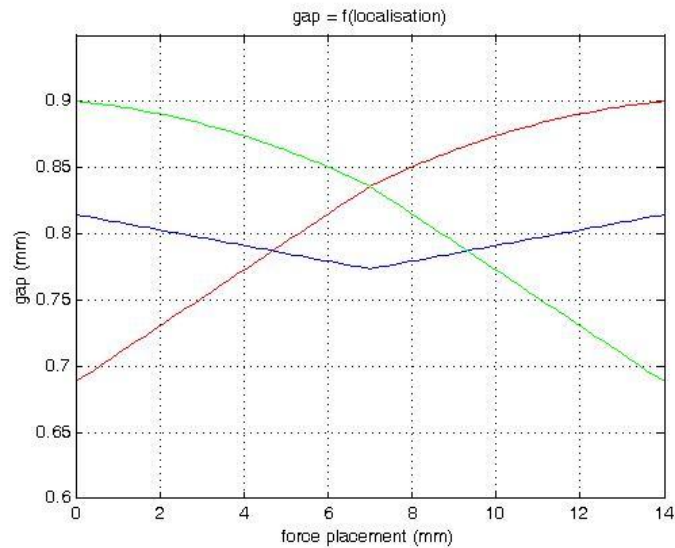


Figure 25 : Modélisation ajustée

Enfin, afin de maintenir l'équilibre des forces $F_{NT} = F_{1T} + F_{2T} + F_{3T}$, alors on redéfinit les forces F_{1T} entre 0 et x_1 et F_{3T} entre x_1 et x_2 . La modélisation finale des forces normales est la suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 0 < x < x_1 \\
 x_1 < x < x_2
 \end{array} \right. \begin{cases}
 F_{1T} = F_{NT} - F_{2T} - F_{3T} \\
 F_{2T} = \frac{-x_2 F_{NT}}{x_1(2x_2 - x_1)} x + \frac{x_2 F_{NT}}{2x_2 - x_1} \\
 F_{3T} = \frac{F_{NT} - F_{2T}}{x_2} x \\
 F_{1T} = \frac{F_{2T} - F_{NT}}{x_2} x + F_{NT} - F_{2T} \\
 F_{2T} = \frac{2x_2 F_{NT}}{x_2^2 - x_1^2} - \frac{x_2 F_{NT}}{x_2 - x_1} \\
 F_{3T} = F_{NT} - F_{1T} - F_{2T}
 \end{cases}$$

L'évolution des écarts en fonction de la position du point d'application est, d'après le modèle final, le suivant :

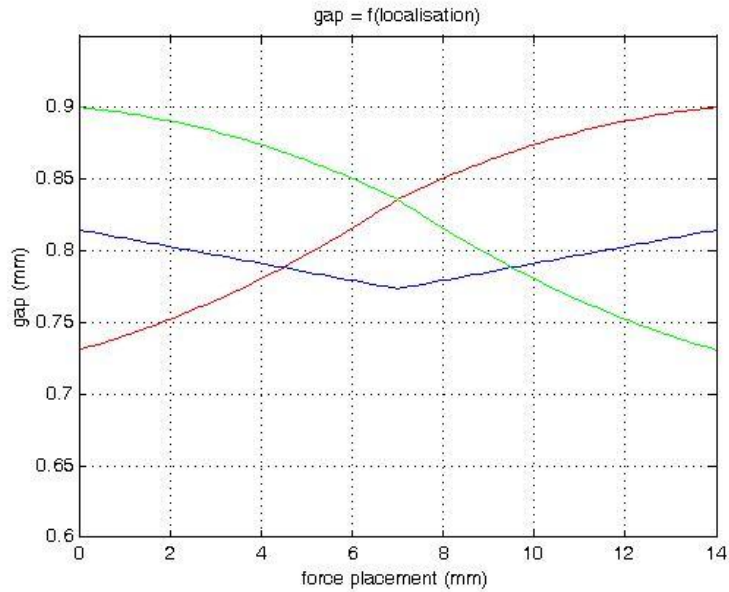


Figure 26 : Modélisation final de la force normale

La solution particulière en $x = x_1$ est bien conservée. De plus, le déplacement de l'électrode de droite est nul quand $x = 0$, et le déplacement de l'électrode de gauche est nul lorsque $x = x_2$. Enfin, la somme des forces est toujours constante.

b. Modélisation des forces tangentielles

Dans un premier temps, considérons une bosse à laquelle est appliquée une force tangentielle. La modélisation structurelle est la suivante :

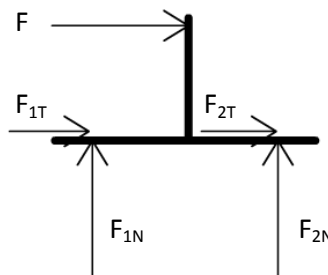


Figure 27 : Modélisation de l'application d'une force tangentielle

Avec :

$$\begin{cases} F_1 = F_{1T} + F_{1N} \\ F_2 = F_{2T} + F_{2N} \end{cases}$$

Les abscisses des points d'application de F_1 et F_2 sont notées respectivement 0 et x_1 .

Le principe fondamental de la statique appliqué au point d'application de F_1 nous donne les équations suivantes :

$$\begin{cases} F + F_{1T} + F_{2T} = 0 \\ F_{1N} + F_{2N} = 0 \\ -bF + x_1 F_{2N} = 0 \end{cases}$$

Les forces F_{1T} et F_{2T} n'ont pas d'importance pour notre problème. Seules les forces F_{1N} et F_{2N} nous intéressent. On obtient donc :

$$\begin{cases} F_{2N} = \frac{b}{x_1} F \\ F_{1N} = -F_{2N} \end{cases}$$

De manière similaire, on trouve pour la seconde bosse :

$$\begin{cases} F_{3N} = \frac{b}{x_2 - x_1} F \\ F_{2N} = -F_{3N} \end{cases}$$

A présent, on suppose que la force tangentielle n'est pas uniformément répartie entre les 2 bosses. Ce sera le cas uniquement quand le point d'application sera positionné à l'abscisse x_1 , verticale de l'électrode centrale. On considère que la bosse gauche supporte l'intégralité de l'effort tangentiel tant que le point d'application de celui-ci est à gauche du pylône. Il en est de même pour la bosse droite. Entre les deux pylônes, la proportion d'effort encaissé par les bosses évolue linéairement pour atteindre 50% à l'abscisse x_1 .

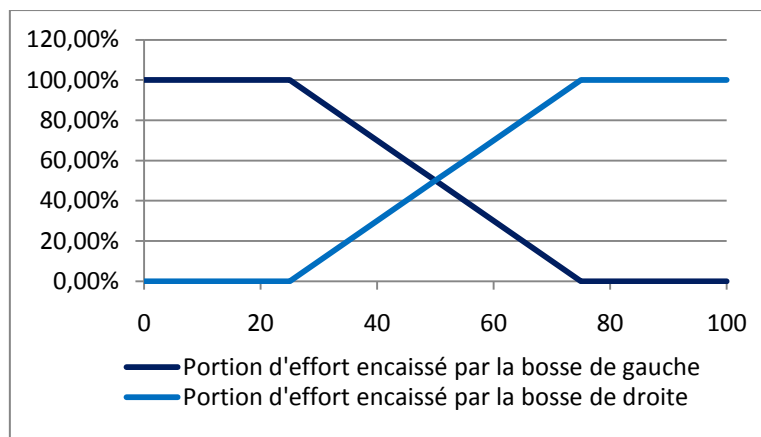


Figure 28 : Portion d'effort encaissé par les bosses en fonction de l'abscisse du point d'application

En posant F_{TL} et F_{TR} les forces tangentielles respectivement appliquées à la bosse de gauche et à la bosse de droite, on obtient alors la répartition suivante d'effort :

$$\begin{cases} x < \frac{x_1}{2} & F_{TR} = 0 & F_{TL} = F \\ \frac{x_1}{2} < x < \frac{x_2 + x_1}{2} & F_{TR} = \frac{2x - x_1}{x_2} F & F_{TL} = F - F_{TR} \\ \frac{x_1 + x_2}{2} < x & F_{TR} = F & F_{TL} = 0 \end{cases}$$

Nous obtenons la courbe de d'écart suivante :

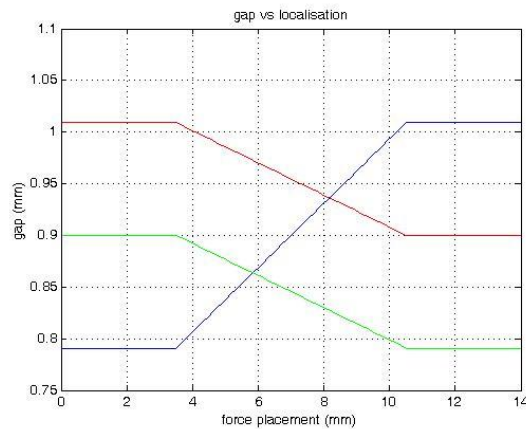


Figure 29 : Ecart entre les électrodes en fonction de la position de la force tangentielle

Les condensateurs de gauche du milieu et de droite sont respectivement représentés par les courbes de couleur rouge, bleue et verte. On remarque que l'application d'une force tangentielle sur la bosse de gauche induit bien une augmentation de l'écart entre les électrodes du condensateur de gauche et un rapprochement des électrodes du condensateur du milieu. Lorsque la force tangentielle est appliquée au-dessus du condensateur du milieu, celui-ci atteint sa valeur par défaut, tandis que les condensateurs de gauche et de droite varient.

c. Résultats

La modélisation mathématique a permis de mettre en évidence la complexité de la structure à 5 condensateurs. A partir de valeurs définies des forces normales et tangentielles, il n'existe qu'une unique position des électrodes supérieures, donc une seule valeur de capacitance. Cependant, cette propriété n'est pas totalement vérifiée dans le sens contraire : un jeu de capacitance n'implique une seule valeur des forces appliquées. Cela aurait été le cas dans le cas de forces purement tangentielles ou purement normales, mais pas dans le cas réel.

3. Vers une structure différente

La rigidité du pylône utilisé pour obtenir un basculement limite la propagation des forces normales. En cas d'appuis ponctuel sur le pylône, le déplacement sera moindre qu'en cas d'appuis excentré sur la bosse. Ceci fausse donc les mesures. De plus, le fait que la bosse présente une surface peut générer des erreurs de localisation. C'est par exemple le cas dans la situation où il y a plusieurs contacts ponctuels sur ladite bosse, comme une clef.

Les résultats de la modélisation mathématique ainsi que le problème dû au pylône ont donc remis en cause la conception de la mécanique du système. Sur la structure actuelle, il serait possible cependant de supprimer le pylône central. Une force tangentielle induit une force latérale tendant à déplacer le système, ainsi qu'un couple. Si le point d'appuis de la force est assez éloigné, alors la force latérale est négligeable devant le couple.

Une solution alternative serait l'utilisation de 3 condensateurs placés à 120° autour d'un axe central en silicone souple. Cette solution a été retenue comme base lors de la conception du circuit imprimé (cf. plus loin).

Une autre solution serait l'utilisation d'une surface garnie de micro-poils ayant une grande rigidité. Celle-ci permettrait d'obtenir une grande sensibilité aux forces tangentielles et aux variations dynamiques. Cette solution a été gardée en tête pour les tests des caractéristiques de la découpeuse laser (cf. partie suivante).

4. Test de la machine à découper au laser

a. Caractérisation de la machine

La machine à découper au laser sera utilisée pour usiner une structure de moule pour la surface du capteur. La structure de la surface devra être composée d'une multitude de « micro-poils » de forme cylindrique. Ceux-ci permettront une détection dynamique de la force appliquée sur le capteur. De plus, ils permettront de limiter l'effet viscoélastique propre au silicone. Afin de maximiser ces propriétés, il faut qu'il y ait un maximum de poils, ou pylônes par unité de surface. De fait, ces poils doivent avoir le plus petit diamètre possible et être les plus rapprochés possibles.

Des essais ont été effectués pour caractériser les possibilités de la machine. Un premier jeu de tests a eu lieu pour but de déterminer le diamètre minimum usinable. En fonction des caractéristiques du matériau et des réglages, il a été montré que le diamètre minimum acceptable est de 0.1 mm. Les trous de ce diamètre sont les plus petits à avoir encore une forme circulaire.

Des tests supplémentaires ont été effectués pour caractériser l'écartement minimum de 2 trous consécutifs. Le test a constitué en lignes de perçage au diamètre 0.1 mm, puis 0.2 mm, avec un écart entre les trous variant de 1 mm à 0.1 mm.

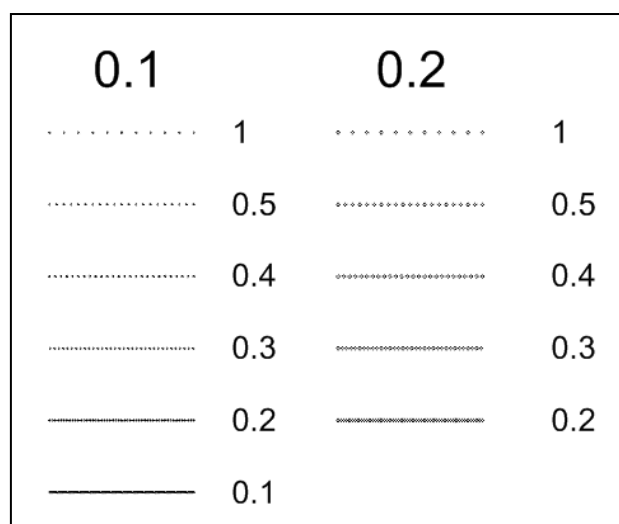


Figure 30 : Essai d'écartement

Pour des perçages de diamètre 0.1 mm, l'écartement minimum efficace entre 2 perçages sans creuser une rainure est de 0.4 mm. Il est éventuellement envisageable d'effectuer des perçages

écartés de 0.3 mm, à condition d'avoir un réglage de la machine particulièrement fin. De même, pour des perçages d'un diamètre de 0.2 mm, l'écartement minimal serait de 0.5 mm, voire 0.4 mm avec un réglage fin des paramètres de coupe.

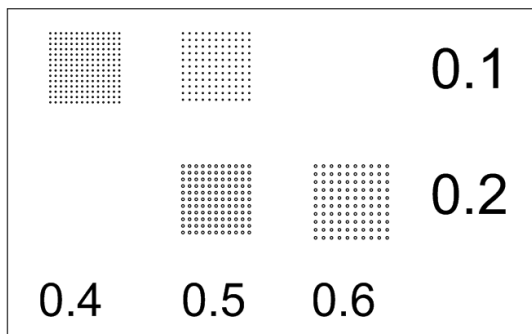


Figure 31 : Essai de matrice découpée

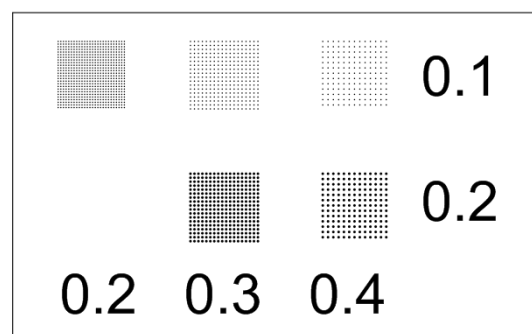


Figure 32 : Essai de matrice gravée

b. Essai sur différents matériaux

Il a été envisagé de travailler sur du Kapton. Ce matériau dispose d'excellentes propriétés mécaniques et d'une très bonne stabilité pour de très larges conditions d'utilisation. Il s'agit de l'utiliser pour séparer les 2 électrodes. Sa faible épaisseur permet d'obtenir une capacitance plus élevée. Il faudrait ensuite en utiliser une couche un peu plus épaisse et gravée pour la couche supérieure. Cette dernière couche serait gravée de manière à ne laisser que les pylônes.

Cependant, après essais, il s'est avéré que le Kapton se gravait très mal au laser. Le faisceau fait fondre la matière sans en enlever la moindre épaisseur. Ce matériau ne sera donc pas usinable dans ces conditions.

L'essai suivant à consister à graver à plusieurs reprises une plaque d'acrylique pour un faire un moule. La gravure simple a un fini visuel à l'œil nu acceptable. Cependant, l'observation au microscope montre que les cercles ne sont pas réguliers. Ainsi la découpe permet un meilleur fini que la gravure.

La dernière idée soulevée a été de découper l'acrylique, mais avec une faible puissance afin de ne pas traverser le matériau. Ainsi, en réglant l'angle du faisceau, il serait possible de graver le moule pour couler les pylônes en Silicone.

IV. Electronique : conception d'un circuit imprimé

1. Introduction

Le développement du circuit imprimé a occupé la majeure partie du PFE. Celui a été créé sur l'environnement de développement gratuit EAGLE. Ce processus s'effectue en deux étapes. Tout d'abord un schéma électrique est mis au point, puis les composants sont physiquement placés sur un circuit imprimé. Bien que ne disposant pas d'outil de simulation du circuit, EAGLE permet tout de même de vérifier certaines règles élémentaires de conception électronique, telles que ne pas laisser de patte de circuit intégré en l'air ou vérifier que les composants sont alimentés par une source de courant.

Certaines contraintes de conception ont été mises en place afin de limiter le choix des composants secondaires. Elles ont été revues et modifiées durant la phase de conception. Ce sont les suivantes :

- Les composants secondaires (résistances, condensateurs) doivent être génériques et trouvables en magasin
- Les composants doivent être de petite taille (typiquement les plus petits conditionnements de chacun d'entre eux)
- Les composants doivent se trouver dans la bibliothèque EAGLE.

De plus, la taille finale du CI utilisé devra être de 20 mm x 30 mm. Cela correspond à la surface d'un doigt de main articulée. Ce circuit imprimé devra être divisé en 2 parties : une partie regroupant les composants et une partie regroupant les taxels.

De part le fait que le système qui allait être créé serait avant tout un banc de test et différent de la version finale, les contraintes précédentes ont doucement évolué. Tout d'abord, ce circuit imprimé n'étant pas destiné au montage sur un doigt, sa taille a pu être augmentée jusqu'à 45 mm x 45 mm afin de placer les différents composants.

A des fins de simplicité de manipulation et d'assemblage, la taille des composants n'est plus devenue une contrainte. En effet, en cas de soudage difficile à effectuer, cela peut créer une autre source d'erreur et introduire des test supplémentaires qui n'ont pas de raison d'exister à cette étape de la conception.

Le logiciel incorpore par défaut des bibliothèques de composants utilisables pour la conception schémas électroniques. Les composants communs, comme les condensateurs ou les résistances s'y trouvent déjà. Certains composants spécifiques, cependant, ont dû être créés et ajoutés manuellement.

Une fois les contraintes définies et les composants créés, la conception du circuit imprimé a pu s'effectuer. Elle s'est déroulée de manière itérative, le circuit incorporant de plus en plus de fonctions au fur et à mesure de sa conception.

La première étape consiste à la mise en place des taxels, de l'AD7147 et du PIC pour communiqué. Il a ensuite fallu insérer un module de communication RS-232 afin de communiquer aisément avec l'extérieur, notamment la partie purement haptique du module.

2. Conception des composants

La conception des composants consiste à utiliser l'interface d'EAGLE afin de créer une représentation visuelle pour le schéma électrique, ainsi qu'un gabarit avec les dimensions constructeur pour le circuit imprimé.

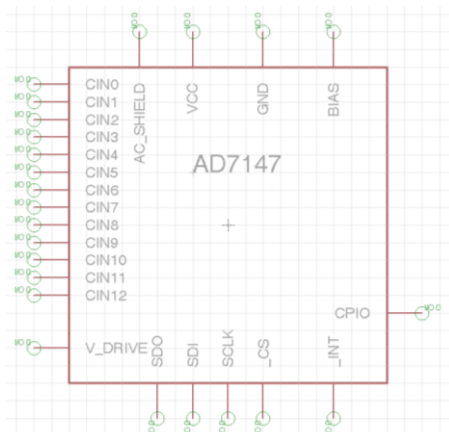


Figure 33 : AD7147 vue schéma électrique

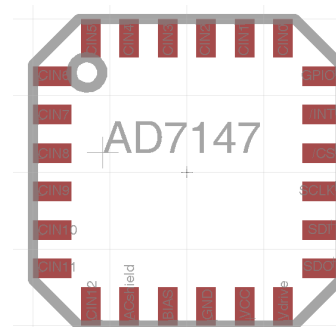


Figure 34 : AD7147 vue circuit imprimé, V1.0

L'AD7147 a fait l'objet d'une mise à jour. En effet, il s'est avéré que les traces de cuivre sur le circuit imprimé étaient trop petites pour une soudure efficace. Le composant a donc été modifié pour faciliter l'assemblage.

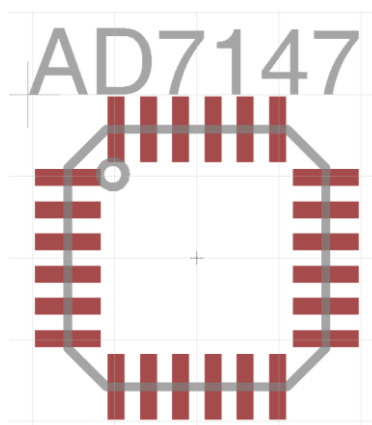


Figure 35 : AD7147 vue circuit imprimé, V1.2

Le PIC16F88 dispose de deux formats de boîtier. Le format PDIP a été utilisé pour le circuit imprimé de test, tandis que le format QFN sera plutôt utilisé pour la version finale.

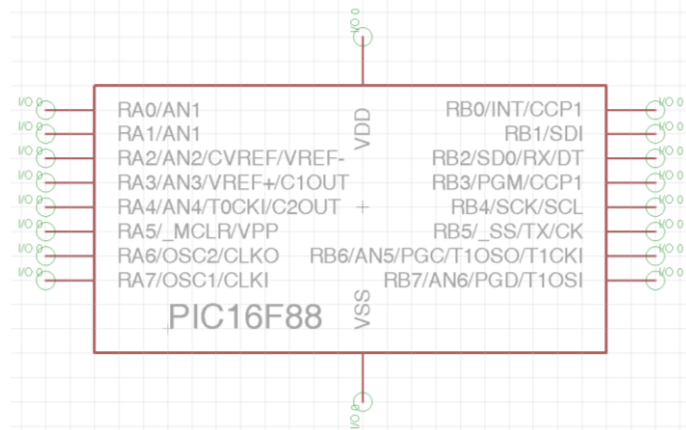


Figure 36 : PIC16F88 vue schéma électrique

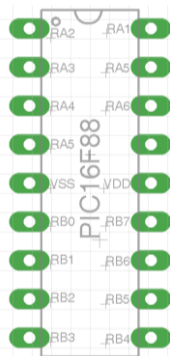


Figure 37 : PIC16F88 vue circuit imprimé, boîtier PDIP

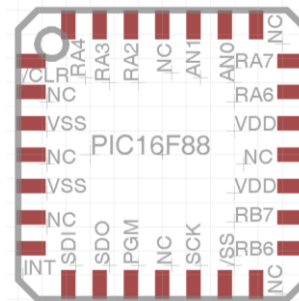


Figure 38 : PIC16F88 vue circuit imprimé, boîtier QFN

3. Conception itérative du circuit imprimé

a. Premier contact avec le circuit imprimé

Les composants de bases placés sur le circuit imprimé sont le jeu de 3 taxels et l'AD7147. Un régulateur de tension LP2951 de 3.3V a été ajouté pour assurer une alimentation stable. Les composants sont placés sur la couche supérieure et les taxels sur la couche inférieure. Originellement, l'alimentation en 5V s'effectue par la partie basse du circuit. Il y a 4 trous aux extrémités pour fixer le circuit imprimé sur un support fixe et éviter que les forces appliquées aux taxels n'endommagent indirectement les puces. Les espaces sans composants seront remplis de cuivres et reliés à la masse. Ils limiteront alors les parasites extérieurs.

Cette première version du circuit imprimé a été créée avec et sans PIC. Dans un premier, il avait été envisagé de relier directement l'AD7147 à un DSP déjà présent sur le site. Cependant, l'idée a été abandonnée car l'utilisation du DSP était plus complexe et prendrait plus de temps que l'utilisation d'un PIC directement sur site.

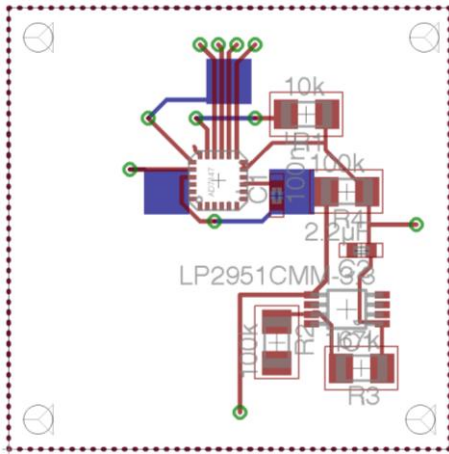


Figure 39 : Circuit imprimé (1) sans PIC

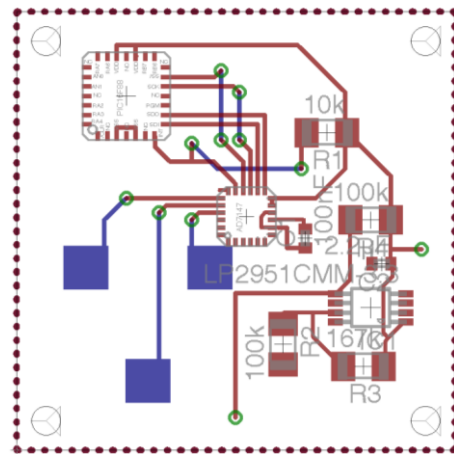


Figure 40 : Circuit imprimé (1) avec PIC

Le routage a été effectué en partie à la main : le tracé automatique générait des aberrations et ne prenait pas en compte certaines facilités dues au placement relatif des composants.

b. Insertion de la communication RS-232

Afin d'initier le protocole de communication RS-232, un régulateur de tension négative de type LM337 a été ajouté. Le circuit dispose alors d'une source de tension +5 V et -5 V. La tension de sortie du PIC est comprise entre 0 à l'état logique 0 et 3.3 V à l'état logique 1. Il faut transposer le signal d'entrée de ± 5 V vers 0 – 3.3 V, et le signal de sortie de 0 – 3.3 V vers ± 5 V.

Pour ce faire, un AOP a été utilisé. Le premier choix s'est porté vers un dispositif AD8001. Celui-ci présente l'avantage d'une taille très réduite. Cependant, il ne tolère que des courants d'entrée très faibles : 5.5 mA. Des résistances ont été ajoutées pour dévier le courant. Cependant, leur taille et leur multiplication occupe beaucoup d'espace sur le circuit imprimé.

L'AOP AD8001 a donc été remplacé par un AD817. Celui-ci est plus gros en termes de place, mais admet un courant d'entrée plus important. Les résistances de tirage ont alors été retirées, et un pont diviseur de tension a été mis en place pour obtenir la tension de référence des AOP : $V_{dd}/2$, soit 1.65 V.

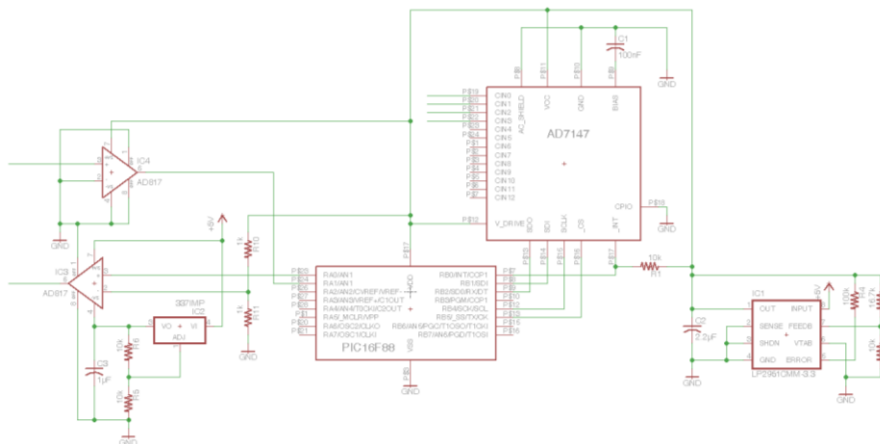


Figure 41 : Circuit électronique avec RS-232 et AOP

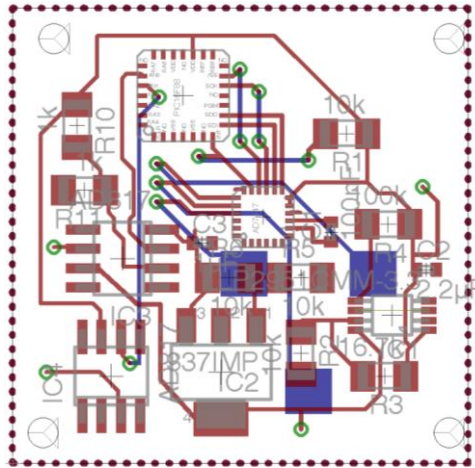


Figure 42 ; Circuit imprimé (2) avec RS-232 et AOP.

Les taxels ont ensuite été placés en vis-à-vis d'une surface de cuivre formant un plan de masse. De plus, le format du boîtier du PIC a été changé pour une version plus grande et plus aisée à souder. Des pins de connections ont été ajoutés pour l'alimentation 5 V et pour pouvoir tester le 3.3 V ainsi que la communication SPI.

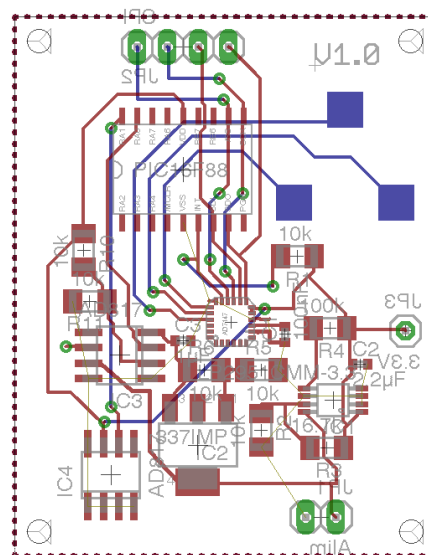


Figure 43 : Circuit imprimé (3)

c. Inspection par un ingénieur en électronique

Cette dernière version du circuit a été envoyée à David Castonguay, un ingénieur diplômé en électronique. Il a déjà travaillé avec le professeur Vincent Duchaine et a l'habitude d'utiliser EAGLE. D'après ses conseils, le régulateur de tension négative peut être remplacé par un circuit dit « charge pump », ce qui limiterait la multiplication de composants secondaires.

De plus, il a fallu séparer les différents masses. En effet, les circuits numériques, à chaque changement d'état, produisent des interférences pouvant perturber le circuit analogique. Une masse dite analogique et masse dite numérique ont été créées et reliées à une masse commune. Des

capacités de découplage ont été rajoutées au niveau de l'alimentation des puces. Une version plus petite des résistances a été proposée pour gagner de l'espace.

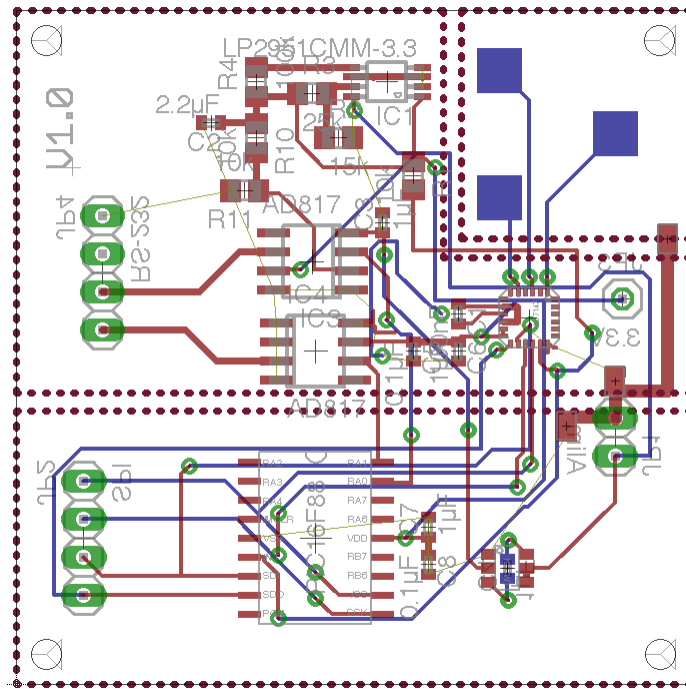


Figure 44 : Circuit imprimé (4)

Les 3 masses sont la masse numérique, située en partie basse, la masse analogique, située en partie haute et la masse liée aux taxels. Toutes celles-ci sont liées au 0 V d'alimentation. Pour ce faire, des composants spécifiques ont été créés à cette fin.

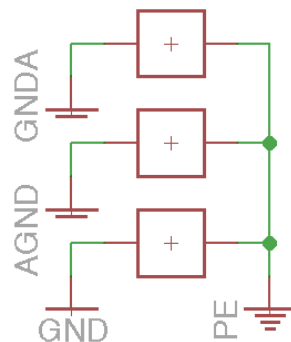


Figure 45 : Différentes masses liées ensemble

Concernant la communication RS-232, David Castonguay a conseillé le circuit ADM3251E. Cet émetteur-récepteur ne nécessite pas d'alimentation -5 V et pourrait permettre de faciliter le codage du PIC16F88. L'ADM3251E fonctionne aussi bien avec une alimentation 5 V qu'une alimentation 3.3 V. Les 2 amplificateurs opérationnels ne sont donc plus nécessaires.

Afin de pouvoir le programmer extérieurement au circuit, la version PDIP a été choisie et placée via un support prévu à cet effet. La largeur des pistes d'alimentation ont été agrandies pour diminuer leur inductance.

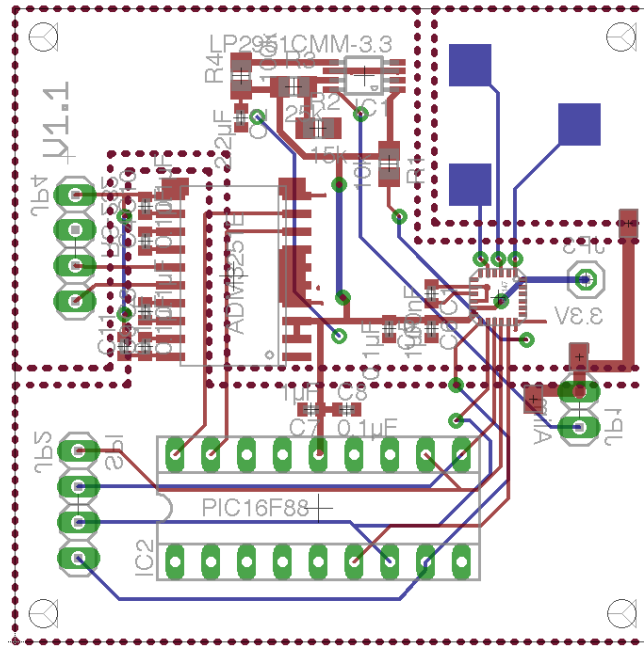


Figure 46 : Circuit imprimé (5)

d. Fabrication du circuit imprimé

Les premiers plans pour la fabrication du circuit imprimé ont alors pu être envoyés à APCircuits, un fournisseur canadien. Il restait cependant une erreur de conception sur l'AD7147.

Par commodité pour relier les électrodes au circuit, le nom des pattes avait été inscrit sur la puce.

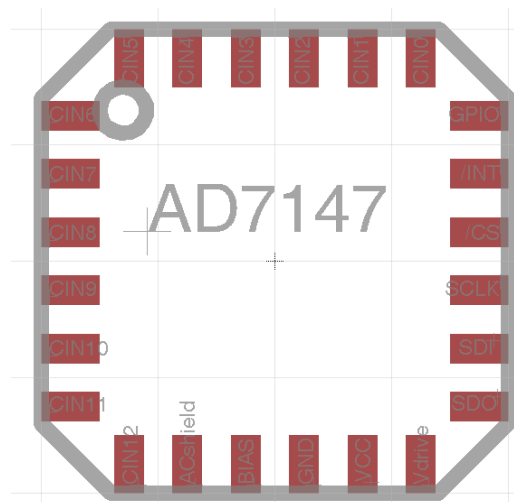


Figure 47 : AD7147 avec pattes nommées.

Cependant, il n'existe pas de calque d'écriture pour les commentaires, aussi ces noms avaient-ils été ajoutés sur le calque de positionnement des composants. L'épaisseur minimale que peut fournir le fabricant pour les traits de positionnement ou d'écriture est de 0.006 pouces. Celui-ci a donc essayé de garder la même écriture, en agrandissant simplement la taille des traits. Cela a donné un texte illisible :

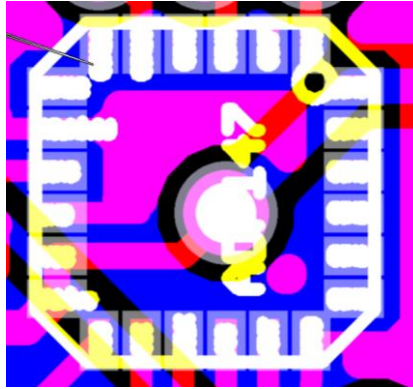


Figure 48 : Ecritures illisibles

Ces écritures ont donc été ôtées du calque. Il ne reste plus que dessin de placement du composant. La commande a enfin pu être envoyée en bonne et due forme.

e. Premier assemblage

Une fois les composants et le circuit reçu, ils ont été confiés au département de Génie Electrique. Ils sont en effet les seuls à disposer des équipements nécessaires à l'assemblage de puces de cette taille.

Le placement de l'AD7147 n'a pu être faite qu'approximativement par le soudeur. En effet, les surfaces de soudages avaient exactement la même taille que les pattes de la puce. Ainsi, le placement n'a pas pu être effectué idéalement. Cette considération a été prise en compte lors de l'élaboration de la version suivante du circuit imprimé.

De plus, une capacité de découplage était manquante. Cela n'aurait pas entravé le bon fonctionnement du circuit, mais aurait pu avoir un impact sur le bruit du signal.

f. Débogage du circuit

Le premier essaie de communication entre le PIC16F88 et l'AD7147 a mis en évidence un certain nombre d'erreurs de conception à prendre en compte pour les prochaines itérations.

Tout d'abord, il s'est avéré que les pattes SDO (sorties) de l'AD7147 et du PIC16F88 avaient été liées ensemble. Il en est de même pour les pattes SDI (entrées). De fait, il est impossible que les composants communiquent par le protocole intégré au PIC (dont les pattes sont définies).

La taille des surfaces de soudure de l'AD7147 mise en évidence par le soudeur implique un réel problème de communication. Les pattes de l'AD7147 mesurent moins d'un demi-millimètre de large et la puce elle-même est un composant carré de 4 mm de côté.

Un multimètre a donc été utilisé conjointement avec un fil de cuivre très fin pour pouvoir tester les pattes de la puce. Leur largeur est de l'ordre de 250 μm . Il en a résulté que la connectique entre le PIC et l'AD était effectuée correctement par les 4 fils du bus SPI (SDO, SDI, CLK et CS). Cependant, l'alimentation de l'AD n'était pas effectuée correctement.

Enfin, le composant ADM3251E, émetteur récepteur RS232, dispose de 2 modes d'alimentation, en 5V ou en 3.3V. La première, permet d'assurer une auto-alimentation du bus de communication. La seconde, impose d'alimenter le bus de communication. Dans notre cas, l'ADM est alimenté par la seconde méthode. Cependant, l'alimentation du bus de communication n'a pas été effectuée.

g. Seconde itération

Les erreurs localisées pendant la phase de débogage ont été analysées et le circuit imprimé a été modifié en conséquence. Un détail supplémentaire a été modifié : la fonction de « Chip Select » du protocole de communication SPI est passée de la patte n°5 à la patte n°7 du port B du PIC16F88. En effet, la fonction « Chip Select » de la patte 5 n'est effective que quand la communication SPI du PIC16F88 le reconnaît en tant qu'esclave.

Le circuit imprimé a ensuite été contrôlé par David Castonguay et envoyé à APCircuits pour la production.

La réception, comme la soudure et les essais n'ont pas décelé de problème dans la structure de ce circuit imprimé.

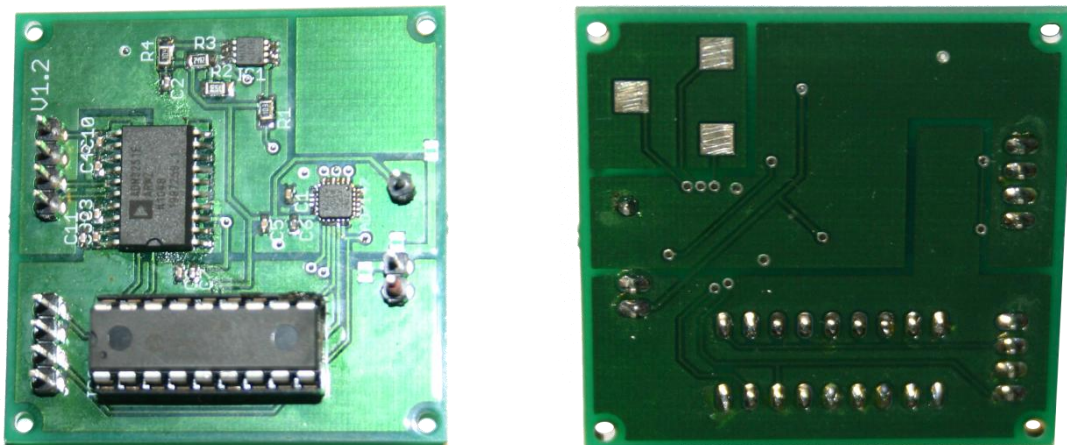


Figure 49 : Seconde itération du circuit imprimé

4. Ecriture du code

L'AD7147 a été avant tout pensé pour créer un clavier tactile à partir de condensateurs. Une électrode est directement placée sur le circuit imprimé, tandis que la seconde est en fait le doigt de l'utilisateur quand il actionne le bouton. Cela fait varier la valeur de la capacitance. Si cette valeur dépasse un certain seuil, un appui est détecté et le microcontrôleur peut agir en fonction.

Dans notre cas, il va y avoir une présence permanente des 2 électrodes. Et c'est l'appui sur l'ensemble de 3 boutons qui fera varier les capacitances. Ainsi, la détection de seuil ne sera pas utilisée.

a. Analyse d'exemples

Des exemples de code ont été récupérés pour la programmation de l'AD7147. Ceux-ci donnent des exemples de programmation pour la communication SPI. Ils ont été minutieusement analysés pour acquérir un maximum de connaissance sur la manière de programmer l'AD7147.

Le fichier Regmaps.h regroupe les noms des registres de l'AD. Il a été créé pour une version similaire de convertisseur capacitif-numérique : l'AD7142. Les valeurs ont été vérifiées et les noms utilisés sont presque tous les mêmes. S'ils ne l'étaient pas, ils ont été modifiés pour correspondre à l'AD7147.

S'en suit le fichier concernant les définitions générales. Il commence par la définition des pins de communication SPI. S'en suivent la définition des types de variables (WORD, BYTE, etc...). Les données propres au registre du microcontrôleur sont définies et la variable globale de donnée est créée. Enfin, viennent les fonctions de lecture/écriture. Celles-ci appellent les fonctions contenues dans le fichier SPI.h.

Le fichier SPI.h gère la communication entre l'AD7147 et le microcontrôleur via le bus SPI. Les fonctions de lecture et d'écriture commencent toutes deux par l'envoi d'une valeur de contrôle contenant le numéro du registre de l'AD7147 qui va être lu, ou dans lequel il va être écrit. Ensuite, les données sont lues ou écrites en fonction de l'action demandée.

Le dernier fichier concerne la configuration des entrées de l'AD7147. Il y a 12 étapes de détection. A chaque étape, il est possible de détecter la valeur de la capacitance d'un condensateur (mesure directe) ou de 2 condensateurs (mesure différentielle). A chaque étape correspond un paramétrage indépendant. Les paramètres sont, entre autres, la sensibilité et la valeur du seuil de détection, les offset, la manière dont est connecté le condensateur à mesurer, etc...

b. Programmation du PIC

La première étape dans la programmation du PIC a été l'utilisation de la communication SPI. Le PIC16F88 dispose de registre et de fonctions intégrés pour ce protocole. Son initialisation comprend la spécification d'un certain nombre de paramètres, comme l'envoi ou la réception de donnée sur front montant ou descendant, la fréquence de transmission par rapport à l'oscillateur interne ou encore quel type de « mode maître » utiliser.

Afin de faire communiquer les 2 puces, le protocole propre au PIC a été utilisé. Le principe du SPI est une lecture/écriture simultanée. Celui intégré au PIC fonctionne de la manière suivante : un mot de 8 bits est placé dans le buffer. Ensuite, le mot contenu dans le buffer est « échangé » bit par bit (le MSB en premier) avec le mot contenu dans le registre cible, à la fréquence de la patte SCK. A la fin de la communication, les 2 mots ont été inversés et un flag est mis à 1 pour signaler la fin de dialogue.

L'AD7147 n'admet que des registres de 16 bits tandis que le buffer du PIC ne contient que 8 bits. Il a donc fallu couper le mot en deux et effectuer 2 envois successifs. Comme la transmission ne s'effectue que lors de front montant ou descendant de SCK, il suffit de le maintenir dans un état constant pendant le traitement des données. Le programme a toutefois été écrit de manière à limiter le temps entre les 2 mots de 8 bits.

La récupération ou l'envoi de données sur l'AD7147 s'effectue en 2 étapes. La première est l'envoi d'un mot de commande de 16 bits constitué d'un en-tête fixe, d'un bit de lecture/écriture et de l'adresse dans laquelle lire ou écrire.

Bit	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Value	1	1	1	0	0	R/W	Adresse du registre									

Écriture dans l'AD7147 : R/W = 0

Lecture à partir de l'AD7147 : R/W = 1

La seconde étape est alors la lecture ou l'écriture du mot de 16 bits. Le protocole de la communication SPI impose l'envoi de donnée quelque soit le cas. S'il s'agit d'une opération de lecture, la donnée envoyée n'a pas d'importance. S'il s'agit d'une opération d'écriture, la donnée envoyée est la donnée à écrire.

Le fait que les pattes SDI et SDO aient été liées ensemble a impliqué une réécriture du protocole SPI. Cette communication dite « manuelle » consiste à faire évoluer le signal d'horloge (SCK) et l'état des pattes SDI et SDO au sein de boucle de programmation. Basés sur un programme existant sur une puce d'Analog Device (l'ADuC841), les programmes ont été réécrits et adaptés au PIC16F88. Des étapes d'attente ont été mises en place par un usage de la fonction nop() (no operation) afin d'obtenir un rapport cyclique de 0.5 sur le signal d'horloge et les entrées/sorties.

Après la réception de la seconde version du circuit imprimé, un premier essai de communication a été effectué entre le PIC16F88 et l'AD7147. Il s'agissait de demander à l'AD son numéro d'identité. Cet essai a été concluant et la communication SPI fonctionne correctement. De plus, l'utilisation de l'ADM3251E assure correctement son rôle dans la communication RS232.

c. Programmation de l'AD7147 et lecture de résultats

La programmation de l'AD7147 a été effectuée par le PIC16F88 via SPI. Il s'agissait dans un premier temps d'initialiser correctement l'AD7147. Celui disposant de nombreuses fonctions il a fallu paramétrer un certain nombre de registres, quitte à leur attribuer une valeur par défaut. Les registres principaux, ainsi que leurs fonctions sont les suivants :

STAGEx_CONNECTION :

Le composant dispose de 12 étapes de détection de la capacitance. Ce registre établit la connexion entre les différentes entrées des capacitances pour l'étape x. L'AD peut lire une valeur de capacitance positive, négative ou différentielle. Chaque entrée peut être paramétrée sur une détection positive ou négative ou être non connectée ou non utilisée. Par défaut, une seule entrée peut être lue par étape de détection, sauf en cas de lecture différentielle où elles peuvent être deux. Enfin, grâce à ces registres, on peut paramétrer la valeur et l'ajout ou non d'un offset négatif ou/et positif pour les valeurs de capacitance ainsi régler la sensibilité de détection.

PWR_CONTROL :

Ce registre permet de régler le type de fonctionnement désiré (full power, low power, le temps de passage de l'un à l'autre), ainsi que le nombre de séquences de conversion, etc...

AMB_COMP_CTRL0-2 :

Ces 3 registres permettent de régler l'auto-calibration. En fonction des paramètres environnementaux, tels que la température, l'humidité, ou même la saleté sur une électrode, l'AD7147 se calibre automatique et périodiquement. Ces registres permettent de régler la fréquence de calibration, le temps durant lequel elle n'est pas effectuée si l'AD convertit une capacitance. De plus, ils permettent de régler les paramètres relatifs à la proximité de détection (la sensibilité, la valeur de capacitance à partir de laquelle il faut arrêter de calibrer et convertir, etc...)

STAGE_EN_CAL :

Ce registre autorise ou interdit l'auto-calibration pendant les différentes étapes de détection d'une capacitance. De plus, il permet de préciser combien d'échantillons convertis doivent être ignorés à cause de la latence de calibration.

STAGE_LOW_INT_EN, STAGE_HIGH_INT_EN, STAGE_COMPLETE_INT_EN :

La détection de capacitance fonctionne sous interruption. Ces 3 registres activent ou non l'activation d'interruption si une valeur de capacitance positive ou négative est détectée, ainsi que si une étape de conversion est finie.

Une fois ces registres initialisés, la valeur de la capacitance peut être lue dans les registres de résultat : ADCRESULT_Sx, x de 0 à 2. Par défaut, la valeur lue est zéro, mais varie lors de l'application d'un doigt sur une électrode. Une détection est donc belle et bien effectuée.

La détection s'effectue la plupart du temps en 2 temps. Tout d'abord, le contact est effectué avec l'électrode et la valeur transmise est maximum (la valeur FFFF en hexadécimal). Puis, suite à l'auto-calibration automatique de l'AD7147, cette valeur peut changer pour prendre une valeur comprise en 0 et FFFF.

La modification des registres d'initialisation n'ont pas d'effet notable sur le résultat. Cependant, différentes pistes sont envisagées à ce sujet pour la suite du projet. Par exemple le fait que le bouclier actif protégeant les traces reliant les électrodes à l'AD7147 ne soit pas placé de manière optimale. Il se pourrait aussi que la valeur de capacitance à détecter soit inférieure à la plage de valeur détectable par l'AD7147. Il s'agirait d'utiliser un condensateur de valeur adéquat comme valeur de référence.

V. Suivi

Ce projet étant le démarrage d'un projet se déroulant sur 3 ans, des données concernant les recherches effectuées doivent être conservées pour l'avenir. Le laboratoire dispose d'un Wiki interne sur lequel ont été stockées toutes les informations relatives au projet en cours. Il contient notamment des informations sur les composants électroniques utilisés, les erreurs fréquemment faite, la méthode pour les éviter, ainsi que des informations à l'utilité récurrente.

Le Wiki sert donc aussi bien de base de données sur lequel sont hébergées tous les fichiers relatifs au travail effectué, mais aussi de site de compte-rendu sur lequel l'avancée des recherches est régulièrement mise à jour.

De plus, des rencontre seront effectuées avec l'étudiant au doctorat en charge de reprendre la suite du projet. Il s'agira de lui expliquer le travail effectué, ainsi que l'état actuel du projet.

VI. Conclusion

Ce projet de recherche était avant tout à but exploratoire. De fait, tous les domaines d'étude de la mécatronique ont été mis en œuvre. Il s'est agit, dans un premier temps, d'une recherche documentaire sur l'état de l'art par rapport au retour haptique. Le projet a ensuite été orienté vers l'instrumentation de la main articulée et la création d'un capteur d'effort.

Une étude mécanique basée sur une publication coréenne a été menée à bien pour évaluer une structure de capteur. Un modèle mathématique a été créé sous Matlab pour évaluer la réponse de la structure à différents types de pression. Dans un but d'approfondissement des recherches mécaniques, des essais ont été effectués avec une machine à découper un laser.

Afin d'acquérir la valeur des capacitances servant de base au capteur, un circuit imprimé a été créé. Il comprend une puce chargée de convertir la valeur de capacitance en valeur numérique : l'AD7147. La programmation de ses registres de 16 bits est effectuée par un PIC16F88 via bus SPI. Les capacités des l'AD7147 sont telles que seule une partie infime d'entre elles seront utilisées à terme pour la suite du projet.

Enfin, un suivit du projet est effectué non seulement grâce à l'utilisation du Wiki interne au laboratoire, mais aussi grâce à de futures rencontre avec l'étudiant au doctorat en charge de poursuivre la recherche.

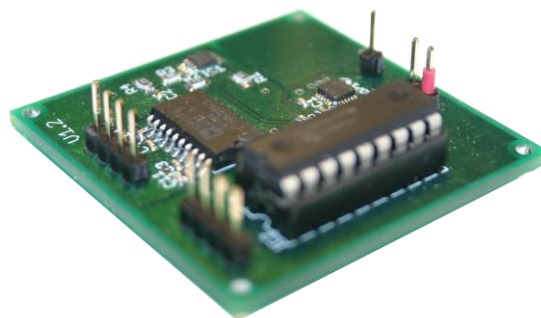


Table des figures

Figure 1 : Main sous actionnée	5
Figure 2 : Structure présentée dans la publication de référence.....	6
Figure 3 : Principe d'appui sur 4 condensateurs	7
Figure 4 : 4 taxels, une bosse	7
Figure 5 : 9 taxels, 4 bosses à la base jointive.....	8
Figure 6 : 16 taxels, 4 bosses disjointes.....	8
Figure 7 : Nouvelle structure.....	8
Figure 8 : Coupe plan médian.....	9
Figure 9 : Coupe au niveau des pylônes	9
Figure 10 : Application d'une force normale.....	9
Figure 11 : Application d'une force tangentielle	9
Figure 12 : Déplacement horizontal issu d'une force normal	10
Figure 13 : Déplacements vertical issu d'une force normale	10
Figure 14 : Déplacement horizontal issu d'une force tangentielle	10
Figure 15 : Déplacements vertical issu d'une force tangentielle	10
Figure 16 : Evolution de l'écart entre les électrodes dans le cas d'une force normale	11
Figure 17 : Evolution de l'écart entre les électrodes dans le cas d'une force tangentielle.....	11
Figure 18 : Structure du capteur	11
Figure 19 : Force appliquée à la bosse de gauches	13
Figure 20 : Force appliquée à la bosse de droite.....	13
Figure 21 : Second système soumis à une force F_{NT}	13
Figure 22 : Capacitance en fonction de la position de la force	15
Figure 23 : Modélisation des écarts en fonction du point d'application de la force normale	16
Figure 24 : Nouvelle modélisation.....	17
Figure 25 : Modélisation ajustée	18
Figure 26 : Modélisation final de la force normale	19
Figure 27 : Modélisation de l'application d'une force tangentielle	19
Figure 28 : Portion d'effort encaissé par les bosses en fonction de l'abscisse du point d'application .	20
Figure 29 : Ecart entre les électrodes en fonction de la position de la force tangentielle	21
Figure 30 : Essai d'écartement	22
Figure 31 : Essai de matrice découpée.....	23
Figure 32 : Essai de matrice gravée	23
Figure 33 : AD7147 vue schéma électrique.....	25
Figure 34 : AD7147 vue circuit imprimé, V1.0.....	25
Figure 35 : AD7147 vue circuit imprimé, V1.2.....	25
Figure 36 : PIC16F88 vue schéma électrique.....	26
Figure 37 : PIC16F88 vue circuit imprimé, boîtier PDIP.....	26
Figure 38 : PIC16F88 vue circuit imprimé, boîtier QNF	26
Figure 39 : Circuit imprimé (1) sans PIC	27
Figure 40 : Circuit imprimé (1) avec PIC	27
Figure 41 : Circuit électronique avec RS-232 et AOP	27
Figure 42 ; Circuit imprime (2) avec RS-232 et AOP.....	28
Figure 43 : Circuit imprimé (3).....	28
Figure 44 : Circuit imprimé (4).....	29

Figure 45 : Différentes masses liées ensemble	29
Figure 46 : Circuit imprimé (5).....	30
Figure 47 : AD7147 avec pattes nommées.....	30
Figure 48 : Ecritures illisibles	31
Figure 49 : Seconde itération du circuit imprimé.....	32

Bibliographie

« *A Haptic Feedback System for Lower-Limb Prostheses* » Richard E. Fan, Member, IEEE, Martin O. Culjat, Member, IEEE, Chih-Hung King, Member, IEEE, Miguel L. Franco, Richard Boryk, James W. Bisley, Erik Dutson, and Warren S. Grundfest

« *A Robust, Low-Cost and Low-Noise Artificial Skin for Human-Friendly Robots* » John Ulmen and Mark Cutkosky

« *Design, Simulation and Fabrication of a Low Cost Capacitive Tactile Shear Sensor for a Robotic Hand* » Arridh Shashank, Student Member IEEE, Mohsin I. Tiwana, Stephen J. Redmond, Member IEEE, Nigel H. Lovell, Senior Member, IEEE

« *New tactile sensor chip with silicone rubber cover* » Michael Leineweber, Georg Pelz, Michael Schmidt, Holger Kappert, Günter Zimmer

« *Normal and Shear Force Measurement Using a Flexible Polymer Tactile Sensor With Embedded Multiple Capacitors* » Hyung-Kew Lee, Jaehoon Chung, Sun-Il Chang, et Euisik Yoon

« *Tactil Sensing and Control of Robotic Manipulation* » Robert D. Howe

« *Towards the design of a prosthetic underactuated hand* » T. Laliberté, M. Baril, F. Guay, et C. Gosselin

Annexes

Synthèse de l'analyse de documents traitant de la mise en œuvre de feedback haptique

Les différents types de capteurs sensoriels

Récepteur probable	Classe	Champ réceptif (mm ²) (médiane)	Type de peau	Gamme de fréquence (la plus sensible)	Corrélation sensorielle probable	Nb de récepteur /cm ² (paume)
Corpuscule de Pacinian	PC	10-100 (100)	G, P	40-800 Hz (200-300 Hz)	Vibration, Chatouillement	21 (9)
Corpuscule de Meissner	RA	1-100 (12.6)	G	10-200 Hz (20-40 Hz)	Toucher, Chatouillement, Vibration de mouvement	140 (25)
Récepteur des follicules pileux	RA	?	P	?	Toucher Vibration	
Terminaison de Ruffini	SA II	10-500 (60)	G, P	7 Hz	Force tangentielle Traction	49 (16)
Cellule de Merkel	SA I	2-100 11.0	G	0.4-100 Hz	Pointes Pression	70 (8)
Disque tactile	SA	3-50	P	?	?	?

G : glabre P : Poilu

Notion de feedback pseudo-haptique

La plupart des publications étudiées parle d'un feedback pseudo-haptique plutôt qu'un "réel" feedback haptique. Il s'agit en fait d'un feedback visuel et/ou sonore complétant ou remplaçant un feedback haptique. Un bon nombre des publications analysées font cette confusion, ce qui induit une erreur dans les recherches.

Domaines d'application

Généralement, la technologie utilisant un feedback haptique est utilisée dans le domaine médical, en particulier dans le cas de la chirurgie non invasive. Le robot Da Vinci est beaucoup cité. Celui-ci permet en effet un retour de force, mais cette fonction reste très peu utilisée par rapport à la stéréovision.

Un autre domaine d'application est les univers virtuels. Que ce soit par un feedback pseudo-haptique, ou un exosquelette complet monté sur le sujet, de nombreuses publications traitent de la

navigation d'un sujet et de ses actions dans un univers virtuel. L'avantage d'un exosquelette est qu'il permet un retour de force sur les membres en questions, donc un véritable feedback haptique.

Vis-à-vis d'un retour par vibration

L'utilisation des vibrations est pratique : simple à mettre en œuvre, très facile à trouver, à utiliser. Elle admet cependant un certain nombre d'inconvénients. Tout d'abord, la désensibilisation du sujet : il finit par s'habituer aux vibrations et ne les ressent plus correctement ou au contraire, cela peut entraîner une gêne. De plus, la sensibilité aux vibrations est réduite lors de mouvements rapides : l'accélération en arrière-plan masque le signal vibratoire.

Type de feedback haptique

On distingue 2 catégories de mise en œuvre du feedback haptique. La première consiste en une réponse proportionnelle à l'action accomplie. La seconde est une réponse événementielle. La réponse événementielle à un choc virtuel apporte plus de réalisme que la réponse proportionnelle.

Une expérience a été menée sur des patients atteints de sclérose, mettant en œuvre un feedback vibratoire. Un feedback proportionnel et continu peu s'avérer gênant pour des personnes peu atteintes et ayant encore des sensations au niveau de la main. Cependant, ce type de feedback est préférable pour les sujets plus gravement atteints, qui n'ont plus de sensation. A contrario, un feedback événementiel est gênant pour les sujets gravement atteints : le déclenchement systématique leur fait perdre leur concentration.

Impact de l'utilisation d'un feedback haptique

Dans la plupart des publications, il est mis en avant le fait qu'un feedback, qu'il soit haptique ou pseudo-haptique, augmente les réussites dans l'action entreprise. C'est notamment observable lors de la suture par le robot Da Vinci pendant les télé-opérations : les forces appliquées via le robot sont plus proches de celles appliquées à la main. Le risque de lésion du patient ou de casse du fil est donc limité.

Restitution du glissement du doigt

Afin de simuler le glissement du doigt sur une surface virtuelle, la plupart des systèmes étudiés proposent un jet d'air pulsé latéralement sur le doigt. Lors du glissement, un jet est pulsé parallèlement à la surface du doigt.

Cas particulier : le gant Teletact

Ce gant permet de simuler les pressions de contact et la température de surfaces virtuelles. Il est utilisé en parallèle avec un joystick à retour d'effort pour simuler le déplacement dans l'espace virtuel. Les contacts directs sont simulés par le gonflement d'une poche située à l'endroit du contact, tandis que la friction est simulée par l'application d'une force tangentielle via un jet d'air pulsé.

Cette expérience conclue sur le fait que la reconnaissance de surface est assez proche de la sensation humaine. Les glissements sont aisément détectables pour peu qu'ils soient assez grands (0.5 mm ou plus). Cependant, pour les petits mouvements (0.1 mm) il est difficile de faire la différence entre le glissement et une vibration.

Utilisation d'un feedback haptique dans le cas d'une prothèse de jambe inférieure

Cette étude se rapproche de la notre. Des capteurs piézorésistifs sont placés à l'intérieur d'une chaussure. Des actionneurs pneumatiques à réservoirs sont placés sur la partie supérieure de la jambe. Les tests consistaient à des gonflements/dégonflement des actionneurs. Le sujet devait reconnaître la position de l'actionneur activé, ainsi que la quantité de gonflement (0%, 40% ou 100%). Les résultats sont globalement élevés pour un sujet sain, comme pour un sujet avec la jambe amputée.

Un module de friction portable pour retour haptique

La zone de contact est de 300 mm² et est composée de 2 blocs circulaires. Ils sont placés de part et d'autre d'un axe de rotation. Les blocs imposent alors un mouvement de rotation à la peau contre laquelle ils sont en contact. Deux types de tests ont été effectués. Le premier consiste, via un potentiomètre, de piloter le dispositif jusqu'à une orientation voulue, présentée sur un écran. Le second consiste à évaluer l'orientation du système et, via le potentiomètre, de modifier l'orientation de l'image à l'écran pour qu'elle corresponde à la sensation.

Les résultats du premier test sont globalement bons, contrairement à ceux du second. Un sujet est capable d'atteindre une position-objectif, mais a plus de mal à évaluer une orientation qui lui est imposée. Cela est d'autant plus vrai quand la position imposée est située aux alentours de zéro degré.

Note concernant la main articulée SNAVE

Il s'agit d'une main prothétique invasive. Elle fonctionne avec 2 modes différents. Dans le premier mode, l'utilisateur contrôle totalement l'ouverture ou la fermeture de la main. C'est donc à lui de gérer les forces à appliquer. Dans le second mode, la fermeture est automatique. La main se referme sur l'objet à attraper et applique automatiquement la force limite de glissement, détectée par des capteurs à l'extrémité des doigts.

Synthèse de l'analyse de documents traitants de capteurs de forces placés sur un doigt

Introduction

D'après certaines publications, la manière humaine d'attraper un objet ne dépend pas des caractéristiques de celui-ci, mais du rapport de la main à l'objet. Ainsi, mesurer le poids d'un objet, ou son coefficient de frottement n'est pas utilisé pour calculer les forces à appliquer. Pour maintenir une prise sur un objet, quel qu'il soit, la main humaine repose avant tout sur la détection du glissement et sur le retour vis-à-vis de la force appliquée. Les dispositifs de mesure de force abondent. Sont aussi présent, en nombre plus restreints, les dispositifs détectant la friction. Une méthode communément utilisée pour assurer la prise d'une main robotisée est de détecter la limite au glissement et de générer une force légèrement supérieure.

Le type de mesure

Les publications analysées recensent 2 types de mesure rentrant dans le cadre du projet. Le premier étant une mesure de force au bout du doigt pendant une saisie. Le second type concerne la détection du glissement après ou au moment la saisie.

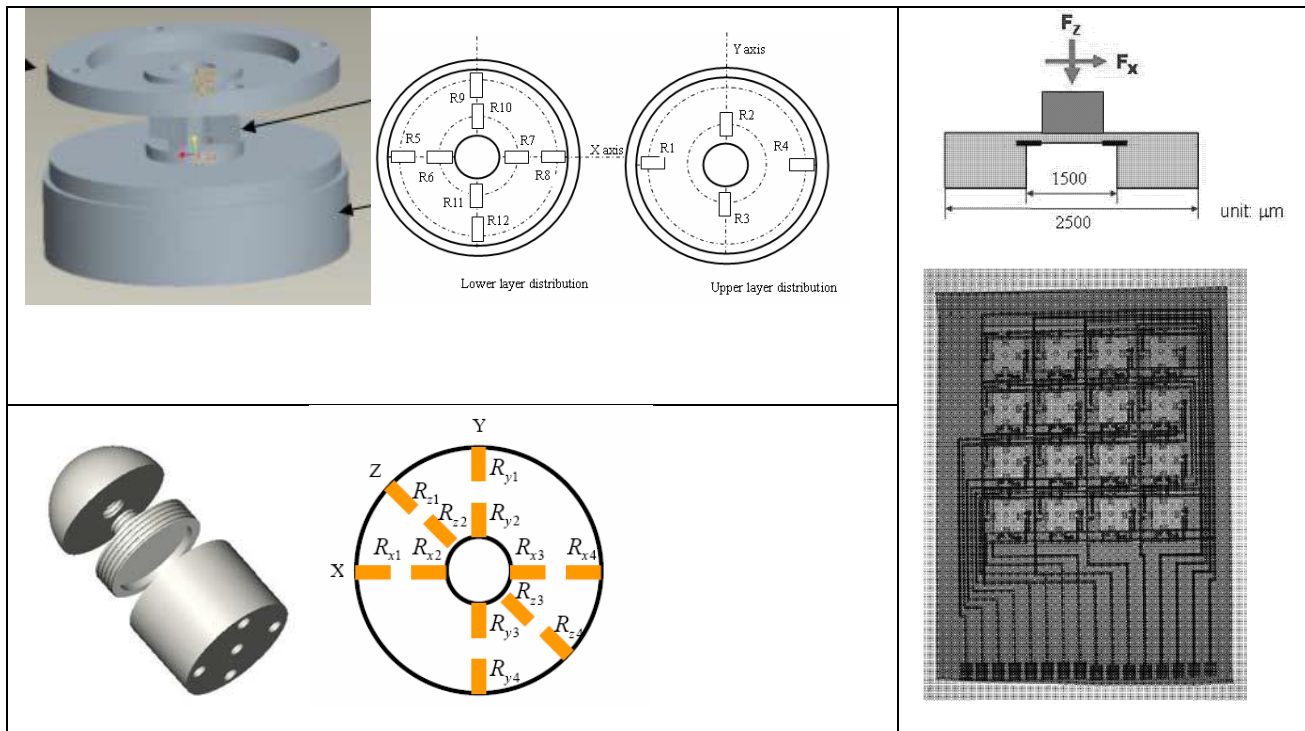
Doigts robotisés

Il est très souvent fait mention de doigt senseur, dans le but de se rapprocher de la physiologie humaine. De fait, de nombreux doigts comportant une grande quantité de capteurs ont été créés. La plupart mesurent une force tridimensionnelle appliquée en leur bout, sa distribution, la friction sur la partie latérale, et quelques fois la température. Ce dernier point ne nous intéresse pas.

Capteur de force : la prédominance de la jauge de contrainte

Dans la plupart des publications analysées, la mesure de force est effectuée par le placement judicieux de jauges de contraintes sur une structure déformable tridimensionnelle. Les jauges de contraintes disposent de nombreux avantages : bonne précision et linéarité, peu d'effet de la température et, si les déplacements sont petits, alors les mesures statiques et dynamiques sont toutes deux possibles.

Exemple de structure de capteurs de force tridimensionnels par jauge de contraintes



Extrait d'une publication de Robert D. Howe

Capteur de force/couple en bout de doigt. C'est une cellule créée pour être contrainte suivant différents axes, montée juste derrière le bout du doigt. Elle peut mesurer jusqu'à 6 composantes de force et de couple (3 de chaque). Il faut pour cela des composants petits et légers avec une bonne réponse statique. La plupart de ces capteurs sont des jauges de contrainte montées sur un support métallique déformable. Leur conception inclut la raideur, l'hystérésis, la calibration l'amplification, la robustesse et le montage.

Capteurs de friction

Pour détecter la friction, l'utilisation de matériau piézoélectrique est plus présente. Ses propriétés dynamiques sont appréciées.

Capteur d'effort par capacité

Une publication expose l'application d'une couche de caoutchouc sur les condensateurs. La force sous le caoutchouc correspond à un modèle de demi-espace élastique. Des essais ont été effectués avec l'appui d'une sphère sur la surface. Sa position et la force appliquée déterminables avec une bonne précision.

Une autre publication relate l'utilisation de la structure même du PCB pour créer un capteur d'efforts tangentiels. Les déplacements doivent être réduits pour que la capacité varie linéairement. Ceci impose une force inférieure à 2 N.

Des recherches ont été effectuées sur capteur de force utilisant 4 condensateurs montés en carré. Les 2 plaques de chaque condensateur sont séparées par une poche d'air. Le tout est placé au centre d'un matériau élastique. Au milieu des condensateurs, sur la partie extérieure du matériau est placée une bosse. C'est avec elle que se feront les interactions. En appuyant sur la bosse de silicone, la poche d'air entre les plaques se réduit, ce qui modifie la valeur des condensateurs. En analysant cette dernière, on peut retrouver la force appliquée. Ce dispositif détecte les forces normales et tangentielles.

Un dispositif permettant de convertir directement la valeur de la capacité en valeur numérique est l'AD7756. Le signal obtenu peut directement être transmis à un microcontrôleur.

Capteur de force par vision

Une publication traitant de la main robotisée NAIST met en avant l'utilisation de la vision comme capteur de force. Le bout du doigt est une demi-sphère de gel transparent derrière lequel se trouve une mini-caméra embarquée. En accord avec la théorie des pressions d'Hertz, la zone de contact entre une sphère et un plan est un cercle. Si l'objet glisse, le cercle est alors déformé. En analysant la déformation de la zone de contact, on peut alors estimer le glissement.

Il existe d'autres publications utilisant ce mécanisme, avec des éléments senseurs différents.

Une autre publication traite de l'usage de la vision : le bout du doigt est en gel transparent, avec, à l'intérieur, 2 couches de marqueurs de couleur différente. Une caméra CCD repère le mouvement des marqueurs en cas d'application d'une force sur le bout du doigt. Les forces ayant généré ces déformations peuvent alors être retrouvées via la théorie de l'élasticité. On obtient alors un champ de vecteurs tridimensionnel.