

## **Finalisation et automatisation d'une main mécanique 3 doigts**

Ing. F. NAHOÉ  
ECAM – Bruxelles

*Depuis toujours, la robotique s'inspire de la motricité humaine afin de permettre la réalisation de mouvements très précis et de posséder une grande capacité d'adaptation. Le système mécanique développé dans le cadre de cette étude porte de nom de « Sous-actionnement. » Avec son mécanisme proche de la main humaine, il permet d'adapter sa prise automatiquement à la forme de l'objet.*

*Mots-clés : main, mécanique, robotique, 3 doigts, pince*

*Since always, robotics has taken its inspiration from human motricity to reproduce really precise movements and adapt itself easily. The mechanical system developed in this study is called Underactuation." With its mechanism close to human hand, it can adapt its grip automatically to the object's shape.*

*Keywords : hand, mechanics, robotics, 3 fingers, pliers*

## 1. Introduction

Depuis toujours, la robotique s'inspire de la motricité humaine afin de permettre la réalisation de mouvements très précis et de posséder une grande capacité d'adaptation. Dans le cadre de cette étude, la pince mécanique comporte trois doigts articulés chacun par trois phalanges.

Trois doigts pour manipuler une grande diversité d'objets, trois phalanges pour adapter la prise à leur forme spécifique.

Afin de permettre la préhension de la pince, un système nommé « Sous-actionnement » sera développé.

La première partie de cet article concerne la compréhension de ce système particulier afin d'en saisir les spécificités et ainsi d'éviter certains problèmes d'ordre technologique ou d'ordre pratique.

Vient ensuite l'étude du système : comment contrôler la force de serrage de la pince afin que celle-ci ne puisse pas détériorer ou déformer l'objet ?

Au terme de cette étude une constatation : chaque élément qui améliore le fonctionnement de la pince mécanique rejoint, dans les détails, la complexité de la préhension de la main humaine.

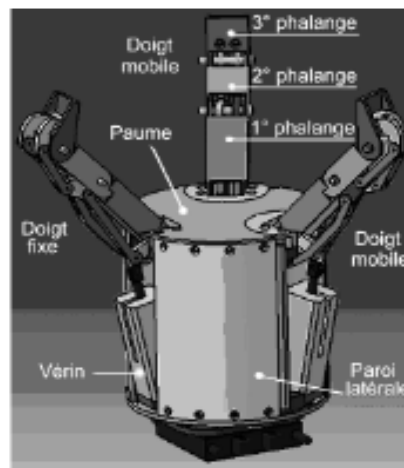


Figure 1 : Vue générale de la pince mécanique 3 doigts réalisée

La figure ci-dessus illustre la pince réalisée ainsi que la dénomination de certains composants.

## 2. Description

Tout comme un doigt humain, la pince a été imaginée avec 3 phalanges<sup>1</sup>, ceci afin d'attribuer une grande souplesse aux différentes prises.

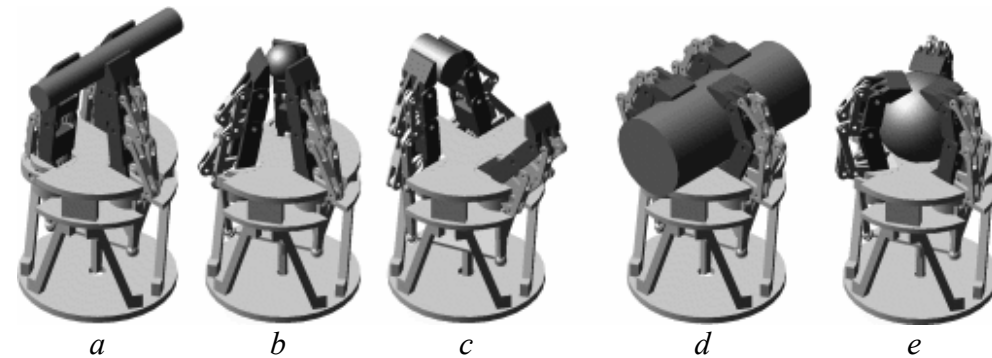


Figure 2 : Différentes configurations de prises d'un objet [1]

La pince peut prendre 3 types de configurations afin de capter un objet. Celles-ci seront intitulées comme suit :

- Prise à 120° : permet de manipuler principalement des objets sphériques (figure 2b et 2e)
- Prise parallèle : permet de manipuler des objets d'une certaine longueur (figure 2a et 2d)
- Prise à 2 doigts : permet de manipuler des objets d'une longueur limitée (figure 2c)

Des servomoteurs placés à la base de 2 des 3 doigts, permettent de passer facilement d'une configuration à une autre.

---

<sup>1</sup> Dans la suite de l'article, nous appellerons :

- Première phalange : la phalange la plus proche de la paume (phalange proximale)
- Deuxième phalange : la phalange centrale (phalange moyenne)
- Troisième phalange : la phalange la plus éloignée de la paume (phalange distale)

### 3. Analyse du système de sous-actionnement

Le système de sous-actionnement est défini comme étant un système dont le nombre d'actionneurs est plus petit que le nombre de degrés de liberté.

Les degrés de liberté sous-actionnés sont dès lors contrôlés par des ressorts et des butées mécaniques.

Il s'agit d'une solution intermédiaire entre :

- Les mains robotiques pour la manipulation : dont les avantages résident dans une prise stable, mais dont le contrôle est d'une grande complexité causée par l'utilisation de plusieurs actionneurs.
- Les préhenseurs simples : dont l'avantage est un contrôle simple car n'utilise que peu d'actionneurs dédiés à des tâches spécifiques. Cependant, ils peuvent engendrer des prises instables. (ex : deux surfaces se rapprochant l'une de l'autre tout en restant parallèles)

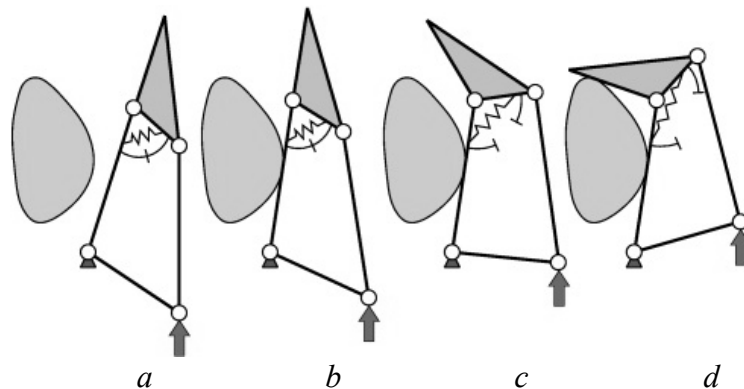


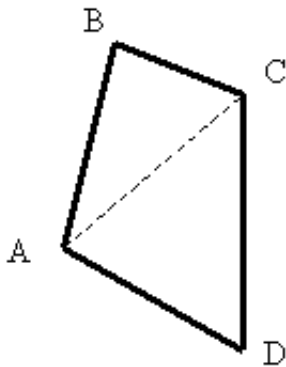
Figure 3 : Principe de fonctionnement d'un système sous-actionné [1]

La figure ci-dessus illustre le principe de fonctionnement du sous-actionnement commandant deux phalanges.

Le système est composé de barres articulées dont 2 barres sont liées entre elles par un élément élastique (ressort). Cet élément va, dans un premier temps, permettre à toutes les barres de pivoter autour d'une seule et même rotule (dont la position est fixée dans l'espace).

Une fois une butée mécanique rencontrée, la force contraint le ressort à s'étirer et permet au système de barres supérieures de pivoter autour d'une autre rotule.

Ce système fait appel à des notions très simples de géométrie. En effet, durant la première partie du mouvement (fig. 3a et 3b), les barres inférieures forment un quadrilatère (ABCD) dont les longueurs des côtés sont constantes (en supposant que les barres soient rigides) et que l'angle B est fixé (le ressort ne s'étire pas encore).



Ce quadrilatère peut-être décomposé en deux triangles (ABC et ACD).

Etant donné que les longueurs des côtés et l'angle B sont constants, la longueur AC l'est également. Ceci engendre que la forme géométrique ne peut pas se déformer.

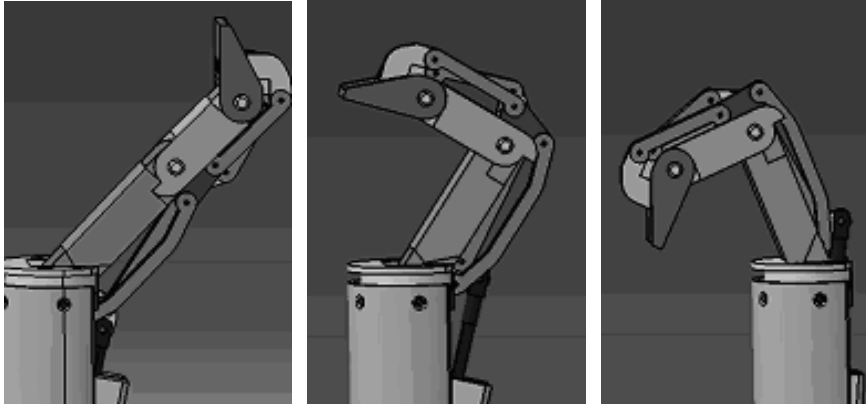
Donc, dans notre cas, si une force est appliquée en D, le système de barres n'a pas d'autre choix que de pivoter autour de A (en supposant que seule la position du point A est fixée dans l'espace).

Lors de la seconde phase du mouvement (fig. 3c et 3d), le ressort commence à s'étirer, si bien que l'angle B n'est plus constant. Ceci engendre la déformation du quadrilatère entier.

Lors de cette phase, la position de la barre AB est fixée dans l'espace (elle se trouve contre la butée mécanique), donc le système de barres supérieures pivote autour du point B.

Le sous-actionnement des doigts permet ainsi l'adaptation de la prise à la forme de l'objet.

Le rôle du ressort est primordial afin que la pince ait le même comportement quelle que soit l'orientation de la pince.



*Figure 4 : Fonctionnement sans ressort*

Ainsi, dans le cas où le ressort n'est pas présent et que la prise d'un objet est réalisée avec la paume de la main vers le haut (supination), l'ordre de mise en mouvement des phalanges est tel que la phalange proximale est la dernière à bouger.

Ceci va provoquer une prise par le bout des doigts (prise instable). Ce n'est évidemment pas le comportement attendu lors de la conception.

De plus, le doigt n'« enroule » pas correctement l'objet et donc ne s'adapte pas à sa forme.

#### **4. Choix et placement du ressort**

En théorie, l'emplacement du ressort est choisi en respectant le principe de fonctionnement du sous-actionnement (fig. 3).

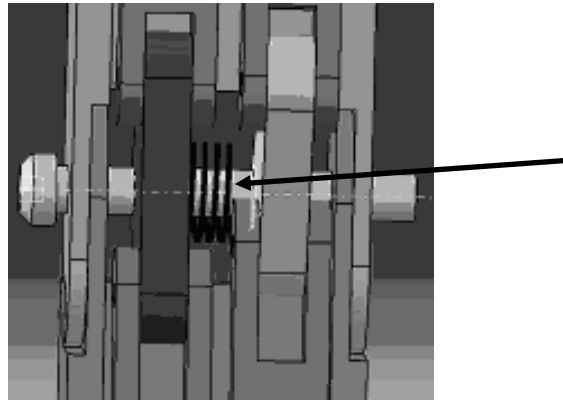
Deux types de ressort sont disponibles pour remplir au mieux cette fonction : le ressort de torsion et le ressort de traction.

##### **4.1 Ressort de torsion**

Dans la mesure du possible, c'est le ressort de torsion qui sera choisi car, de par sa forme et son fonctionnement, c'est lui qui agira au mieux.

En effet, si les spires du ressort de torsion sont placées au niveau de la goupille faisant la liaison entre la première et la seconde phalange, l'effort

de retenue sera parfaitement en phase avec le couple qui tendra à déplacer la barre.



*Figure 5 : Emplacement du ressort de torsion*

Une fois l'emplacement du ressort de torsion choisi, il conviendra de déterminer certaines caractéristiques physiques (force minimum, dimensions, etc.)

Pour ce faire et afin de ne pas perdre trop de temps, quelques mesures simples sur la pince réalisée permettront d'estimer l'élongation maximale que le ressort devra subir ainsi que la force de rappel qu'il devra fournir lors de la première phase du mouvement.

L'élongation angulaire sera mesurée à l'aide d'un rapporteur tandis que la force minimum sera évaluée par un dynamomètre. Celui-ci devra être étiré initialement afin que sa force de rappel soit suffisante pour maintenir les deux barres liées entre elles lors de la première phase du mouvement. Il faudra veiller à ce que cette force de rappel ne soit pas trop importante afin que ces 2 barres puissent se désolidariser une fois que la phalange proximale rencontre une butée mécanique.

Les résultats de ces deux mesures sont :

- 90° d'amplitude angulaire ;
- 3,5 N lorsque le ressort est en position initiale

Il faut bien se rendre compte que le ressort doit résister uniquement lors de la première phase du mouvement et qu'ensuite il n'a plus de raison d'être.

Or il est impossible qu'un ressort voie sa force de rappel disparaître alors que le mouvement tend à l'étirer.

Le ressort choisi devra également avoir une constante de raideur faible afin qu'il n'entrave pas la suite du mouvement à cause d'une force de rappel trop importante. De même, certaines contraintes dimensionnelles, liées à la réalisation, doivent être respectées.

Par exemple : la longueur libre du ressort de torsion ne doit pas être supérieure à la distance entre les 2 rotules (5,5mm), de même que le diamètre des spires ne peut être inférieur au diamètre des goupilles (4 mm).

Existe-t-il un ressort de torsion respectant tous ces critères ?

	<b>Angle max. [°]</b>	<b>F max. [N]</b>	<b>L. libre [mm]</b>	<b>Diam. ext. [mm]</b>	<b>Diam. fil. [mm]</b>	<b>Nbre de spires</b>	<b>L. branche [mm]</b>	<b>D arbre [mm]</b>	<b>Raideur [N*mm/°]</b>
1	180.00	3.6496	5.300	9.300	0.8000	5	25.400	5.500	0.515000
2	179.90	3.5535	5.400	11.400	0.9000	5	31.800	7.100	0.627800
3	99.30	4.4171	5.310	16.800	1.2500	3.25	55.000	12.800	2.444100
4	89.90	4.8868	5.000	7.800	1.0000	4.25	31.800	4.800	1.726700
5	91.60	4.4171	5.000	16.800	1.2500	3	55.000	12.800	2.649300
6	80.10	4.4171	5.310	13.800	1.2500	3.25	55.000	10.100	3.029200
7	90.00	4.2296	4.600	9.800	1.0000	3.25	31.800	5.900	1.494400
8	67.30	4.8588	5.310	11.800	1.2500	3.25	50.000	8.300	3.604500
9	150.00	1.0723	5.088	4.700	0.5500	7.25	18.800	3.150	0.134340
10	155.40	0.6872	5.250	3.500	0.5000	9.5	25.000	2.250	0.110500

*Tableau 1 : Caractéristiques de ressort de torsion [2]*

En se référant à ces quelques exemples, il est à remarquer qu'en pratique, le ressort de torsion ne pourra pas convenir car il n'existe pas de ressort de torsion qui allie taille réduite et force de rappel suffisante. En effet, le tableau ci-dessus nous montre que :

- Soit les dimensions sur le diamètre de l'arbre sont tout simplement trop grandes ou trop petites (lignes 3, 5, 6, 8, 9, 10) ;
- Soit pour une longueur libre de ~5,5mm, la force maximale admise correspond à la force minimale que l'on voulait obtenir dans un état initial (lignes 1 et 2) ;



- Soit pour une force suffisante et des dimensions acceptables, c'est l'angle maximum admissible qui ne convient pas. En effet, comme le ressort doit résister avant le début du mouvement et que son amplitude est de  $90^\circ$ , il n'est pas acceptable d'utiliser des ressorts dont l'angle maximal est de  $90^\circ$  (lignes de 4 à 8).

Il faudra donc se tourner vers le ressort de traction qui permettra une plus grande diversité dans le choix des dimensions et des autres caractéristiques physiques.

#### 4.2 Ressort de traction

Afin de trouver les points d'attache du ressort de traction, on procédera par essais successifs. Par souci de facilité, on placera, à différents endroits du mécanisme, un élastique (beaucoup plus maniable qu'un ressort en acier). De cette façon, on essaiera de trouver les points d'attache qui fournissent le meilleur comportement possible du doigt en évitant ainsi une étude analytique qui se présenterait comme une démarche longue et fastidieuse.

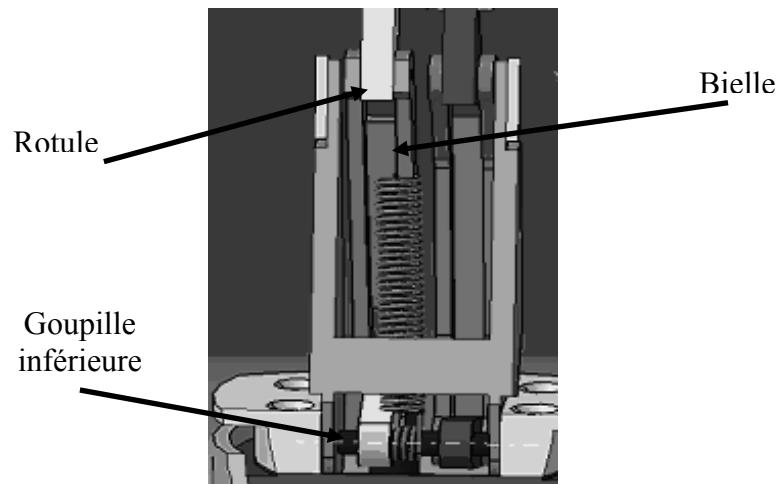


Figure 6 : Emplacement du ressort de traction

Les nouveaux points d'attache trouvés sont sur la goupille inférieure et la bielle sous le niveau de la rotule. Ainsi si on se rapporte au point 3, on n'impose plus l'angle B mais plutôt la distance AC (ce qui, dans le système de sous-actionnement, revient au même)

Cette fois-ci, le ressort ne sera pas choisi dans un catalogue à l'aide de ses caractéristiques physiques mais plutôt de manière heuristique en essayant plusieurs ressorts de traction se trouvant à notre disposition (dans l'atelier). Cette méthode, plus rapide, ne garantit pas de trouver une solution optimale mais permet de vérifier directement si le ressort convient ou non. Après quelques essais, le ressort retenu possède les caractéristiques suivantes :  $\varnothing_{\text{ext.}} = 4,8\text{mm}$  ;  $\varnothing_{\text{fil.}} = 0,6\text{mm}$  ;  $L = 30\text{mm}$ .

## 5. Contrôle de la force

Afin d'avoir un contrôle sur la force de serrage, il serait bon de pouvoir la mesurer par un capteur associé à un système électronique de mesure. En effet, dans le cas d'un objet fragile ou déformable, il serait intolérable que lorsque le robot prend l'objet, celui-ci soit détruit suite à une force non adaptée.

L'emplacement du capteur sera choisi pour obtenir une bonne image de la force de serrage mais également à un endroit où l'on est sûr que le capteur sera toujours en contact avec l'objet, et ce, quelle que soit sa taille

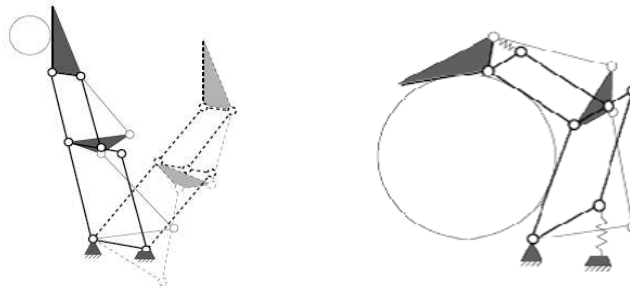


Figure 7 : Choix de l'emplacement d'un capteur de force [3]

Dans le cas où l'objet serait pris du bout des doigts (objet petit ou fin), les deux premières phalanges ne seraient pas en contact avec l'objet. Il ne serait donc pas judicieux de placer des capteurs à ces niveaux.

Par contre, la phalange distale sera toujours en contact, soit parce que c'est la seule, soit parce qu'elle permet de verrouiller la prise, comme l'illustre la Figure 7. C'est donc tout naturellement que le capteur sera placé au niveau de la troisième phalange.

L'information recueillie par les capteurs servira à arrêter le vérin une fois que le seuil de force prédéfini sera atteint, ainsi pas de risque de détériorer l'objet.

Etant donné que le capteur se trouvera sur la face palmaire de la troisième phalange, il devra être plat afin de ne pas trop modifier l'aspect dimensionnel de la pince.

### 5.1 Choix du capteur sensitif

Il existe 2 grands types de capteurs de force répondant à ce critère, à savoir :

- ⇒ Les extensomètres (tels que les jauges de déformation) ;
- ⇒ Les polymères piézo-électriques.

Pourtant, une autre famille de capteurs fait peu à peu son apparition dans le monde industriel. Il s'agit des résistances de détection de force ( F.S.R. : Force Sensing Resistor). Ceux-ci trouvent leurs applications dans des domaines tels que :

- ⇒ La médecine ;
- ⇒ La robotique ;
- ⇒ La musique électronique ;
- ⇒ Les périphériques de saisie pour ordinateur.

Bien que les extensomètres fassent preuve d'une précision et d'une exactitude extrême, ils coûtent chers et nécessitent une électronique d'interface d'une grande précision et d'une grande complexité.

Les polymères piézo-électriques ont comme avantages d'avoir un temps de montée réduit et une grande sensibilité mais ces avantages deviennent vite des inconvénients dans le cas où le capteur se trouverait dans un milieu où certaines vibrations indésirables viendraient entacher le signal de mesure par du bruit (exemple : vibration d'un moteur près du robot)

A caractéristiques comparables, le F.S.R. n'est pas aussi précis qu'un extensomètre, mais il est plus robuste et utilisable pendant des millions de cycles.

Ce type de capteur est également insensible aux vibrations et à la chaleur ; de plus, sa plage d'impédance autorise l'emploi d'une électronique d'interface simplifiée.

Enfin, le capteur F.S.R. est le plus économique des trois.

Ceci explique donc le choix du F.S.R. comme capteur de force.

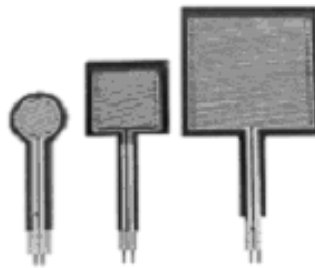


Figure 8 : Capteur FSR [5]

## 5.2 Constitution d'un F.S.R

Selon sa définition, le F.S.R. est un composant constitué d'une couche épaisse de polymère dont la résistance décroît au fur et à mesure que la force appliquée perpendiculairement à sa surface augmente.

Ce capteur est surnommé « l'accélérateur électronique ».

La constitution d'un F.S.R. élémentaire est extrêmement simple : deux feuilles de polymère laminées ensemble et prenant en « sandwich » une bande conductrice.

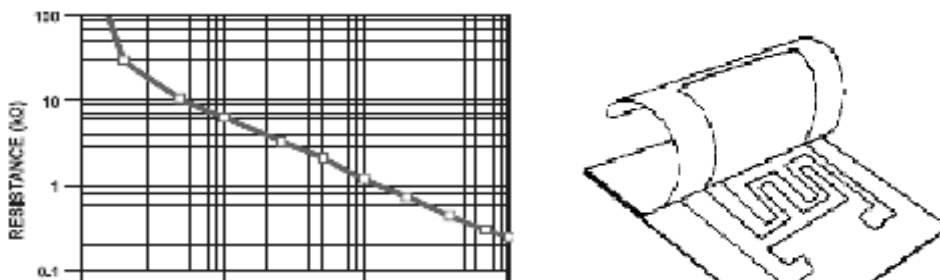


Figure 9 : Caractéristique et composition d'un capteur FSR [5]

### 5.3 Choix d'une interface électronique.

La courbe caractéristique du capteur de force montre qu'il s'agit d'une fonction inverse entre la résistance du capteur et la force appliquée, il y aura lieu de convertir les variations de résistance en variation de tension mais également d'avoir la réponse la plus linéaire possible afin de faciliter une éventuelle régulation.

Il faudra donc joindre au capteur une interface électronique telle que celle représentée à la Figure 10

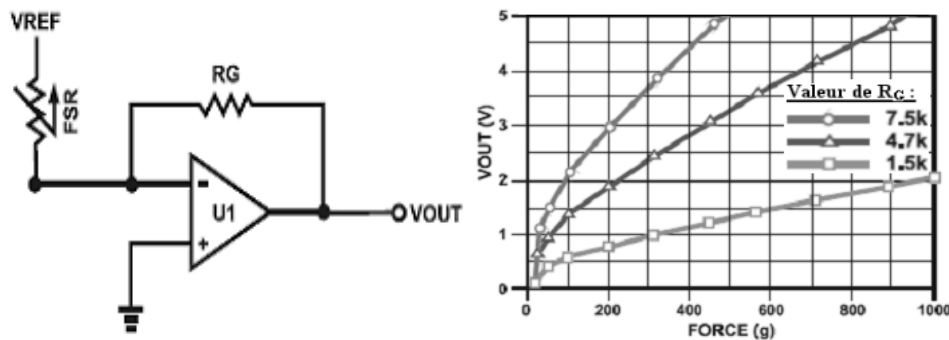


Figure 10 : Schéma et caractéristique d'une interface électronique [5]

Les différentes courbes présentées ci-dessus nous montrent que le montage « convertisseur courant-tension » donne, outre une forte sensibilité aux faibles charges, une réponse en tension qui croît linéairement en fonction de la force appliquée (à partir de 1N). Cette propriété est avantageuse pour des raisons de facilité d'analyse et de régulation.

Ce sont ces différentes propriétés mais aussi un montage électronique simple qui font choisir ce montage plutôt qu'un autre.

## 6. Servomoteur

Afin de donner une grande flexibilité à la pince, deux des trois doigts pourront pivoter sur eux-mêmes grâce à deux servomoteurs placés sous ces doigts. Ces moteurs donnent ainsi la possibilité d'une grande précision dans le positionnement sans avoir besoin de capteur de position.

## 6.1 Description

Un servomoteur est composé :

- d'un moteur à courant continu ;
- d'un réducteur de vitesse à roue dentée ;
- d'un potentiomètre ;
- d'un circuit électronique.

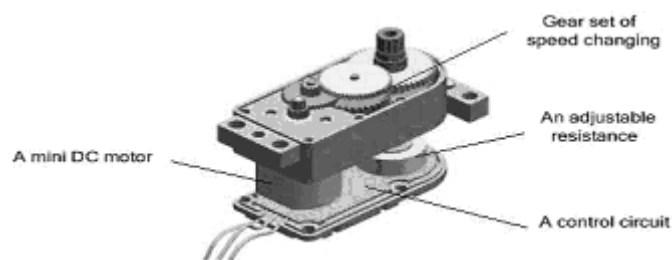


Figure 11 : Structure d'un servomoteur [6]

Le potentiomètre permet l'asservissement de position, grâce au fait que son axe est solidaire de l'axe de sortie, la résistance aux bornes du potentiomètre varie en même temps que la position angulaire. Cette mécanique donne une image de la position angulaire sans avoir recours à un capteur de position « extérieur ».

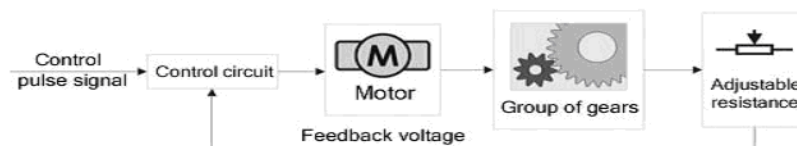


Figure 12 : Régulation interne d'un servomoteur [6]

## 6.2 Utilisation

Comme le servomoteur possède une boucle de régulation interne, il suffit, pour le commander, de lui fournir uniquement un signal de contrôle.

Pour ce faire, il faut donner, au servomoteur, une consigne de position sous forme d'une impulsion. La largeur de l'impulsion déterminera la position finale désirée.

Afin de maintenir la position constante au cours du temps, il va falloir répéter ce signal au moins toutes les 20ms. Cela se fera grâce à une carte électronique.

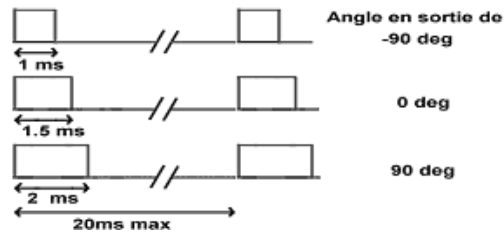


Figure 13 : Commande d'un servomoteur [6]

## 7. Analogie humaine

Ce qui suit montre que le mécanisme de sous-actionnement réalisé se trouve être très proche de la complexité du fonctionnement de la main de l'homme.

### 7.1 Les tendons extenseurs et fléchisseurs

En effet, la force, qui actionne le mécanisme, peut être assimilée aux muscles qui agissent sur les tendons de la main humaine ; de même, le système « bielle-manivelle » peut être assimilé aux tendons des extenseurs et fléchisseurs des doigts.

Le système remplace par un seul vérin double effet, le tendon fléchisseur et extenseur du doigt humain.

En effet, le tendon extenseur a pour but, une fois qu'il est actionné, de tendre le doigt et ainsi aligner toutes les phalanges. Cette action se déroule lors du mouvement « retour » du vérin.

Le tendon fléchisseur, quant à lui, permet aux phalanges de se rapprocher les unes des autres. Ceci se réalise lors du mouvement « aller » du vérin.



Figure 14 : Coupe sagittale du doigt humain [7]

## 7.2 Les muscles lombricaux

Le rôle du ressort fait penser à des muscles très particuliers de la main humaine : « les muscles lombricaux ».

Ces muscles ont comme particularité de permettre la « flexion » de la première phalange tout en maintenant, simultanément, « l'extension » des deux autres.

C'est exactement le but qu'on a donné au ressort de traction, c'est-à-dire, permettre à la première phalange de bouger, tout en gardant les deux autres dans son alignement.

Ce n'est qu'une fois que la première phalange rencontre une butée que les autres ont « l'autorisation » de s'actionner.

## 7.3 Les muscles abducteurs et adducteurs

Un couple de muscles permet au doigt humain de faire des mouvements de gauche à droite. Ceux-ci portent les noms d'abduction et d'adduction :

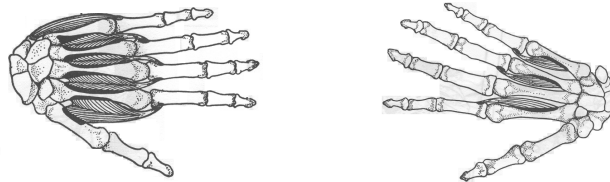


Figure 15 : Tendons abducteurs et adducteurs de la main humaine [8]

- L'abduction consiste en l'action d'écarter tous les doigts ;
- L'adduction consiste en l'action de serrer tous les doigts.

Ceux-ci sont utiles à l'homme afin de prendre des objets de formes et de grandeurs diverses. Les servomoteurs ont été placés à la base de deux doigts afin de remplir la fonction de ces deux muscles.

## 8. Conclusion

Alors que dans des domaines tels que la mécatronique, l'utilisation d'un vérin par phalange est fréquent, le système de sous-actionnement permet de



n'utiliser qu'un seul vérin par doigt (quel que soit le nombre de phalanges). Le contrôle et la complexité s'en trouvent simplifiés et l'encombrement réduit.

De même, la pince a une très grande capacité d'adaptation puisque grâce au sous-actionnement, la pince va pouvoir s'ajuster automatiquement à la forme et à la taille de l'objet.

L'acquisition des données concernant la force de serrage a été intégrée à la pince afin de ne pas détériorer l'objet à prendre. De plus, l'ajout d'une interface électronique permet de linéariser la caractéristique du capteur dans la perspective d'une régulation aisée.

Le système de sous-actionnement est donc le système mécanique qui, de nos jours, se rapproche le plus de la main humaine tout en gardant un contrôle simple.

## 9. Bibliographie

- [1] [http://wwwrobot.gmc.ulaval.ca/recherche/theme04\\_a.html](http://wwwrobot.gmc.ulaval.ca/recherche/theme04_a.html)
- [2] <http://www.vanel.com>
- [3] BIRGLEN Lionel, GOSSELIN Clément et LALIBERTÉ Thierry, *Underactuation in Robotic Grasping Hands*, Japanese Journal of Machine Intelligence and Robotic Control, Special Issue on Underactuated Robots, Vol. 4, No. 3, Septembre 2002, pp. 77-87
- [4] ANDRÉ Guy, Capteur d'environnement en robotique : La perception tactile, Les techniques de l'ingénieur
- [5] <http://www.interlinkelec.com/documents/usersguides/fsrguide.pdf>
- [6] MINI SERVO Explorer 2.1 help
- [7] [http://www.infovisual.info/03/028\\_fr.html](http://www.infovisual.info/03/028_fr.html)
- [8] DANIELS Lucille, WILLIAMS Marian et WORTINGHAM Catherine, *Evaluation de la fonction musculaire*, Librairie Maloine s.a. Paris VI, Troisième édition, p.148-150