

Conception et Performances de Mains Mécaniques Articulées: Revue de l'Etat de l'Art

A Bouachari¹, A Haddad²

¹Faculté de Technologie, univ.-20 Août 1955 Skikda, Algérie, a_bouachari@hotmail.com

²Laboratoire de Mécanique Appliquée des Nouveaux Matériaux-LMANM, univ.-Guelma, Algérie, akhhaddad@gmail.com

Résumé :

La préhension et la manipulation d'objets de diverses formes et qualités par un robot mécanique doté d'une seule main sont complexes. Les mains dextres à plusieurs doigts semblent être la solution. Deux questions majeures sont généralement abordées: la conception de mains à dextérité élevée et le développement d'une qualité acceptable de la fermeture des saisies à travers la réalisation d'une force de fermeture adéquate. Dans cette optique, de nombreuses mains mécaniques multi-doigts ont été réalisées et testées dans différents environnements. L'actuel document présente une large revue de l'état de l'art de la littérature spécialisée et traitant des mains dextres et mécaniques développées comportant trois doigts ainsi que celles intégrant un pouce opposé à trois ou quatre doigts.

Mots-clés : Robotique; Mains mécaniques; Mains dextres; Mains multi-doigts; Saisie; Manipulation mobile.

1. Introduction

La faculté de préhension est très développée chez l'être humain. Elle est généralement vue comme un ensemble de chaînes cinématiques reliées à une base et fermée sur un objet en des zones de contact qu'il convient de modéliser [1]. Il existe principalement deux sortes de préhension. Les prises de puissance ou à pleines mains faisant appel à la notion de stabilité et de sécurité, et les prises dites fines ou de précision nécessitant à la fois sensibilité et dextérité. La préhension peut se réaliser de diverses manières rendues possibles essentiellement grâce au fait que le pouce peut s'opposer aux autres doigts de la main [2].

La main humaine se comporte comme un système mécanique articulé semblable à une chaîne cinématique complexe à structure arborescente [3]. Son squelette est formé par un assemblage complexe des os du carpe, du métacarpe et des phalanges dont les articulations varient selon le nombre de degrés de liberté (DDL) qu'ils possèdent. Les doigts longs possèdent la même structure, tandis que celle du pouce est plus complexe [4]. La conception des mains mécaniques est souvent inspirée de la morphologie de la main humaine. Elles ont été développées pour interagir avec l'environnement humain à travers des robots principalement constitués d'une base mobile équipée d'un ou deux bras manipulateurs anthropomorphes articulés dont l'extrémité est munie d'un préhenseur capable de saisir des objets de diverses géométries.

Au début des années 1980, ces préhenseurs possédaient uniquement deux doigts conçus pour tenir les divers outils nécessaires à la réalisation d'opérations de fabrication. La première main robotique conçue pour la manipulation dextre est celle de Salisbury [5] dont la modélisation de la préhension fournit la base des développements futurs concernant la manipulation dextre. Différents préhenseurs sont actuellement utilisés pour différentes applications (soudage, peinture, transport de matériaux, assemblage des cartes de circuits imprimés, réparation-inspection en environnement hostile ...etc.).

L'actuel article présente huit mains mécaniques articulées actuellement utilisées. Elles peuvent saisir des objets en toute sécurité, et appliquer à la fois des forces arbitraires et des mouvements aux objets manipulés [6].

2. Mains Mécaniques articulées

Les mains mécaniques articulées deviennent de plus en plus analogues aux mains humaines. Elles sont capables de réaliser des saisies d'objets de forme arbitraire. Elles offrent en outre des solutions pour doter les manipulateurs mobiles d'une dextérité polyvalente telle que celle réalisée par une main aux doigts multiples capables d'effectuer une variété de saisies différentes permettant ainsi la réduction des terminaux.

1. Main de Stanford-JPL, 1984

La main dite de Stanford (Figure 1) a été conçue dans la perspective d'étudier les phénomènes liés à la manipulation ainsi que les conditions nécessaires exigées pour une prise manipulatrice efficace [5]. Un minimum de trois doigts est nécessaire pour la réalisation d'une manipulation, un quatrième en hausserait l'efficacité mais en augmenterait sensiblement la complexité [7]. La main de Stanford se compose d'un mécanisme articulé autour de trois doigts modulaires possédant chacun trois degrés de mobilité. La première et la seconde articulation présentent un débattement de 90° alors que la troisième autorise un débattement de 135°.

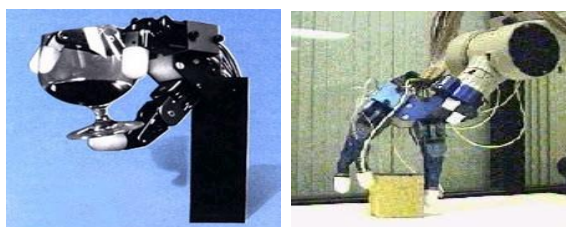


Figure 1. Main de Stanford-JPL manipulant deux objets de formes différentes

La main de Stanford utilise une conception de quatre tendons et offre trois DDL. Son système de transmission modulaire est réalisé à l'aide de quatre câbles en acier revêtus de Téflon protégés par des gaines. Un servomoteur à courant continu permet d'actionner et de contrôler chaque articulation [8], et le contrôle des efforts est assuré grâce à un mécanisme de tension de câble situé à l'entrée de chaque doigt, ce positionnement étant dicté par l'apparition de contraintes exercées sur la poulie de guidage. Des codeurs

optiques incrémentaux placés directement sur les moteurs permettent d'obtenir les positions et les vitesses des articulations de la main. Un capteur rend possible la détermination, la localisation, l'amplitude et la direction de l'effort exercé en un point de contact de la phalange distale [7].

2. Main Utah ou main de Jacobson, 1986

La main UTAH/MIT a été développée au 'Center of Engineering Innovation' de l'université de l'Utah en collaboration avec le 'Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory' du 'Massachusetts Institute of Technology'. Cette collaboration a engendré une main très sophistiquée possédant quatre doigts modulaires, le pouce s'opposant aux trois longs et chacun possédant quatre DDL (le petit doigt n'étant pas nécessaire a été sacrifié aux fins de facilitation de la manipulation). La figure 2 présente la main de Jacobson [9] essentiellement constituée d'un bloc moteur, d'un bloc actionneur et d'un contrôleur analogique qui agit sur les articulations. Un système de capteurs tactiles est intégré en bout des doigts et dans la paume.

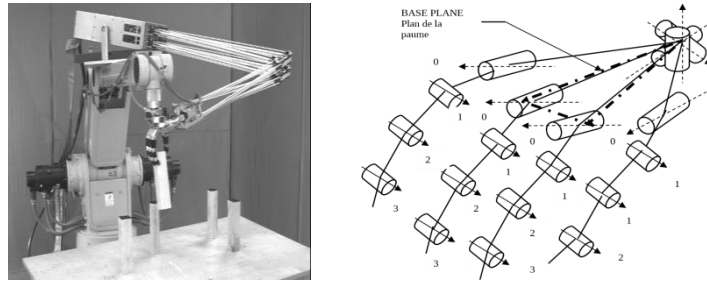


Figure 2. La main UTAH/MIT et sa cinématique [9]

Les articulations notées '0' et '1' de chaque doigt sont séparées afin de permettre l'acheminement des tendons. Les frottements exercés sur ces derniers leur conférant une durée de vie limitée, ils ont été remplacés par des courroies planes engendrant une contrainte séparée par des torsions axiales. L'axe des articulations proximales '0' est parallèle au plan de la paume avec une inclinaison de 30° tandis que pour la main humaine, les premières articulations des doigts sont perpendiculaires à celui-ci. Cette altération permet aux doigts d'effectuer un mouvement latéral, et par conséquent d'en améliorer la mobilité. Quand les doigts s'opposent au pouce, les articulations indicées '0' sont nulles tandis celles indicées '1' autorisent un débattement de 90°. Les modifications géométriques intégrées lors de la conception de la main de UTAH/MIT pour lui donner un aspect anthropomorphe incluent aussi le positionnement du pouce dans la section de la paume entre le premier et le second doigt. Les articulations du poignet sont importantes et fournissent un espace complémentaire pour le placement de 32 tendons indépendants ainsi que des actionneurs pneumatiques.

Cette main est présente dans de nombreuses universités américaines, et est sujette à de nombreuses recherches particulièrement dans le domaine de la télé-opération [10]. Elle ressemble au modèle de Stanford présenté auparavant, mais en diffère par le nombre de doigts ainsi que par la conception. Tandis que Salisbury et Roth [11] développaient une main non anthropomorphe présentant une certaine dextérité, les chercheurs de l'UTAH en collaboration avec les ingénieurs du MIT essayaient de reproduire la main humaine.

3. Main de Belgrade/UCS

Le premier modèle de la main de Belgrade/UCS était équipé d'un pouce rigide et de quatre doigts articulés (Figure 3-a), les moteurs étant placés dans la partie inférieure du poignet. Le second modèle développé (Figure 3-b) possède approximativement la taille de la main humaine, les cinq doigts le constituant étant réalisé en aluminium. Sa structure mécanique autorise la séparation des articulations entre les doigts et le pouce.

La structure du pouce lui permet de réaliser un mouvement de 120° lui assurant ainsi le mouvement d'opposition avec les autres doigts qui sont identiques au niveau de la taille, possédant chacun trois articulations. Toutes leurs rotations sont assurées par des roulements à billes miniatures localisés dans la structure du poignet et actionnés par des servomoteurs à courant continu [12]. Les mouvements des phalanges sont assurés par des mécanismes de réduction permettant grâce à l'utilisation des biellettes représentées en Figure 3-c [13], la transmission directe des mouvements de flexion au poignet. Les mouvements d'extension sont assurés par des câbles ou des tendons.

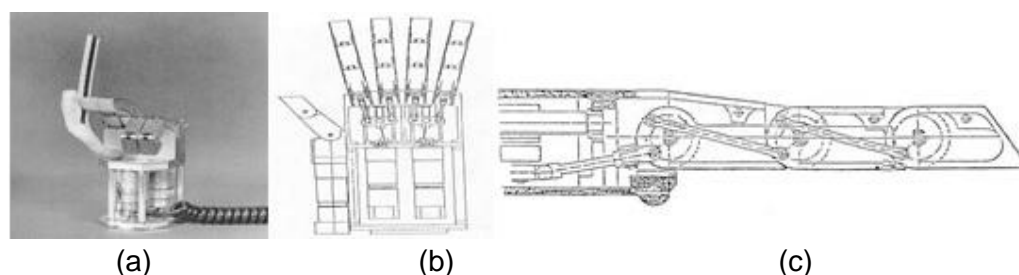


Figure 3. Main de Belgrade/USC.
(a) Modèle-I. (b) Modèle-II. (c) Vue de profil d'un doigt-main de Belgrade-II

La conception de cette main est différente de celle de l'UTH/MIT et de celle de Stanford/JPL [11], particulièrement dans son mode d'actionnement. La main de Belgrade/USC convient aux contrôles de prises, mais ne possède pas la dextérité nécessaire aux applications exigeant un grand nombre de DDL.

4. Mains articulées à plusieurs actionneurs (DLR)

La main de DLR-I (Deutsche Luft-Reederei) a été développée au German Aerospace Centre en 1997. Elle est articulée autour de quatre doigts identiques comportant chacun trois phalanges, et possède une architecture anthropomorphe (Figure 4) et une unité d'articulation de base ayant deux DDL. Deux axes concourants lui assurent le mouvement d'abduction-adduction, et chaque articulation est mue par un actionneur [14]. La figure 4-b représente une unité de doigt mono-actionneur à deux articulations couplées comme dans la cinématique de la main humaine réduisant ainsi le nombre de DDL à 1. La transmission du mouvement est assurée par des câbles et des poulies [14]. La main DLR possède 18 DDL dont 6 se réfèrent au mouvement du poignet et trois indépendamment contrôlables pour chaque doigt qui possède par conséquent une architecture modulaire.

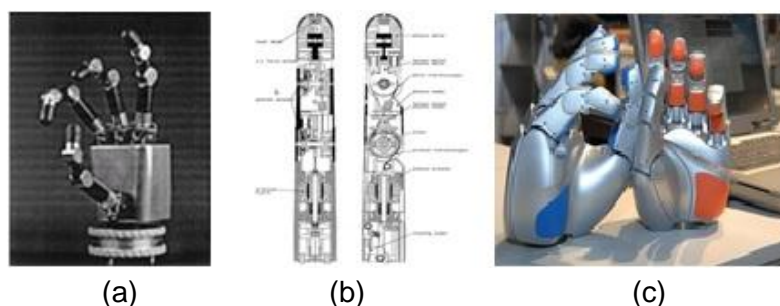


Figure 4. La main de DLR
(a) Main DLR-I, (b) Unité d'articulation à 2 DDL avec actionneur, (c) Main HIT/DLR II à 5 doigts

Plusieurs versions de la main DLR réalisées comportent 4 doigts sauf celle développée en collaboration avec le Harbin Institute of Technology (HIT) qui en comporte 5 (Figure 4-c). Le développement d'une main à 5 doigts présente une grande complexité. Pour atteindre une force et une taille comparables à celle la main humaine, les servomoteurs ont été déportés au niveau de l'avant-bras [15]. La collaboration DLR-HIT permet le développement d'une main dotée de 19 DDL utilisant des cordons 'Dyneema' qui sont des fibres UHMWPE (Ultra High Molecular Weight Polyethylene). Elle est composée d'une paume indépendante et de 5 doigts modulaires identiques. La longueur et la largeur du doigt ont été modifiées dans une proportion de deux tiers par rapport aux versions précédentes. L'utilisation d'un mécanisme de couplage des fils permet d'obtenir un rapport unitaire de transmission de la phalange distale durant tous les mouvements, et le type de conditionnement utilisé pour les doigts et la paume permet de réduire la taille de la main et de la rendre anthropomorphe. Des capteurs de force, couple et position innovants y ont été intégrés afin d'augmenter sa capacité multi-sensorielle [16]. Chaque doigt possède 3 DDL et 4 articulations. Les actionneurs électriques sont intégrés dans le corps du doigt et dans la paume.

5. Mains anthropomorphe de Gifu

La main GIFU-III illustrée en Figure 5 est la version améliorée de deux premières mains, GIFU-I et GIFU-II, réalisées au sein de l'université de Gifu au Japon [17]. Elles comprennent toutes 5 doigts, disposent de 20 articulations dotées de 16 DDL, et sont entraînées par des servomoteurs intégrés. La dernière version,

GIFU-III, a été développée afin de réduire le jeu qui apparut dans la transmission par engrenages des versions précédentes.

Les deux mains gauche et droite ont été conçues d'une manière symétrique. Elles comportent chacune un pouce et 4 doigts longs. Chaque doigt long possède 4 articulations et est doté de 3 DDL alors que le pouce possède 4 articulations et 4 DDL. Le mouvement de la première articulation du pouce et des doigts longs permet d'obtenir l'adduction-abduction tandis que la seconde et la quatrième articulation permettent d'obtenir l'ante-flexion et la rétroflexion. Chaque servomoteur possède un encodeur magnétique doté de 16 impulsions par tour. Les mécanismes de conception du pouce et des doigts longs sont représentés en Figure 7-b et Figure 7-c respectivement [18]. L'amélioration principale réalisée sur cette main réside dans l'utilisation d'un nouveau capteur tactile doté de 859 points de détection dont 313 positionnés sur la paume, 126 sur le pouce, et 105 sur chaque doigt long. Les servomoteurs sont dotés de capteurs de position, et les bouts de doigts de capteurs de force à 6 axes. Un dispositif de commande de la main est couplé à un système d'exploitation en temps réel, l'ART-Linux. La main GIFU-III est à ce jour la main artificielle la plus proche de la main humaine.

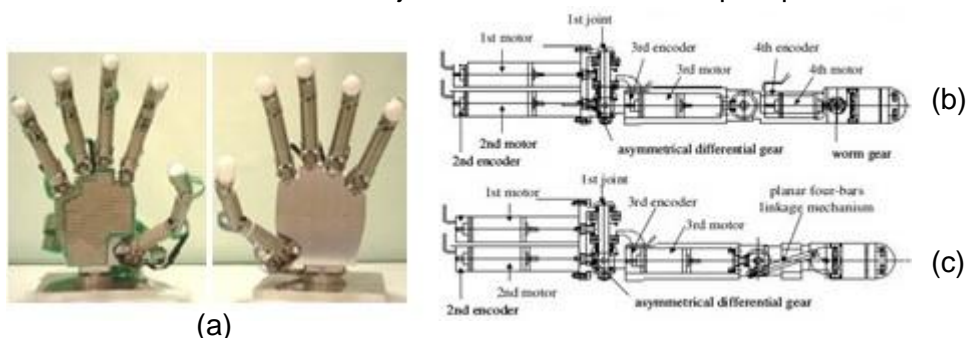


Figure 5. Main anthropomorphe GIFU III
(a) Droite et gauche, (b) Mécanisme du pouce, (c).Mécanisme des doigts longs

6. Main mécanique articulée à quatre doigts L.M.S

La main LMS, réalisée au sein de laboratoire de mécanique des solides de l'Université de Poitiers en France possède 4 doigts, dont 3 longs et un pouce en opposition [19] possédant chacun 4 DDL. Trois doigts permettent le mouvement de flexion-extension tandis que le quatrième réalise celui de l'abduction-adduction (Figure 6-a).

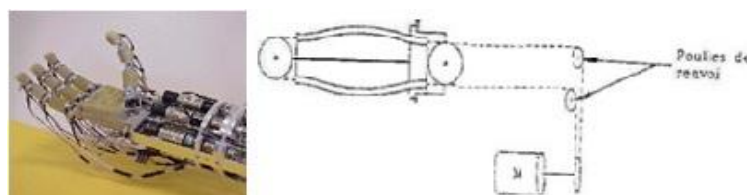


Figure 6. Main LMS et son dispositif de moteurs

Pour les doigts longs, l'axe du mouvement d'abduction-adduction est fixe par rapport à la phalange proximale, permettant ainsi la conservation de l'amplitude de ce mouvement quel que soit la configuration du doigt. Pour le pouce par contre, l'amplitude de ce mouvement est beaucoup plus importante autorisant l'opposition de ce dernier aux autres doigts. Son axe est fixe par rapport à la paume. La main LMS utilise une conception semblable à celle de la main d'UTAH/MIT. Une architecture basée sur l'utilisation de 32 câbles permet le contrôle des 16 articulations. Les poulies motrices permettent de tendre les deux câbles contrôlant une articulation de manière indépendante. D'autres poulies de guidage assurent le passage des câbles au niveau des articulations. La transmission des mouvements aux phalanges nécessite l'utilisation d'une poulie de renvoi par câble (Figure 6-b). Le matériau utilisé pour la structure mécanique est un alliage d'aluminium, et les organes mobiles sont montés sur paliers en Torlon.

7. Main Shadow

A travers la main Shadow illustrée en Figure 7-a, les approches anthropomorphes sont adaptées à la manipulation robotique [20]. Avec ses vingt degrés de liberté, cette main offre des analogies uniques avec la

main humaine. Développée par Shadow et l'UPMC et dotée de capteurs de force, de position ainsi que des capteurs ultra tactiles sensibles au bout des doigts et utilisant des interfaces standard de l'industrie, la main Shadow peut aisément être utilisée comme outil de télé-opération. Elle peut aussi être aisément montée sur une gamme de bras dans le cadre d'un système robotique et exécuter diverses saisies (figure 7-b-c-d-e).

La main Shadow constitue un exploit dans le domaine de la miniaturisation, et sa cinématique est très proche de celle de la main humaine [11]. Avec un total de 129 capteurs (de position pour chaque articulation, de force pour chaque actionneur, tactiles au bout des doigts, de température, et boucles de courant sur les moteurs) dont les lectures sont réalisées via une interface EtherCaT et une carte de contrôle située dans la paume, elle peut fournir une télémétrie détaillée pouvant être exploitée pour produire des systèmes de contrôle de manipulations innovants.

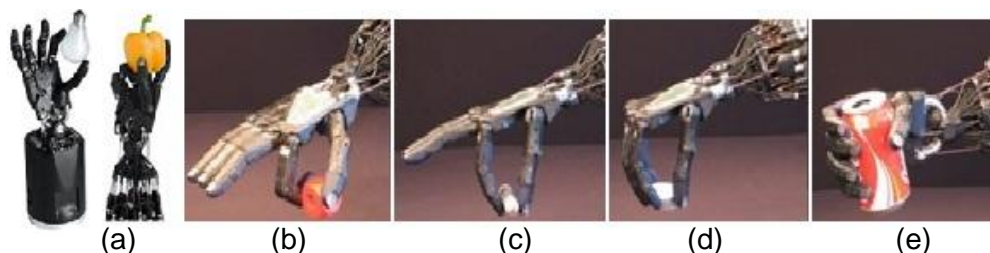


Figure 7. (a) Main Shadow dextre E1, (b) Saisie de pincement à deux doigts, (c) Saisie de précision à deux doigts, (d) Saisie de précision avec tous les doigts, (e) Saisie de puissance

La main Shadow est entièrement intégrée au système ROS [21]. Des modèles de cette main y sont disponibles avec leurs codes, et son contrôle ainsi que celui de ses algorithmes de commande de position peuvent y être modifiés. Pour des applications nécessitant des capacités de détection détaillées, les capteurs tactiles 'BioTac' sont disponibles et peuvent être ajoutées sur chaque doigt apportant ainsi une détection affinée de la force, des micro-vibrations et du gradient de température.

3. Conclusions

Les mains mécaniques à quatre ou cinq doigts facilitent la manipulation d'objets grâce à leurs possibilités de repositionnement de certains doigts sur l'objet. La conception mécanique détermine la dextérité fondamentale de la main i.e. le genre de manipulation pouvant être exécuté lors de la saisie d'objets. La taille et le placement des doigts entraineront le choix de l'approche. Les mains anthropomorphes se basent sur le transfert direct des stratégies de prise à partir de la main humaine, et celles non anthropomorphes considéreront les doigts comme identiques et seront par conséquent rangés symétriquement.

L'étude présente a permis d'examiner l'anatomie de la main humaine et l'assemblage complexe de ses os, des articulations qui les relient et les différents mouvements produits. Un large éventail des structures de mains mécaniques disponibles est présenté ainsi que les derniers développements en cours. Quelles que soient les structures adoptées, le but du concepteur est d'obtenir une main artificielle qui présente une dextérité proche de celle de la main humaine avec le souci d'en simplifier la conception tout en choisissant une commande appropriée.

4. Bibliographie

- [1] REBOULET C. Modélisation des robots parallèles, Techniques de la robotique, architecture et commande, 1988, pp. 257-284.
- [2] SEGUNA, C.M., SALIBA, M.A. The mechanical and control system design of a dexterous robotic gripper, 8th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 3, pp 1195-1201, 2001.
- [3] OSSWALD D., WÖRN H. Mechanical system and control system of a dexterous robot hand, Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 8, 2001.
- [4] BROWN E., VARDY A. Articulated human hand model with inter-joint dependency constraints, Computer Science, 1998, 6752, pp. 8–9.
- [5] SALISBURY K., ROTH B. Kinematic and force analysis of articulated mechanical hands, Journal of Mechanical Design, 1983, 105, pp. 35–41.

- [6] MURRAY R.M., LI, Z., SHANKAR SASTRY S., A mathematical introduction to robotic manipulation, CRC Press Book, 1994.
- [7] LOUCKS C., JOHNSON V., BOISSIERE P., STARR G., STEELE J., Modeling and control of the Stanford/JPL hand, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 4, pp 573–578, 1987.
- [8] POLLARD N.S., GILBERT R.C. Tendon arrangement and muscle force requirements for human-like force capabilities in a robotic finger, IEEE-ICRA'02, 4, pp 3755–3762, 2002.
- [9] JACOBSEN S.C., IVERSEN E.K., KNUTTI D., JOHNSON R., BIGGERS K. Design of the Utah/M.I.T. dexterous hand, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 3, pp 1520-1532, 1986.
- [10] BANKS J.L. Design and control of an anthropomorphic robotic finger with multi-point tactile sensation, AI Technical Report, 2001, pp. 2001-2005.
- [11] BEKEY G.A., TOMOVIC R., ZELJKOVIC I. Control architecture for the Belgrade/USC hand, Dexterous Robot Hands, New York, Springer-Verlag, 1990, pp. 136-149.
- [12] SOTO MARTELL J.W., GINI G. Robotic hands-Design review and proposal of new design process, World Academy of Science, J. of Engineering and Technology, 2007, 26, pp. 85–90.
- [13] MACKENZIE C.L., IBERALL T. The grasping hand, Advances in Psychology, North Holland, 1994, 104.
- [14] BUTTERFASS J., HIRZINGER G., KNOCH S., LIU H. DLR's multisensory articulated hand, Hard and software architecture, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 3, pp 2081-2086, 1998.
- [15] LEBLANC D., http://shyrobotics.com/give-me-five_20110419, 2011.
- [16] SHAOWEI F., YIWEI L., MINGHE J., TIAN L., HONG L. The anthropomorphic design and experiments of HIT/DLR five-fingered dexterous hand, High Technology Letters, 1995, 15, pp. 239-244.
- [17] KAWASAKI H., KOMATSU T., UCHIYAMA K. Dexterous anthropomorphic robot hand with distributed tactile sensor-Gifu hand II, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 7, pp 296-303, 2002.
- [18] MOURI Tetsuya, KAWASAKI H., YOSHIKAWA K., TAKAI J., ITO S. Anthropomorphic robot hand-Gifu hand III. Proc. Int. Conf. ICCAS, pp 1288-1293, 2002.
- [19] GAZEAU J.P. Développement de la commande d'une main mécanique articulée à 4 doigts et 16 degrés de mobilité en vue de la manipulation fine d'objets, Thèse Doctorat, université de Poitiers, France, 2000.
- [20] ROTHLING F., HASCHKE R., STEIL J.J., RITTER H. Platform portable anthropomorphic grasping with the Bielefeld 20-dof shadow and 9-dof, IEEE/RSJ ICIRS, San Diego, USA, 2007.
- [21] www.ros.org/about-ros