

IRSBOT-2 : Un nouveau robot parallèle à deux degrés de liberté pour des applications de manipulation rapide

C. GERMAIN^a, S. BRIOT^a, S. CARO^a, P. WENGER^a

^a. IRCCyN, École Centrale Nantes, 1 rue de la Noë 44321 Nantes, France

Résumé :

*Cet article présente un nouveau robot parallèle à deux degrés de liberté de translation, nommé IRSBot-2 (acronyme de **IRCCyN Spatial Robot with 2 DOF**), pour des applications de manipulation rapide. Contrairement à la majorité des robots générant des mouvements plans de translation, l'IRSBot-2 possède deux chaînes cinématiques à architecture spatiale qui lui confèrent une très bonne raideur intrinsèque. Après une description de l'architecture du robot, l'étude du modèle élastostatique quantifie, en termes de masse et de raideur, les avantages de ce robot par rapport à ses concurrents.*

Abstract :

*This paper presents a novel two-degree-of-freedom (DOF) translational parallel robot, named the IRSBot-2 (acronym for **IRCCyN Spatial Robot with 2 DOF**), for high-speed applications. Unlike most two-DOF robots dedicated to planar translational motions, the IRSBot-2 has two spatial kinematic chains which confers a good intrinsic stiffness. First, the robot architecture is described. Then, the IRSBot-2 is compared to its two-DOF counterparts based on elastostatic performances.*

Mots clefs : Robot parallèle 2T ; Pick-and-Place ; Modélisation élastostatique

1 Introduction

Depuis la création du robot Delta [1,2], l'utilisation des robots parallèles dans l'industrie ne cesse d'augmenter surtout pour des opérations de manipulations de type pick-and-place [1–16].

La plupart d'entre eux possèdent quatre degrés de liberté (DDL) et génèrent des mouvements dits de Schoenflies [17], mais de nombreuses opérations ne nécessitent que deux DDL en translation pour transférer un objet d'une zone de travail à une autre (e.g. convoyeurs) c'est pourquoi des architectures à deux DDL en translation uniquement ont été développées [6, 14–16]. Cependant, ces robots ont l'inconvénient d'être des mécanismes plans, c'est à dire que tous leurs éléments se déplacent dans des plans parallèles et qu'ils sont soumis à des sollicitations de flexion sous l'action d'une charge perpendiculaire au plan de déplacement de la plate-forme mobile. Pour obtenir une raideur suffisante, les éléments doivent ainsi être massifs, ce qui implique une augmentation de la masse en mouvement et une diminution des capacités dynamiques du robot. Afin de palier à ce problème, Pierrot et al. [18] ont récemment développé un nouveau robot nommé Par2 possédant une architecture spatiale et construit sur la base du robot Quattro. Tous les éléments de sa partie distale sont uniquement soumis à des sollicitations de traction/compression/torsion permettant d'obtenir un robot plus léger ayant de meilleures capacités dynamiques. Le prototype de ce robot peut actuellement atteindre une accélération de 53 G mais avec une précision modeste. Cette faible précision est due à la complexité de la conception du robot composé de quatre jambes identiques dont deux d'entre elles sont couplées par une courroie métallique afin de contraindre le mouvement de la plate-forme mobile dans le plan. Ce robot est soumis à beaucoup d'effets parasites rendant ses paramètres dynamiques difficiles à identifier et altérant sa précision. Par ailleurs, son espace de travail est plus petit que celui de ses homologues à deux DDL puisqu'il possède quatre jambes.

Afin de palier aux problèmes mis en avant précédemment en termes de masse en mouvement, de raideur et d'espace de travail, cet article présente un nouveau robot nommé IRSBot-2 (acronyme de **IRCCyN Spatial Robot with 2 DOF**).

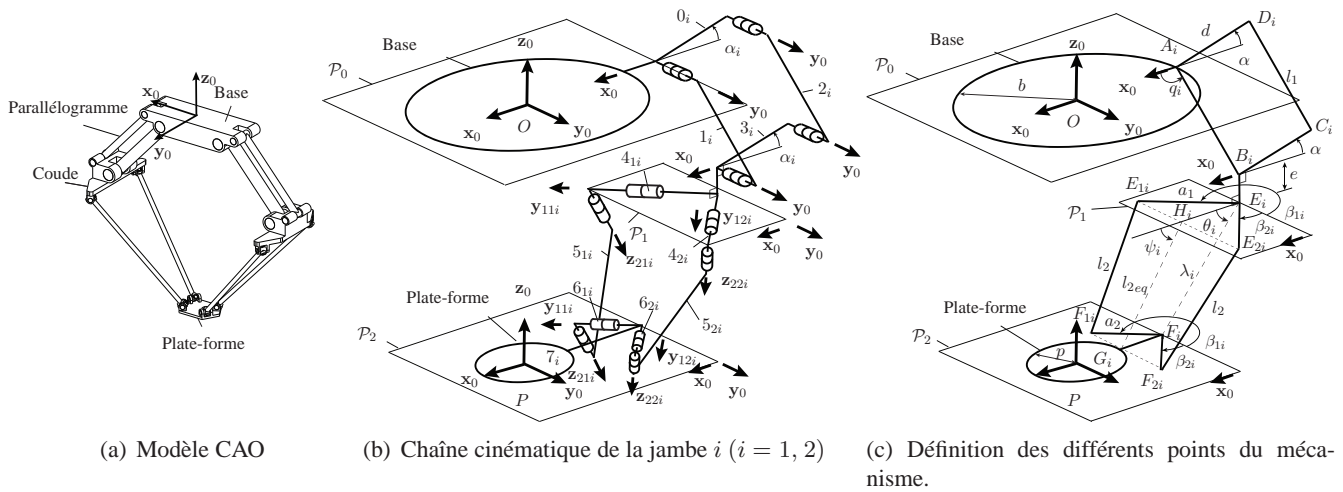


FIGURE 1 – Représentation schématique de l'IRSBot-2.

2 Présentation du Robot

2.1 Description de l'architecture

L'IRSBot-2 est un nouveau robot parallèle à deux DDL de translation suivant les axes \mathbf{x}_0 et \mathbf{z}_0 du repère représenté dans la Fig. 1. Il est constitué de deux jambes identiques reliant la base fixe à la plate-forme mobile.

Chaque jambe est composée d'une partie proximale et d'une partie distale. La partie proximale est réalisée par une articulation de type parallélogramme, également appelée articulation Π composée des éléments 0_i , 1_i , 2_i et 3_i ($i = 1, 2$). Ces éléments sont reliés entre eux par des liaisons pivot d'axe \mathbf{y}_0 . Ce parallélogramme permet de maintenir l'orientation du plan \mathcal{P}_1 parallèle au plan \mathcal{P}_0 auquel est attaché le repère global $(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{z}_0)$.

Contrairement aux manipulateurs planaires classiques, les mouvements des éléments de la partie distale n'ont pas lieu dans des plans parallèles. Cependant, les déplacements de la plate-forme sont contraints à rester dans le plan vertical $(\mathbf{x}_0, O, \mathbf{z}_0)$.

La partie distale est attachée d'un côté à l'élément 3_i par l'intermédiaire de deux liaisons pivot d'axes \mathbf{y}_{1ji} appartenant au plan \mathcal{P}_1 , et de l'autre côté à l'élément 7_i de la plate-forme par l'intermédiaire de deux liaisons pivot d'axes \mathbf{y}_{1ji} appartenant au plan \mathcal{P}_2 ($j = 1, 2$). Les plans \mathcal{P}_1 et \mathcal{P}_2 étant parallèles, le plan \mathcal{P}_2 est également parallèle au plan \mathcal{P}_0 . L'architecture est conçue de telle sorte que les axes \mathbf{y}_{11i} et \mathbf{y}_{12i} (respectivement \mathbf{z}_{21i} et \mathbf{z}_{22i}) soient symétriques par rapport au plan $(\mathbf{x}_0, O, \mathbf{z}_0)$. Notons que les barres 5_{1i} et 5_{2i} ne sont pas parallèles. Si c'était le cas, la partie distale serait un parallélogramme spatial et l'architecture du robot serait singulière.

La partie distale se décompose elle-même en deux sous-parties possédant la même architecture réalisée à l'aide des éléments 4_{ji} , 5_{ji} et 6_{ji} ($j = 1, 2$). Ces éléments sont reliés entre-eux par des liaisons pivot d'axes \mathbf{z}_{2ji} . Les axes \mathbf{y}_{1ji} et \mathbf{z}_{2ji} sont orthogonaux.

Pour analyser la mobilité de l'IRSBot-2, étudions le robot représenté par la Fig. 2. Il s'agit d'un robot Delta linéaire composé de quatre jambes identiques, chacune étant composée d'un actionneur linéaire attaché à la base fixe et d'une barre $A_i B_i$ reliant l'actionneur à la plate-forme mobile par l'intermédiaire de liaisons cardan (Fig. 2(b)). La plate-forme mobile peut réaliser des mouvements à trois DDL de translation alors que le mécanisme a quatre actionneurs. Il est ainsi redondant du point de vue de l'actionnement.

Pour que la plate-forme mobile de ce robot admette un mouvement de translation uniquement dans le plan $(\mathbf{x}_0, O, \mathbf{z}_0)$ passant par le centre de la base (Fig. 2(c)), les centres des liaisons cardan A_i ($i = 1 \dots 4$) des jambes 1 et 2 d'une part et des jambes 3 et 4 d'autre part, doivent avoir la même altitude, i.e. $z_{A_1} = z_{A_2}$ et $z_{A_3} = z_{A_4}$, où z_{A_i} représente la coordonnée cartésienne du point A_i selon \mathbf{z}_0 .

En conséquence, une solution pour que les centres des liaisons cardan des jambes 1 et 2 (respectivement 3 et 4) conservent la même altitude est de les relier au même actionneur. Notons que l'architecture est équivalente à celle représentée par la Fig. 1 dans le cas où la liaison glissière est remplacée par une articulation Π .

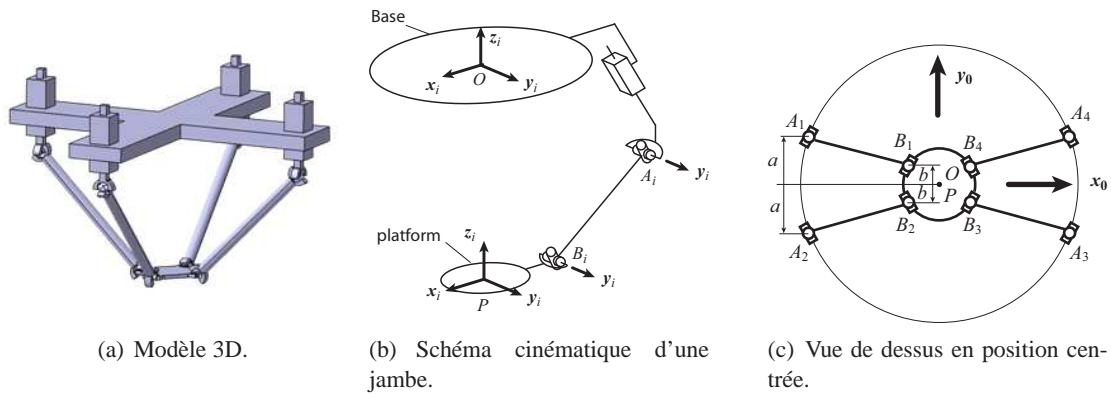


FIGURE 2 – Schéma cinématique du robot Delta redondant.

2.2 Avantage de la nouvelle architecture

Les avantages de l'IRSBot-2 sont les suivants :

- par rapport aux architectures planaires de robots à deux DDL en translation dont chaque élément est soumis à des sollicitations de flexions dans les directions normales au plan du déplacement, les éléments $5_{j,i}$ de l'IRSBot-2 ne sont soumis qu'à des sollicitations de traction/compression/torsion. Ils se déforment ainsi moins que des éléments soumis à de la flexion. Pour l'IRSBot-2, toutes les sollicitations de flexion sont reportées au niveau du parallélogramme, ce qui conduit à l'augmentation de la raideur intrinsèque de l'architecture. Ses performances dynamiques peuvent ainsi être améliorées en minimisant sa masse et sa précision maximisée en diminuant les déformations des éléments.
- par rapport au robot Par2 [19], seul robot d'architecture spatiale à deux DDL de translation que nous pouvons trouver dans la littérature, l'IRSBot-2 présente les avantages d'être (i) plus simple donc moins soumis à des effets parasites non maîtrisés et (ii) d'avoir un espace de travail plus grand puisqu'il n'a que deux jambes contre quatre pour le Par2.

2.3 Analyse géométrique et cinématique

Les paramètres utilisés pour définir les modèles géométriques et cinématiques de l'IRSBot-2 sont définis dans la Fig. 1(c). Ces modèles ne sont pas développés ici. Il est cependant montré dans [20] qu'ils peuvent être calculés de manière analogue à ceux d'un mécanisme \underline{RRRRR} [21]. Ainsi, l'IRSBot-2 a des singularités de Type 1 et 2 [22] similaires à celles d'un mécanisme \underline{RRRRR} [23], i.e. :

- Les singularités de Type 1 apparaissent lorsque $q_i = \psi_i + k\pi$, avec $k \in \mathbb{Z}$. Dans ce cas, le mécanisme perd un DDL.
- Les singularités de Type 2 apparaissent lorsque $\psi_1 = \psi_2 + k\pi$, avec $k \in \mathbb{Z}$. Dans ce cas, le mécanisme gagne localement un DDL. Il s'agit d'un mouvement instantané de translation dans le plan (x_0, O, z_0) et de direction perpendiculaire aux jambes distales.

Il est aussi montré dans [20] que l'IRSBot-2 a des singularités de contraintes [24]. Cependant, ces singularités peuvent être rejetées à l'extérieur de l'espace de travail par une conception optimale du robot. Ce point sera détaillé davantage dans un travail futur.

3 Analyse des performances de l'IRSBot-2

Cette section a pour but de montrer d'un point de vue quantitatif les avantages de l'IRSBot-2 par rapport aux autres robots à deux DDL de translation. A cet effet, nous utilisons l'approche présentée dans [19] qui vise à comparer les mécanismes \underline{RRRRR} et Par2 du point de vue de leurs masse et raideur. Dans cet article, les auteurs montrent que, pour un jeu de paramètres géométriques donnés, le Par2 en position centrée est plus raide qu'un mécanisme \underline{RRRRR} dans la direction perpendiculaire au plan de déplacement, à masse équivalente. Ici, une étude comparative équivalente est faite entre l'IRSBot-2, le Par2 et le mécanisme \underline{RRRRR} .

Pour réaliser cette analyse, il est nécessaire d'écrire le modèle élastostatique des robots étudiés. Nous utilisons l'approche des flexibilités localisées proposée dans [25] pour obtenir ce modèle dont les équations sont détaillées dans [20].

TABLE 1 – Résultats obtenus en termes de masse et de déformation sous l'action d'une force de 100N selon y_0 pour le RRRRR et le Par2.

Robot	Masse (en kg)	$\delta_{y_{Max}}$ (en mm)	$\delta_{y_{Moy}}$ (en mm)	σ_{δ_y} (en mm)
<u>RRRRR</u>	5.6	1,227	1.135	0.064
Par2	5.77	1.158	0.382	0.205

TABLE 2 – Jeu de paramètres \mathbf{x} (en m).

a_2	a_1	D_{parp}	d_{parp}	D_{sp}	d_{sp}	d	D_{coud}	d_{coud}
0.03	0.42	0.06	0.054	0.046	0.044	0.2	0.1	0.09

TABLE 3 – Résultats obtenus en termes de masse et de déformations sous l'action d'une force de 100N selon y_0 pour l'IRSBot-2.

Masse (en kg)	$[\delta_{y_{IRS}}]_{Max}$ (en mm)	$[\delta_{y_{IRS}}]_{Moy}$ (en mm)	$\sigma_{\delta_{y_{IRS}}}$ (en mm)
10.56	1.222	0.941	0.129

Afin d'obtenir un robot IRSBot-2 équivalent au mécanisme RRRRR défini dans [19] au regard des performances cinématiques, nous choisissons les paramètres suivants pour l'IRSBot-2 : $l_1 = 0.375$ m, $l_{2eq} = 0.825$ m, $b = 0.1375$ m et $p = 0.05$ m (c.f. Fig. 1(c)). Les sections des tubes utilisés pour la conception des robots sont aussi définis dans [19]. $D_{para} = 0.06$ m et $d_{para} = 0.05$ m correspondent aux diamètres extérieurs et intérieurs des éléments proximaux pour le Par2 et le RRRRR, et à l'élément 1_i pour l'IRSBot-2 (Fig. 1(b)).

Une fois ces paramètres fixés, il reste à trouver la valeur des autres paramètres de l'IRSBot-2, à savoir la distance d entre les barres proximales du parallélogramme et les paramètres a_1 , a_2 et β de la partie distale (Fig. 1(c)). On note D_{parp} et d_{parp} les diamètres extérieurs et intérieurs du tube de longueur l_1 constituant l'élément 2_i , D_{sp} et d_{sp} les diamètres extérieurs et intérieurs du tube de longueur l_2 constituant les jambes spatiales et D_{coude} , d_{coude} les diamètres constituant les parties spatiales et déformables du coude.

Pour trouver la valeur optimale de ces paramètres, nous résolvons le problème d'optimisation suivant :

$$P : \begin{cases} \text{Trouver } \mathbf{x} \text{ qui minimise} & m_{IRS}(\mathbf{x}, \mathbf{p}), \\ \text{sous contrainte} & [\delta_{y_{IRS}}(\mathbf{x}, \mathbf{p})]_{Max} < [\delta_{y_{RRRRR}}(\mathbf{p})]_{Max}, \\ & [\delta_{y_{IRS}}(\mathbf{x}, \mathbf{p})]_{Moy} < [\delta_{y_{RRRRR}}(\mathbf{p})]_{Moy}, \end{cases} \quad (1)$$

où $m_{IRS}(\mathbf{x}, \mathbf{p})$ est la masse de l'IRSBot-2, $\delta_{y_{IRS}}(\mathbf{x}, \mathbf{p})$ est la déformation selon y_0 du point central de la plate-forme mobile de l'IRSBot-2, $\delta_{y_{RRRRR}}(\mathbf{p})$ est la déformation selon y_0 du point central de la plate-forme mobile du RRRRR, $\mathbf{p} = [x, z, q_1, q_2, l_1, l_{2eq}, b, p, D_{para}, d_{para}]$ est le vecteur des paramètres de conception fixés, commun aux trois manipulateurs et $\mathbf{x} = [d, a_1, a_2, \beta, D_{parp}, d_{parp}, D_{sp}, d_{sp}, D_{coude}, d_{coude}]$ est le vecteur des variables de conception à optimiser.

Afin de faire une comparaison juste, le problème d'optimisation est résolu dans l'espace de travail commun, \mathcal{W}_c , aux trois robots. Nous calculons dans ce dernier, les déformations de chaque robot dans la direction normale au plan de déplacement de leur plate-forme-mobile pour un effort donné.

Les résultats obtenus pour vingt configurations en termes (i) de déformation maximale, déformation moyenne sous l'action d'une charge de 100 N selon l'axe y_0 , (ii) d'écart type de cette déformation sur l'ensemble de \mathcal{W}_c et (iii) de masse en mouvement, sont détaillés dans le Tab. 1 pour les robots RRRRR et Par2. À masse équivalente, le Par2 est en moyenne trois fois plus raide que le RRRRR mais l'écart type de sa déformation est trois fois plus grande.

De manière empirique, nous trouvons un jeu de paramètres pour l'IRSBot-2 proche de l'optimal par rapport à notre problème d'optimisation (Tab. 2). Pour ce jeu de paramètres, les résultats obtenus pour vingt configurations en termes de déformation et de masse totale sont détaillés dans le Tab. 3.

Les résultats, en terme de masse totale, montre qu'à déformation égale, l'IRSBot-2 est plus massif qu'un mécanisme RRRRR.

TABLE 4 – Jeu de paramètres x (en m) après reconception du Robot.

a_2	a_1	D_{parp}	d_{parp}	D_{sp}	d_{sp}	d	D_{coud}	d_{coud}	D_{para}	d_{para}
0.03	0.42	0.045	0.043	0.0555	0.0535	0.1	0.0285	0.026	0.049	0.0419

TABLE 5 – Résultats obtenus en termes de masse et de déformations sous l'action d'une force de 100N selon y_0 pour l'IRSBot-2 après reconception.

Masse (en kg)	$[\delta_{y_{IRS}}]_{Max}$ (en mm)	$[\delta_{y_{IRS}}]_{Moy}$ (en mm)	$\sigma_{\delta_{y_{IRS}}}$ (en mm)
4.48	0.576	0.546	0.03

En effet, l'analyse du mécanisme montre que le parallélogramme se déplace en rotation autour de x_0 sous l'action de la force appliquée sur la plate-forme. Or, une déviation angulaire du parallélogramme entraîne un grand déplacement des extrémités du coude. Le déplacement important des extrémités du coude va entraîner un déplacement important de la plate-forme. Ainsi la conception du parallélogramme a été revue afin de palier à ce problème.

Pour minimiser les déformations en rotation à l'extrémité du parallélogramme, plusieurs mécanismes sont possibles. Une solution simple est de remplacer l'élément 1_i du parallélogramme par deux barres parallèles 1_{1i} et 1_{2i} (non représentées ici). La rotation du coude est d'autant plus faible que les barres 1_{1i} et 1_{2i} sont éloignées l'une de l'autre. L'écart entre ces deux barres parallèles est fixée à $r = 2 a_1 \cos \beta$ (i.e. écart entre les liaisons cardan centrées en E_{1i} et E_{2i}).

Le nouveau mécanisme est donc optimisé en résolvant le problème d'optimisation (1). Cette fois, puisque nous avons doublé le nombre de barres pour remplacer l'élément 1_i , nous nous permettons de faire figurer dans les paramètres d'optimisation D_{para} et d_{para} les diamètres extérieur et intérieur des tubes cylindriques constituant les éléments 1_{1i} et 1_{2i} .

Le nouveau jeu de paramètres de l'IRSBot-2 est donné dans le Tab. 4 et les résultats obtenus en terme de déformation maximale, selon la normale au plan de déplacement de la plate-forme mobile, pour l'IRSBot-2 sont donnés dans le Tab. 5.

D'après le Tab. 5, l'IRSBot-2 est à masse moindre deux fois plus raide qu'un mécanisme RRRRR. De plus, comme le montrent les Tab. 1 et Tab. 5, la variation de la déformation à travers \mathcal{W}_c est plus petite pour l'IRSBot-2 que pour ses concurrents.

4 Conclusion et travaux futurs

Dans cet article, un nouveau robot parallèle à deux DDL en translation appelé IRSBot-2 est présenté. Ce robot a les caractéristiques suivantes :

- (i) Comme le robot Par2, il possède une architecture spatiale dont les parties distales sont uniquement soumises à des sollicitations de traction/compression/torsion. Par conséquent, sa raideur intrinsèque est plus importante et sa masse totale en mouvement plus faible.
- (ii) L'IRSBot-2 n'est composé que de deux jambes, ce qui permet de diminuer la complexité du robot et d'augmenter la taille de son espace de travail.

Une analyse élastostatique de l'IRSBot-2 a montré ses avantages en termes de masse en mouvement et de raideur par rapport au robot Par2 et au mécanisme RRRRR. Il s'avère que l'IRSBot-2 est plus léger que le Par2 et le mécanisme RRRRR en étant deux fois plus raide que ce dernier. Un brevet est en cours de dépôt sur ce nouveau robot.

Nos prochains travaux porteront sur l'analyse approfondie des singularités, sur la synthèse et la conception au stade préliminaire de toutes les architectures spatiales robotisées à deux DDL de translation et sur l'optimisation multi-critères de l'IRSBot-2.

Références

- [1] Clavel, R., 1990. Device for the movement and positioning of an element in space. Patent US 4976582, December 11.

- [2] Bonev, I., 2001. Delta Parallel Robot - The Story of Success. Parallelemic website. <http://www.parallelemic.org/Reviews/Review002.html>.
- [3] Angeles, J., Caro, S., Khan, W., and Morozov, A., 2006. “Kinetostatic design of an innovative schonflies-motion generator”. Proceedings of IMechE Part C : Journal of Mechanical Engineering Science, **220** (7) Jan. , pp. 935–943.
- [4] Campos, L., Bourbonnais, F., Bonev, I. A., and Bigras, P., 2010. “Development of a five-bar parallel robot with large workspace”. In ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences.
- [5] http://www.mitsubishi-automation.fr/produits/robots_RP.html.
- [6] http://backoffice.elau.de/files/3932_20412844/ETIE222_00_18_10_07.pdf.
- [7] <http://fanucrobotics.fr/fr/Countries/FRFR/News/M3iA.aspx>.
- [8] Chablat, D., and Wenger, P., 2003. Dispositif de déplacement et d’orientation d’un objet dans l’espace et utilisation en usinage rapide. Patent FR 2850599.
- [9] Company, O., 2000. *Machines-outils rapides à structure parallèle. Méthodologie de conception, applications et nouveaux concepts*. PhD thesis, Université Montpellier II.
- [10] Pierrot, F., Shibukawa, T., and Morita, K., 2001. Four-degree-of-freedom parallel robot. Patent EP 1 084 802 A2.
- [11] Krut, S., Nabat, V., Company, O., and Pierrot, F., 2004. “A high-speed parallel robot for scara motions”. In Proceedings. ICRA ’04, vol. 4, pp. 4109 – 4115.
- [12] Company, O., Pierrot, F., Nabat, V., and de la O Rodriguez, M., 2005. “Schoenflies motion generator : A new non redundant parallel manipulator with unlimited rotation capability”. In Proceedings. ICRA ’05, pp. 3250 – 3255.
- [13] Nabat, V., Pierrot, F., de la O Rodriguez Mijangos, M., Azcoita Arteche, J. M., Bueno Zabalo, R., Company, O., and Florentino Perez De Armentia, K., 2007. High-speed parallel robot with four degrees of freedom. Patent EP 1 870 214 A1.
- [14] Brogardh, T., 2001. Device for relative movement of two elements. Patent US 6301988 B1.
- [15] Liu, X., and Kim, J., 2002. “Two novel parallel mechanisms with less than six degrees of freedom and the applications”. In Proc. Workshop on Fundamental Issues and Future Reserch Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators, pp. 172–177.
- [16] Huang, T., Li, M., Li, Z., Chetwynd, D., and Whitehouse, D., 2003. Planar parallel robot mechanism with two translational degrees of freedom. Patent WO 03055653 A1.
- [17] Caro, S., Khan, W. A., Pasini, D., and Angeles, J., 2010. “The rule-based conceptual design of the architecture of serial schönflies-motion generators”. Mechanism and Machine Theory, **45** (2) Feb. , pp. 251–260.
- [18] Pierrot, F., Sébastien, K., Olivier, C., Vincent, N., Cédric, B., and A., S. F., 2009. Two degree-of-freedom parallel manipulator. Patent WO 2009/089916 A1.
- [19] Pierrot, F., Baradat, C., Nabat, V., Company, O., Krut, S., and Gouttefarde, M., 2009. “Above 40g acceleration for pick-and-place with a new 2-dof pkm”. In Proceedings. ICRA ’09, pp. 1794 –1800.
- [20] Germain, C., 2010. Analyse et conception d’un nouveau manipulateur parallèle à deux degrés de liberté pour des applications de pick-and-place. Master’s thesis, Ecole Centrale de Nantes, Septembre. See also URL <http://www.irccyn.ec-nantes.fr/~germain>.
- [21] Chablat, D., and Wenger, P., 2001. “Séparation des solutions aux modèles géométriques direct et inverse pour les manipulateurs pleinement parallèles”. Mechanism and Machine Theory, **36** (6) , pp. 763–783.
- [22] Gosselin, C., and Angeles, J., 1990. “Singularity analysis of closed-loop kinematic chains”. Robotics and Automation, IEEE Transactions on, **6** (3) June , pp. 281 –290.
- [23] Liu, X.-J., Wang, J., and Pritschow, G., 2006. “Kinematics, singularity and workspace of planar 5r symmetrical parallel mechanisms”. Mechanism and Machine Theory, **41** (2) , pp. 145 – 169.
- [24] Zlatanov, D., Bonev, I., and Gosselin, C., 2002. “Constraint singularities of parallel mechanisms”. In Proceedings. ICRA ’02, vol. 1, pp. 496 – 502.
- [25] Pashkevich, A., Chablat, D., and Wenger, P., 2009. “Stiffness analysis of overconstrained parallel manipulators”. Mechanism and Machine Theory, **44** (5) , pp. 966 – 982.