

Les robots parallèles : de la recherche vers les applications

Ilian A. Bonev

École de technologie supérieure

Département de génie de la production automatisée

1100, rue Notre-Dame Ouest, Montréal (Québec) Canada H3C 1K3

e-mail: ilian.bonev@etsmtl.ca

Résumé - Malgré le fait que les premières applications de robots parallèles sont apparues bien avant l'avalanche de travaux de recherche en robotique parallèle, ce n'est que depuis quelques années que les résultats de ces travaux ont commencé à conduire à de nombreuses nouvelles applications. Alors que la majorité des applications commerciales reposent sur deux architectures célèbres, la plateforme de Gough-Stewart et le robot Delta, il est réjouissant de constater que de plus en plus d'entreprises font preuve de créativité en utilisant de nouvelles architectures. Un autre constat encourageant est que les applications deviennent de plus en plus courantes : des onéreux simulateurs de vol à la manette de jeux avec retour de force de 189 \$. Cet article commence par une brève historique et enchaîne avec plusieurs exemples de transferts technologiques.

Mots-clés : robots parallèles, applications, étude de marché

I. INTRODUCTION

Le domaine de la robotique parallèle est fascinant car il semble y avoir une infinité de sujets de recherche, d'une complexité grandissante mais encore surmontable. Voilà pourquoi, il n'est pas surprenant de constater que des milliers de chercheurs s'intéressent à ce domaine aujourd'hui. De plus en plus d'industriels adoptent des architectures parallèles pour leurs produits : simulateurs de mouvement, robots industriels, positionneurs, joysticks, etc. Mais est-ce qu'il y a vraiment un transfert de technologie du milieu académique vers l'industrie, ou ce sont plutôt des développements indépendants ?

Force est d'admettre qu'un grand nombre de travaux de recherche n'ont aucun impact direct sur l'industrie. Qui peut prétendre que le fait qu'un hexapode peut avoir jusqu'à 40 solutions réelles à son problème géométrique direct est d'une valeur tangible pour les fabricants d'hexapodes ? Qui croit que le fait qu'un robot a des lieux de singularité de degré 42 est une information utile pour un fabricant ?

Il semble que le comportement typique des fabricants de robots parallèles est le suivant : en voyant le potentiel des robots parallèles (rapidité, rigidité, etc.), le fabricant choisit une architecture bien connue ou en invente une, relativement simple ou peu différente. Par exemple, il choisit l'hexapode standard sans trop modifier son design géométrique, qui par hasard n'a pas de singularités à l'intérieur de son espace de travail. Ensuite, le fabricant passe des années à améliorer le design mécanique et le système de commande de son produit.

Pourtant, il existe de belles histoires de transfert technologique dont il faut tirer des leçons. Dans le restant de cet article, nous décrirons d'abord brièvement les origines des robots parallèles. Ensuite, nous présenterons plusieurs exemples de transferts technologiques bien réussis. Enfin, nous essayerons de comprendre la bonne recette de la commercialisation.

II. BRÈVE HISTORIQUE DE LA ROBOTIQUE PARALLÈLE

Des travaux théoriques sur les octaèdres articulés datent de 1897 [1], mais la première véritable invention d'un robot parallèle à plus d'un *degré de liberté* (ddl) semble être un simulateur de mouvement pour l'industrie de divertissement, annoncé en 1928 [2]. Il y a de grandes chances que ce robot ne fut qu'un concept et que ni son problème géométrique direct, ni ses singularités n'ont été étudiés. D'ailleurs, il est très probable, que ce robot n'ait jamais été construit, à cause de la complexité de sa commande.

Dix ans plus tard, et peu après la naissance du terme « robot », le premier robot industriel a été inventé [3]. Et ce robot était parallèle. Le robot à trois bras, très similaire au robot Delta, était destiné à la peinture automatisée. Ce robot non plus n'a jamais été fabriqué.

Enfin, en 1947, le robot parallèle le plus connu et le plus répliqué a été inventé [4] – l'*hexapode octaédrique*, ou ce qu'on appelle injustement la *plate-forme de Stewart*. C'est l'écossais Dr. Eric Gough, ingénieur à Dunlop Rubber Co., en Angleterre, qui a construit le premier l'hexapode octaédrique afin de tester des pneus en appliquant des charges (Fig. 1).

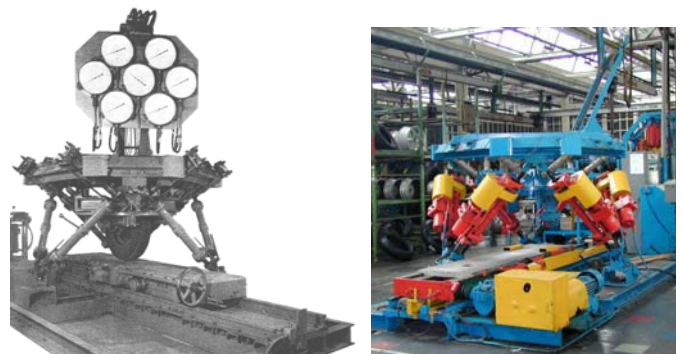


FIGURE 1 – LE PREMIER HEXAPODE OCTAÉDRIQUE À SA NAISSANCE EN 1957 ET PEU AVANT SON TRANSFERT DANS UN MUSÉE EN 2000 (DUNLOP TYRES)



FIGURE 2 – UN MAST (MTS SYSTEMS CORPORATION)

Mais l'hexapode octaédrique n'a pas été conçu à partir de zéro. À cette époque, tel que mentionné par le Dr. Gough dans son célèbre article [4], des systèmes avec six cylindres existaient. En effet, tel que confirmé par d'autres pionniers de la robotique parallèle, des hexapodes avec trois cylindres verticaux et trois cylindres horizontaux étaient si communs que nul ne connaissait leurs origines. Ces systèmes ont toujours été populaires car pour des petites variations, les ajustements des cylindres sont faciles à interpréter. Ils sont connus sous l'acronyme *MAST* (*Multi-Axis Simulation Shake Table*) et continuent d'être fabriqués par diverses compagnies (Fig. 2).

Avant l'ère de l'information, le premier inventeur n'était pas nécessairement celui qui rend son invention populaire. En 1965, le célèbre article de Stewart [5] a été publié. Dans cet article, M. Stewart décrit essentiellement le croquis d'une variante de l'hexapode et propose qu'elle soit utilisée comme simulateur de vol. Mais cette variante est très loin de la géométrie de l'octaèdre. Puisque cet article a eu un impact majeur sur le monde académique et déclenché la recherche sur la robotique parallèle, les hexapodes octaédriques sont souvent appelés *plate-forme de Stewart*. Mais ironiquement, ce n'est pas Stewart non plus qui est le pionnier de l'industrie des simulateurs de vol.

En 1962, le Franklin Institute Research Laboratories aux États-Unis demande à son employé, l'ingénieur Klaus Cappel (récemment décédé) d'améliorer rigidité d'un MAST avec sept cylindres. C'est en essayant d'éliminer la redondance, et sans connaître les travaux du Dr. Gough, que M. Cappel (re)invente l'hexapode octaédrique (Fig. 3).

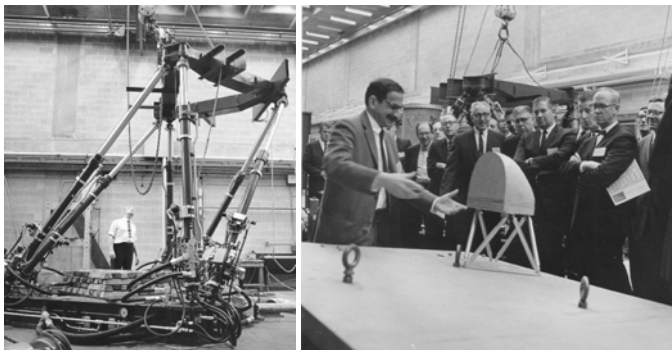


FIGURE 3 – LE PREMIER HÉXAPODE OCTAÉDRIQUE UTILISÉ DANS UN SIMULATEUR DE VOL, CONSTRUIT AUTOUR DE 1965 (KLAUS CAPPEL)

En 1967, M. Klaus obtient un brevet américain pour son invention et l'utilisation de son invention comme simulateur de mouvement [6]. Les fabricants de simulateurs de vols (Link et ensuite autres) ont immédiatement adopté la nouvelle architecture et pendant deux décennies se sont conformés au brevet. Ainsi, c'est l'ingénieur Klaus Cappel qui est le véritable pionnier qui a lancé l'industrie de la robotique parallèle.

Après une quinzaine d'années sans nouveaux développements, voilà qu'en 1983, le Pr. Kenneth Hunt publie un article qui propose une grande partie des architectures parallèles utilisées dans l'industrie aujourd'hui. Ce qui suit, c'est un boom exponentiel de projets de recherches en robotique parallèle. Parallèlement, plusieurs compagnies se sont lancées dans la production de robots parallèles.

III. EXEMPLE DE TRANSFERTS TECHNOLOGIQUES

Divers travaux de recherches ont eu impact direct sur l'industrie. Notamment, des travaux sur l'optimisation de design, sur la conception d'algorithmes d'étalonnage, et sur la modélisation des effets thermiques ont servi à l'industrie pour améliorer leurs produits. Mais les travaux les plus remarquables sont sans doute ceux qui portent sur la conception de nouvelles architectures parallèles. Dans ce qui suit, nous présentons quelques exemples de réussites.

A. Le robot Delta

Certainement, l'architecture parallèle la plus gagnante, outre l'hexapode, est celle du célèbre robot Delta [7]. C'est au début des années 1980 que le Pr. Reymond Clavel de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne invente et fait breveter l'idée d'utiliser trois parallélogrammes pour construire un robot dont la nacelle (la plate-forme mobile) ne se déplace que selon trois translations (Fig. 4). Une licence pour la construction de tels robots a été initialement octroyée à Demarex et à une autre compagnie, mais suite à des restructurations commerciales, d'autres compagnies ont eu le droit de construire des Deltas. Plus de 4000 robots Delta ont été vendus depuis.



FIGURE 4 – LE FLEXPICKER (ABB)



FIGURE 5 – LE FALCON, UN JOYSTICK POUR SEULEMENT 189 \$ (NOVINT)

Aujourd'hui, le brevet principal du robot Delta est expiré et une panoplie de compagnies en fabriquent des Deltas. ABB continue de produire son FlexPicker (Fig. 4), alors que Bosch (le nouveau propriétaire de Demarex) fabrique au moins deux autres modèles de robots de manutention. De plus, le Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique offre deux modèles de mico-robot Delta. L'entreprise française ISIS continue d'offrir le SurgiScope, un système porte-outils plafonnier pour les chirurgiens, et cherche un moyen de l'équilibrer statiquement. La compagnie américaine Delta Tau vient de lancer un robot Delta pour l'assemblage. Enfin, la compagnie suisse Force Dimension offre trois modèles d'interfaces haptiques haut de gamme alors que la compagnie américain Novint Technologies offre une interface haptique, le Falcon, à seulement 189 \$ (Fig. 5) !

Le principe du robot Delta est également utilisé par d'autres compagnies qui fabriquent des machines outils, notamment, Renault, Hitachi, Reichenbacher (Fig. 6), Fatronik, et INDEX-Werke. Enfin, la compagnie ABB vient de lancer un support reconfigurable (Fig. 7) qui consiste essentiellement en un hexapode dont chacune des trois paires de pattes changent de longueur simultanément.

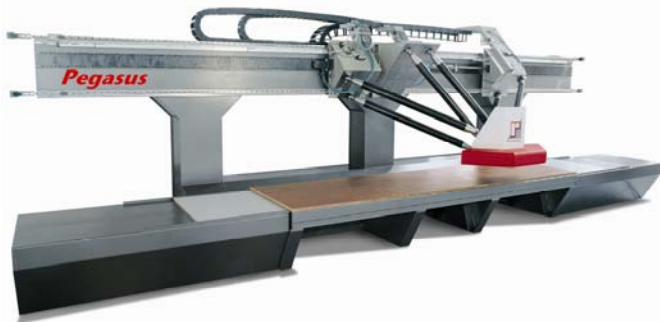


FIGURE 6 – PEGASUS, UNE MACHINE À BOIS (REICHENBACHER)



FIGURE 7 – FLEXPLP, UN SUPPORT RECONFIGURABLE (ABB)

B. Le robot Par4

Un nouveau robot parallèle pour la manutention vient d'être commercialisé et de causer un sérieux problème aux fabricants de robots Delta, ABB et Bosch. Depuis six ans, l'équipe du Dr. François Pierrot du LIRMM s'est associée avec Fatronik, un centre de recherche appliquée du Pays basque, pour concevoir des robots industriels. Ce bel exemple de collaboration, et plus particulièrement le travail de doctorat du Dr. Vincent Nabat, a conduit à l'invention de ce nouveau robot parallèle basé sur le principe des parallélogrammes, et surnommé le Par4. Ce qui caractérise le Par4 c'est l'utilisation d'une nacelle articulée et de quatre pattes identiques à celles du robot Delta.

Grâce à sa rapidité, le prototype du LIRMM et du Fatronik a convaincu Adept Tehnology, un des leaders mondiaux de la robotique industrielle, de commercialiser ce robot à l'échelle mondiale. Ce transfert technologique vient d'aboutir à la mise sur le marché du robot. Baptisé Quattro, ce robot est destiné à toutes les applications où l'on souhaite déplacer des objets, particulièrement dans les secteurs de l'agroalimentaire, de la santé et de la beauté, ainsi que de l'électronique (Fig. 8). Malgré le fait que Quattro est plus léger que le FlexPicker (91 kg), son espace de travail est plus grand, sa charge utile est deux fois plus élevée (2 kg), et son temps de cycle est 50 % plus court (pour les mêmes trajectoire et charge utile).

Adept Technology estime que le marché mondial de robots de transfert rapide est d'environ 1000 robots par année, ce qui annonce un bel avenir pour le Quattro.



FIGURE 8 – LE QUATTRO (ADEPT TECHNOLOGY)

C. Deux interfaces haptiques

Un autre exemple de transfert technologique se trouve au Canada, où le Pr. Tim Salcudean avait développé deux interfaces haptiques innovatrices et basées sur des architectures parallèles, une à trois ddl [9] et l'autre à 5 ddl [10]. Une collaboration avec la compagnie canadienne Quanser a permis de développer des versions commerciales de ces deux interfaces haptiques (Fig. 9). Leur grand avantage est l'ouverture de leurs contrôleurs.

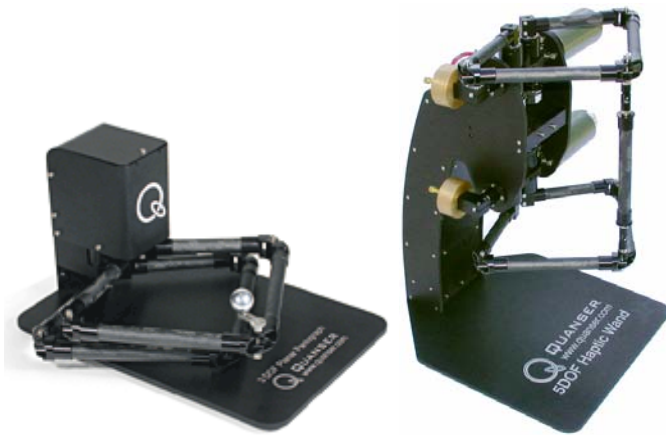


FIGURE 9 – INTERFACES HAPTIQUES À 3 ET À 5 DDL (QUANSER)

D. Un micro-manipulateur à 6 ddl

Au début des années 1990, le Pr. Lung-Wen Tsai a co-inventé une architecture parallèle à 6 ddl [11]. En 2002, la compagnie Adept Technology a lancé le NanoStage Six, un micro-positionneur basé sur l'invention du Pr. Tsai. Malheureusement, des restructurations ont forcé Adept à abandonner le produit qui a été repris par la suite par la compagnie allemande MICOS (Fig. 10). Le produit de MICOS, baptisé le SpaceFAB, est offert sous plusieurs modèles et semble être un produit vedette.



FIGURE 10 – SPACEFAB, UN MICRO-POSITIONNEUR (MICOS)

E. Autres produits commerciaux

Il est réjouissant de constater que de plus en plus d'entreprises font preuve de créativité en utilisant leurs propres architectures parallèles. À titre d'exemple, les chercheurs de Metrom et de Fatronik ont trouvé des architectures très originales pour des machines-outils (Figs. 11 et 12). La société japonaise Hephaist Seiko offre une table de positionnement à 3 ddl qui n'a pas de singularités (Fig. 13) et plusieurs autres robots parallèles. Enfin, la compagnie PRSCO (Parallel Robotic Systems Corporation) commercialise un hexapode dont l'espace en orientation est quasi illimité (Fig. 14).



FIGURE 11 – HSC, UNE MACHINE OUTIL À 5 AXES (METROM)



FIGURE 12 – HERMES, UNE MACHINE-OUTIL À 3 AXES (FATRONIK)

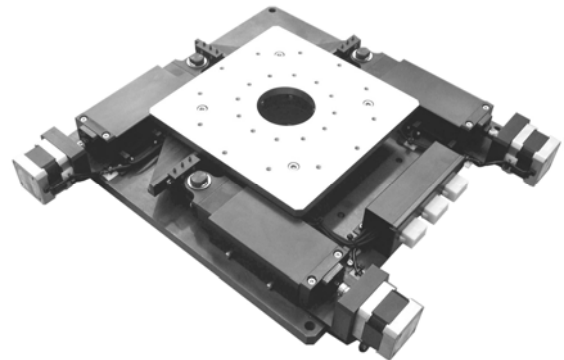


FIGURE 13 – NAF3, UNE TABLE DE POSITIONNEMENT (HEPHAIST SEIKO)



FIGURE 14 – LE ROTAPOD, UN HEXAPODE QUI PEUT TOURNER (PRSCO)



FIGURE 15 – UN ROBOT DE LA FAMILLE GANTRY-TAU (ABB)

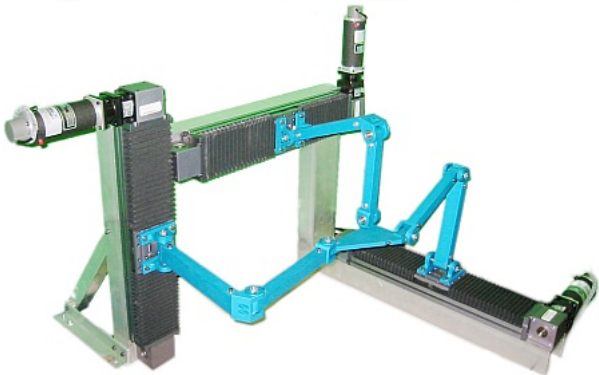


FIGURE 16 – LE TRIPTERON, UN ROBOT CARTÉSIEN (UNIVERSITÉ LAVAL)

IV. À SURVEILLER

Plusieurs chercheurs-inventeurs préparent en ce moment l'industrialisation de nouvelles architectures parallèles. Malgré la concurrence accrue dans le domaine des robots à 4 ddl avec des mouvements de type SCARA (tels que les robots Delta et Par4), plusieurs nouveaux prototypes sont en phase de pré-industrialisation. Notamment, les équipes du Dr. François Pierrot (le Dual 4) [12], du Pr. Jorge Angeles (SMG) [13], et du Pr. Vigen Arakelyan (PAMINSA) [14] ont toutes de telles inventions, très différentes les unes des autres. Les chercheurs du fabricant des robots ABB travaillent également sur plusieurs architectures à 3 ddl (Fig. 15).

La découverte d'une série de robots parallèles isotropes [15,16] a certes été une percée majeure dans le domaine académique (Fig. 16). Il est fort probable que l'industrie embrasse ce nouveau concept.

Les chercheurs de l'IRCCyN travaillent fort envers l'industrialisation de leur machine-outil Orthoglide [17]. Quant à l'équipe du Pr. Reymond Clavel, l'inventeur du robot Delta, leur machine-outil Hita-PDR semble être prête pour commercialisation.

Plusieurs autres exemples existent, mais probablement le concept le plus vendeur dont l'industrialisation attendue devrait être surveillée de près est l'utilisation de câbles pour construire un robot parallèle.

V. CONCLUSION

Après une étude du marché de la robotique parallèle, il semble que la plus grande contribution des chercheurs à l'industrie est l'invention de nouvelles architectures parallèles. La bonne recette semble être la collaboration étroite entre le monde académie et l'industrie et l'amélioration constante des prototypes.

REFERENCES

- [1] R. Bricard, "Mémoire sur la théorie de l'octaèdre articulé", *Journal de Mathématiques pures et appliquées*, Liouville, tome 3, pages 113–148, 1897.
- [2] J.E. Gwinnett, "Amusement device", Brevet américain No. 1 789 680, déposé le 1er octobre 1928, émis le 20 janvier 1931.
- [3] W.L.V. Pollard, "Position controlling apparatus", Brevet américain No. 2 286 571, déposé le 22 avril 1938, émis le 16 juin 1942.
- [4] V.E. Gough, et S.G. Whitehall, "Universal tyre test machine", *Proceedings of the FISITA Ninth International Technical Congress*, pages 117–137, 1962.
- [5] D. Stewart, "A platform with six degrees of freedom", *Proceedings of the IMechE*, Vol. 180, Pt. 1, No. 15, pages 371–385, 1965.
- [6] K.L. Cappel, "Motion simulator", Brevet américain No. 3 295 224, déposé le 7 décembre 1964, émis le 3 janvier 1967.
- [7] I.A. Bonev, "Delta parallel robot—The story of success", article en ligne : <http://www.parallemic.org/Reviews/Review002.html>, 2001.
- [8] V. Nabat, F. Pierrot, M.D.L.O. Rodriguez Mijangos, J.M. Azcoitia Arteché, R. Bueno Zabalo, O. Company, et K. Florentino Perez de Armentia, "High-speed parallel robot with four degrees of freedom", demande de brevet internationale No. WO/2006/087399, demandée le 18 décembre 2006.
- [9] S.E. Salcudean, L.J. Stocco, et I.C.N. Chau, "Three-degree-of-freedom parallel planar manipulator", Brevet américain No. 6 339 969, déposé le 31 mai 2000, émis le 22 janvier 2002.
- [10] L.J. Stocco et S.E. Salcudean, "Hybrid serial/parallel manipulator", Brevet américain No. 6 047 610, déposé le 18 avril 1997, émis le 11 avril 2000.
- [11] F. Tahmasebi et L.-W. Tsai, "Six-degree-of-freedom parallel 'minimaniipulator' with three inextensible limbs", Brevet américain No. 5 279 176, déposé le 20 juillet 1992, émis le 18 janvier 1994.
- [12] V. Nabat, F. Pierrot, M.D.L.O. Rodriguez Mijangos, J.M. Azcoitia Arteché, R. Bueno Zabalo, O. Company, et K. Florentino Perez de Armentia, "Unlimited-rotation parallel robot with four degrees of freedom", demande de brevet internationale No. WO/2006/106165, déposée le 4 avril 2006.
- [13] J. Angeles et A. Morozov, "Four-degree-of-freedom parallel manipulator for producing Schönflies motions", Brevet américain No. 7 127 962, déposé le 6 mai 2005, émis le 31 octobre 2006.
- [14] V. Arakelyan, P. Maurine, S. Briot, et E. Pion, "Parallel robot comprising means for setting in motion a mobile element split in two separate subassemblies", demande de brevet internationale No. WO/2006/021629, déposée le 30 mai 2005.
- [15] C.M. Gosselin et X. Kong, "Cartesian parallel manipulators", Brevet américain No. 7 449 005, déposé le 8 juillet 2002, émis le 4 mai 2004.
- [16] G. Gogu, *Structural synthesis of parallel robots: Part 1: Methodology*, Springer, 2007.
- [17] D. Chablat et P. Wenger, "Device for the movement and orientation of an object in space and use thereof in rapid machining", demande de brevet internationale No. WO/2004/071705, déposée le 4 février 2004.