

# Robot parallèle: état de l'art

J-P. Merlet

INRIA, 2004 Route des Lucioles, BP 93,  
06902 Sophia-Antipolis Cedex, France

**Résumé:** Les robots parallèles sont des chaînes cinématiques fermées qui ont connu un fort développement ces dernières années aussi bien du point de vue des applications que de la recherche. Nous faisons ici le point sur les problèmes à résoudre.

## 1 Définitions

*Un robot parallèle est un mécanisme en chaînes fermées où l'organe terminal est relié à la base par au moins deux chaînes indépendantes. Un robot pleinement parallèle est un mécanisme en chaînes fermées à  $n$  degrés de liberté où l'organe terminal est relié à la base par  $n$  chaînes indépendantes avec un actionneur élémentaire.*

Trois exemples de robots parallèles sont présentés en figure 1: il s'agit de la plate-forme de Gough [6], du robot Hexa [18] et d'un robot sphérique de Gosselin [5]. Dans la plate-forme

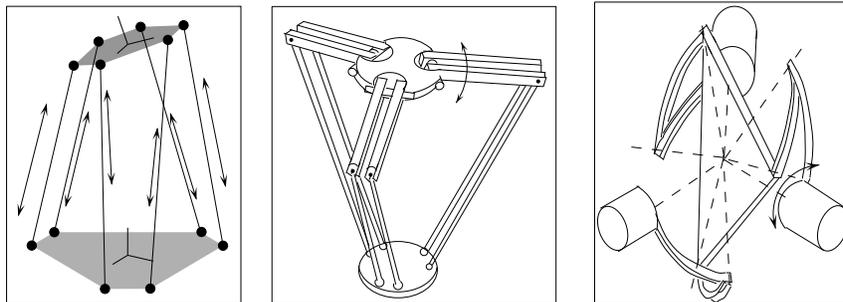


Figure 1: Robots parallèles: plate-forme de Gough, robot Hexa et poignet sphérique de Gosselin.

de Gough 6 segments terminés par des rotules connectent la base et l'organe terminal. Des vérins permettent de modifier la longueur des jambes, ce qui permet de contrôler la posture de l'organe terminal. Dans le robot Hexa la rotation des leviers supérieurs permet d'obtenir le même contrôle. Dans le robot de Gosselin les 3 chaînes sphériques permettent de commander les rotations de l'organe terminal autour du point commun aux axes des moteurs. De nombreuses autres architectures sont possibles<sup>1</sup>.

## 2 Avantages des robots parallèles

Nous allons les illustrer sur la plate-forme de Gough. Le premier de ces avantages est un rapport charge utile/masse du robot très élevé. En effet la charge est distribuée sur les 6 segments qui sont de plus seulement sollicités en compression. A titre d'exemple un des prototypes de l'INRIA a une masse de 35 kg pour une charge utile de 600 kg. Le deuxième avantage est la précision: contrairement aux architectures sérielles les erreurs de mesure sur les capteurs internes ont une influence faible sur l'erreur de positionnement de la plate-forme. Ainsi un

<sup>1</sup>des descriptifs sont disponibles à l'adresse:

<http://www.inria.fr:prisme/personnel/merlet/merlet.html>

des positionneurs que nous avons étudié pour l'European Synchrotron Radiation Facility a une précision absolue meilleure que 1 micromètre pour une charge utile de 500 kg.

Le troisième avantage est l'excellente rigidité due à la structure en treillis. Cette particularité fait des robots parallèles un élément clé pour le développement de nouvelles machine-outils comme l'atteste le succès remporté par la fraiseuse "Variax" de Gidding & Lewis qui est une plate-forme de Gough. Un autre facteur important est la possibilité d'avoir un équipage mobile particulièrement léger et, en conséquence, une excellente dynamique. Le translateur "Delta" [3] est ainsi le robot le plus rapide connu avec des accélérations de l'ordre de  $500 \text{ m/s}^2$ .

## 3 État de l'art

### 3.1 Modèle géométrique

On distingue deux types de modèles géométriques: inverse et directe. Le premier consiste en la détermination des variables articulaires (pour la plate-forme de Gough il s'agit de la longueur des jambes) à partir de la donnée de la posture de l'organe terminal. Cette opération est généralement triviale. Par contre le modèle géométrique direct (trouvez la posture de l'organe terminal pour des longueurs de jambes données) est très difficile. Cependant d'important progrès ont été fait ces dernières années. Par exemple on sait que si la plate-forme est triangulaire il y aura au plus 16 solutions que l'on sait calculer en résolvant un polynôme mono-variable de degré 16 [1]. Dans le cas le plus général on sait qu'il y aura au plus 40 solutions [16] mais il n'existe pas réellement de méthode pour calculer l'ensemble des solutions et l'on ne connaît pas de borne sur le nombre de solutions *réelles*. Des cas particuliers ont été résolus [2, 9, 13] mais il s'agit sans conteste d'un des plus beaux problèmes de cinématique de ces dernières années.

Dans la pratique on utilise des méthodes numériques itératives [20] sans garantie de convergence. Une autre approche intéressante est de rajouter, en sus des capteurs qui mesurent les longueurs des jambes, des capteurs additionnels qui permettront de résoudre simplement le problème [10]. Le nombre et le placement de ces capteurs est encore un problème largement ouvert.

### 3.2 Configuration singulières

Les configurations où les forces dans les jambes ne peuvent pas contrebalancer un torseur de force appliqué à la plate-forme sont qualifiées de configurations singulières. Il est aussi possible de montrer que dans ces configurations les forces dans les jambes peuvent tendre vers l'infini. Il est donc important de déterminer les lieux de ces singularités pour en vérifier la présence dans l'espace de travail du robot. Ces lieux sont caractérisés par l'annulation du déterminant de la matrice jacobienne inverse, qui est connue, mais dont l'expression du déterminant est complexe. Il est toutefois possible d'obtenir plus simplement les conditions de singularités avec une approche géométrique [12]. Mais il n'existe pas encore de méthode permettant de savoir si une singularité existe pour un espace de travail donné.

### 3.3 Espace de travail

L'espace de travail d'un robot parallèle à 6 degrés de liberté n'est pas découplé, c'est-à-dire que l'on ne peut pas représenter séparément ces possibilités en translation et en orientation. Il est toutefois possible de calculer efficacement l'espace en translation pour une orientation constante [4, 11]. On peut aussi tenter de calculer les orientations possibles pour une position donnée du centre de la plate-forme mais il se pose de gros problèmes de représentation [14]. La planification de trajectoire (déterminer comment rejoindre deux points de l'espace de travail par une trajectoire totalement incluse dans celui-ci) est un problème intéressant pour lequel on a simplement une amorce de solution [15].

### 3.4 Calibrage

La précision de positionnement est évidemment dépendante de la qualité du modèle qui est utilisé. Pour les robots précis il peut donc être intéressant de calibrer le robot, c'est-à-dire de déterminer quels sont les valeurs réelles de ces paramètres géométriques. Cette tâche est difficile: Wang [23] a montré que plus de 132 paramètres étaient nécessaires pour décrire complètement une géométrie. Pour les robots sériels la technique classique est de donner plusieurs consignes de posture au robot, de mesurer les postures réelles puis d'utiliser l'erreur pour estimer la valeur des paramètres géométriques. Cette technique fonctionne mal avec les robots parallèles car les erreurs sur les paramètres géométriques se répercutent faiblement sur la posture. Le calibrage est donc un problème très ouvert [22, 8].

### 3.5 Dynamique

La commande axe par axe d'un robot parallèle rapide est délicate de mise au point. Il est donc naturel de s'intéresser à la commande dynamique qui repose sur l'établissement de modèles. Ces modèles pour les chaînes fermées sont réputés difficile à obtenir (au moins dans une forme utilisable en temps réel) même si de nombreux chercheurs se sont intéressés à ce problème [17, 19, 21].

### 3.6 Synthèse et Conception optimale

En dépit du nombre élevé d'architectures possibles le problème de la synthèse est encore largement ouvert. Il s'agit de déterminer les architectures permettant d'obtenir un nombre et des types de degrés de liberté donné. Des approches reposant sur la théorie des groupes de déplacement ont été proposées et ont permis d'obtenir de nouvelles architectures [7] mais on est loin d'avoir les outils pour une exploration systématique. Après la synthèse du mécanisme se pose le problème de la synthèse géométrique: trouver les dimensions d'un manipulateur pour qu'il remplisse au mieux un cahier des charges donné. Très peu de travaux existent sur ce thème important qui constitue pourtant probablement le problème principal des futurs utilisateurs.

## References

- [1] Charentus S. et Renaud M. Calcul du modèle géométrique direct de la plate-forme de Stewart. Rapport de Recherche 89260, LAAS, Toulouse, France, Juillet 1989.
- [2] Chen N.X. et Song S-M. Direct position analysis of the 4-6 Stewart platform. *ASME J. of Mechanical Design*, 116:61–66, Mars 1994.
- [3] Clavel R. Robots parallèles, 1994. Techniques de l'Ingénieur, Traité Mesures et Contrôle.
- [4] Gosselin C. Stiffness mapping for parallel manipulators. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 6(3):377–382, Juin 1990.
- [5] Gosselin C. et Hamel J.-F. The Agile Eye: A high performance three-degree-of-freedom camera-orienting device. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 781–787, San Diego, 8-13 Mai 1994.
- [6] Gough V.E. Contribution to discussion of papers on research in automobile stability, control and tyre performance, 1956-1957. Proc. Auto Div. Inst. Mech. Eng.

- [7] Hervé J.M. Group mathematics and parallel link mechanisms. In *IMACS/SICE Int. Symp. on Robotics, Mechatronics, and Manufacturing Systems*, pages 459–464, Kobe, 16-20 Septembre 1992.
- [8] Innocenti C. Algorithms for kinematic calibration of fully-parallel manipulators. In J-P. Merlet B. Ravani, editor, *Computational Kinematics*, pages 241–250. Kluwer, 1995.
- [9] Innocenti C. et Parenti-Castelli V. Closed-form direct position analysis of a 5-5 parallel mechanism. *ASME J. of Mechanical Design*, 115(3):515–521, Septembre 1993.
- [10] Merlet J-P. Closed-form resolution of the direct kinematics of parallel manipulators using extra sensors data. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 200–204, Atlanta, 2-7 Mai 1993.
- [11] Merlet J-P. Geometrical determination of the workspace of a constrained parallel manipulator. In *ARK*, pages 326–329, Ferrare, 7-9 Septembre 1992.
- [12] Merlet J-P. Singular configurations of parallel manipulators and Grassmann geometry. *Int. J. of Robotics Research*, 8(5):45–56, Octobre 1989.
- [13] Merlet J-P. Direct kinematics and assembly modes of parallel manipulators. *Int. J. of Robotics Research*, 11(2):150–162, Avril 1992.
- [14] Merlet J-P. Détermination de l'espace de travail d'un robot parallèle pour une orientation constante. *Mechanism and Machine Theory*, 29(8):1099–1113, Novembre 1994.
- [15] Merlet J-P. Trajectory verification in the workspace for parallel manipulators. *Int. J. of Robotics Research*, 13(4):326–333, Août 1994.
- [16] Mourrain B. The 40 generic positions of a parallel robot. In Bronstein M., editor, *IS-SAC'93*, ACM press, pages 173–182, Kiev (Ukraine), Juillet 1993.
- [17] Pierrot F., Dauchez P., et Fournier A. Towards a fully-parallel 6 d.o.f. robot for high speed applications. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 1288–1293, Sacramento, 11-14 Avril 1991.
- [18] Pierrot F. et al. Manipulations robotiques à haute vitesse: une solution pleinement parallèle. *APII*, 26(1):3–14, 1992.
- [19] Reboulet C. et Berthomieu T. Dynamic model of a six degree of freedom parallel manipulator. In *ICAR*, pages 1153–1157, Pise, 19-22 Juin 1991.
- [20] Reboulet C. et Robert A. Hybrid control of a manipulator with an active compliant wrist. In *3rd ISRR*, pages 76–80, Gouvieux, France, 7-11 Octobre 1985.
- [21] Seguchi Y., Tanaka M., et al. Dynamic analysis of a truss-type flexible robot arm. *JSME Int. J.*, 33(2):183–190, 1990.
- [22] Wampler C.W., Hollerbach J.M., et Arai T. An implicit loop method for kinematic calibration and its application to closed-chain mechanisms. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 11(5):710–724, Octobre 1995.
- [23] Wang J. et Masory O. On the accuracy of a Stewart platform-part I: The effect of manufacturing tolerances. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 114–120, Atlanta, 2-6 Mai 1993.