

# Commande robuste/adaptative pour l'amélioration des performances des robots à structure parallèle de haute précision

## Contexte

La société SYMETRIE (<https://symetrie.fr/>) développe depuis 20 ans une gamme étendue d'hexapodes et autres systèmes à structure parallèle pour répondre aux besoins les plus spécifiques du marché. Divisé en deux catégories, son catalogue inclut des robots de positionnement de très haute précision d'une part, et des robots générateurs de mouvements dynamiques (simulateurs dynamiques) d'autre part. SYMETRIE œuvre à la fois pour les industriels et les laboratoires de Recherche, exportant plus de 60% de ses robots dans le monde entier. La diversité de leurs applications permet d'intégrer avec succès la technologie de l'hexapode, mature et reconnue, dans de nombreux environnements, même les plus extrêmes (milieu humide, propre, vide, etc.). Son département R&D a pour objectif d'améliorer en permanence ce qui fait le succès grandissant des robots à structure parallèle. Pour cela, les problématiques à traiter vont de la conception mécanique à la définition des lois de contrôle/commande, en passant par les stratégies d'essais, de métrologie et de qualification.

SYMETRIE propose la gamme d'hexapode la plus étendue du marché, ce qui implique de fortes disparités entre les modèles de ses robots. En outre, pour un unique produit, les variations du modèle en fonction de la charge utilisateur sont telles qu'une adaptation en temps réel devient primordiale pour garantir les performances et la stabilité des asservissements. Régulièrement, ces derniers doivent être révisés afin de garantir la stabilité des systèmes mis en œuvre chez les utilisateurs finaux. La variation de masse joue un rôle prépondérant, mais l'expérience prouve que les inerties et les changements de centre de masse ont également un rôle très significatif. De plus, il est courant de mettre en mouvement des charges variables tel que des fluides ou des mécanismes dynamiques embarqués. Enfin, les hexapodes peuvent être placés dans des environnements soumis à des efforts extérieurs (tels que des souffleries ou des bassins de carène) difficiles à modéliser.

Afin d'améliorer la précision en suivi de trajectoire de l'ensemble de sa gamme de robots à structure parallèle, pour une large fourchette de variation de charge ou de l'environnement dans lesquels ils s'insèrent, SYMETRIE doit développer de nouvelles solutions de commandes avancées. La marge de progression est considérable et doit permettre d'atteindre des niveaux de précision inégalés pour de nouvelles applications, (telles que chirurgicales ou nucléaires), où un haut niveau de sécurité et de stabilité dans les performances de suivi de trajectoire (en position, vitesse et/ou en



accélération) sont requis, dans un environnement temps-réel strict. Cette proposition de thèse CIFRE a pour objectif d'aider SYMETRIE à faire face à ce défi technique majeur pour renforcer sa position de leader mondial du domaine.

Le Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM, <http://www.lirmm.fr>) est une unité mixte de recherche, dépendant conjointement de l'Université Montpellier et du Centre National de la Recherche Scientifique. Ses activités de recherche positionnent pleinement le LIRMM au cœur des sciences et technologies de l'information, de la communication et des systèmes. L'équipe de recherche DEXTER (Conception et commande de robots pour la manipulation, concernée par cette thèse) est fondée autour de deux axes de recherche, à savoir (i) la robotique parallèle pour l'industrie, et (ii) la robotique médicale. En robotique parallèle, les activités de recherche sont consacrées aux robots parallèles rigides et aux robots à câbles de grandes dimensions et/ou transportant de lourdes charges. Ces activités concernent la modélisation, l'analyse et la synthèse de performances, la conception, la commande et les applications industrielles. Elles sont menées en collaboration avec des partenaires industriels et sont généralement validées par des expérimentations sur des démonstrateurs de robots parallèles. Ces activités de démonstration sont issues de recherches en cinématique et en optimisation et commande avancée. Le but visé est l'amélioration constante des performances (cadence, précision, performances, etc.) des systèmes et l'extension du panel des tâches 'robotisables' dans le cadre de l'industrie du futur. Avec une longue expérience dans la modélisation et la commande de robots à structure parallèle, le LIRMM est pleinement en mesure de fournir l'expertise et les moyens de recherche nécessaires à la résolution des problématiques de SYMETRIE pour lever les verrous techniques et technologiques.



## Objectifs industriels et académiques

Si la technologie de l'hexapode et les bases des robots à structure parallèle sont posées depuis les années 1949 [12], le pilotage de ces systèmes n'en reste pas moins complexe [1]. Les précisions requises par les applications industrielles et les activités de Recherche sont de plus en plus contraignantes et doivent maintenant faire appel à des techniques avancées de contrôle/commande [2], [8], [20]. Pour cela, une connaissance explicite du modèle dynamique est requise [7], [15], [17], [18]. Du point de vue commande, plusieurs approches ont été proposées dans la littérature pour l'asservissement des robots parallèles rigides. Entre autres nous pouvons citer : les approches classiques de type PID [28], les approches par modèle

inverse [11], les approches adaptatives [4], [5], [13], [16], [23], [24], les approches robustes [3], [10], [19], [21], les approches par mode glissant [6], les approches intelligentes [1], [9], etc.

**i** L'objectif de cette thèse consiste à développer de nouvelles solutions de commande avancées, compatibles avec une implémentation sur un noyau temps-réel, permettant d'améliorer les performances de suivi de trajectoires et de robustesse des hexapodes SYMÉTRIE. Les solutions proposées seront issues des techniques robustes et/ou adaptatives non linéaires.

Le travail à réaliser se fera en trois étapes clés. Dans la première, l'objectif est de modéliser avec beaucoup de rigueur quelques hexapodes de SYMÉTRIE. Les modèles développés seront de type géométrique, cinématique et dynamique. Il convient, pour ce dernier, de prendre en compte la dynamique des actionneurs du robot, de l'assemblage et des charges potentiellement embarquées sur sa plate-forme mobile (organe terminal). Selon l'application visée, positionnement de haute précision ou mise en mouvement dynamique, une analyse de sensibilité devra permettre d'établir les paramètres les plus pertinents des modèles. Par ailleurs, ils doivent également être identifiés expérimentalement, afin d'estimer leurs paramètres géométriques et dynamiques. Une phase de validation finale des modèles est nécessaire pour juger de leur qualité et du degré de leur pertinence pour la commande.

Dans un second temps, le doctorant se concentrera sur le développement de nouvelles approches de commande avancées. Vu les verrous scientifiques associés à cette thèse et les conditions dans lesquelles le robot va opérer (charge embarquée méconnue, paramètres temps-variant, imperfections dans le système à commander, ou encore les erreurs de modélisation), nous nous orienterons vers des approches de commande de type robuste non linéaire et/ou adaptatif. En effet ces commandes sont capables de compenser les éventuelles incertitudes paramétriques et garantir les performances souhaitées ( $\sim 1 \mu\text{m}$  pour les hexapodes positionneurs, et entre 10 et 100  $\mu\text{m}$  pour les hexapodes simulateurs de mouvement). Ces lois de commandes avancées permettront également d'optimiser la consommation d'énergie et la durée de vie des robots, en évitant de solliciter inutilement les actionneurs. En amont de leur implémentation sur les contrôleurs temps-réel des hexapodes de SYMÉTRIE, toutes les approches de commande proposées seront analysées théoriquement du point de vue de stabilité en boucle fermée en se basant sur la théorie de Lyapunov. Dès le début de la phase d'implémentation, SYMÉTRIE mettra à disposition un ou plusieurs hexapodes dédiés à la R&D pour valider les lois de commande proposées. Les expérimentations envisagées seront conduites dans différentes conditions opérationnelles, à savoir (i) cas nominal sans perturbations externes ni changement de paramètres, (ii) test de robustesse vis-à-vis des variations paramétriques telle que la charge et l'inertie, et (iii) test de rejet de perturbations externes. Les performances des lois de commande proposées seront quantifiées à l'aide de critères bien définis dépendant de la tâche à exécuter par le robot ainsi que les performances souhaitées.

La dernière étape consiste, dans la mesure du possible, de généraliser les approches de commande proposées sur une plus grande gamme d'architectures de robots parallèles, en fonction des hexapodes disponibles chez SYMETRIE. Cette étape permettra de démontrer l'efficacité et l'aspect générique des solutions de commande proposées indépendamment de l'architecture du robot à commander.

## Profil souhaité

Le doctorant recruté, curieux et motivé, doit être titulaire d'un diplôme de Master (ou d'ingénieur) en automatique/robotique ou dans un domaine connexe. Le candidat devra avoir des compétences en automatique (commande des systèmes dynamiques) et en robotique (modélisation et identification des robots). Il devra maîtriser un logiciel de calcul/simulation (Matlab/Simulink) et un langage de programmation (idéalement le C/C++). Des compétences en robotique parallèle seront appréciées.

## Candidature

Sont attendus du candidat :

- un CV détaillé,
- les relevés de notes (Ingénieur/Master),
- une lettre de motivation,
- les lettres de recommandations éventuelles,

à envoyer aux référents académique et industriel :

**Ahmed Chemori**  
[Ahmed.Chemori@lirmm.fr](mailto:Ahmed.Chemori@lirmm.fr)  
 LIRMM, 161 Rue Ada,  
 34095 Montpellier

**Johann Lamaury**  
[johann.lamaury@symetrie.fr](mailto:johann.lamaury@symetrie.fr)  
 SYMETRIE, 10 Allée Charles Babbage,  
 30000 Nîmes

## Références bibliographiques

- [1] H. Abdellatif and B. Heimann, "Advanced model-based control of a 6-DOF hexapod robot: A case study," IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 15, no. 2, pp. 269–279, 2010, doi: 10.1109/TMECH.2009.2024682.
- [2] M. Bennehar, "Some contributions to nonlinear adaptive control of PKMs: from design to real-time experiments", Ph.D. thesis, University of Montpellier, 2015.
- [3] M. Bennehar, A. Chemori, M. Bouri, L.F. Jenni and F. Pierrot, "A New RISE-based Adaptive Control of PKMs: Design, Stability Analysis and Experiments", International Journal of Control (Taylor & Francis), vol 91, issue 3, pp. 593–607, DOI: 10.1080/00207179.2017.1286536, 2018.
- [4] M. Bennehar, A.Chemori, F. Pierrot, "A New Revised Desired Compensation Adaptive Control for Enhanced Tracking: Application to RA-PKMs", Advanced Robotics, DOI: 10.1080/01691864.2016.1204248, 2016.
- [5] M. Bennehar, A.Chemori, F. Pierrot and V. Creuze, "Extended Model-Based Feedforward Compensation in L1 Adaptive Control for Mechanical Manipulators: Design and Experiments", Frontiers in Robotics and AI - Robotic Control Systems, vol 2, pp. 1-11, doi: 10.3389/frobt.2015.00032, 2015.

- [6] M. Bennehar, G. El-Ghazaly, A. Chemori, and F. Pierrot, "A novel adaptive terminal sliding mode control for parallel manipulators: Design and real-time experiments," in 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2017, pp. 6086–6092, 2017.
- [7] S. Briot, W. Khalil, "Dynamics of Parallel Robots: From Rigid Bodies to Flexible Elements", vol. 35. Springer, Berlin, 2015.
- [8] J. M. Escorcia-Hernandez, "Contribution to Nonlinear Robust Control of Parallel Kinematic Manipulators: Design and Experiments, PhD thesis, Polytechnic University of Tulancingo, 2020.
- [9] J. M. Escorcia-Hernandez, H. Aguilar-Sierra, O. Aguilar-Meja, A. Chemori and H. Arroyo-Nunez, "A New Adaptive RISE Feedforward Approach Based on Associative Memory Neural Networks for the Control of PKMs", Journal of Intelligent & Robotic Systems (Springer), Vol 100, pp. 827U847, doi: 10.1007/s10846-020-01242-9, 2020.
- [10] J. M. Escorcia-Hernandez, A. Chemori, H. Aguilar-Sierra and J. A. Monroy-Anieva, "A New Solution for Machining with RA-PKMs: Modelling, Control and Experiments", Mechanism and Machine Theory (Elsevier), vol 150, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.103864, 2020.
- [11] A. Ghobakhloo, M. Eghtesad, and M. Azadi, "Position control of a stewart-gough platform using inverse dynamics method with full dynamics," 9th IEEE Int. Work. Adv. Motion Control. 2006., pp. 50–55, 2006, doi: 10.1109/AMC.2006.1631631.
- [12] V. E. Gough, "Contribution to discussion of papers on research in automobile stability, control and tyre performance."
- [13] M. Honegger, R. Brega, and G. Schweiter, Application of a nonlinear adaptive controller to a 6 DOF parallel manipulator, vol. 2. 2000
- [14] T. Hufnagel and A. Muller, "A projection method for the elimination of contradicting decentralized control forces in redundantly actuated PKM," IEEE Transactions on Robotics, vol. 28, no. 3, pp. 723–728, 2012.
- [15] W. Khalil and S. Guegan, "Inverse and Direct Dynamic Modeling of Gough-Stewart Robots," IEEE Trans. Robot. Autom., vol. 20, no. 4, pp. 754–762, 2004.
- [16] H. Lin and J. E. McInroy, "Adaptive sinusoidal disturbance cancellation for precise pointing of Stewart platforms," IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol. 11, no. 2, pp. 267–272, 2003, doi: 10.1109/TCST.2003.809248.
- [17] M. Liu, C. Li, and C. Li, "Dynamics analysis of the Gough-Stewart platform manipulator," IEEE Trans. Robot. Autom., vol. 16, no. 1, pp. 94–98, 2000, doi: 10.1109/70.833196.
- [18] A. Mueller, "Robust modeling and control issues of parallel manipulators with actuation redundancy," Recent Advances in Robust Control: Theory and Applications in Robotics and Electromechanics, p. 207, 2011.
- [19] H. Nijmeijer, "Robust control of robots via linear estimated-state feedback," no. January, 2014, doi: 10.1109/9.328807.
- [20] H. Saied, "On control of parallel robots for high dynamic performances: From design to experiments", PhD thesis, University of Montpellier, 2019.
- [21] H. Saied, A. Chemori, M. Bouri, M. El Rafei, C. Francis and F. Pierrot, "A New Time-Varying Feedback RISE Control for 2nd-Order Nonlinear MIMO Systems: Theory and Experiments", International Journal of Control (Taylor & Francis), DOI: 10.1080/00207179.2019.1704063, 2019.
- [22] G. Sartori Natal, "Control of parallel robots: towards very high accelerations", PhD. thesis, University of Montpellier, 2012.
- [23] G. Sartori-Natal, A. Chemori and F. Pierrot, "Dual-Space Control of Extremely Fast Parallel Manipulators: Payload Changes and the 100G Experiment", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol 23, Issue 4, pp. 1520-1535, 2015.
- [24] G. Sartori Natal, A. Chemori and F. Pierrot, "Nonlinear Control of Parallel Manipulators for Very High Accelerations Without Velocity Measurement: Stability Analysis and Experiments on Par2 Parallel Manipulator", Robotica, DOI: 10.1017/S0263574714001246, pp. 1–28, 2014.
- [25] S. Staicu, "Dynamics of Parallel Robots", Springer, Berlin (2019).