

Sujet de thèse : Génération/Planification de mouvements corps-complet hautement dynamiques pour robot humanoïde par programmation quadratique et bouclage sur l'état complet du robot

Le DARPA Robotics Challenge [1-7] a mis sur le devant de la scène des robots qui se sont avérés capables de résoudre de manière semi-autonome et partiellement télé-opérée (semi-autonomie supervisée) des tâches requérant une dextérité et une versatilité proche de celle qu'on pourrait attendre d'un humain. Parmi les 3 robots ayant réalisé la totalité des huit tâches de la compétition (sur les 24 de la finale), le premier robot classé véritablement humanoïde a accompli l'ensemble de ces tâches en une durée totale de 50 minutes et 26 secondes (IHMC Robotics, classé 2ème, derrière le robot hybride humanoïde/à roues KAIST classé 1^{er}, qui a terminé en 44 minutes et 28 secondes). Un humain, en prenant son temps, aurait eu besoin d'environ 5 minutes pour réaliser la totalité du parcours. La génération de mouvements humanoïdes véritablement « dynamiques » (« rapides ») en ligne et en temps-réel reste encore à ce jour un problème mal formulé. Ce constat découle d'un autre : la cause principale de non-accomplissement des tâches par presque la totalité des robots humanoïdes de la compétition a été le problème de perte d'équilibre de ces robots, tous (sauf un) finissant par chuter à un point ou un autre du parcours et devenir inopérables avant l'accomplissement des huit tâches. De fait, l'état de l'art en planification et en génération de mouvements humanoïdes autres que la marche cyclique sur terrain parfaitement plat et horizontal reste pour le moment cantonné aux mouvements dit « quasi-statiques ».

Cette thèse aura pour objet d'étudier et de résoudre de manière robuste le problème de planification et de génération de mouvements corps-complet hautement dynamiques pour un robot humanoïde, i.e. résoudre simultanément et de manière robuste le problème de positionnement ou de repositionnement de contacts et l'équation Lagrangienne du robot en temps réel en vue de la réalisation des tâches en un minimum de temps avec un maximum de robustesse (compromis), sous contraintes des limites mécaniques et physiques du robot. Le niveau de dynamisme visé à atteindre sera égal à celui des approches par optimisation de trajectoire [8] où les mouvements sont générés hors-ligne et exécutés en boucle ouverte, mais tout en utilisant une approche temps-réel où la commande est calculée en ligne et exécutée en boucle fermée sur l'état complet du robot (état incluant la position de la base flottante dans l'espace et sa vitesse). On étudiera pour cela l'intégration 1) de méthodes récentes d'estimation de déformations des flexibilités des parties non rigides du robot (en général situées au niveau des chevilles ou des semelles, et dont le rôle d'absorber les impacts de la marche, flexibilités non prises en compte dans les modèles corps-rigides utilisés pour le calcul de la loi de commande), 2) les méthodes d'estimation d'état, de position de la base flottante, et du centre de masse de robots humanoïdes, et 3) les méthodes de stabilisation de robots humanoïdes [14-22], avec les méthodes de contrôle corps-complet par programmation quadratique [9-13]. La fermeture de la boucle se fait actuellement sur l'erreur de tâche ou sur les forces des capteurs de forces [10][13]. Le bouclage sur l'état complet du robot humanoïde (incluant l'information des encodeurs moteurs des articulations et IMU de la base flottante) devra aboutir à une génération de mouvement robuste aux erreurs de modèle, aux perturbations extérieures (forces de contact, collision), et à l'état de contact réel par rapport aux contacts planifiés.

Outre la non-robustesse due à l'absence de boucle fermée véritable, la limitation du dynamisme des mouvements dans les approches par programmation quadratique peut-être localisée en première analyse à deux endroits au niveau de la fonction coût du programme quadratique. Cette fonction coût consiste en une somme pondérée de carrés d'erreurs d'accélération de tâches à minimiser. L'erreur s'écrit par rapport à une accélération désirée (planifiée) qui est écrite automatiquement comme une accélération d'un système masse-ressort-amortisseur avec des gains (raideur, amortissement) fixés à la main de manière empirique. Ces gains caractérisent le niveau de dynamisme d'accomplissement des

tâches, et sont souvent choisis par l'opérateur de manière conservatrice pour éviter les mouvements « brusques » ou « agressifs » pouvant mener à la chute du robot, résultant au final en des mouvements « lents » et « prudents ». On cherchera à optimiser ces gains de manière automatique, ou à réformer entièrement ces approches par une utilisation de formulations autres que le système masse-ressort-amortisseur avec gains. Le second lieu de la limitation se situe au niveau d'une des tâches de cette somme pondérée, à savoir la tâche en centre de masse, qui est écrite de manière conservatrice également, et qu'on cherchera à reformuler entièrement ou à remplacer par d'autres tâches s'inspirant ou non des méthodes MPC (Model Predictive Control ou Preview Control) utilisées extensivement dans les générations de mouvement de marche cyclique [23-31].

L'implémentation des méthodes et des approches se feront sur les plateformes humanoïdes de l'équipe LARSEN du LORIA, à savoir dans un premier temps le robot iCub, et à terme sur la plateforme humanoïde de dernière génération dont l'équipe fera acquisition à l'horizon 2019 dans le cadre du CPER Cyber-Entreprise.

Ouverture internationale

Des collaborations internationales pourront être envisagées avec l'AIST au Japon, le MIT (équipe de Russ Tedrake), Carnegie Mellon University (équipe de Chris Atkeson), University of Edinburgh (équipe de Michael Mistry) le candidat pourra dans le cadre d'échange avec ces laboratoires porter et implémenter ses méthodes sur les plateformes humanoïdes HRP, ATLAS, Valkyrie (robot humanoïde de la NASA).

Compétences requises

Le candidat aura des compétences théoriques en robotique (modélisation, cinématique, dynamique, mécanique des corps poly-articulés, contrôle), en optimisation (quadratique, non-linéaire, contrôle optimal, optimisation de trajectoire), en automatique et théorie du contrôle (estimation d'état, observateurs, stabilisation par retour d'état, synthèse de lois de commande robuste). De l'expérience et une maîtrise du framework ROS (Robot Operating System), de l'environnement Linux, du développement en C++ et en Python sont également indispensables. Ces compétences techniques devront avoir été démontrées sur des projets d'envergure en master ou lors de projets étudiants.

Bibliographie :

DARPA Robotics Challenge

- [1] Bouyarmane, K., Vaillant, J., Keith, F., & Kheddar, A. (2012, November). Exploring humanoid robots locomotion capabilities in virtual disaster response scenarios. In *Humanoid Robots (Humanoids), 2012 12th IEEE-RAS International Conference on* (pp. 337-342). IEEE.
- [2] Johnson, M., Shrewsbury, B., Bertrand, S., Wu, T., Duran, D., Floyd, M., and Carff, J. (2015). Team IHMC's lessons learned from the darpa robotics challenge trials. *Journal of Field Robotics*, 32(2), 192-208.
- [3] Luo, J., Zhang, Y., Hauser, K., Park, H. A., Paldhe, M., Lee, C. G., ... & Kim, I. (2014, May). Robust ladder-climbing with a humanoid robot with application to the darpa robotics challenge. In *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on* (pp. 2792-2798). IEEE.
- [4] Koolen, T., Smith, J., Thomas, G., Bertrand, S., Carff, J., Mertins, N., ... & Van Egmond, J. (2013, October). Summary of team IHMC's virtual robotics challenge entry. In *Humanoid Robots (Humanoids), 2013 13th IEEE-RAS International Conference on* (pp. 307-314). IEEE.
- [5] Lim, J., Lee, I., Shim, I., Jung, H., Joe, H. M., Bae, H., ... & Joo, K. (2016). Robot System of DRC - HUBO+ and Control Strategy of Team KAIST in DARPA Robotics Challenge Finals. *Journal of Field Robotics*.
- [6] Atkeson, C. G., Babu, B. P. W., Banerjee, N., Berenson, D., Bove, C. P., Cui, X., ... & Gennert, M. (2016). What happened at the DARPA robotics challenge, and why. submitted to the DRC Finals Special Issue of the *Journal of Field Robotics*.
- [7] Feng, S., Xinjilefu, X., Atkeson, C. G., & Kim, J. (2015, November). Optimization based controller design and implementation for the Atlas robot in the DARPA Robotics Challenge Finals. In *Humanoid Robots (Humanoids), 2015 IEEE-RAS 15th International Conference on* (pp. 1028-1035). IEEE.

Optimisation de trajectoire de robot humanoïde

[8] Lengagne, S., Vaillant, J., Yoshida, E., & Kheddar, A. (2013). Generation of whole-body optimal dynamic multi-contact motions. *The International Journal of Robotics Research*, 32(9-10), 1104-1119.

Contrôle corps-complet par programmation quadratique

[9] Bouyarmane, K., & Kheddar, A. (2011, September). Using a multi-objective controller to synthesize simulated humanoid robot motion with changing contact configurations. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on* (pp. 4414-4419). IEEE.

[10] Vaillant, J., Kheddar, A., Audren, H., Keith, F., Brossette, S., Escande, A., Bouyarmane K ... & Yoshida, E. (2016). Multi-contact vertical ladder climbing with an HRP-2 humanoid. *Autonomous Robots*, 40(3), 561-580.

[11] Vaillant, J., Bouyarmane, K., & Kheddar, A. (2016). Multi-character physical and behavioral interactions controller. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*.

[12] Feng, S., Whitman, E., Xinjilefu, X., & Atkeson, C. G. (2015). Optimization - based Full Body Control for the DARPA Robotics Challenge. *Journal of Field Robotics*, 32(2), 293-312.

[13] Bouyarmane, K., Vaillant, J., Chappellet, K., & Kheddar, A. (2017). Multi-robot and task-space force control with quadratic programming.

Estimation d'état de robot humanoïde

[14] Benallegue, M., & Lamiroux, F. (2015). Estimation and stabilization of humanoid flexibility deformation using only inertial measurement units and contact information. *International Journal of Humanoid Robotics*, 12(03), 1550025.

[15] Carpentier, J., Benallegue, M., Mansard, N., & Laumond, J. P. (2016). Center-of-mass estimation for a polyarticulated system in contact— A spectral approach. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(4), 810-822.

[16] Bloesch, M., Hutter, M., Hoepflinger, M. A., Leutenegger, S., Gehring, C., Remy, C. D., & Siegwart, R. (2013). State estimation for legged robots-consistent fusion of leg kinematics and IMU. *Robotics*, 17, 17-24.

[17] Rotella, N., Bloesch, M., Righetti, L., & Schaal, S. (2014, September). State estimation for a humanoid robot. In *Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), 2014 IEEE/RSJ International Conference on* (pp. 952-958). IEEE.

[18] Stephens, B. J. (2011, May). State estimation for force-controlled humanoid balance using simple models in the presence of modeling error. In *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on* (pp. 3994-3999). IEEE.

[19] Benallegue, M., Mifsud, A., & Lamiroux, F. (2015, November). Fusion of force-torque sensors, inertial measurements units and proprioception for a humanoid kinematics-dynamics observation. In *Humanoid Robots (Humanoids), 2015 IEEE-RAS 15th International Conference on* (pp. 664-669). IEEE.

[20] Lowrey, K., Dao, J., & Todorov, E. (2016, November). Real-time state estimation with whole-body multi-contact dynamics: A modified UKF approach. In *Humanoid Robots (Humanoids), 2016 IEEE-RAS 16th International Conference on* (pp. 1225-1232). IEEE.

[21] Bloesch, M., Gehring, C., Fankhauser, P., Hutter, M., Hoepflinger, M. A., & Siegwart, R. (2013, November). State estimation for legged robots on unstable and slippery terrain. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on* (pp. 6058-6064). IEEE.

[22] Kuindersma, S., Deits, R., Fallon, M., Valenzuela, A., Dai, H., Permenter, F., ... & Tedrake, R. (2016). Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot. *Autonomous Robots*, 40(3), 429-455.

Model predictive control

[23] Hauser, K. (2014). Fast interpolation and time-optimization with contact. *The International Journal of Robotics Research*, 33(9), 1231-1250.

[24] Audren, Hervé, et al. "Model preview control in multi-contact motion-application to a humanoid robot." *Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), 2014 IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE, 2014.

[25] Herzog A, Rotella N, Schaal S and Righetti L (2015) Trajectory generation for multi-contact momentum control. In: *Humanoid Robots (Humanoids), 15h IEEE-RAS Int. Conf. on*.

[26] Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Harada, K., Yokoi, K., & Hirukawa, H. (2003, September). Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point. In *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference on* (Vol. 2, pp. 1620-1626). IEEE.

[27] Brousseau, Camille, et al. "A robust linear MPC approach to online generation of 3D biped walking motion." *Humanoid Robots (Humanoids), 2015 IEEE-RAS 15th International Conference on*. IEEE, 2015.

- [28] Carpentier, J., Tonneau, S., Naveau, M., Stasse, O., & Mansard, N. (2016, May). A versatile and efficient pattern generator for generalized legged locomotion. In *Robotics and Automation (ICRA), 2016 IEEE International Conference on* (pp. 3555-3561). IEEE.
- [29] Perrin, N., Lau, D., & Padois, V. (2015, September). Effective generation of dynamically balanced locomotion with multiple non-coplanar contacts. In *International Symposium on Robotics Research*.
- [30] Dai, H., & Tedrake, R. (2016, November). Planning robust walking motion on uneven terrain via convex optimization. In *Humanoid Robots (Humanoids), 2016 IEEE-RAS 16th International Conference on* (pp. 579-586). IEEE.
- [31] Caron, S., & Kheddar, A. (2016, November). Multi-contact walking pattern generation based on model preview control of 3D COM accelerations. In *Humanoid Robots (Humanoids), 2016 IEEE-RAS 16th International Conference on* (pp. 550-557). IEEE.