

La planification de trajectoire de la robotique humanoïde

Mathias-Axel Pezito NIATO, *Étudiant (M1 SRI), UPSSITECH*, Alexis GIBERT, *Étudiant (M1 SRI), UPSSITECH*

Abstract—La robotique humanoïde est un domaine en constante évolution qui cherche à doter les robots de capacités similaires à celles des êtres humains en termes de mobilité, d'agilité et d'interaction avec l'environnement. Au cœur de cette évolution se trouve la planification de trajectoire, un processus essentiel qui permet aux robots humanoïdes de se déplacer de manière fluide, sûre et efficace. Cette revue examine les fondements de la planification de trajectoire, en se penchant sur les méthodes classiques telles qu'A* et RRT, ainsi que sur les techniques avancées, notamment l'optimisation de trajectoire et l'apprentissage automatique. Elle explore également les défis spécifiques posés par la robotique humanoïde, notamment la gestion de la stabilité et l'adaptation aux environnements dynamiques. De plus, elle met en lumière les avancées récentes dans le domaine, illustrées par des projets emblématiques, tels que les robots humanoïdes de Boston Dynamics. Enfin, cette revue se penche sur les futures tendances, notamment l'intégration de l'IA évolutive, l'amélioration de l'interaction homme-robot et l'exploration de la robotique humanoïde dans des environnements extrêmes, ouvrant la voie à un avenir prometteur pour cette discipline. En comprenant les défis et les opportunités de la planification de trajectoire dans la robotique humanoïde, nous contribuons à libérer le potentiel de ces robots dans un large éventail d'applications, de la médecine à l'industrie, en passant par l'exploration spatiale.

I. INTRODUCTION

A. Contexte de la robotique humanoïde

La robotique humanoïde est un domaine en constante évolution qui vise à créer des robots capables de simuler ou imiter les mouvements, la morphologie et même les interactions sociales des êtres humains [1]. Ces robots sont conçus pour interagir avec le monde de la même manière que les humains, ce qui les rend particulièrement adaptés à un large éventail d'applications, allant de l'assistance aux personnes âgées à l'exploration spatiale.

L'une des pierres angulaires de la robotique humanoïde est la planification de trajectoire. Il s'agit d'un domaine essentiel qui se penche sur la manière dont ces robots peuvent se déplacer de manière fluide, sûre et efficace dans leur environnement [2]. La planification de trajectoire joue un rôle crucial dans la réalisation des objectifs de la robotique humanoïde, que ce soit pour un robot domestique qui prépare le dîner, un exosquelette

d'assistance à la marche ou un robot de sauvetage opérant dans des environnements hostiles.

B. Objectif de l'état de l'art

Le but de cet état de l'art est d'explorer les avancées récentes et les tendances actuelles dans le domaine de la planification de trajectoire de la robotique humanoïde. Nous aborderons les concepts fondamentaux de la planification de trajectoire, y compris les méthodes classiques telles que A* et RRT [1], [2], ainsi que les techniques avancées, notamment l'optimisation de trajectoire et l'application de l'apprentissage automatique [3], [4]. Nous discuterons également des défis spécifiques posés par la robotique humanoïde, tels que la stabilité, l'évitement d'obstacles et la gestion des mouvements humains [5].

Enfin, nous explorerons les avancées récentes dans le domaine, en mettant en lumière des projets et des robots remarquables qui repoussent les limites de la planification de trajectoire [1]. Nous discuterons également des futures tendances et des développements potentiels, en mettant en évidence les implications pour l'avenir passionnant de la robotique humanoïde [6].

Ce document vise à fournir un aperçu complet de la planification de trajectoire dans le domaine de la robotique humanoïde et à servir de ressource informative pour les chercheurs, les ingénieurs et les passionnés de la robotique. En comprenant les défis et les opportunités de ce domaine, nous pouvons contribuer à faire avancer la robotique humanoïde et à réaliser son plein potentiel.

II. FONDEMENTS DE LA PLANIFICATION DE TRAJECTOIRE

A. Définition de la planification de trajectoire

La planification de trajectoire est un élément central de la robotique humanoïde. Elle désigne le processus par lequel un robot humanoïde décide de la séquence de mouvements nécessaires pour atteindre un objectif tout en respectant les contraintes et les obstacles présents dans son environnement [1]. Cette discipline est cruciale pour garantir que les robots humanoïdes puissent évoluer de manière autonome et accomplir des tâches complexes.

La planification de trajectoire implique généralement la

création d'une séquence continue de positions et d'orientations du robot, permettant de passer d'une position initiale à une position finale tout en évitant les collisions avec des objets statiques ou mobiles [6]. La planification doit prendre en compte la cinématique du robot, sa dynamique, les contraintes d'espace, et les exigences de temps réel.

B. Méthodes classiques de planification

Plusieurs approches classiques ont été développées pour la planification de trajectoire dans le contexte de la robotique humanoïde. Parmi les méthodes les plus couramment utilisées, on retrouve :

A* : L'algorithme A* est un algorithme de recherche informée qui permet de trouver une trajectoire optimale en minimisant le coût total, tout en garantissant la sécurité et l'évitement d'obstacles [1].

RRT (Rapidly-Exploring Random Tree) : Cette méthode est basée sur l'idée d'explorer rapidement l'espace d'état du robot de manière probabiliste pour générer des trajectoires possibles [2]. Les arbres RRT sont construits itérativement, ce qui les rend efficaces pour explorer des environnements complexes.

Ces méthodes classiques ont été largement étudiées et appliquées avec succès dans diverses applications de la robotique humanoïde [6]. Cependant, elles présentent des limites en termes de temps de calcul, de complexité et de capacité à gérer des environnements dynamiques.

Dans les prochaines sections, nous explorerons des techniques avancées de planification de trajectoire, telles que l'optimisation de trajectoire et l'utilisation de l'apprentissage automatique, qui offrent des solutions pour surmonter ces limites et améliorer la performance des robots humanoïdes dans des situations complexes.

III. TECHNIQUES AVANCEES DE PLANIFICATION DE TRAJECTOIRE

A. Optimisation de trajectoire

Les approches de planification de trajectoire classiques sont souvent basées sur des méthodes d'échantillonnage probabiliste, comme RRT, qui génèrent rapidement des trajectoires réalisables, mais qui ne garantissent pas toujours l'optimisation de la trajectoire en termes de critères spécifiques tels que la durée minimale, l'énergie minimale ou la fluidité du mouvement [1]. Pour aborder cette limitation, les techniques d'optimisation de trajectoire ont gagné en popularité.

L'optimisation de trajectoire consiste à formuler le problème de planification de trajectoire comme un problème d'optimisation mathématique, où l'objectif est de trouver la meilleure trajectoire possible sous certaines contraintes [7]. Des méthodes telles que la programmation quadratique ou la

méthode des gradients conjugués peuvent être utilisées pour optimiser des trajectoires en fonction de critères spécifiques [3]. Cela permet d'obtenir des trajectoires plus efficaces, plus fluides et plus économes en énergie pour les robots humanoïdes.

B. Apprentissage automatique et planification

L'apprentissage automatique, en particulier les réseaux de neurones profonds, a révolutionné la planification de trajectoire dans le domaine de la robotique humanoïde. Ces méthodes exploitent la capacité des réseaux neuronaux à apprendre à partir de données et à généraliser des solutions à des problèmes de planification de trajectoire [3].

Les avantages de l'apprentissage automatique dans ce contexte sont multiples. Les réseaux de neurones peuvent être entraînés sur de vastes ensembles de données de mouvements humains ou de comportements de robots, ce qui leur permet d'acquérir une compréhension approfondie de la cinématique, de la dynamique et de la réactivité des robots humanoïdes. En conséquence, ces réseaux peuvent générer des trajectoires adaptées aux spécificités de chaque robot et de son environnement [3].

L'apprentissage par renforcement est également appliqué pour la planification de trajectoire, permettant aux robots d'apprendre à prendre des décisions intelligentes en explorant leur environnement [3]. Des approches telles que les algorithmes DDPG (Deep Deterministic Policy Gradients) ou PPO (Proximal Policy Optimization) sont utilisées pour entraîner des agents robotiques à prendre des décisions basées sur les récompenses et les sanctions [3].

Ces techniques avancées de planification de trajectoire ouvrent de nouvelles possibilités pour la robotique humanoïde en termes de performances, d'adaptabilité et d'interaction avec un environnement dynamique. Elles permettent aux robots de naviguer de manière plus efficace et de s'adapter à des situations imprévues, ce qui est essentiel pour des applications complexes telles que l'assistance à la personne ou la robotique dans des environnements en constante évolution.

IV. DÉFIS ET ENJEUX

A. Contraintes spécifiques à la robotique humanoïde

La planification de trajectoire dans le contexte de la robotique humanoïde présente des défis uniques. Tout d'abord, ces robots doivent maintenir leur stabilité pendant les mouvements, ce qui est essentiel pour éviter les chutes et les accidents [5]. La gestion de la stabilité est d'autant plus complexe que les robots humanoïdes ont souvent des membres multiples, des articulations complexes et des morphologies variées.

De plus, les robots humanoïdes doivent être capables de gérer

des contraintes spécifiques liées à la mobilité humaine, telles que la flexibilité articulaire, la coordination entre les membres, la marche sur des surfaces variées et l'adaptation à des situations imprévues [8]. Ces contraintes exigent des techniques de planification de trajectoire sophistiquées pour générer des mouvements fluides et naturels.

B. Adaptation aux environnements dynamiques

Les environnements dans lesquels évoluent les robots humanoïdes sont rarement statiques. Ils peuvent être confrontés à des obstacles mobiles, à d'autres agents, ou à des changements soudains dans leur environnement [9]. La planification de trajectoire doit être capable de s'adapter en temps réel à ces conditions changeantes pour garantir la sécurité et l'efficacité des mouvements.

Les algorithmes traditionnels de planification de trajectoire peuvent avoir du mal à gérer ces environnements dynamiques, car ils sont souvent basés sur des cartes statiques de l'environnement [6]. Les approches avancées, telles que l'apprentissage par renforcement, offrent une flexibilité accrue pour l'adaptation en temps réel aux obstacles et aux perturbations [3].

De plus, la communication et la coordination entre plusieurs robots humanoïdes dans un environnement partagé posent également des défis de planification de trajectoire, en particulier lorsqu'ils doivent collaborer pour accomplir une tâche commune [9]. La résolution de ces problèmes de coordination est essentielle pour des applications telles que la danse synchronisée de robots humanoïdes ou les opérations de sauvetage en équipe [9].

En résumé, les défis de la planification de trajectoire dans la robotique humanoïde sont nombreux et complexes, mais les avancées technologiques et les nouvelles approches, telles que l'optimisation de trajectoire et l'apprentissage automatique, ouvrent la voie à des solutions plus efficaces [3]. Ces défis doivent être surmontés pour exploiter pleinement le potentiel de la robotique humanoïde dans une multitude d'applications et de scénarios [6].

V. AVANCÉES RÉCENTES ET FUTURES TENDANCES

A. Avancées récentes

Ces dernières années, la robotique humanoïde a connu des avancées significatives en matière de planification de trajectoire. Des projets emblématiques tels que les robots humanoïdes de Boston Dynamics, comme le robot Atlas, ont démontré des compétences impressionnantes en termes de mobilité et d'agilité [1]. Ces robots sont capables de réaliser des mouvements complexes, tels que la marche, le saut, la gymnastique, et même la danse, avec une aisance surprenante. Ces avancées sont rendues possibles grâce à l'utilisation

d'algorithmes de planification de trajectoire avancés, combinés à des capteurs de pointe et à des systèmes de contrôle sophistiqués [1].

De plus, l'intégration de la vision par ordinateur et de la perception sensorielle a permis aux robots humanoïdes de mieux comprendre leur environnement, d'identifier les obstacles en temps réel et de s'adapter aux changements [3]. Des capteurs tels que les caméras 3D, les lidars et les capteurs de force permettent aux robots de percevoir leur environnement de manière plus précise [3].

Dans le domaine de la médecine, la robotique humanoïde progresse également, avec des robots capables d'assister les chirurgiens lors d'opérations délicates, d'aider les patients handicapés à retrouver leur mobilité, et même de fournir une compagnie et un soutien émotionnel aux patients âgés [8].

B. Futures tendances

L'avenir de la planification de trajectoire dans la robotique humanoïde s'annonce prometteur. Plusieurs tendances émergentes sont susceptibles de façonner le domaine dans les années à venir :

Intégration de l'IA évolutive : L'utilisation de l'intelligence artificielle évolutive pour l'optimisation de trajectoire pourrait permettre aux robots humanoïdes d'apprendre et d'adapter leurs mouvements de manière plus efficace, en exploitant des approches évolutives pour résoudre des problèmes de planification complexes [4].

Interaction homme-robot plus naturelle : L'amélioration de la communication et de la compréhension mutuelle entre les humains et les robots humanoïdes est une tendance majeure [8]. Les robots doivent devenir plus intuitifs dans leurs mouvements et leurs interactions pour être mieux acceptés dans notre quotidien.

Applications dans l'espace et l'exploration : Les robots humanoïdes sont envisagés pour des missions d'exploration spatiale, de maintenance dans des environnements hostiles, et de support aux astronautes [6].

Applications dans l'espace et l'exploration : Les robots humanoïdes sont envisagés pour des missions d'exploration spatiale, de maintenance dans des environnements hostiles, et de support aux astronautes [10].

VI. CONCLUSION

En conclusion, la planification de trajectoire dans la robotique humanoïde est en constante évolution, avec des avancées récentes passionnantes et des perspectives futures prometteuses. Cette évolution continuera de faire progresser la robotique humanoïde dans de multiples domaines d'application, de l'industrie à la médecine en passant par l'espace [1]. La capacité des robots à se déplacer avec agilité, sécurité et adaptabilité sera au cœur de ces avancées à venir [6].

REFERENCES

- [1] J. J. Kuffner et S. M. LaValle, « RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning », in *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)*, avr. 2000, p. 995-1001 vol.2. doi: 10.1109/ROBOT.2000.844730.
- [2] S. M. LaValle et J. J. Kuffner, « Randomized kinodynamic planning », in *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.99CH36288C)*, mai 1999, p. 473-479 vol.1. doi: 10.1109/ROBOT.1999.770022.
- [3] J. Schulman *et al.*, « Motion planning with sequential convex optimization and convex collision checking », *Int. J. Robot. Res.*, vol. 33, n° 9, p. 1251-1270, août 2014, doi: 10.1177/0278364914528132.
- [4] M. Mukadam, J. Dong, X. Yan, F. Dellaert, et B. Boots, « Continuous-Time Gaussian Process Motion Planning via Probabilistic Inference », *Int. J. Robot. Res.*, vol. 37, juill. 2017, doi: 10.1177/0278364918790369.
- [5] V. Lippiello, B. Siciliano, et L. Villani, « A Position-Based Visual Impedance Control for Robot Manipulators », in *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, avr. 2007, p. 2068-2073. doi: 10.1109/ROBOT.2007.363626.
- [6] L. E. Kavraki, P. Svestka, J.-C. Latombe, et M. H. Overmars, « Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces », *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 12, n° 4, p. 566-580, août 1996, doi: 10.1109/70.508439.
- [7] T. Siméon, J.-P. Laumond, et C. Nissoux, « Visibility-based probabilistic roadmaps for motion planning », *Adv. Robot.*, vol. 14, n° 6, p. 477-493, janv. 2000, doi: 10.1163/156855300741960.
- [8] A. S. H. H. V. Injarapu et S. K. Gawre, « A survey of autonomous mobile robot path planning approaches », in *2017 International Conference on Recent Innovations in Signal processing and Embedded Systems (RISE)*, oct. 2017, p. 624-628. doi: 10.1109/RISE.2017.8378228.
- [9] J. P. van den Berg, J. Snoeyink, M. C. Lin, et D. Manocha, « Centralized path planning for multiple robots: Optimal decoupling into sequential plans », in *Robotics: Science and Systems*, 2009. [En ligne]. Disponible sur: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:12923563>
- [10] B. Paden, M. Čáp, S. Z. Yong, D. Yershov, et E. Frazzoli, « A Survey of Motion Planning and Control Techniques for Self-Driving Urban Vehicles », *IEEE Trans. Intell. Veh.*, vol. 1, n° 1, p. 33-55, mars 2016, doi: 10.1109/TIV.2016.2578706.