Bスプラインを用いたヒューマノイド動作計画のための 軌道平滑化

原田 研介, 森澤 光晴, 三浦 郁奈子, 藤原 清司, 梶田 秀司

Path Smoothing for Humanoid Motion Planning using B-spline

Kensuke Harada, Mitsuharu Morisawa, Kanako Miura, Kiyoshi Fujiwara, and Shuuji Kajita (AIST)

Abstract— In this paper, we propose a method to convert a motion path of a humanoid robot generated by using the PRM planner to a smooth one. By using our method, we can generate the smooth path with avoiding the collision among the links and between a link and the environment. After generating a path by using the PRM, we first make the length of the path shorter by using the random sampling technique. Then, by changing the number of nodes of the B-spline interpolation function, we show that the smooth trajectory can be obtained. The effectiveness of the proposed method is confirmed by several numerical examples.

Key Words: Biped Gait, Motion Planning, Random Sampling, B-spline Interpolation

1. はじめに

本研究は、未知環境を自律的に移動するヒューマノイドロボットを実現することを目指し、全身動作計画の理論的枠組みを構成することを目的とする。そして、全身動作計画を実現するために、ランダムサンプリングに基づく手法に着目する [1, 2, 3, 4, 5, 6]。PRM や RRT 等のランダムサンプリングに基づく手法は、高次元の状態空間に対して適用可能であることと、現実的な時間内で解が求められるという二つの大きな利点を有している。

ヒューマノイドがバランスを維持できるかどうかは、主にロボットの加速度に依存する。ここで、ロボットの動作軌道に速度の不連続が存在すると、加速度にジャンプが生じて、最悪ロボットが転倒することになる。つまり、ヒューマノイドの動作軌道は他のロボットシステムにも増して滑らかであることが望ましい。しかしながら、従来まで提案されてきたランダムサンプリングに基づく手法はマイルストーンを直線軌道で結ぶもので、マイルストーンを通過するときに速度の不連続が生じていた。そこで、本研究ではスプライン関数を用いて動作軌道を滑らかにする手法を提案する。スプライン関数で動作軌道を滑らかにする場合、干渉回避とどのようにして両立させるかが問題になる。そこで、本研究では最初は少数のノードからスタートし、干渉が生じている区間にノードを順次増やしていく手法を提案する。これにより、干渉が生じない滑らかな軌道が最終的に得られることを示す。本論文で提案する手法は、軌道を2段階で滑らかにする。まず、第1段階としてランダムサンプリングにより軌道のショートカットを行い、軌道の距離を短くする。さらに、第2段階でスプライン補間を適用する。最後に提案する手法の有効性を数値例により示す。

2. 軌道平滑化

本論文では、ヒューマノイドの手先や足先が、指定された時間区間に環境上の指定された場所で接触を保ち、かつ不必要な干渉を避ける動作を計画する。 $\mathcal{C}_{free} \subset \mathcal{C}$

は、不必要な干渉を生じないロボットのコンフィグレーション q の集合を表す。さらに、本論文ではヒューマノイドの手先リンクや足先リンク、さらに重心の水平位置について拘束条件を課す。 $\mathcal{C}_{cons}(t) \subset \mathcal{C}$ は、時刻 t において拘束を満足するコンフィグレーションの集合を表す。本論文では、 q_{ini} からスタートして q_{fin} に到達するヒューマノイドのコンフィグレーション $q(t)$, ($t_0 \leq t \leq t_n$) を計画するが、この計画手法自体は論文 [1] に従う。それに対して、本論文では得られた動作軌道を干渉を避けつつ滑らかにすることを考える。

2.1 ショートカット

軌道平滑化の第一段階として、軌道をショートカットすることを考える。本節で説明する手法自体は、論文 [6] に示す手法に時間とともに変化する拘束条件を考慮することで、ヒューマノイドの全身動作計画に適用できるようにしたものである。この手法の概要を Fig.1 に示す。図において、 $q(t) \in \mathcal{C}_{free} \cap \mathcal{C}_{cons}(t)$, $t_i \leq t \leq t_j$ を仮定している。

Fig.1(a) は論文 [1] の手法に従って得られた軌道を示す。図に示すように、ランダム探索を用いて単に軌道を計画しただけでは、その軌道は多くの迂回を含む。そこで、この軌道をショートカットすることを考える。 a を $0 \leq a \leq 1$ を満足するランダムな実数とする。このとき、次の二つの時間を考える。

$$t_s = t_i + (t_j - t_i)a/2 \quad (1)$$

$$t_r = t_i + (t_j - t_i)(a + 1)/2 \quad (2)$$

次に、Fig.1(b) に示すように、 $q(t_s)$ と $q(t_r)$ の間をショートカットする。このとき、ショートカットするパスの決め方、ならびにパスの干渉チェックの方法は論文 [1] に従う。ここで、ショートカットするパスが干渉フリーと判断されると、このショートカットを採用する。

以上のステップを予め決められた回数だけ実行することで、迂回の少ない干渉フリーな軌道を導出する。

Fig.1 The method of shortcut

2.2 スプライン補間

前節に示す方法により得られた軌道は、迂回を減らしただけで速度の不連続を含んだ状態では、ヒューマノイドに適用する場合にロボットがバランスを維持できるとは限らない。そこで、軌道をスプライン補間することで速度の不連続を解消することを考える。本論文では、B-スプライン関数を用いてスプライン補間する。

提案する手法の概要を Fig.2 に示す。Fig.2(a) には、前節の手法で得られた迂回の少ない軌道を時間の関数として表している。次に、Fig.2(b) に示すように、この軌道の始点 $q(t_i)$ と終点 $q(t_j)$ の間を当分に分割する。図では特に、2分割する場合を示しており、 $q((t_i + t_j)/2)$ の点に3点目にノードを持つB-スプライン補間を考える。ここで、補間された軌道のうち、 $q(t_i)$ と $q((t_i + t_j)/2)$ の区間を S_1 、 $q((t_i + t_j)/2)$ と $q(t_j)$ の区間を S_2 とする。

次に、補間された軌道を S_1 から S_2 の順で干渉をチェックする。Fig.2(b) では S_1 で干渉が生じている。この場合、Fig.2(c) に示すように、 S_1 の干渉を検出した時点で、 $q((3t_i + t_j)/4)$ にノードを追加することで、 S_1 を S_{11} と S_{12} に分割する。そして分割後に、 S_2 の干渉をチェックする。

以上のように、補間された区間の干渉をチェックし、干渉を検出すると区間を分割する手法を、最終的に干渉フリーな軌道が得られるまで繰り返す。ここで、前節の手法で得られた軌道とコンフィグレーション障害物との間に少しでも余裕があれば、本手法を用いることで干渉フリーで滑らかな軌道が得られる。また、本節で提案するスプライン補間では、前節で得られた軌道において、コンフィグレーション障害物との距離が近い部分はノードが多く、遠い部分はノードが少ない。

3. 数値例

提案した手法の有効性を示すために、数値例を示す。数値例に用いたヒューマノイド HRP-2 は合計 30 自由度を有しており、身長 1.54[m]、体重 56[kg] である。ソフトウェアとしては、OpenHRP に動作計画のソフトウェアである MPK (Motion Planning Kit)[7] を接続したものを用いた。

Table 1 には、CPU が Xeon 2.4[GHz] の PC を用い

Fig.2 The method of spline interpolation

Fig.3 Motion of robot passing through gate

た場合の提案手法の計算時間を示している。ショートカットは前章で説明した手法を 150 回繰り返した結果、約 30 秒かかった。また、スプライン補間には約 1 分かかっている。

Fig.3, 4, 5 には提案する手法で生成されたロボットの動作を示している。Fig.3 はゲートを潜る動作、Fig.4 は横方向に障害物を避ける動作を表し、Fig.5 は狭い場所を通過する動作を表している。

Fig.6 は Fig.3 に示す動作の関節角の時間軌道を表す。

Table 1 Calculation time of the proposed method

Trial #	1	2	3	4	5
Shortcut [s]	25	41	29	39	41
Spline Interpolation [s]	54	53	52	53	54

Fig.4 Motion of robot avoiding the obstacle in the side **Fig.5** Motion of robot passing through narrow space

ここで、図では特に胴体のピッチ軸回りの関節回転角を示している。Fig.6(a)はショートカットの結果得られた関節軌道を表し、この軌道を等分した結果をFig.6(b)に示す。そして、Fig.6(b)に示した状態からスプライン補間の補間点を増やしていき、最終的に干渉フリーな軌道が得られたときの、関節時間軌道をFig.6(c)に示す。

Fig.6に示す図だと、スプライン補間をしても軌道の形自体は余り変わっていないように見えるが、次に、Fig.7にZMPの水平面内の空間軌道を表す。Fig.7(a)はショートカットを適用した後のZMP軌道を表しているが、動作軌道に速度の不連続性を含むために、ZMP軌道が乱れている。それに対して、Fig.7(b)にはスプライン補間を適用した後の軌道を示す。この図により、スプライン補間の効果が示されている。

Fig.6 Result of spline interpolation **Fig.7** ZMP trajectory of the planned motion

4. おわりに

本論文では、ランダムサンプリングを用いたヒューマノイドの全身動作計画に適用可能な動作軌道の平滑化法を示した。提案する手法においては、まず軌道のショートカットを行い、その後にスプライン補間を行う。従来のスプライン補間とは異なり、干渉回避と両立させるために、最初は少数の補間点からスタートし、干渉を生じている区間に適応的に補間点を増やしていく手法を提案した。ここで、特にスプライン補間はヒュー

マノイド以外の様々なシステムの動作計画に適用可能である。最後に、提案する手法の有効性を数値例により示した。

参考文献

- [1] K. Harada et al., Motion Planning for Walking Pattern Generation of Humanoid Robots, *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on IROS*, 2007.
- [2] S. Sanada, E. Yoshida, and K. Yokoi, Passing under Obstacles with Humanoid Robots, *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on IROS*, 2007.
- [3] K. Hauser, T. Bretl, J.-C. Latombe, Non-gaited Humanoid Locomotion Planning, *Proc. of IEEE Int. Conf. of Humanoids*, 2005
- [4] J. Kuffner, K. Nishiwaki, S. Kagami, M. Inaba, and H. Inoue, Motion Planning for Humanoid Robots Under Obstacle and Dynamic Balance Constraints, *Proc. IEEE ICRA*, pp. 692-698 (ICRA 2001)
- [5] 大島, 小林, RRT を用いたヒューマノイドロボットの全身動作のための平滑化アルゴリズム, 第8回システムインテグレーション部門講演会予稿集, 2007.
- [6] G. Sanchez and J.C. Latombe, A Single-Query Bi-Directional Probabilistic Roadmap Planner with Lazy Collision Checking, *ISRR*, 2001.
- [7] <http://robotics.stanford.edu/mitul/mpk/>