

環境の複雑さに応じた身体表現の自動適合による 人型ロボットの効率的運動計画

Automatic Conformation of Body Representation Based on the Complexity of Environments Toward Efficient Motion Planning of Humanoid Robots

○ 清水 康志 (阪大) 杉原 知道 (阪大)

Yasushi Shimizu, Osaka University, yasushi.shimizu@ams.eng.osaka-u.ac.jp

Tomomichi Sugihara, Osaka University

An efficient method to plan a series of support transitions of a humanoid robot in rather complex life environments is proposed. It utilizes a simple navigation along a guiding path in a sparse area and a random-sampling approach in a dense area. The difficulty is that it is not trivial how to judge the space is sparse or dense. The method first find an approximated path of a variable-volume box, which measures the complexity of the environment and simultaneously find a partial collision-free space. The representation of the robot body automatically conforms to the complexity of the environment.

Key Words: Motion Planning, Humanoid Robot, Collision avoidance, Complexity

1. はじめに

人型ロボットは、人と類似した外観と大自由度を活かした生活支援ツールとして期待される。これを実現するために、生活環境程度に複雑な環境でタスク遂行するための運動を計画する技術が必要である。

運動計画とは、地面との接触を維持した上での障害物回避やロボット自身の身体部位同士の衝突を回避するための幾何学的拘束条件、滑りや転倒を回避するための力学的拘束条件の下で、数十個の関節の変位と速度がなす大次元空間内で軌道計画する問題である。地面との接触状態は不連続に変化し、接触状態に応じて転倒しないような加速度の許容範囲が決まる。このように、幾何学的拘束条件と力学的拘束条件は互いに複雑に入り組んでおり、条件を満足する数十次元の軌道を求めるのは容易ではない。

比較的簡単な環境ならば、有限個の典型運動の組み合わせ [1] や、歩幅や足上げ高さなど少数のパラメータによる運動表現 [2, 3]、単純形状による身体表現 [4] などによって探索空間の次元を落とし、効率よく軌道を求める方法が提案されている。

一方、複雑な環境においてはこれらのような直感的方法を用いることはほぼ不可能であり、ランダムサンプリング [5, 6] により軌道を伸ばしていく技術 [7, 8, 9, 10] が有効であることが知られているものの、要求される計算量は大きい。環境の複雑さに応じて探索空間の次元を適合させることが現実的な方法といえる。しかし、現在どのような次元でロボットの身体を表現することが適切であるかを判断する方法は自明でない。

本研究では、まず体積可変な単純形状によって身体を表現し、これを用いて環境の複雑さの判断と軌道探索を同時に行う方法を提案する。単純形状が全身を包含する十分な体積を持つ部分経路においては、その中を通るような軌道を単純な方法により求める。また、単純形状が小さい部分経路においては、足や腕を变形し障害物回避する軌道をランダムサンプリングにより生成する。

2. 体積可変形状による環境の複雑さ判断と軌道探索

壁や障害物の形状・場所の情報が与えられ、環境中の物体は動かず変形しないといった条件の下で運動計画を行う。体積可変な

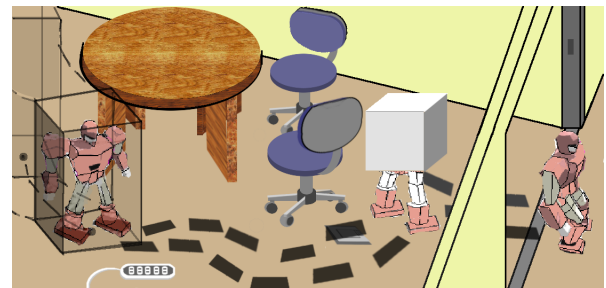


Fig.1 image of the proposed method

直方体を用いて、与えられた初期位置・目標位置を接続する軌道探索を行う。これにより、単にロボットが包含されるかどうかを判断する指標とするだけでなく、得られた直方体の経路を軌道計画時に体幹配置軌道の基準とすることで障害物回避を保証し、身体表現を単純化することを可能とする。また、身体表現を単純化した場合には計画がうまくいかない場合は、干渉回避を保証するまで詳細な計画を行う身体部位を拡大することで、効率的に多様な運動を計画する。

ここで、体積と長方体の中心位置や水平面内での回転角を含むベクトルを r とする。体積可変な直方体による軌道探索では、RRT-Connect[6] を用いて式(1)に示すように乱数により生成することで、初期位置と目標位置を結ぶ経路を効率的に探索する。乱数により生成した直方体を r_{rand} 、その直方体の最近傍に存在する直方体を r_{near} としたとき、 r_{near} から r_{rand} へ距離 ϵ だけ伸ばした直方体 r_{new} を生成する。図7に生成方法の概念図を示す。また、この際に利用する距離として式(2)を用い、直方体の中心位置のユークリッドノルムとする。

$$r_{new} = r_{near} + \epsilon \frac{r_{rand} - r_{near}}{d(r_{rand} - r_{near})} \quad (1)$$

$$d(r_i, r_j) = \sqrt{(r_i, r_j)_x^2 + (r_i, r_j)_y^2 + (r_i, r_j)_z^2} \quad (2)$$

ϵ は $10^{-2} \sim 10^{-1}$ 程度で任意に設定できる定数で、直方体間の距

離である．これにより生成した直方体 r_{new} を追加していき，初期位置と目標位置を結ぶ直方体による経路を出力する．

ロボットが包含される直方体の体積を基準として，環境の複雑さを評価する．これにより，干渉回避を保証する部分経路と干渉回避が困難である部分経路を切り分ける．概経路が十分大きい部分であれば干渉回避を保証しうするため，身体表現を単純化して体幹・両足軌道の計画を行う．すなわち，概経路内での移動であれば，自己干渉回避や可動域内での移動を保証するような両足・体幹軌道を計画し，上半身やその他の関節角を一定値として逆運動学を解くことで，概経路の中心軌道に沿ってロボットの体幹が移動するような運動を計画する．これにより，十分に大きな部分経路について身体表現を単純化して効率的に運動を計画する．逆運動学を解く際の誤差などにより干渉回避を保証しない場合また，概経路が狭くロボットが包含されないと判断された場合は，計画時に考慮する関節角の数を増やしていき，脚や腕の変形を伴った詳細な身体表現を与えることで，干渉回避を保証する運動を与える．

以上により，身体表現を単純化した計画方法と，身体表現を詳細化しランダムサンプリングにより計画する方法の2つの方法を使い分けることで，運動の多様性と計画の計算効率をバランスさせた効率的な運動計画を行う．

3. 環境の複雑さに応じた2段階の支持状態遷移計画

3.1 運動計画

人型ロボットの運動計画では，一般に以下の条件を満たす計画を行う．ロボットの関節角と体幹位置・姿勢を含むコンフィグレーション q とすると，初期コンフィグレーション q_{init} と目標コンフィグレーション q_{goal} を結び，かつ以下の条件を満たす軌道 $q(t)$, ($T_i \leq t \leq T_g$) を計画する．提案方法では，離散的な支持状態遷移計画と連続軌道計画の2段階からなる計画を行う．このうち，指示状態遷移計画を扱う．離散的な支持状態遷移計画は，隣接する支持状態において一方の足の接地状態が同じであるような両足が接地した状態を計画する．すなわち，初期位置から目標位置までの運動において，どのような接地状態を与えるかを計画する．また，これにより力学的拘束条件が定まる．

以下の条件を満たすように，離散的な支持状態 $[q_1, q_2, \dots, q_N]$ を計画する．

- 1 $q_1 = q_{\text{init}}$ $q_N = q_{\text{goal}}$
- 2 $q_i \in C_{\text{contact}}, 1 \leq i \leq N$
- 3 $q_i, q_{i+1}, (1 \leq i \leq N-1)$ において両足のうち一方が同じ位置，姿勢にある

以上を満たすような支持状態を計画する．2は常に環境と接触しながら移動する条件であり， C_{contact} はロボットが環境と接触し，かつその他の身体部位が自己干渉や環境との干渉を起こさないコンフィグレーションの集合である．3は跳躍を行わないための条件である．

3.2 身体表現を単純化した計画

概経路が十分に広い空間内においては，身体表現を単純化した支持状態遷移計画を行う．ここでは身体を表現するために，体幹配置と両足配置を計画する．それ以外の部位に一定の値を与え，逆運動学を解くことで姿勢を与える．両足・体幹配置の計画には，

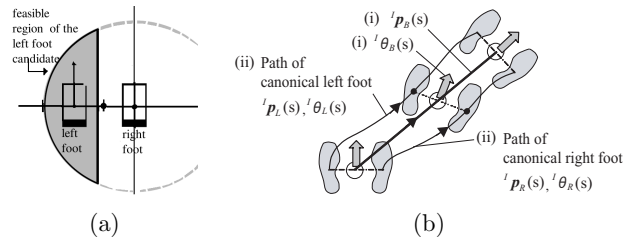


Fig.2 (a) feasible reason of the left foot and (b) Path of canonical stance with respect to linear interpolated torso position and orientation[11]

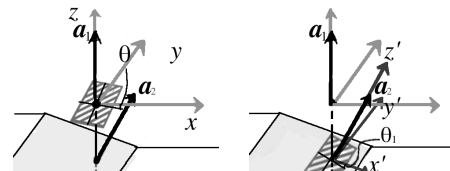


Fig.3 translated a foot into one contact with ground

Kobayashi[11]らの方法を用いる．この方法は，計画する踏み出し足の候補を限定し，踏み出し足が干渉しない領域内，かつ可動範囲内にある領域（許容踏み出し足領域：図2(a)内の候補のみを考える．また，体幹の初期位置と目標位置，経路点から計画時の配置候補となる補完曲線（図2により足配置同士，体幹配置同士を結ぶ曲線：図2(b)仮想レール）を作成する．

$$\phi_{B,k}(s) = (1-s)\phi_B[k] + s\phi_B^* \quad (3)$$

上式の媒介変数 s ($0 \leq s \leq 1$) を最大とする足配置を計画する．ここで， $\phi_B[k]$ は現在の体幹配置， ϕ_B^* は目標体幹配置，足配置列である．この媒介変数により定義される曲線上と踏み出し足領域との共有部分で最大の一步を踏み出すように計画を行う．

以上により両足の干渉なく，可動域を守った目標位置へ到達可能な両足配置を与える．しかし，この方法は環境との干渉回避を保証するものではないため，干渉回避を保証する必要と，仮想レールのための目標体幹軌道を与える必要がある．

直方体による概経路の中心軌道を体幹軌道として与え，上記の方法により両足・体幹配置を計画することで，干渉回避を保証する直方体の中心軌道近傍での運動を計画する．概経路内を移動するため，身体表現を詳細に考慮することなく障害物回避しうる．ただし，床面との接触状態を保証しないため，図3に示すように， z 軸方向での最近傍点への平行移動と，地面と足裏の接触状態を与える最小回転角における足裏の姿勢変換を行う． z 軸方向での平行移動させて地面との接触状態を与えることで，概経路内での移動を維持する．この時の両足・体幹配置を拘束条件として与え，目標位置との誤差最小化問題をとくことで姿勢を与える[12]．逆運動学を解く際の誤差により干渉回避が完全には保証されず，身体表現を詳細化することで干渉回避を保証するような軌道の修正が必要な場合がある．

3.3 身体表現を詳細化した計画

身体表現を単純化した際の計画により拘束条件を満たさない場合や，概経路が十分に広くない部分経路内での計画では，身体表現を詳細化して拘束条件を詳細に考える必要がある．しかし，全探索では計算が爆発するため，ランダムサンプリングを用いて

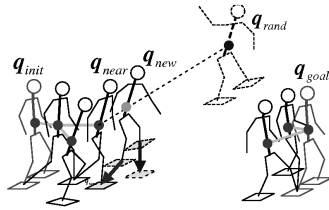


Fig.4 motion planning using RRT-Connect

効率的な運動計画を行う Nishi ら [10] の方法を用いる．これは RRT-Connect[6] による計画方法であり，体幹位置・姿勢と各関節角の値を含むコンフィグレーション q を図 4 に示すようにランダムサンプリングにより生成する．ランダムに生成した姿勢 q_{rand} とその姿勢の最近傍にある姿勢 q_{near} から，式 (4) により生成した関節角変位などを含む姿勢 q_{new} を， q_{near} に接続することで，効率的に計画する．

1. ランダムに生成したコンフィグレーション q_{rand} の最近傍ノード q_{near} を探索する．
2. 式 (4) により距離 ϵ 伸ばしたコンフィグレーション q_{new} を生成する．

$$q_{new} = q_{near} + \epsilon \frac{q_{rand} - q_{near}}{\|q_{rand} - q_{near}\|} \quad (4)$$

ここで，コンフィグレーション間の距離を以下の式 (5) により定義する．

$$d(q_i, q_j) = \max_{1 \leq k \leq N_l} \|p_k(q_i) - p_k(q_j)\| \quad (5)$$

ここで N_l はロボットのリンク数， $p_k(q)$ は q における k 番目のリンクの位置を表す．

3. q_{near} と q_{new} から地面と接触する両足の目標位置・姿勢を求め，その拘束を満たすようにコンフィグレーションを修正する．両足の目標位置・姿勢を以下のように定める．
 - － 一方の足は q_{near} と共通の位置・姿勢
 - － 他方の足は q_{new} の位置と最近傍にある環境上の位置 p_c ， q_{new} の足の姿勢から最小回転角で地面と面接触する姿勢．
4. 両足裏が環境と接触するコンフィグレーションを最近傍ノードの子ノードとして追加する．

3 における地面との接触のための変換は，以下の過程により行われる．足と床との最近傍点対を探索し，各点での面との法線方向のベクトルを v_1 ， v_2 とする．このとき，床面でのベクトル法線 v_1 に一致するように v_2 を変換する (v_1 ， v_2')．以上により図 5 に示すように，足の 4 隅の点が環境と接触する支持状態を得る．

また，Nishi らはランダムサンプリングによる鋸歯状の経路を NURBS による平滑化と Dijkstra 法や移動平均を用いた軌道の間伐を行うことで，無駄の少ない効率的な運動を出力する．身体表現を詳細化した部位に対して上記を用いることで，効率的に運動の多様性を増加させる．運動の多様性を重視し，適用できる環境が増えたものの計算時間も徒然に増えてしまう．実際，今回想定した環境における移動で 10^5 程度かかる場合もある．3. 節に示した単純化した計画では，適した環境では 10^0 s 以下の計算時間であるため，これらを用いることで効率的な運動を計画する．



Fig.5 contact enforcement

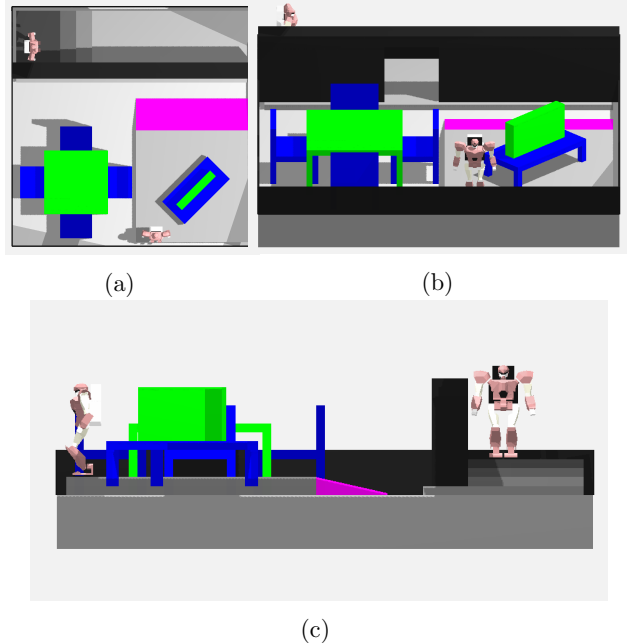


Fig.6 simulation environment

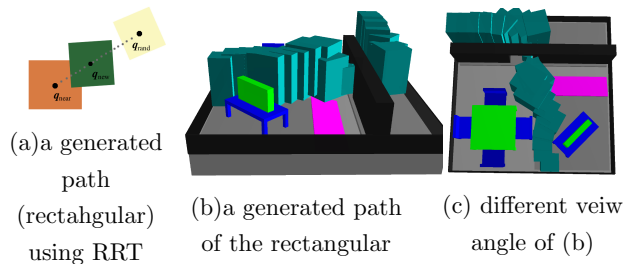


Fig.7 search and evaluate a path and the environment

4. シミュレーション

設定した実行環境を図 6 に示す．机と，複数の椅子，TV 台と TV，ゲートと段差，階段，スロープなどを有する環境であり，生活環境を想定した．初期位置と目標位置，概経路にロボットが包含される限界の大きさ，RRT-Connect により最近傍ノードからランダムに生成したノード方向に伸ばす距離 ϵ を与えた後，プログラムを実行した．

この時に得られた概経路の一例を図 7 に示す．71 回実行した結果，実行時間は $1.5 \pm 0.94 \times 10^{-1}$ s であった．この概経路により環境を判断し，その後の計画方法を切り替えた．図 7 に示す概経路により環境を判断し，その後の計画方法を切り替えた．また，この概経路を計画するための計算時間は， 2.0×10^{-1} であった．

得られた概経路においてロボットが包含される部分経路を考え，仮想レールを用いた計画を行った結果が図 4 であり，この時の実行時間は 9.0×10^{-2} s であった．また，概経路の狭い部分経路において平滑化と間伐を含むランダムサンプリングによる計画を

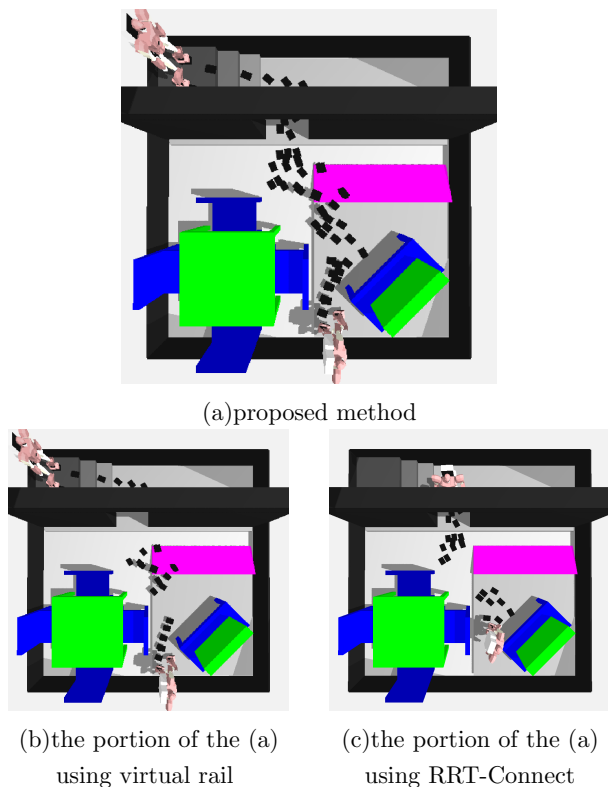


Fig.8 planned motion by proposed method

図 8 に示す．ランダムサンプリングによる計画時間は，17.098s であった．以上のように，概経路を用いた身体表現の適合により計画したとき，全体として 17.388s の計算時間であり，この時の計画結果を図 4 に示す．

仮想レールによる計画では，ゲートをくぐり抜ける動作が出力されず，また，障害物回避を保証しないため，想定した環境中では計画が不可能であった．また，Nishi らの用いたランダムサンプリング単体で計画を行ったときは，計画ができるものの，計算時間が $10^3 \sim 10^4$ 以上であり提案方法が計算時間において優れていると言える．しかし，仮想レールの計画部分において踵部分が階段と干渉していることがあった．これは，環境に接地するように移動させる際に，外経路外にロボットが出てしまわず足裏中心が環境と接地するように， z 軸方向に平行移動するという処理を行ったためである．概経路内での移動を保証するために z 軸方向の平行移動は妥当であるが，干渉回避を保証するために，その平行移動後の位置近傍で探索を行い，干渉回避を保証するような姿勢にすることが考えられる．また，身体表現の粒度が粗いため，より段階的に身体表現を詳細化することで，計算効率と運動の多様性のバランスをより良くする効率的な計画を行う予定である．

5. 結言

本稿では，直方体による概経路により身体表現を単純化する部分経路を判断し，概経路の中心軌道に沿うように目標体幹配置を指定することで，干渉回避と計画時に考慮する関節角を少なくした．また，干渉回避を保証しない部分経路においては身体表現を詳細化し，ランダムサンプリングにより効率的に計画した．上記により複雑さの評価とそれに応じた身体表現の適合を行う計画を提案し，計画全体として，単純化した計画単体よりも多様な運

動を出力し，ランダムサンプリングによる計画よりも計算効率が少ない，計算効率と運動の多様性のバランスがとれた計画であることを示した．

今後の予定としては，身体表現の詳細化の粒度を上げることにより，段階的に身体表現を詳細化するさらなる効率化を行う．また，今回扱っていない動的安定性を考慮することで実現可能な運動を計画した際に，効率化を行うことができることを確認する．

謝辞 本研究は，科学研究費補助金若手研究 (A) (課題番号：22680018) の支援を受けた．

文献

- [1] Z.Shiller, K.Yamane, and Y.Nakamura. Planning Motion Patterns for Human Figures Using a Multi-layered Grid and the Dynamics Filter. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1–8, 2001.
- [2] J.Chestnutt, J.Kuffner, K.Nishiwaki, and S.Kagami. Planning Biped Navigation Strategies in Complex Environments. In *Proceedings of 2003 IEEE International Conference on Humanoid Robotics*, 2003.
- [3] E.Yoshida, I.Belousov, C.Esteves, and J.P.Laumond. Humanoid Motion Planning for Dynamic Tasks. In *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 1–6, 2005.
- [4] J.Kuffner, K.Nishiwaki, S.Kagami, M.Inaba, and H.Inoue. Footstep Planning Among Obstacles for Biped Robots. In *Proceedings 2001 IEEE RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 500–505, 2001.
- [5] L.E. Kavraki, P. Svestka, J.C. Latombe, and M. Overmars. Probabilistic Roadmaps for Path Planning in High-Dimensional Configuration Spaces. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 12, No. 4, pp. 566–580, 1996.
- [6] J.Kuffner and S.LaValle. RRT-Connect: An Efficient Approach to Single-Query Path Planning. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, No. 1, pp. 995–1001, 2000.
- [7] J.Kuffner. Goal-Directed Navigation for Animated Characters Using Real-Time Path Planning. In *Proceedings of Captch'98: Workshop on Modeling and Motion Capture Techniques for Virtual Environments*, pp. 171–186, 1998.
- [8] K.Hauser, T.Bretl, K.Harada, and J.Latombe. Using motion primitives in probabilistic sample-based planning for humanoid robots. In *In proceedings of the Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics*, 2006.
- [9] H.Sanada, E.Yoshida, and K.Yokoi. Passing Under Obstacles with Humanoid Robots. In *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4028–4034, 2007.
- [10] T.Nishi and T.Sugihara. Thinning and Smoothing of Randomly-sampled Support Transitions Toward Practical Motion Planning for Humanoid Robots. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1702–1707, 2010.
- [11] H.Kobayashi and T.Sugihara. Self-consistent Automatic Navigation of COM and Feet for Realtime Humanoid Robot Steering. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Robots and Systems*, pp. 3525–3530, 2009.
- [12] T.Sugihara. Solvability-unconcerned Inverse Kinematics based on Lvenberg-Marquardt method with Robust Damping. In *Proceedings IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 555–560, 2009.