

# Footstep Planning Among Obstacles for Humanoid Robots

著者	AYAZ YASAR
号	54
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第4188号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/61798">http://hdl.handle.net/10097/61798</a>

	やさる あやず
氏 名	Yasar Ayaz
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成21年9月9日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 航空宇宙工学専攻
学位論文題目	Footstep Planning Among Obstacles for Humanoid Robots (ヒューマノイドロボットのための障害物環境下での足跡計画)
指 導 教 員	東北大学准教授 近野 敦
論文審査委員	主査 東北大学教授 内山 勝 東北大学教授 小菅 一弘 東北大学教授 新井 史人 東北大学准教授 近野 敦

## 論文内容要旨

近年, 移動ロボットの研究分野では, 人間型ロボットまたは「ヒューマノイドロボット」の研究が盛んに行われている。ヒューマノイドロボットは, その形状が人間を模倣していることから, 人間が活動している実環境に適応しやすい。例えば, 家やオフィスなど人間の生活空間を移動する際には, 一般に広く知られる車輪型移動ロボットよりもヒューマノイドロボットのほうが, 障害物をまたぐ, または, 乗り越えることが可能なため, その活動能力ははるかに大きい。しかし, 現在知られる移動ロボットのための動作もしくは軌道生成アルゴリズムは車輪型ロボットを想定したものが多く, それらを直接, 人間型ロボットに適用することは不可能である。そのため, 人間型ロボットが有する能力を最大限に発揮することができない。

そこで, これまで, 歩くという能力を活かしたヒューマノイドロボットの歩行軌道生成を行うためにいくつかの手法が開発されている。先行研究では, 局所的に最適な軌道経路を探索する手法が主であった[6]。同手法では, ロボットの現在地の近傍にある障害物のみを考慮し, 次に歩行する方向を決定する。しかし, 最も近傍の障害物のみを考慮して経路を決定する場合, 全体的な障害物の散在状況を考慮していないため, 最終的には, ロボットが目標値までの経路を計画することができず, 局所最適解で停滞してしまう可能性がある[1]。この問題を解決するために, Kuffnerらはゲーム理論を用い, 環境内すべての障害物を考慮し, 可能な歩行軌道を生成する手法を考案した[1]。この手法では, ロボットの現在地から複数の方向に1ステップ前進するための動作セットを予め設定し, 各ステップ毎に次のステップを同様に複数作成することにより, 現在地から目標値までの軌道を網羅的に探索する探索木を生成する。しかし, 同手法では, 探索木を作成する際, 足を任意に前進させるので, 障害物と衝突してしまうステップも軌道候補内に混在する。そのため, 膨大な干渉チェックが必要となってしまう。また, 衝突する可能性のあるステップを探索木から除外していく作業が必要となる。最後に, 得られた探索木から最短・最適経路を選ぶことになるが, 網羅的に作成された探索木の規模は非常に大きいため, 計算量が非常に多くなってしまうという問題もある。同手法のもう一つの問題点は, ステップを決定する際に, ロボットが障害物を跨ぐ能力を考慮することなく, 網羅的にステップの設定を行うことである。ステップの選定では, 障害物に衝突しないように, つまり“回避する”動作を使用しており, “跨ぐ”という動作は軌道計画内に考慮されていない。いくつかの研究では, ロボットの身体能力を活かして大きな一つの障害物を跨ぐ研究がある[3, 4]。しかし, これらの研究は環境全体に散在する障害物を跨ぐという動作も含みながら, 最適な軌道経路計画を行うという研究はこれまで成されたことがない。そこで, 本研究では, ヒューマノイドロボットが有する“跨ぐ”という能力も考慮し, 環境に散在する障害物を回避しながら, 目的地に達する最適な軌道経路を計画する手法を提案した。

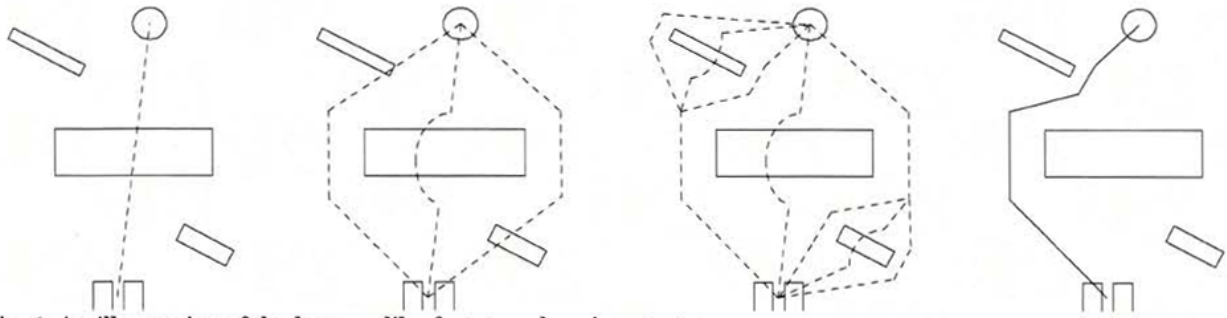
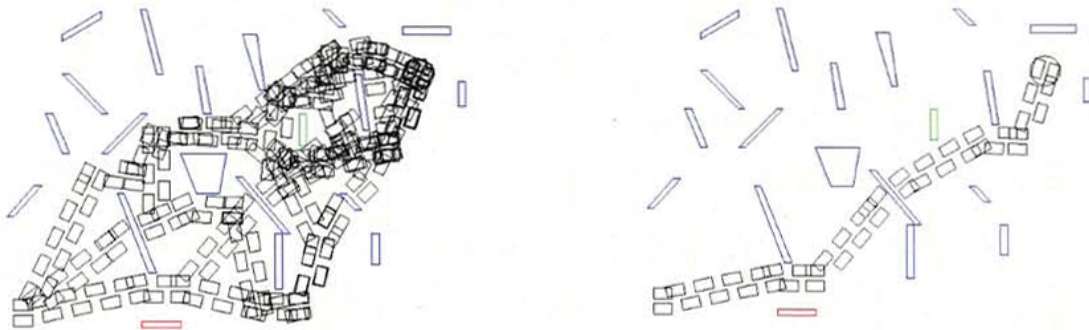


Fig. 1. An illustration of the human-like footstep planning strategy.

nodes= 336 , paths= 11

nodes= 336 , paths= 11 , processing time=444 ms



(a) Various paths for reaching the destination.

(b) Best path identified via exhaustive search.

Fig. 2. Statically stable footstep planning simulation results for HRP-2 Humanoid Robot.

人間は、周囲に障害物がある場合、歩行可能な軌道を探す際、まず初めに、現在地と目的地との間に障害物があるかどうかを見極める。二つの地点を結ぶ直線状に障害物がない場合は、二点間を最短距離で結ぶ直線上を移動することで、目的地に到達することが可能である。一方、現在地と目的地の一直線上に障害物があった場合は、「右から回避する」、「左から回避する」、または、「障害物を跨ぐ」という三通りの回避方法が考えられる。人間の場合、この三通りの回避方法に関する経路を比較し、最も簡単もしくは最短な経路を選択する。もしこの三通りの経路上において、さらに他の障害物と干渉する可能性がある場合は、同様にその障害物に対しても上記三つの方法の中から一つを選択し経路を計画することになる。本研究では、このように人間が歩行する際に、自然に行っている軌道計画をロボットに適用することを目指す。図1に計画法の概略を示す。まず初めに、ロボットが現在地と目的地の間に障害物があるかどうかを二次元干渉チェックを用いて確認する(図1(a))。障害物があると判断した場合、障害物のコーナーの近くを経由する右側と左側からこの障害物を回避する経路を考慮する(図1(b))。さらに、障害物の大きさによっては、跨いで障害物を乗り越える経路も作成する。回避する最初の基本経路内に、さらに障害物が存在する場合には、その障害物に関しても同様に迂回するもしくは跨ぐ経路を計画する(図1(c))。最後に全検索を行い、候補として決定された経路の中から、最適な(安全かつ最短な)経路を選択する(図1(d))。本研究では、ステップの困難さによって重みづけを行い、困難さの指標として、経路全体のステップの総合重みを比較することで安全な経路を選択している。図2にHRP-2ヒューマノイドロボット[2]のモデルを用いたシミュレーション結果を示す。同図では、前述した軌道計画法を用いて導出したヒューマノイドロボットの足跡の軌跡を示す。同結果は「跨ぐ」という動作も考慮した軌道計画が可能となったことを示す。同手法では、ゲーム理論を用いた手法[1]より探索木が小さく、高速な経路決定が可能であった。

図2に示される結果では、ロボット全体の静的なバランスを基準としたZMP (Zero-Moment Point) が常に重心の真下になるように計画し、ロボット全体の安定性を図った。しかし、実際には、どんなに低速でロボット動かしてもロボットのダイナミクスが安定性に影響を与える。特に障害物を跨ぐ動作では、重心が足裏の接触面の縁になるため、最も不安定で、転倒等の恐れのある危険な動作である。そのため、ヒューマノイドロボットHRP2では、Stabilizerと言われる安定化制御が予め組み込まれている。Stabilizerは実時間のロボット動作時において、安定性を保持するために、軌道計画で与えられた足軌跡を補完する役割を担う。そのため、上記で提案した軌道計画法で決定された軌道がStabilizerの安定基準を満たさない場合、実際のステップ軌道が目標ステップ軌道から少々ずれる恐れがある。しかし、

Stabilizer のアルゴリズムは一般ユーザーが変更することはできない。そこで、ここでは、Stabilizer の補完状態も考慮して、うまく障害物を跨げるために、ロボットの歩行経路計画を行う際に補正を行うようなアルゴリズムを開発した。また、これまでの研究では、ロボットの目前におかれた直方体のような単純な状況でしか、障害物を跨ぐことができない。しかし、多数の障害物がある状況で歩行軌道生成を行う際には、いろいろな方向、姿勢から障害物を跨ぐ必要がある(図 6)。本研究では、上記の歩行軌道計画法に加え、いろいろな方向から障害物を跨ぐことが可能なアルゴリズムを開発した。

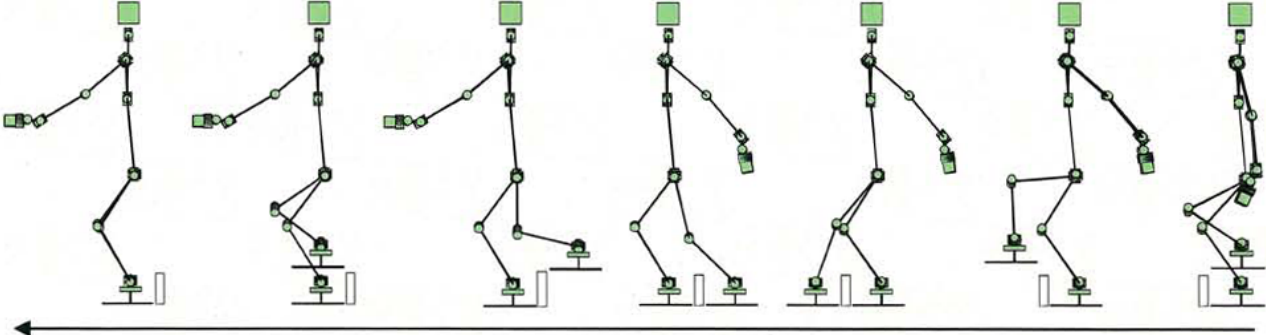


Fig. 3. Basic strategy for stepping over obstacles.

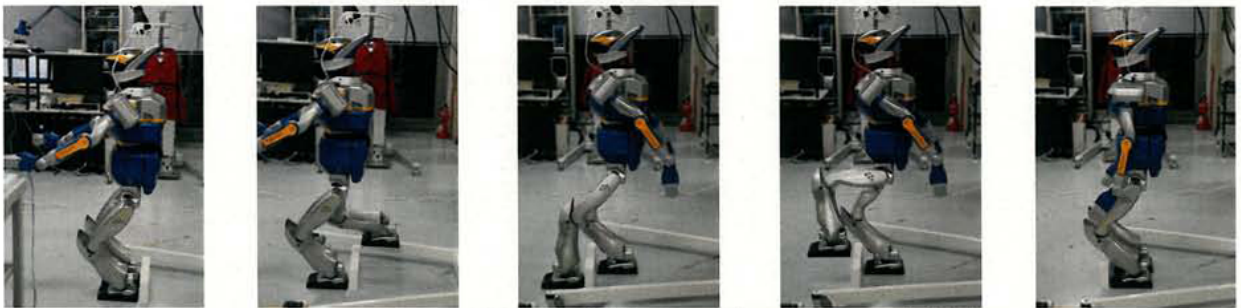


Fig. 4. The stepping over motion. Obstacle: 15 cm (height) x 5 cm (depth) x 40 cm (width).

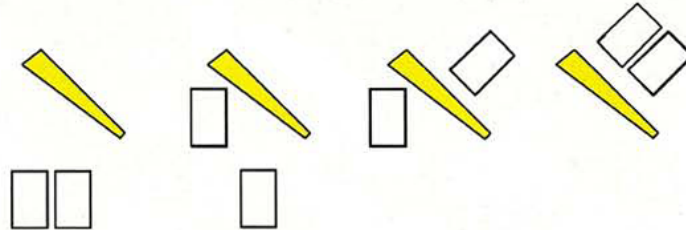


Fig. 5. Stepping over a non-rectangular obstacle lying tilted to the robot's line of motion.

上記の動作経路を自由に生成するために Stepping Over Toolbox (STO) を作成した。STO はいろいろな条件で障害物を乗り越えるための基本的な動作を自動的に作成することが可能である。たとえば、体重を一方の足から、他方の足に移行する際に、重心を初期位置から最終位置まで安定して動かすための軌道生成やロボット全体の方向姿勢を変えることなく、脚部のみを動かす軌道生成などを実現することができる。これらの関数を使ってユーザーが一連の希望動作を STO に入力として与えると、STO が動作を自動的に作成し、その結果を出力する。STO の入力には、ユーザーが一連の動作の中で各重要ポイントにおける速度を設定する。同 Toolbox を使用して、まず、HRP-2 の目前に置いてある障害物を跨ぐ動作を作成した。次に、Stabilizer の影響を測るために理論的に跨げるサイズの障害物を作成し、障害物を跨ぐ実験を行った。実機による実験で、脚部が障害物に衝突する場合には、障害物のサイズを小さく変更し、Stabilizer を組み込んだ状態で跨げる障害物のサイズを推定した。この実験では、最大 15cm x 5cm x 40cm の障害物を跨ぐことが可能であった。同実験の様子を図 4 に示す。最後に、進行方向に対して斜め方向にある障害物を斜めに跨ぐことや、直方体だけではない形状の障害物を跨ぐ動作の実験を行った。図 6 と図 7 に HRP2 の実機による実験の様子を示す。STO では、単純な速度情報を与えるだけで、高さのある障害物を跨ぐことが可能となる軌道を生成する。また、提案する手法では、進行方向に対して斜め方向にある障害物を跨ぐことや、多様な形状の障害物を跨ぐことも可能である。

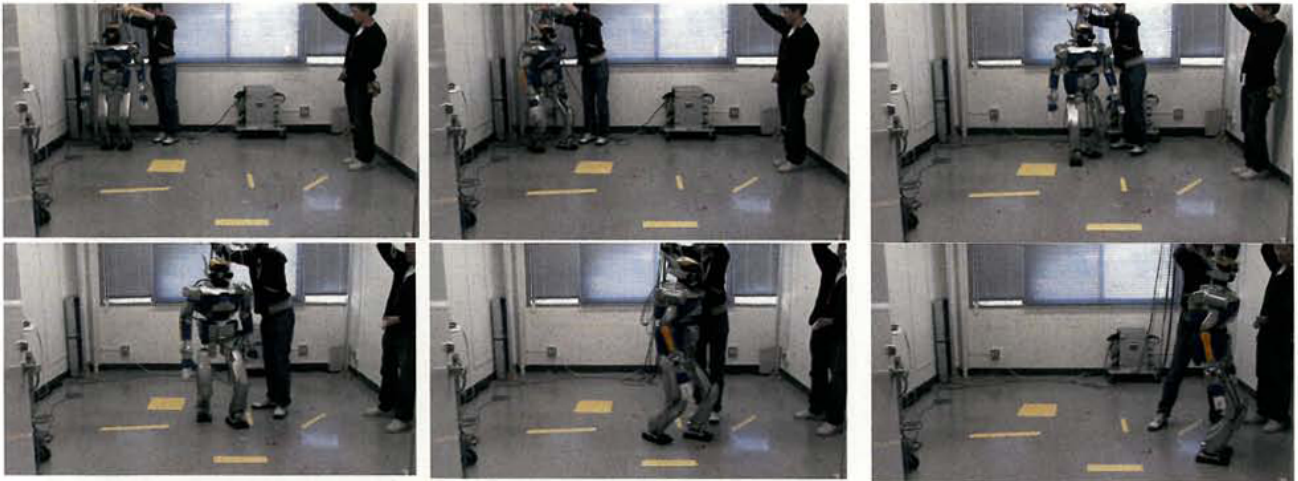


Fig. 6. HRP-2 humanoid robot navigating among obstacles.

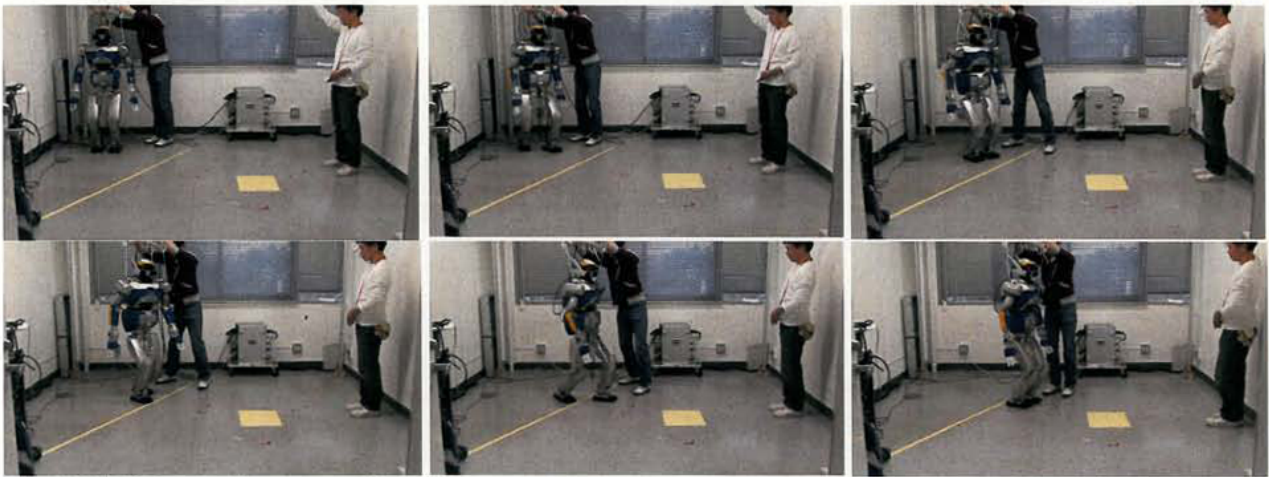


Fig. 7. HRP-2 stepping over a tilted obstacle while navigating among obstacles.

参考文献：

1. J. J. Kuffner et al. "Footstep planning among obstacles for biped robots," in Proc. IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 500- 505, 2001.
2. K. Kaneko et al. "Design of Prototype Humanoid Robotics Platform for HRP," in Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2431- 2436, 2002.
3. Y. Guan et al. "Stepping over obstacles with humanoid robots," IEEE Trans. on Robotics, vol. 22, no. 5, pp. 958-973, 2006.
4. B. Verrelst et al. "Dynamically stepping over obstacles by the humanoid robot HRP-2," in Proc. IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 117- 123, 2006.
5. J. -S. Gutmann et al. "Real-time path planning for humanoid robot navigation," in Proc. Int. Joint Conference on Artificial Intelligence, pp. 1232- 1238, 2005.
6. M. Yagi et al. "Biped robot locomotion in scenes with unknown obstacles," in Proc. IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, pp. 375- 380, 1999.

# 論文審査結果の要旨

ヒューマノイドロボットは、福祉、介護など、人間との共同作業を必要とする分野への応用が期待されている。このような分野で、ヒューマノイドロボットが活躍するためには、障害物が多数存在する環境下で、適切に移動経路計画を行う必要がある。しかし、ヒューマノイドロボットの場合は、車輪型の移動ロボットとは異なり、ある程度の高さの障害物は跨ぎ越えが可能である反面、動力学を考慮し転倒しないような歩行パターンを生成する必要があるため、足先の着地位置に制限がある、などの制約があるため、問題はより困難になる。

本論文は、以上の問題を解決するために、ヒューマノイドロボットの足跡（足先の着地位置）経路計画を高速に行う手法を論じたもので、全編6章からなる。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的を述べている。

第2章では、人間の経路計画を参考にした、新しい足跡経路計画を提案している。従来の方法は、複数の足先着地位置候補を節点として木構造で経路を表現し、ゲーム理論を応用して最適足跡経路を探索するものであったが、この方法では、障害物の数が増えると木構造が膨大となり、オンラインで最適足跡経路を探索するのが困難であった。これに対し、本章で提案する手法では、完全に同じ条件下での比較ではないものの、従来手法に比べ約10倍近い高速化が実現されている。この成果は実用上、非常に有効かつ重要である。

第3章では、ヒューマノイドロボットによる障害物の跨ぎ越えについて論じている。従来方法では、障害物の高さやロボットとの相対位置に関する考慮が無く、跨ぎ越えできる障害物が限定されていた。これに対して、本章で提案する手法では、障害物の高さや相対位置により足跡経路や遊脚軌道を変更することが可能で、跨ぎ越えの適用範囲が大幅に拡大されている。これにより、より適切な足跡経路の計画が可能となっている。この成果も実用上、非常に有効かつ重要である。

第4章では、生成された足跡経路から動歩行パターンを生成する手法を論じている。足跡経路に追従しつつ、動学的に整合性の取れた歩行パターンを生成するために、まず、ヒューマノイドロボットの動歩行パターンを生成するパターンジェネレータをオンラインで使用するためのインタフェースを新たに開発している。これにより、足跡経路生成から動歩行パターン生成までをオンラインで行うことが可能となり、これにより、動的に変化する環境内で障害物回避移動を実現している。

第5章では、第2章、第3章、第4章での成果を踏まえ、ヒューマノイドロボット HRP-2 で、障害物回避移動実験を行っている。この成果は、ヒューマノイドロボットの実世界応用に向けた重要な一歩である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、人間が居住する身の回りに障害物がある環境下で、跨ぎ越えが出来るというヒューマノイドロボットの優位性を生かしつつ、最適な移動経路を高速に探索する手法を提案し、シミュレーションと実験でその有効性を確認したもので、提案された手法の汎用性、応用性を考慮すると、航空宇宙工学およびロボット工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。