

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年5月9日現在

機関番号：82626

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H07391

研究課題名（和文）環境モデル獲得に基づくヒューマノイドロボットの未知環境適応全身移動計画法の実現

研究課題名（英文）Development of an adaptive whole-body locomotion planning system for a humanoid robot in an unknown environment based on approximated environmental models

研究代表者

熊谷 伊織 (Kumagai, Iori)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究員

研究者番号：60803880

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は事前知識のない複雑環境において、ヒューマノイドロボットが人間に類似した身体構造を利用し移動計画を即時的に行うための移動計画システムの構成法を明らかにした。環境計測を記憶として蓄積することで遮蔽された障害物や路面状況を考慮した大域足配置計画とオンラインの足配置補正を実現するとともに、障害物を凸形状モデルにして近似し足配置計画をガイドとした二次計画問題として全身干渉回避動作計画を行うことで全身動作計画における計算コスト増大の課題を解決した。さらにこの低次元の計画結果をガイドとする段階的な動作計画手法は多点接触計画に拡張され、ヒューマノイドロボットの移動可能範囲の拡大に貢献した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、周囲環境計測に基づくモデル獲得と身体構造を用いた干渉回避・多点接触姿勢計画を統合することで、事前情報のない複雑環境におけるヒューマノイドロボットの移動可能範囲を拡大したことである。

環境計測情報を記憶することで視界の制約がある複雑環境においても大域移動計画と移動誤差の補正が可能になるとともに、多自由度な身体構造に起因した全身動作計画の計算コスト増大の課題を低次元の計画結果をガイドとする段階的な動作計画手法により解決したことは、ヒューマノイドロボットが既存の人間の作業環境を変えることなく重労働を代行するために必須の技術であり実用上の意義も大きいと言える。

研究成果の概要（英文）：In this research, we developed the adaptive locomotion planning system for humanoid robot to pass through an unknown complex environment utilizing its human-like body structure. We achieved global footstep planning and online footstep compensation with collision avoidance and ground surface estimation even in an occluded scenario using accumulated environmental memories. We also solved the problem of increasing computational cost in the whole-body locomotion planning by performing a sequential whole-body collision avoidance while approximating obstacles as primitive convex shapes and utilizing the result of the footstep planning as the guide. Furthermore, this motion planning strategy, which used a low-dimensional planning result as a guide, was extended to multi-contact posture planning and contributed to the expansion of the movable range of a humanoid robot.

研究分野：ロボティクス

キーワード：ヒューマノイドロボット 環境計測 全身動作計画 経路計画 障害物回避

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

ヒューマノイドロボットは人間に類似した身体構造を持つことから、建設現場や航空機組立工場等の大型建造物組立現場のような大型の産業用ロボットを導入することが難しい複雑な狭隘環境において、自動化の困難な作業を代行することを期待され研究が進められてきた。この趨勢を踏まえて研究代表者は、ヒューマノイドロボットが未知環境において自動化の困難な人間の作業を代替するべく、周囲環境を認識し多様なタスクを達成するためのロボットシステムの研究開発を行ってきた。しかし建設現場をはじめとした狭隘な作業環境においては、ヒューマノイドロボットの環境計測・行動計画上の制約からロボットの移動可能領域が人間に比べて著しく限定されており、実行可能なタスクに制限が生じる問題がある。従ってヒューマノイドロボットを実際に人間の作業環境に導入し、負担の大きい作業を代行させるためには、ヒューマノイドロボットが自身の人間に似た身体構造を活用し、必要に応じて周囲環境を利用しながら自在に複雑な環境を移動するための全身移動計画技術による移動性能の向上が不可欠であると考えた。

これまでのヒューマノイドロボットの移動計画に関する研究は、周囲環境に対する足配置計画を対象とするものが主流であった。人間が作業する建設現場のような狭隘環境においては、足配置のみならず周囲との干渉を回避するための全身動作計画を行うことにより移動可能な範囲を拡大できると考えられるが、移動中の姿勢安定化制御や移動時の位置推定精度の問題から、全身動作計画と移動計画の統合は平面歩行などの単純な環境設定における事例にとどまっていた。

また、狭隘環境内での全身移動において姿勢安定化制御が困難になった場合に、作業環境内の手すりを利用するなど周囲環境を能動的に利用できるようなれば、ロボットの移動可能範囲をさらに広げることができると考えられる。しかし既存研究では視覚センサの認識精度や視野領域の問題と多点接触動作計画の困難性から、全身の移動計画において環境を積極的に利用する手法は未だ研究途上であった。

2. 研究の目的

本研究は、「環境モデル獲得に基づくヒューマノイドロボットの未知環境適応全身移動計画法の実現」と題して、未知の狭隘環境においてヒューマノイドロボットが自在に移動するための移動計画システムの構成法を明らかにすることが目的である。そのための中核技術として、研究代表者が開発してきた周囲環境記憶技術を基盤とし、研究期間内に(1)「身体構造を利用し狭隘環境を踏破するための全身移動計画法」と(2)「狭隘環境における全身移動計画のための環境モデル獲得法」の開発を行った。これらの中核技術は、歩行時の足配置計画を主として対象としてきた未知環境におけるヒューマノイドロボットの移動計画を全身の動作計画を含めた移動計画として拡張し、手すりなどの環境内の構造物を利用可能にすることでヒューマノイドロボットの移動可能範囲の拡大に貢献することが期待され、複雑な狭隘環境で既存の人間の作業環境を変えることなく高負荷作業をヒューマノイドロボットが代行するために必須の技術としての実用上の意義も大きいといえる。

3. 研究の方法

まず全身移動計画のための環境モデル獲得を行うために、研究代表者が開発してきた自己位置推定・周囲環境記憶技術を拡張し、狭隘空間においても移動計画の基盤となる周囲環境情報の蓄積とそれに基づく足配置計画が可能であることを確認した。次に生成した周囲環境情報をもとに環境との干渉をロボットが全身の身体構造を利用して回避するための全身歩行姿勢計画法を開発した。一般に多自由度の身体構造を持ち、移動中の姿勢安定化制御まで考慮しなければならないヒューマノイドロボットの全身移動計画は計算コストが大きい。本研究では周囲環境記憶技術により獲得した障害物点群情報から歩行時の揺動を考慮してロボットが環境と干渉せずに移動可能な歩行軌道を求め、更にプリミティブな形状モデルとして近似した障害物との干渉を回避するために必要最小限の動作計画を行うことで全身動作計画の計算コストを低減し、周囲環境情報に基づく全身移動計画を実現できると考えた。

さらに上記の全身干渉回避移動計画技術を拡張することで、環境内の物体を能動的に利用し姿勢保持や移動補助を行うことが可能な多点接触移動姿勢計画手法を明らかにした。大域的に計画した経路上で可達域モデルから接触可能な環境構造物を特定し、必要に応じて移動行動に利用する多点接触移動計画技術を実現することでヒューマノイドロボットの移動性能が大きく向上することを示した。

4. 研究成果

(1) 環境記憶と自己位置推定に基づく移動行動システムの開発

本研究ではまず障害物を含む狭隘環境内の移動行動実現のため、障害物回避に用いる環境点群と足配置計画のための高精度かつ密な地面点群を環境記憶として積算する手法と、得られた点群を環境モデルとして用いて大域的な移動計画及び逐次的な補正を行う歩行計画手法を統合することで、図1に示すような環境計測に基づく移動行動システムを実現した。

視界が限定される狭隘環境においてロボットが周囲環境に応じた移動行動を行うためには、

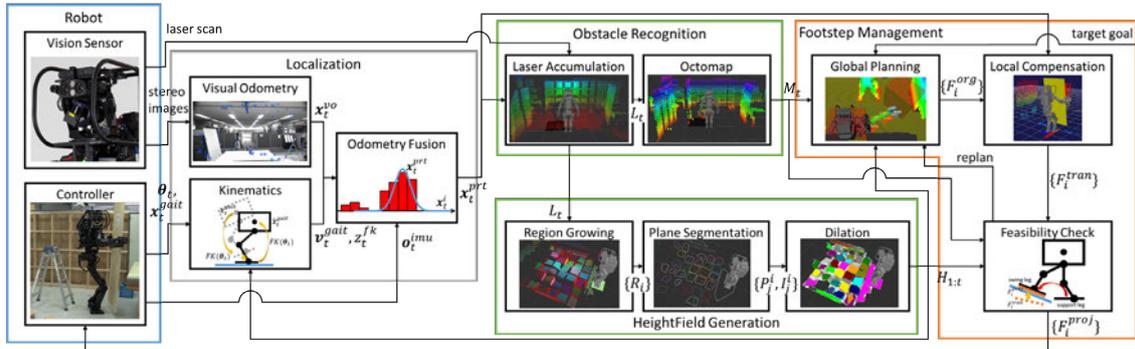


図 1 環境記憶と自己位置推定を用いた足配置補正に基づく移動行動システム

環境情報を積算し必要に応じて自己位置姿勢情報と併せて環境記憶を再利用することが求められる。図 1 に示す認識システムは、移動行動のための環境情報が必要とされる精度と実行周期の観点から地面点群と障害物点群の 2 つの用途に大別できることに着目し、平面推定と空間補間による高密度高精度な認識プロセスと、障害物干渉計算に適した処理を行う認識プロセスを分割している。足配置計画のための地面点群生成においては平面推定と空間補間による高密度高精度化を行うことにより、ロボットの移動中においてもオンライン足配置補正に十分な精度の点群を環境モデルとして獲得することが可能となった。

また狭隘環境においてヒューノイドロボットがタスクを行う上では必ずしも歩行中に移動先の足元を直接視認することができるとは限らないことから、環境計測結果に基づいて絶対座標系上の目標位置姿勢に到達するための大域的な歩行計画が必要である。一方でロボットが移動する際は、移動中に生ずる足の滑りや重心バランスの変化といった外乱による歩行誤差をオンラインで補償しなければならない。図 1 に示す移動行動システムは、環境計測に基づく大域的な移動計画とそれを遂行するための局所的な歩行補正を組み合わせることにより図 2 のような移動中に足元を直接計測することが出来ない条件下でも環境に適応しながら目標位置姿勢に到達可能であることが特徴である。

この成果は国際学会において発表を行うとともに(学会発表①)、産業技術総合研究所が新たに開発したヒューノイドロボット HRP-5P(引用文献①)に実装され、建設施工作業におけるパネル搬送行動の実現に貢献した(ホームページ①)。

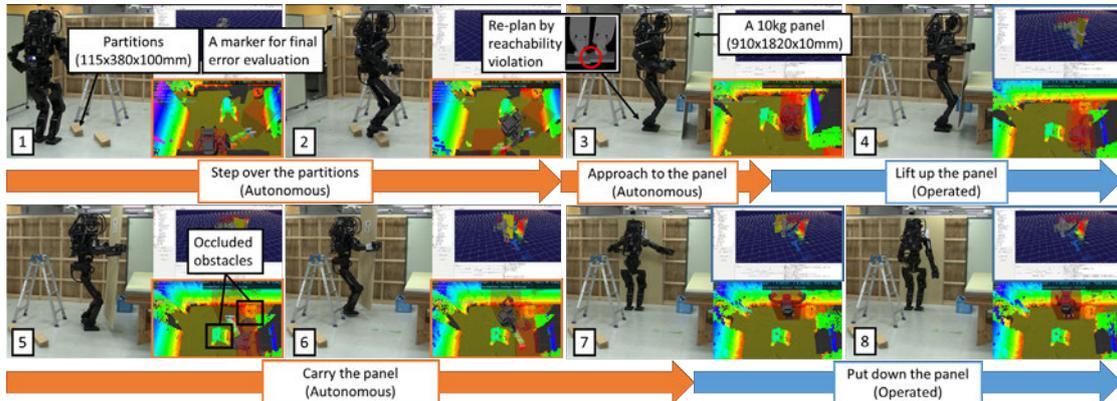


図 2 建設現場模擬環境における視界の遮蔽を含む大型重量物搬送行動

(2) 環境計測に基づく高速な全身干渉回避移動計画システムの開発

ヒューノイドロボットが狭隘環境で実用的な作業を実現するためにはロボットが周囲の環境を計測しその結果に応じて即応的に全身干渉回避移動計画を行う必要があるが、干渉回避可能な全身動作を大域的な姿勢探索により求める既存の全身動作計画手法では人間に類似した多自由度な身体構造を用いた動作計画は計算コストが大きくなり、現実の作業環境における計測結果に応じた即応的な移動計画を行うことは困難であった。そこで本研究では全身の姿勢計画に比べて大幅に探索空間の小さい大域足配置計画の結果をガイドとして用いて重心の動力学条件を考慮した干渉回避姿勢を局所的に計画する高速な全身干渉回避移動計画法を開発した。

提案する全身干渉回避移動計画手法では、まず研究成果(1)を基盤とする大域的な足配置計画を行う。このとき足配置候補の位置から重心の揺動を推定し、ロボットの体幹部を近似した直方体形状の大きさを推定した揺動量に基づいて変更しながら大まかな環境との干渉を考慮した足配置と遷移時間を計画する。これにより近似的な重心の揺動により環境との干渉が起こりうる足配置候補を予め除外する事が可能となる。

次に得られた足配置列を実現するための目標 ZMP 軌道と目標重心軌道を線形倒立振り子モデルにより求める。この足配置列と重心軌道をガイドとして干渉回避制約、足配置制約、重心軌道制約、ZMP 制約及び目標関節角度制約を 2 次計画問題として定式化した優先度付き逆運動学計

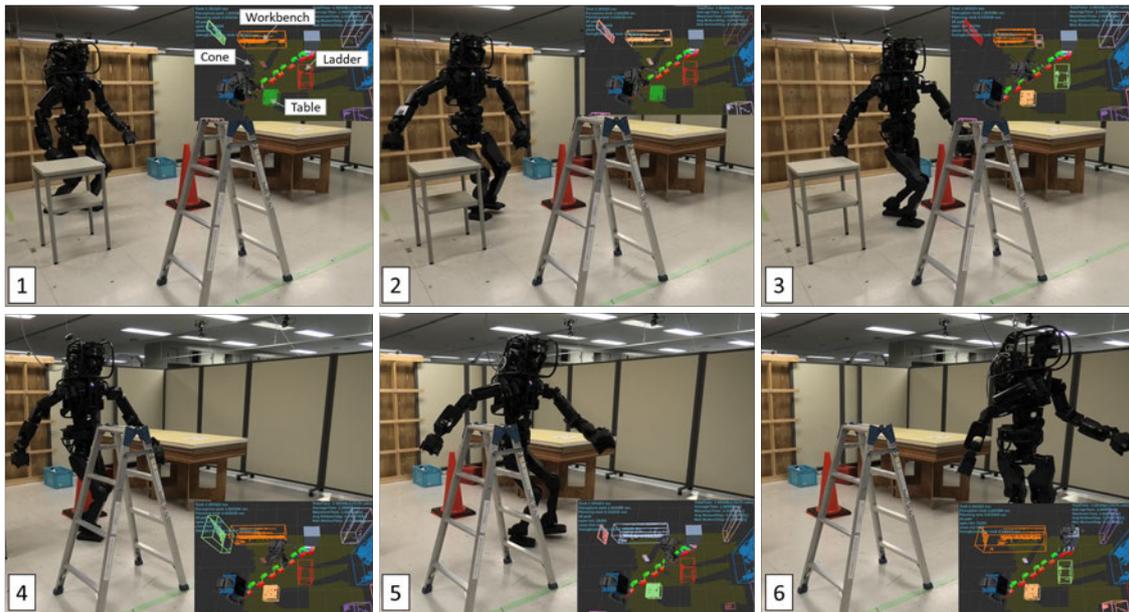


図 3 ヒューノイドロボットによる建設現場模擬環境内の全身干渉回避移動行動

算を逐次的に行うことで全身干渉回避姿勢列を求める。干渉回避においてはロボットが計測した環境点群から Euclidean Cluster Extraction により障害物を抽出し、狭義に凸な球または 2 つの球を円柱で接続したカプセル形状のいずれかのプリミティブ形状モデルとして近似する。ロボットのリンクも同様のプリミティブ形状により簡易化することで、干渉を考慮する形状の組の最小距離についての制約を線形不等式制約として表現することが可能となる(引用文献②)。

提案手法は動力学シミュレーション上及び実際のヒューノイドロボットに適用され、図 3 に示すような建設現場模擬環境を始めとした実用的な環境において 1 歩あたり 150ms 以内で全身干渉回避姿勢列を計算することができることが確認された。この成果は国際学会において発表を行った(学会発表②)。

(3) 可達域を考慮した段階的な多点接触移動姿勢計画

ヒューノイドロボットが建設現場のような狭隘な領域や急な段差を含む環境を移動する際には、二脚での姿勢安定化が困難な場合がありうる。このような場合に近くの手すりや壁に手をつけて安定領域を拡大することで移動可能な領域を拡大することができると考えられる。しかし足以外の環境接触を含むヒューノイドロボットの多点接触移動行動においては二足歩行において仮定されてきた周期的な運動や安定性条件をそのまま適用することができないことから、接触点計画の計算コストが増大し即応的な移動計画が困難であった。

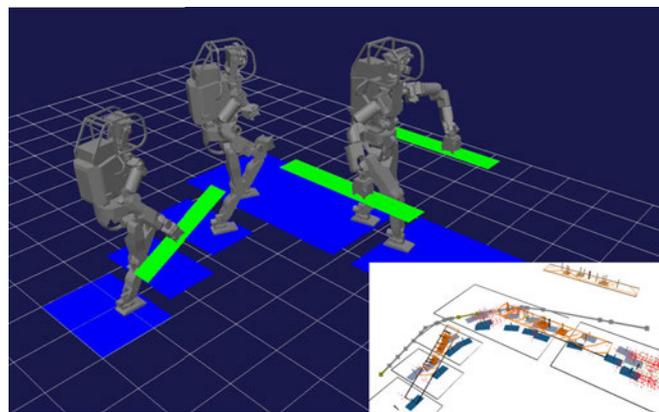


図 4 段階的な多点接触移動姿勢計画

本研究では Tonneau ら(引用文献③)

により提案された可達域モデルを応用し、大域基準リンク経路計画、足配置計画及び手先支持点計画を段階的に行い、各段階に置いて前段階の情報をガイドとして利用する手法を開発した。これにより図 4 に示すような環境平面への手先接触を伴う多点接触移動姿勢を高速に計画することが可能となった。

<引用文献>

- ① Kenji Kaneko et al. “Humanoid Robot HRP-5P: An Electrically Actuated Humanoid Robot with High Power and Wide Range Joints”, IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 4, issue. 2, pp. 1431-1438, 2019
- ② Fumio Kanehiro et al. “A Local Collision Avoidance Method for Non-strictly Convex Polyhedra”, Robotics: Science and Systems, 2008
- ③ Steve Tonneau et al. “An Efficient Acyclic Contact Planner for Multipled Robots”, IEEE Transactions on Robotics, vol. 34, issue. 3, pp. 586-601, 2018

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計2件)

- ① Iori Kumagai, Mitsuharu Morisawa, Shin'ichiro Nakaoka, Takeshi Sakaguchi, Hiroshi Kaminaga, Kenji Kaneko, and Fumio Kanehiro, "Perception Based Locomotion System for a Humanoid Robot with Adaptive Footstep Compensation under Task Constraints", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 713-719, 2018 (査読あり)
- ② Iori Kumagai, Mitsuharu Morisawa, Shin'ichiro Nakaoka, and Fumio Kanehiro, "Efficient Locomotion Planning for a Humanoid Robot with Whole-Body Collision Avoidance Guided by Footsteps and Centroidal Sway Motion", IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots pp. 251-256, 2018 (査読あり)

[その他]

ホームページ等:

- ① 人間と同じ重労働が可能な人間型ロボット試作機 HRP-5P を開発 (https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2018/pr20180927/pr20180927.html)

6. 研究組織

(1) 研究分担者
なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 金広 文男, 森澤 光晴, 中岡 慎一郎

ローマ字氏名: Fumio Kanehiro, Mitsuharu Morisawa, Shin'ichiro Nakaoka

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。