

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01300

研究課題名（和文）複雑未知環境下における即時動作を可能とする多点接触運動システムの実現

研究課題名（英文）Realization of responsive multi-contact locomotion system in complex unknown environments

研究代表者

森澤 光晴（Morisawa, Mitsuharu）

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・副連携研究ラボ長

研究者番号：00392671

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：本課題では、ヒューマノイドロボットの手足を自在に組み合わせて3次元移動する多点接触運動を即時的に生成する研究に取り組んだ。本研究では多点接触運動を実現するにあたって、多点接触運動制御と多点接触運動計画に問題を切り分けて理論的な枠組みの構築を行った。また多点接触運動計画について、強化学習により接触位置や接触遷移の順序を高速に求めるアルゴリズムを開発した。多点接触運動制御については、重心の運動量、角運動量に関する6次元の運動方程式の線形化モデルを用いて予見制御によるオンライン重心生成と、接触位置の摩擦制約を考慮した最適力分配に基づく高速計算アルゴリズムを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでロボットは工場などの整備された環境において活用されてきたが、ロボットは高負荷・単純反復・難姿勢作業といった人にとって負担の大きい作業について代替し、人手不足解消の一助となることが期待される。これらのロボットによる代替が困難な原因の一つとして、これらの作業を期待されている現場は空間的な制約が強く、車輪型ロボットではアクセスが困難なことが挙げられる。本研究成果である多点接触運動技術は、様々な多点接触運動を統一的なフレームワークで動作計画と制御を実行することができ、任意の四肢を用いて、これらの複雑な環境の到達可能な領域を拡大することができる。

研究成果の概要（英文）：In this project, we worked on the responsive generation of a multi-contact locomotion for a humanoid robot that moves in 3D space by freely combining its limbs. In order to realize multi-contact locomotion, we developed a theoretical framework by dividing the problem into multi-contact planning and stabilization. For multi-contact locomotion planning, we developed an algorithm to generate contact sequence with high success ratio and short time by reinforcement learning. For multi-point contact stabilization, we also developed a new algorithm based on online center of mass generation based on preview control using a centroidal dynamics and optimal force distribution considering the friction constraint at the contact position.

研究分野：人型ロボットの運動制御

キーワード：多点接触運動計画 多点接触運動制御 オンライン重心軌道生成 ヒューマノイドロボット 人型ロボット

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

日本は少子高齢化社会が一段と進み、建設業界や物流業界をはじめ様々な分野で労働力不足が社会問題となっている。これまでロボットは工場などの整備された環境において活用されてきたが、ロボットは高負荷・単純反復・難姿勢作業といった人にとって負担の大きい作業について代替し、人手不足解消の一助となることが期待される。これらのロボットによる代替が困難な原因の一つとして、これらの作業を期待されている現場は空間的な制約が強く、車輪型ロボットではアクセスが困難なことが挙げられる。多点接触運動技術はこのような問題を解決するため、任意の四肢を用いて、これらの複雑な環境の到達可能な領域を拡大することが期待されている。

近年、二足歩行ロボットや四足歩行ロボットを始めとする脚型ロボットの運動性能は、ハードウェアおよび運動理論両面から進化しているが、脚型ロボットは凹凸度や傾斜度の高い路面については高い踏破性能が実現されているのに対し、梯子や急階段といった狭隘度の高い環境においては人と同程度に移動することは依然困難である。二脚二腕を有する人型ロボットは、これらの複雑な環境を移動する潜在的な能力を有しているが、その分環境に対して多くの接触点候補が存在し、これらの環境で運動生成するためには環境とロボットの関節数、更に手先について握る・押すといった接触形態の高次元の組み合わせの中から実現可能な動作を見つけなければならない。このように環境の複雑さを増した狭隘環境では、動作生成のための計算コストは格段に高い。

またロボットが手足を使って環境を移動する接触遷移列を生成できたとしても、実時間での運動生成や実環境で安定な移動を実現する安定化制御についても計算コストが問題となる。初期の人型ロボットの運動は二足歩行やその簡易モデルに焦点が当てられてきた。二足歩行運動は圧力中心である ZMP (Zero-Moment Point) を支点とし、重心高さを一定とすると線形倒立振子でモデル化表現し、計算コストを削減することが可能であった。二足歩行運動のような支持領域に対して重心が高い運動については、倒立振子モデルによる近似は運動の特徴を表現していると言えるが、例えば梯子を登るような運動は倒立振子で表現することができない。また全身の動力学や重心の動力学を用いた非線形モデル予測制御による運動制御の手法も提案されているが、サブミリ秒のオーダーで実行することは難しい。

2. 研究の目的

本研究の目的は、計算コストの高い多点接触運動計画と制御を統一的なフレームワークで密に連携して即時的に応答可能な運動システムを実現することである。多点接触運動計画では、身体の中の部位をどのような姿勢で環境と接触し、どのような順番で接触部位を動かして移動するかを求める必要がある。更にその移動中の軌道は、環境と接触しない幾何学的な制約と、所望の環境との接触を維持するための接触制約の両者を満たしたものである必要がある。そのため多点接触運動計画については、これらのロボットや環境の次元を圧縮して運動を高速に求める手法を開発する。また多点接触運動制御においても、従来の多点接触運動生成手法は制御周期と同程度の時間で運動生成することが困難であることから、多点接触運動表現の一般性と計算コストを両立するロボットの近似モデルについて明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、実環境で動作する多点接触運動を実現するため、多点接触運動計画については、①モーションライブラリ用学習データの自動生成するための基盤整備を行い、②モーションライブラリの作成と環境情報からの即時軌道生成する。多点接触運動制御については、③環境誤差、環境変化、それらに起因して起こる不測の接触に対応するための高速に多点接触運動計画から動作生成・制御実行可能な多点接触運動制御アルゴリズムを開発する。そして、これらを連携することにより、即時性を有する多点接触運動システムを構築し、④狭隘環境を含む実環境で多点接触運動を実証する。

①モーションライブラリ用学習データの自動生成については、手や足のランダムな位置・姿勢の集合を事前に学習して微分可能な可到達領域を生成することで、②多点接触運動を最適化問題として接触位置を含む計画を即時的に生成する手法を開発する。また機械学習による接触遷移運動の実現可能性を考慮した次の接触遷移を行う部位を計画するアルゴリズムを開発する。③高速に多点接触運動計画から動作生成・制御実行可能な多点接触運動制御については、多点接触運動表現の一般性と計算コストを両立する観点から、ロボットの近似モデルとして重心の運動量変化、角運動量変化に関する 6 次元の重心動力学方程式に着目し、サブミリ秒以下で計算可能なアルゴリズムを開発する。④多点接触運動の実証では、動力学シミュレーションによる性能評価を通じて、二足歩行では移動が困難な環境での多点接触運動を実機で実現する。

4. 研究成果

①モーションライブラリ用学習データの自動生成

多点接触運動計画における計算コストを削減するため、モーションライブラリとしてベース

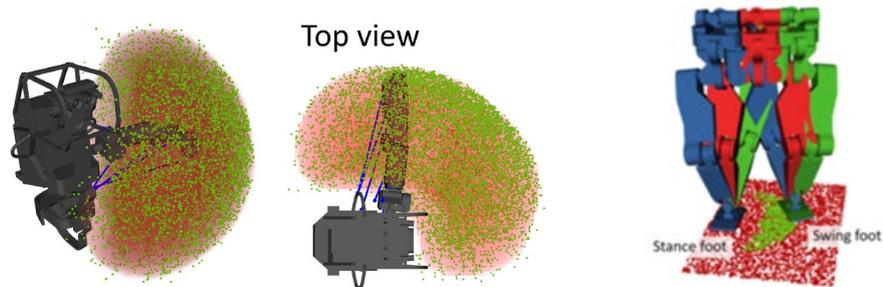


図1 環境との接触部位の到達可能領域

リンクからのロボットの手足などの環境との接触部位の可到達領域を表すマップを事前に作成する。可到達領域は、図1に示すような各接触部位のサンプル集合から運動学モデルを用いて生成する。この離散的到達領域をサポートベクターマシン(SVM)で学習することにより微分可能な連続的到達領域が得られる。

② モーションライブラリと環境情報からの即時多点接触運動計画

①で求めた微分可能な可到達領域を不等式制約で表現し、設計変数として足裏や手先の位置にとることで最適化計算により目的地までの接触遷移列を生成するアルゴリズムを考案した。接触遷移の順序は固定とし、可到達領域の腰リンクの位置は、単脚期では支持脚上にあるものとし、両脚期では力脚の中心にあるものとした。開発した接触遷移列を用いて動力学シミュレーションで不整地路面を伴う隘路環境を移動するシミュレーション結果を図2に示す。本課題で開発した多点接触運動制御器と組み合わせることで、単純な二足歩行よりも左手を利用して左の壁を押しながら多点接触移動することにより、より安定性の高い歩行が可能となった。

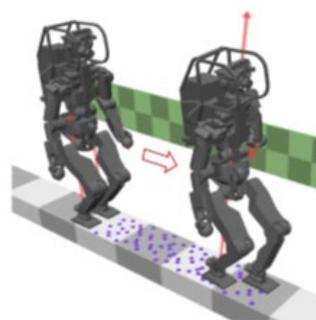


図2 微分可能可到達領域を用いた接触遷移列計画を多点接触移動

次に多点接触運動の遷移の順序を含めた多点接触運動計画を、強化学習を用いて生成する手法を開発した。従来のサンプリングベースの多点接触動作計画手法ではヒューリスティックスなどの評価関数で接触遷移の部位が決められたが、本手法は強化学習を用いて目標地点へ到達するための接触遷移の有望度を予測することにより、非周期的な接触遷移列および接触制約を満たす多点接触運動計画アルゴリズムを開発した。提案手法により図3に示すような隘路環境の会談では手摺を利用した運動が従来手法と比較して高い成功率と短い計算時間で生成することができた。

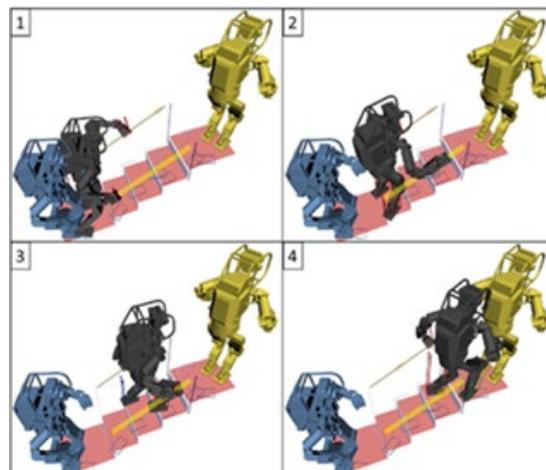


図3 強化学習を用いた多点接触運動計画

③ 多点接触運動制御アルゴリズムの開発

計画した多点接触運動を実環境で実行するため、人型ロボットの動的な多点接触運動のための重心オンライン軌道生成と安定化制御アルゴリズムを開発した。開発した制御器は、モデル予測制御の代わりに予測制御を用いることで計算コストを大幅に削減することに成功した。予測制御と外乱に対するロバストな重心の状態フィードバックおよび接触制約を満たすための力・トルク分配を組み合わせることで、シミュレーション実験により図4に示すような垂直梯子の昇降などの様々な動作が、人型ロボットによって安定的に実現できた。また提案手法は、モデル予測制御による手法と比較して、同じ予測時間に対してより細かくサンプリング時間を設定することが可能で、より短い周期でロボットの重心状態を更新することができた。本成果は *IEEE Robotics and Automation Letters 2022* にて発表された。

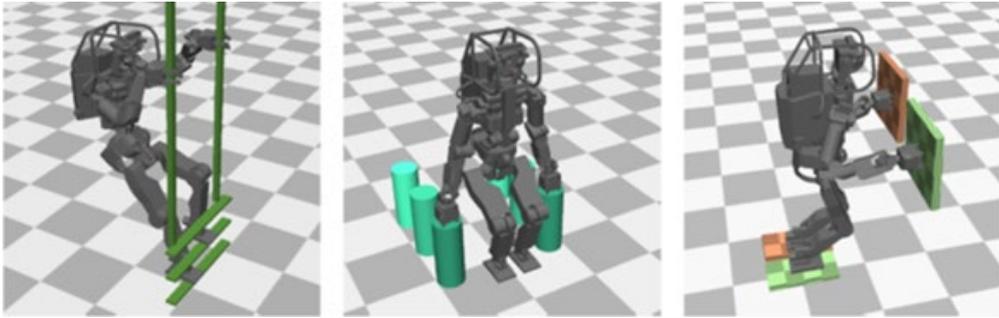


図4 予見制御を用いた多点接触運動制御

④多点接触運動の実証

本課題で取り組んだ多点接触運動計画と多点接触運動制御を統合した実機による多点接触運動の例として、脚立を昇降している様子を図5に示す。ロボットは川崎重工業株式会社と共同で開発したRHP Friendsを利用した。手首にはツールチェンジャーが取り付けられ、ロボットの運動や作業に応じてハンドを変更できるようになっている。ここではハンドとして、Sake Robotics社のEZ Gripperを2個ずつ用いている。提案手法により安定な多点動作が実行できていることがわかる。

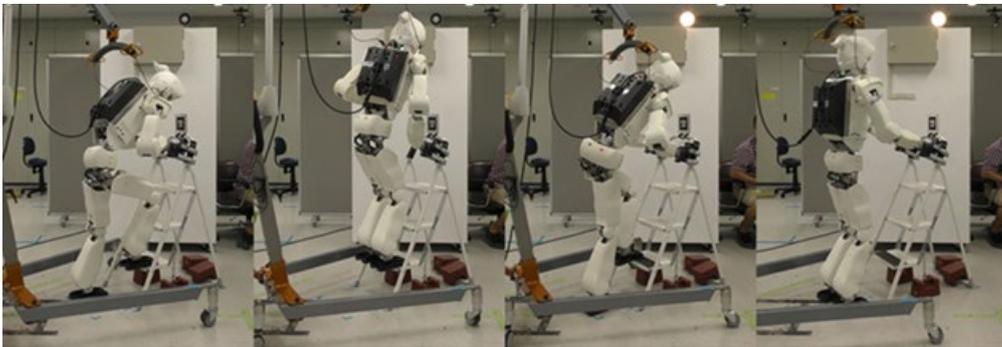


図5 多点接触運動による脚立昇降

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Murooka Masaki, Morisawa Mitsuharu, Kanehiro Fumio	4. 巻 7
2. 論文標題 Centroidal Trajectory Generation and Stabilization Based on Preview Control for Humanoid Multi-Contact Motion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 8225 ~ 8232
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LRA.2022.3186515	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Murooka Masaki
2. 発表標題 Centroidal Trajectory Generation and Stabilization Based on Preview Control for Humanoid Multi-Contact Motion
3. 学会等名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) October 23-27, 2022, Kyoto, Japan (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

ACLoMa - 複雑未知環境下における即時動作を可能とする多点接触運動システムの実現 https://unit.aist.go.jp/jrl-22022/jp/projects/project-kakenhi_kibanb2021_morisawa.html
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	熊谷 伊織 (Kumagai Iori) (60803880)	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・主任研究員 (82626)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	室岡 雅樹 (Murooka Masaki) (70825017)	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・主任研究員 (82626)	
研究 分 担 者	E s c a n d e A d r i e n (Escande Adrien) (00835374)	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・主任研究員 (82626)	削除：2022年7月11日

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関