

令和元年6月13日現在

機関番号：82626
研究種目：基盤研究(B) (一般)
研究期間：2016～2018
課題番号：16H02886
研究課題名(和文)Cutting-edge multi-contact behaviors

研究課題名(英文)Cutting-edge multi-contact behaviors

研究代表者

Kheddar Abderrahmane (Kheddar, Abderrahmane)

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・客員研究員

研究者番号：90572082

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,600,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、ヒューマノイド等の複雑な構造を持つロボットが、環境との接触を利用して狭隘部での移動や全身物体操作を行うための動作計画・制御の基盤技術を構築した。まず、人間の多点接触動作を非拘束で推定し、その結果をヒューマノイドによる人動作の再現に利用した。また、形状の連続的変形によるロバストな3次元多点接触安定規範を導出し、柔軟な力フィードバック制御手法に適用した。さらに、先行研究の多点接触姿勢生成器に、作業を考慮して力を決定変数として組み込み、自己位置同定と地図生成の同時実行(SLAM)による閉ループ制御に拡張した。これらの成果の有効性を、ヒューマノイドの応用シナリオで実験的に検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題で取り扱っているロボットの多点接触動作計画・制御は、現在世界で盛んに研究されている。研究代表者のKheddarはこの分野の創始者の一人として認識され、本課題で上記に示す新たな成果を挙げており、多数の論文発表や招待講演、また日英の教科書執筆を行うなど、科学的意義は高く認識されている。本課題の成果は、大規模組立環境におけるヒューマノイド導入に利用されつつあり、産業展開の点で社会的意義を持つ。特に、航空機組立や建築現場において困難な姿勢を伴う作業の代替や、災害現場での探索、さらに高齢者等の動作支援への応用が期待されており、企業との共同研究が進行中である。

研究成果の概要(英文)：This proposal deals mainly with the fundamentals of motion planning and control for complex robots such as humanoids, to use contacts of any kind with their surrounding environments to enhance their capability of locomotion and objects manipulation. We have achieved the following noticeable advances with respect to our previous work: unobtrusively forces estimation from motion tracking in human multi-contact setting and its application to motion retargeting from human to humanoids; robust equilibrium multi-contact criteria in 3D and its related stabilization scheme through shape morphing as well as compliance and force servoying in both planning and control; extension of multi-contact planning to task-aware contact generation by extending the extended posture generator to embedded force as decision variables; and closing the loop on perception using SLAM in multi-contact. All these developments have been assessed in various industrial experiments involving humanoid robots.

研究分野：ロボティクス

キーワード：知能ロボティクス デジタルヒューマンモデル 多点接触動作 機械学習 最適化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

図1は多点接触動作計画・制御システムの構成要素となるモジュールとその関係を示す。この図中で、点線部分が研究開始当初には確立されておらず、本研究で取り組む内容であった。また、それぞれの構成要素についても本質的な改善が必要であった。例えば、多点接触計画器は、対象作業の特性や、閉ループ機構を利用した作業のための発生力の増加には対応しておらず、また、多目的関数の二次計画法(QP)は力・柔軟制御を含む形では設計されていなかった。

その他、課題開始時には、SLAM と視覚フィードバックは知覚手段として含まれていなかった。さらに、ロボットからの状態入力に基づく閉ループ制御の二次計画制御器への統合も取り組むべき課題として残っていた。

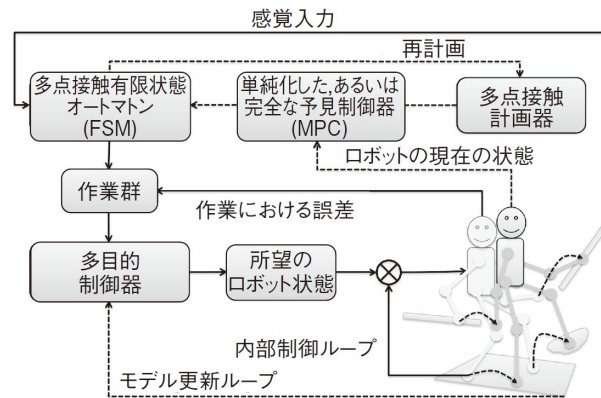


図1 多点接触動作計画の枠組み

2. 研究の目的

本研究の目的は、多点接触技術を学術的な面で高度化するとともに、多自由度ロボットの新たな応用に向けた実装のロバスト性を達成することである。

なかでも手法な目的は、全身多点接触計画の利用における新たな機能と知識の導入、対象作業の特性の制御への統合、滑り接触を含めた動的な安定指標の導出、そして多点接触動作における柔軟性の考察とセンサ情報に基づくロバストな閉ループ制御の枠組みの構築である。コンピュータグラフィックスやアニメーションキャラクターの動作生成と同様に、直感的な形で多点接触を伴う挙動の生成、移動しながらの物体操作における接触の利用に取り組む。研究成果の有効性は、ロボットによる実験を用いて検証する。

3. 研究の方法

本課題を実施するにあたり、挑戦的な課題に相当する3つのサブ課題 (Work-package, WP) で構成し、各年度で目標を決めて研究を実施することとした。WP1 では、人間の行動にヒントを得て、経験知識や意味論を多点接触動作計画に埋め込ため、機械学習により人の技能を動作や接触をエンコードする新たなアプローチについて研究を行う。WP2 では、これまでに構築した多点接触動作計画・制御の枠組みを拡張し、滑り接触や3次元の動的安定指標などの新たな機能の導入により、不規則な着地位置を用いた移動など、WP1の結果も援用しつつ構築する。WP3 では、実際的な実装の課題を中心に取り組む。具体的には、柔軟性や力の調節に関する基盤研究とソフトウェアアーキテクチャと実験による検証を行う。

4. 研究成果

上記の通り、本課題では多点接触動作に関して、WP1 は人間行動の理解と学習の適用、WP2はその計画と制御手法、WP3 は実装の面に取り組むこととした。各WPにおける成果はそれぞれ次のとおりである。

WP1 では、まず人間の多点接触動作を非拘束で推定する手法を構築した。この手法の特徴は、モーションキャプチャシステムのみを利用し、人と環境の間に働く力を測定するための装置が不要であることである。これと並行して、さまざまな多点接触動作・作業に関して、人間と環境の間の力に関する測定データを多く蓄積し、動きから力を推定する手法を導出した。力の推定に関しては、力学ベースの深層学習により、現実に近い力の分布を再現に機械学習を利用した。

さらに、環境の変化も含む人間の多点接触動作を、オンラインまたはオフラインでのロボットによる動作再現を実現した。多点接触の二次計画法による制御の枠組みに基づき、移動を伴う物体操作の実行における身体の接触状況の制御や作業・移動の役割分担の自動決定手法を構築した。人間とロボットのオンラインの同時計測と、計測した人間動作から接触の遷移を抽出し、オフラインでのロボット動作再現を実現した。この成果は、産業応用シナリオでの人間からロボットへの技能移転への適用が期待される。

この成果は、カールスルーエ工科大学の Tamim Asfour 教授と多点接触動作の分類に関する共同研究にも発展した。分類は機械学習に有用な成果であるが、学習成果を多点接触動作生成への応用は今後の課題である。

WP2 の制御に関する成果として、まず、3次元の多点接触における安定指標とその安定化制御手法を構築した。静的安定指標を3次元に拡張し、安定性を明示的に表現する多面体を利用

することで、安定性を維持しつつ多点接触の円滑な遷移と力制御を両立させる二次形式に基づく制御器を導出した。安定性の多面体表現により、双方向・片方向の接触を取り扱うことができ、多点接触動作において不連続な接触遷移を割けつつ、重心位置を連続的に移動させることができる。

また、制御に関するもう一つの成果として、作業を考慮した接触の定式化による接触動作計画の拡張が挙げられる。これにより、移動あるいは物体操作のみを考慮しただけでは導出できない、双方を考慮した適切な全身動作の生成が可能となる。例えば、右手のグリッパにより壁の上のレバーを強い力で引く作業の場合、左手で壁に固定された手すりなどの環境部分を把持することにより閉ループを構成してこれを実現する解を導出することができる(図2)。この新手法より、ロバストな安定性の維持機能、また内力を利用して作業に必要な力の増加を図ることができる。

また、二次計画法に基づく多点接触制御器に新たな機能を追加するための研究を実施した。その一つは、混合整数計画法に基づき、モデル予測制御を用いることにより動的な動作を生成することである。そこで、二次計画法による多点接触動作制御器の安定性とロバスト性に関する理論的な考察を行った。さらに、視覚フィードバックとSLAM技術を導入することで閉ループ制御系を構成した。最後に、多数のロボットが含まれる系に適用可能な二次計画法に基づく多点接触の閉ループ制御器を構築した。滑りを含む接触に関する制御に関しては、接線方向の力と重心位置の制御を精密に行う必要があり、特に3次元のケースは問題の複雑性が予想より高いことが判明した。この課題については、今後さらに考察が必要である。

WP3の実装については、構築したソフトウェアの統合を行い、エアバスから提供された大規模組立環境において、多点接触計画を実証した(図3)。

結論として、より高度な展開については今後の課題として残っているが、すべての目的は達成されており、高度な学術的成果であることは、インパクトの高い論文誌や国際会議で論文が多数採択されていることにも示されている。

5. 主な発表論文等

- [1] Di Fava Alessandro, Bouyarmane Karim, Chappellet Kevin, Ruffaldi Emanuele, Kheddar Abderrahmane, "Multi-contact motion retargeting from human to humanoid robot", Proc. IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 1081-1086, 2016.
- [2] Audren Herve, Kheddar Abderrahmane, Gergondet Pierre, "Stability polygons reshaping and morphing for smooth multi-contact transitions and force control of humanoid robots", Proc. IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 1037-1044, 2016.
- [3] Bolotnikova Anastasia, Chappellet Levom, Paolill Antonio, Escande Adrien, Anbarjafari Gholamreza, Suarez-Roos Adolfo, Rabaté Patrice, Kheddar Abderrahmane, "A circuit-breaker use-case operated by a humanoid in aircraft manufacturing," Proc. IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE), pp. 15-22, 2017 (Best Student Paper Award 受賞).

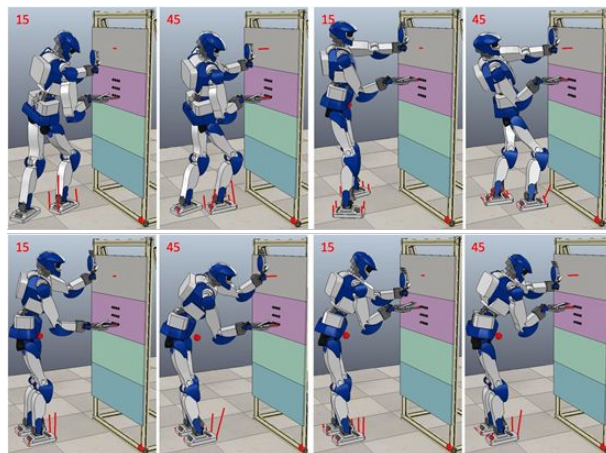


図2 環境との閉ループ機構を利用した作業の例

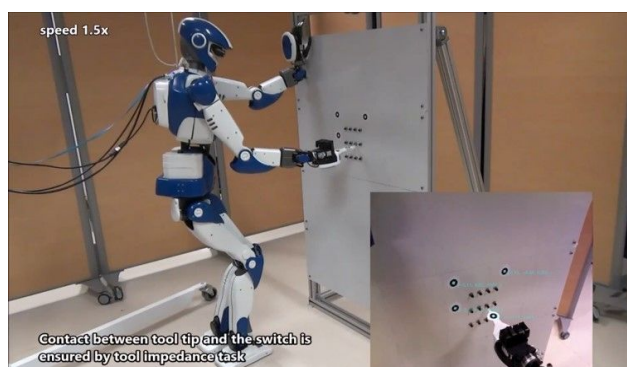


図3 航空機組立環境におけるブレーカーのテストを想定した検証実験

- [4] Audren Herve, Kheddar Abderrahmane, "Model-predictive control in multi-contact based on stability polyhedrons," Proc. IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 631–636, 2017.
- [5] Kheddar Abderrahmane, 第19章 ヒューマノイドロボット 19-7 "多点接触動作計画・制御"、ロボット制御楽ハンドブック、松野 文俊、大須賀 公一、松原 仁、野田 五十樹、稲見 昌彦 (編), 近代科学社、2017.
- [6] Pham Tu-Hoa, Kyriazis Nikolaos, Argyros Antonis A., Kheddar Abderrahmane, "Hand-Object Contact Force Estimation from Markerless Visual Tracking," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 40, No. 12, pp. 2883–2896, 2018. DOI: 10.1109/TPAMI.2017.2759736
- [7] Grimm Raphael, Kheddar Abderrahmane, Asfour Tamim, "Generation of Walking Motions Based on Whole-Body Poses and QP Control," Proc. of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 510-515, 2018.
- [8] Audren Herve, Kheddar Abderrahmane, "3-D Robust Stability Polyhedron in Multi-contact," IEEE Transactions on Robotics, Vol. 34, No. 2, pp. 388-403, 2018. DOI: 10.1109/TRO.2017.278668
- [9] Cisneros Rafael, Benallegue Mehdi, Benallegue Abdelaziz, Morisawa Mitsuharu, Audren Herve, Gergondet Pierre, Escande Adrien, Kheddar Abderrahmane, Kanehiro Fumio, "Robust Humanoid Control Using a QP Solver with Integral Gains," Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 7472-7479, 2018.
- [10] Bouyarmane Karim, Caron Stephane, Escande Adrien, Kheddar Abderrahmane, "Multi-Contact Planning and Control," Humanoid Robotics: A Reference, Ambarish Goswami, Prahlad Vadakkepat, eds, Springer-Nature, 2018.
- [11] Bouyarmane Karim, Chappellet Kevin, Vaillant Joris, Kheddar Abderrahmane, "Quadratic Programming for Multirobot and Task-Space Force Control," IEEE Transactions on Robotics, Vol. 35, No. 1, pp. 64-77, 2019. DOI: 10.1109/TRO.2018.2876782

〔雑誌論文〕(計 3 件)

〔学会発表〕(計 8 件)

〔図書〕(計 2 件)

〔産業財産権〕

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：森澤 光晴

ローマ字氏名：(MORISAWA, Mitsuharu)

所属研究機関名：国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名：情報・人間工学領域

職名：主任研究員

研究者番号(8桁)：00392671

研究分担者氏名：吉田 英一

ローマ字氏名：(YOSHIDA, Eiichi)

所属研究機関名：国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名：情報・人間工学領域

職名：研究部門付

研究者番号(8桁)：30358329

研究分担者氏名：金広 文男

ローマ字氏名：(KANEHIRO, Fumio)

所属研究機関名：国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名：情報・人間工学領域

職名：研究グループ長

研究者番号 (8 桁): 73056806

(2)研究協力者

研究協力者氏名 : エスカンド アドリアン

ローマ字氏名 : (ESCANDE, Adrien)

研究協力者氏名 : ジェルゴンデ ピエール

ローマ字氏名 : (GERGONDET, Pierre)

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。