

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K20380

研究課題名（和文）半未知環境の環境構成物記憶と作業依存関係に基づくヒューマノイドの作業手順計画法

研究課題名（英文）Task management framework for a humanoid robot based on object recognition in a semi-unknown environment and task dependencies

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・主任研究員

研究者番号：60803880

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、目標とする作業を達成するために必要な運動学的・力学的制約条件を考慮した全身動作を生成するための「(1)ロボットの運動学・力学制約を考慮した動作計画手法」の開発と、環境計測情報から作業実行に必要な対象物を検出するための「(2)環境構造物の意味論的認識」の導入を行い、それらを「(3)動作計画と環境認識結果に基づく作業管理システム」に統合することにより自律的な作業実行とエラー検出機能を備え、必要に応じて遠隔指示による補助を伴うエラーリカバリが可能な作業実行管理システムを実現した。提案手法はコンビニエンスストア模擬環境における物体操作作業を適用先として有効性を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、運動学的・力学的な制約を考慮したヒューマノイドロボットの全身動作計画手法を拡張した可達域データベースに基づく動作計画手法を開発し、機械学習を用いた環境認識手法及び自律的なエラー検出が可能な状態遷移に基づくタスク管理システムを統合することで、商品陳列作業のような実世界における作業を遂行するロボットシステムを実現した。環境認識・動作計画・作業手順を統合したシステムを開発し、コンビニエンスストア模擬環境における物体操作作業を通して実世界においてその有用性を実証したことは、実用的な意義が大きいと考えている。

研究成果の概要（英文）：In this research, we developed "(1) motion planning method considering kinematics and statics of a robot" to generate whole-body motion which satisfies its kinematics and statics constraints to achieve the target task. We also introduced "(2) semantic recognition of objects in the environment". We integrated them into "(3) task management based on the motion planning and environmental recognition" and achieved the task management system which can autonomously execute target tasks with error detection and recover from errors with the assistance of the remote operator. We evaluated the effectiveness of the proposed method through the material handling task in a convenience store environment.

研究分野：ロボティクス

キーワード：動作計画 環境認識 作業計画

1. 研究開始当初の背景

ロボットが作業を行う上で必要な知能の構成論は学術的な課題として長らく議論されてきたが、ロボットには搭載可能な外界センサの計測範囲・精度の制約や動作時の運動学・力学的な制約があることから、シンボリックな記述による古典的なタスクプランニング手法のみでは実行可能な作業手順を生成できるとは限らないという課題がある。そのためロボットが実世界で作業を行う上では人間が注意深くそれらの制約を満たす作業手順を設計する手法が未だ一般的であり、ロボットの自律性能を向上するためにはロボットが自己の運動学的・力学的制約条件と周囲の環境から目的とする作業を行うための手順を自律的に判断し、状況の変化に適応しながら行動する知能の高度化が必要であった。

高次の作業手順を記述する手法としては、エラーリカバリや条件分岐を含む複雑なタスク記述が可能な状態遷移図による記述方法を用いることが一般的である。しかしロボットは作業自体の依存関係がない場合でも、腕の可達域や姿勢安定化といった幾何的・力学的制約があるため、作業手順の実行可能性を作業の依存関係のみから判断することは難しく、作業計画と動作計画の双方を考慮することが必要不可欠であった。またロボットに求められる人間の作業環境でのタスク実現を達成するためには、ロボットが自ら作業対象物を検出しなければならないという課題があった。

研究代表者の所属する産業技術総合研究所では、2018年9月に人間の重労働作業を代替できる身体能力を備えた人間型ロボット HRP-5P を開発し、模擬住宅建築現場において石膏ボード壁面施工を HRP-5P 単体で自律的に遂行することに成功した(参考文献)。しかしながらヒューマノイドロボットによる石膏ボード壁面施工作業においては未だ環境計測・動作計画・制御の実行手順を人間が注意深く設計していた。実際にヒューマノイドロボットを作業現場に導入するためにはヒューマノイドロボットがその場で自律的に目的とする作業を達成するための手順を判断することが必要であると考えられた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ロボットが目的とする作業を実現する手順を自律的に判断するために、環境認識、動作計画、作業手順を統一的に取り扱う事が可能な新たな作業手順管理システムの構成方法を明らかにすることであった。

本研究では作業の依存関係と環境の構成物が既知である作業を対象とし、その作業手順と構成物の配置が変化する環境を半未知環境として定義した。その上で、ロボットが周囲の環境構造物を認識するとともに、目標とする作業の依存関係と自己の運動学・力学的制約から並列実行可能な手順を抽出し、環境認識結果と作業実行上の制約を考慮しながら目的とする作業手順を自律的に生成する作業実行管理システムを目指して開発を行った。

3. 研究の方法

本研究では目標とする作業の依存関係を事前知識として、目標とする作業の依存関係の下でロボットが目的とする作業を行うための全身動作の生成可能性を判断するために「(1)ロボットの運動学・力学制約を考慮した動作計画手法」を開発した。まず脚型ヒューマノイドロボット HRP-5P(参考文献)が複雑環境を移動する作業を対象とし、ロボットの幾何的・静的安定性条件を満たす移動動作を生成する動作計画器を開発した。さらに本研究の適用対象を脚型だけでなく台車型単腕ヒューマノイドロボット Fetch Mobile Manipulator(参考文献)に拡張し、運動学的制約条件をグラフ構造としてデータベース化した動作生成手法を開発した。次に環境構造から作業実行に必要な依存関係にある対象物を獲得するための「(2)環境構造物の意味論的認識」として機械学習に基づく物体認識手法を導入した。さらに「(3)動作計画と環境認識結果に基づく作業管理システム」を開発し(1)と(2)を(3)の上で統合することにより、コンビニエンスストア模擬環境において対象物を陳列する作業を実ロボットによって実現した。

4. 研究成果

本研究では、目標とする作業を達成するために必要な運動学的・力学的制約条件を考慮した全身動作を生成するための「(1)ロボットの運動学・力学制約を考慮した動作計画手法」の開発と、環境計測情報から作業実行に必要な対象物を検出するための「(2)環境構造物の意味論的認識」の導入を行い、それらを「(3)動作計画と環境認識結果に基づく作業管理システム」に統合することによりコンビニエンスストア模擬環境における物体操作作業と遠隔指示による補助を伴うエラーリカバリを実現した。得られた研究成果は論文誌 2 報(発表論文、)および国際学会プロシーディングス 1 報(発表論文、)として発表した。

(1) ロボットの運動学・力学制約を考慮した動作計画手法

まず脚型ヒューマノイドロボットの多点接触移動計画を対象として、運動学的・力学的制約を満たす動作が存在するような接触遷移を計画するための移動計画手法の開発を行った。ヒューマノイドロボットの可達域に着目し、可達域の幾何的な領域を用いて移動動作中に接触を維持可能になるような接触遷移を探索する手法を提案した。さらに接触遷移動作計画時に遷移する接触点の順序を考慮するとともに接触点を局所的に変更することで、既存の多点接触動作計画手法では見逃されていた運動学・力学的制約を満たす接触動作を計画可能になった(図1、発表論文)。

また環境を押す方向の接触力のみでなく引く方向の接触力を考慮するための接触近似手法を提案し、脚型ヒューマノイドロボットの安定化可能領域を拡張することでより複雑な環境での動作計画を可能にした。この手法を遷移動作の時系列姿勢群をまとめて最適化する全身運動計画手法に導入することで、動作計画結果の全身関節角度及び重心遷移を平滑化することで手すりをういた急階段の登攀といった運動学的・力学的制約の厳しい動作が実現可能となった(図2、発表論文)。

さらにこれらの移動計画手法をより一般的な作業に拡張するために、二脚二腕以外の形状を持つヒューマノイドロボットにも適用可能な動作計画手法が必要であると考えた。そこで移動計画手法において利用した可達域の考え方を発展させ、オフラインでランダムにサンプリングした目標手先位置姿勢に対するロボットの逆運動学解をグラフ構造としてデータベース化する新たな軌道計画手法を提案した。オンラインの作業時にデータベース内で現在姿勢から目標とする手先位置姿勢までの経路を探索し、経路上の関節角度を手先関節軌道計算のガイドとして利用することで、物体操作作業における既存の最適化動作計画では解を求めることが困難な環境でも、実用的な計算時間で直観的なロボットの手先関節軌道を計画することが可能になった(図3、発表論文)。またこの手法はデータベースをグラフ構造として表現していることから、構成する枝の重みを更新することにより動作計画に成功しやすい経路を優先的に探索することができる。これは作業を繰り返し行うにつれて動作計画に必要な時間を短縮することが可能であることを意味する。

(2) 環境構造物の意味論的認識

目標とする作業に必要な物体を自律的に検出するための手法として、機械学習に基づく物体認識手法の導入を行った。これによりコンビニエンスストア模擬環境における商品陳列作業を例として、カップ麺のような陳列対象となる物体をロボットが自律的に画像から認識しその把持点を計画するとともに、対象物が見つからない場合にその対象物を必要とする作業の実行を停止するという環境計測情報に応じた動作が可能となった。

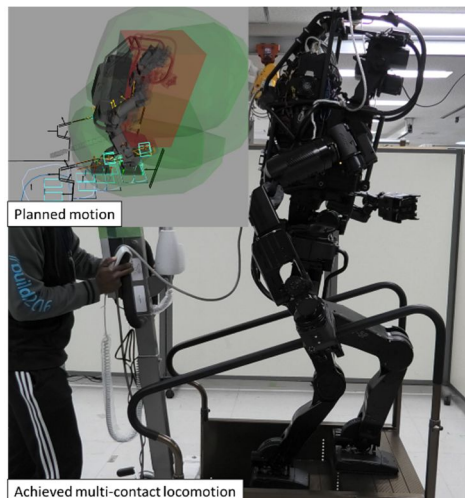


図1 接触遷移移動計画の例

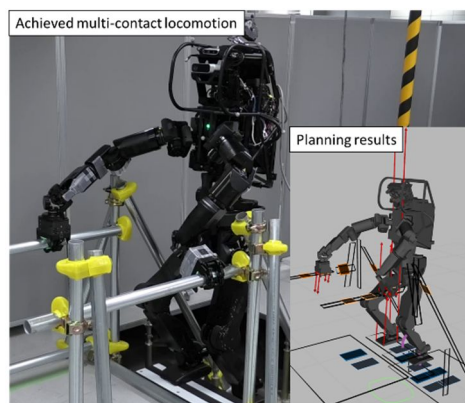


図2 双方向接触力を利用した動作例

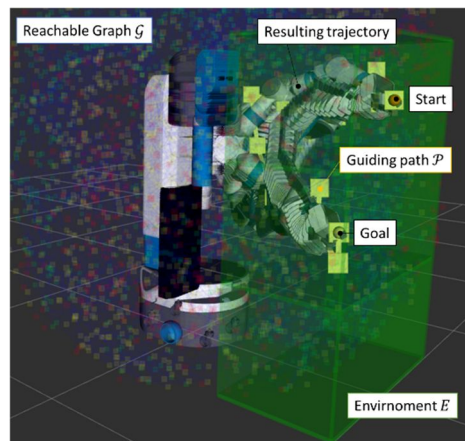


図3 可達域データベースに基づく手先軌道計画



図4 商品陳列作業における自律的なエラー検出と遠隔指示によるリカバリ

(3) 動作計画と環境認識結果に基づく作業管理システム

コンビニエンスストア模擬環境における商品陳列作業を例として、状態遷移に基づく作業記述手法を用いて環境計測に基づく対象物認識と可達域データベースに基づく動作計画を統合し、その有効性を実ロボットにより検証した。商品陳列作業に必要な対象物の認識、対象物の把持・移動のための動作計画、およびロボットによる動作実行処理を状態遷移として記述し作業の依存関係を表現することで、自律的な作業の実施とエラー検出機能を備えた作業管理システムを実現した。この作業管理システムを用いることで、例えば商品陳列作業中の外乱により陳列対象の物体の認識に失敗した場合(図 4-1)に、ロボットが自律的にエラーを検出して物体認識に失敗した物体を対象とする後続の作業を停止(図 4-2)し、遠隔指示による補助を受けてリカバリ動作を計画・実行することで自律作業に復帰する(図 4-3)ことが可能となった。目標としていた並列実行可能性を考慮した作業手順の自律的な生成までは到達できなかったものの、自律的な作業実行とエラー検出、および遠隔指示の補助を伴うエラーリカバリについて実世界での実証が達成されたと考えている。

研究期間を通じた研究成果の総括として、運動学的・力学的な制約を考慮したヒューマノイドロボットの全身動作計画手法を拡張した可達域データベースに基づく動作計画手法を開発し、機械学習を用いた環境認識手法及び自律的なエラー検出が可能な状態遷移に基づくタスク管理システムを統合することで、商品陳列作業のような実世界における作業を遂行するロボットシステムを実現した。環境認識・動作計画・作業手順を統合したシステムを開発し、コンビニエンスストア模擬環境における物体操作作業を通して実世界においてその有用性を実証したことは、実用的な意義が大きいと考えている。

〔 発表論文 〕

Iori Kumagai, Mitsuharu Morisawa, Shizuko Hattori, Mehdi Benallegue, and Fumio Kanehiro, “Multi-Contact Locomotion Planning for Humanoid Robot Based on Sustainable Contact Graph With Local Contact Modification”, IEEE Robotics and Automation Letters, issue. 5, pp.6379-6387, 2020 (査読あり、主著、論文誌)

Iori Kumagai, Masaki Murooka, Mitsuharu Morisawa, and Fumio Kanehiro, “Multi-Contact Locomotion Planning With Bilateral Contact Forces Considering Kinematics and Statics During Contact Transition”, IEEE Robotics and Automation Letters, issue. 6, pp.6654-6661, 2021 (査読あり、主著、論文誌)

Iori Kumagai, Masaki Murooka, Mitsuharu Morisawa, and Fumio Kanehiro, “Reachability Based Trajectory Generation Combining Global Graph Search in Task Space and Local Optimization in Configuration Space”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 4513-4520, 2022 (査読あり、主著、国際学会プロシーディングス)

〔 参考文献 〕

Kenji Kaneko, Hiroshi Kaminaga, Takeshi Sakaguchi, Shuuji Kajita, Mitsuharu Morisawa, Iori Kumagai, and Fumio Kanehiro. “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

Melonee Wise, Michael Ferguson, Derek King, Eric Diehr and David Dymesich. “Fetch & Freight: Standard Platforms for Service Robot Applications. In Workshop on Autonomous Mobile Service Robots, held at the 2016 International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2016.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Kumagai Iori, Murooka Masaki, Morisawa Mitsuharu, Kanehiro Fumio	4. 巻 6
2. 論文標題 Multi-Contact Locomotion Planning With Bilateral Contact Forces Considering Kinematics and Statics During Contact Transition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 6654 ~ 6661
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2021.3095517	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 -

1. 著者名 Kumagai Iori, Morisawa Mitsuharu, Hattori Shizuko, Benallegue Mehdi, Kanehiro Fumio	4. 巻 5
2. 論文標題 Multi-Contact Locomotion Planning for Humanoid Robot Based on Sustainable Contact Graph With Local Contact Modification	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 6379 ~ 6387
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2020.3013843	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 -

1. 著者名 Kumagai Iori, Murooka Masaki, Morisawa Mitsuharu, Kanehiro Fumio	4. 巻 -
2. 論文標題 Reachability Based Trajectory Generation Combining Global Graph Search in Task Space and Local Optimization in Configuration Space	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)	6. 最初と最後の頁 4513 ~ 4520
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IROS47612.2022.9981906	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Kumagai Iori, Murooka Masaki, Morisawa Mitsuharu, Kanehiro Fumio
2. 発表標題 Multi-Contact Locomotion Planning With Bilateral Contact Forces Considering Kinematics and Statics During Contact Transition
3. 学会等名 2021 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kumagai Iori, Morisawa Mitsuharu, Hattori Shizuko, Benallegue Mehdi, Kanehiro Fumio
2. 発表標題 Multi-Contact Locomotion Planning for Humanoid Robot Based on Sustainable Contact Graph With Local Contact Modification
3. 学会等名 2020 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kumagai Iori, Murooka Masaki, Morisawa Mitsuharu, Kanehiro Fumio
2. 発表標題 Reachability Based Trajectory Generation Combining Global Graph Search in Task Space and Local Optimization in Configuration Space
3. 学会等名 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------