

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K20371

研究課題名（和文）数理モデルと実演解析によるロボット身体と行動知能の同時探索の理論構築と実世界適用

研究課題名（英文）Theoretical construction and real-world application of simultaneous search of robot body and motion intelligence based on mathematical model and demonstration analysis

研究代表者

室岡 雅樹（Murooka, Masaki）

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：70825017

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、最適化に基づくロボットの動作生成手法を拡張しロボットの動作と身体を同時に探索する手法を確立することを目標とした。そのために、第一に、所与のタスクを実現する時系列のロボット姿勢列を逐次二次計画法により決定する動作生成手法を開発した。第二に、ロボットの身体構造を可変のリンク長と関節軸向きとしてパラメータ化し、先述の動作生成手法において、動作を記述するパラメータと身体構造を記述するパラメータの双方を設計変数として同時に最適化することで、関節トルクなどの指標を最小にする身体構造を決定する手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、ロボットの身体設計とロボットの動作の生成という別々に扱われることの多い2つのプロセスを同時に扱うための技術を確立することを目的とした。これにより、実行するタスクに応じて身体サイズや消費エネルギーの観点でより効率的なロボットの身体と動作を生成することで、ロボットが実社会に適用される際にその有用性を向上させることに寄与すると考える。本研究成果は、人型ロボットのアームの関節配置の探索から工場を模した環境でのマニピュレータ配置の探索まで、本技術が様々なスケールの問題に適用可能であることを示している。

研究成果の概要（英文）：The goal of this research was to establish a method for simultaneously exploring the robot's motion and body by extending the optimization-based robot motion generation method. First, we developed a motion generation method that uses sequential quadratic programming to determine a time series of robot posture sequences that realize a given task. Second, we parameterized the robot's body structure as variable link lengths and joint axis orientations, and developed a method to determine the body structure that minimizes indexes such as joint torque by simultaneously optimizing both parameters describing the motion and the body structure as design variables in the motion generation method described above.

研究分野：ロボティクス

キーワード：ロボティクス 最適化 動作計画

1. 研究開始当初の背景

少子高齢化などの社会問題に対応するために、ロボットが実世界で様々なタスクを実現することが求められている。ロボットが多様なタスクを効率的に実現するためには、タスク実現に適したロボットの身体とロボットの動作の両方が必要である。ロボットの身体を決定する問題と動作を決定する問題は、これまで分けて解かれることが多かった。しかし、本来は独立ではないこれらの問題を分けて解くことにより、真の最適性を追求することや検証することは困難となる。本研究では、この問題を打開するために、ロボットの身体と動作を同時に探索することを可能とする理論的枠組みを確立することを目指す。

2. 研究の目的

本研究では、上述の背景における問題を解決するために、所与のタスクを実行するために最適なロボットの身体構造とロボットの動作の組を探索する手法を構築することを目的とする。ロボットとしては、マニピュレータや人型ロボットの一部(腕など)を想定する。また、マニピュレータが複数配置された大規模なシステムなどへの適用の可能性も検討する。タスクとしては、エンドエフェクタを所定位置へ到達させるリーチングを扱う。時系列のリーチング位置を指定することで物体運搬などの高次のタスクを記述することも可能とする。

3. 研究の方法

本研究では、(1)最適化に基づくロボットの動作生成手法を拡張して、(2)身体と動作の同時探索手法を開発する。これらの開発にあたっては、(3)再利用性を意識した動作最適化ソフトウェアを公開することを念頭に進める。

(1)ロボットの関節角の時系列データを設計変数として動作目的を記述したタスク関数ノルムを最小化する制約付き非線形最適化問題を解くことで、ロボットの動作を生成する手法を開発する。本手法は、従来の単一時刻のロボットの関節角のみを扱う逆運動学計算の一般化と位置付けることができる。マニピュレータ、移動マニピュレータ、人型ロボットなどの多様なロボットのリーチングタスクに適用しその有効性を検証する。

(2)上述の動作生成手法において、身体構造を表すパラメータを設計変数に追加することで、ロボットの身体と動作を同時に探索する手法を開発する。ロボットの身体をアキュエータの幾何的なツリー構造とみなし、可変のリンク長や関節軸向きを表す仮想関節を導入することで、ロボットの身体構造をパラメータ化する。また、このような仮想関節の導入により、従来のロボットモデリング記法を変更することなく、身体可変ロボットを記述できることを検証する。開発した手法を、マニピュレータが所定の軌道にエンドエフェクタを到達させるための最適な身体構造を探索する問題などに適用する。最適化の指標としては、タスク誤差に加えてロボットのリンク長や関節トルクなどを扱う。

(3)ロボットの動作生成は、ロボットの身体パラメータの探索のみならず、様々な応用において必要となる基本的な機能である。しかし、本研究で開発するように時系列の逆運動学計算を可能とし、人型ロボットや複数のロボットにまで適用できる汎用性を有し、さらにロボットの動作の三次元視覚化などのユーティリティ機能を備えた動作生成ソフトウェアの公開例は極めて限定的である。本研究では開発成果をオープンソースとして公開し、グループ内外の他の研究で効率的に活用することを目指す。

4. 研究成果

前項に記述した3点についてそれぞれの成果を以下に記述する。

(1)ロボットの動作を離散時刻での関節角の列として表現し、これを最適化の設計変数とすることでロボットの動作を生成する手法を考案し有効性を検証した。

本手法は従来の逆運動学計算に比べて、時系列データを生成する点と高度な最適化手法を利用する点に特徴があり、時系列逆運動学最適化計算と呼ぶ。非線形のタスク関数から構成され

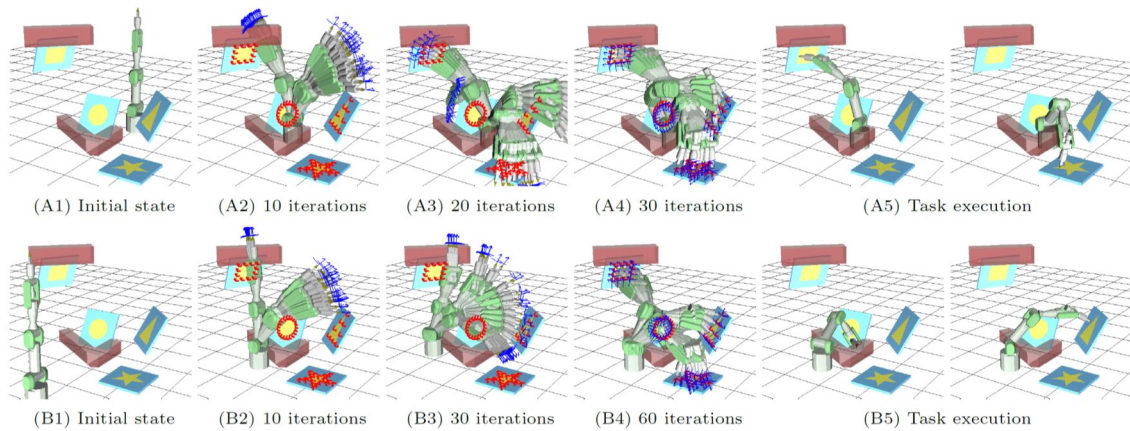


図 1 : 時系列逆運動学最適化計算のマニピュレータへの適用例

る目的関数や関節可動域・干渉回避を表す不等式制約の取り扱いを可能とするために、非線形最適化手法のひとつである逐次二次計画法を利用した。本手法により、図 1, 2 に示すように固定マニピュレータ、モバイル双腕マニピュレータ、人型ロボットの動作が生成されることを確認され、成果をまとめた筆頭著者論文が論文誌に採録された。

上述の手法では、ロボットの幾何条件のみから表現されるタスクや制約を扱うものであり、関節トルク制約などを陽に扱うことは困難であった。この課題を解決するために、ロボットの接触力や関節トルクを設計変数に含めることで静力学・動力学条件まで考慮可能な時系列最適化計算を開発した。これにより、関節トルク制約を考慮しながら人型ロボットが重量物を持ち上げる操作が実現可能であることが示された。

本成果は、共著論文としてロボティクス分野のトップ国際学会において発表された。

本手法における最適化計算で利用した逐次二次計画法は、非線形の目的関数や制約を柔軟に扱うことが可能である。この利点を、ロボットにおいて提案例の少ない全身部位が接触する動作の生成に活用できると考え、全身接触姿勢生成手法を開発した。ロボットのリンク表面上の接触点を設計変数に含めることで、関節角と接触点が同時に探索可能となり、双腕ロボットが大型物体を腕で抱え込むような動作が、従来の逆運動学計算を一般化する拡張により生成できることを示した。本成果をまとめた筆頭著者論文が国際論文誌に採録された。

(2) ロボットの身体と動作を表すパラメータを、与えられた指標が最適になるように、同時に探索する手法を開発した。

時系列逆運動学最適化計算においてロボットの身体を扱うためには、ロボットの身体をパラメータにより表現する必要がある。本研究では、ロボットの身体をリンクにより接続された関節のツリー構造とみなし、リンク長や関節軸向きを表す仮想関節を導入した。ロボットモデルの一般的な記述様式である URDF モデルに仮想関節を追加することで、単一のロボットモデルに記述されたパラメータを変更するだけで、ロボットの身体構造と関節角を同時に変更できる。この表現は、ロボット分野で広く用いられているソフトウェアを再活用するために有用である。

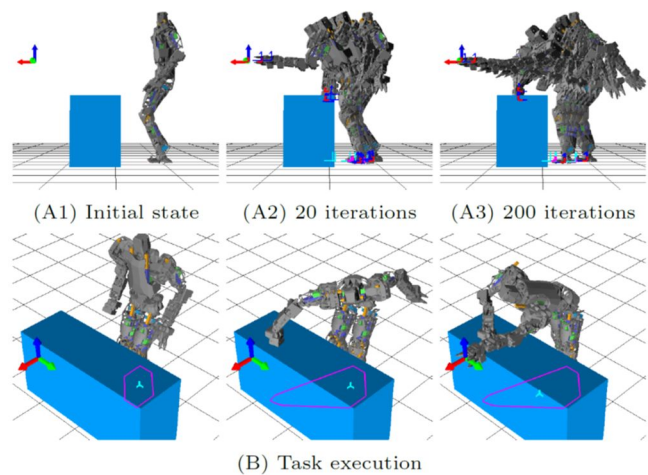


図 2 : 時系列逆運動学最適化計算の人型ロボットへの適用例

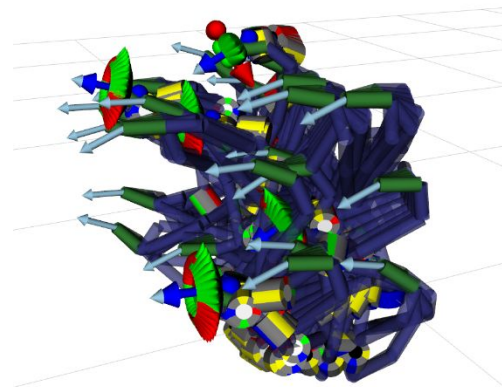


図 3 : マニピュレータ構造最適化の例

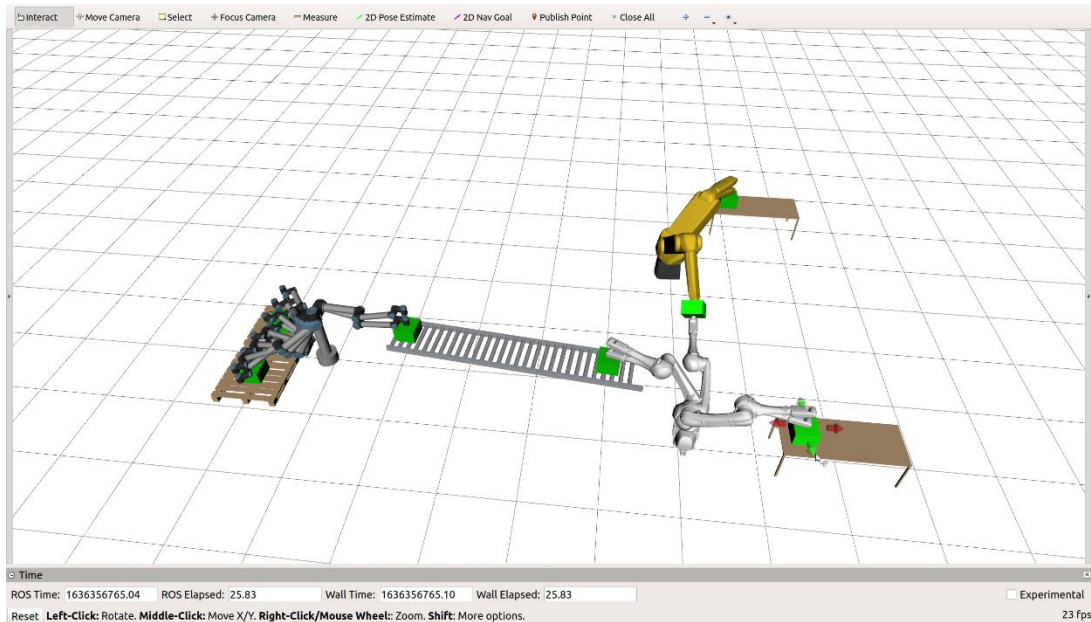
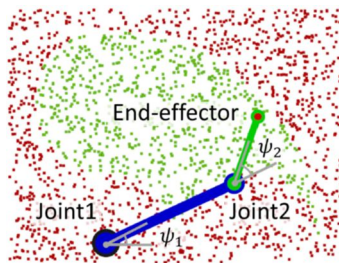
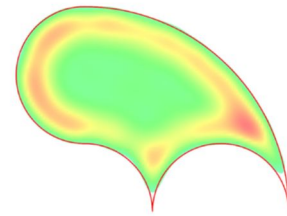


図4：複数マニピュレータの配置最適化の例

ロボットの身体パラメータ（リンク長や関節軸向きに対応する仮想関節変位）と動作パラメータ（時系列の関節角）を設計変数として、タスク誤差と身体指標からなる目的関数を最小化する最適化問題を逐次二次計画法により解くことで、ロボットの身体と動作の同時最適化手法を実装した。これにより図3に示すように、人型ロボットの腕を想定したマニピュレータが指定位置セットにリーチング



(A) Sample set generation



(B) Reachable region

図5：リーチャビリティマップのデータ・ドリブン獲得の例

ることのできるリンク長や関節軸向きの中で、リンク長の総和が最小になるような身体パラメータを決定する問題が解けることが確認された。さらに図4に示すように、複数のマニピュレータが物体を受け渡ししながら所定の位置まで運搬する工場を模した環境において、マニピュレータの配置を身体パラメータとすることで、物体の移動経路が最短となるようなマニピュレータ配置を決定できることが確認された。これは、本手法が単一のロボットのみならず複数のロボットからなるシステムにまで適用できる汎用性や拡張性を有していることを示している。身体パラメータや動作パラメータの次元が増大するに応じて計算コストが増大するが、それらのパラメータの関係は疎であり、目的関数や制約のヤコビ行列のスパース性を考慮可能な二次計画ソルバーを用いることで、計算コストの増大を緩和させた。

上述の身体・動作同時最適化手法を実装している過程において、ロボットのエンドエフェクタの可到達性（リーチャビリティ）をロボットモデルからデータ・ドリブンに獲得するアイデアを得た。本手法では、タスク空間において到達可能な点と到達不可能な点のセットから、可到達性を表す連続関数を学習する。そのような学習が可能な手法は複数あるが、本研究ではサポートベクトルマシン（SVM）を用いることで、図5に示すようにマニピュレータや人型ロボットのリーチャビリティマップが精度よく獲得されることを確認した。さらに、One-class SVMと呼ばれる陽データのみから学習可能な手法を用いることで、到達不可能な点を必要とせずにリーチャビリティマップを獲得可能であることを示した。本成果について、筆頭著者論文を国際学会へ投稿し査読中であるとともにドキュメントやソースコードをGitHub上で公開した。

(3)本研究では、時系列姿勢や複数ロボットを扱うことが可能なロボット動作生成のソフトウェアを開発した。さらに、ロボットオペレーティングシステム（ROS）で広く使われている可視化ツールRvizにおいて、ロボットの時系列姿勢を可視化するプラグインを開発し、効率的に検証を行った。これらのソフトウェアはGitHub上で公開されており、複数の研究テーマにおいて有効に活用されている。

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 Masaki Murooka, Kei Okada, Masayuki Inaba	4. 巻 5
2. 論文標題 Optimization-Based Posture Generation for Whole-Body Contact Motion by Contact Point Search on the Body Surface	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 2905-2912
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LRA.2020.2974689	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 室岡 雅樹, 垣内 洋平, 岡田 慧, 稲葉 雅幸	4. 巻 55
2. 論文標題 コンフィギュレーションの時変・時不変性と隣接性を考慮した時系列逆運動学最適化計算によるロボット運動生成	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 664-673
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.9746/sicetr.55.664	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 Riku Shigematsu, Masaki Murooka, Yohei Kakiuchi, Kei Okada, Masayuki Inaba	4. 巻 1
2. 論文標題 Generating a Key Pose Sequence Based on Kinematics and Statics Optimization for Manipulating a Heavy Object by a Humanoid Robot	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)	6. 最初と最後の頁 3852-3859
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/IROS40897.2019.8967902	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0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

ロボット動作最適化ソフトウェア
<https://github.com/isri-aist/optmotiongen>

リーチャビリティマップ学習ソフトウェア：
https://github.com/isri-aist/differentiable_rmap

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