

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03315

研究課題名（和文）運動最適化と深層学習の融合理論による力学コンシステントな人の運動生成

研究課題名（英文）Physically consistent human motion generation based on fusion theory of motion optimization and deep learning

研究代表者

鮎澤 光（Ayusawa, Ko）

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：60649086

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）：本研究では、運動に関する動力学整合性を実現できる運動最適化理論、および人の運動データに基づく深層学習を融合させて、力学的整合性を持つ人の運動生成を扱える方法論の構築を行った。個々の技術としては、様々な物理的変数を扱うための運動最適化における勾配計算の高速計算法、人骨格系の運動学的整合性を持つ深層学習ネットワークの構築、速度・加速度・外力などの力学的評価を可能とする実用的な運動生成法、などを開発した。実問題への応用例として、ビデオ画像や慣性センサなどの運動計測デバイスに基づく人筋骨格運動のリアルタイム推定、人型ロボットによる力学的整合性を持つ人動作再現、などを実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

運動最適化と機械学習を融合させることで、簡易的な計測から力学的整合性を持つ人の運動生成を実現させる方法論を開発した。最適化理論の観点からは学習により冗長性問題を解決し、機械学習の観点からは運動最適化により力学的整合性を実現させた。これにより、人の運動に纏わる力学的整合性・冗長性問題を同時に扱えるという学術的意義を示せた。また、ビデオ画像や慣性センサなどの計測デバイスによる人の実時間筋骨格運動解析技術は、スポーツ・リハビリなどの特定の場面だけでなく、人の運動モニタリングによる健康・労務管理などの日常生活や労働環境において活用できることが期待されるため、社会的・産業的な波及効果も期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed a new methodology that can generate physically consistent human movements by combining motion optimization theory for physical consistency and deep learning based on a motion dataset. We have developed an efficient method for gradient computation in motion optimization which can handle various physical quantities, a method for constructing a deep neural network considering kinematics consistency of the human skeletal system, and a motion generation method that can evaluate mechanical properties such as velocities, accelerations, and external forces. As application examples, we have developed a real-time estimation of human musculoskeletal motion by using measurement devices such as 2D video images and inertia sensors, and a motion retargeting method from humans motion to humanoid robots.

研究分野：ロボティクス

キーワード：人運動解析 ヒューマノイド 運動最適化 深層学習

## 1. 研究開始当初の背景

人型ロボットに関する力学理論の進展は、人の運動解析の分野においても貢献してきた。ロボットの力学理論は、物理世界でロボットを制御することが本来の用途であるため、実際に実行可能である力学的な整合性をもつ運動を扱える利点がある。特に、力学理論と最適化理論を融合した運動最適化理論の発展により、運動や力に関する力学的評価に基づいて、力学的整合性をもつ運動を推定・生成する理論的な土台ができつつある。しかし人の運動解析では、観測できる情報量に対して推定すべき物理量の方が多いという、冗長性問題に直面する。前述の理論は、運動に関する評価を与えて運動を決定するだけのものである。実験室環境では計測情報量が多いため顕著ではないが、屋外スポーツや工場で働く労働者の計測といった応用的場面では、評価に必要な事前情報量が圧倒的に不足するため、最適化理論単体では冗長性問題を解決できない。冗長性問題を解決する糸口として、運動データによる機械学習が候補にあがる。特に、画像認識の分野では、深層学習が話題を集めており、例えば二次元画像から人の身体姿勢を推定する研究もされている。ただし、動画像から運動を復元する場合、動画像中の一枚一枚の画像から身体姿勢を独立に復元するため、生成される動作は力学的整合性を持ちえない。力学的な整合性のとれた質の高いデータベースも現存しておらず、バイオメカニクスやロボットの制御などの用途において、深層学習など機械学習単体による運動の力学的整合性の実現は未だ困難である。

## 2. 研究の目的

本研究では、運動に関する動力学整合性を保障できる運動最適化理論と、運動データに基づく深層学習を代表とした機械学習的アプローチとを融合させて、力学的整合性を持った運動の学習と生成を行う方法論を構築することを目的とする。最適化理論の観点からは学習による冗長性問題への有効性を検証し、また機械学習的観点からは運動最適化による運動の力学的整合性を持ち得るかを検証する。

## 3. 研究の方法

力学的にコンシステントな人の動作生成を実現するため、運動最適化・深層学習に関する基盤構築を行い、人の運動に関する学習と生成を行う。後者については、幾何学的整合性、微分幾何学的整合性、動力学的整合性を持った動作生成を段階的に取り組む。各研究項目は以下ようになる。

### (1) 運動最適化・深層学習に関する基盤構築

- (1-1) 運動最適化における高速な勾配計算法の開発
- (1-2) 運動生成のための深層学習ネットワーク構築と公開データベースとの連結
- (1-3) 個人差を反映した人体力学モデルの同定と生成

### (2) 力学的にコンシステントな運動の学習と生成

- (2-1) 運動学計算の統合による二次元静止画像から三次元姿勢生成
- (2-2) 微分運動学計算の統合による速度・加速度に関して整合性を持つ三次元動作生成
- (2-3) 動力学計算の統合による運動・接触力に関して整合性を持つ三次元動作生成

## 4. 研究成果

平成30年度では、運動最適化・深層学習に関する基盤構築を主に行い、以下の成果が得られた。

- (1) 運動最適化における評価関数の勾配の高速計算法を開発した。身体部位の位置・速度・加速度・力に関する、関節の角度・速度・加速度に関するヤコビ行列の計算法が提供されているが、物理量の数に比例したヤコビ行列の計算が必要となり、膨大な学習時間が必要となる。本手法はヤコビ行列を直接計算しないことで高速化を実現している。この手法を人型ロボットの力学モデル同定および幾何学的な人動作再現に応用し、その有効性を示した。
- (2) 深層学習において幾何学的整合性を組み込むネットワーク構造を提案した（図1）。各関節への相対姿勢を内部変数として導入し、正規直行性を保つ姿勢行列演算を導入することで、人の骨格の幾何学的条件を扱った。また既存の公開データベースと接続し、三次元空間を二方向の関節中心画像で表現してパラメータ数削減と深度方向推定を行い、二次元画像から三次元的な関節運動を推定可能なネットワークを構築した。

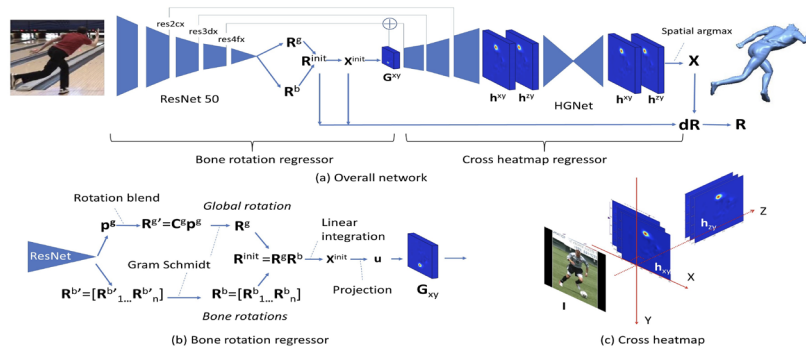


図1 関節姿勢に関する整合性を満たし二次元画像から三次元姿勢を推定するネットワーク

令和1年度では、運動最適化・深層学習の基盤を用いることで、人筋骨格運動解析への応用を主にいき、以下の成果が得られた。

- (3) 運動最適化に基づく人の運動計算法と深層学習を用いた運動推定法を融合することで、ビデオカメラ等から得られる二次元画像から人筋骨格モデルなどの人型モデルを用いた逆運動学・逆力学解析をリアルタイムで行う手法の開発を行った（図2）。従来の運動最適化の中に深層学習を組み込むことで、慣性センサなどを用いた精度の高い運動解析法とビデオカメラ等の簡便で利便性の高い運動解析法を同時に実現することができる。
- (4) 上記の運動最適化と深層学習に基づく運動推定法を発展させ、計測デバイスの入力組み合わせをリアルタイムで取捨選択できる筋骨格運動解析システムを開発した。本システムでは計測状況に適した計測デバイスに基づいて人の運動推定を行うことができる（図3）。また人の体型データベースに基づいて推定されたパラメータを事前知識として、身長・体重などの簡易的パラメータから個々人の筋骨格モデルの生成を行った。
- (5) 人の運動において速度・加速度に関して整合性を持つ運動最適化法の開発を行った。速度・加速度に関する整合性を扱う場合、各時刻における関節角度の復元誤差が大きく変動するため、速度・加速度に関する最適化がコントロール不能になる問題があった。予見制御の導入により未来の運動軌道を予測することで、速度・加速度のコントロールを可能とした。ロボットによる人の運動復元という問題に対して、本手法の有効性の検証を行った（図4）。

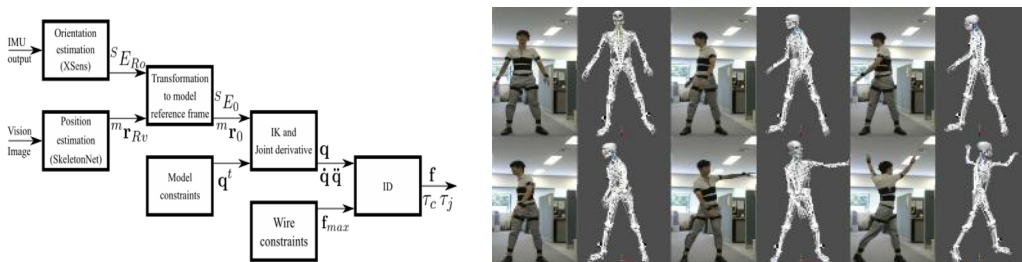


図2 運動最適化と深層学習に基づくリアルタイム人筋骨格運動推定

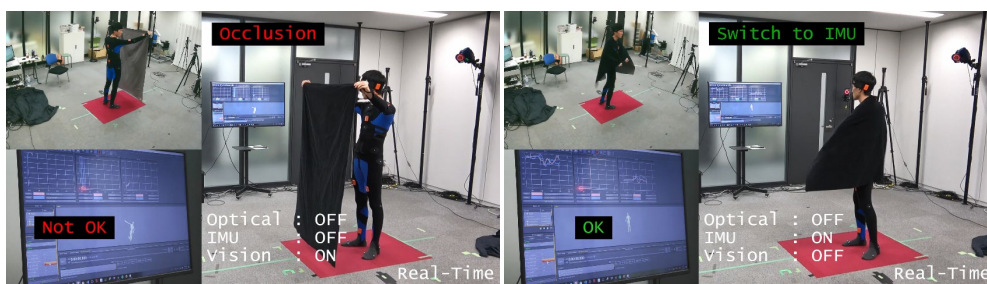


図3 様々な計測デバイスをリアルタイムで切り替え可能な筋骨格運動解析システム

令和2年度は、力学的整合性をもつ人動作生成の可否を検証するため、実世界において人型ロボットによる人動作生成を主に行い、以下の成果が得られた。

- (6) 運動における速度・加速度に関するパラメータを変数として扱うことができる運動最適化の枠組みを応用することで、外力が伴う人の運動を学習して人型ロボットで再現する技術を開発した。アシスト機器を用いた人の運動データを計測し、運動と外力のデータセットを用いて力学的な運動場へ変換・学習を行い、運動最適化に基づいて人から人型ロボットの運動へと変換し、人型ロボットによる人の動作を実験的に生成できた(図5)。実機実験により、動力学的に整合性を持つ人の運動生成が実現できていることを確認した。
- (7) これまでの運動最適化や機械学習において用いられる運動に関する評価関数あるいは損失関数の設計は既知としてこれまで扱っていた。人の運動データからこれら評価関数の設計法を抽出する逆問題(逆最適化問題)は、計算難度が高いため複雑な人型システムでの実現は困難であった。一方、様々な評価指標を用いて人型システムの運動を生成し、それら運動データベースを構築し、低次化された運動と評価関数の関係を学習して低次元空間を構成し、疑似的ではあるが逆運動最適問題を高速に解く手法を開発した。

#### ロボットによる人動作再現

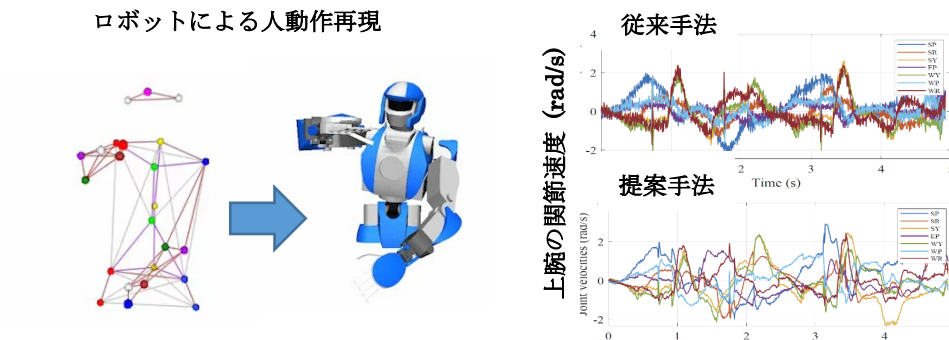


図4 速度・加速度の整合性を満たす運動最適化とロボットによる人動作再現への応用



図5 人の運動・外力のデータに基づく力学場を用いたロボットによる人動作再現

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ito Takahiro, Ayusawa Ko, Yoshida Eiichi, Kobayashi Hiroshi	4. 巻 5
2. 論文標題 Simultaneous Control Framework for Humanoid Tracking Human Movement With Interacting Wearable Assistive Device	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 3604 ~ 3611
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2020.2979663	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 Shimizu Soya, Ayusawa Ko, Venture Gentiane	4. 巻 1
2. 論文標題 Motion Synthesis Using Low-Dimensional Feature Space and Its Application to Inverse Optimal Control	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 23rd CISM IFToMM Symposium	6. 最初と最後の頁 503 ~ 511
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-58380-4_60	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 Samy Vincent, Ayusawa Ko, Yoshiyasu Yusuke, Sagawa Ryusuke, Yoshida Eiichi	4. 巻 1
2. 論文標題 Fusion of Multiple Motion Capture Systems for Musculoskeletal Analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. of the IEEE/SICE International Symposium on System Integration	6. 最初と最後の頁 295-299
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/SII46433.2020.9025818	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 Ayusawa Ko, Suleiman Wael, Yoshida Eiichi	4. 巻 1
2. 論文標題 Predictive Inverse Kinematics: optimizing Future Trajectory through Implicit Time Integration and Future Jacobian Estimation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems	6. 最初と最後の頁 566-573
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IRoS40897.2019.8968110	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 該当する

1. 著者名 Samy Vincent, Ayusawa Ko, Yoshiyasu Yusuke, Sagawa Ryusuke, Yoshida Eiichi	4. 巻 1
2. 論文標題 Musculoskeletal Estimation Using Inertial Measurement Units and Single Video Image	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of the IEEE Int. Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts	6. 最初と最後の頁 39-44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ARSO46408.2019.8948820	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 Yoshiyasu Yusuke, Sagawa Ryusuke, Ayusawa Ko, Murai Akihiko	4. 巻 1
2. 論文標題 Skeleton Transformer Networks: 3D Human Pose and Skinned Mesh from Single RGB Image	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. of Asian Conference on Computer Vision	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-20870-7_30	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Mori Kenya, Ayusawa Ko, Yoshida Eiichi	4. 巻 1
2. 論文標題 Online Center of Mass and Momentum Estimation for a Humanoid Robot Based on Identification of Inertial Parameters	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. of the IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots	6. 最初と最後の頁 257-263
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/HUMANOIDS.2018.8625037	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 Masuda Shimpei, Ayusawa Ko, Yoshida Eiichi	4. 巻 1
2. 論文標題 Optimization Framework of Humanoid Walking Pattern for Human Motion Retargeting	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. of the IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots	6. 最初と最後の頁 725-731
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/HUMANOIDS.2018.8625060	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 0件）

1. 発表者名 Ayusawa Ko
2. 発表標題 Motion Optimization Framework of Humanoid Systems toward Human Ergonomic Analysis
3. 学会等名 The 6th Symposium on Theoretical and Applied Mechanics
4. 発表年 2020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
研究 分担者	吉安 祐介  (Yoshiyasu Yusuke)  (10712234)	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)	

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