

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820082

研究課題名(和文)時空間最適化による人の身体力学系のバイオメカニカルコンピューティング

研究課題名(英文)Biomechanical computing of humanoid dynamics based on spatiotemporal optimization

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・知能システム研究部門・研究員

研究者番号：60649086

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：ロボティクスで発展してきた人型ロボットの力学の計算技術は、人の身体モデリングや運動解析の方法論に貢献してきた。また人の解析で得られる知見は、ロボットの設計や制御問題に新たな切り口を与える。本研究課題では、人体・人型ロボットの双方に適用できる人型システムの力学計算を基盤とし、パラメータ同定問題、運動復元・計画問題、運動評価問題を統合的に解く時空間最適化法とその計算技術を開発した。その応用例として、力学モデルのパラメータ同定法を開発し、関節トルク推定に基づく身体負荷の評価に適用した。また人・ロボットの双方の運動を同時に扱える特性を利用し、人型ロボットによる人動作の模擬と評価への応用を行った。

研究成果の概要(英文)：The dynamics computation techniques developed in the field of humanoid robotics have been contributing to the methodology development of the modeling of human body and the analysis of human motion. The knowledge obtained from the human analysis is also feedback to the design and the control of robots. In this project, the computational framework of the spatiotemporal optimization for humanoid systems was developed. It can handle the parameters identification, motion planning and analysis simultaneously. The framework was applied for the physical load estimation based on the identification of the humanoid dynamics. Since the proposed optimization can evaluate the motion features of both a humanoid robot and a human body, it was also tested on the motion retargeting and evaluation between two humanoids systems.

研究分野：ロボティクス

キーワード：動力学計算 システム同定 運動解析 運動計画 運動最適化 ヒューマノイドロボット

1. 研究開始当初の背景

ロボティクスで発展してきた力学計算の技術は、人の運動解析の方法論に大きく貢献をしてきた。特にヒューマノイドロボットの分野における力学計算やパラメータ同定に関する計算技術の進展は、人の身体モデリング、身体運動の解析、体性感覚情報の推定に関連した方法論に対して、新たな切り口を与えてきた。ロボティクス、バイオメカニクスの双方において、力学計算に基づくパラメータ同定や運動解析問題は、計測された時系列データに基づいて運動軌道を復元した後、パラメータの同定や体性感覚の推定などの力学解析を行うという二段構えの解法が利用される場合が多い。計算コストは低いが、得られた答えが必ずしも物理的に実現可能な値を持つとは限らず、物理的整合性を持つように修正した場合は、計測データとの整合性が失われる。近年では計算技術の進展により、運動軌道全体を未知としたまま、計測された時系列データを復元しつつ、解析や推定で前提となる力学整合性を同時に考慮することが可能になってきた。自由度の小さな多体系モデルでは実現可能であるが、人型システムでは効率的な時空間最適化問題の構築とその数値計算手法の開発がいまだに課題である。人型システムにおいて実用的な計算法を実現することは、独立に処理されてきた身体モデリング、身体運動の解析、体性感覚情報推定を統合するフレームワークを提供し、各種整合性を満たした精度の高い運動解析の実現、スポーツ分野での人の運動改善の支援、産業分野での人中心設計支援や製品評価への応用を行う上で重要な課題である。

2. 研究の目的

研究代表者は過去に以下の研究を行ってきた。人体モデル・ヒューマノイドロボットを含めた人型システムにおいて、モーションキャプチャと床反力計を用いた運動計測により、各身体部位の寸法や質量・重心・慣性テンソル(力学パラメータ)を求めるパラメータ同定法を開発した。また得られた力学モデルを基盤として、モーションキャプチャで得られたデータから、力学計算と最適化計算の技術を応用することで、人の身体内部に働くトルク・筋張力を推定する技術を開発してきた。どちらも、計測された時系列データから運動軌道を復元した後、直接計測困難なパラメータを同定・推定する問題である。既に前述したとおり、力学的な整合性を満たす精度の高い解析を行う上では、運動軌道を必ずしも既知とせず同定・推定を行う手法が望ましいが、その軌道の時間・空間の双方を考慮した最適化計算の定式化および計算コストが研究課題である。これを実現するために以下の項目の開発を実施した。

(1) 時空間最適化法の開発

人型ロボットの分野における動力学計

算・運動計画法の計算技術を基盤とし、人・ヒューマノイドロボット双方に適用できる人型システムの力学計算を拡張し、パラメータ同定問題、運動復元・計画問題、運動評価問題を統一的に解く時空間最適化法を開発する。また効率的な計算方法を開発する。

(2) パラメータ同定への応用

人型システムのパラメータ同定問題を時空間最適化問題として拡張する。すなわち観測される時系列データを必ずしも真とせず、各身体部位の力学パラメータや摩擦・アクチュエータモデルのパラメータを同定する手法を開発する。これにより精度の高い力学シミュレーションのための推定モデルを獲得することを目的とする。

(3) 運動計画・推定問題への応用

人型システムの統一的な時空間最適化問題の応用例として、計測した人の運動をヒューマノイドロボットにおいて動作再現(運動リターゲットング)する手法を開発する。この応用例では、人・ロボットの双方を取り扱い、人の運動推定・パラメータ同定・ロボットの運動生成の3種の問題を同時に扱うため、本研究課題である時空間最適化法の有用性を検証できる。また運動リターゲットング技術はロボットの動作生成に有用なツールである。特に近年のヒューマノイドの応用として、人と身体特徴の類似性が高いヒューマノイドに人間動作を模倣させて、ロボットのセンサでトルク等の力情報を計測して、人体モデルの力推定問題の検証や指標として利用することが期待されている。ここでは、特にヒューマノイドで再現された動作のうち、動作特徴がどのように改変されるかを定量的に評価する手法を開発する。

3. 研究の方法

人型システムの力学計算・パラメータ同定・運動計画問題・運動推定問題を統一的に解くためのフレームワークを構築するために、以下の要素技術の開発を行った。

(1) 人型システムの運動に関する時間軌道最適化計算

パラメータ同定・運動計画問題・運動推定問題を統一的に解くための最適化問題を定式化する。具体的には、人型システムの一般化座標の運動時系列で構成される運動軌道について、差分法を用いて有限の軌道パラメータを用いて軌道を補間して運動軌道を表現する。またモデルは幾何学パラメータ等のモデルパラメータを変数とし、これらが変化することでモデルは構造的に変形される。評価関数は、モーションキャプチャシステムから得られるマーカ位置などの時系列データと未知の運動軌道との誤差関数として、これを先の軌道パラメータおよびモデルパラメータの関数とする。次にモデルパラメータに

関する整合条件や運動時の関節の稼動範囲や転等を防ぐための重心に関する軌道パラメータの制約などの力学的整合条件を拘束条件として与える。以上に基づき、時空間最適化問題を定式化する。

(2) 人型システムの力学パラメータの同定と製品評価への応用

人型システムのパラメータ同定問題を時空間最適化問題として拡張する。これまでに開発してきた脚システム特有性質である、ベースリンクの運動方程式の特徴を用いた力学パラメータの同定法を基盤とする。本課題ではヒューマノイドロボットのパラメータ同定問題に焦点を当てる。ベースリンクの力学に基づいた力学パラメータの同定に加えて、モータで駆動される関節モデルのパラメータ、すなわちアクチュエータ定数や関節摩擦などの機械定数を、モータの電流時系列データから同定する。同定時では、関節トルクの時系列データは未知とする。上記のパラメータ同定により、運動時の関節トルクの推定精度を向上させる。本課題では精度の高い関節トルク推定の応用例として、ヒューマノイドロボットのトルク推定値を用いた人アシスト製品の評価に適用する(図1)。

S1. Motion measurement S2-a. Retargeting S2-b. Identification

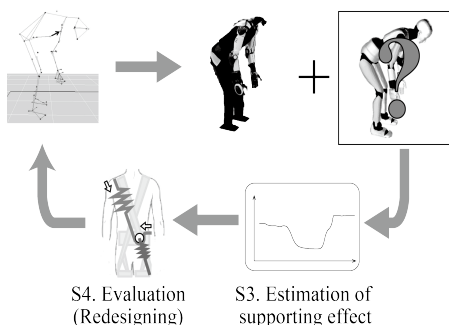


図1 パラメータ同定を用いたヒューマノイドの関節トルク推定に基づく製品評価

(3) 人・ヒューマノイドロボット間の運動リターゲティング

人の動作をロボットに再現させるリターゲティング問題を時空間最適化問題として扱うことで、人の観測された時系列データを最も再現し、かつロボットの幾何学的・力学的整合性を満たし、被験者の幾何パラメータおよび被験者・ロボットの双方の未知運動時系を同時に求める問題として定式化する(図2)。特に幾何学的なモデルパラメータはロボットの仮想的な関節角度として記述することで、モデルパラメータと軌道パラメータを統一した逆運動学問題として扱うことで、ロボットの高速な逆運動学計算法を用いて計算量を削減する。また人動作とロボッ

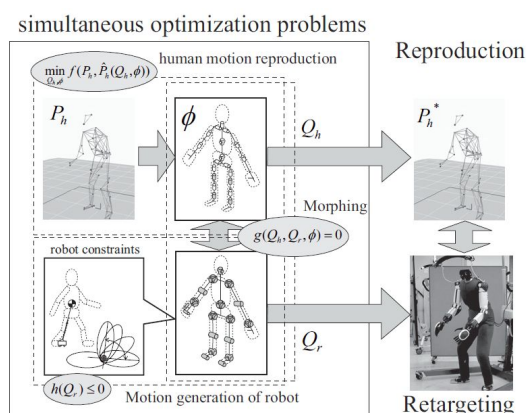


図2 人・ヒューマノイド間の動作リターゲティング

ト動作の双方を同時に求めることで、ロボットの再現時に改変された運動特徴量を逆に人間の計測データに逆再現させることで、リターゲティングによる改変を人の運動において直接的に比較する。

4. 研究成果

(1) 人型システムの運動に関する時間軌道最適化計算の開発

パラメータ同定・運動計画問題・運動推定問題を統一的に解くための最適化問題を定式化した。人型システムの一般化座標の運動時系列で構成される運動軌道を表現する軌道パラメータとモデルパラメータを変数として、モーションキャプチャの計測値と運動学・動力学計算に基づく推定値との誤差を評価関数とし、人型システムの関節可動域、速度・加速度条件、接触条件、重心のバランス条件を拘束条件とした時空間最適化問題を解く計算ライブラリを開発した。これらを用いてパラメータ同定およびリターゲティングへ応用を行った。

関節トルクや加速度などの動的特徴量を含む評価に基づいた計算難度の高い最適化計算を実現するため、関節トルク・身体加速度に対する関節角度・速度・加速度に関するヤコビ行列の高速計算法を開発した。従来の計算手法の場合、あるリンク加速度やある関節トルクのヤコビ行列に関する計算量のオーダーは、関節の自由度の二乗に比例していた。一方、開発した計算手法の計算量は関節の自由度に高々比例する程度であり、計算オーダーの改善を実現した。

(2) 人型システムの力学パラメータの同定法の開発と製品評価例

ロボットの運動計測データから以下のパラメータ群を同定する技術を開発した。

- ・各身体部位の力学パラメータ
- ・アクチュエータ・関節モデルのパラメータ

本技術では、床反力計測に基づくロボットの力学パラメータ同定法を基盤とした。従来技術では力学パラメータのみを同定するが、各関節のモータ電流値を利用することで、モータ定数・各種摩擦係数も同時に同定できる。また工業用マニピュレータの同定で広く利用されている技術と異なり、モータ定数などのアクチュエータのモデルパラメータが未知な場合でも同時に同定ができる点が特徴である。本技術に基づいて同定した関節モデル・力学モデルを用いることで、運動時における関節トルクを精度良く推定することができる(図3)。

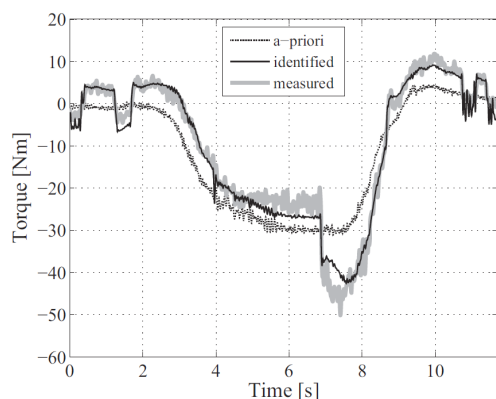


図3 パラメータ同定に基づく腰関節トルク推定 (measured: 計測値、identified: 同定モデルからの推定値、identified: C A Dモデルからの推定値)

上記の関節トルク推定の応用例として、ヒューマノイドロボットにウェアラブルアシスト機器を装着して、機器のアシストトルクを定量的に求めるフレームワークに適用した。ここでは、以下の2通りの方法により、アシスト効果を推定した。

(方法A) アシスト機器を装着した場合とそうでない場合で、ロボットに全く同一の動作軌道を再現させて、その関節トルク値の差分からアシスト効果を抽出する。

(方法B) アシスト機器を装着したロボットに任意の動作を再現させて関節トルク値を得る。次に機器を装着しないシミュレーションモデルから関節トルクを計算して、それらの差分からアシスト効果を抽出する。

(A)は推定精度が高く、(B)は再現動作の任意性が高い。本課題ではゴムバンドなどの受動的要素で構成されたサポートスーツ「スマートスーツ」を装着したロボットに基づいて計測実験を行い、パラメータを同定しつつ、手法(A)と(B)でアシスト力を推定した。推定されたアシスト力は、機器の設計パラメータから求まるアシスト力の波形を再現した(図4)。

精度検証のため、推定トルクから機器モデルのパラメータ(ゴムバンドの剛性)を逆推定して実測値と比較した結果、手法(A)の誤

差は6.1%に留まった。一方、手法(B)の誤差は8.3%程度と少し大きな値となった。一方でパラメータ同定を一切行わず製造者から提供されたパラメータのみを用いた場合、誤差は66.7%となった。このことから、本パラメータ同定を用いたトルク推定の有用性が示された。

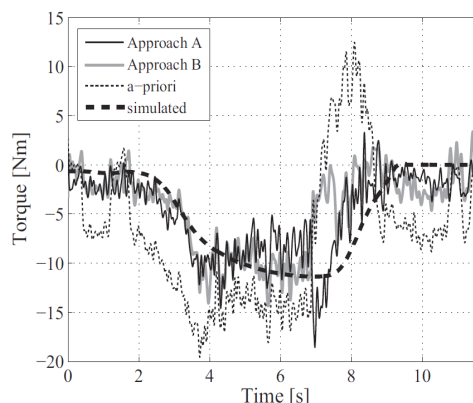


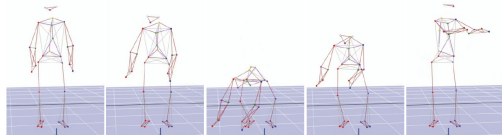
図4 アシスト機器による腰関節におけるアシストトルクのグラフ (Approach A, B: 方法(A)・(B)による推定値、a-priori: C A Dモデルによる推定値、simulated: 機器の設計モデルによる推定値)

(3) 人・ヒューマノイドロボット間の運動リタargeting法の開発

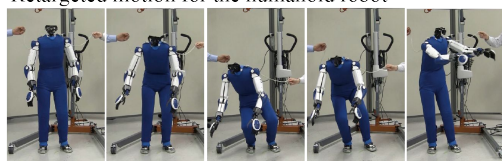
本課題で開発してきた時空間最適化手法の応用として、人の運動計測データからロボットの運動を生成する動作リタargetingに適用した。本手法では、任意の体型をした人の計測動作からロボットで再現可能な動作への変換を行うことができる。一方で、ロボットで再現可能な動作に変換される過程において、力学的あるいは制御的な制約に基づいて、元々の計測動作は必ず修正を余儀なくされる。これまでのリタargeting技術の課題は、動作再現時に上記のような修正がどのように起きているかを確認することが困難であり、計測動作において本来評価したい特性が損なわれるか否かを判断することができなかった。本課題で開発した最適化法に基づくリタargetingでは、計測された人の動作をロボットで再現可能な動作への変換を行う過程で、逆にロボットで実際に生成された動作を人動作へ逆リタargetingできる。図5の上段ではモーションキャプチャシステムにより計測された人動作、中段では動作リタargetingにより生成されたロボットの模擬動作、下段ではロボットの模擬動作を逆再現した人動作の例を示している。本手法では、上段と下段の人動作を直接的に比較することができる。図6は前述した計測された人動作と逆再現された人動作における腰関節角度軌道を示しているが、例えばロボットの関節可動域の問題

によって、動作再現時に腰を大きく曲げるときに改変を余儀なくされていることが分かり、またその改変量を定量化することが可能である。このように元々の人の計測動作と逆再現された動作とを直接比較できるため、人動作の再現度を定量化する上で実用性が高く、本課題で開発してきた基礎理論の有用性を示すことができた。

Original captured human motion



Retargeted motion for the humanoid robot



Reconstructed human motion after retargeting

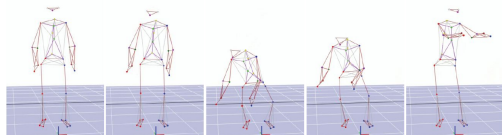


図 5 ロボットによる人計測動作の模擬と模擬動作に対応する人動作の逆再現

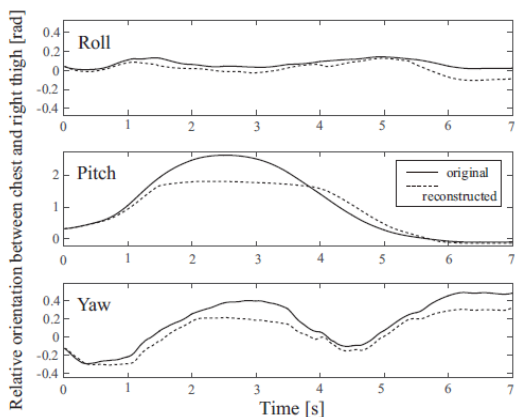


図 6 計測した人動作と逆再現された人動作における腰関節角度軌道の比較

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- [1] K. Ayusawa, E. Yoshida, Y. Imamura, T. Tanaka, "New evaluation framework for human-assistive devices based on humanoid robotics", *Advanced Robotics*, vol. 30, no. 8, pp. 519-534, 2016.

〔学会発表〕(計 4 件)

- [1] K. Ayusawa, M. Morisawa, E. Yoshida, "Motion retargeting for humanoid robots based on identification to preserve and reproduce human motion features", *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2774-2779, 2015.

- [2] K. Ayusawa, S. Nakaoka, E. Yoshida, Y. Imamura, T. Tanaka, "Evaluation of assistive devices using humanoid robot with mechanical parameters identification", *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Humanoid Robots*, pp. 205-211, 2014.

- [3] 鮎澤光, 森澤光晴, 吉田英一, "人の動作特徴を陽に組み込み可能なヒューマノイド動作再現", *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015*, 1P2-B06, 2015.

- [4] 鮎澤光, 吉田英一, 今村由芽子, 田中孝之, "Effect of Joint Parameters Identification of Humanoid Robot on Evaluation of Assistive Devices", *第 32 回日本ロボット学会学術講演会*, 1A3-03, 2014.

6. 研究組織

(1) 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・知能システム研究部門・研究員

研究者番号: 60649086

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし