

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：12101

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14933

研究課題名（和文）関節の機械インピーダンス特性に基づく人のタスクの記述法

研究課題名（英文）Formulation of human tasks based on time-varying joint impedance

研究代表者

矢木 啓介 (Yagi, Keisuke)

茨城大学・理工学研究科（工学野）・助教

研究者番号：90802710

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、小型軽量の瞬発力生成機構を用いることで人関節インピーダンスを力センサレスで推定する新規手法を確立した。これにより、特に手関節について、実作業中に調節されるインピーダンスを、その作業をほぼ阻害せず推定可能となった。本手法を用いて、ペグインホールやジャグリングといったロボット工学の典型的題材において、タスクフェーズに応じて調節される手関節インピーダンスの推定を実現した。一方、足関節については、歩行中のインピーダンスを推定するためのブーツ型デバイスを開発した。そして、特に柔軟性の調節が重要となる踵接地時の推定を、トレッドミルと床の2通りの歩行条件で実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

柔らかさを持ち人との協調が求められる次世代のロボット技術において、人を含む外環境との関わりは避けて通れないものである。本研究によって、生まれつき学習能力の備わっている人間が、自身の関節の柔らかさを外環境との関わりの中でどのように活かし、タスクをどのようにこなしているか、関節インピーダンスの視点を加えて解析を行う方法を示した。本成果は、学術的にはタスクを実現する人の運動の力学面の解析に貢献するものであり、また社会的には、より人に身近なところで進む今後のロボット技術へのニーズの多様化に対して、人を規範とするという解を常に提供し続ける意義を有している。

研究成果の概要（英文）：We have established the force sensorless method for human joint impedance estimation utilizing a wearable snap-through buckling mechanism. The proposed method opens the possibility of the time-varying wrist impedance estimation in a practical task-dependent scenario. As representative cases, the time-varying wrist impedance in the peg-in-hole task and devil stick juggling task has successfully been estimated. In addition to the wrist joint, a boots-type perturbation device for the ankle joint is developed. Using this device, we have estimated the ankle joint impedance at the heel contact phase in the treadmill and overground walking conditions.

研究分野：ロボット工学

キーワード：関節インピーダンス推定 ウェアラブルデバイス 実作業 身体運動学 デクステリティ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

人とロボットが協調する社会を見据え、柔らかさを持つロボットの研究が盛んに進められている。従来の産業用途での人間との協働に加えて、人間に着用して動作支援を行う、人間と共に過ごすなど、ロボットに課されるタスクはより身近な生活シーンを舞台に多様化しており、いまや単に固いか柔らかいかというだけでなく、それらを状況に応じて適切に変えていくことが求められている。この要求を受けて、ハードウェア技術の面では機能性材料なども導入した柔剛融合ロボット関節機構が様々に開発されているが、しかし、固さ・柔らかさを適切に制御するためのソフトウェア技術については未だほとんど議論が行われていない。

人は、関節の位置を制御しつつ、その柔らかさも調節可能な身体機構を有し、それを適切に取り扱って身の回りの様々なタスクを実現している。特に手首や足首は、多くのタスクにおいて外環境との物理的相互作用を望ましく行うための主要な役割を担う関節である。実用タスクにおけるそれらの機械的特性を知ることは、人のタスクのやり方を力学的にとらえ、ロボティクスの言葉で理解することにつながる。こうした背景から、柔らかさを持つロボットの制御を考えるためのアプローチの1つとして、人が何らかのタスクを繰り返す中で学習して獲得する関節の柔らかさの調節の仕方を定量的に評価する技術が求められる。

### 2. 研究の目的

本研究では、人がタスクフェーズに応じて意識的・無意識的に行う関節の剛性・柔軟性の調節動作を、慣性・粘性・弾性からなる機械インピーダンスの意味で定量的に明らかにする方法の確立を目的とする。また、実タスクとして選定した例題を通じて、タスクフェーズと得られた関節インピーダンスとを関連付け、人がタスクをどのように実現しているのかについて知見を得ることをねらいとする。

### 3. 研究の方法

#### (1) ウェアラブルデバイス開発

関節インピーダンスを知るためには、対象関節に対して外部から摂動を入力し、その応答を見る必要がある。したがって、摂動を入力するためのデバイスが必要となる。本研究では弾性体の飛び移り座屈現象を利用した摂動入力を実現するものと、ダイレクトドライブモータとリンク機構を利用したブーツ型のものの、2つのウェアラブルデバイスを製作し、それぞれ手関節と足関節の実作業中のインピーダンス推定に用いる。

実作業中の対象関節の運動を阻害しないために、摂動入力には短い時間幅かつ適度な振幅で行うものとする。飛び移り座屈機構のデバイスについては弾性体で生じる瞬間的な運動を摂動として入力することで、短い時間幅を実現する。また、事前に弾性体パラメータとアクチュエーション性能の関係を評価しておき、適度な振幅を得られるパラメータで設計する。一方、ブーツ型のデバイスについては正弦波の合成信号を摂動入力とする。ある程度の高周波信号まで用いて合成することで、短い時間幅かつ任意の振幅の周期信号を実現する。

#### (2) 随意運動に対応したインピーダンス推定法の検討

人の関節は、デバイスによる外部摂動の他に、筋活動で生じる内部トルクによっても運動を生じる。そのため、計測される関節の動的応答から摂動に対するものを抽出する必要がある。

飛び移り座屈機構のデバイスについては、時間領域での信号処理を行う。摂動入力の有る場合と無い場合で関節角度の応答データを用意し、バンドパスフィルタ処理を行ったのちに両者の差分を取ることで摂動への時間応答を抽出する。そして、抽出された応答データにフィットするインパルス応答を示す2次遅れ系を求める。

ブーツ型のデバイスについては、生成される摂動入力に既知の周波数成分を含む合成信号であることから、周波数領域において信号処理を行う。歩行中の足関節の随意運動よりも高い周波数帯にて入出力の関係を調べ、この帯域で周波数応答をよく近似する2次遅れ系を求める。

#### (3) 被験者実験

健康な成人を対象とし、実作業中にフェーズに応じて推移する関節インピーダンスを推定する実験を行う。実作業には、リハビリテーションや知育、ロボットマニピュレーションの題材として古くから取り上げられるペグインホールタスクと、人の巧みな物体操作技能で実現されるジャグリングタスク、そして社会的な需要の大きい歩行タスクの3例を選定する。

### 4. 研究成果

本研究の成果は(1)推定手法に関わる基礎研究と(2)実作業中の関節インピーダンス推定結果に大別される。

(1) 推定手法に関わる基礎研究の成果

本研究では、摂動入力システムとして図1に示す2つのウェアラブルデバイスを製作した。

図1(a)のデバイスは主に手関節を対象としており、小型軽量かつ関節の運動を阻害せずに摂動入力を実現できる。本研究では、まずこのデバイスのアクチュエーション能力の評価を行った。次に、このデバイスの手関節への作用が撃力(インパルス入力)によるものとしてモデル化される点に注目し、力情報を用いずに関節インピーダンスを推定する新規手法を確立した。

図1(b)のデバイスは足関節を対象としている。アクチュエータとしてダイレクトドライブモータを採用したことにより、矢状面内の足関節の動きを阻害しない。また、減速器が無いために応答性が良く、周波数成分を多く含む摂動入力信号を生成可能である。本研究では、歩行中の足関節において、随意運動によって生じる角度変化と、開発したデバイスの摂動入力に対して生じる角度応答との周波数成分の違いを調べ、摂動入力の有無によって20Hz以上の帯域に差が表れることを確認した。そして、この帯域を摂動への角度応答の成分として抽出し、これにフィットする周波数応答を示す2次の伝達関数を求め、その分母多項式の係数として関節インピーダンスを得る手法を提案した。

各推定手法の検証として、準静的条件下での手関節および足関節インピーダンス推定を行った。足関節では別途運動時の検証として、ペダルこぎ動作中のインピーダンス推定も実施した。

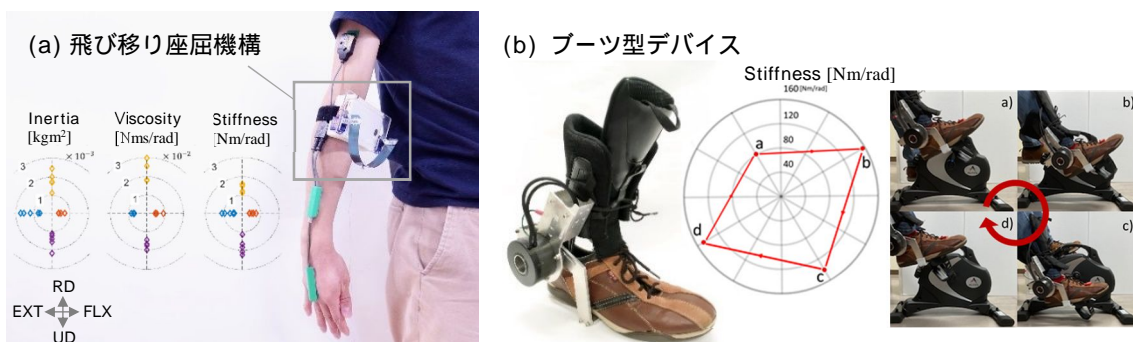


図1 本研究で製作したデバイスとパイロットテスト結果。

(2) 実作業中の関節インピーダンス推定結果

健康な成人の実験参加者を3名募り、本研究で確立した力センサレスの推定法を用いて、ペグインホールタスクを遂行中の手関節インピーダンス推定を実施した。まず、タスクに含まれる主要な動作に基づき、1サイクルを8フェーズに分割する。そして、各フェーズにおいて摂動入力に対する角度応答を計測し、インピーダンス値を推定する。得られた結果の1例を図2に示す。

手関節角度の推移とインピーダンスの推移より、主として掌背屈方向(FE)に関する変化が大きいことがみてとれる。環境(ペグボード)と接触してホールを探るのフェーズでは、手関節の掌背屈(FE)方向のスティフネスが低下し、粘性が上昇している。一方、ペグを挿入するのフェーズになると、今度はスティフネスが上昇し、粘性が低下している。これらは各フェーズで求められる、手先の作業空間においてペグとボードの適度な接触状態を保持することと、ペグの挿し込みと手の引き戻し動作をすることに対して理にかなった調節の仕方であり、本研究でこれを定量的に得ることができた。また、実験後のアンケートで運動意識を調査したところ、この参加者は、ホールの探索が済んでからも目を離さず、ペグをしっかり挿し込む意識であったことが分かった。参加者によってインピーダンスの推移は異なったものの、こうした参加者ごとの意識と推定された値には対応が確認されたことから、タスク実現に向けた人の運動意識を関節インピーダンスによって推測したり、数値的に解釈したりできる可能性があることが分かった。

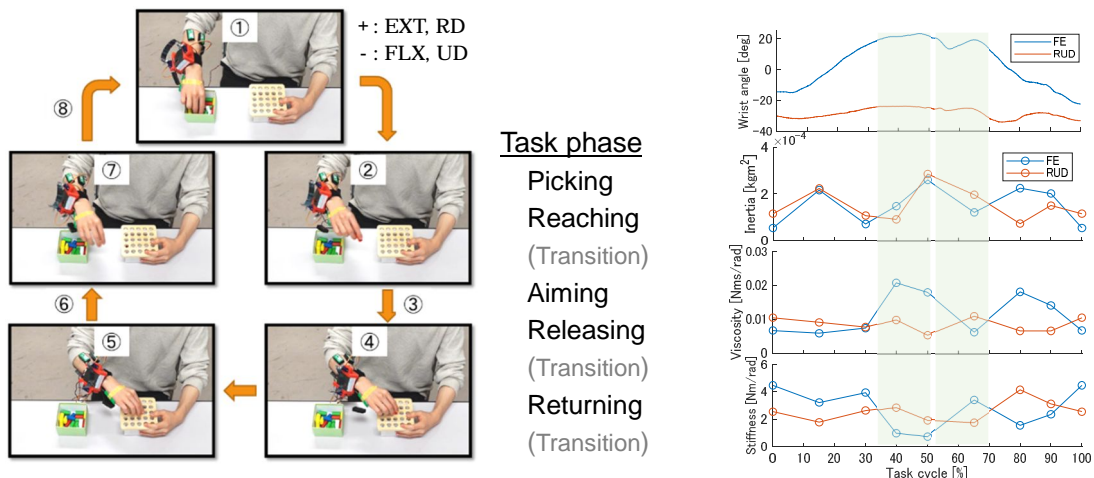


図2 ペグインホールタスクを遂行中の手関節インピーダンス推定結果。

次に、同様に力センサレス推定法を用いて、ジャグリング中の手関節インピーダンス推定を実施した。種目として剛体棒を操るデビルスティックを挙げ、アイドリングと呼ばれる基礎トリックをタスクに選定した。1サイクルを5フェーズに分割し、各フェーズにおいてインピーダンス値を推定する。得られた結果の1例を図3に示す。

手関節特性のうち、特にスティフネスの推移は筋活動と対応していることが確認できる。ここで、前腕部と手部の運動を2関節（肘・手首）6自由度でモデル化し、モーションキャプチャで得た前腕部の運動学データと、推定された手関節インピーダンスのデータを使用して、手関節角度の時間応答を生成するシミュレーションを行った。その結果、アイドリングを実行中の実際の手関節の運動の概形のような軌道が生成された。一方、手関節インピーダンスを固定値とすると、このような軌道は生じなかった。すなわち、ジャグリングのような素早い巧みなタスクについて、これを実現する上肢の各関節の運動軌道をすべて明示的に与えずとも、関節インピーダンスの適切な推移による運動調整の形で記述できる可能性が示された。

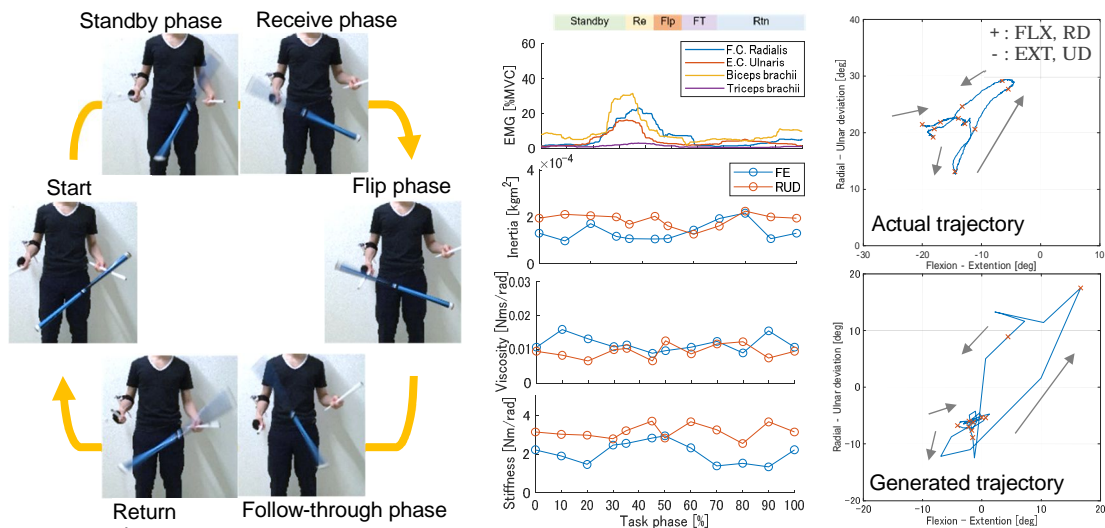


図3 ジャグリングタスクを遂行中の手関節インピーダンス推定結果。

最後に、ブーツ型のウェアラブルデバイスを用いて歩行中の足関節インピーダンス推定を実施した。歩行サイクルの中で特に柔軟性の調節が重要である踵接地時を対象とし、トレッドミル歩行と床歩行の2通りの条件で推定を実施した。得られた結果の1例を図4に示す。

トレッドミル歩行の踵接地時に得られた足関節インピーダンス値は関連研究と比較して相違ないものであった。さらに、床歩行条件で得られた推定結果は、この時の両条件の筋活動レベルの比較に基づくと、矛盾無く求められたといえるものであった。立脚期に対するデバイスの大幅なトルク不足により全フェーズを通した推定は実現されなかったが、本研究の提案手法について、人の自然な歩行の中で足関節インピーダンスが推定できること、実環境歩行に対応できることを実証した。

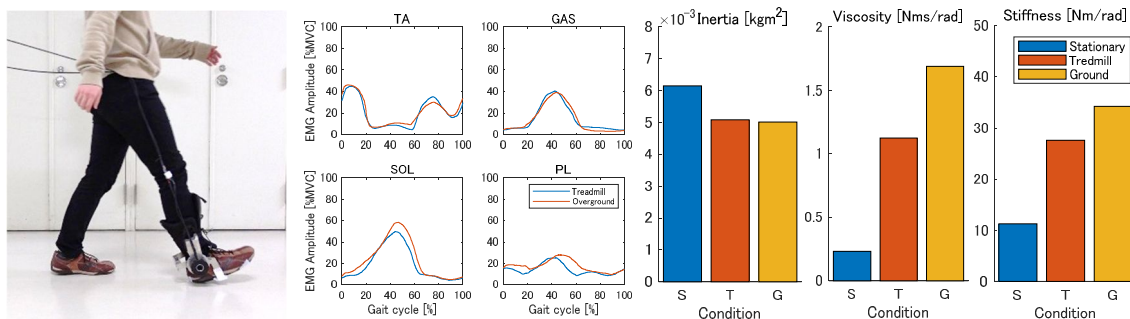


図4 歩行タスクを遂行中の足関節インピーダンス推定結果。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yagi K., Mori Y., Mochiyama H.	4. 巻 35
2. 論文標題 Force-sensorless human joint impedance estimation utilizing impulsive force	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 349 ~ 358
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2020.1861976	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 Mochiyama Hiromi, Modar Hassan, Yagi Keisuke, Suzuki Kenji	4. 巻 38
2. 論文標題 Smart Mechanics: Fusion of Softness and Rigidity in Robot Joints	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Robotics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 926 ~ 933
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.38.926	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Keisuke Yagi, Shohei Ito, Yoshikazu Mori
2. 発表標題 Development of a Boots-type Perturbation Device for Ankle Joint Impedance Estimation
3. 学会等名 2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 打越 元紀, 宮原 宣道, 矢木 啓介, 森 善一
2. 発表標題 Peg-in-Hole作業中の手関節インピーダンス推定
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス部門講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keisuke Yagi, Yoshikazu Mori, Hiromi Mochiyama
2. 発表標題 Estimation of Human Wrist Impedance in Juggling of Sticks
3. 学会等名 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Yagi, Y. Mori, and H. Mochiyama
2. 発表標題 Evaluation of the Impulsive Force Induced by the Snap-Through Buckling of Closed-Elastica
3. 学会等名 21st IFAC World Congress (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 矢木 啓介, 森 善一, 望山 洋
2. 発表標題 弾性体の飛び移り座屈機構を利用した人関節インピーダンスのカセンサレス推定
3. 学会等名 第25回ロボティクス・シンポジア
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤星平, 矢木啓介, 森善一
2. 発表標題 周波数応答法に基づく足関節の機械インピーダンス推定
3. 学会等名 日本機械学会2020年度茨城講演会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 矢木啓介, 森善一, 望山洋
2. 発表標題 道具を操る曲芸における人の手関節の使い方
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤星平, 矢木啓介, 森善一
2. 発表標題 ダイレクトドライブ型の装着型デバイスを用いた運動中の足関節インピーダンス推定
3. 学会等名 第21回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Keisuke Yagi and Hiromi Mochiyama
2. 発表標題 Human Wrist Impedance Estimation Based on Impulse Response Induced by Snap-Through Buckling of Closed-Elastica
3. 学会等名 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC'19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢木 啓介, 森 善一, 望山 洋
2. 発表標題 人間関節インピーダンス推定のための閉ループ弾性体の飛び移り座屈機構で生じる瞬発力の評価
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019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
---------	---------