

令和元年6月11日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01654

研究課題名(和文) 運動の誤差感度解析に基づく投擲の最適化と教示

研究課題名(英文) Throwing optimization based on sensitivity analysis and motion instruction

研究代表者

岡田 昌史 (Okada, Masafumi)

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：60323523

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、感度解析結果に基づいて誤差の影響の小さい運動を設計し、これを投擲に応用して命中率の高い投げ方を求めるとともに、投擲ロボットを用いた実験により検証を行った。また、得られた運動を人に適切に提示・誘導することを目的として、自律制御系をベースとした制御系において人と機械の役割分担を行い、人が楽に運動を実現するよう誘導する人間-機械協調系の設計を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、機械によって人を適切な運動に誘導することを大きな目的としており、我々のQOL(Quality of Life)向上に貢献する高い社会的意義を持った内容である。特に、運動の「適切性」には命中率の向上、人が楽に運動を実施できる、人の仕事を最大限発揮するといったことについて、数学的・物理的な考察から求めており、高い学術性を有している。今後、この成果をリハビリテーションやスポーツへ応用し、我々の生活を豊かにする機械の設計・制御を実施する。

研究成果の概要(英文)：In this research, based on the sensitivity analysis, we designed an appropriate motion that has small influence of errors. Applying the proposed method to throwing, optimal motions with high accuracy have been designed, and verified it by experiments using a throwing robot. Moreover, for the purpose of presenting and guiding the obtained motion to human, an autonomous-based control is divided into the role sharing between man and machine, and man-machine cooperation system has been designed so that the human can easily generate and continue the work.

研究分野：ロボット工学

キーワード：感度解析 人間機械協調 行動誘導

1. 研究開始当初の背景

投擲運動はロボット工学、スポーツ工学の分野でよく研究対象とされる運動である。例えば、災害地などにおいて人が入れない場所にセンサシステムを投げ込み、中の情報を収集するシステム開発、山岳地におけるワイヤリングのための投擲、工場内でのコンベアに変わるパーツ移動システムとしての投擲、その際の適切な投げ方などが挙げられる。これらは人に代わって作業をする機械の設計であり有用な結果を導いてくれる。一方、スポーツ工学ではプロのバスケットボール選手の運動から、リリース点、ボールの回転速度などが解析されている。これら従来の研究は、主に物体を遠くに投げるための機構開発、投げ方/受け取り方の制御アルゴリズム、画像データに基づく解析である。これに対し、物体を適切な場所に正確に到達される命中率も投擲においては重要な要素である。特に、バスケットボールにおけるフリースローでは命中率が勝敗を大きく左右するため、命中率の高い投げ方を検討し、これを選手に適切に指導することは強いチームをつくることにおいて重要である。これを実現するために、以下の課題に取り組む必要がある。

(1) 命中率の高い投擲運動を設計する。

(2) 人に適切な運動を教示する、あるいは、誘導する。

本研究ではこれら2つの課題に対して取り組む。

2. 研究の目的

本研究は、バスケットボールのフリースローを対象とし、誤差に関するボールの到達点の感度を最小化する投げ方を求め、これを人に教示することを目的とする。これまでにロボットの投擲において初期姿勢のばらつきに関する到達位置の感度を求める手法を提案し、これを最小化することで命中率の高い投げ方を求める手法を提案してきた。この手法は、運動の軌道に沿ったロボットのダイナミクスの線形化および時間的な離散化により順動力学の解を陽に求める点に特徴があり、これにより感度解析が可能となっている。本研究はこれを人のバスケットボールへ応用し、初心者と熟練者の投げ方の違いを解析すると共に、感度を評価関数とした最適化によって命中率の高い投げ方を求め、さらに、これを人に教示する手法を提案するものである。

3. 研究の方法

本研究では、以下の内容について取り組む。

- I. フィードバックループが存在する場合の動的な感度解析手法と感度の小さい運動の設計
 - (1) 平面3自由度マニピュレータに対して投擲の動的感度解析を実施し、初期姿勢角度の誤差に対する着地点の誤差感度を最小化する運動(命中率の高いロバスタな運動)を設計し、これを実験によって検証する。
 - (2) マニピュレータのフィードバックゲインを設計パラメータとし、ある運動に対して命中率が高くなるPDフィードバックゲインを求めると共に、実験によって検証する。
 - (3) バスケットボールのフリースローを対象とし、人のモーションキャプチャデータに基づいて熟練者、初心者の投擲の感度解析を行うと共に、感度を小さくするための初心者の運動の設計を行う。
- II. 人への運動誘導手法の開発
 - (1) 人への運動教示のために、人に適切な運動を求める。そのために、生体の筋肉特性を考慮し、これに基づいた運動の逐次最適化で軌道を得る。
 - (2) ロボットを平衡多様体に安定化することで運動軌道を弱く拘束し、人への触覚的な運動提示を行うために、平衡多様体への安定化手法を提案する。
 - (3) 運動提示のために軌道をロボット(機械)が制御し、推進力を人が制御するような役割分担を行い、これを実現するための制御アルゴリズムを提案すると共に、カートロボットを用いて人の誘導を検証する。
 - (4) 人は適切な力と適切な速度をもって運動を決定している。そのため、パワーアシストは力だけでなく速度のアシストも必要となる。そこで、これら両方をアシストし、人が長時間楽に運動を実施し続けられるアシスト機構の設計とその誘導アルゴリズムを開発し、実験によって検証する。

4. 研究成果

I. 動的な感度解析手法の提案と感度の小さい運動の設計

一般に感度 S は誤差を持つ変数を x 、出力を $y = y(x)$ としたとき、

$$S = \frac{\partial y}{\partial x}$$

で与えられるが、投擲のような動的な運動では、投擲物の着地点 y は微分方程式(運動方程式)の解で与えられ、ロボットの運動方程式の強い非線形性から積分した解を得ることができない。そこで、本研究では先にロボットの軌道を与え、軌道まわりでの運動方程式の線形化、離散化を用いて近似解を与える手法を提案すると共に、これに基づいた感度解析手法を提案した。また、平面3自由度マニピュレータを用いて実験検証を行った。

(1) 平面3自由度マニピュレータに対して投擲の感度解析を行った。図1(a)のマニピュレータ

に対して、図 1(b)にあるように目標の着地点に到達する 2 つの投擲軌道を求め、軌道上の点を投擲点として感度解析を行った。感度解析の結果を図 2 に示す。投擲点 1 は感度が大きく、投擲点 4 は小さい結果が得られた。そこで、こ

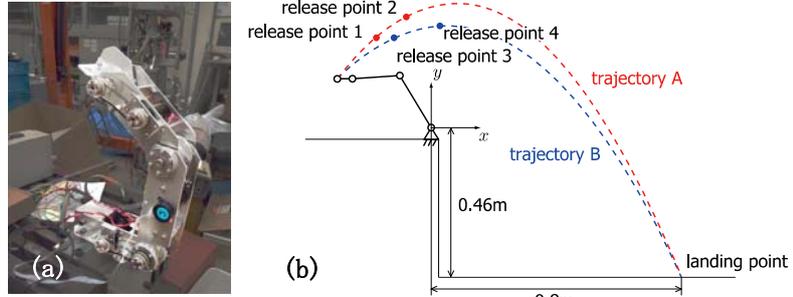


図 1 平面 3 自由度マニピュレータによる投擲軌道

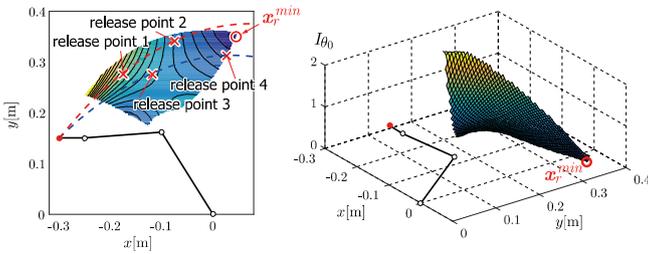


図 2 投擲の感度解析結果

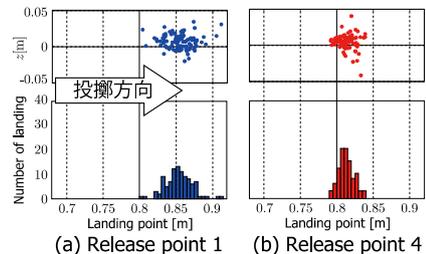


図 3 着地点のヒストグラム

れらの点での投擲を行い、そのときの投擲物の着地点のヒストグラムを図 3 に示す。この結果から、感度解析結果は着地点のばらつきをよく表しており、これに基づいて感度の小さい、すなわち、命中率の高いロバストな運動が設計できている様子が理解できる。なお、これらの結果は発表論文(雑誌論文[1])、(学会発表[6])において成果発表されている。

- (2) 感度解析手法に基づいてマニピュレータの PD フィードバックゲインの最適化を行った。このときの着地点のヒストグラムを図 4 に示す。図 4(a)の初期フィードバックゲイン時と比べ、最適化することで図 4(b)のように、着地点のばらつきが小さくなった。なお、(a)では極めて大きなフィードバックゲインを用いており、ロボットは初めに与えた関節角度軌道を忠実に再現しているのに対し、(b)では比較的小さなゲインが得られている。この結果は、人の場合でも力を入れすぎず、適度に柔軟な投擲を行うことで、ばらつきが小さくなることを示唆している。なお、この結果は(学会発表[3])において成果発表されている。

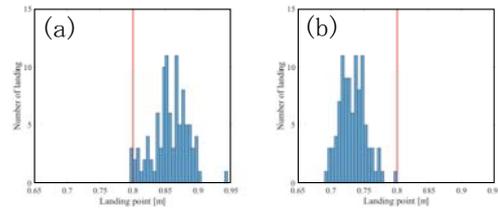


図 4 フィードバックゲインの最適化

- (3) 図 5 のように、人のバスケットボールにおけるフリースローの様子を熟練者、初心者の合計 17 名に対してそれぞれ 20 回モーションキャプチャし、それぞれの運動に対して感度解析を行った。最も感度の小さい投擲(熟練者)、大きい投擲(初心者)を図 6 に示す。ただし、



図 5 モーションキャプチャ

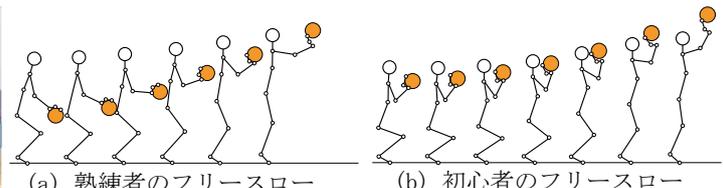


図 6 フリースローのモーションキャプチャ

残念ながらロボットの場合とは異なり、初心者の運動の再現性は極めて低く、すでに誤差が含まれる運動しか得られないため、正確な感度解析が行えなかった。そこで、初期姿勢における各関節角度のばらつき、ゴールのばらつきをもとに、ひじ関節の影響が大きいことを見つけ、初心者のひじ関節の動きを熟練者の動きに近づけることで、運動の設計を行った。得られた運動を図 7 に示す。この結果、初心者は熟練者のひじの動きを真似することで、感度の小さいフリースローになることを確認したが、極めて発見的な設計にとどまるだけでなく、これを初心者に提示する手法について再検討が必要であるとの結果に至り、この後は人への運動提示手法に取り組むこととした。なお、この結果は(学会発表[5])において成果発表されている。

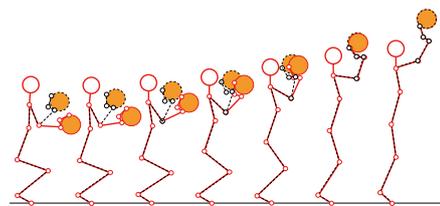


図 7 設計した初心者の運動

II. 人への運動誘導手法の開発

人に運動を提示・誘導するために、機構を利用することを考え、その際に機械で軌道を制御し、人は推進を制御する方針を考えた。これにより、訓練によって人は軌道を学習すると共に、これを実現する力を入れ具合を学習し、その結果適切な運動が実施できるようになると予測される。さらに、軌道の拘束が強い場合、人は違和感を覚え、適切な学習がしづらいと見えられ、機械は軌道を平衡多様体とするように制御することとした。

- (1) 一般に、人の運動軌道を設計する場合、人をリンク系と見なしトルク最小化やトルク変動最小化によって運動最適化が行われる。しかし、これはグローバルな最適化であり、十分学習が行われた結果である。一方、人は学習課程においてグローバルな最適化はできておらず、逐次的に最適化を行い、最終的に運動が実現されると考えられる。すなわち、運動は時々刻々の外界とのインタラクションで決定し、軌道はその結果として得られるという見解である。手におもりを持ち、肩の高さまで持ち上げる作業に対し、区分スプラインで軌道を定め、関節トルク変動を最小化するように、軌道を逐次的に求め、モーションキャプチャ結果と比較した。この結果を図8に示す。手に持つおもりを0kg, 2kg, 5kgと変化させたモーションキャプチャ結果が(a)に示され、最適化によって得られた運動が(b)に示される。肩関節、肘関節、手首関節の重みを変化させることで(b)は(a)とほぼ同様の結果が得られ、人の動きに近い運動が得られたことが分かる。ただし、特に5kgの場合に人の運動は再現性がなく、毎回異なる動きをとる。そのため、最適化の際の重み行列も変化させて計算した。この結果から、疲労など他の要素も考慮した最適化が必要であると考えられる。なお、この結果は(学会発表[7])において成果発表されている。

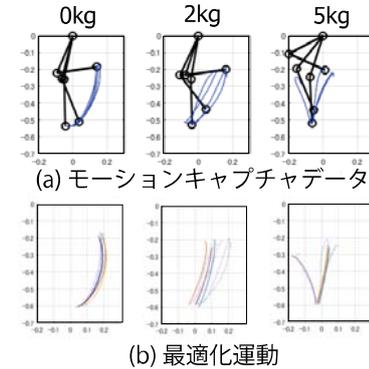


図8 人の腕の運動

- (2) 軌道の拘束を生み出す制御のために、ロボットを平衡多様体に安定化する手法を提案し、図9にある倒立振子を用いた実験検証を行った。この装置は第2関節にモータがあり、第2リンクを振りながら安定化する。 θ_1 と θ_2 の組み合わせによる多くの平衡点を持ち、それらが連続的につながっていることから平衡多様体を形成する。本研究では評価関数を設定し、(a)ある初期状態から評価関数を最小化する平衡点(平衡多様体上のいずれかの点)の探索、(b)そこまでの軌道と入力、を求め、多くの初期状態を設定することで状態空間内

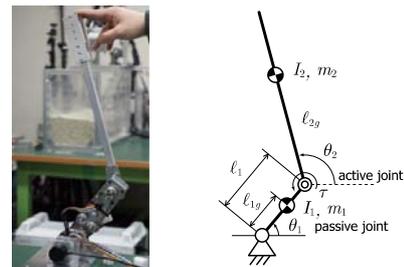


図9 二重倒立振子

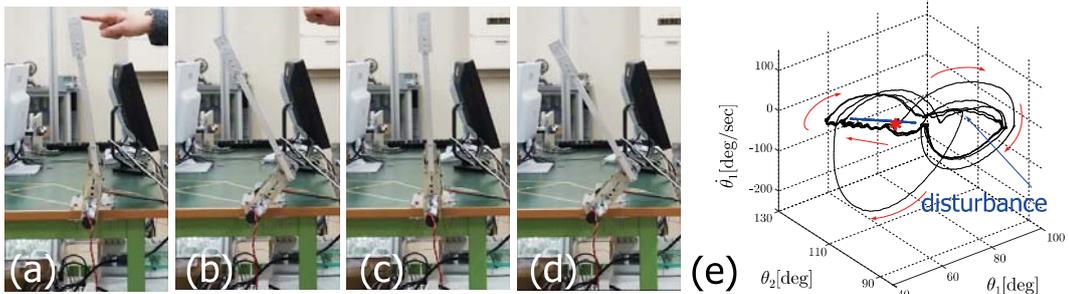


図10 二重倒立振子の平衡多様体への安定化

に平衡多様体に収束する場が形成されることを利用し、これを関数近似することでコントローラを設計する。実験結果を図10に示す。(a)~(d)は実験の様子を表しており、(e)はそのときの状態変数の動きを表している。なお、状態空間は4次元空間であるが、ここでは3次元空間のみを示している。赤い*で示される初期値から出発した振子は青実線で表される平衡多様体へと安定化され、その近傍を動き続ける。途中で外乱を与える(図10(a))ことで、一度平衡多様体から大きく離れるが、再度近傍で安定化されている。この結果から、提案手法により平衡多様体へと安定化するコントローラが設計可能であることが理解できる。なお、この結果は(学会発表[4])において成果発表されている。

- (3) 平衡多様体への安定化を、人を誘導する手法へと応用する。ここでは、図11に表されるカートを対象とする。これは位置・姿勢計測装置(StarGazer)によってカートの位置と姿勢を計測し、そのデータから前輪の操舵角を制御する。推進

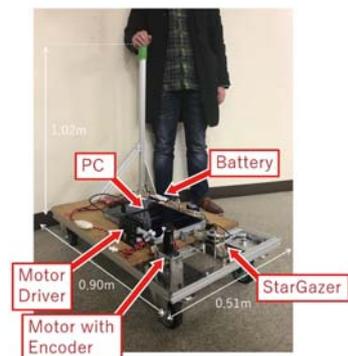


図11 手押しカート

力は人によって与えられ、人はカートを押すだけで、所望の位置へ誘導される。非常時には人が止まることで安全性を確保する。この系に対し、(a) 経路点を複数個与え、これを通る軌道を求める。(b) この軌道に収束する軌道と操舵角を数多く求め、これを収束場とする。(c) 収束場を関数近似し、操舵コントローラを得る、を実施した。特に、(a)、(b)において、カートは非ホロミック系であることから任意の軌道をとることができない。そこで、上記(2)の手法と同様の手法によって軌道を求めた。この装置を用いたときの実験



図 12 手押しカートの走行実験

結果を図 12 に示す。a からスタートし、人はカートを押すだけで b, e において指定の経路点(図の緑の四角)を通過する。また、i においてゴール地点へと誘導される。この間、d, e において前を歩行者が通過するが、人が止まることでカートも止まり、安全性を確保している。この結果において、(a) で与えた軌道は平衡多様体であるといえ、平衡多様体を利用した人の行動誘導が得られている。なお、この結果は(学会発表[1])において成果発表されている。

- (4) 最後に、パワーアシストにおいて人を誘導する機構と機構の制御手法を提案する。一般に、パワーアシストでは力がアシストされ、人は楽に仕事をする事ができる。しかし、例えば自転車のペダルを漕ぐ場合のように、小さい力で大きな回転速度を出しても、大きな力で小さな回転速度を出してもその疲労は大きく、適切な力と適切な速度で人の動力を最大化させ、しかも作業を長時間継続させることが可能となる。そこで本研究では力と速度を誘導する機構とその制御手法を提案する。ここで用いる装置を図 13 に示す。人は ω_h, τ_h を入力として、発電やおもりの巻き上げといった作業を行う。このとき、差動ギアを通して、2つのモータによって作業の力、速度を制御する。まず、人の作業を計測し、Hill の筋肉モデルに基づいて人の力-速度曲線を導く。また、そこから動力最大の力、速度を求め ω_h, τ_h から関数化する。この結果をもとに、人の作業中に ω_h, τ_h を計測し、これが動力最大化と

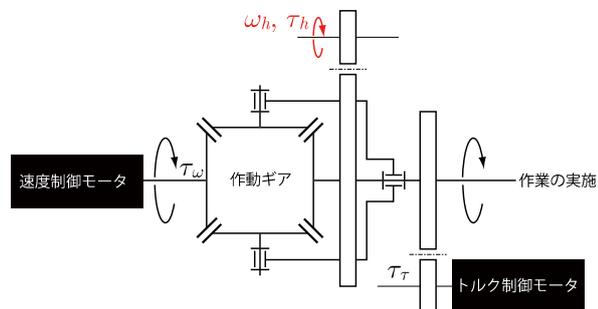


図 13 力と速度のアシスト装置



図 14 力と速度のアシスト装置

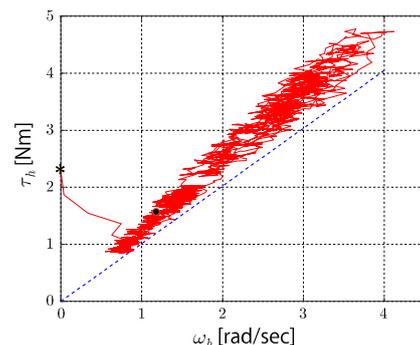


図 15 人によるおもりの巻き上げ

なる ω_h , τ_h になるようにモータを制御する. 図 14 にある実験装置を試作し, 人によるおもりの巻き上げ実験を実施した結果を図 15 に示す. ω_h , τ_h が原点を通る直線上にあるときに動力が最大化され, *から出発した ω_h , τ_h はこの直線上に誘導されている. これにより, 人は楽に長時間, 最大動力で作業が続けられる. なお, この結果は(学会発表[2])において成果発表されている.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- [1] Masafumi OKADA, Shota ONIWA and Wataru HIJIKATA, Robust throwing design based on dynamic sensitivity analysis, Mechanical Engineering Journal, Vol.5, No.1, pp.17-00442, 2018 (査読有り)

[学会発表] (計 7 件)

- [1] 尤 亜倫, 舛屋 賢, 岡田昌史, 人間支援による車輪移動系の軌道収束制御, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019(Robomec2019), 2A2-L06, 2019 (査読なし)
- [2] 中塚大輝, 舛屋 賢, 岡田昌史, 人の動力特性に基づく力と速度のアシストシステムの設計, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019(Robomec2019), 2A2-L10, 2019 (査読なし)
- [3] 山中悠太, 土方 亘, 岡田昌史, 動的感度解析に基づくロバストコントローラの設計, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018(Robomec2018), 2P2-E11, 2018 (査読なし)
- [4] 岡本 裕, 土方 亘, 岡田昌史, ベクトル場を利用した仮想ポテンシャルの設計とロボットの平衡多様体への安定化, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018(Robomec2018), 2A2-E15, 2018 (査読なし)
- [5] 岡田昌史, 田中尚義, 土方 亘, フリースローにおける人の運動の感度解析と設計, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017(Robomec2017), 2A2-D01, 2017 (査読なし)
- [6] 岡田昌史, 大庭翔太, 土方 亘, 動的感度解析に基づくロバスト投擲運動設計 - 平面 3 リンクマニピュレータによる実験検証 -, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017(Robomec2017), 1P1-H07, 2017 (査読なし)
- [7] 小林 亮, 岡田昌史, 土方 亘, 動きの人らしさ, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017(Robomec2017), 1A1-N11, 2017 (査読なし)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名 : 土方 亘	ローマ字氏名 : Wataru HIJIKATA
研究協力者氏名 : 舛屋 賢	ローマ字氏名 : Ken MASUYA
研究協力者氏名 : 田中尚義	ローマ字氏名 : Yoshihisa TANAKA
研究協力者氏名 : 小林 亮	ローマ字氏名 : Ryo KOBAYASHI
研究協力者氏名 : 大庭翔太	ローマ字氏名 : Shota ONIWA
研究協力者氏名 : 岡本 裕	ローマ字氏名 : Yutaka OKAMOTO
研究協力者氏名 : 山中悠太	ローマ字氏名 : Yuta YAMANAKA
研究協力者氏名 : 中塚大輝	ローマ字氏名 : Daiki NAKATSUKA
研究協力者氏名 : 尤 亜倫	ローマ字氏名 : Yalen YOU

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。