

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：12612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K12128

研究課題名(和文) 武術における身体操作の実験的解析とその計算論的理解

研究課題名(英文) An experimental analysis and computational interpretation of body skills in martial arts

研究代表者

阪口 豊 (Sakaguchi, Yutaka)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：40205737

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、武術的身体操作の原理の解明を目的として、単体での動作と二者が接する状況での動作について身体動作を計測・解析し、その機能的、制御上の意味を検討した。

単体動作については、立ち方(静止立位)と歩行を対象として動作を解析し、武術的立位法では、重心が前方に移動すること、動きの方向によらず素早く歩き出せること、歩き出し時の上下動が少ないこと(観察者に動きの手がかりを与えにくいこと)を明らかにした。

二者動作については、相手との関係性を絶ち切る立位法を解析し、相手との重心動揺の相関が小さくなることを明らかにしたほか、関係性を絶ち切る立位制御メカニズムについて新たな仮説を得た。

研究成果の概要(英文)：We analyzed the human body movement of martial arts in order to clarify the control principles and functional meaning of body manipulation of the martial arts, and obtained two major results.

First, we found that people could step out more quickly with less trunk movement when they stood with a martial art method. This means that this method facilitates the movement with generating less visual signals to the others. Second, we found that correlation of the COP (center of pressure) movements of two persons who stood still contacted with each other was reduced if one of them stood using a martial technique. This suggests that this standing method blocks the interaction between two persons, which may be used to a tool to maneuver the other.

Therefore, the present result indicates that the body manipulation of martial arts are tightly related to human communication through sensory signals.

研究分野：生体情報論

キーワード：武術 身体操作 立位姿勢制御 歩行制御 身体動揺 制御モデル

1. 研究開始当初の背景

身体技能の遂行・習得においては、多数の身体パーツをいかに協調的に操るか(身体操作法)が技能の成功(良否)を定める重要な因子である。研究代表者、分担者は、ヒトの運動制御・学習メカニズムの解明を目的として、身体動作解析と計算理論による学術的研究に加えて、武術やバレエといった身体技能の専門家と連絡を取り、リアリスティックな状況での身体運動の理解に向けた予備的検討を行ってきた。

その過程を通じて、武術の技が高度な身体コミュニケーションに裏付けられていることや、武術における身体操作が種々の動作に共通する一般的原理に基づくことに気づいた。このことから、武術の身体操作の原理を解明してその特徴や意味を理解し、ヒトの運動メカニズム解明へつなげる本研究課題を着想するに至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、武術的な身体操作法の特徴を身体運動計測・解析により明らかにすること、および、ヒト間コミュニケーションの観点から武術における技の機序を明らかにすることである。特に、武術では相手に自分の意図を悟られないように身体を使うことや、触力覚を介して相手のバランス制御機構に働きかけることが重要であることから、これらの要点に関わる実験的知見を得ることを目指した。

3. 研究の方法

本研究では、一般人に加えて武術専門家を対象とした種々の行動実験を行なった。代表的な実験内容・方法は以下の通りである。

(1) 静止立位からの踏み出し動作

武術においては、動作そのものが素早く行えることに加えて、動作を始めたことが相手に気づかれにくいことが重要である。この実験では、静止立位からの踏み出し動作を題材として、武術的立位法の特徴を明らかにするとともに、武術的立位からの踏み出し動作が通常立位からのものと比較して物理的に速いかどうか、他者に気づかれにくい特徴を有しているかを実験的に明らかにする。

(2) 他者と接した条件での静止立位

静止立位時に手先で外部物体に軽く触れると重心動揺が有意に減少することが知られている("light touch effect")。この事実は、ヒトの立位バランス制御が他者との接触の影響を受けることを示している。一方、武術的立位法には、接触する他者との関係性を絶つ効果があるといわれているものがある。この立位法が立位バランス制御にもたらす効果を実験的に明らかにするとともに、その効果が生じる制御メカニズムについて検討する。

(3) 種々の武術的身体操作の実態解析

触力覚を通じた相手の誘導や、動きの「履歴効果」、特定の姿勢が身体の動きに与える影響など、武術の実践場面において指摘されている種々の身体操作の効果を実験により検証する。

(4) 姿勢の変動を許容する立位バランスの協調制御法

武術では技を繰り出したり受けたりする際に、立位姿勢のバランスを維持しなければならない。そのためには重心の制御が求められるものの、重心位置は支持基底面のある領域に納まっていればよく、身体姿勢の変動も許容される。そこで、身体操作として各関節角の目標姿勢を一意に決めずに、時々刻々の姿勢変動を許容する立位制御モデルを考案する。さらに、全身を模した多関節リンクモデルを用いて上肢到達運動のシミュレーション実験を行ない、外乱が加わる条件において提案する立位制御法の有効性を検証する。

(5) 外乱に強い立位制御のメカニズム

武術では対戦相手から受ける攻撃(外乱)に対して立位バランスを維持することが重要である。本研究では、外乱に強い立位姿勢制御の特徴について、筋応答の時間遅れや揺動を抑えるためのフィードバック制御ゲイン、励起される筋群の活動(筋シナジー)などに着目して分析を行なう。

4. 研究成果

(1) 静止立位からの踏み出し動作(発表)

静止した状態から素早く動き出すことができるといわれている「中間重心立位」と呼ばれる立位法について、姿勢、床反力特性、筋活動を計測するとともに、中間重心立位からの踏み出し動作について、動作に要する時間と動作中の身体パーツの動きを通常立位からの動作と比較した。その結果、以下のことが明らかになった。

まず、中間重心立位では、全身がやや前方に移動して、床反力中心(重心位置)が支持基底面のほぼ中央に位置していた(図1)。一般に「よい姿勢」と云われる姿勢では、床反力中心は外果(くるぶし)のやや前方に位置することから、中間重心立位はそのような

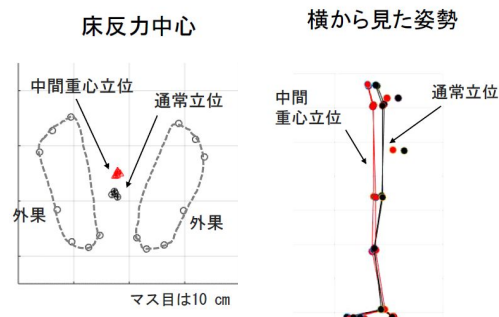


図1 中間重心立位での立位バランス

「よい姿勢」での立位と比べて身体が前方に移動した立位であるといえる。実際、そのような姿勢を支えるために、ヒラメ筋や腓腹筋など足関節底屈に関わる筋の活動昂進が見られた。

静止立位からの踏み出し動作については、前進・後退に関わらず、中間重心立位からの踏み出し動作では、通常立位からの動作と比較して、動作に要する時間が短く踏み出し幅も大きかった。動作中の床反力の時間変化を分析したところ、中間重心立位条件では運動前半に前進方向に受ける床反力が大きかったことから、中間重心条件では運動初期に大きく加速していると考えられる。なお、前進のみならず後退においても動作時間が短くなったことは、中間重心立位において重心が前方に移動していることが動作時間短縮の直接的原因でないことを示している。実際、中間重心立位からの踏み出し動作は、支持脚、遊脚の動きが通常立位からの踏み出し動作と質的に異なっており、その違いは上体の上下動に明確に現れていた。すなわち、通常立位からの前進動作では、体幹部がいったん上方に動いた後下方に動く（あるいは、運動中に上方に動くフェーズがある）のに対し、中間重心立位から前進動作では一様に下方に動いていた（図2）。このことは、中間重心立位からの前進動作では上下方向の無駄な動きが小さく、その結果として、効率的な動作を実現するだけでなく、観察者に動き出しを告げる視覚的手がかりを抑制する効果を生み出していることを示唆している。

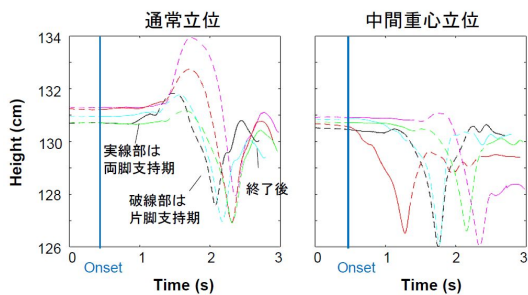


図2 踏み出し時の体幹の上下動の違い

(2) 他者と接した条件での静止立位 (発表 ,)

「相手との関係性を絶つ」効果があると考えられている「垂直離陸」と呼ばれる立位法に着目し、この立位法をとったときの身体動揺特性と筋活動を、単体および相手と接触した状態でそれぞれ解析した。また、「light touch effect」と呼ばれる身体動揺抑制効果に着目し、垂直離陸時にもこの効果が観察されるかどうかを検討した。

その結果、垂直離陸時には、下肢全般の筋活動が向上し、足関節を中心に下肢関節周りの拮抗対筋の同時活性化の見られた。一方で、垂直離陸時には床反力中心の揺動（つまり、身体動揺）が大きくなった。このことは、拮

抗筋対の同時活性化が必ずしも関節粘弾性増加を生み出している（身体を堅く固定して身体動揺を抑えている）わけではないことを示唆している。また、興味深いことに、一部の被験者では、垂直離陸での静止立位において外果（くるぶし）の動きが増加していた。この結果は、垂直離陸では、通常バランス制御の支点とみなされる足関節自身が動いていることを意味しており、垂直離陸でのバランス制御が従来の立位制御モデルとは異なる制御構造を有している可能性を示唆する。

また、通常立位する二者が接触する条件では両者の床反力中心の揺動に一定の相関が見られたが、二者の一方が垂直離陸を行うと両者の相関が低下することが確認された。このことは、「他者との関係性を絶つ」という内容が「身体動揺の相関断ち切り」という物理的現象として実証したものであり、有意義な結果である。一方で、他者に軽く接触することで重心動揺が大きく減少する“light touch effect”については、垂直離陸時においても通常立位と同様に生じることが明らかになった（図3）。

以上の結果から、垂直離陸による「関係性の断絶」は、通常時には二者が一体となってバランスを維持する制御構造が解消されることによってもたらされたものであって、他者との接点から得られる感覚情報の遮断を意味するものではないと考えられる。

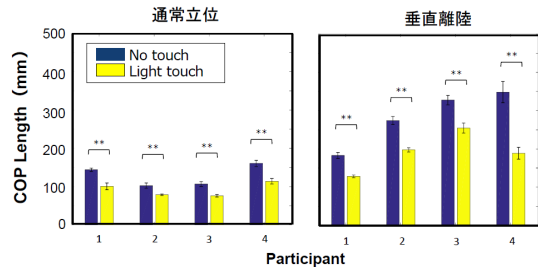


図3 light touch effect の影響

(3) 他の武術的身体操作の解析 (発表 ,)

本研究では、上述した立位バランスに関する内容のほか、種々の武術的身体操作の効果を実験的に検証したが、ここではその一例として「運動の履歴効果」について述べる。

初期姿勢から目標姿勢に移行してその姿勢を維持する際に、移行過程での身体軌道の違いに依存して目標姿勢を維持する際の筋活動が異なることを実験的に明らかにした。この結果は、同じ姿勢を維持するための筋活動がその姿勢に至る経路に依存して異なること、つまり、ある姿勢を楽に（小さな筋活動で）維持したいときはその姿勢に至る経路に留意する必要があることを示している。姿勢維持に無駄な筋活動を使わないことは武術に限らず身体技能全般の実践において重要であるから、身体操作の違いが姿勢維持における筋活動の違いを生むことを示した本研究成果は重要な結果である。

(4) 姿勢の変動を許容する立位バランスの協調制御法(発表,)

全身運動を想定した冗長多関節リンクモデルの軌道生成において、目標手先位置と望ましい重心位置を実現する関節角からなる部分空間(UCM: UnControlled Manifold)を定め、このUCM上で最適な関節角の組を時々刻々と決定していく制御法を考案した。この制御法は、UCM上の点を選び続けることにより、手先位置が目標軌道に沿い、かつ、重心が身体バランスをとるための範囲内に常に位置し続けるような身体姿勢を生成する。この制御法の特徴は、関節角の目標値を陽に与えないことで、身体姿勢の変動を許容する柔軟性にある。

続いて、提案した上記の協調制御法によってどのような全身運動が実現できるかを計算機シミュレーションで調べた。具体的には、ヒトの身体動作を鉛直面内で動く5リンク機構としてモデル化したものを用いてダイナミクスを表現し、到達運動の制御を行なった。作成したモデルにおいて、運動中にインパルス状の外乱を付加した際の姿勢変動を調べたところ、関節角にばらつきが生じるものの手先は目標軌道を描き続け、かつ、重心位置も望ましい範囲に維持されることが確認できた。

このように、本研究では、冗長自由度をもつ身体機構の下で、姿勢変動を許容しつつ目的の動作を実現する身体操作法を具体的な制御アルゴリズムとして構築することができた。

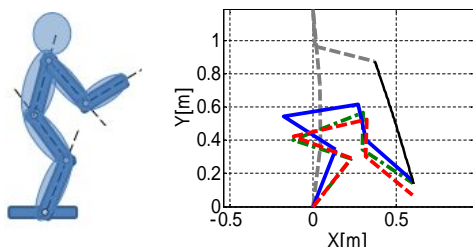


図4 5リンクモデルの構造(左図)とシミュレーションで得られた終端姿勢(右図)

(5) 外乱に強い立位制御のメカニズム(発表)

両手を組んで静止立位姿勢をとる被験者の胸部に対して左右いずれかの方向に引っ張る外乱を与え、床反力中心(COP)の揺動および下肢及び体幹の筋(胸部棒脊柱筋、腹直筋、大殿筋、中殿筋、内転筋、大腿直筋、長腓骨筋、内側腓腹筋)の筋活動を計測した。外乱は、重りを自由落下させたときの力を利用して、力の大きさが一定に保ちつつそのタイミングと方向は被験者が予期できないようにした。COPの揺動に対してStabilogram Diffusion Analysis(SDA)を適用して、フィードバック制御の遅延時間およびフィードバックゲインを推定した。また、外乱に対する筋活動の開始時間を求めたほか、応答する

筋群の活動がCOPの安定化に寄与するかどうかを探る筋シナジー解析を主成分分析とUCM解析を用いて行なった。また、外乱付与直後のCOP揺動総量を姿勢安定指標として、抽出した種々の運動パラメータのうちこの指標値を小さく抑える上で有効なものを探った。

その結果、SDAで推定されるフィードバック制御の遅れ時間より短い期間でのCOPの揺動が姿勢安定指標と高く相関していること、さらに、膝下筋(長腓骨筋・内側腓骨筋)が外乱直前(150ms~)に強く活動した場合は、外乱後(150~2000ms)に強く活動した場合に比べて姿勢安定指標が有意に小さくなることが明らかになった(図4)。

少林寺拳法には、相手から引っ張られた時に体勢を崩すのを防ぐ手法として鈎手手法がある。この手法を習得する際にはしばしば「足首を固めるように」と指導される。足関節周りの筋インピーダンス調整に寄与する長腓骨筋・内側腓骨筋の筋活性を高めることが外乱に対する揺動抑制に重要であることを示唆する本研究結果は、鈎手手法の指導方法を支持するものであるといえる。

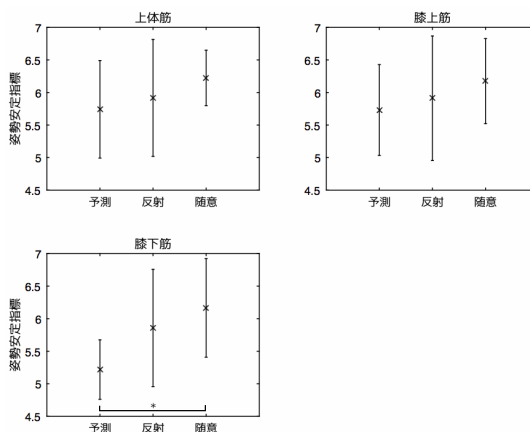


図4 筋活動と姿勢安定指標の関係。各筋活動が最大値の1/2をはじめて越えた時刻に応じて予測期(外乱前の150ms)、反射期(外乱発生後0~150ms)、随意期(外乱発生後150~2000ms)に分け、それぞれの場合の姿勢安定指標の平均値と標準偏差を示している。

(6) むすび

本研究は武術的身体操作法の原理を明らかにすることを目的として実施したものであるが、研究期間中のさまざまな検討を通じて改めて認識したことはヒトの運動制御における立位と歩行の重要性である。そのため、本報告書で述べた成果の大部分は立位バランスに関するものとなった。二足による立位という不安定性がヒト運動制御の重要な因子であることはある意味で当然であるが、ここでは、ヒトの運動制御メカニズム研究においては、局所の動きだけでなく(バランスに関わる)全身の動きを同時に考える必要があることを指摘しておきたい。

また、本研究では、複数の武術実践者の方

に実験に参加いただき、また、種々の指導や助言をいただいた。これらの内容は形のある成果物としてまとめるには至っていないが、研究チームにとって、ヒトの運動制御メカニズム（特に全身の協調や身体感覚の働き）に関して新しい観点から考察を深めるうえで大きな財産となった。この場を借りて挑戦的萌芽研究としてサポートいただいたことに謝意を表したい。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計12件)

香川高弘, 宇野洋二: 単振子と倒立振子に基づく歩行バランスに関する検討, 電子情報通信学会 ME とバイオサイバネティクス研究会, 2017/03/13, 機械振興会館(東京都港区).

石川裕一郎, 金井 涼, 阪口 豊: 武術における立位法の実験的検討～身体バランスに与える影響と接触相手との関係性の断ち切り～, 電子情報通信学会ヒューマン情報処理研究会, HIP2016-84, 2017/03/10, 脳情報通信融合研究センター(大阪府豊中市).

金井 涼, 石川裕一郎, 阪口 豊: 静止立位時の姿勢が動き出し動作の特性に与える影響, 電子情報通信学会ヒューマン情報処理研究会, HIP2016-83, 2017/03/10, 脳情報通信融合研究センター(大阪府豊中市).

石川裕一郎, 金井 涼, 阪口 豊: 武術における立位バランスの実験的検討: 「垂直離陸」による接触相手との関係性の断ち切り, 第10回 Motor Control 研究会, 2016/09/03, 慶応義塾大学(神奈川県横浜市).

金井 涼, 石川裕一郎, 阪口 豊: 通常立位と中間重心立位からの前進動作の比較, 第10回 Motor Control 研究会, 2016/09/02, 慶応義塾大学(神奈川県横浜市).

Owaki, D., Horikiri, S., Nishii, J. Ishiguro, A: "TEGOTAE"-based control of bipedal walking, Living Machines V: 5th International Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems, 2016/07/22, Edinburgh (UK).

金井 涼, 石川裕一郎, 小幡哲史, 阪口 豊: 静止姿勢における筋状態は直前の運動履歴に依存する, 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, 2016/03/22, 玉川大学(東京都町田市).

石川裕一郎, 金井 涼, 小幡哲史, 阪口 豊: 武術における「離陸」のメカニズムの解明～相反する動作の拮抗が生み出す身体状態～, 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, 2016/03/22, 玉川大学(東京都町田市).

熊澤一樹, 香川高弘, 宇野洋二: 姿勢の変動を許容する全身運動の制御, 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, 2016/03/22, 玉川大学(東京都町田市).

藤井瑛蔵, 西井 淳: 外乱に対する姿勢安定性を決定する制御要素, 電子情報通信学

会総合大会, 2016/03/15-16, 九州大学(福岡県福岡市).

熊澤一樹, 香川高弘, 宇野洋二: 多関節アームの姿勢の多様性を許容する位置制御, 第16回計測自動制御学会 SI 部門講演会, 2015/12/14, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市).

小森拓真, 香川高弘, 宇野洋二: 重心周りの角運動量を考慮したヒューマノイドロボットのバランス維持, 第16回計測自動制御学会 SI 部門講演会, 2015/12/15, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阪口 豊 (SAKAGUCHI, Yutaka)

電気通信大学・大学院情報理工学研究所・教授

研究者番号: 40205737

(2) 研究分担者

宇野 洋二 (UNO, Yoji)

名古屋大学・大学院工学研究所・教授

研究者番号: 10203572

西井 淳 (NISHII, Jun)

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号: 00242040

井上 康之 (INOUE, Yasuyuki)

東京大学・高齢社会総合研究機構・特任研究員

研究者番号: 00644436