

研究終了報告書

「DATSURYOKU: マルチレベルな介入による運動スキル獲得支援の実現」

研究期間: 2019年10月～2023年03月

研究者: 村井 昭彦

1. 研究のねらい

スポーツの試合やピアノの演奏会の本番において普段のパフォーマンスが発揮できずに失敗に終わることは珍しくない。この現象は緊張に起因することが多く、そのような環境下では、ヒトは暗黙(無意識)的に筋の過度な共収縮(拮抗する筋の活動)を起こし、関節剛性の上昇や振動等を招き、パフォーマンスの低下やミスを誘発する。ヒトは、暗黙的な状況のみならず明示(意識)的な状況においても、筋を活動させることは容易だが、脱力させることは極めて困難である。また他動的にでさえ、機能的電気刺激により筋を活動させることができるが、脱力させるには筋弛緩剤や運動野への経頭蓋磁気刺激による抑制等の侵襲的な手法が必要となる。例えば高齢者やパーキンソン病患者において見られる振戦や筋固縮は、拮抗する筋の過度な共収縮が原因であり、その解決には侵襲度の高い深部脳刺激までも適用されている。このように、暗黙的な筋脱力はアスリートのパフォーマンスのみならず日々のスムーズな日常生活動作に重要であるが、その実現は極めて困難である。

本研究“DATSURYOKU”は、暗黙的な筋脱力による運動パフォーマンスの向上のために、運動力学および認知のマルチレベルな介入による運動スキル(暗黙的な筋脱力)獲得支援の実現を目的とする。ヒトの身体の長期的変化には明示的な認知介入が必要であるが、自身の身体の可観測性および可制御性が満たされないことから、認知介入のみでは身体を適切に制御することができない。一方で運動力学介入ではヒトの認知に関わらず自在に身体に一時的変化をもたらすことができるが、ヒトが意識しないために学習・定着(スキル獲得)が起こらない。そのため本提案では、ヒトの運動パフォーマンスを決定する身体と環境の間の運動力学的インタラクション(身体環境インタラクション)の適切な変化による運動スキル獲得のために、①身体環境インタラクションを暗黙的に変化させる環境の運動力学介入のデザイン、および②学習・定着を実現する認知介入のデザインを行う。①により自在に身体環境インタラクションに一時的変化を起こす技術を確立し、②により長期的変化として学習・定着させる。“DATSURYOKU”の実現には①および②の実現が必要であるが、本研究では特に、大目標(Society5.0が謳う“誰もが快適で活力に満ちた質の高い生活を送ることのできる社会(健康な社会)の実現”)からのバックキャストイングから得られる②に焦点を当てる。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、大きく次の3つのテーマについて取り組んだ。

研究テーマ①「身体環境インタラクションを暗黙的に変化させる環境の運動力学介入のデザイン」について、身体環境インタラクションの暗黙的な変化を実現するために、ヒトの運動に合わせて運動力学的に環境を制御する運動力学介入システムを開発した。これはヒトの運動

を計測する光学式モーションキャプチャとトレッドミルのコントローラを通信・同期させるもので、0.05~0.1[s]の時間遅れでの同期を実現した。次に筋脱力を実現する運動力学介入デザインとして、歩行時の膝への負担軽減を目的とした歩行動作に合わせたトレッドミルの速度・加速度の制御を行なった。着地時の膝関節の剛性を下げるために膝周りの伸長反射を抑制するため、踵接地時に低速、その後加速する速度パターンを歩行動作と同期して実現した。これにより、等速パターンと比較して床反力鉛直成分を 2.14%、腓腹筋および前脛骨筋の活動をそれぞれ 1.89%、0.708%低減し、怪我リスクの低減と筋脱力を実現した [主な研究成果リスト 1.]。

研究テーマ②「学習・定着を実現する認知介入のデザイン」について、ヒトの運動に合わせて認知的に環境を制御する認知介入システムを開発した。これはヒトの運動を計測する光学式モーションキャプチャと立体音響システムのコントローラを通信・同期させるもので、ヒトの運動に同期した音環境の変化を実現した。また、認知的に筋脱力を促すことを目指し、筋緊張のフィードバックを実現する DATSURYOKU センサを開発した。これは静電容量式周長センサにより筋形状の変化を計測するものであり、日常的な長時間安定した計測における従来の筋電計の技術的課題を解決した。筋活動と周長の高い相関 ($ICC(2, 1) = 0.928$)を確認し、また筋の共収縮時や歩行時に特徴的なパターンが得られることを確認した。このデバイスは 200Hzで 24 時間の筋状態計測を実現し、日常的な筋状態の把握を実現した [主な研究成果リスト 2.]。

研究テーマ③「筋脱力を実現するトレーニングシステム・サービスの社会実装」について、スポーツ分野およびリハビリテーション分野における連携を実現した。またこれらの連携において DATSURYOKU センサを利活用するため、安定かつ簡易に用いられるようアップデートを行なった。

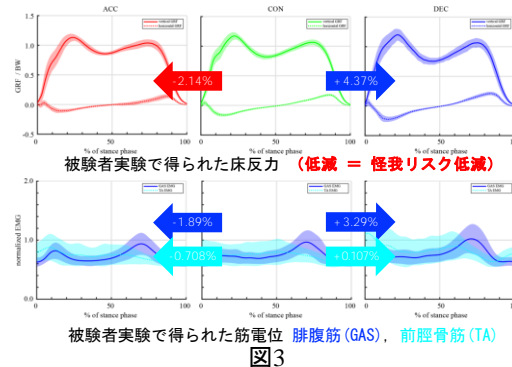
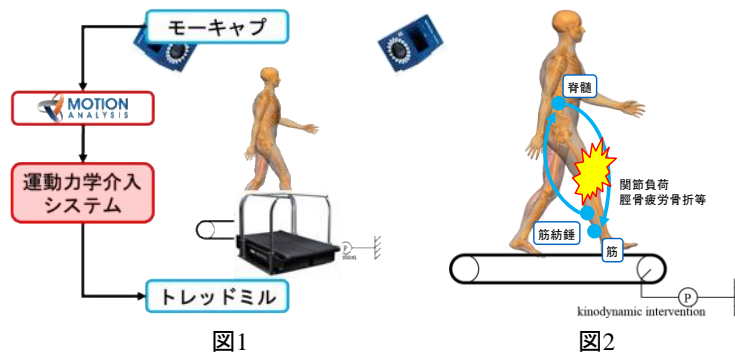
これら 3 つのテーマにおいて、身体と環境の運動力学的なインタラクションを軸に筋脱力による運動パフォーマンス向上を目指し、環境制御(インタラクションデザイン)による筋脱力の実現および日常的な筋状態計測技術を開発した。その結果、筋を軸としたインタラクションデザインを確立したと考える。

(2) 詳細

研究テーマ①「身体環境インタラクションを暗黙的に変化させる環境の運動力学介入のデザイン」 [主な研究成果リスト 1.]

日常生活における活動量の低下や緊張は、暗黙のうちに過剰な筋収縮を引き起こし、スポーツにおけるパフォーマンス低下や傷害を引き起こす。本研究テーマでは、環境と身体の間相互作用を、環境の運動力学介入により暗黙的に変容させた。具体的には、トレッドミルの加減速を介入として、歩行時の負荷軽減を実現した。そのために、ヒトの運動に合わせて運動力学的に環境を制御する運動力学介入システムを開発した。これはヒトの運動を計測する光学式モーションキャプチャとトレッドミルのコントローラを通信・同期させるもので、0.05~0.1[s]の時間遅れでの同期を実現した(図 1)。次に、身体モデルを用いた順動力学シミュレーションを用いて、筋脱力を実現する運動力学介入パターンをデザインとした。脛骨疲労骨折等の怪我のリスクを低減するために、歩行時の床反力の低減による膝への負担軽減を目指した。こ

の際、膝の剛性の低減が必要となるが、この剛性は膝周りの拮抗する筋の伸長反射等に由来する共収縮により生まれる(図2)。そこで、着地時の筋の伸長反射を低減させるために、踵接地時の速度を低減、そして平均速度(=パフォーマンス)を保つために、その後加速する速度パターンを歩行動作と同期して実現した。これにより、等速パターンと比較して床反力鉛直成分を2.14%、腓腹筋および前脛骨筋の活動をそれぞれ1.89%、0.708%低減した(図3)。これらの結果は、非侵襲的な運動力学的介入によりヒトの運動制御システムを変容させ、スポーツや日常生活における暗黙の筋弛緩(DATSURYOKU)を実現し、また傷害を予防する可能性を示している。



研究テーマ②「学習・定着を実現する認知介入のデザイン」 [主な研究成果リスト 2.]

ヒトの計測と、①で開発した環境の運動力学介入と、視覚や聴覚等の認知介入のリアルタイムフィードバックシステムを開発した。具体的には、8chのキューブ状に配置されたマルチスピーカによる立体音響ハードウェアと、複数の音源位置を制御するソフトウェアから構成される認知介入システムを構築し、また運動計測システムとリアルタイムにつながる運動力学介入システムとのリアルタイムインタフェースを開発した。これは、ヒトの運動を入力として音源位置や音源種類等を制御、出力し、聴覚による認知介入を実現する。これにより、ヒトの運動と同期した認知介入とともに、介入による運動の変容の計測を実現し、リアルタイムの環境の運動力学および認知の制御を可能とした。

また、認知的に筋脱力を促すことを目指し、筋緊張をフィードバックする DATSURYOKU センサを開発した。日常的に筋緊張を測定することは重要であるが、過度の筋緊張時に見られる共収縮は拮抗筋で相殺され動作中に現れないため容易に検出することができず、従来のモーションキャプチャシステムでは測定することができない。筋状態の把握には通常筋電計が用いられるが、筋電信号の性質から高周波数(1kHz~)での計測が必要であり、消費電力

が大きい。また経皮で電位信号を計測することから、皮膚と電極のインピーダンスが影響し、長時間の日常計測には適さない。そこで筋の生理的な特徴に着目すると、筋は活動時には筋腹の隆起とともに硬化し、弛緩時には軟化する。つまり、筋の形状および硬度を計測することで筋の状態を推定できる。そこで、日常的に筋状態を把握することができるウェアラブル・デバイス“DATSURYOKU センサ”(図 4)を開発した。これは静電容量式周長センサにより筋形状の変化を計測するものであり、従来の筋電計の技術的課題を解決した。図 5 に見られるように筋活動と周長の高い相関($ICC(2, 1) = 0.928$)を確認し、また筋の共収縮時(図 6 左)や歩行時(図 6 右)に特徴的なパターンが得られることを確認した。このように、DATSURYOKU センサは、筋活動に現れない受動的な筋変形を測定することができる。DATSURYOKU センサは、日常的に筋緊張・弛緩を測定することで過度の筋緊張による故障や怪我のリスクを回避し、日々の変化を測定することで先制医療の実現に貢献する可能性を示す。



図4

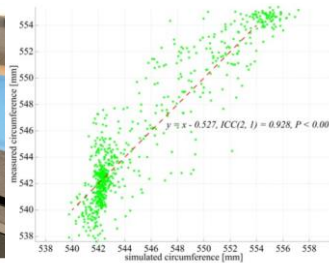


図5

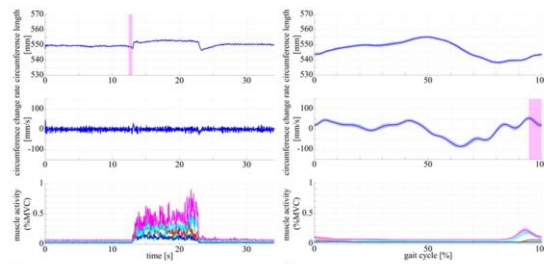


図6

研究テーマ③「DATSURYOKU を実現するトレーニングシステム・サービスの社会実装」

システム・サービスの社会実装として、スポーツ分野およびリハビリテーション分野における連携を実現した。そして、これらの連携において DATSURYOKU センサを利活用するため、安定かつ簡易に用いられるようアップデートを行なった(図 7)。

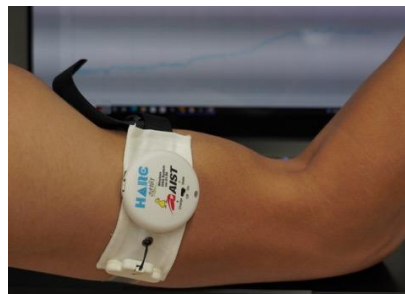


図7

3. 今後の展開

今回のさきがけ研究の中では、身体と環境の運動力学的なインタラクションを軸に筋脱力による運動パフォーマンス向上を目指し、環境制御(インタラクションデザイン)による筋脱力の実現および日常的な筋状態計測技術を開発した。その結果、筋を軸としたインタラクションデザインというコンセプトを確立したと考える。また、当初の研究目的から外れるために成果報告に詳細は記載していないが、さきがけ研究期間中、コロナ禍においてヒトを対象とした実験の遂行が非常に困難となり、いかに非接触で実験を遂行するかという工夫の中から、映像式モーションキャプチャの社会実装や DATSURYOKU センサに代表されるウェアラブルデバイスによる日常的なヘルスケアデータの蓄積を実施した。このような研究活動の中から、「筋を軸としたインタラクションデザインの普及」、つまり日常的に筋を測り、筋を知り、筋を変える、その結果、より筋を身近に感じることで日常的なヒトのパフォーマンスの拡張を実現するという考えに至っている。これらの中から出てくる成果をアピールすることで、上記の日常的に筋を測り、筋を知り、筋を変えるというリテラシの変化のきっかけを 2~3 年に実施し、実際の社会への実装を 5 年を目処に実現したいと考える。

4. 自己評価

研究目的の達成状況については、今回のさきがけ研究の目的「身体と環境の運動力学的なインタラクションを軸に筋脱力による運動パフォーマンス向上を実現」は、環境の運動力学介入による怪我リスクの低減と筋脱力の実現という形で達成できた。また研究の進め方(研究実施体制および研究費執行状況)については、今後の研究展開も含めて大規模実証実験等を実施するための体制を整備することができ、上記目的および日常的な筋の計測に必要なシステム・デバイスの開発を中心として適切に研究費を執行した。研究成果の科学技術および社会・経済への波及効果としては、さきがけ研究で得られた技術を知財化することで今後の展開の基礎とし、今後の展開を形成することができた。特に、今後の医療・介護において必要となる先制医療に資する、筋を軸とした日常的なヘルスケアデータの計測・蓄積とそれによる疾患予測・予防というコンセプトにもとづき、社会実装を目指した実証実験を始めることができた点が、今後の社会・経済への波及効果がある。以上から、今後の社会的な医療・介護に資する、筋を軸としたインタラクションデザインを確立し、その普及を目指している点が高く評価できると考える。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 7件

1. Murai, A., Washino S., and Mochimaru, M.. "DATSURYOKU: designing environment-body interaction for implicit muscle relief." *Advanced Robotics* 36.3 (2022): 142-152.

本研究では、環境と身体との相互作用を、環境の運動力学介入により、暗黙的に変容させる。具体的には、トレッドミルの加減速を介入として、歩行時の負荷軽減を実現する。デザインした介入パターンを実環境に実装し検証を行った。その結果、踵接地時にトレッドミルの速度が低く徐々に加速する場合、床反力鉛直成分が 2.14%減少し、腓腹筋と前脛骨筋の活動がそれぞれ 1.89%と 0.708%減少した。これらの結果は、スポーツや日常生活における

暗黙の筋弛緩(DATSURYOKU)を実現し、また傷害を予防する可能性を示している。

2. Murai, A., Kanazawa, S., Ayusawa, K., Washino, S., Yoshida, M., and Mochimaru, M. "DATSURYOKU Sensor—A Capacitive-Sensor-Based Belt for Predicting Muscle Tension: Preliminary Results." *Sensors*, 21.19 (2021): 6669.

日常的に筋緊張を測定することは重要であるが、従来のモーションキャプチャシステムでは測定することができない。そこで、筋の生理的特徴である、活動時に筋腹部断面積が増加し弛緩時に軟化することに着目した。適用部位の外周を計測する DATSURYOKU センサを用いて筋緊張、特に共収縮と弛緩の計測を実現した。DATSURYOKU センサは、日常的に筋緊張・弛緩を測定することで過度の筋緊張による故障や怪我のリスクを回避し、日々の変化を測定することで先制医療の実現に貢献する可能性を示す。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 2 件(特許公開前のものも含む)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

- 村井昭彦, 鷺野壮平, 持丸正明, “DATSURYOKU: 身体環境インタラクションが筋活動をデザインする”, 第 26 回ロボティクスシンポジウム, 2021.
- Suzuki, H., Murai, A., Ikegami, Y., Uchiyama, E., Yamamoto, K., Yamada, A., Mizutani, Y., Kawaguchi, K., Taketomi, S., and Nakamura, Y., “Muscle Activity Estimation at Drop Vertical Jump Landing Using Passive Muscle Mechanical Model.” 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society, pp. 4722-4727, 2021.
- 村井昭彦, “健康で安全な生活を目指す人間拡張技術”, バイオメカニズム学術講演会, 2021.
- 鈴木比奈子, 鮎澤光, 村井昭彦, “運動志向性にもとづく筋骨格系最適化による運動スキル拡張”, 第 28 回ロボティクスシンポジウム, 2023
- ウルトラセブン 55 周年記念コラボレーション特別指令「エレキングの進行を阻止せよ」-身体の可能性に挑戦する実証実験-, 柏の葉イノベーションフェス 2022, 2022.