

[研究助成 (A)]

動的プリミティブの運動制御仮説に基づく 歩行・走行への介入と訓練効果

2241021



研究代表者
(助成金受領者)

大阪大学 大学院基礎工学研究科

准教授

平井 宏明

[研究の目的]

ノーバート・ウィーナーの『サイバネティクス』以来、「人機一体」技術は着実な進化を遂げてきた。現在、支援技術は単なる機能補完の段階を超え「身体拡張」の領域に到達しており、パラアスリートの事例が示す通り、生来の身体能力を凌駕するパフォーマンスが現実のものとなりつつある。しかし、この「拡張された身体」とそれを制御する「脳」との相互適応プロセスに関する科学的理解は、未だ十分ではない。こうした背景から、本研究では運動制御および学習に関し、以下の学術的問い（Q1～Q5）を設定した。

Q1：運動制御の基本構成要素は何か

Q2：脳はどの変数を操作して拡張身体を制御するか

Q3：これらの変数は脳内でどのように符号化されるか

Q4：運動符号はどのように獲得・保持されるのか

Q5：符号獲得を最適化する訓練法は何か

本研究では、Q1～Q3に関し「運動制御は3種類の動的プリミティブ（機械インピーダンス、サブムーブメント、オシレータ）で構成される」という仮説（H1）を採用した。これを作業仮説とし、「動的プリミティブに基づく介入は、新奇身体と脳の間の運動学習を促進する」という検証仮説（H2）のもと、歩行・走行への介入を通じた運動性能向上効果の解明を目的とした。

[研究の内容、成果]

理論的基盤と解析方法

仮説に基づけば、脳は動的プリミティブを組み合わせ、身体の機械インピーダンスや平衡点に関わる変数を操作することで所望の動作を生成している。これらの変数は、筋群の協調的な活動パターンである筋シナジーとして脳内に符号化される。本研究では、H1の妥当性を検証しつつ、特にQ4（符号の獲得・保持）およびQ5（最適な訓練法）の解明を目指した。

評価にあたっては、大阪大学で開発された介入支援機器および筋シナジー解析技術を用い、7つの工学的指標（①運動学、②共活性シナジー、③機械インピーダンス、④平衡点、⑤平衡点可操作性、⑥踏力、⑦エネルギー代謝量）に基づいて多角的に分析した。②～⑤は筋骨格系の数理モデルより算出される物理的指標であり、ロボット工学からスポーツ、医学分野へ提案する新たな評価軸である。推定される運動特徴量は中枢神経系の運動指令を反映している。特に、効果器（足先）の平衡点操作能力を可視化する「平衡点可操作性」は、本課題によって考案された新しい概念^[6]であり、動的プリミティブ解析において核心的役割を果たす。本特徴量は機械インピーダンス、サブムーブメント、オシレータ、筋シナジーを統合的に関連付ける。

検証は、(1) 健常児童を対象とする陸上教室、(2) 健常成人を対象とする運動部活動、(3) 歩行困難者を対象とするリハビリテーション病院

の3つの現場で行い、提案手法の科学的根拠の獲得と社会実装を目指した。

各現場における研究成果

(1) 健常児童を対象とした陸上指導者による全力疾走訓練

10～11歳の健常児童9名を対象とした5か月の陸上指導を通じ、運動性能の向上を動的プリミティブの観点から評価した(図1A)。その結果、「平衡点可操作性」の特徴量により習熟過程の峻別に成功した。訓練初期から中期には「質的改善(平衡点可操作性楕円の最適化)」, 中期から後期には出力増大を伴う「量的改善」が進行することが判明した(図5)。これは、技能習得が単純な筋力向上ではなく、動的プリミティブと筋シナジーに基づく内部モデルの再構築過程(Q4の回答)であることを示している。

(2) 健常成人を対象とした機能性用具による歩行・走行訓練

身体各所に粘弾性特性を調整可能な受動用具(外腱)をネットワーク配置し、新奇身体環境を提供した(図2C, 図6A)。健常成人4名の訓練後のトレッドミル歩行において、外部動力を用いない受動用具として世界トップクラスとなる最大8.0%のエネルギー代謝量の削減を確認した(図6B)。この効率向上は、外腱網が機械インピーダンスと平衡点(サブムーブメント, オシレータ)の調整を介し、脚の弾道的制御を支援した結果である。また、歩行速度増加に伴う効果の減弱から、人工物による身体拡張には脳の制御系が適応可能な速度域の境界が存在することが示唆された。

さらに、脚間に動力伝達の新奇経路を形成する介入を行ったところ、健常成人4名の訓練後の走行において、実験参加者の未活用の身体性が引き出され、エネルギー代謝量はトレッドミル走行で6.7%減、地上走行で10.2%減という極めて高い性能を示した(図1B, 図2B)。

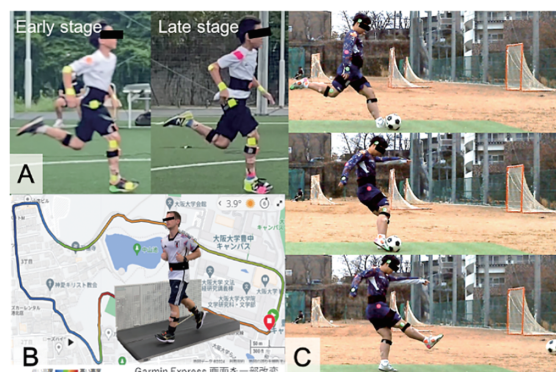


図1 アスリート特有の卓越した動作の計測と解析。(A) 陸上教室にて短距離走の訓練を行う健常児童^[14], (B) 長距離走の訓練を行う健常運動部生^[4,8], (C) サッカーのシュート動作^[5,11,12]を行うスポーツ外傷・障がい後リハビリ過程のプロ選手^[15]。訓練時の運動動作は、各種計測機器によって記録される、運動学、運動力学、筋電図学、運動生理学データに基づき多角的に評価・分析される。訓練は長期間に渡ることもある。

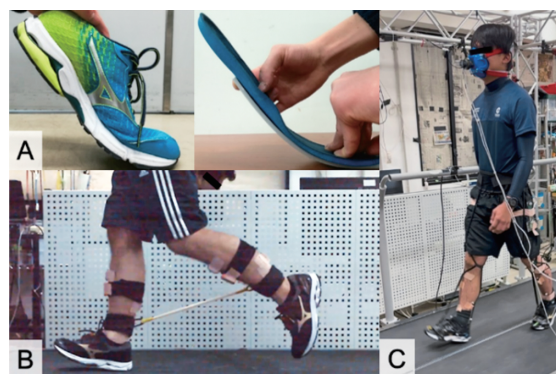


図2 運動機能拡張のための機能性用具。(A) 走行の経済性を向上させる高弾性シューズ, (B) 走行の経済性を向上させる脚間連結外腱^[4,8], (C) 歩行の経済性を向上させる外腱網スーツ^[16,21]。人工物によって強化された新奇な身体を使いこなすには十分な訓練が必要である。個人差はあるものの、総じて運動パフォーマンスの向上を確認している。

(3) 大腿骨近位部骨折患者を対象とした療法師および機能性用具による歩行訓練

術後患者13名を対象に、歩行自立を分かち制御戦略を動的プリミティブの観点から比較した(図3B, 図7, 図8)。自立群は平衡点制御を構成する要素が少なく、効率的に弾道的運動を生成していたのに対し、非自立群は、転倒回避のための多数の修正運動を伴っていた。自立には動的プリミティブに連動した共活性シナジーの再構築が不可欠であり、局所的な筋力改

善以上に、全身的な制御戦略を再構築する介入（Q5の解法）が重要であると結論付けられた。この知見は、さらなる術後患者13名を対象とした機能性用具（受動的外腱網）による歩行支

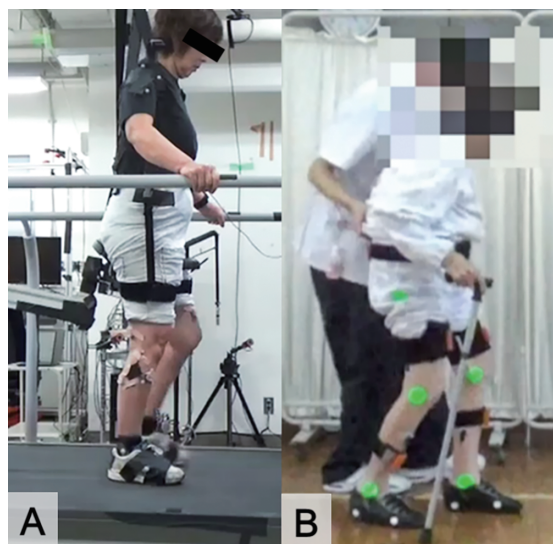


図3 障がい特有の拙劣な動作の計測と解析。(A) 部分体重免除の下でトレッドミル歩行訓練を行う慢性期脳卒中後遺症者、(B) 術後に地上歩行訓練を行う大腿骨近位部骨折患者^[2,9,18,22,23]。運動動作は医学的臨床評価の他、各種計測機器によって記録される、運動学、運動力学、筋電図学、運動生理学データに基づき、多角的に評価・分析される。

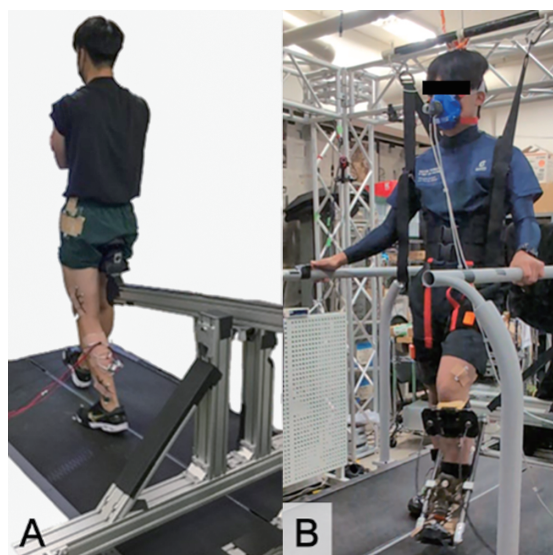


図4 運動機能回復のための電気機械装置。(A) 体重免除装置、トレッドミルロボット、機能的電気刺激の介入を搭載したワークステーション型歩行訓練装置^[1,3,7,10,13,17]、(B) 外骨格型歩行訓練ロボット^[20]。障がいの種類や程度によって運動機能に大きな個人差があるため、利用者の特性にパーソナライズした介入が重要となる。

援介入においても裏付けられ、臨床指標においても良好な改善効果が確認された。また、全実験参加者において立脚期での足先剛性増大、遊脚期での減少が認められた。外力への適応に伴う機械インピーダンス調整が歩行戦略の基盤であり、平衡点操作の効率化（サブムーブメント、オシレータの減少）こそが歩行自立の鍵であることが明らかとなった。

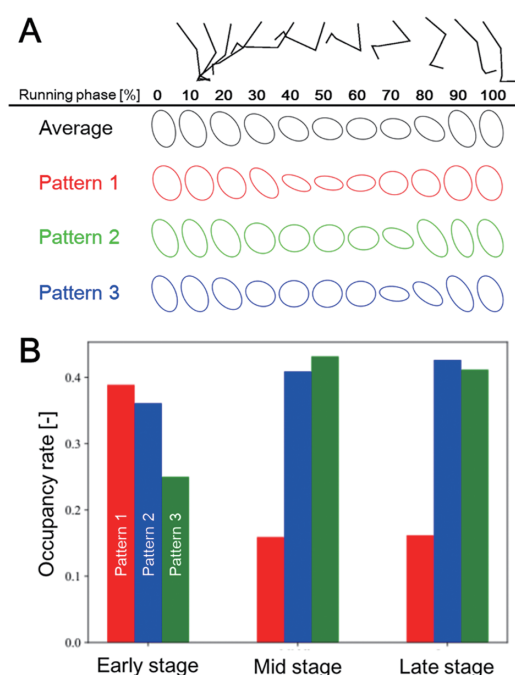


図5 脚の操作性と疾走能力。(A) 走行周期中の平衡点可操作性楕円の時間推移パターン、(B) 訓練初期、中期、後期における各パターン占有率。疾走能力の向上とともにパターン1は減少し、よりメリハリの利いたパターン2、3へと変化する。

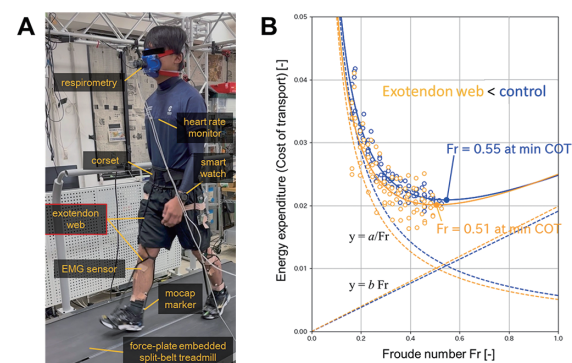


図6 機能性用具の装着による身体機能の適応と歩行能力の拡張。(A) 運動計測環境、(B) エネルギー代謝量。歩行支援ギア（外腱網）を装着し、訓練を積んだ実験参加者は歩行経済性が最大8.0%向上した。

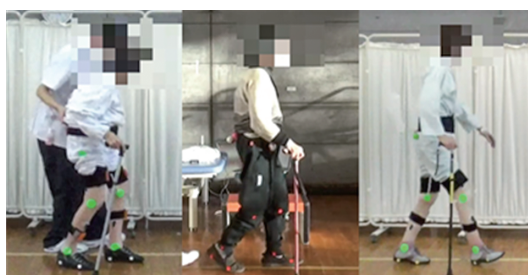


図7 大腿骨近位部骨折患者の歩行リハビリテーション。
左から歩行レベルの低い順（介助度の高い順）に並ぶ。

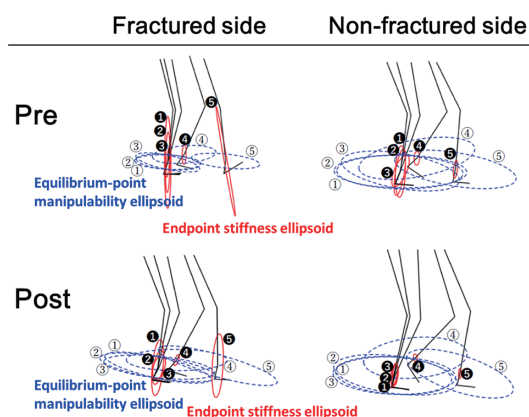


図8 平衡点可操作性楕円と足先剛性楕円（代表実験参加者のデータ）。歩行自立者は、平衡点の高い操作性とメリハリの効いたインピーダンス調整を獲得している。

総括と今後の展望

本研究を通じ、「運動改善の本質は、肢端の平衡点操作性を向上させるような、肢内の機械インピーダンスの調整にある」ことが強く示唆された。提案した「平衡点可操作性」は、今後のスポーツ科学やリハビリテーションにおける標準的指標となり得る。今後は、介入に対する「応答者・非応答者」を自動識別する機械学習アルゴリズムを構築する。さらに、展開中の民間企業との共同研究を通じて機器の社会実装を加速させ、個人の身体・脳適応特性に最適な介入を提示する「個別化スポーツトレーニングおよびリハビリテーション」（図2、図4）を確立し、誰もが身体拡張の恩恵を享受できる社会の実現に向けて研究を推進する。

〔成果の発表，論文など〕

- [1] 平井宏明，他：歩行訓練装置，特願 2024-85348（2024 年 5 月 27 日出願）。
- [2] 古川啓介，他：大腿骨近位部骨折患者の歩行レベルの違いによる運動制御の差異，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2024（ROBOMECH2024）講演論文集，2A2-H06(1)-(4)，2024。
- [3] 寺田怜平，他：サドル支持型免荷装置を用いたトレッドミル歩行訓練における蹴り出し動作のタイミング推定—骨盤／サドルの運動に着目した間接的アプローチ—，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2024（ROBOMECH2024）講演論文集，2A2-H07(1)-(4)，2024。
- [4] 八島侑祐，他：脚間を連結する受動的外腱を付与されたヒトの新奇な身体機能への運動適応と走能力の拡張，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2024（ROBOMECH2024）講演論文集，2P1-I08(1)-(3)，2024。
- [5] 黒木蓮，他：サッカー熟練者のインステップキック動作における支持脚の運動制御戦略，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2024（ROBOMECH2024）講演論文集，2P1-I09(1)-(3)，2024。
- [6] 平井宏明，他：運動解析装置，運動解析方法及びプログラム，特願 2024-147486（2024 年 8 月 29 日出願），PCT/JP2025/030496（2025 年 8 月 29 日国際出願）。
- [7] R. Terada et al.: Transverse pelvic/saddle rotation characterizing push-off initiation during saddle-seat-type body-weight-supported treadmill walking, Proc. 2024 10th IEEE RAS/EMBS Int. Conf. Biomed. Rob. Biomechatron. (BioRob2024), pp. 876-882, 2024.
- [8] E. Christofori et al.: Energy savings without external energy in augmented running, 第 42 回日本ロボット学会学術講演会（RSJ2024）予稿集，1G5-02，2024。
- [9] 古川啓介，他：大腿骨近位部骨折患者の歩行時の介助量と共活性シナジー，足先剛性および平衡点操作性の関係，第 45 回バイオメカニクス学術講演会（SOBIM2024）講演予稿集，pp. 194-197，2024。
- [10] 久賀紘和，他：サドル支持型部分体重免荷，左右分離型トレッドミル，および下腿三頭筋への機能的電気刺激を用いた歩行への介入とその効果，第 25 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（SI2024）講演論文集，pp. 1987-1990，2024。〔優秀講演賞〕
- [11] 黒木蓮，他：サッカー熟練者のインステップキック動作における蹴り脚と支持脚の運動制御戦略，第 25 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（SI2024）講演論文集，pp. 2176-2179，2024。〔優秀講演賞〕
- [12] 平井宏明，他：運動計測装置，運動計測方法及びプログラム，特願 2025-20156（2025 年 2 月 10 日出願），PCT/JP2026/004718（2026 年 2 月 10 日国際出願）。
- [13] 久賀紘和，他：サドル支持型部分体重免荷，左右分離型トレッドミル，および下腿三頭筋への機能的電気刺激を用いた歩行への介入とその効果—バイオメカニクスの分析—，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス

-
- 講演会 2025 (ROBOMECH2025) 講演論文集, 2A2-N06(1)-(4), 2025.
- [14] 武市明日海, 他: 陸上指導を受ける小学校高学年男子児童の疾走能力のトレーニング効果—平衡点可操作性による新しい尺度からの解釈—, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2025 (ROBOMECH2025) 講演論文集, 1P1-J08(1)-(2), 2025.
- [15] 黒木蓮, 他: 蹴球動作の熟練技能—インパクト直前 150ms の運動制御—, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2025 (ROBOMECH2025) 講演論文集, 1P1-J09(1)-(3), 2025.
- [16] 井出陽, 他: 受動的外腱網の着用による新奇弾性場へのヒトの歩行適応, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2025 (ROBOMECH2025) 講演論文集, 2A1-Q11(1)-(4), 2025.
- [17] 寺田怜平, 他: サドル支持型部分体重免荷装置を用いたトレッドミル歩行における股関節と足関節の相互作用, 第 43 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2025) 予稿集, 2K3-04, 2025.
- [18] 古川啓介, 他: 大腿骨近位部骨折患者における杖歩行自立・非自立の運動制御戦略の違い, 日本臨床バイオメカニクス学会第 52 回学術集会プログラム集, O19-4, 2025.
- [19] 古堅功将, 他: 外野手問題の運動計画に対する一考察: 視覚駆動型離散制御, 日本機械学会スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス部門講演会 (SHD2025) 講演論文集, B-5-3, 2025.
- [20] 寺田怜平, 他: サドル支持型部分免荷トレッドミル歩行における股関節運動に連動した足関節介入の効果—機能的電気刺激と外骨格ロボットの比較—, 第 26 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 (SI2025) 講演論文集, pp. 683-687, 2025.
- [21] 井出陽, 他: 力場の着用による身体機能拡張—歩行適応の個別動態解析—, 第 26 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 (SI2025) 講演論文集, pp. 1171-1176, 2025.
- [22] 古川啓介, 他: 大腿骨近位部骨折患者におけるリハビリテーション介入と歩行制御の変化, 日本ロボット学会誌, 2026. (印刷中)
- [23] 古川啓介, 他: 大腿骨近位部骨折後の歩行再獲得に対する運動制御的視点と臨床リハビリテーションへの示唆, 日本ロボット学会誌, 2026. (印刷中)