

Close-up 理学療法に活かすモニター技術

慣性センサを用いるウェアラブル歩行分析システムと臨床応用

三宅 美博 内富 寛隆

理学療法ジャーナル

第55巻 第8号 別刷

2021年8月15日 発行

医学書院

知っておきたい

深めたい

Close-up

理学療法に活かすモニター技術

生体から得られる情報を感知して可視化していくことはEvidence Based PTにとって重要であるだけでなく、対象者への説明と理解、相互信頼性の構築という観点からも意義のあることです。本企画では、モニター技術を理学療法にどう活かすのか、その臨床的意義を解説するとともに、これまでの成果を踏まえながら今後を展望します。

慣性センサを用いるウェアラブル歩行分析システムと臨床応用

三宅美博 内富寛隆

Key Words 歩行分析 慣性センサ 歩行軌道 Walk-Mate Evidence Based PT

はじめに

歩行運動に関連する時空間的軌道を推定できる臨床的歩行分析手法に近年関心が集まっている。診断や経過観察は、患者の歩行運動に伴う実際の体動を含めた、身体の流れや形に注目して行われることが多く、Evidence Based Physical Therapy (EBPT) の観点からも、歩行の連続的な時空間的軌道にかかわる客観的な情報が求められているのである。

これを実現するために、モーションキャプチャを用いる高精度な計測方法からキネクトなどを用いる方法まで、画像情報を活用したさまざまな歩行分析システムがこれまで提案されてきた。しかし、これらの方法は専用の計測スペースを必要とする大掛かりなものであり、日常のリハビリテーション治療への導入や所定の時間単位内での利用が難しいなど、多くの課題が残されていた。このような背景のなかで、身体に装着した小型の慣性セン

サの情報を用いることで、屋内外を問わず高精度かつ簡便な計測を可能とする、ウェアラブルな歩行分析システムへの期待が高まりつつある。

本稿では、われわれがWALK-MATE LAB社と開発を進めている、慣性センサを用いる歩行分析システムWM GAIT CHECKER (ウォークメイトゲイトチェッカ)を取り上げ、そのコア技術となる歩行軌道の高精度推定の方法、そして臨床応用の事例について解説する。

ウェアラブル歩行分析システム

1. システムの概要

ウェアラブル歩行分析システムWM GAIT CHECKER (WMGC) は、歩行運動時の一歩一歩の足部の運びの時空間的軌道や腰部の軌道を

Yoshihiro MIYAKE, Hiroataka UCHITOMI 東京工業大学情報理工学院(知能情報学)
〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259

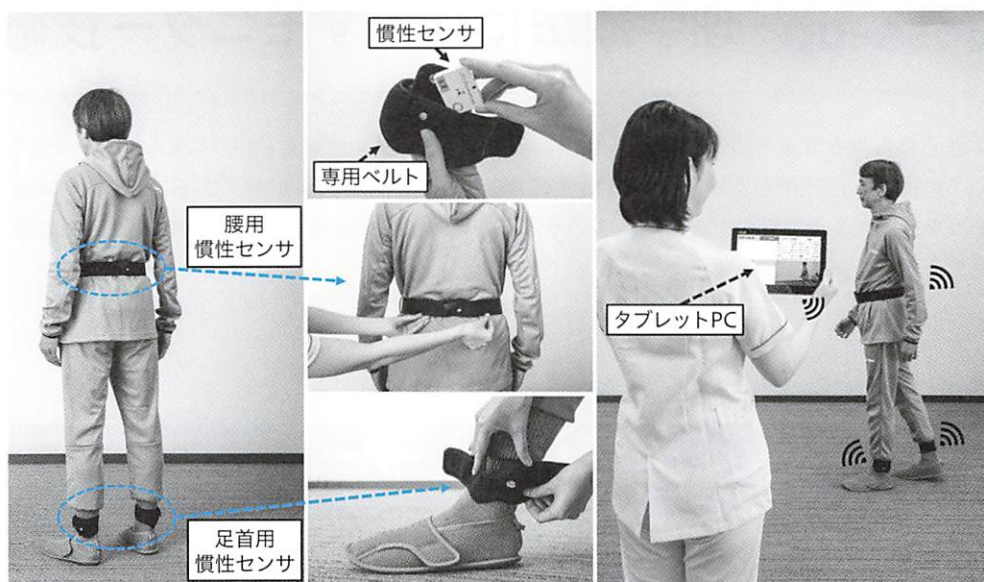


図1 ウェアラブル歩行分析システムWM GAIT CHECKERのシステム構成と計測方法

計測し、分析できるシステムである¹⁾。一般的に、このような軌道の取得には、複数の外部撮像装置を利用する光学式モーションキャプチャシステムが必要とされてきた。これに対してWMGCは、左右の足首や腰に装着した慣性センサを利用して歩行運動の際の足首軌道や腰軌道をそれぞれ推定できるため、リハビリテーション室や生活空間などさまざまな場所への導入が容易になる。また、慣性センサと無線接続するタブレットPCに実装された専用アプリにより、計測から分析、表示、外部出力までをワンストップで実行でき、利用方法も簡便である。

2. 計測時の操作と環境

システム構成と計測方法を図1に示す。左右の足首と腰にそれぞれ合計3個のウェアラブルな慣性センサを専用ベルトで装着することで、システムの利用準備が完了する。タブレットPCの専用アプリを操作することで、タブレットPCと慣性センサとの無線接続が確立し、計測開始が可能となる。専用アプリ内のボタンによって計測の開始と

終了を操作でき、終了直後にすぐに分析結果がレポート表示される。また、WMGCは歩行計測の際に同時に動画撮影も可能である。足首軌道や腰軌道の分析結果を閲覧するときに、動画を同時に表示することができ、診断時の観察情報と分析結果の時空間的軌道を対応付けて確認し、検討することができる。

3. 医療保険の適用

WMGCは一般分析機器で研究用途からデイリーユースまでさまざまな場面で活用することができるが、このモデルのほかに、一般医療機器(クラスI)の歩行分析計WM GAIT CHECKER Pro(製造販売届出番号:13B3X10313K00001)がある。こちらは医療機器であり、医療保険適用も可能であることから、医療機関で導入しやすくなっている。すでに歩行の分析結果のレポート情報を電子カルテに反映して履歴として利用する事例もある。患者の診断結果や経過観察の記録として継続的にデータを蓄積していくことが可能であり、EBPTへの応用も期待される。

歩行軌道の推定技術

1. 慣性情報からの軌道推定方法

慣性センサを利用する歩行運動の時空間的軌道の推定手法では、計測生データとして装着部位の加速度と角速度を計測し、これらに適切な回転座標変換を施すことでセンサ座標系からワールド座標系に変換し、さらに積分的な情報処理をすることで連続的な位置情報としての時空間的軌道を推定する。すでに精度向上や誤差要素低減のために、さまざまな推定アルゴリズムが提案されているが、ここでは筆者らの提案手法の要点を紹介する²⁾。図2aのように、慣性センサを用いて歩行運動時の一步一步の足首軌道を高精度に推定可能な手法であり、これを繰り返して適用することで連続歩行の足首軌道を推定することもできる。

一般に、慣性センサの計測データは、基線が経時的に変化するドリフト誤差や、センサの装着時姿勢に関連する誤差などさまざまな誤差要因を有し、軌道の推定結果に影響を与える。これに対して提案手法では、歩行時の立脚期に観測される特徴的な時系列データ波形をモデル化して一步一步のデータを分割して切り出し、一步一步の足首軌道を推定することで、誤差の累積を抑制している。また、連続的な位置情報の推定の際には加速度データの積分演算が必要であるが、装着時の足首センサの姿勢推定結果を補正に反映するとともに、時間的に発展する方向の積分演算と時間的に後退する方向の積分演算を組み合わせることで、足首軌道推定の高精度化を実現している。なお、本手法の詳細については関連論文を参照されたい^{2,3)}。

2. 歩行軌道の推定精度

歩行時の足首軌道推定の精度は、運動軌道計測のゴールドスタンダードとしての光学式モー

ションキャプチャシステム (optical motion capture system : OMC) を用いて検証されている^{2,3)}。具体的には、足首に装着したセンサで歩行を計測する際に、OMCでも同時に計測を行い、慣性センサを用いた時空間的軌道の推定結果とOMCで取得した参照値とを比較した。比較のために実施した相関分析の結果を図2bに示す。横軸に提案手法で推定された足首軌道から計算したストライド長、足首の最大持ち上げ高さ、歩行速度、歩行周期、および足首の水平面に対する回転角度をとり、縦軸にOMCで計測したそれぞれの参照値をとった相関分析の結果である。なお、この回転角度は、ある一步に対する次の一步のなす角に該当し、特に一步一步の足首軌道の推定を繰り返して連結することで得られる連続歩行の軌道推定の精度にかかわるものである。いずれの場合も、相関係数は0.9を大きく超える値を示し、参照値のOMCと比較しても高い精度で推定できていることがわかる。

3. 計測可能なデータ

歩行時の足首軌道は3次元の時空間的軌道で推定されるため、2次元に写像した軌道としても分析できる。図2cは、矢状面、前額面、水平面から見た足首軌道である。一連の歩行における一步一步の足首軌道が重畳表示されており、それぞれのストライド長やクリアランス (最大持ち上げ高さ) も含めて、連続的な線状の軌道として確認できる。また、一步一步のばらつきや、左右の非対称性を、それぞれの足首軌道の形状の相違として比較できる。さらに、定量的な分析に不可欠となる多くの歩行指標群についても自動的に計算されており、そのなかから選択して表示することができる。それらのデータ一式を外部のPCに取り出して分析することも可能になっている。

なお、ここでは足首軌道について説明したが、歩行に関連する時空間的軌道としては、同図に示すような腰軌道も重要である。WMGCでは上記

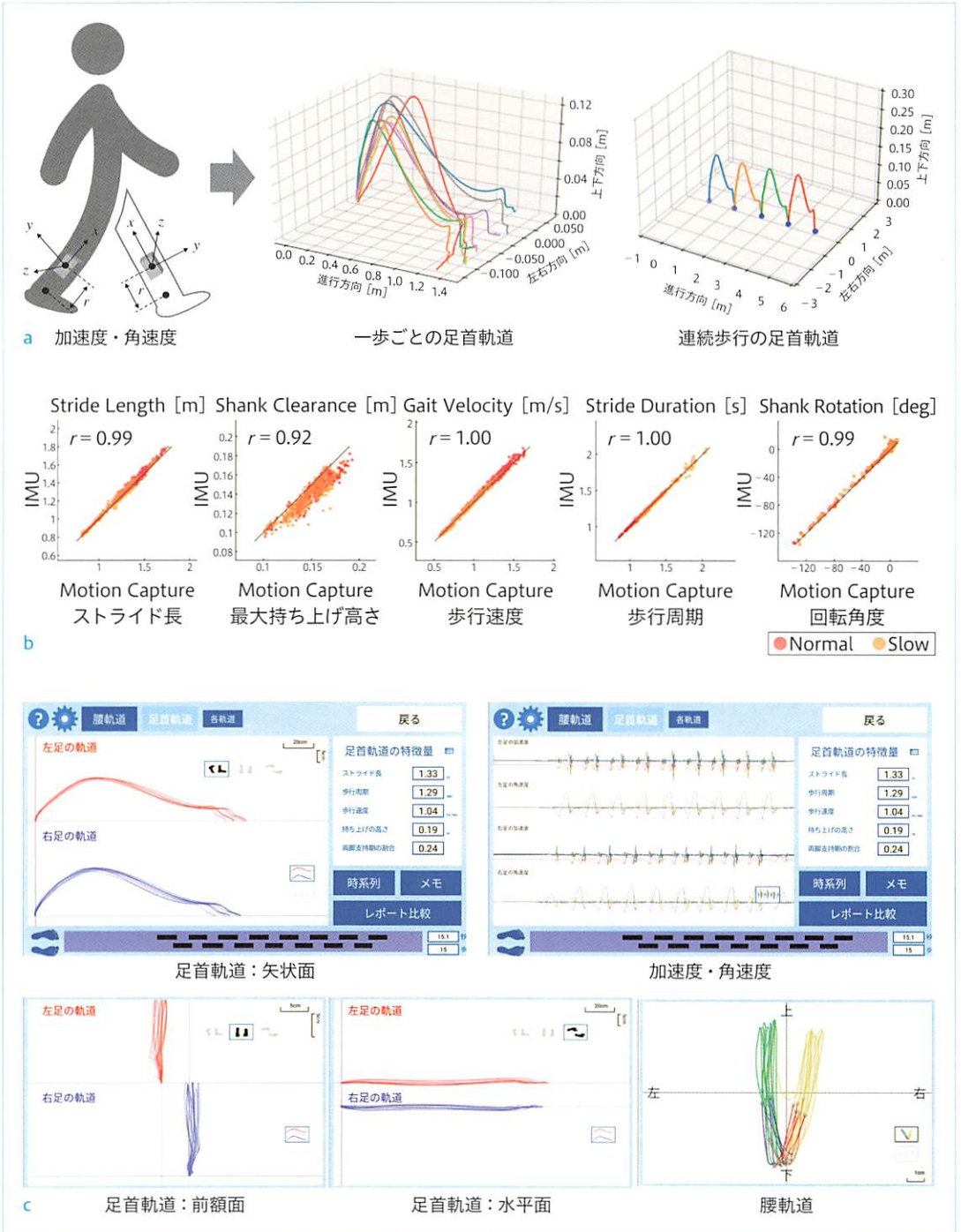


図2 慣性情報からの軌道推定と計測可能なデータ

a: 慣性センサを用いた足首軌道の推定, b: 慣性センサと光学式モーションキャプチャの相関分析, c: 2次元に写像した足首軌道

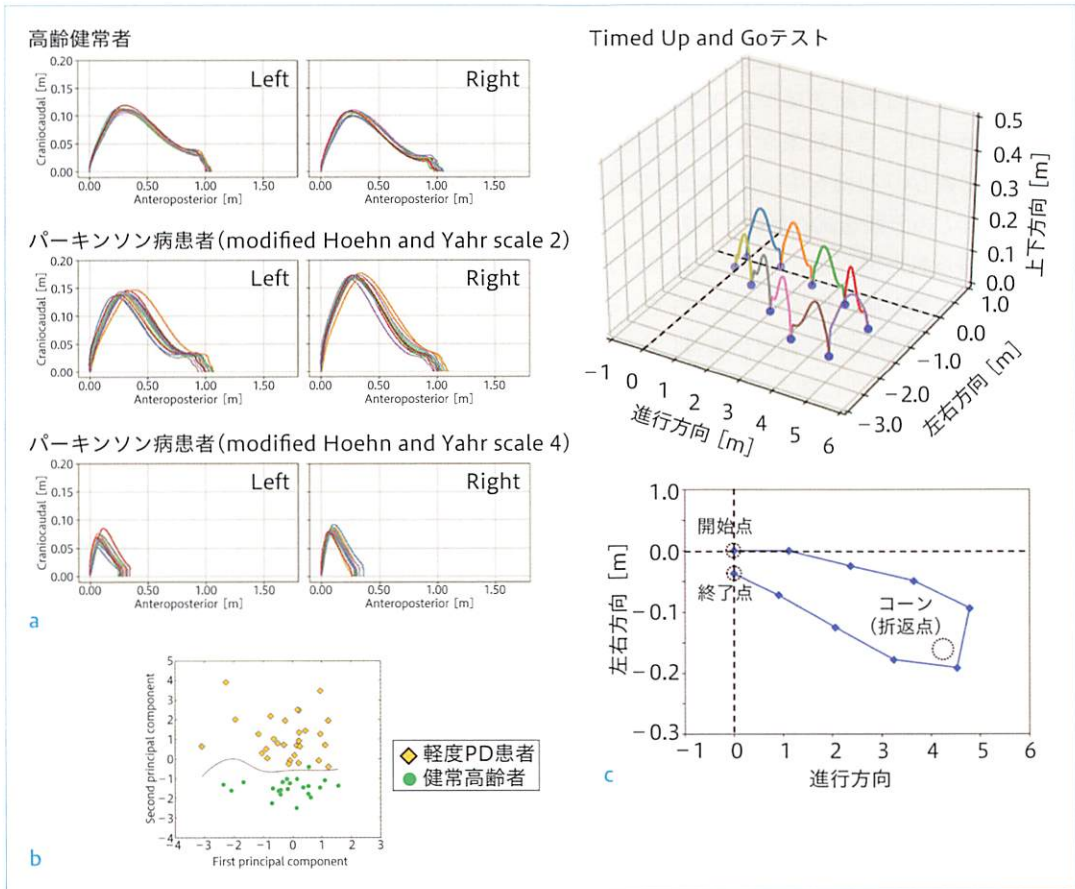


図3 臨床への応用例

a: パーキンソン病患者の足首軌道の推定, b: 機械学習技術を用いた軽度パーキンソン病患者と健常高齢者の分類, c: Timed Up and Goテストの足首軌道パターンの推定

と類似した手法で腰軌道の推定も行っているが、ここでは当該図事例の紹介にとどめる。

臨床応用事例の紹介

疾患に応じて歩行の様相が異なることから、患者の容態の診断や経過観察に歩行運動の観察や臨床的歩行分析が行われる。歩行運動を足首や腰の時空間的軌道の情報から捉えることは、診断時の観察結果と一対一に対応させて考察しやすいだけでなく、各種歩行指標の推定も可能とする。このような歩行診断支援に向けた試みについて紹介する。

1. パーキンソン病の足首軌道のパターン

図3aは、パーキンソン病 (Parkinson's disease: PD) 患者の歩行の足首軌道の推定結果である²⁾。図3aの上図から症状の軽い順に、高齢健常者、modified Hoehn and Yahr scale 2および4のPD患者の左右の足首軌道の推定結果が並んでおり、それぞれ15歩分の足首軌道が重畳表示されている。足首軌道の形状に注目すると、重症度が高くなるにしたがって、一步一步の足首軌道のばらつきが広がる傾向がみられ、また足の運びも小さくなっていることが確認できる。このように歩行の症状を時空間的軌道と歩行指標の両側面から検討できることが重要である。

また、このような情報は診断支援への応用も期待され、疾患の徴候の早期検知支援や、症状の進行に伴う重症度診断支援などの検討が進みつつある。図3bは、足首軌道から算出した歩行指標と機械学習(AI)技術を用いて、軽度PD患者と健常高齢者との分類を試みた事例である⁴⁾。分析結果から得られた境界線によって、軽度PDと健常高齢者の分類が高い精度で推定されていることが見てとれる。このような軌道に着目した診断支援の試みは、PD^{4~6)}に加えて、アルツハイマー病⁷⁾、正常圧水頭症⁸⁾、脳卒中片麻痺⁹⁾に対しても展開しつつある。

2. Timed Up and Goテストでの足首軌道のパターン

脳中枢神経系疾患から筋骨格系疾患まで、その症状が歩行機能に影響を及ぼすことから、診断時に歩行テストが利用される。日本理学療法士協会の理学療法ガイドラインで信頼性、妥当性が認められている推奨グレード分類Aのテスト方法として、Timed Up and Go (TUG)テスト、10 m歩行テスト、5 m歩行テストなどが多用される。

例えば、図3cは、上述の3次元軌道の推定方法に基づいてTUGテストの足首軌道のパターンを推定した事例である。対象者がスタート地点(座標原点)から歩行を開始し、前方に設置されたコーンを回って、往復して帰ってくるまでの区間について、連続的な足首軌道が確認できる。これらの歩行テストは、一般的にストップウォッチを利用して歩行速度を算出する簡便な方法であるが、実際には目視診断による足部の動きなどの包括的な確認も症状判断時の重要な要素である。目視診断結果の俯瞰的な記録や共有、さらなる分析への展開において、連続的な足首軌道や歩行の軌跡の推定は有効な手段となり得る。

3. 脳卒中片麻痺の腰軌道のパターン

臨床的歩行障害の特徴は歩行時の腰軌道にも強く反映される。歩行運動によって、身体の重心周りを含む体幹が移動していくためであり、左右のバランスが大きく影響する。例えば脳卒中片麻痺患者に対しては、歩行時の左右の非対称性が経過観察でもよく注目される。図4aは、脳卒中片麻痺患者の歩行時の腰軌道の事例であり、症状の重い順で、Brunnstrom stage VI~IVの患者、および健常者の腰軌道が示されている¹⁰⁾。健常者の腰軌道の事例では、V形状のリサージュ図形を描いているが、重症度が大きくなるにつれて腰軌道の形が変化している。これは麻痺側足部を振り回して歩行するぶん回し歩行の際に見られる腰軌道の様相である。

4. 股関節手術前後での腰軌道のパターン

歩行時の左右のバランスは、脳卒中片麻痺などの脳に関連する中枢神経系疾患だけでなく、身体に関連する筋骨格系疾患の経時的な経過観察でも重要な要素になる。図4bは、股関節疾患患者の人工股関節置換術の前後、およびリハビリテーション経過を腰軌道によって評価した事例である¹¹⁾。推定された腰軌道の左右それぞれの最大高さのバランスに注目すると、術前および術後7日目において一方側と他方側の腰軌道の上下方向の高さが著しく異なるのに対して、術後10日目以降には緩和していく経過が見てとれる。経時的な回復期の推移は個人間で大きく異なるが、特徴量で追いきれない包括的な形状による検討が可能となり、さらに患者への視覚的な共有も容易である。

おわりに

日常のリハビリテーション治療において、1人ひとりの患者に限られた時間内に最適な治療を行うためには、患者の症状や進行を客観的に分析し、エビデンスを蓄積しながら治療を進める必要があ

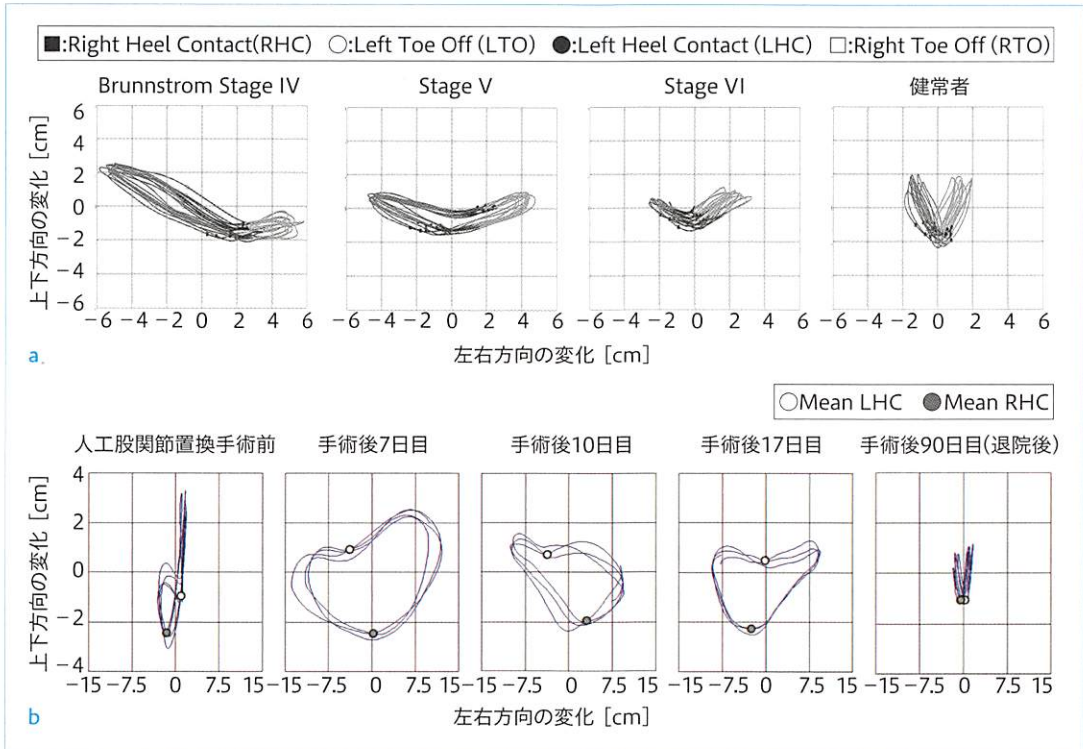


図4 臨床への応用例

a: 脳卒中片麻痺患者の腰軌道, b: 股関節疾患患者の腰軌道

る。本稿では、これを支援する1つの可能性として、慣性センサを用いることで屋内外を問わず高精度かつ簡便に歩行を計測できるウェアラブル歩行分析システムWM GAIT CHECKERを紹介した。これはEBPTを推進するうえでも有効であり、さらに医療従事者と患者のコミュニケーションを促進する可能性もある。本技術がこのような近未来のリハビリテーション治療への一助となれば幸いである。

文献

- 1) WALK-MATE LAB株式会社: <https://walkmate.jp/> (2021年6月17日閲覧)
- 2) Hori K, et al: Inertial measurement unit-based estimation of foot trajectory for clinical gait analysis. *Front Physiol* 2020; **10**: 1530. doi: 10.3389/fphys.2019.01530
- 3) Mao Y, et al: Estimation of stride-by-stride spatial gait parameters using inertial measurement unit attached to the shank with inverted pendulum model. *Sci Rep* 2021; **11**: 1391. doi: [org/10.1038/s41598-021-81009-w](https://doi.org/10.1038/s41598-021-81009-w)
- 4) Hori K, et al: Diagnosis support system of Parkinson's

disease based on gait trajectory. *Proc. of the 16th International Conference on Biomedical Engineering (ICBME2016)*, p146. Singapore, 2016

- 5) Hori K, et al: Early detection of Parkinson's disease based on gait trajectory analysis using wearable sensors. *J Neurol Sci* 2017; **381**: 348. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jns.2017.08.989>
- 6) Ono Y, et al: A gait evaluation of patients with Parkinson's disease with inertial measurement units. *Proc. of the 14th International Conference on Alzheimer's and Parkinson's Diseases (AD/PD2019)*. p247. Lisbon, 2019
- 7) 喜古 勇, 他: 慣性センサーを用いたAlzheimer型認知症患者の歩行特徴の評価と他疾患との比較. *ヒューマンインタフェースシンポジウム2018論文集*, pp678-682, 2018
- 8) Ono Y, et al: Gait evaluation of normal pressure hydrocephalus using inertial sensor. *J Neurol Sci* 2017; **381**: 722. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2017.08.2035>
- 9) 太田玲央, 他: 加速度計を用いた歩行動態分析システムの開発—片麻痺およびパーキンソン病への適用. *臨床神経学* 2013; **53**: 1421
- 10) 西 辰徳, 他: 腰軌道の運動学的分析に基づく片麻痺歩行評価システム. *計測自動制御学会論文集* 2011; **47**: 8-16
- 11) 小林哲平, 三宅美博, 他: 加速度センサを用いた運動学的歩行分析システム—股関節疾患の術後リハビリにおけるWalk-Mate有効性評価への適用. *計測自動制御学会論文集* 2006; **42**: 567-576