

Editorial

片麻痺患者の定量的歩行分析の現在の視点

長谷公隆¹¹関西医科大学リハビリテーション医学講座

Hase K. Current perspectives on quantitative gait analysis for patients with hemiparesis. Jpn J Compr Rehabil Sci 2022; 13: 1-3.

定量的歩行分析の臨床応用

定量的歩行分析は、脳卒中患者の機能的移動能力を評価するために用いられてきた。片麻痺患者は、非対称的パフォーマンスによって代表される適応的・代償的運動戦略を駆使しており、神経学的問題のない者に比べて、時間・空間的、運動学的、そして運動力学的な歩行の変動が大きくなる。これらの指標の定量的分析によって、歩行障害症例に対するわれわれの臨床的意思決定が可能となることが期待される。定量的歩行分析からは複雑なデータが膨大に得られるので、標的とする移動障害の根本的な原因となる候補を理解し、高度の多変量解析や機械学習研究を実行する必要がある。

片麻痺患者における歩行障害の要因

歩行訓練効果に関する近年の研究は、麻痺肢推進力の改善が、患者自身が選択する最適歩行速度や最大歩行速度の変化に寄与することを示してきた。推進力を規定する2つの要因は、実験室垂直軸と第5中足骨関節から大転子へのベクトルとの角度として定義される trailing limb angle (TLA) と、歩行周期立脚期における足関節底屈モーメントである [1]。図1は片麻痺患者 (30名, 62.5±11.8歳) と年齢をマッチさせた健常者 (62名, 63.0±11.6歳) の歩行速度と TLA および足関節の底屈モーメントとの相関を示している。これらの指標は、各群において有意な相関があるが、特に、麻痺側の TLA と底屈モーメントは、片麻痺患者の歩行速度に強く寄与している。

Hsiao らは、片麻痺患者がトレッドミル歩行において推進力を増やすには、主に、麻痺肢および非麻痺肢の TLA を変えることによることを見出した [2]。し

かしながら、たとえ同じリハビリテーション課題を片麻痺患者に適用しても、歩行速度を増大させる応答には異なった機序が互いに関連している。特に、リハビリテーション治療後にもたらされる行動変化の基礎となる生体工学的要因を解明するには、麻痺肢機能の回復と代償的運動戦略による成果を区別して捉えることが重要である [3]。後者は片麻痺患者が歩行パフォーマンスの適応的な実行を助けるが、麻痺筋の可能な出力レベルを発揮する能力を使わずに生活を続けてしまうと、麻痺肢の機能的改善を抑えてしまうかもしれない。麻痺肢において身体を制御する機会をもたらすようなリハビリテーション課題こそが、片麻痺患者の制約された社会生活からの脱却に必要とされる治療である [4]。

歩行訓練戦略を決定するための臨床的データマイニング

ロボット支援を含めたさまざまなタイプの歩行訓練戦略が片麻痺者の移動能力改善を目指して開発されてきた。その全体的な効果は、介入に対する平均応答の変化によってしばしば評価されるが、各患者の臨床的・生体力学的特徴の不均一性に一致して、受けた訓練刺激に患者がどのように反応するかは明確に異なる。したがって、近年の関心の高まりは、訓練後の適応における個人個人の変動を同定し、介入によく反応する“responder”と、意味をなさない改善を呈している“non-responder”とを区別し [3, 5]、“non-responder”の標的となる障害を改善する可能性のある最適な治療を探求することにある [6, 7]。まさに、歩行訓練後の変化を同定するための定量的歩行分析で得られる測定指標には、基調となる協調や歩行に特異的な運動制御の理解を可能にする注目すべき特徴量が含まれている。この特徴量選択は、元となる変数の最適なセットを決定する臨床的データマイニングの過程として位置づけられる。

定量的歩行分析で得られるベースライン変数の臨床的特徴量選択は2つの側面を含んでおり、その一つは生体工学的および病態生理学的機序を理解すること、もう一つは治療成果を予測することである。その客観的で強固なデータ分析は、歩行周期全体のデータを解析することで達成され、臨床診療を改善するような新たな知見が、その拡張された初期特徴量の中から導き出される。計測された複数の歩行関連指標は互いに関係し合っているため、その歩行パターンを表わす

著者連絡先：長谷公隆
 関西医科大学リハビリテーション医学講座
 〒573-1191 大阪府枚方市新町2丁目5-1
 E-mail: hasekim@hirakata.kmu.ac.jp
 2021年12月1日受理

利益相反：申告すべきものなし。

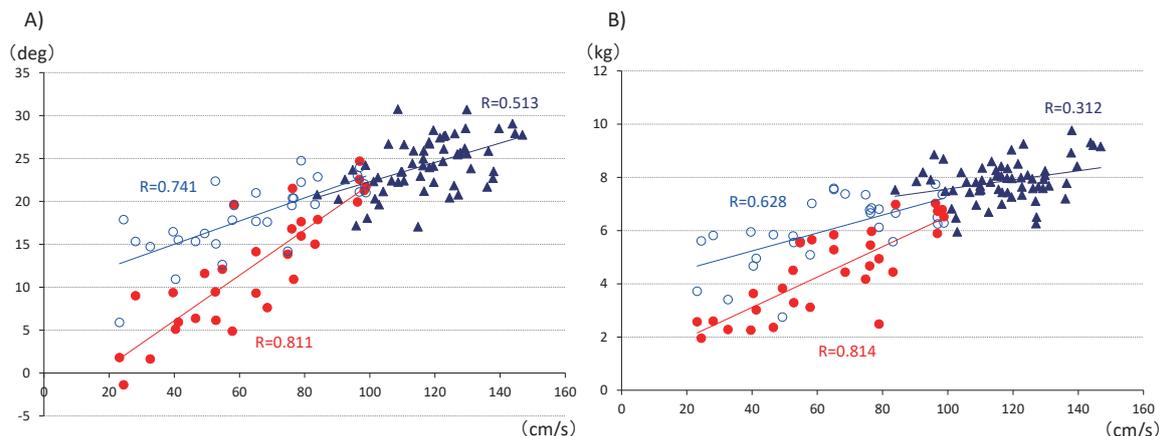


図 1. 歩行速度と TLA ならびに足関節底屈モーメントとの相関

A) 歩行速度と TLA の相関

B) 歩行速度と足関節底屈モーメントの相関

色塗り円：片麻痺患者の麻痺肢 (N = 30)

白抜き円：片麻痺患者の非麻痺肢 (N = 30)

三角：健常者の右下肢 (N = 62)

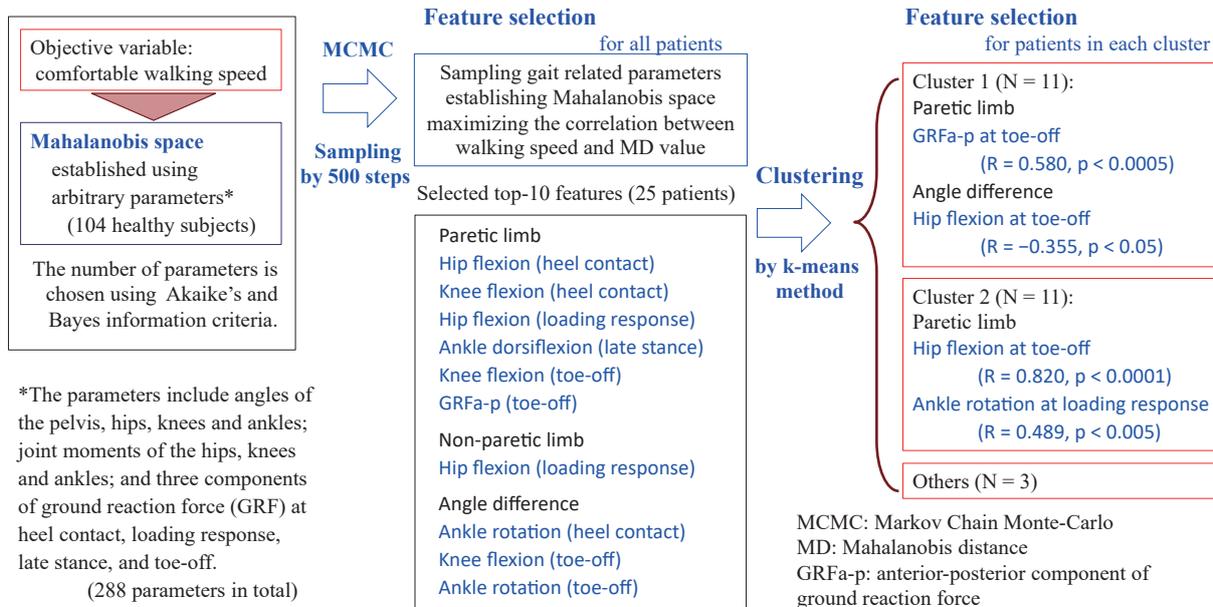


図 2. 相関に基づいた特徴量選択とクラスタリングのアルゴリズム

特徴量選択：歩行速度と MD 値との間の相関係数を最大化するマハラノビス空間を構築する歩行関連指標のサンプリング。状態 i から状態 j への遷移確率に従うマルコフ連鎖において、ランダム変数としての歩行関連指標が、そのマハラノビス空間で計測された歩行速度と MD 値との間の相関がより高い場合に選択される（モンテカルロ法；500 ステップ）。500 回のサンプリングの中でより頻繁に選択されたトップ 10 の歩行関連指標が色塗り四角内に示されている。

特徴量のセットを同定する統計学的解析システムが求められる。

特徴量選択のための解析パラダイム

主成分分析のような多変量解析や機械学習法は、歩行の変動性を検査し、生体工学的特性に基づいたグループ分けに用いられてきた。図 2 は、マハラノビ

ス距離 (MD) とマルコフ連鎖モンテカルロ (MCMC) 法を用いた特徴量選択とクラスタリングによるグループ分けの課程を示している。データのグループ分けやグループ間の差異の決定の問題によく適用される MD は、あるデータが多変量の正常分布 (マハラノビスの空間) の中心からどの程度離れているかを測定できる共分散を用いた効果的な統計学的手法である。片麻痺患者の歩行速度のような目的変数が MD 値と相関し

ていれば、そのマハラノビス空間を形成する歩行関連指標のセットは臨床的に意味のある特徴量とみなせるであろう。MCMC法は、パラメーター同定を想定したり、識別不能なパラメーターを削除したりせずに、歩行関連指標の分布から特徴量をランダムにサンプリングすることで、ある分布を特徴付けるために利用できる [8]。この重要度サンプリングによって選択された特徴量のセットを用いたクラスタリングは、適切な目標を持った介入によって、より効果的な治療の立案を可能にするかもしれない。

片麻痺患者 25 名のクラスタリングの結果、2 つのサブグループが同定された (図 2)。クラスター 1 の患者の歩行速度は、つま先離地時の麻痺側床反力前後成分の増大ならびに踵接地時の股関節屈曲角度の両肢間の差の減少とともに改善する。これらは、麻痺肢の推進力増大と歩幅の対称性改善がそれぞれ速度増大に寄与することを意味している。一方、クラスター 2 の患者の歩行速度は、つま先離地時の麻痺肢股関節伸展角度が強く相関するとともに、荷重応答期の足関節回旋角度が関与する。TLA 形成による推進増大に加えて、アキレス腱の正常化した stretch-shortening cycle が推進力生成に寄与するかもしれない。これらの生体工学的特徴を理解することは、臨床的意思決定を助ける治療アルゴリズムを形成する将来的可能性をもたらすであろう。

結論

あるリハビリテーション治療によるパフォーマンス変化の原因となる要因を見分けることはきわめて難しい。その治療成果に応じた生体工学的歩行プロフィールの違いを理解することは、誰がどのようなリハビリテーション治療を受けるべきかを決定する適切なアルゴリズムの発展を助けるであろう。定量された生体工学的変数の特徴量選択の使用は、個別的なリハビリテーション治療の提供を可能にするにちがいない。

この仕事の一部は科学研究費 21K21775 の助成を受けたものである。

文献

1. Hsiao H, Knarr BA, Higginson JS, Binder-Macleod SA. Mechanisms to increase propulsive force for individuals poststroke. *J Neuroeng Rehabil* 2015; 12: 40.
2. Hsiao H, Awad LN, Palmer JA, Higginson JS, Binder-Macleod SA. Contribution of paretic and nonparetic limb peak propulsive forces to changes in walking speed in individuals poststroke. *Neurorehabil Neural Repair* 2016; 30:743–52.
3. Bowden MG, Behrman AL, Neptune RR, Gregory CM, Kautz SA. Locomotor rehabilitation of individuals with chronic stroke: difference between responders and nonresponders. *Arch Phys Med Rehabil* 2013; 94: 856–62.
4. Hase K, Suzuki E, Matsumoto M, Fujiwara T, Liu M. Effects of therapeutic gait training using a prosthesis and a treadmill for ambulatory patients with hemiparesis. *Arch Phys Med Rehabil* 2011; 92: 1961–6.
5. Reisman DS, McLean H, Keller J, Danks KA, Bastian AJ. Repeated split-belt treadmill training improves poststroke step length asymmetry. *Neurorehabil Neural Repair* 2013; 27: 460–8.
6. Allen JL, Ting LH, Kesar TM. Gait rehabilitation using functional electrical stimulation induces changes in ankle muscle coordination in stroke survivors: a preliminary study. *Front Neurol* 2018; 9: 1127.
7. Sauder NR, Meyer AJ, Allen JL, Ting LH, Kesar TM, Fregly BJ. Computational design of fastFES treatment to improve propulsive force symmetry during post-stroke gait: a feasibility study. *Front Neurobot* 2019; 13: 80.
8. van Ravenzwaaij D, Cassey P, Brown SD. A simple introduction to Markov Chain Monte-Carlo sampling. *Psychon Bull Rev* 2018; 25: 143–54.