

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：32203

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25893223

研究課題名(和文)脚運動エントロピー解析による歩行適応能力定量評価法の開発

研究課題名(英文)Quantitative evaluation of gait adaptation using leg motion entropy analysis

研究代表者

栃木 祐樹 (Tochigi, Yuki)

獨協医科大学・医学部・准教授

研究者番号：70711737

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、小型慣性モニターを利用した新しい簡易歩行解析手法である脚運動エントロピー解析法(ELLIS法)の理論的根拠を確立するため、「負荷増大に伴う歩行フレキシビリティの低下を検出する能力」および「臨床症例における歩行障害改善度の定量評価能力」の検証実験が行われた。その結果、理論上で予測された「動作適応に伴う生理的バリエーションの増大」が示され、本法の基本コンセプトが支持された。その一方で、歩行速度の影響を排除して被験者の体格や全身状態に影響されない歩行機能評価を行う方法に関しては、今後に課題を残した。

研究成果の概要(英文)：The present project aimed to establish the rationale of a novel simplified gait analysis method, namely the Entropy of Leg-Linkage Inertial Signals (ELLIS) method. Specifically, work was proposed to test its capabilities in detecting decrease of gait flexibility associated with increased stress, and in addressing peri-operative longitudinal changes of gait quality in clinical cases of knee osteoarthritis. The experimental data have indicated that physiological variability in leg kinematics increases with increased stress in gait, supporting the basic concept of the ELLIS method. The data also have suggested technical challenges in standardization about gait velocity, which is important for eliminating effects from body size variability and general physical status.

研究分野：整形外科，運動器リハビリテーション，生体工学

キーワード：歩行解析 歩行機能計測 ロコモティブシンドローム 運動器障害 歩行不安定性

1. 研究開始当初の背景

歩行機能の改善は、下肢筋骨格系や脊髄・脊椎障害を治療の対象とする整形外科や運動器リハビリテーションにおける重大関心事であり、その客観的評価を行うために様々な試みがなされてきた。質問票や visual analog scale を利用する患者立脚型評価法は、簡便で観察者側のバイアスがかからないため治療効果のグループ間比較といった臨床研究で有用性が高いが、プラセボ効果や症状変化への感受性の差異などの被験者側要素には影響を受けやすい。最大歩行距離や歩行速度は、客観性は高いものの呼吸・循環機能の影響を受け、被験者の性格や心理状態にも影響されやすい。動作解析装置を用いた kinematics や kinetics の計測は、客観性が高く歩行障害のメカニズムを詳細に検討するうえでの有用性は高いものの、計測・解析に時間がかかりデータ解釈も複雑なため一般臨床における症状変化の評価には適さない。個々の症例における治療効果の客観評価のためには、簡便かつ信頼性の高い歩行機能の総合的評価法の確立が望まれている。

申請者らの開発した ELLIS (Entropy of Leg Linkage Inertial Signals) 法は、これら現存の手法とは大幅に異なるコンセプトに基づく新しい歩行機能評価法である。健常人の安定した歩行は、一見すると非常に周期性の高い単一動作のくり返しに見えるが、歩幅・歩隔・関節運動等を詳細に計測すると、実際は歩行サイクル間に微小な「ばらつき」が存在することが知られている。この生理的ばらつき (physiological variability) は、多関節を同時制御している複合的神経・筋フィードバックシステムの交互作用から生じるとされている。そして、局所的機能不全が総合的コントロール能力に影響を及ぼしシステムのフレキシビリティが損なわれた状態では、physiological variability は減少すると考えられている。(注：循環器生理学においては、同様のコンセプトが 1990 年頃に提唱され、近年では心拍データの微小変化を検出する新手法としての臨床応用が始まっている。なお、physiological variability の変化は標準偏差といった線形的計測手法では検出が困難なため、その定量評価には非線形解析ツールを利用する必要がある。)

ELLIS 法では、脚運動データは弾性ストラップを用いて下腿に被侵襲的に装着した小型慣性モニターを用いて採取し、得られた 3 次元加速度・角速度データに含まれる歩行周期間の physiological variability を Sample Entropy (SampEn) という非線形ツールで解析する。研究代表者の以前の研究 (Tochigi et al., Journal of Orthopaedic Research, 2012) では、健常成人 52 名 (20-79 歳) および変形性膝関節症 (OA) 患者 57 例の歩行時の脚運動エントロピーを計測したところ、「健常成人では脚運動エントロピーが年齢の上昇とともに漸減すること」、およ

び「OA 患者の脚運動エントロピーは同年代・相当歩行速度の健常人に比して低下していること」が示された。これらの結果は、加齢や関節障害に伴う歩行能力低下という臨床的経験則に、ELLIS analysis のコンセプトがよく合致している事が示されていた。

前述の研究で明らかとなった ELLIS 出力のもう一つの特徴が、その速度依存性である。これは、歩行ペースが上昇して脚運動制御システムへの要求が高度になると、それに応じて各制御システム間の交互作用がより複雑となって physiological variability が増加するためだと推定される。別の視点からは、歩行速度上昇にも関わらず physiological variability が増加しない (増加させることができない) 状態は脚運動コントロールのフレキシビリティ低下を反映しているとも考えられ、その定量化が歩行機能の総合的評価に有用である可能性が示唆された。

その後の研究 (2013 Orthopaedic Research Society Annual Meeting にて発表) において、この仮説を検証するために先の論文のデータを「歩行速度の相対変化に伴う脚運動エントロピーの増加率」(ELLIS speed-sensitivity index) という観点で再解析したところ、この評価指標によって高齢者 (65 歳以上) 歩行データを比較的若年者 (20 - 64 歳) から識別する能力を持つことが判明した (図 1, 2)。この結果は、ELLIS analysis が加齢に伴う歩行能力低下の臨床指標となりうる可能性を強く支持するものであった。

2. 研究の目的

本研究では、以下に示す 2 仮説を検証することにより、ELLIS 法による簡易歩行解析が個々の被験者内の比較的微小な歩行機能変化を検出する能力を保持することの立証を目指した。

仮説 1: ELLIS speed-sensitivity index は、履物の不安定化に伴う歩行フレキシビリティ低下を検出する能力を持つ。

仮説 2: ELLIS speed-sensitivity index は、整形外科臨床症例における歩行機能障害の変化を良好に反映する。

3. 研究の方法

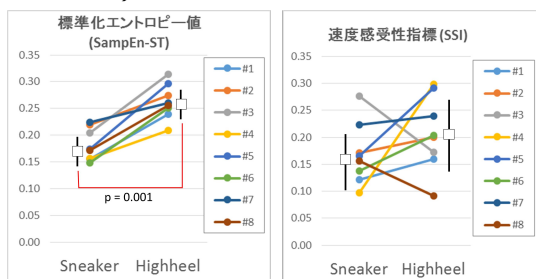
歩行フレキシビリティ低下を検出する能力の検証 (研究 1) は、健常成人女性ボランティア 8 名を対象に実施した。それぞれの被験者においてハイヒール着用下 (不安定歩行モデル) とスニーカー着用下 (安定歩行) の 2 条件で歩行テストを行い、それぞれの状態での歩行速度の相対変化に伴う脚運動エントロピーの増加率 (speed sensitivity index = SSI) を算出した。そして、この SSI 値が歩行状態の安定性を識別する能力を検定した。また、この SSI を用いて各テストで得られたエントロピー値を歩行速度で標準

化した数値も算出した。

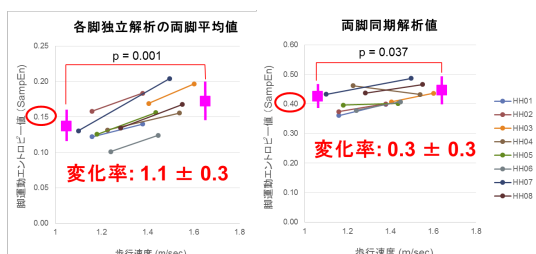
臨床症例における歩行障害改善度の定量評価能力の検証（研究2）では、変形性膝関節症に対する手術症例12名を対象に術前および術後2～3か月、術後6か月の3時点で歩行テストを繰り返し、SSI値と臨床症状や総合的歩行能力との相関性の検定を試みた。

4. 研究成果

研究1（歩行フレキシビリティ低下を検出する能力の検証）においては、不安定歩行モデル（ハイヒール着用）では、安定歩行モデル（スニーカー着用）と比較して標準化エントロピー値の有意な増加（ $p = 0.001$ ）が示された。この変化は、足元が不安定な状態での身体動揺を最小限にとどめるための動作適応に伴って脚運動制御システム内における制御ユニット間の相互作用が増大した結果として生じた『生理的パリアビリティ』の増加を反映すると考えられる。このように健常人の歩行適応現象を定量化し得たことは、本法の有望性を支持するものといえる。その一方で、SSIに関しては変化率のばらつきが大きいこともあり有意な変化が確認されず（ $p = 0.302$ ）データ解釈コンセプトの再考を要するものと考えられた。（2015年 日本整形外科学会基礎学術集會にて発表）



このように期待された結果が得られなかった原因のひとつを示唆するデータとして、本法における脚運動エントロピー変化の検出能力を臨床実用レベルとしてゆくうえでのカギと考えていた「同期両脚データの同時解析による精度改善」に関して、仮説を支持する結果は得られなかったことが挙げられる。両脚同時解析ではエントロピー出力値が全体に高値を示したことから、多次元解析の際に両脚データの干渉によってノイズの影響が増大し、検出力が低下したものと推測される。（2015年 日本臨床バイオメカニクス学会にて発表）



こうした計測精度の問題を解決するため、歩行フレキシビリティの計測手法を、従来から用いている Sample Entropy 解析に加え、本研究で採取したデータを他の非線形手法で再解析し、より信頼性の高い解析法の開発に現在取り組んでいる。具体的には2種類の代替案が試みられており、一つは本研究で用いた慣性モニターから出力される角速度データを2回微分した値である角跳動（angular jerk）を用いて運動の「ぎこちなさ」として定量化する angular jerk cost (AJC) 解析である。もうひとつは、やはり慣性モニターから出力加速度データをフーリエ解析にかけ、エントロピーを算出する周波数までの成分から直流成分を除いて取り出し、取り出した成分の和が1になるように正規化して正規化された値をエントロピーの式に代入する power spectrum entropy (PSE) 解析である。

両案ともに解析プログラムの全面的な組み直しが必要であるため、現時点でその結果は得られておらず、更なる時間を要する見込みである。また、こうした解析手法上の問題点が明らかとなったため、研究2（臨床症例における歩行障害改善度の定量評価能力の検証）で収集したデータは、上記の代替解析法の確立を待つ解析を進める予定となっている。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

1. 栃木祐樹、宮崎千枝子、増田陽子、大関 覚： 脚運動エントロピー解析における同期両脚データ同時解析が検出力に与える効果。第42回日本臨床バイオメカニクス学会 2015/11/13-14 東京都
2. 栃木祐樹、増田陽子、大関 覚： 脚運動エントロピー解析による歩行動揺に対する動作適応の定量的評価。第30回日本整形外科学会基礎学術総会 2015/10/22-23 富山市

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：

出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

栃木 祐樹 (TOCHIGI, Yuki)
獨協医科大学・医学部・准教授

研究者番号： 70711737

(2) 研究分担者

該当なし ()

研究者番号：

(3) 連携研究者

該当なし ()

研究者番号：