

平成30年6月22日現在

機関番号：22303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K01467

研究課題名(和文) 装着型センサと携帯情報端末を用いた歩行リハビリテーション支援システムの開発

研究課題名(英文) Development of a system for supporting gait rehabilitation using wearable sensors and mobile data terminal

研究代表者

向井 伸治 (Mukai, Shinji)

前橋工科大学・工学部・教授

研究者番号：50135109

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、小型多機能センサと携帯端末を用いて歩行リハビリテーションを支援するシステムを開発した。システムの特徴は、3つのセンサを腰部と両足果上部に装着することで、正確な歩行解析を簡単に行えることである。基本的な時間パラメータから計算される規則性と対称性を表す歩容指標を作成した。さらに、10m歩行テストとリサージュ図形から得られる新しい評価指標も提案した。本システムを用いて、10人の高齢者および脳卒中による片麻痺を有する5人のリハビリ患者の歩行状態を計測した。その結果、被験者間で指標値の差を検出できること、リハビリの回復状況を定量的に評価できることを示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a system for supporting gait rehabilitation using multifunctional sensors and mobile data terminal. The advantage of this system is that accurate gait analysis can be easily performed with 3 sensors attached to the waist and both ankles. In addition to the gait indices representing symmetry and regularity calculated from basic temporal parameters, we also proposed new evaluation indices derived from the 10-meter walking test and Lissajous figure. Walking conditions of 10 older people and 5 rehabilitation patients with hemiplegia due to stroke were measured by using the system. Analysis results show that (1) it can detect the difference of the index values among subjects, and (2) the recovery situation of rehabilitation can be evaluated quantitatively.

研究分野：設計工学、形状情報処理、福祉工学

キーワード：歩行分析 リハビリテーション 多機能センサ 携帯情報端末

## 1. 研究開始当初の背景

歩行リハビリ患者の歩行状態の把握は、医師や療法士の知識や経験、目視観察や患者とのコミュニケーションによる主観的な判断に大きく依存しているのが現状である。歩行状態を客観的・定量的に評価するために、複数カメラによる3次元動作分析装置やトレッドミル型歩行解析装置などによる計測も行われてきている。しかし、導入コストが高い、大がかりで計測環境が限定される、計測手順が煩雑であり手間がかかるなどの問題もある。そこで、低価格で手軽に測定できる小型の加速度計や圧力センサなどのセンサ群を用いた歩行計測が注目され、そのシステム開発や分析が多数なされてきている。しかし、多数のセンサ群を用いたシステムにおいても、計測データのリアルタイム処理が困難であることや専門的な知識技術を要することが多く、リハビリ現場での実用化の域には達していないといえる。

一方、スマートフォンやタブレット等の携帯情報端末を活用した在宅医療や在宅介護支援システムといったサービスが検討されはじめ、モバイルヘルスケア技術が注目されてきている。モバイル端末の活用により、健康・医療のサービスアプリケーションの創出が期待されている。歩行分析においては、スマートフォンに搭載されている加速度センサを利用したアプローチもなされてきている。しかし、これは健康者の大まかな歩行状態の把握には適用できても、リハビリ歩行における患者の歩行フェーズの検出には精確に対応できない。

## 2. 研究の目的

本研究は、センサ群を用いた歩行計測技術と急速に普及しているAndroid搭載の携帯端末によるデータ通信機能・計算能力とを併用・連携することにより、実時間で処理可能な歩行リハビリ支援システムの構築を目的とする。計測は、小型3軸センサを腰部や両足果上部に装着して行い、Bluetooth方式で歩行データを端末機に送信する。解析ソフトウェアでは、歩容の安定性や円滑性、再現性や対称性を評価できる複数の新指標値を算出し、過去の計測結果との比較分析を通じてリハビリ目標に対する回復効果の状況を提示する。リハビリスタッフや家族ともデータを共有し、自身のリハビリ活動のモチベーション維持向上にも資するシステムを目指す。

## 3. 研究の方法

### (1) 歩行計測の方法

計測は、多機能センサを腰部(第2腰椎付近)と両足の果上部に1つずつ装着し、各部位の進行方向に対する前後方向、左右方向、上下方向の3軸加速度および3軸角速度を計測する。サンプリング周波数は100Hzとし、取得したデータは、Bluetooth Serial Port Profileを用いて接続したAndroid端末に送

信する。その後、取得したデータを用いて歩行パラメータを算出し、歩容を定量化する。

### (2) 計測データの分析方法

加速度データは、個人による歩き方の差や歩行モード、履いている靴の形状などに大きく影響を受けてしまう。そこで、センサの数を増やさずに、より正確に分析を行うため、ジャイロセンサに着目した。まず、踵接地とつま先離地の瞬間を判別するため、3軸角速度センサの矢状面と垂直を示すピッチ軸の角速度データを用いた。カメラによる画像データと角速度データを同期させることで歩行周期の検出を行った。左右の足の踵接地とつま先離地のタイミングを検出することにより、遊脚期や立脚期、単脚支持期、両脚支持期を求めた。また、腰部加速度を積分することで歩行速度とステップ長を算出した。

### (3) 被験者

はじめに基本的なシステム構築を行うにあたり、歩行中のセンサデータの変化を確認するため、健康高齢者10名(男性5名、女性5名、年齢 $77.4 \pm 4.3$ 歳)を対象に計6回の計測を行った。これらのデータはリハビリ歩行との有意性を見るためにも使用した。次に、リハビリの効果を確認するため、脳出血や脳幹梗塞による脳卒中片麻痺患者5名(男性3名、女性2名、年齢 $75.0 \pm 5.0$ )を対象に週1回、最長で8ヵ月間の計測を行った。5名ともに、週に3日ほど通所リハビリ施設を利用し、機能維持訓練を行っている維持期の患者である。リハビリ内容は、マシンを使用した筋力や体力増強運動、リハビリ器具を用いたバランス機能や随意性の回復訓練であり、ADL向上や歩行訓練に努めている。計測調査の計画・実施に際しては、所属機関の人間機能実験倫理審査委員会の承認を得て行った。被験者に対しては、予め計測調査の内容について詳しく説明した後、同意を得た上で実施した。

### (4) 歩容評価指標の作成

本システムでは、歩行分析において必要な基本パラメータである歩行周期[sec]、遊脚期[sec]、立脚期[sec]、単脚支持期[sec]、両脚支持期[sec]、ケイデンス[steps/min]、歩行速度[m/sec]、ステップ長[m]の計8項目を算出している。これらの基本パラメータを用いて、歩行を定量的に評価するための歩容評価指標を作成した。まず、規則性と左右対称性の指標について述べる。足を規則的に動かすことは、安定した歩行を行う上で重要な要素である。ここでは歩行周期ごとの果上部加速度波形に着目し、波形の類似性から歩行の規則性を評価した。加速度データを1周期ごとに切り分け、平均波形を算出し、各周期との相関係数Rを規則性の指標と定義した。歩行時における身体の左右のブレや片麻痺歩行のリハビリによる効果を確認するため、左右足における周期ごとの遊脚期と立脚期の比を用いて左右対称性 $St$ を定義した。規則性と対称性のいずれの指標値も0~1の範

囲であり、1に近いほど安定した歩行である。

10m歩行テストとは、10m間を自由歩行した際の所要時間を計測し、算出された歩行速度の値から、自立歩行が可能であるかを評価するテストである。定常歩行を計測するため、計測距離の前後に2~3mの助走距離を設けて行われる。このテストは簡便に行えるために多くのリハビリ施設で実施されているが、評価される点が歩行速度に限定されるという問題がある。本研究では、既存のテストでは評価の対象とされていなかった助走距離に注目し、歩行テストにおいて歩き始めを示す加速期、安定期、歩き終わりを示す減速期の3つの区間に分割し、各区間の解析を行うことで新しい評価指標を作成した。ここでは、歩き始めと歩き終わりの区間をそれぞれ3歩分とし、それ以外を安定区間と定義した。解析の結果、健常者とリハビリ患者においては、3分割間の歩行周期の変化量に大きな違いが現れることが分かった。そこから、歩行周期の変動量に注目し、歩行時の転倒リスクを表す指標TRを定義した。

リサーチ図形は、互いに直角方向に振動する2つの単振動を合成して得られる平面図形のことである。腰部センサの加速度データを用いて、前額面、矢状面、水平面のそれぞれの面に対してリサーチ図形を作成することで、歩行時における体幹の揺れを2次元の図形として可視化した。さらに、定量的な比較を行うために、腰部センサの各軸に対する加速度変量を算出した。定常歩行時の加速度時系列データに対し、高速フーリエ変換を用いてパワースペクトラム値を算出する。算出された高周波領域パワースペクトラム値の加算平均を腰部センサに対する各軸の体幹動揺量TWと定義した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 基本パラメータを用いた解析

図1はある計測時点でのリハビリ患者3名と平均値でみた健常高齢者の1歩行周期における単脚支持期、両脚支持期、および遊脚期の比率を示したものである。例えば、脳梗塞の発症に伴い痙性片麻痺歩行の特徴が見られる被験者RM1は、患側の右脚で長く身体を支えられないため、左脚に比べ立脚期が短く、遊脚期が長いという結果が算出された。1周期における両脚支持期の割合が32%であり、健常者平均の約20%よりも大きいことから、両脚で長くバランスを取っていることも分かる。さらに、被験者間においては、パラメータに多少の差が見られた。この差は個人差であり、リハビリ期間や疾患の程度の違いによる結果だと考えられる。図2に規則性と左右対称性の算出例を示す。リハビリ患者に対して健常高齢者の平均値と比較したものである。規則性Rについては、健常高齢者とリハビリ患者の間には有意な差は見られなかった。よって、リハビリ患者においても、ある程度規則的な歩行を行っていることが分

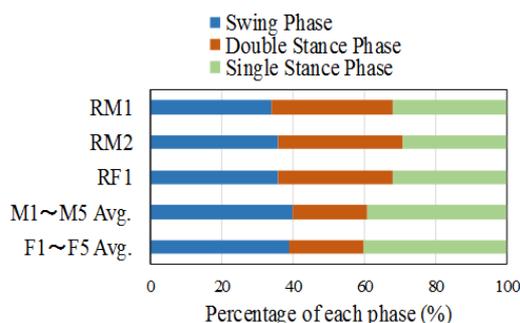


図1 1歩行周期における各フェーズの比較

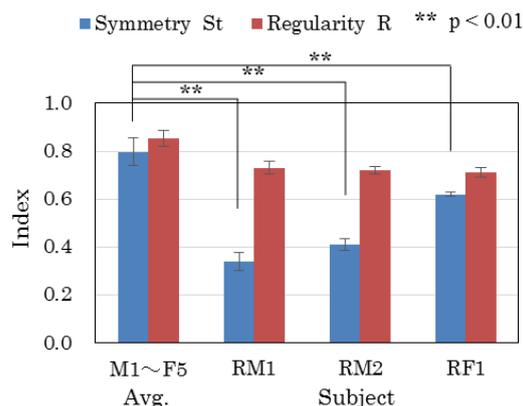
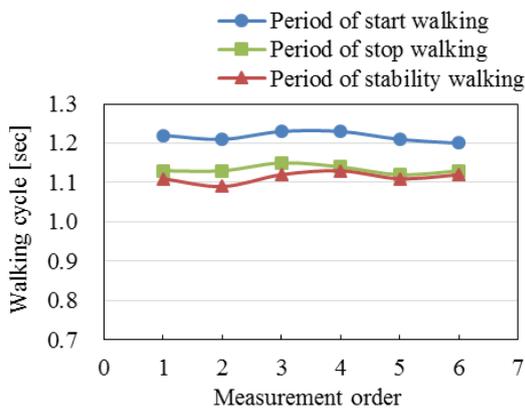


図2 規則性指標と左右対称性指標

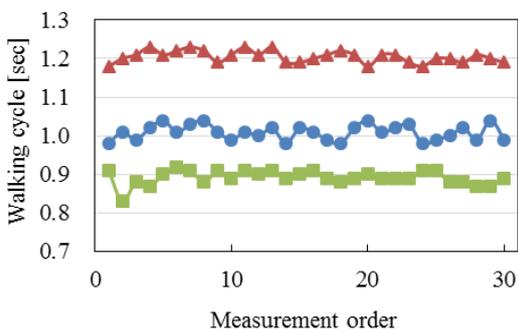
かる。しかし、左右対称性Stにおいては、大きな有意差が表れた。片側が麻痺していることにより、身体の左右のバランスが崩れていることがこの指標を用いて確認できる。

##### (2) 10m歩行テストの3分割解析

リハビリ患者は、健常者に比べ3分割間の歩行周期の変化量が大きいことが分かった。特に、歩行時の転倒に大きく関わる歩き出しから安定歩行に達するまでの歩行周期の変動において、リハビリ患者は健常者よりも大きく変化していることが認められた。さらに、最大歩行周期を示す区間も異なっていた。リハビリ患者が最大歩行周期を示したのは、10m区間内における安定歩行中であったが、健常者においては歩き始めが最も周期が長いという結果であった。一例として図3に10m歩行を3分割した際の各区間における歩行周期の平均値を計測回ごとに示す。このような結果が見られた要因として、歩き出しにおける患側の影響が考えられる。リハビリ患者は患側の影響から歩き出しが不安定であり、大きな推進力を得られず、短い歩幅で歩き出すため、健常者と比べて歩き始めの周期が短くなる。そこから徐々にスピードが上がることでより安定した歩行に移行し、足を大きく広げられるようになることで周期が増大すると考えられる。反対に、健常者は歩き始めにおいて大きな推進力を得ようとするため、強く地面を蹴り大きく1歩目を踏み出すことで周期が長くなると考えられる。図4に転倒指標の算出例を示す。リハビリ患者に対して健常高齢者の平均値と比較した結果を示し



(a) 健常高齢者 M1



(b) リハビリ患者 RM1

図3 3区間の歩行周期の変化

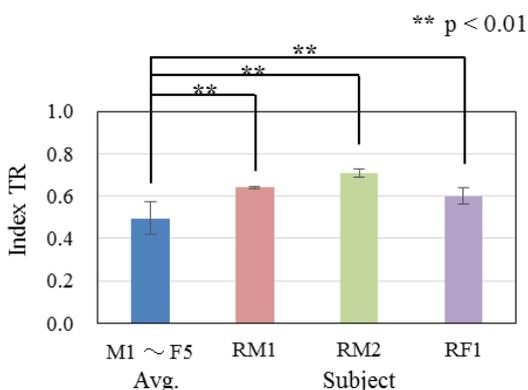


図4 転倒指標

ている。健常者とリハビリ患者の間には大きな有意差が表れた。健常高齢者の中には歩行時の転倒に対して不安を感じている人はいなかったが、リハビリ患者は麻痺側の影響から歩行に大きな不安を感じていた。算出した転倒指標の結果は、被験者の転倒に対する不安感を裏付けていると言える。よって、転倒指標を用いることにより、歩行の安定さを示すことができると考えられる。

### (3) リサーチ図形解析

リサーチ図形を作成することにより、歩行時における体幹の動揺量を可視化した。身体との関連性を理解しやすくするために、被験者の身体写真を貼付し表示した。図形状を確認することで、歩行特徴を把握することが可能である。リサーチ図形による体幹動揺

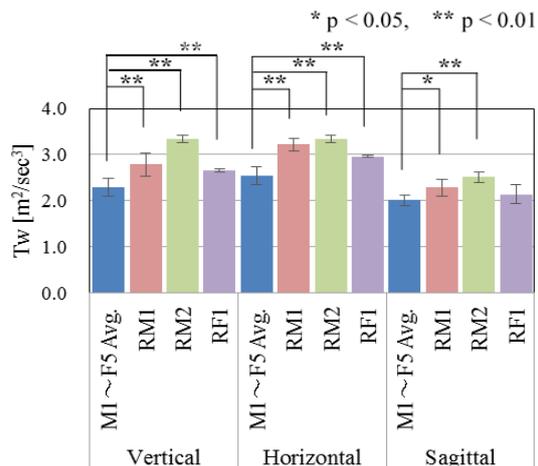


図5 体幹動揺指標

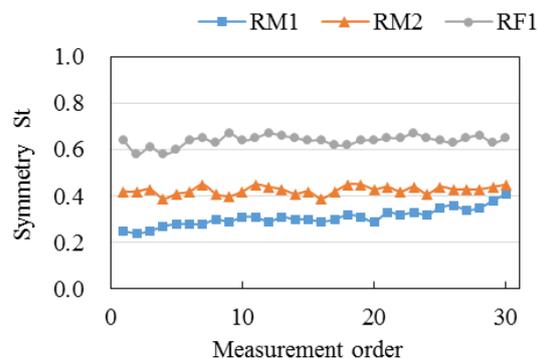


図6 左右対称性指標の推移

を定量化するため、安定歩行時における進行方向に対する前後、上下、左右の腰部加速度データを用いて高速フーリエ変換を行い、歩行時の体幹における各軸に対する体幹動揺量 TW を算出した。リハビリ患者に対して健常高齢者の平均値と比較した例を図5に示す。上下方向と左右方向成分においては、健常者とリハビリ患者の間に有意な差が見られた。また RM2 と RM1 については、前後方向にも比較的振れが大であることが分かった。この結果から、個人差はあるものの、リハビリ患者の歩行が上下左右に大きく振れていることを定量的に評価した。

### (4) リハビリによる回復評価

現在、リハビリによる回復状況を把握するために様々な評価項目が設けられている。麻痺の回復状況をみるブルンストロームステージ、ADL を評価するための FIM やバーセルインデックスなどである。しかし、これらの検査結果が高得点であったとしても、患者自身が麻痺による違和感や日常生活への不安感を持っていることも少なくない。そのため、歩行パラメータの変化からリハビリによる効果を確認することで、上記の評価項目を裏付ける一つの助けとなると考えられる。長期間のデータ計測による歩容評価指標の変化を確認するために、片麻痺患者の結果を比較した。一例として図6に左右対称性の結果を示す。被験者 RM1 の計測1回目は、0.25とい

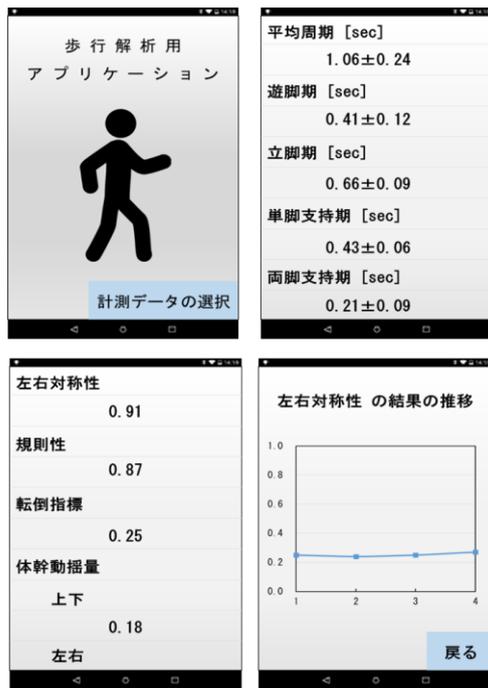


図7 画面表示例

う低い値であったが、8 ヶ月間のリハビリによって 0.41 までの上昇が見られた。健常高齢者は 0.7~0.8 台の数値であったことから、例えば目標値を 0.7 と設定した場合には、リハビリにより左右対称性が 23% 回復したと言える。被験者 RM2 と RF1 においては、すでに長期間のリハビリを行っていたため、全体的に大きな変化は表れなかった。しかし、数値の減少が見られなかったことから、リハビリや機能維持訓練によって能力がしっかりと維持されていると言える。このように、自身の歩行が健常な歩き方とどのように異なっているのか定量的に比較することで、日々の生活での意識が変わり、リハビリに対するモチベーションの維持向上が望めると考えられる。

#### (5) システムの構築と特徴

本システムでは、3 個のセンサを用いて計測している。センサの重さは約 22g であり、それを布製バンドで固定しており、被験者への負担はなく、装着による歩容への影響はないことを確認している。装着は容易であり、計測データの解析アプリケーションはタブレットやスマートフォンで動作するため、どこでも手軽にシステムを使用できる。解析用アプリケーションでは、基本パラメータや歩容評価指標の結果を一覧として表示し、歩行特徴を把握することができる。さらに、計測回ごとの評価指標値を時系列グラフで表示し、その推移を確認できる。被験者間での結果の比較も表現できる。図 7 に本システムの表示例を示す。

#### (6) まとめ

本研究では、多機能センサと携帯情報端末を用いて歩行状態を定量化する方法を検討

し、リハビリテーションを支援するシステムを開発した。歩容評価指標として、基本パラメータを用いた対称性と規則性を表す指標、10m 歩行テストの 3 分割解析による転倒指標、リサーチ図形解析による体幹動揺指標を提案した。提案指標は、健常者とリハビリ患者の間で大きな有意差を表し、歩行特徴の把握に有用であることを示した。長期間のデータ取得の結果、評価指標は有意な変化を示し、リハビリによる回復状況を定量的に評価していることを確認した。

今後、異なる症状のリハビリ患者のデータを取得することで、評価指標が様々な歩き方に対応していることを確認するとともに、分析結果の表示方法の改善などシステム全体の利便性の向上が課題である。

#### 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 5 件)

- ① 倉島帆崇, 向井伸治, 新谷益巳: 多機能センサとタブレット端末を用いた歩行リハビリテーション支援システムの開発, 日本福祉工学会第 21 回学術講演会講演論文集, 2017.
- ② 倉島帆崇, 向井伸治, 新谷益巳: 多機能センサとタブレット端末を用いたリハビリ患者の定量的歩行分析, バイオメカニズム学会第 38 回学術講演会予稿集, 2017.
- ③ 倉島帆崇, 福崎健志, 向井伸治: 多機能センサと Android 端末を用いた歩行分析システムについて, 日本福祉工学会第 20 回学術講演会講演論文集, 2016.
- ④ 倉島帆崇, 福崎健志, 向井伸治: 多機能センサと Android 端末を用いた高齢者の歩行分析, 日本福祉工学会九州支部大会講演論文集, 2016.
- ⑤ 倉島帆崇, 福崎健志, 向井伸治: 小型多機能センサとタブレット端末を利用した歩行状態定量化システムの開発, 日本福祉工学会第 19 回学術講演会講演論文集, 2015.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

向井 伸治 (MUKAI, Shinji)  
前橋工科大学・工学部・教授  
研究者番号: 50135109