

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12918

研究課題名(和文) 日常生活の中的环境や文脈の影響を含む歩行動作や行動による、転倒リスク評価技術の開発

研究課題名(英文) Development of a technique to assess the risk of falling by walking behavior including the influence of the environment and context in daily life.

研究代表者

小林 吉之 (Kobayashi, Yoshiyuki)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究チーム長

研究者番号：00409682

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：高齢者の転倒は、超高齢社会を迎えた我が国にとって何としても低減したい日常生活上の事故である。これまでの研究で、転倒リスクが高い者は、低い者に比べて、歩行の再現性が低いことが報告されている。そこで本研究は、このような知見を応用し、日常生活上の歩行動作全体としての行動やその時の生理指標の再現性から、個々人の歩行中の転倒リスクを評価・フィードバックできる仕組みを開発することを目的とした。本研究で開発した技術によって、いつでも・どこでも・だれでも転倒リスクを評価できるようになりつつある。本研究の成果を一日も早く実用化し、将来的な転倒の発生件数の減少を達成したい。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高齢者の転倒は、医療費が毎年7,300億円にも上ること[林ら, 2007]、寝たきりになる原因の第3位であることなどから、超高齢社会を迎えた我が国にとって特に重要なテーマである。転倒は、そのリスクが高い者を早期に見つけることさえできれば、見守りを増やすなどの適切な対策をとることができる。しかし現状では、リソース不足など様々な理由で、個々人の転倒リスクの早期発見は実現に至っていない。本研究のように簡易センサで転倒リスクを評価できるようにすることは、このような問題を解決する手段として高い有用性が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Falls among the elderly are an accident in daily life that should be reduced at all costs in Japan's super-aged society. Previous studies have reported that those at high risk of falling have a higher variability of walking pattern than those at low risk of falling. The purpose of present study is to develop a system that can evaluate and provide feedback on an individual's risk of falling based on the variability of the overall walking behavior and physiological indices that can be measured during daily life. The technology developed in this study is making it possible for anyone, anywhere, at any time, to assess the risk of falling. We hope to put the results of this research into practical use as soon as possible to reduce the number of falls in the near future.

研究分野：人間工学

キーワード：歩行分析 動作解析 バイオメカニクス 転倒 高齢者

## 1. 研究開始当初の背景

高齢者の転倒は、医療費が毎年 7,300 億円にも上るという報告もある通り[林ら, 2007], 超高齢社会を迎えた我が国にとって特に重要なテーマである。転倒リスクが高い者は、低い者に比べて、歩行の再現性が低い(ばらつきが大きい)ことが報告されている[Hausdorff et al., 2005]。我々は、この知見をさらに発展させ、転倒リスクが高い者は低い者に比べて、立脚後期から遊脚初期にかけての再現性が特に低下していることを発見した【Kobayashi et al., 2014】。この知見はさらに応用され、医療や研究の現場で使用できる簡易センサ(IMU センサや力センサ、簡易的な光学センサなど)を用いて、個々人の転倒リスクやそれに関連した歩行特徴を 70%以上の精度で判別し、その結果を利用者にフィードバックできる技術(以下、産総研歩行特徴評価技術)を開発してきた【Kobayashi et al., 2015】。この技術は国内の複数の企業により実用化され、実際に企業健診や歩行特徴評価サービス事業などに利用されている。しかしこれまでの技術では統制された環境での歩行計測が必須であったため、そのような現場に訪れない者の評価はできなかった。

一方、日常生活中に歩行をはじめとする動作や行動、心拍などの生理指標を計測・記録できる機器が近年普及してきている。これらのセンサシステムを用いると、申請者がこれまで詳細に研究してきた、実験室で計測される一歩の再現性(歩行の短期的な再現性)に加え、日常生活中に歩行をはじめとする動作や行動などの特徴も分析対象とできる。例えば van Schooten らは、腰背部に装着した 3 軸加速度センサで、319 名の高齢者それぞれから 8 日間分の日常生活の加速度を計測した。得られたデータから複数の歩行関連指標を算出し、歩調、歩行の左右対称性の指標(Harmonic Ratio: HR2)、歩行の滑らかさの指標(Index of Harmonicity: IH3)、

歩行の複雑性の指標(Multi Scale Entropy: MSE4)が、その後 1 年間に発生した転倒と関連していたことを報告している。Brodie らは、胸骨位に装着できるペンダント型の加速度センサを用いて、18 名の高齢者を対象に、14 週間の日常生活歩行データの収集を行った。得られたデータは周波数解析にかけられ、転倒経験者は非経験者よりも、一回の歩行 bout(歩き始めてから歩き終わるまで)の長さや、その間の歩数が有意に少ないこと、一歩にかかる時間(歩調の逆数)のばらつきの最頻値が有意に大きいことなどが明らかになった。しかしこれらの研究では、計測期間全体での傾向を示すに留まっており、被験者がいつ、どのような場所を、どのような靴で歩いていたのかなどの詳細については分析されていない。歩く時間帯や季節、路面の状況、履いている靴などの要因が歩容に影響することは、先行研究で報告されている。また、天候も歩容に影響する可能性が考えられる。日常生活での歩行評価でもこのような要因の影響が加味できれば、システムやサービスの精度や信頼性をさらに向上できる可能性が考えられる。

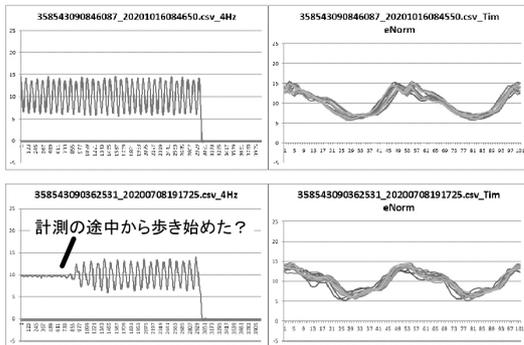
## 2. 研究の目的

日常生活での歩行に、上記のような要因が与える影響を明らかにするためには、歩行のデータに加えて実験協力者の位置や生活に関する情報(履いている靴など)を取得する必要がある。しかしこれまでの研究や、実用化されているシステムやサービスでは、位置情報などのような機微な情報は扱われてこなかった。また、既存の製品は、他の機器と同期させて用いること、生データを出力すること、などができず、研究で大規模なデータを取得するには難しいものが多い。そこで我々は、これらの課題を解決して、研究で大規模データを取得するための独自計測システム、産総研歩行属性判定システム HOLMES(Human Objective Locomotion MEasurement System)を開発し、この機器を用いて日常生活中における屋外での歩行特徴に関する分析を行った。

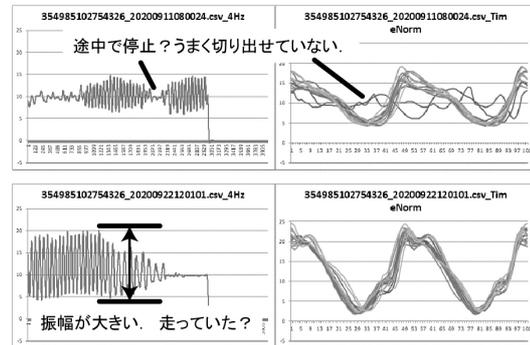
## 3. 研究の方法

本研究は、産総研人間工学実験委員会に計画を諮り、位置情報を含むデータを研究で利用することについての承認を得た(人 2018-869)。本研究で開発したシステム(HOLMES)は、市販の Android 端末(Sony 社製, Xperia1)、IMU センサ(マイクロストーン社製, MVP-RF8-HC)及びクラウド(Dropbox など)を組み合わせた構成とした。独自に開発した Android 端末用アプリケーション(HOLMES アプリ)は、任意のタイミングで、任意の計測時間、Bluetooth Low Energy (BLE)で接続した IMU センサから加速度を取得することができる。また、センサの校正(キャリブレーション)も任意のタイミングで実施することができる。Android 端末に取得した生の加速度データは、計測時間終了後、端末 ID と取得開始日時をファイル名としたテキストファイルとしてクラウドにアップロードされる。同時に以下の 6 つの情報が別のクラウド上のデータベースに保存される: 計測日時、計測した端末の ID、計測開始時点の位置情報(Android 端末内蔵の GPS で取得した経度緯度)、計測終了時点の位置情報(同上)、計測開始時点の位置情報から Open Weather Map を介して取得した天候情報(天気、気温、湿度、風速、風向)、計測開始時点と終了時点の位置情報から、地理院地図を介して取得した標高。当該アプリはバックグラウンドでも稼働するため、一度アプリを立ち上げた後は、画面を切ることができる。ただし、Android 端末とセンサがある程度(およそ 10m)以上離れると BLE の通信が切れてしまい、計測が継続で

分析対象としたデータの例



除外したデータの例



左：合成加速度。200Hzで15秒間計測したため、データ数は3000点。  
 右：一歩行周期分の波形を切り出し、時間正規化し、重ねて表示。

図1 本研究で分析対象としたデータ(左)と、除外したデータ(右)の例

きなくなることがある。当該システムは満充電の状態で、1分に一回、15秒ずつ200Hzで加速度データを取得すると、およそ8時間稼働できる(稼働時間のテストではSONY社製Xperia1を使用)。そのため、1回の充電でおよそ480試行、およそ7200秒のデータを取得することができる。なお本システムでは位置情報としてGPSの経度緯度を取得しているため、主には屋外での使用を想定している。

本システムを用いての実験は、2020年7月6日から11月27日にかけて千葉県我孫子市、柏市、東京都江東区を中心に実施した。実験協力者らは、開発したシステムの使用方法について説明を受け、その後14日間の計測に参加した。センサは、ランナー用のウェストポーチに入れ、腰背部に装着するよう指示した。データ計測用のスマートフォンは、専用のポーチを用意することで、できるだけ常時身につけるよう指示した。データ計測用のHOLMESアプリは、屋外に出る際に起動するよう指示し、どうしてもデータを記録したくない場所では当該アプリを終了するか、当該アプリが稼働しているスマートフォンの電源を落とすよう指示した。

計測項目は、センサ座標系の3軸加速度(xacc, yacc, zacc)、計測日時、計測した端末のID、計測開始時点の位置情報(スマートフォン内蔵のGPSで取得した経度緯度)、計測終了時点の位置情報(同上)、路面の傾斜(計測開始時点および終了時点の位置情報と国土地理院の地理院地図から取得できる標高より計算)、天候(計測開始時点の位置情報とOpen Weather Mapから取得できる天気、気温、湿度、風速、風向)、および履いていた靴(協力者に記録を依頼した実験記録より取得)の8項目とし、からの項目は1分に一回、15秒ずつの計測を行った。

計測した加速度より、Zijlstraらの手法を応用して踵接地のタイミングを抽出した。具体的な手順は次の通りである。計測した3軸の合成加速度(accres)を次式によって算出する。

$$\text{accres}_t = (\text{xacc}_t + \text{yacc}_t + \text{zacc}_t) \dots$$

ここでtはデータの各時点を示す。合成加速度に、カットオフ周波数2Hzのローパスフィルタをかける。これによって合成加速度の波形はほぼ正弦波状になる。各波のピーク値を踵接地のタイミングとして記録する。なおZijlstraらは、加速度の前後成分のピーク値で踵接地のタイミングを取得したが、我々は合成加速度を用いた。これは、日常生活での計測では、実験者がセンサの装着状態を確認できないため、気が付かないうちにセンサの向きが変わってしまう可能性が懸念されたためである。取得した踵接地のタイミングに基づき、連続した14歩行周期分の信号を切り出せるデータのみを分析対象とした。これは、計測の時点で定常歩行をしていたのか、それとも直前に歩き始めたのか、それともその後に停止したのかが不明なため、前後2歩行周期分を加速期と減速期として除外しても10歩行周期分の定常歩行と考えられるデータを分析できるためである。またこの過程で、明らかにセンサが正しく装着できていないと考えられるデータや、正しく切り出しが行えていないと考えられるデータ、走っていたと判定できるデータなどについては除外した(図1)。

分析対象としたデータより、次のパラメータを算出した。

- ・動作の左右非対称性の指標：Harmonic Ratio (HR)。
- ・HRを100点満点として理解しやすくした指標：improved Harmonic Ratio (iHR)。
- ・動作の滑らかさの指標：Index of Harmonicity (IH)。
- ・動作の複雑性の指標：Multi-Scale Entropy (MSE)。
- ・歩調：Cadence (CAD)。
- ・歩行のばらつきの指標：Cadence (CAD)の変動係数。

上記パラメータのうち、HR、iHR、IHについては、センサ座標系におけるx、y、z各軸、および合成加速度(res)に対して計算した。上述の通り、センサはランナー用のウェストポーチに入



図2 産総研柏センター近辺でデータが取得された地点．地図上に表示されたピンの位置でデータが計測されている．

れ、腰背部に装着した．加速度の x 軸は左右歩行（正の値が右）、y 軸は上下方向（正の値が上）、z 軸は前後方向（正の値が後ろ）を示す．また、MSE については、先行研究に従い t=1 から 6 までの条件で算出した．

本実験は、日常生活中における屋外での歩行特徴に関する予備的検討として、取得されたすべてのデータより、次の条件に合致するデータを抽出し、個別に比較検討した．

- ・ 時間条件：朝（午前 6 時から 9 時）と夕方（午後 5 時から 8 時）
- ・ 履いていた靴：スニーカー条件とヒール靴条件
- ・ 天候条件：晴もしくは曇り条件と雨条件

それぞれの条件間の統計学的な比較には、対応のない t 検定と効果量 Cohen ' s d を用いた．有意水準は、先行研究 11) に従い  $p < 0.05$  以下、かつ  $d > 0.2$  とした．

#### 4．研究成果

本研究では、開発したシステム（HOLMES）を用いて、参加者より 35,380 歩行周期分の分析対象のデータを取得した．図 2 に、産総研柏センター近辺でデータが取得された地点の例を示す．

本研究では、初めに計測時間の影響を分析した．分析対象のデータより、朝（6 時～9 時）に取得したデータ 1163 件と、夕方（17 時～20 時）に取得したデータ 1434 件を抽出し、各パラメータを比較した．その結果、複数のパラメータで統計学的な有意差が認められ、総じて夕方は朝よりも歩行の質が低い（歩行の左右差が大きい、滑らかさが低い、複雑性が低い）ことが確認された．この傾向は、夕方は朝よりも歩行速度が遅いことを報告している先行研究の知見と一致すると考えられる．一方で、実験協力者が歩いていたルートを確認したところ、最大 5% 程度の緩い傾斜路が確認され、朝は下り、夕方は上りとなっていた．日常生活での歩行計測では、このように時間帯によってルートの影響が異なることは頻繁に生じると考えられる．そのため日常生活での歩行データを単純に時間帯だけで比較することには注意が必要と言える．

次に、天候の影響について分析を行った．この分析では、梅雨の時期に計測したデータ 554 件のみを対象とした．晴もしくは曇りの日に取得したデータ 337 件と、雨の日に取得したデータ 217 件を抽出し、各パラメータの比較を行った．分析の結果、複数のパラメータで統計学的な有意差が認められ、総じて雨の日は晴れ日より歩行の質が高い（歩行の左右差が小さい、滑らかさが高い、複雑性が高い）ことが確認された．雨の日には、路面がぬれていることなど、晴れの日よりも歩行条件が悪いことが想定される．それにもかかわらず雨の日の方が歩行の質が高かったという結果は、雨の日にはより保守的な戦略をとって歩いている可能性が示唆される．

最後に、靴の影響について分析を行った．この分析では、靴の条件が同一となるように貸与した、実験用のスニーカーと実験用ヒールを履いた際のデータ 2341 件（スニーカー条件のデータ 1632 件、ヒール条件のデータ 709 件）のみを分析対象とした．分析の結果、左右対称性に関する HR のみ統計学的な有意差が認められ、総じてヒール条件は、スニーカー条件よりも歩行の左右差が大きいことが確認された．

本稿で紹介した通り、我々が開発したシステム HOLMES は、実験協力者の了解を得たうえで、位置情報などのような機微な情報を取得しながら、加速度信号を計測することができる．当該システムを用いることで、本研究で示したように、歩く時間帯や天候、履いている靴など、日常生活の様々な要因影響を分析することができる．しかし当該システムもまだまだ開発中であり、

以下に示すような限界がある。まず 現状では、スマートフォンに内蔵されている GPS の機能を用いて位置情報を取得しているため、ショッピングモールや地下街のような屋内空間や、高さ方向の移動では精度が著しく低下することが挙げられる。これについては、例えば自律航法 (Dead Reckoning) など衛星に頼らない測位技術も併用する対策などが考えられる。一方で、バッテリーの問題も対策が必要である。自律航法のように常時センサ値の取得が必要な技術を用いると、現状よりも早く電源が尽きることが考えられる。現状でも 1 分に 1 回、15 秒ずつしか計測を行っていないため、例えば不意に生じたつまずきなどをこのシステムで拾うことは容易ではない。また、データ量や解析時間が膨大になることも限界として挙げられる。本研究では 3538 件 (35380 歩行周期分) の分析対象のデータが取得されたが、例えば歩いていなかった (車や電車などに乗っていた、座っていたなど) と思われるデータはこのおよそ 5 倍程度存在する。それらをあらかじめ決めた基準で分析し、歩いていたと思われるデータを抽出するにはかなりのコストがかかる。以上を踏まえ、当該システムの運用方法については今後より高度化していく必要がある。

本研究では、日常生活の歩行動作全体としての行動やその時の生理指標などの特徴を用いて転倒リスクを判定できるようなシステムを開発することを目的とし、長時間これらの指標を計測できるデバイスの開発とそれを用いた日常生活の歩行特徴の評価を行った。開発したシステムを用いることで、これまで実験室では研究できなかった様々な要因 (例えば、場所や時間帯、混雑度合い、飲酒の影響などなど) についても考慮した歩行特徴分析ができることが確認された。今後はこのシステムの実用化を目指し、より精度や信頼性の高い歩行特徴評価技術・サービスの開発に貢献していきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

|  |                 |
|--|-----------------|
| 1. 著者名<br>Gaku Kutsuzawa, Hiroyuki Umemura, Koichiro Eto, and Yoshiyuki Kobayashi                              | 4. 巻<br>-       |
| 2. 論文標題<br>Age Differences in the Interpretation of Facial Emojis: Classification on the Arousal-Valence Space | 5. 発行年<br>2022年 |
| 3. 雑誌名<br>Frontiers in Psychology  | 6. 最初と最後の頁<br>- |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.3389/fpsyg.2022.923056   | 査読の有無<br>有      |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）  | 国際共著<br>-       |

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>小林吉之, 五十嵐健太, 沓澤岳, 二瓶史行, 中原謙太郎     |
| 2. 発表標題<br>健常成人女性の日常生活中における屋外での歩行特徴に関する予備的検討 |
| 3. 学会等名<br>第42回バイオメカニズム学術講演会(SOBIM2021)      |
| 4. 発表年<br>2021年                              |

〔図書〕 計1件

|   |                 |
|---|-----------------|
| 1. 著者名<br>(一社)日本福祉のまちづくり学会 身体と空間特別研究委員会、原 利明、伊藤 納奈、太田 篤史、船場 ひさお、松田 雄二、矢野 喜正 | 4. 発行年<br>2020年 |
| 2. 出版社<br>鹿島出版会   | 5. 総ページ数<br>168 |
| 3. 書名<br>ユニバーサルデザインの基礎と実践   |                 |

〔出願〕 計1件

|                                 |                   |                          |
|---------------------------------|-------------------|--------------------------|
| 産業財産権の名称<br>感情記録支援装置と感情記録支援方法   | 発明者<br>小林 吉之, 沓澤岳 | 権利者<br>国立研究開発法人産業技術総合研究所 |
| 産業財産権の種類、番号<br>特許、特願2021-043215 | 出願年<br>2021年      | 国内・外国の別<br>国内            |

〔取得〕 計0件

〔その他〕

AIST 歩行属性判定システム HOLMES  
<https://unit.aist.go.jp/harc/ExPART/holmes.html>  
 AIST 歩行属性判定システム HOLMES 2019  
<https://unit.aist.go.jp/harc/ExPART/holmes.html>

6. 研究組織

|  | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |  |  |
|---------|---------|--|--|
| ドイツ     | DFKI    |  |  |