

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 23 日現在

機関番号：12611

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350665

研究課題名(和文) 無侵襲デバイスによる高齢者の運動機能のフィールド計測・解析と運動介入評価

研究課題名(英文) On-site measurement of motor function of the elderly and evaluation of intervention

研究代表者

太田 裕治(OHTA, Yuji)

お茶の水女子大学・基幹研究院・教授

研究者番号：50203807

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：高齢者の立位・歩行機能の維持増進・改善に向け、無侵襲的に運動機能を計測する手法を開発した上で、静止立位ならびに歩行運動を評価した。計測手法に関しては、現場で簡便に利用することが可能な足圧計測靴デバイスならびに、非接触型距離カメラを利用し静止立位姿勢を評価する手法を開発した。前者に関しては、ポール・ウォーキングを対象に歩行状態を解析した。後者に関しては、静止立位時に体幹回旋運動が存在する事を見出すとともに、回旋運動は視覚情報の有無に依らないという興味深いデータを示した。

研究成果の概要(英文)：To improve motor function of the elderly, we developed novel non-invasive methods and evaluated the gait/stance motion. Regarding measurement method, we fabricated the in-shoe device to measure plantar pressure during daily human activity. The device is non-invasive and can be used easily for on-site checkup. By using the device, the gait with walking pole was analyzed. Also, we develop a new method to evaluate stance motion by using a non-contact depth camera, and it was found that rotational movement of trunk was seen during upright position. Interestingly, the motion was found to be independent of the visual information.

研究分野：人間医工学

キーワード：バイオメカニクス 医療・福祉 生物・生体工学 計測工学 シミュレーション工学

1. 研究開始当初の背景

2011年の日本の高齢化率は23.3%に達し、2055年には40%程度と推定される。世界的にも高齢者の運動機能の増進・転倒予防（骨折予防）に向けた研究・取組が活性化している。安定した立位・歩行動作の実現には、静的・動的バランス維持機能の評価が重要となる。Honeggerらは硬い床面、ならびに柔らかい床面上に被験者を立位させたときの頭部～体幹～骨盤間のバランス運動を比較した（Neuroscience, 28; 213: 62-71, 2012）。また、岡田らは安静立位時に水平外乱を加えた場合の立位姿勢保持能力を評価する研究を行った（基盤研究(C) 12680029, H12～14）。高転倒リスク者に対し研究室環境下で各種歩行パラメータを評価する研究もある（Leeら, Arch Phys Med Rehabil, 87, 569-575, 2006）。日常生活動作の観察に基づく Berg Balance Scale 等も機能評価に広く実施されている（Pardasaneyら, Phys Ther. 92(3), 388-97, 2012）。

研究代表者らも歩行中の足底圧を計測するデバイス（以下、靴デバイス）を開発し（Med Eng Phys. 33(5), 638-45, 2011）、転倒に密接に関係する歩行機能を簡便に定量計測してきた（IFMBE Proceedings, 37, 868-871, 2012 など）。すなわち、靴に敷上に片足7個の圧センサ（感圧導電ゴム）を配置し、無線伝送（2.45 GHz 帯 ZigBee）とすることで、足底圧の無拘束計測が可能である。このデバイスを用いて、重要な歩行パラメータである踵接地・爪先離床時の圧力値計測など、各種歩行安定性評価を行ってきた。

上記文献（Honeggerら、岡田ら、Leeら）における計測法などと比較し、靴デバイスの優位性は極めて高い無侵襲・無拘束性にある（単に靴を履くだけで定量計測可能である）。すなわち、既存研究は専用環境下における拘束性デバイスを用いた運動計測が主であり、従って、それらにより評価された運動は日常生活のそれとは乖離すると考える。加えて対象者は数が限定された健常高齢者となる（虚弱高齢者や疾患高齢者群を計測対象とすることは困難である）。Pardasaneyらの研究のように多数高齢者を対象とした研究もあるが、評価については十分な定量性は望めず定性に留まる傾向にある。

以上の研究状況下、靴デバイスの位置づけとしては、その計測精度は実験室専用機器に劣るものの、フィールドで簡便に natural な立位・歩行運動の定量記録解析が可能な機器と捉え得る。本助成事業では、この靴デバイスをベースに新たに kinematics を加えた計測システムを構築し、様々な高齢者の立位・歩行運動を網羅計測・評価することを考えた。このような手法はこれまで存在せず、データを基に歩行健康支援に対する新観点を拓くと考える。

本研究の特色としては、提案する運動計測法は国内外に類例が無いこと、簡便であり計測フィールドを選ばないことが先ず挙げられる。加えて、計測直後に対象者に運動データを可視化し提示する迅速なフィードバックは、対象者自身の行動変容に繋がるのみならず、運動機能の向上データは各自治体での介入実施内容に対する財政支出を評価する根拠となりえる。現状は高齢者の身体機能の定量はなされておらず、そこに本計測システムの意義がある。以下では、本研究により得られた主な成果について報告する。

2. 研究の目的

本研究では、高齢者の立位・歩行機能の維持増進・改善に向け、無侵襲的に運動機能を計測する手法を構築した上で、静止立位時、ならびに、歩行運動を評価した。計測方法として、まず、

- 1) 足底に掛かる圧を無線計測することで、立位・歩行時のバランス運動を無侵襲定量する手法
- 2) 3次元距離カメラにより立位時の姿勢動揺量を非接触計測する手法

を構築する。開発手法の具体的な評価の対象例として、前者に関しては、中高年齢者を対象に、健康の維持増進に有効と近年盛んとなっているノルディック・ウォーキングの歩行を解析することで、同訓練方法の運動科学的観点からの検討を行った。後者に関しては、高齢者が静止立位姿勢を維持した時の体幹運動の評価を中心に行った。体幹運動に関しては、計測の難しさから、従来、詳細な検討は余り実施されておらず、とくに、体幹の捻れ運動の観点から検討を行った。

3. 研究の方法

3-1 計測方法の構築

(1) 靴デバイスの開発

靴デバイスの特徴は解剖学的特徴を考慮し、圧センサ数を7箇所（足裏の踵骨隆起部、立方骨、第五中骨頭、拇指接地面、第一中骨頭、中間楔状骨、内足弓中心）に簡略化した点にある。各箇所は、歩行バイオメカニクスの観点から、高齢者の歩行特徴抽出や転倒リスク推定に適切な位置として選んだ。このセンサ配置に対し、身体重心位置 (CoM) の動揺は CoP（足圧の平均座標, Center of Pressure）と相関すると考え、靴デバイスにより静止立位時の重心動揺軌跡を求める手法の構築を試みた。従来、この計測には据え置き型重心動揺計が用いられてきたが、ここでは靴デバイスの左右両足底14個の圧センサ出力に基づき CoP 軌跡を求める手法を構築した。靴デバイスから得られる

CoP 軌跡を、据え置き型重心動揺計により較正した結果、相関係数 0.97 程度が得られ、開発デバイスによる CoP 軌跡の計測に問題が無いことを確認した。

次いで、歩行時の同デバイスの性能に関して検討を行った。すなわち、インソール上の限定的計測点のため算出される CoP は誤差を含むこととなる。この点に関し、ここでは、F-scan II システムによる較正実験を通じ計測信頼性を評価し、問題が無いことを確認している。F-scan II は 960 個の圧センサをインソールフィルム上に有し高精度 CoP 測定が可能な計測デバイスである。以上の検討から、同デバイスにより立位時から歩行時に至る CoP 軌跡（歩行時の場合は踵接地から爪先離床までの軌跡）が得られることとなり、歩行安定性評価に極めて有用と考えられる。靴デバイスの特徴は、煩わしい計測機器の交換がなく、数分以内に静止立位と歩行運動が評価できる点であり、体力の劣る高齢者・患者も適用対象となると考える。

(2) Time-of-Flight カメラ（以下、ToF カメラ）による身体動揺量計測手法を確立した。ToF カメラとは、対象物体までの距離を非接触計測するカメラであり、各種物体の 3 次元形状・運動計測が可能である。すなわち、カメラ前面の LED から発光された赤外線が対象物体表面で反射し、カメラに戻るまでの時間から反射点までの距離を得る方式である。

ここでは ToF カメラに Baumer 社製 TZG01 を選定し、立位時の姿勢変位量を非接触計測する手法を構築した。サイズならびに質量は $65 \times 65 \times 80$ mm, 530 g であった。また、イメージセンサ内の 176×144 画素が独立して距離を計測することが可能であること、また、最高 54 frame/sec のサンプリングレートを有しており、運動計測も可能である点が特徴である。

予備実験を通じ、カメラから 3m 近辺の位置において数 mm 程度の変位計測精度を得ており、この位置で立位人体が動揺したときの身体各部位の変位計測精度を Vicon システムを用いて較正した。すなわち、被験者背後に設置した ToF カメラにより、頭部、肩、主要関節の前後変位量の時間変化を計測した。他の計測条件（周囲照度、フレームレート、exposure time など）を最適化するとともに、着衣影響（浮き上がりや皺、衣料繊維の種類など）についても検討した結果、現場で計測可能なシステムとして構築した。

3-2 静止立位時のバランス機能評価～体幹運動の評価

本項目のフィールド計測対象はカフェランチルーム事業（志木市）であった。当該事業は志木市

主催であり、小学校の空き教室を活用し転倒予防などの身体作りを介入実施する教室である。この教室参加者（高齢者 21 名(77±6 歳)）を評価対象とした。すなわち、ステージ上の被験者（開眼/閉眼）の静止立位運動として、ToF カメラによる姿勢変位量計測と重心動揺計(マットスキャン, Nitta Co.) による重心動揺軌跡を計測・比較した。両計測器ともに、サンプリングレートは 20 Hz であった。比較対象被験者は健常若齢者 10 名(23±2 歳, mean ± S.D.) であった。

ToF カメラの動画像データ解析には数値解析ソフト MATLAB を使用した。動画像データに対し、適宜、関心領域(ROI: region of interest)を設定し、その領域の輝度値に基づいてカメラからの距離変位を算出した。ROI サイズは 3×3 pixel とし、配置は左肩、右肩、左腰、右腰等とした。とくに、被験者の肩および腰の高さでの回旋運動を調べるため、肩・腰（左右）の前後変位量を算出し、45 秒間における最大振幅を回旋範囲と定義した。統計処理にはフリーソフト R を使用した。

3-3 ノルディック・ウォーキング時の歩行評価

ノルディック・ウォーキング (Nordic Walking, 以下 NW) とは 2 本のポール (ストック) により歩行運動を補助し運動効果を増強するエクササイズであり心身両面に有効とされる (Scand J Med Sci Sports. 2012, 22(5), e70-8.)。NW の、より積極的な治療効果を考えた場合、ヒトの歩行決定は下肢交代の過渡応答期のバランス機能であり、NW はそのバランス障害を克服する治療手法と位置づけることが可能である。富士温泉病院 (甲府市) では同病院名誉院長矢野英雄博士 (研究協力者) のもと、股関節症患者の保存的治療を 10 年来実施しており、全国から 1500 名の患者を抱える。これらの患者を対象に、歩行治療のためのノルディック・ウォーキング (Nordic Walking, 以下 NW) が実践されている。以下では、開発したデバイスによる NW の科学的効果に関して検討を行った。

4. 研究成果

4-1 静止立位時のバランス機能評価

当該フィールド計測から得られた、静止立位時の体幹運動に関する主な計測結果として、現在までのところ以下が得られている。

- (1) 肩位置ならびに腰位置の RoM を高齢者と若齢者の間で比較した結果、高齢者は開眼・閉眼両条件ともに肩位置での RoM が有意に大きかったが、若齢者では両条件において両 RoM 間に有意差は認められなかった。
- (2) RoM と CoP 総軌跡長との関係に関しては、高齢者は開眼条件において弱い負の相関が見られた。

また、若齢者では開眼・閉眼両条件において弱い正の相関が見られた。

(3) RoM を、開眼条件と閉眼条件の間で比較したところ、高齢者・若齢者ともに、肩・腰それぞれの位置における RoM の有意な差は認められなかった。

(1) の結果は、肩位置での RoM が腰位置のそれと比較し、有意に大きいことを意味し、これは、体幹捻れが存在することを意味する。また、(3) の結果からは、視覚情報は RoM に影響を与えないという興味深い結果を示している。

4-2 ノルディック・ウォーキング時の歩行評価

靴デバイスの計測手法を改良し、二つの手法、すなわち、小型軽量の 6 軸加速度センサをウォーキングポールの上部に固定し、3 軸加速度ならびに 3 軸角速度をワイヤレス計測することで歩行運動中のポール姿勢を計測する手法、ならびに、ウォーキング・ポール先端の石突部に小型圧力センサを固定し、ポール軸方向に作用する圧力ならびにポールの接地タイミングを計測する手法、を新たに構築することで、片麻痺者を対象に歩行中のポール等に作用する力を計測した。その結果、歩行時の足底圧変化としては、踵接地と同時に、踵部圧力は上昇し、その後、前足部による蹴りだしのための圧力と入れ替わる「2 峰性」の特徴的变化を示すが、ポールウォーキングを行った場合、この計測事例では、ポール無し歩行と比較した場合、踵接地圧力、前足部圧力ともに増加する傾向にあった。ポール使用により、通常、歩幅や歩行速度は自然増加する傾向にある為、足底圧力が増加したとも考えられる。一方、ポールに加わる圧力に関しては、接地時にポール圧が一時的に減少する特性が見られた。このような振る舞いはポールウォーキングにおいてたびたび見出される現象であり、ポール無し歩行においても踵部におけるヒールトランジットとして、このような圧変化が報告されており、同様の現象かとも思われる。このような現象に関しては不明な点が多く、ポールウォーキングの力学モデル化に際して、考慮されるべき課題の一つと考えられる。

四足動物の陸上歩行時において、四肢の着床・離床のパターン(順序)は、歩行速度の増加に伴い様々な様相を呈する。ポールウォーキングの場合も同様の状況が存在すると想定される。計測結果の一例として、NW 非熟練者の場合、右足踵の接地に対して、100 ミリ秒程度、反対側ポールが先行接地する事が分かり、ポールが歩行全体をリードすることが示唆された。一方、NW 熟練者の場合、このタイミングは逆となり、ポールは足の後に接地し、踵が歩行全体をリードする傾向にある事が分かった。このような歩行経験の差による歩行タイミングの違い、また、速度によるタイミングの

変化などは、ポールウォーキングが歩行リズム(パターンジェネレータ)に及ぼす効果などを考える際に重要と考えられ、適切な数学的モデルへの発展が求められると考えられる。

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 2 件)

□ Anzai E, Nakajima K, Yamashika K, Ohta Y ほか . Effect of foot arch structure on postural stability. Clinical Research on Foot & Ankle, 2014 (on line journal) (査読有). doi:10.4172/2329-910X.1000133

□ Nakajima K, Anzai E, Yamashita K, Ohta Y ほか . Measuring gait pattern in elderly individuals by using a plantar pressure measurement device. Technol. Health Care, 22(6),2014,805-815 (査読有). doi: 10.3233/THC-140856.

〔学会発表〕(計 3 件)

□ 安在絵美, 太田裕治. ポール運動評価システムの開発とポールウォーキング中の足部接地とポール接地タイミングの検討. 日本生体医工学会関東支部若手研究者発表会, 2015 年 12 月 5 日, 東京電機大学東京千住キャンパス(東京都足立区) .

□ 安在絵美, 中嶋香奈子, 太田裕治. 陸上ならびに水中ポール・ウォーキングの歩行周期におけるポール接地タイミング. 水中ポール・ウォーキング研究会. 2015 年 8 月 30 日, サクラリゾート(山梨県甲斐市) .

□ 豊島歌穂, 太田裕治 ほか. 3 次元距離カメラを用いた身体動揺計測について. 日本生体医工学会関東支部若手研究者発表会, 2014 年 11 月 22 日, 東京電機大学東京千住キャンパス(東京都足立区) .

〔図書〕(計 2 件)

□ 太田裕治, 中嶋香奈子, 安在絵美, 山下和彦. 転倒による骨折予防のための歩行バランス機能計測靴デバイスの開発(分担執筆), pp. 265-271, アンチ・エイジングシリーズ 3 骨研究最前線, 2013. 株式会社エヌ・ティー・エス .

□ 太田裕治, 橋田泉. 歩行運動調査とワイヤレス式足底圧計測靴による運動機能計測(分担執筆), pp. 216-218, Medical Walking, 2013. 南江堂 .

研究代表者ホームページ

<http://www.eng.ocha.ac.jp/biomedeng/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

太田 裕治 (Ohta, Yuji)
お茶の水女子大学・基幹研究院・教授
研究者番号:50203807

(2) 研究分担者

中澤 公孝 (Nakazawa, Kimitaka)
東京大学・大学院総合文化研究科・教授
研究者番号:90360677

(3) 研究分担者

山下 和彦 (Yamashita, Kazuhiko)
東京医療保健大学・医療保健学部・教授
研究者番号: 00370198

(4) 研究分担者

大隅 久 (Osumi, Hisashi)
中央大学・理工学部・教授
研究者番号:00203779

以上