

令和元年6月17日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K12959

研究課題名(和文) 日常的な歩行分析のための簡易なインソール型歩行無線計測システムの開発

研究課題名(英文) Development of insole-type wireless measurement system for daily gait analysis

研究代表者

福田 博也 (FUKUDA, HIROYA)

神戸大学・人間発達環境学研究科・准教授

研究者番号：90294256

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：市販の安価なフォースセンサと一般的な材料を組み合わせ、歩行中の床反力(鉛直、左右・前後)、足圧中心軌跡、足部アーチなどの変化の様子をリアルタイムで確認できる、「安価で」「簡易な」歩行計測用インソールの開発に取り組んだ。実験装置を組み立てることにより、使用場面を想定した形でフォースセンサの力学特性(圧縮、せん断、曲げ)を明らかにすることができた。さらに、被験者実験の結果から、床反力と足圧中心軌跡の推定結果が日常的に「歩き方」や「走り方」を評価するための精度を有していることが確認された。研究成果はスポーツ指導の現場での利用や歩行リハビリテーションでの下肢機能の評価を行う場面で貢献すると考える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究成果は、日常的に「歩き方」や「走り方」を把握することは勿論のこと、スポーツ指導の現場での利用、歩行リハビリテーションでの下肢機能の評価、術前・術後の比較分析を行う場面で貢献する。さらに、本研究で開発した歩行計測システムの有用性を、方向転換、段差歩行など日常動作で起こり得る突発的な動作や、高齢者や障害者のような下肢疾患患者で確認できれば、高齢者の躓き・転倒メカニズムの解明や高齢者のための生活空間や住宅設計にも貢献すると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In order to measure in real time the ground reaction force, the center of plantar pressure and the arch of sole, we have developed an inexpensive and simple gait measurement insole system by combining two or more commercially available inexpensive thin-film force sensors. Several mechanical properties, such as compressive load, shear force and bending stress, were made to evaluate the performance of commercially available inexpensive thin-film force sensors and a new designed triaxial shear force sensor. In addition, the estimating results of ground reaction force waveform and trajectory of the center of plantar pressure were verified experimentally over different footwear and walking pace on a group of subjects. It will be expected that the research results have been contributed to sports instruction and walking rehabilitation in the field.

研究分野：計測工学・人間工学

キーワード：健康・福祉工学 歩行リハビリテーション 歩行分析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

足底が床面を押す力(足底荷重)は、床面からの反作用である「床反力」として、フォースプレートと呼ばれる装置で計測できる。フォースプレートは通常、床面に設置・固定されており計測範囲が装置上に限定されるために、予測できない動きを伴うような歩行では使用できない。これに対し、履物底部に装着できる小型のフォースプレートも開発・市販されているが、使用する金属材料の剛性の影響により、装着した履物本来の性質が失われるなどの問題が指摘されている。

このような技術的背景のもと、研究代表者は、異なる原理と構造をもつフィルム状フォースセンサを複数個組み合わせ、歩行中の鉛直、左右・前後方向の床反力(3軸)と足圧中心軌跡、さらに足部アーチの変化の様子をリアルタイムで確認できる歩行計測用インソールの開発に取り組みうと考えた。

2. 研究の目的

(1) 歩行計測用インソールの開発 「歩き方」や「走り方」を日常的に評価するために、市販の安価なフィルム状フォースセンサを複数個組み合わせ、立位・静止状態と歩行中の床反力(鉛直、左右・前後)、足圧中心軌跡、足部アーチなどの変化の様子をリアルタイムで確認できる、「安価で」「簡易な」歩行計測用インソールを開発する。

(2) 性能評価と計測用ソフトウェアの構築 日常的な歩行分析のために、歩調や床面環境を変化させたとき、異なる履物を用いたときなどの条件下で被験者実験を行い、性能を評価する。さらに、得られた歩行データ列をスマートフォンなどの携帯端末において可視化するためのソフトウェアを構築する。

3. 研究の方法

(1) センシング回路の設計と製作 フォースセンサには、荷重に対して抵抗値が変化するもの、起電力を生じるものがあるため、個々の原理に合わせてセンシング回路を設計・製作した。データの取り扱い易さを考え、荷重の変化を電圧の変化として取り出した。商用電源や人体運動から生じる周波数成分を考慮してフィルタ回路を組み込んだ。

(2) 市販のフォースセンサの性能評価 大きさ、形状、フィット感、人体運動の特殊性を考慮し、工業用の小型フォースセンサのなかでも、軽量で柔軟なフィルム状フォースセンサを使用した。実験装置を組み立て、利用場面を想定した形で力学特性を調べた。

(3) 歩行計測用インソールの考案と製作 フォースセンサを樹脂製プレート上に複数個配置し、床反力を計測するためのインソールとした。鉛直方向の床反力を計測するためのセンサとして、高分子厚膜のFSRや半結晶性ポリマーのPVDFの使用も考えたが、予備実験により、Flexi-Force(NITTA社)を採用することにした。左右・前後方向の床反力についてはStrain Gaugeを応用した新たなセンサを考案・製作した。足部アーチを計測するために、PVDFの利用を検討した。

(4) 様々な条件下における被験者実験 考案した歩行計測用インソールを装着し、履物(サンダル、靴)、歩調、床面環境(平地、傾斜)を変化させたときの床反力を計測し、実際応用上の有効性について検証した。歩行中の床反力波形の特徴点である第一峰P1、谷の部分P2、第二峰P3の現れ方は歩行分析において重要であるため、各特徴点での床反力を $F_{P1} \sim F_{P3}$ 、その発生時刻を $T_{P1} \sim T_{P3}$ とし、床反力推定の結果を定量的に評価した。体重や歩調は被験者間で異なるため、各特徴点における誤差は、床反力は被験者の体重 W 、時間は歩行の立脚期間 T によって基準化した。

(5) 日常計測のためのソフトウェアの構築 日常計測や歩行リハビリテーションなどの現場において手軽に利用できるように、ADコンバータで得られた歩行データ列をWi-Fiによる無線通信を用いて収集し、C言語で作成したアプリケーションによりリアルタイムで携帯端末に画面表示した。

4. 研究成果

(1) フォースセンサの基本性能評価 Flexi-Forceの感圧面における荷重分布を均等にするために、厚さ0.5mm、直径9mmの平らな円盤(パック)を面上に貼り付けた。パックの材質は加工が容易なPET樹脂、アルミニウムとステンレス鋼の3種類とした。図1はデジタルフォースゲージによる面負荷に対するセンサのコンダクタンスの変化である。パックの材質の違いによる圧縮荷重特性の違いは殆どみられなかった。次に、床面とセンサの感圧面に傾斜角度 θ をもたせて、せん断力がセンサ出力に及ぼす影響について調べた。その実験結果を図2に示す。○は1回目、+は2回目、×は3回目の結果、直線は回帰直線である。これらの結果から、センサが鉛直方向の力のみを捉えているのであれば、傾斜角度 $\theta=15^\circ$ 、 $\theta=30^\circ$ 、 $\theta=45^\circ$ でセンサ出力に違いがみられる筈であるが、回帰直線はほぼ一致していることから、せん断力

も同時に捉えている。つまり、鉛直方向の力のみを捉えるような使い方をする場合、感圧面にせん断力が加わらないような方法や構造が必要であることがわかった。

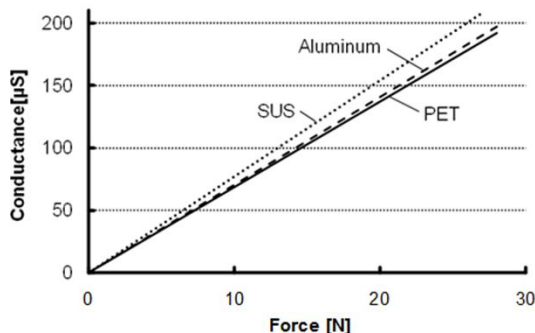
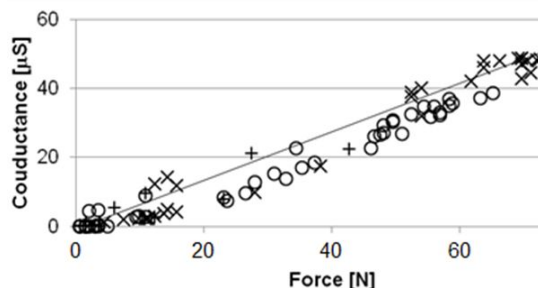
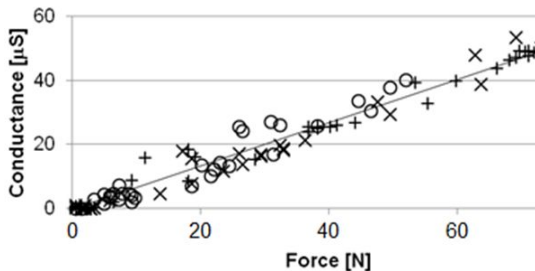


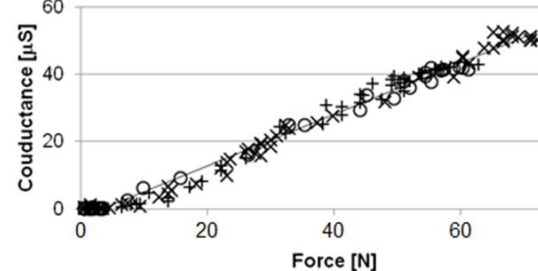
図 1 面負荷におけるセンサの圧縮特性



(a) 水平面との傾斜角度 $\theta=15^\circ$



(b) 水平面との傾斜角度 $\theta=30^\circ$



(c) 水平面との傾斜角度 $\theta=45^\circ$

図 2 センサのせん断特性

(2) 床反力（鉛直方向）の推定 考案した歩行計測用インソールを足底に装着した状態でフォースプレートを踏んでもらい、鉛直方向の床反力の推定結果の妥当性を検証した。履物を装着せずに平地を任意の速度で歩行する(a)の他に、3種類の歩行(b)~(d)を指示し、下肢疾患のない健康な成人5名(24.0±0.9歳)を被験者とした。(d)の歩調は平均的な120step/minを基に、遅い歩調として80, 100step/min, 走行にならない速い歩調として140step/minを選んだ。

- (a) 通常（履物なし，平地，歩調指定なし）
- (b) 履物装着（サンダルと靴，平地，歩調指定なし）
- (c) 傾斜路（履物なし，勾配1/12，歩調指定なし）
- (d) 歩調指定（履物なし，平地，80~140step/min）

(a)~(d)の歩行条件に対し、5名の被験者に5回ずつ歩行してもらった。図3に被験者実験により得られた結果の一例を示す。床反力の全体的な類似性を表す相関係数 $R=0.994$ 、床反力の各特徴点 $F_{P1} \sim F_{P3}$ 、 $T_{P1} \sim T_{P3}$ の誤差が0.99~6.49%であったことを示している。全ての歩行条件において、床反力波形の全体的な類似性を表す相関係数の平均値は0.970以上、床反力の各特徴点における誤差の平均値は全て5%以内に収まっていた。その中でも、各特徴点で比較的大きな誤差を生じた原因としては、歩行計測用インソールを2枚の靴下で挟み込んだ状態で固定・装着したことにより、歩行中にインソールが左右・前後方向に動いてしまったことや、歩き方によってせん断力の影響を大きく受けてしまったことなどが考えられるが、今回使用したフィルム状フォースセンサの力学特性を考えると妥当な結果ではないかと思われる。以上の結果は、床反力波形の特徴点での各誤差が5%程度で十分であるという用途には歩行計測用インソールを利用できることを示唆しているが、この誤差を許容できない用途で利用する場合は、力学特性に優れたフォースセンサの導入が必要があるが、現時点ではそのような優れた特性のフォースセンサはどこにも存在しない。

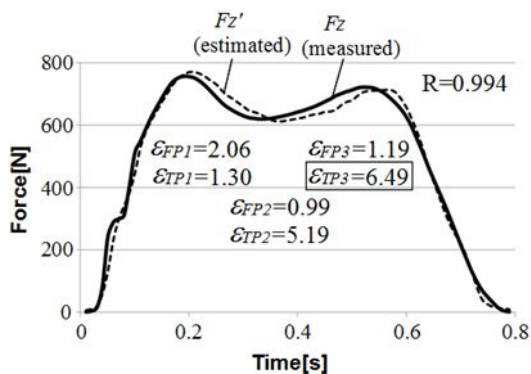


図 3 鉛直床反力の推定結果と各誤差(%)

(3) 足圧中心軌跡と床反力（左右・前後方向）の推定 考案した歩行計測用インソールを足底に固定・装着した状態でフォースプレートを踏んでもらった。フォースプレートから得られる足圧中心軌跡の左右方向の実測値を X_G 、前後方向の実測値を Y_G 、歩行計測用インソールから得られる推定値をそれぞれ X_G' 、 Y_G' とした。図4は立位・静止状態、図5は歩行中の一歩の結果である。ともに、足圧中心軌跡と軌跡の範囲の幅は一致していることから、日常生活における簡易的な歩行分析などに用途を絞れば有用であると考えられる。

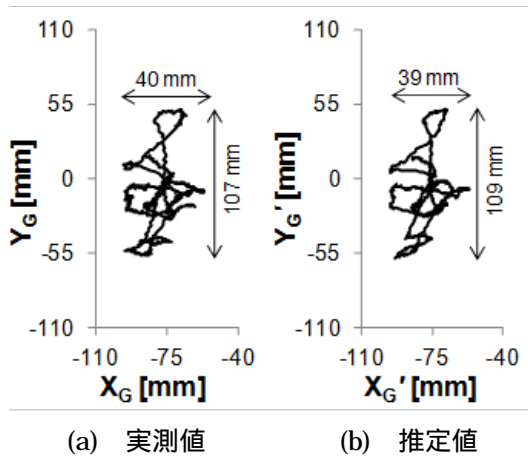


図 4 立位・静止状態の足圧中心軌跡の推定

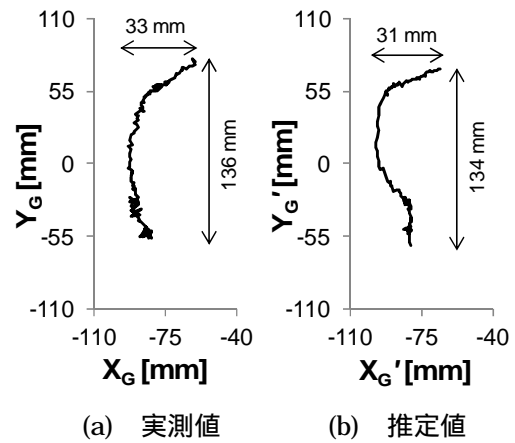


図 5 歩行中の足圧中心軌跡の推定

左右・前後方向の床反力の検出するために、Strain Gauge を用いた新しい原理と構造を持つせん断力センサを考案・製作した。小型 3 軸力覚センサ上にせん断力センサを置き、Z 方向（鉛直方向）に力を加えないように X 方向（左右方向）、Y 方向（前後方向）に力を加えたときの結果を図 6、図 7 に示す。小型 3 軸力センサ上から得られる実際の力をそれぞれ X load, Y load, Z load, せん断力センサから得られる力をそれぞれ X output, Y output とした。X, Y 方向共に、実際の力とよく一致していることがわかる。

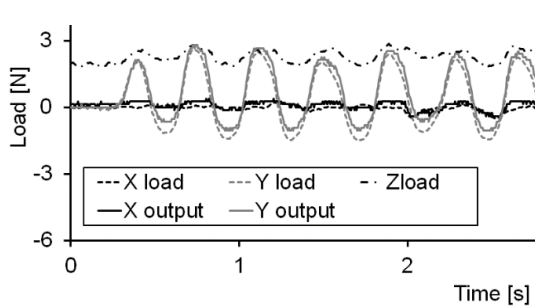


図 6 X 方向に力を加えたときのセンサ出力

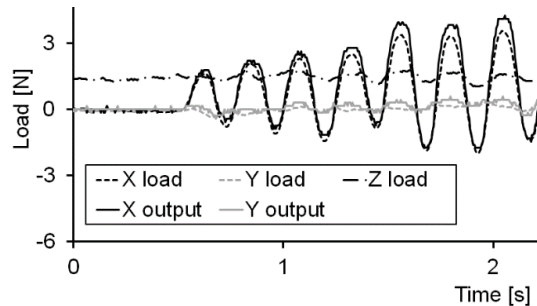


図 7 Y 方向に力を加えたときのセンサ出力

本研究で開発した歩行計測システムの有用性を、方向転換、段差歩行などの日常動作で起こり得る過渡的な動作や、高齢者や障害者のような下肢疾患で確認できれば、歩行分析の発展は勿論のこと、例えば、高齢者の転倒メカニズムの解明や高齢者のための生活空間や住宅の設計に貢献すると思われる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

高松 優子, 福田 博也, 圧力センサを用いた嚙下動作の検出, 電気学会論文誌 E, 査読有, Vol. 139, No. 4, 2019, pp. 85-86

長井 聡, 福田 博也, ゲーム機による寝床者の生体情報計測と落床予防, 電気学会論文誌 C, 査読有, Vol. 138, No. 4, 2018, pp. 635-636

〔学会発表〕(計 6 件)

高松 優子, 福田 博也, 介護施設の高齢者を対象とした嚙下センサの開発, 生体医工学シンポジウム, 2018 年 9 月 14 日, 名古屋工業大学 (愛知県・名古屋市)

高松 優子, 福田 博也, 圧力センサを用いた嚙下動作の検出, 電気学会全国大会, 2018 年 3 月 14 日, 九州大学 (福岡県・福岡市)

長井 聡, 鎌田 庸平, 福田 博也, 荷重中心の計測による臥床者の体位検出, 電気学会全国大会, 2018 年 3 月 14 日, 九州大学 (福岡県・福岡市)

鎌田 庸平, 福田 博也, 無線通信を利用した気圧センサによる身体活動量の推定, 電子情報通信学会総合大会, 2018 年 3 月 21 日, 東京電機大学 (東京都・足立区)

長井 聡, 福田 博也, バランス Wii ボードによる生体情報計測, 電気学会電子・情報・システム部門大会, 2016 年 8 月 31 日, 神戸大学 (兵庫県・神戸市)

鎌田 庸平, 福田 博也, 気圧センサによる活動状態の推定, 電気学会全国大会, 2017 年 3 月 15 日, 富山大学 (富山県・富山市)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。