

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25560285

研究課題名(和文) 歩行分析のための3軸床反力計測インソールの開発と簡易型歩行無線計測システムの構築

研究課題名(英文) Development of ground reaction force measuring insole and inexpensive wireless measurement system for 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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：歩行リハビリテーションにおける歩き方を簡単かつ定量的に評価するために、床反力計測インソールと簡易型歩行無線計測システムの開発に取り組んだ。市販の安価なフィルム状フォースセンサと考案した一軸せん断力センサの性能を評価するために、実験装置を組み立てて、力学特性(圧縮荷重、せん断、曲げ変形)を測定した。その結果、身体活動中の力計測に利用する場合の留意点と計測精度が明らかになった。さらに、異なる履物および異なる歩調における床反力波形の推定結果が妥当であることを確認した。研究成果は、日常的な歩き方を評価するための簡易で安価なシステムへと発展させることができる。

研究成果の概要(英文)：In order to easily and quantitatively evaluate the gait in walking rehabilitation, we have developed a reaction force measuring insole and inexpensive wireless measurement system for gait analysis. 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 uniaxial shear force sensor. As a result, the accuracy for estimating and considerations upon implementation in force measurement for various daily body activities were revealed. In addition, the estimating results of ground reaction force waveform were verified experimentally over different footwear and walking pace on a group of subjects. It will be expected that a simple and inexpensive system to evaluate daily gait has been developed.

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

1. 研究開始当初の背景

歩行中に足底が床面を押す力(足底荷重)の反作用である床反力の測定には、床面に設置・固定されたフォースプレートと呼ばれる装置を用いるが、測定範囲が装置上に限定されるため、予測できない動きを伴う歩行の中で使用するには限界がある。このような問題に対し、インソール上に工業用の金属製圧力センサを複数配置して床反力を推定している研究報告や、履物下部に装着する小型フォースプレートも開発されているが、センサからの配線の引き回しの影響により、履物がサンダルのような開放的なものに限定される、センサの剛性により、装着した履物本来の性質が失われてしまうといった問題がある。

このような学術的・技術的背景のもと、研究代表者は安価で柔軟なフィルム状フォースセンサを利用し、歩行中の足底荷重から鉛直方向の床反力(1軸)を推定するインソールの開発に取り組んできた。本研究では、これまでの研究を発展させるべく、異なる原理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・前後・左右方向の床反力(3軸)が得られるような床反力計測インソールの開発に取り組んでいる。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、「歩き方」や「走り方」を定量的に評価するために、安価なフィルム状フォースセンサを利用した3軸床反力計測インソールの開発と簡易型歩行無線計測システムの構築を目的としている。「安価で」「簡易な」歩行計測システムを用いて、異なる履物を用いたとき、歩調や床面環境(平地、傾斜)を変化させたときなど、様々な歩行条件での床反力の計測を目指す。さらに、得られた歩行に関するデータ列をスマートフォンやタブレット端末において可視化するためのアプリケーションを作成する。

(2) 歩行リハビリテーションやスポーツ指導などの現場において、「歩き方」や「走り方」を定量的に評価するために、「安価な」フォースセンサと「一般的な」電子部品、さらに、「構造・使用上の創意工夫」によって、「簡易な」歩行計測システムを構築しようというのが本研究の特色である。また、構築したシステムを用いて、「高価な」フォースセンサと「特殊な」電子部品による歩行計測システムと同等以上の歩行データを得ようというのが本研究の独創的な点である。

(3) このような歩行計測システムを実現できれば、スポーツ指導の現場での利用は勿論のこと、歩行リハビリテーションにおける下肢機能の評価や、術前・術後の歩行の比較分析を行う場面での貢献が予想される。

3. 研究の方法

(1) センサ回路の設計・製作とフォースセン

サの性能評価— 研究目的に合った専用のセンサ回路は存在しないため研究代表者が設計・製作した。感圧面に加わる荷重に対して抵抗値を変化させるもの、起電力(電位差)を生じさせるものがあるため、それら個々の原理に合わせてセンサ回路を設計した。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出力段にはフィルタ回路を設けた。大きさ、形状、フィット感、人体運動の特殊性などの理由から、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。製造元から提供されている繰り返し性、線形性などの基本的な物理特性や電気特性だけでなく、実験装置を組み立て、利用場面を想定して図1のような力学特性(圧縮荷重、せん断、曲げ変形)を明らかにした。

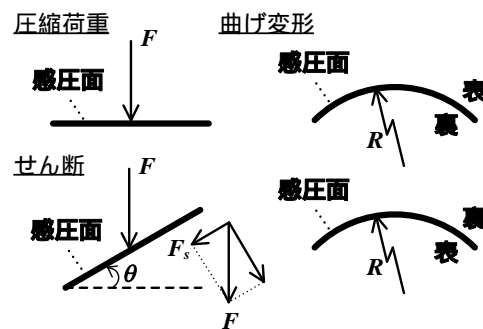


図1 フォースセンサの力学特性

(2) 床反力計測インソールの開発— フォースセンサを樹脂製プレート上に6個配置し、床反力を計測するためのインソールとした。感圧紙を用いて立位静止状態の静的な足底荷重分布を確認し、個々の足底荷重の特徴を抽出することでセンサの位置を決定した。床反力の鉛直成分を計測するためのフォースセンサとしては、高分子厚膜のFSRや半結晶性ポリマーのPVDFの使用も考えられたが、予備実験による検討を経て、Flexi-Force (NITTA社)を採用することにした。図2のように6個のセンサから得られる荷重値 $f_1 \sim f_6$ を用い、重回帰分析により足底にかかる全荷重値を推定して、その値を床反力の鉛直成分 F_z とした。床反力の水平成分(せん断力)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。

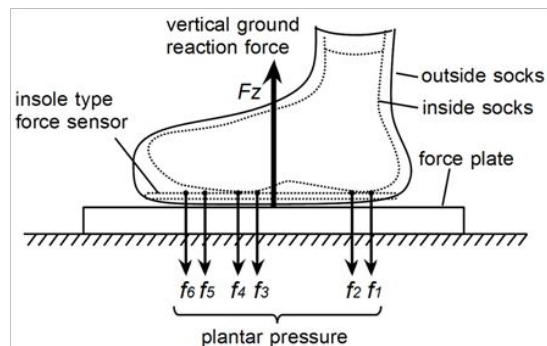


図2 足底荷重を用いた鉛直床反力の推定

(3) 異なる履物および異なる歩調における有用性の検証— 床反力計測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鉛直床反力を計測して、床反力計測インソールの実際応用上の有効性について検証した。図 3 のように、一般的に、歩行中の立脚時間 T における鉛直床反力波形の特徴点である第一峰 $P1$ 、谷の部分 $P2$ 、第二峰 $P3$ の現れ方は個人差や歩行条件による。そのため、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することにした。なお、各特徴点における誤差は、体重や歩調の異なる被験者間で比較するため、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。

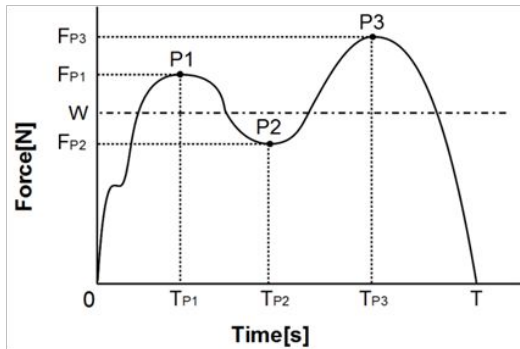


図 3 床反力の特徴点と各値の定義

(4) 歩行データを可視化するためのアプリケーションの作成— 歩行リハビリテーションなどの現場において日常的かつ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 ZigBee による無線通信を用いてパソコンで収集し、VisualBasic で作成したアプリケーションによりリアルタイムで画面表示した。

4. 研究成果

(1) センサ回路の設計・製作とフォースセンサの性能評価— Flexi-Force には、感圧面の荷重分布を均等にするために、感圧面より小さい、厚さ 0.5mm、直径 9mm の平らな円盤（パック）を上貼り付けた。パックの材質は加工が容易な PET 樹脂、金属のアルミニウムとステンレス鋼の 3 種類とした。図 4 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。パックとして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。

図 1 における水平面との傾斜角度 θ を変化させて、せん断力 F_s がセンサに及ぼす影響について調べた。その結果を図 5 に示す。○ は 1 回目、+ は 2 回目、× は 3 回目の測定結果、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 F のみを捉えているのであれば、傾斜角度 $\theta=15^\circ$ 、 $\theta=30^\circ$ 、 $\theta=45^\circ$ でコンダクタンスの変化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ため、せん断力 F_s も同時に捉えて

いることがわかった。このことから、鉛直方向 F 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の工夫が必要であることがわかった。

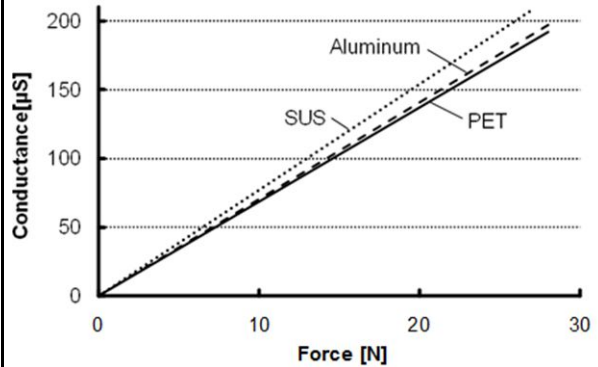
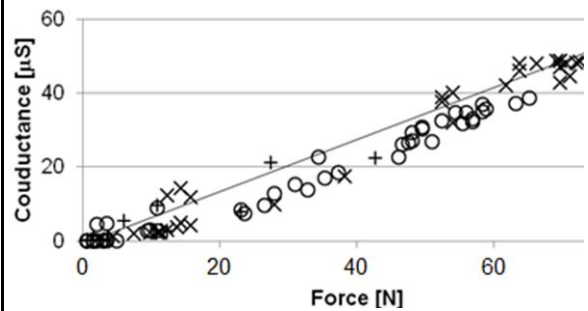
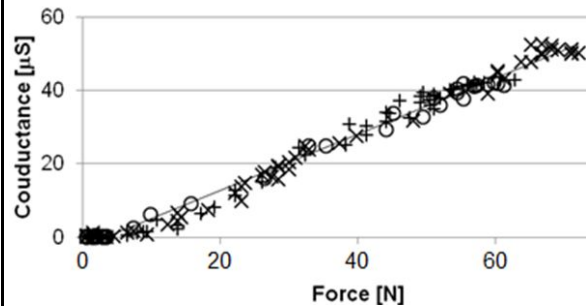


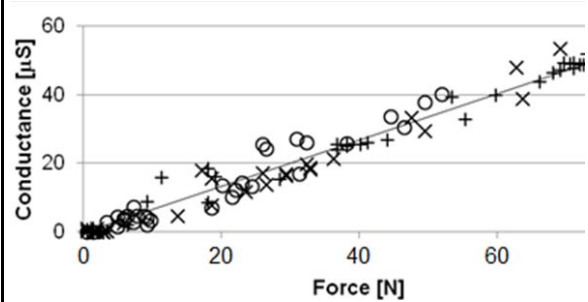
図 4 面負荷におけるセンサの圧縮特性



(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 5 センサのせん断特性

図 1 の半径 R の逆数である曲率 $1/R$ を変化させて、曲げ変形がセンサに及ぼす影響について調べた。その結果を図 6 に示す。センサの感圧面が、ある曲率範囲を超えるとコンダクタンスは急激に増加し、曲げ変形の影響がみられた。このことから、実際の身体活動での力計測において、センサの感圧面が大きな曲率となるような使用には十分な注

意が必要であることがわかった。

床反力の水平成分（せん断力）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。一軸方向の特性を図 7 に示す。なお、横軸の正・負はせん断力の方向の違いを表している。せん断力の変化に対してほぼ直線的なセンサ出力が得られていることが確認できた。

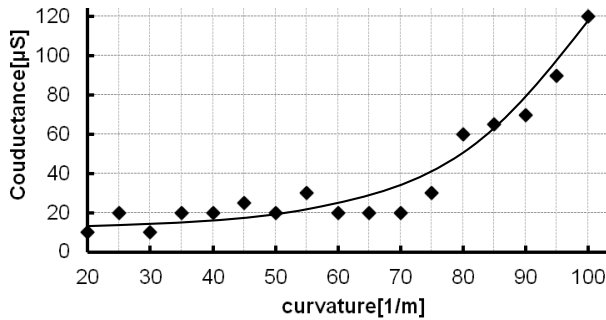


図 6 センサの曲げ変形特性

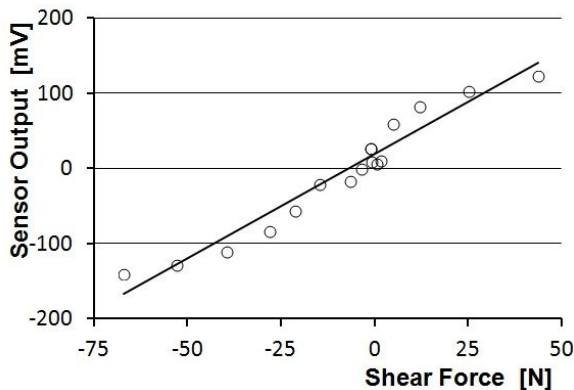


図 7 床反力の水平成分（せん断力）の検出

(3) 異なる履物および異なる歩調における有用性の検証— 鉛直床反力の推定結果にどの程度の妥当性があるかを調べるため、床反力計測インソールを足底に固定した状態で、履物を装着せずに平地を任意の速度で歩行する通常歩行 (a) の他に、以下のような典型的な 3 種類の歩行 (b)~(d) を指示し、下肢疾患のない健常な成人男性 5 名 (24.0 ± 0.9 歳) を被験者とした実験を行った。なお、(d) における歩調は平均的な 120step/min を基準とし、遅い歩調として 80, 100step/min, 走行にならない範囲での速い歩調として 140step/min を設定した。歩行条件は全部で 8 つある。

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

それぞれの歩行条件に対し、5 名の被験者に

5 回ずつ歩行してもらった。図 8 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 $R=0.994$ 、図 3 の各特徴点における誤差は 0.99~6.49% であったことを示している。歩行条件ごとに 5 名×5 回、計 25 データについての平均値を図 9 に示す。

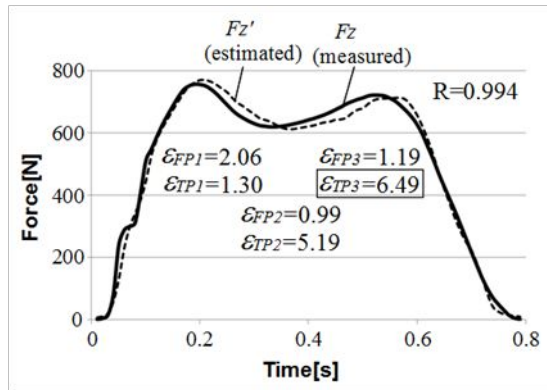
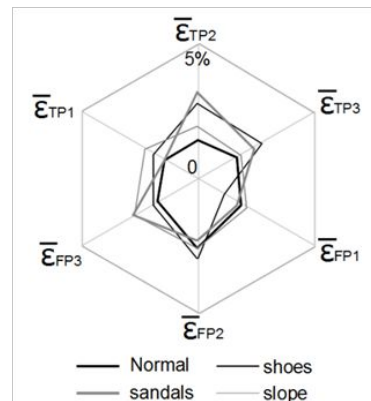
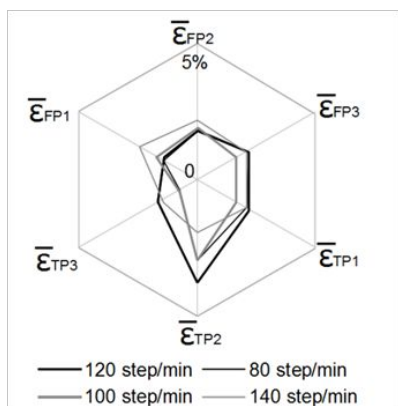


図 8 鉛直床反力の推定結果と各誤差(%)

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 0.97 以上であった。図 9 (a) と図 9 (b) の結果が示すように、特徴点の一致度を表す各誤差の平均値は 5% 以内に収まっている。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、床反力計測インソールを 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前後・左右方法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の薄型フォースセンサの直線性、繰返し性、ヒステリシス、ドリフトなどの特性と図 4~図 6 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の一致度を表す各誤差が 5% 程度で十分であるという用途には床反力推定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には、力学特性に優れたフォースセンサの導入を検討する必要がある。しかしながら、現時点ではそのような優れた特性のフォースセンサは存在しない。



(a) 通常、履物装着、傾斜路での誤差(%)



(b) 歩調を変化させた場合の誤差(%)
図 9 異なる歩行下での誤差の平均値

(4) 歩行データを可視化するためのアプリケーションの開発 — 画面サイズの小さいスマートフォンで表示するには表示項目を絞るなど、更なる工夫が必要であることがわかった。

本研究で開発した歩行計測システムの有用性を、歩行停止や開始、方向転換、段差歩行など日常動作で起こり得る様々な過渡的な動作や、健常者だけでなく、高齢者や障害者のような下肢疾患患者で確認できれば、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)

葉山 浩樹, 福田 博也, インソール型フォースセンサによる足圧中心軌跡の推定, 生体医工学, 査読有, Vol. 54, No. 1, 2016, pp. 15-21

葉山 浩樹, 福田 博也, 異なる歩調および履物における床反力推定インソールの性能評価, 生体医工学, 査読有, Vol. 52, No. 2, 2014, pp. 108-112

〔学会発表〕(計 9 件)

葉山 浩樹, 福田 博也, インソール型フォースセンサによる足圧中心軌跡の推定, 生体医工学シンポジウム 2015, 2015 年 9 月 25 日, 岡山国際交流センター(岡山県・岡山市)

鎌田 庸平, 福田 博也, 圧力センサを用いた姿勢・行動判別法, 生体医工学シンポジウム 2015, 2015 年 9 月 25 日, 岡山国際交流センター(岡山県・岡山市)

寺元 統人, 福田 博也, 歪みゲージを用いた柔軟な一軸剪断力センサに関する検討, 生体医工学シンポジウム 2015, 2015 年 9 月 25 日, 岡山国際交流センター(岡山県・岡山市)

長井 聡, 福田 博也, 気圧センサによるベッド上の姿勢変化推定, 第 54 回日本生

体医工学会大会, 2015 年 5 月 7 日, 名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市)

長井 聡, 福田 博也, 気圧センサの荷重計測システムへの応用, 生体医工学シンポジウム 2014, 2014 年 9 月 26 日, 東京農工大学(東京都・小金井市)

寺元 統人, 福田 博也, 加速度センサとプレゼンテーションソフトを用いた反応時間計測システムの構築, 第 53 回日本生体医工学会大会, 2014 年 6 月 24 日, 仙台国際センター(宮城県・仙台市)

葉山 浩樹, 福田 博也, 薄型フォースセンサと無線通信モジュールを用いた床反力計測システムの開発, 第 53 回日本生体医工学会大会, 2014 年 6 月 24 日, 仙台国際センター(宮城県・仙台市)

葉山 浩樹, 福田 博也, 異なる歩調および履物における床反力推定インソールの性能評価, 生体医工学シンポジウム 2013, 2013 年 9 月 21 日, 九州大学伊都キャンパス(福岡県・福岡市)

岸 恭正, 福田 博也, 動き出しにおける敏捷性評価のための反応時間計測システムの考案, 生体医工学シンポジウム 2013, 2013 年 9 月 20 日, 九州大学伊都キャンパス(福岡県・福岡市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福田 博也 (FUKUDA, Hiroya)

神戸大学・大学院人間発達環境学研究所・准教授

研究者番号: 90294256