

令和 4 年 5 月 29 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K22810

研究課題名（和文）低コストで使い捨てが可能な歩行計測用スマートインソールの開発

研究課題名（英文）Development of low-cost and disposable smart insole 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） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：歩行中の床反力と足圧中心軌跡の動的変化が携帯端末においてリアルタイムで確認できる、低コストで使い捨てが可能な歩行計測用スマートインソールの開発に取り組んだ。その中で、床反力と足圧中心軌跡の動的変化を計測するためのフィルム状3軸フォースセンサを安価なセンサと他の材料を組み合わせで実現した。評価用の実験装置を構築することにより、その基本性能を明らかにした。さらに、使用場面を想定した形で被験者実験を行い、日常的に「歩き方」を評価するための精度を有していることを確認した。開発した歩行計測用スマートインソールは、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利用できる。

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用スマートインソールの有用性を、方向転換、段差歩行など日常的に起こり得る突発的な動作や、高齢者や障害者で確認できれば、躓き・転倒メカニズムの解析や身体的弱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 and the center of plantar pressure, we have developed an inexpensive and simple gait measurement smart-insole 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：歩行リハビリテーション 歩行計測 スマートインソール

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

市販の安価なフォースセンサと他の材料を組み合わせ、歩行中の床反力(鉛直, 前後・左右成分)と足圧中心軌跡, さらには, 足部アーチ(縦・横方向)の動的変化が携帯端末においてリアルタイムで確認できる, 低コストで使い捨てが可能な歩行計測用スマートインソールが開発できれば, 健常者だけでなく高齢者や障害者の歩行分析は勿論のこと, 転倒メカニズムの解明や身体的弱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。

### 2. 研究の目的

(1) フィルム状 3 軸フォースセンサの考案 — 「歩き方」や「走り方」を日常的に評価する際に用いる低コストで使い捨てが可能な歩行計測用インソールを開発するために, 市販の安価なフォースセンサと他の材料を組み合わせたフィルム状 3 軸フォースセンサを考案する。

(2) 歩行計測用インソールの開発とスマート化 — 考案したフィルム状 3 軸フォースセンサを用いて, 立位・静止状態と歩行中の床反力(鉛直, 前後・左右成分), 足圧中心軌跡などの変化を計測する。また, 様々な条件下で被験者実験を行い, 歩行計測用スマートインソールの性能を評価する。さらに, 得られた歩行データ列を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) センサの選定 — 市販センサの製造元から提供されている基本性能と本研究に関連する既製品, 研究報告, 研究論文などを調査して, 行動・運動時の人体運動の特殊性(大きさ, 形状, フィット感)を考慮しながら, フォースセンサを選定した。選定したセンサは, 図 1 のような荷重, せん断, 曲げなどの力学刺激に対して, 抵抗値が変化するもの, 起電力を生じるもの, 静電容量が変化するものなどがあるため, それぞれの原理に合わせてセンシング回路を設計した。さらに, アナログフィルタ回路, デジタルフィルタ, 機械学習を組み合わせ, 周囲温度などの環境の影響を軽減した。

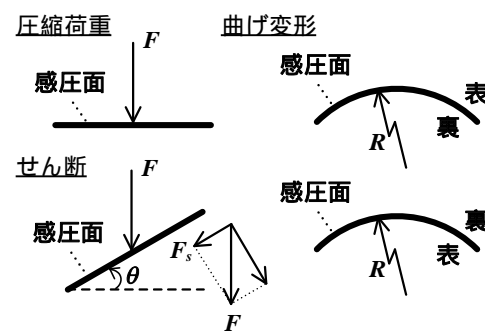


図 1 フォースセンサの力学特性

(2) センシング回路と実験装置の製作 — センサの原理に合わせてセンシング回路を製作し, 市販のフォースゲージ, 力覚センサ, 弾力センサなどを組み合わせ, センサの性能評価用の実験装置を構築し, 荷重, せん断, 曲げなどの力学特性を明らかにした。歩行中の履物内の温度変化も無視できないため, 別途実験装置を製作し, センサの温度ドリフトの影響も明らかにした。

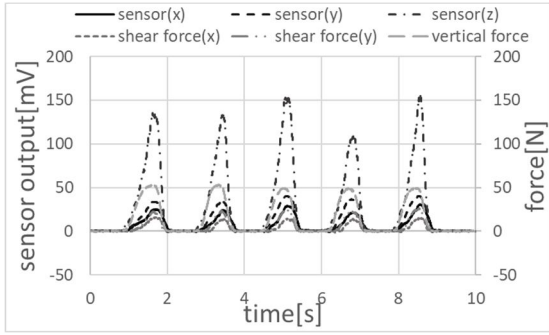
(3) フィルム状 3 軸フォースセンサの開発 — 床反力の鉛直, 前後・左右成分が計測できるフィルム状フォースセンサを考案・製作し, 市販の小型 3 軸力覚センサによる実測値と比較するなどして, その基本性能を評価した。床反力の鉛直成分と前後・左右成分のセンサ出力がそれぞれ干渉する問題に対して, 機械学習による新しい補正方法を導入することにより, インソールへの実装に際して十分な性能を引き出すことができた。

(4) 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。床反力の鉛直成分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。床反力の前後・左右成分については 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(縦・横方向)を計測するために, PVDF の利用を検討した。

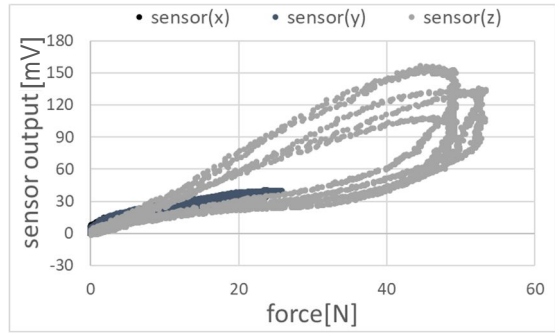
(5) 歩行計測用インソールのスマート化 — 日常計測や歩行リハビリテーションなどの現場において手軽に利用できるように, AD コンバータで得られた歩行データ列を Wi-Fi による無線通信を用いて収集し, C 言語と Visual Basic 言語で作成したアプリケーションによりリアルタイムでパソコンと携帯端末に画面表示した。

### 4. 研究成果

(1) 考案したフィルム状 3 軸フォースセンサの性能評価 — 床反力の鉛直成分, 前後・左右成分を計測するために, Strain Gauge を応用した新しい原理と構造を持つフィルム状 3 軸フォースセンサを考案・製作した。市販の小型 3 軸力覚センサ上に考案したフォースセンサを置き, 力覚センサから得られる実測値とセンサ出力を比較した結果を図 2 に示す。床反力の鉛直成分に相当する  $z$  軸, 前後・左右成分に相当する  $x$  軸・ $y$  軸ともに誤差がみられた。これは, センサ出力がそれぞれ干渉することによるものであったため, 機械学習により補正を試みた。その結果を図 3 に示す。図 3 から線形性とヒステリシス幅が大幅に改善されていることが確認できる。

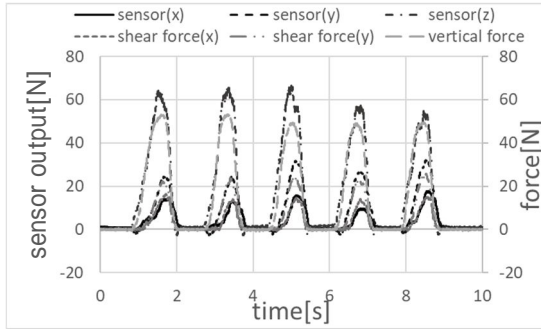


(a) 実測値(N)とセンサ出力(mV)の時間変化

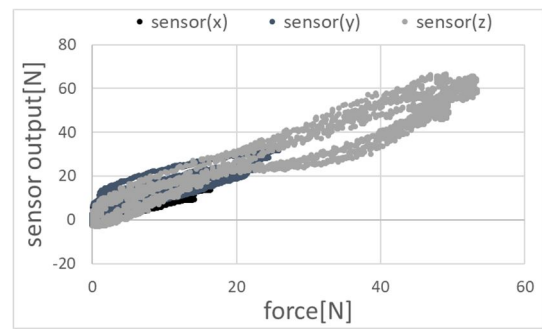


(b) 実測値(N) - センサ出力(mV)

図 2 力の実測値とセンサ出力の比較 (補正前)



(a) 実測値(N)とセンサ出力(N)の時間変化



(b) 実測値(N) - センサ出力(N)

図 3 力の実測値とセンサ出力の比較 (機械学習による補正後)

(2) 床反力の鉛直成分の計測 — 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、床反力の鉛直成分の計測結果の妥当性を検証した。図 4 に被験者実験により得られた結果の一例を示した。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  $F_{P1} \sim F_{P3}$  とそれらの発生時刻  $T_{P1} \sim T_{P3}$  の誤差が  $0.99 \sim 6.49\%$  であることを示している。各特徴点で誤差を生じた原因としては、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。

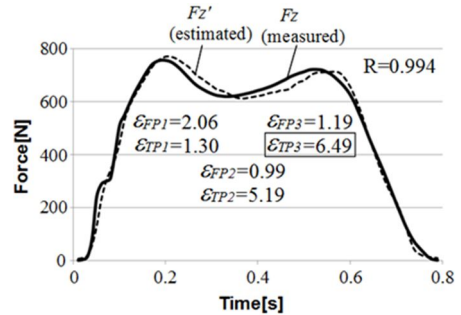
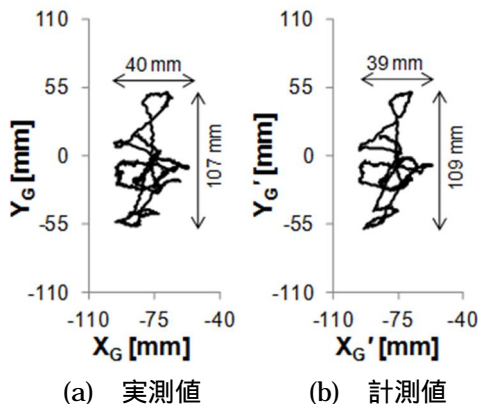


図 4 床反力 (鉛直成分) の各誤差 (%)

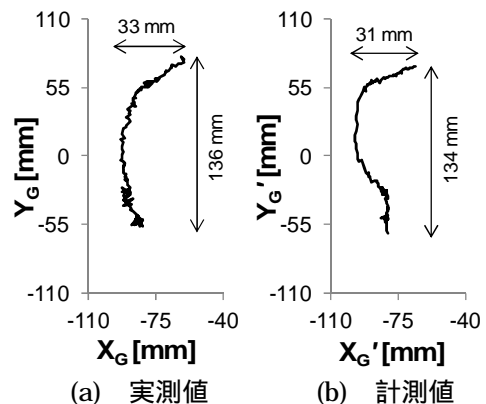
(3) 足圧中心軌跡の計測 — 考案した歩行計測用インソールを足底に固定・装着した状態でフォースプレートを踏んでもらった。フォースプレートから得られる足圧中心軌跡の左右方向の実測値を  $X_G$ 、前後方向の実測値を  $Y_G$ 、歩行計測用インソールから得られる計測値をそれぞれ  $X_G'$ 、 $Y_G'$  とした。図 5 は立位・静止状態、図 6 は歩行中の一歩の結果である。ともに、足圧中心軌跡と軌跡の範囲の幅は一致していることから、日常生活における簡易的な歩行分析などに用途を絞れば有用であると考えられる。



(a) 実測値

(b) 計測値

図 5 立位・静止状態の足圧中心軌跡の計測



(a) 実測値

(b) 計測値

図 6 歩行中の足圧中心軌跡の計測

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Akira Takekawa, Masayuki Kajiura, Hiroya Fukuda	4. 巻 13(10)
2. 論文標題 Role of Layers and Neurons in Deep Learning With the Rectified Linear Unit	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Cureus Journal of Medical Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7759/cureus.18866	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -
1. 著者名 武川 公, 原岡 剛一, 長井 聡, 福田 博也	4. 巻 14
2. 論文標題 超平面を用いたDeep Learning情報処理過程の解析とシグナルフロー線図による表現	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 神戸大学大学院人間発達環境学研究科研究紀要	6. 最初と最後の頁 139 ~ 141
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス 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 -
1. 著者名 武川 公, 原岡 剛一, 長井 聡, 福田 博也	4. 巻 104
2. 論文標題 多層化された超平面による非線形判別	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌	6. 最初と最後の頁 1~2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14923/transfunj.2020JAL2014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yuko Takamatsu, Hiroya Fukuda	4. 巻 139
2. 論文標題 Detection of Swallowing Movement Using Pressure Sensor	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines	6. 最初と最後の頁 85 ~ 86
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejsmas.139.85	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔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 高松 優子, 白杉(片岡) 直子, 福田 博也
2. 発表標題 圧力センサを用いた嚙下動作の検出
3. 学会等名 日本調理科学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (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
---------	---------