

下駄着用推進を目的とした足部状態可視化システム 「Getarable」

澤田 広輝¹ 長尾 将旭¹ 岡島 聡大¹ 安達 拓也² 濱川 礼¹

概要: 本論文では、下駄着用推進を目的とした足部状態可視化システムの開発について述べる。後天性外反母趾患者と後天性偏平足患者は年々増加傾向にある。それらは下駄を履くことによって予防することができるといわれているが、下駄を履く日本人はほとんどいない。我々の開発した Getarable は、片方の下駄に 10 個ずつ、計 20 個のセンサを設置しそれらのデータからユーザの足趾力、重心、土踏まずの広さを推定、可視化し、ユーザの足の健康状態を Android 端末のアプリで確認することや、履き続けるほどスコアが伸びていくゲームで遊ぶことによって、下駄を楽しく履き続けられるようにすることを目的としている。ユーザが下駄を履く意欲向上に Getarable が有効かどうか検証し、その結果と考察を述べる。

A Foot State Visualization System to Propel Geta 「Getarable」

HIROKI SAWADA¹ MASAOKI NAGAO¹ AKIHIRO OKAJIMA¹ TAKUYA ADACHI²
REI HAMAKAWA¹

Abstract: In this thesis, we describe the development of a foot state visualization system to propel geta. Acquired hallux valgus patients and acquired flattened foot patients tend to increase year by year. Although it is said that they can be prevented by wearing clogs, but there are few Japanese who wear clogs. In our developed Getarable, we installed a total of 20 sensors, one for each of the clogs, estimate and visualize the user's foot toe, center of gravity and arch size from these data and calculate the health condition of the user's foot on Android. It is aimed to be able to keep wearing clogs happily by checking with the application of the terminal and playing with a game in which the score increases as wearing continues. We will verify whether this system is effective for the user's motivation to wear clogs, and present the results and discussion.

1. はじめに

厚生労働省の調査によると、昭和 59 年の後天性外反母趾の累計患者数は約 2000 人、後天性偏平足の累計患者数は約 1000 人であった。しかし、平成 17 年には後天性外反母趾の累計患者数は約 6000 人、後天性偏平足の累計患者数は約 3000 人に増加している [1]。特に外反母趾は近年の履物の変化によって増えてきた病気の一つである。アメリカ合衆国のマサチューセッツ州ボストンに住む高齢者 600 人を対象に外反母趾とハイヒールの使用関係を調査した

「高齢の男女の人口に基づいた研究における外反母趾関連の要因、ボストンの高齢者研究」によると、女性の 58%、男性の 25% が外反母趾であり、また 20 歳から 64 歳までの間にいつもハイヒールを履いていた女性は、履いていなかった女性と比べて高確率で外反母趾になっていたことがわかっている [2]。外反母趾は重症化すると、痛みを伴い、歩行困難、腰痛、内臓疾患を引き起こす [3]。

そこで、私たちはこれらの病気の予防として下駄に注目した。下駄は裸足に近い状態で歩くことができハイヒールやパンプスなどの履物に比べて足の指が開くので外反母趾になりにくい。また鼻緒の付け根（前足部、親指の付け根あたり）に重心が矯正され、鼻緒を足の指で掴むように歩くため足の指の筋肉（足趾力）が鍛えられることで偏平足を予防することができる [4][5]。しかし、現状下駄を履く

¹ 中京大学 工学部
School of Engineering Chukyo University

² 中京大学 情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology,
Chukyo University

人はほとんどいない。

よって、我々はこの問題を解決する手段として、ユーザが楽しく下駄を履き続けることができるシステム、Getarableを開発した。Getarableは、下駄型デバイスとAndroid端末の2つで構成される。下駄型デバイスは、下駄に10個のセンサを設置した下駄型デバイスで、センサから得たデータからユーザの足趾力、重心、土踏まずの広さを取得する。取得したデータをRaspberry Pi Zero W（以下「Raspberry Pi」と略す。）を使ってAndroid端末に送信する。Android端末は、Raspberry Piから受信したデータから足の状態を可視化し、さらにそのデータと下駄を履き続けた日数によってスコアが変化するゲームを搭載している。図1と図2にGetarableのイメージ図を示す。

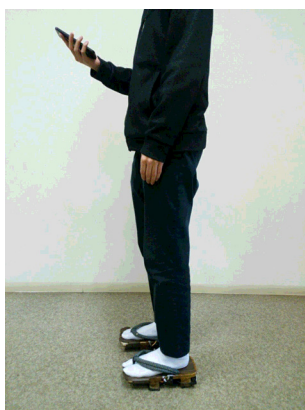


図1 計測の様子



図2 歩いている様子

2. 関連研究

履物に関する研究は様々な手法を用いて行われている。ここでは研究事例を示し、本研究での位置づけと期待される効果を示す。

2.1 着靴が足趾関節運動およびウィンドラスメカニズムに及ぼす影響について

長谷川らは、靴着用が原因と考えられる扁平足、外反母趾等の障害の改善には、靴等の環境要因の改善および足部内在筋強化等の身体的要因の改善が重要であると考え、履物着用中の歩行が足部に及ぼす影響を調査し、その中でも下駄着用歩行の有用性について検討する研究を行った[6]。

健康な成人10名を被験者として、各条件における10m歩行時の第1趾中足趾関節および内側縦アーチの変化を3次元動作解析装置で撮影し、比較を行った。

結果として、下駄着用により内側縦アーチの運動が確認され、足部内在筋の関与が示唆された。

足趾トレーニング効果は、外反母趾[4]および扁平足[5]等の足部障害予防効果だけでなくバランス能力の改善[7]になる事も報告されている。

2.2 3軸触覚センサ埋め込みによる足裏応力分布計測システムを用いた各種スポーツ計測

ウォーキングやジョギング・ランニングを工学的な観点から計測する手法は大きく3つある。しかし、それぞれの手法には欠点があり、床にフォートレスプレートを配置する手法は計測範囲が室内に限られた場所に限定される。靴底にセンサを配置する手法はセンサが金属製で大きくその影響がないとはいきれない。靴の中敷きにセンサを配置する手法はせん断力を直接計測できない。中井亮仁は、独自に開発した3軸力センサを運動靴に設置し、そのセンサがそれぞれの欠点を克服しつつ有効なデータが取れているかの検討を行った[8]。運動靴のインソールに8つのセンサを配置し、水平方向、傾斜路上り下り、ランニング、ダッシュを行ったときの足裏部3軸力分布の計測を行った。

Getarableでは下駄の有用性に着目し、足の状態をユーザがリアルタイムで確認しながら、なおかつ楽しみながら履くことができることを目的とした。

3. 足部データ取得手法

1. はじめに示したように、下駄を履くことによって様々な効果を得られる。Getarableでは、足の状態を数値化し、日々の変化として蓄積することによってユーザの下駄着用の意欲向上を図る。数値化するパラメータとして、「前後重心」、「左右バランス」、「土踏まず」、「足趾力」を使う。

身体における重心とは、体全体における重さの中心であり、この重心位置が、支持基底面という身体を支える為に、床と接している部分を結んだ範囲の中心に近いほど安定性がよくなる[9]。本稿における「前後重心」、「左右バランス」では、下駄に働く体重による力の分布と掛かり具合から身体における足底部平面の重心位置を重心と定める。しかし、下駄のすべての範囲の力を取得することは難しかったため、足部の主要荷重部分である各足指の根元と踵にかかる力を取得することで身体における重心を算出する。

土踏まずとは、足根骨と中足骨が筋膜や靭帯、筋肉によって固定され、体重をかけてもそのアーチが維持できる状態とされており、足の第一趾から踵にかけての大きなアーチ、第五趾から踵にかけての中程度のアーチ、第一趾から第五趾にかけての小さなアーチの三つで構成される土踏まずが無い状態を扁平足と呼び、扁平足であると、足全体にかかる負担が増大し、長時間の歩行に耐えられない、疲れやすいなどの傾向がある[10]。土踏まずの形成具合を取得するため、足の外側から体重の掛かり具合の変化を調べ、変化が大きくなった場所を土踏まずの境界線とし、この境界線を本稿における「土踏まず」と定める。

足趾力とは、足の指の力のことであり、身体のバランス保持に重要な役目を果たす。本江らは足趾挟力、足趾筋力（握力含む）、足趾じゃんけん、足趾10秒テストの4項目

を「足趾力」と定義している [11] が、本稿における「足趾力」ではこのうちの足趾挟力を足趾力として定める。

1. はじめにで示す通り、これらは下駄を履くことで矯正や強化がされる要素であり、下駄の効果を実感するパラメータとして適切であると考えた。足の状態を得るためのセンサとして圧力センサ FSR402 (以下、「FSR402」と略す.)、及び圧力センサ FSR400 (以下、「FSR400」と略す.) を用いる。これらのセンサは圧力を加えることで抵抗が下がり、供給されている電源電圧から電圧が下がる仕組みとなっており、重心や土踏まず、足趾力を調べるのに適していると考えた。この2つのセンサは大きさに違いがあり、圧力を取得できる範囲に違いがある。FSR402 は 13mm、FSR400 は 5mm である。足の大きさに個人差があるため、できるだけ広い範囲の圧力を取得できることが望ましいが、狭い範囲の圧力の違いを求める必要があったり、設置できる場所が限られていたりするので、取得するパラメータによって圧力センサを変えている。

重心検出では足の大きさの個人差に対応するため、取得範囲の広い FSR402 を用いた。

土踏まず検出では細かい範囲の圧力変化を取得するため、FSR400 を用いた。

足趾力検出では圧力センサを鼻緒に設置する都合上、圧力センサを設置できる場所が限られるため、センサ部の小さな FSR400 を用いた。これらのセンサの設置位置を図 3 に示す。

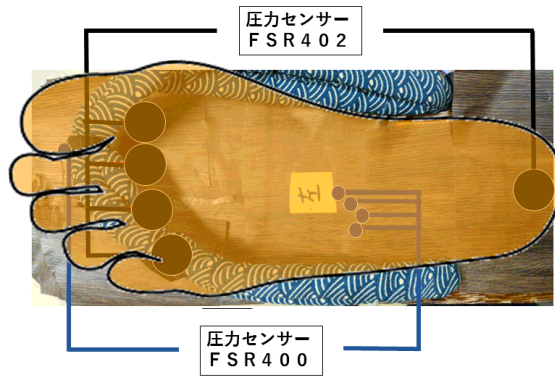


図 3 圧力センサ設置位置

3.1 前後重心検出

前後重心検出では、基準点から圧力計測位置までの距離と、各部の圧力から、前後重心位置を検出する。基準点から圧力計測位置までの距離を $L_n (n = 1, 2, 3, 4, 5)$ 、各部の圧力を $F_n (n = 1, 2, 3, 4, 5)$ とする。前後重心を G とし、単位を cm で示す。前後重心 G を式 1 のように定義する。

$$G = \frac{\sum_{i=1}^5 F_i L_i}{\sum_{i=1}^5 F_i} \quad (1)$$

中村らは安定立位姿勢における重心線の足部重心点について、前後方向の場合外果（外くるぶし）の前方 5~6cm を通る [9] と述べており、これを前後重心基準点として用い、基準点と重心点が一致している場合を理想とし、値は 0 となる。

3.2 左右バランス検出

左右バランス検出では、右足、左足の各部の圧力の合計から体重の偏りの左右バランスを検出する。右足、左足の圧力 F_n を区別するため、左足の各部の圧力を $F_{Ln} (n = 1, 2, 3, 4, 5)$ と、右足の各部の圧力を $F_{Rn} (n = 1, 2, 3, 4, 5)$ とし、それぞれの圧力の合計を F_L, F_R とする。左右バランスを B とし、最大値 100%、最低値 -100% の百分率で示す。左右バランス B を式 2 のように定義する。

$$F_L = \sum_{i=1}^5 F_{Li}$$

$$F_R = \sum_{i=1}^5 F_{Ri}$$

$$B = \frac{F_R - F_L}{F_R + F_L} \quad (2)$$

3.1. 前後重心検出と同冊子において、安定立位姿勢における重心線の足部重心点について、左右方向の場合両内果（内くるぶし）の中心を通ると述べており、これを左右バランスの基準点として用いた。基準点と重心点が一致している場合を理想とし、値は 0 となる。

3.3 土踏まず検出

最小圧力値を示す最も内側にある圧力センサ（以下、「最小圧力値センサ」と示す。）の位置から各部の圧力計測位置までの距離を $L_n (n = 6, 7, 8)$ 、各部の圧力と、最小圧力との差を $F_n (n = 6, 7, 8, 9)$ とし、 $F_n (n = 6, 7, 8, 9)$ のうちの最大値は F_9 である。圧力をもとにした土踏まずの境界を F_9 の 80% とした。この閾値は、扁平足でない健常者 3 名の計測をした際に F_9 に対する F_n の割合の変化が最大るとき、 F_9 に対する F_n の割合はどれもこの値を越えていたため、この値を採用した。 F_9 の 80% の値を F_e とする。

次に、 F_e より大きく最も近い F_n を $F_{e'}$ 、 $F_{e'}$ に対応する L_n を $L_{e'}$ とし、最小圧力センサの位置から、土踏まずの境界までの距離を L_e とする。 $F_{e'}$ の F_e に対する圧力の割合を R とし、 $L_{e'}$ に掛けることで、 L_e が求められる。式 3 のように定義する。

$$R = \frac{F_e}{F_{e'}}$$

$$L_e = L_e' R \quad (3)$$

最小圧力センサの位置から最大圧力値を示す最も外側にある圧力センサの位置までの距離 L_8 の L_e に対する割合を百分率で表した値を A とし、式 4 のように定義する。

$$A = \frac{L_e}{L_8} * 100 \quad (4)$$

Getarable で扁平足でない健常者 3 名の計測をした際の平均の値は 60 であったため、これを理想の値と定めた。

3.4 足趾力検出

足趾力検出では足趾力を電源電圧と圧力センサの値との電位で表す。電源電圧を V_0 、圧力センサの電圧を V とする。足趾力を P とし、単位は mV で示す。足趾力 P を式 5 のように定義する。

$$P = V_0 - V \quad (5)$$

足趾力の基準値として、「足指間力計測器 チェッカーくん」(以下、「チェッカーくん」と略す。)*1 を用いた。日伸産業株式会社では、「チェッカーくん」を使って、5kg を越えれば足趾力は十分であるとしている。「チェッカーくん」で 3 日間計測を行い、5kg の結果を出す対象者に Getarable で計測した結果を基準値として用いた。結果は 984mV となり、これを理想の値と定めた。

各値とセンサの対応表を図 4 に示す。

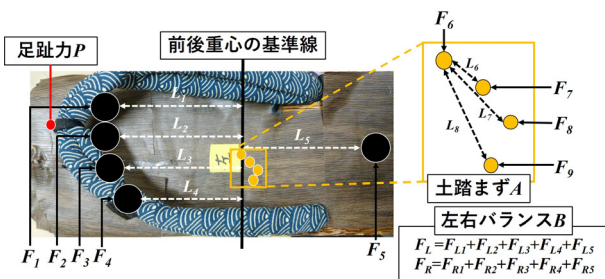


図 4 値とセンサ対応

4. システム構成

Getarable は大きく分けて下駄型デバイスと Android 端末の 2 つから構成される。システム構成を図 5 に示す。下駄型デバイスからユーザの足部状態を取得、送信し、Android 端末でそれを受信、可視化している。

4.1 下駄型デバイス

下駄型デバイスは、データ取得部、データ変換部、データ送信部から構成されている。主にユーザの足部状態を取得することを目的としている。

*1 日伸産業株式会社 足指間力チェッカーくん

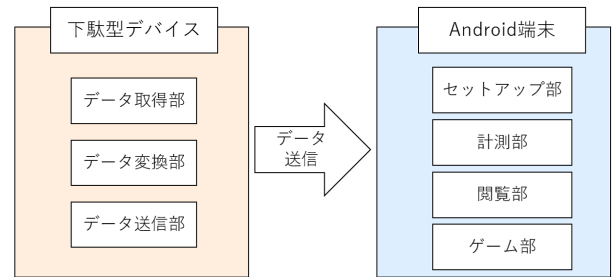


図 5 システム構成図

4.1.1 データ取得部

データ取得部は 3. 足部データ取得方法で述べたようにユーザの足部状態を取得するため、下駄型デバイスに設置してある各圧力センサ (図 3) の値を Raspberry Pi を用いて取得している。

4.1.2 データ変換部

データ取得部で取得した値は下駄の歯の間に設置した Raspberry Pi を用いて前後重心、左右重心、土踏まずの値、足趾力の値に 3. 足部データ取得方法で示した方法で変換する。これを左右の下駄型デバイスそれぞれで行う。また、Raspberry Pi の電力はかかとに設置したモバイルバッテリー*2 から送っている (図 6)。

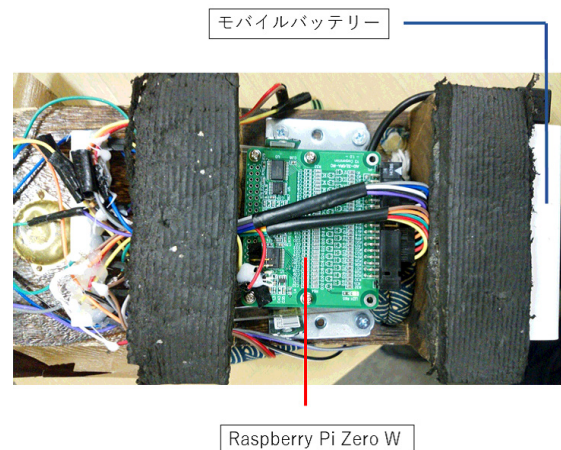


図 6 下駄の裏面

4.1.3 データ送信部

データ変換部で変換した値は Raspberry Pi を使用して Android 端末に Bluetooth Low Energy (以下「BLE」と略す。) を用いて送信する。

4.2 Android 端末

Android 端末は、セットアップ部と閲覧部、計測部、ゲーム部の 4 つから構成されている。

4.2.1 セットアップ部

セットアップ部は BLE を用いて下駄型デバイスをスキャンし、検出したデバイスを登録する。

*2 株式会社 磁気研究所 HI-DISC モバイルバッテリー 2200mAh ML-HDMB2200IWH

4.2.2 計測部

計測部では、重心、土踏まず、足趾力を計測し、データとして保存する。

4.2.3 閲覧部

閲覧部は現在の足部状態を可視化するシステム（図7）と、計測部で保存したデータを可視化するシステムがある。保存したデータは重心と土踏まずを画像を日付別に切り替えるような形で表示（図8、図9）し、足趾力は折れ線グラフで表示している（図10）。

4.2.4 ゲーム部

ゲーム部では計測部で保存したデータを使用し、下駄を上に乗るゲームである。本機能の飛び前の画面を図11に、飛び終わった画面（スコアが100のときのもの）を図12に示す。直近1週間のデータから継続日数、重心、土踏まず、足趾力の値から下駄の飛び距離を計算する。継続している日数が多いほど、また重心、土踏まず、足趾力の値が理想に近いほど下駄の飛び距離が増加する。下駄を履き続け、重心、土踏まず、足趾力の値がゲームを通して理想値に近づいていることを実感することで、下駄を履くモチベーションを促す。

5. 評価実験

5.1 実験手順

5.1.1 実験1

Getarableを用いることで、下駄を履くことの意欲向上の有効性について検証した。対象者として、普段下駄でない一般的な靴を着用している大学生5名に対して1週間実験を行った。デバイスを30分間着用して歩行し、その後Android端末で各種データの計測、閲覧を行ってもらった。1週間の実験の終了後、対象者には7項目のアンケート調査を行った。

5.1.2 実験2

筆者の一人がGetarableの長期利用によって下駄の効果が得られるか検証を行った。こちらは一か月の実験を行った。前述した実験と同様にデバイスを30分間着用して歩行し、Android端末で各種データを計測を行った。

5.2 実験結果

5.2.1 実験1

表1にアンケートの回答結果を示す。下駄を履き続けたいと感じたかの質問7は、「思う」が多くを占める結果となった。しかしながら「思う」と回答した中でも下駄の履きやすさへの質問1へ「いいえ」、閲覧部への質問3、質問4、質問5へ「思わない」、ゲーム部への質問6へ「思わない」と回答する人もいた。下駄型デバイスの履きやすさにおいて、「いいえ」と回答した中に、配線や重量を原因とした回答があがった。また、足趾力の計測において、圧力センサを反応させることに苦労をしたという回答があった。

閲覧部に関しては計測結果に説明や分かりやすさが欲しいとの回答があった。

5.2.2 実験2

前後重心の実験データのグラフを図13に示す。前後重心に関しては右足の前後重心は0cmへ近づいているが、左足は値がプラス、体後方に偏っていた。これは左足の一部センサが故障しており、正確な圧力を取得できていなかったため、その分左足の重心位置がずれてしまったためであった。左右バランスの実験データのグラフを図14に示す。一部に大きな偏りがあるが、これもセンサの故障により、圧力の取得ができず、片足にかかる合力がセンサー一つ分減った場合があったためである。土踏まずの実験データのグラフを図15に示す。土踏まずは値に安定性が見られなかった。これは計測方法、センサ配置が適正でなかったため、圧力取得から土踏まず検出が上手くできていなかったためであった。足趾力の実験データのグラフを図16に示す足趾力は理想の値である984mVを超え、最終的な値は両足を平均して、1287mVとなった。

5.3 考察

実験1では、下駄型デバイスの履きやすさへの質問1の回答が、「はい」と「いいえ」二つに分かれた。これの理由として配線のはみだしや、バッテリーによる重量の偏りが原因と考える。またそれに加え、個人の足のサイズへの対応ができなかったことも原因の一つとして考えられる。これは閲覧部への質問3、質問4、質問5の回答が、「思う」と「思わない」の二つに分かれた原因とも考えられる。取り付けたセンサが人によって計測しやすさに影響が出てしまい、計測結果に影響が出てしまったと考えられる。ゲーム部の質問6は「思わない」という回答が多かったことは、難易度調整が足りず、簡単に最大スコアへ到達してしまう結果となったためだと考える。

実験2では、前後重心位置が左右で違いがあった。センサの故障により、左足の重心位置がずれてしまった。また、左右バランスは、上述の通り一部のセンサの故障があったため、大きな偏りがあった。その都度の修理も行ってはいたが、修理を行えずそのままの値を出してしまった場合もある。センサの補強や、定期的なメンテナンスにより、不具合を迅速に見つけ出す必要があると考える。土踏まずは大きなばらつきがあった。これの理由として、個人の足の大きさによってはFSR400で圧力が取得できず、センサの値にほとんど差がなかったため、土踏まずの境界が上手く検出できなかったためだと考える。

6. おわりに

本論文では、健康的になる様子を観察することができる足部状態可視化システムを用い、下駄を履かせることを目的としたシステムの開発を行った。評価実験では、ユーザ

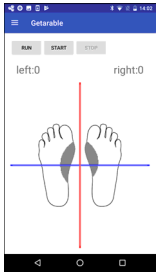


図 7 現在の足部状態

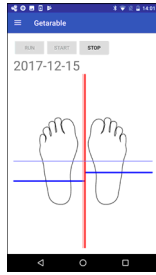


図 8 重心

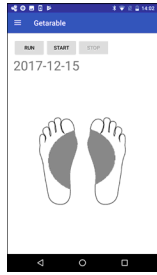


図 9 土踏まず

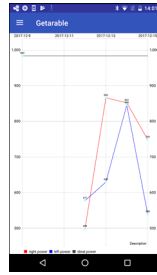


図 10 足趾力

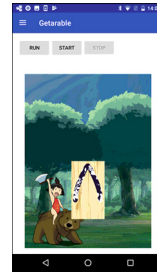


図 11 飛び前の画面

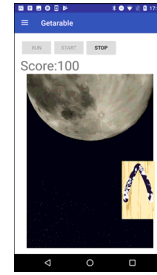


図 12 飛び終わった画面

表 1 アンケート結果

質問	はい	いいえ		
下駄が履きやすかったか (%)	60	40		
アプリ全体に関して操作はわかりやすかったか (%)	100	0		
質問	非常に思う	思う	思わない	全く思わない
重心の可視化画面を見て改善が感じられたか (%)	0	60	40	0
土踏まずの可視化画面を見て改善が感じられたか (%)	0	60	40	0
足趾力の可視化画面を見て改善が感じられたか (%)	0	40	60	0
ゲーム画面で下駄履き続けたいと感じたか (%)	0	20	60	20
これからも続けて下駄を履きたいと思うか (%)	0	80	20	0

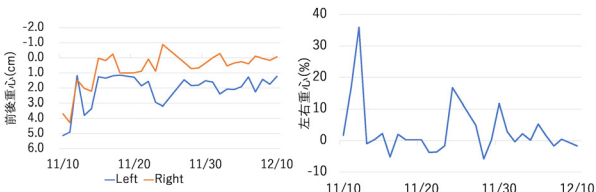


図 13 前後重心の変化

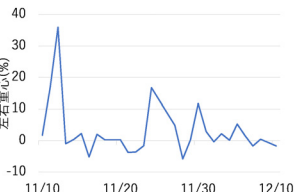


図 14 左右バランスの変化

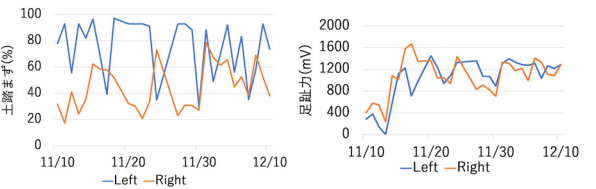


図 15 土踏まずの変化

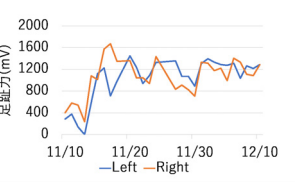


図 16 足趾力の変化

に行ったこれからも続けて下駄を履きたいと思うかというアンケートを行った結果、5人中4人の人が下駄を履き続けたいと思うという回答を得た。したがって、下駄着用推進という目的を達成するための一定以上の性能を示した。

今後の展望として、下駄型デバイスはセンサが故障しやすく、また気づきにくいいため、Android 端末に故障していることを通知するシステムを実装したい。さらに、個人の足の大きさの違いにより、計測結果に大きく影響が出てしまっているので、それぞれの足の大きさにあった下駄型デバイスを開発する必要があると考えられる。

謝辞 本研究にあたってはゲーム部のデザインを提供していただいた愛知県立芸術大学の H さん（匿名）に、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 厚生労働省. 厚生労働省平成 17 年患者調査報告(傷病分類編)傷病別年次推移表. <http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/kanja/05syoubyo/suihyo39.html>.
- [2] U.-S.D.T. Nguyen, H.J. Hillstrom, W. Li, A.B. Dufour, D.P. Kiel, E. Procter-Gray, M.M. Gagnon, and M.T. Hannan. Factors associated with hallux valgus in a population-based study of older women and men: the mobilize boston study. *Osteoarthritis and Cartilage*, Vol. 18, No. 1, pp. 41 – 46, 2010.
- [3] 病気スコープ. 外反母趾とは? — 病気スコープ. <http://www.fdoc.jp/byouki-scope/disease/bunions/>.
- [4] 健治野崎, 昌人高尾, 拓蓼沼, 和憲大饗, 祐司内尾. 足ゆび運動療法動作中の筋活動に関する研究. *靴の医学*, Vol. 19, No. 2, pp. 1-5, mar 2006.
- [5] 尚司築山, 弘明長島, 益生千田. 足縦アーチの日内変動および足指筋力増強訓練が及ぼす効果について. *運動療法研究会講演論文集*, Vol. 18, pp. 78-81, 1993.
- [6] 長谷川正哉. 着靴が足趾関節運動およびウィンドラスメカニズムに及ぼす影響について. *形態 機能*, Vol. 5, No. 2, pp. 75-80, 2007.
- [7] 伸宏木藤, 秀俊井原, 恵三輪, 秀樹神谷, 真一島沢, 八千代馬場, 直彦田口. 高齢者の転倒予防としての足指トレーニングの効果. *理学療法学 = The Journal of Japanese Physical Therapy Association*, Vol. 28, No. 7, pp. 313-319, dec 2001.
- [8] 中井繁仁. 3軸触覚センサ埋め込みによる足裏応力分布計測システムを用いた各種スポーツ計測. 公益財団法人ミズノスポーツ振興財団, 2013.
- [9] 中村隆一, 齋藤宏, 長崎浩. *基礎運動学*, pp. 351 – 352. 医歯薬出版株式会社, 2003.
- [10] 健康教育序説: 生活と健康. 玉川大学出版部, 1995.
- [11] 本江恭子, 金森昌彦, 長谷奈緒美, 西谷美幸. 看護フィジカルアセスメントにおける足趾力評価の意義(第1報): 健康人を対象とした基準値の設定. *富山大学看護学会誌*, Vol. 12, No. 2, pp. 101-111, dec 2012.