

靴下型圧力センサを用いた足裏ジェスチャの設計と実装

深堀 孔明 坂本 大介 五十嵐 健夫*

概要. 本研究では足裏ジェスチャと名付けた、靴下型の圧力センサを用いた微小な足ジェスチャを提案する。本システムでは、ユーザはつま先で地面をぐっと押すなどといった足裏の圧力分布を変える動作でコンピュータを操作する。このような動きは非常に小さいため、ユーザは例えば電車の中といった公共の場でも周囲に迷惑をかけず実行できるという利点がある。本研究ではまずコンピュータの各種操作に適した足裏ジェスチャを決めるための調査実験を行い、その後、得られたジェスチャセットの認識器を機械学習を用いて実装した。さらに本認識器では、事前に収集した日常動作(歩行や起立など)における足裏の圧力パターンを負の訓練データとして利用し、これらの動作時にジェスチャが誤認識されることを防ぐことを試みた。本稿の最後では本システムの有用性を示すためにいくつかの利用例を提案する。

1 はじめに

日常生活において、ユーザが手を使えない状況はしばしば発生する。例えば、1) 料理などをしていて、ユーザの手が汚れている場合。2) 両手に荷物を持っている場合。3) 混みあった列車の中において、手を自由に動かせない場合。4) 冬場に屋外にいて、指がかじかんでうまく動かせない場合。などが考えられる。

このような状況で携帯端末のコンピュータを操作する代替手段として、足を使ったジェスチャが提案されてきている [1, 14]。しかし既存の足ジェスチャでは、ユーザはキック動作をしたり足首を回転させるなど足を大きく動かす必要がある。そのため周囲の人々の迷惑になりやすく公共の場での使用には向かないという問題がある。

そこで本稿では、靴下の足裏部分に圧力センサを取り付けた靴下型圧力センサを利用した、微小な足裏ジェスチャ認識システムを提案する(図1)。本システムにおいてはユーザはつま先で地面をぐっと押すなどの足裏の圧力分布を変える動作(以下足裏ジェスチャと呼ぶ)でコンピュータを操作する。このような足裏を動かす動作は非常に小さいため、周囲に悟られずに実行することができる。

本稿では以下の2つを行う。1) コンピュータの各種操作に対する最適な足裏ジェスチャを設計する。2) 足裏ジェスチャの認識器を実装する。本稿では機械学習(サポートベクタマシン, SVM)を用いてジェスチャ認識を行う。これらを実現するため、我々は以下の3つの実験を行った。実験1では、コンピュータの各種操作に対する最適な足裏ジェスチャを決定するために、20名の実験参加者にコンピュータの各種操作に対応する足裏ジェスチャを考案してもらった。

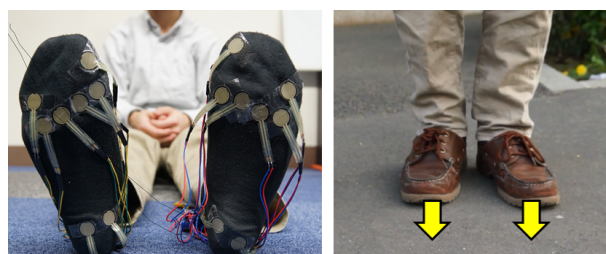


図1. 左: 本研究で使う靴下型圧力センサ Sockswitch. 右: つま先をぐっと押す足裏ジェスチャを行っている様子。

この結果を元に各コンピュータ操作に割り当てる足裏ジェスチャを決定した。さらに、ジェスチャ認識の訓練データを集める目的で実験2を行う。本実験では被験者に靴下型圧力センサを付けた状態で各足裏ジェスチャを行ってもらい、そのときの足裏の圧力変化を計測した。加えて、歩く・立ち上がるなどの日常動作を行っているときにジェスチャが誤認識されないようにするために、負の訓練データを集める目的で実験3を行う。本実験では被験者に靴下型センサを付けた状態で日常動作を行ってもらい、そのときの足裏の圧力変化を計測した。結果として、本稿のジェスチャ認識器は、各ジェスチャを85.1%の精度で識別でき、日常動作とジェスチャ動作を94.9%の精度で区別できた。

2 関連研究

2.1 足裏の圧力計測デバイス

これまでも足裏-床間の圧力分布を計測するデバイスは数多く提案されてきている。これらのデバイスは床型センサ、装着型(靴型・靴下型)センサの2種類に大別できる。床型センサは床下に圧力センサを敷きつめたデバイスで、ユーザの足型や立ち位

置をリアルタイムに取得できる [2, 7]. 床型センサは比較的高精度に足裏の圧力分布を測定できるが, 屋外に持ち運べないため, 例えば電車の中での使用は難しいという欠点がある.

装着型センサは靴の中敷または靴下の足裏部分に圧力センサを取りつけたデバイスである ([16, 15], サーベイ論文は [11]). しかしこれらのデバイスは主にリハビリテーションやフィットネスといった分野で, ユーザがきれいな歩き方や走り方をしているかといった測定をする目的で利用されてきた.

2.2 足を使ったインタラクション

近年, 足を使ったインタラクション手法が数多く提案されている. 例えば, 足を前後左右に動かしてマウスカーソルを操作できるデバイス [9], つま先/踵を上げる, つま先/踵を軸に足首を回すといったジェスチャ [14], ジョギング時に足捌きを変えることで音楽プレイヤなどを操作する手法 [18] が提案されている. また, 足裏の圧力計測デバイスを利用するシステムとして, ダンス中に足の動かし方で BGM を操作したり [8], 前歩き/後ろ歩きをすることで仮想空間を移動するシステム [5] が提案されている. 特に Alexander ら [1] は携帯端末の操作に適した足ジェスチャ(キック動作や足先を円を描く動作など)を調査した. しかしこれらの足ジェスチャはいずれも足を大きく動かす必要があり, 公共の場で行うと(現代の社会通念においては)奇異であり周囲の迷惑になりやすい. 一方で, 提案システムでは非常に小さい動きでジェスチャを行えるため, 公共の場でも周囲に悟られずに利用できる.

本システムに最も近いシステムが Multitoe [2] のオプション機能として提案されている. このシステムでは, 床型センサを用いてユーザの足裏の圧力変化を感知し, PC ゲームの操作に利用している. 我々はこのアイデアを押しすすめ, コンピュータの各種操作に適した足裏ジェスチャを網羅的に調査し, 靴下型センサを用いた実生活での利用を想定したジェスチャ認識器を実装する.

2.3 微小な動きによる入力装置

身体の微小な動きでコンピュータを操作する手法は近年数多く提案されている. 例えば腕の筋肉の電圧変化を感知するデバイス [13] や指先の小さい動きを感知するデバイス [6, 4, 3] を使ったコンピュータ操作が提案されている. 一方で, このようなデバイスは手にデバイスを装着する必要がある, 料理中など手が汚れやすい状況では利用が難しいという問題がある. また, ユーザが念じるだけでコンピュータを操作できる脳波デバイス [10] も提案されているが, 現状高精度での認識が難しいという問題がある. これに対して提案手法は手以外の部位に装着でき, 比較的高精度にジェスチャを認識可能な靴下型

デバイスを提案する点が異なる.

2.4 ユーザ定義型ジェスチャ

ユーザ定義型ジェスチャとは, ユーザ自身に使いやすそうだと思うジェスチャを考えてもらい, 得られたジェスチャ案を元に設計したジェスチャのことである. この手法は, 利用するデバイスが一般的でなく, ユーザがどのように使いたいと思うのかが明らかでない場合に有効である. この手法はこれまでにテーブルトップ [17] や携帯端末を操作するためのジェスチャシステム [12], あるいは大きな足ジェスチャ(キック動作など)システムの設計 [1] において利用されてきた. 本研究でも同様の手法を用いて, コンピュータの各種操作に適した足裏ジェスチャを被験者に考えてもらうことでジェスチャセットを設計する.

3 足裏ジェスチャの検討と設計

我々は図 2 に示す 6 カテゴリ 29 個のコンピュータ操作に適した足裏ジェスチャを設計する. これら操作は Alexander らの研究 [1] で使われた操作リストを参考にして決定した. Alexander らは本研究と同様に, コンピュータの操作に適した足ジェスチャ(ただしキック動作など足を大きく動かす動作)を調査しており, 研究の動機が近いので彼らの操作リストを参考にした. 我々はこれら 29 個の操作に対する足裏ジェスチャを設計するために以下の実験を行った.

3.1 実験 1: 足裏ジェスチャ案の収集

タスク 我々は被験者に 29 個の操作をひとつずつ示し, 各操作に適する足裏ジェスチャを考えるよう指示した. 各操作はカテゴリ順に示されるが, 各カテゴリ内の操作の表示順はランダムである. 例えば, 最初には必ず“アイテム選択”カテゴリの 5 操作のいずれかが示されるが, どれが表示されるかはランダムである.

実験において被験者はヘッドマウントディスプレイ (HMD) とイヤホンをつけ, そこから各操作を説明する映像・音声再生される. 例えば“着信応答”の場合, HMD 上には iPhone の着信画面が表示されてイヤホンから着信音が流れる. この状態で着信に応答するにはどんな足裏ジェスチャを行うべきか尋ねた. また, 本実験において被験者は靴下型センサを装着しないが, 被験者自身の靴を履いた状態で実験を行ってもらった.

加えて被験者には以下の 5 点を指示した. 1) 直立状態で, 足裏の位置をずらしたり浮かしたりすることなく, 足裏で地面を押す動作のみで各操作を行うこと. 2) 必要であれば両足を使ってよいこと. 3) ジェスチャの競合は考慮しなくてよいこと. 4) ジェスチャが認識可能かは考慮しなくてよいこと. 5) 適

靴下型圧力センサを用いた足裏ジェスチャの設計と実装

1. アイテム選択					2. 地図操作		
左	右	上	下	選択	視点を左移動	視点を右移動	視点を上移動
2. 地図操作					3. メディア操作		
視点を下移動	地図を左回転	地図を右回転	ズームイン	ズームアウト	再生/一時停止	前のトラックへ	次のトラックへ
3. メディア操作				4. 携帯端末の操作			
音量を上げる	音量を下げる	着信応答 (着信画面表示)	着信拒否 (着信画面表示)	着信応答 (振動で通知)	着信拒否 (振動で通知)	通話終了	ホーム画面へ
5. ブラウザ操作			6. ジェスチャ認識モードへの移行				
前のページへ	次のページへ	検索バーを選択	認識開始	認識終了			

図 2. 実験 1 から得られた足裏ジェスチャセット.

切なジェスチャが思いつかなければ「思いつかない」と発言すること.

被験者 23 歳から 59 歳 (平均 26.8 歳) の 20 名 (18 名は情報系の大学院生). 利き足は 19 名が右で 1 名のみ左だった. 2 名のみ足を使う入力デバイスを日常的に利用しており (どちらもゲームセンターのダンスゲーム), 足の動きを妨げるような怪我を負っている人はいなかった.

結果 29 個の各操作につき 17 個から 20 個, 計 563 個 (「思いつかない」が 17 回) のジェスチャ案が得られた. ただし被験者が「左右どちらの足を使ってよい」と答えたジェスチャについてはその被験者の利き足を使うものとして統一した.

3.2 足裏ジェスチャの選択アルゴリズム

実験 1 により得られたジェスチャ案から以下の方針に従って足裏ジェスチャを決定する. 1) 各操作について多くの被験者が提案したジェスチャを選択する. 2) 線対称な操作には線対称なジェスチャを割り当てる. 3) 競合が許されない操作間で同じジェスチャや似たジェスチャが割り当てられてはいけない.

形式的には, 操作集合 O からジェスチャ集合 G への写像 L に関する以下のエネルギー関数を最小化する.

$$\min_{L:O \rightarrow G} E_{Agree} = \min_{L:O \rightarrow G} \sum_{i \in O} -|P_{iL(i)}| \quad (1)$$

$$s.t. \quad \{i, j\} \in S_O \Rightarrow \{L(i), L(j)\} \in S_G \quad (2)$$

$$\exists C_O \in \{C_O\}, i, j \in C_O \\ \Rightarrow L(i) \neq L(j), \{L(i), L(j)\} \in I_G \quad (3)$$

P_{ig} は操作 i に対してジェスチャ g を提案した被験

者. S_O, S_G はそれぞれ線対称な操作/ジェスチャの組の集合. C_O はジェスチャが競合してはいけない操作の集合. I_G は似ているジェスチャの組の集合を表す (図 5 上段の左から 1 番目と 4 番目など).

実装 上記のエネルギー関数を最小化する写像 L (ジェスチャセット) を求めるプログラムを C# 言語で実装した. アルゴリズムの基本的な戦略は, 1) 線対称な操作の組 (または線対称な対がない操作単体) ごとに可能なジェスチャ案を列挙し, 2) 割り当てずみのジェスチャと競合するジェスチャ案を随時除去しつつ, 提案者の総数が多いものから順に採用していく.

結果 得られたジェスチャセットを図 2 に示す. 29 個の操作に対して 15 種類の足裏ジェスチャが割り当てられた. 各イラストは赤色で塗られた部分で地面をぐっと押すジェスチャを表している.

ここで得られたジェスチャセットは 29 個の操作に対してそれぞれ独立したものではなかった (つまり, $|C_O| = 29$ ではない). しかし, これらの操作は同一の状況で利用されることはまれであるため (例えばアイテム選択の上と地図操作の視点上移動), 実用上競合は発生しないと考えられる. つまり, ユーザが足裏ジェスチャを行ったときにどの操作を実行するかは, 現在アクティブなアプリが状況に応じて適宜選択することを想定している.

本実験ではほとんどの被験者の利き足が右だったため, 右足を使うジェスチャが好まれた. 一方で, 左利きの被験者 1 名は実験中左足を使うジェスチャを多く提案していた. したがって実用的には各ジェスチャで使用する足は利き足に合わせてユーザが変更できるようにすると良いだろう.

4 足裏ジェスチャ認識器の実装

前章で得られた 15 種類の足裏ジェスチャの認識には機械学習 (Support Vector Machine, SVM) を用いる。訓練データとなる足裏の圧力変化のパターンを集めるため、我々は 2 つの実験を行う。ひとつ目の実験 2 では各ジェスチャに対する圧力パターンの変化を計測する。加えて実験 3 では日常動作 (歩行・起立など) 時の圧力パターンの変化を計測し、これを用いて日常動作時にジェスチャが誤認識されることを防ぐ。

4.1 実験に使用する靴下型圧力センサ

足裏ジェスチャを感知するため、我々は簡単な靴下型圧力センサ Sockswitch を自作した (図 3)。Sockswitch は足裏部分に片足あたり 8 個ずつ計 16 個の圧力センサ (Interlink Electronics, FSR 402) が取り付けられている。圧力センサの配置については Wertsch ら [16] が提案した配置方法を参考している。圧力データは 50ms ごとにサンプリングされ、マイクロコンピュータ (Arduino Fio) によってワイヤレス通信 (ZigBee シリアル通信) でホストコンピュータに送られる。

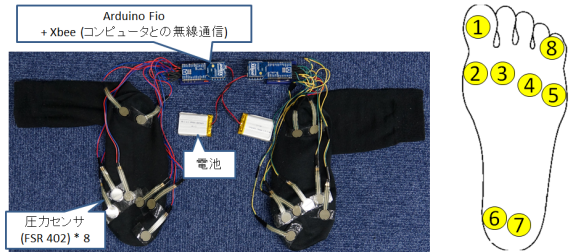


図 3. 左: Sockswitch の構成要素. 右: 圧力センサの配置.

4.2 ジェスチャ認識アルゴリズム

図 4 に我々のジェスチャ認識の処理の流れを示す。なお、右つま先 2 度押し (図 5 右下) については、右つま先押し (図 5 中段左) が 0.5 秒以内に 2 回行われたかで判定する。そのため、本システムでは右つま先 2 度押しを除く 14 種類のジェスチャの識別を行う。

まず、圧力計測中、以下の関数 $I(t)$ を足裏の動きの強度として随時計算し、 $I(t)$ が閾値 (0.1) を超えた区間+その前後 200ms を足裏が動いた時間帯としてセグメント化する (図 4 の赤枠)。

$$I(t) = g_{i,j}(t) \max\left(\frac{df_i}{dt}(t), 0\right) \quad (4)$$

$$s.t. \ g_{i,j}(t) = f_i(t) - E_i(t) - f_j(t) + E_j(t) \quad (5)$$

$$\{i, j\} = \max_{i,j \in \text{sensors}} g_{i,j}(t) \quad (6)$$

$f_i(t)$ はセンサ i の時刻 t おける圧力値 ($[0, 1]$), $E_i(t)$ はその指数移動平均 ($\alpha = 0.3$) である。直感的には、 $I(t)$ は足裏全体の圧力の増加成分である。

次に、各セグメント内での足裏の動きが「日常動作」「ジェスチャ動作」のいずれであるかを SVM により判定する。特徴量は各センサ値の最大値と最小値 (32 個), 各センサ値の時間微分と $I(t)$ の積分 (16 個), 左足, 右足ごとの圧力値の和の最小値 (2 個), 各センサの波形を 64 点で等間隔にサンプリングし離散フーリエ変換して得られたデータ列の低周波成分 3 つの振幅と位相 (96 個) の計 146 個を用いる。なお、SVM の実装には LIBSVM¹ を使用している。本システムでは、後述する実験 2 で得られる圧力データを「ジェスチャ動作」、実験 3 で得られる圧力データを「日常動作」として SVM に学習させる。

最後に「ジェスチャ動作」と識別されたセグメントを同様に SVM で個々のジェスチャに分類する。特徴量は前段落と同じものを使う。各ジェスチャの訓練データとして実験 2 で得られた圧力パターンを SVM に与える。

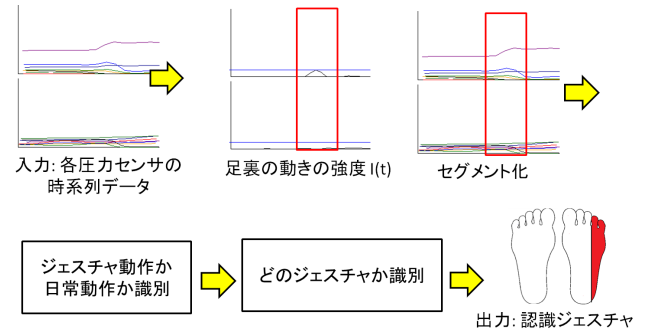


図 4. 足裏ジェスチャの認識処理の流れ.

4.3 実験 2: ジェスチャごとの圧力パターンの収集

タスク 被験者には、Sockswitch を履いて実験 1 で得られた (右つま先 2 度押しを除く) 14 種類の足裏ジェスチャを行うよう指示した。各ジェスチャはランダムな順番でひとつずつ被験者に提示され、各被験者は提示されたジェスチャを実行する。各ジェスチャは 10 回ずつ表示され、各被験者は計 140 回ジェスチャを実行する。システムは被験者が各ジェスチャを実行したときの足裏の圧力変化を計測する

被験者 22 歳から 24 歳 (平均 23.4 歳) の情報系の学生 5 名。利き足は 4 人が右で 1 人が左だった。いずれも足の動きに支障をきたす怪我を負った人はいなかった。また、足のサイズは 25.5cm から 27.5cm (平均 26.4cm) だった。

¹ <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm/>

結果 各ジェスチャに対して $10 \times 5 = 50$ 個、全体で 700 個の圧力パターンが得られた。この内、各被験者が奇数回目に実行したジェスチャの圧力パターン計 350 個を訓練データとして SVM に学習させ、残りの 350 個の圧力パターンを識別した。結果を図 5 に示す。ジェスチャ毎の識別率の平均は 87.7 % となった。

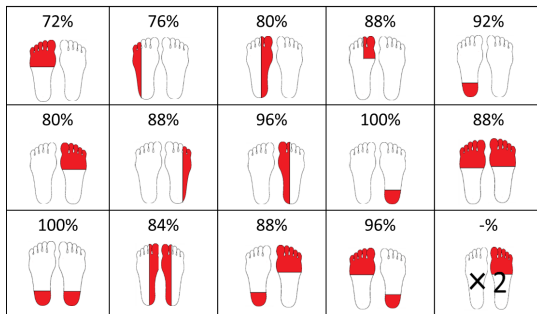


図 5. 14 個の足裏ジェスチャの識別率。右つま先 2 回押し (右下) は直接 SVM では識別せず、右つま先押しが 0.5 秒以内に 2 回検出されたかで判定する。

4.4 実験 3: 日常動作における圧力パターンの収集

タスク 被験者は Sockswitch を履いて、研究室から構内の購買部まで飲み物を買ってきてもらう。システムは被験者が研究室の椅子に座っている状態から圧力測定を開始し、被験者が椅子から立ち上がり、購買部へ行って戻ってきて、再び研究室の椅子に座った時点で測定を終了する。本実験により、歩行・階段昇降・起立・着席などの各種日常動作を行ったときの圧力パターンを測定した。

被験者 実験 2 と同じ 5 名。実験 2 を行った直後に実験 3 に参加してもらった。

結果 1824 秒間の圧力センサのデータが得られた。この圧力データをセグメント化 (図 4 の上段) したところ 299 個の圧力パターン (セグメント) が得られた。これらの圧力パターンの半数 150 個 (奇数番目に検出された圧力パターン) のを「日常動作」、そして実験 2 で得られた圧力パターンの半数 (各被験者の奇数回目のジェスチャ) 計 350 個を「ジェスチャ動作」として SVM に学習させた。得られた SVM を使って、実験 2, 3 で得られた残りの圧力パターン $350 + 149 = 499$ 個を識別した。結果として、識別率は 99.4 % となった。また、ジェスチャ動作・日常動作の適合率 (Precision) は順に 0.99, 1, 再現率 (Recall) は 1, 0.98 となった。

5 利用例

本稿で提案した足裏ジェスチャシステムはハンズフリーで人目に付きづらいという利点がある。その

ためこれらのジェスチャは、混雑した電車内で携帯の着信を切ったり音楽プレーヤを操作するといった、公共の場での携帯端末の操作に適している。また、料理中にクックパッドなどのページを操作したり、身振りを交えたプレゼンでスライドをめくるなど、手が使えない、または使うことが好ましくない状況におけるコンピュータ操作に利用することも有効であろう。もし足裏感圧センサが一般に普及すれば、ATM といった公共のセキュリティシステムでの暗証番号入力へも利用できるだろう。さらに、Google Glass に代表される HMD 型の携帯端末での利用も考えられる。現状では HMD 型携帯端末においては音声による操作や、腕や手を利用したジェスチャによる操作が考えられているが、これらの操作は一般的に周囲の他者にも見える・聞こえる状態で実行される。これに対して、本稿で提案する手法を用いることで周囲の人々に気付かれずに、もしくは迷惑を掛けずに利用できるという点において、有用であろうと考えている。

靴下型デバイスはウェアラブルであるので靴を脱いでも利用することができる。このため、例えば電化製品のリモコンとしても利用できる。テレビやエアコンといった製品を操作するさいに毎回リモコンを探して拾うのは面倒である。しかし例えば学習型リモコンを利用して足裏ジェスチャと各製品の操作を関連付けることで、ユーザはリモコンではなく足裏ジェスチャによって家の電化製品を操作できる。

実験 1 の被験者のうち 7 名が、足裏ジェスチャは地図操作のような複雑な操作ではなく着信応答のような単純な操作に向いていると指摘した。足裏ジェスチャは、それだけであらゆる操作を行うのではなく、あくまで手を使ったインタラクションの補助として利用することがベストであろう。そのような補助的な利用法として、ある被験者は PC 作業中にショートカットキーの代わりに足裏ジェスチャを使うことを提案した。例えば、アプリケーションを切り替える (Alt+Tab) には比較的指を大きく動かす必要がある。しかし、ある足裏ジェスチャを行ったときにこのキーストロークを送信すれば、ユーザは指をホームポジションから動かさずにアプリケーション切り替えを自由に行える。

6 議論と今後の課題

我々は 3 つの実験により日常生活での利用を考慮した足裏ジェスチャシステムを設計・実装した。足裏ジェスチャの認識に Sockswitch のような靴下型センサを使う以外に、FootLogger² のような靴型センサを使うという選択肢もあった。しかし本研究では、屋内で靴を脱いだときにもジェスチャ操作を行えるようにと靴下型センサを採用した。さらに、

² <http://vandrico.com/device/3l-labs-footlogger>

ある被験者は「靴下は靴と違って足のサイズがある程度違って履ける」という理由で靴下型センサの方が好ましいと指摘した。事実、実験2, 3において被験者の足のサイズはバラバラであったにもかかわらず問題なく同一の靴下型センサを履くことができていた。

足裏ジェスチャは足をほとんど動かさず行う動作であるが、コンピュータを直感的に操作するという点においては、キックや足で円を描くといった視覚的にわかりやすい大きな足ジェスチャが好まれる場合もあるだろう。実用的には大きな足ジェスチャと足裏ジェスチャの両方をサポートし、ユーザが状況に応じて使い分けられるようにすると良いだろう。

本研究ではスニーカーなど踵の低い靴を履いている状況でのジェスチャ入力を前提としている。したがってハイヒールや厚底ブーツを履いた状況では、最適なジェスチャセットや各ジェスチャの圧力パターンは本稿とは異なる結果が得られることが予想される。このような特殊な靴を履いた際の足裏ジェスチャの調査は今後の課題である。

また、本研究では両足が地面についている状況でジェスチャを行うことを想定している。そのため足を組んで座っているときのように片足または両足が宙に浮いている状況での足裏ジェスチャの実行は難しい。しかし、例えば足の指治いに曲げセンサをつけて足指の曲げを検知することができると考えている。

7 まとめ

本稿では靴下型足裏圧力計測デバイスを用いたインタラクション手法を提案した。我々はユーザ定義型ジェスチャセットを設計し、各ジェスチャのSVM認識器を実装した。さらに日常動作における足裏の圧力パターンを計測し、日常生活において予期せずジェスチャが認識されることを防いだ。ジェスチャの識別率は87.7%で日常動作とジェスチャの識別率は99.4%であった。さらに足裏ジェスチャの利用例を提案し、本ジェスチャシステムの可用性を示した。

8 謝辞

本研究はJSPS 科研費 26240027 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] J. Alexander, T. Han, W. Judd, P. Irani, and S. Subramanian. Putting Your Best Foot Forward: Investigating Real-World Mappings for Foot-based Gestures. In *Proc. CHI '13*, pp. 1229–1238, 2013.
- [2] T. Augsten, K. Kaefer, R. Meusel, C. Fetzer, D. Kanitz, T. Stoff, T. Becker, C. Holz, and P. Baudisch. Multitoe: high-precision interaction with back-projected floors based on high-

- resolution multi-touch input. In *Proc. UIST '10*, pp. 209–218, 2010.
- [3] L. Chan, R.-H. Liang, M.-C. Tsai, K.-Y. Cheng, C.-H. Su, M. Y. Chen, W.-H. Cheng, and B.-Y. Chen. FingerPad: Private and Subtle Interaction Using Fingertips. In *Proc. UIST '13*, pp. 255–260, 2013.
- [4] K.-Y. Chen, K. Lyons, S. White, and S. Patel. uTrack: 3D input using two magnetic sensors. In *Proc. UIST '13*, pp. 237–244, 2013.
- [5] I. Choi and C. Ricci. Foot-mounted gesture detection and its application in virtual environments. In *Proc. IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics '97*, pp. 4248–4253, 1997.
- [6] M. Fukumoto and Y. Suenaga. "FingerRing": a full-time wearable interface. In *Proc. CHI '94*, pp. 81–82, 1994.
- [7] J. Paradiso, C. Abler, K. yuh Hsiao, and M. Reynolds. The Magic Carpet: Physical Sensing for Immersive Environmentse. In *Proc. CHI EA '97*, 1997.
- [8] J. Paradiso, E. Hu, and K.-Y. Hsia. Instrumented Footwear for Interactive Dance. In *Proc. the XII Colloquium on Musical Informatics '98*, pp. 89–92, 1998.
- [9] G. Pearson and M. Weiser. Exploratory evaluation of a planar foot-operated cursor-positioning device. In *Proc. CHI '88*, pp. 13–18, 1988.
- [10] M. Pike, H. Maior, M. Porcheron, S. Sharples, and M. L. Wilson. Measuring the Effect of Think Aloud Protocols on Workload using fNIRS. In *Proc. CHI '14*, pp. 3807–3816, 2013.
- [11] A. H. A. Razak, A. Zayegh, R. K. Begg, and Y. Wahab. Foot plantar pressure measurement system: a review. In *Journal of Sensors '12*, pp. 9884–9912, 2012.
- [12] J. Ruiz, Y. Li, and E. Lank. User-Defined Motion Gestures for Mobile Interaction. In *Proc. CHI '11*, pp. 197–206, 2011.
- [13] T. S. Saponas, D. S. Tan, D. Morris, R. Balakrishnan, J. Turner, and J. A. Landay. Enabling always-available input with muscle-computer interfaces. In *Proc. UIST '09*, pp. 167–176, 2009.
- [14] J. Scott, D. Dearman, K. Yatani, and K. N. Truong. Sensing foot gestures from the pocket. In *Proc. UIST '10*, pp. 199–208, 2010.
- [15] Sensoria. <http://www.sensoriafitness.com/>.
- [16] J. J. Wertsch, J. G. Webster, and W. J. Tompkins. A portable insole plantar pressure measurement system. In *Rehabilitation Research and Development '92*, pp. 13–18, 1992.
- [17] J. O. Wobbrock, M. R. Morris, and A. D. Wilson. User-defined gestures for surface computing. In *Proc. CHI '09*, pp. 1083–1092, 2009.
- [18] T. Yamamoto, M. Tsukamoto, and T. Yoshihisa. Foot-Step Input Method for Operating Information Devices on Jogging. In *Proc. SAINT '08*, pp. 173–176, 2008.