

# 腹部触覚提示を用いた足圧中心位置の誘導システム

川崎 陽平<sup>1,a)</sup> 杉浦 裕太<sup>1,b)</sup>

**概要：**本研究では、振動アクチュエータを用いた触覚提示により足圧中心の位置を誘導するシステムを提案する。バランス Wii ボードで計測された自身の足圧中心の位置と目標位置の関係に応じて、ユーザーの腹部に装着されたアクチュエータの振動を変化させることで誘導を行う。本研究では提案手法により目標位置に到達するまでの所要時間を計測した。

**キーワード：**身体共有, 足圧中心, Phantom Sensation

## 1. はじめに

足圧中心 [7] は身体に対する床反力の作用点であり、反力全体がその点のみからもたらされているとみなしたときに同じ運動効果をもたらすとされている。この足圧中心を誘導することによって、適切な運動姿勢の教示や他者との身体感覚の共有が可能となる。しかし、足圧中心は不可視の感覚であり目標位置を指示したり、共有したりすることは本質的には困難であると考えた。

そこで、本研究では触覚提示を用いて足圧中心を制御するシステムを提案する。腹部周囲に 4 個の振動モータを装着し、Phantom Sensation を用いて身体の内部に触覚提示を行うことによって足圧中心の位置の誘導を行う。足圧中心の位置を測定する際にはバランス Wii ボードを用いた。

ユーザ実験では正解とする足圧中心の位置とその許容領域を設定し、被験者が自身の足圧中心を設定された領域内に移動させるまでの所要時間を計測した。触覚提示の有用性を検証するために 1) 視覚提示による誘導, 2) 触覚提示による誘導の 2 種類の提示手法を用いて実験を行った。

## 2. 関連研究

### 2.1 バランス Wii ボードを用いた足圧中心の位置の計測と利用

足圧中心は身体の健康状態を調査する上での指標として用いることが可能である。先行研究では、扁平足か否かの識別 [6] や捻挫の既往を判定 [10] や高齢者の転倒を調査 [8] するための指標として足圧中心を用いている。また、足圧中心の位置を測定する際にバランス Wii ボードを用いる研



図 1 実験中の様子

究は多くなされている。川井田らはバランス Wii ボードが足圧中心の位置を測定するデバイスとして機能するか調査を行った [9]。バランス Wii ボードと床反力計両者の足圧中心の位置の相関係数が前後左右方向ともに 0.989 を示したと報告している。本研究では、バランス Wii ボードを用いて足圧中心位置を測定し、触覚を用いて誘導をする手法を提案する。

### 2.2 Phantom Sensation を用いた触覚提示

Phantom Sensation とは、疑似的に触覚を提示するための手法の一種である。人間の皮膚の上の異なる 2 点に振動アクチュエータを配置し、振動させることによって 2 つの振動アクチュエータを結ぶ線分上に触覚を錯覚することが可能となる。Phantom Sensation を用いた触覚提示に関する研究は多くなされている。Jinsoo らは Phantom Sensation を用いた、体を貫通する感覚に関する研究を行った [1]。ユーザ実験では、体の前方と後方に一つずつ振動アクチュエータを装着してもらい、最も貫通する感覚を感じやすい振動の条件を調査し、振動の周波数は 100Hz が効

<sup>1</sup> 慶應義塾大学

<sup>a)</sup> yohei.green@keio.jp

<sup>b)</sup> sugiura@keio.jp

果的であると報告していた。この研究では2個の振動アクチュエータを用いているため、触覚提示が可能な領域が直線上に限られる。Gunhyukらはスマートフォンに4個の振動アクチュエータを装着することで手を対象とした2次元平面におけるPhantom Sensationの知覚に関する調査を行い、静止している触覚は動いている触覚に比べて低い精度で識別されると報告していた[3]。Gyeoreらは椅子の上背、くびれ、腰、太ももにあたる部位に振動アクチュエータを設置し、座った人間の体の広範囲に渡って触覚提示を行うことを目的として研究を行いPhantom Sensationの有用性について報告していた[4]。本研究では腹部の前後左右に振動アクチュエータを装着することで腹部断面におけるPhantom Sensationの実装を提案する。触覚提示位置はリアルタイムで変更を施す。

### 2.3 触覚提示による方向の誘導

触覚提示によって人間の行動を誘導する手法は多くなされている。Matsudaらはネックレス状のデバイスを用いて、触覚提示により他人と視線の方向をリアルタイムで共有するシステムの提案をした[2]。首の周囲に16個の振動モータを $22.5^\circ (= 360^\circ \div 16)$ 間隔で配置し、視線の一致度に応じて振動するモータを選択し、振動の強弱を調整することで視線の誘導を行った。しかし、視線が一致するにつれて振動が弱くなるアルゴリズムであったためユーザは徐々に触覚を感じにくくなるという課題があった。本研究では正解とする足圧中心位置に一定距離近づいた際に周波数を変化させることでユーザにフィードバックをするシステムを提案する。

## 3. 提案手法

### 3.1 システムの概要

本研究では、バランスWiiボードから取得した足圧中心の位置を利用しPCを介して処理を行うことでリアルタイムで触覚提示を行う(図2)。ユーザがバランスWiiボードの上に乗ることで足圧中心の位置を取得可能となる。取得した値をPCに送信し、PC内のMaxMSP\*1で処理を行うことで足圧中心を誘導する方向の計算を行い振動を発生させる。目標の足圧中心の位置から半径3cm以内の領域を許容領域とし、許容領域内に3秒間留まることを誘導が完了したことの条件とした。誘導が開始されてから完了するまでの所要時間を計測した。デバイスは図3のように接続した。MaxMSPで計算された振動をオーディオインタフェース(Roland, OCTA-CAPTURE)とプリアンプ(Cidre IxD Inc., 8ch PreAmplifier for Haptic Devices.)を介して振動アクチュエータ(Acouve Laboratory, Inc., バイプロトランスデューサ Vp2 シリーズ)で出力する。

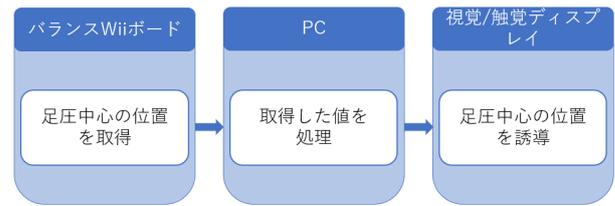


図2 提案手法の流れ

### 3.2 触覚提示による誘導

Phantom Sensationを用いて腹部に触覚提示を行う。腹部の断面を座標平面とした際に、断面の中心を原点として誘導を行いたい方向に触覚を提示した。例えば、腹部断面の後方右側に触覚を感じる際には、足圧中心を後方右側に移動させる必要があることを意味している。ユーザは触覚提示される位置が体の中心になるように足圧中心の移動を行う。許容領域外に存在している際には振動の周波数を100Hzに設定し、許容領域内では150Hzに設定することでフィードバックを行った。(図4)

### 3.3 振動制御のアルゴリズム

バランスWiiボード上のセンサは四隅の一つずつ配置されている。(図5)バランスWiiボードの中心を原点とし、目標の足圧中心位置を $(X, Y)$ 、ユーザの足圧中心位置を $(x, y)$ とする。 $(-21.5 \leq X, x \leq 21.5, -12 \leq Y, y \leq 12)$ 誘導する方向と強さを表すベクトル $(p, q)$ を $(p, q) = (\frac{X-x}{2 \times 43}, \frac{Y-y}{2 \times 24})$ で定義する $(-0.5 \leq p, q \leq 0.5)$ 。このとき装着する部位 $i$ における振動 $x_i$ は式1, 2, 3, 4で表される。

$$x_{left} = \{0.02 \times (-p + 0.5)\} \cos(2\pi Fp) \quad (1)$$

$$x_{right} = \{0.02 \times (p + 0.5)\} \cos(2\pi Fp) \quad (2)$$

$$x_{front} = \{0.02 \times (q + 0.5)\} \cos(2\pi Fq) \quad (3)$$

$$x_{back} = \{0.02 \times (-q + 0.5)\} \cos(2\pi Fq) \quad (4)$$

コサイン波を搬送波として用いた。 $F$ は周波数を表す。振幅に0.02を乗じることでユーザの体に負担をかけない振動を作成した。

## 4. 足圧中心誘導実験

### 4.1 実験概要

実験には21歳から23歳まで(平均22.4歳, 分散0.64)の5人の男性の協力者が参加した。視覚提示による誘導, 触覚提示による誘導の順番で実験を行った。目標の足圧中心の位置は8パターン用意した。(図6)バランスWii

\*1 <https://www.mi7.co.jp/products/cycling74/>

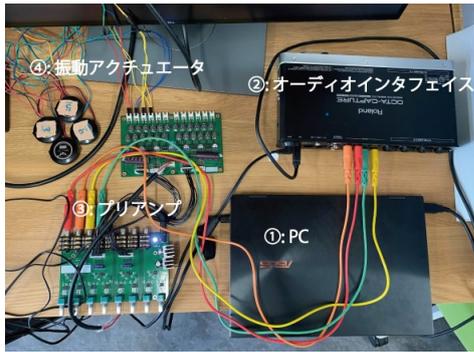


図 3 デバイスの配置

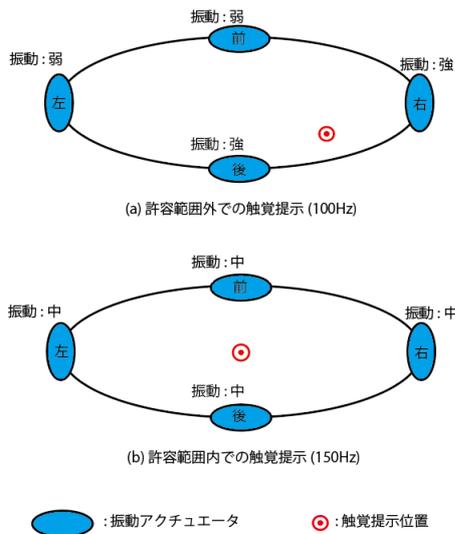


図 4 触覚提示時の腹部断面図

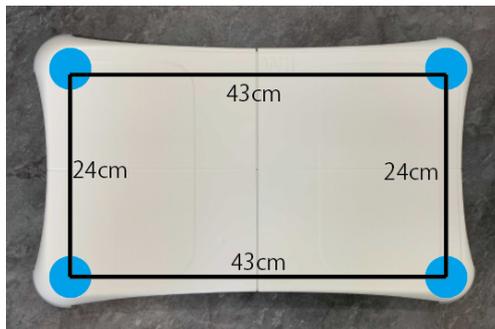


図 5 バランス Wii ボード

表 1 触覚提示における各提示箇所の実験結果

提示箇所	平均所要時間 (秒)	最小所要時間 (秒)
T1	19.33	6.38
T2	39.16	5.27
T3	12.65	4.59
T4	7.65	6.40
T5	208.27	4.89
T6	29.18	5.06
T7	24.60	5.24
T8	3.32	6.79

表 2 視覚提示における各提示箇所の実験結果

提示箇所	平均所要時間 (秒)	最小所要時間 (秒)
T1	16.68	5.45
T2	7.50	4.60
T3	6.90	4.66
T4	8.08	4.39
T5	9.17	4.55
T6	6.83	4.19
T7	5.27	4.15
T8	8.48	4.62

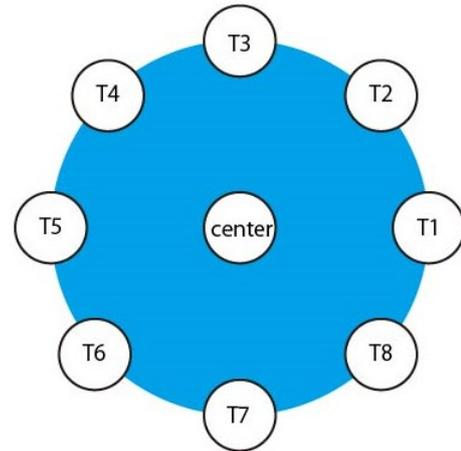


図 6 提示位置 8 パターン

ボードの中心位置から半径 15cm の円上に  $45^\circ (= 360^\circ \div 8)$  間隔で設定した。視覚と触覚による誘導で共通して同じものを用いた。各パターンはランダムな順番で提示され、それぞれ 2 回ずつ目標位置として設定された。一つの誘導手法につき  $16 (= 8 \times 2)$  回分のデータを取得し、全員で  $80 (= 8 \times 2 \times 5)$  回分のデータを取得した。

#### 4.2 比較条件の用意

矩形内の中心が原点を表しており、矩形内の点がユーザが足圧中心を移動すべき方向を表している。触覚提示と同様に、例えば後方右側に点が存在している際は、足圧中心を後方右側に移動させる必要がある。ユーザは点を中心に移動させることを目標として足圧中心の移動を行う。正解、不正解を表示することで許容領域内に存在しているか否かのフィードバックも行った (図 7)。

#### 4.3 実験結果

各提示手法における実験結果を表 1, 2 に示す。平均の所要時間においては視覚提示を用いた方が所要時間が短いことが確認できる。

### 5. 議論と課題

#### 5.1 実験中のユーザの様子

触覚提示手法を用いた実験中、提示位置を見失うユーザが見受けられた。その際ユーザは体を前後左右に動かすことによってより振動を感じる方向を探するという行動をとっ

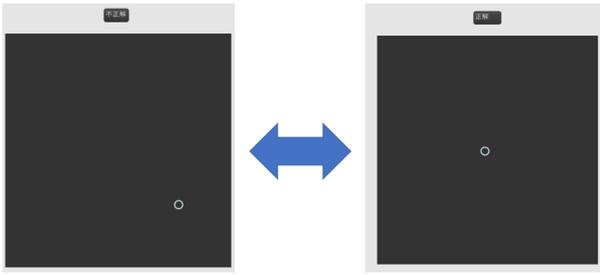


図 7 MaxMSP 内での視覚による誘導

表 3 各手法における変動係数

提示箇所	触覚提示	視覚提示
T1	0.72	0.83
T2	1.70	0.31
T3	0.95	0.29
T4	0.59	0.39
T5	2.33	0.41
T6	1.36	0.46
T7	1.16	0.20
T8	0.32	0.48

表 4 触覚提示における誘導成功率

提示箇所	誘導成功率 (%)
T1	80
T2	90
T3	90
T4	90
T5	60
T6	80
T7	80
T8	100

表 5 視覚提示における誘導成功率

提示箇所	誘導成功率 (%)
T1	80
T2	100
T3	100
T4	100
T5	100
T6	100
T7	100
T8	100

ていた。これは視覚提示手法においては起こりえない行動であるため、誘導所要時間に差が生じた原因であると考えられる。このことから Phantom Sensation によって触覚提示された位置は、体を動かすことでより知覚することが可能になると考えられる。

## 5.2 触覚提示と視覚提示の比較

表 3 は各提示手法における所要時間の変動係数を表している。T1, T8 においては触覚提示の方が値のばらつきが小さいがそれ以外の箇所においては視覚提示の方が小さいことから触覚提示は視覚提示と比べると安定性に欠けると

いえる。それぞれの手法においての平均所要時間と最小所要時間について t 検定を施すとどちらも有意差が見られた。このことから触覚提示の方がより時間がかかる手法と考えられる。

## 5.3 触覚提示の有用性

前項で述べたように触覚提示位置を見失うことが原因で所要時間が長くなるユーザが見受けられた。そこで所要時間が 30 秒以内であるものを誘導成功とし、各提示位置における成功率を表 4, 5 に示す。また総合の誘導成功率は触覚提示は 83.75%、視覚提示は 97.5%であった。

## 5.4 今後の課題

誘導の所要時間においては触覚提示は視覚提示に劣るという結果が得られた。今後は触覚提示を用いた際の誘導時間を縮めることを課題として研究に取り組んでいきたい。振動アクチュエータの数の増加に伴い提示位置をより高精度で表現可能になると考えた。加えて振幅を制御する関数についても再検討を行う必要がある。本研究では線形関数を用いた制御を行ったが、指数関数、対数関数、多項式を用いた際の誘導についての調査を検討している。

## 5.5 実応用

足圧中心の位置を誘導する技術を 2 点のアプリケーションに利用することを検討している。

1 点目はスポーツのフォームに関するアプリケーションへの利用である。[5] ではゴルフのフォームの計測や、ゴルフスキルの定量化が行われている。本研究で提案したシステムを用いて足圧中心を誘導し、スポーツのフォーム指導を行うことを目指している。

2 点目は視覚障害者の支援である。触覚提示を用いて視覚障害者に姿勢やスポーツのフォームの指導を行うことの実現を目指している。

## 6. 終わりに

本研究では触覚提示を用いた足圧中心位置を誘導するシステムを提案し、誘導が完了するまでの所要時間を計測した。30 秒以内に誘導を完了させるという条件下では 83.75%の精度で誘導を行うことに成功した。触覚提示と視覚提示の所要時間の差を縮めることを課題として今後の研究に取り組んでいきたい。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 JP21H03485 の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] Kim, J., Oh, S., Park, C. and Choi, S.: *Body-Penetrating Tactile Phantom Sensations*, p. 1–13, As-

- sociation for Computing Machinery (2020).
- [2] Matsuda, A., Nozawa, K., Takata, K., Izumihara, A. and Rekimoto, J.: HapticPointer: A Neck-Worn Device That Presents Direction by Vibrotactile Feedback for Remote Collaboration Tasks, *Proceedings of the Augmented Humans International Conference, AHs '20*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery (2020).
  - [3] Park, G. and Choi, S.: *Tactile Information Transmission by 2D Stationary Phantom Sensations*, p. 1–12, Association for Computing Machinery (2018).
  - [4] Yun, G., Oh, S. and Choi, S.: Seamless Phantom Sensation Moving Across a Wide Range of Body, *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 616–621 (2019).
  - [5] 穂苅真樹, 渡辺嘉二郎, 栗原陽介, 瀬川友輔, 鳴尾丈司: スポーツフォームの運動解析と計測, 計測自動制御学会論文集, Vol. 38, No. 11, pp. 922–930 (2002).
  - [6] 三秋泰一, 加藤逸平: アーチ高率の違いによる内外側方向における足圧中心位置の検討, 理学療法科学, Vol. 22, No. 3, pp. 409–412 (2007).
  - [7] 福井 勉: 姿勢制御について, 理学療法 - 臨床・研究・教育, Vol. 13, No. 1, pp. 2–6 (2006).
  - [8] 川井田豊, 福留清博, 上嶋 明, 西 智洋, 松下寿史: バランス Wii ボードの重心動揺計としての利用, 理学療法学 Supplement, Vol. 2008, pp. B3P1321–B3P1321 (2009).
  - [9] 川井田豊, 福留清博, 上嶋 明, 西 智洋, 松下寿史: バランス Wii ボードの重心動揺計としての利用, 理学療法学 Supplement, Vol. 2008, pp. B3P1321–B3P1321 (2009).
  - [10] 大谷 遼, 小野寺久美, 秀島聖尚, 小松 智, 平川信洋, 峯 博子, 青柳孝彦, 可徳三博, 鶴田敏幸: 女子バドミントン選手における足関節捻挫と足部機能・足圧中心制御の関係, 理学療法学 Supplement, Vol. 2012, pp. 48101485–48101485 (2013).