



センサ内蔵インソールを用いたスケートボード における足裏反力の分析

Analysis of Sole Reaction Forces in Skateboarding using Insoles Built-in Tactile Sensors

河村倫輝¹⁾, 宮本賢昇^{1,3)}, 街道一翔^{1,3)}, 小松仁美²⁾, 寺前達也³⁾, 野田智之³⁾, 安藤潤人^{1,3)}, 野間春生^{1,3)}

Tomoki KAWAMURA, Kensho MIYAMOTO, Kazushi KAIDO, Hitomi KOMATSU, Tatuya TERAMAE,

Tomoyuki NODA, Mitsuhiro ANDO, and Haruo NOMA

1) 立命館大学 情報理工学部 (〒567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150, is0665hf@ed.ritsumeai.ac.jp)

2) 清泉大学 短期大学部 こども学科 (〒381-0085 長野県長野市上野 2-120-8)

3) 株式会社 国際電気通信基礎技術研究所 (〒619-0288 京都府相楽郡精華町光台 2-2-2)

概要: スケートボードにおいて、足裏に作用する反力は、重心制御やトリックの安定性に関わる重要な要素である。本研究では IT を活用して外力の制御のサポートを行い、ライダーのパフォーマンスを向上させることを目指す。ここではまず、ライディング時の足裏からの反力と重心変化の対応を評価した。実験では、MEMS 触覚センサ内蔵のインソール型デバイスを用いて、スケートボード上で実験参加者が前後に重心移動を行う状況を想定して、片足にかかる圧力中心(COP)の変動と足裏に装着した触覚センサの出力の比較を行った。その結果、母指球部における垂直荷重と COP の y 成分との間に相関が認められ、足裏の y 方向 COP を推定する上で、これらのセンサ情報が有効である可能性が示唆された。

キーワード: スケートボード, 触覚センサ, センサ内蔵シューズ, 重心計測, 足裏荷重中心

1. はじめに

2020 年東京オリンピックにおいてスケートボードが正式種目に採用されて以降、その人気は飛躍的に高まり、競技人口も増加の一途をたどっている。これにより、選手のパフォーマンス向上や、より安全なライディング技術の習得に対する需要が高まっている。スケートボードのパフォーマンス向上において、ライダー自身の重心 (Center of Gravity: COG) の制御は極めて重要である。佐藤ら[1]の研究でも示されているように、身体のねじり運動や重心移動によってボードを傾け、推進力や回転力を生み出す。ライダーの重心移動は、身体に作用する重力、加速やトリックに伴う慣性力、そしてスケートボードからの反力の 3 つの外力のバランスによって制御される。この中で、スケートボードからの反力は足裏を介して直接身体に作用し、COG の制御の多くを担っていると考えられる。すなわち足裏の圧力の中心点 (Center of Pressure: COP) が COG 制御のための重要な要素となるはずである。これらのことからライディング中の両足の各 COP を計測し分析することが、選手の技術の数量化とさらなる上達に繋げるための有効な手がかりになると考えた。

そこで本研究では、複数の小型 MEMS 触覚センサ[2]をインソールに組み込んだシューズを開発し、選手のライディング技術の数量化をし、外力の制御のサポートを行うシステム実現を目的とする。本稿では、目的達成のためフォースプレートから得た COP と触覚センサから得た三軸荷重との相関を調べることで、COP の推定の可能性について議論した。

2. 関連研究

スケートボードの動作を計測し、技術習得を支援する研究はこれまでもいくつか報告されている。作農らは、本研究と同様に圧力中心 (COP) に着目し、スケートボードのデッキ (板) 表面に抵抗膜方式の圧力分布センサを実装したシステムを開発した [3]。この手法ではセンサがデッキに直接組み込まれているため、ライダーはこの加工されたボードしか使用できず、普段から使い慣れた自身のボードで計測することは困難であった。一方、森らは、初心者が「チックタック」と呼ばれる基本技術を安全に習得することを目的としたシミュレータ「Tick-Tack Board」を開発した [4]。この研究で用いられているセンサは、ユーザの

搭乗を検知するための一軸の圧力センサと、ボードの傾きを検知する加速度センサを用いていた。そのため、COP のような詳細な圧力分布や、ボードを操作する上で重要な足裏剪断力（床面に平行な力）を捉えることは難しかった。これらの先行研究から、ライディングスキルを数量化するためには、以下のような要求仕様が考えられる。

- ・ライダーが自身のボードを自由に利用
- ・現実の多様な滑走場面で計測
- ・ボードコントロールに不可欠な三軸荷重を計測

そこで本研究では、これらの課題を解決するため、センサをデッキ側ではなくライダーのシューズに内蔵する手法を提案した。本研究で用いる小型 MEMS 触覚センサは、垂直方向の荷重に加えて剪断力（二軸）も同時に計測できる三軸触覚センサである。このインソール型計測デバイスにより、ライダーはボードの種類に制約されることなく、COP の算出はもちろんのこと、従来の手法では計測が困難であった、ボードを繊細に操るための足裏の三軸の力まで、様々な環境で収集することが可能となる。

3. 提案手法

本研究で使用した計測デバイスには、独自に開発した小型 MEMS 触覚センサをインソール下に配置したセンサ内蔵シューズ[5]を用いた(図 1)。MEMS センサは、基板サイズ約 1cm²、厚さ 2mm の Si 基板上に直径数 mm の三軸力検出素子を搭載しており、垂直方向(鉛直)および前後・左右方向の剪断力を同時に検出可能である。センサはその小型性により、柔軟なインソール素材に組み込むことが可能であり、足底の変形に影響を与えることなく、足底三軸の力データを取得できるという特徴を有する。本センサの検出原理は、Si 基板上に設けられた 3 本のマイクロカンチレバー(200 μ m $\times$ 300 μ m)によって構成されている。カンチレバー全体はエラストマ素材で覆われており、外力が加わるとエラストマが変形し、それに伴って各カンチレバーが独立に変形する。この変形量はカンチレバー根元に配置された歪み抵抗により計測され、各成分の外力に対応した電気信号として出力される[6]。センサ出力はアンプ回路により増幅されたのち、無線通信機能を備えた慣性センサモジュール(AMWS020, ATR-Promotions 社)を介して、PC へ送信される。センサモジュールと電気回路はすべて足部に装着可能なサイズに収められている。本稿のデバイスでは、

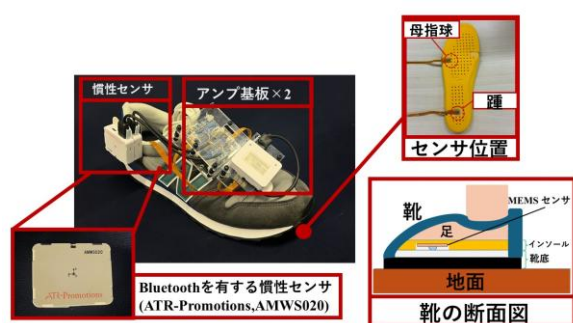


図 1: 計測機器の構成

触覚センサを足底の母趾球・踵の二点に配置しており、足底の部分的な荷重分布をリアルタイムで取得可能である。従来の床反力計(フォースプレート)とは異なり、本手法ではポータブルかつ固定設置を必要としない軽量の計測が可能である。そのため、触覚センサの配置は自由に決めることができ、ライディング時に重要な荷重がかかる足の甲に関しても計測可能となっている。

4. 二点での三軸荷重計測結果と COP の関係

本研究の研究課題は、足裏の限られた計測点で得られる三軸荷重から足裏の重心 COP と身体の重心である COG への影響を推定することである。本研究ではこれに先立ってまず、母趾球と踵の二点の足裏荷重と COP の関係について観察した。ここでは、センサ内蔵シューズを履いた片足のみをフォースプレートに置き、片足内の荷重中心である COP と、センサ内蔵シューズから得られる三軸荷重データを同時に記録し、両者を比較した。

実験参加者は 20 代男性 2 名とした。実験では、左足の靴の母趾球とかかとの位置に触覚センサを組み込んだ。計測には、図 2 に示すような左右 2 枚のプレートで構成されるフォースプレートを用いた。フォースプレートから出力される COP は、各プレートの中心を原点とし、右向きを x 軸正の方向、上向きを y 軸正の方向とする座標で得られる。実験参加者は、フォースプレートの右側プレートに右足、左側プレートに左足を乗せ、両足を平行に保った。その姿勢から、前方へ 2 秒間、後方へ 2 秒間、意図的に重心を移動させる動作を 1 試行とし、これを 1 名につき 10 回実施した。

5. 計測結果

図 3 は、フォースプレートの y 方向 COP と、センサシューズの母趾球・踵センサから得られた三軸荷重の時系列データを 5 試行分切り取った結果である。一番下のグラフは、フォースプレートから得た y 方向の COP の変位を示している。およそ -100mm から 50mm 範囲で COP が変位していることが分かる。これに対して、上の二つのグラフは母趾球と踵のセンサ設置点に作用する三軸荷重の結果を示している。青色の線は、垂直方向の圧力、緑は前後方向の剪断力、赤は左右方向の剪断力を表す。ただし、この方向は、靴に固定された座標軸であるが、実験においては靴

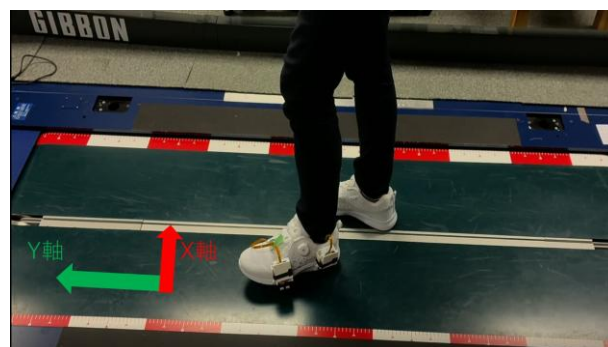


図 2: 実験の様子とフォースプレートの座標軸

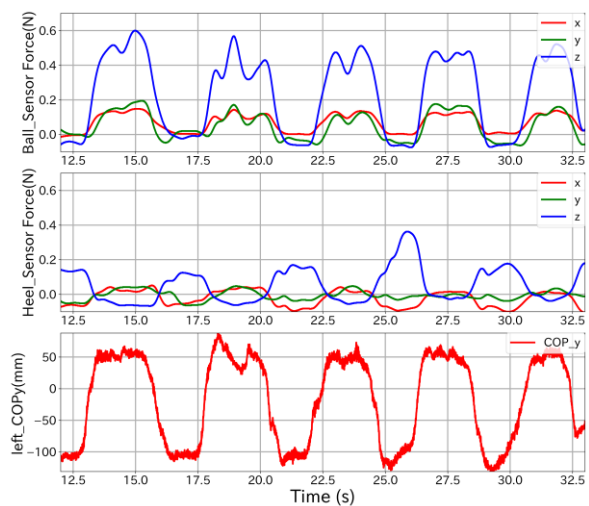


図 3: COP の y 成分と各センサ三軸荷重の時系列データ (代表例)

表 1: y 方向 COP と母指球、踵における相互相関係数

	母指球_Fx	母指球_Fy	母指球_Fz	踵_Fx	踵_Fy	踵_Fz
実験参加者1	0.94	0.84	0.94	0.87	0.72	-0.87
実験参加者2	0.65	0.7	0.67	0.76	0.37	-0.8

とフォースプレートとの方向は一致させている。このグラフより、母指球では圧力と剪断は y 方向 COP の前後移動と同期していることが分かる。一方で踵については、圧力は前後移動に対して逆方向に応答しているが、剪断力は同期していることが分かる。

そこで、計測したすべての結果に対して、y 方向 COP と三軸荷重成分の相互相関を取った結果を表 1 に示す。この結果から、すべての試行において母指球で計測された垂直荷重と剪断力、踵にかかる剪断力とフォースプレートの y 方向 COP の間に強い正の相関が、また、踵の垂直荷重とは y 方向 COP の間には負の相関が確認された。ここで、前方に重心を掛けた状況では、母指球の荷重が増加したと同時に踵では荷重が減少している。このことは、前方への重心移動で踵が持ち上がるような状況と考えられる。また、剪断力は母指球、踵ともに増加していることは、足裏に対して水平面に外力は作用していないため、計測点への荷重の増加によって足裏全体が変形し、それに伴う剪断方向の変形が生じたと考えられる。一方で、後方への重心移動時には、母指球への三軸荷重はほぼ 0N であり、つま先を浮かせて踵の一点で体を支えるような不安定な状況にあることが推察される。この時、剪断力は負の出力であり、前方重心時と逆方向に足裏が変形している。また、この際の荷重変動は母指球側と比較して小さく計測された。この理由として、後方重心時は力が非常に狭い範囲に集中するのに対し、触覚センサは荷重を面ではなく点として計測しているため、この力の集中点がずれていたために、後方重心時の踵に集中した荷重を正確に捉えきれなかった可能性が考えられる。

以上の結果から、センサシューズの母指球に配置した触覚センサで計測される垂直荷重は、COP の前後方向の動き

を推定するための有効な指標となることが示された。また、センサへの荷重伝達が大きく変化するという、ウェアラブルセンサ特有の課題も明らかになった。精度の高い力学的解析を行うためには、センサの構成を再検討する必要がある。解決策として、センサの数を増やすことや、センサの応答する範囲を広げる仕組みを導入すること、あるいは足裏全体の圧力分布を捉えられる面型のセンサを用いるといった改良が考えられる。

6. おわりに

本稿では、スケートボードの技術の数量化のために、ライダーの足裏からボードへ伝わる三軸荷重が計測可能なウェアラブルなシューズを開発した。その有効性を検証するために、フォースプレート上で前後の重心移動を行った際のセンサシューズの三軸荷重とフォースプレートから取得した COP を比較した。実験の結果、センサシューズで計測した足裏の垂直荷重と、フォースプレートで計測した COP の y 成分の（前後方向）との間に、高い相互相関が確認された。このことは、提案したセンサシューズで、ライディングにおける重要な指標である COP を十分に推定できる可能性が高いことを示している。

今回の実験ではセンサの応答を確認するために意図的に COG を静的に前後に変化させた計測を行ったが、本来、スケートボードの上に立つ際には、COG はボードの中央に維持して、まっすぐ立つのが基本である。また、猫背や顎と腹部が前に出ている姿勢では膝が使いにくいいため、そもそもボード上での踵立ちも不安定になる。本提案のセンサシューズでこのようなボード上での不安定な姿勢を検知する仕組みを考案する。また、実際のスケートボードでは動的な COP の移動によって、ボードの車輪の方向をステアリングして進行方向を自由に変え、足裏の剪断力を使ってボードの推進力やブレーキを行っている。提案するセンサシューズを用いてこれらのスケートボードでの行動の分析を進めて、その数量化と新しいトレーニング方法への発展を目指す。

謝辞 本研究の成果の一部は、JSPS 科研費 22H00542、24K21325 の助成を受けたものです。

参考文献

[1] 佐藤 勇一, 長嶺 拓夫, 多田 裕行, "スケートボードの推進メカニズム", 日本機械学会論文集 C 編, vol.72, No.724, pp. 211-217, 2006.

[2] M. Sohga, A. Nozawa, H. Yokoyama, T. Kanashima, M. Okuyama, T. Abe, H. Noma, and T. Azuma: Multimodal Measurement of Proximity and Touch Force by Light-and Strain-sensitive Multifunctional Mems Sensor, IEEE Sensors 2014, pp. 1749-1752, 2014.

[3] T. Sakunou and T. Yamaguchi, "Development of Interactive Sensing System to Support the Acquisition of Skateboarding Skills", 2023 62nd Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers (SICE), 2023.

- [4] 森 友汰, 柳 英克, "Tick-Tack Board: 初学者を対象としたスケートボード上達支援システム", 情報処理学会インタラクシオン 2015, 2015.
- [5] 宮本 賢昇, 街道 一翔, 安藤 潤人, 寺前 達也, 野田 智之, 野間 春生, "靴のインソールに内蔵する mems 触覚センサを用いた足裏反力の分析", シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集, Vol. 2024, p. U00055, 2024.
- [6] 河内 彪博, 安藤 潤人, 野間 春生, 寒川 雅之, "Mems 触覚センサの校正処理手法の実装と評価電気学会研究会資料", pp. 13-16, 2021.