

# 研究終了報告書

## 「間接的な足底触覚提示技術による足底インタラクションの拡張」

研究期間：2017年10月～2021年3月

研究者：橋本 悠希

### 1. 研究のねらい

身体運動・行動に大きく関わる足底に対して触覚情報を重畳することで、運動・作業・遊戯・リハビリなど足を用いたあらゆる体験の「安全」「便利」「健康」「快」を拡張し、活動的で豊かな生活を足元から支えることが本研究のねらいである。

ヒトが二足直立歩行を獲得して以来、地面と唯一接している足底は、姿勢制御のための求心性感覚を収集・発信する基地として極めて重要な役割を持つ。そのため、日常生活のあらゆる場面で足底の触感が用いられており、足部の重要性は広く認識されている。それにもかかわらず、現代社会では裸足で歩かなくなったことや、靴のクッション性の向上から、足底へ伝わる感覚量が減衰している。これにより、足底の機能が十分に発揮されず、また機能の低下を引き起こすことで、身体運動・行動に悪影響を及ぼすことが懸念されている。しかしながら、現在の生活様式を変えることは現実的ではない。そのため、生活様式を崩さず、足底インタラクション機会を増加させる技術の開発は、生活の質(Quality of Life)の向上にとって極めて重要な課題である。

本研究では、日常生活の中で刻々と変化する身体運動・行動に対応した足底触覚フィードバックによってヒトの活動を支援・拡張するため、足背側からの振動刺激によって足底側に触覚を知覚するという錯触覚提示手法を基盤とした間接的な足底触覚提示手法を新たに確立させる。さらに、本手法に最適化されたソックス型フットウェアを開発し、身体運動・行動の拡張を実践する。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

本研究は、足背側からの振動刺激によって足底側に触覚を知覚するという錯触覚提示手法を基盤としている。この手法の利点は主に3点ある。装置が地面や体重からの衝撃を直接受けず簡素化可能である。振動刺激が厚い足底の皮膚を介する必要が無く省電力化が容易になる。なにより通常の運動や歩き心地を妨げず、快適性が保たれる。よって、足底を直接刺激する従来手法と比較して、実用性に優れていると言える。本手法を用いることで、靴やスリッパ、ソックスに組み込んで常に足底を受けることが可能な環境の実現が期待でき、上述した生活の質向上に大きく貢献できると考えられる。

本研究期間で取り組んだ課題および成果は以下の通りである。

#### 1. 確実な技術にする

足爪刺激手法の錯触覚生起条件を同定すると共に、錯覚の知覚強度を増強するための手法を提案し、有効性を確認した。また、爪以外の部位に振動提示を行うことで、足爪と同様の錯触覚が生起することを確認し、その条件を同定した。これにより、間接的な足底触覚提示手法の安定的な提示、効率化、広範囲化を実現した。

## 2. 有効な技術にする

本手法による足底触覚提示が身体運動に及ぼす影響について検証した。足踏みおよび歩行の3種類について行い、それぞれ行い、重心動揺の変動係数が減少する等、身体バランスの改善効果が見られた。また、歩容も変化したことから、意識下で歩容に介入できる可能性が示唆された。

## 3. 使える技術にする

本手法による足底触覚提示専用の回路モジュールを設計・製作し、足首や靴等に取り付けても違和感のないサイズ・重量を実現した。また、スリッパ型、ソックスカバー型の試作機を作成し、学会や各種イベントで多くのデモ展示を行い、使用感を調査した。

## (2) 詳細

### 1. 確実な技術にする

#### ① 足底錯触覚の生起条件・最適値の同定

これまで未解明だった錯触覚の詳細な生起条件を求めた。荷重の有無・範囲、振動部位・強度においてそれぞれ錯触覚の生起確率を検証した結果、母趾爪上において振動強度 0.5~3.0G(0.5~1.0G が最適)、荷重条件 300~2000gf(700~1400gf が最適)であることが明らかとなった。これは、歩行時における立脚期間の7割で錯触覚提示が可能であることを示しており、また一般的な運動においても十分な刺激の知覚時間があることが分かった。

#### ② 微弱振動付与による錯触覚知覚の強化

錯触覚生起確率向上のため、微弱振動を足根管刺に提示した。足根管刺激手法は確率共鳴理論に基づいており、足底全体の触覚感度が向上することが示唆されている。このため、足爪刺激手法と組み合わせることで、錯触覚提示においても生起確率の向上が期待できる。検証した結果、足根管に微弱刺激を提示し(図1)、錯触覚生起確率が約10%向上することを示した(図2)。



図1. ピエゾ素子を用いた足根管への微弱刺激

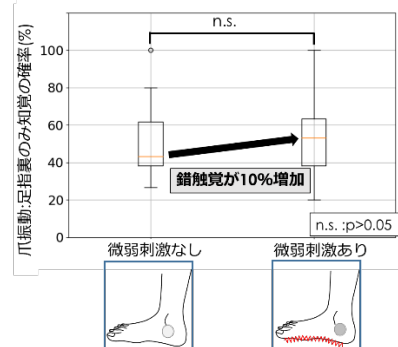


図2. 実験結果

#### ③ 錯触覚の知覚範囲拡大

足指のみに設置していた振動子を、機会受容器が密集している趾付け根部分である第一および第五中足骨にも設置し(図3)、錯触覚の生起可能性を検証した。結果、歩行時における立脚中の足に強度 2.0G 以上の振動提示を行うことで錯触覚を提示可能であることが分かった(図4)。また、荷重条件を検証した結果、歩行時における立脚期間の9割以上で錯触覚を提示

可能であることも判明し、本刺激手法の有効性が高いことを示した。

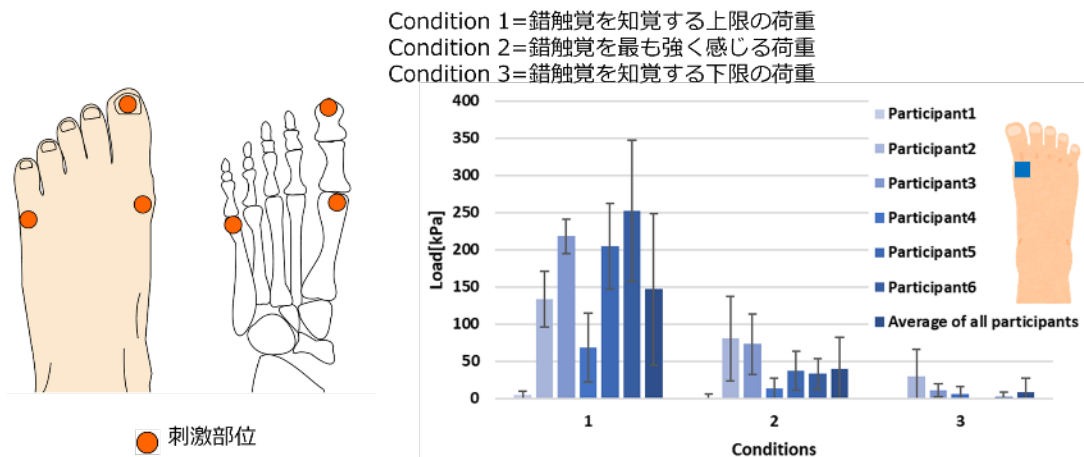


図3. 新たな刺激部位

図4. 錯触覚を生起する荷重範囲(第一中足骨)

以上から、ユーザに対して足底の広範囲に、確実に錯触覚提示を行うための知見を集めることができた。

## 2. 有効な技術にする

### ①足踏み動作および歩行時における重心動揺・歩容の変化

足底錯触覚刺激による足踏み時の重心動揺への影響を検証した。その結果、刺激が無い状態だと重心動揺のばらつきが大きな群に対して、重心動揺値およびばらつきが小さくなった(図5左)。また、歩行時における錯触覚刺激の影響をモーションキャプチャおよびフォースプレートで検証した。その結果、足踏み時と同様に刺激無しでは重心動揺のばらつきが大きな群に対してばらつきが抑えられた(図5右)。また、歩行速度や立脚時間にも変化があり、歩容への影響も見られた。

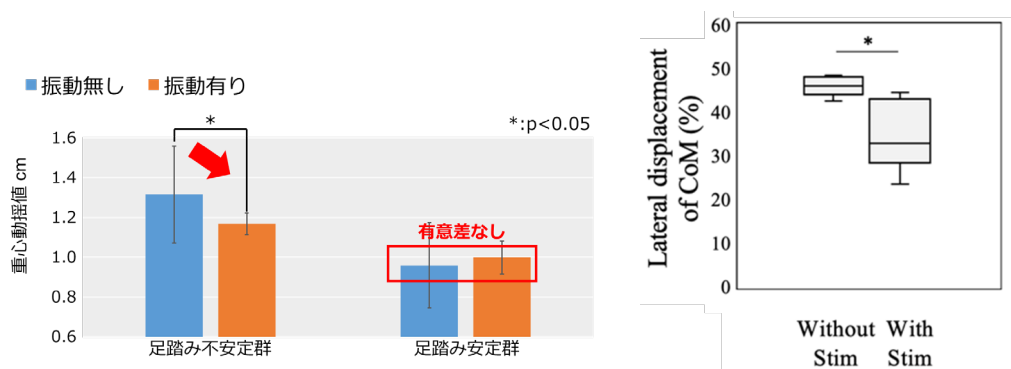


図5. 重心動揺の比較(左:足踏み, 右:歩行)

以上から、本手法によって重心動揺の安定化に寄与することから、歩行による転倒予防や疲労低減等の効果が期待できることが示唆された。また、歩容に対して介入できる可能性があることが分かったことから、例えば氷上やぬかるみ等の転倒リスクが高い地面に対する安全な歩き方となるよう意識下で誘導するなど、ユーザの状況に応じた最適な歩容に調整する

アプリケーション実現が期待できる。

### 3. 使える技術にする

#### ①ウェアラブルな触覚デバイスの開発

身に付け続けることが可能な触覚フットウェアを目指し、小型・軽量・長時間動作可能なプロトタイプを試作を行った。初期型は市販されている靴へのアタッチメントタイプで、単純な振動パターンのみ出力可能(図 6①)であったが、スリッパに組み込んだタイプでは複雑な振動パターンが出力可能となり(図 6②)、その後回路モジュールが小型化され、無線通信にも対応した(図 6③)。PC やスマートフォンとの連携も可能である。



図 6. 試作したプロトタイプの推移

また、ソックスや素足に直接装着するタイプのフットカバー型デバイスも併せて試作した(図 7)。本デバイスでは、足首にデバイスを巻き付けるという手間があるが、靴を履かない場所での触覚フィードバックが可能である他、デバイスを装着したまま既存の靴を履くこともでき、汎用性が高い。



図 7. フットカバー型デバイス

#### ②使用感，錯触覚の知覚状況の調査

国内外の学会(WorldHaptics, 日本バーチャルリアリティ学会大会, SICE SI 等)や各種イベントでデモ展示を行い、プロトタイプの使用感や触覚がどのように知覚されているのかを調査した。錯触覚の知覚率は、改良を重ねるごとに向上して最終的にほぼ全員となった。装置の使用感、装着時に一部補助が必要だが、装着後は違和感なく体験可能であることが分かった。テクスチャ波形の提示による質感については、ユーザによって感じ方に大きな差はあったが、地面の踏み心地の変化は十分に体験することが出来た。また、地面を意識するようになったという感想が多く聞かれたことから、足元に注目させる場合等に質感提示の変化が有効であることが示唆された。

以上から、錯触覚をほぼ全ての人が知覚可能であり、日常使いが視野に入るレベルの使用

感のデバイスを作り上げることが出来た。また、躓き等を予防する足元への注意というアプリケーション実現への可能性が示唆された。

#### 足底以外への展開

##### ①手先の巧緻性向上手法

本研究で行った微弱振動付与を参考に、爪上からの微弱振動刺激を用いて手先の巧緻性を向上させる手法に取り組んだ。親指と人差し指の爪上に小型振動子を取り付け(図 7)、知覚閾値付近のノイズ振動を提示しながら巧緻性評価用タスクを行ったところ、振動有の場合で優位にタスク完了時間が短縮した(図 8)。

##### ②杖型錯覚提示デバイスによる地面感覚の重畳

杖から伝わる振動情報に別のテクスチャ波形を重畳することで地面質感を変化させる試みを行った。加速度センサによって杖の衝突を判別し、時間遅れ 100ms 以下で振動提示を行ったところ、地面の質感が変化したように知覚される確率が高くなった。また、テクスチャ波形の違いも識別可能であることが分かった。

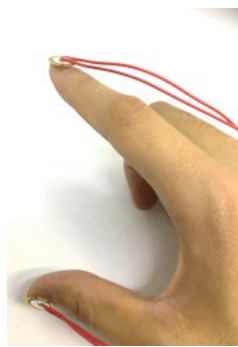


図 7. 指爪上に振動子を取り付けた様子

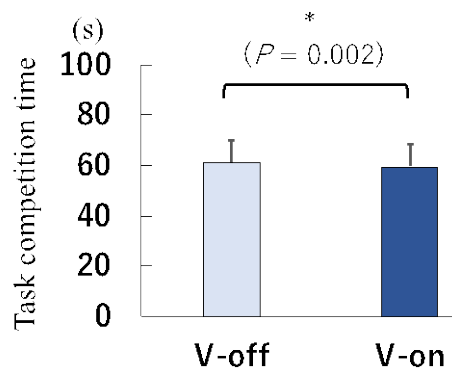


図 8. タスク完了時間の比較

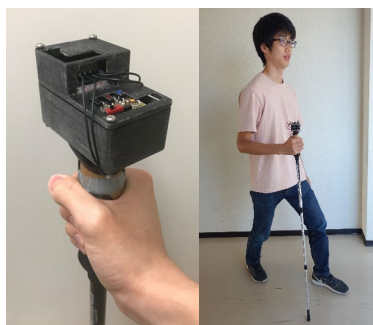


図 9. タスク完了時間の比較

以上から、本研究を基にして複数の派生研究が生まれた。巧緻性向上手法は、高度な指先タスクへのトレーニング支援や指先感覚が衰えた高齢者へのサポートが期待できる。杖デバイスは、本研究と合わせて使用することでリアリティの向上や歩容への介入強化が期待できる。



### 3. 今後の展開

プロトタイプをより洗練させ、長時間の使用に耐えるものにしていく。また、歩行について、歩容の変化と振動パタンの関係を明らかにすることで、意図した歩容に変容させるような手法を確立する。また、研究・開発と並行して社会実装も大きく進めていく。本研究を通して連携した研究機関・企業に対して検証用プロトタイプを貸し出し、日常生活、運動、疾患等に対する本手法の有効な使用方法を探索し、多くの分野で“役に立つ”ことを示していくことで、人間活動を活発化させる基盤技術として発展させたい。

### 4. 自己評価

本研究で取り組んだ課題である「1. 確実な技術にする」「2. 有効な技術にする」「3. 使える技術にする」についてそれぞれ有意義な成果が得られた。また、本研究の成果を基にした派生研究が生まれており、社会・経済への波及効果が様々な形で創出できる可能性が見込まれる。

課題を個別に見てみると「1. 確実な技術にする」については概ね当初の計画通り進めることができた。「2. 有効な技術にする」については、重心動揺および歩容という点に焦点を絞って取り組んだが、その過程で今回検証し切れていない面白い結果が得られ、また共同研究で本手法の応用に関して様々な提案を受けたことから、取り組む余地が多分に残った。さきがけ期間中に取り組み領域内で議論したい内容もあったが、間に合わなかったことが心残りである。「3. 使える技術にする」では、研究のためのプロトタイプという考えから脱却し、実用的なデバイスの実現を目指した。実用化可能なデバイスとするためには個人では手に負えない技術的な問題が数多く出てきたため、多くの研究機関や企業に相談をして回った。これは、出口を見据えた研究活動を行うというさきがけ研究だからこそ経験できたことだと思う。おかげで、日常使いとするためにはハードルがまだあるが、解決できる見込みがある程度立ったことは収穫であった。しかしながら、モニターテスト等が出来ず具体的なデバイスの検証が実施できなかったことが悔やまれる。

本研究を通じた共同研究や企業との連携等で、足底触覚フィードバックに対する多能面のニーズや期待があると分かった一方、最終年度に予定していた多くの検証項目がコロナ禍の影響で中止となってしまった影響もあり、今回の成果ではまだそのニーズに答えられる段階に至っていない。今後は身体運動への様々な効果の検証を主軸とした継続的な活動を行うことでニーズに答えられる技術に昇華させ、社会に広く還元できるものにしていく所存である。

### 5. 主な研究成果リスト

#### (1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:2件(他, 投稿中 1件)

1. Haruki Toda, Yuki Hashimoto and Mitsunori Tada. Vibrotactile Stimulation of Nail of Hallux during Walking: Effect on Center-of-Mass Movement in Healthy Young Adults. Applied sciences, 2020, 10(13), 4562

母趾爪上への振動提示が歩行中の重心動揺や歩容に与える影響を検証した。その結果、振動刺激は歩行速度、スタンス時間、横方向の重心動揺のばらつきに影響を与えることが確認された。特に変動の大きい被験者では、横方向の重心動揺の変動係数が低下した。このことから、通常歩行時に重心動揺のばらつきが大きい若年健常者では、母趾爪上を刺激することで、重心動揺のばらつきが改善することが示唆された。

2. 濱崎愛, 唐島卿, 横山哲大, 橋本悠希. 爪上振動刺激が触覚感度及び巧緻性に与える影響. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 第 25 巻第 4 号, p.326-333, 2020.

指の巧緻性を向上させるため、爪上に振動刺激を与えることで確率共鳴現象を引き起こす手法を提案し、指の触覚感度及び巧緻性に与える影響を検証した。まず、爪上振動の有無による粗さ弁別精度への影響を検証し、閾値程度の強度で振動刺激を与えると弁別精度が向上した。また、爪上振動の有無による手作業の作業時間を比較し、振動有では作業時間の短縮が認められた。以上により、提案手法は、指の触覚感度及び巧緻性の向上に効果がある可能性が示唆された。

## (2)特許出願

研究期間累積件数:0 件

## (3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

### 【学会発表】

1. Yutaro Iijima, Masayuki Uchida, Taku Hachisu, Yuki Hashimoto: Enhancement of range of creation of foot sole tactile illusion by vibration stimulation of the foot instep, 2019 IEEE World Haptics Conference (WHC), Tokyo, Japan, 9-12 July 2019
2. Xuqing Tang, Yuki Hashimoto: Improved finger dexterity via vibration applied to fingernails, IEEE World Haptics Conference 2019, Tokyo, Japan, 9-12 July 2019.
3. 中村, 橋本: 振動パターンが足裏錯触覚生起の時間的推移に与える影響, 第 25 回日本バーチャルリアリティ学会, 1D1-1, 2020/09/16-18
4. 内田, 蜂須, 橋本: 足爪振動による足指裏への錯触覚現象の検証, 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 14A-5, 2018/09/19-21.
5. 飯島, 内田, 蜂須, 橋本: 第五中足骨先端上刺激による足底触覚提示積の拡大, 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 14A-4, 2018/09/19-21.
6. 橋本, 内田: 足爪振動刺激による間接的な足底触覚提示手法, 第 62 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI' 18), 222-4, 2018/05/16-18.

### 【著作物】

1. 橋本: 錯覚を利用した触覚インタフェース, 電子情報通信学会誌, Vol.104 No.2, pp156-161, 2021/2/.
2. 橋本: 足底への錯触覚提示手法, 自動車技術, Vol.73, No.12, pp30-35, 2019.
3. 橋本: 足爪上への振動刺激による足底触覚提示手法, VR/AR技術の開発動向と最新応用事例, 技術情報協会, pp155-164, 2018/2/28.

#### 【招待講演】

1. 橋本: ちょっと変わった触覚提示技術, JASE ナイトセミナー, 2019/7/15.
2. 橋本: 錯触覚提示手法を用いた歩行動作への介入, 人工知能研究センター第 33 回 AI セミナー, 2019/5/14.
3. 橋本: 錯触覚提示手法による歩行動作への介入, PRISM シンポジウム 2019, 2019/3/4.

#### 【メディア】

1. 橋本: 歩くことがもっとたのしくなる!?, J-WAVE INNOVATION WORLD FESTA 2020, 2020/10/17-18.
2. 橋本: 錯覚が歩行を助ける! 足の裏からの振動と錯覚させる靴で「歩く」を手に入れる, みらいぷラス, 2020/8/20.