

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

(新型コロナウイルス感染症の影響を受け2021年9月まで延長)

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.

追加支援【新型コロナ】

外出制限による長時間座位状態を強いられることによる下肢の筋力・運動能力低下を予防するため, 提案手法を座位時に使用することで, 運動感覚を提示することを試みた. また, 大腿部に対する微弱刺激により, 膝関節の調整能力強化を行った.

新型コロナウイルス感染症の影響を受け6ヵ月間研究機関を延長し, 触覚フットウェアの改良, 足底触覚刺激による長時間歩行への影響の検証実験, 提案手法の応用展開に向けたアプリケーションの開発, 追加支援課題における追加実験を実施した.

(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).

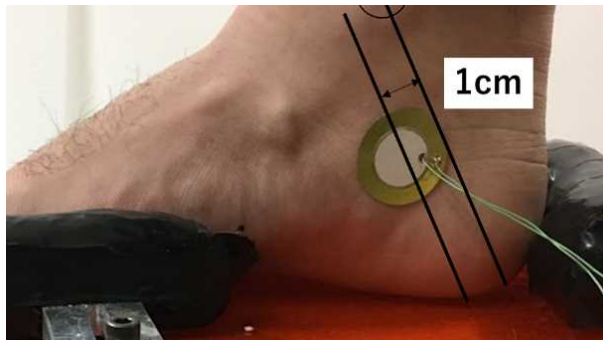


図1. ピエゾ素子を用いた足根管への微弱刺激

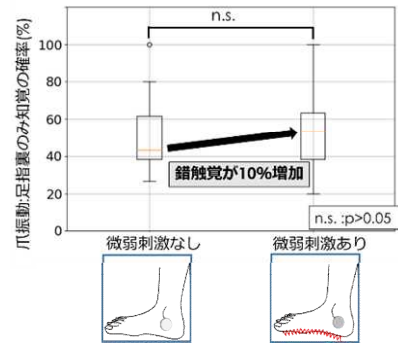


図2. 実験結果

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。

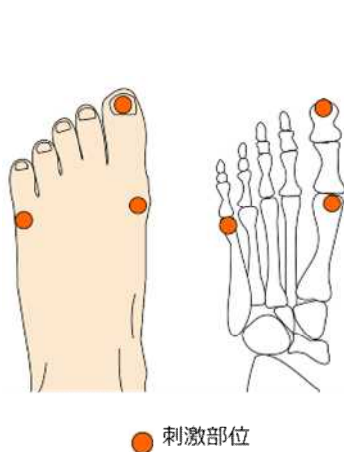


図3. 新たな刺激部位

Condition 1=錯触覚を知覚する上限の荷重
Condition 2=錯触覚を最も強く感じる荷重
Condition 3=錯触覚を知覚する下限の荷重

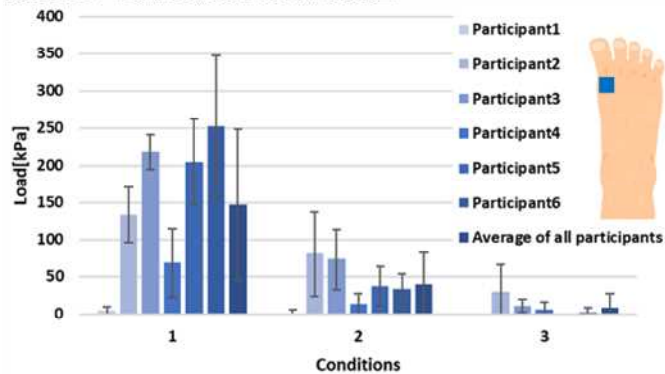


図4. 錯触覚を生起する荷重範囲(第一中足骨)

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。

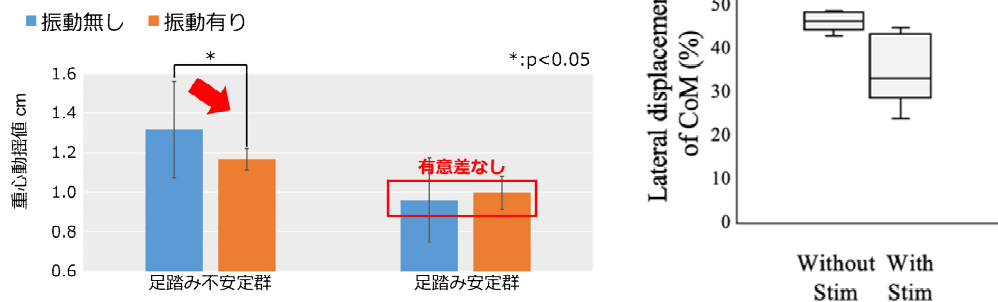


図5. 重心動揺の比較(左:足踏み, 右:歩行)

②足底触覚刺激による長時間歩行への影響の検証実験

トレッドミルを用いた連続歩行に対する提案手法の影響を検証した。その結果、歩幅の変動率と重心動揺の偏りについて顕著な改善が見られた。このことから、長時間歩行における歩行支援にも使用可能であることが示唆された。

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、歩行によけ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。また、本手法は重心が不安定な人に対する効果が高かったことから、高齢者、身体障がい者、フレイル状態の人など対象者を広げることで、福祉への展開も可能だと考えられる。

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

身に着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。立脚を検出する圧電センサはふっとカバーに縫い付けて一体化を図り、洗濯も可能とした。



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。装置の使用感は、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)。

また、微弱振動刺激の効果をさらに向上させるため、微弱振動による神経活動電位を他部位へ波及させる手法の実現可能性について検討した。感覚神経活動電位の波及現象に着目し、正中神経(中指)・尺骨神経(小指)間について、微弱振動の有無による試験片検出テスト(図 9)を実施したところ、小指に微弱振動を提示した場合に中指の検出率が向上した(図 10)。

②杖型錯触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(図 11)。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

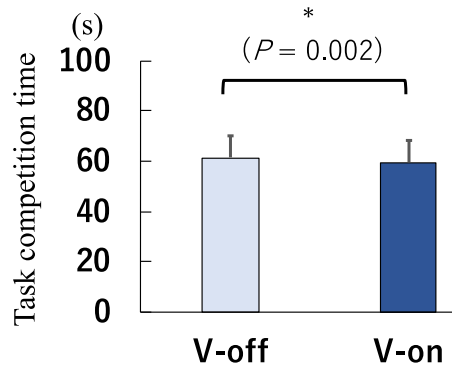


図 8. タスク完了時間の比較



図 9. 小指に微弱振動提示をしている様子

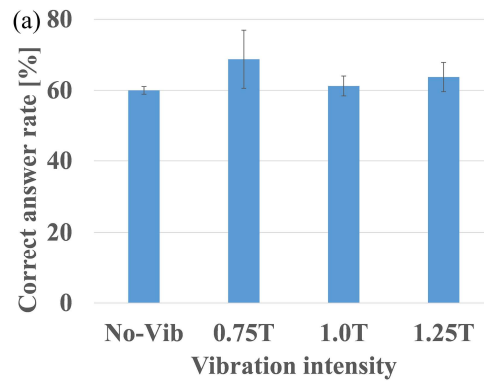


図 10. 触覚感度の比較



図 11. 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度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。

追加支援【新型コロナ】

①座位時における運動感覚の提示

座位時に提案手法による歩行を模した振動刺激を提示することで歩行感覚を知覚させること

に取り組んだ。定常刺激, ランダム刺激, 歩行刺激の 3 条件を比較した結果, 歩行感覚の評価は歩行を模した刺激が最も高かった(図 12 左)。また, 歩行をしていない場合でも, 歩行刺激を爪上に提示することで時間と共に錯触覚が生起されることが分かった(図 12 右)。

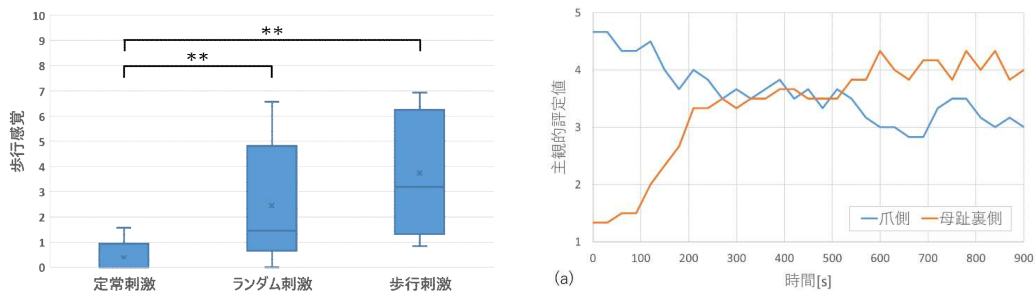


図 12. 左: 歩行感覚の評価 右: 歩行刺激における知覚の時間変化

さらに, 振動波形によって生じる錯触覚生起および運動感覚知覚への影響について検証した。主観的な歩行感覚が向上するための振動波形条件をある程度同定することができた。以上から, これまでの検証結果である歩行周期の最適化と本結果を組み合わせた触覚提示によって, 座位時においても歩行感覚が強く生起させることが可能だと考えられる。ただし, 本実験時, 足の筋電も併せて計測したが変化は僅かであり, 筋運動の誘発には至らなかった。今後, 運動感覚を生起する振動条件の最適化や, 聴覚や視覚と組み合わせたマルチモーダルな運動感覚提示により, 筋運動の誘発が可能になると考えられる。

②大腿部への微弱振動刺激による膝関節調整能力の強化

大腿部に微弱振動を提示し, 膝関節の運動能力を向上させる手法に取り組んだ。座位状態で目標角へ膝を伸展させ, その精度を比較した結果, 振動強度を適切に設定することで精度が向上した(図 13 左)。また, 座位からの規律動作時における左右の重心動揺を比較した結果, 特定の振動強度で動揺が低減した(図 13 右)。

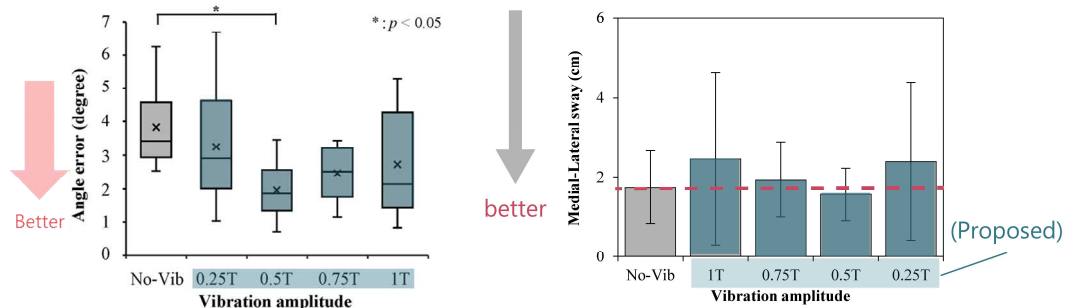


図 13. 左: 関節位置覚の精度 右: 起立動作時の左右の重心動揺

以上から, 提案手法では, 座位時においても歩行を模した刺激パターンによるバーチャルな運動体験が可能であることが示唆された。また, 大腿部への微弱刺激により, 膝関節の感覚の衰えを抑えることができる可能性も示唆された。外出制限で運動不足が指摘されている中, 本試みによって運動の感覚的衰えを低減・補助することが期待できる。

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 (in press)

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.

【追加支援(新型コロナ)に関する成果】

1. 大木, 橋本: 大腿部への微弱振動印加による膝関節位置覚への影響, 第 26 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2021/9/12-14
2. Tetta Yokoyama, Yuki Hashimoto: Effect on Haptic Sensitivity of the Middle Finger of Vibrations Applied to the Little Fingernails, 2021 IEEE World Haptics Conference (WHC), Montreal, Canada (Virtual), 6-9 July 2021.
3. 大木, 橋本: 大腿部への微弱振動印加による体性感覚機能への影響, 第 26 回ハプティクス研究会, 2021/03/08-09

JST_1112083_17940613_2021_Hashimoto_PER.pdf