

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K17926

研究課題名（和文）身体の接触の拡張：皮膚の振動伝搬特性と錯覚現象を利用した振動位置覚制御論の確立

研究課題名（英文）Augmentation of Interpersonal Touch Interactions: Establishing Vibrotactile Localization Control Theory Utilizing Propagation Characteristics of Skin Waves and Sensory Illusions

研究代表者

蜂須 拓 (Hachisu, Taku)

筑波大学・システム情報系・助教

研究者番号：20810170

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本課題では、ブレスレット型デバイスを装着した二者の手指による接触を対象に、手首から手指への振動伝搬特性と振動位置覚に関する錯覚現象を解析した。まず、手首に提示された振動の手指にかけての伝搬を加速度センサにより計測し、振動伝搬特性を明らかにした。また、接触相手の伝搬した振動に対する知覚強度を計測し、加速度の二乗平均平方根に対数比例することを明らかにした。次に、従来報告されてきた個人内で生じる振動位置錯覚現象が握手中の二者の手指間で生じるか検証した。その結果、両者の手首への振動刺激の強度比に応じた位置に振動感覚が生じることが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、皮膚の振動伝搬特性と振動位置覚に関する錯覚現象を明らかにし、触覚提示技術の基礎理論を確立した点にある。これにより、従来の触覚研究に新たな知見を提供し、触覚提示技術の発展に寄与する。特に、この二者間の物理的な身体接触に対する触覚提示技術は未開拓領域であり、人の触覚メカニズムの理解を深める重要な成果である。社会的意義としては、本研究成果はエンターテインメントやコミュニケーション技術の分野に応用可能である。例えば、複数名が参加するバーチャルリアリティや発達支援における触覚フィードバックの質を向上させることで印象的な体験を創出し、対人交流の促進に貢献する可能性がある。

研究成果の概要（英文）：This study analyzed the propagation characteristics of vibrations from the wrist to the fingers and the sensory illusion related to vibrotactile localization in two individuals wearing bracelet-type devices during hand contact. First, the propagation of vibrations from the wrist to the fingers was characterized using accelerometers. Additionally, it was found that the perceived intensity by the contact partner was logarithmically proportional to the root mean square of the acceleration. Next, the vibrotactile localization illusion, previously reported to occur within individuals, was found to occur between individuals who held each other's hands. The perceived location of the vibrations can be controlled by the intensity ratio of the vibrations applied to both wrists.

研究分野：ハプティクス

キーワード：身体接触 触覚 振動 錯覚現象 振動伝搬 ハプティクス ヒューマンコンピュータインタラクション

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

近年、コンピュータと人の対話を豊かにするために、機械から皮膚を刺激することで単調な記号的提示から空間性(方向、形状)、質感(つるつる、ざらざら)等の複雑な情報を提示する触覚提示手法が盛んに研究開発されている。特にビデオゲーム等のエンタテインメントと相性が良く、プレイヤーにバーチャル世界で生じている現象を文字通り肌で感じさせ、従来触れられなかったものに触れるようにする体験は多くの感動を与えている。Sherrick (The Psychology of Touch 1991) は著書で様々な情報を表現力豊かに効率良く提示可能な触覚提示手法の確立が触覚研究者の挑戦であると述べている。

本研究では、人と人の対話を豊かにするために、握手等の身体接触に対して触覚を提示することで身体接触の感触を拡張し、身体接触にエンタテインメント性を付加することに取り組んできた。日常的な身体接触を対象とする際、日常的に装着可能なデバイスからの刺激の提示が望ましい。ここでは状況として振動子を内蔵したブレスレット型デバイスを装着し手指を接触している二者間を想定する。サイズの制約から表現力に乏しい小型な振動子しか搭載できないブレスレット型デバイスにおいては、刺激は装着部位の手首への単調な刺激に限定されてしまう。このような制約のもと、情報を表現力豊かに効率良く提示するための振動刺激の設計方法が求められる。

2. 研究の目的

本研究では、二者間の手指による身体接触を対象に、皮膚の振動伝搬特性と振動位置覚に関する錯覚現象を利用し、物理的な振動刺激部位(手首)から指先の任意の位置に振動感覚を提示する方法論を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では2つの研究課題に取り組んだ。

(1) 皮膚の振動伝搬特性の計測

皮膚は弾性体であるため、手首に提示された振動は弾性波として手指へ、そして接触相手へ伝搬する。この振動の伝搬特性は主に振動周波数に依存し、一般的に低周波であるほど強度を保ちつつ、長い距離を伝搬することが知られている(図1)。本課題では、手首から手指への機械的な伝搬特性を計測し、さらに伝搬した振動に対する接触相手の知覚強度を計測して両者の対応関係を解析することで、効率的に接触相手に振動を伝搬する方法を明らかにする。

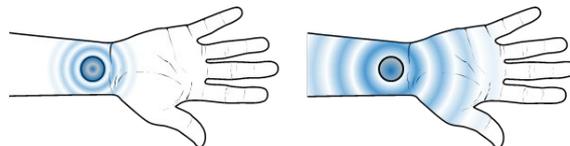


図1 振動周波数に対する皮膚の振動伝搬特性の模式図：低周波であるほど強度を保ちつつ、長い距離を伝搬する。

手首から手指への機械的な伝搬特性を計測に関して、実験システムを振動子、参加者の手、加速度センサアレイ、コンピュータより構成した(図4A)。振動子は参加者の手首に固定され、コンピュータからの信号により皮膚を法線方向または接線方向に50、100、または200 Hzの正弦波で駆動する。なお、これらの周波数は、人が触覚的に知覚しやすい帯域である。加速度センサアレイは84個のデジタル三軸加速度センサから構成され、参加者の手指に固定され、加速度をおよそ1 kspssで計測し、コンピュータに取り込む。

伝搬した振動に対する接触相手の知覚強度を計測に関して、上記のシステムにおける参加者の手を実験者の手に、加速度センサの代わりに参加者の指先に変更することで、接触者(=参加者)の伝搬した振動に対する知覚強度を計測した。計測にはマグニチュード推定法を用い、知覚強度を数値化した。本実験には12名が参加した。また、上記の機械計測によって得られた伝搬した振動の加速度と知覚強度に対して相関解析を行った。

(2) 二者間で生じる振動位置錯覚現象の検証

振動の物理的な刺激位置と振動を感じる位置(位置覚)の間に矛盾が生じる錯覚現象としてファントムセンセーションが知られている。ファントムセンセーションとは、皮膚上の強度の等しい2点の同時の振動刺激に対して位置覚が刺激位置の2点でなく中間の1点に生じる錯覚である(図2左)。また、振動刺激に強度差がある場合は、その比率の大きい方に位置覚が移動する。従来のファントムセンセーションに関する研究は個人内の皮膚で生じることが報告されてきた。本課題では、手指を接触中の二者間でファントムセンセーションが生じるかを検証する(図2右)。



図2 ファントムセンセーション：左)従来の個人内で生じるファントムセンセーション。皮膚上の強度の等しい2点の同時の振動刺激に対して刺激位置の2点でなく中間の1点に振動が知覚される錯覚；右)本課題で検証する個人間で生じるファントムセンセーション。

実験システムを 1 対のブレスレット型デバイス（以降、デバイス 1、デバイス 2 と呼ぶ）およびコンピュータより構成した。デバイス 1 を参加者に、デバイス 2 を実験者に装着させ、両者を握手するように手を握り合わせた。コンピュータからの信号によりブレスレット型デバイスを法線方向に 50, 100, または 200 Hz の正弦波で駆動する。それぞれの周波数に対して、次のような条件の加速度振幅を 7 水準設定した：デバイス 1 の提示可能な加速度振幅を A_{max} としたとき、 $n \times A_{max} / 6$ とする（ただし、 $n=0, 1, 2, \dots, 6$ ）；デバイス 1 とデバイス 2 の振幅の合計値を A_{max} とする。個人間のファントムセンセーションと同様の傾向を示すのであれば、図 3 に示すように n に応じた位置に振動感覚が生じる。参加者に対して n を伏せた状態で振動刺激を提示し、振動を感じた位置を図 3 と同様の図を用いて 7 段階で回答させた。本実験には 12 名が参加した。

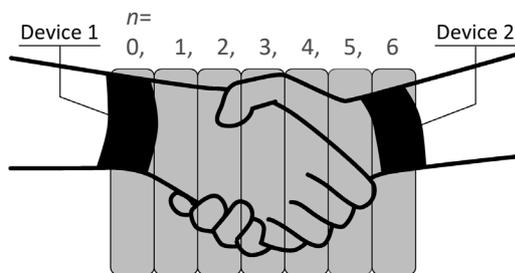


図 3 予想される n と位置覚の関係

4. 研究成果

(1) 皮膚の振動伝搬特性の計測

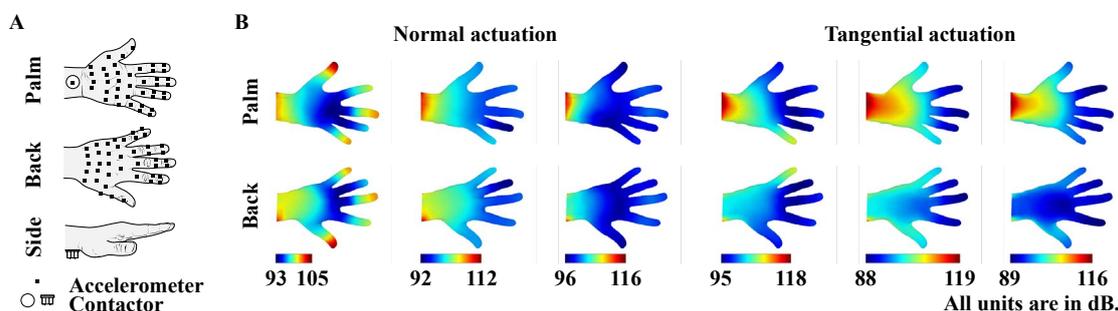


図 4 皮膚を伝搬する振動の加速度の計測：A) 手首への振動提示時に手指に伝搬する振動の加速度を計測；B) 手首から手指にかけての機械的な振動伝搬。振動子の駆動方向および周波数に対する振動伝搬特性を示す。

まず、計測した加速度データに対してフィルタリング処理等を行った後、二乗平均平方根 (RMS) を求めた。次に、線形補間を用いて 84 点の RMS からおよそ 40,000 点から構成される手の 3 次元モデルの各頂点の RMS を求めた。Jet カラーマップを用いてレンダリングした手首から手指にかけての振動伝搬を示す手の 3 次元モデルを図 4B に示す。位置による強度差はあるものの、いずれの振動条件においても人の閾値を上回る加速度が観察されたことから、接触者が十分に知覚可能な強度の振動が伝搬することが明らかとなった。法線方向に駆動した場合、50 Hz の振動は手首から掌にかけて減衰し、指先で増幅している。これは 2 つ以上の振動モードがあることに由来すると考えられる。一方で、100 Hz 以上では手首付近でより大きい振動が観察される一方で、距離による減衰が大きく、指先での増幅も見られなかった。次に接線方向に駆動した場合、掌で法線方向よりも大きい加速度が観察された。一方で、指先での増幅や、甲側への伝搬は小さかった。周波数と距離による減衰は法線方向と同様の傾向が観られた。

伝搬した振動に対する接触相手の知覚強度を計測したところ、強度に差はあるものの、手指のいずれの部位においても接触相手も振動を知覚できることが明らかになった。さらに、この知覚強度は伝搬した加速度の RMS と対数比例することが統計解析より認められた。本結果は、伝搬した振動の加速度の RMS より接触相手の知覚強度の推定が可能であることを示す。また、握手をするように手指全体が接触している状態では、周波数が低いほど手全体が振動しているように感じられ（振動源の位置が不鮮明）、高いほど局所的な振動を感じられることが明らかとなった。

(2) 二者間で生じる振動位置錯覚現象の検証

周波数 200 Hz の検証結果を図 5 に示す。行は提示した n 、列は参加者が回答した位置を示す。対角線のセルが提示した n と参加者の位置覚が図 3 のように一致したことを示す。また、各セルは参加者の回答数を示し、色が濃いほど回答が集中していることを示す。概ね、対角線上に回答が集中していることから個人間でのファントムセンセーションの生起が確認された。より低い周波数でも、回答のばらつきが若干大きくなるものの、同様の傾向が観られた。回答のばらつきが大きくなった原因は、前述のとおり、周波数が低いほど手全体が振動しているように感じられ（振動源の位置が不鮮明）、高いほど局所的な振動を感じられる

		Response						
		0	1	2	3	4	5	6
Target location	0	30	47	25	11	5	2	0
	1	30	48	23	11	5	3	0
	2	17	37	26	18	14	8	0
	3	11	25	26	24	16	14	4
	4	5	19	20	22	21	26	7
	5	2	6	13	23	21	37	18
	6	0	4	2	23	27	43	21
		Participants side			Experimenter side			

図 5 n と生起した位置覚の関係

ためと考えられる。本結果は 2 つのデバイスが提示する振動の加速度振幅の比によって手首から指先の一次元の任意の位置に振動感覚を提示することが可能であることを示す。

(3) その他の発展的内容

上記の成果の発展的内容として、フィールド実験に向けた振動提示の時間解像度の向上のためのブレスレット型デバイス間の通信精度の向上および振動提示方法の人と植物の接触への応用を試みた。

前者に関して、上記の研究課題では再現性を重視した実験室実験として振動刺激の生成には大型の振動子を用い、コンピュータで精密に制御された振動刺激を用いた。一方で、日常の身体接触を対象とした場合、一対のブレスレット型デバイスに内蔵したマイクロコントローラより二つのデバイスの振動提示タイミングを同期させる必要がある。この同期のために人体を伝送路としてデバイス間で通信する人体通信技術を採用し、その通信精度向上のための電極設計を行った。

後者に関して、人同士の接触にエンタテインメント性を付加することと同様に、人と植物の接触を対象とした技術転用が可能であるかを検証した。試作システムを構築し、植木鉢に内蔵した振動子から植物の根、幹、葉柄、葉に振動を伝搬させることで葉に接触した人に振動を知覚させることが可能であることを予備的に確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Hachisu Taku, Reardon Gregory, Shao Yitian, Suzuki Kenji, Visell Yon	4. 巻 Early Access
2. 論文標題 Interpersonal Transmission of Vibrotactile Feedback Via Smart Bracelets: Mechanics and Perception	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Haptics	6. 最初と最後の頁 1~13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TOH.2023.3327394	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 海老名 健太、蜂須 拓	4. 巻 28
2. 論文標題 ファントムセンセーションを用いた二者間における任意位置振動提示手法	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本バーチャルリアリティ学会論文誌	6. 最初と最後の頁 303~310
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18974/tvrsj.28.4_303	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 森 理樹、蜂須 拓	4. 巻 28
2. 論文標題 身体接触計測のための電流伝送機能を有する導電布製リストバンドの設計	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本バーチャルリアリティ学会論文誌	6. 最初と最後の頁 295~302
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18974/tvrsj.28.4_295	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kenta Ebina, Taku Hachisu
2. 発表標題 Interpersonal Vibrotactile Phantom Sensation between Hands via Actuated Bracelets
3. 学会等名 IEEE World Haptics Conference（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 海老名健太, 蜂須拓
2. 発表標題 身体の物理的接触を拡張するウェアラブルデバイス (第11報): ファントムセンセーションを用いた任意位置振動提示手法
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会ハプティクス研究会第29回研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 海老名健太, 蜂須拓
2. 発表標題 身体の物理的接触を拡張するウェアラブルデバイス (第15報): 身体接触をインタフェースとするプレスレット型ゲームコントローラ的设计
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 森 理樹, 蜂須 拓
2. 発表標題 身体の物理的接触を拡張するウェアラブルデバイス (第16報): 導電布製電極の配置と電流方式人体通信の信号雑音比の関係
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 海老名健太, 蜂須拓
2. 発表標題 身体の物理的接触を拡張するウェアラブルデバイス (第13報): マルチプレイヤービデオゲームへの応用検討
3. 学会等名 第28回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森 理樹、蜂須 拓
2. 発表標題 身体の物理的接触を拡張するウェアラブルデバイス（第14報）：導電布製電極の配置に対する電流伝送機能の基礎評価
3. 学会等名 第28回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森理樹，蜂須拓
2. 発表標題 身体の物理的接触を拡張するウェアラブルデバイス（第12報）：長時間計測のための電流伝送機能を有するリストバンドの設計
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会ハプティクス研究会第30回研究会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
米国	University of California, Santa Barbara		