



視覚効果を含む触覚ディスプレイの提案及び基礎的評価

Proposal and Basic Study of the Haptic Display with Visual Effect

村田凌¹⁾, 堀江新²⁾, 柏野善大³⁾, 稲見昌彦³⁾

Ryo MURATA, Arata HORIE, Zendai KASHINO, and Masahiko INAMI

1) 東京大学 情報理工学系研究科 (〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, murata@star.rcast.u-tokyo.ac.jp)

2) 東京大学 工学系研究科

3) 東京大学 先端科学技術研究センター

概要: 本稿では視覚効果を含む触覚ディスプレイを提案する. 従来は目に見える形で刺激提示を行う簡易的な触覚ディスプレイが無く, 触覚体験が提示を受ける本人のみに限られていた. 第三者から提示が視認できるディスプレイを提案することで触覚体験を共有し, ディスプレイを介した相互インタラクションが可能になる. そこで今回は視覚効果を含む触覚ディスプレイを作成し, 刺激の空間的な流れの提示に関して基礎的評価を行った.

キーワード: 触覚ディスプレイ, 視覚効果, 体験共有

1. 序論

握手や抱擁といった行為に代表されるように, 触覚を介した他者とのインタラクションは私たちの情動に大きな影響を与える.COVID-19 の流行によって私たちは以前よりも物理的な距離を保って生活をするようになり, 直接触れ合って交流をする機会の多くが失われつつある. その結果, 以前よりもストレスや不安などの精神的なトラブルを抱える人が多くなっていると考えられている [1]. 感染症流行下においてこの問題を解決する方法の1つとして, 他者と距離を保ちながら触覚インタラクションを実現することが挙げられる.

離れた相手と触覚インタラクションを成立させるには, 1) 相手からの作用が自分に及んでいること, 2) 自分の作用が相手に及んでいることの2点を互いが認識することが重要である. この双方向のインタラクションを実現するシステムとして, 手術ロボットの遠隔操作 [2] などで用いられるバイラテラル型のマスタースレーブシステムが提案されている. このシステムはスレーブ側がマスター側の動きに応じて動作すると共に, スレーブ側が受ける力覚情報をマスター側にフィードバックすることで双方向のインタラクションを実現するものである. しかしながらこの手法においては高速な通信及び複雑な力学系が要求されるという制約がある.

簡易的に距離を保った状態での触覚インタラクションを実現する手段として, 触覚ディスプレイを用いたものが多数考案されてきた. Cha[3] らはジャケットに振動子を搭載した触覚ディスプレイを考案し, 離れた人から触れられている感触を再現している. Keng[4] らは空気圧を調節することによりハグの感覚を再現するジャケット型のディスプレイを提案した. Saadatian[5] らは唇を模したディスプレイを提案し, 遠隔でキスを再現するシステムを提案した. しかしな

がら, これらのディスプレイを用いたインタラクションでは自分の作用が相手に及んでいることを認識できず, 触覚体験が相手から自分への片方向のみに限定されていた.

刺激の有無を提示されている本人以外にも認識させるために触覚ディスプレイに視覚効果を付与したものが考案されている. 例えば Konishi[6] らは LED を搭載した触覚ディスプレイを提案し, 刺激提示部位を光らせることで装着者以外が刺激の場所を確認できるようにした. しかし, LED による記号的な視覚効果は触覚を連想させることができず, 装着者に触覚刺激が生じていることを装着者以外が自明な形で認識することができない. したがって距離を保った状態で触覚インタラクションを実現する場合は, ディスプレイが刺激を提示していることを提示を受ける本人以外が直接認識できるような視覚効果を持つことが望ましいと考えられる.

そこで本稿においては皮膚上の変形という視覚効果に注目した簡易的な触覚ディスプレイを提案する. 皮膚上の変形が直接見える設計にすることで, 刺激が加わっていることを提示されている本人以外が視覚的に認識できるようになる. また触覚インタラクションにおいて, 「撫でる」のような連続的な刺激をもたらす動作が頻繁に行われることから, 本稿では提案するディスプレイにおいて連続的な触覚刺激を提示するためのパラメータの範囲の同定を行った. そしてその範囲において視覚的に刺激の流れを認識可能であるか否かについて検証を行った.

2. 原理

2.1 提案する触覚ディスプレイ

今回提案するのは図 1 のような触覚ディスプレイである. ディスプレイは 30 mm 間隔に並んだ 3 枚の刺激素子から構

成されている。初期状態では刺激素子は皮膚から離れており、根元につけられたモーターの回転によって皮膚表面に接触し、押し込むことによって触覚刺激をもたらす。このように押し込みという刺激提示をすることで触覚ディスプレイの挙動および皮膚表面の変形が視覚的に認識できる仕様になっている。モーターとしてはサーボモータ（RS204MD, futaba）を用い TTL 半二重通信により角度制御を行った。また 3 つの刺激素子が逐次的に皮膚に接触することにより方向を持った触覚刺激を提示することができる。今回提案するディスプレイは 2 方向（手→肘側、肘→手側）の刺激の流れを生成可能で、時空間的に変動する触覚刺激を提示することができる。

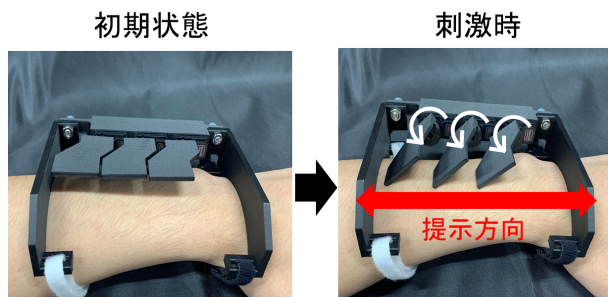


図 1: 左: ディスプレイの初期状態. 右: ディスプレイの刺激提示の様子。

2.2 仮現運動

刺激の流れを表現する際に本稿では触覚における仮現運動を取り入れた。触覚の仮現運動は皮膚上の離れた複数点に逐次的な刺激を提示することにより刺激の移動が知覚される現象である。この現象を適切な提示条件で発生させることにより、知覚される刺激の移動に連続性を付与することができる。

仮現運動の出現は主に 2 つのパラメータによって決定づけられると考えられている [7]。1 つ目は刺激素子あたりの刺激提示時間（Duration）、2 つ目は各素子の刺激時間間隔（SOA : Stimulus Onset Asynchrony）である（図 2）。特に SOA は仮現運動を特徴付ける主要なパラメータで SOA が過度に大きいと離散的な動きをする刺激を感じ、過度に小さいと刺激の移動が知覚されなくなる。本稿が目標とする連続的な仮現運動は、SOA が両者の間の領域にある時に実現される。したがって連続的な刺激を知覚する SOA の上限と下限を求めることで、目標とする刺激設計の指針とすることができる。

3. 実験 1: 触覚刺激による仮現運動のパラメータ設計

3.1 参加者

22 歳から 24 歳の左前腕に皮膚疾患などは報告されていない健康な男性 5 名女性 1 名が実験に参加した。利き腕は全員右腕であった。

3.2 刺激

本実験では 3 つの刺激素子の回転角をそれぞれ同形のガウス分布を用いて制御した。回転角は皮膚に接触するまで 10° 、皮膚に接触してから更に最大で 10° 押し込むように設定し

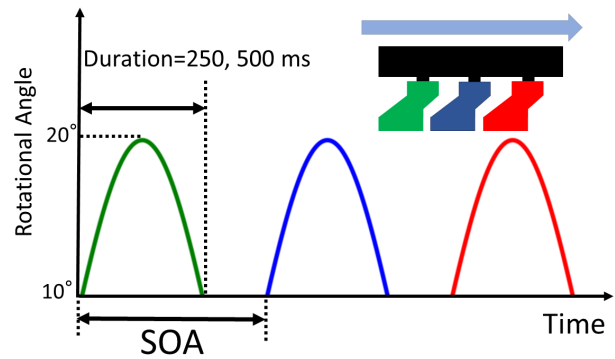


図 2: SOA と Duration の定義

た。押し込む角度を 10° に設定したのは、この程度の角度が痛みを感じず、且十分に知覚可能な触覚刺激を提示するうえで適切であると予備実験から判断したためである。

3.3 手順

図 3 に実験開始時の状態を示す。被験者に着席した状態で左腕の前腕に触覚ディスプレイを装着した。また、聴覚的な手がかりを遮断するため被験者はホワイトノイズが流れるノイズキャンセリングヘッドフォンを装着した。続いて視覚的な手がかりを遮断するため、ディスプレイを黒い布で覆った。

まず SOA の下限を求めるにあたって SOA の初期値を 0 ms にした。刺激を提示後、方向を持つ刺激を知覚したか否かを PC のディスプレイ上で尋ね、はい・いいえの 2 択で回答をした。回答はキーボード入力により行った。知覚したと回答した場合は加えて刺激方向も尋ね、同様に回答を記録した。刺激方向の選択肢は「肘から手に向かう方向」、「手から肘に向かう方向」の 2 択とした。方向を持つ刺激を知覚しなかったあるいは方向の回答を間違えた場合は SOA の値を 5 ms 上げ、方向の回答に正解した場合は SOA を 5 ms 下げた。この一連の手続きを繰り返すことによって SOA を増減させ SOA の増減の反転が 7 回起きたところで実験を終了した。この時、反転が起きた時の 7 つの SOA の平均値を下限として求めた。

次に SOA の上限を求めるにあたって SOA の初期値を 500 ms にした。この値を選んだのは十分に離散的な刺激を知覚できると予備実験から判断したためである。刺激を提示後、離散的な刺激を知覚したか尋ね、はい・いいえの 2 択で回答をした。離散的な刺激を知覚した場合は SOA の値を 20 ms 下げ、知覚しなかった場合は 20 ms 上げた。この手続きを繰り返し、下限を測定したときと同様に平均を取って SOA の上限を求めた。以上の上限と下限の測定を Duration が 250 ms, 500 ms の場合においてそれぞれ行った。測定時間はそれぞれ 5 分程度であった。

3.4 結果と考察

図 4 に 2 つの Duration における SOA の上限と下限を載せる。上限は Duration が 250 ms, 500 ms においてそれぞれ 177 ms, 396 ms であり下限は 12.9 ms, 13.3 ms であった。それぞれの閾値は全被験者の平均を取るによって求め、その標準誤差をエラーバーで示した。上限と下限の差の有意性は有意水準 5 % の反復測定分散分析を用いることに

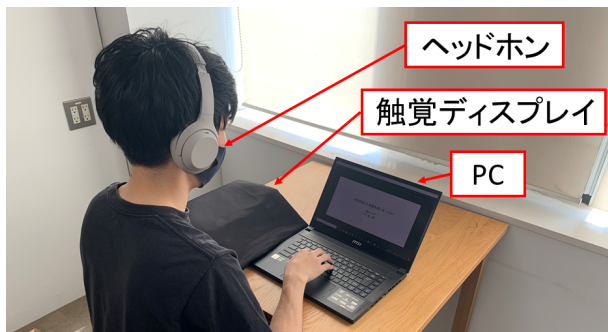


図 3: 実験の様子

よって確認した [$F(1,5)=65.7, p<0.001$]. これにより SOA の上限と下限の間に連続的な刺激を感じる領域があることが明らかとなった. SOA の上限と下限の平均を取ると Duration が 250 ms, 500 ms ではそれぞれ 95 ms, 205 ms でありこれらの値付近が最適な SOA であると考えられる.

また, 分散分析により SOA の閾値は Duration によって有意に変化することが明らかとなった [$F(1,5)=15.8, p<0.05$]. これは振動子を用いて連続的な仮現運動を検証した先行研究と一致する [8, 9]. しかしながら, 先行研究では Duration の増加に伴って SOA の上限と下限はともに上昇する傾向が確認されているが今回の測定において下限には有意な変化は見られなかった.

SOA の下限が Duration によって変化しなかった原因としては刺激素子の接触タイミングの誤差の影響が考えられる. 先行研究では振動子をあらかじめ体に接触させた状態で刺激提示をするのに対し, 今回のディスプレイは初期状態では皮膚に接触しておらず刺激素子が一定角以上回転すると刺激提示がなされる設計になっている. このような遭遇型の触覚ディスプレイでは各刺激素子の接触するタイミングに誤差が生じ, 十分小さい SOA であっても刺激の流れがあったように知覚されてしまう恐れがある. 実際に被験者の回答を確認したところ, SOA が 0 ms の刺激に対しても複数人が「刺激の方向がある」と回答していた. これによって SOA の下限が適切に決定できず, Duration による差異が確認されなかったと考えられる. SOA の下限が数十 ms のオーダーであることから, 今回提案するような遭遇型の触覚ディスプレイにおいては腕の形状に応じて接触タイミングを精度よく揃える必要があることが予想される.

4. 実験 2: 方向の視認が可能な刺激のパラメータ設計

4.1 参加者

実験 1 と同様

4.2 手順

著者がディスプレイを左の前腕に装着し被験者が正面からディスプレイを見ることができるよう座る位置を調整した. 被験者にノイズキャンセリングヘッドホンを装着し, ホワイトノイズを流す. SOA を 9 種類 (0 ms, ± 15 ms, ± 20 ms, ± 30 ms, ± 50 ms) 用意しそれぞれの SOA について 20 回ずつランダムに刺激を提示し, 刺激方向を尋ねた. 刺激方向の選択肢は「肘から手に向かう方向」, 「手から肘

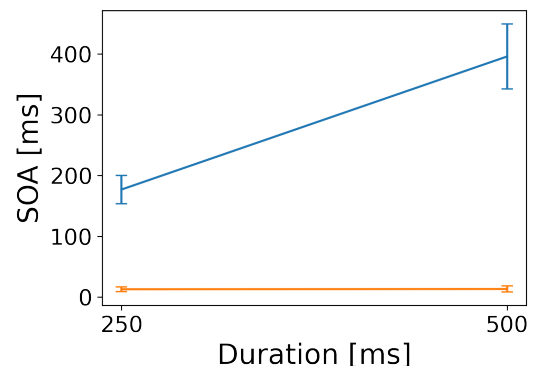


図 4: Duration=250 ms, 500 ms における連続的な触覚刺激を知覚する SOA の上限 (青色) 及び下限 (橙色) .

に向かう方向」の 2 択とした. 選択肢はそれぞれ SOA が正の時, 負の時の刺激を表す. 視覚的に刺激の流れの方向を認識する際には, どの刺激素子が先に動き始めるかが判断の手がかりとなる可能性が高かったため, 実験 2 ではすべての刺激において Duration は 250ms に固定した. 測定時間はおよそ 10 分程度であった.

4.3 解析

横軸に SOA, 縦軸を「肘から手に向かう方向」と回答した割合を全被験者の間で平均した値をプロットする. それらの点をガウス関数の累積分布関数でフィッティングし, 刺激提示方向が視覚的に認識できる SOA の閾値を 2 方向においてそれぞれ求める. 閾値としては回答の正答率が 75 % になったところを採用する. つまりグラフの値が 25 % になる SOA が「手から肘に向かう方向」が認識できる SOA の閾値, 75 % になる SOA が「肘から手に向かう方向」が認識できる SOA の閾値とする.

4.4 結果と考察

図 5 は九つの SOA に対する回答率をフィッティングしたものである. それぞれの回答率は全被験者の平均を取ることによって求め, その標準誤差をエラーバーで示した. フィッティングの結果, 肘から手に向かう方向の閾値は 5.6 ms, 手から肘に向かう方向の閾値は 37.7 ms であった. 以上の結果と実験 1 で求めた SOA の範囲から Duration が 250 ms の場合, SOA が 40 - 180 ms 程度の範囲であれば, 視覚的に刺激の流れの方向が認識可能であり, 触覚的に連続的でその方向が知覚可能な刺激提示ができることがわかった.

また, 刺激の提示方向によって閾値に変化が見られた原因について検証するために主観的等価点 (PSE) を求めた. その結果 PSE は 16.6 ms であり, 閾値に対して比較的大きい値であったことから今回提案するディスプレイにおいては刺激の流れの見え方が提示方向によって異なることが明らかとなった. この原因としては刺激素子の形状が影響していると考えられる. 図 1 からわかるように今回提案するデバイスの刺激素子は刺激の提示方向に対して非対称的な形状をしている. この非対称性によって刺激の提示方向によって見え方に差異が生じたと考えられる. 実際に被験者に刺激方向

の見え方に違いがあったか尋ねると、素子の形状から刺激が手から肘に流れているように見えやすかったという声が多かった。このことからデバイスの視覚的な形状も方向の認識に影響する可能性が考えられる。

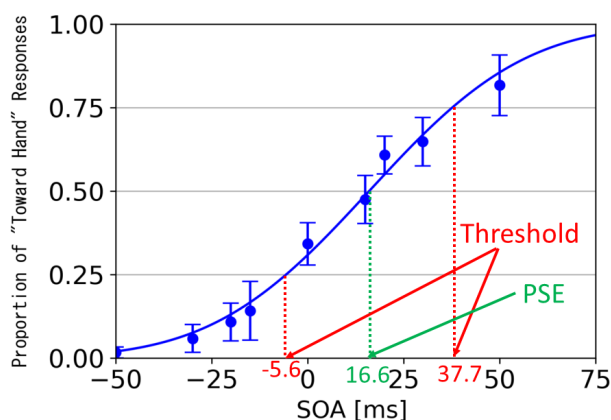


図 5: 9 つの SOA に対する「肘から手に向かう方向」と答えた割合, およびガウス関数の累積分布関数によるフィッティングの結果。

5. 結論

本稿では皮膚の変形という視覚効果を含む触覚ディスプレイを提案し, 連続的な刺激の流れを表現するためのパラメータの同定を行った。その結果, Duration が 250, 500 ms において, SOA がそれぞれ 15 - 180 ms, 15 - 400 ms 程度の範囲であれば, 触覚的に連続的で刺激方向が知覚可能であることが明らかとなった。また, Duration が 250 ms の時, SOA が約 40 ms 以上であれば視覚的に刺激の流れの方向が認識可能であることがわかった。このことから Duration が 250 ms の場合, SOA が 40 - 180 ms 程度の範囲であれば視覚的に刺激の流れの方向が認識可能であり, 触覚的に連続的でその方向が知覚可能な刺激提示ができることがわかった。また, 本稿で採用した装置の形状においては, 視覚的に知覚される刺激の流れの方向に偏りが生じることが明らかになった。

今回の調査の結果を踏まえて刺激の設計の指針とすると共に, 今後は本触覚ディスプレイを用いた触覚インタラクションの実現を目指す。皮膚の変形という視覚効果を伴う触覚ディスプレイを用いることで, 他者にその感覚を伝達し, 距離を保ちながら双方向的な触覚インタラクションが提案できると考えている。

謝辞本研究は JST ERATO JPMJER1701 の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] Joanne Durkin, Debra Jackson, and Kim Usher. Touch in times of COVID-19: Touch hunger hurts. *Journal of Clinical Nursing*, Vol. 30, No. 1-2, pp. e4-e5, 1 2021.
- [2] Wataru Iida and Kouhei Ohnishi. Reproducibility and operability in bilateral teleoperation. In *International Workshop on Advanced Motion Control, AMC*, pp. 217-222, 2004.
- [3] Jongeun Cha, Mohamad Eid, Ahmad Barghout, A. S.M.Mahfujur Rahman, and Abdulmotaieb El Saddik. HugMe: Synchronous haptic teleconferencing. In *MM'09 - Proceedings of the 2009 ACM Multimedia Conference, with Co-located Workshops and Symposia*, pp. 1135-1136, 2009.
- [4] James Keng, Soon Teh, Adrian David Cheok, Roshan L Peiris, Yongsoon Choi, Vuong Thuong, and Sha Lai. Huggy Pajama: A Mobile Parent and Child Hugging Communication System. 2008.
- [5] Elham Saadatian, Hooman Samani, Rahul Parsani, Vikram Pandey, Jinhui Li, Lenis Tejada, Adrian David Cheok, Ryohei Nakatsu, and Stephen J Payne. Mediating intimacy in long-distance relationships using kiss messaging \$. 2014.
- [6] Yukari Konishi, Nobuhisa Hanamitsu, Kouta Minamizawa, Benjamin Outram, Ayahiko Sato, and Tetsuya Mizuguchi. Synesthesia Suit : the full body immersive experience.
- [7] Carl E Sherrick and Ronald Rogers2. Apparent haptic movement. Technical report.
- [8] Ali Israr and Ivan Poupyrev. Tactile Brush: Drawing on skin with a tactile grid display. In *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, 2011.
- [9] Taku Hachisu and Kenji Suzuki. Tactile apparent motion through human-human physical touch. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, Vol. 10893 LNCS, pp. 163-174, 2018.