

発泡ビーズの振動伝搬を用いた広範囲触覚ディスプレイ(第2報) -振動知覚実験およびアプリケーション開発-

栗原洋輔^{†1} 西村奈令大^{†1} 高下昌裕^{†1} 梶本裕之^{†1 †2}

身体広範囲へくまなく触覚呈示を行うため、これまでに我々は発泡ビーズの振動伝搬を用いた広範囲触覚ディスプレイを提案してきた。本稿では本研究の第2報として、発泡ビーズを用いた触覚ディスプレイの腕部に対する振動知覚実験およびアプリケーションシステム「からだ花火」について報告する。打ち上げ花火の爆発振動をユーザの足全体にくまなく呈示し、まるでユーザの足の中で花火が爆発しているように感じさせる新たな花火鑑賞の形を提案する。

Large Area Tactile Display by Vibration Transmission through Jammed Particles (II) -User Study of Vibration Transmission and Application System-

YOSUKE KURIHARA^{†1}
MASAHIRO KOGE^{†1}

NARIHIRO NISHIMURA^{†1}
HIROYUKI KAJIMOTO^{†1 †2}

To apply vibrotactile feedback to large-area of body surface, we previously developed a vibrotactile display using vibration transmission through jammed styrofoam particles. In this study, we report a user study which verifying the intensity of the vibration transmitted via jammed particles and application system named "Bodily Fireworks". By providing vibration of fireworks explosion to the user's whole legs, we present a novel experience of fireworks explosion within the legs.

1. はじめに

映画や音楽など視聴覚コンテンツ体験における臨場感向上を目的として、ユーザの身体広範囲に振動触覚刺激を呈示する手法が数多く提案されてきた。例えば ジャケット [1]や椅子[2][3]に振動子を組み込んだ振動子を音楽やゲームコンテンツに併せて駆動するシステムなどが提案されている。

しかし、身体広範囲にくまなく触覚を呈示するためには大量の振動子を敷き詰める必要があり、装置の複雑化やコスト増大を招く [4][5]。また大量の振動子を用いたとしても、各ユーザの身体形状に振動面を適合させることが難しく、振動子の接触具合が部分的に異なる結果となる。これによりユーザが感じる振動強度にばらつきが生じてしまい、設計者が望んだ通りの触覚呈示が行えないことが危惧される。そこで我々は、より少ない振動子による身体広範囲への均等な触覚呈示を目的として、発泡スチロール製ビーズの空気圧制御による圧縮・硬化に着想を得て、振動伝搬を用いた触覚ディスプレイを提案する。

我々はこれまでに、前腕部を発泡ビーズで包み前腕表面にくまなくビーズを接触させ、さらに減圧することによって圧縮・硬化させたビーズを介して振動呈示を行い、前腕部広範囲に振動を伝搬させる手法 (図 2) について報告した [6]。本稿では、掌から肘関節までの部位に対するビーズ

を介した振動触覚知覚実験、および触覚的に花火鑑賞を楽しめるアプリケーションシステム「からだ花火」(図 1) について報告する。



図 1 「からだ花火」体験の様子

Figure 1 Demonstration of the "Bodily Fireworks".

2. ビーズを介した振動知覚実験

減圧により圧縮したビーズを介して振動を十分に感じられるかどうかを検証するため、掌から肘関節における振動知覚実験を行った。

2.1 実験環境

実験装置は前報にて報告したもの (図 2) に類似しているが、実験条件の統制のためスピーカ 4 個の代わりに振動モータ 1 個のみを用いた装置にて行った (図 4)。幅約 40cm、長さ約 50cm の密閉袋の内部を、直径 5mm の発泡ス

^{†1} 電気通信大学
The University of Electro-Communications
^{†2} 科学技術振興機構 さきがけ
Japan Science and Technology Agency

チロール製ビーズで約7割を満たした。被験者が腕を密閉袋の中に入れると、被験者の上腕までビーズに覆われる。様々な大きさおよび材質のビーズを試したが、軽い振動を伝達しやすい点、および摩擦が少なく砂のように振る舞い身体表面にくまなく接する点を考慮し、直径 5mm の発泡スチロール球を採用した。密閉袋の上腕側はマジックテープ式バンドで上腕に締め付け、密閉した。

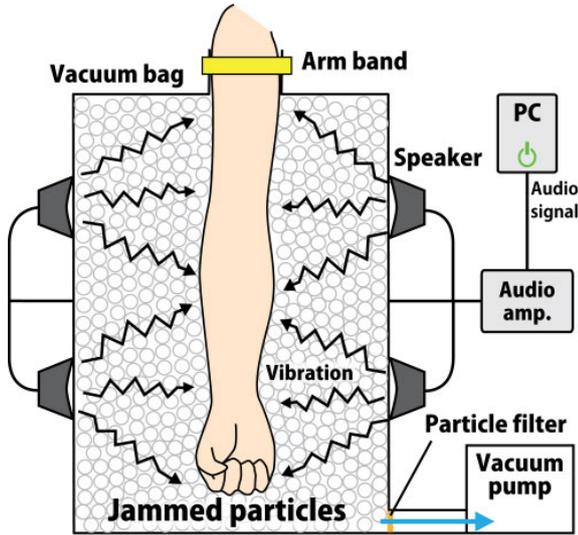


図 2 発泡ビーズの振動伝搬による触覚ディスプレイ [6]
Figure 2 Vibration transmission through jammed particles [6].

密閉袋の前腕側はビーズを遮断する網目フィルタを介してバキュームポンプ (VP0625, 日東工器社製, 真空到達度-33.3kPa, 吐出空気量 40L/min) と接続されている。密閉袋の内部を減圧することで図 3 のように発泡ビーズが圧縮され、硬化する。密閉袋前腕側の内部には気圧センサ (20 INCH-D2-P4V-MINI, All sensors 社製) が装着されており、真空度をモニタリングする。密閉袋の掌側に円盤型振動モータ (FM34F, TPC 社製) が 1 個装着されており、約 200Hz の振動刺激を被験者に呈示する。振動モータを駆動すると、圧縮された発泡ビーズによって振動が伝搬され被験者の腕に振動が呈示される。密閉袋内部の空気圧は均等に減圧されるので、被験者の腕にかかる力も部位によらず一定となる。したがって、振動刺激も部位によらずほぼ均等に呈示できると考えられる。



図 3 減圧による発泡ビーズの圧縮・硬化
Figure 3 Particle jamming by evacuating the air.

2.2 実験条件

本実験の被験者として男性 4 名 (21~23 歳, 右利き) に協力を依頼した。図 4 に実験の概観を示す。被験者の右腕に対し、実験刺激として下記の 2 つの条件で振動を呈示した。

直接刺激: 被験者の右前腕・掌側の中央に振動モータを直接貼り付け、振動刺激を呈示した。したがって本条件では振動モータが装着された部位の周辺でのみ振動が感じられると予想された。

ビーズ刺激: 被験者はビーズで満たした密閉袋の中に右腕を上腕まで入れた。振動モータは、被験者の右前腕・掌側の中央の密閉袋上に 1 個配置した。密閉袋内部の空気圧は常に約 96.1 kPa になるよう手動で調整された。圧縮された発泡ビーズにより、振動は腕全体で感じられると予想された。

被験者の左腕には、6 個の振動モータを左腕の掌側の手、前腕、肘および手の甲側の手、前腕、肘に装着し、基準刺激としてこれら 6 個の振動子を同時に駆動した。左腕への基準刺激と右腕への実験刺激は同時に 10 秒間呈示された。被験者は、右腕掌側の手、前腕、肘および手の甲側の手、前腕、肘における振動の強度を、左腕の同 6 部位と比較して視覚的アナログ尺度で評価した (0: 全く振動を感じない, 100: 左手の同部位と同じ位強い)。

直接刺激

ビーズ刺激



図 4 直接刺激とビーズ刺激。

Figure 4 Direct condition and via-particles condition.

2.3 実験手続き

被験者は椅子に着席し、まずヘッドホンを装着して振動モータおよびバキュームポンプから発せられる音をマスキングした。実験者は被験者の左腕に振動モータを 6 個粘着テープで貼り付けた。

被験者 4 名のうち 2 名は直接刺激を先に行い、その後ビーズ刺激を行った。残りの 2 名は逆の順序で行った。直接刺激の試行およびビーズ刺激の試行毎に、被験者は右腕への実験刺激の強度を回答した。直接刺激とビーズ刺激のペアを 1 セットとし、これを被験者毎に 3 セット繰り返した。

3. 実験結果

図 5 に被験者が右腕で知覚された振動強度の平均値を示す。直接刺激では前腕部・掌側、すなわち振動モータが装着されていた場所において他の部位よりも極めて強い振動が知覚された。これは実験前の予想通りの結果である。

本実験結果に対して 2 要因分散分析 (2 振動条件 × 6 刺激位置, 被験者間計画) を行った。その結果, 直接刺激条件における刺激位置に関して有意差が認められた ($F(5, 36) = 39.32, p < .01$)。一方でビーズ刺激条件における刺激位置に関して有意差は認められなかった ($F(5, 36) = 1.54, p = 0.20, n.s.$)。Holm 法を用いた刺激位置の多重比較の結果, 前腕・掌側での振動が他のどの部位よりも有意に強く感じられていたことが明らかとなった。

刺激位置別に着目すると, 2 つの位置において直接/ビーズ刺激間で有意差が認められた。一つは, 前腕・掌側においてビーズ刺激が直接刺激よりも有意に弱かったこと ($F(1, 36) = 77.57, p < .01$)。もう一つは手・掌側においてビーズ刺激が直接刺激よりも有意に強かったことである ($F(1, 36) = 7.10, p = 0.011 < .05$)。また, 手・手の甲側においてビーズ刺激の方が直接刺激よりも有意に強い傾向があった ($F(1, 36) = 2.99, p = 0.092 < .10$)。

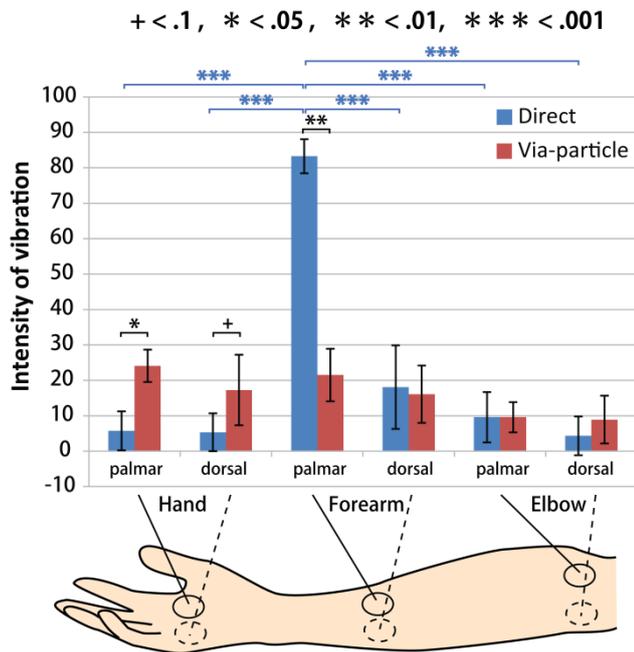


図 5 右腕で感じられた振動強度。エラーバーは標準偏差を示す。縦軸の 100 点は左腕で知覚された基準刺激の強さに対応する。

Figure 5 Intensity of vibration felt on the right arm. Error bars indicate the standard deviation. 100 in vertical axis corresponds the vibration intensity with referential stimuli to the left arm.

4. 考察

4.1 腕部広範囲への振動伝搬

実験結果によると, 発泡ビーズを介した振動刺激は右腕の全 6 部位において均等な強さで知覚されていたといえる。すなわち, 密閉袋の表面に装着された単一の小型振動モータのみにより広範囲への振動触覚呈示が可能であるということである。

一方で, 振動条件 (直接刺激/ビーズ刺激) 間の有意差は前腕・手の甲側, 肘・掌側および肘・手の甲側においては認められなかった。これは人間の腕部における触覚能力の違いに起因していると考えられる。一般に, 人間の肘関節は触覚受容器が少なく触覚能力に乏しいため, 被験者は振動を感じにくかったと考えられる。また手で振動が強く感じられた事についても, 手には触覚受容器が密集しているという事実により説明がつく。

4.2 被験者による内観報告

ビーズ刺激条件において全 4 名の被験者から, 「右腕全体がぼんやりと振動しており振動源を特定できない」といったコメントが得られた。本コメントは発泡ビーズによる振動伝搬が腕全体に対して振動を呈示できていることを示していると考えられる。被験者 1 名からは「振動の強さが圧縮袋内の空気圧によって変わる」といった報告が得られた。今後は, 振動をより効率よく伝搬させる空気圧などを検証し明らかにする必要があると考えられる。

5. 触覚的花火鑑賞装置「からだ花火」の開発

発泡ビーズを用いた身体広範囲への振動伝搬手法を用いたアプリケーションシステムとして, 打ち上げ花火の爆発を足全体で触覚的に鑑賞できる装置「からだ花火」を開発した。本システムの目的は, ユーザの足全体に対して花火の振動を呈示することで, 花火を視覚・聴覚のみならず触覚的にも楽しめる新たな花火鑑賞体験を作り出すことである。

5.1 システム構成

本システムでは, 実験に用いたシステムのように発泡ビーズをそのまま密閉袋に入れるのではなく, まずストッキングに詰め込んでからビーズ入りストッキングの束を圧縮袋に入れた。これは, ユーザの身体に発泡ビーズがまとわりつくのを防ぐため, また発泡ビーズをユーザの足全体に均等な厚みで分布させるためである。ビーズ入りストッキング 27 本を図 6 に示すように両足が入るように並べ, 粘着テープで固定し, 黒布を巻いた状態で幅約 75cm, 長さ約 130cm の密閉袋に入れた。ユーザは足を伸ばして床に座った状態で本装置に両足を入れ, 臀部と床で密閉袋を挟むことで袋内部の空気の流出を防ぐ。

左右両端のストッキング, および左足と右足を仕切るス

トッキングのふくらはぎ部分と太腿部分には1つずつボイスコイル型振動子 (Haptuator Mark II, TactileLabs 社製) が埋め込まれており、オーディオアンプ (RSDA202, Rasteme Systems 社製) を介して PC のオーディオジャックに接続されている。すなわち PC から出力される花火のオーディオ信号によって4つの振動子が駆動され、ユーザに振動刺激を呈示する。



図 6 発泡ビーズ入りストッキングの束
Figure 6 Stockings filled with beads.

本装置およびユーザの周囲を暗幕で覆うことで暗室をつくり、密閉袋の上部にプロジェクタで花火の動画を投影する(図 1)。花火動画の音信号は、ユーザ前方のスピーカから音として呈示されると同時に振動子の駆動にも利用される。この際、密閉袋の内部を掃除機で圧縮しビーズを硬化させることで、両足全体に均等に振動が伝搬する。

プロジェクタからの映像は、あえてビーズ袋から少しはみ出すように投影する。これにより、通常は足を入れたビーズ袋上のみには花火が投影されるが、しばしば打ち上がる大きな花火の場合はビーズ袋外周の床面にも花火が投影され、より迫力のある体験[7]を得ることができる。

5.2 デモンストレーション

本システムを11月09~10日に開催された「いしかわ夢未来博 2013」にて展示した(図 7)。体験者のほとんどは小学校低学年程度の子供であり「身体の中から弾ける感じがする」「気持ちいい」「熱い」といった感想が多く得られた。

人間の体内への触覚呈示は、身体の両面に振動刺激を与えること[8] (i.e., フェントムセンセーション[9])、もしくはユーザの身体を視覚的に膨張させ、振動源が体内にあると錯覚させる[10][11]ことで可能であることが知られている。足全体に振動を呈示し、さらに足を発泡ビーズで包み込み膨張させる本手法を用いることで、まるで足全体の中で花火が爆発しているような新しい花火鑑賞体験を作り出すことができたといえる。

気持ちよさに関しては、花火の爆発の振動に加え、密閉袋の圧縮により両足にかかる適度な圧迫感も寄与していると考えられる。また温度に関しては、花火のイメージから連想する熱に加え、足が密閉されることで内部温度が実際に上昇することで感じていたと推測される。



図 7 子供へのデモンストレーションの様子
Figure 7 Demonstration for children.

6. おわりに

本稿では、減圧により硬化させたビーズの振動伝搬を用いた身体広範囲への触覚ディスプレイ開発の第2報として、振動知覚実験を行った。腕に直接振動を呈示する条件(直接刺激)と、ビーズを介して振動を呈示する条件(ビーズ刺激)で、腕部の6部位(掌側の手、前腕、肘、手の甲側の手、前腕、肘)に感じられた振動強度を回答させる実験を行った結果、ビーズ刺激により振動を広範囲に均等に呈示できることが明らかとなった。

またアプリケーションとして足全体で花火を触覚的に鑑賞できる装置「からだ花火」を開発し、多くの子供に対してデモンストレーションを行った。その結果、足表面全体への均等な振動刺激が、表面だけでなく体内の擬似触覚として需要されていたことが示唆された。体験者の反応は良好であり、新たな花火鑑賞の形を提案することができたといえる。

今後は、密閉袋内部の空気圧に応じてバキュームポンプの吸引力を調整し、一定の気圧を保つようシステムを改良する予定である。また浴槽などより大きな容器を用いた全身触覚ディスプレイの開発を目指す。

謝辞 本研究で使用した機材について、電気通信大学大学院情報システム学研究科・小池研究室の佐藤俊樹助教には多大なる助言をいただきました。心から感謝申し上げます。

参考文献

- [1] P. Lemmens, F. Cromptvoets, D. Brokken, J. V. D. Eerenbeemd and G.-J. de Vries: A body-conforming tactile jacket to enrich movie viewing. *Proceedings of the EuroHaptics Conference*, pp. 7-12, March 18-20, 2009, Salt Lake City, UT, USA.
- [2] M. Karam, C. Branje, G. Nespoli, N. Thompson, F. A. Russo and D. I. Fels: The emoti-chair: an interactive tactile music exhibit. *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'10 Extended Abstracts)*, pp. 3069-3074, April 10-15, 2010, Vancouver, Canada.
- [3] A. Israr, I. Poupyrev, C. Ioffreda, J. Cox, N. Gouveia, H. Bowles and A. Brakis, B. Knight, K. Mitchell, T. Williams: Surround haptics: sending shivers down your spine. *Proceedings of the ACM*

SIGGRAPH 2011 Emerging Technologies, August 7-11, 2011, Vancouver, Canada.

- [4] R. W. Lindeman, R. Page, Y. Yanagida and J. L. Sibert: Towards full-body haptic feedback: the design and deployment of a spatialized vibrotactile feedback system. *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pp. 146-149, November 10-12, 2004, HongKong.
- [5] R. Tadakuma and R.D. Howe: A whole-arm tactile display system. *Proceedings of the EuroHaptics Conference*, pp. 446-451, March 18-20, 2009, Salt Lake City, UT, USA.
- [6] 栗原, 高下, 岡崎, 梶本: 発泡ビーズの振動伝搬を用いた広範囲触覚ディスプレイ. *エンタテインメントコンピューティング (EC2013)*, 2013.10.04-06, サンポートホール高松・かがわ国際会議場.
- [7] B. R. Jones, H. Benko, E. Ofek and A. D. Wilson: IllumiRoom: peripheral projected illusions for interactive experiences. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'13)*, April 27-May 2, 2013, Paris, France.
- [8] S. Ooshima, Y. Fukuzawa, Y. Hashimoto, H. Ando, J. Watanabe, and H. Kajimoto: /ed (slashed) - Gut feelings when being cut and pierced. *Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2008 Emerging Technologies*, August 11-15, 2008, Los Angeles, CA, USA.
- [9] G. V. Bekesy: Neural funneling along the skin and between the inner and outer hair cells of the cochlea. *Journal of Acoustical Society of America*, 31(9), pp. 1236-1249, 1959.
- [10] T. Kosaka, H. Misumi, T. Iwamoto, R. Songer and J. Akita. "Mommy Tummy" a pregnancy experience system simulating fetal movement. *Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2011 Emerging Technologies*, August 9-11, 2011, Vancouver, Canada.
- [11] M. Katoh, S. Nakamura, S. Ikeno, T. Kikuchi, S. Kudo, H. Kajimoto: ViVi-EAT: augmentation of food-flowing sensation using tactile feedback, *Laval Virtual ReVolution*, March 20-24, 2013, Laval, France.