

# 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

栗原洋輔<sup>†1</sup> 高下昌裕<sup>†1</sup> 岡崎龍太<sup>†1</sup> 梶本裕之<sup>†1 †2</sup>

身体広範囲への触覚ディスプレイは、これまで主に振動子付きジャケットやイス等を用いた手法が提案されてきた。しかし身体表面に振動子をくまなく接触させることが難しく、また大量の振動子が必要であった。そこで本研究では、発泡スチロール製ビーズを用いたどんな身体形状にも適合する触覚ディスプレイを提案する。内部を真空状態にして硬化させたビーズで振動を伝搬させることにより、少ない振動子で身体表面広範囲への触振動呈示を試みる。

## Large Area Tactile Display by Vibration Transmission through Jammed Particles

Yosuke Kurihara<sup>†1</sup> Masahiro Koge<sup>†1</sup> Ryuta Okazaki<sup>†1</sup> Hiroyuki Kajimoto<sup>†1 †2</sup>

Large area tactile displays often employ vibration feedback from chair or jacket. However, contact between vibrotactile transducers and the user's body surface is sometimes insufficient, and the system requires a lot of transducers to apply to the whole body. In this study, we propose a novel vibrotactile display that fits to various shapes and covers large area of body surface, by means of vibration transmission through jammed particles. Styrofoam particles around the body are jammed by evacuating the air. Vibrations from speakers are delivered to user's body through the jammed particles. We envision that our vibrotactile transmission technique can be applied for the whole body tactile display.

### 1. はじめに

映画・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 Tactile Jacket[1]はジャケットに内蔵した複数の振動子を動画に合わせて駆動することで、動画を視覚・聴覚のみならず胴体で触覚的に体感できる。また椅子の背面に装着された振動子を音楽やゲームコンテンツに併せて駆動することで情動体験を増幅するシステム[2][3]などが提案されている。

しかしながら身体の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。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できてしまい、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。

そこで本稿では、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振動伝搬を用いた触覚ディスプレイを提案する。ビーズの中に身体を入れることで、身体表面にくまなくビーズが接触する。さらに減圧によって圧縮・硬化させたビーズを介して振動呈示を行うことで、ビーズが触れている身体広範囲に振動を伝搬させることを試みる。本研究は視聴覚コンテンツ体験の臨場感向上に応用できると期待される。

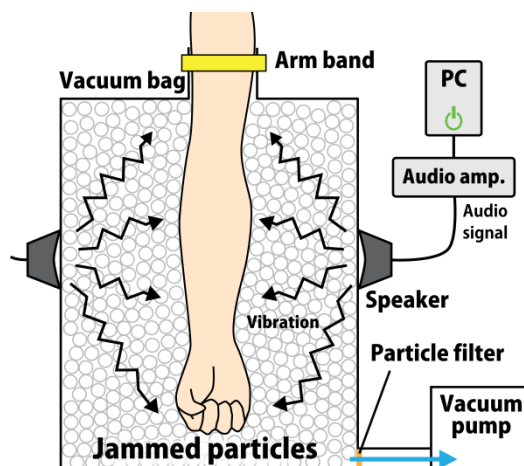


図 1 ビーズの振動伝搬による前腕全体への触覚呈示  
Figure 1 Vibrotactile stimulus to forearm by vibration transmission through jammed particles.

### 2. 先行研究

密閉されたビーズの空気圧制御を用いた触覚ディスプレイはこれまでも様々なものが提案されている[4][5][6]。佐藤ら[8]は、密閉された発泡ビーズの空気圧制御により表面の形状・硬度が可変なテーブルトップ型触覚ディスプレイを開発した。本システムではビーズが粘土のように柔らかい状態（大気圧）で成形を行い、その後硬化（減圧）させて形を保つといったインタラクションが可能である。また満田ら[9]はビーズを内蔵したビニルチューブの剛性制御を用いた身体装着型の力覚呈示装置を開発した。これらのシステムでは、空気圧制御によるビーズの形状・硬度変化そのものが触覚・力覚呈示機能として働いている。

<sup>†1</sup> 電気通信大学  
The University of Electro-Communications  
<sup>†2</sup> 科学技術振興機構さきがけ  
Japan Science and Technology Agency

これらに対し我々は、ビーズを振動伝搬用の媒介として用いた振動触覚ディスプレイを提案する。すなわちビーズの形状・硬度変化自体が目的ではなく、これを用いた振動の伝搬が目的である。本研究は、ビーズの空気圧制御を用いた触覚ディスプレイの新たな形として触覚学の分野に貢献できると考えられる。

### 3. ビーズの振動伝搬を用いた広範囲触覚呈示

#### 3.1 前腕部への触覚呈示

ビーズの振動伝搬を用いて前腕部全体に触覚呈示を行うプロトタイプを製作した。図 1 にシステムの模式図を示す。密閉袋には直径 5mm の発泡スチロールビーズが詰め込まれている。ユーザが密閉袋の中に腕を入れると、ユーザの腕にビーズが隙間なく接触する。より小さい発泡スチロールビーズや別の素材も検討したが、静電気が発生しにくく密閉袋から腕を出す際にビーズが腕にまとわりつかない点、また軽量で振動を伝えやすい点の 2 点を考慮して 5mm の発泡スチロールビーズを採用した。密閉袋の上部はアームバンドでユーザの上腕に締め付けることで袋内の空気の流出を防ぐ。

密閉袋の下部はビーズを遮断するフィルタを介して真空ポンプ (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。袋内を減圧し真空状態にすることで内部のビーズが密着・圧縮され、全体が硬化する (図 2)。密閉袋の両側面にはフルレンジスピーカ (W2-800SL, Tang Band 社製) が一個ずつ装着されており、PC からの音声をオーディオアンプ (RSDA202, Rasteme Systems 社製) で増幅し出力する。ビーズが硬化した状態でスピーカを駆動すると音と同時にスピーカコーンの振動がビーズに伝搬し、ビーズに埋まっている前腕全体に振動が伝わる。

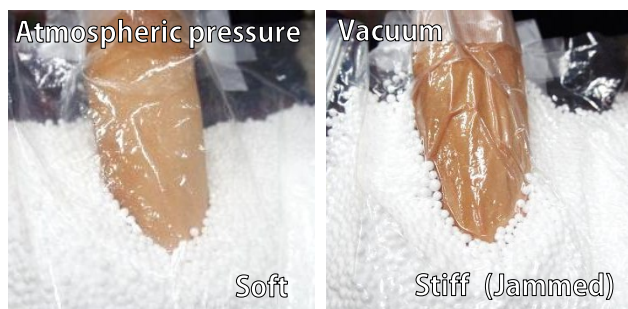


図 2 減圧によるビーズの硬化

Figure 2 Particle jamming by evacuating the air.

ビーズはユーザの前腕部全体の表面にくまなく接触しており、また密閉袋内の空気圧はどの部位でも均等に低下し前腕にかかる圧力はどの部位でも等しくなる。したがって前腕部全体に振動強度のばらつきなく触覚刺激を与えることが可能となる。また身体広範囲への振動触覚呈示を行

う場合、従来の手法では振動子およびスピーカを敷き詰める必要があったが、本提案手法を用いればスピーカ 2 個のみで前腕全体への振動呈示が可能となる。

#### 3.2 脚・胴体・全身への触覚呈示

前腕部用のシステムと同様の構成で、他の部位に触覚呈示を行うプロトタイプも製作した。両足全体用のシステムを図 3 に示す。ビーズと身体を直接接触させることなく、ビーズの入った密閉袋を胴体に巻きつけ、袋の上から胴体全面に触覚呈示を行った例を図 4 に示す。ビーズが入ったマットを身体に巻きつけ、減圧して固定・装着する仕組みは、傷病者の欠損部位を固定するための救命救急器具としてすでに実用化されている[10]。したがって本手法でも身体形状への適応性は高いと考えられる。ただしビーズ内に身体を入れる場合に比べ身体を締め付ける圧力が弱く、受容される振動強度は低下することが確認された。



図 3 両足への触覚呈示

Figure 3 Vibrotactile display for legs.



図 4 胴体への触覚呈示

Figure 4 Vibrotactile display for torso.

首から下の身体全てをビーズに浸すことで、身体表面全てに触覚呈示を行うことも検討した(図5)。これにより、従来は難しかった頭部以外の全身にくまなく触覚呈示することも可能である。



図5 全身への触覚呈示

Figure 5 Vibrotactile display for the entire body.

#### 4. ユーザテスト

前腕部用の触覚呈示システムを用いて、オーケストラ演奏動画および打ち上げ花火の動画を被験者3名に鑑賞させた。ポンプから発生する騒音によりスピーカからの動画音声がかき消えにくくなることを考慮して、超確定時にはノイズキャンセリングヘッドホン(QuietComfort 15, BOSE社製)を用いた。

ユーザテストの結果、全ての被験者から「減圧すると前腕に明確な振動を感じる」「前腕部全体にビーズが密着している」といったコメントが得られた。特に打ち上げ花火の破裂音のような瞬間的な振動は音楽に比べて知覚しやすく、より臨場感が高まったという感想が得られた。

被験者1名からは「腕の中で花火が爆発しているような感覚がする」というコメントが得られた。このことから、本手法は身体表面だけではなく身体内部への感覚も再現できる可能性が示唆された。身体内部に触覚を感じる現象の原因としては、身体両面からの振動刺激による体内ファントムセンセーション[11]や、身体サイズの拡大による身体表面の誤認[12]などが知られており、本システムにおいてはこれらの両方が関与していると考えられる。

一方で前腕の位置が密閉袋内の片側に寄ってしまいビーズ層の厚みに差が出た場合には、より層が薄い部分での振動を強く感じたという報告があった。したがって前腕全体の振動強度を均一化するには、ビーズ層の厚みを一定に保つことが重要であると考えられる。また空気圧およびビーズ層の厚みの違いによる振動伝達特性の変化についても検証が必要であるといえる。

#### 5. 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を提案した。前腕部全体への触覚呈示を行うプロトタイプを開発し、実際に振動を感じるかどうかのユーザテストを行った。その結果全ての被験者が振動を明確に感じることができ、視聴覚コンテンツの鑑賞における臨場感向上効果が示唆された。

今後は、密閉袋内部の空気圧に応じて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. van den Eerenbeemd, 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, 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, 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] S. Follmer, D. Leithinger, A. Olwal, N. Cheng, H. Ishii: Jamming user interfaces: programmable particle stiffness and sensing for malleable and shape-changing devices. *Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST'12)*, pp.519-528, October 7-10, Cambridge, MA, USA.
- [5] A. A. Stanley, J. C. Gwilliam, A. M. Okamura: Haptic Jamming: a deformable geometry, variable stiffness tactile display using pneumatics and particle jamming. *Proceedings of the IEEE World Haptics Conference*, pp.25-30, April 14-18, 2013, Daejeon, Korea.
- [6] K. Rebane, Y. Matoba, A. Hakamatsuka, T. Sato, S. Kodama, H. Koike: Development of and experimentation on deformable three-dimensional figures by the use of polystyrene beads, a pressure sensor, and an air pump. *Proceedings of the Workshop on Smart Material Interfaces: A Material Step to the Future*, October 26, 2012, Santa Monica, CA, USA.
- [7] A. Mazzone, C. Spagno, A. Kunz: The HoverMesh: a deformable structure based on vacuum cells. *Proceedings of the ACM International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE'04)*, pp. 187-193, June 3-4, 2004, Singapore.



- [8] T. Sato, Y. Matoba, N. Takahashi, H. Koike: Interactive surface that have dynamic softness control. Proceedings of the *ACM Advanced Visual Interfaces (AVI'12)*, pp796-797, May 22-26, 2012, Capri, Italy.
- [9] T. Mitsuda, S. Kuge, M. Wakabayashi, S. Kawamura: Wearable haptic display by the use of a particle mechanical constraint. Proceedings of the *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS'02)*, pp.153-158, March 24-25, 2002, Orlando, FL, USA.
- [10] Hartwell Medical Corp., EVAC-U-SPLINT.  
<http://www.hartwellmedical.com/evacsplint.php>
- [11] 渡邊, 福沢, 梶本, 安藤: 腹部通過仮現運動を利用した貫通感覚提示. *情報処理学会論文誌*, Vol.49, No. 10, pp.3542-3545, 2008.
- [12] 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.