



空中超音波と接触式振動刺激による複合触覚提示

Combined tactile presentation using aerial ultrasound and contact-type vibration stimuli

曾明然, 砥出悠太郎, 森崎汰雄, 芹澤洗希, 藤原正浩, 牧野泰才, 篠田裕之

Zen SOMEI, Yutaro TOIDE, Tao MORISAKI, Kohki SERIZAWA,

Masahiro FUJIWARA, Yasutoshi MAKINO, Hiroyuki SHINODA

東京大学 新領域創成科学研究科 (〒 277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5, somei@hapis.k.u-tokyo.ac.jp)

概要: 接触型の振動子と非接触型の集束超音波による複合触覚提示手法を提案する。手のひらに集束超音波で刺激を提示しながら、手首に振動子で振動を提示するシステムを作成し、そのコンセプトの適用可能性を検証した。具体的には、同時に刺激提示した場合の感じ方、およびそれぞれを独立したモダリティとして利用する場合の可能性、という2つの観点から検討した。その結果、同時提示時に硬い物体との接触感を再現でき、また、触体験に違和感を持たせずに独立に刺激を知覚できたことで、複合触覚提示による幅広い用途があることが分かった。

キーワード: 複合触覚提示, 空中超音波, 振動刺激

1. はじめに

人は触覚を通じてあらゆる情報を得ている。このため、触覚の再現・提示技術は多くの用途があり、例えば、ビデオゲームや映画、VR 体験における没入感向上 [1] や、視覚障害者に対する歩行誘導 [2] などが実際に提案されている。

この触覚を提示する手法は、大きく接触型と非接触型に分かれる。接触型としては、振動子 [3] やロボットアーム [4] が代表例として挙げられ、強い触力覚を得られるのが特徴である。非接触型としては、エアジェット [5] や集束超音波 [6] を用いるものが代表として挙げられる。非接触型は、接触型に比べて提示力は制限されるものの、デバイスを身に着けなくてよいという大きい利便性がある。また、集束超音波においては接触型では難しい分布触覚提示 [7, 8] も自由に行えるという利点がある。

我々は、接触型と非接触型の触覚提示手法を同時に利用するという新たな触覚提示のコンセプトを提案する。先述したように、接触型には強い力触覚が提示できるという利点があり、一方で、非接触型にはデバイスを身につけなくてよく、分布提示も容易であるという利点がある。これらの利点が損なわれない組合せ方を見つけることで、これまで出来なかった範囲にまで触覚提示を適用できる。

本研究では提案コンセプトの具体例として、手首には振動子で、裸の手のひらには集束超音波で触覚提示を行うシステムを開発する。この組み合わせにより、ユーザはほとんどデバイスを身につけることなく、手首から先全体に対して触覚提示を受けることが出来る。手首に振動子を取り付けるのは、スマートウォッチなどの普及を考えれば妥当である。一方、日常で手のひらを覆うことはほとんどないため、非接触な空中超音波が適している。また、手首は触覚を感じにくく、

手のひらは分布を感じるのが得意という点からもこの組み合わせが有用であるといえる。

本稿では、この振動子と超音波という組み合わせの利点について、以下の二つの観点

- (1) 二つの触覚を混ぜ合わせ、手のひらで硬い物体に触れた感覚の再現
- (2) 独立な触覚モダリティとして活用し、動作誘導など複雑な情報提示への利用

から基礎的検討を行う。

観点 (1) では、具体的には超音波で物体に触れたときの接触感を提示し、振動子で触れた際手首に伝わる振動を再現することで、硬いものに触れたような感覚が再現できるかということを確認した。

観点 (2) においては、同時提示の際に触体験に違和感を与えることなく各刺激を知覚できることによって、独立な触覚モダリティとしても利用できることを確かめた。

2. システム構成

接触型と非接触型との複合触覚提示の具体例として、手首には振動子で、裸の手のひらに集束超音波で触覚提示を行えるシステムを開発した。提案システムを図 1 に示す。本システムは、空中超音波触覚提示のための AUTD [6] (Airborne Ultrasound Phased Array (図 2)) と Leap Motion、接触式振動提示のためのパワーアンプと振動子から構成される。バーチャルな剛体壁との接触時に AUTD と振動子を同時に駆動し、空中超音波触覚刺激を手のひらに、接触式振動刺激を手首に対してそれぞれ提示した。

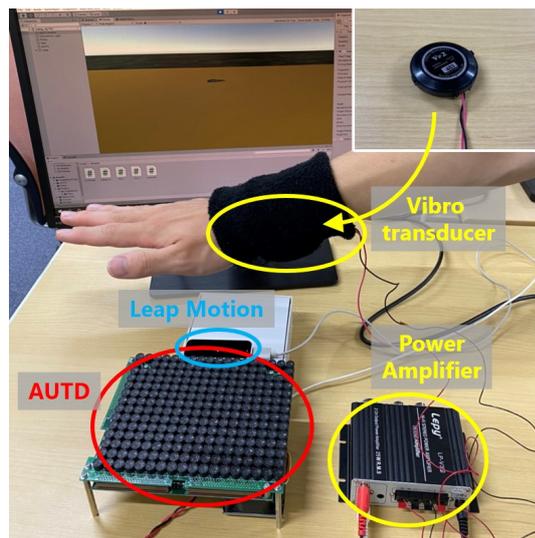


図 1: システムの構成

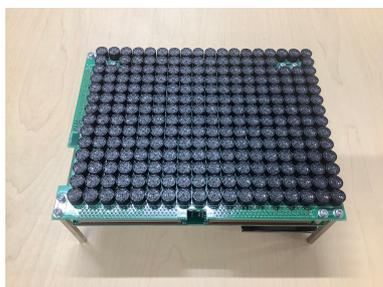


図 2: AUTD

2.1 空中超音波触覚提示システム

空中超音波触覚提示システムは、触覚提示のための AUTD (図 2) と手のひらの 3 次元位置を取得するための Leap Motion から構成される。AUTD は、アレイ状に配置された各超音波振動子の振幅と位相を個別に制御することで、超音波焦点による触覚像を任意の 3 次元位置に作り出すデバイスである。本システムでは、AUTD による単一焦点を手のひらに対して提示することで触覚提示を行った。単一焦点による触覚刺激は、人に十分知覚できるように振幅変調 (AM: Amplitude Modulation)[6] を加え、150 Hz の周波数になるように設定した。

2.2 接触式振動触覚提示システム

接触式振動触覚提示システムは、パワーアンプ (LP-V3S, Lepy) と振動子 (Vp216, 株式会社アクーブ・ラボ) を用いたリストバンド型の触覚提示システムである。音声信号をパワーアンプで増幅し、増幅した信号を振動子で提示した。本稿では、バーチャルな剛体壁との接触時における再生音源として、バスドラムの音源 (図 3 参照) を使用した。バスドラムの音源は図 3 のように瞬間的に強い振幅が得られるため、剛体壁との接触時のような撃力の表現に十分適当な刺激であると考えられる。そのため、本稿ではバスドラムの音源を用いて今後の被験者実験を行った。

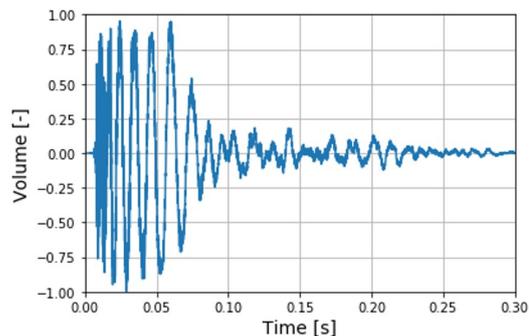


図 3: バスドラムをたたいた時の音声信号波形

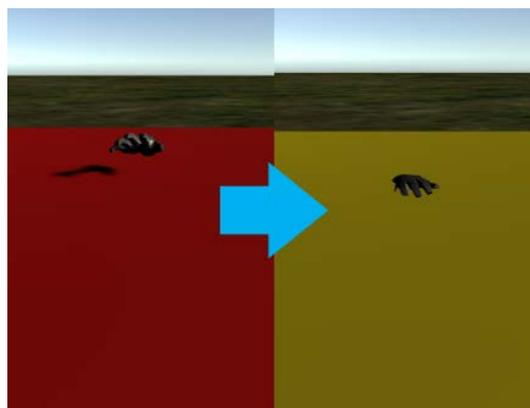


図 4: Unity 上での画面 (左: 接触前 右: 接触後)

2.3 同時触覚提示システム

空中超音波触覚刺激と接触式振動刺激との同時提示の流れについて記載する。空中超音波触覚と振動刺激との同時提示、及びバーチャルな剛体壁とのインタラクション時の挙動は Unity を用いて管理した。図 1 のように AUTD を机の上に配置し、手のひらを上から近づけた。Leap Motion を用いて手のひらの中心座標を取得し、AUTD の直上 25 cm に手のひらが入ってきた瞬間に、各振動刺激のフィードバック、及び視覚的なフィードバック (図 4) を与えた。

3. 実験

接触型と非接触型の触覚提示手法を同時に利用するという新たな触覚提示のコンセプトを提案する。特に振動子と超音波の組み合わせに着目し、(1) 二つの触覚を混ぜ合わせるにより、裸の手のひらで硬い物体に触れた感覚を再現 (2) 独立な触覚モダリティとして利用することによる動作誘導など複雑な情報提示への利用の二つの観点に関して検討する。本稿では、具体的な検証内容として、

- (I) 個別に提示する場合に比べて、手のひらで剛体壁に接触した感覚を提示できるか
- (II) 両刺激を同時に提示しても、触体験に違和感を持たせることなく各刺激を独立して知覚できるか

という 2 点についてリッカート尺度に基づいて質問し、その評価を得た。

3.1 実験手順

検証 (I), (II) の実験手順について示す。

まず、被験者は図 1 のシステムを用いてバーチャルな剛体壁との接触体験を行った。その際、検証 (I), (II) に関する質問として、

質問 (I) 手のひらに剛体壁に接触したような感覚が得られたか

質問 (II) 同時提示の際に手のひらだけでなく、手首にも振動が感じられたか

という 2 つの質問を、11 段階 (0~10) 段階のリッカート尺度で評価してもらった。それぞれの質問に対する評価基準として、質問 (I) では 0(手のひらに触覚刺激を感じない)~10(手のひらで剛体壁に接触した) として設定し、質問 (II) では 0(手首に刺激を感じない)~10(手首に強く刺激を感じる) として設定した。尚、この 2 つの質問はそれぞれ別の実験として回答させた。

各実験は健康な男性 4 名 (平均年齢 24~25 歳) に対して行われた。また、参加した 4 名全ての被験者は AUTD を用いた収束超音波による触覚提示の経験があった。

4. 実験結果

各質問における結果を図 5 に示す。

図 5(左図) は質問 (I) について評価した結果である。空中超音波触覚提示 (AUTD) と、接触式振動提示 (Contact) それぞれ個別に提示した場合に比べて、各刺激の同時提示 (AUTD + Contact) の方が手のひらで硬いものに触れた感覚を提示出来ているかを検証した。そのため、AUTD + Contact 群と AUTD 群、AUTD + Contact 群と Contact 群とで比較を行った。Bonferroni の補正によって修正した有意水準 $0.05/3 = 0.016$ の条件の下、それぞれに対して t 検定を行った。その結果、 $p = 0.014$ (AUTD), $p = 0.00057$ (Contact) であり、同時提示は個別提示に比べてどちらも有意差があることが確認された。

続いて、質問 (II) について評価した結果を図 5(右図) に示す。2 つの刺激の同時提示を行った際、質問 (I) のように手のひらだけに触覚を感じられるだけでなく、手首に対しても刺激を知覚しているかを検証した。その結果、各被験者間で十分な高い評価が得られていた (8.0 ± 0.4)。

5. 考察

本実験では、(1) 二つの触覚を混ぜ合わるることにより、裸の手のひらで硬い物体に触れた感覚を再現すること (2) 混ぜ合わせたときでも触覚体験の違和感ない程度に各刺激を知覚できることによって、独立な触覚モダリティとしても利用できることという 2 つの観点から検討を行っている。

図 5(左図) によると、振動子と空中超音波を個別に提示した時に比べて、同時提示を行った場合の方が高い評価が得られていたことから、複合触覚提示の場合の方が手のひらで剛体壁に接触したときの感覚の再現が行えていたと考えられ

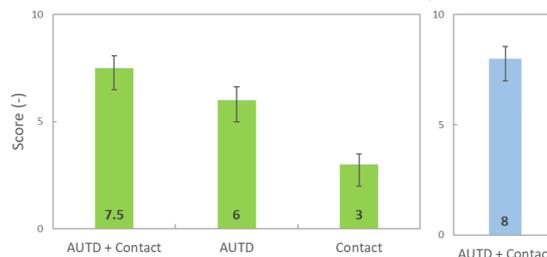


図 5: 被験者の評価結果 (左: 質問 (I)(手のひらに対して剛体壁に接触したような感覚が得られたか), 右: 質問 (II)(同時提示の際に手のひらだけでなく、手首にも振動が感じられたか))

る。そのため、複合触覚提示における同時提示が十分適用する価値のあるシチュエーションが存在することが分かった。

また、同時提示の際に手首にも振動が感じられるかという質問に対して十分な高い評価を得られていたという結果から、手のひらで剛体壁との接触体験を行えているという認識が得られながらも独立した触覚モダリティとしても知覚できていたと言える。さらに、質問 (I) の Contact において低い評価を得ていたことも考えると、手のひらでの接触時に手首が振動するということに対しては強い違和感があるが、同時提示を行うことで刺激位置の違和感を減らすことにもつながっている。これらの結果から、複合触覚提示の際、狙った触覚体験を阻害することなく、独立した触覚モダリティとして利用出来る可能性があることが分かった。

独立した触覚モダリティに対する具体的な利用方法としては、例えば任意の 3 次元位置に対する動作誘導への利用が考えられる。これまで、超音波焦点を移動させることで 3 次元の任意の位置に誘導する研究はなされている [9]。その結果、手のひらに平行な方向に対しては十分な探索能力があるが、手のひらの法線方向への移動は探索が困難とされていた。ここで、同時に [10] のような非対称な振幅の振動を振動子で提示することで手のひら法線方向に牽引力を想起できれば、任意の 3 次元位置に素早く動作誘導できる可能性がある。

以上より、接触式振動提示と非接触式の振動提示との複合触覚提示は、同時提示による利用、独立した触覚キューとしての利用と、幅広い触覚提示の適用可能性があることが示された。

6. 結論

本研究では、接触型と非接触型の触覚提示手法を同時に利用するという新たな触覚提示のコンセプトを提案した。接触型による強い力触覚を提示する利点と非接触型によるデバイスを身につけることない、分布提示も容易、という利点を十分に生かせれば、新たな触覚提示の可能性が広がるものと期待できる。

我々は本コンセプトを実現する具体例として、手首に振動子で、裸の手のひらに集束超音波で触覚提示を行うシステムを開発した。このシステムにより、複合触覚提示の持つ利用

可能性について (1) 二つの触覚を混ぜ合わることにより、裸の手のひらで硬い物体に触れた感覚を再現すること (2) 混ぜ合わせたときでも触体験の違和感ない程度に各刺激を知覚できることによって、独立な触覚モダリティとしても利用できることという二つの観点から検討を行った。

その結果、振動子と収束超音波それぞれ個別の触覚提示に比べ、手のひらで硬い物体に触れた感覚を十分再現できていたことが分かった。さらに、手のひらで剛体壁との接触体験を行えているという認識が得られながらも、独立な触覚モダリティとしての利用可能性も示すことができた。そのため、接触型と非接触型の複合触覚提示は、同時提示による利用にも独立した触覚モダリティとしての利用にも使用できる可能性が示された。

謝辞 本研究は JST CREST JPMJCR18A2 および 科研費 16H06303 の助成を受けている。

参考文献

- [1] Damien Ablart, Carlos Velasco, and Marianna Obrist. Integrating mid-air haptics into movie experiences. In *Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Experiences for TV and Online Video*, pages 77–84, 2017.
- [2] Tomohiro Amemiya and Hisashi Sugiyama. Orienting kinesthetically: A haptic handheld wayfinder for people with visual impairments. *ACM Transactions on Accessible Computing (TACCESS)*, 3(2):1–23, 2010.
- [3] Jose V Salazar Luces, Kanako Ishida, and Yasuhisa Hirata. Human position guidance using vibrotactile feedback stimulation based on phantom-sensation. In *2019 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS)*, pages 235–240. IEEE, 2019.
- [4] Thomas H Massie, J Kenneth Salisbury, et al. The phantom haptic interface: A device for probing virtual objects. In *Proceedings of the ASME winter annual meeting, symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems*, volume 55, pages 295–300. Chicago, IL, 1994.
- [5] Rajinder Sodhi, Ivan Poupyrev, Matthew Glisson, and Ali Israr. Aireal: interactive tactile experiences in free air. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 32(4):1–10, 2013.
- [6] Takayuki Hoshi, Masafumi Takahashi, Takayuki Iwamoto, and Hiroyuki Shinoda. Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound. *IEEE Transactions on Haptics*, 3(3):155–165, 2010.
- [7] Seki Inoue, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Active touch perception produced by airborne ultrasonic haptic hologram. In *2015 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pages 362–367. IEEE, 2015.
- [8] Tom Carter, Sue Ann Seah, Benjamin Long, Bruce Drinkwater, and Sriram Subramanian. Ultrahaptics: multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces. In *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pages 505–514, 2013.
- [9] Azuma Yoshimoto, Keisuke Hasegawa, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Midair haptic pursuit. *IEEE transactions on haptics*, 12(4):652–657, 2019.
- [10] Tomohiro Amemiya, Shinya Takamuku, Sho Ito, and Hiroaki Gomi. Buru-navi3 gives you a feeling of being pulled. *NTT Technical Review*, 12(11), 2014.