

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔平成31年度（2019年度）研究進捗評価用〕

平成28年度採択分
平成31年3月6日現在

**非接触での分布触覚提示が生体に及ぼす効果の系統的説明と
応用展開**

**Systematic Study on Human Response to Noncontact
Distributed Haptic Stimulation and Its Applications**

課題番号：16H06303

篠田 裕之（SHINODA, HIROYUKI）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授



研究の概要（4行以内）

超音波による空中触覚提示技術は、原理的には人間の運動を拘束することなく、刺激部位や力の空間分布を任意に変化させることを可能にする。本研究では、まず任意の位置、タイミングに多様な力分布を与えることができる触覚提示環境を実現する。そのシステムを用いて触覚を解明するとともに、3次元インタフェースとコミュニケーションの新しい姿を提案する。

研究分野：ヒューマンインタフェース・インタラクション

キーワード：ハプティクス、超音波、バーチャルリアリティ

1. 研究開始当初の背景

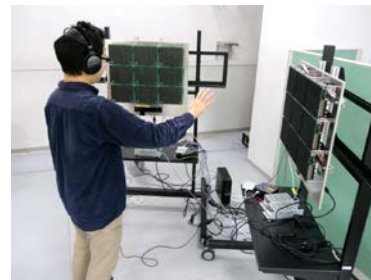
超音波放射圧による触覚提示技術は、原理的には人間の運動を拘束することなく、刺激部位や力の空間分布を任意に変化させることを可能にするが、研究開始時点ではごく狭いワークスペースでプリミティブな触覚提示が行われているに過ぎなかった。

2. 研究の目的

そこで本研究では、まず人間の上半身が自由に動かせる領域内で、任意の位置、タイミングに多様な力分布を与えることができる触覚提示環境を実現する。分散配置された超音波デバイスを同期して駆動し、反射も考慮しながら所定の放射圧分布を生成するシステムを確立する。そのシステムを用い、触覚を解明するとともに、3次元インタフェースとコミュニケーションの新しい姿を提案する。

3. 研究の方法

まず、超音波フェーズドアレイを構成する多数の超音波フェーズドアレイユニットが、超音波が干渉できる時間精度で同期し、連携動作できるシステムを開発する。所望の触覚刺激を生成する波面制御方法を確立し、その刺激環境を用いて触覚を伴いながら空中映像を自在に操作したり変形させたりする作業の実現や、動作誘導型インタフェース、すなわち物体に触れる前の触覚刺激によって人間の運動を誘導するインタフェースを探求する。分布触覚が人間に与える作用の系統的理解を深め、その知見に基づきながら応用を進める。



4. これまでの成果

大規模フェーズドアレイの確立

遅延ばらつき $1\mu\text{s}$ 以下で同期でき 1kHz 以上の更新レートを達成する超音波ユニットの開発に成功した。各ユニットがプロセッサを搭載し、同期を保ったまま必要に応じてユニットを増設できる。多数のユニットを用いた場合、相互の位置関係を自動計測する機能を備えることで、フレキシブルに提示環境を構築できる。それらを干渉させて音場を生成できることを実証した。

復元力まで含めて音場を設計する境界ホログラムの開発

物体表面に所定の圧力分布を実現する素子駆動信号の計算方法を確立した。反射の扱いを明確化した上で問題を定式化し、最適化手法によって実用的な解を求める。さらに表面での圧力分布だけでなく、物体の微小変位に対する復元力までも制御する方法を示し「境界ホログラム」として確立した。

また、放射圧だけでなく、超音波によって望ましい音響流を設計する問題にも取り組んだ。生成した音響流によって冷気を皮膚上

に運搬し、冷覚提示を行うシステムを実証した。

薄型の実用デバイス開発

強力超音波を生成できる薄型実用デバイスを提案した。原理検証実験において現行の圧電型デバイスと同程度の超音波強度を達成し、50%以上の電気-音響変換効率が得られることを実験的に確認した。さらに超音波出力を向上し、製品化も見込めるデバイスの開発を進めている。発音部の厚みは0.5 mm以下であり、表面は完全平面化できる。

物体把持感覚の再現

人間は、ほぼ無意識に3次元物体を持ち上げて動かすことができるが、超音波による触覚フィードバックによって、この把持感覚を再現するシステムを試作した。つまんで動かすことができる立体映像を実証し、さらに映像を見ずに触覚だけでも物体をつまみ上げることができることを示した。



受動触覚の解明

受動的に知覚される物体表面の触感を記録再現するシステムを試作し、一定のリアリティで触感を再現できることを確認した。また、固定点で圧力を変化させた場合よりも、焦点位置を皮膚に沿って振動させた方が強い触覚が生起されることを発見した(Lateral Modulation 法)。これによって皮膚有毛部にも触覚提示が可能となった。

動作誘導型インタフェースの実証

人間の手の自然な誘導を可能にする Haptic Pursuit を発見した。人間の手掌部に超音波放射圧による触覚刺激を提示し、それを手掌部の面に沿って移動させると、人間の手は容易にそれを追従することができる。また、これとは異なる手法として、定常的な Bessel beam ビームを能動的に探索させることで目的地点まで手を誘導するシステムも提案・実証した。

空中浮遊型インタフェース

風船のような軽量物体を、超音波で制御する方法を確立した。広いワークスペース内で、軽量物体を3次元制御可能であることを実証し、視触覚提示に利用可能であることを示した。また、境界ホログラムを適用し、任意形状物体の位置・姿勢を任意に微小変化させた際に、全ての自由度において復元力が働く音場の実現方法を示した。その手法を用い、波長より大きい非球体を遠隔浮遊させることに成功した。

5. 今後の計画

これまでに開発されたデバイスや触覚提示技術を基盤としながら、触覚の解明とその応用を進める。開発したシステムによって皮膚刺激の空間的および時間的パターンを人間の運動に同期して多様に変化させることができる。それを用いて触覚の基礎的な知覚特性、特に快・不快などの感性的な反応や効果を解明し、人間の活動を支援するシステムとして具体化していく。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

[1] Atsushi Matsubayashi, Yasutoshi Makino, H. Shinoda: "Direct Finger Manipulation of 3D Object Image with Ultrasound Haptic Feedback," Proc. ACM CHI, 2019, accepted.

[2] Seki Inoue, Shinichi Mogami, Tomohiro Ichiyama, Akihito Noda, Yasutoshi Makino, Hiroyuki Shinoda: "Acoustical boundary hologram for macroscopic rigid-body levitation," Journal of the Acoustical Society of America, Jan:145, pp. 328-337, 2019.

[3] Takuro Furumoto, Keisuke Hasegawa, Yasutoshi Makino, Hiroyuki Shinoda: "Three-Dimensional Manipulation of a Spherical Object Using Airborne Ultrasound Plane Waves," IEEE Robotics and Automation Letters, pp. 81-88, Volume: 4, Issue: 1, Jan. 2019.

[4] 神垣 貴晶, 二宮 悠基, 篠田 裕之: 高効率・高出力な静電駆動型空中超音波振動子の開発, 計測自動制御学会論文集, Vol. 54, No.3, pp. 340-345, 2018.

[5] Keisuke Hasegawa, Hiroyuki Shinoda: "Aerial Vibrotactile Display Based on Multiunit Ultrasound Phased Array," IEEE Transactions on Haptics, vol. 11, no. 3, pp. 367-377, 1 July-Sept. 2018.

[6] Ryoko Takahashi, Keisuke Hasegawa, Hiroyuki Shinoda: "Lateral Modulation of Midair Ultrasound Focus for Intensified Vibrotactile Stimuli," Proc. Eurohaptics, pp. 276-288, Pisa, Italy, June 13-16, 2018.

[7] Shun Suzuki, Keisuke Hasegawa, Yasutoshi Makino, Hiroyuki Shinoda: "Haptic Tracing of Midair Linear Trajectories Presented by Ultrasound Bessel Beams," Proc Eurohaptics, pp. 209-220, Pisa, Italy, June 13-16, 2018.

[8] 経済産業省デジタルコンテンツ協会 Innovative Technologies 2017 採択、IEEE Haptics Symposium 2018 Best Demonstration Award の Finalist に選出

7. ホームページ等

http://www.hapis.k.u-tokyo.ac.jp/?page_id=447