



空中集束超音波を用いた 唇部への非接触触覚提示の基礎的検討

Basic Study on Non-contact Tactile Presentation to Lips using Focused Airborne Ultrasound

神宮重良太¹⁾, 三河祐梨¹⁾, 藤原正浩²⁾, 牧野泰才²⁾, 篠田裕之²⁾

Arata JINGU, Yuri MIKAWA, Masahiro FUJIWARA, Yasutoshi MAKINO, and Hiroyuki SHINODA

1) 東京大学大学院 情報理工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, jingu@hapis.k.u-tokyo.ac.jp)

2) 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 (〒 277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

概要: 数ある身体部位の中で、唇部は触覚提示への感度が高く、VR 体験の幅を広げうる部位として近年研究が盛んである。従来では身体接触を伴う手法が研究されてきたが、本研究では空中集束超音波による非接触な唇部触覚提示システムを想定し、衛生的かつ幅広い触覚表現の実現を目指す。音響シミュレーションと模型実験により唇部の音響放射圧分布特性の調査を行い、本手法の高い空間解像度および広い圧力範囲を確認した。

キーワード: 唇部, 空中集束超音波, 非接触触覚提示, バーチャルリアリティ, ハプティクス

1. はじめに

これまで、人間の五感の一つである触覚を適切に刺激し、没入的なバーチャルリアリティ体験を構築する試みが多数なされてきた。人間の身体部位の中でも、手指や腕、胴体など、広域かつ装着を容易とする部位への触覚提示の研究が最も盛んに行われてきた [1]。他方で、近年、唇部のようなデリケートな部位への触覚提示も注目を浴び始めている。唇部は飲食において最も外界に接する身体部位であり、同様にバーチャルリアリティの体験を深める味覚・嗅覚・聴覚との関連も強い。また、接吻など、他者との密な身体コミュニケーションを司る重要な部位でもある。唇部に適切な刺激を与えて触覚提示を行うことは、バーチャルリアリティの体験を拡張しうるものであり、今後の研究・発展が期待される。

従来研究において、唇部を対象とした触覚提示装置が多数研究されてきた。橋本らによる Straw-like User Interface [2] は、飲食物を吸引する際の音・振動・圧力変化を再現することで、ストローを介して唇部に吸引感覚を提示する。また、接吻の感覚を提示する研究として、チューブ状の回転機構を口腔内に配置する手法 [3] や、サーボモータによってシリコンゴムを介して唇部表面を刺激する手法 [4] が提案されている。更に、ヘッドマウントディスプレイに取り付けた送風機構による唇部周辺の触覚提示 [5] も提案されている。

本研究では、図 1 (a) に示すような空中集束超音波を用いた唇部への非接触な触覚提示システムを想定する。空中集束超音波を用いた非接触触覚提示 [6] は、接触や装着を伴わないため、簡便で衛生的な運用ができる。さらに、焦点の空間分解能が高いことから、棒状に尖った形状から平面状に広がった形状まで、幅広い触覚表現の実現が期待され

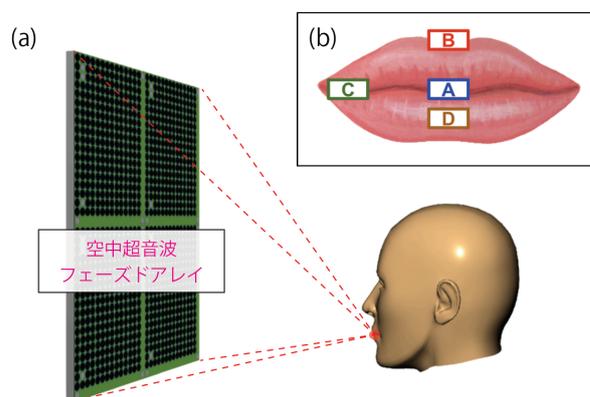


図 1: a) 本研究の想定する唇部への非接触触覚提示システムの外観図, b) 唇部模式図

る。本稿では、システム実現の第一段階として、空中集束超音波提示における唇部の音響放射圧分布特性を調査する基礎的検討を行う。

本研究では、評価実験として、音響シミュレーションおよび模型実験の二種類の実験を行った。評価実験により、本手法を用いて高い空間解像度での触覚提示が可能であり、また空中集束超音波の提示可能な圧力範囲を 1.5-3.5 倍拡大できることを示した。

2. 関連研究

2.1 唇部の触覚特性

唇部の触覚感受性は非常に高い。唇部の二点弁別閾は指と同程度に低く [7], 唇部は触覚知覚において高い空間分解能を有している。

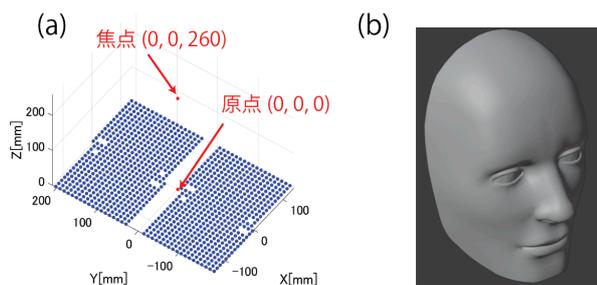


図 2: a) 超音波トランスデューサ群の配置 (青色球が各トランスデューサ), b) 顔の CG モデル

唇部の機械受容器として、手の無毛部と同様にマイスナー小体、メルケル触盤、ルフィニ終末が存在する [8]。マイスナー小体は低周波振動に、メルケル触盤は圧力に、ルフィニ終末は皮膚の伸展に反応すると言われている。一方、手の無毛部に存在して高周波振動に反応するパチニ小体は唇部には確認されていない。

2.2 空中超音波フェーズドアレイ

本研究では、唇部に対して非接触な触覚提示を行うために空中超音波フェーズドアレイ (以降、AUPA と呼ぶ) [9] を使用した。

音響インピーダンスの異なる二つの媒質の境界を音波が透過する際、境界面上で音響放射圧が発生する。AUPA は 249 個のトランスデューサから超音波を放射し、対象物体表面に集束させることで音響放射圧を発生させる。音響放射圧 P [Pa] は式 (1) によって近似的に計算され、音圧の二乗に比例する。

$$P = \alpha \frac{p^2}{\rho c^2} \quad (1)$$

ここで、 p [Pa] は超音波の音圧、 ρ [kg/m³] は空気の数密度、 c [m/s] は音速、 α は物体表面の反射特性で決まる係数である。ただし、超音波の強い放射によって音を伝播する媒質自体が移動する音響流 [10] という現象により、実際の音響放射圧の値は式 (1) から変化しうる。

空中集束超音波提示において、知覚される振動触覚の強度を高めるために、機械受容器の周波数特性に合わせて超音波に変調をかける手法が提案されている。代表的な変調手法として AM (Amplitude Modulation) と LM (Lateral Modulation) [11] が存在する。AM では空中集束超音波の焦点位置を固定したまま、超音波出力強度を正弦波状に変化させる。一方、LM では超音波出力強度を一定のまま、空中集束超音波の焦点位置を正弦波状に変化させる。手の無毛部・前腕の有毛部において、LM は AM と比較してより強力な振動触覚刺激を提示できることが示されている。

3. 唇部における音響放射圧分布の調査

本研究は、図 1 (a) に示すように、空中超音波を用いた唇部への非接触な触覚提示を行うシステムを想定している。空中超音波を用いた唇部への触覚提示において、その知覚特性は未だ明らかにされていないことから、本研究はそれ

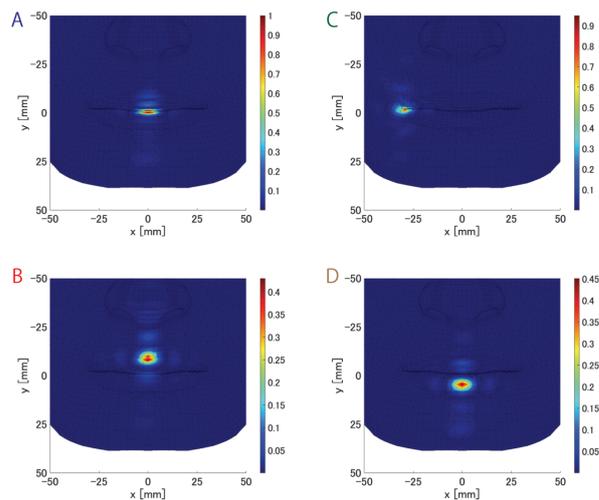


図 3: 唇部の各部位に対して集束超音波提示を行う音響シミュレーションの結果。カラーバーは CG モデル表面における音響放射圧の定数倍を表し、部位 A のシミュレーションにおける最大値で割って正規化している。

表 1: 各シミュレーションにおける最大値。小数第二位まで表示。

A	B	C	D
1.00	0.43	0.95	0.45

の解明を目指す。

本稿は、その基礎的検討として簡単のため、図 1 (b) にある唇部の図のように、唇部における代表的な四部位に対し、超音波を一点に集束させた空中集束超音波の提示による音響放射圧分布特性を調査する。この四部位は唇部の中で特徴的な形状を持つ閉口時正中口裂点 (部位 A)、上唇結節 (部位 B)、口角 (部位 C)、下唇中心 (部位 D) である。本稿では、提示対象の唇部は閉じた状態で静止しているものとする。

空中集束超音波を唇部に提示した際の音響放射圧分布特性の調査を行うべく、以下に示す音響シミュレーションおよび模型実験を行った。音響シミュレーションの目的は、唇部の各部位への集束超音波提示における理論上の最大音響放射圧を比較することにある。式 (1) より、ある時点における音響放射圧は理論上では音圧と定数のみから求められるため、音響シミュレーションにおいて変調周波数および変調手法を設定しなかった。一方、模型実験の目的は、実環境における唇部への集束超音波提示による音響放射圧分布を調査することにある。提示手法の違いによる実際の音響放射圧分布への影響を調査するため、二種類の変調周波数 (40 Hz, 200 Hz) および二種類の変調手法 (AM, LM) の提示を行なった。この変調周波数はそれぞれマイスナー小体、パチニ小体での検出閾値が最小になる周波数範囲内の値であり、人の触覚知覚特性との関連が強い。また、AM/LM は 2.2 節で述べたように空中集束超音波の代表的な二種類の提

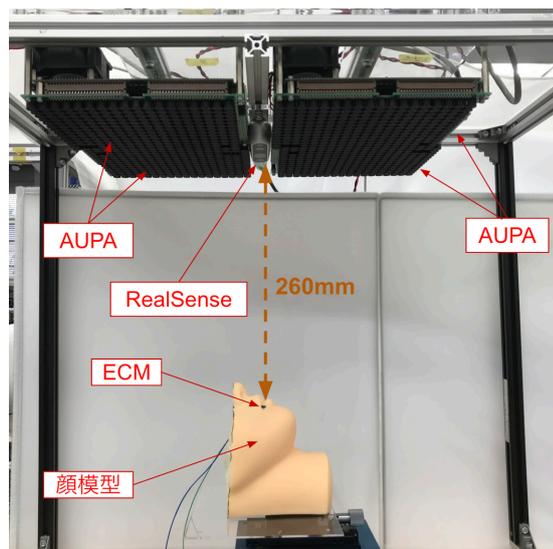


図 4: 実験装置の構成

示手法である。LM では、集束超音波焦点が唇部に対して水平方向に振幅 7 mm の正弦波振動を行うように設定した。

3.1 実験 1: 音響シミュレーション

3.1.1 実験手法

本節では、境界要素法による音響シミュレーションを行った。本シミュレーションでは、超音波トランスデューサ群を図 2 (a) のように仮想的に配置し、図 2 (b) に示す顔の CG モデルの唇部に超音波単焦点を形成した。計測は図 1 (b) の各部位ごとに行い、超音波トランスデューサ群の原点から一定位置 (Z 方向に + 260 mm) に超音波単焦点と提示部位が配置されるように設定した。これらの配置は実験 2 の計測条件と一致する。本実験では、人の顔を剛体としてモデル化し、顔の表面で超音波が完全に反射されると仮定した。

3.1.2 実験結果・考察

各部位における音響シミュレーションの結果を図 3 に、各シミュレーションにおける最大音響放射圧を表 1 に示す。顔上部における音響放射圧は十分小さかったため、唇部を拡大して表示した。この図より、各部位において、直径 5 mm 以内の位置に音響放射圧を集中的に提示できることが確認された。また、部位 A, C における最大音響放射圧は部位 B, D におけるそれと比較して、2.1-2.3 倍大きいことが確認された。これは部位 A, C の谷状の構造における超音波の多重反射に起因すると考えられる。

3.2 実験 2: 模型実験

3.2.1 実験装置

実験装置の構成を図 4 に示す。顔模型には Seven Beauty 社製のマネキン (幅 15 cm, 高さ 26 cm) を使用した。利便性のために唇部周辺の音響特性に関連が薄い顔上部を取り除き、超音波単焦点を提示する場所に穴をあけ、ECM (エレクトレットコンデンサマイク) を埋め込んだ。顔模型は図 1 (b) に示す各部位ごとに作成した。ECM には Kingstate

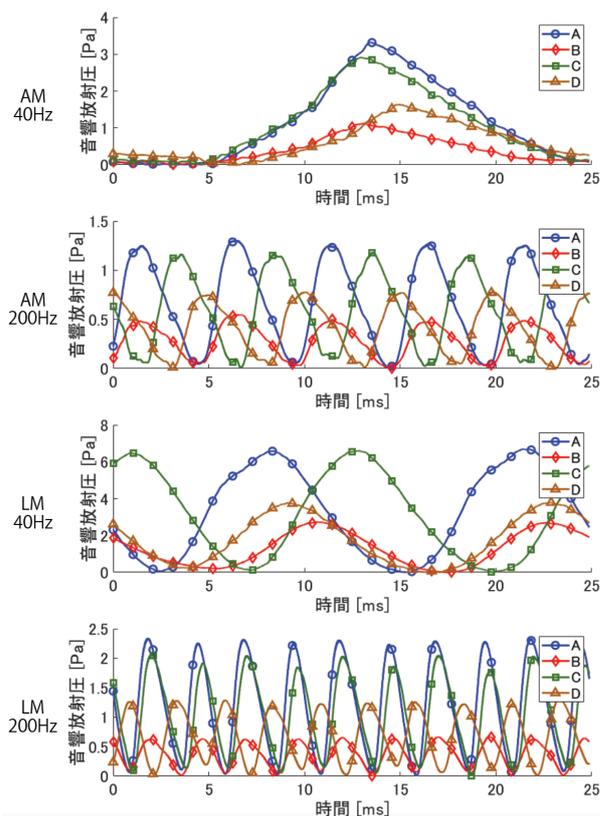


図 5: 各提示手法, 各部位における音響放射圧 [Pa] の時系列データ

表 2: 各時系列データにおける最大値 [Pa]. 小数第二位まで表示。

	A	B	C	D
AM 40 Hz	3.32	1.12	2.91	1.63
AM 200 Hz	1.31	0.55	1.19	0.79
LM 40 Hz	6.69	2.73	6.60	3.80
LM 200 Hz	2.34	0.67	2.07	1.34

社製の KECG2738PBJ-A を使用した。

四体の AUPA を図 2 (a) と同様に配置し、ECM が AUPA 系原点から Z 方向 + 260 mm に配置されるように顔模型の位置を調整した。Intel 社製の RealSense D435 によって得た点群情報を元に、ECM の位置と超音波単焦点の位置とが一致するように設定した。

3.2.2 実験手法

顔模型を利用して、実環境における音響放射圧の計測を行った。本実験では、二種類の変調周波数 (40 Hz, 200 Hz), 二種類の変調手法 (AM, LM) を組み合わせた計四種類の提示手法を使用した。

ECM の出力音圧にカットオフ周波数 1 kHz のローパスフィルタをかけることで、超音波トランスデューサの制御によって生じる高周波振動成分を取り除いた。更に、ECM 計

測時の直流カットの影響を取り除くため、各時系列データの最小値を全データから引いて最終的な音響放射圧とした。

3.2.3 実験結果・考察

各提示手法、各部位において計測された音響放射圧の時系列データを図5に、各時系列データにおける最大値を表2に示す。いずれの提示手法においても、部位A、Cにおける最大音響放射圧は部位B、Dにおけるそれと比較して1.5-3.5倍大きいことが確認された。この比率は実験1の音響シミュレーションの結果と概ね一致しており、同様に唇部の谷状の構造における超音波の多重反射に起因すると考えられる。また実験1と比較して比率に若干の差があるが、これは音響流の影響、音響シミュレーション時の仮定や近似、直流カット補正時の計算誤差等によって相違が生じたと考えられる。双方の実験から、唇部構造を利用することで、AUPAの元の出力範囲を超えて、提示可能な圧力範囲を拡大できることが示された。

表2より、同じ変調周波数においてLMの最大音響放射圧がAMのそれより大きいことが確認された。これは2.2節で述べた他部位における結果と合致する。一方、同じ変調手法において40Hzの最大音響放射圧が200Hzのそれより大きいという計測結果が出た。これは、音響放射圧が超音波の変調周波数によらないとする式(1)に反している。原因として、音響流の影響により式(1)が近似式であること、計測に利用したECMの200Hzにおける感度が40Hzにおける感度より低い可能性があることが挙げられる。変調周波数による音響放射圧への実際の影響は、今後被験者実験によって明らかにする必要がある。

4. まとめ

本研究では空中集束超音波を用いた非接触な唇部触覚提示手法を想定し、システム実現の第一段階として、空中集束超音波提示における唇部の音響放射圧分布特性を調査した。音響シミュレーションによって本手法の高い空間解像度を示した。また模型実験の結果から、唇部構造を利用することで、AUPAの元の出力範囲を超えて、提示可能な圧力範囲を1.5-3.5倍拡大できることを示した。空中集束超音波の焦点を空間内の自由位置に形成できることを加味すると、高い時空間解像度と広い圧力範囲を駆使して、高い自由度での非接触な唇部触覚提示が可能になると見込まれる。

今後の展望としては、被験者実験を行い、本稿の実験結果と関連づけながら人間の知覚特性を調査するほか、飲食や接吻などの実際のバーチャルリアリティ体験に取り入れ、その影響の調査を行うことが考えられる。

参考文献

- [1] Heather Culbertson, Samuel B Schorr, and Allison M Okamura. Haptics: The Present and Future of Artificial Touch Sensation. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, Vol. 1, pp. 385-409, 2018.
- [2] Yuki Hashimoto, Naohisa Nagaya, Minoru Kojima, Satoru Miyajima, Junichiro Ohtaki, Akio Yamamoto, Tomoyasu Mitani, and Masahiko Inami. Straw-like user interface: virtual experience of the sensation of drinking using a straw. In *Proceedings of the 2006 ACM SIGCHI international conference on Advances in computer entertainment technology*, pp. 50-es, 2006.
- [3] 高橋宣裕, 國安裕生, 佐藤未知, 福嶋政期, 古川正紘, 橋本悠希, 梶本裕之. 口腔内動作を入出力とする触覚コミュニケーションデバイス. *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, Vol. 13, No. 4, pp. 335-344, 2011.
- [4] Hooman Aghaebrahimi Samani, Rahul Parsani, Lenis Tejada Rodriguez, Elham Saadatian, Kumudu Harshadeva Dissanayake, and Adrian David Cheok. Kissenger: design of a kiss transmission device. In *Proceedings of the Designing Interactive Systems Conference*, pp. 48-57, 2012.
- [5] Alexander Wilberz, Dominik Leschtschow, Christina Trepkowski, Jens Maiero, Ernst Kruijff, and Bernhard Riecke. FaceHaptics: Robot Arm based Versatile Facial Haptics for Immersive Environments. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1-14, 2020.
- [6] Takayuki Iwamoto, Mari Tatezono, and Hiroyuki Shinoda. Non-contact method for producing tactile sensation using airborne ultrasound. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 504-513. Springer, 2008.
- [7] Sidney Weinstein. Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex and laterality. *The skin senses*, 1968.
- [8] Maria Z Siemionow, Bahar Bassiri Gharb, and Antonio Rampazzo. The face as a sensory organ. In *The Know-How of Face Transplantation*, pp. 11-23. Springer, 2011.
- [9] Seki Inoue, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Scalable architecture for airborne ultrasound tactile display. In *International AsiaHaptics conference*, pp. 99-103. Springer, 2016.
- [10] James Lighthill. Acoustic streaming. *Journal of sound and vibration*, Vol. 61, No. 3, pp. 391-418, 1978.
- [11] Ryoko Takahashi, Keisuke Hasegawa, and Hiroyuki Shinoda. Lateral modulation of midair ultrasound focus for intensified vibrotactile stimuli. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 276-288. Springer, 2018.