



空中超音波における圧覚増強の要因分析: 振動分布面積と位相差の効果

森崎汰雄¹⁾, 宇治土公雄介¹⁾

Tao Morisaki, Yusuke Ujitoko

1) NTT 株式会社 コミュニケーション科学基礎研究所

(〒 243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1, {taomorisakim,yusuke.ujitoko}@gmail.com)

概要: 集束超音波を用いれば非接触に触覚刺激を提示できる。本研究では、超音波での強力な圧覚提示に向け、皮膚刺激パターンと圧覚強度の関係を系統的に調べる。実験 1 では、皮膚の一点に数 Hz 振動を与えた場合の圧覚強度は、皮膚振動の最大振幅が同じであっても、焦点を動かした場合よりも弱くなることを示した。実験 2,3 では、提示する 5 Hz 振動の面積を増加させると圧覚強度が増加すること、この面積による増強効果は、提示した振動分布に位相差がある場合のみ生ずることを示した。

キーワード: 圧覚、空中超音波、振動分布面積、位相差

1. 緒言

物体の触感を再現する触覚提示法が注目を集めており、VR やゲームへの応用が提案されている [1]。これまでに振動子を装着するウェアラブル型 [2] などが提案されているが、これらの手法は皮膚と装置の接触が必須のため使用時の身体的な負担が高いという問題を抱える。

デバイスとの接触が不要な触覚提示として、空中超音波による触覚提示が提案されている [3]。超音波を集束させると、その焦点に音響放射力と呼ばれる力が生ずる。この放射力を皮膚に直接提示することで、触覚刺激を非接触に提示できる。超音波の集束には、振動子をアレイ状に配列した空中超音波フェーズドアレイが用いられる [4]。触覚フィードバック付きの空中タッチパネルなど、この超音波触覚を活用した様々な応用がこれまでに提案されている [5]。

超音波触覚では、提示する放射力に変調を加えることで知覚強度を向上させるのが基本方針となる。焦点に生ずる放射力の物理強度は高々数グラムと弱い [4]。この放射力をそのまま皮膚に提示しても、触覚受容体の順応によりその刺激は継続的に知覚できない [6]。これまでに代表的な変調として、提示放射力を周期変化させる Amplitude Modulation(AM) と [7]、焦点の提示位置を数 mm だけ周期変位させる Lateral Modulation(LM) [8] が提案されている。これらの変調を用いると皮膚に加わる放射力は常に時間変動するため、典型的には、その触感は振動に感じられる。

近年の Morisaki らの研究により、超音波の LM 刺激において、焦点の移動周波数を数 Hz と低くすることで、振動でなく定常的な加圧感覚 (圧覚) が生起することが示された [9]。圧覚は実物体に物体を押したり、掴んだりしたときに必ず知覚されるため、リアルな触感の再現に必須の感覚である。Morisaki らは、5 Hz の LM 刺激を提示すること

で 0.2 N 相当以上の圧覚が生起することを掌と指腹において確認した。この圧覚提示法によって物体に軽く触れた接触感は再現できるが、固い物体に触れた感覚や重量感の再現にはより強力な圧覚が必要である。

人間の圧覚の知覚メカニズムに基づいて刺激パターンを最適化すれば、この超音波による圧覚の強度をより高められると考えられる。しかし、この圧覚提示はこれまで、低周波 (例: 5Hz) の LM で提示できることが実験的に確認されたのみであり、その知覚メカニズムは未だ不明である。これまでに圧覚生起のメカニズム解明への糸口として、LM 刺激で生ずる数 Hz の皮膚振動の重要性が指摘されている [9]。Morisaki らは、LM 刺激が皮膚に与える圧力変動が、5 Hz の方形波から正弦波に近づくと (高調波成分が減少すると) 圧覚が生ずることを確認した [9]。また、Konyo らは数 Hz の振動が定常的な圧覚として感じることを振動子を用いて確認し、これが圧覚を捉える機械受容器であるメルケル細胞の周波数特性によるものであると指摘している [2]。より強力な圧覚提示法の解明には、この数 Hz の皮膚振動をはじめとした、LM 刺激で生ずる皮膚刺激パターンと圧覚強度の関係を系統的に調査する必要がある。

本研究では 3 つの実験を行い、LM 刺激によって広がる数 Hz 振動の面積が圧覚強度を増強させる要因であることを示した。実験 1 では、5Hz の LM 刺激が 5Hz の AM 刺激よりも強い圧覚を生起することを確認した。この結果は、皮膚 1 点への 5Hz 振動提示だけでは LM 刺激の圧覚強度は説明できないことを示す。実験 2 では、5Hz 振動刺激の面積を増大させると圧覚強度が増強することを示した。刺激面積が最大の刺激としては、焦点が半径 5 mm の円に沿って 5 Hz で回転する LM 刺激を用いた。より刺激面積が小さい刺激として、LM 刺激の焦点軌道上の 1 点、2 点、4 点のみ

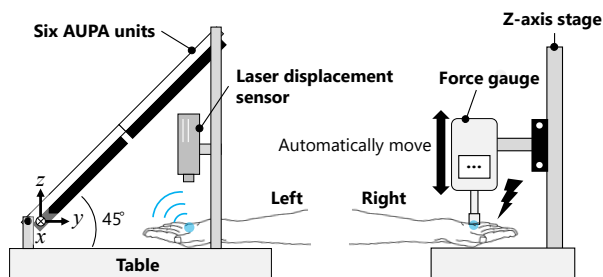


図 1: 実験 1 で用いた実験装置の模式図。

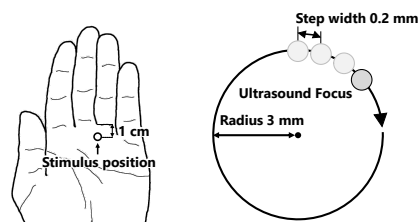


図 2: 左) 刺激位置の模式図。実験 1,2,3 のすべてで超音波刺激は中指の付け根から 1 cm 下の位置に提示。右) 実験 1,2,3 で用いた円状 LM 刺激の模式図。焦点の軌道半径は、実験 1 では 3 mm、実験 2, 3 では 5 mm。

を逐次的に刺激するパターンを用いた。実験 3 では、この面積による圧覚の増強効果は、提示した振動分布に位相差がある場合のみ生ずることを示した。皮膚の 2 点に同位相で 5 Hz の振動を提示した場合と、その 2 点を逐次的に 5 Hz で刺激した場合を比較し、位相差のある逐次的な刺激の方がより強い圧覚を生起することを示した。これらの結果より、LM 刺激の強い圧覚強度の要因は、その焦点軌道上に位相差を伴って広がる 5 Hz 振動分布であると考えられる。

2. 実験 1: 5 Hz 振動の圧覚強度への影響

本実験では、LM 刺激の強い圧覚強度を、刺激時に生ずる皮膚の 5 Hz 振動のみで説明できるか調査した。5 Hz の LM 刺激と AM 刺激の提示時に生ずる圧覚強度を比較した。

2.1 実験装置

実験装置の模式図と座標系を図 1 に示す。本装置は 6 台のフェーズドアレイ、一軸自動ステージ (中央精機 ARS-7036-GM)、フォースゲージ (IMADA ZTS-50N) で構成された。フェーズドアレイは、実験参加者の左手への超音波刺激の提示に用いる。また、刺激時の皮膚の変位もレーザ変位計 (キーエンス LJ-X8060) で測定した。この皮膚変位測定のため、このフェーズドアレイは地面に対し 45 度傾けて配置された。フォースゲージは自動ステージに取り付けられ、自動で上下しその先端で被験者の右手を押し込んだ。フォースゲージの先端には、面取りしたプラスチック製の直径 6 mm の円柱が取付られた。この円柱の半径は、用いた円状 LM 刺激の軌道半径と同じである。実験参加者は、超音波刺激と自動ステージによる押し込みを比較し、どちらの力が大きいと評価した。実験中、装置の駆動音をマスキングするた

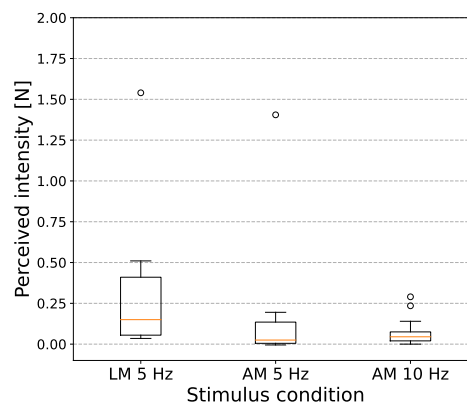


図 3: 圧覚刺激の知覚強度評価結果 (実験 1)。

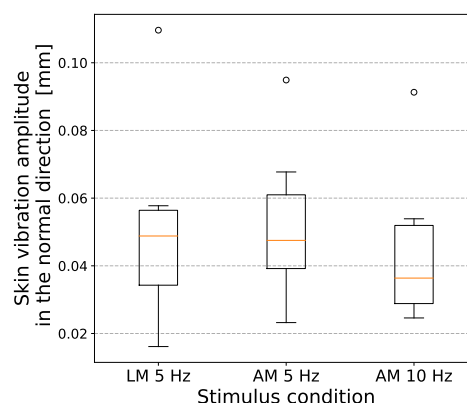


図 4: 皮膚の法線方向の振幅 (実験 1 内で測定)。

め、参加者はヘッドフォンでホワイトノイズを聴いていた。

2.2 実験手順

実験参加者は 13 名であり、うち 6 名が女性 (20 代 5 名、30 代 1 名)、7 名が男性 (20 代 6 名、30 代 1 名) であった。本稿のすべての実験は、日本電信電話株式会社の倫理委員会より承認を得たうえで実施された (承認番号: R05-018、NTT コミュニケーション科学基礎研究所 研究倫理委員会)。

あらかじめ被験者の両手には水性ペンで刺激位置 (中指の付け根から真下に 1 cm) を示すマーカーを書き込んだ。実験参加者は、まず自身の左手をそのマーカーが超音波刺激の刺激位置に重なるように配置した。また、右手のマーカーはフォースゲージの先端の真下に揃うように配置した。

手の配置後、左手には超音波刺激が提示され、右手には、ステージの移動によりパルス状の押し込み刺激が提示された。ステージの移動速度は 10 mm/s であり、既定の押し込み量まで押し込んだのち、0.5 s 静止し元の位置に戻った。

この押し込み量は、二重上下法に基づき 0.1 mm ずつ増減した。押し込み量の初期値は、各実験参加者ごとに、上昇系列の場合は押し込み力が 0 N, 下降系列の場合は 1 N 以上となるようにあらかじめ設定した。参加者は両手に提示された刺激から感じられる力を比較し、より大きいと感じた刺激をフットペダルで回答した。すなわち、右手側の押

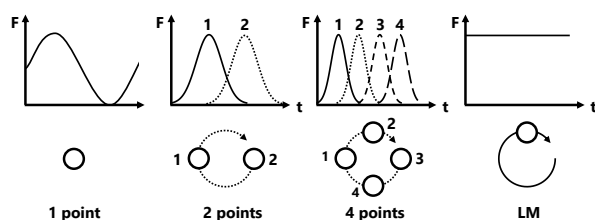


図 5: 実験 2 で使用した刺激デザインの模式図。

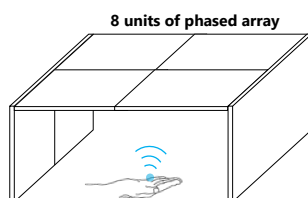


図 6: 実験 2,3 で使用したフェーズドアレイのセットアップ。

し込み刺激が強いと感じた場合は、右側のペダルを、左手側の超音波刺激がより強いと感じた場合は左側のペダルを踏んだ。上昇・下降系列ともに、参加者の回答が 6 回反転するまで継続した。この上昇系列と下降系列の刺激は混ぜて提示され、その提示順序もランダム化された。この実験は 3 種類の刺激 (LM 5 Hz, AM 5 Hz, AM 10 Hz) に対し一回ずつ行い、その順番はランダム化された。

LM, AM 刺激で生起する圧覚の強度を正確に評価するため、押し込みと超音波刺激の比較においては、超音波刺激によって感じられる定常的な力の成分 (圧覚に相当する成分) にのみ着目し変動成分 (振動感や刺激位置の動きの感覚) は無視するよう、実験参加者は指示された。

2.3 実験結果

図 3 に圧覚強度の評価結果と皮膚の振動振幅の測定結果を示す。Holm の補正付きの Wilcoxon の符号順位検定の結果、LM 刺激の圧覚強度はほかの刺激より有意に強いことが示された ($p < 0.005$)。また、皮膚変位の測定結果 (図 4) より、刺激の種類間で皮膚振幅の大きさに有意な差がないことも示されている ($p > 0.05$)。これらの結果は、1 点の 5 Hz 振動を皮膚に与えるだけでは LM 刺激と同等の強さの圧覚は提示できないことを示している。

3. 実験 2: 5 Hz 振動分布の面積と圧覚強度の関係

本実験では、LM 刺激によって生ずる 5 Hz の振動刺激の面積が圧覚強度に与える影響を調査した。

3.1 提示刺激

図 5 に本実験で用いた超音波の触覚刺激の模式図を示す。本実験では 5 Hz 振動の提示面積が最大の刺激として 5 Hz の LM 刺激を、最小の刺激として 5 Hz の AM 刺激を用いた。この LM 刺激の焦点軌道は半径 5 mm の円であった。この面積を変化させるため、LM 刺激の焦点軌道上の 2 点、4 点のみを逐次的に刺激するパターンも用いた。以下、これらのパターンをその刺激点数に応じて、1 点刺激 (AM)、2

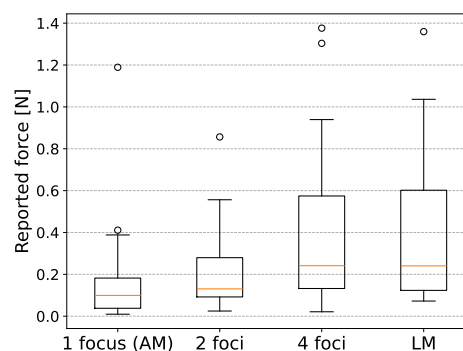


図 7: 5 Hz 振動の面積を変化時の圧覚強度 (実験 2)。

点刺激、4 点刺激、LM 刺激と呼称する。2 点、4 点刺激では提示放射力をガウス分布状に変化させた。これは、放射力プロファイルに含まれる高調波を抑制し、圧覚提示の際に意図しない振動が生ずるのを避けるためである [9]。図 5 に各刺激で用いた放射力の時間プロファイルの模式図を示す。

3.2 実験装置

図 6 に実験に用いた装置の模式図を示す。本実験装置は、超音波刺激を提示するための 8 台の超音波フェーズドアレイ、押し込み刺激を与えるためのロボットアーム (DOBOT MG400)、押し込み力を測定するためのフォースゲージ (IMADA ZTS-5N) で構成される。フォースゲージはロボットアームの先端に取り付けられ、皮膚を押し込むようにその高さを上下するように動く。実験 1 と同様に、フォースゲージの先端には半径が 6 mm のプラスチック状の円柱を装着した。実験中、装置の駆動音をマスキングするため、参加者はヘッドフォンでホワイトノイズを聴いていた。

実験参加者は 23 名であり、うち 18 名が男性 (20 代 17 名、40 代 1 名)、5 名が女性 (20 代 2 名、30 代 2 名、40 代 1 名) であった。

実験参加者は、超音波刺激とロボットアームによる押し込みを比較し、どちらの力が大きいか評価した。また、ロボットアームの押し込み量は実験手順は実験 1 と同様に、2 重上下法を用いて 0.2 mm ずつ操作した。

3.3 実験結果と解析

実験結果を図 7 に示す。圧覚強度は 4 点刺激の時に最大になり、その中央値は 0.241 N であった。最小になるのは 1 点刺激の場合であり、その中央値は 0.099 N であった。

刺激条件間で有意差があるか多重比較を行った。Friedman 検定の結果より、5 Hz 振動の面積が圧覚強度に有意な影響を持つことが示された ($p = 0.00026$, $\eta^2 = 0.42$)。Holm の補正付きの Wilcoxon の符号順位検定を行った結果、4 点刺激と LM 刺激のペア以外の全ての刺激ペアで有意差が見られた ($p < 0.05$)。

4. 実験 3: 振動分布の位相差と圧覚強度の関係

本実験では、提示した 5 Hz 振動刺激の分布内における位相差が圧覚強度に与える影響を調査した。

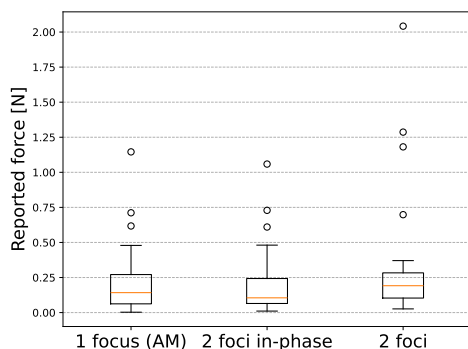


図 8: 位相変化時の圧覚強度 (実験 3)。2 foci in-phase は 2 点に同相の 5 Hz 振動を提示する刺激、2 foci は実験 2 でも用いた位相ずれを伴う刺激を指す。

4.1 実験手順

実験参加者は 28 名であり、そのうち 21 名が 20 代の男性、7 名が女性 (20 代 2 名、30 代 1 名、40 代 4 名) であった。

本実験では、2 点を 5 Hz で逐次的に刺激する振動刺激、2 点を同時に 5 Hz で刺激する振動刺激、および 1 点を 5 Hz で刺激する刺激の 3 種類の刺激を用いた。逐次的な刺激は実験 2 と同様の方法で提示した (図 5)。

実験装置及び実験手順は実験 2 と同様である。8 台の超音波フェーズドアレイを用いて左手に超音波刺激を提示し、同時にロボットアームを用いて参加者の右手を加圧した。参加者はそれらの刺激から受ける力の強さを比較し、どちらが強いと回答した。ロボットアームの加圧の強さは、二重上下法を用いて変化させた。

4.2 実験結果

実験結果を図 8 に示す。圧覚強度は 2 点逐次刺激の時に最大になり、その中央値は 0.19 N であった。最小になるのは 2 点の同相刺激の場合で、その中央値は 0.11 N であった。

刺激条件間で有意差があるかどうか多重比較を行った。Holm の補正付きで Wilcoxon の符号順位検定を行った結果、2 点の逐次刺激による圧覚の強度は 1 点、2 点同時刺激によるものより有意に強かった ($p < 0.05$)。これらの結果は、実験 2 で示した刺激面積による圧覚の増強効果は、提示した 5 Hz 振動分布に位相差がある場合にのみ生じることを示している。

5. 議論

3 つの実験の結果より、LM 刺激の強力な圧覚強度の要因は、その焦点軌道上に位相差を伴って広がる 5 Hz 振動分布であると考えられる。まず、実験 1 より、皮膚の単一の点に 5 Hz の振動を与えるだけでは LM 刺激と同程度に強力な圧覚が提示できないことが示された。実験 2 では、LM 刺激の焦点軌道上を逐次的に刺激する 2 点刺激、4 点刺激を導入し皮膚上に刺激する点数、すなわち刺激面積が少なくなると生ずる圧覚も有意に弱くなることを示した。実験 3 では、この面積による圧覚の増強効果は、提示した振動分布に位相差がある場合のみ生じることを示した。皮膚 1 点に 5 Hz 振動を提示した場合と皮膚の 2 点に同位相で 5 Hz 振動

を与えた場合では、生じた圧覚強度に差が見られなかった。

本研究の制約として、刺激点に与える放射圧のプロファイルが刺激の種類の間で揃えられていないことがあげられる。1 点刺激では正弦波が、2 点、4 点刺激ではガウス分布状の変化がそれぞれ提示された。このため、この放射力のプロファイルが圧覚強度に影響を与えた可能性がある。今後は、この放射力プロファイルの影響も調査する。

参考文献

- [1] Olivier Bau, Ivan Poupyrev, Ali Israr, and Chris Harrison. Teslatouch: electrovibration for touch surfaces. In *Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 283–292, 2010.
- [2] Masashi Konyo, Satoshi Tadokoro, Akinori Yoshida, and Naoki Saiwaki. A tactile synthesis method using multiple frequency vibrations for representing virtual touch. In *Proceedings of 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3965–3971. IEEE, 2005.
- [3] Takayuki Hoshi, Masafumi Takahashi, Takayuki Iwamoto, and Hiroyuki Shinoda. Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 3, No. 3, pp. 155–165, 2010.
- [4] Shun Suzuki, Seki Inoue, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Autd3: Scalable airborne ultrasound tactile display. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 14, No. 4, pp. 740–749, 2021.
- [5] Ismo Rakkolainen, Euan Freeman, Antti Sand, Roope Raisamo, and Stephen Brewster. A survey of mid-air ultrasound haptics and its applications. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 14, No. 1, pp. 2–19, 2020.
- [6] Ake B Vallbo, Roland S Johansson, et al. Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation. *Hum neurobiol*, Vol. 3, No. 1, pp. 3–14, 1984.
- [7] Keisuke Hasegawa and Hiroyuki Shinoda. Aerial vibrotactile display based on multiunit ultrasound phased array. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 11, No. 3, pp. 367–377, 2018.
- [8] Ryoko Takahashi, Keisuke Hasegawa, and Hiroyuki Shinoda. Tactile stimulation by repetitive lateral movement of midair ultrasound focus. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 13, No. 2, pp. 334–342, 2019.
- [9] Tao Morisaki, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Non-vibratory pressure sensation produced by ultrasound focus moving laterally and repetitively with fine spatial step width. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 15, No. 2, pp. 441–450, 2021.