



THE VIRTUAL REALITY SOCIETY OF JAPAN

# 空中超音波触覚ディスプレイを利用した掌への平面形状提示

Tactile presentation of flat shapes on the palm using an airborne ultrasound tactile display

岸 尚希<sup>1)</sup>, 松林 篤<sup>1)</sup>, 牧野 泰才<sup>1)</sup>, 篠田 裕之<sup>1)</sup>

1) 東京大学 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1)

## 概要:

本研究では、掌で平面形状を知覚できる空中超音波触覚提示法を提案する。平面提示を行う掌上の正方領域を仮定し、それを  $4 \times 4$  のグリッドに分割した際に、その 1 つのグリッド内に円軌道で周回する超音波焦点を提示し、その位置を移動させながら平面触覚を生成する。焦点の提示パターンにより平面形状の知覚に生じる影響を被験者実験により確かめた結果、提案手法の範囲では凹凸感を持った平面形状が知覚されることを明らかにした。

キーワード: 触覚, 提示, 感覚・知覚, 平面

## 1. 研究背景

近年触覚のセンシングや皮膚表面への触覚提示に関する研究が進んでおり、触覚センシングや提示技術を用いたアプリケーションの実現につながっている。例として、CAD を用いたモデリングにおいて材料の形状や剛性の触覚情報を手で知覚できるようにすることでデザインの直感性を向上させたアプリケーションが挙げられる [1]。仮想空間に存在するオブジェクトに立体映像を介して触れる感覚が得られることは、操作の直感性、没入感、他者とのインタラクション体験の向上につながる。

本研究では、立体映像への触覚提示に焦点を当てた。触覚提示を行う際に手にデバイスを装着する手法が挙げられるが、デバイスの形状や装着方式によって手の動きが制限されて動かしにくくなり、動作の簡便性を損なう可能性がある。また、デバイスの接触感が立体映像の触感を阻害する、デバイスが視界を遮ることで立体視の障害になるというデメリットがある。そこで、空中に触覚提示を行うことができる超音波触覚を用いて、手に何も装着せずに立体映像への触覚提示を行う。

立体映像への触覚提示において、今回は掌で平面全体の触覚刺激を知覚できるようにすることを目的とする。掌上の平面領域に触覚刺激が提示できると、物体を握る、掌でさすといった触覚体験が可能になる。指を用いるだけでは、物体表面を押す、複数の指で物体を掴むという動作に限られ、掌への平面触覚提示によって触覚体験の拡張につながる。掌への触覚提示に関する類似の研究として、Korres らの研究が挙げられる [2]。この研究では、1 点の触覚刺激を掌いっぱいほどの大きさの円周上の点上を高速に移動させることで、ある領域の輪郭に沿った線上の連続的な振動触覚を提示する手法が提案され、円周上の点の数や各点での触覚提示の時間、各点間の提示の遅延をパラメータとして振動触覚の連続性が評価された。本研究では、領域の輪郭だけでなく、内部も含めた領域全体に触れているような感

覚を出すことを目的とする。1 点の触覚刺激を領域の輪郭だけでなく、領域の内部も含めて高速に移動させることで、領域全体を連続的に知覚できるようにすることを試みる。また、Hajas らは、動的触覚ポインタを用いて二次元の幾何学的形状の空中触覚の提示を行った [3]。掌に丸や三角、四角といった図形の輪郭に沿って動的触覚を提示することによって各図形を識別することを目的とした。動的触覚が静的触覚よりも識別精度高く、輪郭上を移動する運動触覚の数を増やす・角のポイントで触覚の移動を一時停止させるといったアプローチで識別精度が向上することが示された。本研究では、提示する図形を四角形に固定し、輪郭だけでなく図形内部にも振れているような感覚を知覚できるようにすることを目指す。具体的には、掌上に触覚提示したい正方領域を  $4 \times 4$  のグリッドに分割して各グリッド内に円軌道を設け、1 点の超音波触覚刺激が全てのグリッドの円軌道上を高速に移動する手法をとった。これにより、1 点の超音波焦点が平面全体を万遍なく刺激し、掌で平面全体に触れているような感覚を十分な強度で提示することができる。被験者実験では 60 mm 正方の平面領域に触覚提示を行い、知覚された触覚刺激がどの程度の強度で静止した平面に近いかを評価し、手法の有効性を検証した。

## 2. 提案手法

本研究では立体映像の表面に掌で触れる感覚提示の実現に向けて、掌上に正方形を仮定し、その領域に空中触覚を提示する手法を検討した。空中触覚の提示には、図 1 のような空中超音波触覚ディスプレイ (AUTD) を用いた [4]。AUTD は格子状に配列された超音波振動子から構成されるデバイスであり、各振動子から発せられる超音波の位相及び振幅を制御することで、空間中に所望の形状を持った圧力分布を生成できる。よって触覚を提示したい領域全体に渡る圧力分布を生成することで、平面的な触覚提示が可能である。ただし、この方法は圧力を広範囲に分散させるため、

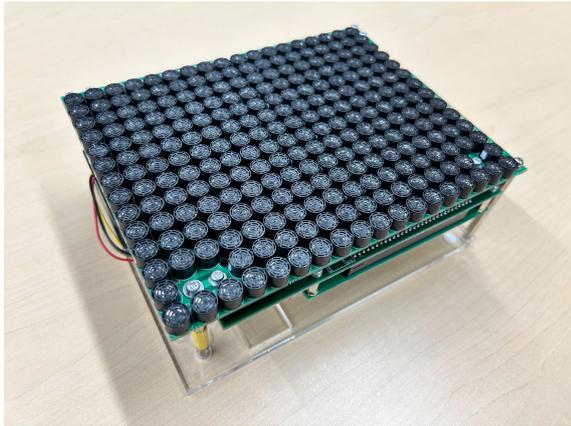


図 1: AUTD

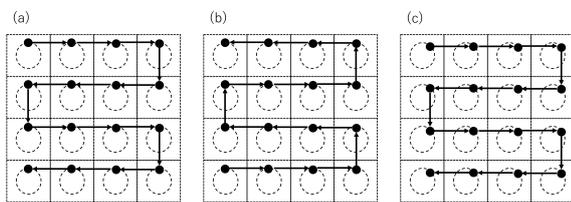


図 2: 提案手法における焦点軌道。(a) まず各グリッドの円軌道の 12 時の位置の点をたどる。(b) 左下に到達すると (a) の経路を逆にたどる。(c) 左上に戻ると円軌道の隣の点に移り、各グリッド同じ位相の点をたどる。これが円軌道を一周するまで繰り返す、全体の焦点軌道の 1 周が完了する。

手のひらに感じる触覚刺激は非常に弱いものになってしまう。そこで、焦点の周期移動により触覚刺激の主観強度を向上させる LM (Lateral Modulation) という手法の考え方を導入する [5]。LM とは、超音波焦点を水平軌道に沿って周期移動させることで皮膚上により強い振動触覚刺激を提示する手法であり、焦点を水平円形軌道で周回させることで触覚刺激の主観強度が向上したことが示されている。本手法では、図 2 のように平面形状を  $4 \times 4$  のグリッドに分割し、各グリッド内で円軌道で周回する超音波焦点を提示した。グリッド間の焦点の動きは平面領域全体に触覚を提示するため、各グリッド内での焦点の円軌道の周回は平面触覚の主観強度を向上させるために用いた。

焦点軌道について具体的に述べる。まず図 2(a) のように、左上のグリッドの円軌道の 12 時の位置に焦点を生成し、隣り合うグリッドの円軌道の同じ位置へ矢印の順に焦点を移動させる。このとき、焦点の移動間隔が長いと掌で焦点が移動している感覚を知覚して平面感が失われてしまうと考えると、移動間隔が短くなるように必ず隣り合うグリッドに移動するように移動経路を調整した。焦点が左下に到達すると、図 2(b) のように元の経路を逆にたどる形で左上のグリッドへと移動させる。焦点が左上のグリッドに戻ると、次は図 2(c) のように円軌道に沿って隣の点に生成位置を変え、再び、隣り合うグリッドの円軌道の同じ位置へ矢印の順に焦点を移動させ、左下に到達すると元の経路を逆にたどる。焦点が各グリッド内の円軌道を一周するまで上記の運動を繰り返す。



図 3: 被験者実験の様子

返して左上のグリッドの円軌道の 12 時の位置に焦点が戻った時点で、今回の提案手法の焦点軌道が完結する。この軌道上で超音波焦点が高速に移動することで、各グリッド内で超音波焦点が円軌道で周回しているような分布を作り出すことができ、平面領域全体で十分な強度で掌に触覚刺激を提示することができると考えた。

### 3. 実験

提案手法の有効性を検証するため被験者実験を行った。60 mm 四方の平面形状の触覚刺激を、図 3 のように 8 台の AUTD を用いて被験者の掌に提示する実験を行った。実験では、焦点数 (points num) ・周波数 (frequency) ・円軌道の半径 (radius) の 3 条件を変えて平面触覚の評価を行った。焦点数は、各グリッド内に設定した円軌道上に、触覚刺激を行う点をいくつ設けるかを表している。刺激点は円軌道上で均等に並ぶように設けた。周波数については、焦点が図 2 に沿って 1 秒間に何周移動するかを表している。焦点数は 2, 4, 8, 16 個、周波数は 10, 20, 30, 40 Hz、半径は 0, 5, 10, 15 mm とし、全ての組み合わせの 64 パターンを被験者が 1 人 1 回ずつ平面触覚を評価した。平面触覚の評価については、触感の強さ (strength)、平面感 (evenness)、触覚刺激の移動感覚 (movement) の 3 つの観点で 7 段階評価を行った。触感の強さについては、弱い場合 1、強い場合 7 とした。平面感については、移動する触覚刺激が離散的に知覚されてしまい平面に感じられない場合 1、移動する触覚刺激が連続的に知覚され平面に感じられるも凹凸感が残る場合 4、真っ平な平面のように感じた場合 7 を目安とした。移動感覚については、触覚刺激が静止していると感じた場合 1、動いていると感じた場合 7 とした。3 人の被験者が実験に取り組み、各評価指標の平均をとり提案手法の有効性を検証した。

### 4. 結果

図 4, 図 5, 図 6 は、各条件の値を変えた時の各評価値の平均値を表している。一方で、半径が大きくなるにつれて移動感覚が大きくなり、平面感が低下することが分かった。

まず図 4 を見ると、円軌道の焦点数については、2 個の場合が全ての評価指標において最も良い値を記録した。これは、各グリッドの中で触覚刺激が円軌道ではなく 2 点間で

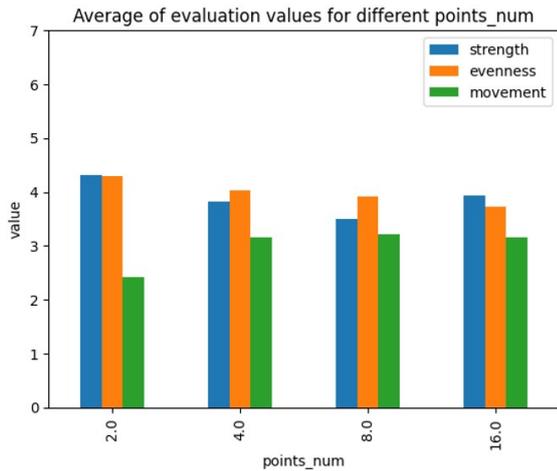


図 4: 焦点数を変えた時の各評価値の平均値

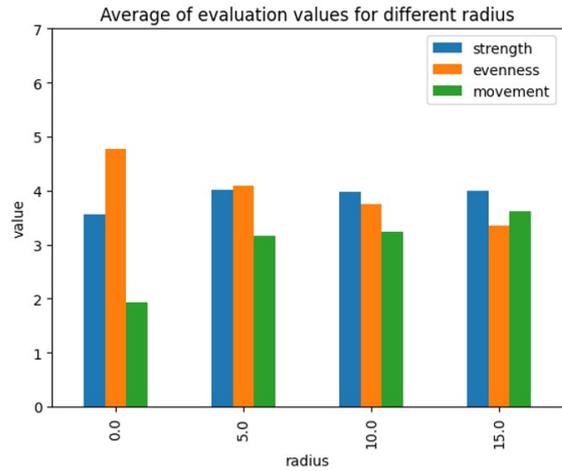


図 6: 半径を変えた時の各評価値の平均値

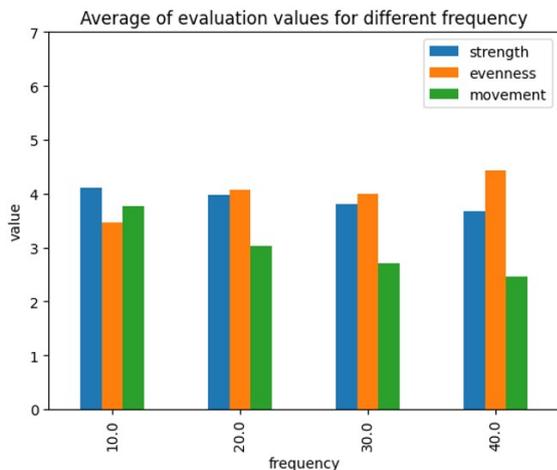


図 5: 周波数を変えた時の各評価値の平均値

の振動として移動していることになる。LM の手法 [5] において直線上に触覚刺激を移動させる場合でも触感の主観強度が強くなるとされているものの、円軌道で移動させる方が主観強度がより強くなると主張されており、今回の実験では反する結果となった。焦点数を増やしたときに強度が低下した理由として、超音波触覚を移動させる時に位相シフトが起こると一時的に振幅が低下することが関係していると考えられる [6]。焦点数を増やすと 1 秒間に焦点が移動する点数が増え、隣り合う焦点に移動するまでの時間が短くなる。焦点数が大幅に増え各位置を刺激する時間が非常に短くなると、位相シフトで振幅が低減した状態のまま次の位置に焦点が移動してしまい、十分な強さの触覚刺激が知覚されなくなると考えられる。また、今回の提示手法では触覚刺激が各グリッドを移動しながら各グリッド内の円軌道を周回していることから、通常の LM と異なり隣り合う円軌道上の点を刺激する際に時間遅延が生じており、触感の強度が低下した原因となった可能性が考えられる。次に図 5 を見ると、周波数については、大きくすると移動感覚が低下し静止した平面形状の触覚提示が可能になる一方、触感の強さが低下するというトレードオフが起きた。一方

で、触感の強さの減少幅はさほど大きくないことが分かった。さらに図 6 を見ると、半径については、値が 0 か正かで触感の強さに大きな差が生じた。また、半径が大きくなるにつれて移動感覚が大きくかつ平面感が低下し、静止した平面形状の触覚刺激から遠ざかる傾向が見られた。グリッドごとの円軌道を取り入れる場合には、半径 10 mm, 15 mm より 5 mm が適していることが示唆される。

より主観強度が高く平面感を維持した触覚刺激を実現するために、提案手法の改善をする必要があると考える。まず、今回 60 mm 四方の正方形を  $4 \times 4$  の同じ大きさのグリッドに分割したため、1つのグリッドは 20 mm 四方と固定されていた。触覚刺激間の距離が近いほど両者の刺激を区別しにくくなると考えられる。したがって、各グリッドのサイズを小さくすることで、触覚刺激の移動間隔が短くなり、より凹凸感が少ない平面形状の触覚提示が実現できると考えられる。しかしその場合、焦点軌道上の経由点の数が増加するため、振動子位相の高速切り替えが必要となり、それに伴って超音波振幅の低下が起こる問題がある [6]。また、前述の通りグリッドサイズを小さくすると全体の平面形状のサイズも小さくなり、触覚提示をできる領域の範囲が限られてしまう。そこで、移動させる焦点を複数用意し、各焦点毎に移動させるグリッドを割り当てることによって、軌道内の焦点数を増やす、全体の平面形状のサイズを大きくするというアプローチをとることが可能になる。一方で、同じ台数の AUTD で生成する焦点数を増やすと各焦点の強度が低下してしまうため、生成する焦点の数を適切に求める、AUTD の台数を増やすといった対応をとる必要がある。

## 5. 結論

本研究では、立体映像を掌で触れる際の触覚提示の実現を見据え、掌で平面形状に触れる感覚を実現する手法を提案した。提案手法では、提示する平面領域を  $4 \times 4$  のグリッドに分割し、各グリッド内で触覚刺激が円軌道で周回するように、1つの触覚刺激を隣り合うグリッドへ順々に移動させ

ることで、平面形状の触覚提示を行った。被験者実験では、各グリッドの円軌道を構成する焦点数、焦点移動の周波数、各グリッドの円軌道の半径を変化させて、平面触覚の評価を実施した。平面触覚の評価は、触感の強さ、平面感、触覚刺激の移動感覚の3つの軸で行った。被験者実験を行って各条件での平面触覚の評価値の平均をとったとき、提案手法の範囲では、焦点数が2個のときに全ての指標で最も良い値となった。また、周波数を大きくすると静止した平面形状への触覚提示につながるものの触感の強さが低下し、半径については10 mm, 5 mm とするよりも5 mm とした方がより良い評価値が得られた。より評価の高い平面触覚刺激を提示すべく、各グリッドのサイズを小さくして平面の凹凸感を低減させる、移動させる触覚刺激の数を1つから2つ以上にすると、といったアプローチが考えられる。このようなアプローチの適用により、今後平面触覚刺激を向上させる提示手法の構築を進めていく。

### 参考文献

- [1] Ken Nakagaki, Daniel Fitzgerald, Zhiyao Ma, Luke Vink, Daniel Levine, and Hiroshi Ishii. inforce: Bidirectional force'shape display for haptic interaction. In *Proceedings of the thirteenth international conference on tangible, embedded, and embodied interaction*, pp. 615–623, 2019.
- [2] Georgios Korres, Tamas Aujeszky, and Mohamad Eid. Characterizing tactile rendering parameters for ultrasound based stimulation. In *2017 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 293–298. IEEE, 2017.
- [3] Daniel Hajas, Dario Pittera, Antony Nasce, Orestis Georgiou, and Marianna Obrist. Mid-air haptic rendering of 2d geometric shapes with a dynamic tactile pointer. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 13, No. 4, pp. 806–817, 2020.
- [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] 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.
- [6] Shun Suzuki, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Reducing amplitude fluctuation by gradual phase shift in midair ultrasound haptics. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 13, No. 1, pp. 87–93, 2020.