

## 第5章 空間立体ユーザインタフェース

### 第1節 レーザーと超音波による空間触覚提示

筑波大学 落合 陽一

#### 1. はじめに

本稿では空中触覚提示のためのレーザーと超音波による空間触覚刺激提示手法について述べる。大枠の実装・実験等については、著者の過去の研究から6)と26)を参照した。

データを空間表示し、視覚・触覚・聴覚・嗅覚・味覚などの人の感覚器を用いて対象物を認識しようとすることを目的とした研究は、過去50年間にわたって大きな注目を集めてきた。写真やレンズを用いたメガネ型の機器による表示手法は19世紀にいくつかの原型を持ち、その後計算機処理された三次元物体をメガネ型の機器を用いて視覚的に表示する研究はIvan Sutherland<sup>1)</sup>がヘッドマウントディスプレイを用いて行ったのを皮切りに3Dディスプレイを探求するための絶え間ない努力がなされている。これを達成するためにメガネを使用する技術は、アナグリフ、時分割、および偏光などに基つき、導光板や光変調などを用いた多くの手法が提案されている。

一方、メガネに頼らない技術は、バララックスバリアやレンチキュラーレンズやレンズアレイやメタマテリアルミラーなどに基づいたものが多い<sup>2)</sup>。これらの方法は効果的な3D画像を提供することができるが、それらは複数の視点に対する正確な画像の計算および生成を必要とし、そしてユーザーは限られた視野角内に留まらなければならない。

他にも3Dディスプレイを実現するための別のアプローチは、平面の代わりに物理的な3D空間を使用して3D空間に「ボクセル」を配置することにより、ユーザーに表示された画像を任意の角度から見るようにすることである。この手法で構成されたボリュメトリックディスプレイは、時にユーザーが物体表面に触れられたり、その物体から音が出たりすることによって三次元空間をより物質的に構成する。それらはボクセルの特性が自発光型か反射光型かによって2つのカテゴリーに分けられる。例えば光を放射するボクセルは、LED<sup>3)</sup>、光ファイバの端点<sup>4)</sup>、またはレーザー誘起プラズマ<sup>5,6)</sup>などがある。また投影された光を反射するものはフォグを用いたもの<sup>7)</sup>、水滴を用いたもの<sup>8)</sup>、シャボン膜を用いたもの<sup>9,10)</sup>あるいは小さな粒子を浮遊させる<sup>11)</sup>などがある。

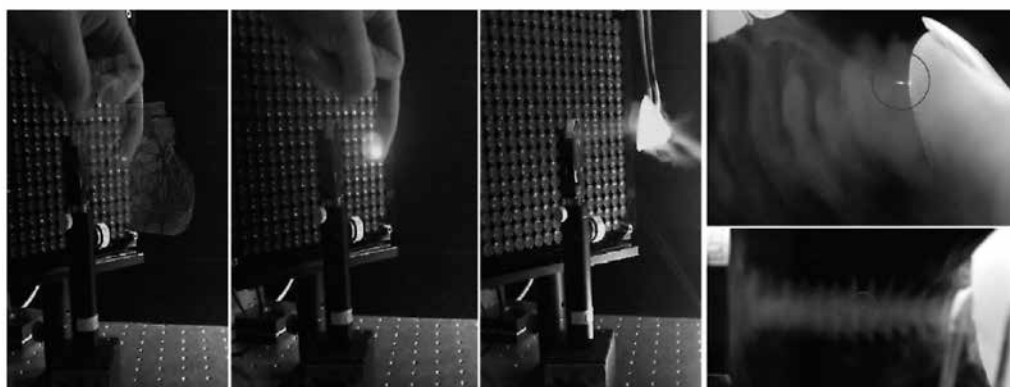


図1 レーザーと超音波を組み合わせた空中触覚提示。(左から)AR表示と組み合わせた例, レーザーのみ, 超音波をドライアイスで可視化した図, 超音波をドライアイスで可視化しながらレーザープラズマを写した図(拡大), 超音波をドライアイスで可視化しながらレーザープラズマを写した図(カラー図は口絵参照)

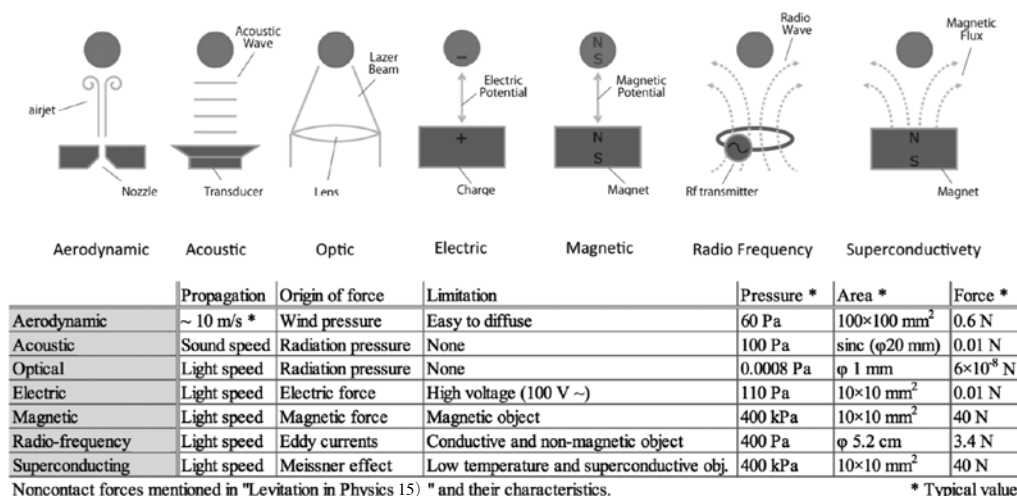


図2 空力, 音響, 光学, 電気, 磁気, 高周波, および超伝導の空間伝達力

こういった3次元的な視覚表示の系譜を含め、空間情報により実在感をもたらすような触覚情報をもたらすものとして、空中触覚フィードバックは盛んに研究されている。現実世界指向のインタラクション、拡張現実感 (AR)、そしてバーチャルリアリティ (VR) などの目的のためにエアジェット<sup>12)</sup>、超音波<sup>13)</sup>、および空気の渦<sup>14)</sup>などの様々な方法が提案されている。上記に挙げた視覚的ディスプレイとしては、2019年現在、仮想没入型コンテンツおよび深度カメラを用いたヘッドセットであるHololens2<sup>注1)</sup>やOculus GO<sup>注2)</sup>などが販売されており、メガネに依らない技術でもLooking Glass<sup>注3)</sup>やASKA3D<sup>注4)</sup>などが販売されている。しかし、空中触覚フィードバックの実用化の観点では、主だったところではUltrahaptics<sup>注5)</sup>による空中触覚用フェーズドアレイ技術が開発者用製品として出回っているのみであり、未だ研究領域での探求が盛んに行われている。

接触型でない空中触覚ディスプレイにはいくつかの利点がある。物理的に接触していないため、空中触覚を与える上で高い「プログラム可能性」を有する。言い換えれば、皮膚に接触する物理的なアクチュエータを必要としないため、それは3D内の任意の位置に設定することができる。またサイズは実空間のサイズに対応するため正確な体積表現を行うことができる。したがって、この技術は空間的なユーザーインタラクションへの親和性が高い。

非接触の空間伝達力に関する研究としては、過去Brandtによって議論された(図2)<sup>15)</sup>。彼は物体の浮上に焦点を当てて、空間伝達力に関して議論を行ったが、その分類は空間に対する非接触触覚ディスプレイにも適用可能である。Brandtが議論した非接触力は、空力、音響、光学、電気、磁気、高周波、および超伝導の7種類であった。その中でも、空力、音響、そして光技術は空間に対する触覚ディスプレイとして潜在的に利用可能である。近年、それらの非接触力を用いたいくつかの研究は計算機による処理に焦点を当てている。そういった研究は三次元空間に触覚情報を描画するホログラフィックアプローチで超音波による音響エネルギー<sup>16)</sup>やレーザー<sup>6)</sup>を処理し、人間の触覚知覚につなげるものである。また単一の物理量に対する研究がいくつか行われてきたが、相乗効果の探求も行われてきた。本稿ではその中でレーザーと超音波を用いた視触覚ディスプレイについて述べる。

注1 Hololens2 : <https://www.microsoft.com/ja-jp/hololens>  
 注2 Oculus GO : <https://www.oculus.com/go/>  
 注3 Looking Glass : <https://lookingglassfactory.com>  
 注4 ASKA3D : <https://aska3d.com/ja/>  
 注5 Ultrahaptics : <https://www.ultrahaptics.com>

## 2. 関連する研究アプローチ

本節では、空中触覚に関する従来の研究について概説する。例えば17)では、仮想物体の空中触覚はノズルからのエアジェットによって表現された。同じように空中に渦輪や空気砲による触覚表示を与える手法が研究されている<sup>14,18)</sup>。他にも超音波による触覚フィードバック<sup>19-21)</sup>超音波や22)のような磁力を使った手法がある。これはユーザーの指に小さな磁石を付けることで空中の磁力線を感じられるようにする手法である。レーザー光を用いてユーザーが手を触ったときに手に感覚を与えるための手法も検討されている<sup>23)</sup>。他にも例えばナノ秒レーザーが肌に触れると触感が現れるものなども検討されている<sup>24,25)</sup>。電気、ラジオ周波数、超伝導力もこれまでのところ空中触覚フィードバックに適用されている。またプラズマを触ったときの触覚については6)で議論されている。これは空中像をレンダリングするためにレーザープラズマを使用し、その空中像の触覚について報告したものである。

本稿では著者の過去の研究<sup>26)</sup>をもとに、レーザーと超音波という二つの異なる分野を使うことで、重ね合わせだけでなく、同時に相乗効果についても論ずる。近年、静電触覚や磁性流体を用いた触覚の組み合わせ<sup>27)</sup>や渦輪と超音波を組み合わせた触覚の組み合わせ<sup>28)</sup>など設計時に複数のフィールドを組み合わせる相互作用が研究されている。以下に、空中触覚に関する問題を解決することを目的としてレーザーと超音波の組み合わせについて解説する。

## 3. レーザーと超音波を用いる理由

超音波触覚フィードバックは比較的高い空間を有する他の空中触覚フィードバックと比較した場合、解像度が波長によって制限される(40 kHzの場合例えば8.5 mmの超音波波長)。また空気中での吸収損失のために、より短い波長を持つより高い周波数の超音波は触覚フィードバックには適していない。もう1つの制限は刺激の弱さである。例えば本研究で用いている18×18のアレイ配列によって生成される最大の力は、16 mNと低いため<sup>20)</sup>、これを得るにはより大きなアレイが必要である。知覚的により大きい力を探求するため、我々は、レーザープラズマがその知覚を補償することができる可能性を考慮して本研究に着手した。超音波触覚フィードバックの欠点と考えられる上記二つの効果は、それぞれ物理的に独立しているレーザーなどの他の力を用いることで補完的にシステムに組み込むことができる。物理的にそれらの二つの触覚フィードバックは同じ場所に適用することができる。その解像感と相互作用について以下では論ずる(図3)。

また後述するが、それぞれ超音波暴露とレーザーによる侵襲には細心の注意を払う必要がある。超音波の音圧レベルは触覚を感じるほど強い音響放射圧を生成している。強力な超音波を用いた実験を行う際は鼓膜の保護に関する安全対策を行う必要がある。また、触覚を与える程度のレーザープラズマへの接触は皮膚の角質に微小ではあるものの損傷を与える<sup>6)</sup>。またレーザーを眼球に直接照射すれば網膜にダメージを当てる可能性がある。そのため、実験にはエネルギーのコントロールおよび安全対策が不可避である。

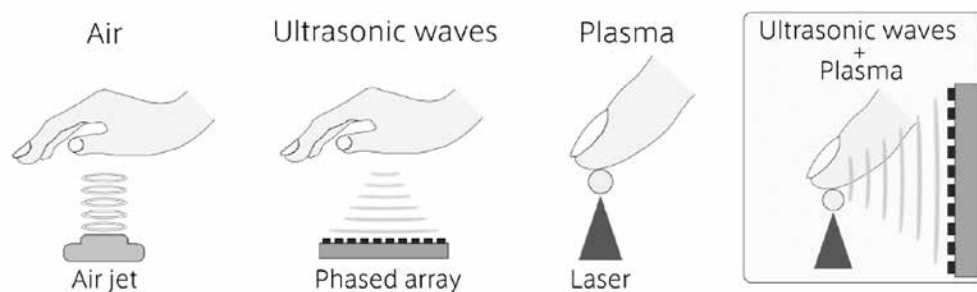


図3 レーザーと超音波による触覚フィードバックの概念図

## 4. 触覚像の定義

音響フェーズドアレイとレーザーを用いた触覚像は以下の $H_i$ によって与えられる<sup>26)</sup>。

$$H_i = \Sigma(H_l(x, y, z) + H_a(x, y, z) + cH_l(x, y, z)H_a(x, y, z))$$

触覚画像 $H_i$ は焦点の時系列の和，すなわち，後述する光のホログラムと焦点移動によって得られる積分値 $H_l$ と音響ホログラムと焦点移動によって得られる積分値 $H_a$ の和である。物理的に独立な二つの現象における知覚的な相互作用を検討するため，後ろの調整項を置く。この相互作用の決定に関わる実験は後述する。

### 4.1 計算機ホログラム

計算機生成ホログラム (CGH)  $U_r$ からの再構成の複素振幅 (CA) は，設計されたCGHパターン $U_h$ のフーリエ変換によって与えられる。

$$\begin{aligned} U_r(v_x, v_y) &= \iint U_h(x, y) \exp[-i2\pi(xv_x + yv_y)] dx dy \\ &= a_r(v_x, v_y) \exp[i\varphi_r(v_x + v_y)] \\ U_h(x, y) &= a_h(x, y) \exp[i\varphi_h(x + y)] \end{aligned}$$

ここで， $a_h$ と $\varphi_h$ は，SLMに表示されるホログラム面の振幅と位相をそれぞれ表す<sup>6)</sup>。実験では，CGHへの光照射は均一な強度分布を持つ平面波と考えられるため， $a_h$ は一定である。 $\varphi_h$ はORAアルゴリズムを使用して得られる<sup>29)</sup>。 $a_r$ と $\varphi_r$ はそれぞれ再構成平面の振幅と位相である。再構成の空間強度分布は，実際には $|U_r|^2 = a_r^2$ として観察される。CGHは，平面方向 (XおよびY) 方向に沿って焦点位置を制御するために，いくつかのblazed gratingのCAの重ね合わせに基づいて設計される。再構成された面がN個の集束スポットを有する場合，CGHはN個のblazed gratingを含む。焦点位置を軸 (Z) 方向に沿って制御するために，焦点距離 $f$ を有する位相フレネルレンズパターンが $\varphi_h$ に加えられる。

$$\varphi_p(x, y) = k(x^2 + y^2)/2f$$

ここで $k=2\pi/\lambda$ となる波数である。この場合，SLMの空間分解能が最小焦点距離を決定する。

### 4.2 レーザーによる触覚像

レーザーによる触覚像 $H_i$ は，SLM画像とガルバノミラーと可変焦点レンズの組み合わせによって与えられる。

$$H_l(x, y, z) = G_{l(x,y)} V_{l(z)} (\Sigma(U_r(x_i, y_i, z_i)))$$

$G_{l(x,y)}$ はガルバノミラーによる移動平面方向の移動， $V_{l(z)}$ は軸方向の移動をそれぞれの焦点を中心としたホログラム像の積分値になる。このときの1フレームあたりのドット数 ( $dpf$ ) について考える。

$dpf$ は，レーザーによる立体ディスプレイで評価する必要があるパラメータである。視覚ディスプレイの場合はドットは視認点として考えるが，触覚の場合は最小の触覚提示エネルギーを与えるドットとして定義する。したがって，各ドットに必要な最小エネルギーはレーザーブレイクダウンしきい値 $E_{lbd}$ より高くなる。これがどれだけ大きくなるかは後述する被験者実験で明らかにする。総出力エネルギー $E_{tot}$ は，SLMによってドット間で分割される。レーザーパルスあたりのドット数 $N_{dot}$ は，

$$N_{dot} = \frac{E_{tot}}{E_{lbd}}$$

として表される。1フレームあたりのドット数は， $N_{dot}$ ，レーザーパルスの繰り返し周波数 $F_{rep}$ ，および人間の触覚の持続性に基づいて決定されるフレーム時間 $T_f$ によって決まる。したがって，

$$dpf = N_{dot} F_{rep} T_f$$

である。例えば、 $N_{dot}=100$ ,  $F_{rep}=1$  kHz,  $T_f=100$  msの場合、10 fpsで10,000 dpfのアニメーションが再生される。実際には、フレームあたりのドット数は時間応答のボトルネックによって決まることに注意が必要である。

### 4.3 超音波による触覚像

超音波による空中触覚フィードバックは音響放射圧に基づいている。これは皮膚に長時間適用することができるが、比較的弱い(10～20 mN)力を与えることしかできない。皮膚で触る感覚は狭い領域内の層流空気流に似ている。図4は、285個の超音波トランスデューサを備え、それらを適切な時間(または位相)遅延で個別に制御する超音波フェーズドアレイの概要を示している。

例えば点が1つの場合、 $(i,j)$ 番目の変換器に対する時間遅延 $\Delta_{tij}$ は次式で与えられる。

$$\Delta_{tij} = \frac{l_{00} - l_{ij}}{c}$$

ここで、 $l_{00}$ および $l_{ij}$ は焦点から $((0,0)$ 番目(基準)までの距離であり、 $(i,j)$ 番目の振動子。 $c$ は空気中の音速である。焦点は、次の座標の時間遅延を再計算して設定することで移動させることができる。1点の場合は、上の位相フレネルパターンと同様になる。正方形のトランスデューサアレイから発生する超音波の空間分布は、ほぼsinc関数の形状をしていることが理論的および実験的に示されている<sup>20)</sup>。また触覚像はレーザーの場合と同様に $U_h(x,y)$ を求めることによって計算できる。フェーズドアレイに平行なメインローブの幅 $w$ は、

$$w = \frac{2\lambda R}{D}$$

波長 $\lambda$ , 焦点距離 $R$ ,  $D$ は正方形配列の辺の長さを表す。この式は、レーザーホログラムが空間分解能とSLMの解像度の間でトレードオフがあることを示しているように、超音波ホログラムも、空間分解能とアレイサイズの間でトレードオフがあることを意味する。

## 5. 実験システム

この節では、我々の光学および音響システムの実装について説明する。まず、SLMとガルバノミラーを備えたフェムト秒レーザーの光学系を紹介したのち、次に、超音波フェーズドアレイを用いた超音波音響システムについて説明する。最後に、それらを統括する制御システムについて説明する。

### 5.1 レーザーハプティックス

レーザーハプティックスはフェムト秒レーザーのアブレーション効果に基づいており、フェムト秒レーザーは皮膚表面をわずかに削り、皮膚に衝撃波を発生させる。これは超短パルスレーザー(本稿では40 fsのものを使用)の非熱的効果であり、ナノ秒レーザーの熱弾性効果とは異なる<sup>24,25)</sup>。皮膚の損傷を防ぐため、照射時間は1秒以下に制限している<sup>6)</sup>。その感覚はザラザラとしており、場合によっては少し痛みのような感覚を覚える。例えるなら静電気による電気刺激や粗い紙やすりに似ている。図4にフェムト秒レーザーの概要を示す。次にSLMとガルバノミラーについて記述する。

#### 5.1.1 光学系

ここでは、スキャンシステムについて詳しく説明する。ガルバノミラーを使用して横方向(XおよびY)の方向をスキャンするが、バリフォーカルレンズはその焦点をビームの軸(Z)方向に変更するために用いる。SLMを用いることでホログラムを再生する。一般に、SLMには、レーザービームの強度、位相、またはその両方を変調する一連のコンピューター制御ピクセルがある。この研究では、ネマチック液晶層を含む液晶



図4 (a) 光学系と超音波系の俯瞰図 (b) 刺激エリアの拡大図 (超音波系と対物レンズの周囲)

SLM (LCOSLM) を使用した。この層内の分子方向は電極 (すなわち画素) によって制御され、各画素によって反射された光線の位相は液晶分子の方向に従って変調される。言い換えれば、この装置は光学フェーズドアレイとして機能する。光の空間位相制御は、集束位置を横方向 (XおよびY) および軸方向 (Z) の両方に沿って制御することを可能にする。可変焦点レンズとして Optotune EL-10-30 を使用し、USB のシリアル通信制御で PC から制御する。これらのデバイスは C++ を使用して作成されたプログラムによって操作している。ワークスペースは  $2 \times 2 \times 2 \text{ cm}^3$  であり、対物レンズの直径に応じて大きくなる。

### 5.1.2 ハードウェア仕様

フェムト秒レーザー光源を含む設定を以下に説明する。このフェムト秒レーザー源 (コヒーレント社) は、800 nm の中心波長、1 kHz の繰り返し周波数、および 1 から 2 mJ の範囲のパルスエネルギーを有する。ガルバノミラーは、横方向に沿って発光ドットを走査し (X および Y 走査)、バリフォーカルレンズはその焦点を軸方向に変化させることができる (Z 走査)。フーリエ CGH は並列光アクセスに使用する。最適回転角 (ORA) 法で設計された CGH<sup>(6)</sup> は、解像度  $768 \times 768$  ピクセル、ピクセルサイズ  $20 \times 20 \mu\text{m}^2$  の LCOS-SLM に表示される。

## 5.2 音場生成

40 kHz の共振周波数を持つ超音波フェーズドアレイ (図4) を利用した。焦点の位置は、波長の 1/16 の分解能 (40 kHz の超音波の場合は約 0.5 mm) でデジタル制御され、1 kHz で更新可能である。40 kHz フェーズドアレイは、 $170 \times 170 \text{ mm}$  の面積に配置された 285 個の変換器 (直径 10 mm, T4010A1, 日本セラミック株式会社) からなる。焦点距離  $R=200 \text{ mm}$  のとき、焦点のピークでの音圧は 2585 Pa RMS (測定値) である。単一フェーズドアレイのサイズと重量は、それぞれ  $19 \times 19 \times 5 \text{ cm}^3$  と 0.6 kg である。2つの回路基板で構成されている。1つは超音波トランスデューサのアレイ基板、もう1つは FPGA とプッシュプルアンプ IC を含む駆動基板である。これらのボードはピンコネクタで互いに接続されている。フェーズドアレイは、USB を介して単一の PC によって制御されている。制御アプリケーションは、Windows 上の C++ で開発されている。PC は焦点の座標および出力を含むデータを駆動ボードに送る。ドライビングボードはデータを受信し、式に基づいて各トランスデューサの適切な時間遅延を計算する。(1), (3) を駆動して駆動信号を生成する。ワークスペースは  $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$  と光学的触覚スペースに比べて大きく、フェーズドアレイのサイズに合わせて拡大される。これらのレーザーと超音波ハプティックスの作業空間の重なり面積は  $2 \times 2 \times 2 \text{ cm}^3$  であり、これはレーザーハプティックスによって制限される。ガルバノミラーのより広い角度範囲を可能にするためにより大きなレンズまたはレンズアレイシートを使用することによって、将来拡大することができる。



図5

### 5.3 制御システム

ここでは、我々のシステムを用いて空中で触覚像をレンダリングするためのパイプラインについて説明する。図5にシステム図を示す。システムはWindows PCを使用して制御され、すべてのプログラムはC++でコーディングした。制御システムは、音響フェーズドアレイ、SLM、ガルバノミラー、および可変焦点レンズを動作させる。ユーザーとのインタラクションを撮影するために、USBカメラがシステムに接続されている。フェーズドアレイ、ガルバノミラー、バリフォーカルレンズは異なるスレッドに沿って走り、新しい描画パターンが入力されると同期する。ユーザー入力はカメラ側で60 Hzでキャプチャされている。SLMは外部ディスプレイとしてコンピューターに接続されている。レーザー側の操作(座標の設定と駆動ミラー、レンズ、SLMの制御と計算)は、PCからの制御信号によって実行される。超音波フェーズドアレイには、焦点の座標や出力の力などのデータをPCから受信するFPGAが含まれている。データを受信すると、FPGAは式(1)に基づいて各トランスデューサに対して適切な時間遅延を計算する。(1)、(3)を駆動して駆動信号を生成する。駆動信号は増幅器を介して振動子に送られる。位相変化を修正すると、音響ポテンシャル場の分布が変化する。また各振動子のパルス幅変調(PWM)制御によって出力が変化する。

## 6. ユーザー研究と結果

このセクションでは、前節に挙げた光と音場の相互作用を評価するためのユーザー実験について説明する。最初に個々の分野の評価について説明し、次にそれらの間の相乗効果について説明する。言うなれば前節に挙げた触覚像の定数を求めるための実験にあたる。

### 6.1 レーザーの知覚しきい値

我々は、皮膚上に生じるレーザープラズマの衝撃波に対する知覚的しきい値を評価するために、このユーザー調査を実施した。7人の被験者がこのユーザースタディに参加した(平均22.5歳、女性5人、男性2人)。被験者は、右手の人差し指にレーザー触覚刺激を与えた。蒸発効果を力(N)として測定することは困難であり、我々はそれをレーザー出力パワー(W)によって測定した。レーザー出力パワーは、0.05、0.10、0.13、および0.16 Wに設定した。最低パワーは仕様によって制限され、最高パワーは予備試験によって決定した。各電力条件は2回(2試行)適用され、試行回数は被験者あたり8であった。試験の順序はランダム提示された。各試行で、被験者は最大10回レーザーを当て、人差し指で何かを感じたかどうかを尋ねた。視覚情報は目隠しで遮断し、聴覚情報は白色雑音のあるヘッドフォンで遮断した(図6)。このヘッドフォンと目隠しは前述した安全対策の観点からも網膜と鼓膜を保護する目的で重要である。結果を図7(a)に示す。知覚率は、各レーザー出力の試行回数に対する、被験者が刺激を感じた試行回数の比率である。90%しきい値は、

0.03-0.04 Wの間であるように思われる。被験者は、0.16 Wでは自信を持って(すなわち90%を超える)刺激を感じると回答した。

### 6.2 集束超音波の知覚しきい値

集束超音波によって誘発された音響放射圧の知覚しきい値を評価するために、このユーザー調査を実施した。私達が知る限り超音波非接触触覚フィードバックの知覚的しきい値に関する報告は少ない<sup>26)</sup>。被験者は前のセクションと同じである。超音波の直流出力は知覚するには弱すぎるので、振動触覚刺激(200および50 Hzの矩形波によって変調)が人差し指に加えられた。これらの変調周波数は、PC (Pacinian corpuscles) と RA (Meissner corpuscles) の異なるチャネルをよく刺激するように選択した。超音波焦点の直径(20 mm)は人差し指の幅より大きく、人差し指に作用する力は制御システムによって設定された出力よりいくらか小さいことには注意が必要である。出力は、予備実験によって推定されたしきい値を中心にして14の値のうちの1つに設定された。各パターンは1回適用され(1試行)、試行数は被験者あたり14であった。試験の順序は無作為化された。各試験で、被験者は超音波に自由に触れ、自分の人差し指で何かを感じたかどうかを尋ねた。視覚情報は目隠しによって遮断され、聴覚情報は白色雑音を有するヘッドフォンによって遮断された。

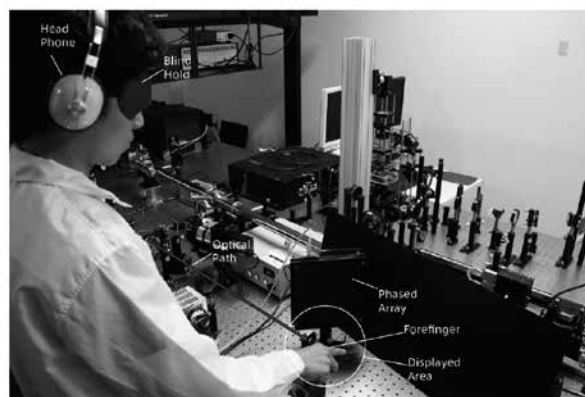


図6 被験者実験の様子

結果を図7 (b) に示す。知覚率は、被験者が刺激を感じた試行回数と各超音波出力の試行回数との比である。200 Hzと50 Hzの刺激に対する50%のしきい値は、それぞれ約1.1 mNと1.6 mNであった。被験者は、それぞれ約1.6 mNおよび2.4 mNで200および50 Hzの刺激を自信を持って(すなわち90%)感じた。触覚の感度が約200 Hzの刺激に対して高いことは触覚学の研究分野ではよく知られており、我々の結果はこの知識と一致する。

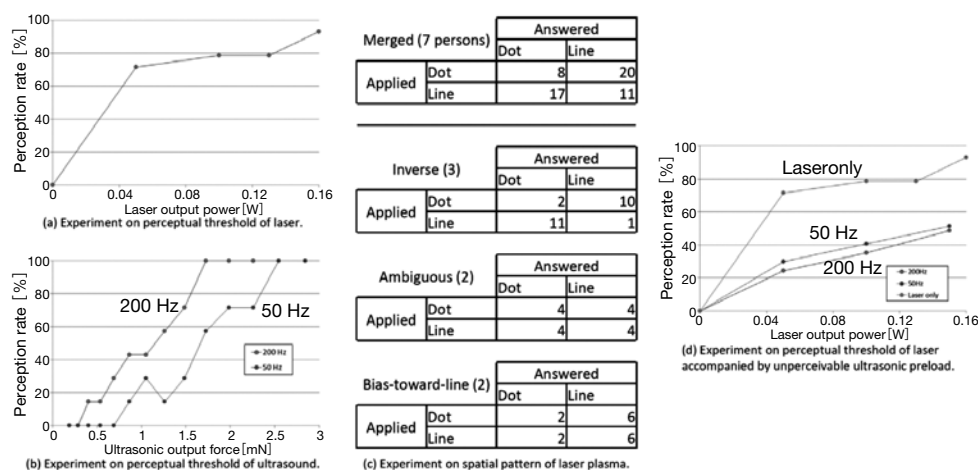


図7

### 6.3 描画パターンの知覚

レーザープラズマで描画された空間パターンを識別する能力をテストするために、このユーザー調査を実施した。図8は、レーザープラズマの反復ガルバノスキャンによってレンダリングされた例を示す。この実



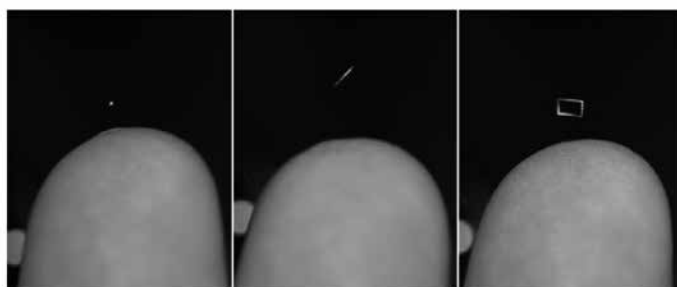


図8 レーザープラズマの反復ガルバノスキャンによるレンダリング例

験では、2つの空間パターン(点と線)を使用した。被験者は前のセクションと同じである。各パターンは4回適用され(4試行)、試行数は被験者あたり8であった。試験の順序はランダム化された。各試行で、被験者は最大10回レーザーに触れ、自分の人差し指にどのパターンを感じたかを尋ねた。前の実験のように視覚情報は目隠しによって遮断され、聴覚情報は白色雑音を有するヘッドフォンによって遮断された。結果を図7(c)に示す。結果は人々が2つのパターンを区別することができるが逆に答える傾向があることを示した。一度パターンを認識すると、正答率は上昇する。被験者の中には2つのパターンを非常によく区別することができる(「逆」群)が、他の者は全く識別できないことに留意されたい。さらに、2つのタイプの傾向がみられた。1つは「あいまいな」グループであり、もう1つは逆にバイアスがかかったグループである。ここにはまださらなる調査の余地があるだろう。

#### 6.4 相互作用に関する実験

我々は、知覚的しきい値より弱い超音波振動触覚刺激の負荷の下でレーザープラズマの衝撃波に対する知覚的しきい値を評価するためにこのユーザー研究を行った。レーザー触覚に対する超音波の2つの影響が考えられる。1つはレーザープラズマの知覚しきい値を上げるマスキング効果で、もう1つは確率的なものである。

9人の被験者がこの被験者実験に参加した(平均21.6歳、女性4人、男性5人)。被験者には、右手の人差し指にレーザー触覚刺激を与えた。レーザー出力は、0.05、0.10および0.15 Wに設定した。超音波の変調周波数は、前述のPCチャンネルおよびRAチャンネルを刺激するためにそれぞれ200 Hzおよび50 Hzとした。各電力および周波数条件は4回適用され(4試行)、試行数は被験者あたり24であった。試験の順序はランダム化された。各試行で、被験者は最大10回レーザーを当て、自分の人差し指で何かを感じたかどうかを尋ねた。超音波刺激は、各周波数および対象について知覚できる力のすぐ下になるように調整された。前述の実験と同様の理由で視覚情報は目隠しによって遮断され、聴覚情報は白色雑音を有するヘッドフォンによって遮断された。図9は、レーザーおよび超音波触覚刺激からの可聴音を示す。結果を図7(d)に示す。ここで、「レーザーのみ」は図7(a)と同一である。知覚しきい値より弱い超音波がレーザー衝撃波の知覚に影響を与えることは興味深い。知覚できない超音波の負荷(図7(d)の200 Hzと50 Hzの線)があるレーザーハプティックスの50%知覚しきい値は、「レーザーのみ」(Laseronlyの線)の約5倍である。この結果はマスキング効果を支持する。これは、超音波負荷がレーザー触覚をある程度を少なくすることを意味する。それによりレーザー触覚による痛覚が軽減するという報告もあった。このマスキング効果のメカニズムの調査は今後の研究課題になるだろう。

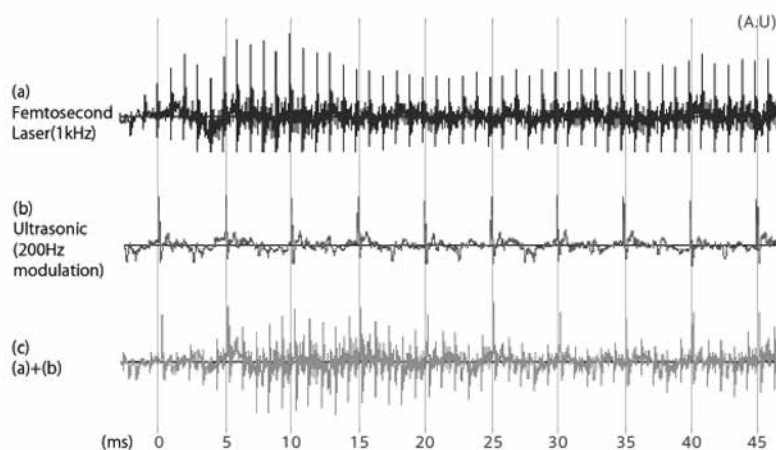


図9 レーザーおよび超音波触覚刺激からの可聴音

## 7. 応用例

本節では提案手法の応用例について述べる。まず、この手法の特徴について説明し、それから、可能性のある用途、すなわち複数の領域にまたがる空中触覚提示に基づく触覚インタラクションの手法を説明する。我々の用いた40 kHzの超音波フェーズドアレイはおおよそ(空間分解能は16 mm, 波長の2倍)触覚像を生成することができるが、それは広い領域(約30 cm)と放射圧をカバーすることができ、その放射圧はレーザー触覚に対して十分に強い(16 mN)。一方フェムト秒レーザーによるレーザー触覚提示のシステムは、触覚像を正確に生成することができる(空間分解能1  $\mu\text{m}$ )が、小さな領域(2 cmまで)しかカバーすることができない。

上記のレーザーと超音波の相互作用に基づいた知覚的しきい値に関する実験において見出されるように、超音波による触覚提示は、レーザープラズマによる触覚提示に対する感受性を抑制する。本稿では、音響場による大まかな触覚像の提示とレーザー触覚による細かな提示の組み合わせによる例を提案する。大まかな位置や広範囲の提示に関しては超音波ホログラムによる触覚像を用い、詳細な触覚像には光学的なアプローチによる提示を使用する。これは超音波による物体表面(大まかな形)および/またはレーザーによる内部構造(詳細)の提示などに用いることができるだろう。それを示すためにレーザーと超音波による点字ディスプレイ、ならびにレーザーによって超音波触覚の拡張を表現するAR/VR用途のための触覚像を実装した(図10, 11)。

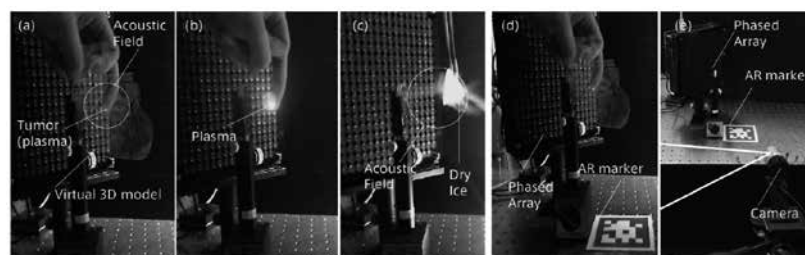


図10

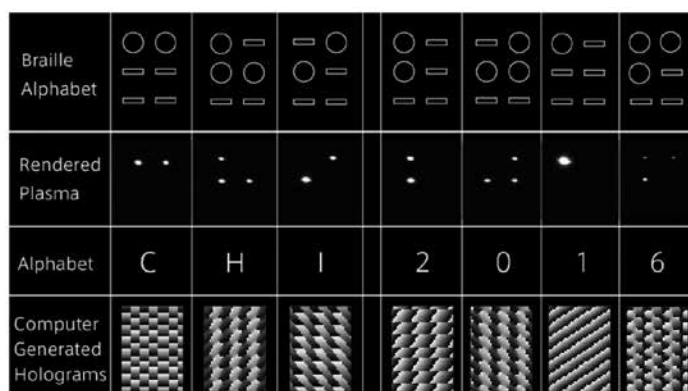


図11

## 8. 考察

この節では、被験者実験と応用事例の設計に基づく拡張性およびスケーラビリティ、知覚や安全性について議論する。

### 8.1 スケーラビリティ

単一フェーズドアレイから放射される超音波の力は、1つあたりの振動子が同消費電力駆動の場合、振動子の数に応じて増加する。1つの振動子から得られる音響放射圧には限界があるためより多くの振動子を用いることは、より強力な音響放射圧を生成することを可能にする。また振動子の数を増やすことは他の利点をもたらす。例えば利点の1つとして、焦点のサイズを維持しながら焦点の可動範囲を大きくすることである。もう1つは、振動子の位相遅延特性の影響を減らすことであり、それは音場のより正確な生成および制御をもたらす。これは触覚像の解像度に影響をもたらす。

またレーザーのパルス幅は、レーザー触覚において重要な要素である。より短いパルス幅は、同じ時間平均エネルギーでより高いピークエネルギーを与える。これはよりプラズマしきい値を超えやすくなることと同義であり、照射エネルギーを減らしながらプラズマを作りやすくなることができる。また、より短いパルス幅は、より高い繰り返し周波数のレーザーパルスを生成可能にする。

これらの知見から、超音波のワークスペースに関しては振動子の数を増やすことがスケールの拡大につながり、パルス幅の短く積算エネルギーの小さいレーザーを用いることが侵襲がより少なくより高解像度の触覚像を提示することにつながる。

### 8.2 相互作用

上記に挙げたレーザーと超音波に関する被験者実験の結果から、音響放射圧はレーザー触覚フィードバックの感覚を一部マスクできることがわかった。この一連の研究では、光と音響の両方の物理量に関しての触覚しきい値を調査した。また相互作用を用いた触覚像の3D形状と三次元位置に関する空間的要素の技術を中心に調査したが、これらが時間領域でどのような要因をもたらすかについては調査していない。これは、遠隔伝達力を用いた空中触覚研究の次のトピックになるだろう。

### 8.3 安全性

23)では、ブタの皮膚を用いてフェムト秒レーザーによる皮膚へのレーザー損傷の危険性を実験し報告している。パルスエネルギーが21 mJ未満の44 fsパルスレーザーによる損傷は、暴露後24時間で消失したと報告されている。私達の現在のシステムの最大パルスエネルギーは2 mJまでである。それ故に我々のレー

ザー触覚提示手法による皮膚損傷はユーザーインターフェース設計において許容可能であると考えている。しかしながら日常生活に私達の技術を適用するとき、網膜の損傷の危険性は十分に考慮されるべきである。レーザーシステムは、ユーザーの目を直接撮影しないように慎重に設計する必要がある。私達は赤外線レーザー（波長800 nm）を採用したが、この波長をカットするフィルターを周囲に設置することは網膜を確保するための効率的な方法の1つである。他にもVRゴーグル着用時に触覚提示を行うなど、網膜への安全性を担保しながら触覚提示を考慮することは大切な観点である。また超音波暴露についても同様であり、例えばヘッドフォンでの音提示と組み合わせて触覚提示することは耳をヘッドフォンによって保護するという意味でより強力な超音波を提示した際にも超音波暴露の安全性をより向上させる。そのように、要素技術の検討と安全性ガイドラインの検討は応用事例への組み込みとともに模索されるべきだろう。

## 9. おわりに

本稿では空中触覚提示のためのレーザーと超音波による手法について述べた。大まかな触覚像のための音響場による提示とレーザー触覚による細かな提示の組み合わせによる例を提案し、被験者実験を含め相互作用や応用例、安全性について述べた。先に述べたように2019年現在、視覚ディスプレイに関しては多く商用ハードウェアやコンテンツが普及しつつあるが、空中触覚用フェーズドアレイ技術は開発者用製品として出回っているのみであり、未だ研究領域での探求が盛んに行われている。そのため要素技術と安全性ガイドラインの検討は応用事例への組み込みとともに模索されるべきだろう、その具体例と実用のための例を本稿では述べた。

## 参考文献

- 1) Ivan E. Sutherland. 1968. A head-mounted three dimensional display. In *Proceedings of the December 9-11, 1968, Fall Joint Computer Conference, Part I (AFIPS'68 (Fall, part I))*. ACM, New York, NY, 757-764. DOI:<http://dx.doi.org/10.1145/1476589.1476686>
- 2) Belen Masia, Gordon Wetzstein, Piotr Didyk, and Diego Gutierrez. 2013. A survey on computational displays: Pushing the boundaries of optics, computation, and perception. *Computers & Graphics* 37, 8 (2013), 1012-1038. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cag.2013.10.003>
- 3) Clarence P. Cain, William P. Roach, David J. Stolarski, Gary D. Noojin, Semih S. Kumru, Kevin L. Stockton, Justin J. Zohner, and Benjamin A. Rockwell. 2007. Infrared laser damage thresholds for skin at wavelengths from 0.810 to 1.54 microns for femto-to-microsecond pulse durations. In *Proceedings of SPIE*, Vol. 6435. 64350W-64350W-12. DOI:<http://dx.doi.org/10.1117/12.715199>
- 4) Karl Willis, Eric Brockmeyer, Scott Hudson, and Ivan Poupyrev. 2012. Printed optics: 3D printing of embedded optical elements for interactive devices. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST'12)*. ACM, New York, NY, 589-598. DOI:<http://dx.doi.org/10.1145/2380116.2380190>
- 5) Hidei Kimura, Akira Asano, Issei Fujishiro, Ayaka Nakatani, and Hayato Watanabe. 2011. True 3D display. In *ACM SIGGRAPH 2011 Emerging Technologies (SIGGRAPH'11)*. ACM, New York, NY, Article 20, 1 page. DOI:<http://dx.doi.org/10.1145/2048259.2048279>
- 6) Yoichi Ochiai, Kota Kumagai, Takayuki Hoshi, Jun Rekimoto, Satoshi Hasegawa, and Yoshio Hayasaki. 2016. Fairy Lights in Femtoseconds: Aerial and Volumetric Graphics Rendered by Focused Femtosecond Laser Combined with Computational Holographic Fields. *ACM Trans. Graph.* 35, 2, Article 17 (February 2016), 14 pages. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2850414>
- 7) Ismo Rakkolainen, Stephen DiVerdi, Alex Olwal, Nicola Candussi, Tobias Hüllerer, Markku Laitinen, Mika Piirto, and Karri Palovuori. 2005a. The interactive fogscreen. In *ACM SIGGRAPH 2005 Emerging Technologies (SIGGRAPH'05)*. ACM, New York, NY, Article 8. DOI:<http://dx.doi.org/10.1145/1187297.1187306>
- 8) Peter C. Barnum, Srinivasa G. Narasimhan, and Takeo Kanade. 2010. A Multi-layered display with water drops. *ACM Trans. Graph.* 29, 4 (July 2010), Article 76, 7 pages. DOI:<http://dx.doi.org/10.1145/1778765.1778813>

- 9) Yoichi Ochiai, Alexis Oyama, and Keisuke Toyoshima. 2012. A colloidal display: membrane screen that combines transparency, BRDF and 3D volume. In *ACM SIGGRAPH 2012 Posters (SIGGRAPH'12)*. ACM, New York, NY, USA, Article 9, 1 pages. DOI: <https://doi.org/10.1145/2342896.2342907>
- 10) Y. Ochiai, T. Hoshi, A. Oyama, and J. Rekimoto. 2013. Poppable display: A display that enables popping, breaking, and tearing interactions with people. In *Proceedings of the 2013 IEEE 2nd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE'13)*. 124-128. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/GCCE.2013.6664771>
- 11) Yoichi Ochiai, Takayuki Hoshi, and Jun Rekimoto. 2014. Pixie dust: Graphics generated by levitated and animated objects in computational acoustic-potential field. *ACM Transactions on Graphics* 33,4 (July 2014), Article 85, 13 pages. DOI:<http://dx.doi.org/10.1145/2601097.2601118>
- 12) BENGTTSSON, J. 1994. Kinoform design with an optimal-rotationangle method. *Appl. Opt.* 33, 29 (Oct), 6879-6884.
- 13) BOLANOWSKI, S. J. Jr., GESCHIEDER, G. A., VERRILLO, R.T., AND CHECKOSKY, C. M. 1968. Four channels mediate the mechanical aspects of touch. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 84, 5, 1680.94.
- 14) GUPTA, S., MORRIS, D., PATEL, S. N., AND TAN, D. 2013. Airwave: Non-contact haptic feedback using air vortex rings. In *Proceedings of the 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, ACM, New York, NY, USA, UbiComp'13, 419.428.
- 15) BRANDT, E. H. 1989. Levitation in physics. *Science* 243, 4889, 349.55.
- 16) CARTER, T., SEAH, S. A., LONG, B., DRINKWATER, B., AND SUBRAMANIAN, S. 2013. Ultrahaptics: Multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, ACM, New York, NY, USA, UIST '13, 505.514.
- 17) IWAKI, S., MORIMASA, H., NORITSUGU, T., AND KOBAYASHI, M. 2011. Contactless manipulation of an object on a plane surface using multiple air jets. In *ICRA, IEEE*, 3257.3262.
- 18) SODHI, R., POUPYREV, I., GLISSON, M., AND ISRAR, A. 2013. Aireal: Interactive tactile experiences in free air. *ACM Trans. Graph.* 32, 4 (July), 134:1.134:10.
- 19) BOLANOWSKI, S. J. Jr., GESCHIEDER, G. A., VERRILLO, R.T., AND CHECKOSKY, C. M. 1968. Four channels mediate the mechanical aspects of touch. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 84, 5, 1680.94.
- 20) HOSHI, T., TAKAHASHI, M., IWAMOTO, T., AND SHINODA, H. 2010. Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound. *IEEE Transactions on Haptics* 3, 3, 155.165.
- 21) INOUE, S., KOBAYASHI-KIRSCHVINK, K. J., MONNAI, Y., HASEGAWA, K., MAKINO, Y., AND SHINODA, H. 2014. Horn: The hapt-optic reconstruction. In *ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies*, ACM, New York, NY, USA, SIGGRAPH'14, 11:1.11:1.
- 22) SAGA, S. 2014. Fingerflux: Near-surface haptic feedback on tabletops. In *Proceedings of AsiaHaptics 2014*, AsiaHaptics 2014.
- 23) CAIN, C. P., ROACH, W. P., STOLARSKI, D. J., NOOJIN, G. D., KUMRU, S. S., STOCKTON, K. L., ZOHNER, J. J., AND ROCKWELL, B. A. 2007. Infrared laser damage thresholds for skin at wavelengths from 0.810 to 1.54 microns for femto-to-microsecond pulse durations. In *Proc. SPIE*. Vol. 6435. 64350W.64350W.12.
- 24) JUN, J. H., PARK, J. R., KIM, S. P., MIN, B. Y., PARK J. Y., KIM H. S., CHOI, S., JUNG, S. J., HWA P. S., YEOM D. I., JUNG, G. I., KIM J. S., AND CHUNG, S. C. 2015. Laser-induced thermoelastic effects can evoke tactile sensations. *Scientific Reports* 5, 11016.
- 25) LEE, H., KIM, J. S., CHOI, S., JUN, J. H., PARK, J. R., KIM, A. H., OH, H. B., KIM, H. S., AND CHUNG, S. C., 2015. Mid-air tactile stimulation using laser-induced thermoelastic effects: The first study for indirect radiation. In *World Haptics Conference (WHC)*, 2015, 374.380.
- 26) Yoichi Ochiai, Kota Kumagai, Takayuki Hoshi, Satoshi Hasegawa, and Yoshio Hayasaki. 2016. Cross-Field Aerial Haptics: Rendering Haptic Feedback in Air with Light and Acoustic Fields. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'16)*. ACM, New York, NY, USA, 3238-3247. DOI: <https://doi.org/10.1145/2858036.2858489>
- 27) S. Hashizume, K. Takazawa, A. Koike and Y. Ochiai, "Cross-field haptics: Multiple direction haptics combined with magnetic and electrostatic fields," *2017 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, Munich, 2017, pp. 370-375. doi: 10.1109/WHC.2017.7989930
- 28) Satoshi Hashizume, Amy Koike, Takayuki Hoshi, and Yoichi Ochiai. 2017. Sonovortex: rendering multi-resolution aerial haptics by aerodynamic vortex and focused ultrasound. In *ACM SIGGRAPH 2017 Posters (SIGGRAPH'17)*. ACM, New

- York, NY, USA, Article 57, 2 pages. DOI: <https://doi.org/10.1145/3102163.3102178>
- 29) Jörgen Bengtsson. 1994. Kinoform design with an optimal-rotation-angle method. *Appl. Opt.* 33, 29 (Oct. 1994), 6879-6884. DOI:<http://dx.doi.org/10.1364/AO.33.006879>