

触覚フィードバックのある空中映像

東京大学 大学院情報理工学系研究科

篠田 裕之

1. まえがき

空中に浮かんでいる映像を見ると、思わずそれに触りたくなる。立体映像技術が普及し、立体映像が手軽に楽しめるようになると、次に考えたいのはそれらに触覚を付与することであろう。触覚提示技術、すなわち人間の触覚に刺激を与えて人工的な触感を作り出す技術の基礎研究は2000年ごろから活発に行われるようになり、最近、特にヒューマンインターフェースとしての観点から、触覚と映像との融合が強く意識されるようになってきている。とりわけ立体映像に触覚を付加することは、コンピューターゲームのリアリティーやインターフェースとしての操作性を高める上で効果が著しいと考えられ、今後注目すべき技術分野であると考えられる。

これまでに研究開発されてきた触覚提示手法は、いくつかの категорияに分類することができる。第一の категорияは、もともと何らかの操作用に存在しているハンドル、操作レバーなどに、状況に応じた反力を人工的に生成し付与するものである。これによって操作を容易にしたり、シミュレーターの効果を高めることがその主目的である。第二の categoriaは「設置型」提示装置であり、ユーザーが環境に設置されたアームの先端部などを手に持ちながらそれを自由に動かし、触体験を行うタイプのデバイスである。アームは多自由度のリンク機構を持ち、手に対する反力をコンピューター制御することで物体に接触する感覚を再現する。第三の categoriaは「装着型」提示装置であり、手にはめたグローブが指を曲げる力を発生したり、手に持った装置が振動したり変形したりすることで触覚を提示する。人間の知覚特性や錯覚を上手に利用することで、比較的簡単な構造のデバ

イスでありながら、さまざまな触覚が再現できる。そして、最後にもう一つ「皮膚刺激型」提示装置と呼ぶべきものがある。指がデバイス表面に触れた際に、複数のピンを駆動して触感や記号を提示したり、タッチパネルに触れている指の位置に応じた振動刺激などを与えて触感を生成するもので、実用開発も進んでいる。

これらの触覚提示デバイスは年々進歩してきており、そのニーズも広がりつつあるが、一つ難点は、触覚を感じるために何らかのデバイスに手を触れることが前提となっていることである。触覚は、モノに触れて生じる感覚であるからそれは不可避のようにも思えるが、このことが触覚フィードバックの活用範囲を狭めてしまっていることも事実である。例えば、設置型の装置で力を発生できるのは空間的に限られた領域であり、その領域を広げようとする、装置はたちまち大掛かりになってしまう。また装着型の場合、あらかじめ装置を身につけている必要があり、ユーザーすべてにそれを期待するのは難しいかもしれない。そこで筆者らの研究室では何も装着していない手に対し、非接触で触覚を提示する手法を提案・研究している。それが本稿で紹介する空中超音波触覚提示法であり、立体映像ディスプレイとの親和性が高い技術である。

2. 非接触で触覚を付与する方法

筆者らの研究(岩本を中心に行われた研究¹⁾)以前に存在した非接触触覚提示手法として、おそらく唯一のものは空気噴流(ジェット)を利用するものである。空気噴流方式の原理的な制約は、触覚を提示可能な範囲の広さと、提示される圧力・刺激の空間分解能の両立が難し

しのだ ひろゆき

いことにある。例えば、直径 50cm の噴流を 1m まで到達させるのは比較的容易であるが、直径 5mm の噴流をその径を保ったまま 1m 遠方まで到達させるのは、事実上不可能といってよい。したがって「風のディスプレイ」は、すでにアミューズメントパークで実用されている技術であるが、接触に伴う詳細な圧力分布を提示するためには噴流のノズルを手近づけなければならない。

力の伝達媒体として空気を用いるもう一つの選択肢が、本稿で紹介する超音波の利用である。超音波のフェーズドアレイから生成される収束ビームによって放射圧を誘起し、それによって触感を再現する。原理上、数十 gf 程度までの弱い力しか生成できないが、大開口のフェーズドアレイを用いれば 1m 立方を超える提示範囲の確保も可能である。各振動子での超音波振動の位相と振幅を変調することで、提示範囲の瞬時切り替えや 1kHz の圧力変化を与えることも可能となる。以下では、超音波による非接触触覚提示に話題を限定し、その原理と制約、可能性などについて説明する。

3. 空中超音波触覚提示法の基本原理

超音波を微小振幅で観測する限り、正音圧と負音圧が交互に発生し、その平均値はゼロである。しかし、超音波の振幅が大きくなるにつれ、音響エネルギーに比例する圧力（放射圧）が見えてくるようになる。すなわち超音波のビームを面によって遮ると、面を押そうとする力が発生する。定量的には図 1 のように、面 S_1 を通過したエネルギー流ベクトル p_1 [W] の音響ビームが表面上の領域 S に入射し、エネルギー流ベクトル p_2 [W] のビームとして反射する場合、 c を音速として面 S には

$$f = \frac{1}{c}(p_1 - p_2) \quad \text{[N]} \quad (1)$$

となる力が働く。力はその瞬間に面 S の手前に生じている音響エネルギー密度に比例するから、超音波の波面や

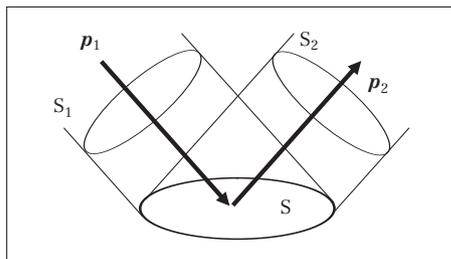


図 1 放射圧の説明図

強度を変化させることによって発生する力の分布や大きさが制御できる。音波の伝達速度 $c=340\text{m/s}$ は、人間の動作の速度より十分速く、超音波の周波数（本稿の設定の場合 40kHz）は、人間の知覚する振動周波数より十分高いので、それらを変調することによって人間が感じている触感の多くを再現可能であると期待される。

以下では本原理を用いた際の限界について議論する。

3.1 提示可能な圧力の上限

式(1)から分かるように、音波が表面に対し垂直に入射・反射される場合に限定すると、放射圧による力の総和は面に入射する音波の総パワーで決まる。例えば、全体として $1\text{gf}=0.01\text{N}$ の力を発生するためには、 $0.01\text{N} \times 340\text{m/s}=3.4\text{W}$ の音響パワーが入射する必要がある。超音波振動子の電気-音響変換効率率は 1 以下であることも考慮すると、実際の消費電力はこれ以上であり、室内照明に匹敵する消費電力となる。モノに触れた瞬間にだけ触覚提示するのであれば、平均電力としてはこの見積もりより小さいが、携帯機器に組み込もうとすると無視できない制約になる可能性がある。

次に考慮しなければならないのが、人体に対する安全性である。超音波の安全性は現在も議論が継続されており、複数の安全基準が並立しているようである。最も緩い基準と厳しい基準では数倍以上開きがあるが、米国および日本の超音波医学会による最も厳しい安全の目安は 100mW/cm^2 である。空気と液体・固体の音響インピーダンスが著しく異なるため、皮膚表面に入射した空中超音波のエネルギーの大半は皮膚表面で反射され、皮膚の内部に吸収されるパワーは入射パワーの 0.1% である。したがって、皮膚内部に 100mW/cm^2 が透過するときの入射音波のパワーは $P=100\text{W/cm}^2$ 、そのときの放射圧は $2P/c=0.6\text{N/cm}^2$ (60gf/cm^2) である。これが提示圧力の理論的上限となる。

3.2 提示可能範囲と空間分解能

超音波によって触覚を提示可能な領域の広さと提示される圧力の空間分解能を決定する要因は、①使用する超音波の波長 λ 、②その周波数での超音波の減衰距離 L 、③超音波フェーズドアレイの開口 W である。

まず、超音波音速の変動や媒体中での減衰を考えない場合には、提示可能な圧力分布の最小スポット径は波長 λ の程度であり、その解像度を達成できる提示範囲はフェーズドアレイの前方 W の程度までの領域である。図

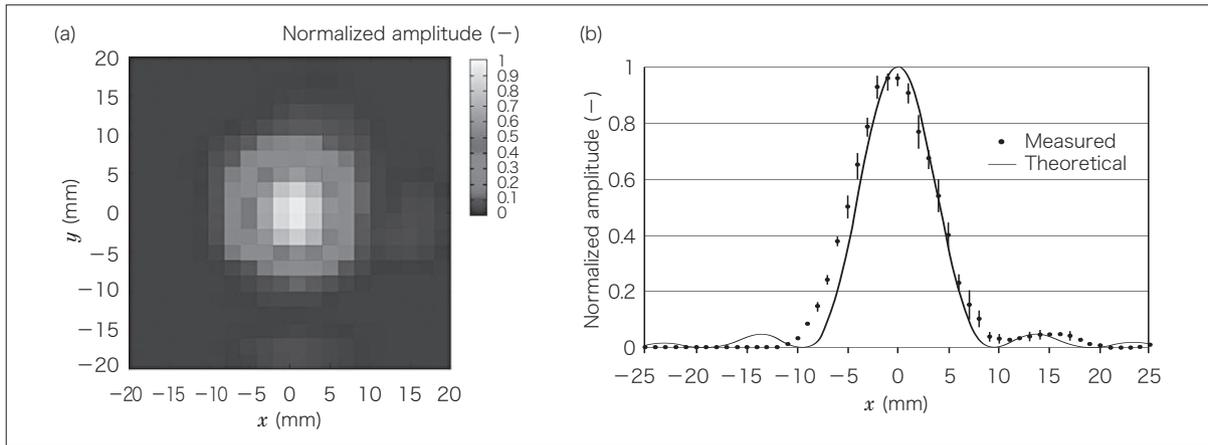


図2 空中超音波を1点に収束させて計測した放射圧分布。(a) 放射圧の2次元分布実測値。超音波振動子アレイから20cm離れた平行面を設定し測定(ピーク値で正規化して表示)。(b) $y=0\text{mm}$ の線に沿って計測した放射圧の分布(ピーク値で正規化して表示)。星らによる文献2)より転載。

2は、 $18\text{cm} \times 18\text{cm}$ の正方形領域に超音波振動子を $18 \times 18 = 324$ 個配置したフェーズドアレイを用いた測定結果を示している。面から20cm、すなわち W と同程度離れた平行面上での放射圧分布を測定した。超音波の波長は40kHzに対して $\lambda = 8\text{mm}$ 程度であるが、放射圧スポットの直径も、ほぼそれと同程度になっていることが分かる。測定面の距離 D を増大させていくと、フェーズドアレイ真正面付近での解像度は

$$\sin \theta = \frac{W/2}{\sqrt{D^2 + (W/2)^2}} \quad (2)$$

に反比例して粗くなる。

触覚提示の空間解像度を高めるためには超音波周波数を高め、波長を短くすればよいが、それと引き替えに超音波の減衰距離 L が短くなる。この距離 L が提示範囲を最も直接的に決定するパラメーターとなる。したがっ

て、超音波触覚提示においても空間解像度と提示範囲はトレードオフの関係にある。

本稿のシステムで40kHzの超音波を用いているのは、それなりに小さな波長でありながら、減衰距離 L も8.7m(すなわち1dB/m)と十分大きいためである。周波数を n 倍すると減衰距離はおおむね $1/n^2$ 倍になるといわれているため、フェーズドアレイから数十cm以上までの動作範囲を確保しようとするのであれば、40kHzより著しく周波数を高めることはできないことが分かる。したがって空間分解能としては、1cm程度が実用上の下限になると考えられる。

3.3 時間応答

40kHzの一定振幅信号を0~5msおよび10~15msの間フェーズドアレイに入力し、焦点における超音波波形および放射圧波形を測定したものを図3に示す。図

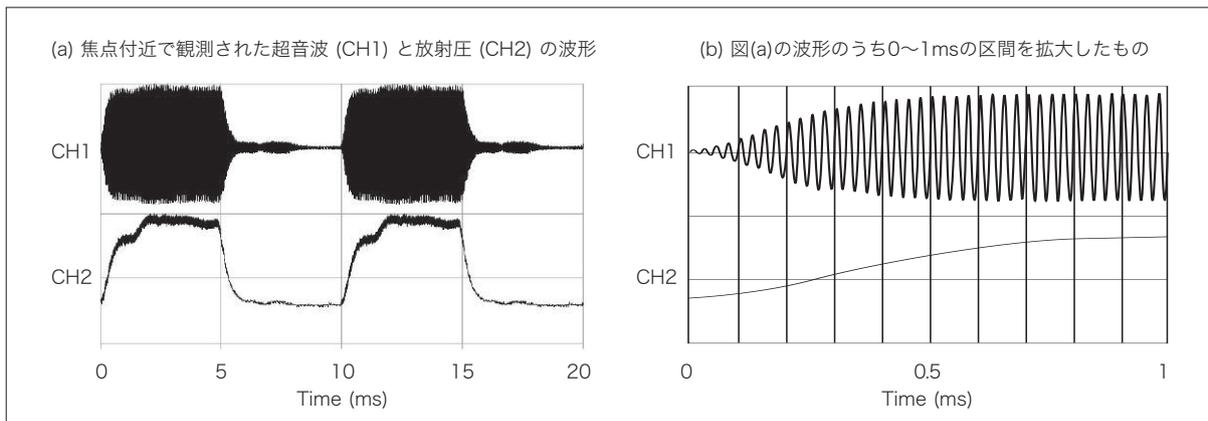


図3 放射圧の時間波形。星らによる文献2)より転載。

3(b)を見ると、おおむね1ms以内に放射圧が立ち上がっていることが分かる。より詳細に見ると、CH1の超音波振動は0.3ms程度の時定数で立ち上がっているが、この立ち上がり遅れの原因は、本実験で用いている超音波振動子が共振型のものであるためである。放射圧の立ち上がりは、これよりさらに少し遅いように見えるが、これは放射圧が超音波振動振幅の1乗ではなく2乗に比例しているためであり、CH1の縦軸の値を2乗にしてプロットすると、おおむねCH2の波形と一致している。このように、本稿のシステムでは超音波放射圧を1ms刻みで制御することができる。

4. アプリケーション

空中映像に触覚を与える技術には幅広い応用が想定されるが、応用目的によって技術課題や開発の優先順位が異なったものとなる。まず、提示する触覚には少なくとも以下の2通りがある。

① 能動触覚

自分から空中映像に触りにいった場合の触感を提示する。

② 受動触覚

例えば、画面からボールが飛んできて自分に衝突する感覚を提示する、あるいは映像と触感を強制的に与えて危険を知らせる等、受動的に与えられる触覚。

「3Dテレビに触感を付加する」と一口でいっても、それが「テレビの中に映っているモノに自由に触れられる」という意味か(能動触覚)、あるいは「テレビ側で、すでに決まっているシナリオどおりに触覚を感じる」という意味か(受動触覚)によって必要とされる技術やコンテンツの作り方が変わってくる。

映画館で多くの人が同時に見ている映像に、能動的に触れるようにするには原理上の困難が伴う。観客の誰かが勝手に画面内の人物や物体に触り、その状態を変えてしまえばシナリオ自体が変わってしまうし、複数の人が同時に触れれば状態が一つに決められなくなってしまう。したがって、能動触覚に対応するためにはテレビゲームのように、そこに登場しているモノそれぞれが物理モデルを持ち、一人あるいは少人数ごとにそれらの物理モデルと相互作用するような状況が前提となる。一方、受動触覚であれば映画館で多人数に対して上映し、

共通の触覚を体験させることについて原理上の困難はない。

また、触覚提示装置が提示する触感の多様さについても、いくつかの実現段階がある。多くの場合、現実に存在する物体にあたかも触れたかのような感覚を再現することが技術目標となるが、このときのリアリティーの意味には少なくとも以下の2段階がある。

① 接触感の提示

操作ボタンなどの物体に手が触れたことをユーザーに知らせる。いくつかの典型的な物体に触れた感覚が提示できれば十分である。

② 多様な触感の提示

3D表示される多様な物体の触感をリアルに再現する。

前者の接触感提示については、ある程度実用開発の目標設定が可能な段階にあるが、後者の多様な触感提示については依然基礎研究段階である。

空中超音波触覚提示法で印加できるのは、最大でも数十gf/cm²程度までであるから、提示できるのは非常に柔らかいか、極めて軽く動く物体との接触感に限られる。また空間分解能の制限から、鋭い先端など皮膚と実効的な接触面積の小さい物体との接触感覚の提示は困難であり、皮膚に働く力の方向も表面に対して垂直なものに限定される。さらに、超音波振動子と提示面との間に遮へい物が存在しないことも使用の条件となる。

このような制約のもとで想定される第一の応用は、人間の意志を読み取るために存在しているボタン類やタッチパネルなどを非接触なものにすることである。触感があって操作しやすい空中映像が実現すれば、ボタン類を身の回りに浮かべて操作することができる。非接触であるから接触による汚れや劣化も生じない。これを病院や公共スペースで使用した場合には、接触による感染の危険を回避することもできる。なお、このような応用のためには、ユーザーの手の位置を高精度でセンシングする問題や、立体映像と触覚提示位置を一致させる問題も解決される必要がある。ステレオ方式の立体映像は見る人の両眼の間隔によって提示位置が変化し、超音波の焦点は温度による音速変化でいくらか変化する。

その次の段階が、提示可能な触感の多様性を拡大していくことである。超音波触覚提示には前述のような制約があるものの、それ以外の点では非常に優れた特性を有

している。高い時間分解能で圧力を制御でき、非接触であるから再現性よく刺激を行うことができる。したがって万能触覚提示装置とはいえないものの、触感全体の中の一定のカテゴリー、例えば柔らかく軽い生き物の触感を再現したりすることなどは、本デバイスでも十分可能性のある提示対象である。また映画の効果音は、撮影中にその場所で生じている音に忠実である必要はなく、別の場所で録音されたり加工されたりした音を編集時に合成するのが普通である。同様に、再現される触感の種類が限定的であったとしても、それが多様なシーンで有効活用される可能性は十分ある。すなわち、実際のものとはいくらか異なった触覚刺激であったとしても、それが3D映像とともに再現されることで、その実在感を高めてくれる効果は十分に期待できる。

図4は、手に装着した光学マーカーをセンサーで読み取り、空中映像に同期して触覚刺激を行う装置の試作例である。アニメの水滴が手についた瞬間や、手の上を小さな象が走り回るのにあわせて超音波を放射する。照射する超音波は、その刺激を感じやすくするために200 Hzで振幅変調している。それらの刺激は実物が手の表面にあるときに生じる応力の分布からはほど遠いものであるが、映像と同時に与えられることで、それなりの感触を体験することができる。これらのリアリティーを高めていくことで、立体映像をより豊かに感じるようになることができるようになると思われる。

以上、主に能動触覚に関する応用例を説明したが、受動触覚を活用する応用にも期待は大きい。警告するだけでなく瞬時に危険回避のための動作を教えたり、正しい動作を習得するための補助刺激を行ったりなど、人間支援システムの中で触覚が活用される可能性は高く、非接触触覚提示はそのような目的にも適した手法である。

従来の装着型・設置型の触覚提示装置を利用するもの

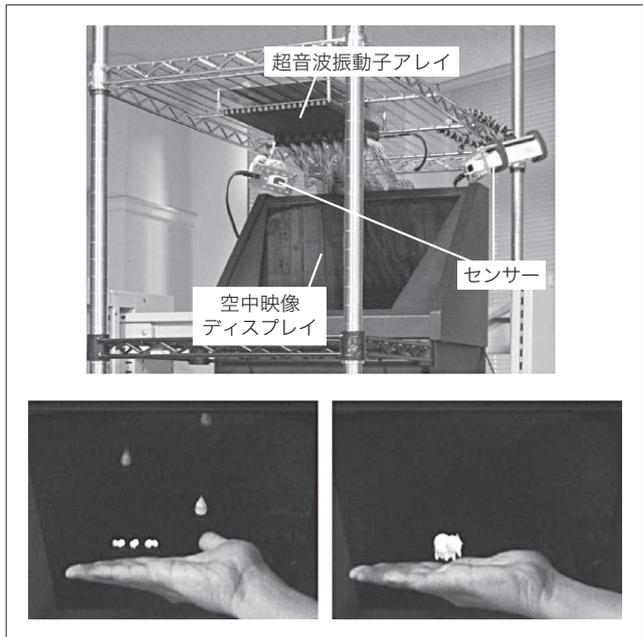


図4 空中映像と超音波触覚提示を組み合わせた触覚提示例 [文献2)]. 計測された手の位置に応じて映像と触覚を変化させる。

を含めても、立体映像に触感を与える研究開発の例はまだそれほど多くない。今後の研究や実用化の進展の中で、さらに多くのアプリケーションが見いだされてくるものと考えられる。

参考文献

- 1) T. Iwamoto, M. Tatzono, and H. Shinoda: *Haptics: Perception, Devices and Scenarios: 6th International Conference, Eurohaptics 2008 Proceedings*, M. Ferre (ed.), Springer, pp. 504 ~ 513 (2008)
- 2) T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda: "Non-contact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound," *IEEE, Transactions on Haptics*, in press (2010)