

機関番号：17401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21800039

研究課題名（和文） 空中を伝搬する超音波を用いた触感合成法の研究

研究課題名（英文） Research on synthesizing tactile feelings with airborne ultrasound

研究代表者

星 貴之 (HOSHI TAKAYUKI)

熊本大学・大学院自然科学研究科・助教

研究者番号：80537704

研究成果の概要（和文）：超音波が物体を押す現象（音響放射圧）を利用した、非接触触覚提示デバイスの開発を行っている。これを用いて毛布などの肌触りを再現することを目指し、圧力に伴う気流の抑制と、皮膚の振動を計測する装置の開発を行った。また近年、カメラなどの前で手を動かして入力を行うシステムが盛んに研究されている。本手法の空中で触覚を提示できる利点を活かして、これらに触覚フィードバックを付与し、操作性を向上する試みも行った。

研究成果の概要（英文）：A noncontact tactile display has been developed. It utilizes a phenomenon that ultrasound pushes objects (acoustic radiation pressure). The effect of airflow arising from the display was reduced and a sensor of skin vibration was developed aiming to reproduce realistic tactile feelings such as blanket. On the other hand, systems in which one can control a computer by moving his hand in air are investigated these days. Enhancing usability was attempted by applying the noncontact tactile display to them.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,080,000	324,000	1,404,000
2010年度	980,000	294,000	1,274,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,060,000	618,000	2,678,000

研究分野：触覚・バーチャルリアリティ

科研費の分科・細目：メディア情報学・データベース

キーワード：触覚ディスプレイ・空中超音波・音響放射圧・バーチャルリアリティ・非接触

## 1. 研究開始当初の背景

空気中を伝わる超音波を物体が遮ると物体を押す力が発生する（音響放射圧）。これを利用することで、非接触で触覚を提示することができる。音響放射圧自体は古くから知られている現象であり、微小物体の非接触搬送などへの応用が研究されている。研究代表者が所属するグループでは、その現象を触覚提示に応用する研究を行っている。

研究代表者は、研究開始時までに以下に述べる2機の試作機を開発していた。1機は触

覚の提示位置を変更することのできる試作機である。324個の超音波振動子をそれぞれ異なる位相で駆動することにより、直径2cm程度の圧力焦点を空間中任意の位置に生成することができる。図1は手の位置によってプレイするブロック崩しゲームの例である。ボールがカーソルに当たったとき、手のひらに触覚刺激がフィードバックされる。また焦点が手のひら上を動き回るといった、細かな位置制御も可能である。ただし提示可能な力は16 mNと弱く、触覚刺激も単一周波数に

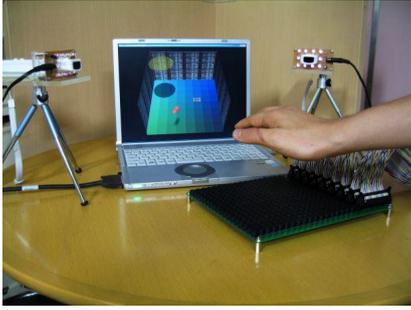


図1 触覚を感じるブロック崩しゲーム

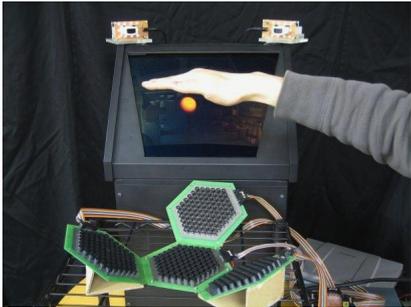


図2 触覚（衝突感）を感じる空中映像

限られていた。もう1機は触覚の提示力を向上させた試作機である。364個の振動子の空間配置を工夫し、また振動子が破損しない範囲内で駆動電圧を高めたことにより48mNの発生力（瞬時値）を達成している。図2は空中映像装置 Holovision と組み合わせた例である。空中に投影されたボールを手で叩いた瞬間、その衝突感を手のひらにフィードバックする。これによりボールのリアリティが高められる。ただし駆動回路の制約から、触覚の提示位置は固定であった。

これらの試作機によって提案手法が実行可能であることや理論の正当性が示された。また音響放射圧に伴う気流は、刺激時間が2ms以下のとき抑制される、という有用な知見も得られた。

## 2. 研究の目的

研究開始時には、前述のように空中超音波を用いた触覚提示法の実行可能性が確かめられた段階であった。そこから本手法を発展させるための課題には以下のようなものが挙げられる。

### (1) 波形制御による触感合成

例えば、毛布を撫でたときの音を録音し、その音を超音波の包絡波形として出力すると毛布の手触りを感じるか。さらに手のひらの上で焦点を走査すると触感はどのように変わるか。気流の影響と対策も調べる必要がある。なお、この段階ではユーザは手をデバイス上にかざして静止させるものとする。

### (2) 位置計測との連携

意図した触感を与えるためには、手が動いたときの速度などを考慮して波形に信号処理を加える必要はあるか。どのような信号処理が適切か。

### (3) 空中映像との融合

以上によってリアリティの高い触感が再現できたとき、それを視覚と組み合わせることにはどれほどの効果があるか。あるいはどうすれば効果的か。

これらのうち、本研究では(1)について取り組むものとした。(2)および(3)は、(1)の次の段階であると判断した。

## 3. 研究の方法

空中超音波を用いた触感合成法の確立に向けて、以下の項目について取り組む必要があった。それぞれについて詳細を述べる。

### (1) 音響放射圧に伴う気流についての調査および抑制法の開発

学会や展示会において1000人を超える多くの参加者が前述の試作機を体験した。その感想の中に「風が吹き付けてくるような感じがする」というものがあった。もし放射圧の他に気流も生じているならば、放射圧の時空間的な制御によって再現した触感の妨げとなるため望ましくない。そこで、この問題について

- ① 空気の流れを可視化することにより気流が生じているかどうかを確認する
  - ② 気流が生じている場合にはその抑制法を考案する、
- という順序で調査を進める。

### (2) 皮膚の振動を計測するセンサの開発

触感の提示は放射圧の時空間制御によって行われる。ある触感を再現するためにはどのような振動波形を提示すればよいかの参考とするためには、実際に対象物体を触っているときの皮膚の振動を計測する必要がある。またその振動波形の通りに放射圧を制御したとき、皮膚が期待通りに振動しているかどうかを確認するためにも同様の計測を用いる。これらの目的のため、皮膚表面の振動をS/N比のよい状態で計測するセンサを開発する。

## 4. 研究成果

前述の各項目に関する成果(1)(2)を以下に述べる。また研究開始当初には計画していなかったが有用性があると判断して実施した研究の成果(3)についても報告する。

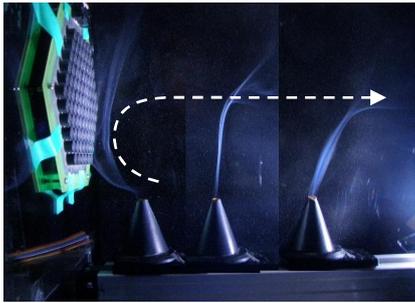


図3 線香の煙による気流の可視化



図4 フィルタによる気流抑制

## (1) 気流の観察と抑制法

### ① 気流の観察

以下に述べる2通りの方法で気流を観察した。まずは空気が流れているかどうかを確かめるため、線香の煙を用いて流れの可視化を行った。超音波を水平に放射させ、その超音波ビームの経路上に線香の煙を立ち上らせる。気流が無ければ煙は真っ直ぐ上るが、気流が生じている場合には斜めに傾く。

結果を図3に示す。これは異なる位置に線香を置いて撮影した写真を一枚に合成したものである。左端の超音波振動子アレイから右へ向かって超音波ビームが放射されている。煙の傾き方から、(図3に示した破線矢印のように)振動子アレイの周辺から空気が引き込まれ、そして超音波ビームに沿って空気が流れていると推察される。これにより、確かに気流が存在していることが確認された。このようにビームに沿って発生する気流としては、空気の粘性によって超音波が空気を駆動する現象(音響流)が考えられる。しかしそれが原因であると断言するには、さらなる調査が必要である。

### ② 気流の抑制法

空気が流れていることが確認されたので、これが触感に与える影響を低減することを考えた。仮に発生している気流が音響流であった場合、それは超音波ビームが放射されているとき必ず発生する。よって、発生した気流を除去する方法を考える。

予備実験として薄手のゴム手袋を装着し

て放射圧を感じる実験を行った。気流の感覚は抑制できたものの、ゴム膜全体が振動するため、放射圧が皮膚を直接刺激する場合と異なり触覚刺激の局在感が低下することがわかった。一方、放射圧のON/OFFによって提示した周波数(55 Hz、110 Hz、220 Hz)を感じ分ける実験において、ゴム手袋を装着して気流を除去すると、素手の場合よりも正答率が向上することが確認された。これは気流が触感の知覚を妨げていることを示す結果であり、気流を抑制する必要があることを示唆している。

手に何も装着せずに気流を抑制する方法として、気流を透過せず超音波のみを透過するフィルタを超音波ビームの経路上に配置する方法を検討した。多孔質素材(スポンジなど)や布素材(ガーゼ、衣服生地など)を試し、超音波を低減することなく気流を最もよく低減する素材を探索した。試した中では男性用肌着生地(シルキードライ、ユニクロ社製)が最もよい素材であった(図4)。超音波をほぼ1倍で透過し、気流を30%近く低減するものであった。これを用いてゴム手袋の場合と同様の周波数弁別実験を行ったところ、やはり素手の場合より正答率が向上するという結果が得られた。また、ゴム手袋で正答率が向上した被験者がフィルタでは向上しなかった(あるいはその逆)という例も見られた。これは気流を除去した結果、放射圧のみでは提示力が弱くて感じにくくなってしまった可能性が考えられる。

本調査により、放射圧に伴って確かに気流が発生していること、その気流を抑制すると触感の知覚が改善されることが確認された。ただし今回製作した気流除去フィルタは完全ではなく30%低減するにとどまっていた。今後はより効率よく気流を低減するフィルタの素材を探索するとともに、超音波デバイスの性能向上にも取り組み、意図した通りの触感を生じさせられる環境の特定を目指す。

## (2) 皮膚振動センサの開発

指先の皮膚の振動を計測するため、以下の2通りの計測法を考案し、センサを試作した。

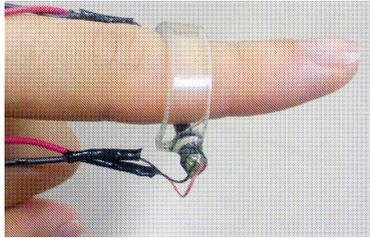
### ① ゴムチューブを用いた皮膚振動計測

皮膚表面の振動をS/N比のよい状態で計測する方法として、密閉したゴムチューブを皮膚に押し当て、皮膚の振動によって増減するゴムチューブ内の容積変化を計測する方法を考案した。容積変化はゴムチューブの端に配置したマイクロフォンで計測する。この方法の利点は、ゴムチューブと空気の音響インピーダンスが大きく異なることにより、外来音がチューブ内に侵入しないことである。そのため、マイクロフォンは皮膚振動のみを計測することができる。

2009年度に試作したセンサ(図5(a))は



(a) 一点計測 (2009)



(b) 二点計測 (2010)

図5 ゴムチューブを用いた指振動センサ

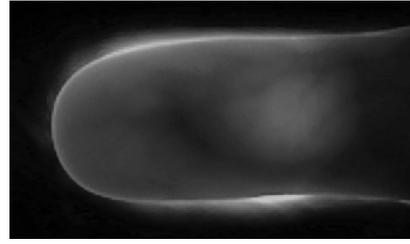
ゴムチューブで指を巻き、両端を上部で合わせてそこにマイクロフォンを置くという構造であった。そのため位置に関する分解能は持たないものであった。これを用いて計測したデータを周波数領域で解析することで、硬質の織物製品、毛糸製品、アクリル板、の3種類の触感を見分けられることを示した。

また2010年度にはこれに位置推定を付与することを試みた(図5(b))。ゴムチューブを指腹部のみに接触させ、その両端に2個のマイクロフォンを配置した。左右のマイクロフォンで計測された波形の時間差から、指の左側、中央、右側のどこで接触が生じたかを推定することができる。ただしこの時間差が生じることは必ずしも自明ではなく、原理については考察の余地がある。接触位置の推定は現段階では手作業で行っている。今後は左右のデータの相関を用いるなどして推定を自動化することにより、安定的に接触位置を追従することを目指す。

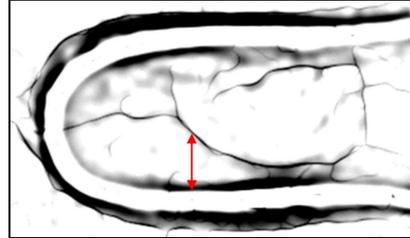
## ② 静脈撮像にもとづく皮膚内部の観察

皮膚表面だけでなく、皮膚内部の振動状態まで観察することができれば、触感についてより詳細な情報を得ることが期待できる。しかし皮膚内部を計測可能な従来技術はOCTやMRIなど大掛かりな機材が必要なものであった。それらに対し、小型・軽量なデバイスで観察可能な方法として赤外線を用いて静脈を撮像する装置の試作を行った。静脈の変形・移動から指内部の変位分布を推定する。これは同じグループに所属していた研究員が以前に考案した原理であり、研究代表者が本研究目的のために引き継いだものである。

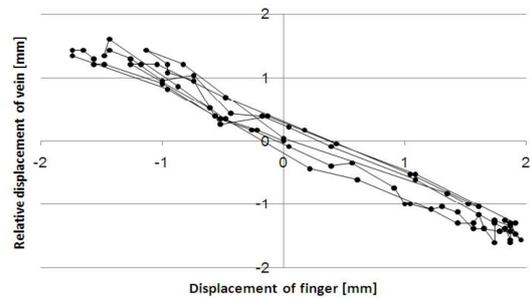
撮影した静脈画像の例を図6(a)に示す。またそれに細線化処理を施して静脈を強調した画像を図6(b)に示す。さらに指を透明なアクリル板に押し当てて指の軸と垂直な方向



(a) 静脈像



(b) 細線化



(c) 移動量 vs 輪郭と静脈の距離

図6 静脈撮像にもとづく皮膚内部の観察

にずらす動きをさせたときの、輪郭と静脈の距離(図6(b)に示した赤矢印)と移動量の関係を図6(c)に示す。ほぼ線形の関係にあることが確認できた。

現段階では撮像素子として市販のウェブカメラを用いており、感度もフレームレートも低い。今後は赤外線に特化した高感度カメラや高速度カメラを用いることにより、細い血管が触動作中に振動する様子をとらえることを目指す。

また本センサは携帯機器などに搭載されたタッチインタフェースの新たなセンシング原理としても応用できる可能性がある。例えば、従来のタッチパネルでは検出不可能なねじる動作や、静脈認証で本人であることを確認しながら操作する、などである。

## (3) 空中インタフェースの開発

研究開始時には予定していなかったが、本触覚提示手法がその特長を発揮する用途が見つかったので、その実装に取り組んだ。

### ① 素手で扱える触覚フィードバックを伴う空中インタフェース

近年、カメラなどの前で手を動かして入力を行うシステムが盛んに研究されている。こ

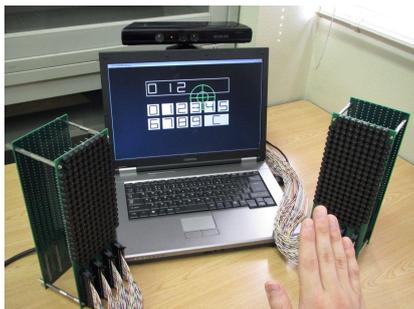


図7 素手で扱える空中インタフェース



図8 プロジェクタ映像との触覚インタラクション

れはゲームや博物館展示などにとどまらず、接触を伴わないため衛生的という理由から病院や食品工場、公共施設などでの応用も期待される技術である。

研究代表者は本研究課題とは別に、指に装着した赤外線 LED の位置を赤外カメラで検出し、そこへ空中超音波によって触覚フィードバックを行うシステムを開発していた。これにより、押した感じがしないことによる操作感の悪さを改善することが期待できる。そこからさらに、本研究課題において、この位置検出を装着物なしで行えるよう改良を加えた(図7)。2010年11月に発売された距離を計測するカメラ(Kinect、Microsoft社製)を利用している。装着物が不要であり使用準備の手間がかからないため、数秒間だけ操作をしたい、作業中で手が汚れている、複数ユーザが交互あるいは同時に使う、などの状況でも使用可能なシステムとなった。

## ② プロジェクタ映像との触覚インタラクション

前述の空中インタフェースでは PC 画面を中央に配置しており、超音波振動子アレイをその両側に配置していた。このため超音波が皮膚に対して斜めに入射することになり、提示力が弱くなるという非効率な点があった。これを改善するため、PC画面があった位置に超音波振動子アレイを配置し、画面はプロジェクタで前方に投影するシステムを構築した(図8)。試作して、振動子アレイや駆動回路など超音波デバイス全体がひとつの筐体に収まるという利点も明らかになった。



図9 全周囲触覚提示

## ③ 全周囲触覚提示

これまでの空中超音波による触覚提示は一方から皮膚を押すのみであった。本手法の応用範囲を広げるためには、触覚提示の方向を増やすことが必要とされる。この目的のため、手を取り囲むように振動子アレイを4枚配置し、全周囲からの力を提示可能な構造を試みた。試算により、手のひらがどの方向を向いていても、振動子アレイ1枚と正対しているとき以上の力が提示されることが示されている。これは、将来的にホログラフィなど空中映像に触感を与える際に有効と考えられる。今後、振動子アレイ間の相互作用によるエネルギーロスの有無や、生じる気流の分布などについて調べる必要がある。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計9件)

- ① 星貴之: 触覚フィードバックのある空中入力システムの開発, 第11回計測自動制御学会 SI 部門講演会, 2010年12月23日, 東北大学(宮城県).
- ② 星貴之: 静脈をマーカーとして用いる指変形観察の試み, 第29回計測自動制御学会九州支部学術講演会, 2010年12月4日, 宮崎大学(宮崎県).
- ③ 橋元達哉, 星貴之, 鳥越一平: 接触位置の推定が可能な指輪型振動計測デバイス, 第29回計測自動制御学会九州支部学術講演会, 2010年12月4日, 宮崎大学(宮崎県).
- ④ 西山雄太, 星貴之, 鳥越一平: プロジェクタ映像との触覚インタラクションシステムの開発, 第29回計測自動制御学会九州支部学術講演会, 2010年12月5日, 宮崎大学(宮崎県).
- ⑤ 小川雄大, 星貴之, 鳥越一平: 空中超音波の包絡変調による触覚を介した音階提示の試み, 第29回計測自動制御学会九州支部学術講演会, 2010年12月5日, 宮崎大学(宮崎県).

- ⑥ 渡邊雅之, 星貴之, 鳥越一平: 空中映像との多方向触覚インタラクションシステムの開発, 第 29 回計測自動制御学会九州支部学術講演会, 2010 年 12 月 5 日, 宮崎大学 (宮崎県).
- ⑦ T. Hoshi, Y. Nishiyama, and I. Torigoe: Observations of Airflow Arising from Airborne Ultrasound Tactile Display, SICE Annual Conference, 19 Aug., 2010, Grand Hotel (Taiwan).
- ⑧ 西山雄太, 星貴之, 鳥越一平: 空中超音波触覚ディスプレイに伴う気流の研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 2010 年 6 月 15 日, 旭川大雪アリーナ (北海道).
- ⑨ 橋元達哉, 星貴之, 鳥越一平: 生体指振動を計測する指輪型デバイス, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 2010 年 6 月 15 日, 旭川大雪アリーナ (北海道).

[その他]

ホームページ等

[http://www.alab.t.u-tokyo.ac.jp/~star/index\\_j.html](http://www.alab.t.u-tokyo.ac.jp/~star/index_j.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

星 貴之 (HOSHI TAKAYUKI)

熊本大学・大学院自然科学研究科・助教

研究者番号: 80537704

### (2) 研究分担者

なし ( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

なし ( )

研究者番号: