

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：33917

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K19819

研究課題名（和文）超音波フィードバック型フェーズドアレイ触覚ディスプレイの開発

研究課題名（英文）Development of ultrasonic feedback phased array tactile display

研究代表者

藤原 正浩 (Fujiwara, Masahiro)

南山大学・理工学部・講師

研究者番号：30825592

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、触覚ディスプレイへの応用を目的に、超音波フィードバック型のフェーズドアレイULFPAT (Ultrasonic feedback phased array tactile display) を開発してきた。開発したULFPATのプロトタイプを用いて、刺激対象点を模擬した発音源の位置推定精度を検証しその有効性を示した。また、触覚刺激点となる超音波焦点を、本装置を用いて複数生成する技術的問題に対し、多様体上の最適化手法を適用して評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、空中超音波により何も装着していない皮膚に人工的な触感を提示する空中ハプティクスにおいて、これまで超音波を送信するのみであったのが、受信も可能とするデバイスを開発した。これにより、例えば指先に超音波刺激を与える際、従来はデプスカメラ等を使用して指先位置を計測していたが、反射超音波を受信することによっても計測できることを示した。本手法は装置間の位置調整が不要であることや、外乱光などの環境変化によらず精度を保つことができるという利点がある。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we have developed an ultrasonic feedback phased array tactile display (ULFPAT) for the purpose of application to tactile displays. Using a prototype of the developed ULFPAT, the accuracy of estimating the position of a sound source simulating a stimulation target point was verified, and its effectiveness was demonstrated. In addition, a manifold optimization method was applied to evaluate the technical problem of using this device to generate multiple ultrasonic foci that serve as tactile stimulation points.

研究分野：ハプティクス

キーワード：超音波フェーズドアレイ 超音波センシング 触覚提示 ハプティクス 多様体上の最適化

1. 研究開始当初の背景

申請時においても、大学・企業や国内・国外を問わず、空中を伝搬する集束超音波による非接触の触覚ディスプレイ (AUTD: Airborne ultrasound tactile display) の開発や、その提示手法の研究は精力的に行われていた。具体的には、AUTD は高い自由度で非接触の触覚提示が可能であることから、リアルな触感の再現手法や触覚フィードバックのある空中インタフェースなどの応用研究が進められていた。AUTD の構造は超音波振動子の送信フェーズドアレイになっており、超音波強度の時空間分布を動的に設定可能であるという特長がある。特に、任意形状の圧力パターンを提示する手法や、主観的な提示強度を増幅する移動点刺激などが発見されており、AUTD が出力可能な触感パターンの自由度は格段に向上してきていたという環境にあった。

その一方で、AUTD により実際に皮膚表面に提示されている超音波強度分布と、知覚される触感パターンとの関係は限定的にしか評価されていなかった。所望の超音波強度分布を基に AUTD を駆動した後、実際に皮膚表面で生じる分布は、外乱により所望の分布から変動する。従来のシステムはその皮膚表面で実際に形成された超音波強度分布をセンシングしておらず、所望の分布がそのまま提示されていると仮定していた。超音波が皮膚表面上に至るまでに混入する外乱としては、対象皮膚表面の位置偏差や形状分布、温度分布や気流による音速変化、表面速度によるドップラー周波数偏移などが考えられる。特に、超音波が伝搬する際にはエネルギー散逸による温度上昇や、非線形効果による音響流が必ず生じ、これらの効果は無視できないものとなる。また、駆動信号を算出する際には各超音波振動子の入出力特性が一様であることを仮定しているが、実際にはばらつきがあることも外乱となる。

申請時の環境では、皮膚表面に提示されている圧力分布がこれらの外乱によって不定となるため、AUTD による触感提示に再現性が保証されていない状況にあった。また、物理的な時空間刺激値と主観的な触知覚との関係も定量化できないため、触知覚の特性やメカニズムの解明も困難になっていた。そのため、外乱を評価して所望の分布提示を保証する必要があった。

外乱を想定した評価はそれ以前にも間接的には行われており、自由環境下の音場計測、数値シミュレーション、デプスカメラ等による対象形状の光学計測等により対策されていた。自由環境下の音場計測では、実デバイスで生成した音場分布を標準マイクロフォン等の空間走査により測定し、所望の分布と一致していることを確認する。本手法により、振動子のばらつきやその環境下における温度分布による影響は補償することが可能であるが、実際には触覚を提示する手指等が存在するために音場が大きく変わる問題がある。数値シミュレーションでは手指等を計算領域に設定し音場を算出することで、所望の分布が得られることを確認する。しかし、数値シミュレーションでは振動子のばらつきや温度分布等の影響は補償できない。対象形状の光学的計測では手指等の位置や形状をリアルタイムに計測し、それに基づき皮膚表面上での音場変動を補償することが可能である。ただし、温度分布や気流による影響を加味して補償することは困難である。

2. 研究の目的

本研究は、超音波照射により皮膚表面に生じる超音波強度分布をセンシングし、所望の強度分布へフィードバック制御する触感提示システムである ULFPAT (Ultrasonic feedback phased array tactile display) を開発し、その有効性を検証することを目的とした。

ULFPAT には焦点面における超音波強度分布が保証されるという利点がある。この利点により、物理的な時空間刺激と主観的な触知覚の関係性を初めて定量的に評価できるのと同時に、より再現性の高い触覚提示が可能となる。

本手法は以下の3つの利点から、技術的背景に対する有効なアプローチであると考えられる。第一の利点は、超音波強度を直接的にセンシングすることにより、皮膚表面に提示されている超音波の分布が得られる点である。実際の超音波強度分布は数値シミュレーションや光学的計測では得られないため、本手法がほぼ唯一の手段となる。また、本手法は標準マイクロフォンによる走査計測と同様の振動子ばらつきも含めた補償を行うのみでなく、手指等が存在していることを前提に測定できる利点がある。

第二の利点は、AUTD が送信フェーズドアレイ構造であり、高空間分解能なセンシングに適している点である。特に AUTD は超音波強度と超音波集束性の向上のため、多数の送信素子による大開口構成となっており、高 SN 比かつ高分解能なセンシングが容易である。また、受信素子も大開口アレイを構成することによりディジタルビームフォーミングや部分空間法などのアレイ信号処理が適用でき、高フレームレートなセンシングが可能になると考えられる。

第三の利点は、フィードバック制御を行うことにより、外乱に対しロバストに制御できる点である。従来の AUTD には光学計測の結果をフィードバックし、手指等の位置や形状に追従して超音波分布を移動させるシステムは存在した。それに対し ULFPAT は、反射超音波をフィードバックすることにより、手指の位置等の変動を含む超音波強度分布を変化させる要因全てを抑制可能なことが期待される。

3. 研究の方法

本研究では、ULFPAT のプロトタイプを実際に設計・製作し、外乱に対しロバストな超音波出力が可能であることを実験的に示す。ULFPAT のハードウェア設計およびソフトウェア設計は、既存の AUTD を改変することをベースにし、フィードバック制御の有無による耐外乱性能を定量的に比較する。また、設計パラメータの同定には適宜数値シミュレーションによる知見を活用する。製作したプロトタイプの評価は、外乱をある程度コントロール可能な実験環境において、生成音場を実計測することにより行う。

ハードウェア設計においては、まずは現行の AUTD に受信部を付加する方針であり、マルチチャネルの受信素子及び受信回路により、皮膚表面からの反射波を受信する。特に、受信素子の配置は適切に設計することにより MIMO 等の空間多重化技術を適用でき、より高い分解能が得られる可能性がある。また、触覚提示と受信信号処理を同時に行うため、リアルタイム処理が可能な演算リソースの付加を必要に応じて検討する。ソフトウェア設計においては、マルチチャネル受信信号から空間内の超音波強度分布を推定するアレイ信号処理に基づき設計する。

製作したプロトタイプの評価は、対象表面形状や温度分布等がコントロールされた環境において、超音波マイクロフォン等で音場を実計測することにより行う。外乱に対する感度を定量化することで、フィードバック制御により所望の強度分布に十分な精度で一致することを検証する。

4. 研究成果

主な成果として、試作した ULFPAT により皮膚表面から反射した超音波を測定し、焦点位置の精度を確認することでその性能を評価した。提案法では、フェーズドアレイとレンズ系の類推に基づき、共焦点原理に従って反射強度をパターン計測した。その結果、本手法の理論限界である波長程度の計測精度を達成できることを確認した。

図 1 に送信機アレイと受信機アレイの配置を示す。実験条件として、作業領域に指先があると仮定し、受信強度が最大になる位置を有効な焦点位置とする。送信アレイは長方形上に配置され、受信アレイはその外周一列に配置される。スキャン領域は、アレイに平行な平面に x - y 座標、アレイに垂直な方向に z 座標をとる。スキャン領域内の指先の音響反射率は非常に大きく、提案手法では完全反射を仮定する。反射体の分布は、次の手順により測定できる。有効な焦点位置は、受信強度が最大になる位置として決定される[1]。

- 送信フェーズドアレイは、特定の焦点に焦点を合わせたバースト超音波を出力する。
 - 外周受信機フェーズドアレイで反射体からの反射波を取得する。
 - 同じ焦点で各チャネルの反射波信号を合成し、合成反射強度を取得する。
 - 焦点位置をステップ幅で更新し、手順 i～iii を繰り返す。
 - 所定の空間領域全体をスキャンすると、測定が終了する。各手順を以下に説明する。
- この手順に基づき、数値シミュレーションと試作機による実験により有効性を検証した。

(1) 音場の数値シミュレーション

計算機による数値シミュレーションには擬似スペクトル法を用いた。擬似スペクトル法は、実空間場をフーリエ変換して得られる k 空間場における偏微分方程式の時系列発展問題を解くものである。計算プラットフォームには MATLAB の k-Wave toolbox を使用した。

ハードウェア配置のシミュレーション条件は図 2 に示すように、反射体が超音波送受アレイから 150 mm の距離にあるとき、約 250 個の素子アレイによる計測とした。計測時間は 1.7 ms であり、送信する 40 kHz 超音波の周期に対して十分長くした。反射体の形状は、アレイに対抗する断面形状が正方形のものと L 字形のものを使用し、超音波焦点は走査領域を 1.7 mm 間隔で走査した。

図 3 と図 4 は、それぞれ正方形と L 字型の反射体における x - y 平面内の焦点走査に対する受信強度分布の結果である。これらの結果から、焦点直径である約 8.5 mm の分解能で強度分布が得られていることが

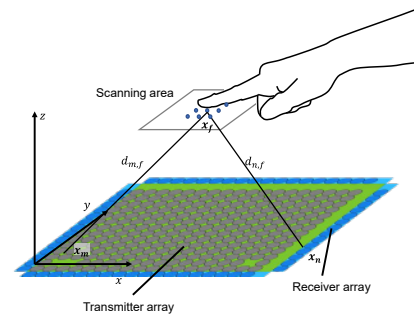


図 1 送受アレイと走査領域

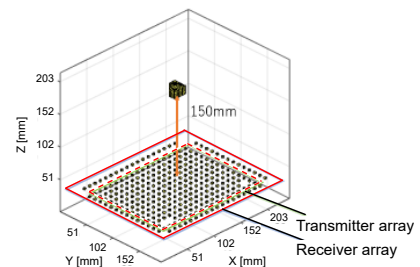


図 2 シミュレーション条件

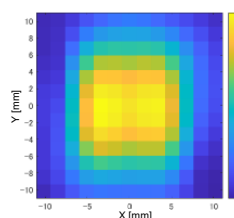


図 3 正方形反射体のシミュレーション結果

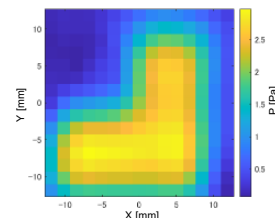


図 4 L 字型反射体のシミュレーション結果

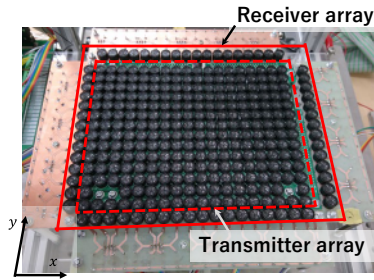


図 5 製作した ULFPAT 試作機

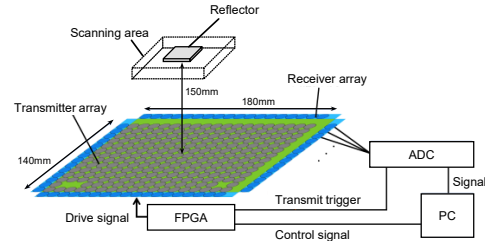


図 6 試作機を用いた実験系

分かる。これらのシミュレーション結果から、およそその反射体形状分布を本手法により捉えられることが確認された。刺激を適切な位置に提示するためには、この x 方向と y 方向の強度パターンを基に設定すべき焦点位置を推定する必要がある。

(2) ULFPAT 試作機による性能評価実験

図 5 に示す ULFPAT 試作機を製作し、図 6 のように数値シミュレーションと同様の計測評価を行った。PC は装置全体のコントローラであり、FPGA, ADC はそれぞれ駆動装置、測定装置である。

図 7 と図 8 は、それぞれ正方形と L 字型の反射体の、 x - y 平面における焦点走査に対する受信強度分布である。これらの結果は、シミュレーション結果ほどではないものの、波長程度の分解能で反射体パターンを取得できることを示している。

図 8 の結果の不均一性として、 $x=0, y=0$ 付近で反射音圧の低下が見られた。原因としては、反射体表面での鏡面反射によって、一部の反射波が受信素子に入射しなかったことが考えられる。

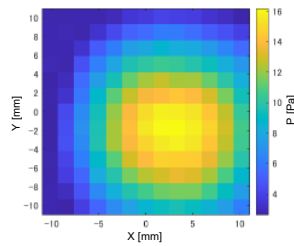


図 7 正方形反射体の受信強度測定結果

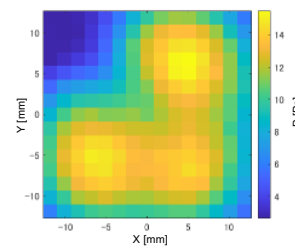


図 8 L 字型の受信強度測定結果

(1)及び(2)の成果により、当初の目的であった ULFPAT の有効性の基礎的部分は検証され、反射波を利用することで、触覚刺激提示中の皮膚上での強度分布を推定することが可能であることを示せた。ただし、反射体表面の鏡面反射成分に対しても高精度な計測を実現する、全素子送受信可能なフェーズドアレイの実現が課題として残された。

(3) 複数刺激点提示のための数理的駆動手法

(1)及び(2)の研究を進める過程で、送信時特有の問題であった複数刺激点提示のための超音波素子駆動方法が、受信時に使われるアレイ信号処理を一部援用することで定式化できることを発見した。

一般に、焦点面内において所望の超音波強度分布を実現する、超音波素子の駆動振幅及び位相は、線形変換問題として容易に解ける。しかし、その場合は焦点面における超音波強度の低下が生じ、十分な触覚刺激ができない問題が生じる。この問題を解決するため、これまでは焦点面における音圧強度を最大化する制約条件を追加するなど、非線形な問題として定式化して解く手法が多くつかわれていた。

ここで、この追加された制約条件を、抽象的な幾何図形である多様体構造をもつ複素数集合とみなすと、無制約の最適化問題として定式化でき、より効率的に問題を解ける可能性があることを示した。この手法によって複数焦点を形成した結果を図 9 に示す。本手法はその計算量を評価することにより、複数刺激点提示をする際の標準的な方法となる可能性がある。

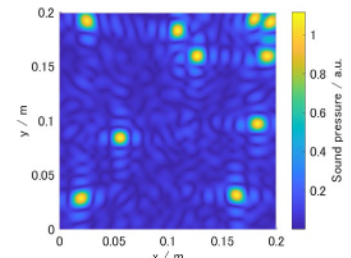


図 9 多様体上の最適化を用いた
10 焦点提示時の焦点面音場分布

参考文献

- [1] M. Fujiwara, Y. Someya, Y. Makino and H. Shinoda, "Reflection Pattern Sensing for Valid Airborne Ultrasound Tactile Display," *2021 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, Montreal, QC, Canada, 2021, pp. 121-126.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 藤原正浩
2. 発表標題 空中触覚提示のための超音波フェーズドアレイセンシングの基礎検討
3. 学会等名 第40回センシングフォーラム計測部門大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤原正浩
2. 発表標題 空中超音波フェーズドアレイとパターン計測
3. 学会等名 第28回計測自動制御学会パターン計測シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masahiro Fujiwara
2. 発表標題 Airborne Ultrasound Tactile Device Capable of Array-Sensing
3. 学会等名 International Symposium on Hierarchical Bio-Navigation 2024（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda
2. 発表標題 Phase Optimization on Complex Circle Manifold for Generating High Intensity Ultrasound Foci Using Phased Array
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masahiro Fujiwara, Yu Someya, Yasutoshi Makino, Hiroyuki Shinoda
2. 発表標題 Reflection Pattern Sensing for Valid Airborne Ultrasound Tactile Display
3. 学会等名 IEEE World Haptics Conference (WHC) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 染谷 優, 藤原 正浩, 牧野 泰才, 篠田 裕之
2. 発表標題 空中超音波触覚提示における焦点反射センシング
3. 学会等名 第37回センシングフォーラム計測部門大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda
2. 発表標題 Three-dimensional Ultrasound Sensing for Aerial Tactile Display
3. 学会等名 IEEE 59th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

—

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------