



ベイズ最適化による超音波フェーズドアレイのビーム集束

Ultrasound Phased Array Beam Focusing Using Bayesian Optimization

陳劍宇¹⁾, 森崎汰雄¹⁾, 砥出悠太郎¹⁾, 鈴木颯¹⁾, 藤原正浩¹⁾, 牧野泰才¹⁾, 篠田裕之¹⁾

1) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

概要: 超音波フェーズドアレイにより生成された集束ビームは触覚提示などに応用されている。しかし、単一焦点などの単純な場を生成することは簡単だが、障害物や非線形要素を考慮することは難しかった。そこで、我々はアレイが場を生成する過程をブラックボックスとして、ベイズ最適化により、任意の場を生成する手法を提案する。本手法は、特定の物理モデルに依存せず、障害物や非線形要素を暗に考慮することができる。本研究では基礎検討として、単一焦点の生成を試みる。

キーワード: 超音波フェーズドアレイ, 焦点, ベイズ最適化

1. 緒言

超音波フェーズドアレイは位相を個別に制御できる超音波振動子を並べたデバイスである。これらの振動子から放出された超音波は、互いに干渉しながら空間中に音場を形成する。振動子の位相を適切に制御し、適当な位置で音を強め合わせることで、焦点やベッセルビームなどの集束ビームを生成できる。十分に音圧を高めた高強度の集束ビームでは、放射圧や音響流などの非線形効果が現れる。

これまでに、この放射圧を用いることで、非接触な触覚提示などが行われてきた[1]。例えば、門内らは焦点を利用して、空中触覚バーチャルスクリーンを開発した[2]。また、音響流に伴う空気流[3]を用いて、様々なアプリケーションが開発された。例えば、空気流で冷気を輸送することによる遠隔冷覚提示[4]や再構成可能な空中ミストディスプレイ[5]などのアプリケーションが提案されている。

これらの応用において、多彩な触覚表現や高度な非接触制御などを行うために、より複雑な音場をフェーズドアレイで生成する手法が多く提案されてきた。例えば、複数の焦点を同時に提示することで、三次元形状を知覚させる方法が提案されている[6] [7]。これらの従来手法では、音場の線形性を利用して逆問題を解いている。

しかし、障害物が介在する場合や、音響流などの二次的な非線形場を生成する場合に逆問題を解くことは難しい。触覚インタラクションにおいては、触覚提示対象である手や指そのものによって音場が乱されてしまうため、これを考慮して音場を設計するのは重要である。また、これまで、音響流やそれに伴う風を制御することはできず、純粋に放射圧のみを用いた触覚提示なども難しかった。

た。

この問題を解決するために、我々はベイズ最適化 (Bayesian Optimization: BO) を用いた手法を提案する。BO により、フェーズドアレイが場を生成する過程をブラックボックス関数として、最適化が行える。障害物や非線形要素も含めてブラックボックス関数とみなし、我々はただその出力を観測し、目標の場との残差のみをフィードバックすれば良い。つまり、順問題を数値計算で解いたり、マイクなどで直接場を観測する事により最適化を行うことができる。

本論文ではシミュレーションにより、提案手法を用いて単一焦点を生成し、提案手法の可能性を検討した。

2. 実験手法

2.1 フェーズドアレイの生成する音場

上述したように、シミュレーションにより提案手法の実現可能性を確認する。本論文では簡単のため、障害物がない場合の音場をシミュレートする。

i 番目の振動子の位相を ϕ_i , 位置を \mathbf{r}_i とする。振動子から放出される音波が球面波であると仮定すると、 n 個のトランスデューサーによって生成される複素音場 $p(\mathbf{r})$ は、次の式で表される。

$$p(\mathbf{r}; \phi_1, \dots, \phi_n) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|} e^{-j(k|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|)} e^{j\phi_i}, \quad (1)$$

ここで、 k は波数である。

式 (1) により、 \mathbf{r}_f の位置に焦点を生成したいなら、振動子の位相 ϕ_i を次のように設定すれば良い事がわかる。

$$\phi_i^* = k|\mathbf{r}_f - \mathbf{r}_i|. \quad (2)$$

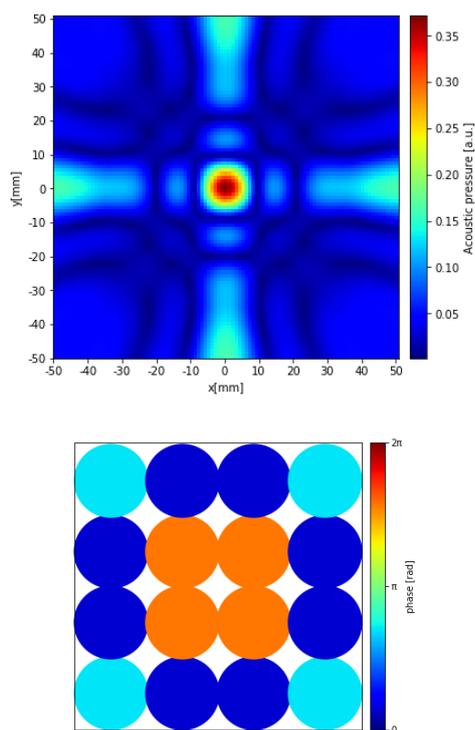


図1 目標音場とフェーズドアレイの位相

本論文では、この ϕ_i^* が生成する音場、すなわち単一焦点場 p^* を目標音場とする。つまり、目標音場とフェーズドアレイの生成する音場との二乗平均平方根誤差 (Root Mean Squared Error: RMSE) である次の関数 $f(\phi_1, \dots, \phi_n)$ を最適化する。

$$f(\phi_1, \dots, \phi_n) = \sqrt{\frac{1}{V} \int_V d\mathbf{r} (|p^*| - |p(\mathbf{r}; \phi_1, \dots, \phi_n)|)^2}. \quad (3)$$

なお、本研究ではシミュレートされた音場をもとに最適化を行っているが、例えば実測された音圧分布をもとに最適化を行うこともできる。つまり、本提案手法においては、式(1)のような物理的特性に関する前提は、本質的には不要である。

2.2 ベイズ最適化

本研究では、振動子の数に対して指数関数的に増加する探索空間で効率的に最適化するために BO を採用する。BO により、ブラックボックス関数 $f(\mathbf{x})$ が最小になるような入力 $\mathbf{x}^* = \operatorname{argmin}_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d} f(\mathbf{x})$ を効率的に見つけられる[8]。

BO のアルゴリズムは以下の通りである。

1. $f(\mathbf{x})$ の回帰モデルとして、ガウス過程 (Gaussian Process: GP) を仮定する。
2. 獲得関数 $a(\mathbf{x})$ を最大化する点 $\mathbf{x}_t = \operatorname{argmax}_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d} a(\mathbf{x})$ における、目的関数の出力 $y_t = f(\mathbf{x}_t)$ を観測する。
3. 観測データ列 $\{(\mathbf{x}_0, y_0), \dots, (\mathbf{x}_t, y_t)\}$ から GP の事後確率分布を更新する。
4. 上記2~3を指定回数繰り返す。

BO ではブラックボックス関数 $f(\mathbf{x})$ の事後確率分布の期待値 μ と分散 σ^2 を推定するために、 $f(\mathbf{x})$ の回帰モデルとして GP を仮定する。本研究では、GP の共分散関数 (カーネル関数とも呼ばれる) として、Matérn5/2 カーネルを選択

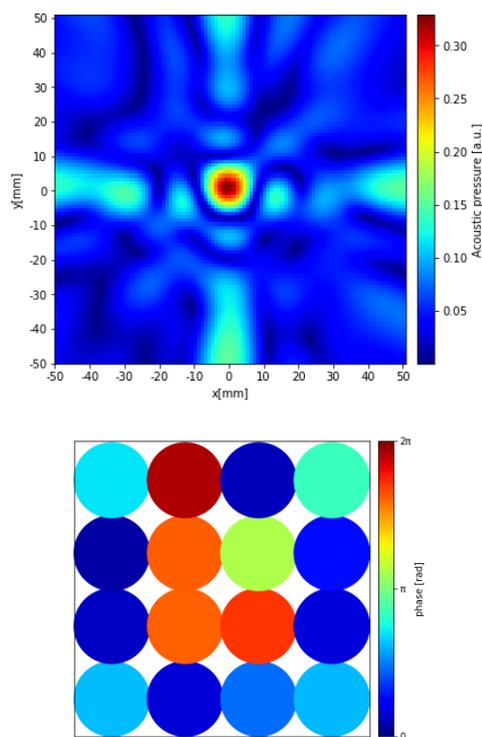


図2 BOにより最適化された音場とフェーズドアレイの位相

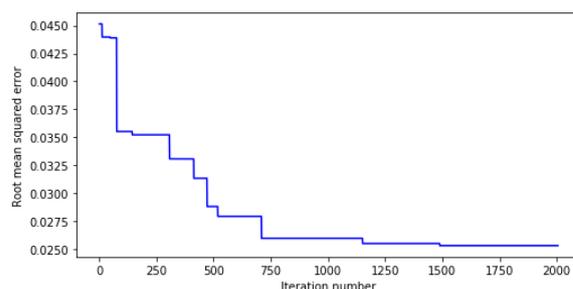


図3 反復回数に対する RMSE の変化

した。

次に、観測点 \mathbf{x}_t を決定するために獲得関数を設定する必要がある。よく知られているものとして、期待改善量 (EI) と上限信頼区間 (UCB) がある。今回は、次式で表される UCB を利用することにした。

$$a_{\text{UCB}} = \mu + \kappa\sigma. \quad (4)$$

UCB では、推定の期待値 μ と標準偏差 σ の両方を用いることで、期待値の高くなる点の活用と未知の点の探索を同時に考慮する。式(4)における κ により活用と探索のトレードオフを制御する。

3. シミュレーション実験

本実験では、 4×4 のフェーズドアレイによる音場をシミュレートする。振動子は10mm間隔で格子状に配置されている。座標系は、アレイの中心に原点を置き、アレイの表面と xy 平面が水平で、右手形をなすように設定する。

まず、入力である位相の探索範囲を決定する。一般に、位相には周期性があるため、範囲は $[0, 2\pi)$ に設定した。また、フェーズドアレイのすべての振動子の位相に均一な

オフセットを加えても、生成される音場は変化しない。これにより BO の収束が悪くなる可能性があるため、ある一つの振動子の位相を 0 に固定した。

目標となる焦点は $\mathbf{r}_f = (0 \text{ mm}, 0 \text{ mm}, 40 \text{ mm})$ に生成した。このときの理想的な位相パターンは焦点位置からの距離に応じた同心円パターンとなり、そのときの音場分布と併せて可視化すると図 1 のようになる。シミュレーションでは、最適化する式 (2) の積分は総和で近似する。観察面の範囲は $(x, y) \in [-50 \text{ mm}, 50 \text{ mm}] \times [-50 \text{ mm}, 50 \text{ mm}]$, $z = 40 \text{ mm}$ であり、この範囲を 1 mm 間隔でサンプリングした点で RMSE を計算する。

経験的に、BO の反復回数は 2000 回、獲得関数の κ は $\kappa = 0.5$ とした。

4. 結果

図 2 に、BO により最適化された音場と位相を示す。焦点における音圧は目標音場より弱くなったものの、単一焦点を生成することができた。今回はシミュレーションのために物理モデルとして式 (1) を利用しているが、BO で最適解を探索する際には、式 (1) は利用していない。つまり、物理モデルを考慮すること無く最適化が行えることが確認された。

図 3 から、BO は 1488 回で収束することがわかった。また、インテル® Core™ i7-8086K の CPU を使用して、収束するまでに約 6 時間かかった。

5. 結言

BO を利用することで、物理モデルを考慮することなく、焦点場を生成するフェーズドアレイの駆動を再現することができた。BO では、目標となる音場との残差のみがフィードバックされた。すなわち、前提となる物理モデルを用いることなく、BO は $(16 - 1)$ 次元の探索空間の中から、1488 回の反復で目標音場を再現できることを確認した。現在は、この反復には 6 時間ほどの計算時間がかかっているが、将来的にはリアルタイムに用いることができると期待する。また、音圧もさらに目標音場に近づけられると期待する。

この論文では、基礎検討として、単一焦点を生成した。さらに複雑な音場の生成や、障害物が存在する場合に任意の音場を生成すること、気流などの任意の非線形場の生成が、今後の課題である。また、BO がいかにかして効率的に音場を再現したのかを解析することも重要な課題である。

謝辞 本研究は JST CREST JPMJCR18A2 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Tayayuki Hoshi, et al. ‘Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound’, IEEE Transactions on Haptics, Volume: 3, Issue: 3, July-Sept. 2010
- [2] Yasuaki Monnai, et al. ‘HaptoMime: mid-air haptic interaction with a floating virtual screen’, UIST '14: The 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology Honolulu Hawaii USA October 2014
- [3] Hasegawa, et al, ‘Electronically steerable ultrasound-driven long narrow air stream’, Applied Physics Letters, 111, 064104 (2017)
- [4] Mitsuru Nakajima, et al, “Remote Cooling Sensation Presentation Controlling Mist in Midair,” in Proc. 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp. 1238-1241, Jan. 12-15, 2020
- [5] Mohd Adili Norasikin, et al. ‘SonicSpray: A Technique to Reconfigure Permeable Mid-Air Displays’, ISS'19, November 10–13, 2019
- [6] Benjamin Long, et al, ‘Rendering volumetric haptic shapes in mid-air using ultrasound’, ACM Transactions on Graphics, Article No.: 181, November, 2014
- [7] Seki Inoue, ‘Active touch perception produced by airborne ultrasonic haptic hologram’, 2015 IEEE World Haptics Conference (WHC), June, 2015
- [8] Peter I. Frazier, ‘A Tutorial on Bayesian Optimization’, Jul, 2018