

音場制御におけるスピーカ・制御点配置最適化法の比較評価*

○小山翔一 (東京大学/JST さきがけ), Gilles Chardon (CentraleSupélec),
Laurent Daudet (Institut Langevin)

1 はじめに

複数のスピーカを用いて所望の音空間を合成する音場制御は、高臨場感音響再生や空間的な騒音抑圧などの広い応用を有する。制御対象領域を離散化することで複数の制御点を設定し、制御点上の音圧が所望のものと一致するように逆フィルタを設計することでスピーカ駆動信号を求める多点音圧制御 (pressure matching: PM) 法 [1] は、実装の容易さから広く用いられる手法である。

PM 法では、スピーカ (二次音源) と制御点 (センサ) の配置が合成の精度や逆フィルタの安定性に大きく影響する。能動騒音制御においては、二次音源の最適配置に関するいくつかの研究例があるが [2, 3], 多くの場合は特定の所望音場に対してスピーカの配置を最適化することを目的とする。しかしながら、一般の音場制御においては、対象領域内に多様な所望音場を合成する場が多い。特定の所望音場に大きく依存しない手法としては、Gram-Schmidt 直交化に基づく方法 [4] などがある。制御点配置の最適化に関する研究例は少なく、音場再現の分野で発展した解析的な手法においては、対象領域に球や円、平面や直線などの単純な形状を仮定し、その境界面上を等間隔に離散化してセンサを配置することが行われてきた [5]。これは、境界面上における音圧のみが既知の下で対象領域内全体を制御することが特定の周波数において困難となる、禁止周波数問題を避けるために、剛体バッフル (音響的に剛な散乱体) や指向性マイクロフォンなどを用いた際の観測信号を陽に記述するためである [6]。著者らは、音場制御において所望音場に依存しない形で二次音源・センサ配置を同時に最適化するため、empirical interpolation method (EIM) と呼ばれる関数補間のための手法を応用した方法を提案している [7]。

一方、機械学習やセンサネットワークの分野においては、センサ配置最適化のための様々な手法が提案されている。多くの場合、計測対象の領域を離散化して得られる候補点から、最適なセンサ集合を選択する組合せ最適化問題を考える。最適化の規準としては、実験計画法の分野で提案されている観測行列に関する様々なコスト関数 [8] や、相互情報量などの情報理論に基づく規準 [9] などが用いられる。Ranieri ら [10, 11] は FrameSense に基づく計測におけるセンサ配置最適化法、制御におけるアクチュエータ配置

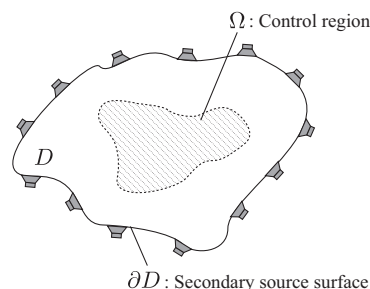


Fig. 1: PM 法による音場制御。 ∂D 上に配置した二次音源を用いて、対象領域 Ω 内に所望の音場を合成する。

最適化法をそれぞれ提案している。最適化アルゴリズムとしては、貪欲法、凸緩和法、ヒューリスティクスによる方法などが用いられる。著者らは、これらのうちの代表的な手法を音場制御における二次音源・センサ配置の問題に適用し、実験的な比較を行った結果を総説論文としてまとめている [12]。

本稿では、文献 [12] で取り上げた二次音源あるいはセンサ配置の最適化法のうちのいくつかを簡単にまとめ、これらを複数の対象領域における音場制御の問題である、マルチゾーン音場制御に適用した新たな実験結果を示す。

2 多点音圧制御法による音場制御

図 1 のように、領域 D の境界面 ∂D に L 個の二次音源を配置し、制御領域 Ω 内に所望の音場を合成することを考える。位置 \mathbf{x} 、角周波数 ω における合成音場を $u_{\text{syn}}(\mathbf{x})$ とすると、 $u_{\text{syn}}(\mathbf{x})$ は二次音源の駆動信号と伝達関数の線形和として以下のように書ける。

$$u_{\text{syn}}(\mathbf{x}, \omega) = \sum_{l=1}^L d_l(\omega) g_l(\mathbf{x}, \omega) \quad (1)$$

ここで、 $d_l(\omega)$ と $g_l(\mathbf{x}, \omega)$ はそれぞれ l 番目の二次音源の駆動信号と伝達関数である。以降、角周波数に関して独立に定式化できるとして、 ω は省略して表記する。

領域 Ω 内の合成音場が所望音場 $u_{\text{des}}(\mathbf{x})$ と一致するように駆動信号 d_l を求めたい。そこで、合成音場と所望音場の二乗誤差の Ω 内での領域積分を考える。

$$J = \int_{\mathbf{x} \in \Omega} \left| \sum_{l=1}^L d_l g_l(\mathbf{x}) - u_{\text{des}}(\mathbf{x}) \right|^2 d\mathbf{x} \quad (2)$$

* Comparison of source and sensor placement methods in sound field control. by KOYAMA, Shoichi (The University of Tokyo), CHARDON Gilles (CentraleSupélec), DAUDET, Laurent (Institut Langevin)

	配置最適化対象	最適化規準	アルゴリズム
Krause, et al. [9] (2008)	センサ配置	相互情報量	貪欲法
Joshi and Boyd [13] (2009)	センサ配置	対数行列式 (D-optimal)	凸緩和法
Ranieri, et al. [10, 11] (2014)	二次音源/センサ配置	フレームポテンシャル	貪欲法
Liu, et al. [14] (2016)	センサ配置	平均二乗誤差 (A-optimal)	凸緩和法/貪欲法
Koyama, et al. [7] (2018)	二次音源・センサ配置	L_∞ 誤差ノルム	貪欲法

Table 1: 二次音源とセンサ配置最適化法の比較。

この目的関数 J の d_i に関する最小化は、領域積分を含むために解くことが難しい。PM法では、領域 Ω を離散化し、 Ω 内に離散的に配置された制御点において、合成音場と所望音場が一致するように d_i を求める。領域 Ω を M 個の制御点として離散化したとし、制御点上での $u_{\text{des}}(\mathbf{x})$ を並べたベクトルを $\mathbf{u}^{\text{des}} \in \mathbb{C}^M$ とする。また、 $d_i, g_i(\mathbf{x})$ をそれぞれベクトル $\mathbf{d} \in \mathbb{C}^L$ 、行列 $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{M \times L}$ として書けば、PM法の目的関数 J_d は以下ようになる。

$$J_d = \|\mathbf{u}^{\text{des}} - \mathbf{G}\mathbf{d}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{d}\|_2^2 \quad (3)$$

ここで、第1項は制御点上での合成音場の二乗誤差を表し、第2項は \mathbf{d} の振幅が過度に大きくならないようにするための正則化項であり、 λ は正則化パラメータである。 J_d を最小化する \mathbf{d} は以下のように閉形式で求められる。

$$\mathbf{d} = (\mathbf{G}^H \mathbf{G} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^H \mathbf{u}^{\text{des}} \quad (4)$$

領域 Ω の離散化として見れば、高い精度での音場制御を実現するためには、制御点は Ω 内にできるだけ密に配置することが望ましい。しかしながら、伝達関数行列 \mathbf{G} は各二次音源と制御点の間で測定することで得られるため、密な制御点配置を実現するには膨大な数のマイクロフォンを要する。また、仮に Ω の境界面のみ制御点を配置すると、特定の周波数で音場制御の精度が著しく悪化する、禁止周波数の問題が生じることが知られている。二次音源についても、 ∂D 上に密に配置することはコストやシステム規模の面から現実的ではない。したがって、適切な数の二次音源・制御点を適切な位置に配置することが望ましい。

3 音場制御における二次音源・センサ配置法

センサ配置の最適化は、近年、機械学習やセンサネットワークの分野で発展しており、様々な手法が提案されている。これらは音場制御における制御点配置の最適化のために直接適用できると考えられる。また、制御のためのアクチュエータ、つまり音場制御における二次音源配置の最適化についても、いくつかの手法がこれまでに提案されている。ただし、所望音場に特定の音場を仮定しない二次音源配置手法は多

くない。表1にこれらのうちの代表的な手法5つをまとめた。

センサ配置の最適化では、対象領域を離散化することで得られる候補点の中から、ある規準の下で最適なセンサ集合を選択する、組合せ最適化問題を解く。観測信号と推定したいパラメータに線形モデルを仮定し、これらに関係づける観測行列 (式(3)での \mathbf{G} に相当) に対して、実験計画法 [8] の分野で提案されている様々な規準が用いられる。例えば、 \mathbf{G} のトレースを規準とする A-optimal では、推定値の平均二乗誤差を最小化することと等価である。D-optimal では、推定値の信頼領域に相当する $\log \det \mathbf{G}$ の最大化を行う。また、行列 \mathbf{G} のフレームポテンシャルと呼ばれる規準を用いる手法も提案されており [10]、これはアクチュエータ配置の最適化にも応用されている [11]。この規準は推定値の平均二乗誤差の近似となることが知られている。一方、観測値にガウス過程などの確率モデルを導入し、情報理論的な規準を用いる場合もある。例えば、選択されたセンサとそれ以外のセンサとの間のエントロピー [15] や相互情報量 [9] を規準とする手法が提案されている。

ある規準を定めた上で、最適なセンサ配置の組合せを求めるためのアルゴリズムも多岐にわたっている。センサ配置問題は一般に大規模となるため、全探索により最適解を求めることは現実的ではない。大きく分けて、貪欲法、凸緩和法、ヒューリスティクスによる方法や、これらの組合せを用いる場合が多い。貪欲法では、反復ごとに規準を最大化あるいは最小化するセンサを1つずつ追加していく。特に、相互情報量やフレームポテンシャルは、コスト関数に劣モジュラ性が成り立つため、貪欲法による解法によって最適解の近似率が保障できる。凸緩和法においては、センサの選択・非選択を表す2値ベクトルを連続値のベクトルに置き換えることで、組合せ最適化問題を凸な連続最適化の問題に近似する。半正定値計画問題として解く方法 [14]、さらに近似を適用してニュートン法を用いる方法 [13] も提案されている。多くの場合、凸緩和法のみによって得られる解では元のコスト関数の最適解に対する近似解としては不十分なため、乱択アルゴリズムなどのヒューリスティクスによる方法を組み合わせる。

ここまでで紹介した手法は、センサあるいはアク

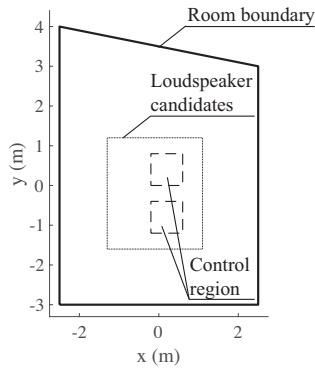


Fig. 2: シミュレーション実験条件。2次元の台形の室形状を仮定し、点線上をスピーカ配置候補点、破線領域内を制御点配置候補点とした。

チューエタどちらかに関して最適な配置を求める手法であった。著者らは、音場制御における二次音源と制御点の配置を同時に最適化する手法として、偏微分方程式の数値解析の分野で提案されたEIMに基づく手法を提案している [7]。EIMは関数近似のための補間関数とサンプリング点を求めるための手法だが、音場制御の問題を伝達関数を補間関数、制御点をサンプリング点とする関数補間の問題とみなすことで、EIMを二次音源・制御点配置の同時最適化法として適用できる。この手法は、二次音源と制御点の候補位置間の伝達関数行列 \mathbf{G} に対し、各反復で選択された二次音源・制御点を用いて補間した \mathbf{G} の L_∞ 誤差ノルムを最大とするものを選択していく貪欲法である。

文献 [12] では、ここで紹介したいいくつかの手法を音場制御問題に適用した場合の定式化を行うとともに、数値実験による詳細な比較評価を行っている。また、実験を再現可能なMATLABのソースコードも提供しているので参照されたい。

4 数値実験

数値シミュレーション実験として、複数の制御対象領域において所望音場を合成する、いわゆるマルチゾーン音場再現の問題におけるスピーカ・制御点の最適配置を扱う。2次元音場を仮定し、図2のような台形の室を考える。スピーカ候補位置は、 $2.4\text{ m} \times 2.8\text{ m}$ の矩形境界上を256点に離散化することで設定した。制御対象領域は $0.8\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ の正方形領域を2つ設定し、それぞれの領域を 0.04 m 間隔で441点に離散化したものを制御点の候補位置とした。各候補位置の間の伝達関数は有限要素法を用いて計算し、室境界上の吸音率を0.5とした。

比較手法として、以下の7手法を用いた。

- **Reg:** 境界上に等間隔配置。
- **Rand:** 候補点の中からランダムに選択。

- **GSO:** 制御点は境界上に二層で等間隔配置、スピーカはGram-Schmidt直交化法 [4] による。
- **Det:** スピーカは等間隔配置、制御点は対数行列式規準の凸緩和法 [13] による。
- **MI:** スピーカは等間隔配置、制御点は相互情報量規準の貪欲法 [9] による。
- **FS:** FrameSenseに基づくスピーカ・制御点配置 [10, 11]。
- **EIM:** EIMに基づくスピーカ・制御点配置 [7]。

また、スピーカおよび制御点の数は、EIMにおいて反復の停止条件である閾値を 1.0×10^{-2} とすることで決定した。所望音場は単一の平面波音場とし、到来方向は全方位を1度ごとに離散化することで得た。各周波数において選択したスピーカ・制御点を用いて、平面波音場を再現した精度をsignal-to-distortion ratio (SDR)の平均によって評価した結果が図3である。また、逆フィルタの安定性の指標として、伝達関数行列 \mathbf{G} の条件数を図4に示した。例として、800 Hzにおける再現音圧分布および誤差分布を図6に示した。**Reg**は禁止周波数の影響により、精度が大きく劣化する周波数が見られる。これを避けるために**GSO**のような境界上の二層配置がよく用いられるが、全体的なSDRは低い。**Det**, **MI**, **EIM**は禁止周波数を避けつつ高いSDRを実現しており、特にスピーカ・制御点配置の同時最適化が可能な**EIM**が最も高いSDRと低い条件数を示した。

5 おわりに

音場制御におけるスピーカ・センサ配置の最適化において、様々な分野で提案されてきた配置最適化法を適用するとともに、数値シミュレーション実験による評価を行った。マルチゾーン再現の問題を対象とした実験を行い、スピーカ・制御点配置の同時最適化が可能な**EIM**が最も良い性能を示した。音場の計測や制御における様々な問題において、センサ・アクチュエータ配置の最適化を扱う研究はまだ多くないため、今後もこの分野の更なる発展が期待される。

謝辞 本研究は、JST さきがけ JPMJPR18J4 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Miyoshi and Kaneda. *IEEE TASSP*, vol. 36(2), pp. 145–152, 1988.
- [2] Ruckman and Fuller. *J. Sound Vibr.*, vol. 186(3), pp. 395–406, 1995.
- [3] Khalilian, et al. *IEEE/ACM TASLP*, vol. 24(8), pp. 1364–1379, 2016.
- [4] Asano, et al. *IEEE TSAP*, vol. 7(2), pp. 213–230, 1999.

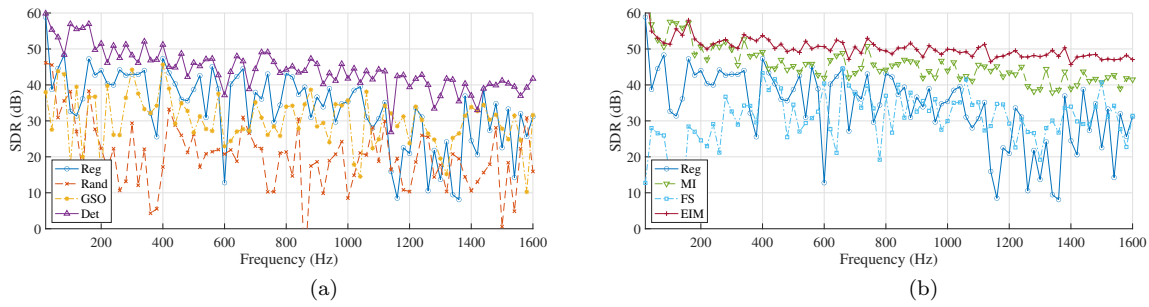


Fig. 3: 周波数と SDR との関係。

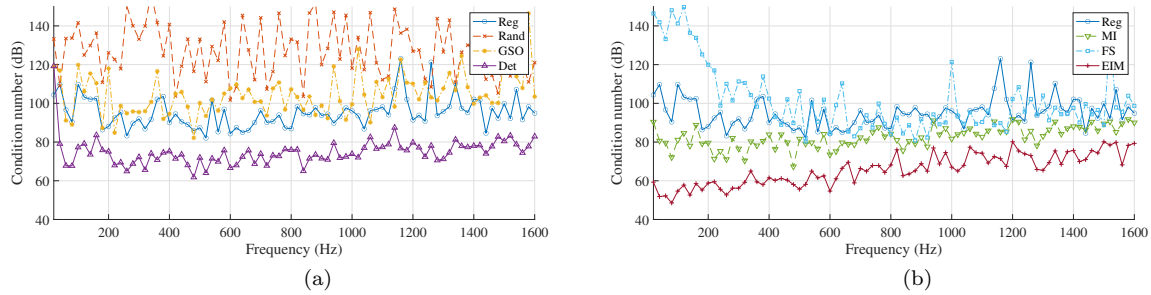


Fig. 4: SDR と条件数との関係。

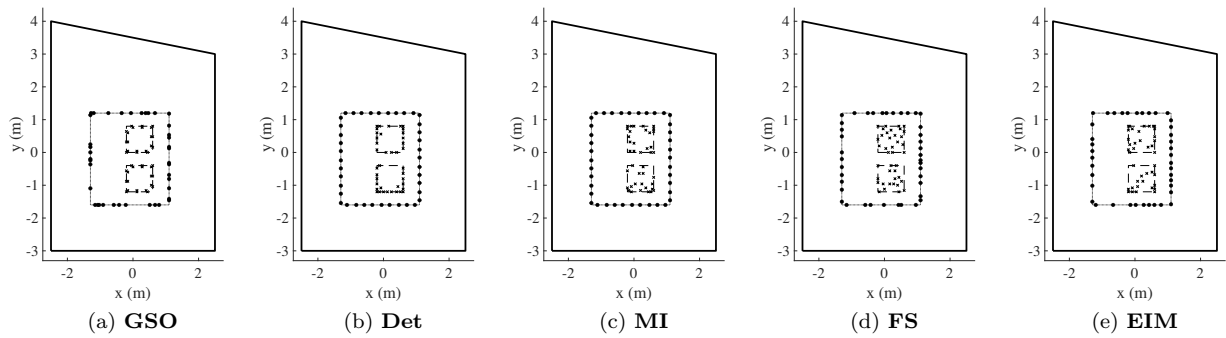


Fig. 5: 選択されたスピーカ (●), 制御点 (×) の配置。

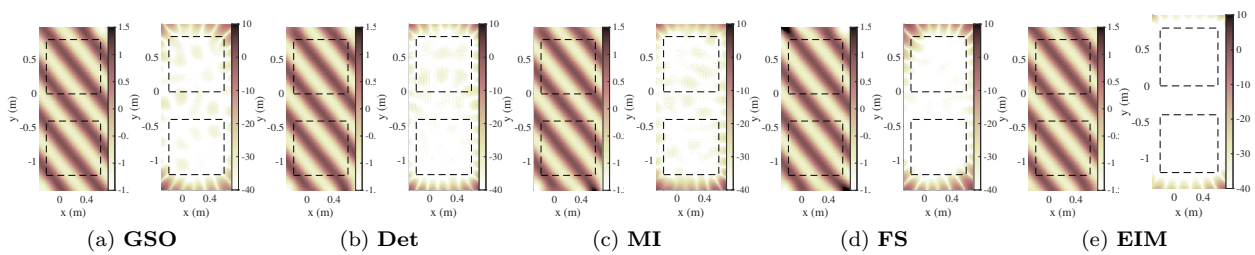


Fig. 6: 800 Hz の平面波を所望音場とした場合の再現音圧分布 (左) と誤差分布 (右)。

- [5] 小山. 日本音響学会誌, vol. 68(11), pp. 584–589, 2012.
- [6] Poletti. *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 53(11), pp. 1004–1025, 2005.
- [7] Koyama, et al. In *Proc. IEEE ICASSP*, pp. 501–505, 2018.
- [8] Steinberg and Hunter. *Technometrics*, vol. 26(2), pp. 71–97, 1984.
- [9] Krause, et al. *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 9, pp. 235–284, 2008.
- [10] Ranieri, et al. *IEEE TSP*, vol. 62(5), pp. 1135–1146, 2014.
- [11] Ranieri and Vetterli. In *Proc. IEEE ICASSP*, pp. 6825–6829, 2014.
- [12] Koyama, et al. *IEEE/ACM TASLP*, vol. 28, pp. 686–714, 2020.
- [13] Joshi and Boyd. *IEEE TSP*, vol. 57(2), pp. 451–462, 2009.
- [14] Liu, et al. *IEEE TSP*, vol. 64(13), pp. 3509–3522, 2016.
- [15] Wang, et al. In *Proc. IPSN*, pp. 36–45, 2004.