

フィードバックの抑制を考慮した逆システム設計と 音場共有システムへの応用*

☆河野峻也, △井上裕介, 池田雄介, 渡邊祐子, 伊勢史郎 (東京電機大/JST, CREST)

1 はじめに

境界音場制御の原理に基づく3次元音場再生システム (BoSCシステム) が実用レベルに近づきつつある [1]。複数の BoSC システムをインターネットで接続することにより, 遠隔に位置する複数の演奏家がアンサンブルを行うことが可能な音場共有システムの開発が進められているが, 一般的な通信システムと同様のフィードバックの問題が存在する。現在開発中の BoSC システムは再生系が 96ch であるため, フィードバックキャンセラを通常用いるようなリアルタイム適応フィルタで実現することは難しい [2, 3]。そこで本研究では, 逆システム設計により BoSC システムの再生室内に設置した演奏音収音用マイクロホン位置での音圧が最小となるよう制御する手法 [4] を採用し, フィードバックの抑制を目指す。

2 フィードバック抑制手法

2.1 逆システム設計法

Fig.1 のように原音場における BoSC マイクロホンの出力信号を $[X_j] (\in \mathbb{C}^{1 \times M})$, 再現音場におけるスピーカからマイクロホンアレイ (以下, BoSC マイクロホン) への伝達関数を $[G_{ij}] (\in \mathbb{C}^{N \times M})$, $[G_{ij}]$ の逆システムを $[H_{ji}] (\in \mathbb{C}^{M \times N})$ とすると, 再生音場における j 番目の BoSC マイクロホン出力信号 $[Y_j] (\in \mathbb{C}^{1 \times M})$ は

$$[Y_j] = [X_j][H_{ji}][G_{ij}] \quad (1)$$

となる。ただし, $j = 1, \dots, M, i = 1, \dots, N$ であり, M は BoSC マイクロホンのチャンネル数, N はスピーカのチャンネル数である。次にアンサンブル演奏が可能な音場共有システムを実現するために音場再生室内に L 個の楽音用マイクロホンを設置する場合について考える。すなわち音圧が最小となる制御点 (以下 Null Space) を L 個の楽音用マイクロホン位置に生成する。スピーカから楽音用マイクロホンへの伝達関数を

$[\hat{G}_{ik}] (\in \mathbb{C}^{N \times L})$ とすると再現音場におけるスピーカから BoSC マイクロホンおよび楽音用マイクロホンへの伝達関数 $[G'_{iq}]$ は $[G_{ij}]$ と $[\hat{G}_{ik}]$ を結合することにより

$$[G'_{iq}] = [G_{ij} \hat{G}_{ik}] (\in \mathbb{C}^{N \times (M+L)}) \quad (2)$$

と表される。ただし, $k = 1, \dots, L$ であり, $q = 1, \dots, M, M+1, \dots, M+L$ である。同様に原音場, 再生音場における各マイクロホンからの出力信号は

$$[X'_q] = [X_j \hat{X}_k] (\in \mathbb{C}^{1 \times (M+L)}) \quad (3)$$

$$[Y'_q] = [Y_j \hat{Y}_k] (\in \mathbb{C}^{1 \times (M+L)}) \quad (4)$$

となる。

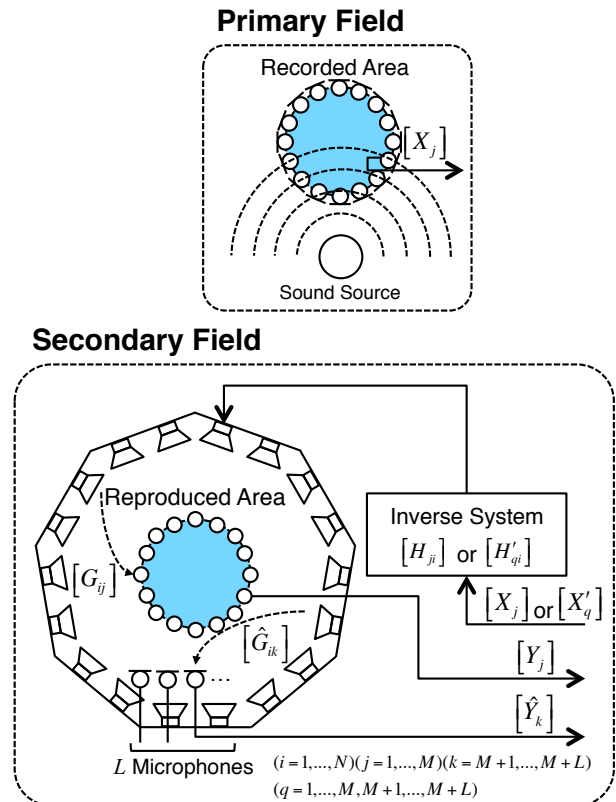


Fig. 1 Block diagram of the sound-field reproduction system with L null spaces at the position of the source microphones.

*Inverse system design method for feedback cancellation and applications to the sound field sharing system. by KOHNO Syunya, INOUE Yusuke, IKEDA Yusuke, WATANABE Yuko, ISE Shiro (Tokyo Denki University/CREST, JST)

ここで望まれるシステムは再生音場における BoSC マイクロホンの出力信号が原音場における BoSC マイクロホンの出力信号と等しくなることと、再生音場における楽音用マイクロホンの出力信号が 0 となることである。したがって、

$$[E_{qq}] = [H'_{qi}][G'_{iq}]. \quad (5)$$

ただし、 $[E_{qq}]$ は

$$[E_{qq}] = \begin{cases} 1 & (q \leq M) \\ 0 & (q > M) \end{cases}, \quad (6)$$

となる逆システム $[H'_{qi}] (\in \mathbb{C}^{(M+L) \times N})$ を求めればよい。これらの関係を用いると Null Space を生成する場合の再生音場における q 番目のマイクロホン出力信号 Eq(4) は、

$$[Y'_q] = [X'_q][H'_{qi}][G'_{iq}] \quad (7)$$

となる。また Null Space を生成しない場合の楽音用マイクロホンも含めた q 番目のマイクロホン出力信号 $[Y_q] (\in \mathbb{C}^{1 \times (M+L)})$ は、

$$[Y_q] = [X_j][H_{ji}][G'_{iq}] \quad (8)$$

である。

Eq(1)-(8) において $M < N$ および $M+L < N$ の場合には、逆システムの解は不定となる。この場合には最小ノルム解を与える Moore-Penrose 型一般逆行列を用いる手法によって逆システムの設計が可能である [5]。

3 実験的検討

3.1 実験条件

Null Space の数 $L = 1$ としたときの Null Space の位置と抑圧量の関係を検討する。

音響樽内の 96 個のスピーカと 80 個の BoSC マイクロホン間の伝達関数 $[G_{ij}]$ と、スピーカと楽音用マイクロホン間の伝達関数 $[\hat{G}_{ik}]$ を測定した。測定信号には 65536 点の TSP 信号を用い、サンプリング周波数 48 kHz、量子化ビット数 24bit、同期加算回数 10 回で測定を行った。Null Space 生成位置として Fig.2 に示す音響樽の壁面 92 箇所を選び、それぞれの位置に無指向性マイクロホン (DPA 4060) を設置した。なお、音響樽の平面断面は九角形であり、Fig.2 の上側は縦断面、下側は展開図である。また、マイクロホン番号 3 と 5 の高さについては扉のある面にはマイクロホンを設置しなかった。

92 箇所から任意の k 番目の測定位置を 1 つ選び、Null Space を 1 つ生成する逆システム $[H'_{qi}]$ を 92 種類設計する。また $[G_{ij}]$ をもとに Null Space を生成しない逆システム $[H_{ji}]$ も設計する。なお、逆システム設計法には最小誤差緩和アルゴリズム [6] を採用し、条件数の上限が 30 dB になるよう特異値を操作した。逆システムは伝達関数の信号長 2048 点、FFT 長 8192 点で周波数領域において設計した後、4096 点目を中心に 4096 点のハンギング窓で切り出すことで 4096 点の逆システムを設計した。設計した逆システムをもとに、Eq(7), (8) における入力信号 $[X'_q], [X_j]$ をそれぞれ伝達関数 $[G'_{iq}], [G_{ij}]$ として計算により $[Y'_q]$ と $[Y_q]$ を求めた。

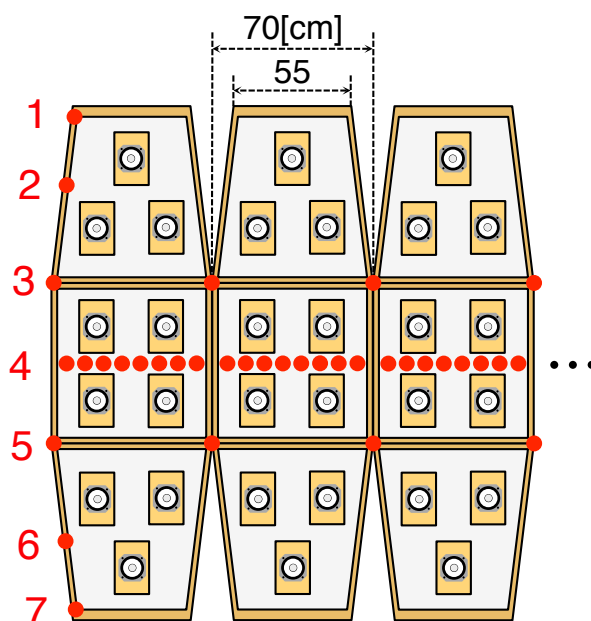
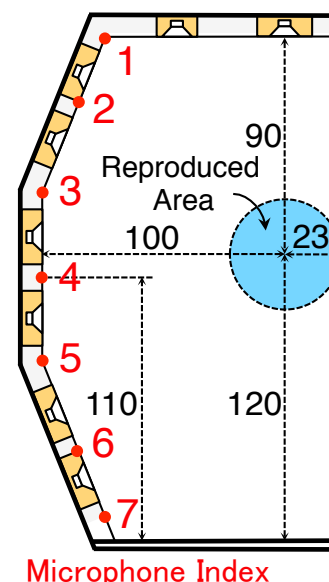


Fig. 2 Measurement position of the impulse response.

これらの値を用い、各測定位置における Null Space の抑圧量 E を次式により定義した。

$$E = 10 \log_{10} \frac{\sum_{t=0}^T |y_{src}[t]|^2}{\sum_{t=0}^T |y'_{src}[t]|^2} [\text{dB}], \quad (9)$$

ただし $y_{src}[t]$, $y'_{src}[t]$ はそれぞれ Null Space 非生成時, Null Space 生成時の楽音用マイクロホン出力信号の時間応答, t は時間サンプルである。なお, シミュレーションにおける伝達関数の信号長は 2048 点, 逆システム長は 4096 点, Eq(9) 中の T は 2047 である。

Eq(9) によって求めた各測定位置における抑圧量を Fig.3 に示す。なお, Fig.3 中の赤色のマーカーは Fig.2 の最も左端のマイクロホンに Null Space を生成した場合の結果のみを示し, 3~5 番目のマイクロホンの高さについては, 抑圧量の最小値と最大値をそれぞれ "△", "▽" で示した。Fig.3 より, どの位置においても約 20 dB 抑圧できることがわかる。また, 水平方向よりも垂直方向の位置によって抑圧量が増えることがわかる。

3.2 音場再現精度への影響

BoSC システムは 96 個のスピーカで 80 個の BoSC マイクロホン位置における音圧を制御するが, Null Space を生成することで制御点が増え, 音場再現領域の再現精度が低下する可能性がある。そこで制御点数 80 個の場合と Null Space を 1 つ生成した場合の音場再現領域における再現精度を SNR により比較した。Null Space 非生成時の SNR は次式によって定義した。

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \frac{\sum_{i=1}^{96} \sum_{q=1}^{80} \sum_{t=0}^T |g'_{iq}[t]|^2}{\sum_{i=1}^{96} \sum_{q=1}^{80} \sum_{t=0}^T |y_q[t] - g'_{iq}[t]|^2} [\text{dB}]. \quad (10)$$

ただし $g_{iq}[t]$, $y_q[t]$ はそれぞれ $[G'_{iq}]$, $[Y_q]$ の時間応答である。また, Null Space 生成時の SNR は

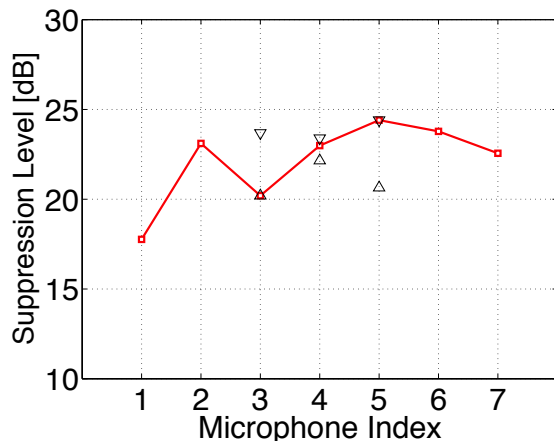


Fig. 3 Suppression level by simulation.

Eq(10) の $y_q[t]$ に $[Y'_q]$ の時間応答 $y'_q[t]$ を代入して計算した。その結果, Null Space 非生成時の SNR は 22.9 dB であり, 今回測定したどの位置に Null Space を生成した場合でも再現精度の低下は 0.1 dB 以内であった。したがって Null Space を 1 つ設置することにより音場再現精度は低下しないと言える。

4 抑圧量の実測

4.1 実測の手順

音場共有システムへの実装に向け, 実環境において Null Space の抑圧量を実測した。実測は音源の再生によって行なう。具体的にはまず, Null Space あり/なしの 2 種類の逆システムをそれぞれ畳み込んだ音源を音響樽で再生し, 再生された信号を楽音用マイクロホンで収録する。次に, 収録した信号から Eq(9) を用いて抑圧量を算出した。前述の実測したインパルス応答から計算した結果より, 抑圧量は水平方向よりも垂直方向の位置によって変化することがわかったので, Null Space 生成位置は Fig.2 下図の最も左側, 高さの異なる 7 箇所のみとした。

自由音場において BoSC マイクロホンの中心位置と同じ高さ, 距離 150 cm の点音源からピンクノイズを出力した場合を想定して原音場における BoSC マイクロホン出力信号を計算し, さらに逆システムを畳み込むことによりスピーカへの入力信号を求めた。測定を行う前には音響樽内の BoSC マイクロホンの中央位置に騒音計を設置し, どの逆システムを用いた場合でも同一区間での平均音圧レベルが 80dB になるように音圧を調整した。

4.2 実音源を用いた場合の抑圧量

Fig.2 左図の 4 番目のマイクロホン位置に Null Space を生成したときと, しないときの音圧レベルを Fig. 4 に示す。全帯域で抑圧できているが中心周波数 8kHz 以上では抑圧量が小さいことがわかる。実用上での抑圧性能を検証するために原音場としてあるコンサートホールで収録したオーケストラ演奏を用いて実測を行った。上記と同じマイクロホン位置に Null Space を生成したときと, しないときの音圧レベルを Fig.5 に示す。各周波数帯域における抑圧量はピンクノイズとほぼ同じであるが, オーケストラは 4 kHz 以上での音圧レベルが小さくなるため, 全帯域 (O.A.) の抑圧量は大きいことがわかる。

またマイクロホン位置毎の抑圧量（全帯域）を Fig.(6) に示す。点線はピンクノイズ、実線はオーケストラの場合の抑圧量である。ピンクノイズの場合は抑圧量は約 13 dB 前後であるが、オーケストラの場合は約 20 dB 以上の抑圧量が得られている。またピンクノイズの場合は 4 番目のマイクロホン位置において抑圧量が最も高いが、オーケストラの場合は 5, 6, 7 番目のマイクロホン位置において抑圧量が高い。これは原音場における信号に含まれる高周波数成分の大きさが影響しているものと考えられる。

5 まとめ

音場共有システムにおけるフィードバック形成プロセスに着目し、逆システム設計によってフィードバックを抑制する手法を検討した。実測したインパルス応答から抑圧量を算出した結果、約 20dB 抑圧できること、Null Space が一つであれば音場再現精度に影響を及ぼさないことがわかった。実測では高域を多く含まないオーケストラ演奏を音源とした場合には約 20 dB の抑圧量が得られたことから、実用可能性があることを確認した。

参考文献

- [1] 伊勢, 音講論 (秋), 3-5-13, 2011.
- [2] Eberhard Hansler, Gerhard Schmidt, "Topic in Acoustic Echo and Noise Control", Springer, 2006.
- [3] 杉山, 信学誌, 81(3), 266-274, 1998.
- [4] 三野 他, 信学技報, EA, 101(479), 67-74, 2001.
- [5] 神沼 他, 音学誌, 57(3), 175-183, 2001.
- [6] 開原 他, 信学技報, 105(556), 7-12, 2006.

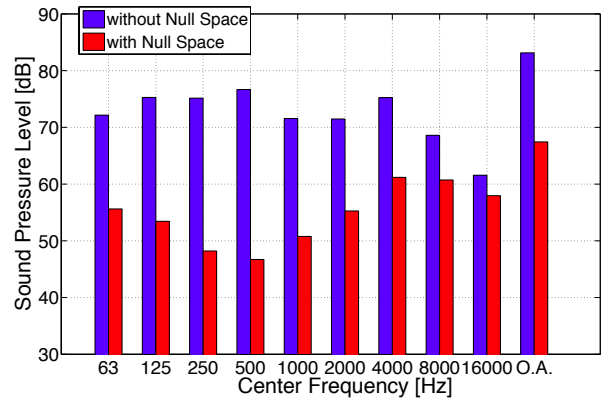


Fig. 4 Octave analysis of the observed signal at microphone index 4 when using pink noise as the primary signal.

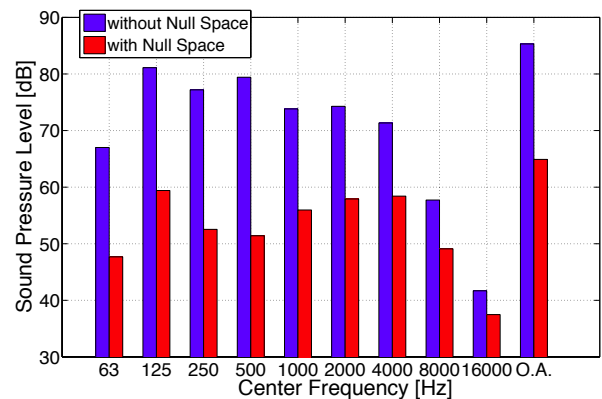


Fig. 5 Octave analysis of the observed signal at microphone index 4 when using the orchestra as the primary signal.

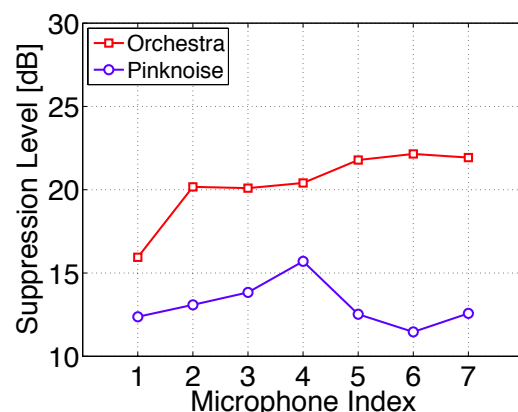


Fig. 6 Suppression level by actual measurement.