

# 大空間を一元的に制御する次世代型超臨場感音響再生システムに関する研究

広 林 茂 樹 富山大学大学院理工学研究部(工学)教授

## あらまし

一般的な音場創生システム(SoundField Generation System)は、再生時に再生音場の残響の影響が加わるため、音場創生システムの効果が低下する。そのため、再生前に再生音場の残響の影響を軽減することが求められる。本論文は、筆者等によって提案されているパワーエンベロープ逆フィルタ処理を音場創生システムの前処理に用いることによって、再生音場の影響を軽減するシステムを提案した。本システムは、波面合成など他の手法に比べ、1 kHz 以上の高周波数の改善効果や、1 つの制御点で広い空間が制御できる可能性がある。そこで、実験では、一元的処理効果を検証するため、音響ホールで周波数の改善効果や、制御領域について客観評価を行った。

## 1 はじめに

音響ホールの設計には事前にその音響効果を入念な検証が行われる。しかし、既存ホールの音響効果を改善するには、物理的にホールの形状や部材の改修を伴う建築的な補正を行わなければならないが、これらの工事を行うには多額の費用がかかるため容易に行えない[1]。また、最近の大画面テレビの普及によって、一般家庭なリビングルームでも、それに伴う多チャンネルのスピーカシステムの導入など、より臨場感を求められるようになってきた。そこで、電気音響的な制御により、ホールの機能拡大や音場改善をする技術を開発し、再生音場の影響を軽減するシステム原音に忠実な再生が求められるようになってきた。

これら再生音場の影響を軽減する技術には、様々な手法がある。S.T. Neely と J.B. Allen 等は、単一マイクロフォンから受音された室内伝達特性の最小位相成分のみを取り除いて、回復信号を求める最小位相逆フィルタ法[2]を提唱している。音場伝達特性が最小位相特性を有する場合には効果的に残響を抑圧できる。しかし、残響時間の増加に伴い非最小位相成分も一般的に増加するため伝達系に与える影響が大きくなる。すなわち、非最小位相成分の最小位相化による位相歪の増加によって回復精度が低下するため、長い残響時間を有する室内環境で残響の影響を軽減することは難しい。

一方、音場を制御する方法として、三好等によって、複数のマイクロフォンを用いた音場逆フィルタ理論(MINT 法)[3][4]が提唱されている。また、MINT 法を応用した逆フィルタ処理では、Semi-Blind MINT 法[5]が提案されている。音源の数に対しマイクロフォンを 1 つ以上多く配置することによって、非最小位相成分の影響を強く受けた伝達特性でも、音源信号を正確に復元できる。しかし、音源から各々のマイクロフォンに至る伝達特性の零点が重複する場合や接近する場合は解が発散する。また、タップ長の増加に伴い、解を求めるための逆行列演算に膨大な時間を要し、継承的な演算の増加に伴い計算誤差が大きくなる。神沼等は最小ノルム解に基づく逆フィルタ理論[6]を提案しているが、残響時間の増加に対しては対策が講じられていない。伊勢はキルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式を用いて残響を抑圧するのではなく、音場を制御することで音源の再現を試みている[7]が、複数のマイクロフォンと複数のスピーカが必要であり、高周波域ではその再現性が低い。また、及川等も波面合成法による音場制御と音場再現を試みている[8]が、これも複数のスピーカが必要であり、1kHz 未満では高い改善効果を得るの難しい。このように、広い制御領域を得るためには、高周波数域での制御が難しく、多チャンネルを前提としたシステムであり、制御範囲も点制御が基本であるなど、人の移動などの環境変動要因に対しては、その都度適応的な対応が必要とされる。

そこで、本論文では、ブラインド残響抑圧処理の目的で開発したパワーエンベロープ処理を、再生音場の影響を軽減させる音響再生システムに応用することに着目した。特に、著者等によって提案されているパワーエンベロープ逆フィルタ処理は、高周波数域での改善効果が見込めること[9]や、信号の包絡線に着目した処理のため、観測場所による違いも少ない可能性もある[10]。また、エンベロープたたみ込みモデルに比べ、処理対象の帯域内のスペクトル数が少ない信号では明瞭度改善効果は劣るが、様々な楽器が混ざった音楽信号に代表されるような帯域内に多くのスペクトルを持つ混合音では高い改善効果が見込める[9]。

本論文では、著者等によって提案されているパワーエンベロープ逆フィルタ処理を再生音場の影響を軽減

する音響システムに応用し、周波数の改善効果や、制御範囲について定量的に検証する。

## 2 提案システム

### 2-1 パワーエンベロープ畳み込み処理

著者等によって提案されているパワーエンベロープ逆フィルタ処理はパワーエンベロープたたみ込みモデルを変調雑音を用いてモデル化している。また、フィルタバンクによって狭域化された信号のパワーエンベロープ逆フィルタ処理は、高周波数域での制御も信号の逆フィルタ処理に比べ容易である。最近では、このパワーエンベロープ処理の利点に着目した改善、応用研究も盛んに行われている[11][12][13][14][15]。

再生音場において観測される信号は、観測信号  $y(t)$  は次式の通り、音源信号  $x(t)$  と室内インパルス応答  $h(t)$  のたたみ込み演算によって表される。パワーエンベロープたたみ込みモデルでは、音源信号と室内インパルス応答をそれぞれ変調雑音信号でモデル化している[16]。ここで、各変調雑音信号の変調前の雑音信号が互いに無相関であると仮定すると、観測信号  $y(t)$  のパワーエンベロープは (2乗集合平均) は、観測信号  $y(t)$  のパワーエンベロープは音源信号  $x(t)$  と室内インパルス応答  $h(t)$  のそれぞれのパワーエンベロープのたたみ込みで記述できる[16]。

$h(t)$  は、一般に最小位相ではないが、 $h(t)$  のパワーエンベロープはほぼ単調な指数関数のように減衰し、最小位相特性に近い。従って、音源信号のパワーエンベロープ特性  $\hat{P}_x(\omega)$  は、

$$\hat{P}_x(\omega) \approx P_y(\omega) P_{h \min}^{-1}(\omega) \quad (1)$$

のように観測信号  $y(t)$  のパワーエンベロープの周波数特性  $P_y(\omega)$  と室内インパルス応答  $h(t)$  のパワーエンベロープの周波数特性  $P_h(\omega)$  の最小位相逆特性  $P_{h \min}^{-1}(\omega)$  の積で近似できる。著者らがパワーエンベロープ処理を提案した当初は、この室内インパルス応答  $h(t)$  のパワーエンベロープがほぼ指数関数減衰するため、指数関数で近似し、ブラインド音源回復を行って、音源波形の概略を推定していた。しかし、このパワーエンベロープを室内インパルス応答から正確に抽出すれば、再生音場の影響をより軽減し、より正確な音源信号を再生することができる可能性がある。

### 2-2 前処理への応用

目的音場の室内伝達関数  $H_{\text{imag}}(\omega)$  を測定し、音源信号  $S(\omega)$  に次式のように乗算することにより、目的音場を再現した信号  $X(\omega)$  (目的信号) を創出することが可能である。

$$X(\omega) = S(\omega) H_{\text{imag}}(\omega) \quad (2)$$

しかし、再生音場で  $X(\omega)$  を再生すると、再生音場の室内伝達関数  $H_{\text{real}}(\omega)$  の影響も加わり、目的音場の残響感が再生音場の観測点において正しく再現されない。すなわち、再生音場のリスナには次式の信号  $Y(\omega)$  が受聴される。

$$\begin{aligned} Y(\omega) &= X(\omega) H_{\text{real}}(\omega) \\ &= S(\omega) H_{\text{imag}}(\omega) H_{\text{real}}(\omega) \end{aligned} \quad (3)$$

このように、音源信号に目的音場と再生音場の2つの伝達関数が2重に重畳された観測信号となる。ここで、 $X(\omega)$  と  $Y(\omega)$  を一致させるためには、事前に  $X(\omega)$  から再生音場の室内伝達関数の影響を軽減する必要がある。

図1に提案システムの概要を示す。音場創生システムを用いて音源信号に対して目的音場の残響を付加した信号  $X(\omega)$  に対し、あらかじめ再生音場の室内伝達関数  $H_{\text{real}}(\omega)$  の影響を軽減するシステムを構成することにより、次式に示す補正信号  $\hat{X}(\omega)$  を得ることができる。ただし、再生音場のリスナは、 $\hat{X}(\omega)$  に再生音場の室内伝達関数  $H_{\text{real}}(\omega)$  が加わるため、目的音場の音を聞くことができると推測できる。

$$\hat{X}(\omega) = X(\omega) / H_{\text{real}}(\omega) \quad (4)$$

以上のように、目的信号から事前に再生音場の影響を軽減して出力することで、リスナは目的音場の響きを仮想的に聞くことができることはよく知られている。荒井らは、式(4)に示されるような再生音場の影響をあらかじめ軽減する方法として、残響によって影響を受けやすい母音などを事前に抑圧し、子音等で重要な部分をマスクしないように制御することを提案している[17]。これは、ほぼエンベロープの逆フィルタリン

グを前処理に応用することと等しい。しかし、基本的にエンベロープを用いた逆フィルタ処理では、帯域毎に多数のスペクトルが存在する信号に対してモデル式との誤差が生じる[9]。

本論文では、図1に示すように、式(4)を前述したパワーエンベロープ逆フィルタ処理の式(1)を用いて実現した。パワーエンベロープ逆フィルタ処理は多数のスペクトルを有する信号に対して高い改善効果があるため、様々な楽器や歌声が混ざった音楽信号にも有効である[9]。また、エンベロープ逆フィルタ処理やパワーエンベロープ逆フィルタ処理は、信号の微細構造信号を用いていないため、観測点の変化による影響も少ないなどの利点も考えられる。

計算手順は、目的信号 $X(\omega)$ をエンベロープとキャリア(微細構造信号)にわけ、目的信号 $X(\omega)$ のパワーエンベロープに対し、再生音場の室内伝達関数 $H_{real}(\omega)$ のパワーエンベロープを用いて逆フィルタ処理を行い、目的信号のキャリアと合成した。なお、目的信号と再生音場の室内伝達関数のエンベロープの抽出には、それぞれの信号のヒルベルト変換後の絶対値信号をとり、さらに低域通過フィルタ(cut-off frequency を $f_c$ とする)を通して求める。

### 3 評価実験

本論文は、パワーエンベロープ逆フィルタ処理を用いて再生音場の残響の影響を軽減することにより、室内において広い制御領域を持つ音場制御システムを提案するものである。すなわち、包絡線処理に基づいて室内の残響の影響を軽減することにより、従来の制御方法に比べ少ない制御点で、より広い制御領域を得ることができる可能性がある。本論文では、まず、包絡線処理を用いて逆フィルタ処理を行うことで、室内の広い空間を制御できることを明らかにするため、多数の室内インパルス応答を測定(多数のリスナを想定)し、その中から一つの室内インパルス応答を用いて包絡線処理を行った。まず、残響を軽減する代表的な手法である最小位相逆フィルタ処理と比較して、提案システムが室内において広い制御領域を持つことを明らかにした。また、提案システムは目的音場で観測される信号を再生音場で観測できるようにするものであるため、目的音場と再生音場の室内インパルス応答の残響時間に影響される可能性がある。そこで、提案システムの制御領域を検証した後に、目的音場と再生音場の残響の違いによる提案システムへの影響を検証した。

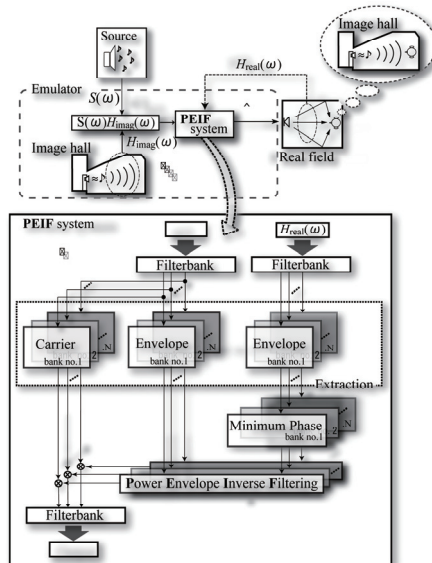


図1 提案システムの構成

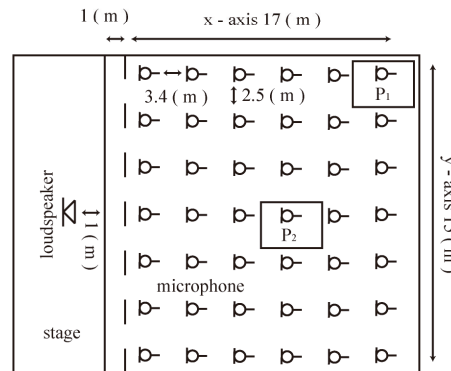
#### 3-1 室内インパルス応答の相関係数による評価

室内インパルス応答は観測点によって伝達特性が異なるが、室内インパルス応答の包絡線は、ほぼ同様の形状をしているため、包絡線処理に基づいた残響抑圧処理は室内の広い範囲を制御できる可能性がある。そこで、室内インパルス応答の包絡線の形状を比較するため、図2に示す富山大学敷地内にある黒田講堂内部で、図2(b)の図面に従ってマイクロフォンとスピーカを配置し、サンプリング周波数 44.1 kHz の swept-sine 信号[18]を用いて室内インパルス応答を測定した。本論文では、フィルタバンクを用いて評価を行うため、測定した室内インパルス応答のサンプリング周波数を 32 kHz にした。なお、それぞれの環境で測定した室内インパルス応答の数は図2(b)の黒田講堂で合計 42 箇所である。実験では、それぞれの環境で測定した室内インパル

ス応答をフィルタバンクを用いて帯域分割し、それぞれの帯域で得られた時間波形、エンベロープ、パワーエンベロープの相互相関係数をコンピュータシミュレーションによって計算した。実験に用いたフィルタバンクは、帯域幅を 500 Hz(32 分割)とし[18]、エンベロープの算出に関しては、ローパスフィルタの $f_c$ を 10 Hz とした。本論文では、エンベロープの2乗前にローパスフィルタを施しているため、これを2乗したパワーエンベロープでは、倍角定理より $f_c$ が 20 Hz に拡張される。これはパワーエンベロープ逆フィルタ処理の帯域幅を検証した鶴木等の実験結果と一致するものである[19]。



(a) Kuroda hall



(b) record point

図 2：黒田講堂における室内インパルス応答の測定場所(a)黒田講堂の内部(b)測定場所

### 3-2 黒田講堂におけるパワーエンベロープ逆フィルタ処理による制御領域の評価

室内インパルス応答は観測点によって伝達特性が異なるが、室内インパルス応答のエンベロープやパワーエンベロープは、ほぼ同様の形状をしている。すなわち、包絡線処理に基づいた残響抑圧処理は室内の広い範囲を制御できる可能性がある。そこで図 2 の黒田講堂において測定した室内インパルス応答を用いて、最小位相逆フィルタ処理、エンベロープ逆フィルタ処理、パワーエンベロープ逆フィルタ処理の同じ室内における制御領域の評価を行った。なお、計算機シミュレーションでは、フィルタバンクの帯域幅を 500 Hz(32 分割)とし、エンベロープ抽出時のローパスフィルタの $f_c$ を 10 Hz とした。実験では、帯域における改善効果を調べるため、変調周波数 10Hz を用いて変調した変調雑音信号を音源とし[16]、測定した各室内インパルス応答から一つを逆フィルタ処理に用いて音源信号から再生音場の影響を軽減した。その後、各観測点の室内インパルス応答を用いてたたみ込み処理を行うことで、各観測点毎の観測信号を作成した。各逆フィルタ処理の回復指標は、一般的に残響音声における了解性とその包絡線変化には高い相関性がある[20]ことを利用して、回復指標値(Improvement Index:  $I_p$ )として、次式の指標を用いた[16] [21] [22]。

$$I_p = -10 \log_{10} \frac{\int_0^T \{e_x(t) - \hat{e}_x(t)\}^2 dt}{\int_0^T \{e_x(t)\}^2 dt} \text{ (dB)} \quad (5)$$

式(5)の $e_x(t)$ は音源信号のエンベロープを示しており $\hat{e}_x(t)$ は回復信号のエンベロープを示している。また、 $T$ は分析時間である。分析時間は、信号の前半部分と後半部分には十分な残響が加わっていないため、平衡状

態である3秒から6秒の部分を取り出してシステムの改善値を求めた。本論文では、目的信号から再生音場の影響を取り除く方法として、パワーエンベロープ逆フィルタ処理のほかに、最小位相逆フィルタ法とエンベロープ逆フィルタ法についても、提案システムと同様に評価しているため、式(5)の $\hat{e}_x(t)$ は3種類存在し、それぞれのシステムによって得られた処理信号の $I_p$ を全て改善値と表記している。

図3から図8に、黒田講堂における各逆フィルタ処理による各観測点の帯域毎の改善値を示す。図3から図8は、図2(b)の $P_1$ で測定された室内インパルス応答を用いて逆フィルタ処理を行っており、図中では対応する測定場所を黒色のバーで示している。また、図3から図8には、低域から広域までを0-500 Hz, 501-1000 Hz, 1001-2000 Hz, 2001-4000 Hz, 4001-8000 Hz, 8001-16000 Hzに分割して、各逆フィルタ処理の改善値を示している。また、(a)に最小位相逆フィルタ処理、(b)にエンベロープ逆フィルタ処理、(c)にパワーエンベロープ逆フィルタ処理による改善値を示している。なお、図3から図8のx軸とy軸は、図2(b)の図面と対応しており、z軸は式(5)による改善値をdBで示している。図3では、逆フィルタ処理に用いた室内インパルス応答の測定場所において、(a)最小位相逆フィルタ処理は約5.8 dB、(b)エンベロープ逆フィルタ処理は約4.1 dB、(c)パワーエンベロープ逆フィルタ処理は約8.5 dBの改善値である。また、空間全体の平均値は、それぞれ、(a)最小位相逆フィルタ処理が約7.0 dB、(b)エンベロープ逆フィルタ処理が約3.0 dB、(c)パワーエンベロープ逆フィルタ処理が約6.6 dBの改善値である。図4では、逆フィルタ処理に用いた室内インパルス応答の測定場所において、(a)最小位相逆フィルタ処理は約12.0 dB、(b)エンベロープ逆フィルタ処理は約10.5 dB、(c)パワーエンベロープ逆フィルタ処理は約13.3 dBの改善値である。また、空間全体の平均値は、それぞれ、(a)最小位相逆フィルタ処理が約7.0 dB、(b)エンベロープ逆フィルタ処理が約7.9 dB、(c)パワーエンベロープ逆フィルタ処理が約10.9 dBの改善値である。図5では、逆フィルタ処理に用いた室内インパルス応答の測定場所において、(a)最小位相逆フィルタ処理は約12.5 dB、(b)エンベロープ逆フィルタ処理は約9.2 dB、(c)パワーエンベロープ逆フィルタ処理は約13.0 dBの改善値である。また、空間全体の平均値は、それぞれ、(a)最小位相逆フィルタ処理が約6.0 dB、(b)エンベロープ逆フィルタ処理が約6.8 dB、(c)パワーエンベロープ逆フィルタ処理が約9.8 dBの改善値である。図6では、逆フィルタ処理に用いた室内インパルス応答の測定場所において、(a)最小位相逆フィルタ処理は約14.3 dB、(b)エンベロープ逆フィルタ処理は約11.1 dB、(c)パワーエンベロープ逆フィルタ処理は約15.2 dBの改善値である。また、空間全体の平均値は、それぞれ、(a)最小位相逆フィルタ処理が約6.3 dB、(b)エンベロープ逆フィルタ処理が約8.9 dB、(c)パワーエンベロープ逆フィルタ処理が約11.0 dBの改善値である。図7では、逆フィルタ処理に用いた室内インパルス応答の測定場所において、(a)最小位相逆フィルタ処理は約16.2 dB、(b)エンベロープ逆フィルタ処理は約8.9 dB、(c)パワーエンベロープ逆フィルタ処理は約14.6 dBの改善値である。また、空間全体の平均値は、それぞれ、(a)最小位相逆フィルタ処理が約5.9 dB、(b)エンベロープ逆フィルタ処理が約7.9 dB、(c)パワーエンベロープ逆フィルタ処理が約11.5 dBの改善値である。図8では、逆フィルタ処理に用いた室内インパルス応答の測定場所において、(a)最小位相逆フィルタ処理は約16.0 dB、(b)エンベロープ逆フィルタ処理は約9.4 dB、(c)パワーエンベロープ逆フィルタ処理は約14.0 dBの改善値である。また、空間全体の平均値は、それぞれ、(a)最小位相逆フィルタ処理が約4.9 dB、(b)エンベロープ逆フィルタ処理が約7.8 dB、(c)パワーエンベロープ逆フィルタ処理が約10.0 dBの改善値である。図3から図8より、包絡線処理は空間全体を制御しており、特に、高周波数域において、最小位相逆フィルタ処理よりも高い精度で制御していることがわかる。

図9から図14に、図3から図8と同様に、図2(b)の $P_2$ で測定された室内インパルス応答を用いた各逆フィルタ処理の観測点毎の各帯域毎における改善値を示す。図9では、逆フィルタ処理に用いた室内インパルス応答の測定場所において、(a)最小位相逆フィルタ処理は約11.1 dB、(b)エンベロープ逆フィルタ処理は約3.5 dB、(c)パワーエンベロープ逆フィルタ処理は約8.4 dBの改善値である。また、空間全体の平均値は、それぞれ、(a)最小位相逆フィルタ処理が約6.9 dB、(b)エンベロープ逆フィルタ処理が約3.7 dB、(c)パワーエンベロープ逆フィルタ処理が約8.3 dBの改善値である。図10では、逆フィルタ処理に用いた室内インパルス応答の測定場所において、(a)最小位相逆フィルタ処理は約11.9 dB、(b)エンベロープ逆フィルタ処理は約9.9 dB、(c)パワーエンベロープ逆フィルタ処理は約13.9 dBの改善値である。また、空間全体の平均値は、それぞれ、(a)最小位相逆フィルタ処理が約6.9 dB、(b)エンベロープ逆フィルタ処理が約9.8 dB、(c)パワーエンベロープ逆フィルタ処理が約13.0 dBの改善値である。図11では、逆フィルタ処理に用いた室内インパルス応答の測定場所において、(a)最小位相逆フィルタ処理は約14.1 dB、(b)エンベロープ逆フィルタ処理は約7.8 dB、(c)パワーエンベロープ逆フィルタ処理は約13.5 dBの改善値である。また、空間全体の平均値は、それぞれ、(a)最小位相逆フィルタ処理が約5.8 dB、(b)エンベロープ逆フィルタ処理が約7.8 dB、(c)パワーエンベロープ逆フィルタ処理が約11.1 dBの改善値である。図12では、逆フィルタ処理に用いた室内インパルス応答の測定場所において、(a)最小位

相逆フィルタ処理は約 14.4 dB, (b)エンベロープ逆フィルタ処理は約 11.4 dB, (c)パワーエンベロープ逆フィルタ処理は約 14.5 dB の改善値である。また、空間全体の平均値は、それぞれ、(a)最小位相逆フィルタ処理が約 6.4 dB, (b)エンベロープ逆フィルタ処理が約 9.9 dB, (c)パワーエンベロープ逆フィルタ処理が約 12.7 dB の改善値である。図 13 では、逆フィルタ処理に用いた室内インパルス応答の測定場所において、(a)最小位相逆フィルタ処理は約 15.7 dB, (b)エンベロープ逆フィルタ処理は約 9.0 dB, (c)パワーエンベロープ逆フィルタ処理は約 14.1 dB の改善値である。また、空間全体の平均値は、それぞれ、(a)最小位相逆フィルタ処理が約 4.7 dB, (b)エンベロープ逆フィルタ処理が約 8.5 dB, (c)パワーエンベロープ逆フィルタ処理が約 12.2 dB の改善値である。図 14 では、逆フィルタ処理に用いた室内インパルス応答の測定場所において、(a)最小位相逆フィルタ処理は約 15.5 dB, (b)エンベロープ逆フィルタ処理は約 8.5 dB, (c)パワーエンベロープ逆フィルタ処理は約 12.5 dB の改善値である。また、空間全体の平均値は、それぞれ、(a)最小位相逆フィルタ処理が約 4.7 dB, (b)エンベロープ逆フィルタ処理が約 7.5 dB, (c)パワーエンベロープ逆フィルタ処理が約 9.6 dB の改善値である。図 9 から図 14 より、逆フィルタ処理に用いる室内インパルス応答の観測点を変更しても、図 3 から図 8 と同様に、パワーエンベロープ逆フィルタ処理は、空間全体で高い改善値を得ていることがわかる。

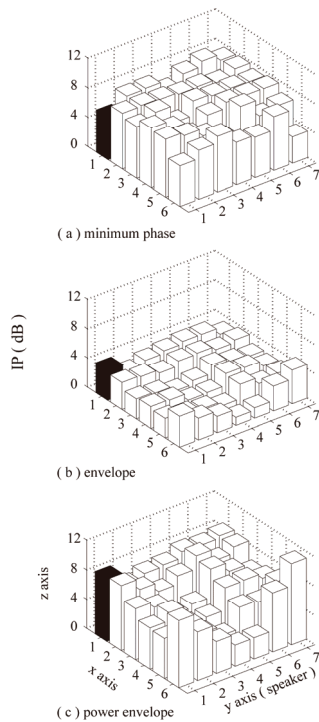


図 3：黒田講堂の測定場所  $P_1$  における各逆フィルタ処理の改善値(0 - 500 Hz)

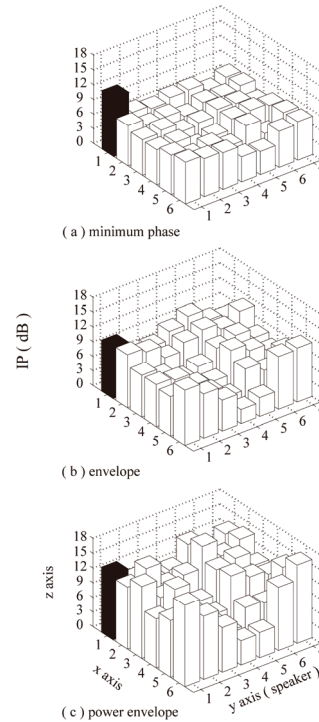


図 4：黒田講堂の測定場所  $P_1$  における各逆フィルタ処理の改善値(501 - 1000 Hz)

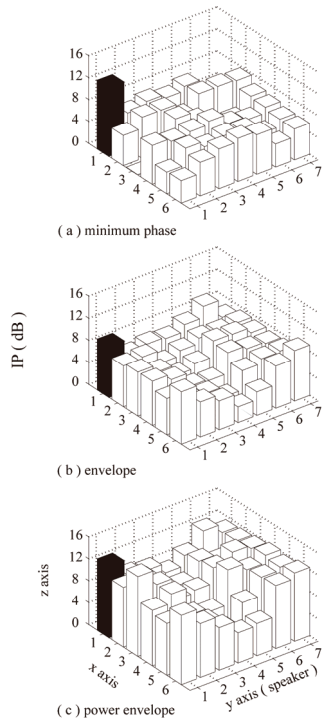


図 5 : 黒田講堂の測定場所  $P_1$  における各逆フィルタ処理の改善値(1001 - 2000 Hz)

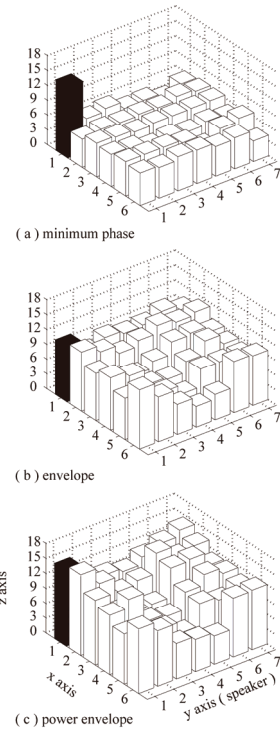


図 6 : 黒田講堂の測定場所  $P_1$  における各逆フィルタ処理の改善値(2001 - 4000 Hz)

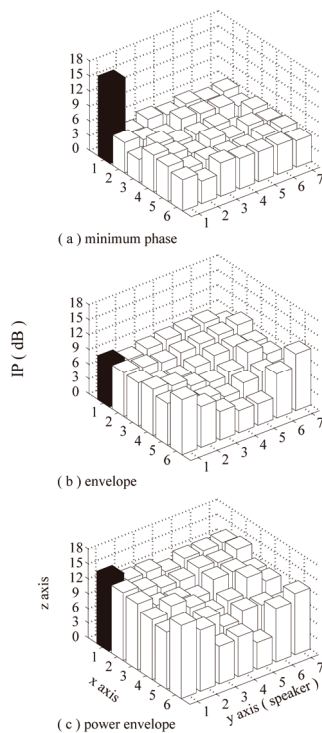


図 7 : 黒田講堂の測定場所  $P_1$  における各逆フィルタ処理の改善値(4001 - 8000 Hz)

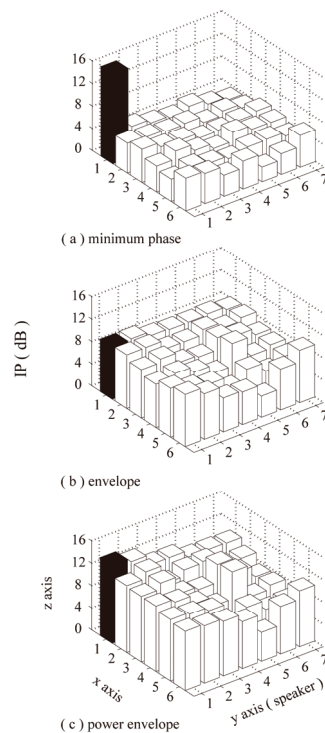


図 8 : 黒田講堂の測定場所  $P_1$  における各逆フィルタ処理の改善値(8001 - 16000 Hz)

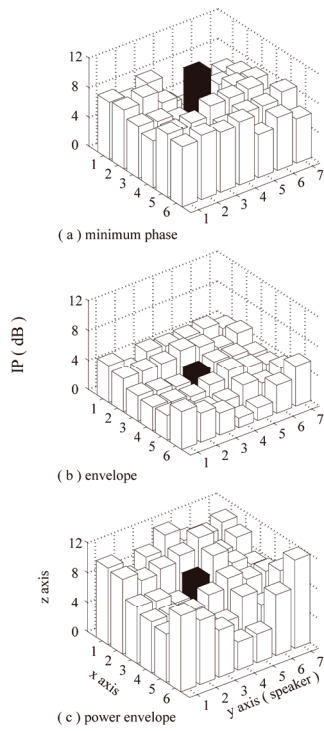


図 9 : 黒田講堂の測定場所  $P_2$  における各逆フィルタ処理の改善値(0 - 500 Hz)

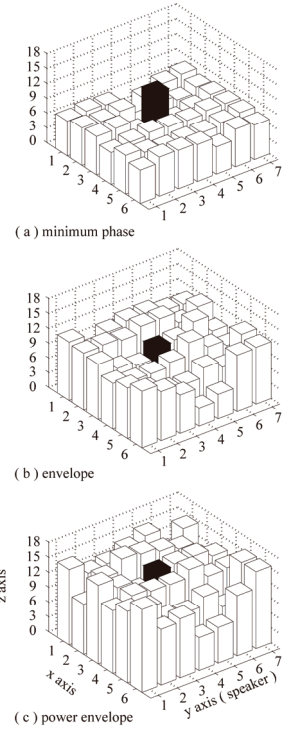


図 10 : 黒田講堂の測定場所  $P_2$  における各逆フィルタ処理の改善値(501 - 1000 Hz)

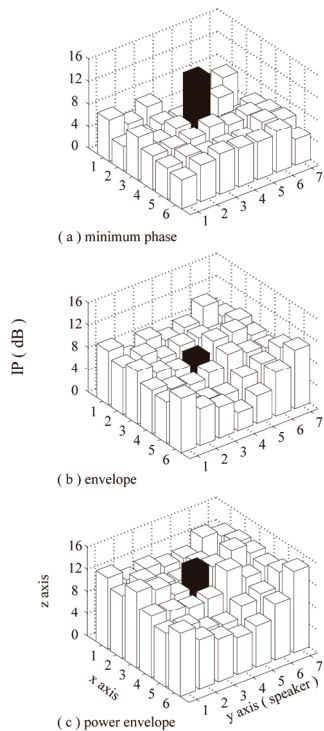


図 11 : 黒田講堂の測定場所  $P_2$  における各逆フィルタ処理の改善値(1001 - 2000 Hz)

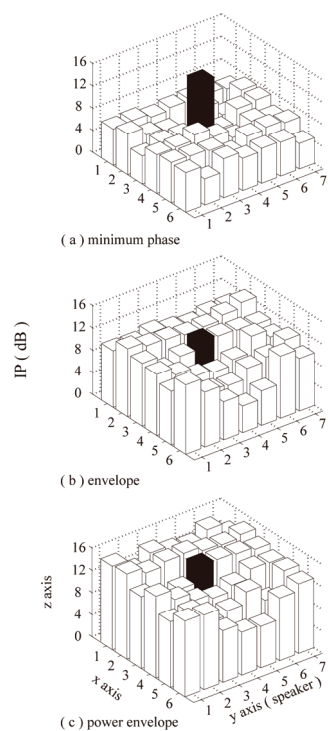


図 12 : 黒田講堂の測定場所  $P_2$  における各逆フィルタ処理の改善値(2001 - 4000 Hz)



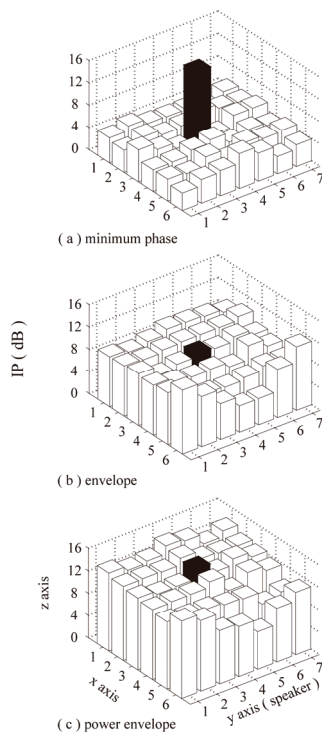


図 13 : 黒田講堂の測定場所  $P_2$  における各逆フィルタ処理の改善値(4001 - 8000 Hz)

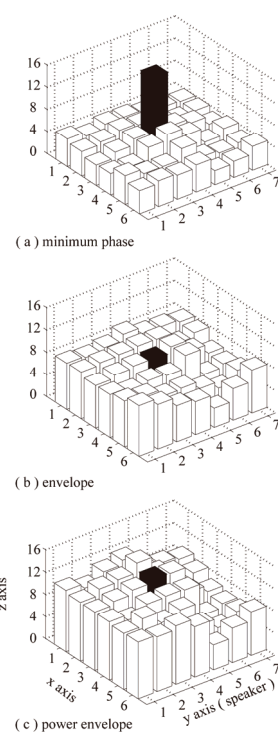


図 14 : 黒田講堂の測定場所  $P_2$  における各逆フィルタ処理の改善値(8001 - 16000 Hz)

#### 4 まとめ

本論文では、室内の残響の影響を軽減する代表的な手法である最小位相逆フィルタ処理、包絡線処理に基づくエンベロープ逆フィルタ処理、著者等によって提案されているパワーエンベロープ逆フィルタ処理を用いて、各逆フィルタ処理による空間内の制御領域を定量的に評価した。その結果、最小位相逆フィルタ処理は、逆フィルタ処理に用いる室内インパルス応答の測定場所のみが制御領域であることに對し、パワーエンベロープ逆フィルタ処理は、室内の広い空間を制御領域に持つことを明らかにした。また、本システムは、制御が容易な低周波数域だけでなく、空間内の場所による違いが大きいとされる高周波数域においても、高い精度を得ることができることを確認した。

#### 【参考文献】

- [1] 織田 慎一, “多目的音響空間における建築音響設計の一例,” 映像情報メディア学会誌, vol.57,no.7,pp.792-795,2003.
- [2] J.B. Allen, D.A. Berkley and J. Blauert, “Multimicrophone signal processing to remove room reverberation from speech signals,” J. Acoust. Soc. Am., vol.62, pp.912-915, 1977.
- [3] M. Miyoshi and Y. Kaneda, “Inverse filtering of room acoustics,” IEEE Trans. Fundamentals. ASSP, vol.36, pp.145-152, 1988.
- [4] H. Nakajima, M. Miyoshi and M. Tohyama, “Sound field control by indefinite MINT filter,” IEICE Trans. Fundam., vol.E80-A, pp.821-824, 1997.
- [5] K. Furuya, “Noise reduction and dereverberation using correlation matrix based on the multiple input/output inverse-filtering theorem (MINT),” Proc. International Workshop on Hands-free Speech Communication (HSC 2001), pp.59-62, Kyoto, Japan, April 2001.
- [6] A. Kaminuma and K. Shikano, “An inverse filter for multi-channel sound reproduction-system using least-norm-solution,” IEIC, vol.99, no.60, pp17-23, 1999.

- [7] S. Ise, "The Boundary Surface Control Principle and Its Applications," IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E88-A, No.7, pp.1656-1664, 2005.
- [8] 及川 靖弘, 馬場 貞如, 山崎 芳男, "人間の聴感を考慮した波面合成法による音場制御と音場再現," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.5, no.3, 2000.
- [9] 広林茂樹, 寺島洋行, 山淵龍夫, "残響音場における音響信号のエンベロープ推定法の評価," 日本シミュレーション学会, vol.22, no.3, pp.208-215, 2003.
- [10] 古家 賢一, 片岡 章俊, "チャンネル間相関行列と音声の白色化フィルタを用いた Semi-blind 残響抑圧," 電子情報通信学会, vol.J88-A, no.10, pp.1089-1099, 2005.
- [11] M. Yamazaki, S. Hirobayashi, H. Kimura and M. Tohyama, "Dereverberation of speech by power envelope inverse filtering and pitch emphasis processing," Proceedings of Institute of Acoustics, vol.20 part.5, pp.231-238, Windermere (Britain), 1998.
- [12] M. Unoki, K. Sakata, M. Furukawa and M. Akagi, "A speech dereverberation method based on the MTF concept in power envelope," Acoustical Science and Technology, vol.25, no.4, pp.243-254, 2004.
- [13] M. Unoki, K. Sakata, M. Furukawa and M. Akagi, "An improved method based on the MTF concept for restoring the power envelope from a reverberant signal," Acoustical Science and Technology, vol.25, no.4, pp.232-242, 2004.
- [14] M. Unoki, M. Toi and M. Akagi, "Development of the MTF-based speech dereverberation method using adaptive time-frequency division," Proc. Forum Acusticum 2005, pp.51-56, 2005.
- [15] 酒田 恵吾, 鶴木 祐史, 赤木 正人, "MTF に基づいた残響音声の回復法の検討," 信学技法, pp.13-18, 2003.
- [16] S. Hirobayashi, H.Nomura, T. Koike and M. Tohyama, "Speech waveform recovery from a speech signal using inverse filtering of the power envelope transfer function," Electronics and Communications in Japan, part 3, vol.83, no.6, pp.77-85.
- [17] T. Arai, K. Kinoshita, N. Hodoshima, A. Kusumoto and T. Kitamura, "Effects of suppressing steady-state portions of speech on intelligibility in reverberant environments," Acoustical Science and Technology. Sci. and Tech, vol.23, pp.229-232, 2002.
- [18] J. Mourjopoulos and J.K. Hammond, "Modelling and enhancement of reverberant speech using an envelope convolution method," Proc. IEEE ICASSP, pp.1144-1147, 1983.
- [19] M. Unoki, K. Sakata, M. Furukawa and M. Akagi, "A speech dereverberation method based on the MTF concept in power envelope," Acoustical Science and Technology, vol.25, no.4, pp.243-254, 2004.
- [20] R. Drullman, J.M. Festen, and R.Plomp "Effect of temporal envelope smearing on speechreception," J. Acoust. Soc Am., vol.95, pp.1053-1064, 1989.
- [21] S. Hirobayashi, H. Terashima, T. Yamabuchi and T. Yoshizawa, "Speech recovery under a reverberant conditions using power envelope inverse filtering and filter banks," Proceedings of the 6th International Conference on Engineering Design and Automation, pp.555-560, Hawai (USA).
- [22] H. Terashima, S. Hirobayashi, T. Yamabuchi and T. Yoshizawa, "Blind dereverberation of sub-band complex signal using power envelope inverse filtering," Proceedings of the Fourth Asia-Pacific Conference on, Industrial Engineering and Management Systems, pp.696-699, Taipei (Taiwan).

### 〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
A Simulation of an acoustic system using a power envelope inverse filtering,	Proceedings of The 33rd International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), pp.325-328	2008 年 4 月
パワーエンベロープ逆フィルタ処理の制御範囲の評価	平成 20 年度電気学会全国大会講演論文集, G-9,	2008 年 9 月