

トランスオーラル再生のための 2入力2出力系の逆システム同定

Inverse System Identification of Two Input Two Output Systems for Transaural Reproduction

○高杉 修平（岩手大・院），西山 清（岩手大），佐藤克昌(ARI)

○Syuhei Takasugi, Kiyoshi Nishiyama, Katsuaki Satoh

岩手大学, Iwate University, (株)ARI, Amenity Research Institute

キーワード： 逆システム (inverse system), トランスオーラルシステム (transaural system), システム同定 (system identification),

連絡先： 〒020-8551 盛岡市上田4-3-5 岩手大学 工学部 情報システム工学科 西山研究室
西山清, Tel.: (019)621-6475, Fax.: (019)621-6475, E-mail: nishiyama@cis.iwate-u.ac.jp

1. はじめに

立体音響に関する試みは古くからなされており、マルチチャンネルのサラウンドシステムが実用化されている。擬似的な音場を再現する技術は広く用いられているが、一方でコンサートや野外録音などの臨場感を録音、再現したいというニーズもある。それに応えることのできる技術としてバイノーラル録音¹⁾がある。バイノーラル録音はダミーヘッドの耳元に組み込まれたマイクロフォンやリアルヘッドの両耳にマイクロフォンを装着して行う録音であるが、聴取する際にはイヤフォンやヘッドフォンを用いる必要がある。このバイノーラル音源を2チャンネルのスピーカを用いて立体音響を実現するための手法としてトランスオーラル再生がある。トランスオーラル再生を実現するためには、伝達系のクロストーク成分をキャンセルするための補正フィルタとして伝達系の逆システム

を求める。トランスオーラルシステム構築において逆システムの同定精度が重要となり、その精度が聴取時に得られる臨場感に大きな影響を与えることになる。

本研究では、2入力2出力系に基づく H_∞ トランスオーラル再生を提案する。トランスオーラルシステムの構築に必要な補正フィルタを、適応フィルタを用いた逆システム同定によって求める。適応フィルタとして、高速 H_∞ フィルタ³⁾と従来法であるNLMSアルゴリズムを用いて比較することで、トランスオーラルシステムのための逆システム同定手法としての高速 H_∞ フィルタの有効性を検証する。また、2入力2出力系に基づくトランスオーラルシステムを実装し、再生シミュレーションを行うことで、高速 H_∞ フィルタを用いることによるトランスオーラルシステムの実現性について検討する。

2. バイノーラル録音とトランスオーラル再生

2.1 バイノーラル録音

実際の人間の耳にマイクを装着、または人間の頭部形状を模したダミーヘッドと呼ばれる人形の両耳部分にマイクを埋め込んで録音する手法をバイノーラル録音という。この音源をヘッドホンやイヤホンにより聴取した場合、録音時の情報がそのまま再現されるため高臨場感が得られる(図1)。

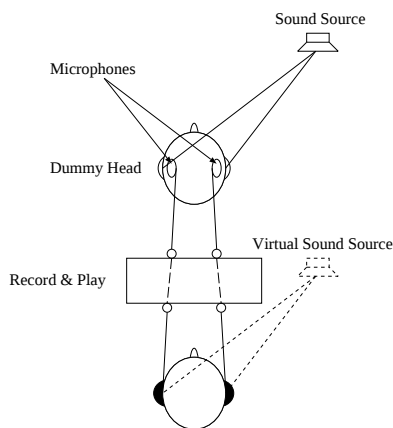


Fig. 1 バイノーラル録音・再生

2.2 トランスオーラル再生

バイノーラル音源をステレオ再生すると左右の音が混ざり合ってしまう臨場感は損なわれる。2チャンネルのステレオスピーカを用いて高臨場感再生を可能にする手法がトランスオーラル再生¹⁾である。

トランスオーラル再生を実現するためには、スピーカから耳元へ至るクロストーク成分をキャンセルするために伝達系の逆システムが必要となる⁵⁾。この逆システムが図2のトランスオーラルフィルタ G となる。

トランスオーラルシステムは次の関係式を満たす。

$$\begin{bmatrix} H_{LL} & H_{LR} \\ H_{RL} & H_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{LL} & G_{RL} \\ G_{LR} & G_{RR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

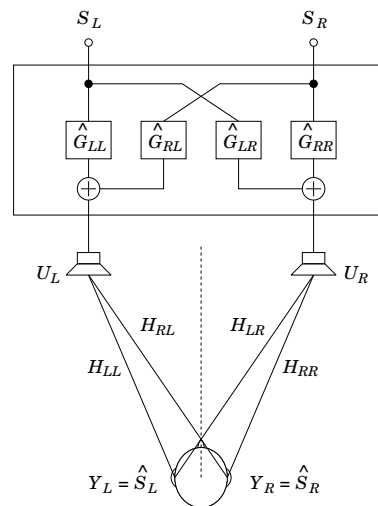


Fig. 2 トランスオーラルシステム

すなわち、

$$H_{LL}G_{LL} + H_{LR}G_{LR} = 1, H_{RL}G_{RL} + H_{RR}G_{RR} = 1 \quad (2)$$

$$H_{LL}G_{RL} + H_{LR}G_{RR} = 0, H_{RL}G_{LL} + H_{RR}G_{LR} = 0 \quad (3)$$

式(2)は音源の通過領域であり、式(3)はクロストークのキャンセルを表す。上式を満たすトランスオーラルフィルタ G を実現できれば、耳元でバイノーラル音源が再現される。つまり、ヘッドホンで聴取した場合と同様な3次元の高臨場感再生が得られる。

トランスオーラルシステムによる3次元高臨場感再生において逆システムの同定が重要となり、その精度が聴取時に得られる臨場感に大きく影響を与える。

2.3 除算法

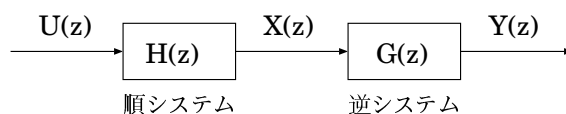


Fig. 3 順システムと逆システム

デジタル通信用等化器の設計法の一つに除算法がある。等化器は伝送路による信号の歪みを補正

するものであることから、等化器は通信路の逆システムといえる。図3をデジタル通信系とするならば、図中の順システムを伝送路、逆システムを等化器と置き換えて考えられる。除算法を利用することにより逆システムを近似的に非再帰型すなわちFIRフィルタとして求めることができる⁴⁾。ただし、除算法は対称とするシステムが既知である場合のみ逆システムを近似的に求めることができ、雑音は考慮できない。未知のシステムに対して逆システムを得るには、まず未知システムを同定し、その結果を用いて除算法を使用するというように段階を踏まなければならない。本研究のような音響分野ではインパルス応答のタップ数は長大となり、さらに発散成分を多く含むようなデータも扱うため、除算法は音響分野への応用には適さないと考えられる。

2.4 逆システムの同定

本研究では適応フィルタにより逆システムを同定する。図4に1入力1出力系の逆システム同定のブロック図を示す。適応アルゴリズム²⁾には、NLMSアルゴリズム、高速 H_∞ フィルタ³⁾などが知られている。

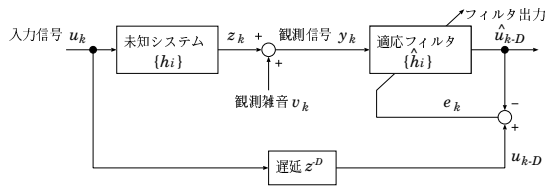


Fig. 4 逆システム同定のブロック図

ハイパー H_∞ フィルタは収束性、追従性、外乱に対するロバスト性の調整を可能としたフィルタであり優れた性能をもつが、単位時間ステップ当たりの計算量は $O(N^2)$ となる。

観測行列 $\mathbf{H}_k$ が以下のようなシフト特性をもつとき、計算量が $O(N)$ となる高速アルゴリズム(高

速 H_∞ アルゴリズム)が存在する。

$$\mathbf{H}_k = [u_k, H_{k-1}(1), \dots, H_{k-1}(N-1)] \quad (4)$$

ここで、 u_k は時間 k での未知システムへの入力信号である。

[高速 H_∞ フィルタ]

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} + \mathbf{K}_{s,k}(y_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}) \quad (5)$$

$$\mathbf{K}_{s,k} = \frac{\mathbf{K}_k(:,1)}{1 + \gamma_f^{-2} \mathbf{H}_k \mathbf{K}_k(:,1)} \in \mathcal{R}^{N \times 1} \quad (6)$$

ここで、ゲイン行列 $\mathbf{K}_k$ は次式で更新される。

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{m}_k - \mathbf{D}_k \boldsymbol{\mu}_k \in \mathcal{R}^{N \times 2} \quad (7)$$

$$\mathbf{D}_k = [\mathbf{D}_{k-1} - \mathbf{m}_k \mathbf{W} \boldsymbol{\eta}_k][1 - \boldsymbol{\mu}_k \mathbf{W} \boldsymbol{\eta}_k]^{-1}$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\eta}_k &= \mathbf{c}_{k-N} + \mathbf{C}_k \mathbf{D}_{k-1} \\ \begin{bmatrix} \mathbf{m}_k \\ \boldsymbol{\mu}_k \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{S}_k^{-1} \mathbf{e}_k^T \\ \mathbf{K}_{k-1} + \mathbf{A}_k \mathbf{S}_k^{-1} \mathbf{e}_k^T \end{bmatrix} \\ \mathbf{m}_k &\in \mathcal{R}^{N \times 2}, \boldsymbol{\mu}_k \in \mathcal{R}^{1 \times 2} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\mathbf{S}_k = \rho \mathbf{S}_{k-1} + \mathbf{e}_k^T \mathbf{W} \tilde{\mathbf{e}}_k \quad (9)$$

$$\mathbf{e}_k = \mathbf{c}_k + \mathbf{C}_{k-1} \mathbf{A}_k$$

$$\mathbf{A}_k = \mathbf{A}_{k-1} - \mathbf{K}_{k-1} \mathbf{W} \tilde{\mathbf{e}}_k \quad (10)$$

$$\tilde{\mathbf{e}}_k = \mathbf{c}_k + \mathbf{C}_{k-1} \mathbf{A}_{k-1}$$

ただし、 $\mathbf{C}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_k \\ \mathbf{H}_k \end{bmatrix}$, $\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -\gamma_f^{-2} \end{bmatrix}$ であり、 $\mathbf{c}_k \in \mathcal{R}^{2 \times 1}$ は $\mathbf{C}_k = [\mathbf{c}_k, \dots, \mathbf{c}_{k-N+1}]$ の第1列ベクトルである。

2.5 1チャンネル同定に基づくトランスオーラルシステム

4つの伝達関数 $H_{LL}, H_{LR}, H_{RL}, H_{RR}$ それぞれの逆システムを独立に同定した場合、各伝達関数に対して $\hat{H}_{LL}^{-1}, \hat{H}_{LR}^{-1}, \hat{H}_{RL}^{-1}, \hat{H}_{RR}^{-1}$ が得られる。

式(3)に着目し、次のようにトランスオーラルフィルタを構成する⁶⁾。

$$\begin{aligned} \hat{G}_{LL} &= \hat{H}_{RL}^{-1}, \hat{G}_{RL} = -\hat{H}_{LL}^{-1}, \\ \hat{G}_{LR} &= -\hat{H}_{RR}^{-1}, \hat{G}_{RR} = \hat{H}_{LR}^{-1} \end{aligned} \quad (11)$$

このときのトランスオーラルシステムは以下となる。

$$\begin{aligned} H\hat{G} &= \begin{bmatrix} H_{LL} & H_{LR} \\ H_{RL} & H_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{H}_{RL}^{-1} & -\hat{H}_{LL}^{-1} \\ -\hat{H}_{RR}^{-1} & \hat{H}_{LR}^{-1} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} H_{LL}\hat{H}_{RL}^{-1}-H_{LR}\hat{H}_{RR}^{-1} & -H_{LL}\hat{H}_{LL}^{-1}+H_{LR}\hat{H}_{LR}^{-1} \\ H_{RL}\hat{H}_{RL}^{-1}-H_{RR}\hat{H}_{RR}^{-1} & -H_{RL}\hat{H}_{LL}^{-1}+H_{RR}\hat{H}_{LR}^{-1} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} H_{LL}\hat{H}_{RL}^{-1}-H_{LR}\hat{H}_{RR}^{-1} & 0 \\ 0 & -H_{RL}\hat{H}_{LL}^{-1}+H_{RR}\hat{H}_{LR}^{-1} \end{bmatrix} \quad (12) \end{aligned}$$

伝達関数が左右対称であるとき、 $H_{LL} = H_{RR}$, $H_{RL} = H_{LR}$ であるから式(12)は

$$\begin{bmatrix} H_{RR}\hat{H}_{RL}^{-1}-H_{RL}\hat{H}_{RR}^{-1} & 0 \\ 0 & -H_{LR}\hat{H}_{LL}^{-1}+H_{LL}\hat{H}_{LR}^{-1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

となる。順システム H とその逆システム H^{-1} の和 $H + H^{-1}$ は並列システムとなり、その振幅特性はそれぞれの振幅特性の和となるためフラットになる。式(13)の(1,1)成分と(2,2)成分はこの形式となっていることから、トランスオーラルシステムとして成立する。ただし音源信号の通過領域に関して、 $H + H^{-1} = 1$ とはならないためゲインの調整が必要となる。

3. 4経路同時同定に基づくトランスオーラル再生

図5に示すように4つの経路に対して同時に逆システムを同定し、トランスオーラルフィルタを構成する⁷⁾。

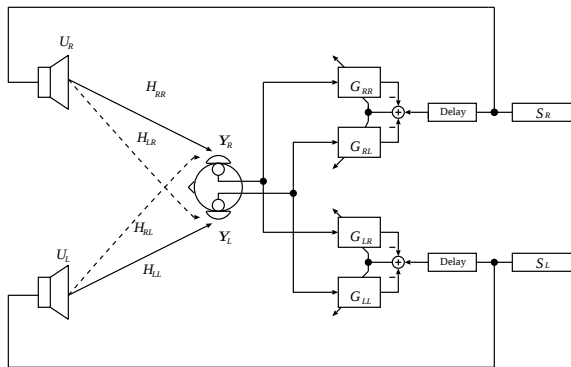


Fig. 5 4経路同時逆システム同定方式

4つの伝達関数をそれぞれ $H_{LL}, H_{LR}, H_{RL}, H_{RR}$ とし、スピーカの出力を U_L, U_R とする。このとき聴取者の両耳に届く信号 Y_L, Y_R は

$$\begin{bmatrix} Y_L \\ Y_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{LL} & H_{LR} \\ H_{RL} & H_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_L \\ U_R \end{bmatrix} \quad (14)$$

のように表すことができる。ここで観測信号 Y_L, Y_R を逆システムの入力信号(参照信号)とすると信号 U_L, U_R は

$$\begin{bmatrix} U_L \\ U_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{LL} & G_{LR} \\ G_{RL} & G_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_L \\ Y_R \end{bmatrix} \quad (15)$$

と表すことができる。ここで、

$$\begin{bmatrix} \hat{G}_{LL} & \hat{G}_{LR} \\ \hat{G}_{RL} & \hat{G}_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_L \\ Y_R \end{bmatrix} \rightarrow Z^{-D} \begin{bmatrix} U_L \\ U_R \end{bmatrix}$$

に収束することが期待できるため、信号 S_L, S_R に遅延を与えたものとの評価誤差が0となるよう適応的にフィルタを制御することで逆システムを同定することができる。このとき、

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} \hat{G}_{LL} & \hat{G}_{LR} \\ \hat{G}_{RL} & \hat{G}_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{LL} & H_{LR} \\ H_{RL} & H_{RR} \end{bmatrix} \\ &= Z^{-D} \begin{bmatrix} \hat{G}_{LL}H_{LL}+\hat{G}_{LR}H_{RL} & \hat{G}_{LL}H_{LR}+\hat{G}_{LR}H_{RR} \\ \hat{G}_{RL}H_{LL}+\hat{G}_{RR}H_{RL} & \hat{G}_{RL}H_{LR}+\hat{G}_{RR}H_{RR} \end{bmatrix} \\ &= Z^{-D} \mathbf{I} \quad (16) \end{aligned}$$

となり、クロストークをキャンセルすることができる。

4. トランスオーラル再生シミュレーション

2.3節で提案した2入力2出力系の同定に基づくトランスオーラルシステムをシミュレーションで評価を行った。図5の方式に基づき逆システムをNLMSアルゴリズムと高速 H_∞ フィルタによりそれぞれ同定する。対象とする未知の伝達系としては無響室で測定したタップ数342のインパルス応答を用いた。サンプリング周波数は16 kHzとした。

同定のための入力(参照)信号として以下の白色雑音を使用する。

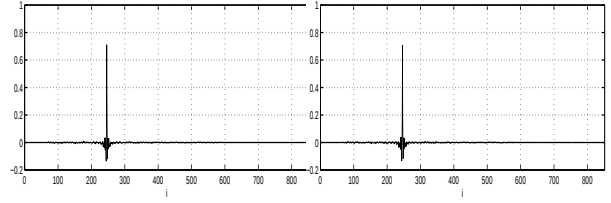
$$u_k = w_k \quad (17)$$

ここで、 w_k は平均値0,分散 $\sigma_w^2 = 0.04$ の定常なガウス白色雑音とし、異なる種を使用して2種類の無相関な白色雑音を用いて左右で異なる入力信号 $u_{L,k}, u_{R,k}$ を生成した。

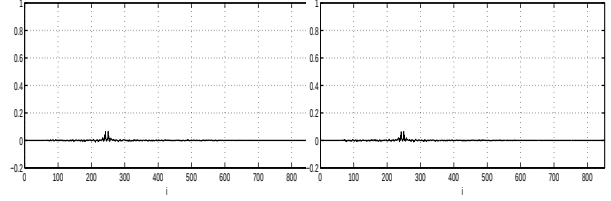
入力信号のデータ長は $L = 16000$ とし、逆システムのインパルス応答のタップ数 $N_{iv} = 512$ 、遅延時間 $D = 246$ と設定した。観測雑音は分散 $\sigma_v^2 = 1.0 \times 10^{-4}$ の白色雑音を用いた。

図6にNLMSアルゴリズムによる同定結果、図7に高速 H_∞ フィルタによる逆システムの同定結果を示す。推定した逆システムと順システムの積のインパルス応答の畳み込み $h_i * \hat{g}_i$ が合成システムのインパルス応答となる。各図(a),(b)は音源信号の通過領域、(c),(d)はキャンセル領域の合成システムを示している。通過領域ならば単位インパルスとなるような逆システムが理想的なものであり、キャンセル領域はフラットであれば良い結果であると言える。NLMSアルゴリズムを用いた結果を見ると、特に通過領域に乱れが生じているが、高速 H_∞ フィルタを用いた結果は単位インパルスと見ることが出来る。

図8および図9に各経路の振幅特性を示す。各図(a),(b)を比較すると、NLMSアルゴリズムを用いた場合の通過領域は高域が大きく落ちていたが、高速 H_∞ フィルタを用いた場合は一部にディップが見られるがおおよそフラットであることがわかる。また、各図(c),(d)から、NLMSアルゴリズムを用いた場合は平均して減衰が-20 dB程度であるが、高速 H_∞ フィルタを用いた場合は平均して減衰が-40 dB程度であることからクロストークをキャンセルできているため、同定された逆システムが良好なものであることがわかる。

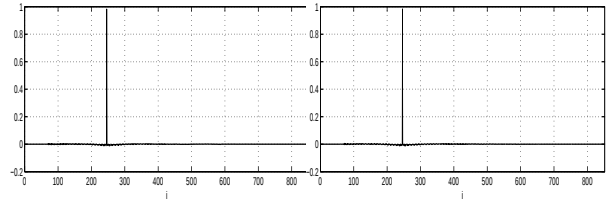


(a) $h_{LL} * \hat{g}_{LL} + h_{LR} * \hat{g}_{RL}$ (b) $h_{RL} * \hat{g}_{LR} + h_{RR} * \hat{g}_{RR}$

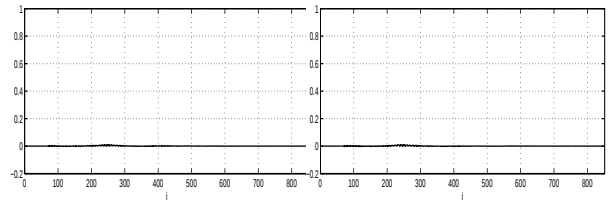


(c) $h_{LL} * \hat{g}_{LR} + h_{LR} * \hat{g}_{RR}$ (d) $h_{RL} * \hat{g}_{LL} + h_{RR} * \hat{g}_{RL}$

Fig. 6 NLMSアルゴリズム($\mu = 0.1, \delta = 0.01$)により同定した逆システムを用いたトランスオーラルシステムのインパルス応答; 同定用入力信号:白色雑音, データ長 $L = 16000$, 未知システムのインパルス応答のタップ数 $N = 342$, 逆システムのタップ数 $N_{iv} = 512$, 遅延時間 $D = 246, \sigma_v^2 = 10^{-4}$



(a) $h_{LL} * \hat{g}_{LL} + h_{LR} * \hat{g}_{RL}$ (b) $h_{RL} * \hat{g}_{LR} + h_{RR} * \hat{g}_{RR}$



(c) $h_{LL} * \hat{g}_{LR} + h_{LR} * \hat{g}_{RR}$ (d) $h_{RL} * \hat{g}_{LL} + h_{RR} * \hat{g}_{RL}$

Fig. 7 高速 H_∞ フィルタ($\gamma_f = 32, \epsilon_0 = 1.0$)により同定した逆システムを用いたトランスオーラルシステムのインパルス応答; 同定用入力信号:白色雑音, データ長 $L = 16000$, 未知システムのインパルス応答のタップ数 $N = 342$, 逆システムのタップ数 $N_{iv} = 512$, 遅延時間 $D = 246, \sigma_v^2 = 10^{-4}$

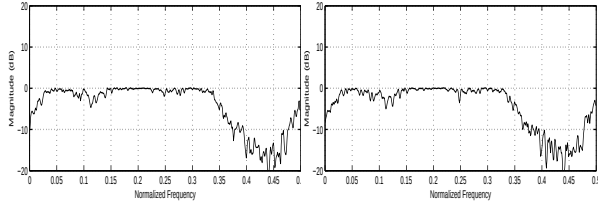
5. まとめ

本研究では、トランスオーラルシステムの構築を目的とした逆システム同定の新しい手法について述べた。この同定手法は高速 H_∞ フィルタを用いることによって優れた性能を実現できた。事実、4経路同時逆システム同定のシミュレーションの結果は、NLMSアルゴリズムと比べて、高速 H_∞ フィルタによる逆システム同定が非常に有効であることを示した。

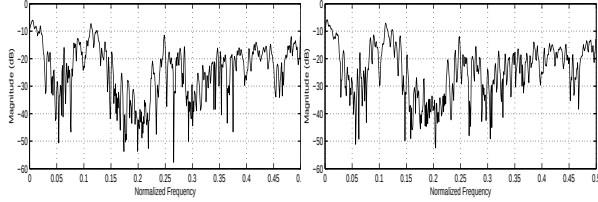
今後は、実機を用いた性能の評価を進めていきたい。

参考文献

- 1) 浜田 晴夫, “バイノーラル音場再生系について”, 日本音響学会誌48巻4号, pp. 250-257, 1992.
- 2) 西山 清, 最適フィルタリング, 培風館, 2001.
- 3) K. Nishiyama, “An Optimization and Its Fast Algorithm for Time-Variant System Identification”, IEEE Trans. SP, 52, 5, pp. 1335-1342, 2004.
- 4) 小松 洋貴, 西山 清, “除算法による逆システム同定の性能”, 計測自動制御学会東北支部 第272回研究集会, 資料番号 272-9, 2012.
- 5) 小松 洋貴, 西山 清, “トランスオーラルシステムのための逆システムの同定”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, p. 70, 2012.
- 6) 小松 洋貴, 西山 清, “3次元音場再生のための H_∞ トランスオーラルシステム”, 日本音響学会研究発表会講演論文集, 3-10-14, 2013.
- 7) 新井 清嗣, 勝俣友紀, 佐藤克昌, 西山 清, “ H_∞ 高速同定を用いた3次元高臨場感音場再生システムの開発-4経路同時同定-”, 日本音響学会研究発表会講演論文集, 3-1-1, 2013.

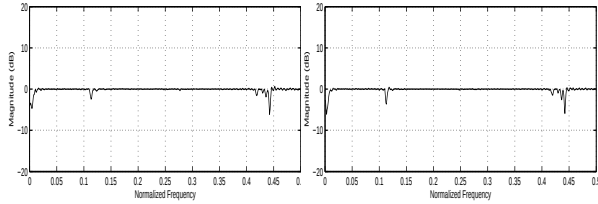


(a)図6(a)の振幅特性 (b)図6(b)の振幅特性

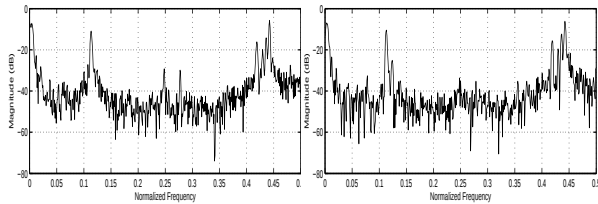


(c)図6(c)の振幅特性 (d)図6(d)の振幅特性

Fig. 8 NLMSアルゴリズム($\mu = 0.1, \delta = 0.01$)により同定した逆システムを用いたトランスオーラルシステムの各経路の振幅特性; 同定用入力信号: 白色雑音, データ長 $L = 16000$, 未知システムのインパルス応答のタップ数 $N = 342$, 逆システムのタップ数 $N_{iv} = 512$, 遅延時間 $D = 246$



(a)図7(a)の振幅特性 (b)図7(b)の振幅特性



(c)図7(c)の振幅特性 (d)図7(d)の振幅特性

Fig. 9 高速 H_∞ フィルタ($\gamma_f = 32, \epsilon_0 = 1.0$)により同定した逆システムを用いたトランスオーラルシステムの各経路の振幅特性; 同定用入力信号: 白色雑音, データ長 $L = 16000$, 未知システムのインパルス応答のタップ数 $N = 342$, 逆システムのタップ数 $N_{iv} = 512$, 遅延時間 $D = 246$