

連立方程式法を用いた車室内音場創生技術の研究

Study of In-vehicle Sound Field Creation by Simultaneous Equation Method

藤井 健作 *Kensaku FUJII*
若林 功 *Isao WAKABAYASHI*
宇治野 正 *Tadashi UJINO*
加藤 茂樹 *Shigeki KATOH*



要旨

2008年2月、富士通テン(株)はトヨタ自動車(株)の“クラウン”向けに“空間コントロール技術”を用いた「トヨタプレミアムサウンドシステム」を開発し、好評を得ている。この技術をさらに改善し、より自然な拡がり感を提供すべく、連立方程式法を用いた音場創生技術の研究を富士通テン(株)と兵庫県立大学との共同で進めている。原理検証をシミュレーションモデルを用いて実施し、聴取者の移動に応じて適切な制御が行えること、また聴取者の耳元で任意の音場が設定できることを確認した。この技術の導入により、聴取者の移動に対し堅牢になるため、1.5kHzで制限していた空間コントロールの制御帯域を拡大することができ、より自然な拡がり感実現の可能性を見出した。

Abstract

FUJITSU TEN Limited has developed "TOYOTA Premium Sound System" using "spatial control technology" for CROWN of TOYOTA Motor Corporation in February 2008, which receives high reputation. We, at FUJITSU TEN Limited, and UNIVERSITY OF HYOGO have been collaborating on research activities of sound field creation technology by a simultaneous equation method through the upgrade of the spatial control technology in order to provide sounds with more natural sense of expanse. Through verifying the principle with a simulation model, we confirmed that it provides appropriate controls depending on listener's moves and creates arbitrary sound field at the periphery of listener's ears. This new technology can provide precise controls depending on listener's moves, and this leads to expansion of the spatial control range whose upper limit used to be 1.5 kHz. We found a clue to providing sounds with more natural sense of expanse.

1

はじめに

自動車の車室内は、多くのドライバーにとって貴重なプライベート空間の一つである。また、メディアのデジタル化が進み、ホームと同等の高品位な音楽ソースを大量に持ち込めるようになった。こうした背景から、今や車室内は、音楽を楽しむためのリビングルームとして重要な役割を担っている。

ところが、車室内を音楽を聴取する空間として捉えると、一般のリビングルームと比較して、走行騒音があること、空間が狭くスピーカの設置条件が制約されること、さらにウインドガラスによる音の反射、内装材の不要振動の影響など、オーディオ再生にとって不利な条件が多い。こうした課題に対し、騒音感応自動ボリューム¹⁾、小型低音再生スピーカ²⁾、広指向性ツイータ、車室内伝送特性補正用イコライザ³⁾、音場制御装置などの開発と採用によって、車室内のような条件下でも良い音が得られるようになってきた。

2008年2月、富士通テン(株)はトヨタ自動車(株)殿の「クラウン」向けに「空間コントロール技術」を用いた「トヨタプレミアムサウンドシステム」を開発した⁴⁾。この技術は、車室内音場の精密な解析結果から、空間の狭さを感じさせる反射音や不要振動を抑制し、広い部屋をシミュレートした効果音を付加することで、リビングルームのような音場の創生を試みたものである。このシステムの音は、多くのユーザから「今までの車にはない拡がり感や臨場感がある」と好評を得ている。筆者らはこのシステムをさらに進化させるべく、より自然な「拡がり感」のある音を目指して検討を継続している。

自然な「拡がり感」を得るには、先に述べた車室内特有の制限のなかでの空間コントロール技術をブラッシュアップする必要がある。その手段として連立方程式法を使った音場創生技術⁵⁾を用いた。以下、空間コントロールにおける本音場創生技術の実用化の可能性について検討を行った結果を報告する。

2

空間コントロールと課題

2.1 サウンドコンセプト

富士通テン(株)が目指すサウンドコンセプトは「感動の音空間創造」である。すなわち、図1のような狭い車室内空間を感じさせない拡がり感のある音作りをめざしている。目標とする広さは家庭で音楽を楽しむのに適した20畳前後のリビングルームである。

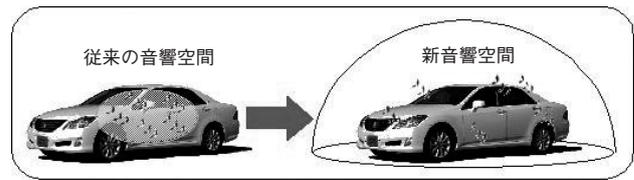


図1 目標イメージ

Fig.1 Image of Targeted Acoustic Space

2.2 空間コントロール技術と効果

空間コントロールは、車室内での制約事項を以下の課題として具体的にとらえ、それら対策を実施することで仮想的にリビングルームとして車室内空間を実現している。

課題①：スピーカ取り付け部周辺からの不要振動

解決策①：不要振動抑制技術

不要振動を抑えるために、ホームオーディオ用スピーカのタイムドメイン⁶⁾システム開発で培った車載スピーカの制振技術を用いた⁶⁾。

課題②：ガラスなどからの、遅延時間が短く強い反射音

解決策②：不要反射音抑制技術

強い反射音を抑制するために、聴取者の耳元にスピーカを設置し、そこから逆位相の音を再生して不要な反射音を消す方法を開発した。

課題③：天井、シートなどに吸収され反射音の到来方向が限定

解決策③：空間情報付加技術

リビングルームで発生する反射音をできるだけ忠実に再現するため、空間情報として専用のスピーカを用い、デジタル信号処理によりシミュレートした反射音を再生。

次に図2~4に空間コントロール技術の効果を示す。図2は目標とするリビングルームのインパルス応答⁷⁾、指向性拡散図⁸⁾である。図3、4に空間コントロール処理OFF / ONの車室内におけるインパルス応答と指向性拡散図を示す。

処理ONはOFFよりもインパルス応答では空間情報（反射音）が付加され、指向性拡散図ではさまざまな方向から反射音が観測されており、目標のリビングルームの特性に近づいているのがわかる。

* (1) 音の時間軸特性を重視し、入力波形をできる限り忠実に再生する技術。

* (2) インパルスと呼ばれる時間的幅が無限小で高さが無限大の非常に短い信号を入力したときのシステムの出力。

* (3) 反射音の到来方向とそのレベルをベクトル表示した図。

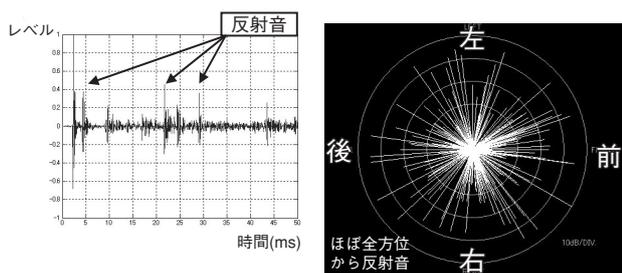


図2 リビングルームのインパルス応答(左)と反射音の指向性拡散図(右) [目標]

Fig.2 Impulse Response (Left) and Directional Diffusion Diagram of Reflected Sounds (Right) in [Ideal] Living Room

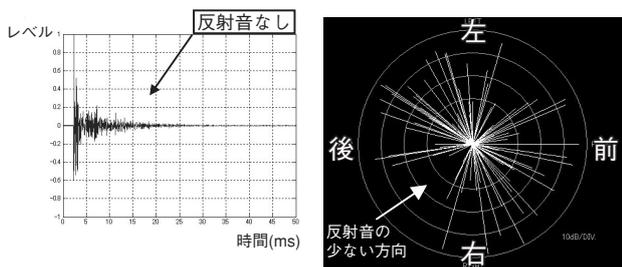


図3 車室内のインパルス応答(左)と反射音の指向性拡散図(右) [空間コントロールOFF]

Fig.3 Impulse Response (Left) and Directional Diffusion Diagram of Reflected Sounds (Right) in Vehicle Cabin [with Spatial Control off]

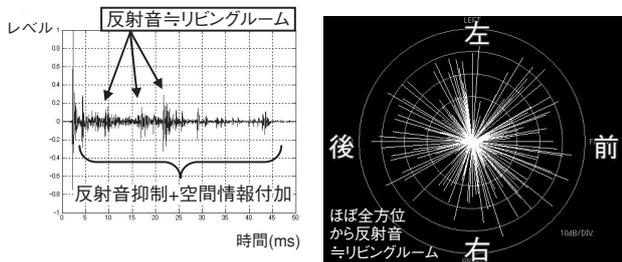


図4 車室内のインパルス応答(左)と反射音の指向性拡散図(右) [空間コントロールON]

Fig.4 Impulse Response (Left) and Directional Diffusion Diagram of Reflected Sounds (Right) in Vehicle Cabin [with Spatial Control on]

このように空間コントロール技術は、スピーカの制御や信号処理などの技術を組み合わせ、拡がり感を提供している。

そのなかで、不要反射音の抑制や空間情報の付加は主に信号処理技術によって実現されており、効果に大きく影響を及ぼす。筆者らは、より自然な拡がり感を提供すべく、これらの信号処理技術に着目し検討を進めることにした。

2.3 残存課題

今までの不要反射音抑制技術では制御フィルタの帯域を1.5kHz以下に制限している。よって、1.5kHz以上に制御帯域を拡大すれば、より広帯域にわたり不要反射音が抑制され、より自然な拡がり感を提供できる。

しかし、図5(従来法)のように制御帯域を拡大すると、周波数の高い(=波長の短い)音は、聴取位置のずれに対

しキャンセル効果を十分に発揮できない場合が存在する。そこで、制御帯域の拡大と、聴取者位置変動による制御効果低下回避の両立を課題として、取り組んできた。

目指す状態は図5(音場創生技術)のように、制御帯域を拡大しても聴取者の移動に対して制御効果の低下を回避し、聴取者耳元の特性をリビングルームなどの音場に保つ状態である。

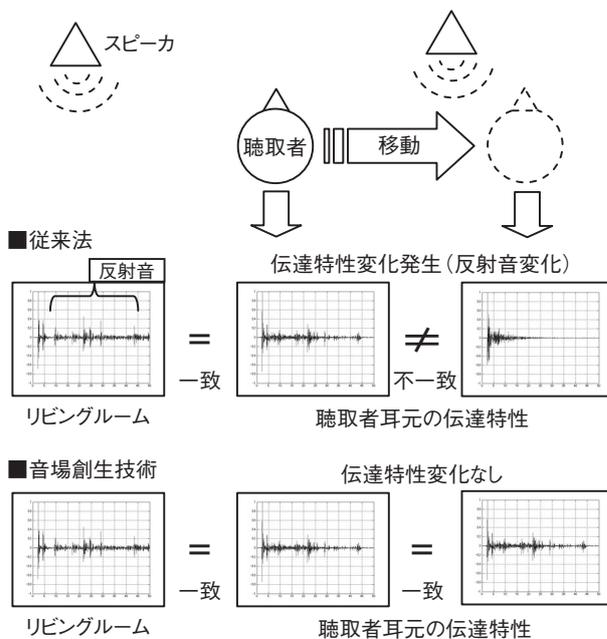


図5 制御効果イメージ
Fig.5 Control Effect Image

3

音場創生技術の紹介

課題への対策として、聴取者の移動に対し不要反射音の制御を追従させる適応制御技術を選択した。適応制御技術の一つに、特に移動への対応に適した連立方程式法がある。この方法を用いれば、聴取者の移動を随時検知し不要反射音の制御をその移動に適した状態にすることが可能である。

さらに聴取者耳元の伝達特性を任意の特性に設定することができ、空間情報付加制御も可能である。

本章では音場創生技術の概要について述べたのち、原理を紹介する。

3.1 音場創生技術の概要

図6に従来法と音場創生技術の制御フローを示す。従来法では制御フィルタの係数が最初に設定され、以後変更はされないで、聴取者の移動に追従できない。音場創生技術ではまず、聴取者耳元での伝達特性とリビングルームなどの理想とする特性(以下、目標音場)との差分を随時取得する。次にその差分を元に聴取者耳元で目標音場を再現するように制御フィルタを更新する。次第に差分がなくな

れば、制御フィルタの更新が行われなくなり、聴取者耳元の特性が目標音場と一致する。

差分を随時取得しているため、聴取者の移動の検知ができ、その差分を元に車室内の伝達特性を調整し、保つことができる。このようにして音場を作り上げるため、本技術を音場創生技術と称している。

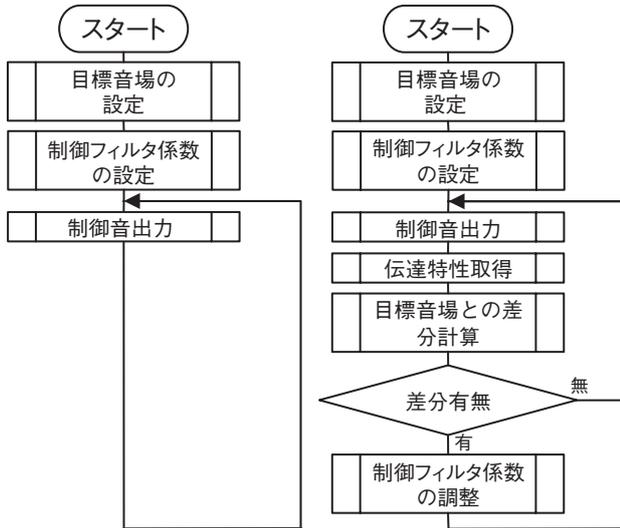


図6 制御フロー概略図 (左図：従来法、右図：音場創生技術)
Fig.6 Overview Control Flowchart
(Left: Traditional Method, Right: Sound Field Creation Technology)

3.2 原理

3.2.1 構成

音場創生技術のシステム構成を図7に示す。スピーカから出力され、音響空間を通過した音響信号を聴取者近傍のマイクで取得する。次に演算装置部で取得した信号を解析し、聴取者近傍を目標音場にすべく制御フィルタを計算する。

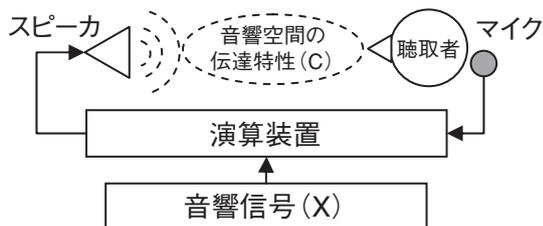


図7 システム構成
Fig.7 System Configuration

演算装置内の処理について説明をする。

まず、連立方程式法を用いない一般的な適応制御技術を図8に示し、その問題点について説明する。

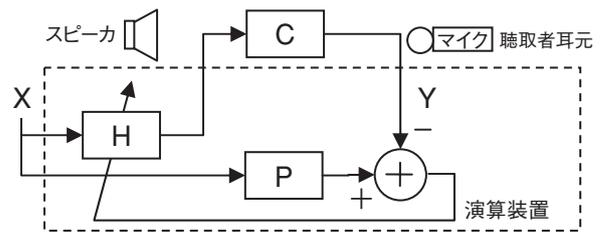


図8 演算装置内ブロック図 (一般的な適応制御技術)
Fig.8 Block Diagram of Arithmetic Processor
(General Adaptive Control Technology)

P はシステムが目標とする目標音場フィルタでリビングルームの特性など任意の特性を設定することができる。

C は聴取者とスピーカ間の音響空間の伝達特性であり、聴取者の移動などによって変動するため、未知の値である。

H は聴取者の耳元で目標音場 (P) を再現するように、目標音場 (P) の出力と聴取者耳元の信号 (Y) との差分を元に調整される制御フィルタである。

聴取者の移動などで、音響空間伝達特性 (C) の残響時間が変動する場合、制御フィルタ (H) のメモリ長を十分に長い残響時間に対応するように設定しておくことで、聴取者の移動に対し制御を追従させることが可能である。

しかし、音響空間伝達特性 (C) が想定以上に変動した場合、制御フィルタ (H) のメモリ長に過不足が生じる。

メモリ長が過剰な場合は余分な計算時間が生じてしまい、不足している場合は制御が困難になってしまう。

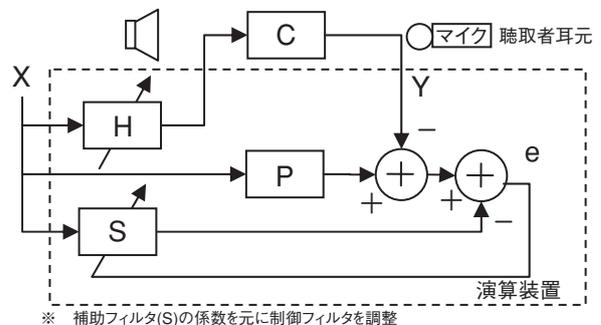


図9 演算装置内ブロック図 (連立方程式法を用いた適応制御技術)
Fig.9 Block Diagram of Arithmetic Processor
(Adaptive Control Technology by Simultaneous Equation Method)

次に、聴取者が移動しても制御フィルタ (H) の自動的な修正を可能とすべく、連立方程式法を用いた適応制御技術 (音場創生技術) を図9に示す。

図8からの変化点は補助フィルタ (S) を用いたことである。補助フィルタ (S) は聴取者耳元の特性 (CH) と目標音場 (P) との差分を示すフィルタであり、補助フィルタ (S) と目標音場との差分の差 (e) を0にするように調整される。このとき、補助フィルタ (S) には聴取者移動による音響空間伝達特性 (C) の変動や、制御フィルタ (H) の過不足についての情報が含まれるため、補助フィルタ (S) の値から制御フィルタ (H) を算出することで、

音響空間伝達特性 (C) に適したフィルタに修正できる。

従って、連立方程式法はさまざまな音響空間伝達特性 (C) に効率良く追従できることから、特に移動への対応に適した適応制御技術といえる。

次節では連立方程式法導入時の制御フィルタ調整方法について説明を行う。

3.2.2 制御フィルタの調整方法

制御フィルタ調整方法は次の手順で行われる。目標音場と聴取者耳元の伝達特性との差分の取得、聴取者耳元までの伝達特性推定、最後に制御フィルタ調整であり、これを順を追って説明する。図9から聴取者は制御フィルタ (H) と音響空間伝達特性 (C) を通過した観測信号 (Y) を聞く。聴取位置の信号は次のように表すことができる。

$$Y = CHX \quad \text{聴取位置の信号}$$

この特性を目標音場フィルタ (P) を通過した音響信号 (PX) とすることが目的であるので、制御フィルタ (H) は次のとおりである。

$$PX = CHX \Rightarrow H = \frac{P}{C} \quad \text{制御フィルタ (H) の最適解}$$

これが音響空間伝達特性 (C) における最適解である。

ただし音響空間伝達特性 (C) が未知であるので、このままでは最適解を求めることができない。

そこで、次のような補助フィルタ (S) を設定する。

$$S = P - CH \quad \text{補助フィルタ (S) 定義式}$$

$$\Rightarrow SX = PX - CHX$$

$$\Leftrightarrow SX = PX - Y \quad \text{補助フィルタ (S) 算出式}$$

図9にて、補助フィルタ (S) と目標音場との差分の差 (e) を0にするように補助フィルタ (S) が調整されると、補助フィルタ (S) 定義式の右辺が得られる。

これにより、目標音場 (P) と聴取者耳元の特性 (CH) との差分を求めることができる。

次に、補助フィルタ (S) が十分に推定されていれば、補助フィルタ定義式から既知の値 (P, H, S) を使い、音響空間伝達特性 (C) の値を近似的にC'として推定できる。

$$C' = \frac{P - S}{H} \quad \text{音響空間伝達特性 (C) 算出式}$$

このC'を用いて制御フィルタ (H) を表すと、補助フィルタ (S) で構成された制御フィルタ (H) の更新式となる。

$$H = \frac{P}{C'} = \frac{P}{P - S} H \quad \text{制御フィルタ (H) 更新式}$$

これによって、音響空間伝達特性 (C) を測定することなく差分から制御フィルタ (H) を求めることができる。

3.2.3 システムの動作例

システム作動時、音響空間伝達特性 (C) 変動時のシステムの動作例を補助フィルタ (S)、制御フィルタ (H) を使い説明を行う。

■システム作動時

システム作動時はまず補助フィルタ定義式から補助フィルタ (S) の推定が行われる。

次に制御フィルタ更新式を使い、制御フィルタ (H) が計算される。補助フィルタ (S) の係数から音響空間伝達特性 (C) を測定することなく制御フィルタ (H) の最適解を算出することができる。

以下、式中の添え字は更新回数を示し、0は初期値である。

・補助フィルタ定義式

$$S_1 = P - CH_0 = P - C \quad H_0 = 1$$

・制御フィルタ更新式

$$H_1 = \frac{P}{P - S_1} H_0 = \frac{P}{P - (P - C)} = \frac{P}{C}$$

音響空間伝達特性 (C) の変動がない理想環境では、制御フィルタ (H) の最適解は更新を1回行うことで求まる。この場合、次の更新時は補助フィルタ (S) の値は零つまり、目標音場との差分が零になり、制御フィルタ (H) は更新されない。

・補助フィルタ定義式

$$S_2 = P - CH_1 = P - C \frac{P}{C} = 0$$

・制御フィルタ更新式

$$H_2 = \frac{P}{P - S_2} H_1 = \frac{P}{P} H_1 = \frac{P}{C}$$

■音響空間伝達特性 (C) 変動時

聴取者位置が動き、音響空間伝達特性 (C) がC ⇒ C+Δに変動した場合、補助フィルタ (S) は零ではなくなり、制御フィルタ (H) の更新が行われる。更新によって、制御フィルタ (H) は変動した音響空間伝達特性 (C+Δ) に対応する最適解を算出する。

・補助フィルタ定義式

$$S_3 = P - (C + \Delta)H_2 = P - (C + \Delta) \frac{P}{C} = -\frac{P}{C} \Delta$$

・制御フィルタ更新式

$$H_3 = \frac{P}{P - S_3} H_2 = \frac{P}{P + \frac{P}{C} \Delta} \frac{P}{C} = \frac{P}{C + \Delta}$$

制御フィルタ (H) の最適解が求まっていれば、次の更新では補助フィルタ (S) の値が零になり、制御フィルタ (H) は更新されない。

・補助フィルタ定義式

$$S_4 = P - (C + \Delta) H_3 = P - (C + \Delta) \frac{P}{C + \Delta} = 0$$

・制御フィルタ更新式

$$H_4 = \frac{P}{P - S_4} H_3 = \frac{P}{P} \frac{P}{C + \Delta} = \frac{P}{C + \Delta}$$

これらの方法を用いると聴取者が移動し、音響空間伝達特性 (C) が変化しても、その都度適切な制御フィルタ (H) に更新される。よって、制御帯域の拡大による、より自然な拡がり感提供と聴取者位置の変動による効果量低下の回避を実現できる。

4 原理検証結果

4.1 シミュレーション

次に音場創生技術の原理検証を行った。図10にシミュレーションモデルを示す。音響空間伝達特性 (C) の初期値には擬似的に作成した特性を設定し、目標音場フィルタ (P) は図12のような特性、補助フィルタ (S) は0、制御フィルタ (H) は1とした。確認事項は下記のとおり。

- ・聴取者近傍の音場特性が目標音場と一致するか
- ・音響空間伝達特性変化後も目標音場と一致するか

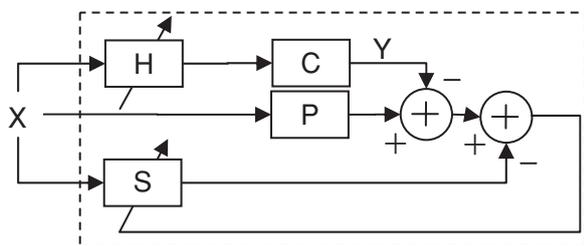


図10 シミュレーションモデル
Fig.10 Simulation Model

音響信号 (X) には目標音場を精度よく再現させるため、白色雑音を用いた。

評価指標は下記の式で定義される評価誤差 (E) を用いた。この評価誤差は目標音場フィルタ (P) と聴取者近傍の音場特性 (CH) が同じ特性を持てば、 $P=CH$ となり $E=0$ となる。従って、評価誤差が小さな値ほどよく目標音場

フィルタ (P) と聴取者近傍の音場特性 (CH) が一致しているといえる。

$$E = 10 \log_{10} \left[\frac{(P - CH)^2}{P^2} \right] \quad \text{評価誤差定義式}$$

E: 評価誤差、P: 目標音場フィルタ、CH: 聴取者近傍の音場特性

4.2 シミュレーション結果

図11に評価誤差の推移を示す。横軸を制御フィルタの更新回数、縦軸を評価誤差としてプロットしている。

この結果では制御フィルタの更新を繰り返すことで、評価誤差が減少している。また、更新回数が2回程度で評価誤差が約1/100 (-40dB) 程度で収束し、目標音場と一致しているのがわかる。

更新回数6回目では聴取者の移動を模擬すべく、音響空間伝達特性 (C) を変化させている。これによって、評価誤差が急激に上昇し、目標音場と異なっているが、すぐに -40dB 程度にまで差が小さくなり、目標音場と一致しているのがわかる。

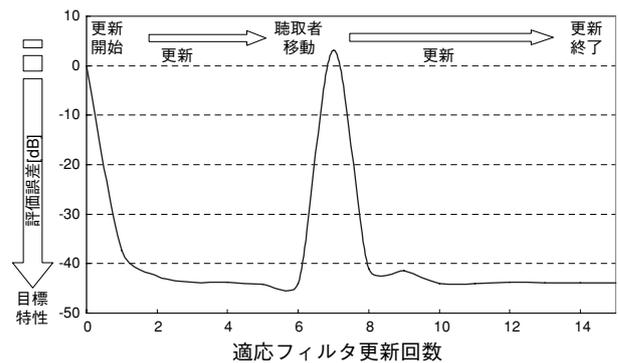


図11 評価誤差の推移

Fig.11 Transition of estimation errors

図12は目標音場フィルタ (P) のインパルス応答、図13は評価誤差が -40dB 程度の制御フィルタ (H) を用いた制御点近傍の音場特性 (CH) を表すインパルス応答である。聴取者近傍の音場特性が目標音場とよく一致しているのがわかる。

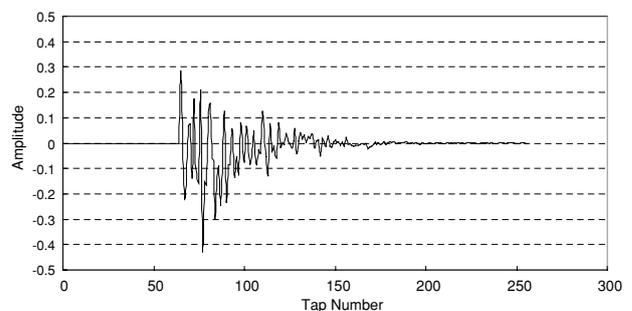


図12 目標音場のインパルス応答

Fig.12 Impulse Response in Targeted Sound Field

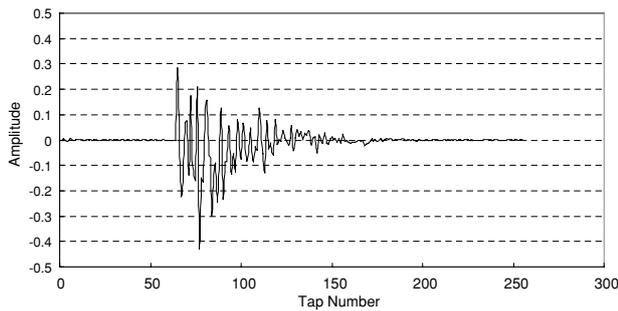


図13 聴取者近傍音場のインパルス応答

Fig.13 Impulse Response in Sound Field around Listener

以上の検証から、聴取者近傍の音場特性 (CH) が目標音場フィルタ (P) と一致すること、聴取者が移動し、音響空間伝達特性 (C) が変化しても目標音場と一致することが確認できた。

5

おわりに

連立方程式法を使った音場創生技術と、その原理検証について紹介した。この技術を用いると制御帯域を拡大した状態で聴取者が移動しても、その都度適切な制御フィルタに更新され、聴取者位置の変動による効果量低下の回避が可能となる。

従って、聴取者位置に寄らずより自然な拡がり感の提供の可能性が見出せた。

今回、シミュレーションには音楽信号を用いず、精度を確保するため、白色雑音を用いた。実用化を考えると、音楽信号で精度を確保する必要がある。次はこの課題について取り組んでいく。

また、連立方程式法の考えを、車の音場を調整する際の測定方法として用いることが可能であり、この技術を適用した製品の提案活動を進めている。

参考文献

- 1) 富田 裕二、本島 顕、加藤 茂樹 「車室内騒音下における再生音のダイナミックレンジ制御方法についての一考察」 テン技報 (36号) P28-33
- 2) 加藤 茂樹、柴田 浩 「車載用超低音スピーカ “6001”」 テン技報 (2号) P51-61
- 3) 加藤 茂樹、澤井 利仁、西野 雄治、天谷 祐治 「車室内音響特性とイコライジング」 テン技報 (5号) P51-61
- 4) 高橋 寿夫、田林 準史、中石 信一、富田 裕二、今村 忠、蔭山 雅義、山崎 慎一 「空間コントロール技術を用いたクラウンヨタプレミアムサウンドシステム」 テン技報 (51号) P11-18
- 5) Tadashi Ujino, Keiichiroh Tanaka, Isao Wakabayashi, Kensaku Fujii, and Mitsuji Muneyasu "Application of simultaneous equations method to sound field creation system" Acoustical Science and Technology, vol. 31, pp. 337-346, 2010.
- 6) 加藤 茂樹 「車室内における快適音響空間創造技術」 自動車技術 Vol.62 No2 88-94

社外執筆者紹介



藤井 健作
(ふじい けんさく)

1972年富士通入社。2001年まで、主にエコーキャンセラや能動騒音制御の開発に従事。2001年より兵庫県立大学工学研究科 教授に就任。研究対象はデジタル信号処理全般とその応用。

筆者紹介



若林 功
(わかばやし いさお)

2005年入社。以来、音響信号処理アルゴリズムの開発に従事。現在、CI第一技術本部 音響技術部に在籍。



宇治野 正
(うじの ただし)

2008年入社。以来、車載用スピーカ設計開発に従事。現在、CI第一技術本部 音響技術部に在籍。



加藤 茂樹
(かとう しげき)

1979年入社。以来、車載用音響システムの開発に従事。現在、CI第一技術本部 音響技術部 音響技術部長。