

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23700198

研究課題名(和文)スピーカアレーを用いた同一空間への複数の音場生成

研究課題名(英文)Multiple individual sound field generation in the same space by loudspeaker array

研究代表者

立蔵 洋介(Tatekura, Yosuke)

静岡大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：30372519

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、同一空間にいる複数のユーザに対して異なる音情報を同時に提供する音響再生法の実現を目的とした。まず、一般ユーザがスピーカアレーを手軽にセットアップできる容易で高速な音響伝達特性の測定法について開発した。その結果、一般的な楽音を用いて全チャンネル同時に音響伝達特性を測定できる方法を見出した。次に、逆フィルタ処理に基づく音場再現システムにおいて、劣決定条件下において個別音場生成を実現する方法に取り組み、ユーザの頭部移動に対して頑健なシステムを構築できた。さらに、スピーカアレーとNBSFCフィルタの統合に基づく個人用再生システムを見出し、それを並列化すると多ユーザ化できることがわかった。

研究成果の概要(英文)：In this research, the goal is to achieve a new sound image reproduction method which reproduce different sounds to multiple users in the same space. First of all, easy and fast measurement method of room acoustic transfer characteristics was developed, which a normal user can set up the loudspeaker array system easily. As a result, the principal investigator have found a method that can measure the acoustic transfer characteristics at all channels simultaneously by using normal music. Next, in the sound reproduction system based on inverse filtering, the principal investigator worked on achievement of individual sound image generation in the under-determined conditions. As a result, the system can be realized with robustness against user's head movement. Further, a personal sound reproduction system based on the integration of the NBSFC filters and loudspeaker array was proposed, and the principal investigator proved to expand for multiple users by parallelizing the system.

研究分野：音響情報処理

科研費の分科・細目：知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：音場制御 ユーザ・インタフェース

1. 研究開始当初の背景

情報機器の多様化・高機能化に伴い、ユニバーサルデザインを旗印にユビキタスホーム環境におけるコミュニケーションシステムが研究されている。音メディアにおいては、ヘッドホンなどのデバイスを身に着けることなく肉体的にフリーな状態での音響再生法が取り組まれているが、近年の核家族化と高齢化に伴い、多様なユーザや利用環境への適用が課題である。したがって、住環境や日常のライフスタイルという観点から、同じ室内で複数のユーザに対してそれぞれの好みに応じた音を再生できるシステムをスピーカ再生で実現できれば、待合室、イベント会場、高齢者などの聴覚特性が異なる人々が生活する場においても、音情報の伝達システムとして活用でき、応用範囲は広い。

音場を制御する従来技術として、波面合成や境界音場制御の原理に基づく手法がある。前者はホイヘンスの原理に基いて広い音場を制御できることから、複数ユーザに対して同じ音場を提供できるが、無響室での適用が前提である。後者では室内の反射・残響などの音響特性の影響を補正して音を再生できるが、周囲環境の変動に起因する音響特性の変化に伴い、再現音の品質が劣化することが問題であった。

研究代表者は平成 17-18 年度科研費若手研究 (B)「受聴環境の変動にロバストな高品質音場再現システム」をはじめとした一連の研究において、環境変動が生じて再生音の品質を劣化なく保持させることに成功すると共に、逆フィルタ処理を用いた音場の制御に関する様々なノウハウを蓄積してきた。研究代表者のこれまでの手法を多ユーザ化させるためには、利用するスピーカ数やその配置など、改善を要する課題もある。特に各ユーザにそれぞれ異なる音を再生する場合、従来の逆フィルタ処理のままでは再生音同士の干渉が予想され、このままではかえって不快な音響再生インタフェースとなってしまう。

2. 研究の目的

本研究課題のゴールは、住空間における複数ユーザへの快適でやさしい音環境デザインの観点から、それぞれのユーザの好みに応じた音場を生成するシステムを開発することである。そのプラットフォームとして、研究代表者がこれまでに取り組んできた音場再現システムの逆フィルタ処理の技術をベースに、普通のユーザでも一般的な家電を扱うのと同じような感覚でセットアップ・チューニングできるスピーカアレーシステムを構築する。

本科研費助成期間内においては、まず、1つのスピーカアレーシステムで2名のユーザに対してそれぞれ異なる音場を生成することを目標とし、既存の逆フィルタ処理に対して多ユーザ化に向けた拡張を行う。特別な実

験設備ではなく一般的な家庭環境での使用を想定し、各スピーカは分散配置させるのではなく、できるだけ密集して配置(ユニット化)することを想定する。そのため、スピーカアレーの設計方針(スピーカ数、配置、間隔など)や逆フィルタ設計方法などについて評価実験を踏まえて明らかにする。複数のスピーカのユニット化に関しては、従来の制御方法では制御の不安定性が指摘されていたが、研究代表者のこれまでの成果を適用することにより解決可能と考えている。

また、スピーカアレーのユニット化により、波面合成の技術を融合できる可能性がある。これにより、波面の進行方向以外では再生音圧を減衰できることが見込まれる。したがって小規模なスピーカアレーシステムを並列化できれば、さらなる多ユーザ化の実現が期待できる。本研究では、逆フィルタ処理と波面合成の統合による効果についても数値計算と実環境実験の両面から検討する。

3. 研究の方法

(1) インパルス応答の多チャンネル同時測定

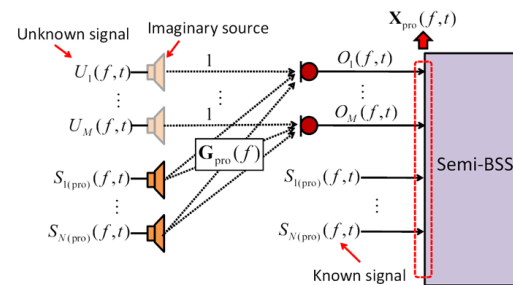


図1 Semi-BSSを利用した複数インパルス応答の同時測定手法の概要

誰もが音響システムを手軽にセットアップできるようにするため、室内音響インパルス応答を複数のラウドスピーカ - 複数の受音点間で同時に測定する方法に関するアルゴリズムの構築を行った。

研究代表者らはこれまでに、室内音響インパルス応答測定用信号である TSP (Time Stretched Pulse) 信号を用いた多チャンネル音響システムにおけるインパルス応答の同時測定法を提案したが、測定に用いる入力信号としては特別な測定用信号ではなく、楽音などを自由に利用できることが好ましいことが明らかとなった。そこで本研究では、図1に示すように、Semi-BSS (セミブラインド音源分離) の原理を利用して、特別な測定用信号を用いずに複数スピーカからのインパルス応答を同時に測定する方法を提案した。スピーカから再生される参照信号はシステムにとっては既知の情報であるため、複数の異なる音楽を同時に再生したとしても、Semi-BSS によって個別の音に分解可能である。ここで、研究代表者らは semi-BSS にお

ける分離行列内に、元のインパルス応答に関する成分を内包しうることを数理的に見出し、実環境データを用いた数値計算によってこれを明らかにすることとした。

(2) 全体を一括で制御する個別音像生成

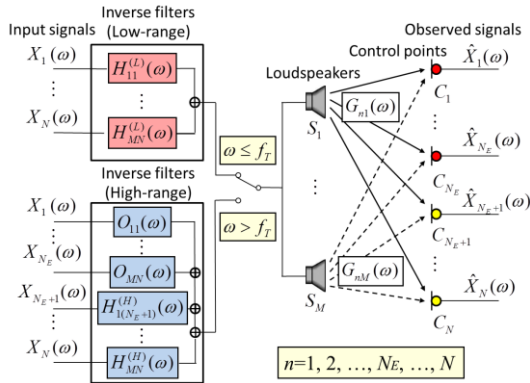


図 2 制御点における制御帯域切り替えに基づく個別音像生成法の概要図

個別音像生成は逆フィルタ処理に基づく多チャンネル音場制御の一種であるが、逆フィルタがラウドスピーカから制御点までの伝達系に対して正確な逆特性を持たない場合、任意の制御点に対して他の制御点で提示されるべき信号が混入する「クロストーク」が生じる。

一つのスピーカシステムで複数の領域の音場を生成する手法では多数のラウドスピーカを必要とするため、実用化のためにはなるべく少数個のスピーカによって実現したい。しかしながら、劣決定条件では制御精度が大幅に劣化し、制御点での再生音にクロストークに起因する雑音が混入する。

この問題を解決するため、受聴者の頭部の周辺を取り囲むよう制御点を配置し、周波数帯域毎に制御点数を切り替えることを行った。この手法により、受聴者の耳元や頭部周辺において高周波数のクロストークを抑制し、受聴領域が拡大できることが期待される。本手法の概要図を図 2 に示す。

本研究では、残響を有する環境を想定したシミュレーションを行い、クロストーク抑圧量及び抑圧範囲について評価を行うこととした。加えて、実環境データを用いてシミュレーションを行い、得られた観測信号に関して主観評価実験を行った。そのため、部屋の残響や受聴者の頭部の影響を考慮するとともに、聴感上で提案法の有効性を確認した。

(3) 1 人用個別音像生成システムの提案とその並列化による複数ユーザへの対応

(2)の方法とは別に、一般的なスピーカをアレー化することにより、指向性の高いビーム形成を通じ、個人用個別音像生成システムを構築し、これを並列にすることによって複数ユーザに対応させることを試みた。

近年、超音波を用いたパラメトリックスピ

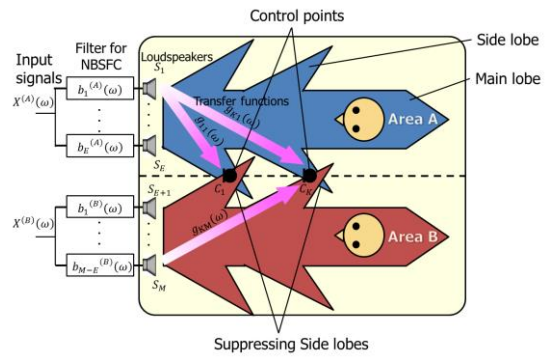


図 3 スピーカアレーと NBSFC の組み合わせによる個別音像生成システムの概要図

一カにより指向性を高める手法が検討されているが、可聴音として生成される音響信号と比較して非常に大きな音圧の音波を放射する必要がある。そのため、超音波暴露の問題より人体への影響が懸念されている。そこで、研究代表者らは一般的なスピーカによるアレーで指向性を形成するため、任意の制御点の音圧を抑制する Nullspace-Based-Sound-Field-Control (NBSFC) によるサイドローブ抑圧手法を提案した。

本研究では、前述のスピーカアレーと NBSFC を利用した方法を複数ユーザ向けに拡張し、複数ユーザへの個別音像生成手法を提案する。提案法では、直線状に配置したスピーカアレーと波の干渉によって再生音圧の高い領域を集中させ、さらに音圧が 0 となる制御点がユーザを隔てるようにアレー状に設置されることによって各再生音の干渉を低減することを図る。直感的には、図 3 に示すユーザ間に「光は通すが音は通さない」壁を形成することに相当する。これにより、ユーザに対する移動制限を緩和しつつ、複数ユーザへ個別音像が生成できることが見込まれる。

4. 研究成果

(1) インパルス応答の多チャンネル同時測定

提案手法によって測定したインパルス応答を逆フィルタ処理による 4 スピーカ 2 受音点の音場再現システムに適用し、その再現精度から提案手法の測定精度を評価した。本研究ではインパルス応答の測定用信号として、TSP 信号を用いた場合と提案手法を用いて測定した場合の測定精度の比較を行った。

図 4(a) に従来法である TSP 法と提案法の再現精度の比較結果を示す。これより、再現精度は両手法でほぼ同等であることがわかる。したがって、従来法と提案法のインパルス応答の測定精度は同等であると判断できる。

図 4(b) に、測定系内に外部雑音が存在する

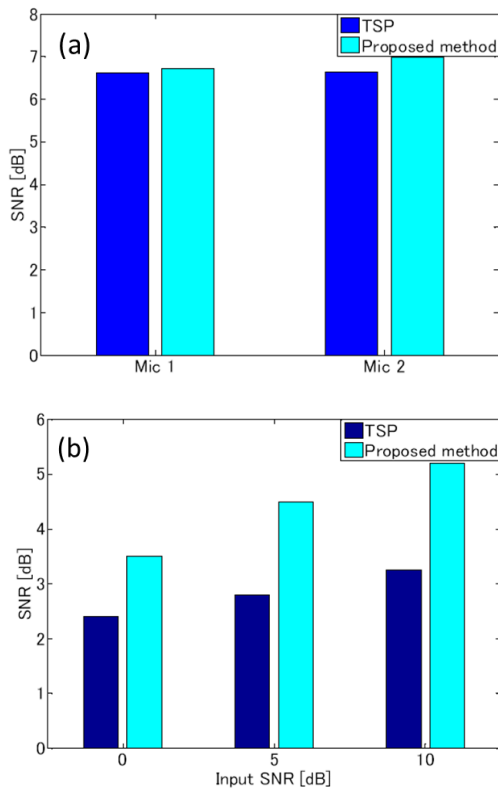


図 4 インパルス応答同時測定法の評価結果
(a): 再現精度の比較結果, (b): 耐雑音性の比較結果

場合の両手法の測定精度の比較結果を示す。ここで、外部雑音には、提案手法による測定では用いられていない別の楽音を用いた。横軸は外部雑音に対する測定信号の音量レベルを表しており、値が低いほど外部雑音の音量が高いことを示す。これより、提案手法ではいずれの場合でも高い再現精度を有しており、提案手法は測定時の雑音の影響に対して頑健であることが示された。

一方で、本実験では、提案手法において各スピーカごとに異なる楽音を同時に再生して測定を行っており、測定時のユーザの耳に届く音は考慮していない。また、提案手法ではICAの原理を利用しているため、各測定用信号間の独立性によって測定精度が変化すると考えられる。そのため、提案手法における測定用信号の最適化が今後の課題である。

(2) 全体を一括で制御する個別音像生成

耳元での制御点における信号対クロストーク比 (SCR) の平均値と耳元から半径 0.05m の円内における SCR の平均値を図 5 に示す。ここで、耳元から半径 0.05m の円内とは、頭部の横移動や縦移動 0.05 m 許容され、頭部の回転に関しては左右に約 40° の回転が許容される範囲である。耳元での制御点における SCR の平均値は、従来法で 20.2dB、提

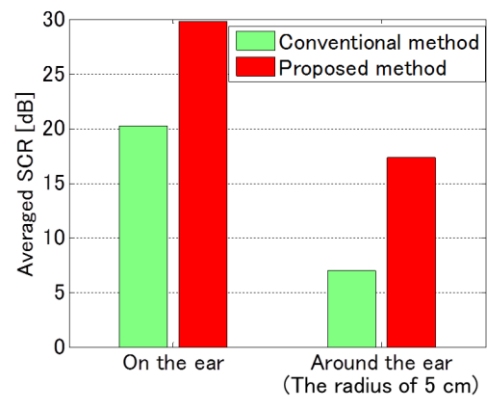


図 5 ユーザの耳元および両耳周辺付近における信号対クロストーク比

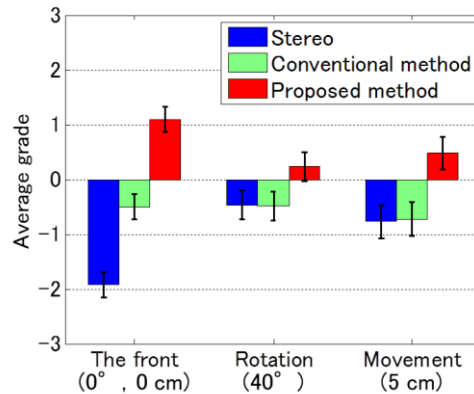


図 6 ユーザの頭部移動を伴う主観評価結果

案法では 29.8 dB であり、耳元周辺の SCR の平均値は、従来法で 7.0dB、提案法では 17.3 dB となり、提案法によりそれぞれ約 10dB 程度 SCR の値が改善された。この結果から、提案法では耳元周辺でのクロストークを抑圧可能であり、受聴領域を拡大可能であると考えられる。

さらに、聴感上におけるクロストーク量の評価を行うため、主観評価実験を行った。実験では、正常な聴覚を持つ男女 8 名の被験者に対し、Scheffe の一対比較法(浦の変法)による評価を行った。先に提示した刺激音を基準として、後に提示した刺激音を被験者に評定させた。その際、目的音声に対する妨害音声の大きさについて 7 段階で評定させた。主観評価の結果を図 6 に示す。縦軸は平均嗜好度を表し、図中のエラーバーはヤードスティックによる 95%信頼区間を表す。図中の頭部の移動がない場合では、各手法で有意差が見られた。提案法では従来法よりも優位であり、従来法はステレオ再生よりも優位である。そのため、頭部の移動がない場合においては、提案法でクロストークが抑圧されたと考えられる。次に、頭部の回転や移動においては、従来法とステレオ再生で有意差が見られなかった。しかし、提案法では他の二手法に比

べて優位であり、提案法によりクロストークが抑圧されたと考えられる。

一方、本稿によるクロストーク量の評価値である SCR は音質との関係が不明確であるため、今後は別の主観評価を行うことで両者の関係を明らかにする必要がある。

(3) 1 人用個別音像生成システムの提案とその並列化による複数ユーザへの対応

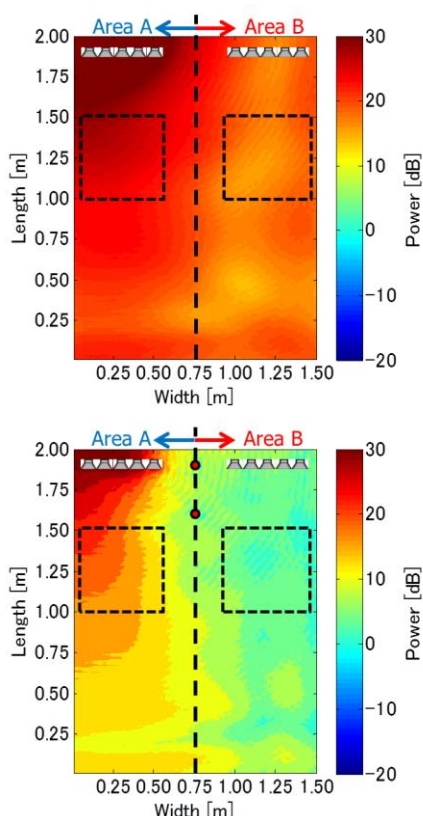


図 7 数値計算による未処理の場合と提案手法による音圧分布。(上): NBSFC フィルタを通さない未処理の場合,(下): NBSFC フィルタでエリア間の境界上の 2 点を制御した場合。

本研究では、二人のユーザに異なる音像を提示することを想定し、そのため二つの領域を考え、一つの領域で再生した音声がもう一方の領域ではどの程度抑圧できているかについて、数値計算による音圧分布評価を行った。ここでは、左側の領域 (Area A) を受聴領域、右側の領域 (Area B) を抑圧領域とする。

まず、図 7 上を見ると、受聴領域全体で高い音圧パワー値を示しているが、抑圧領域内であっても全体的に高いパワー値を示している。つまり、抑圧領域であっても Area A で再生した信号が混入している。また、図 7 下を見ると、受聴領域全体では高いパワー値を示しているが、抑圧領域内全体では受聴領域と比較して小さいパワー値を示している。つ

まり、抑圧領域では Area A で再生した信号の混入を抑えることができ、受聴領域内では所望の音像が提示できる領域が形成されていると考えられる。この結果から、提案法により複数ユーザへ個別に音像を生成する領域が形成されていると考えられ、提案法の有効性が確認された。

しかし、本研究では、壁による反射は一次反射のみとしていた。今後の課題として残響下でのシミュレーションを行い提案法の有効性について評価を行う必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Yumiko Nakayama, Masatoshi Adachi, Kotaro Ishimoto, Yosuke Tatekura, “Individual Sound Image Generation for Multiple Users Based on Loudspeaker Array with NBSFC,” 18th International Conference on Digital Signal Processing (DSP2013), 2013. DOI: 10.1109/ICDSP.2013.6622740 (査読あり)
- ② 原佳紀, 立蔵洋介, “スピーカアレイと NBSFC によるユーザ周辺の狭受聴領域形成,” 電子情報通信学会論文誌, vol. J95-A, no. 7, pp. 645-649, 2012. (査読あり)
- ③ 石本幸太郎, 立蔵洋介, “劣決定条件下の音場再現における複数ユーザへの個別音像提示,” 電子情報通信学会論文誌, vol. J95-A, no. 7, pp. 640-644, 2012. (査読あり)

[学会発表] (計 11 件)

- ① 中山裕美子, 立蔵洋介, “スピーカアレイと NBSFC を用いた個別音像生成の性能評価,” 日本音響学会春季研究発表会, 1-1-4, 2014 年 3 月 10 日, 日本大学 (東京都) .
- ② 中山裕美子, 立蔵洋介, “スピーカアレイと NBSFC を用いた個別音像生成における制御点配置の検討,” 電気関係学会東海支部連合大会, F2-1, 2013 年 9 月 24 日, 静岡大学 (静岡県) .
- ③ 足立昌俊, 石本幸太郎, 立蔵洋介, “スピーカアレイと NBSFC を用いた複数ユーザへの個別音像生成,” 日本音響学会春季講演論文集, 1-P-24, 2013 年 3 月 13 日, 東京工科大学 (東京都) .
- ④ 石本幸太郎, 栗須拓郎, 立蔵洋介, “劣決定条件下の個別音像生成におけるクロストーク抑圧手法の評価,” 日本音響学会春季講演論文集, 1-10-14, 2013 年 3 月 13 日, 東京工科大学 (東京

- 都) .
- ⑤ 石本幸太郎, 立蔵洋介, “少数個のラウドスピーカを用いた個別音像生成における制御点配置の検討,” 日本音響学会秋季講演論文集, 1-9-12, 2012年9月20日, 信州大学(長野県) .
 - ⑥ 原佳紀, 立蔵洋介, “スピーカアレイとNBSFCを用いたユーザ周辺における狭受聴領域の簡易制御,” 日本音響学会春季講演論文集, 2-1-1, 2012年3月14日, 神奈川大学(神奈川県) .
 - ⑦ 赤堀公平, 立蔵洋介, “複数ユーザへの個別音像生成におけるクロストーク抑圧手法の評価,” 日本音響学会春季講演論文集, 1-1-6, 2012年3月13日, 神奈川大学(神奈川県) .
 - ⑧ 原佳紀, 立蔵洋介, “スピーカアレイとNBSFCによる狭空間音場制御,” 電気関係学会東海支部連合大会, Q5-3, 2011年9月26日, 三重大学(三重県) .
 - ⑨ 石本幸太郎, 立蔵洋介, “劣決定条件下の音場再現における制御点の切り替えを用いた再生品質の改善,” 電気関係学会東海支部連合大会, Q5-1, 2011年9月26日, 三重大学(三重県) .
 - ⑩ 赤堀公平, 立蔵洋介, “複数ユーザに対する個別音像形成におけるクロストーク抑圧,” 電気関係学会東海支部連合大会, Q4-3, 2011年9月26日, 三重大学(三重県) .
 - ⑪ Y. Tatekura, T. Koyano, and K. Ouchi, “Simultaneous measurement of multichannel room impulse responses using semi-BSS,” Inter-noise 2011, 2011年9月5日, 大阪コンベンションセンター(大阪府) .

6. 研究組織

(1) 研究代表者

立蔵 洋介 (TATEKURA, Yosuke)

静岡大学・工学研究科・講師

研究者番号 : 30372519