

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02728

研究課題名(和文) 3次元音響空間ウォークスルー実現に向けた波数領域収音再生技術

研究課題名(英文) Audio signal processing in wavenumber domain for 3D sound walkthrough system

研究代表者

金田 豊 (KANEDA, Yutaka)

東京電機大学・工学部・教授

研究者番号：20328511

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：音響空間場において主要な音源情報(音源位置、原音情報)とアンビエントな音情報(室内インパルス応答、残響時間、周囲雑音)を取得し、それらを再合成することで、ユーザが仮想的にその空間内を移動しながら音を聴取することが可能なシステムの提案を行う。本研究では、音場の基本情報である複数個所の室内インパルス応答を正確かつ短時間で取得する方法、および所望の音源情報を空間スペクトル(指向特性)出力の差により抽出する方法を確立した。さらに、これらに基づいて空間スペクトル表現した音場からユーザの両耳信号を再現するデモシステムの構築を行い、制限されたエリア内ではあるが音場内をウォークスルー可能なことを示した。

研究成果の概要(英文)：Auditory walkthrough system, which analyzes and synthesizes the main sound source information (source signal and its location) and the ambient information (room impulse responses, reverberations, noises) from sound field, is proposed. We proposed the fast and high accuracy measurement methods of multiple impulse responses and the source separation method based on the difference between the spatial spectrum information. Furthermore, we made a prototype system in which the user can walk through virtually in the restricted reproduced-sound-field.

研究分野：音響信号処理

キーワード：3次元音響 波数領域処理 マイクロホンアレイ 頭部伝達関数 ウォークスルー 室内インパルス応答  
音源位置 雑音抑圧

## 1. 研究開始当初の背景

サッカーなどのスポーツ中継では、観客席にいるかのような臨場感をはるかに超え、ボールを蹴る音や選手同士の会話などを間近で聞くことが望まれている。また人間が行けない場所において、遠隔からその場の音情報を得ることは、災害時などにしばしば重要となる。しかし、従来のマイクロホンアレー技術は、主に音の到来方向に着眼しているため、場全体の收音や、同一方向から到来する音を飛び越えた收音はできない。方向のみならず奥行き(音源までの距離)を含めた位置推定技術や高残響下における原信号の抽出技術に関する研究は立ち遅れている。

また、例えば観客の後ろにマイクが設置されていても観客を飛び越えた收音と周囲の環境音場の同時収録を行い、ヘッドフォン用に再合成することで、その場に対するウォークスルーを実現し、これまでにない感動を与えるという再生方法についても立ち遅れている。

## 2. 研究の目的

本研究では、これまで方向ごとに音の收音をしていたマイクロホンアレーに関して、録音あるいはリアルタイムに收音した音情報から、その場のあらゆる位置の音圧を精度よく再構成可能な情報を取得することを目的に、所望音の音響場の全体的な情報と主たる音源の原音や位置といった情報を抽出收音可能な、3次元空間場收音再合成技術の確立を目指す。この際、音場の持つ情報は、空間場の情報と音源そのものが持つ情報に大きく分かれるが、(1)複数の音源と受信点がある中で、同時にかつ効率的に空間場の取得する手法を考案し、性能を明らかにする、(2)3次元空間内において複数の音源情報を選択的に收音可能かを明らかにする、(3)得られた音場情報に基づいて任意の位置の音圧空間を再合成し、ユーザが音響空間内を自由にウォークスルーするシステムが構築可能かおよびユーザに与える影響について明らかにすること、を目的とする。合わせて、ヘッドフォン再生のみならず(4)特定のユーザのみにスピーカ再生可能かも検証をすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

複数の音源が存在する空間場において聴取者が選択した自由な位置での音場を再現可能かを明らかにするため、音場の收音から再生までを各ステップに分け、(1)音場の基本情報の取得、(2)3次元選択的音源收音、(3)ウォークスルーヘッドフォン再生、(4)指向性スピーカ再生、について取り組む。

### (1) 音場の基本情報の取得

ウォークスルー可能な3次元空間音場收音合成に向けて必要な音場の空間的情報(イ

ンパルス応答)を効率よく抽出するために、雑音下でのインパルス応答を短時間で高精度に測定する技術を開発するとともに、複数のスピーカとマイクロホン間のインパルス応答を同時に観測できる手法の確立と性能評価を行う。

### (2) 選択的音源收音

多様な雑音環境下においてマイクロホンアレーの入力信号を有/無指向性信号に分解し、これらの音響モデル推定を同時に行うことで、空間信号分布を用いて反復的に音響モデル推定を行う手法を確立する。

### (3) ウォークスルーヘッドフォン再生

マイクロホンアレーにて收音した音から任意の位置にユーザがウォークスルーしたことを想定した音場情報を合成し、ヘッドフォンにより呈示する技術の確立するとともに、システムによる評価を行う。

### (4) 指向性スピーカ再生

ヘッドフォンを装着しないスピーカ再生においては、必要なユーザにだけ音を呈示することが重要となるが、入力信号を複数のサブ信号に分解し、ユーザ周囲では音が聞き取れないようがユーザのみが聞き取れる方法を確立する。

## 4. 研究成果

### (1) 音場の基本情報の取得

音場の基本情報であるインパルス応答を正確に短時間で求める方法の検討を進めた。一般室での測定においては室内騒音が主要な誤差要因となる。この室内騒音は低周波数成分が強いことが多いが、測定結果においては、各周波数のSN比が一定であることが望まれる。この要求にこたえる測定信号として、これまで、CSN信号が提案されていた。

本研究ではまず、CSN信号を用いた室内音響特性測定の手法を確立し、有効性を確認した。次に、CSN信号の改良を試みた。CSN信号のSN比の規定条件は、「全周波数でSN比一定」と厳しいものであった。これに対して、「各オクターブバンドでSN比一定」と条件を緩和したBMN信号を提案した。残響時間などの室内音響特性はオクターブバンドで評価されることが多いため、このように条件を緩和しても特性値の算出には影響がなかった。

BMN信号を用いると、CSN信号と比べて、測定時間を約60%に短縮することができた。測定されたインパルス応答の帯域別短時間パワー特性を図1に示す。図より、雑音レベルがどの帯域でも一定となっていることがわかる。

また、インパルス応答の測定信号として、擬似雑音信号の改良を進めた。擬似雑音信号は、一般室で妨害要因となることの多い非常雑音の抑圧に効果的である。本研究では、

擬似雑音の欠点とされていた、波高値が高いこと、および、時間軸変動の影響を受けやすいこと、を改善するために、低波高値擬似雑音、および、純白色擬似雑音を提案し、有効性を確認した。

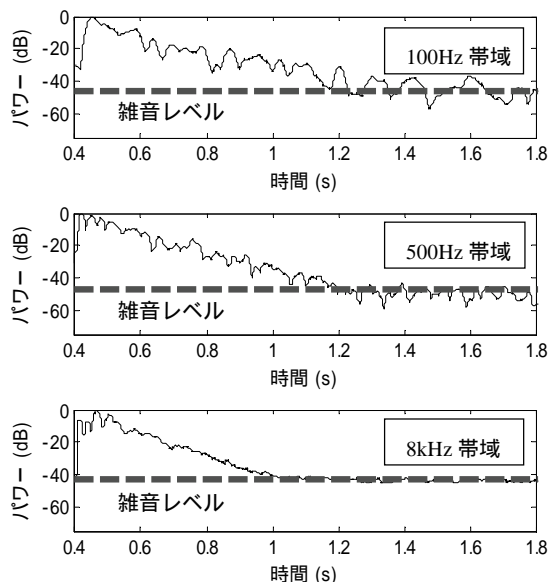


図1 測定したインパルス応答の帯域別短時間パワー特性

次に、複数のインパルス応答を同時に測定するために、複数の音源スピーカから互いに無相関なM系列信号を出力(多重化)する手法を検討した。多重化することによってインパルス応答の測定時間を、一つずつ個別に測定する場合に比べておよそチャンネル数分の一にできる。さらに実験によりどの程度測定精度が保たれるか検証した。

図2は、音源スピーカ3個のインパルス応答を多重化M系列信号により同時に測定した場合の測定誤差を示している。縦軸は、個別に測定した場合のインパルス応答の周波数スペクトルを真値として、多重化測定した場合のインパルス応答の周波数スペクトルとのスペクトル歪(SD値)の差を測定誤差として表示してある。(差がなければSD値は0 dBとなる。)実験結果から、音源スピーカの位置により異なるが、全体としてSD値を1.2 dBより小さく抑えることができるこ

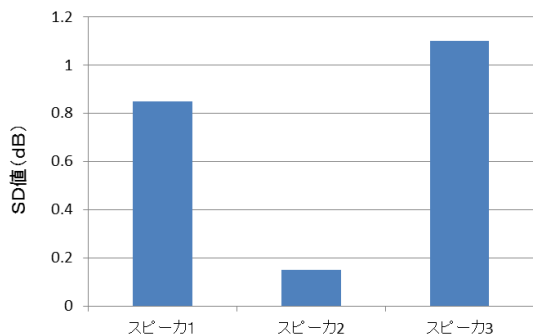


図2 測定インパルス応答の誤差(SD値)

とが分かった。

(2) 選択的音源收音

マイクロホンアレーの入力信号を有/無指向性信号それぞれの特徴に基づき分解し、反復的に互いの影響を取り除きながら、各信号のパワースペクトルを高精度に推定する方法を考案し、検証を行った。

実験は方向性雑音と拡散性雑音が混在する環境で收音した音声データを使用し、素子間隔2 cm、素子数16のマイクロホンアレーで收音をしている。本実験において、所望信号は男女各5名の音声、方向性雑音はHoth雑音、拡散性雑音はparty雑音を用いた。Hoth雑音はピンクノイズのような周波数特性を持ち、主に室内で発生し得る空調音のような雑音である。party雑音はパーティ会場において多数の話者の音声が入り混じった雑音である。以下、入力信号のSNR(Signal to Noise Ratio: 信号対雑音比)は所望信号と雑音(方向性雑音と拡散性雑音)とのSNRを表し、收音時の方向性雑音と拡散性雑音のパワーは等しいものとする。

図3に、SNR改善量およびSD(音声周波数特性歪)について、反復的に各信号のパワースペクトルを求めず、1回で推定する従来手法と比較したグラフを示す。図から雑音の到来方向が $\theta = -45^\circ$ 、 $-30^\circ$ の時、従来手法と提案手法の雑音抑圧性能は差がないことがわかる。一方、SDの評価より、提案手法は

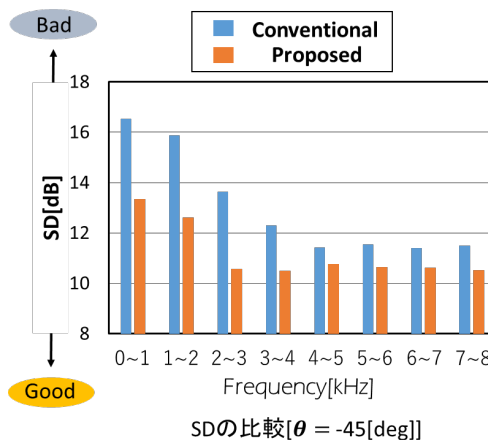
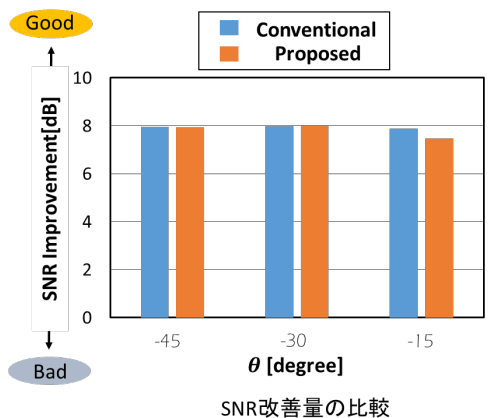


図3 SNR改善量とSDの比較

従来手法より大きく音声歪みが低減できていることが確認できる。4 kHz 以下において、音声品質改善の効果が高く表れていることも確認できる。

以上の結果から、提案手法は従来手法と同等の雑音抑圧性能を持ちつつ、音声品質を大きく改善できることが確認できた。従来手法と同規模のアレーを用いた場合でも提案手法は十分な雑音抑圧と音声品質改善の性能が得られることがわかった。

### (3) ウォークスルーヘッドフォン再生

空間場において音源から 1m 程度離れた位置に設置した 24ch 直線マイクロホンアレーの收音信号からヘッドフォン再生信号を合成する手法を提案した。本手法は、(2)において述べた有/無指向性信号に分解して音響モデルを構築するという基本概念を波数領域のモード展開としている。具体的には、頭部を剛円筒と仮定することで直線アレー收音信号を頭部で受聴した際の信号にモード展開により変換を行う手法を考案した。図 4 に提案手法のイメージ図を示す。ここで、24 個の離散的に配置されたマイク信号から連続的な円筒上の信号を再合成するために、空間アップサンプリングを用いた逆伝搬法を考案し、導入を図った。

次に得られた音圧を剛円筒上に音圧に変換するため、波数領域での伝達関数形式に基づいた以下の式を利用した。

$$\hat{p}(a, \theta) = \sum_{n=-N}^N \frac{2j}{\pi k a} \frac{p_n}{H_n^{(2)}(ka) J_n(ka)} e^{jn\theta}$$

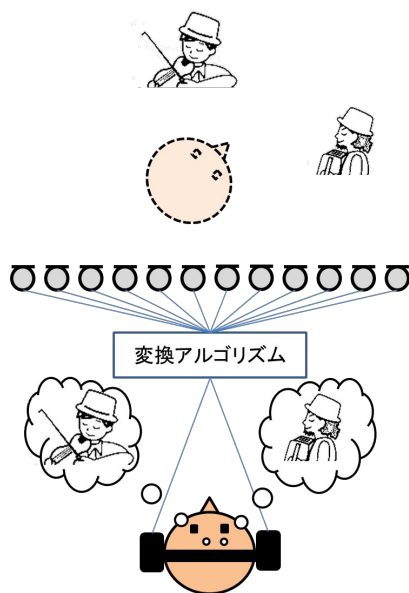
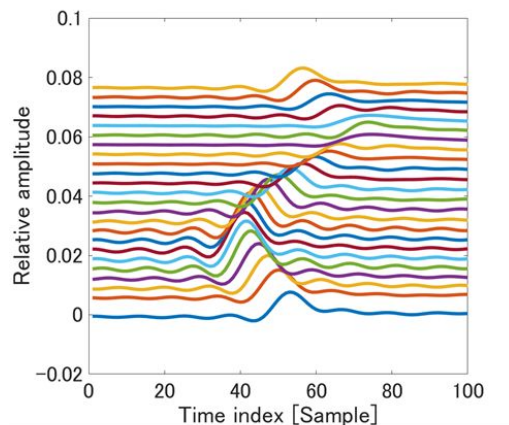
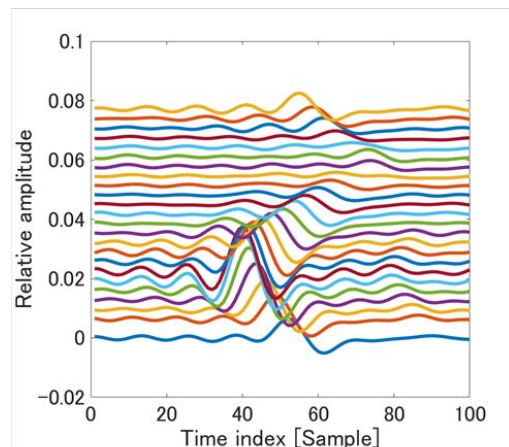


図 4 直線マイクロホンアレー信号からの両耳信号変換のイメージ図

図 5 に、剛円柱を頭部とみなして正面から 90° 方向に右耳があり、かつ音源が 0° 方向に配置されているとした場合に、頭部を反時計周りに 15° ずつ回転した際の右耳での理論的な受信信号 (グラフの下が 0° 方向で上にいくにつれて回転角度が大きくなる) と、無響室にて 24ch 直線マイクロホンアレーで收音した信号から合成した右耳の受信信号とを示す。信号は帯域制限インパルス信号とした。水平面上の定位に重要な両耳間のレベル差や両耳間時間差が再現できていることが分かる。



(a) Theoretical rigid cylinder array



(b) Proposed method (virtual rigid cylinder array)

図 5 理論値の受信波形(a)と提案手法による合成波形(b)の比較図

続いて図 6 に示す仮想空間内にて、半径 2m の円上に 36 個 (10° 間隔) の仮想音源を配置し、それぞれからランダムにバイオリンの音を再生し、仮想空間内での定位について検討した。使用した機材は、HTC Vive およびそれに付随するオープン型のヘッドフォンである。頭部運動を許し、音源方向を付属のコントローラーのトリガーで生成されるレーザ

ーで指し示す応答をさせた。結果、30°の誤差を有する場合もあったが、多くが20°以内であった。これは、ヘッドフォン自体、また頭部運動に対するシステムの追従性などに大きく依存することがわかり、今後は身体動作を加味した音の再生手段を検討する必要があることが示された。

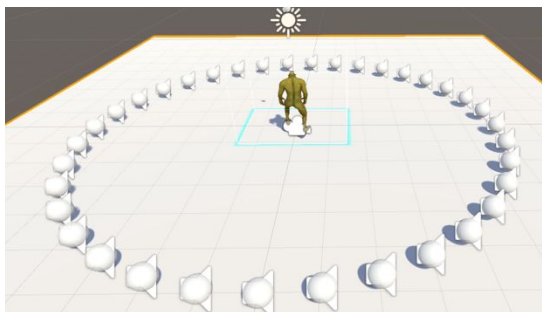


図6 仮想空間内における仮想音源配置

#### (4) 指向性スピーカ再生

入力信号を分解する手法としては、入力信号をランダムな信号で表現するランダムベクトル分解法を用いた。ランダムベクトル分解法で分解された入力信号はそれぞれがホワイトノイズのような信号となるため、再合成点以外の場所では聞き取ることができない。しかし、再合成される領域が非常に小さいという課題があったため、入力信号のLPC残差信号を用いて分解を行う残差信号分解法や非負値行列因子分解を用いた手法などの検討も行った。その結果、再生範囲の拡大について一定の効果が見られた。

#### 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9件)

中原 優樹, 金田 豊, "インパルス応答測定結果の帯域別雑音レベルを一とする効率的な残響時間測定法", 日本音響学会誌, 査読あり, 72巻, 2016, 358-366  
DOI: 10.20697/jasj.72.7\_358

Yuki Nakahara and Yutaka Kaneda, "Improvement of efficiency in reverberation time measurement method using constant signal-to-noise ratio swept sine signal," Acoust. Sci. & Tech., 査読あり, vol. 37, 2016, 133-135

DOI: 10.1250/ast.37.133

Yuki Nakahara and Yutaka Kaneda, "Faster method of reverberation time measurement using signal realizing a constant noise level for each frequency band", Acoust. Sci. & Tech., 査読あり, vol. 37, 2016, 247-249

DOI: 10.1250/ast.37.247

篠原 亮, 金田 豊, "インパルス応答測定用擬似雑音信号における波高率低減処

理", 電子情報通信学会論文誌, 査読あり, vol. 98-A, 2015, 450-457

Yutaka Kaneda, "Noise Reduction Performance of Various Signals for Impulse Response Measurement," J. Audio Eng. Soc., 査読あり, vol. 63, 2015, 348-357

DOI: 10.17743/jaes.2015.0024

Yuki Nakahara and Yutaka Kaneda, "Effective measurement method for reverberation time using a constant signal-to-noise ratio swept sine signal," Acoust. Sci. & Tech., 査読あり, vol. 36, 2015, 344-346

DOI: 10.1250/ast.36.344

(ほか3件)

##### [学会発表](計82件)

小林 祐介, 片岡 章俊, "マイクロホンアレーを用いた空間信号分布に基づく反復音響モデル推定" 日本音響学会, 2018-3-13, 日本工業大学(埼玉県南埼玉郡)

Asuka Yamazato, Yoichi Haneda, "Generating method of binaural signals at semi-arbitrary listening positions from a linear microphone array," 2017-11-30, 応用音響研究会, オークランド大学(ニュージーランド)  
Yuhei Yamamoto, Yoichi Haneda, "L1-Regularised MV Beamformer in the Spherical Harmonic Domain for Spherical Microphone Array Recording," IEEE Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), 2017-10-24, ウィンチ愛知(名古屋)

安枝 和哉, 新城 大輔, 片岡 章俊, "複数スピーカアレーを用いた分解信号の再合成によるエリア再生", 日本音響学会, 2017-9-25, 愛媛大学(愛媛県松山市)

山里 飛鳥, 羽田 陽一, "直線マイクロホンアレー信号からの円筒形両耳信号への変換", 応用音響研究会, EA2016-119, 2017-03-01, 沖縄産業支援センター(沖縄)

森 健太郎, 金田 豊, "インパルス応答測定用純白色擬似雑音信号の時間軸変動耐性の検討", 電子情報通信学会応用音響研究会, 2017-3-1(沖縄県那覇市)

Shoma Kuroda, Shingo Uenohara, Keisuke Nishijima, and Ken'ichi Furuya, "Comparison of the multiple maximum length sequences and multiple exponential sweeps method for parallel measurements of impulse responses", Joint Meeting of the Acoustical Society of America and

Acoustical Society of Japan,  
2016-12-2, ホノルル(ハワイ)  
Maureen, Yoichi Haneda,  
"Visualization of one source in a  
two sources sound field by  
estimating source positions,"  
Joint Meeting of the Acoustical  
Society of America and Acoustical  
Society of Japan, 2016-12-2, ホノル  
ル(ハワイ)  
Shoma Kuroda, Shingo Uenohara,  
Keisuke Nishijima, and Ken'ichi  
Furuya, "Evaluation of Parallel  
Measurement Methods for Multichannel  
Impulse Responses," IEEE Global  
Conference on Consumer Electronics  
(GCCE), 2016-10-13, メトロポリタン京  
都(京都府京都市)  
大野瑞季, 片岡章俊, "空間ポストフィ  
ルタにおける有/無指向性音響モデル推  
定性能について", 日本音響学会,  
2016-3-9, 横浜桐蔭学園大学(神奈川県  
横浜市)  
黒田 翔馬, 上ノ原 進吾, 西島 恵介,  
古家 賢二, "多チャンネルインパルス応  
答測定における多重 M 系列信号と多重  
Log-SS 信号の比較", 日本音響学会,  
2016-3-9, 会津大学(福島県会津市)  
黒田 翔馬, 上ノ原 進吾, 西島 恵介,  
古家 賢二, "多チャンネルインパルス応  
答測定における多重 M 系列信号と多重  
Log-SS 信号の巡回性について", 応用音  
響研究会, 2015-11-15, 熊本大学(熊本  
県熊本市)  
大野瑞季, 片岡章俊, "異なる空間特性  
の複数雑音環境における空間ポストフ  
ィルタ推定", 応用音響研究会,  
2015-11-13, 熊本大学(熊本県熊本市)  
大野瑞季, 片岡章俊, "ビームの重なり  
を考慮した空間クロススペクトル推定  
による拡散性雑音抑圧", 応用音響研究  
会, 2015-7-3, 電気通信大学(東京都調  
布市)

(ほか 68 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称: 音源方向推定装置、音源方向推定方法、  
およびプログラム  
発明者: 羽田陽一, 田中 龍亮  
権利者: 電気通信大学  
種類: 特許  
番号: 特願 2016-032281  
出願年月日: 2016/2/23  
国内外の別: 国内

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

金田 豊 (KANEDA, Yutaka)  
東京電機大学・工学部・教授  
研究者番号: 20328511

### (2) 研究分担者

片岡 章俊 (KATAOKA, Akitoshi)  
龍谷大学・理工学部・教授  
研究者番号: 20528682

古家 賢一 (FURUYA, Ken'ichi)  
大分大学・理工学部・教授  
研究者番号: 10643611

羽田 陽一 (HANEDA, Yoichi)  
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・  
教授  
研究者番号: 80647496

菅木 禎史 (CHISAKI, Yoshifumi)  
千葉工業大学・先進工学部・教授  
研究者番号: 50284740

### (3) 連携研究者

西島 恵介 (NISHIJIMA, Keisuke)  
大分大学・理工学部・助教  
研究者番号: 30237698