

令和 2 年 7 月 11 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C)（特設分野研究）

研究期間：2017～2019

課題番号：17KT0142

研究課題名（和文）身体的音空間知覚を可能にする広帯域三次元音場再現システム

研究課題名（英文）Sound field reproduction system for physical perception of acoustic space

研究代表者

池田 雄介（Yusuke, Ikeda）

東京電機大学・未来科学研究科・助教

研究者番号：80466333

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：音声の持つ主要な音空間情報（音源位置，音源指向性）に着目し，それらを含む音場を物理的に合成可能かつ，聴取者位置に合わせて動的に音場を制御することで，聴取者が身体的に自然な聴取（身体への装着がなく，聴取者移動を許容）が可能なシステムの提案を行う。本研究では，高速1bit信号直接駆動方式を用いた没入型の多チャンネル音場合成システムの構築と，これらを用いた動的局所音場制御手法を提案した。さらに，局所音場制御のための効率的な空間インパルス応答測定手法を提案し，シミュレーションと実測実験によって局所領域に関して近接した少数マイクロホン情報から直接音と初期反射音のモデル化が可能なることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

音声の持つ空間的な情報（音源の位置，指向性）は，無意識にその変化が知覚されており，人の存在感といった高次の認知的感覚への寄与が期待される。本研究で提案された動的局所音場再現システムでは，再生システムの小型化によって多チャンネル音場再生システムの構築を容易にし，また，聴取者の位置に合わせて局所的に音場を合成し，スピーカの物理的制約を以上の高周波数まで音場を制御する。さらに音場制御に必要な多数点の空間インパルス応答を効率的に取得する推定技術を提案し，これらの技術を複合することで，従来法では困難であった高精度な音場再現の実現が容易となり，音空間のリアリティに関する認知的理解への貢献が期待できる。

研究成果の概要（英文）：To focus on the primal spatial information of acoustic voice, we propose the dynamic sound field synthesis system that physically synthesizes the voice's sound field. The listener can move freely with no attachment such as headphones, by moving the controlled sound field to track the listener's head. This research project develops the immersive multi-channel sound synthesis system with loudspeakers directly driven by high-speed 1bit signals and proposed dynamic local sound field synthesis. Furthermore, we introduced the estimation method of the spatial impulse response to improve the effectiveness of impulse response measurement for local sound field synthesis. From the simulation and anechoic chamber experiments, direct sound and early reflections of impulse response in the local area can be modeled from the adjacent small number of microphones.

研究分野：音響工学

キーワード：物理音場再現 高速1bit信号 空間インパルス応答 スピーカアレイ マイクロホンアレイ 音像定位 局所音場合成

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、その重要度が増している遠隔コミュニケーションや高臨場感コンテンツにおいて、音声は重要な役割を担っている。これまで音声の言語情報に関して多くの関心が集められてきたが、音声の非言語情報は豊かな表現や内容の信頼性を高めるなど、人間らしいコミュニケーションを支えている。中でも、無意識に知覚される音声の空間的情報は、人の存在感や気配といった高次の認知的知覚に寄与することが期待されるが、これらを物理的に合成することは容易ではなく、多くのメディア環境では無視されるという問題がある。

また、近年盛んに研究されてきた物理的音場合成手法は、所望の音空間を心理的にではなく、物理的に合成する。多数のスピーカを用いて所望の波面が合成されることにより、合成音場に対して自然な聴取を可能とする。しかし、必要となる多チャンネル再生システム構築の難しさ、スピーカ配置の物理的制約による音場合成精度の限界や、実装時に必要となる多点の空間インパルス応答の測定の問題など、多くの課題が残されている。

2. 研究の目的

本研究では、身体的拘束の少ない自然な聴取が可能な音声音場の物理的な再合成を目的とした、没入型の多チャンネル音場合成システムの構築と、これらを用いた動的局所音場制御手法を提案する。さらに、効率的な空間インパルス応答測定手法を提案とその局所音場制御への適用、低実装コストな高精度音場再合成技術の確立を目指す。この際、大きく分けて（1）スピーカ再生システムの分散配置が容易な高速 1bit 信号直接駆動方式の多チャンネル再生システムの構築、（2）聴取者の頭部の動きに合わせて局所的に物理的に高精度に所望音場を合成する動的局所音場合成手法の提案（3）近接した少数マイクロホンアレイを用いた空間的に連続な空間インパルス応答の推定手法の提案を行う。

3. 研究の方法

聴取者の身体的な自由度の高い物理的に高精度な音場制御が可能かを明らかにするため、再生システムと制御手法に関して、大きく3つの研究に分け、（1）多チャンネル音場合成システム（2）動的局所音場合成（3）空間インパルス応答推定とその局所音場合成への適用

（1）多チャンネル音場合成システム

物理音場合成に必要な空間的に分散したスピーカシステムの構築を容易にするため、高速 1bit 直接駆動方式を用いた多チャンネル再生システムの構築を行う。全チャンネルのクロックレベルでの信号同期の保証と動的局所音場合成への適用が可能となるよう SoC FPGA を用いた信号の集中管理と分散再生の両立したシステムの確率とその性能評価を行う。

（2）動的局所音場合成

スピーカ配置の物理的な制約による空間ナイキスト周波数以上の高周波数までの音場制御を可能にする特定領域のみで音場を合成する局所音場合成を用いて、聴取者が自由に移動可能な自然な聴取を実現するため、聴取者の頭部位置に追従する局所音場合成手法を提案する。頭部の追従は離散的に行う必要があるが、その際、制御領域の位置によって再現精度の誤差が異なることが原因で生じるノイズや音像定位に関して動的局所音場合成手法の評価を行う。

（3）空間インパルス応答推定とその局所音場合成への適用

局所音場合成への適用を目的とした多点の空間インパルス応答を効率的に計測する目的で、マイクロホンアレイからその周囲の局所領域に対する空間インパルス応答の外挿手法を確立し、シミュレーションおよび無響室実験による評価を行う。加えて、空間インパルス応答推定手法と Pressure Matching 法を用いた局所音場合成手法を提案し、シミュレーションによる評価を行う。

4. 研究成果

（1）多チャンネル音場合成システム

多チャンネル音場合成を行うには、室内に分散した多数のスピーカに対し、独立した信号をクロックレベルで同期して再生する必要がある。また、スピーカの駆動には、各スピーカに対して、DA 変換や増幅器など多数の電子部品が必要となり、チャンネル数が増えるほどにその負担は増大する。そこで、システム全体の信号を統括する FPGA SoC を搭載した Master Unit と各スピーカ群に近接した位置に配置する高速 1bit 直接スピーカ駆動方式を用いた小型の Hub Unit で構成される音場再生システムを提案した。

図 1 にシステムの概要図を示す。動的局所音場合成には、頭部に追従して再生信号を逐次更新する必要があるため、Master Unit 側で信号全体を統合し、再生信号の柔軟な変更に対応する。また、多チャンネル音場合成において、各スピーカの音響出力は必ずしも大きい必要はないことを利用し、高速 1bit スピーカ直接駆動を採用することで、20 cm × 15 cm 程度に収まる単純回路で 32ch のスピーカ駆動を可能にした。

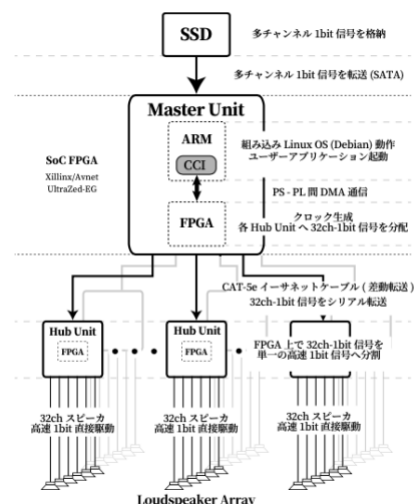


図 1：システム概要図

次に、構築したシステムを用いて無響室実験を実施し、実測インパルス応答を用いた没入型2次元スピーカアレイによる局所音場合成によって作り出した波面と音像の関係を明らかにする目的で、複数の局所領域においてダミーヘッドを用いた両耳間レベル差を用いた評価を行い、局所領域の位置や合成手法にもよるが、所望の音像定位を作り出すことが可能であることを確認した(図2)。



図2：無響室実験の様子

分散配置されたスピーカシステムを組みやすくなることで、これまで物理音場制御技術を実測データで検討、また、このような物理音場再現が人の知覚に与える影響の検討が進むことが期待される。今後は、これらのシステムの安定的な利用に向けて改良を重ねつつ、実測実験を加速させ、物理音場制御技術および音空間の知覚/認知の発展に貢献する。

(2) 動的局所音場合成

多チャンネル物理音場合成の実装において、スピーカの設置の物理的制約は、再現可能な周波数へ大きな影響を与えることが知られている。一方で、一般的な再現手法では、スピーカアレイに囲まれた領域すべてが再現領域とするが、これを頭部を取り囲むのに十分な領域のみに制限する局所音場再現では、より高い周波数まで音場を制御可能となる。しかし、再現領域が狭まることにより聴取者の動きは制限されてしまう。そこで、聴取者の動きに合わせて動的に局所音場合成をする手法を提案する(図3)。

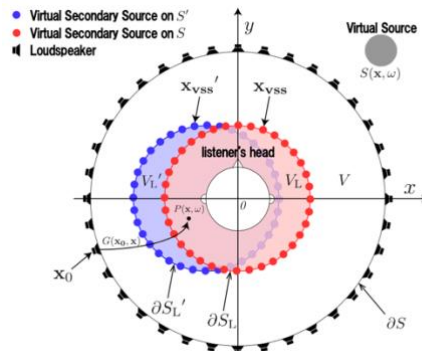


図3：動的局所音場制御の概念

頭部の位置の変更に合わせて離散的に局所音場合成領域を切り替える必要がある。この時、合成領域の位置によって再現精度が不均一であることが、聴感上にクリックノイズや定位感への影響を生じさせる可能性がある。シミュレーション実験によってこれらの影響を評価し、実現可能な再現領域切替速度で聴感への影響を抑えることが可能であることを明らかにした(図4、図5)。

動的局所音場制御は、聴取者の自然な動きを許容しつつ、高精度に音場を再現を可能にする点で従来困難であった身体的自由度の高いバーチャルリアリティ空間の実現や、音空間情報が与える音声の非言語情報の解明など、様々な発展が見込まれる。今後は、複数人での聴取や遠隔コミュニケーションへの応用などに向け、実用化を進める。

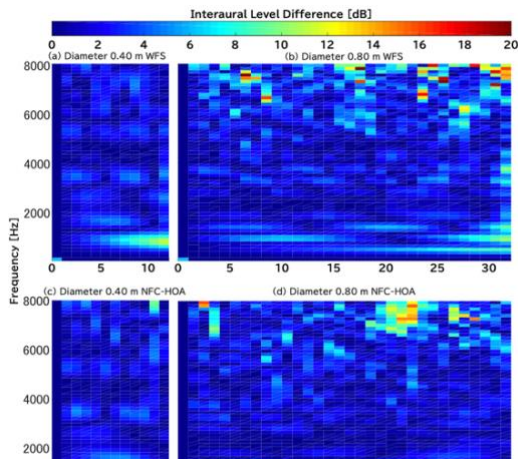


図4：仮想2次音源を用いた局所音場合成の合成位置による両耳間レベル差の変化

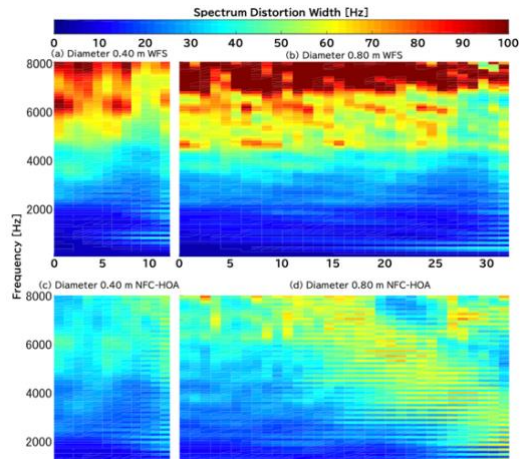


図5：仮想2次音源を用いた局所音場合成の合成領域切替時のスペクトル歪み

(3) 空間インパルス応答推定とその局所音場合成への適用

音場再現技術を実装する際に、その室内の音響特性を補正する目的で、多点の室内インパルス応答 (Room Impulse Response : RIR) が必要となる。特に、Pressure Matching 法のように、直接多数の点を制御する手法は単純でありながら有効だが、多数点の RIR を計測すること自体が困難であった。そこで、少数マイクロホンの RIR からその周囲の RIR を推定する手法を提案する (図 6)。音伝搬の物理モデルとなる音源を基底として導入し、多くの場合事前におおよその位置が知ることが可能な自らが設置したスピーカの位置情報や壁面の位置に基づいて、仮想的に音源を配置し、少数の計測情報に基づいて、周辺音場を表すのに最適な基底音源の線形和を求める。シミュレーションと実測により、初期反射音まで含めた RIR に対して有効であることが示された。RIR の推定技術は、音場合成のみならず、多くの音響技術にとって有益であり、音場の可視化など様々な技術への応用され発展することが期待される。

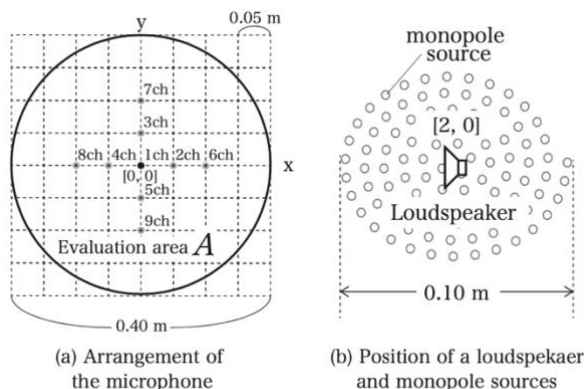


図 6 : 等価点音源を用いた少数マイクロホンを用いた局所音場インパルス応答の推定の概念図

さらに、RIR 推定技術を用いて Pressure Matching 法を拡張した局所音場制御技術を提案した (図 7)。各スピーカから特定の領域の伝達関数を少数のマイクロホンで計測しておくことで、従来よりも効率的な計測が可能になる。また、直接音のみを検討したシミュレーションでは、多数点を計測した場合と同等の程度の再現精度を実現可能であることが明らかとなり、その有効性が確認された (図 8)。Pressure Matching 法は音場合成の中でも、アクティブノイズコントロールなど他の音場制御手法にも応用されており、提案手法は他の音場制御手法に広く活用できる可能性があり、快適な音環境の実現にも寄与することが期待される。

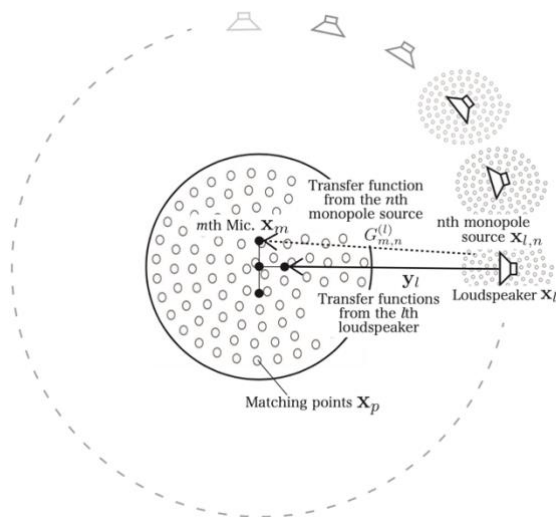


図 7 : 等価点音源を用いた局所音場インパルス応答の推定を用いた Pressure Matching 法の概念図

今後は無響室および実環境での実測実験へと評価実験を進め、後期残響音も含めた環境下での再現性能の評価や信号処理手法の改良を行う。

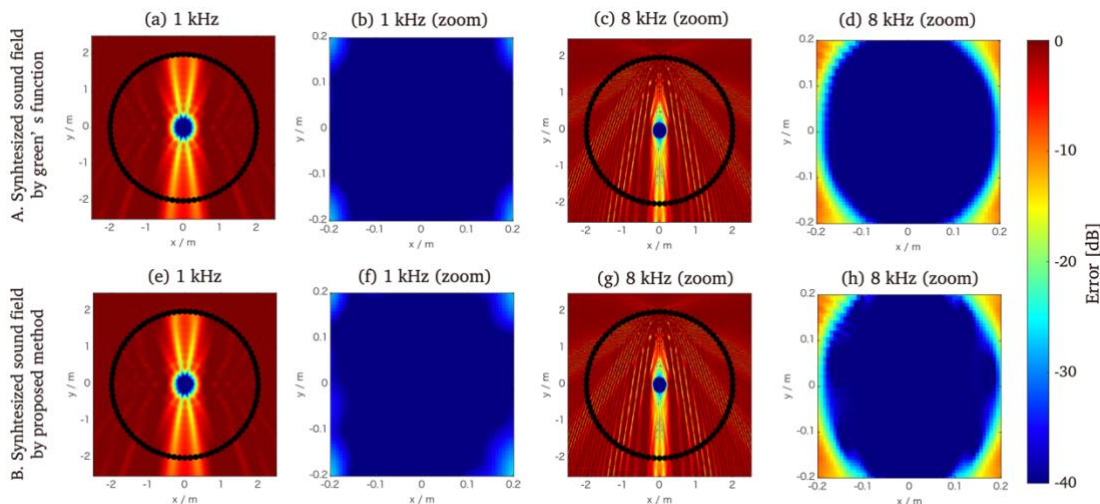


図 8 : 等価点音源を用いた局所音場インパルス応答の推定を用いた Pressure Matching 法のシミュレーション結果の一例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 黒川 翔瑠, 津國 和泉, 池田 雄介, 小坂 直敏, 及川 靖広
2. 発表標題 多チャンネル高速1bit信号を用いた局所音場合成による音場の可聴化
3. 学会等名 日本音響学会アコースティックイメージング研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中琴美, 津國和泉, 池田雄介, 小坂直敏
2. 発表標題 等価点音源による局所音場への一次反射音伝達関数の推定
3. 学会等名 2019年日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒川 翔瑠, 津國 和泉, 渡辺 靖明, 池田 雄介, 小坂 直敏, 及川 靖広
2. 発表標題 多チャンネル高速1bit信号を用いた動的局所音場合成システム
3. 学会等名 2019年日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 津國和泉, 黒川翔瑠, 池田雄介
2. 発表標題 仮想スピーカを用いた局所音場合成における頭部反射の再現精度への影響
3. 学会等名 2019年日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒川翔瑠, 津國和泉, 池田雄介, 及川靖広
2. 発表標題 仮想スピーカを用いた動的局所音場合成の基礎的検討
3. 学会等名 2019年日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒川 翔瑠, 津國 和泉, 池田 雄介, 小坂 直敏, 及川 靖広
2. 発表標題 多チャンネル高速1bit信号を用いた没入型3次元音場再生システム
3. 学会等名 2018年日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 津國 和泉, 黒川 翔瑠, 池田 雄介, 小坂 直敏
2. 発表標題 Focused Sourceを用いた二領域共有音場制御における再現精度
3. 学会等名 2018年日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kakeru Kurokawa, Izumi Tsunokuni, Yusuke Ikeda, Naotoshi Osaka and Yasuhiro Oikawa
2. 発表標題 Effect of Switching Reproduction Area in Dynamic Local Sound Field Synthesis
3. 学会等名 2019 IEEE 8th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Izumi Tsunokuni, Kakeru Kurokawa, Yusuke Ikeda and Naotoshi Osaka
2. 発表標題 Modeling of Direct-Sound Transfer Functions in Local Area by Sparse Equivalent Sources
3. 学会等名 2019 IEEE 8th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Izumi Tsunokuni, Kurokawa Kakeru and Yusuke Ikeda
2. 発表標題 Pressure-matching-based 2D sound field synthesis with equivalent source array
3. 学会等名 International Congress on Acoustics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kurokawa Kakeru, Izumi Tsunokuni, Yusuke Ikeda and Yasuhiro Oikawa
2. 発表標題 Dynamic local sound field synthesis with multi-channel 1-bit signal reproduction system
3. 学会等名 International Congress on Acoustics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Izumi Tsunokuni, Kakeru Kurokawa, Yusuke Ikeda, Naotoshi Osaka
2. 発表標題 Sound Field Reproduction in Prism-Type Arrangement of Loudspeaker Array by Using Local Sound Field Synthesis
3. 学会等名 2018 AES INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPATIAL REPRODUCTION AESTHETICS AND SCIENCE (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kakeru Kurokawa, Izumi Tsunokuni, Yusuke Ikeda, Naotoshi Osaka, Yasuhiro Oikawa
2. 発表標題 Three-Dimensional Large-Scale Loudspeaker Array System Using High-Speed 1-Bit Signal for Immersive Sound Field Reproduction
3. 学会等名 2018 AES INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPATIAL REPRODUCTION AESTHETICS AND SCIENCE (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	及川 靖広 (Oikawa Yasuhiro) (70333135)	早稲田大学・理工学術院・教授 (32689)	