

令和元年5月24日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H01736

研究課題名(和文) ADVISE理論に基づく自由聴取点高精細3次元音空間システムの開発

研究課題名(英文) Development of free-listening-point 3D sound systems based on ADVISE theory

研究代表者

鈴木 陽一 (SUZUKI, Yoiti)

東北大学・電気通信研究所・教授

研究者番号：20143034

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,900,000円

研究成果の概要(和文)：アクティブリスニングに対応可能な自由聴取点音空間情報制御システムの開発を目指し、研究代表者等の独自技術である仮想球モデルに基づく3次元聴覚ディスプレイADVISEの高度化とシステム実現を進めた。仮想球の内側(仮想球から聴取者まで)の音場合成法を精緻化し、仮想球の外側の音場合成にARDを用いることによりシステム実装した。

アクティブリスニングに対応した高精細3次元音空間情報取得システムについて、コンパクト球状マイクロフォンアレイで集音した音空間情報の高効率信号処理法の開発を進めた。また、システム開発の基盤となる音空間知覚特性に関し、アクティブリスニング知覚過程の理解の深化を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、自由視聴点型音空間情報処理技術の基盤構築を研究代表者の独自技術であるADVISEに基づいて実現することができた。この技術は空間の把握に効果的なアクティブリスニング下で有効に機能することから、現実空間とサイバー空間の境界をシームレスにつなぐ音空間技術として大きな意義を有する。また、開発したアルゴリズムは、教室程度の部屋であれば、既に現状の高性能コンピュータを用いることにより実時間の計算も可能であることが示された。これは、今後の音に関するVR技術を根本的に高度化するシリコンコンサートホール技術の実現基盤を構築しえたものとして極めて大きな学術的、かつ社会的意義を有する。

研究成果の概要(英文)：Our aim is to develop high-definition, 3D sound systems that can control a free-listening point in order to support human active listening. To this end, we developed an advanced and high-precision 3D auditory display based on the theory of ADVISE, i.e. using the virtual sphere model proposed by the project's PI. We succeeded in refining the theory behind sound field synthesis within a virtual sphere. We then considered the sound field outside of the sphere, i.e. sound propagation throughout the room or hall that was virtually presented to the listeners based on ARD. Combining these results, we succeeded in developing a 3D auditory display based on ADVISE.

As a complement to these technologies, we also developed high-definition and efficient systems for the acquisition of 3D spatial sound information using compact, spherical microphone arrays.

Moreover, we also investigated the perceptual aspects of spatial hearing in humans under active listening conditions to accumulate new knowledge.

研究分野：音情報科学

キーワード：音空間 聴覚ディスプレイ アクティブリスニング ADVISE 球状マイクロフォンアレイ ARD 高次元ソニックス spherical audio

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現実空間とサイバー空間の境界をシームレスにつなぐ空間情報処理技術の必要性が高まっている。空間の把握には空間内の移動が極めて効果的であることから、今後の空間処理技術は自由視聴点型とすべきである。また映像技術と相乗効果を発揮させる形でさらに革新させる必要があり、それには高精細度のみの追求ではなく、環境に応じた精細度とシステム規模をもつ技術の開発が必須であると考えた。

2. 研究の目的

本研究では、映像空間情報と大きな相乗効果を持ち豊かな高次感性を有する音空間情報処理技術を大きく進歩させ、それを通じコミュニケーション技術の高度化に大きな寄与を果たすことを最終目的とする。それに向けて、人間のアクティブリスニング過程に対応する音空間システムの開発を実現することを目的とし、代表者の独創技術で仮想球モデルに基づく3次元聴覚ディスプレイ設計理論 ADVISE (Auditory display based on virtual sphere model, 図1) を基盤として、上記要件を満たす革新的な3次元音空間情報制御・取得技術の開発と、システム高度化に活用しうる知覚情報学研究を行う。

具体的には、(1)自由聴取点聴空間情報制御システムの開発と、(2)聴取者の動きに対応した高精細3次元聴空間情報取得システムの開発を行う。あわせて、システムの高度化につながる音空間知覚特性として(3)聴取者運動時の音空間把握特性の解明の3つのサブテーマについて研究を進める。

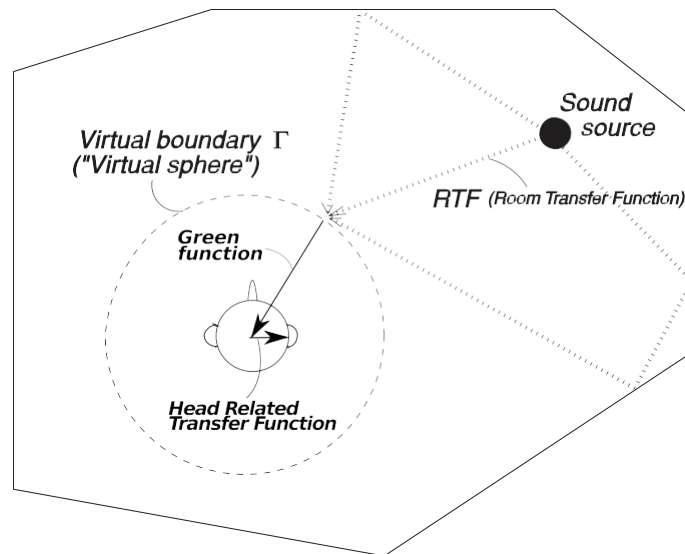


図1 ADVISE が用いる仮想球モデルの概念図

3. 研究の方法

3.1 自由聴取点聴空間情報制御システムの開発

バイノーラル出力型 ADVISE 信号処理の実装に必要な信号処理技術の精緻化、高度化を進める。そのため、オリジナルな ADVISE の2重仮想球に加え、球座標を基盤とした高次アンビソニクス (High-order Ambisonics, HOA) を用いて一重仮想球上の音場情報から出力信号を得る信号処理方式を開発する。

3.2 聴取者の動きに対応した高精細3次元聴空間情報取得システムの開発

代表者らが世界を先導するコンパクト球状マイクロフォンアレイで集音した聴空間情報について、音源の距離を集音後に任意に変更するアルゴリズムの実装と、多チャンネル集音信号の冗長性を利した信号圧縮法の開発を行う。

3.3 聴取者運動時の音空間把握特性の解明

スピーカの直線移動装置と、受聴者が知覚した音像位置と頭部の位置と回転角を同時に測定する装置を構築。この装置を用いて、静止音源の音像、あるいは移動音源の音像軌跡を聴取する場合の知覚特性を、受動的な聴取を行う場合と能動的 (アクティブリスニング) の場合を設定し、心理物理学手法により系統的に調べる。併せて、聴取者が受動的に運動している際に自己運動を知覚しうる条件の検討を進める。以上から、アクティブリスニング知覚過程の解明を進める。

4. 研究成果

4.1 自由聴取点聴空間情報制御システムの開発

アクティブリスニングに対応可能な自由聴取点音空間情報制御システムの開発を目指し、研究代表者等が基本原理の提案を行った仮想球モデルに基づく3次元聴覚ディスプレイ設計理論

である ADVISE の高度化とシステム実現を進めた．第 2 年度までに仮想球の内側（仮想球から聴取者まで）の音場合成法として HOA を用いる新しい信号処理法の定式化を終えた．図 2 に点音源による 3 次元音場の合成例を示すように，提案法により高精度な音場合成が実現されていることが見て取れる．さらに，仮想球の外側空間(部屋)の音伝搬特性合成には新しい FDTD (Finite-difference time-domain method) アルゴリズム ARD (Adaptive rectangular decomposition) を用いることによりシステム実装し，複数の具体的部屋形状について実際にレンダリング出力を得ることができた．また，その結果から，教室程度の部屋であれば現在の高性能コンピュータを用いることにより実時間の計算が可能であることが明らかになった．

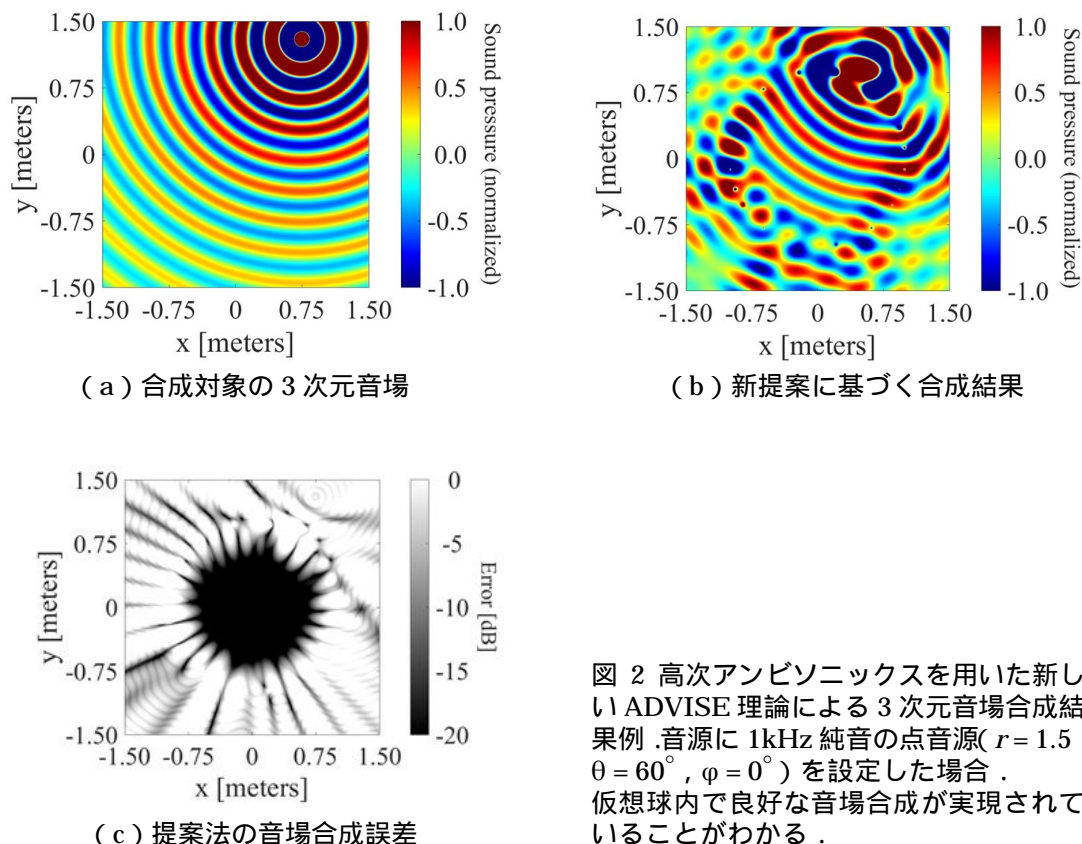


図 2 高次アンビソニクスを用いた新しい ADVISE 理論による 3 次元音場合成結果例．音源に 1kHz 純音の点音源($r = 1.5$, $\theta = 60^\circ$, $\varphi = 0^\circ$)を設定した場合．仮想球内で良好な音場合成が実現されていることがわかる．

4.2 聴取者の動きに対応した高精細 3 次元聴空間情報取得システムの開発

小型球状マイクロフォンアレイ出力に音の波動性を考慮した信号処理を加えることにより，音源の距離を集音後に任意に変更するアルゴリズム DVF (Distance-varying filter) の開発と実装を進めた．また，同マイクロフォンアレイで集音した聴空間情報について，集音信号の統計的性質を利用して伝送情報量を圧縮する信号処理法について検討した．その結果，入力チャンネル間の相関を用いた信号処理を行うことにより，マイクロフォンアレイの出力信号を大幅に削減できることを示した．さらに，複数の小型球状マイクロフォンアレイを用いて音源位置を正確に定める信号処理手法の開発を行った．

4.3 聴取者運動時の音空間把握特性の解明

アクティブリスニング下の音空間知覚過程の解明を進めた．構築したスピーカ直線移動装置と，音像位置および頭部の位置と回転角の同時測定装置を用い，静止音と直線移動音について受動，能動の 2 受聴姿勢のもとで音像定位実験を行った．その結果，静止音源の音像定位については，アクティブリスニングによって定位精度が向上することを再確認するとともに，壁からの反射波が引き起こす定位の偏位も解消することが明らかになった．移動音源の音像軌跡の追跡は，受動聴取および能動聴取のいずれの場合でも可能であったが，壁からの反射波が引き起こす音像軌跡の湾曲は能動聴取によって解消することが示された．また，聴取者が受動的に回転運動している際の音像定位精度の低下が自己運動知覚の有無によるトップダウン的要因によることを示唆する成果を得た．そこで，受動的回転運動中に自己運動を知覚しうる条件の検討を進めた．

以上の検討の結果，ADVISE 理論に基づく高度なバイノーラル型聴覚ディスプレイの設計理論の構築と，実装を達成するとともに，聴覚ディスプレイと両輪を成す音空間情報収録技術の高度化を果たした．あわせて，音空間システムの設計法高度化の基盤となる，アクティブリスニング知覚過程に関する様々な新知見を得ることができた．

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計10件)

1. Hu S., Salvador C., Trevino J., Sakamoto S. and Suzuki Y., “Modeling head-related transfer functions with spherical wavelets,” Applied Acoustics, 146, 81-88 (2019) (査読有り)
2. Honda, A., Tsunokake, S., Suzuki, Y. and Sakamoto, S. “Effects of listener's whole-body rotation and sound duration on horizontal sound localization accuracy,” Acoust. Sci. & Tech., 39, 305-307 (2018) (査読有り)
3. 鈴木陽一, トレビーニョ ホルヘ, 坂本修一, “超高臨場感空間音響技術の最新動向と将来展望,” 通学誌, 101, 786-792 (2018) (編集委員による査読有り)
4. Salvador C., Sakamoto S., Trevino J. and Suzuki Y., “Boundary matching filters for spherical microphone and loudspeaker arrays,” IEEE Trans. Audio, Speech & Language Proc., 26, 461-474 (2018) (査読有り)
5. Cui Z., Sakamoto S., Gyoba J. and Suzuki Y., “Influence of visual depth and vibration on the high-level perception of reality in 3D contents,” J. Inf. Hiding & Multimedia Sig. Proc., 8, 1382-1391 (2017) (査読有り)
6. Salvador C., Sakamoto S., Trevino J. and Suzuki Y., “Enhancement of spatial sound recordings by adding virtual microphones to spherical microphone arrays,” J. Inf. Hiding & Multimedia Sig. Proc., 8, 1392-1404 (2017) (査読有り)
7. Salvador C., Sakamoto S., Trevino J. and Suzuki Y., “Design theory for binaural synthesis: combining microphone array recordings and head-related transfer function datasets,” Acoustical Sci. & Tech., 38, 51-62 (invited review, 2017) (査読有り)
8. サルバドル セザル, 坂本修一, トレビーニョ ホルヘ, 鈴木陽一, “マイクロホンアレイと頭部伝達関数に基づくバイノーラル信号収録再生法的设计理論,” 音響誌, 73, 189-196 (2017) (編集委員による査読有り)
9. Salvador C., Sakamoto S., Trevino J. and Suzuki Y., “Spatial accuracy of binaural synthesis from rigid spherical microphone array recordings,” Acoustical Sci. & Tech., 38, 23-30 (2017) (査読有り)
10. Honda A., Ohba K., Iwaya Y. and Suzuki Y., “Detection of sound image movement during horizontal head rotation,” i-Perception 7, 1-10 (2016) (査読有り)

〔学会発表〕(計33件)

1. Kurachi S., Morikawa D. and Hirahara T., “The effect of head orientation on the sound-image localization of a sound source near a reflective wall,” Universal Acoustical Communication 2018, 2-p ms, (2018)
2. Shi J., Salvador C., Trevino J., Sakamoto S. and Suzuki Y., “Spherical harmonic representation of rectangular domain sound fields,” Universal Acoustical Communication 2018, 2-p ms. (2018)
3. Trevino J., Sakamoto S. and Suzuki Y., “Revisiting the Theory of Auditory Displays based on the Virtual Sphere Model,” Universal Acoustical Communication 2018, 4-p ms. (2018)
4. Salvador C., Sakamoto S., Trevino J. and Suzuki Y., “Enhancing binaural reconstruction from rigid circular microphone array recordings by using virtual microphones,” AES Intl. Conf. Audio for Virtual and Augmented Reality, P6-1, 9-p ms. (2018)
5. Salvador C., Sakamoto S., Trevino J. and Suzuki Y., “Dataset of near-distance head-related transfer functions calculated using the boundary element method,” 2018 AES Intl. Conf. Spatial Reproduction, 38, 9-p. ms. (2018)
6. Trevino J., Sakamoto S. and Suzuki Y., “Extending the listening region of high-order Ambisonics through series acceleration,” 2018 AES Intl. Conf. Spatial Reproduction, 43, 7-p ms. (2018)
7. Sakamoto S., Salvador C., Trevino J. and Suzuki Y., “Binaural rendering of spherical microphone array recordings by directly synthesizing the HRTF spatial pattern,” 24th Intl. Cong Sound & Vib., 8-p ms (invited lecture, 2017)
8. Shimizu T., Trevino J., Sakamoto S., Suzuki Y. and Ise T., “Multi-zone reproduction of a shared sound field including distance effects,” 24th Intl. Cong. Sound & Vib., 8-p ms. (2017)
9. Trevino J., Salvador C., Braciulis V., Sakamoto S., Suzuki Y., Yoshikawa K., Yamasaki T. and Kidokoro K., “Sound source separation in complex environments using an array-of-arrays microphone system,” 22nd International Congress on Acoustics, ICA2016-415, 10-p ms (2016)
10. Salvador C., Sakamoto S., Trevino J. and Suzuki Y., “Numerical evaluation of binaural synthesis from rigid spherical microphone array recordings,” 2016 AES Intl. Conf. Headphone Technology, 3-1, 8-p ms. (2016)

他

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：行場 次郎
ローマ字氏名：(GYOBA, Jiro)
所属研究機関名：東北大学
部局名：文学研究科
職名：教授
研究者番号(8桁)：50142899

研究分担者氏名：坂本 修一
ローマ字氏名：(SAKAMOTO, Shuichi)
所属研究機関名：東北大学
部局名：電気通信研究所
職名：准教授
研究者番号(8桁)：60332524

研究分担者氏名：平原 達也
ローマ字氏名：(HIRAHARA, Tatsuya)
所属研究機関名：富山県立大学
部局名：工学部
職名：教授
研究者番号(8桁)：80395087

研究分担者氏名：本多 明生
ローマ字氏名：(HONDA, Akio)
所属研究機関名：静岡理工科大学
部局名：情報部
職名：准教授
研究者番号(8桁)：80433564

(2)研究協力者

研究協力者氏名：TREVINO, Jorge

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。