

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24240016

研究課題名(和文) 高精細 3次元音空間情報のセンシングとディスプレイ技術の開発

研究課題名(英文) Development of high-definition 3D sound information sensing systems and 3D auditory displays

研究代表者

鈴木 陽一 (SUZUKI, Yo-iti)

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) 34,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、コミュニケーション技術の高度化に極めて有効な3次元音空間情報のセンシングとディスプレイに関する基盤研究の開発を、3次元音空間知覚特性の解明とあわせて推進した。その結果、センシング技術では、球面調和関数展開を規範とした球状と円柱状のマイクロホンアレイを用い、頭部伝達関数表現法の高度化などを達成した。ディスプレイ技術では、複数聴取点において同時に高精度に音空間情報を提示可能なアンビソニック技術の定式化などを行った。また、臨場感を高める上で必須の音空間知覚機序の解明では、頭部運動中は音空間知覚精度が低下するという、将来のシステム応用に向け興味深い知見を得、その知覚モデルの検討を行った。

研究成果の概要(英文)：To aim at advancing communications technologies, this study has tackled with developing basic technologies to sense and display 3D sound space information along with accumulating knowledge on human information processing of 3D spatial hearing, which is crucial to enhance the sense of presence. As for sensing technology, we have conducted research with spherical and cylindrical microphone arrays. One main result is formulation of new representation methods of head-related functions with the arrays. As for display technology, we have formulated, for example, new display algorithm which reproduce high-definition 3D sound field information at multiple areas. Moreover, as for spatial hearing, we have found a new phenomenon that the precision of human spatial hearing becomes worse when a listener is moving both actively and passively than that when a listener is still. We also try modelling this mechanism. This finding seems effective to develop future high-definition 3D sound systems.

研究分野：情報学

キーワード：音空間知覚 空間音響 3次元音響 聴覚ディスプレイ マイクロホンアレイ デジタル信号処理 音信号処理 アクティブリスニング

1. 研究開始当初の背景

聴覚は視覚と並んで遠感覚に分類され、身体から少し離れた身の回りの環境の様子を知るための感覚系であって受容しうる情報量も大きい。また、視覚と異なり、全方位の情報の取得が可能であるという、大きな特徴を有しており、その入力情報は臨場感を司る大きな要因の一つである。このため、コミュニケーション技術の高度化に極めて有効な3次元音空間情報の取得と再生を高精度で行うシステムの実現には、知覚上、十分に高精細な音場・音空間情報のセンシングと、厳密に音場情報を提示する技術(聴覚ディスプレイ)の開発が必要不可欠である。そのためには、原理的に厳密な音場情報の取得・合成が可能であることと、迫真性や臨場感などの高次感性情報を高める上で重要な聴取者の動的挙動への対応が可能であることが必須である。

しかし、厳密に3次元音場情報を提示しようとする、システムの規模が膨大となる。このため、高精度な音場再現に基づく技術は期待とは裏腹に、実際のシステムの構築には高いハードルが存在する。また、音空間情報の高精細センシングは聴覚ディスプレイと両輪の重要課題である。しかし、聴覚ディスプレイ技術に比べると、音空間情報センシング分野の研究は、比較的少数のマイクロホンを空間内に配置する技術の開発に留まるなど、かなり遅れていたと言わざるを得ない。

2. 研究の目的

以上の背景を考慮すると、本研究の目的は、これらの特性を持つキルヒホッフ・ヘルムホルツ方程式や球面調和展開に基づく方法と音伝搬伝達関数合成法を用い、3次元音空間情報のセンシングならびに聴覚ディスプレイを対象として、その高度化と合理的なシステム規模による実現技術を開発することである。以上の背景のもと、聴覚ディスプレイ技術、音空間のセンシング技術、および音空間知覚過程に関連して、以下の課題に取り組む。

(1) ディスプレイ技術

音場再現型聴覚ディスプレイのシステム規模問題に対して合理的な規模での解決を図り、個人化された高精細音空間の提示技術を開拓する。

(2) センシング技術

これまで構築してきた多チャネル球状マイクロホンアレイの高精度化と、これを用いた音場情報の高精細取得技術を開発する。

(3) 音空間知覚過程

開発したディスプレイ技術とセンシング技術を主観的、客観的に評価するばかりでなく、センシングの精度と提示の精度が音空間知覚に対して与える影響について調べ、聴感上真に必要なシステムの精度について検討する。

3. 研究の方法

音空間情報のディスプレイ技術とセンシング技術、音空間知覚過程の解明に分けて研究を推進する。

(1) ディスプレイ技術

厳密な音場再現のための合理的なシステム実装を目指し、Ambisonics法とバイノーラル合成技術を主な対象として、次の3項目について検討を行う。

① Ambisonics法において高精度聴取領域を拡大するための新手法の定式化。

② キルヒホッフヘルムホルツ積分方程式法、Ambisonics法らの融合と高速計算器を用いたバイノーラル提示技術の開発。

③ 聴取者の移動を考慮したトランスオーラル型バイノーラル信号提示技術の開発。

(2) センシング技術

これまで構築してきた多チャネル球状マイクロホンアレイを基軸として、次の2項目について検討を行う。

① 球面調和解析に基づくAmbisonics球状マイクロホンアレイを用いた音空間情報の情景分析法の構築。

② 超多チャネル球状マイクロホンアレイを用いて人間の空間知覚特性を加味した新しい音伝達関数直接合成手法の開発。

(3) 音空間知覚過程

開発したセンシング、ディスプレイ技術を用いて、提示する音空間を系統的に操作し、その音を聴取刺激とした心理物理学的聴取実験を行い、次の2点について検討する。

① 聴取者が移動しているときの動的3次元音空間知覚過程の解明。

② 音空間知覚過程のモデル化。

4. 研究成果

(1) ディスプレイ技術

Ambisonics法は音場情報を高精度に再現できる領域を一つしか生成できず、かつ、その領域が狭いという問題があった。これに対し、複数領域を同時に再現することで複数の聴取者に対応するという手法が提案されていたが、これらは3次元音場を再現することができないほか、音場を再現するために極めて多くのスピーカが必要であり、必要なスピーカ数が比較的少なくすむというAmbisonics法の大きな特徴が失われてしまっていた。従来法では、複数領域に同一の音場情報の再現を目指していたが、各々の領域に同一の音場情報を再現するのではなく、それぞれに原音場にある別の領域の音場情報を再現することを発想した。これにより、合理的なスピーカ数で、かつ、3次元の音場情報を複数の領域で再現することができる新しい信号処理アルゴリズムを定式化した。その結果、領域の数を複数としても、同時に高精度に音空間情報を提示可能なことが確認

された。

また、バイノーラル提示による聴覚ディスプレイ技術の最終段である聴取者への音提示デバイスについて、スピーカを使用したトランスオーラル型を想定し聴取者の微小な動きにも頑健に動作するクロストークキャンセラ用スピーカ配置について研究を進めた。クロストークキャンセラ用スピーカ配置の検討では、新しい評価指標を提案することで、5 度程度の聴取者の頭部位置変化にも頑健に対応することができるものであった。

更に、上述のトランスオーラル型聴覚ディスプレイを聴取者の動きに対応させることが臨場感の向上に極めて効果的であることから、ステレオカメラを用いて聴取者の頭部の動きをセンシングする新しい技術の開発を行った。開発した、ステレオ画像間のマッチングに位相限定相関法を用いた聴取者の頭部位置センシング法は、シンプルな処理ながら聴取者の比較的はやい頭部運動にも十分に追従することができることが示された。この技術は、ごく少数のスピーカ数で聴取者に適切な音空間を提示するために必須の技術であり、高精度な音空間を合理的なシステム規模で実現する際の要素技術となる。

(2) センシング技術

球面調和関数展開を規範とした球状 Ambisonics マイクロホンアレイを用いた 3 次元音空間収録再生技術において、音空間情景分析に必須の要因となる距離情報の編集手法を提案した。

超多チャネル球状マイクロホンアレイを用いた 3 次元音空間収録再生技術において、音空間情景分析に必須の要因となる距離情報の編集手法を提案した。また、頭部伝達関数の測定位置、密度と再現音空間精度の検討を行った。頭部伝達関数の表現手法についても、球体との形状の差分に基づいて頭部伝達関数が有する急峻なピークやディップを吸収する表現手法を提案した。

更に、アンビソニックスを規範とした音空間収録再生手法に関し、水平方向の音空間知覚精度の方が垂直方向の音空間精度に比べて低い人間の特性を反映させることが可能など、通常の球状配置のものに比べ人間との親和性の高い手法として、円筒形に配置したマイクロホンとスピーカアレイを用いた円筒型アンビソニックスの提案を行った。この手法は、リング上に構成したマイクロホンとスピーカを円筒状に複数個配置し、リングの数、配置間隔を適応的に変えることで、収録・再現する音空間の精度を方向ごとに変えることが可能となるものである。

(3) 音空間知覚過程

聴取者が移動しているときの動的 3 次元音空間知覚過程に関しては、従来、頭部が運動している、まさにその時点での音空間知覚に関する研究は極めて限定的であった。しか

し、高い臨場感の実現には、人間が頭や体を動かしたときに、それに対応した音空間情報を聴覚特性の変化を踏まえて提示する必要がある。そこで、頭部を自ら能動的に回転させた場合と、ターンテーブル上で受動的に回転した場合について、回転の速度を広範囲に変化させ、音空間知覚との関連を詳細に検討した。その結果、頭部運動中は能動、受動いずれの条件においても音空間知覚精度が低下するという興味深い知見が得られた。また、この現象はマルチプルルックモデルにより説明が可能であることを示した。

本研究プロジェクトを通して、これまでにない新しい音空間センシング、ディスプレイ技術が提案でき、当初の目的を超える成果を達成できたものと考えている。今後はこの提案技術をより深化させるとともに、新しい空間表現方法としてインタラクティブメディアなどにおけるディスプレイ技術としても展開していく予定である。

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 21 件) 全て査読有り

1. T. Shimizu, J. Trevino, S. Sakamoto and Y. Suzuki, "Multi-zone approach to sound field reproduction based on spherical harmonic analysis" Acoust. Sci. & Tech., in press (2015)
2. T. Shimizu, J. Trevino, S. Sakamoto and Y. Suzuki, "Multi-zone sound field reproduction algorithm based on spatial harmonics analysis" Proc. NCSP'15, 28AM2-1-1 (2015)
3. Jorge Trevino, Shoichi Koyama, Shuichi Sakamoto and Yôiti Suzuki, "Mixed-order Ambisonics encoding of cylindrical microphone array signals" Acoust. Sci. & Tech., 35(3), 174-177, 2014.
4. Kanji Watanabe, Yukio Iwaya, Yôiti Suzuki, Shouichi Takane, and Sojun Sato. "Dataset of head-related transfer functions measured with a circular loudspeaker array." Acoust. Sci. & Tech. 35, no. 3, pp. 159-165, 2014
5. Jorge Trevino, Takuma Okamoto, Yukio Iwaya, Yôiti Suzuki, "Sound Field Reproduction Using Ambisonics and Irregular Loudspeaker Arrays," IEICE Tran. Fund., E97-A(9), 1832-1839, 2014.
6. Cesar Salvador, Shuichi Sakamoto, Jorge Trevino and Yôiti Suzuki "Embedding distance information in binaural renderings of far field recordings" Proc. EAA Joint Symp. on Auralization and Ambisonics 2014 (7 page ms) (2014).

7. Yoshiki Satou, Shuichi Sakamoto and Yôiti Suzuki, "HRTFs representation based on weighting coefficients calculated by SENZI system" Proc. NCSP'14, 1AM1-2-3, 29-32 (2014).
 8. Yoji Masumi, Yôiti Suzuki, Akio Honda and Shuichi Sakamoto, "Listener's subjective front in horizontal sound localization: Effects of head movements and face directions" Proc. NCSP'14, 1AM1-2-4, 33-36 (2014).
 9. Majdak, Piotr; Iwaya, Yukio; Carpentier, Thibaut; Nicol, Rozenn; Parmentier, Matthieu; Roginska, Agnieszka; Suzuki, Yoiti; Watanabe, Kankji; Wierstorf, Hagen; Ziegelwanger, Harald; Noisternig, Markus, "Spatially oriented format for Acoust.tics: A data exchange format representing head-related transfer functions." Proc. Audio Engineering Society Convention 134, (2013).<http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=16781>
 10. Jorge Trevino, Takuma Okamoto, Yukio Iwaya, Yoiti Suzuki, Junfeng Li, "Extraction of horizontal Ambisonics data from mainstream stereo sources," Proc. IAH-MSP 2013, IS12-07 (4 page ms) (2013).
 11. Jorge Trevino, Takuma Okamoto, Cesar Salvador, Yukio Iwaya, Zhenglie Cui, Shuichi Sakamoto and Yôiti Suzuki, "High-order Ambisonics auditory displays for the scalable presentation of immersive 3D audio-visual contents" Proc. the 23rd International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT2013), D5 (2 page ms) (2013).
 12. Cheolsu Han, Takuma Okamoto, Yukio Iwaya, Yôiti Suzuki, "Loudspeaker distributions suitable for crosstalk cancellers robust to head rotation", Acoust.t. Sci. & Tech., 33, 266-269, 2012.
 13. Yôiti Suzuki, Jorge Trevino, Takuma Okamoto, Zhenglie Cui, Shuichi Sakamoto and Yukio Iwaya, "High definition 3D auditory displays and microphone arrays for the use with future 3D TV" (invited lecture) Proc. 3DSA, (4 page ms) (2013).
 14. Cesar Salvador, Shuichi Sakamoto, Jorge Trevino, Junfeng Li, Yonghong Yan and Yôiti Suzuki "Accuracy of head-related transfer functions synthesized with spherical microphone arrays" Proc. The 21st ICA, 055085, pp. 1-9 (2013).
 15. J. Trevino, T. Okamoto, Y. Iwaya and Y. Suzuki, "Evaluation of different spatial windows for a multi-channel audio interpolation system" Proc. The 21st ICA, 055028, 9-page ms, Jun. 2013.
 16. Cheolsu Han, Takuma Okamoto, Yukio Iwaya, Yôiti Suzuki, "Loudspeaker distributions suitable for crosstalk cancellers robust to head rotation" Acoust. Sci. & Tech., Vol. 33 (2012) pp.266-269
 17. Yôiti Suzuki, Takuma Okamoto, Jorge Trevino, Zheng-Lie Cui, Yukio Iwaya, Shuichi Sakamoto and Makoto Otani, "3D spatial sound systems compatible with human's active listening to realize rich high-level kansei information", Interdisciplinary Info. Sci., 18(2), 71-82, 2012.
 18. Shuichi Sakamoto, Hiroshi Mishima and Yôiti Suzuki, "Effect of consonance between features and voice impression on the McGurk effect", Interdisciplinary Info. Sci., 18(2), 83-85, 2012.
 19. Yukio IWAYA, Takeru CHIBA, Makoto OTANI, Satoshi YAIRI, Maori KOBAYASHI, and Yôiti SUZUKI, "Consideration of Effective Acoust.tic Rendering of Spatialized Ambient Sound", Interdisciplinary Info. Sci., 18(2), 93-98, 2012.
 20. Trevino, Y. Iwaya, Y. Suzuki, T. Okamoto, "Ambisonic synthesis of directional sources using non-spherical loudspeaker arrays," Proc. of 25th AES UK Conference (2012) 10 (5 page ms) 2012
 21. Y. Iwaya, M. Otani, Y. Suzuki, "Effective Rendering of Ambient Sounds in Virtual Auditory Display" (invited lecture) Proc. of Inter-noise 2012, in12_652 (4 pages ms) (2012)
- [学会発表] (計 42 件)
1. 増見洋治, 本多明生, 鈴木陽一, 坂本修二 "受動回転中の主観的正面における音像定位弁別限" 電子情報通信学会 HIP 研究会, 2014 年 12 月 1 日~2 日, 東北大学 (宮城県仙台市)
 2. 本多明生, "能動的な聴取訓練は何をもたらすか: 聴覚 VR ゲームの転移効果" (招待講演) 日本音響学会春期研究発表会, 2014 年 3 月 10 日~12 日, 日本大学 (東京都千代田区)
 3. 岩谷幸雄, 庄子拓也, 川崎誉洋, 千葉順子, 大谷真, 土屋隆生 "遠隔レンダリング型聴覚ディスプレイの試作", 電子情報通信学会 EMM 研究会, 2014 年 1 月

27日～28日，東北大学（宮城県仙台市）

4. 岩谷幸雄，庄子拓也，川崎誉洋，土屋隆生，大谷真 “クラウド型聴覚ディスプレイの遅延解析” 電子情報通信学会2014年総合大会，2014年03月18日～21日，新潟大学（新潟県新潟市）

他38件

〔図書〕（計 0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0件）

○取得状況（計 0件）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木陽一 (SUZUKI, Yōiti)
東北大学・電気通信研究所・教授
研究者番号：20143034

(2) 研究分担者

岩谷幸雄 (IWAYA, Yukio)
東北学院大学・工学部・教授
研究者番号：10250896

坂本修一 (SAKAMOTO, Shuichi)
東北大学・電気通信研究所・准教授
研究者番号：60332524

本多明生 (HONDA, Akio)
山梨英和大学・人間文化学部・准教授
研究者番号：80433564

大谷智子 (OTANI, Tomoko)
東北大学・電気通信研究所・助教
研究者番号：40422406