

氏名（本籍地）	いせ ともひこ 伊勢 友彦
学 位 の 種 類	博士（情報科学）
学 位 記 番 号	情博第 540 号
学位授与年月日	平成 24 年 7 月 12 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研 究 科、専 攻	東北大学大学院情報科学研究科（博士課程）システム情報科学専攻
学 位 論 文 題 目	小閉空間における大局的音場合成法の研究
論 文 審 査 委 員	（主査） 東北大学 教授 鈴木 陽一 東北大学 教授 中尾 光之 東北大学 教授 伊藤 彰則 東北大学 准教授 岩谷 幸雄 (工学研究科)

## 論文内容の要旨

### 第 1 章 序論

現代社会において自動車は欠くことのできない移動手段の一つであり、車内をより便利で快適に過ごしたいという要望がますます強くなっている。このような要望に応えるものとして、音楽や音情報を提供する手段としてのカーオーディオシステムの重要性が増している。しかし車室内の音響特性は近接反射音や定在波の影響により劣悪なものとなっており、これによって音質の劣化や、音情報の正確な伝達に支障をきたす場合が生じる。本研究では、このような車室内の劣悪な音響特性を改善し、望ましい音場を合成するシステムの実現を目指す。

車室内で快適な音環境を創り出す音場合成システムの実現のためには、複数の乗員が着座する広い範囲を合成対象とする必要がある。つまり車室内における大局的音場合成の実現が望まれている。従来、大局的な音場合成に用いられる手法として、多点合成法、Kirchhoff-Helmholz 積分方程式に基づく音場合成法、モーダルモデルに基づく手法がある。しかしこれらの従来法を車室内のような小閉空間音場に用いた場合の、大局的な音場合成性能についての検討は充分になされていない。また、実用化の観点から音場合成システムの規模をできるだけ小さくすることが重要であるが、この点についての検討も充分になされていない。そこでまず、従来法を車室内のような小閉空間音場に用いた場合の音場合成性能について検討を行い、その問題点について整理して論じる。さらに音場合成システムでは、音圧や粒子速度などの物理量を設定・観測する空間点の数が合成性能やシステムの規模に影響するため、従来法の検討では空間点の数についても着目して論じる。そして従来法を小閉空間音場に用いた場合の問題点をふまえ、新しい手法を提案することが本研究の大きな目的である。本論文の構成を図 1 に示す。まず第 2 章では、従来法を小閉空間音場に用いた場合の音場合成性能とシステム規模の大きさについて検討を行い、その問題点について整理して論じる。第 3, 4, 5 章では従来法の問題点を改善する新しい手法を提案する。第 6 章では、第 3, 4, 5 章での提案手法を比較整理し特徴をまとめた上で、カーオーディオに適用する際の今後の展望について述べる。

## 小閉空間に適用可能で小規模な大局的音場合成システムの構築

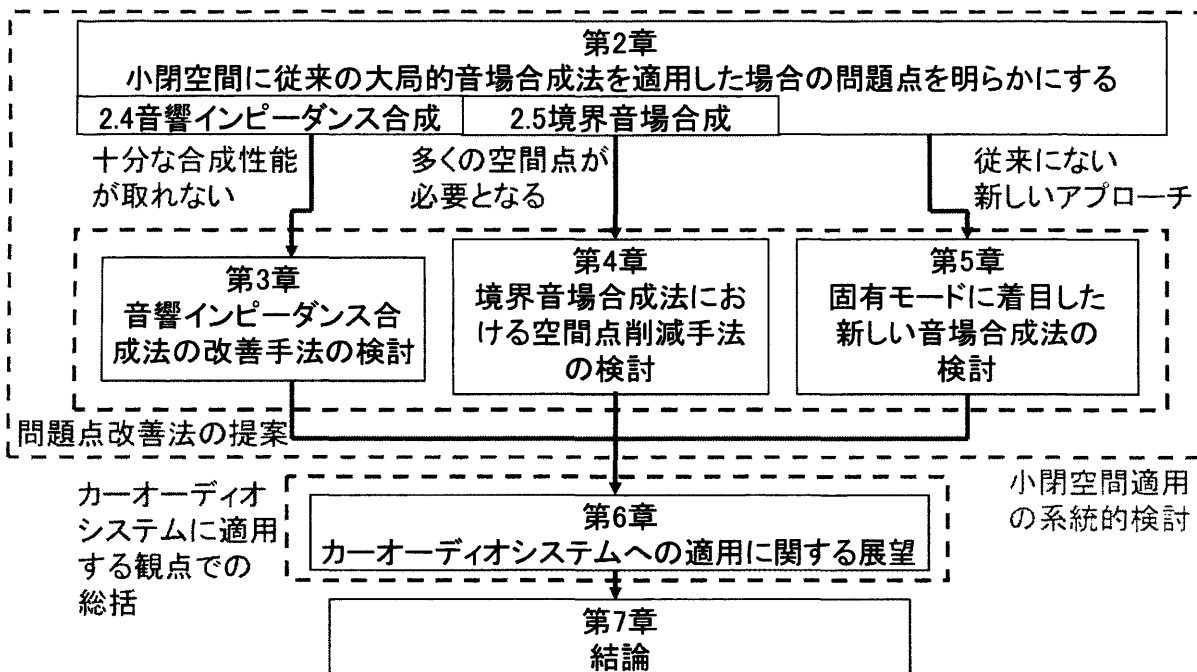


図1 本論文の構成

### 第2章 大局的音場制御法の小閉空間音場への適用

第2章では従来法を車室内のような小閉空間音場に用いた場合の問題点について検討した。従来法として、多点制御法から音圧合成に基づく音場合成法と音響インピーダンス合成法を、Kirchhoff-Helmholz 積分方程式に基づく音場合成法から境界音場合成手法(boundary surface control : BoSC)と境界一付加音圧設定点合成法 (boundary and additional-points sound pressure control : BAPC)を選び検討の対象とした。多点音場合成法について検討した結果、小閉空間音場では充分な音場合成性能を得られないことが問題点として示された。Kirchhoff-Helmholz 積分方程式に基づく音場合成法では充分な音場合成性能を得られたものの、実用化の観点ではシステム規模が大きいたことが課題であることが問題点として示された。

### 第3章 3次元粒子速度に着目した多点音圧合成法による大局的音場合成法の提案

第2章の検討で、従来の多点音場合成法では小閉空間音場で充分な音場合成性能を得られなかった。そこで第3章では多点音場合成の一つである音響インピーダンス合成法を改善した、粒子速度に着目した多点音圧合成法 (multiple point sound pressure synthesis focused on 3-dimensional particle velocity : MPSV) を提案し、その効果について検討した。その結果、提案法が音響インピーダンス合成法や多点での音圧合成による伝達関数合成法、BoSC、BAPC と比べて、空間点間隔を広く取ることができることを示した。しかしながら、粒子速度に着目したために音圧設定点数としては増加するため、音圧のみに着目する BAPC よりシステム規模が大きくなることが示唆された。

### 第4章 内部 Dirichlet 問題の固有関数に着目した境界音場合成法における音圧設定点削減法の提案

第2章の検討で、従来の Kirchhoff-Helmholz 積分方程式に基づく音場合成法では実用化の観点で

システム規模の削減が必要であった。そこで第4章では、Kirchhoff-Helmholz 積分方程式に基づく音場合成の一つである BAPC 法についての音圧設定点の削減法について検討を行い、その効果について検討した。まず、境界面の配置に起因する内部 Dirichlet 問題の固有関数に着目した制御点配置指標（*CI* 値）を導出し、その基準に従って配置した境界面上の音圧設定点のレイアウトが、同じ数の等間隔レイアウトと比べ音場合成性能が良くなることを示した。さらに、小閉空間内における合成領域の境界面位置が音場合成性能に及ぼす影響について、音圧設定点の配置に関するモード固有関数に着目した性能指標（*NMI* 値）を導出し、*NMI* 値が 1 に近い合成領域の配置を取る場合には音場合成性能が良くなる傾向があることを示した。このような検討により、BAPC 法における少ない音圧設定点での音場合成性能改善法を提案した。

## 第5章 閉空間の固有モードに着目した大局的音場合成法の提案

第5章では、モーダルモデルに基づき、閉空間音場の固有モード振幅を調整して重ね合わせることで所望の音場を合成する、新しい音場合成法（global sound field synthesis focused on eigen-modes : GSEM）を提案し、その効果について検討した。この中では、提案法の原理、本手法における最適な音源配置指標、小閉空間音場に適用した時の音場合成性能について検討をおこなった。その結果、提案法は音圧設定点数と同程度の数の対象固有モードを調整して所望の音場を合成可能であることが示された。この手法は固有モードを分解して観測する必要があるために、適用できる音場が制限されるものの、小閉空間音場の低周波数帯域のように強いモードの固有周波数が分散している場合には、対象とするモードを分解しやすく、かつ、モード数を少なくでき、本手法の適用が効果的となる。

## 第6章 カーオーディオシステムへの適用に関する今後の展望

第6章ではまず、第3章から第5章において提案した手法に関し、音場合成性能とシステム規模の観点から比較整理し、それぞれの提案手法の特徴をまとめた。その結果を表1に示す。そして、この

表1 提案法の特徴比較

合成原理	多点合成	境界音場合成	モーダルモデル
提案法	MPSV法(第3章)	音圧設定点削減 BAPC法(第4章)	GSEM法(第5章)
空間点 間隔	0.8m (0.58 $\lambda$ )	0.4m~0.8m (0.29 $\lambda$ ~0.58 $\lambda$ )	0.4m~0.67m (0.29 $\lambda$ ~0.49 $\lambda$ )
音圧設 定点数	18	11	12
音源数	19	12	10
長所	・空間点間隔を広く取ることができる。	・比較的小さなシステム規模で十分な合成性能が得られている。	・比較的小さなシステム規模で十分な合成性能が得られている。
短所	・十分な合成性能を取るため他の提案法より多くの音圧設定点が必要となっている。	—	・小さな閉空間音場でのみ効果のある手法。

内容を踏まえ、現在実用化されているカーオーディオシステムの規模を「最高級システム」、「中高級システム」、「一般システム」に分け、それぞれの規模のシステムに対しどのように適用していくかについて検討を行い提案した。これにより、本研究の目的として掲げた、「小規模な大局的音場合成システム」の実現に結びつくものとする。しかしその一方では、さらなるシステム規模の削減と、合成周波数帯域の拡大に向けた検討が必要であることが残された課題として挙げられた。

## 論文審査結果の要旨

自動車への高度な情報通信技術の導入に伴い、カーオーディオシステムは車室における音情報提示システムとしての役割をますます強めており、その特性の更なる改善が望まれている。著者は、車室が反射性の素材で囲まれた狭い空間であることに起因する劣悪な音場特性の改善が重要と考え、その実現には聴取点のみならずそれを含む一定の領域を対象として音場を合成する技術、すなわち大局的音場合成法が有望であると考え、その実用化を目指した研究に取り組んできた。本論文はその成果をまとめたもので全編7章からなる。

第1章は序論である。

第2章では、大局的音場合成に用いられる4つの従来技術について、車室程度の小閉空間音場における音場合成性能と必要なシステム規模について検討し、それらの改善点や問題点と、解決の方向性について論じている。

第3章では、従来の多点音圧合成法の特長改善を目指し、音場のみならず粒子速度の合成にも着目した新しい合成法を提案し、従来法に比べ、システム規模については検討の余地があるものの優れた特性を持ちうることを示している。これは音の進行方向を陽に考慮した新しい大局的音場合成法の提案として評価できる。

第4章では、従来法の中では優れた性能を示すBAPC法のシステム規模削減法について検討している。音場合成領域の内部Dirichlet問題の固有関数に基いた定量指数を導入し、これが大きくなるように音圧設定点配置を定めることにより、同数の音圧設定点を等間隔にした場合に比べ音場合成誤差が3dB程度改善されることを示している。これは、実用システムを目指す上で有効な提案と評価できる。

第5章では、これまで大局的音場合成には用いられていなかったモーダルモデルに基づく新しい合成法GSEMを提案し、その性能を評価している。その結果、従来法及び本研究で提案した他の2法にくらべ、少ない音源数で良好な合成性能が得られることを示した。これは、大局的音場合成技術により車室内音場の特性向上を実現するための実用的技術の提案として高く評価できる。

第6章では、本研究で提案した3つの技術を今後のカーオーディオシステムに実際に適用する際の適切な方策を、想定されるシステムの規模ごとに論じている。これは、今後のシステム実用化に向け有効な論考であると評価できる。

第7章は結論である。

以上、要するに本論文は、自動車の車室内における劣悪な音場特性を実用化可能なシステム規模で改善するための新しい大局的音場合成技術を提案し、その実現のための道筋を示したものであり、音情報科学ならびにシステム情報科学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。