

きんじょう しょうた	
氏 名	金城 翔太
本 籍 (国 籍)	沖 縄 県
学 位 の 種 類	博士(工学)
学 位 記 番 号	工博 第284号
学位授与年月日	平成30年 3月23日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当 課程博士
研究科及び専攻	工学研究科電気電子・情報システム工学専攻
学位論文 題目	パラメトリックスピーカによる可動ビーム生成と空間センシングに関する研究
学位審査委員	主査 教授 安倍 正人
	副査 教授 永田 仁史
	副査 教授 萩原 義裕

論 文 内 容 の 要 旨

パラメトリックスピーカは、変調した超音波の自己復調作用を利用した音響装置であり、出力音響ビームが鋭い指向性をもつ。狭い音響ビームの中でのみ可聴音が生成されることを利用し、特定位置のみに音響情報を伝えるアナウンスシステムや遠距離メガホンなどが実用化されている。また、出力デバイスが多数の振動子から構成されるため、各素子の駆動信号を制御して音響ビーム全体の出力方向を変化させるビームステアリング機能を実現することができ、これを可聴範囲の制御に利用した試作システムなどが報告されている。

本論文は、パラメトリックスピーカの特徴である鋭い指向性とステアリング機能に注目し、音響ステアリングビームによる空間センシングを実現し、人の動きに追従してその人だけに音響情報を伝えることができるような、新しい音響システムの構築に関して述べる。

まず、パラメトリックスピーカシステムにおいてステアリング処理を伴ったビーム出力を行うための駆動システムの開発について検討した。扱う周波数が超音波領域であり、且つ、多チャンネルであることから演算量が多く、空間センシングと音響情報出力の複数の処理をPC上で実時間処理するには、従来システムで使用されている多数のフィルタ処理を極力削減する処理法が必要であった。これを解決するため、スピーカ駆動信号生成のために従来から用いられているフィルタを用いた片側側波帯(SSB)変調処理とステアリングのための遅延処理をすべて周波数領域処理に置き換えるとともに一括で行う方式を提案し、スピーカ駆動信号生成のための実時間システムを開発した。

開発したスピーカ駆動システムに関して性能評価したところ、駆動信号生成とステアリング処理に関しては、従来の時間領域のフィルタを用いる場合に比べて

演算時間が約 4 割となり、想定している 64ch システムでのリアルタイム処理が可能であることがわかった。さらに、空間センシング用ビームと音響情報出力用の 2 つのビーム出力を想定した場合については、従来処理がステアリング処理が倍になる分大幅に増加するのに対し、本システムではほとんど処理時間は増加せずリアルタイム処理可能であり、時間領域から周波数領域への単なる置き換え以上の演算量削減効果が確認できた。

次に、スピーカデバイス本体に関して検討した。スピーカ本体は、従来、10mm ϕ 程度の小型の超音波振動子を密に配置した規則配列のデバイスが用いられているが、規則配置の場合は出力ビームの指向性上に大きな副極が出易く、その出方は側方へのステアリング時に顕著になるため、空間センシングに大きな悪影響を及ぼす。そこで、本システムでは、振動子を平面上の 18cm ϕ の円内にランダムに配置して副極を抑えるランダム配置スピーカを設計、製作した。配置に関しては、計算機シミュレーションによって多数の配置パターンの中から、想定するステアリング角度全域に亘って副極レベルが最も低くなるものを選んだ。素子は 16mm ϕ と比較的大きめの素子を用いており、これは、システム出力チャンネル数が装置による制限から最大 64 と制限され、十分なパワーでビーム放射するには大きなサイズの素子が必要となったことによる。スピーカに関しては、さらに、素子特性のばらつきの問題があることがわかり、その補正についても検討し、振幅の変化するテスト信号を用いた反復処理により、搬送波周波数に関しては出力特性の非線形性の影響を回避してばらつき補正が行えることが確認できた。

開発したランダム配置スピーカの評価のため指向性を測定したところ、従来の規則配置スピーカで出現した大きな副極が大幅に抑えられ、復調音についてはさらに副極抑圧効果が高く得られた。また、ばらつき補正によってフェーズドアレー処理の場合の副極レベルがわずかに改善し、これに加えて目的ステアリング方向ごとの主極と副極のレベル差を最大化するように設計したビームフォーマ係数を用いてステアリング処理した場合、さらに副極レベルを低減できることが確認できた。

開発したパラメトリックスピーカシステムが処理性能と指向性について十分な性能を持っていることが確認できたことから、ステアリングビームを用いた空間センシングについて検討した。物体の反射面の向きによって反射音を受音できない場合があるが、複数のセンサを異なる位置に設置してその可能性を低くした。スピーカ近傍に置いた基準センサの信号と各受音センサの間の相互相関関数に基づいて物体位置の可視化像を計算したところ、半球状の物体については正確にその位置を検出することができ、人については、一部分だけその位置を検出できる結果となった。これらは、異なる複数の帯域においてそれぞれ可能であったため、音響情報の伝達と並行して物体位置検出が可能であることがわかった。

論文審査結果の要旨

パラメトリックスピーカは、超音波振動子から変調超音波を出力し、その自己復調作用を利用して可聴音を伝えるデバイスであり、可聴音域でも指向性が鋭いため「音響スポット」を実現するデバイスとして美術館等の説明用アナウンスに使われている。また、多素子から構成されることを利用して出力方向を電氣的に変えるビームステアリングが可能であることも重要な特徴である。本論文は、この二つ特徴を積極的に利用する空間センシングシステムの開発を目的とし、ステアリング機能搭載のスピーカ駆動システム、および、音響による物体検知に適したスピーカデバイスの提案・開発とその評価について述べている。

第1章は研究背景と目的の説明である。

第2章では、まず、従来のパラメトリックスピーカ駆動システムの構成と問題点について述べ、スピーカ駆動用の全搬送波単側波帯(SSB-WC)変調信号生成とビームステアリングが各々フィルタリングを含み、特に、多チャネルフィルタからなるステアリングの演算量が大幅に嵩むことを指摘している。この問題改善のため、入力信号の離散フーリエ変換(DFT)における帯域シフトと位相シフトを、各々、変調とステアリングに対応させた DFT 上の一括処理による省演算量の駆動システムを提案している。提案法においては、DFT の帯域シフトに起因した隣接フレーム間の位相歪について指摘し、その除去法を提案している。さらに、従来の規則的素子配置のスピーカで出現する高レベルの副極が空間センシングにおいて問題になることから、副極抑圧のためのランダム素子配置スピーカの提案とその開発、および、これを用いた本システムの全体構成について述べている。周波数領域一括処理による駆動システム、ランダム素子配置スピーカ、ともに従来にない方式の提案である点で評価できる。

第3章は、提案駆動システムの性能評価であり、演算量と駆動・再生信号の精度に関して従来システムと比較している。演算量に関しては、1本のビーム出力時に従来システムの約4割に演算時間を削減できている。複数ビーム放射時においても、従来システムがビーム数分のステアリング処理を要するのに対し、提案システムは全ビームの処理が DFT 上の一括処理に含まれるため、わずかな演算量増加に留まることを確認している。これは、64チャネルのスピーカの場合、PCによる実時間処理が並列化やアクセラレータなしで可能な演算量であり、PC単体の実時間システム実現は画期的である。また、音声の復調音については、ビームステアリング角度 $\pm 35^\circ$ の範囲で原信号に対するSN比がほぼ一定の約22dBとなり、一定幅のステアリング角度に亘って高精度な再生音が得られている。パラメトリックスピーカの自己復調音は補正が必要な程度に歪んでいるのが普通であるが、ここで得られた再生精度は通常得られない良い値であり、高く評価できる。

第4章は、開発したランダム素子配置パラメトリックスピーカの性能評価である。指向性測定の結果、指定方向にビームの主極が現れると同時に、格子配列スピーカと比較して副極レベルが大幅に抑えられ、目的とする指向特性が実現され

ていることを確認している．さらに，超音波振動子の振幅特性のばらつきと非線形性について検討し，反復的な音響出力による振幅補正法を提案している．この方法に基づいた振幅補正について評価した結果，最大副極レベルを最小化するように設計したビームフォーマの場合に副極レベルの減少が見られている．副極は空間センシングにおいて虚像発生の原因となることから，この問題を素子配置，ビームフォーマ，ばらつき補正の3面から改善し，ほぼ問題ないレベルに抑えた点は高く評価できる．

第5章は，開発した駆動システムとランダム素子配置スピーカを用いた空間センシングの検討である．空間センシングは，ビームステアリングにより対象空間を走査し，反射波の遅延時間に基づいて物体位置の可視化像を求める方法を用いている．実験の結果，人体については衣服表面などでのビームの吸収により部分的にしか検出できなかった一方，硬い球形の物体についてはその位置を確実に検出することができている．また，複数の周波数帯域で物体検出を行えたことから，音声伝達と並行して音声伝達とは別の帯域で物体検出を行うことが可能であることを確認している．この結果により，従来になかったパラメトリックスピーカを用いた物体検出を改善の余地はあるものの実現できたことになり，大変画期的であるといえる．

第6章は結論であり，今後の課題についても述べている．

以上のように，本論文は，スピーカ本体を含む新しいパラメトリックスピーカシステムを提案，開発，性能評価してその高い性能を明らかにし，また，パラメトリックスピーカの新しい応用である空間センシングへの有用性についても確認している．これは，音響工学やアレー信号処理工学の研究発展に大いに寄与するものである．

よって，本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める．

原著論文名（1編を記載）

周波数領域処理を用いたパラメトリックスピーカ駆動システム,金城翔太,永田仁史,藤岡豊太,安倍正人,電子情報通信学会論文誌 A（採録決定）