

氏 名	本郷 哲
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 7 年 3 月 24 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気及通信工学専攻
学 位 論 文 題 目	複数センサによる音響ホログラフィ法の 音源探査への応用に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 中鉢 憲賢
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 中鉢 憲賢 東北大学教授 曾根 敏夫 東北大学教授 根元 義章 東北大学助教授 安部 正人

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

騒音制御, 音による機械や生体の診断, また複数のセンサを用いた指向性合成による音声の高精度収録等を行う上で, 音源探査は重要な技術である。このような背景から, 従来から様々な音源探査法が提案されているが, 雑音に対する安定性, 計測にかかるコスト, 空間分解能など全ての面からすぐれた音源探査法は提案されていない。

音響ホログラフィ法は, 比較的雑音に対する安定性が高く, 音源探査法として従来からしばしば用いられてきたが, 参照センサを用いた際の雑音や反射波に起因する不安定性及び, 低い空間分解能などの問題が残されたままであった。

本論文は, 種々の音源探査法の中から雑音に対する安定性が良い音響ホログラフィ法を取り上げ, その実用化を目指して, 雑音に対する安定性を保ちながらコストを低減し, さらに空間分解能を向上させる方法について研究を行った成果を述べたものである。

第 2 章 音響ホログラフィ法とその周辺の研究

本章では, 従来から行われてきた音響ホログラフィ法を用いた音源探査法についてその原理を述べ, 実用上の問題点を数式解析により明らかにした。

まず, 遠距離音場における音響ホログラフィ法の原理を述べ, 実用化の際にセンサ数を有限とす

るために生じる原理上の2つの問題点を述べた。第1の問題点は、センサ間隔が有限長に広がることであり、折り返し歪みの原因となる。第2の問題点は、測定面の開口長が有限となることであり、このために実用上の空間分解能は波長と同程度となる。

次に、センサのコストを低減する方式として、従来から行われてきた、参照センサを用いたクロススペクトルによる音響ホログラフィ法の原理を示した。この中で、クロススペクトルによる方法では参照センサに雑音や反射音が混入する場合には、ホログラフィ像の再生結果に大きな影響を与えることを数式解析により明らかとした。

第3章 遠距離音場音響ホログラフィ法におけるセンサ配列の影響

本章では、遠距離の音響ホログラフィ法においては、測定面上のセンサ間隔が理論上のナイキスト条件を満たさない場合でもフレネルの領域（音源と測定面の距離が波長の数倍程度）に音源とセンサがあれば主極の再生パワーに比べ折り返し歪みによる虚像のパワーが小さくなることに着目し、実用に適したセンサ配置を数値計算によって与えた。

ホログラフィ再生に影響を与えるパラメータと考えられる、測定面開口長、測定面の高さ、センサ間隔、音源位置を変化させ、網羅的な数値計算を行なった。図1は、測定面開口長を 10λ とし、測定面の音源から高さを 3λ としたときに、センサ間隔を変化させたときの主極の半値幅と第2の極の大きさを示している。この結果より、測定面上のセンサ間隔が波長と同程度であっても主極のパワーに比べ折り返し歪みによる虚像の影響は少ないことが明らかとなった。すなわち、従来の配置法に比べて $\frac{1}{4}$ のセンサ数で良いことが明らかとなった。

また、奥行き方向の分解能を上げるために層状にセンサを配列した場合について、最適な層アレイの組合せがあることを明らかにした。本章で明らかになったセンサ配列は、第4章に反映されている。

第4章 定常音に対する部分アレイを用いた音響ホログラフィ法

本章では、定常音を対象とした場合について、従来用いられてきた参照センサを使用せず、走査する部分アレイのみを用いて音響ホログラフィ法の再生像を推定する方式を提案した。従来のクロススペクトル方法と本提案法の原理を比較した結果を図2に示す。提案法は、beamformingによって特定の音源位置における音源波形を推定し、それを参照波として、干渉性を保ったまま部分アレイ間の同期をとるものである。この結果、雑音や反射音の影響を $1/(\text{センサ数})$ にすることができることを数式解析により、明らかにした。

図3は、無相関周期雑音を基準パワーに対して+6dB付加させ、目的音源のパワーを変化させたときに、従来法と提案法により得られた再生像のパワーを比較した結果（シミュレーション）である。太点線で示している提案法では、参照センサを用いた従来法（細点線）に比べ、目的音源のパワーが小さい領域でも真値の直線（太実線）に近い推定値が得られている。さらに、本章では、シミュレーションによる定量比較、モータサイクルを用いた実験を行ない、従来法に比べ最大で約10dB程度外部雑音を低減できることを明らかにした。また、従来法では測定帯域毎に参照位置を

変更する必要があったが、提案法では参照位置を計算機上で設定するので、このような測定上の複雑性も回避することが可能となった。

第5章 クロススペクトルの位相変化率と重み付き最小2乗法による音源探査能力の改善

本章では、クロススペクトルの位相の変化率を利用して高精度に音源位置を推定する方法を示した。本方法では有色信号に対しても位相の変化率を高精度に推定できるように、コヒーレンスで重みを付けた最小2乗法を適用する方法を示した。さらに、本章で述べるクロススペクトルの位相の変化率に着目して微小時間を計測する方法と音響ホログラフィ法との関連性は従来は指摘されていなかったが、この手法が最小のホログラムすなわちセンサ数が2であるときの、音源を白色化した音響ホログラフィ法と近似できることを数式により明らかにした。

また、シミュレーションによって、本方法の性能を調べた。図4は、2つのセンサに無相関な雑音を付加したときに推定精度がどのように変化するか雑音のパワーを変化させて調べたものである。真の時間遅延を $-(3/16)T$ (T はサンプリング周期)とし、平均回数20回の場合と50回の場合について推定を行なった。図4より、 S/N で約 -10dB 以下まで推定が可能であり、平均回数を増やすことによって無相関雑音の影響を抑えることが可能であることがわかった。また、相関雑音の影響も調べ、本方式が、推定空間内で最もパワーが最大となる音源1個を探査する性質があることを明らかとした。

さらに、本方法を利用して、頭蓋内音を用いた脳血管障害位置の推定を行なった。従来、頭蓋骨の内部の血管疾患から血流音が発生していることが報告されていたが、それを用いて疾患位置が探査されたことはなかった。さらに、2チャンネルで与えられていた本方法をより多くのセンサを用いることにより、3次元的に音源の位置を探査することができることを示した。また、(1)高振幅の時間窓を平均しない、(2)心電パルスより0.2秒付近から音波を切り出す、(3)位相の校正を行なう等により、血管障害位置を推定することができることを示した。図5にその結果を示す。推定位置と実疾患位置がよく一致している。この他、7名の患者中、高いコヒーレンスで測定ができた(センサが正しく取り付けられた)患者5名については、疾患の位置を正しく推定することができた。

第6章 結 論

本研究により、低コストで安定な音響ホログラフィ法による音源位置探査法を実用化することが可能となった。さらに、空間上最大のパワーを持つ音源の位置を非常に高い空間分解能で探査することが可能となった。これらの成果は、雑音や反射波の存在する一般の室における、より安定で低コストの音源探査、頭蓋骨内の血管障害位置の予備探査等に使用できるものである。

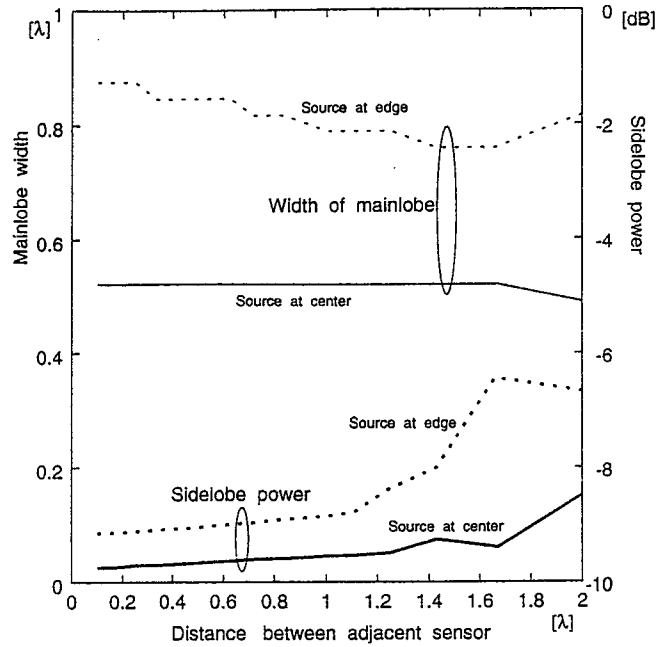
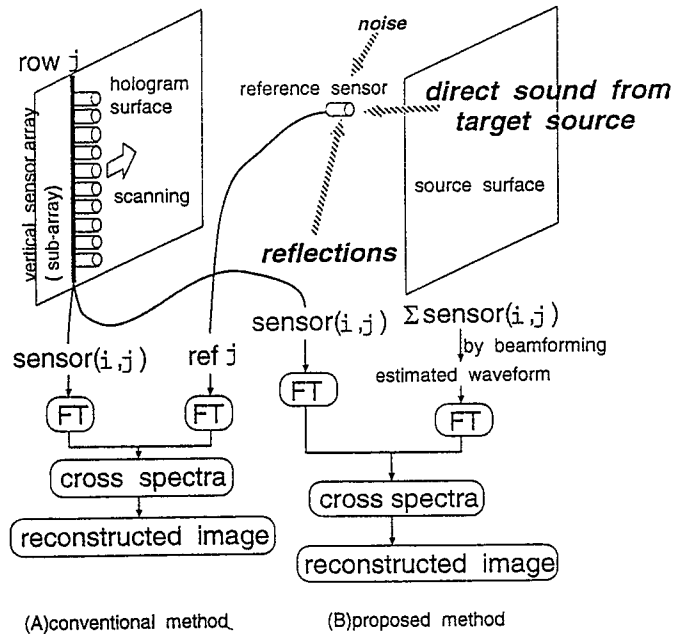


図 1 : センサ間隔を変化させたときの主極の半値幅と第 2 のピークの大きさ
(測定面開口長 : 10λ , 音源から測定面までの高さ : 3λ)



(A)conventional method

(B)proposed method

図 2 : 従来の参照センサを用いたクロススペクトルによる音響ホログラフィ法と提案法の違い

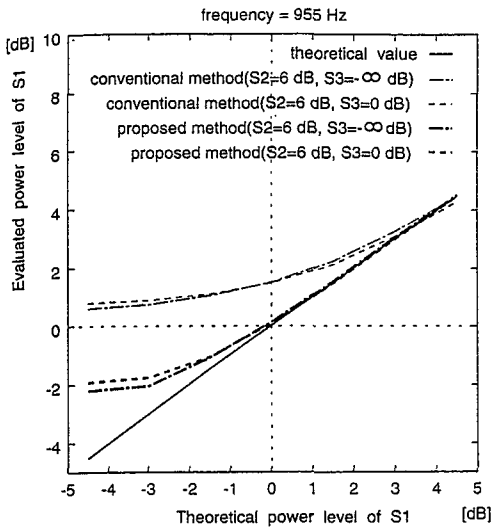


図3：目的音源パワーを変化させたときの再生像のパワーの変化

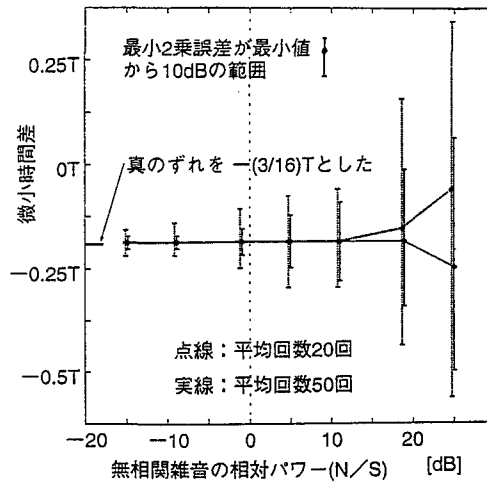


図4：2つのセンサに無相関な雑音を付加したときの推定結果

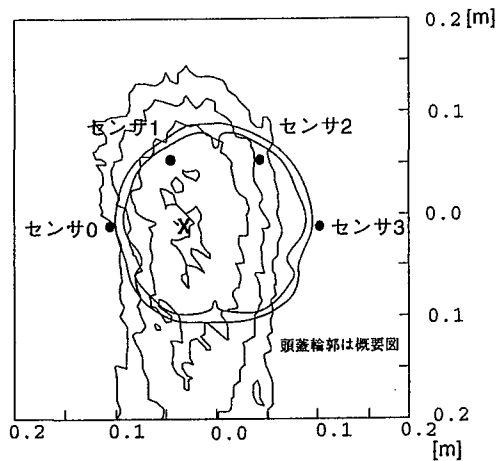


図5：3次元空間上の位置推定結果（54歳女性 左側に障害のある患者）
疾患名：左中大脳動脈瘤（MCA-AN）

審査結果の要旨

騒音制御や音による機械診断等を行なう上で、音源探査は重要な技術となっている。そのため、従来から様々な音源探査法が提案されているが、十分な空間分解能、ノイズに対する安定性、さらにコストの低減等が重要な課題である。著者はノイズに対する安定性が特に重要であると考え、音響ホログラフィ法による音源探査を取り上げ、その実用化に関して、コストの低減と空間分解能の向上を目指して研究を行なった。本論文は、それらの成果をまとめたもので、全文6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、音響ホログラフィ法の原理を述べ、実用上センサ間隔が広がることで生じる折り返し歪みによる虚像の問題、および空間分解能が波長程度しか得られないという問題があることを述べている。また、センサのコストを減らす目的で開発された参照センサと部分アレイを用いる方法では、参照センサに雑音や反射音が混入すると正しい音源探査が出来ないことを指摘している。

第3章では、実用の測定条件と考えられるフレネル音場では、発生する虚像の大きさが従来考えられていたより小さいことに着目し、センサ間隔を従来の倍まで上げられること、すなわち少ないセンサで同じ空間分解能を得ることが出来ることを明らかにした。この結果は、第4章で用いたセンサアレイの設計に反映されている。

第4章では、従来の音響ホログラフィ法における参照センサに雑音や反射音が混入すると正しい推定が行なえないという問題を解決するために、参照センサの代わりに、部分アレイによる指向性合成で得られた信号を用いる方法を提案している。これにより、雑音、反射波の影響を従来に比べ約10dB減らすことに成功している。また、この方法は、部分アレイの指向性を向ける参照音源の位置を計算処理上容易に変更できるので、解析周波数の変更に伴って、参照位置を変更する必要があった従来法に比べ、測定時間のコストを大幅に減らすことを可能にした。これは、実用上有益な成果である。

第5章では、センサペアのクロススペクトルの位相の変化率から音波の到達時間差を推定する際に、コヒーレンス関数で重み付けた最小2乗法を用いることにより、波長の1/10以下の高空間分解能で音源位置を探査することができ、しかも高い耐雑音性を有する新しい音源位置探査法を提案している。さらに、本手法を頭蓋内の血管障害位置の同定に応用している。すなわち、頭蓋内の血流音を前頭部に取り付けられた4つのセンサで検出し、その出力を計算機処理するもので、低コストかつ測定時間が短いという特徴がある。これは、新しい音響診断法として注目に値する。

第6章は、本論分の総括である。

以上要するに本論文は、音源探査法として音響ホログラフィ法を取り上げ、ノイズに対する安定性を保持しながら高い空間分解能及び低コストの音源探査装置を実現したもので、音響工学ならびに電気通信工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(工学)の学位論文として合格と認める。