

令和元年5月28日現在

機関番号：32689

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H07191

研究課題名（和文）音の光干渉計測におけるデータ解析手法の研究

研究課題名（英文）Studies on data analysis in optical sound measurement

研究代表者

矢田部 浩平（Yatabe, Kohei）

早稲田大学・理工学術院・講師（任期付）

研究者番号：20801278

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、光学的計測手法・光学的データ処理・音響的データ処理について研究を行った。光学計測では、空気中に密度の異なる気体を流入する可視化手法を提案し、これまで計測困難だった流れと音の同時取得を実現した。計測データの扱いに関しては、位相シフト干渉法の高度化に取り組み、非線形最適化による高精度な位相抽出を実現した。多方位からの観測データを用いて音響情報を復元する手法も提案し、これらによって光学的音響計測を高性能化することができた。さらに、音響信号に対する解析・処理手法についても研究を行い、光学的音響計測の高度化の可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、これまで計測することができなかった音場を観測することが可能となり、測定に基づいて音響現象を解析できる範囲を広げることができた。今後さらに研究を進めることで、産業的な需要は高いが計測が困難な音場を扱えるようになることが期待でき、そのためのステップを進めることができた点に本研究の学術的・社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, the following three topics were investigated: (1) optical measurement method; (2) optical data processing; and (3) acoustical signal processing. For measurement, a novel methodology, injecting gas in air, is proposed for simultaneously visualizing sound and air flow. A nonlinear-optimization-based accurate phase-retrieval method is also proposed to improve the performance of phase-shifting interferometry. Moreover, a signal processing method is proposed to recover acoustical information from multiple measurements. While these methods achieved much improvement of optical sound measurement, some analysis and processing methods for acoustical signals were also investigated, which indicated the improved potentiality of optical sound measurement.

研究分野：光学的音響計測

キーワード：並列位相シフト干渉法 偏光干渉計 音響光学効果 位相シフト干渉法 物理音響モデル

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

マイクロホンには実体があるので、微小領域や流れ内部など、マイクロホンでは原理的に測定できない音場が存在する。エンジン内部の状態の診断など、様々な場面で音情報は利用されているが、マイクロホンで計れない情報が重要な場合も多く、新たな音響計測手法が求められている。そこで、レーザー光を用いて非接触に音を計測する、光学的音響計測の研究を行っている。音は空気の疎密変化であり、音圧に応じて空気密度が変化するので、屈折率の変化として光に影響を与える。その屈折率の変化を光学干渉計を用いて計測すれば、光の変化から音の情報を得ることができる。光を用いることで、測定系を対象音場に設置する必要がないので、微小な領域でも流れ内部でも、測定光さえ適切な状態で通過することができれば、音の情報を得ることができる。すなわち、光学的音響計測によって、これまでの手段では計れない音場を計測することができるようになり、計測に基づく新たなモノづくりや物体診断などが実現できると期待される。

しかし、音による屈折率変化は非常に微弱であり、光学的音響計測にはノイズの問題がついてまわる。具体的に、見かけの光路長で 0.1 ナノメートル程度の変化を計る必要があり、それに対して誤差を少なく計測するのは難しい。そのため、これまでは基礎的な検討に留まっており、具体的な応用や実用のことなどについては検討されていない。

### 2. 研究の目的

本研究では、これまで発展させてきた光学的音響計測をさらに発展させ、現実問題へ適用可能な計測法にすることを目標に、光によって測定されたデータの解析手法について研究を行った。また、実際の問題に適用することを想定して、音響的な解析まで踏み込んで研究を行うことで、応用を見据えた研究を行った。

### 3. 研究の方法

光学的音響計測の方法として、偏光高速度カメラによって実装できる並列位相シフト干渉法（PPSI：parallel phase-shifting interferometry）を取り扱う。並列位相シフト干渉法は、通常の位相シフト干渉法で求められる複数枚の干渉縞画像を、並列に同時に計測する方法である。光路を分けることで複数の干渉縞を同時に作り出す方法も存在するが、本研究では偏光を用いて、光の強度ではなく偏光に干渉縞の情報を持たせる偏光干渉計を用いる。偏光干渉計によって、干渉の情報が偏光で表現されるので、偏光を計測する偏光カメラを用いれば、空間的に複数枚の干渉縞画像を得ることができる。特に、高速度撮影可能な偏光高速度カメラを用いることで、音のように高速に変化する物理現象を観測可能となる。具体的には、最大毎秒 100 万コマを撮影可能なので、数万コマ程度が要求される可聴音をサンプリング定理を満たしながら観測することが可能である。

変更高速度干渉計によって得られるデータは高速度映像なので、データ量としては大量の情報が含まれている。すなわち、測定対象が微弱でノイズが乗っていたとしても、大量のデータを適切に解析することで、ノイズを減らすことができると期待される。さらに、音響情報を取り出すことで、光学的な要因に起因する誤差も減らせると考えられる。そこで、データから必要な情報を適切に抽出する処理に関して検討を行い、応用上重要な課題を解決することを試みた。具体的には、位相シフトされた干渉縞の解析手法を提案し、また新たな計測法自体も提案することで、並列位相シフト干渉法が適用できる音場の範囲を広げた。さらに、複数のデータから元の音響情報を復元する方法も提案し、複数の観測が許される状況で音場が復元できるようにした。また、音響測定データから音響情報を解析する手法も提案し、得られた音響情報から意味を取り出すことについても試みた。

### 4. 研究成果

位相シフト干渉法の高度化を目指し、位相シフトされた干渉縞画像から光の位相分布を抽出する方法を提案した。位相シフト干渉法では位相シフトされた複数の干渉縞を用いることで精度良く位相分布を推定するが、その干渉縞における仮定が満たされていない場合はむしろ逆効

果となる場合もある。その問題に対し、位相シフトされた干渉縞の仮定を緩め、誤差が乗っていても誤差の影響を自動的に補正する手法を提案した。具体的には、干渉縞が張る部分空間の上で非線形最適化を行い、干渉縞の誤差があってもその部分空間内の成分を補正することができるようにした。さらに、計測結果として誤差の多い箇所を自動的に同定し、そのデータを除去することで、測定不可能領域などの影響を取り除く方法も提案した。また、光学的音響計測に対する新たな計測法として、空気と密度の異なる気体を流入する計測法も提案した。空気の疎密変化を屈折率から計測する際に、疎密変化として現れない流れなどの成分を観測するために、密度の異なる気体を流入することで、音と異なる現象の同時可視化を実現した。これにより、音の周りでどのような現象が発生しているかや、音を発生させる流れの状態などを観測できるようになり、干渉縞の解析手法と合わせて、今まで光学的に計測することができなかった音場を計測できるようにした。

光で計測した結果がただの干渉縞でなく、音による密度変化であることを考えれば、音である前提でデータを解析することで、光学的観測結果から音響情報を復元することができるはずである。そこで、複数の観測が可能な状況を想定し、測定結果を統合して音場の情報を推定することで、音響情報を復元する手法を提案した。具体的には、光による音場の観測過程を積分モデルによって表現し、その積分モデルの逆解析として定式化することで、物理モデルに基づく復元を実現した。これは、物理的な根拠を用いているという点でラドン逆変換などとは異なり、その分だけより良い精度で推定できることを示した。逆解析問題の定式化には最小二乗法を用い、積分による線形モデルなので、誤差解析なども容易な手法となっている。これにより、従来は映像の中に隠れてしまう音響情報を抽出することが可能となり、音源情報の解析に近付いたと言える。

さらに、音響測定データから音響情報を解析する手法についても研究を行い、光学的音響計測と組み合わせることで、音響情報のより効果的な活用ができると期待される。まずは、音響計測が具体的に観測可能な情報について理論的な解釈を行い、数値計算を援用することで、音響計測が具体的に観測可能な情報の性質を明らかにした。具体的には、音響計測を線形作用素としてモデル化し、その性質を調べるのに特異値分解を用いた。しかし、その作用素は無次元なので、有限次元の計算に落とし込む工夫を行い、有限の計算で具体的に左右特異ベクトルと固有値を求める方法を考えた。これにより、音響計測が具体的に取得可能な情報を解析できるようになった。次に、計測された音響データから音源の情報を抽出する方法について検討を行った。測定されたデータから、そのデータを与える音を発していた音源の情報を復元することで、ただデータを測定するのみでなく、その意味について検討できるようにした。具体的には、線形モデルに基づく最小二乗問題として定式化をし、その問題の解空間が広いので、その中から適切な解を見つけるための解選択問題を定式化した。解の選択には、音響モデルのスパース性と空間的滑らかさを考慮し、凸最適化問題となるように定式化することで、適当な凸最適化アルゴリズムによって解くことができるように工夫した。これにより、音源の方向に関する情報を抽出できるようになり、方向毎の音の寄与をデータに基づいて考えられるようになった。さらに、方向毎の音をそれぞれ分けて取り出す手法についても検討を行い、音の方向性を利用する方法を提案した。具体的には、音響測定データに対してそれぞれの方向性に基づく情報を分ける分離フィルタをかけるモデルを考え、その分離フィルタの推定問題を近接最適化によって解くことを考えた。一般的な推定問題を抽象的な最適化問題として解釈し、その抽象的な問題に統一的なアルゴリズムを与えることで、モデルの選択が容易な手法を提案した。アルゴリズムとしては主双対分離アルゴリズムを適用し、各作用素の計算を分離することで、比較的大規模な問題でも解きやすいように工夫した。

これらの成果を合わせれば、本研究を実施する以前に比べて光学的音響計測の適用範囲を拡張することができたと考えている。本研究ではそれぞれの要素ごとに研究を行ったが、これらの研究を組み合わせ、全体として大きな達成目標に向けてさらに研究を進めることで、光学的音響計測の可能性をさらに広げることができ、産業などへの実応用に近付けることができると考えている。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- [1] K. Ishikawa, R. Tanigawa, K. Yatabe, Y. Oikawa, T. Onuma and H. Niwa, "Simultaneous imaging of flow and sound using high-speed parallel phase-shifting interferometry," Opt.

- Let., vol. 43, no. 5, pp. 991–994, 2018. <http://doi.org/10.1364/OL.43.000991> (査読有)
- [2] Y. Koyano, K. Yatabe and Y. Oikawa, “Infinite-dimensional SVD for revealing microphone array's characteristics,” *Appl. Acoust.*, vol.129, pp. 116–125, 2018. <http://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.07.014> (査読有)
- [3] K. Yatabe, K. Ishikawa and Y. Oikawa, “Hyper ellipse fitting in subspace method for phase-shifting interferometry: Practical implementation with automatic pixel selection,” *Opt. Express*, vol. 25, no. 23, pp. 29401–29416, 2017. <http://doi.org/10.1364/OE.25.029401> (査読有)
- [4] Y. Tamura, K. Yatabe and Y. Oikawa, “Least-squares estimation of sound source directivity using convex selector of a better solution,” *Acoust. Sci. & Tech.*, vol. 38, no. 3, pp. 128–136, 2017. <http://doi.org/10.1250/ast.38.128> (査読有)
- [5] K. Yatabe, K. Ishikawa and Y. Oikawa, “Acousto-optic back-projection: Physical-model-based sound field reconstruction from optical projections,” *J. Sound Vib.*, vol. 394, pp. 171–184, 2017. <http://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.01.043> (査読有)

〔学会発表〕 (計 6 件)

- [1] Y. Oikawa, K. Ishikawa, K. Yatabe, T. Onuma and H. Niwa, “Seeing the sound we hear: Optical technologies for visualizing sound wave,” *Three-dimensional Imaging, Vis., Disp. (Proc. SPIE 10666)*, 106660C, 2018.
- [2] K. Yatabe and D. Kitamura, “Determined blind source separation via proximal splitting algorithm,” *IEEE Int. Conf. Acoust., Speech Signal Process. (ICASSP)*, pp. 776–780, 2018.
- [3] K. Yatabe and Y. Oikawa, “Phase corrected total variation for audio signals,” *IEEE Int. Conf. Acoust., Speech Signal Process. (ICASSP)*, pp. 656–660, 2018.
- [4] D. Takeuchi, K. Yatabe and Y. Oikawa, “Realizing directional sound source in FDTD method by estimating initial value,” *IEEE Int. Conf. Acoust., Speech Signal Process. (ICASSP)*, pp. 461–465, 2018.
- [5] R. Tanigawa, K. Ishikawa, K. Yatabe, Y. Oikawa, T. Onuma and H. Niwa, “Simultaneous visualization of flow and sound using parallel phase-shifting interferometry,” *11th Pac. Symp. Flow Vis. Image Process. (PSFVIP)*, 2017.
- [6] K. Ishikawa, R. Tanigawa, K. Yatabe, Y. Oikawa, T. Onuma and H. Niwa, “Experimental visualization of flow-induced sound using high-speed polarization interferometer,” *14th Int. Conf. Flow Dyn. (ICFD)*, 2017.

## 6. 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

なし

※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。