

令和 5 年 5 月 2 日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14929

研究課題名（和文）光学干渉計による高速度映像からの音響情報抽出に関する研究

研究課題名（英文）Research on extracting acoustic information from high-speed data obtained by optical interferometer

研究代表者

矢田部 浩平（Yatabe, Kohei）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：20801278

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：音を光学的に計測する光学的音響計測の計測対象を広げるために、画像処理による音響情報の抽出、アレイ処理の適用、投影像からの三次元音場の復元、水中音場への適用、計測領域拡張のための測定系、移動物体近傍の音場の計測、測定器校正への応用などの研究を行った。これらの研究により、計測の対象となる音場としてこれまで扱われてこなかった音場を新たに計測できることがわかり、またその信号処理によって各測定データから音響情報の抽出が可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の研究では測定されてこなかった音場を光学的に測定できることを示したことにより、音の情報が重要な工学的または工業的な応用に適用可能な範囲を広げることができた。それにより、光学的音響計測を実用に近づけることができた。

研究成果の概要（英文）：For extending the range of application of optical sound measurement, several research topics have been investigated. They include image processing for acoustic information retrieval, array processing for optical sound measurement, three-dimensional sound field reconstruction from optical projection, and measurement instrument calibration. The research results indicate that there are some room for measuring sound fields that have not been investigated. In addition, we showed that acoustic information can be extracted by applying signal processing to those data.

研究分野：音響工学

キーワード：光学的音響計測

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

言語などの情報伝達手段として人類は音を利用しているが、言語情報に限らず、「機械の動作状態」や「気流の状態」など、発音源に関する様々な情報を音から得ることができる。例えば、高速回転中の自動車エンジンの状態を直接計測することは困難なので、代わりに動作音を計測することで、加工精度や組み付け精度などの情報を得ることができる。音響計測技術が発達すれば、そのように音が伝達する情報をより有効に活用できるので、高度な音響計測の実現は非常に重要な課題である。

しかし、測定系を設置すること自体が物理現象を変えてしまう場合など、マイクロホンのような従来の方法では原理的に計測できない音場が数多く存在する。例えば、音源ごく近傍の音場を計測しようと測定系を設置すると、境界条件を変えることになるので、共鳴などの影響により系自体が変化してしまう。他にも、マイクロホンは気流が存在すると大きな雑音を発し、さらに気流を乱すことで新たな空力音の発生源にもなるので、流れを含む音場の直接的な計測はできない。しかしながら、機器の開発や診断などで重要なことから、これらの音場を直接的に計測する方法が求められている。

そこで、光による非接触な音響計測手法の研究を行っている。音は空気の疎密の変化であり、それに応じて空気の屈折率も変化するので、音場を通過した光の位相から音の情報を得ることができる。音場内に測定系を設置する必要がないので、原理的には理想的な音響計測が実現可能なのである。しかし、屈折率の変動が微弱な空気中の可聴音は計測の難易度が高い（具体的には、光路長に換算して 0.1 nm 程度の位相変動を毎秒数千～数万回計測する必要がある）ので、世界的に研究例は少なく、未だに基礎検討の段階にあると言える。

これまで、より良いデータを計測することを目標に、測定系や測定方法の検討が進められている。しかし、これまでの研究は計測の質を向上することのみを目標としており、獲得したデータをいかに活用するかについてはあまり検討されていない。音の情報を得ることと、それを応用に活かすことは技術的に異なっており、測定した後にデータから音響情報を抽出して解釈するプロセスが必要である。すなわち、空気の屈折率の測定データから意味のある情報を抽出し、その情報を活かすにはどうすれば良いか。また、それによって何ができるかについて研究を進める必要がある。

2. 研究の目的

本研究は、これまでの計測自体を改善することを目標としていた研究を次のステップに進めるべく、光学的測定データから意味のある情報を抜き出し利用するための方法を実現することを目的としている。具体的には、光学干渉計を用いて撮影した高速度の動画データから音の情報を抽出し、その音を発生させた現象に関する情報を復元することを目指している。また、光学的音響計測の適用範囲を拡大することで、これまで対象として考えられていなかった音場への応用についても検討を行った。

3. 研究の方法

音響現象の情報を復元するために、信号処理や画像処理に関する検討や、物理モデルベースの信号処理に関する検討を行った。計測データに対する信号処理を発展させることで、これまでノイズに埋もれてしまっていた情報を利用できるようにし、計測限界を広げることを検討した。また、物理モデルを用いて計測に必要なデータ量を減らすことで、これまで計測できなかった音場の三次元音圧を瞬時に計測することを考えた。

さらに、適用可能範囲を拡大するために、これまで検討されてこなかった音場への適用や、計測領域を拡大するための測定系に関する検討も行った。これは、音響情報を抽出するための信号処理を前提としたシステムを考えることで、現実的な範囲内で大幅に計測領域を拡大することを目指したものである。また、移動物体近傍や測定器の生成する校正用音場への適用を行い、応用範囲の拡大について検討を行った。

4. 研究成果

(1) まずは光学的計測データに音響情報がどのように含まれているかを理論およびシミュレーションによって検討した。

① 光学計測では、光路上の屈折率を投影（積分）した動画が観測されるので、単一の光学系で発音源の情報を全て得ることはできず、その一側面を反映したデータのみが手に入る。したがって、光学系と発音源の幾何的な関係次第では計測されない情報があるので、その性質を理解する必要がある。音響情報は波動方程式の解として特徴づけることができ、積分路と音源位置の関係によって欠落する情報があるので、その条件について検討を行った。その結果、光線に沿って対称な音場情報が欠落することを確認した。

② 計測されるデータには光学系に起因する誤差が含まれるが、光学的要因の誤差は音響的には非常に特殊な誤差なので、音響情報の抽出法にとってその誤差がどう影響するかを調べなければ

ばいけない。特に、画像や動画としてのノイズが音響測定データとしてどのような特徴を持つかについて考えなければならない。また、計測データは画素として空間サンプリング点が半分の間引かれた状態で観測されるので、最近傍補間以外のデモザイキング手法についても検討を行った。その結果、計測誤差の時空間周波数分布と音響情報の周波数特性の関係を明らかにすることができた。また、計測条件と測定対称の音響現象の空間周波数に応じてデモザイキングの方法を考ええると良いことがわかった。

③ 上で検討した、計測されない音響情報の特徴に基づいて、復元可能な音場の条件についても検討を行った。空間音圧分布を復元するにあたって、失われた方向情報はデータに含まれないので、含まれている情報のみを対象として定式化する必要がある。そのために、失われた情報に関する軸を無視して、データに含まれる音響情報を抽出するのに必要な仮定について検証した。その結果、音場の軸対称性を仮定すれば単一の投影像から三次元音場を復元できることがわかった。また、復元できない条件においては複数の投影像を異なる角度から得ることで、一般の音場を復元できることも確認した。

(2) 上記の検討の結果を踏まえて、実際の計測データを処理する手法の開発を行った。

① データに含まれているのが音響現象であることを前提とした画像処理手法を提案した。音響現象は時空間フーリエ変換領域においてスパースな信号であるため、その周波数特性は計測誤差の周波数分布とは異なっている。従って、音響のスペクトル成分を抽出するフィルタを構成することで音響情報を抽出することができる。ただし、光線の積分路上に物体が存在すると、オクルージョンが発生するため境界領域で適切に音響関連成分を抽出することができない。そこで、データから空間方向の時変フィルタを構成する方法を提案し、画像としてのノイズを適切に除去できることを確認した。

② 軸対称音場を仮定したシングルショット三次元音場復元手法を提案した。光学干渉計で計測できるのは光路上を積分した投影像なので、線上の情報が縮退したデータから三次元音圧を復元するのは困難である。従来は複数の投影像を計測することで測定されていない情報を補って三次元音圧を復元していたが、測定時間がかかることや測定系が複雑になること、また再現可能な音場でない適用できないなどの問題があった。それに対し、軸対称音場を仮定することで、投影によって欠落する情報を無視し、再構成可能な範囲で三次元音圧を復元する手法を提案した。また、提案した方法をスピーカが生成した軸対称音場に適用し、シングルショットであるにも関わらず三次元音圧を復元できることを確認した。

③ 音響測定機材の校正に用いられる特別な音源近傍の音場を計測し、音源を点音源と仮定したときの仮想的な中心位置の推定を行った。音響測定に用いられる精密マイクロホンの校正にマイク自身を音源として用いる方法があり、その音源の音響中心がパラメータとして重要な役割を持つが、音響中心を測定によって推定するのは容易ではない。一方、光学的音響計測を利用すれば音源近傍の多点で音圧に関連する情報を得ることができるが、光学的ノイズが含まれた計測データから音響中心を推定しなければならない。それに対し、位相分布を利用した音響中心の推定方法を提案し、実際の音源を計測することでその妥当性を検討した。

(3) さらに、適用可能な応用の範囲を広げるための検討も行った。

① 音は広範囲に広がりを持つ現象なので、測定をする上では測定範囲も広いことが好ましい。しかし、光学的音響計測を行うには高価な干渉計が必要であり、特に測定範囲の拡大には非常に高価な設備が必要になるため、視野の拡大を行うことは容易ではなかった。一方、音響情報のみに着目して、信号処理によって情報抽出を行う前提であれば安価な光学系でも必要な情報を計測できる可能性がある。そこで、安価な樹脂性レンズを用いた計測について検討した。光学系の質の低下に伴って干渉計としての性能は低下したが、そのような低品質な測定データからも音響情報を抽出することができることを確認した。これにより、従来の光学系では現実的に実現不可能な広範囲の計測を行うことができるようになった。

② これまでは静止している音源を測定の対象としていたが、移動物体から発せられる音は工学的および社会的に重要な対象であり、移動する音源の計測についての知見を獲得する必要がある。そこで、高速に移動する音源からの音場を光学干渉計で計測した。具体的には、模型に音源を埋め込み、模型を移動させた際の音場の高速度撮影を行った。また、音源が移動すると音場自体が非定常になるので、定常音場とは異なる解析が必要となる。音源の移動にあわせて相対的な測定位置を計算し、音源位置の時間変化に合わせて対応する画素の情報を集約することで、従来の定常音場の解析がある程度の妥当性をもって適用可能であることを確認した。

③ 空中の可聴音は屈折率の変化が微弱であるために計測が難しいが、空中可聴音以外の対象を考える際には屈折率変化の大きさがむしろ困難さを生む場合がある。そのような状況に関する知見を得るために、屈折率の大きい水中音場の測定を行った。水は空気より屈折率が大きいのみでなく、水中では空中に比べて大音圧を出すことが多いので、空中可聴音では想定されない大きな変化が測定系にかかる。そこで、水中の音場を干渉計測し、屈折率が大きい場合に音場情報にどのような違いが現れるかを調べた。その結果、空中と水中の屈折率の違いから、どちらかの領域にフォーカスしなければいけないことが明らかになった。また、そのような条件では、光線を直線によって扱うことが妥当でない可能性も示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Kenji Ishikawa, Kohei Yatabe, Yasuhiro Oikawa, Yoshifumi Shiraki, Takehiro Moriya	4. 巻 47
2. 論文標題 Speckle holographic imaging of a sound field using Fresnel lenses	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 5688-5688
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.469972	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Mariko Akutsu, Toki Uda, Kohei Yatabe, Yasuhiro Oikawa	4. 巻 43
2. 論文標題 Visualization of sound wave from high-speed moving source	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Acoustical Science and Technology	6. 最初と最後の頁 339-341
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1250/ast.43.339	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Denny Hermawanto, Kenji Ishikawa, Kohei Yatabe, Yasuhiro Oikawa	4. 巻 153
2. 論文標題 Determination of microphone acoustic center from sound field projection measured by optical interferometry	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Journal of the Acoustical Society of America	6. 最初と最後の頁 1138-1146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1121/10.0017246	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 石川憲治, 矢田部浩平, 及川靖広	4. 巻 77
2. 論文標題 光を用いた楽器近傍音場の計測	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本音響学会誌	6. 最初と最後の頁 601-608
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20697/jasj.77.9_601	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yoshida Souta, Tanigawa Risako, Yatabe Kohei and Oikawa Yasuhiro	4. 巻 43
2. 論文標題 Underwater sound visualization and temperature measurement using high-speed interferometer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Acoust. Sci. & Tech.	6. 最初と最後の頁 177-187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1250/ast.43.177	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ishikawa Kenji, Yatabe Kohei, Oikawa Yasuhiro	4. 巻 32
2. 論文標題 Physical-model-based reconstruction of axisymmetric three-dimensional sound field from optical interferometric measurement	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 45202
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6501/abce73	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 及川靖広, 谷川理佐子, 矢田部浩平, 石川憲治	4. 巻 43
2. 論文標題 偏光高速度干渉計を用いた音響現象の可視化と計測	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 騒音制御	6. 最初と最後の頁 207-210
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 石川憲治, 谷川理佐子, 矢田部浩平, 及川靖広, 大沼隼志, 丹羽隼人	4. 巻 48
2. 論文標題 音の光干渉計測 ~ 並列位相シフト干渉法による流れと音の同時可視化計測	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 光学	6. 最初と最後の頁 241
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 矢田部浩平
2. 発表標題 光学的音響計測のための信号処理
3. 学会等名 日本音響学会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 F. Imaeda, K. Ishikawa, K. Yatabe and Y. Oikawa
2. 発表標題 Estimating sound intensity from acoustic data captured by parallel phase-shifting interferometry
3. 学会等名 Int. Congr. Acoust. (ICA) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Tanigawa, K. Yatabe and Y. Oikawa
2. 発表標題 Interferometric measurement of aerodynamic sound generated by parallel plates inside flow field
3. 学会等名 48th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng. (inter-noise) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Tanigawa, K. Yatabe and Y. Oikawa
2. 発表標題 Guided-spatio-temporal filtering for extracting sound from optically measured images containing occluding objects
3. 学会等名 IEEE Int. Conf. Acoust., Speech Signal Process. (ICASSP) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Tanigawa, K. Ishikawa, K. Yatabe, Y. Oikawa, T. Onuma and H. Niwa
2. 発表標題 Extracting sound from flow measured by parallel phase-shifting interferometry using spatio-temporal filter
3. 学会等名 SPIE Def. Commer. Sens. (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------