

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26540086

研究課題名(和文) デジタルホログラフィーによる3次元音場のリアルタイム可視化技術

研究課題名(英文) Real-time visualization technique of three-dimensional sound field by digital holography

研究代表者

的場 修 (MATOBA, OSAMU)

神戸大学・システム情報学研究科・教授

研究者番号：20282593

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：デジタルホログラフィーによる音場計測技術を提案し、光による非接触な音声情報の記録・再生と音場の時空間伝搬の様子を可視化することに成功した。はじめに、440 Hzの音叉を記録し、空間中のある1点の時間的位相分布を再構成することで音声情報を再現することに成功した。また、人の音声情報の再現にも成功した。次に、音場の時空間伝搬の可視化に向けて縮小光学系とマルチビームによる2つの方法を開発し、観測領域を拡大した。

研究成果の概要(英文)：We proposed a technique to record and reconstruct the sound wave by digital holography. We showed experimentally the recovery of the sound wave and visualization of the propagation of the sound wave. First, the sound wave from the tuning fork operated at 440 Hz was recorded and then it was recovered from the temporal phase distribution at one position. We succeeded the human voice recording and its reconstruction. Next, we succeeded to enlarge the observation area by two methods those are the image-size reduction system and multi-beam illumination for the visualization of sound wave propagation.

研究分野：計測光学

キーワード：デジタルホログラフィー 音場可視化 光マイクロフォン

1. 研究開始当初の背景

イメージセンサの高速化及び高解像度化によって、これまで画像や動画として見るのでできなかった映像が見られるようになってきた。イメージセンサの最大ピクセル数は1億を超え、撮像速度は最高2000万フレーム毎秒となっている。しかしながら、直接光強度を測定するだけでは観測することのできない不可視情報も存在する。不可視情報の一つに音の空間伝搬が挙げられる。

音場計測の従来方法としてマイクロフォンを用いた音場計測技術がある。音場観測にはマイクロフォンを密に並べる必要があるが、集積化が難しく計測の解像度が低いことやマイクロフォン自体が障害物となり、計測精度の面で問題点がある。光を用いた音場計測技術もいくつか提案されており、シュリーレン法やレーザードップラー計測、干渉計測等がある。しかしながら、計測可能な音場の帯域がイメージセンサのスピードに制限されるため、2000年ごろまでの多くの論文ではビデオレート(30 fps(frames per second))のイメージセンサが用いられていたため、音場計測は定在波などのほぼ定常状態の計測に限定されていた。また、レーザードップラー計測では画像化のために走査が必要のため、音場の瞬間を可視化することができない。そのため、光を用いて非接触かつ非侵襲に音場の時空間伝搬の様子を可視化する技術の開発が望まれている。

2. 研究の目的

デジタルホログラフィーとは3次元物体からの光波を干渉により記録し、計算機内で逆伝搬計算をすることで3次元物体を定量的に再構成(可視化)する技術である。デジタルホログラフィーの応用として、微粒子速度分布計測や位相情報の定量計測に基づくバイオ応用等が行われている。本研究では、デジタルホログラフィーを不可視情報である音場の計測技術に応用する。

デジタルホログラフィーを用いると2次元センサで3次元情報を一度に取得することから音場の伝搬そのものを時間及び3次元空間で計測することが可能になる。そのため、音場の時空間発展を可視化できる期待がもてる。また、遠方の音場を計測することも期待できる。

本研究では、デジタルホログラフィーによる音場計測技術を提案し、光による非接触な音声情報の記録・再生と音場の時空間伝搬の様子を可視化する。はじめに、音声情報の再現が可能であることを実証する。計測技術を評価するために、音の大きさと周波数の定量的計測の可能性を検証する。次に、音場イメージングに向けて観測領域の拡大について検討する。デジタルホログラフィーでは一般的に観測領域がイメージセンサの大きさに制限され、計測範囲がcmオーダーと狭いという問題がある。対象とする音の波長は

長く(440 Hzの場合、波長は約79 cm)、音の空間的なふるまいを捉えることは難しいという問題がある。観測領域の拡大では縮小光学系の導入とマルチビームによる2つの方法を検討した。

3. 研究の方法

デジタルホログラフィーによる音場分布計測システムの概要を図1に示す。図1のシステムではデジタルホログラフィーを用いた音場計測の実験系とその後の信号処理の概要を示している。光学系はマッハツェンダー干渉計である。レーザー光源からの光を2つに分割したのち、ビームエキスパンダーによりビーム径を広げる。物体光側には音場が伝搬し、音場による屈折率変化の影響を受ける。物体光と参照光の間に角度をつけることでオフアクシス型ホログラムとしてイメージセンサに記録する。再生時には、フーリエ変換法による縞解析を用いて、物体光の複素振幅分布を抽出する。その後、フレネル伝搬計算や角スペクトル計算により物体面まで物体光を逆伝搬させる。音場の情報は屈折率変化、つまり位相情報に含まれるため、再生された物体面において、位相分布を抽出する。時系列に記録したホログラムデータを再生することで、物体面での時系列位相データを得る。

時系列位相データにおいて、空間上のある1点に着目すると、その点での時間位相分布を得ることができる。この位相分布が音声データに相当する。時間位相分布を音声データに変換すると音声データを再現することができる。

実験では、光源に波長532 nmのレーザー光を用い、イメージセンサとして画素ピッチ $16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$ 、画素数 512×512 ピクセル、最高記録スピードが2000 fpsを用いた。したがって再生可能な音声データの最高周波数は1 kHzとなる。また、図1の光学系においては、縮小光学系が含まれていないため、計測可能な音場の領域はイメージセンサの大きさと同じ約8 mm角となる。温度 25°C での空気中の音速は346.5 m/sであり、440 Hzの音場の波長は78.75 cmとなる。したがって、音場の一波長分は計測範囲の約100倍となり、音場の伝搬による屈折率変化の様子を観察することは困難である。音場の空間伝搬の様子を調べるためにはビーム径を大きくし、計測範囲を拡大させる必要がある。

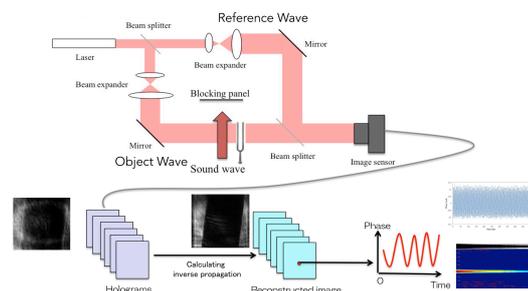


図 1 デジタルホログラフィーによる音場可視化システムの概要図。

4. 研究成果

(1) 音声記録と再現実験

はじめに、固定周波数の音場を生成する音叉(440 Hz)を用いて原理確認実験を行った結果を示す。音叉の近傍の位置での時系列位相データから局所フーリエ変換を用いて時間一周波数特性を表すスペクトログラムを求めた。その結果を図2に示す。図2の上部の黒線で表されているグラフは位相データの時系列分布である。位相データの振幅が時間とともに減少していることがわかり、時間が進むにつれて音の大きさが小さくなっていることが計測できている。図2の下部のグラフがスペクトログラムである。横軸は時間で縦軸は周波数である。色が太く表示されているのは単一周波数である 440 Hz のみにデータが存在することが分かる。この結果より、位相情報を計測することで音声データを再現できることが分かる。

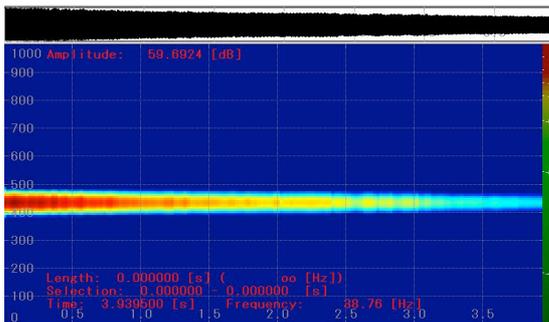
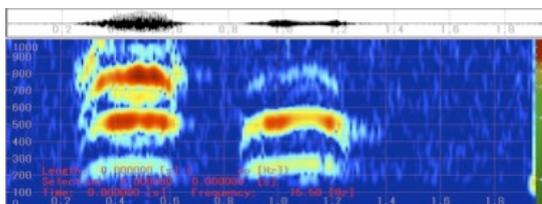
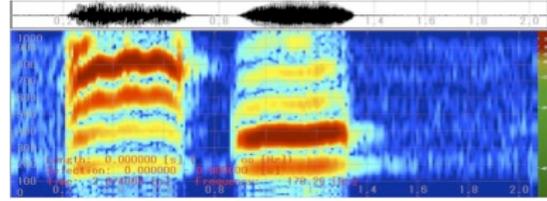


図2 440 Hz の音叉を記録したときの時間位相分布とそのスペクトログラム。

次に人の声を物体光側に発することで音声データの記録と再現を試みた。日本語の母音である「あ」と「い」を発音したときのスペクトログラムを図3(a)に示す。比較データとしてマイクロフォンを用いて記録した音声データを最高周波数が1 KHzにしたときのスペクトログラムを図3(b)に示す。この2つの結果を比較すると、第1、第2フォルマントの特徴がよく似ていることが分かる。フォルマントはスペクトルの包絡線を取り、強いピークから第1、第2と割り当て、音声データの周波数領域での特徴を表すものである。



(a)



(b)

図3 音声情報の再生; (a) デジタルホログラフィーによるスペクトログラム, (b) マイクロフォンによるスペクトログラム。

(2) 音声情報の周波数特性

音声情報を正確に記録するためには、周波数特性が重要になる。ここでは音声情報の周波数特性を調べた結果を述べる。音源として 100 Hz から 900 Hz の音を使用し、各周波数で計測された音圧変化の振幅を比較した。イメージセンサはフレームレートが 2,000 fps のものを使用した。

100 Hz から 900 Hz の音源を計測したときの周波数特性を図4に示す。300 Hz を境にして高周波に行くほど計測できる音圧が低くなっていることが分かる。ただし、500 Hz 以上は音圧による位相変化は一定であるように見える。今後の課題として、高フレームレートのイメージセンサで周波数依存性を計測し、広い範囲の周波数特性を調べる必要がある。

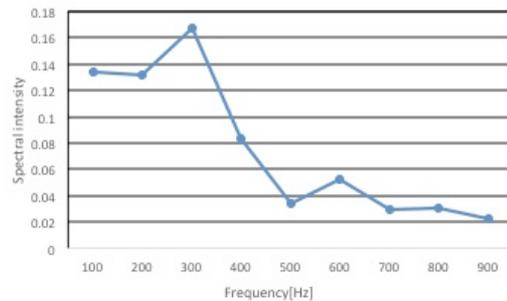
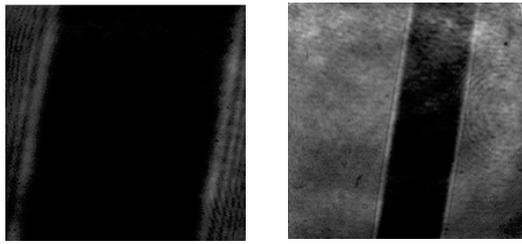


図4 図1の光学系における音声情報の周波数特性。

(3) 音場伝搬の可視化

440 Hz の音の波長は約 79 cm となるため、図1の光学システムでの観測領域 8 mm では音場が伝搬する様子を観察することができない。そのため、縮小光学系の導入とマルチビームによる観察領域拡大の2つの方法を検討した。

縮小光学系の導入では図1の光学系に結像レンズを導入し、3倍の領域拡大を達成した。図5にその結果を示す。



(a) (b)

図5 縮小光学系の導入による再生像; (a) 導入前, (b) 導入後.

縮小光学系で観察する場合には、照射する光のビーム径もメートルサイズが必要になる。その場合にビーム拡大系が必要となるため照明光学系が大きくなる。そこで光学系を大きくすることなく、広い領域を観察できる方法としてマルチビームによる同時観察を考案した。図6に光学系を示す。今回の実験では照射ビームを2本に分割した。2本に分割した光波は別々の音場領域を通過し、1つのイメージセンサで記録される。イメージセンサで記録された2つの情報を分離するために、オフアクシスホログラムの多重記録を利用した。つまり、2つの干渉縞の方向を互いに垂直とすることで、分離して再生することが可能になる。

音源としては440 Hzの音叉を用いた。イメージセンサとしてフォトロン社のSA5(フレームレート10,000 fps)を使用した。図6中のA、B点それぞれの位置で再構成した音波をそれぞれ図7(a)、(b)に示す。ここでA点、B点の直線距離は約25 cmに設定した。これは波長が約79 cmの440 Hz音源を計測したときに距離による音波の位相の違いを計測でき、実験系の都合により定めた長さである。図7より2地点での位相は反転状態に近いことがわかる。位相差を測定した結果、2地点間の距離は27.0 cmと求められた。

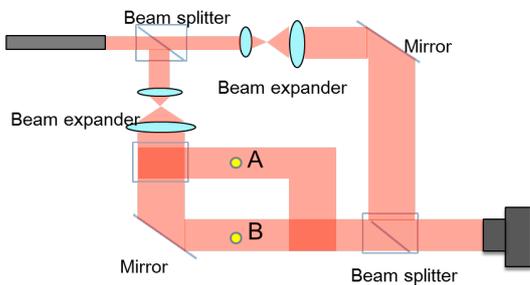
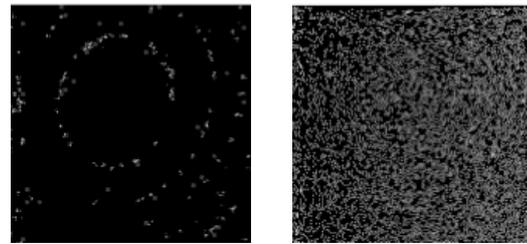
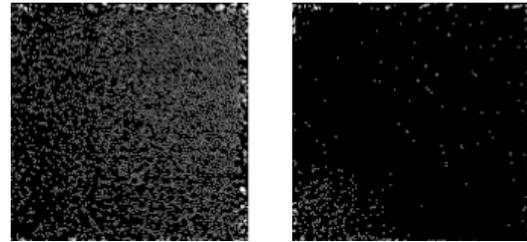


図6 2本のビームを用いた音場観察領域拡大光学系.



(a) (b)



(c) (d)

図7 2地点での位相分布計測; (a), (b)A点での位相分布, (c), (d)B点での位相分布. (a)と(b), (c)と(d)の時間差は0.7 ms.

以上の結果より、本研究ではデジタルホログラフィー技術を用いて、音声情報の記録と再現に成功し、音場の時空間発展の様子を可視化することに成功した。時空間伝搬の様子をわかりやすく可視化するためには観測領域をメートルオーダーに拡大する必要があるが、本研究で提案した拡大光学系とマルチビームによる2つの方法が有効であると考える。この研究成果により将来的に光で音を記録し、可視化する“光マイクロフォン”としての利用に繋がることを示された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- ① O. Matoba, H. Inokuchi, K. Nitta, and Y. Awatsuji, “Optical voice recorder by off-axis digital holography,” *Optics Letters*, 査読有, Vol. 39, Iss. 22, pp. 6549–6552 (2014). DOI: 10.1364/OL.39.006549

[学会発表] (計6件)

- ① H. Inokuchi, P. Xia, K. Nitta, O. Matoba, Y. Awatsuji, “Observing sound wave propagation by using off-axis digital holography,” *International Workshop on Holography and Related Technologies 2015 (IWH2015)*, We4-6, 2015年12月2日, 沖縄コンベンションセンター (沖縄県)
- ② O. Matoba, H. Inokuchi, and Y. Awatsuji, “Digital holographic measurement for voice recording and reproduction,” *SPIE DSS, Sensing Technology + Applications*, 9495-21, 2015年4月21日, Baltimore Convention Center, Baltimore, MD, USA.

(招待講演)

- ③ O. Matoba, H. Inokuchi, Y. Awatsuji, "Sound wave reproduction by digital holography," Optics & Photonics Taiwan, International Conference 2014 (OPTIC2014), Paper No. 2014-FRI-S0404-I002, 2014年12月5日, Taichung, Taiwan. (スペシャル講演)
- ④ 井ノ口弘毅, 仁田功一, 的場 修, 粟辻安浩, “デジタルホログラフィーによる音場計測,” 第75回応用物理学会秋季学術講演会, 19a-S11-9, 2014年9月19日, 北海道大学(北海道)。
- ⑤ O. Matoba and Y. Awatsuji, "Sound wave recording by digital holography," Workshop on Information Optics (WIO) 2014, Mo5, 2014年7月7日, EPFL, Neuchatel, Switzerland. (招待講演)
- ⑥ H. Inokuchi, K. Nitta, O. Matoba, and Y. Awatsuji, “Observation of sound wave field by using digital holography,” Technical Digest of The Biomedical Imaging and Sensing Conference 2014 (BISC'14), BISCp3-4, 2014年4月23日, パシフィコ横浜(神奈川県)。

[産業財権]

○出願状況(計1件)

名称: デジタルホログラフィーによる音場3次元画像計測方法および音再生方法

発明者: 的場 修

権利者: 神戸大学

種類: 特許

番号: 特願2014-086948号

出願年月日: 平成26年4月19日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://brian.cs.kobe-u.ac.jp/research.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

的場 修 (MATOBA, Osamu)

神戸大学・大学院システム情報学研究科・教授

研究者番号: 20282593