

令和元年6月13日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06080

研究課題名(和文) 双画像と再生粒子像伸びを解消したホログラフィ法による3次元粒子画像流速法の開発

研究課題名(英文) Development of three-dimensional particle image velocimetry using a holography suppressing a twin-image and a reconstructed particle elongation

研究代表者

田中 洋介 (Tanaka, Yohsuke)

京都工芸繊維大学・機械工学系・助教

研究者番号：80509521

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：この研究課題では、新しい2台の高速度カメラを用いた位相回復ホログラフィを開発した。従来のホログラフィでは、位相上方の欠如による微粒子の結像位置で結像しない双画像問題があった。一方、開発したホログラフィは位相情報を回復するため、鮮明な再生粒子像を観察することが出来る。さらに、1000フレーム以上での微粒子の高速度撮影が可能である。加えて、位相反転を用いた粒子位置検法を開発した。これらの手法を微粒子、マイクロバブル、微粒液滴の3次元空間内の軌道を観察した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来では双画像問題や粒子伸び問題により、困難であった3次元空間中の高速度移動する微粒子の観察が本研究課題で可能になった。このことは、3次元粒子画像流速法の発展に寄与するだけでなく、エンジン内の燃焼効率を決定するインジェクターからの微粒液滴や製薬など合成過程で生じる微粒子の粒径分布の把握や、流体抵抗低減に寄与するマイクロバブルの挙動解析に役立つ。

研究成果の概要(英文)：In this project, the Principal Investigator develops novel phase retrieval holography using two high-speed cameras. Conventional holography has the twin-image problem, which defocuses reconstructed small particles at focused planes due to lack of phase information. Whereas, the developed holography can observe clear reconstructed particles at focused planes because of retrieving phase information. Moreover, the developed method also can record particles at over 1000 fps as high-speed imaging. Additionally, the investigator establishes a novel particle detection method using phase reversing at a focused position. Finally, observation of trajectories of microparticles, microbubbles, and microdroplets were conducted by using these developed methods in three-dimensional volume.

研究分野：流体計測

キーワード：微粒子計測 位相回復ホログラフィ 双画像問題 粒子伸び問題 3次元粒子画像流速測定法

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

2000 年前後から数値流体力学（CFD）は京コンピュータに代表されるスーパーコンピュータの利用により、DNS や LES などの計算手法で 3 次元 3 成分（3D3C）の速度場の実用解析が可能となった。現在、この解析結果の妥当性を評価するため、3 次元 3 成分（3D3C）の速度場計測データの要求が高まっている。一方実験流体力学（EFD）では、2006 年以降に、オランダのデルフト大学とドイツのゲッチンゲン大学を中心に 2 次元 3 成分（2D3C）のステレオ法を進展させた 3 次元 3 成分（3D3C）の速度場計測が可能となる 3 次元粒子画像流速法（3DPIV）の開発が進んでいる。しかしながら、4 台以上の高速度カメラの配置や強力なパルスレーザーの使用で、高額なシステムと高度な調整技能が求められるため、一部の研究機関でしか運用できていない。一方で、デジタルホログラフィ法は、弱い連続発振のレーザーと多くても 2 台程度のカメラでシステムが構築可能である。しかしながら、従来の Gabor ホログラフィでは双画像問題と呼ばれる画質低下と、再生粒子像伸び問題と呼ばれる奥行き方向精度低下がある。

### 2. 研究の目的

上記の背景から本研究の目的は、「双画像と再生粒子像伸びを解消したホログラフィ法による 3 次元粒子画像流速法の開発」で得られる測定結果で、CFD 計算結果の検証に貢献することである。従来のホログラフィ法では、【双画像問題】と【再生粒子像伸び問題】により検証に必要なベクトル数と精度が確保できなかった。そこで、以下に示す 2 つの方法で問題を解消する。

1. 高速度カメラ 2 台で記録した 2 枚のホログラムを用いた位相回復法で双画像問題を解消
2. 粒子結像位置での位相反転を適用して再生粒子像伸び問題を解消

### 3. 研究の方法

これまで、応募者は双画像問題に対してコンボリューション法や粒子像伸び問題に対し 2 波長再生で対策を実施してきたが、双画像や伸び低減の効果が充分ではなかった。そこで、位相情報を得る 2 台のカメラを用いた位相回復法と位相反転を用いた粒子位置検出を用いる。また本申請では、数値検証利用可能な一般的な計測手法に発展するために、高精度化と観測体積拡大に向けた開発を実施する。

### 4. 研究成果

Denis ら（2005）の下記に示す 2 枚以上のホログラム画像を用いて、微粒子の欠落する位相情報を回復する位相回復ホログラフィが提案されたが、ホログラムは個別に撮影されるために動的な対象に対応できなかった。そこで研究代表者は、高速度カメラ 2 台を用いて 1000fps 以上で、高速移動する微粒子の撮影を可能とする新しい位相回復ホログラフィを開発した。

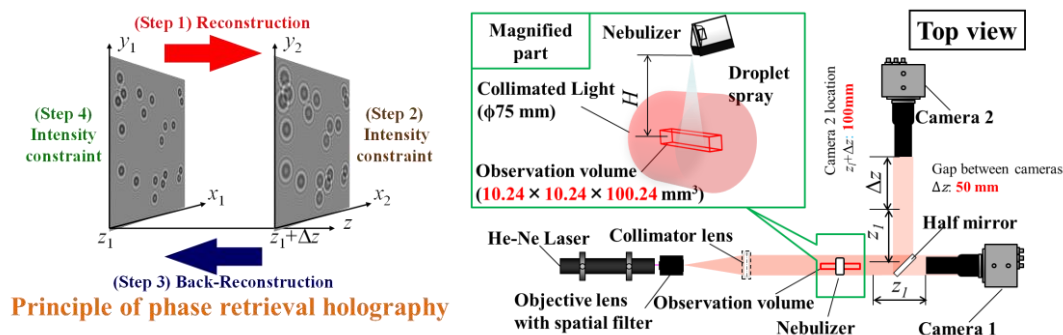
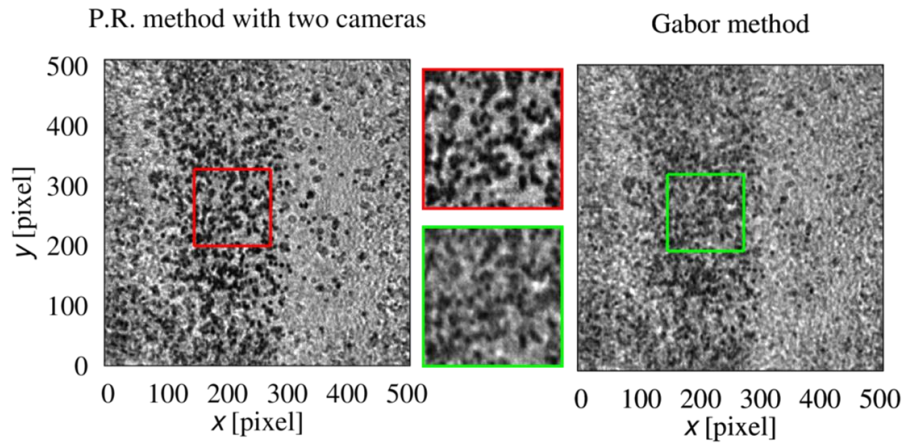


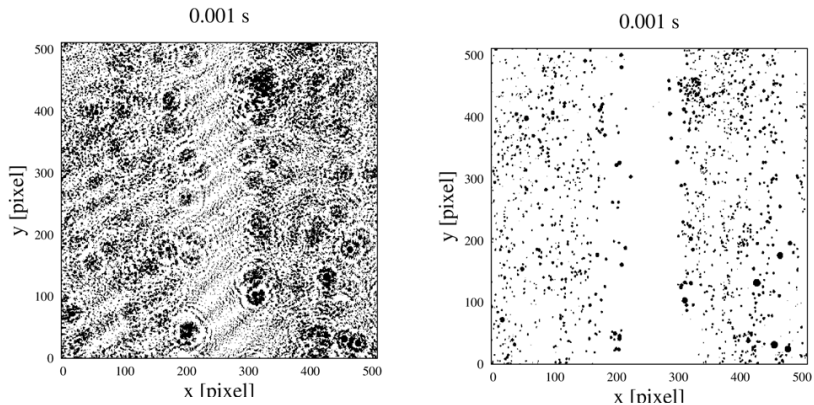
図 1：2 枚のホログラフィを用いた位相回復ホログラフィ

本手法では、2 台のカメラを画像変換と XYZ ステージを用いた位置調整で、1.0 pixel 以下で調整している。また、テレセントリックレンズを導入することで、ホログラム記録面の撮影位置の調整幅が広がっており、観測の制約が減っている。以下に各年度の主な成果を示す。

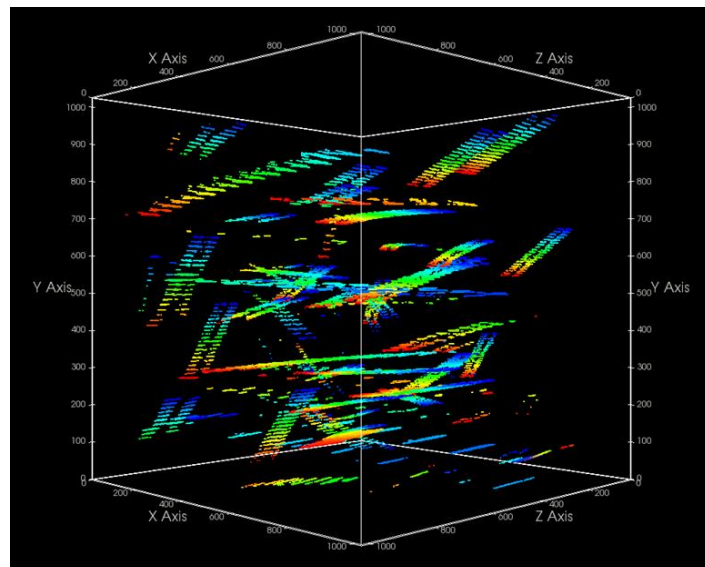
2016 年度には固体微粒子：雑誌論文[4]の撮影に本手法を適用した。3 次元空間中の断面において、従来法の Gabor ホログラフィと比較して明瞭な粒子像が得られることを明らかにした。また、2 台のカメラの最適な設置方法について、光学的見地から検証をおこなったところ、式の導出ができた。この結果から、本手法の実施時の測定範囲を明示することができたため、広く利用することが可能となった。2017 年度には、マイクロバブル：学会発表[9]、雑誌論文[3]に適用して固体粒子と同様に液中でも本手法が適用できることを確認できた。さらに、2018 年度には微粒液滴：雑誌論文[1]にも適用し、3 次元空間での軌道観察に成功した。また、粒子伸び問題：学会発表[3]については、位相反転を用いた解決策により一定の成果を得た。



(a) 固体微粒子 雑誌論文[4]



(a) Gabor holography (b) Phase retrieval holography  
 (b) マイクロバブル 学会発表[9]、雑誌論文[3]



(c) 微粒液滴 雑誌論文[1]

図 2 : 位相回復ホログラフィを用いた固体、液体、気体の微粒子の 3 次元計測

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

1. Visualization of spray droplets using phase retrieval holography, Tanaka Y, Nakatani Y, Murata S., Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, vol. 11051, (2019), 1-6
2. 位相回復ホログラフィにおける再生液滴像伸びに基づく噴霧液滴径分布の推定, 中谷 康寛, 田中 洋介, 村田 滋, 混相流, vol. 33, (2019)

3. OBSERVING BUBBLES USING PHASE-RETRIEVAL HOLOGRAPHY, Atsuo Kubonishi, Yohsuke Tanaka, Shigeru Murata, Journal of Flow Visualization and Image Processing, vol. 25, (2018), 25-32
4. Phase retrieval method for digital holography with two cameras in particle measurement, Yohsuke Tanaka, Shunsuke Tani, and Shigeru Murata, Optics Express, vol. 24, (2016), 25233-25241
5. Calibration along the depth direction in tomographic digital holography, Shunsuke TANI, Yohsuke TANAKA and Shigeru MURATA, Proc. SPIE 10328, (2016)
6. Reduction of Ghost Particles by Using Iterative Volumetric Filtering in Tomographic Digital Holography, Shunsuke TANI Yohsuke TANAKA and Shigeru MURATA, Advanced Experimental Mechanics, vol. 1, (2016), 155-166

[学会発表] (計 19 件)

1. Yohsuke Tanaka, Yasuhiro Nakatani, Shigeru Murata, Visualization of spray droplets using phase retrieval holography, The 32nd International Congress on High-Speed Imaging (2018)
2. Yohsuke Tanaka, Yasuhiro Nakatani, Shigeru Murata, Measurement of spray trajectories using phase retrieval holography, The International Symposia on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics 2018 (2018)
3. Atsuo Kubonishi, Yohsuke TANAKA, and Shigeru MURATA, Particle Depth Position Detection Using Phase Signature in Phase-Retrieval Holography, International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2018 (2018)
4. 久保西淳夫, 田中洋介, 村田滋, 位相回復ホログラフィと位相特徴を用いた奥行位置検出の精度評価, 日本光学会年次学術講演会 (2018)
5. 中谷康寛, 田中洋介, 村田滋, ホログラフィックパターンのスペクトル分布に基づいた液滴衝突の検知, 第 46 回可視化情報シンポジウム (2018)
6. 久保西淳夫, 田中洋介, 村田滋, 位相回復ホログラフィによる気泡計測に関する研究, 関西支部第 93 期定時総会講演会 (2018)
7. 中谷康寛, 田中洋介, 村田滋, 位相回復ホログラフィを用いた噴霧液滴の 3 次元軌道の計測, 関西学生会 平成 29 年度学生員卒業研究発表講演会 (2018)
8. 久保西淳夫, 田中洋介, 村田滋, 位相回復ホログラフィによるマイクロバブル奥行位置の検出, 日本機械学会 2018 年度年次大会 (2018)
9. Atsuo Kubonishi, Yohsuke TANAKA and Shigeru MURATA, OBSERVATION OF BUBBLES USING PHASE RETRIEVAL HOLOGRAPHY The 11th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP-11) (2017)
10. Yohsuke TANAKA, Atsuo Kubonishi and Shigeru MURATA, Two Problems in Particle Measurement Using Digital Holography, International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2017 (ISOM17) (2017)
11. 久保西淳夫, 田中洋介, 村田滋, 位相回復ホログラフィによる気泡計測に関する研究, 関西支部第 93 期定時総会講演会 (2017)
12. 田中洋介, 中谷章寛, 村田滋, 位相回復ホログラフィを用いた噴霧液滴計測, 高速度イメージングとフォトニクスに関する総合シンポジウム 2017
13. 久保西淳夫, 田中洋介, 村田滋, 位相回復ホログラフィによる粒子奥行き位置の検出, 本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2017 Tokyo (2017)
14. 田中洋介, 久保西淳夫, 村田滋, 位相回復ホログラフィを用いた微粒子計測に関する研究, 混相流シンポジウム 2017 (2017)

15. Yohsuke TANAKA, Shunsuke TANI and Shigeru MURATA, Camera layout for phase retrieval method with two cameras in digital holography, ICHSIP 31 (2016)
16. Shunsuke TANI, Yohsuke TANAKA and Shigeru MURATA, Calibration along the depth direction in tomographic digital holography, ICHSIP 31 (2016)
17. Hirotaka YAMAOKA, Yohsuke TANAKA, Shunsuke TANI and Shigeru MURATA, Phase Distribution Measurement of Transparent Film Using Digital Holography with Phase Retrieval Method, ICHSIP 31 (2016)
18. 谷駿介, 田中洋介, 村田滋, トモグラフィックデジタルホログラフィにおける粒子位置強調フィルタ処理, 日本光学会年次学術講演会 (2016)
19. 山岡博隆, 田中洋介, 谷駿介, 村田滋, 位相回復法を用いたデジタルホログラフィ法による透明フィルム透過時の位相差計測, 日本光学会年次学術講演会

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号 (8 桁)：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

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。