

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04170

研究課題名(和文) 相転移する微粒子の3次元速度と屈折率計測が可能な2波長位相回復ホログラフィの開発

研究課題名(英文) Development of phase retrieval holography using two-wavelength for measuring three-dimensional velocity and refractive index of micro-particles of phase transitions

研究代表者

田中 洋介 (Yohsuke, Tanaka)

京都工芸繊維大学・機械工学系・准教授

研究者番号：80509521

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)：相転移する微粒子の屈折率変化と3次元速度の同時計測は幅広い現象(気泡溶解、微粉燃焼、雪片融解、液滴凍結)理解に重要である。この相転移は屈折率変化を伴うため、シュリーレン法やBOS法で観測がおこなわれてきた。しかし、奥行き情報がないため3次元速度を得ることができない。また、トモグラフィック粒子画像流速測定法で速度場計測は可能だが、粒子撮影で屈折率変化してはいけない。一方で、申請者が開発した1波長位相回復ホログラフィは同時計測可能だが、短い波長が原因で、小さな屈折率変化や、低い奥行き位置精度になり、その計測範囲は限定的であった。そこで、本研究では波長を長くすることでこの問題を解決する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究成果は大きく3つに分けることができる。1つ目は2波長位相回復ホログラフィ実施に必要なGPUを用いた高速画像処理の確立である。数十分単位の処理が数秒まで短縮されて本手法のボトルネックが解消された。2つ目は温度変化による位相変化の観測が可能となり、非接触温度計測が可能となった。最後の3つ目はマイクロチャネル内の2波長による奥行き位置精度向上と3次元速度場計測が可能であることが示せた。これらの成果から、本手法は、工学分野において粉体製造工程のセンシング利用など実運用段階に進む目途が立った。

研究成果の概要(英文)：Simultaneous measurement of the refractive index and 3D velocity of fine particles with a phase transition is important for understanding a wide range of phenomena (bubble dissolution, powder combustion, snowflake melting, droplet freezing). Because a change in refractive index accompanies this phase transition, it has been observed using the Schlieren and BOS methods. However, the lack of depth information makes it impossible to obtain 3D velocities. In addition, the tomographic particle image velocimetry method can measure the velocity field, but particle imaging must not change the refractive index. On the other hand, the one-wavelength phase-recovery holography developed by the applicant allows simultaneous measurement. Still, its measurement range is limited due to small refractive index changes and low depth position accuracy caused by the short-wavelength. In this study, this problem is solved by increasing the wavelength.

研究分野：流体計測

キーワード：位相回復ホログラフィ 微粒子計測

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

相転移する微粒子(数十 μm から数 mm の直径)の屈折率変化と 3 次元速度の同時計測は幅広い現象(気泡溶解、微粉燃焼、雪片融解、液滴凍結)理解に重要である。この相転移は屈折率変化を伴うため、シュリーレン法や BOS 法(Dalziel ら 2000)で観測がおこなわれてきた。しかし、奥行き情報がないため 3 次元速度を得ることができない。また、トモグラフィック粒子画像流速測定法(Elsinga ら 2006)で速度場計測は可能だが、粒子撮影で屈折率変化してはいけない。一方で、申請者が開発した 1 波長位相回復ホログラフィは同時計測可能だが、短い波長(可視光: $400\text{ nm} < \lambda < 700\text{ nm}$)が原因で、小さな屈折率変化に限定され、低い奥行き位置精度のため、その計測範囲は非常に狭い。

2. 研究の目的

上記の背景から本研究の目的は、「可視光より波長を長くする」ことで問題解決を試みることである。具体的には 2 波長記録と記録位置シフトで 1 波長位相回復ホログラフィの制限を解消する。

3. 研究の方法

従来の 1 波長位相回復ホログラフィは、同一波長記録で 2 枚 1 組のホログラムで位相を求める必要がある。本研究では、2 つの異なる波長を同時に照射し、ダイクロミックミラーで分光した波長の異なるホログラムを記録する。しかし、それぞれの波長で 2 枚 1 組のホログラムが得られない。そこで、波長によって記録位置がシフトする関係式を用いる。計算機内で波長ごとに異なる波長の記録位置シフトで、本来 1 波長の光学系では不可能な 2 枚で 1 組の波長の異なるホログラムを 2 組得ることが出来る。次に、2 組のホログラムで位相回復のくり返し演算が収束すると、それぞれの記録位置で位相 1 と位相 2 を得る。最後に、粒子の位置で位相 1 と位相 2 を用いて得られる 2 波長により約 10 倍長い合成波長を得ることが出来る。

4. 研究成果

研究成果は大きく 3 つに分けることが出来る。1 つ目は 2 波長位相回復ホログラフィ実施に必要な GPU を用いた高速画像処理の確立である。図 1 に示すように、従来の CPU と比べて GPU を用いた場合に、数十分単位の処理が数秒まで短縮されて本手法のボトルネックが解消された。

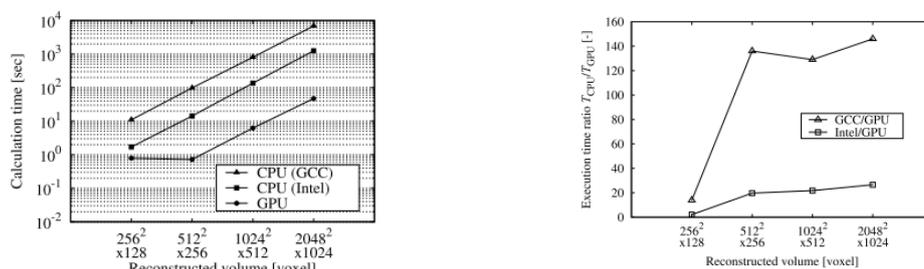


図 1：従来の CPU と GPU を用いたホログラム再生時間の比較

2 つ目は温度変化による位相変化の観測が可能となり非接触温度計測が可能となった。図 2 に示す温度変化に対応した位相変化を数値的に与えた際に、位相回復ホログラフィによって得られる分布を比較した。図の結果より位相変化の観測が可能となり、位相変化と温度を結びつける Gladstone-bale 則などの関係式を用いると温度分布を得ることが可能となる。

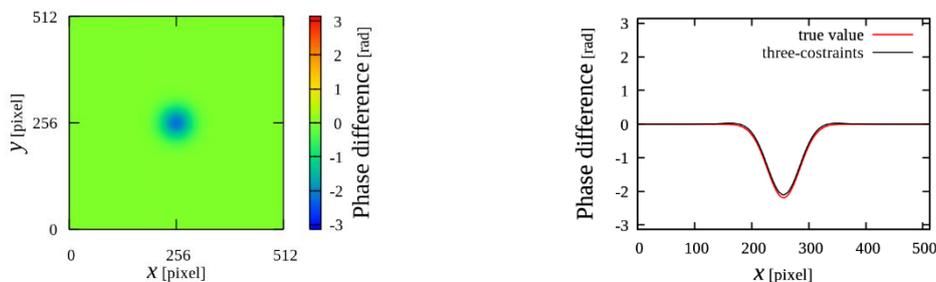


図 2：温度変化による位相分布と位相回復ホログラフィによる再生結果

最後の 3 つ目はマイクロチャンネル内の 2 波長による奥行き位置精度向上と 3 次元速度場計測が可能であることが示せた。図 3 の左図において、1 波長では粒子位置付近で波長が短いために位相が反転する箇所があるが、2 波長で合成することで波長が長くなり反転を抑制し奥行き位置精度向上につながる。また、右図ではマイクロチャンネル内の 3 次元速度場分布を精度よく測定可能であることを示せた。

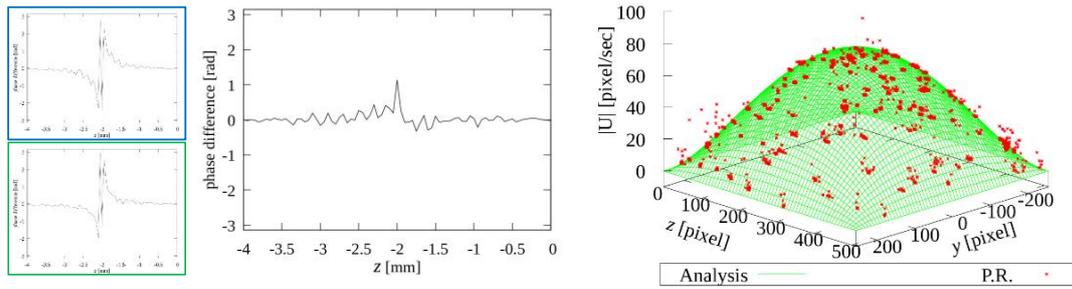
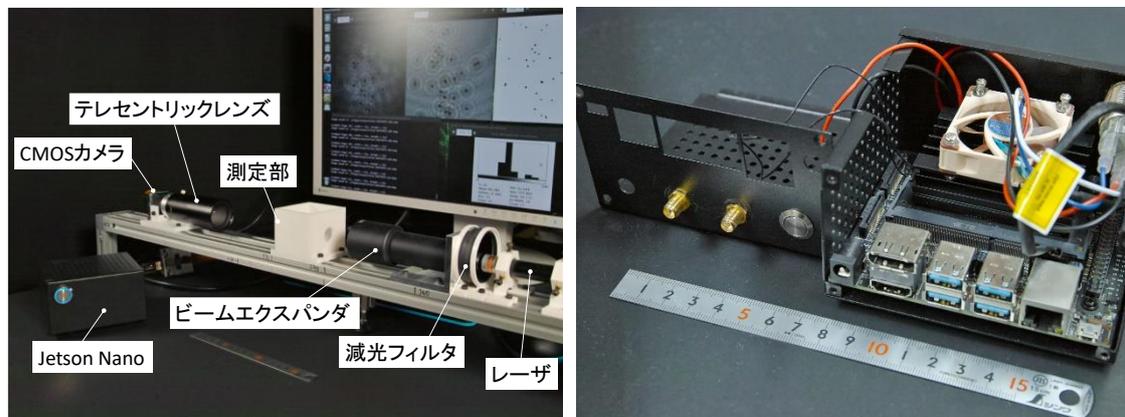


図3：2波長による奥行き位置精度向上とマイクロチャネル内の3次元速度場分布

これらの成果から、本手法で波長を長くすることで従来の制限が解消された。さらに発展的な成果として、実施期間中に新型コロナウイルスが流行し工程の省人化・自動化の要求が高まったため、図4に示すGPU搭載シングルボードコンピュータを用いた微粒子計測システムの提案を行った。また、まん延防止には、積極的なオンラインミーティングの利用や、研究活動時間の制限には3次元プリンタ導入による試作検討効率向上で対応することが出来た。



(a)計測システム外観

(b) GPU 搭載シングルボードコンピュータ

図4 GPU 搭載シングルボードコンピュータを用いたホログラフィ微粒子径測定装置

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 田中 洋介	4. 巻 20
2. 論文標題 ホログラフィによる微粒子計測	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 実験力学	6. 最初と最後の頁 95～100
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11395/jjsem.20.95	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 Yohsuke Tanaka, Hiroki Matsushi, and Shigeru Murata	4. 巻 59070
2. 論文標題 Phase Retrieval Holography for Particle Measurement With GPU Acceleration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 American Society of Mechanical Engineers	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/AJKFluids2019-5204	査読の有無 有
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 田中 洋介	4. 巻 60
2. 論文標題 GPU搭載シングルボードコンピュータを用いたホログラフィ微粒子径測定	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 光技術コンタクト	6. 最初と最後の頁 11-18
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15件（うち招待講演 1件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Yohsuke Tanaka, Hiroki Matsushi, and Shigeru Murata
2. 発表標題 Observation of Paramecium with Phase Retrieval Holography Using Two High-Speed Cameras
3. 学会等名 OSA Imaging and Applied Optics Congress 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takuma Matsumura, Yohsuke Tanaka, Hiroki Matsushi, and Shigeru Murata
2. 発表標題 Study on Influence of Iteration Number on Temperature Measurement using Phase Retrieval Holography
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroki Matsushi, Yohsuke Tanaka, Takuma Matsumura, and Shigeru Murata
2. 発表標題 Holographic Microscopy using Dual-Wavelength with a Color Camera in Phase Retrieval Holography
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yohsuke Tanaka, Hiroki Matsushi, Shigeru Murata
2. 発表標題 Observation of Daphnia using Phase Retrieval Holography with Two High-Speed Cameras
3. 学会等名 Digital Holography and 3-D Imaging (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yohsuke Tanaka, Hiroki Matsushi, Shigeru Murata
2. 発表標題 PHASE RETRIEVAL HOLOGRAPHY FOR PARTICLE MEASUREMENT WITH GPU ACCELERATION
3. 学会等名 AJK2019-FED (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中谷康寛、田中洋介、村田滋
2. 発表標題 液滴数密度がホログラム空間周波数解析による液滴衝突検知に及ぼす影響
3. 学会等名 可視化情報シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松四大樹、田中洋介、村田滋
2. 発表標題 位相回復ホログラフィを用いた攪拌容器内における流れ場の計測
3. 学会等名 混相流シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuhiro Nakatani, Yohsuke Tanaka, Shigeru Murata
2. 発表標題 Transmittance Function for a Transparent Droplet in Holographic Measurement
3. 学会等名 ISOM19 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中洋介
2. 発表標題 微粒子ホログラムの高速記録と高速再生
3. 学会等名 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2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中谷康寛、田中洋介、村田滋
2. 発表標題 位相回復ホログラフィを用いた微小液滴の3次元軌道の観測
3. 学会等名 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2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松四大樹、田中洋介、村田滋
2. 発表標題 位相回復ホログラフィを用いた気泡流の可視化
3. 学会等名 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2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中谷康寛、田中洋介、村田滋
2. 発表標題 接近する2つの微小液滴間のホログラムパターンの空間周波数解析
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松四大樹、田中洋介、村田滋
2. 発表標題 位相回復法を用いた球面波インラインホログラフィ
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野田翔太郎, 田中洋介, 村田滋
2. 発表標題 位相回復ホログラフィによる位相特徴を用いた粒子位置検出
3. 学会等名 日本光学会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 15. Shotaro Noda Yohsuke Tanaka, Shigeru Murata
2. 発表標題 Numerical Verification of Rectangular Microchannel Flow Using Phase-Retrieval Holography
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021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