

令和 2 年 6 月 19 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06156

研究課題名(和文)高精度粒子計測のための多波長デジタルホログラフィ法の開発

研究課題名(英文) Development of multi-wavelength digital holography for highly accurate particle measurement

研究代表者

村田 滋 (MURATA, Shigeru)

京都工芸繊維大学・機械工学系・教授

研究者番号：50174298

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)：本研究課題では、1台のカメラで3次元空間に高密度分布する数マイクロ～数十マイクロメートルの微小粒子・液滴群に関する様々な量を時系列同時計測できる高性能デジタルホログラフィ粒子計測システムを開発した。位相回復法においてカラー情報を利用することで、記録粒子像を測る際にノイズの原因となる共役像波面を除去し、また、数値像再生された粒子像の奥行き方向伸びを新しいデコンボリューション処理で抑制することで性能を向上させた。数値実験及び観測実験によって本開発手法の性能を評価し、その有用性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題で開発した粒子計測システムを用いると、1台のカメラと波動光学理論に基づく数値処理によって粒子・液滴・気泡群の3次元空間情報を簡便かつ廉価に知ることができる。例えば高密度燃料噴霧の空間分布特性や噴霧粒子特性を同時計測することでエンジンの高効率化や排気ガスのクリーン化を図ることができ、またビデオカメラで観測するため、粒子・液滴・気泡群の3次元空間における運動状態を時系列的に捉えることが出来るため、各種産業界の開発研究や一般の学術研究においてその有用性は極めて大きいと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this research, a high-performance digital holographic system has been developed for simultaneously measuring various quantities on small particles or droplets of about 10 micro meter in diameter distributed in three-dimensional space with high number density. Performance improvement is achieved by applying a phase retrieval technique to color hologram images to eliminate the noisy effect of conjugate image fringes on the background and by employing a new deconvolution technique to suppress the depth elongation of particle image numerically reconstructed from hologram image. Performance tests are carried out in numerical simulation and experiment to show the feasibility of the developed system in particle measurement.

研究分野：流体工学

キーワード：流体計測 波動光学 デジタルホログラフィ 3次元計測 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

(1) 研究動機

船体の抵抗低減や養殖魚介類の品質向上などで近年盛んに話題となっているマイクロバブル流れは分散性混相流の一つであるが、この種の流れは工業的にも様々な分野で極めて重要な役割を果たしている。燃料噴霧もまた分散性混相流の一つであり、ディーゼルエンジンやハイブリッド車など燃焼室をもつエンジンシステムは今後も輸送機器・建設機械・高出力動力源として豊かな社会を支える重要な要素であり続けるものと予想されるが、エンジン性能の本質的な改善を図るためには、3次元空間における様々な噴霧情報を短時間に手間を掛けることなく同時計測する手法の開発が求められている。

(2) 技術背景

こうした状況の解決手法としてデジタルホログラフィが注目されている。これは3次元空間情報をもつホログラムパターンを撮像電子デバイスでデジタル記録し、その画像を計算機で数値的に解析することによって、記録された3次元空間情報を再生することのできる技術である。デジタルホログラフィではこれを撮像素子や計算機で電子的に処理するため、オンラインでホログラフィ観測が可能となり、その特長を活かして「3次元物体の変形計測」「微生物などの顕微鏡観測」といった計測技術を始めとして2000年以降盛んに研究が進められてきた。特に、従来の流体計測法では困難であった、超高速燃料噴霧の液滴径・数密度などの空間分布情報計測や、材料変形と周囲流体の連成運動の3次元同時計測などへの応用が期待されている。

(3) 現状と問題点

これらのデジタルホログラフィ応用分野では共通的に関わりのある技術開発目標を挙げることができ、その目標は次の4点に纏められる。

「記録現象の高速化」 「記録空間の広域化」

「再生像の画質改善」 「再生像の高速計算」

とりわけ、デジタルホログラフィを計測技術に展開する場合、3つ目の「再生像の画質改善」は重要な項目であり、上記分散性混相流を念頭に置いた場合、粒子・液滴群情報をより高精度に計測できるかどうか実用化へのポイントとなる。こうした観点から、空間位置分布・粒径分布・数密度といった粒子計測結果の信頼性を著しく改善する後処理法を開発し、その性能評価を行ってきたが、単波長レーザーを用いた計測法の性能改善は限度近くに達しており、抜本的な手法改善により性能向上することが強く望まれている。

2. 研究の目的

以上の研究背景を踏まえ、本申請課題では、これまで単波長照明を用いて開発してきたデジタルホログラフィ粒子計測法を多波長法へと拡張し、単眼で3次元空間に高密度分布する数 μm ～数十 μm の微小粒子・液滴群に関する様々な量を時系列同時計測できる高性能デジタルホログラフィ粒子計測システムの開発を目的とした。このシステムの目標性能として、時間分解能20Hz、空間位置検出精度 $1\mu\text{m}$ 、粒径計測精度500nmである実用レベルの単眼3次元空間粒子計測システムを目指すとともに、開発した粒子計測システムの計測性能を実証実験により検証している。

3. 研究の方法

(1) 多波長デジタルホログラフィ粒子計測法

これまでの単波長照明を用いたデジタルホログラムに記録できる粒子情報には限界があり、計測対象となる微小粒子群の情報を別途独立なホログラムに記録できれば、その計測精度は向上することが期待できる。本研究課題では、基本的にその情報量の増加をカラー情報として実現しようとするもので、異なる波長をもつ赤・緑・青の3色またはその内の任意の2色のレーザー照明を用いて、観測情報であるホログラムパターン複数枚をセットとして取得する。異なる多波長照明により同じ奥行き位置で観測されるホログラムは、同一波長照明により異なる奥行き位置で観測されるホログラムと等価であるという性質を利用し、異なる波長のホログラムから生じさせた再生像を重畳させることで、共役像ノイズの少ない安定した再生像を得ることが出来る。この方法では、同一奥行き距離において記録した多波長ホログラム画像を、異なる奥行き距離の複数枚の単波長ホログラム画像として扱うことにより、多波長ホログラム画像の再生時に計測対象となる物体光は共通部として強調され、ノイズとなる共役光、非回折光は異なるため非共通部として抑制できる。さらに、多波長デジタルホログラフィ法を用いて検出した粒子情報の修正を行うIPR処理を導入し、測定精度の改善を図った。

図1に、本研究課題で構成した赤(633nm)、緑(532nm)、青(488nm)の波長を持つレーザー光源を用いたホログラム観測装置を示す。

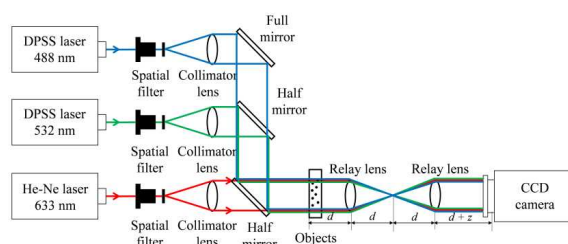


図1 多波長ホログラム観測装置の構成

(2) 多波長位相回復デジタルホログラフィ

上述した多波長デジタルホログラフィ粒子計測法において利用するカラーホログラムは、上述のように同一波長に換算すると、異なる奥行き位置で観測したホログラムと一致するため、この複数枚のホログラムパターンを拘束条件として、いずれかのホログラム面における光振幅分布を反復計算により推定することが出来る。通常、人間の目や撮像素子で捉えることの出来る量は光強度であるが、光波そのものを表す光振幅分布を推定できれば、観測ホログラム面における光波の相対的な位相の空間分布が分かることになり、ホログラム再生時に共役像の発生を抑制できる。そのため、この光振幅分布推定法は位相回復法と呼ばれる。従来の位相回復法では、複数台のカメラを異なる奥行き位置に精度よく設置することが求められたが、本研究では、複数の撮像素子を持つカラーカメラを使用することで、より簡便に位相回復法をデジタルホログラフィ粒子計測において実現し、数値再生像における共役像ノイズ低減を試みた。

(3) 背景光処理したデコンボリューション法

ホログラムから再生した粒子像の奥行き方向伸びをデコンボリューション処理により低減する方法の性能を改善した。デコンボリューション処理は、再生像の奥行き方向伸びを点拡がり関数 (Point Spread Function, PSF) と呼ばれる関数で理論的に表現し、その影響を実際の再生粒子像から取り除く処理である。背景におけるスペckル状の偽粒子像を低減するため、再生像から平面波再生光成分を除去することで共役像を形成するフリンジを抑制し、従来のデコンボリューション処理法によるデジタルホログラフィ粒子計測法の性能向上を図った。

(4) 性能評価の方法

数値シミュレーションでは、性能改善手法(1)~(3)に対して、微小粒子群の数値モデルを作成し、粒子数、粒子空間位置、粒径などのパラメータを与えて数値ホログラムを作成し、そのホログラムを改善手法で解析した結果に対して誤差評価を行うことで、改善効果を定量的に表現した。性能評価項目は、再生像の画質に関しては、光強度分布(画像濃度値)のRMS誤差、粒子検出結果に関しては、粒子検出数、粒子誤検出数、粒子空間位置誤差、粒子移動量誤差などを用いた。また、観測実験では静止水中を沈降する粒子と正方形断面を有する流路内の流れの可視化トレーサを測定対象として性能評価を行った。

4. 研究成果

(1) 多波長デジタルホログラフィ粒子計測法

数値シミュレーションによる性能評価では、3次元再生像から粒子像を抽出するための2値化閾値が、設定した粒子の未検出数や誤検出数、検出粒子位置のRMS誤差に及ぼす影響を調査するとともに、粒子数に対する検出精度の確認を行った。その結果、検出粒子位置のRMS誤差は $8.7\mu\text{m}$ と評価された。また、理論速度に基づく粒子移動量計測においては、従来手法である単波長法に比べ、RMS誤差がおおよそ1/5に低減できることを示した。また、流速計測における有用性を示すために、水槽内を沈降する粒子及び矩形流路内を流れる粒子を記録対象として流れの計測を行い、従来手法との比較を行った。その結果、それぞれ、図2及び図3のように、検出速度ベクトルの奥行き幅が実際の流れ場を正しく表し、理論解に相当する速度分布が得られることを実証した。

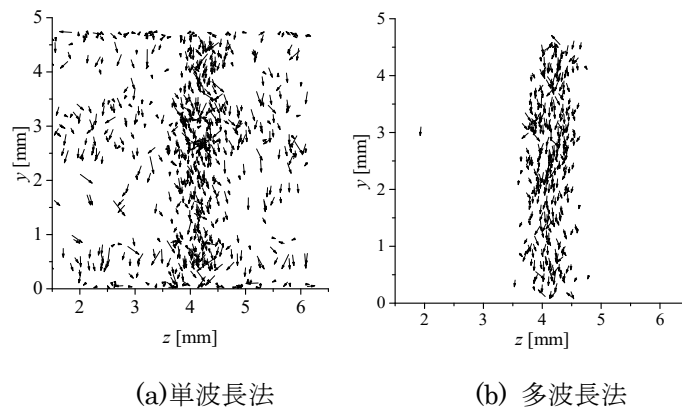


図2 沈降粒子の速度ベクトル線図(奥行き幅1mm水槽)

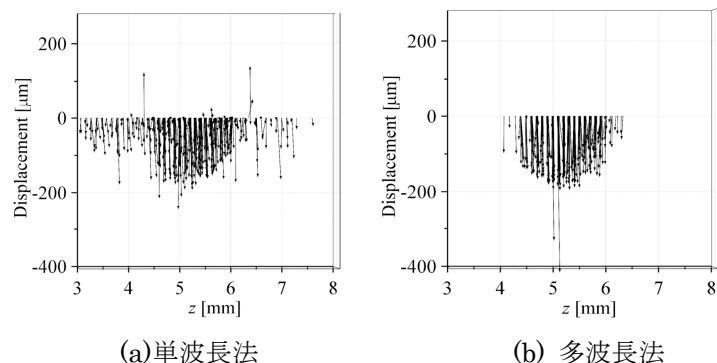


図3 矩形断面流路内の速度ベクトル線図(流路幅2mm)

(2) 多波長位相回復デジタルホログラフィ

多波長位相回復ホログラフィにおける数値再生像の画質改善効果を図4に示す。単波長 633nm で得た位相回復処理を施さない(b)に比べ、2波長 488nm, 633nm で得た位相回復法による結果(c)の方が、設定した粒子像分布(a)に遙かに近いことが分かる。また、粒子像の周りの背景部において、(b)のインライン法では共役像を成す波面が生じさせた干渉縞パターンが多数生じており、これが重畳して疑似粒子を生成してしまうが、位相回復を施した(c)ではその共役像ノイズは強く抑制されている。これらの再生像のS/N比を調べた結果、可視光の範囲では、波長差が大きくなるほどS/N比は向上する傾向が認められたので、観測実験には赤と青のレーザー照明を用いることが望まれることが示された。この位相回復処理は粒子像の奥行方向伸びを低減するものではないので、細長い粒子像となるが、背景との分離がしやすい粒子再生像を得ることができる。

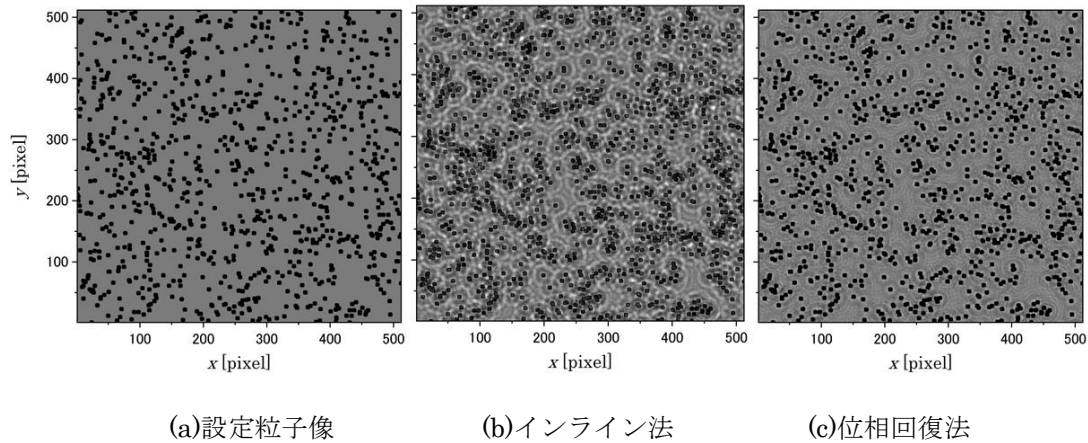


図4 位相回復法による数値再生像の画質改善効果

(3) 背景光処理したデコンボリューション法

数値シミュレーションによって背景光処理した再生像を図5に示す。背景光を差し引くことで、背景部に生じている共役像干渉縞が抑制されていることが分かる。背景光処理だけでは粒子像の奥行き方向伸びを低減できないが、背景光処理を施した粒子像を用いることで、デコンボリューション処理による像伸びが効果的に低減できることを示した。次に、記録対象を粒径 $30\mu\text{m}$ の粒子とし、奥行き方向 $z=14.75\text{mm}$ の位置に配置した粒子のホログラムを用いて、PSF サイズが粒子奥行き位置検出に及ぼす影響を調べた。これは任意粒径をもつ測定対象粒子を単一の PSF で計測処理できるかという現実的な問題を検討するものである。異なる PSF に対する再生像光強度の奥行分布を図6に示す。実際の粒径と異なる粒子 ($27\sim 33\mu\text{m}$) の PSF を使用しても、PSF の粒径が記録対象の粒径の前後 10% の範囲までなら粒子位置を明確に示す顕著な光強度の急減が認められ、粒子位置計測に寄与できることが示された。そして、系統的なパラメータ設定による数値シミュレーションにより、とりわけ高粒子数密度の場合にその効果が発揮されることを確認した。

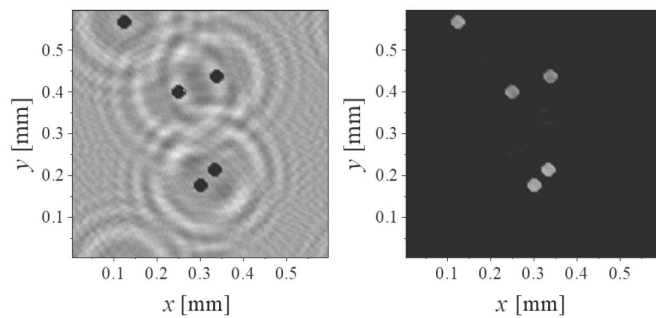


図5 背景光処理による再生像の変化

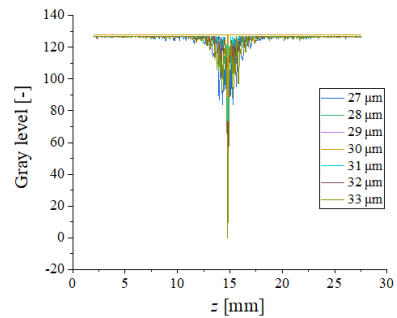


図6 光強度奥行方向分布に及ぼす PSF サイズの影響

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 村山 眞嗣
2. 発表標題 多波長位相回復ホログラフィによる粒子計測法
3. 学会等名 日本機械学会関西学生会学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naohiro HAYASHI, Shigeru MURATA and Yohsuke TANAKA
2. 発表標題 Measurement of Particle Movement in 3D Flows Using Multi-Wavelength Digital Holograms
3. 学会等名 The Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC9) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masatsugu Murayama, Shigeru Murata, and Yohsuke Tanaka
2. 発表標題 Particle measurement method by phase retrieval digital holography using multiple wavelengths
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村山 眞嗣, 村田 滋, 田中 洋介
2. 発表標題 波長差が多波長位相回復ホログラフィにおける粒子計測に及ぼす影響
3. 学会等名 可視化情報学会第47回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村山 眞嗣, 村田 滋, 田中 洋介
2. 発表標題 ホログラム再生処理におけるデコンポリューション粒子検出法の性能改善
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第95回定時総会講演会
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
連携研究者	田中 洋介 (TANAKA Yohsuke) (80509521)	京都工芸繊維大学・機械工学系・准教授 (14303)	