

研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560172
 研究課題名(和文) 位相シフトデジタルホログラフィを用いた高精度単眼3D-PIVの実用化
 研究課題名(英文) Feasibility study of high performance monocular 3D-PIV using phase-shifting digital holography
 研究代表者
 村田 滋(MURATA SHIGERU)
 京都工芸繊維大学・工学科学研究科・教授
 研究者番号：50174298

研究成果の概要：本研究では、流れの中に散布したトレーサ粒子を1台のカメラで追跡することで3次元空間内の流速分布を測定できる手法を開発し、その性能を数値的および実験的に評価した。この手法は3次元像を記録・再生することのできるホログラフィ技術に基づくもので、再生過程を計算機処理するデジタルホログラフィ手法に位相シフト観測法を適用し高精度化を図った。さらに粒子速度のみならず任意形状の繊維状物体の運動姿勢や形状の同時測定法へと拡張した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：流体計測

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：(1) 流体計測 (2) デジタルホログラフィ (3) 3次元計測 (4) 単眼計測
 (5) 粒子計測 (6) 非定常流れ (7) 繊維状物体

1. 研究開始当初の背景

(1) 代表的な混相流である気泡・液滴・粒子を含む流れは学術的な側面のみならず実用面において重要であるが、噴射圧力の高い燃料噴霧や工学的に広く注目されているマイクロバブル流れのような極めて数密度の高い微小な気泡・液滴・粒子群の挙動を精度良く時間を追って計測することは極めて困難である。一般に、微小粒子など計測法としては、最も一般的な位相ドップラー法、異形粒子を計測できるシャドードップラー法、また

球形粒子を前提とする光回折法などが実用化されてきたが、基本的に点計測法であり、流れ場空間全体の情報を取得するのは困難である。これに対して、ホログラフィ法は高数密度な場合でも粒子群などの空間情報を記録することができ、とりわけ高数密度な燃料噴霧計測にも適用されている。特に、計測の自動化に繋がるデジタルホログラフィ計測手法の開発が進められ、 200×10^3 (#/cc) を超える高数密度噴霧の瞬時の噴霧情報が可能となってきた。

(2) 一方、流体計測法の1つの柱として確立された粒子画像流速測定法(Particle Image Velocimetry, PIV)は、混相流や回転機械内流れなど幅広い実験解析に適用できる流速分布の画像計測法であるが、簡便な高精度3次元計測法に拡張できていないのが現状である。一般に3次元PIV計測(3D-PIV)にはステレオ法による観測が用いられてきたが、観測装置設置の容易さや粒子対応付けが不要な点などから単眼観測法も十分な利点をもつ。単眼観測法の一つとして、(1)に述べたデジタルホログラフィが2000年以降、PIVに活発に応用されるようになったが、測定点密度が低い上、単眼観測ゆえ奥行き位置の検出精度が低く、また時間変動する流速の瞬時値ではなく時間平均値による結果しか提示されないなど非定常計測法としての測定精度に改善すべき点を残している。

(3) 上述の背景の下、報告者による平成17-18年度科学研究費補助金に基づく研究では、高速度カメラを用いて時間分解能高く取得した時系列デジタルホログラムを用いて、高空間分解能で精度良く3成分流速ベクトル空間分布を測定できる3D-PIVを開発した。この3D-PIV手法に(1)の研究成果を適用すれば、高密度に散布した可視化トレーサの奥行き位置測定精度(測定点精度)を改善したデジタルホログラフィ流速測定法が構築でき、さらに、運動する微小気泡・液滴などの大きさ・形状・運動姿勢などを時系列単眼同時計測が実現できるものと期待される。

2. 研究の目的

(1) 高速現象観測のための瞬時位相シフト技術を開発し、位相シフトデジタルホログラフィによる高精度な粒子群空間分布計測を実用化する。

(2) 従来の光強度や相対位相ではなく、新しい位相調整複素振幅の情報に基づく数値像再生を行い、高密度に分布する粒径十数~数十 μm 程度の粒子群を相互干渉させることなく明瞭に結像させることで、精度良く測定される流速ベクトル数の多い3D-PIVを構築する。

(3) 微小粒子・液滴・気泡群の移動速度・空間分布・円相当直径、形状、運動姿勢を精度良く同時計測することのできるデジタルホログラフィ単眼3D-PIVを実現する。

3. 研究の方法

(1) まず、瞬時位相シフトデジタルホログラフィ観測装置を構築した。位相シフト法では通常、参照光位相を変化させて観測したホログラム画像が3ないし4枚必要となるが、

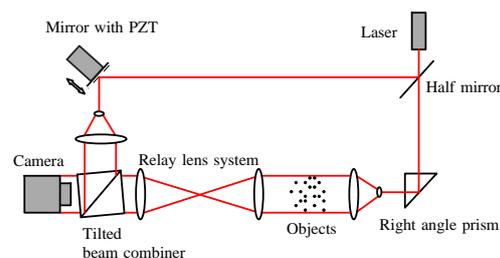


図1 チルト式観測光学系

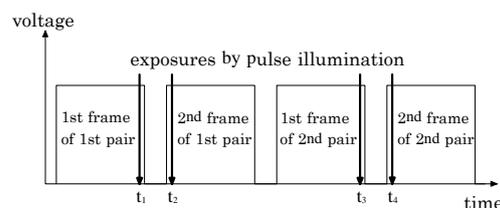


図2 照明タイミング

ここでは高速現象に対応できる瞬時位相シフト法とするため、チルト式観測法を利用しその観測光学系を図1のように構成した。圧電素子PZTで参照光の光路長を変化させるが、1画素列毎に π radだけ位相が変化するように撮像素子への参照光の入射角を設定した。この観測系では1画像に2つの異なる位相シフト量の情報が記録されるため、1枚目(0, π)、2枚目($\pi/2$, $3\pi/2$)の位相シフト量となり、かつほぼ同時刻観測となるよう、図2のように照明タイミングを近づけて照明し、2枚1組にして1枚分の複素振幅を得た。

(2) (1)に示した瞬時位相シフト観測法および新しい再生光情報による数値再生法が粒子計測性能改善に寄与した効果を数値シミュレーションで評価した。位相シフト観測方式は、提案方法(two-line phase-shifting)、完全瞬時法(four-line phase-shifting)、高解像度法(full-resolution phase-shifting)と比較し、トレーサ粒子数、奥行き幅、奥行き位置、粒子直径をパラメータとして、粒子検出率および粒子空間位置検出精度を数値的に評価した。一方、数値再生像を表現する光情報の種類が粒子計測性能改善に及ぼす影響を同じく評価した。用いた光情報は、提案手法である位相調整複素振幅と、旧来の光強度または相対位相とした。

(3) 位相シフトデジタルホログラフィ単眼3D-PIVの実流動計測における実用性の検討のため、図3のようなアクリルガラスと光学ガラス窓で作製したミリチャネル内の電気浸透流と電気泳動による粒子運動を測定し、他手法の結果と比較した。作動流体は精製水、トレーサ粒子は15.62 μm の標準粒子を使用した。

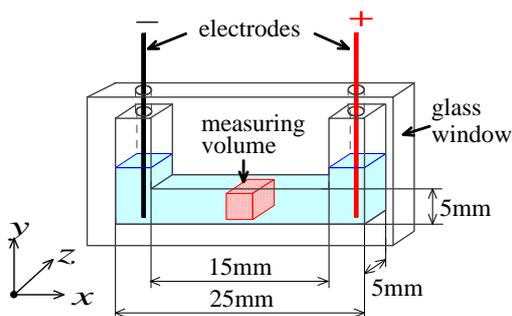


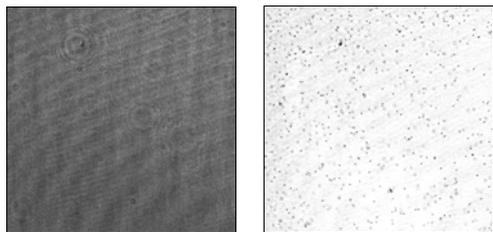
図3 速度分布測定実験装置

(4) デジタルホログラフィを用いた単眼3D-PIVの不確かさ解析を実施し、本手法の測定精度に及ぼす様々な誤差要因の関連について考察した。

(5) 任意形状の繊維状物体に対する3次元姿勢・形状計測のアルゴリズムを構築し、その性能評価を数値シミュレーションおよび基礎実験によって実施した。粒子と異なり、繊維状物体の場合、その物体を構成する各部が離散的に検出されるため、複数の繊維状物体が存在する場合、検出点がどの繊維状物体に関係するものか分類しなければならない。本研究では、検出点を自動的にグループ化する自己組織化アルゴリズムを考案した。

4. 研究成果

(1) チルト式位相シフト法に基づく瞬時位相シフトホログラム観測装置を高速カメラまたは高解像度カメラ、グリーン固体レーザーおよび piezo素子を使用して構成し、3次元ホログラフィックPIVシステムを完成した。このシステムは振動に敏感なオフ軸型光学系に基づくため、振動の影響を低減するための数値ホログラム修正法を開発した。図4は粒子を観測したホログラム画像と再生像の一例である。ホログラム画像は1画素幅の縦縞状パターンが繰り返され、異なった2つの位相シフト量の情報が1画素おきに正しく記録されていることが確認された。また、振動の影響排除を含む背景処理により、再生像はむらのない様な背景に明瞭な黒い粒子像が再生されており、チルト式



(a) ホログラム (b) 再生像

図4 観測ホログラムと再生像

位相シフト法の利用が粒子検出を容易にしていることが示されている。

(2) 瞬時位相シフトが可能なチルト式位相シフト法を(1)で述べた観測光学系で実現したが、瞬時性は確保できるがデータ補間量が多いと計測精度が低下する。チルト式では1枚のホログラムに4本列毎または3本列毎に位相シフト量の異なる光強度分布を記録する完全瞬時法と、2枚のホログラムに2本列毎に位相シフト量の異なる光強度分布を記録する提案方法について複素振幅分布再構成性能を比較した。数値シミュレーションの結果、補間情報量の少ない2枚のホログラムを使用する方法がもっとも性能がよく、高解像度法と同等であることが確認された。また、位相シフト法である提案手法と位相シフトしない従来法を比較すると図5のように評価された。従来法では誤検出が多く、検出率が1を上回ることがあり、誤差も大きい。提案手法では誤検出率が低く、粒子数12000個であるにも関わらず、70%検出時に検出精度が30 μm と低いことが示された。

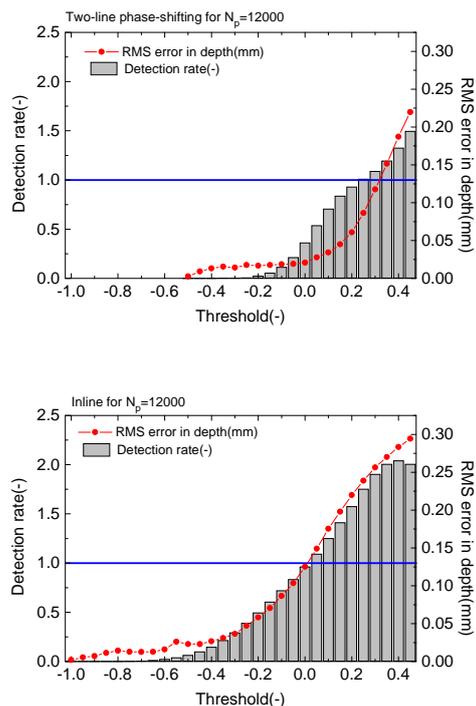


図5 位相シフト法による性能改善

(3) 観測ホログラム画像から数値像再生する方法を改良し、粒子情報抽出処理法を改善した。数値像再生には従来、光強度と相対位相を用いてきたが、新しく位相調整複素振幅を提案し、数値シミュレーションで性能評価を行った。これは、図6のように画素毎に奥

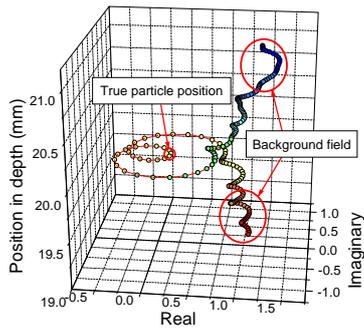


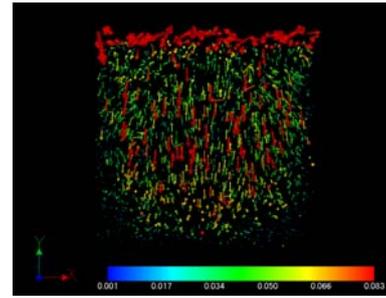
図6 位相調整複素振幅の変化

行き方向の位相調整複素振幅変化を複素平面上で描くことで、そのトラジェクトリ特徴部から粒子空間位置を検出するもので、光強度や相対位相による手法の基本概念的違いを明確化することが出来た。また、立方体キャビティ内3次元流れに対して数値シミュレーションによる粒子追跡性能評価を行ったところ、図7のとおり、約2000個の粒子数の場合でも、従来法に比べ検出流速ベクトルの精度が改善されることが示された。

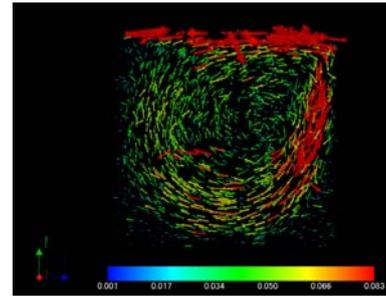
(4) 上述の観測装置および計測アルゴリズムを用いて、電気泳動および電気浸透流による微小トレーサ粒子の3次元運動を観測し、提案計測法である瞬時位相シフトホログラフィ法に基づく高精度単眼3D-PIVの実用性を示した。図8は測定された3次元3成分流速ベクトルを位相シフトによる提案手法と位相シフトしない方法を比較して表示したものである。観測方向に対して垂直な異なる2方向への投影ベクトルを示しているが、位相シフト法を利用した本提案手法の方が奥行き方向(z方向)の精度が改善されていることがわかる。

(5) 上記(4)の実験に関して不確かさ解析を実施し、本手法の測定精度に及ぼす様々な誤差要因の関連について考察した。画像変換係数、面内変位量、面外変位量、時間間隔ごとに伝搬する誤差を評価し、誤差要素の正確度と精密度を統括したところ、不確かさ速度は面内では $3.96(\mu\text{m}/\text{sec})$ 、面外では $17.3(\mu\text{m}/\text{sec})$ であることが示された。

(6) 微小径の繊維状物体の3次元空間における姿勢および形状をデジタルホログラフィで計測しパラメータ化する手法を開発した。上記の粒子計測法を拡張し、自己組織化アルゴリズムを用いて任意形状の繊維状物体を計測できることを示し、数値的にその性能を評価した。図9のように正弦波形状の1本の繊維物体を考えた場合、(a)に示す候補点が多数検出され、その後、提案した自己組

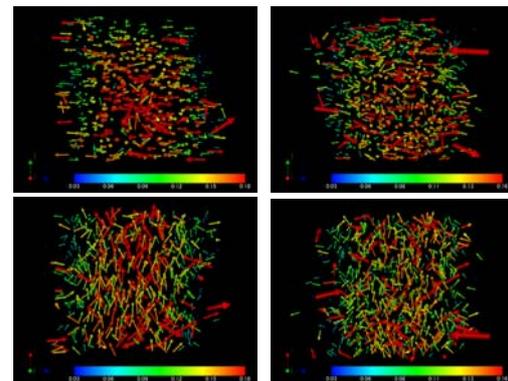


(a) x-y 面



(b) z-y 面

図7 立方体キャビティ内流れ



(a) 提案手法 (b) 位相シフトなし

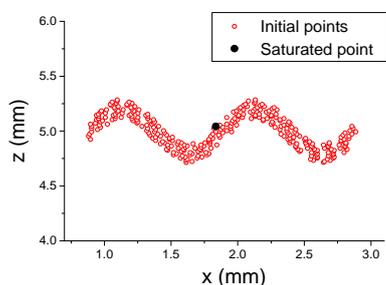
図8 微小チャネル内の流動計測

(上段: z-y 面, 下段: z-x 面)

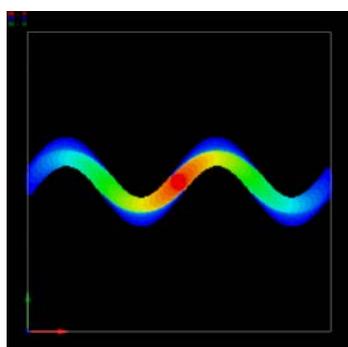
織化アルゴリズムで同定すると、端部候補点が移動しながら順に中央部候補点へと対応付き、赤付近の収束点に至り同定が終了する。数値シミュレーションでは、図10に示すような40本の繊維状物体が3次元空間に任意の姿勢で存在している場合でも、90%の認識率で正しく個々の繊維状物体が識別されていることが示された。図11は1本のカーボンファイバを形状計測した実験結果である。

(7) 繊維の形状をパラメータ化するため曲率とねじれ率を用いた。繊維状物体の各部の曲率とねじれ率がわかっている時、Bouquet

の公式により曲線全体を復元することができ、図 1 1 の形状計測結果に対して、曲率とねじれ率が評価された。

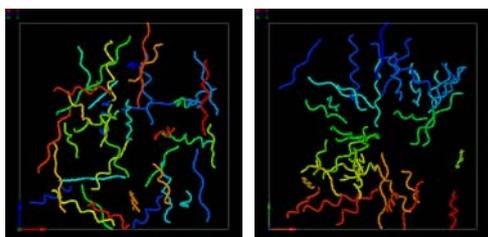


(a) 候補点分布



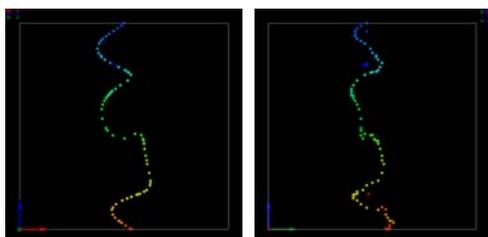
(b) 同定プロセス (青→赤 : 同定終了)

図 9 候補点の同定プロセス



(a) x-y plane (b) x-z plane

図 10 繊維状物体群の識別同定結果



(a) x-y plane (b) z-y plane

図 11 単一カーボンファイバの形状計測結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 6 件)

- ① Murata,S., Harada,D., Tanaka,Y., Spatial Phase-shifting Digital Holography for 3D Particle Tracking Velocimetry, International Topical Meeting on Information Photonics 2008(IP2008), November 19, 2008, Hyogo, Awaji Yumebutai International Conference Center
- ② 村田滋, 原田大輔, 平尾梨沙, 田中洋介, デジタルホログラフィの流体計測への応用, 日本光学会年次学術講演会 (Optics & Photonics Japan 2008), 2008 年 11 月 6 日, つくば市, つくば国際会議場
- ③ 原田大輔, 村田滋, 辻 勝之, 2 時刻ホログラムを用いた位相シフトデジタルホログラフィ粒子計測, 日本機械学会 2008 年度年次大会学術講演会, 2008 年 8 月 6 日, 横浜市, 横浜国立大学
- ④ 平尾梨沙, 中岡象平, 村田滋, 3 次元形状を持つ繊維状物体の自己組織化アルゴリズムの開発, 日本機械学会 2008 年度年次大会学術講演会, 2008 年 8 月 4 日, 横浜市, 横浜国立大学
- ⑤ 高岡真也, 村田滋, 辻勝之, デジタルホログラフィ粒子計測法における粒径に応じた閾値切替, 日本機械学会 2007 年度年次大会, 2007 年 9 月 12 日, 吹田市, 関西大学
- ⑥ 辻勝之, 村田滋, 姉崎幸信, デジタルホログラフィ再生過程における深さ方向の粒子像伸長に関する考察, 日本機械学会 2007 年度年次大会, 2007 年 9 月 12 日, 吹田市, 関西大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村田 滋 (MURATA SHIGERU)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・教授
研究者番号 : 50174298

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者