

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420147

研究課題名(和文) ドップラーシフトホログラフィーによるマイクロ流路内の単眼三次元流速計測

研究課題名(英文) Three-Dimensional Velocity Measurement by Single Camera in a Micro-Channel using Doppler Phase-Shifting Holography

研究代表者

二宮 尚 (NINOMIYA, NAO)

宇都宮大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70212123

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ドップラー位相シフトホログラフィーを用いることで、光のドップラー効果より物体の奥行き方向速度を計測可能なことに着目し、顕微鏡下での μ PIVによる二次元計測に加え、トレーサー粒子のインラインホログラムの時間変化を高速度カメラで観測し、粒子の速度によるドップラーシフトを検出することで、単眼でトレーサー粒子の三次元の位置と速度を同時に精度良く計測した。

本研究では、まず離散的な計測点に対して、各点の三次元速度を独立に計測可能であることを示した。更に、ホログラムの干渉光学系に拡大光学系を加えることで、微小領域に対しても同様にドップラー位相シフトホログラフィーが実現可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：Presently, three-dimensional particle motions are measured by using the Doppler phase-shifting holography. By the Doppler effect caused by the moving particles, the longitudinal velocity can be calculated from the Doppler beat frequency. Moreover, with the use of micro PIV for the in-plane velocity measurement, three-dimensional velocity measurement has been achieved.

First, the discrete particles with different velocities are measured simultaneously. Then, the same measurement was done with the expanding optics. Thus, the three-dimensional velocity measurement of the particles in the micro channel will be possible with the single camera observation under microscopy.

研究分野：熱工学

キーワード：速度計測 三次元計測 ホログラフィー PIV PTV

1. 研究開始当初の背景

近年、デジタルビデオカメラなどの撮像機器の高速度化と高解像度化に伴い、計算機の高速度化も相まって、熱流体の可視化に基づく画像計測技術の進展が著しく、多くの分野で成果を上げている。中でも、PIV (粒子画像流速計) は、カメラ2台を用いたステレオPIVや複数台のカメラを使用するトモグラフィックPIVや時系列データが取得可能なTR-PIVなど、多次元化が実現されている。しかし、顕微鏡下での μ PIVでは、視差が必要なステレオPIVは適用出来ず、共焦点顕微鏡を用いても奥行き方向の速度は計測出来ず、新たな三次元計測手法の開発が求められていた。

一方、ホログラフィーは、単眼で三次元情報が記録可能であり、三次元計測への適用が期待されているが、通常用いられるインライン型ホログラムでは、0次の物体光を除去することが出来ず、奥行き方向の計測精度に問題があった。また、ホログラフィーを利用し、単眼で三次元速度計測が可能なホログラフィックPTV (粒子追跡流速計) も提案されているが、粒子の時間追跡方法に進展が無く、低い解像度に留まっている。

近年、位相の異なる複数の干渉光を用いることで、回折光の強度分布だけを精密に算出することが出来る位相シフト法がいくつか提案され、精度の高い計測が可能となってきた。しかし、時間位相シフト法では非定常計測は難しく、空間位相シフト法では複数台のカメラの精密な位置合わせが必要となるなど、熱流体への応用は限定的であった。一方、ドップラー位相シフト法は、1台の高速度カメラで高精度な三次元計測が可能であり、加えて、物体光と参照光の速度差に基づくドップラー効果を検出するために、そのうなりの周波数から奥行き方向の速度が計測可能であると考え、本研究の着想に至った。

研究代表者は、PIVやPTVに関する豊富な研究経験を有しており、PIVやPTVによる面内方向の速度計測に加え、ドップラー位相シフト法による奥行き方向の速度計測を加えることで、三次元速度計測が可能となると考えられる。既に予備的研究として、一定速度で移動する凹面鏡や5円玉硬貨に対し、ドップラー位相シフト法による計測を試み、精度の高い形状計測と奥行き方向速度の同時計測が可能であることを示した。

2. 研究の目的

本研究では、より一般的な形状の物体を測定対象とすることで、最終的には流体中に散乱した多数のトレーサー粒子の各々に対し、同時に三次元速度計測を可能とすることで、単眼で非接触にてマイクロ流路内の流体に対し、三次元速度計測が可能新たな計測法を開発することを目的とする。

そのためにまず、(1) 離散的な計測点に対し、奥行き方向速度計測が計測可能である

ことを示す。次に、(2) 面内方向への移動を含む、三次元の任意の方向への移動に対する三次元速度計測を実現する。更に、(3) 計測的が奥行き方向にも分布を持つ場合に対し、三次元の位置と速度の同時計測が可能であることを示す。(4) 三次元空間内で複数の計測点を独立に計測することが可能な計測条件の限界を明らかにする。(5) 拡大光学系を導入し、顕微鏡下でも三次元速度計測が実現可能であることを示す。そして、最終的には、(6) マイクロ流路内にて、実際の流れ場に対する三次元流速測定を試みるということを本研究の目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、研究目標を段階的に(1)～(6)として設定したので、各項目について順に研究を行う。

(1) 当初、ドップラー位相シフト法を用いての速度計測は、画面全体が一定の速度で移動する5円玉硬貨を計測対象としたため、画面内の任意の画素について、同一の周波数のドップラー・ビートが検出されたため、微小な金箔を計測対象とすることで、画像の一部分のみからの信号で速度計測が可能であることを示す。

(2) 更に、計測点が面内方向速度を有する場合には、ビート信号の検出点を時間的に追従させる必要があり、それが実現可能であることを示す。更に、画面内を複数の計測点が異なる速度で移動する場合に、各々の速度を独立に検出可能であることを示す。

(3) また、複数の計測点が奥行き方向に分布を持つ場合に、各々の速度のみならず、各々の奥行き方向位置を精度良く計測可能であることを示す。これにより、三次元速度計測の基本原理が確立されることになる。

(4) 複数の計測点が奥行き方向に分布を持ち、更に様々な速度で移動する場合に、各計測点間距離の限界や同時に計測可能な計測点数などの実験条件の詳細を明らかにする。

(5) 顕微鏡下でも同様の三次元速度計測が可能のように、拡大光学系を組み込んで、同様の速度計測が可能であることを示す。

(6) マイクロ流路内のトレーサー粒子に対し、実際にドップラー位相シフト法を用いたデジタルホログラフィーによる三次元速度計測を行い、顕微鏡下での単眼三次元速度計測が可能であることを示す。

4. 研究成果

本研究の目的で設定した(1)～(6)の研究目標に対し、研究の方法で示した手順に従い、研究を進めた結果、以下の結果を得た。

(1) 微小な金箔を計測対象とした場合、ドップラー・ビートを検出する画素の位置に多少の制限があるものの、微小な物体の速度も精度良く計測可能であることを示した。

(2) 観測領域内に複数の微粒子を配置し、それらを異なる速度で移動させた場合について、個々の粒子から異なる周波数のビートが観測され、各々の周波数成分を用いることで速度の異なる粒子の再生像を分離して再生可能であることを示した。

(3) 複数の微粒子を奥行き方向に分布を持たせて配置した場合に対し、各微粒子の奥行き方向位置を精度良く分離しつつ再生可能であることを示した。

(4) 画面内に複数の微粒子を配置した場合の検出分離の条件について検討した。その結果、干渉縞を分離することが可能なことは示せたが、干渉縞の大きさが回折距離に比例するため、本研究の実験装置では、回折距離をある程度までしか小さく出来なかったため、分離可能な干渉縞の下限は特定出来なかった。但し、(5)の拡大光学系との組み合わせにより、この点は解決可能な余地がある。

(5) 対物レンズとコリメートレンズの組み合わせにより、テレセントリック光学系を組み合わせることで、対象物を拡大した状態で三次元速度計測が可能であることを示した。但し、拡大した場合の奥行き方向位置の原点については、更なる検討が必要であることが明らかになった。

(6) 実際のマイクロ流路内における三次元速度計測は実現しなかったが、そのために必要な要素技術はほぼ全て実現出来た。今後も継続的に本研究を遂行する計画であるので、遠くない将来には実現可能であると考えている。

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 2件)

- 1) N. Ninomiya, Y. Kubo, D. Barada and T. Kiire, "Direct Measurement of Longitudinal Velocity by Doppler-Phase-Shifting Holography", *Journal of Visualization*, 査読有, Vol. 18, No. 3, pp. 409-412 (2015)
- 2) N. Ninomiya, Y. Kubo, D. Barada and T. Kiire, "Three-Dimensional Velocity Measurement by a Single Camera using Doppler Phase-Shifting Holography", *Meas. Sci. Technol.* 査読有, (2016) (submitted as selected article)

[学会発表](計 3 4件)

(国際会議)

- 1) N. Ninomiya, S. Tsukada and M. Ikeda, "The Interaction between Two Droplets and the Interaction between Two Solid Spheres", *Proc. 10th Symp. on Particle Image Velocimetry*, (2013), Delft, Netherland.
- 2) T. Yatagai and D. Barada, "Multi-Wavelength Doppler Phase Shift Holography and Interferometry", *Fringe 2013: 7th International Workshop on Advanced Optical Imaging and Metrology*, pp. 167-172 (2013), Nürtingen, Germany.
- 3) D. Barada, T. Tanimoto, K. Yamashita, S. Kawata, and T. Yatagai, "Digital Holographic Imaging of Vector Wave from a Polarization Hologram with Spatial Phase Shifting," *Extended Abstracts of the 74th Autumn Meeting*, JSAP-OSA-124 (2013), Kyoto, Japan.
- 4) N. Ninomiya, Y. Kubo, D. Barada and T. Kiire, "Toward the Development of the Single Camera Three-Dimensional PTV by using a Doppler-Phase-Shifting Holography", *Proc. 16th Int'l Symp. on Flow Visualization*, (2014), Okinawa, Japan.
- 5) N. Ninomiya, Y. Kubo, D. Barada and T. Kiire, "Direct Measurement of Three-Dimensional Velocity by a Doppler-Phase-Shifting Holography", *Proc. 17th Int'l Symp. on Appl. Laser Techniques to Fluid Mechanics*, (2014), Lisbon, Portugal.
- 6) D. Barada, N. Ninomiya, S. Kawata, and T. Yatagai, "Velocity filtering method for moving particles based on doppler phase-shifting digital holography," *Imaging and Applied Optics 2014 OSA Technical Digest ,DTh1B.4* (2014), Seattle, WA, USA.
- 7) N. Ninomiya, Y. Kubo, D. Barada and T. Kiire, "Three-Dimensional Velocity Measurement by a Single Camera using Doppler Phase-Shifting Holography", *Proc. 11th Symp. on Particle Image Velocimetry*, (2015), Santa Barbara, CA, USA.
- 8) D. Kono and N. Ninomiya, "Turbulence Measurement of a 2-D Jet by High Resolution 3-D 3-C PIV", *Proc. 9th Int'l Symp. on Measurement Techniques for Multiphase Flows.*, Vol. 1428, pp. 11-17 (2015), Sapporo, Japan.
- 9) N. Ninomiya, T. Kindaichi, T. Ouchi, Y. and D. Barada, "3-D Velocity Measurement of Dispersed Objects by Doppler Phase-Shifting Holography", *Proc. 1st Pacific Rim Thermal Eng. Conf.*, (2016), Waikoloa, HI, USA
- 10) N. Ninomiya, "Three-Dimensional

Velocity Measurement by a Single Camera Observation using Digital Holography”, Proc. 17th Int’l Symp. on Flow Visualization, keynote, (2016), Gatlinburg, TN, USA.

(国内会議)

- 11) 五月女聡, 二宮 尚, 「3-D 3-C PIV による三次元計測の精度検証」, 第 50 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (2013 年 5 月), 仙台.
- 12) 酒巻洋成, 二宮 尚, 「壁面近傍を落下する液滴周りの圧力分布に関する研究」, 第 41 回可視化情報シンポジウム, 可視化情報, Vol. 33 Suppl., No. 1 (2013 年 7 月), 東京.
- 13) 久保大和, 二宮 尚, 茨田大輔, 喜入朋宏, 「ドップラー位相シフトホログラフィによる物体の三次元速度計測」, 第 41 回可視化情報シンポジウム, 可視化情報, Vol. 33 Suppl., No. 1 (2013 年 7 月), 東京.
- 14) 岩本和也, 二宮 尚, 「液滴の薄い液膜への衝突における流動の可視化と PIV 計測」, 第 41 回可視化情報シンポジウム, 可視化情報, Vol. 33 Suppl., No. 1 (2013 年 7 月), 東京.
- 15) 酒巻洋成, 二宮 尚, 「壁面近傍を落下する液滴内外の流れ場に関する研究」, 可視化情報学会全国講演会(会津 2013), 可視化情報, Vol. 33 Suppl., No. 2 (2013 年 9 月), 会津.
- 16) 五月女聡, 二宮 尚, 「3-D 3-C PIV を用いた三次元計測の精度検証」, 可視化情報学会全国講演会(会津 2013), 可視化情報, Vol. 33 Suppl., No. 2 (2013 年 9 月), 会津.
- 17) 池田元洋, 二宮 尚, 「静止液体中を落下する二液滴の相互作用と固体球の相互作用」, 可視化情報学会全国講演会(会津 2013), 可視化情報, Vol. 33 Suppl., No. 2 (2013 年 9 月), 会津.
- 18) 稲田竜也, 佐藤裕亮, 二宮 尚, 「ドップラー位相シフトホログラフィを用いた単眼 3 次元計測」, 第 51 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (2014 年 5 月), 浜松.
- 19) 河野大輝, 二宮 尚, 五月女聡, 「3-D 3-C PIV による三次元流速測定の高精度化」, 第 42 回可視化情報シンポジウム, 可視化情報, Vol. 34 Suppl., No. 1 (2014 年 7 月), 東京.
- 20) 稲田竜也, 二宮 尚, 佐藤裕亮, 「ドップラー位相シフトホログラフィを用いた三次元速度計測」, 日本機械学会 2014 年度年次大会講演論文集 (2014 年 9 月), 東京.
- 21) 稲田竜也, 二宮 尚, 佐藤裕亮, 「ドップラー位相シフトホログラフィによる三次元速度の単眼計測」, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2014 講演論文集 (2014 年 11 月), 東京.
- 22) 柏木駿, 茨田大輔, 藤村隆史, 川田重夫, 谷田貝豊彦, 「不等間隔フーリエデジタルホログラフィによる微細光波の観察」, 日本光学会情報フォトニクス研究グループ, 第 9 回関東学生研究論文講演会 (2015 年 3 月), 浜松.
- 23) 河野大輝, 二宮 尚, 「高解像度 3-D 3-C PIV による三次元乱流計測」, 第 52 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (2015 年 6 月), 福岡.
- 24) 金田一哲平, 二宮 尚, 「ドップラー位相シフトホログラフィを用いた単眼三次元速度計測」, 第 43 回可視化情報シンポジウム, 可視化情報, Vol. 35 Suppl., No. 1 (2015 年 7 月), 東京.
- 25) 大内崇嗣, 二宮 尚, 「ドップラー位相シフトホログラフィによる微小領域の三次元計測に関する研究」, 第 43 回可視化情報シンポジウム, 可視化情報, Vol. 35 Suppl., No. 1 (2015 年 7 月), 東京.
- 26) 柏木駿, 茨田大輔, 藤村隆史, 川田重夫, 谷田貝豊彦, 「任意拡散参照波を用いたフーリエデジタルホログラフィの提案」, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 14a-2E-1, (2015 年 9 月), 名古屋.
- 27) 金田一哲平, 二宮 尚, 「ドップラー位相シフトホログラフィを用いた物体の速度三次元計測」, 可視化情報学会全国講演会(京都 2015), 可視化情報, Vol. 35 Suppl., No. 2 (2015 年 10 月), 京都.
- 28) 大内崇嗣, 二宮 尚, 「ドップラー位相シフトホログラフィによる拡大三次元計測に関する研究」, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2015 講演論文集 (2015 年 10 月), 大阪.
- 29) 金田一哲平, 二宮 尚, 「ドップラー位相シフトホログラフィによる微粒子の三次元速度計測」, 第 53 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (2016 年 5 月), 大阪.
- 30) 田中 志尚, 二宮 尚, 「3-D 3-C PIV の精度向上に関する研究」, 第 44 回可視化情報シンポジウム, 可視化情報, Vol. 36 Suppl., No. 1 (2016 年 7 月), 東京.
- 31) 名古屋達, 二宮 尚, 松田 勝, 「メダカ胚における心臓内血流の PIV 計測に関する研究」, 第 44 回可視化情報シンポジウム, 可視化情報, Vol. 36 Suppl., No. 1 (2016 年 7 月), 東京.
- 32) 宮内 郁海, 二宮 尚, 「拡大光学系を用いたドップラー位相シフトホログラフィによる三次元計測に関する研究」, 第 44 回可視化情報シンポジウム, 可視化情報, Vol. 36 Suppl., No. 1 (2016 年 7 月), 東京.
- 33) 西村 政彦, 二宮 尚, 「ドップラー位相シフトホログラフィを用いた微粒子の三

次元速度計測に関する研究」, 第 44 回可視化情報シンポジウム, 可視化情報, Vol. 36 Suppl., No. 1 (2016 年 7 月), 東京.

- 34) 加藤 大貴, 二宮 尚, 「自由落下する液滴の表面に対する衝突挙動に関する研究」, 第 44 回可視化情報シンポジウム, 可視化情報, Vol. 36 Suppl., No. 1 (2016 年 7 月), 東京.

〔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：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

- 1) 西尾 茂, 二宮 尚, 「PIV 計測の原理と応用」, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 41, No. 5, pp. 380-386 (2013).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

二宮 尚 (Nao Ninomiya)
宇都宮大学大学院・工学研究科・准教授
研究者番号：70212123

(2) 研究分担者

茨田 大輔 (Daisuke Barada)
宇都宮大学大学院・工学研究科・准教授
研究者番号：80400711

(3) 連携研究者

()

研究者番号：