J0510206

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

稲田 竜也^{*1}, 二宮 尚^{*2}, 佐藤 裕亮^{*1}

Three-Dimensional Velocity Measurement by a Doppler-Phase-Shifting Holography

Tatsuya INADA^{*1}, Nao NINOMIYA^{*2} and Yusuke SATO^{*1}^{*1,2} Dept. of Adv. Interdisciplinary Sci., Graduate School of Engineering, Utsunomiya Univ.
Yoto 7-1-2, Utsunomiya, Tochigi 321-8585, Japan

During these decades, the application of image processing to the flow measurement has made great successes such as PIV. But, the demands for the three-dimensional measurement are growing bigger and bigger. As holography can record three-dimensional structures, digital holography can be a good candidate for the three-dimensional measurement with a single camera. But, the commonly used in-line hologram suffers the influence of the zeroth diffraction, which is the real image of an object. Several techniques that can avoid the zeroth diffraction have been proposed by using so-called “shifting”. In this study, the Doppler phase-shifting holography has been used to accurately calculate the three-dimensional structures. While this technique uses the Doppler phase-shift to extract the first order diffraction from others, the shift frequency is determined by the velocity of an object. This implies that the three-dimensional velocity can be measured directly by Doppler phase-shifting holography and the results are introduced in the present study.

Key Words: Digital Holography, Doppler-Phase-Shifting, Particle Image Velocimetry

1. 結 言

近年、コンピュータやカメラの技術進歩により、流れ場の計測手法として PIV などの可視化画像計測手法が主流となっている。流れ場の 3 次元 PIV を行う手法としては、3 次元 3 成分 PIV (3-D 3-C PIV) やデジタルホログラフィック PTV (DHPTV) がある。3-D 3-C PIV は、3 次元カメラ校正式を用いて、粒子の三次元位置の計測を行い、速度の 3 次元 3 成分を計測する手法である。DHPTV は、粒子像の撮影をデジタルホログラフィで行う PTV である。3-D 3-C PIV は、カメラ校正の精度が粒子の三次元位置の計測精度を規定するため、カメラ校正が複雑になる問題がある。また、測定領域が装置内部の限られた空間であることが多い。一方、DHPTV は、撮影システムが複雑になるが、単眼で被写界深度の深い撮影と実際の物体を三次元的に再生することが可能である。しかし、デジタルホログラフィの再生過程において、+1 次光の他に、0 次光も同時に再生されてしまい、再生像品質が低下する。また、時間軸方向に対する追跡方法に進歩がなく、何かしらの技術革新が必要であった。

ドップラー位相シフト法は、物体からの散乱光を移動するミラーからの参照光と干渉させ、光のドップラー効果による干渉縞の時間変化を高速度カメラで観測し、+1 次光のみの複素振幅を抽出する技術である。また、物体が速度を有する場合においても、同様にドップラー信号の観測が可能である。したがって、三次元速度の効果を含んだ複素振幅分布が算出可能ではないか考え、本研究の着想に至った。本研究では、日本の 5 円硬貨を被測定物とし、移動する 5 円硬貨の速度三成分の計測を行うことが主な目的である。

2. 実験装置

Fig. 1 に実験光学系を示す。基本的な構成は凹面鏡の形状及び速度計測に用いたものと同様である。被測定物として直径 22mm の 5 円硬貨を用い、光軸と VCM ステージとの間に θ の角度を与えて、速度三成分を計測できる

^{*1} 非会員, 宇都宮大学大学院工学研究科学際先端システム学専攻 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

^{*2} 正員, 宇都宮大学大学院 工学研究科

E-mail: nino@utmu.jp

ように設定した. この場合, 光軸と平行方向の移動速度 v_{0z} は $v_{0z} = v_0 \cos \theta$, 垂直方向の移動速度 v_{0x} は $v_{0x} = v_0 \sin \theta$ で与えられる. 実験条件は, 撮影速度 $f_s = 2000\text{fps}$, シャッター速度 $1/2000\text{s}$ とし, 256 階調 (8bit), 解像度 $1024 \times 1024\text{pixel}$ の干渉縞画像を $N = 4096$ 枚取得した. 撮影した干渉縞画像のうち, 400frame から 911frame の 512 枚, 2400frame から 2911frame の 512 枚の 2 組を用いて, 2 時刻の 5 円硬貨の強度分布を算出した. 得られる強度分布画像は, ある時間の間における積分値であるため, 中間の時刻を強度分布の時刻と定義し, $t_1 = 0.328\text{s}$, $t_2 = 1.328\text{s}$ とした. さらに, 光軸と VCM ステージとのなす角度 θ を 76° に設定した. 5 円硬貨は VCM ステージを用いて一定速度 $v_0 = 413.4 \mu\text{m/s}$ で移動させ, $v_{0x} = 400 \mu\text{m/s}$, $v_{0z} = 100 \mu\text{m/s}$ とした. また, 平面ミラーには速度を与えないこととした ($v_r = 0 \mu\text{m/s}$). また, 5 円硬貨の移動方向は, ビームスプリッタに近づく方向に設定し, 5 円硬貨と CMOS イメージセンサーとの距離は $z = 265\text{mm}$ に設定した.

Fig.1 Experimental setup

3. 五円硬貨の三次元計測

Fig.2. に, ビート周波数スペクトルを示す. Fig.2 をみると, 大きく 3 つのピークが確認でき, ビート周波数値は, (a) では $\nu_b = \pm 396.2\text{Hz}$, (b) では $\nu_b = \pm 399.7\text{Hz}$ であった. 得られたビート周波数値を速度に変換すると, (a) では $v_{0z} = 101.8 \mu\text{m/s}$, (b) では $v_{0z} = 102.7 \mu\text{m/s}$ となった. 誤差は, (a) では 1.8%, (b) では 2.7% となり, (a), (b) ともに実測値と比べ, 若干大きな値となっていることが確認できる. これは, 測定対象が面内方向にも移動しているにも関わらず, ビート周波数スペクトルを干渉縞画像のある一画素のみの時系列変化だけを用いて算出したためと考えられる. 本来であれば, 画像内の特徴点を捉え, その点の時系列変化を調べるべきである.

Fig.2 Beat frequency spectra obtained from 512 images

Fig. 3 は、2 時刻の再生像を用いた PIV 結果である。左側に示した図は、2 時刻の再生像を合成したものである。赤色は 0.328s、青色は、1.328s を示す。拡大図を見ると、各時刻の再生像が独立して存在していることが確認でき、5 円硬貨が x 方向に移動していることがよくわかる。PIV 解析の条件は、解像度 3072×3072 pixel、検査窓サイズは 50×50 pixel、探索領域サイズは 90×90 pixel、オーバーラップは 50% と設定した。得られた平均移動量は、それぞれ $v_{0x} = 40.07$ pixel, $v_{0y} = 0.742$ pixel となった。 y 方向の移動量が計測されているのは、5 円硬貨の移動に用いた VCM ステージの移動方向と、撮影に用いたカメラの x 方向が完全には一致していなかったためと考えられる。

Fig.3 Displacement of Japanese 5-yen coin measured by 2-D PIV

ここまでは、撮影された干渉縞画像の中心画素の光強度の時系列変化を用いて計測を行った。しかし、5 円硬貨は、 x - y 平面内を移動するため、前述したように、5 円硬貨の移動方向に沿って干渉縞画像中の画素の輝度値の時系列変化を算出する必要がある。本研究では、式(1)に示す、離散フーリエ変換の性質（シフト定理）を利用して画像位置の補正を行い、再びビート周波数および PIV の計測を行った。

$$f(x - x_0, y - y_0) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{k=0}^{N_x-1} \sum_{l=0}^{N_y-1} F(k, l) \times \exp \left[2\pi i \left(\frac{kx}{N_x} + \frac{ly}{N_y} \right) \right] \cdot \exp \left[2\pi i \left(\frac{kx_0}{N_x} + \frac{ly_0}{N_y} \right) \right] \quad (1)$$

式(1)に基づいて、ビート周波数値を算出した結果、(a)では $\nu_b = \pm 391.2$ Hz, (b)では $\nu_b = \pm 392.6$ Hz であった。ビート周波数値を速度に変換すると、(a)では $v_{0z} = 100.5 \mu\text{m/s}$, (b)では $v_{0z} = 100.9 \mu\text{m/s}$ となった。誤差は、(a)では 0.5%, (b)では 0.9% となった。また、PIV 解析を行った結果、平均移動量は、 $v_{0x} = 0.0427$ pixel, $v_{0y} = 0.0215$ pixel となり、ほとんど移動していないことがわかる。Fig. 4 に示すように、わずかな補正値を残すものの、はじめに行われた PIV 解析結果が精度良く行われていることが確認できる。Table. 1 に、角度 $\theta = 76^\circ$ における 5 円硬貨の最終的な速度計測結果を示す。

Table 1 Measured velocities in longitudinal and transverse direction

	v_{0z}	v_{0x}
Theoretical Value ($\mu\text{m/s}$)	100	400
Measurement value ($\mu\text{m/s}$)	100.7	401.2

Fig.4 Displacement of Japanese 5-yen coin measured by 2-D PIV re-calculated

4. 結 論

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による物体の三次元形状計測手法に、粒子画像流速計 (PIV: Particle Image Velocimetry) の原理を組み合わせることで、物体の三次元速度を単眼観測で直接計測する手法を考案し、以下の結論を得た。

- (1) 光軸と垂直方向に速度成分を持つ物体の再生像を取得することに成功した。
- (2) 時刻の再生像を用いて PIV 解析を行い、2次元平面内の移動速度を計測することに成功した。
- (3) PIV 解析結果をもとに干渉縞の画像補正を行い、ビート周波数値から設定値に近い奥行き移動速度を計測することに成功した。

謝 辞

本研究の一部は、宇都宮大学オブティクス教育センター、宇都宮大学特別経費「バイオイメーjing技術の総合的推進事業」、JSPS 科研費 (No. 25420147) の援助を受けた。記して、謝意を表する。

参考文献

- (1) Schnars, U. and Jueptner, W., “Digital Holography Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques”, *Springer* (2005).
- (2) Kikuchi, Y., Barada, D., Kiire, T. and Yatagai, T., “Doppler Phase-Shifting Digital Holography and its Application to Surface Shape Measurement”, *Optics Letters*, Vol. 35, No. 10 (2010).