デジタルホログラフィを用いた液滴 3 次元形状計測

組谷 賢次郎^{*} (京工繊大院), 村田 滋 (京工繊大), 田中 洋介 (京工繊大)

Measurement of 3-D shape of droplet using digital holography

Kenjiro KUMITANI, Shigeru MURATA and Yohsuke TANAKA

ABSTRACT

In order to measure the flow in a droplet using laser light sheet, 3-D shape of the droplet and positions of tracer particles in it must be measured simultaneously, because the visualized images are distorted on account of refraction. Computer tomography is a method to construct 3-D configuration from object scanning data. This paper presents a digital holographic method to record a droplet illuminating from multiple directions and then to reconstruct the 3-D shape of the droplet in the same way as computer tomography. A diffraction grating is employed in a multi-hologram imaging system to capture an instantaneous digital hologram with three fringe patterns observed from different directions. Performance test is carried out for a ball lens to evaluate the measurement accuracy of the present method. The results show that the instantaneous 3-D shape of a droplet can be successfully reconstructed using the present method.

Keywords: 3-D shape, Droplet, Digital holography, Diffraction grating

1. 緒言

近年, 燃料電池の電極素材や競泳水着などにおいて, 撥水性能を備えた素材の開発が進められている. そのような素材の表面上での液滴の挙動を知る手法としては, トレーサ粒子を計測対象の流体内に混入し, ある時間間隔で撮影した画像を時系列解析することにより流速を計測する PIV 法⁽¹⁾が挙げられる.

液滴内部の流動を計測するには, トレーサ粒子から液滴を抜けてくる散乱光に対して屈折の影響を考慮しなければならず, Kang らはスネルの式を用いて画像補正を行い, 液滴中心を通る断面内の流動を計測している⁽²⁾. しかし, 液滴の変形を伴う場合は, その液滴の 3 次元形状を逐次知らなければならず, そのための実験手法を確立することは重要なポイントとなる.

本論文では 3 次元形状計測のため, CT を用いた手法について論じる. 複数方向から計測対象の情報を得るため, 回折格子を用いたインラインホログラフィの手法を取り上げ⁽³⁾, その投影像から 3 次元形状の復元を試みた.

2. 3 次元形状測定法

2. 1 回折光による照明

回折格子とは, 複数のスリットに入射してきた光を回折により干渉縞とする光学素子である. 平面波を入射させると, 0 次回折光と, n 波長のずれごとに $\pm n$ 次回折光が作られる. n 次回折光のそれぞれの回折角は, 入射角を α , 回折角を β , 入射光の波長を λ , 格子間距離を d とし, 以下ようになる.

$$\beta = \arcsin\left(\frac{n\lambda - d \sin \alpha}{d}\right) \quad (1)$$

± 1 次回折光が十分に計測対象を捉えるように設置し, 0 次回折光と ± 1 次回折光が同時にカメラの撮像素子に届くように設置する. Fig.1 に示すように 0 次回折光と ± 1 次回折光同士がそれぞれ重ならないように設置しなければならない. 今回の実験では, 回折格子から計測対象までの距離は 5mm とした.

Fig.1 Optical system.

また, ± 1 次回折光によるホログラムは, 入射光に対して角度 β だけ傾いているため, 補正をかける必要がある.

2. 2 3 次元形状の復元

デジタルホログラフィによる手法⁽⁴⁾によって得られたホログラムを元に 3 次元形状を復元する. 複数方向からの計測対象の情報を元に再構築を行う CT の手法を用いる. 計測対象は球に近い形状とし, 回折格子を用いて撮影した方向の違うホログラムから得られた投影像を逆投影し, 投影像間の鉛直方向断面をスプライン補間法により滑らかに繋げる. なお, スプライン補間法には 3 次のスプライン関数を導出し, 用いた⁽⁵⁾.

2. 3 性能評価

ボールレンズを用いて 3 方向からの投影像を元に、3 次元形状の復元が可能かを調べた。撮影した画像を Fig.2 に示す。入射角 α を 0° ，入射光の波長 λ を 632.8nm，格子間距離 d を 833.3nm とした。それにより 1 次回折角 β は 49° となる。カメラは SONY 製 XCL-5000，画像サイズは $2048 \times 2048 \text{ pixel}^2$ ，1 画素サイズは $3.45 \times 3.45 \mu\text{m}^2$ ，露光時間は $1/1000 \text{ s}$ とした。撮影したホログラムを奥行き位置をずらしながら再生を行った。投影像から計測対象の輪郭を検出するために、計測対象と背景部の画像濃度値が最も違う画像を選択した。Fig.2 の $A-A'$ で光強度値の勾配を求めた図を Fig.3 に示す。また、各奥行き位置における最も大きい光強度値の勾配を Fig.4 に示す。

Fig.2 Reconstructed image.

Fig.3 Light intensity.

Fig.4 Maximum gradient.

選択した画像全体に SOBEL フィルターをかけ、二値化することにより輪郭を検出した。その後、再生像の $\pm 10 \mu\text{m}$ の奥行き位置の再生像とパターンマッチングを行ってノイズを除去した。

Fig.5 の(a)に示す逆投影像から復元した形状と、(b)に示すシミュレーションにより作成したボールレンズの形状の比較を行った。Fig.5 の(a)におけるプロット点に対して中心からの距離のヒストグラムをとると Fig.6 のようになる。

(a) experimental

(b) true

Fig.5 Reconstructed 3D shape of a ball lens.

Fig.6 Frequency of radial distance.

Fig.6 から分かるように真値である半径 $1000 \mu\text{m}$ 付近にヒストグラムは集中しており、その RMS 誤差は $12.09 \mu\text{m}$ であった。

2. 4 液滴の形状復元

同様の手順で、撥水处理を行った平板上に置いた液滴の 3 次元形状復元を行った図を Fig.7 に示す。撮影パラメータは、ボールレンズ撮影時と同様である。Fig.7 を見ると、液滴上部に比べ平板との接触面付近では 3 次元形状が復元されていないことが分かる。

Fig.7 Reconstructed 3D shape of a droplet.

3. 結言

提案した手法の優位性を確認するため、実験的に時間変化する液滴の復元を行い上記のような結果が得られた。得られた形状を元に、液滴内部を通過するトレーサ粒子からの散乱光を補正することが可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 酒井 宗寿, 中島 章, PIV 法を用いた撥水表面上における液滴転落時の内部流動の可視化, 可視化情報学会, (2006), Vol26, Supp1, No.2, pp.295-296
- 2) K.H.Kang, S.J.Lee, C.M.Lee, Visualization of Flow inside a Small Evaporating Droplet, Measurement science & Technology for PIV03's paper, 3242
- 3) 梅田 光一, 山本 恭志, 植村 和正: 回折格子を利用したインラインホログラフィによる 3 次元位置計測, 日本機械学会年次大会講演論文集(2007), No07-1, pp.109-110
- 4) Shigeru Murata, Norifumi Yasuda, Potential of digital in particle measurement, Optics & Laser Technology 32, (2000), pp.567-574
- 5) 吉村和美, 高山文雄, パソコンによるスプライン関数データ解析/CG/微分方程式, 東京電機大学出版局, (1988), pp21-98