時系列カラー画像を用いた depth-from-defocus による

粒子奥行き位置と変位量の同時計測*

出口 美樹¹⁾, 村田 滋²⁾, 田中 洋介²⁾

Simultaneous measurement of particle position and displacement in depth by depth-from-defocus using time-series color images

Miki DEGUCHI, Shigeru MURATA and Yohsuke TANAKA

ABSTRACT

This paper presents a method for simultaneous measurement of particle position and displacement in depth by depth-from-defocus using time series color images. This method enables us to obtain the particle information for 3D-PIV by using a single color camera. To improve the depth measurement accuracy, three differently blurred images are simultaneously captured as RGB color images and the depth information is estimated from the three images with a neural network considering in-plane position. In performance tests, we numerically and experimentally evaluate the measurement accuracy of particle position and displacement in depth. The results of depth position by neural network show that the RMS error decreases to 65% of that by a calibration line. The results of depth displacement from three color images show that the RMS error decreases to 24% of that from only one color image, corresponding to 9.5% for maximum displacement 2 mm.

Keywords: Depth-from-defocus, Color image, Depth position, Depth displacement, Neural network

1. 緒言

モーションキャプチャや自律移動ロボットなど画像を用いて 3 次元空間情報を測定する技術は実用段階にあり、ステレオ法等に基づく複数台のカメラを使用する方法の他に、1 台のカメラで 3 次元の情報を得る単眼観測法が開発されている。その実用的な方法の一つとして、画像ぼけの違いから奥行き位置を取得する **depth-from-defocus (DFD)** がある。近年では DFD の奥行き位置の測定精度を向上させるためにレンズ開口に工夫を加えており、Zhou ら¹⁾は 2 つの最適化された符号化開口を用いてそれぞれ画像を取得し、深度マップや全焦点画像の作成を行っている。また、Moriuchi ら^{2), 3)}は 2 色のカラーフィルタをレンズの開口に挿入し、非対称 DFD によって 1 枚の画像から深度マップを作成している。しかし、これらの研究は風景等の広範囲な奥行き位置を対象としているため、奥行き位置

測定誤差は 2 mm 程度となっている。

一方、流体工学における動画像計測分野では、著者ら^{4,7)}が DFD を用いて可視化トレーサ粒子の空間分布検出を行ってきた。3 板式 CCD カラーカメラとカラーフィルタによるマイケルソン干渉計の原理を用いた光学系を構成し、これにより同時に取得した異なる画像ぼけ状態の 2 枚の粒子画像から奥行き位置を推定している。しかし、奥行き測定誤差は 1.7 mm であり、奥行き方向の十分な粒子追跡精度は得られていない。また、田中ら⁸⁾は時系列画像を DFD に基づき解析することで奥行き変位量を直接推定する方法を提案している。しかし、これらの DFD を用いた手法を実際の流れ場での 3D-PIV に適用するためには、別途奥行き位置の特定が必要である。また、DFD と同じく画像ぼけを利用した奥行測定法の一つとみなせる 3 点ピンホールを用いた手法^{9), 10)}では、焦点ずれ量に応じて、1 粒子に対して生じる 3 つの粒子像の広がりが増えることを利用しているが、ピンホールを用いるため光量不足が問題となる。

そこで本研究では、RGB 3 色の時系列画像情報を用いた **depth-from-defocus** によって奥行き位置と奥行き変位

* 原稿受付 2019 年 4 月 15 日

1) 京都工芸繊維大学大学院 工芸科学研究科 (〒606-8585 京都府京都市左京区松ヶ崎橋上町)

2) 正会員 京都工芸繊維大学 機械工学系

量それぞれの評価量を求め、両者の同時推定を行う。さらに推定の際にはニューラルネットを用いることで、粒子の面内位置や奥行き変位量の場合には奥行き位置を考慮することで測定精度の向上を目指した。特に、100 mm 程度の流体機械モデルにおける 3D-PIV 計測を目的として、奥行き変位-2~2 mm の最大変位に対し、10 %以下の測定誤差を目標とした。

2. 理論

レンズを含む観測光学系において、合焦位置において得られる画像は鮮明であり合焦画像として得られるが、合焦位置から離れるにつれて像はぼやけていきぼけ画像として得られる。Depth-from-defocus とは、対象物の複数の異なるぼけ画像を用いて奥行き方向の位置や変位量を推定する方法である。

ぼけ画像を $g(x,y)$ 、合焦画像を $f(x,y)$ とすると、 $g(x,y)$ と $f(x,y)$ の関係はコンボリューション*を用いて式(1)のように表せる⁴⁾。 $b(x,y)$ は画像のぼやけ方を表す関数であり、画像ぼけ関数と呼ばれ、 x, y は画像中の座標位置である。

$$g(x,y) = f(x,y) * b(x,y) \quad (1)$$

また、式(1)から、ぼけ画像 $g(x,y)$ のフーリエ変換 $G(\xi,\eta)$ は式(2)のように $g(x,y)$ 、 $b(x,y)$ それぞれのフーリエ変換 $F(\xi,\eta)$ 、 $B(\xi,\eta)$ の積で表すことができる。ただし、 ξ, η は空間周波数成分を表す。

$$G(\xi,\eta) = F(\xi,\eta)B(\xi,\eta) \quad (2)$$

ここで、画像ぼけ関数 $b(x,y)$ について、本研究では式(3)のようにガウス関数を用いて表す。 σ は画像ぼけの空間的広がりを表す標準偏差であり、物体と合焦位置との位置関係によって変化する。

$$b(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{\sigma^2}\right) \quad (3)$$

また、式(3)をフーリエ変換すると式(4)を得る。

$$B(\xi,\eta) = \exp\left(-\frac{\sigma^2(\xi^2+\eta^2)}{2}\right) \quad (4)$$

式(4)から画像ぼけの程度を表す分散 σ^2 は式(5)のように画像ぼけ関数のフーリエ変換を用いて表すことができる。

$$\sigma^2 = -\frac{2}{\xi^2+\eta^2} \log B(\xi,\eta) \quad (5)$$

次に、2 枚のぼけ画像 g_1, g_2 を用いた奥行き位置や奥行き変位量の評価式について考える。以下では g_1, g_2 に関わる量を添え字 1, 2 をつけてそれぞれ表現する。 g_1, g_2 は、同じ対象物に対して画像ぼけの程度が異なるぼけ画像であるため、これらの合焦画像 f は等しく、画像ぼけ関数 b_1, b_2 のパラメータ σ^2 が異なる。よって g_1, g_2 のフーリエ変換

G_1, G_2 の比は式(6)のように B_1, B_2 の比で表すことができる。

$$\frac{G_2(\xi,\eta)}{G_1(\xi,\eta)} = \frac{F(\xi,\eta)B_2(\xi,\eta)}{F(\xi,\eta)B_1(\xi,\eta)} = \frac{B_2(\xi,\eta)}{B_1(\xi,\eta)} \quad (6)$$

これら 2 枚のぼけ画像 g_1, g_2 の評価式を E とし、 σ^2 の差で表すと式(5)、(6)から式(7)のように表すことができる。

$$\begin{aligned} E = \sigma_2^2 - \sigma_1^2 &= -\frac{2}{\xi^2+\eta^2} \log \frac{B_2(\xi,\eta)}{B_1(\xi,\eta)} \\ &= -\frac{2}{\xi^2+\eta^2} \log \frac{G_2(\xi,\eta)}{G_1(\xi,\eta)} \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)において、実際の粒子画像をフーリエ変換すると虚部を含むため、式(7)は式(8)のように絶対値を用いて表す。

$$E = -\frac{2}{\xi^2+\eta^2} \log \left| \frac{G_2(\xi,\eta)}{G_1(\xi,\eta)} \right| \quad (8)$$

式(8)の評価式について、2 枚のぼけ画像 g_1, g_2 の取得方法を述べる。既報^{4),8)}の通り、2 枚のぼけ画像の取得手順は以下の 2 つに分けられるが、本論文では両者を併用している。

STEP1: 時刻 $t = t_0$ の対象物を異なる条件で同時に撮影する
STEP2: 時間変化 Δt による対象物の移動を撮影する

STEP1 は時刻 $t = t_0$ の対象物を条件を変えて撮影した 2 枚のぼけ画像から式(8)によって評価量を計算する。この評価量の値は時刻 $t = t_0$ の対象物の奥行き位置を表す値となる。同時に異なるぼけ画像を取得するために Fig. 1 のようなマイケルソン干渉計を用いる。Fig. 1 はハーフミラーとミラー 1 の間の距離 l_d に対して、ハーフミラーとミラー 2 の間の距離を $l_d + \Delta l_d$ にすると、対象物→ハーフミラー→ミラー 1→ハーフミラー→カメラを経路とする Path1 と対象物→ハーフミラー→ミラー 2→ハーフミラー→カメラを経路とする Path2 の 2 つの光路があり、その光路長差 $2\Delta l_d$ が与えられる。2 つの経路で観測される画像を時刻 $t = t_0$ で同時に取得すると、Fig. 2 のように Path1 から得られるぼけ画像 g_{p1} と Path2 から得られるぼけ画像 g_{p2} は $2\Delta l_d$ 離れた位置に対象物があるような異なるぼけ画像となる。Path1 と Path2 から同時刻に得られた 2 枚の異なるぼけ画像から式(8)によって奥行き位置評価量を計算する。その評価量を E_d とすると、式(8)から式(9)のように表される。

$$E_d = E_d(\xi,\eta) = \sigma_{p2}^2 - \sigma_{p1}^2 = -\frac{2}{\xi^2+\eta^2} \log \left| \frac{G_{p2}(\xi,\eta)}{G_{p1}(\xi,\eta)} \right| \quad (9)$$

STEP2 では、 Δl_d の大きさには奥行き変位推定法は直接関わらないので、Fig. 2 の Path1 にのみ注目して述べる。

まず、同じ観測条件で撮影した時刻 t_0 の対象物の奥行き位置 z でのぼけ画像 g_z と、時刻 $t_0 + \Delta t$ の対象物の奥行き位置

Fig. 1 Basic concept of depth-from-defocus with Michelson interferometer.

Fig. 2 Difference in image bur between Path1 and Path2.

$z + \Delta z$ でのぼけ画像 $g_{z+\Delta z}$ を撮影する。これらは対象物の移動によって異なるぼけ画像として得られる。これらの画像 $g_z, g_{z+\Delta z}$ を用いて式(8)によって評価量を計算する。この評価量の値は時刻 t_0 での奥行き位置 z および $t_0 + \Delta t$ での奥行き位置 $z + \Delta z$ における画像ぼけ程度の差を表す値となる。このときの式(8)の E を奥行き変位評価量 E_s とし、式(10)で表す。

$$E_s = E_s(\xi, \eta) = \sigma_{z+\Delta z}^2 - \sigma_z^2 = -\frac{2}{\xi^2 + \eta^2} \log \frac{|G_{z+\Delta z}(\xi, \eta)|}{|G_z(\xi, \eta)|} \quad (10)$$

以上式(9)および式(10)で表される評価量を用いてそれぞれ奥行き位置と奥行き変位量を別々に求める。

最後に奥行き位置評価量 E_d と奥行き変位評価量 E_s の関係について示す。Path1, Path2 それぞれの奥行き変位評価量 $E_{s,1}, E_{s,2}$ の差を求めると式(11)のように表せる。

$$\begin{aligned} E_{s,2} - E_{s,1} &= -\frac{2}{\xi^2 + \eta^2} \log \frac{|G_{2,z+\Delta z}(\xi, \eta)|}{|G_{2,z}(\xi, \eta)|} + \frac{2}{\xi^2 + \eta^2} \log \frac{|G_{1,z+\Delta z}(\xi, \eta)|}{|G_{1,z}(\xi, \eta)|} \\ &= -\frac{2}{\xi^2 + \eta^2} \log \frac{|G_{2,z+\Delta z}(\xi, \eta)|}{|G_{1,z+\Delta z}(\xi, \eta)|} + \frac{2}{\xi^2 + \eta^2} \log \frac{|G_{2,z}(\xi, \eta)|}{|G_{1,z}(\xi, \eta)|} \\ &= E_d|_{z+\Delta z} - E_d|_z \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 $G_{1,z}, G_{2,z}$ はそれぞれ Path1, Path2 から得られた奥行き位置 z でのぼけ画像のフーリエ変換、 $G_{1,z+\Delta z}, G_{2,z+\Delta z}$ は Path1, Path2 の奥行き位置 $z + \Delta z$ でのぼけ画像のフーリエ変換である。式(11)の右边は奥行き位置が Δz 異なるときの奥行き位置評価量 E_d の値の変化であり、奥行き位置評価量の感度を表している。奥行き位置評価量 E_d の感度が高くなることで奥行き位置計測を精度良く行えることにつながる。よって奥行き位置評価量 E_d の感度を上げる

ためには、式(11)の左辺の値が大きくなる 2 つの Path の光路長差 $2\Delta l_d$ を設定すれば良い。

式(9)や式(10)の評価量を求める際には対象物を $N_p \times N_p$ pixel サイズで切り出し、高速フーリエ変換(FFT)を行うことでぼけ画像のフーリエ変換 G を得る。以上のように取得した画像から求めた奥行き位置評価量 E_d と奥行き位置 z 、奥行き変位評価量 E_s と奥行き変位量 Δz を校正してそれぞれの推定を行う。

3. 観測方法

3.1 観測装置

本提案手法では Fig. 3 に示す光学系を用いて粒子画像の取得を行う。Fig. 3 は Fig. 1 同様にマイケルソン干渉計の仕組みを用いて奥行き位置の異なるぼけ画像をカラー画像として同時に取得する光学系である。ハーフミラーで分割された反射光と透過光はそれぞれある一定の波長域のみ反射し、それ以外は透過する機能をもつイエロー（反射波長帯域 400-520 nm）とシアン（反射波長帯域 590-700 nm）のダイクロイックミラーで反射させる。シアンのダイクロイックミラーの設置位置は調整可能である。画像の取得には 3 板式 CCD (3CCD) カラーカメラを用いる。今回用いた 3CCD カラーカメラ（JAI AT-140CL, フレームレート 25.21 frame/sec, 画像サイズ 1392×1040 pixel）では、イエローのダイクロイックミラーから青と緑、シアンからは赤の波長が反射されて画像を得ることができる。Fig. 3 に示すようにハーフミラーと粒子、イエローのダイクロイックミラー、シアンのダイクロイックミラー、カメラのフランジ面との間の距離をそれぞれ $l_p, l_d, l_d + \Delta l_d, l_c$ で表し、 $\Delta l_d = 0$ のときは 2 枚のダイクロイックミラーがハーフミラーに対して等しい距離にある場合を表す。

Fig. 4 には Fig. 3 の光学系から得られた像を示す。イエローのダイクロイックミラーを反射して得られた像が green, シアンのダイクロイックミラーを反射して得られた像が red である。このとき用いたレンズは Nikon の 50 mm 標準レンズ、F 値 f1.2~16 であり、f1.2 とした。照明は 2 灯式のストロボを用いた。green, blue の光路における対象物までの距離を L で表すと $L = l_c + 2l_d + l_p$ であり、このときの red の光路における対象物までの距離は $L + 2\Delta l_d$ となり、対象物の奥行き位置 z は $z = L$ とする。Fig. 4 は $l_c = 130$ mm, $l_d = 65$ mm, $\Delta l_d = 2$ mm, l_p は 2 μ m ごとに制御可能な電動ステージ（中央精機, QT-ADL1）によって 350~360 mm の間を 1 mm 間隔で変えて粒子の奥行き位置 $L = 610 \sim 620$ mm の画像を取得した。Fig. 4 の得られた像は $\Delta l_d = 2$ mm であることから、光路長差が $2\Delta l_d = 4$ mm の場合である。Fig. 4 に示すように 2 つのダイクロイ

Fig. 3 Optical setup.

 Fig. 4 A Sample of blurred images ($\Delta l_d = 2$ mm).

ックミラーの設置位置を変えて光路長差をつけることでそれぞれから得られる像の合焦位置が異なっていることが分かる。

Fig. 5には取得した画像の合焦位置と画像ぼけの関係を調べるため、RGB 各色に分けて奥行き変位評価量を求めたものを示す。カメラ条件や用いたレンズ、また l_d , l_c の距離は Fig. 4 の画像取得と同様で、 $\Delta l_d = 0$ mm, l_p は電動ステージによって 350~370 mm の間を 1 mm 間隔で変えて $L = 610 \sim 630$ mm の画像を取得した。Fig. 5 は $L = 624$ mm を奥行き位置 z_p として、縦軸に奥行き位置 z_p からの奥行き変位評価量 E_s , 横軸には L と $z_p = 624$ mm からの変位量 Δz を示した。図中には各奥行き位置で検出された 480 個前後の粒子に対する E_s の平均値と標準偏差をそれぞれシンボルとエラーバーで示している。このときの粒子像の切り出しサイズは粒子像を中心に $N_p = 16$ pixel とした。Fig. 5 において、 E_s が極小値となる奥行き位置が合焦位置となる。Fig. 5 の結果から、Blue, Green, Red の合焦位置はそれぞれ 624, 617, 618 mm と分かる。これらの合焦位置の違いは色収差の影響が大きいと考えられるが、カメラ対象物間距離、使用するカメラレンズ性能に影響されるため、本計測法を使用する場合、事前に Fig. 5 の画像ぼけ特性を把握することが重要である。

3.2 較正

Fig. 5 から、今回使用した観測系では奥行き変位評価量 E_s の値は合焦位置よりも ± 8 mm 程度離れた位置においてその変化が大きいことが分かる。これらの領域では、画像ぼけが粒子像切り出しサイズ $N_p \times N_p$ ($N_p = 16$ pixel) 内で顕著に変化している。 E_s の値の変化が大きいと奥行き変位量 Δz に対する E_s の感度が高いことを意味する。また、奥行き位置の推定には異なる色の画像ぼけの差から奥行き位置評価量 E_d を求める。式(11)に示すように奥行き位置評価量 E_d は Fig. 5 に示すある 2 色の E_s の差が奥行き位置に対して大きな変化となるよう設定すれば L を感度良く検

 Fig. 5 Estimator E_s in RGB images for various particle positions in depth ($z_p = 624$ mm).

出できる。以上のことから奥行き位置 z と奥行き変位量 Δz に対して感度を同時に上げるためには、Fig. 5 の $\Delta l_d = 0$ mm の場合において green の画像の $L = 624$ mm と red の画像の $L + 2\Delta l_d = 612$ mm 付近を用いるのが適切であると判断できる。よって Δl_d の値は $\Delta l_d = 6$ mm とし、Red の焦点位置を奥行き方向手前に 12 mm 移動させて観測した。また、今回の測定対象範囲に関して、奥行き位置は $L = 610 \sim 615$ mm, 奥行き変位量は $\Delta z = -2 \sim 2$ mm とする。

Fig. 6 には式(9)の $P_1 = \text{Green}$, $P_2 = \text{Red}$ の画像を用いた場合の奥行き位置評価量 E_d を示している。縦軸に奥行き位置評価量 E_d , 横軸に粒子の奥行き位置 L を示す。奥行き位置 L は測定対象範囲の $L = 610 \sim 615$ mm を示している。図中には各奥行き位置で検出された粒子の E_d の平均値と標準偏差を示している。Fig. 7 には式(10)の奥行き変位評価量 E_s を示している。Fig. 7 は縦軸に奥行き変位評価量 E_s を示し横軸に粒子の変位量 Δz を示している。Fig. 7(a) は $L = 612$ mm, Fig. 7(b) は $L = 613$ mm を奥行き位置 z_p として、奥行き位置 z_p からの奥行き変位量と奥行き変位評価量を示している。Fig. 7(a), (b) ともに粒子の奥行き変位量 $\Delta z = 0$ mm の位置を実線で示し、奥行き変位測定の対象範囲は実線の両側に示した点線の内側とする。Fig. 7(a), (b) から、奥行き位置 z に応じて Δz と E_s の関係を較正しておく必要があることが分かる。

 Fig. 6 Calibration results between E_d and L .

Fig. 7 Calibration results between E_s and Δz for two different depth positions z_p .

次に奥行き位置評価量 E_d と奥行き変位評価量 E_s の分布を示す. Fig. 8 には奥行き位置評価量 E_d の x - y 分布を $L = 611, 613, 615$ mm の場合について示す. 同様に Fig. 9 には $L = 613$ mm を奥行き位置 z_p として, 奥行き位置 z_p における奥行き変位評価量 E_s の x - y 分布を $\Delta z = -2, 0, 2$ mm の場合について RGB ごとに示す. Figs. 8, 9 左右の図は同じ結果を異なる方向から示している. Figs. 8, 9 いずれも面内位置が変わると同じ奥行き位置や奥行き変位量であっても評価量 E_d, E_s の値が異なることが分かる. この面内位置による評価量の値の違いが Figs. 6, 7 の標準偏差の値にも影響を与え, ばらつきが大きくなっていると考えられる. 以上から奥行き位置の推定には各粒子の奥行き位置評価量 E_d と面内位置の考慮が必要であること, さらに奥行き変位量の推定には各粒子の奥行き変位評価量 E_s と面内位置, さらに粒子の奥行き位置の考慮が必要であると言える.

Fig. 8 Correlation between E_d and in-plane position (x, y) .

Fig. 9 Correlation between E_s and in-plane position (x, y) .

3.3 ニューラルネットによる推定

3.2 節から, 奥行き位置評価量 E_d の値は粒子が同一の奥行き位置であっても画像中の面内位置 (x, y) によって変わるということ, また奥行き変位評価量 E_s の値は粒子の面内位置 (x, y) だけでなく粒子の奥行き位置 z によっても値が変わるため, これらの値を考慮して奥行き位置と奥行き変位量それぞれの推定を行う必要があることが分かった. そこで, これらを考慮して推定を行うため, 本研究では階層型ニューラルネット¹¹⁾を用いた.

Fig. 10 に今回用いたニューラルネットの概念図を示す. Fig. 10(a) は奥行き位置推定, Fig. 10(b) は奥行き変位推定のためのニューラルネットである. 今回, このように奥行き位置推定と奥行き変位推定それぞれに対してニューラルネットを構築した. Fig. 10(a) の奥行き位置推定には検出された各粒子の面内位置 $(x, y) = (x_p, y_p)$ と奥行き位置評価量 E_d を入力信号として与え, 奥行き位置 z を出力し, 出力された奥行き位置を奥行き検出位置 $z = z_p$ とする. Fig. 10(b) の奥行き変位推定には検出された各粒子の面内位置 (x_p, y_p) と奥行き検出位置 z_p , そして奥行き変位評価量 E_s を入力信号として与え, 奥行き変位量 Δz を出力する. 奥行き変位評価量 E_s に関しては RGB それぞれの画像から求められる値 E_{sb}, E_{sg}, E_{sr} を入力する. また, Fig. 10(a), (b)

 (a) estimate z

 (b) estimate Δz

Fig. 10 Neural network models for particle position and displacement in depth.

 (a) estimate z

 (b) estimate Δz

Fig. 11 Learning histories.

ともに階層型ニューラルネットであるため、このニューラルネットを用いるためには予め入力信号とそれに対応する教師信号を与えて学習させる必要がある。そこで Fig. 10(a), (b) の学習過程をそれぞれ Fig. 11(a), (b) に示す。Fig. 11(a), (b) ともに縦軸に総自乗誤差 E_t を示し、横軸に反復回数を示している。また、それぞれの中間層ユニット数 n_1 は、Fig. 11(a) は $n_1 = 8$ 、Fig. 11(b) は $n_1 = 6$ である。

4. 性能評価

4.1 平板 0 deg での性能評価

Fig. 12 に奥行き位置の推定結果を示す。縦軸に粒子面内位置 x を示し、横軸に奥行き位置 z を示す。Fig. 12(a), (b) は奥行き位置 $z = 613$ mm の推定結果であり、Fig. 12(a) は Fig. 6 中に示した較正式を用いた結果、Fig. 12(b) は Fig. 11(a) で学習させたニューラルネットを用いた結果を示す。較正式は Fig. 6 の各奥行き位置の奥行き位置評価量 E_d のプロット点から最小自乗法によって作成した。ニューラルネットを用いた結果は各粒子の面内検出位置 (x_p, y_p) と奥行き位置評価量 E_d を入力信号に与えた。Fig. 12(a), (b) から、ニューラルネットを用いることで面内位置によるばらつきを低減できていることが分かる。Fig. 12(c), (d) には Fig. 12(b) 同様に Fig. 11(a) の学習結果を用いて得た奥行き位置 $z = 611, 615$ mm の推定結果を示す。また、Table 1 には $z = 610 \sim 615$ mm の推定結果の RMS 誤差をニューラルネットを用いた場合と較正式を用いた場合で示す。Table 1 の結果から、ニューラルネットを用いて面内位置を考慮することで $z = 610 \sim 615$ mm の測定範囲内での RMS 誤差は 0.30 mm となり、較正式を用いたときに比べてばらつきが約 65% 低減できた。

Fig. 13 には Fig. 11(b) の学習結果を用いて奥行き変位量 Δz を推定した結果を示す。但し、Fig. 12(b) の奥行き位置 $z = 613$ mm のときの粒子の奥行き検出位置 z_p からの奥行き変位量 $\Delta z = -2 \sim 2$ mm の推定結果を示している。各粒子の面内検出位置 (x_p, y_p) や奥行き検出位置 z_p 、RGB それぞれの奥行き変位評価量 E_s を入力信号に与えた。Fig. 13 の結果の RMS 誤差と、比較のため、ある 1 色の奥行き変位評価量 E_s を用いて奥行き変位量 Δz を推定した場合の RMS 誤差を色ごとに Table 2 に示す。1 色を用いた場合は入力信号に面内検出位置 (x_p, y_p) と奥行き検出位置 z_p と奥行き変位評価量 E_s を 1 色のみに与えた。Table 2 の結果を比較すると、3 色同時にニューラルネットを用いて推定した結果は、最もばらつきの小さな red の画像を用いた場合に比べて約 24% 低減できていることが分かる。また、Fig. 13, Table 2 から、ニューラルネットを用いた $z = 613$ mm での ± 2 mm の範囲の奥行き変位量の RMS 誤差は 0.19 mm となり、奥行き変位量 2 mm に対して 9.5% の誤差で評価できた。

(a) $z = 613$ mm with a calibration line

(b) $z = 613$ mm with a neural network

(c) $z = 611$ mm with a neural network

(d) $z = 615$ mm with a neural network

Fig. 12 Estimated depth position for small particles on a glass plate at $\theta = 0$ deg.

(a) $\Delta z = -2$ mm

(b) $\Delta z = -1$ mm

(c) $\Delta z = 0$ mm

(d) $\Delta z = 1$ mm

(e) $\Delta z = 2$ mm

Fig. 13 Estimated depth displacement for small particles on a glass plate at $\theta = 0$ deg ($z_p = 613$ mm).

Table 1 RMS error of estimate z .

z (mm)	RMS error (mm)	
	neural network	line-fit
610	0.29	0.82
611	0.28	0.82
612	0.28	0.84
613	0.28	0.87
614	0.34	0.90
615	0.30	0.88
Total	0.30	0.86

 Table 2 RMS error of estimate Δz ($z_p = 613$ mm).

Δz (mm)	RMS error (mm)			
	3color	blue	green	red
-2	0.24	0.79	0.43	0.31
-1	0.19	0.64	0.37	0.25
0	0.01	0.25	0.25	0.05
1	0.19	0.47	0.37	0.26
2	0.24	0.51	0.30	0.32
Total	0.19	0.55	0.34	0.25

4.2 回転させた平板による性能評価

次に平板を回転させた場合の奥行き位置 z と奥行き変位量 Δz の推定を行う。奥行き位置 $z = 618$ mm の位置で光軸に対して垂直になるよう固定した状態を $\theta = 0$ deg とした。そして、回転角 $\Delta\theta = 5$ deg を与えて角度 $\theta = 5$ deg とし、回転前および回転後の粒子奥行き位置と回転角 $\Delta\theta$ に対応する粒子奥行き変位量をそれぞれ別々に推定した。このときのカメラ条件や用いたレンズ、また l_d, l_c の距離は Fig. 4 の画像取得と同様で、 $\Delta l_d = 6$ mm とした。また、4.1 節と同様、3.2 節に示した手順で較正実験を予め行った。Fig. 14 には $\theta = 0, 5$ deg での奥行き位置の推定結果、Fig. 15 には回転角 $\Delta\theta = 5$ deg に対応する奥行き変位量の推定結果を示す。ただし、Fig. 15 では変位量ベクトルの始点を Fig. 14 の 0 deg における検出奥行き位置として示した。Figs. 14, 15 に示す実線はそれぞれの真値であり、この真値に対して RMS 誤差を求めると Fig. 14 の奥行き位置は $\theta = 0$ deg のとき 0.48 mm、 $\theta = 5$ deg のとき 0.54 mm となった。また、Fig. 15 に示すように、 $\Delta\theta = 5$ deg の奥行き変位量の RMS 誤差は $-2.6 \leq \Delta d$ (mm) ≤ 2.4 の範囲で 0.36 mm となった。

5. 結言

本提案手法では画像ぼけを用いた奥行き情報の測定精度向上を目的とした。そのための方法として、ニューラルネットワークを用いて面内位置を考慮した奥行き位置の推定と、

 Fig. 14 Estimated depth positions for small particles on a glass plate rotated from $\theta = 0$ deg to 5 deg.

 Fig. 15 Estimated depth displacement for small particles on a glass plate rotated from $\theta = 0$ deg to 5 deg.

面内位置と奥行き位置を考慮した奥行き変位量の推定を別々に行った。

画像全体が同一の奥行き位置にある粒子画像に対して一様に奥行き位置を変化させたときの奥行き位置と奥行き変位量の推定を行ったところ、奥行き位置 $z = 610 \sim 615$ mm の範囲を推定した際の奥行き位置の RMS 誤差は 0.30 mm となり、これは較正式によって推定した場合に比べて約 65% 低減できた。奥行き位置 $z = 613$ mm での $\Delta z = -2 \sim 2$ mm の奥行き変位量を RGB3 色の奥行き変位評価量 E_s を同時に用いてニューラルネットで推定した際の RMS 誤差は 0.19 mm となり、最大変位量に対して 9.5% の誤差で評価できた。また、この奥行き変位量のばらつきは、1 色の画像を用いた E_s から推定した場合と比べて約 24% 低減できた。次に平板を 5 deg 回転させたときの回転前後の粒子の奥行き位置と奥行き変位量の推定を行ったところ、奥行き位置推定結果の RMS 誤差は $\theta = 0$ deg の場合で 0.48 mm、 $\theta = 5$ deg の場合で 0.54 mm であり、回転角 $\Delta\theta = 5$ deg の場合の奥行き変位量推定結果の RMS 誤差は $-2.6 \leq \Delta d$ (mm) ≤ 2.4 の範囲で 0.36 mm となった。

以上より、本研究で提案した画像ぼけに基づく手法について奥行き位置および奥行き変位量の測定精度を著しく改善でき、その実用性を示すことができた。

参 考 文 献

- 1) Zhou, C., Lin, S., Nayar, S.K.: Coded Aperture Pairs for Depth from Defocus and Defocus Deblurring, *International Journal of Computer Vision*, Vol.93, No.1 (2011), pp.53-72.
- 2) Moriuchi, Y., Sasaki, T., Mishima, N., Mita, T.: Depth from Asymmetric Defocus using Color-Filtered Aperture, *SID Symposium Digest of Technical Papers*, Vol.48, No.1 (2017), pp.325-328.
- 3) 三島 直, 佐々木 貴之: 単眼カメラで撮影した1枚の画像から精度良く距離計測できるカラー開口撮像技術, *東芝レビュー*, Vol.73, No.1(2018), pp.39-43.
- 4) Murata, S., Kawamura, M., Nakagawa, Y.: A depth-from-defocus for small particles distributed in three-dimensional space, *Optical Methods and Data Processing in Heat and Fluid Flow*, IMechE Conference Transaction 1998-2, C541/024 (1998), pp.11-18.
- 5) Murata, S., Kawamura, M., Nakagawa, Y.: A depth-from-defocus for particle images and its application, *Proc. 8th International Symposium on Flow Visualization*, Sorrento, Italy, Paper No.176 (1998), pp.176.1-176.6.
- 6) Murata, S., Kawamura, M.: Particle depth measurement based on depth-from-defocus, *Optics & Laser Technology*, Vol.31, No.1 (1999), pp.95-102.
- 7) Murata, S., Uratani, I.: A study on the measurement accuracy of a depth-from-defocus technique for 3D-PIV measurement, *Proc. of 9th International Conference on Laser Anemometry Advances and Applications*, Limerick, Ireland, (2001), pp.199-206.
- 8) 田中 嘉宏, 村田 滋, 特許第6399517号, (2018).
- 9) Willert, C. E. and Gharib, M. : Three-dimensional particle imaging with a single camera, *Experiments in Fluids*, Vol.12, No.6 (1992), pp.353-358.
- 10) Uemura, T., Yamamoto, Y., Fukumasu, K., Iguchi, M. : Improvement of the Color-Defocus Method for 3D PTV, *Japanese Journal of Multiphase Flow*, Vol.24, No.5 (2011), pp.657-663.
- 11) 村田 滋, 山本 貴幸: PIVにおけるフーリエ変換法のニューラルネットによる性能改善, *日本機械学会論文集 (B編)*, Vol.63, No.609 (1997), pp.1628-1634.