B221 3次元分布した微小粒子に対する Depth-from-defocus法

京都工繊大 村田 滋[○]、 京都工繊大院 川村 雅義

A depth-from-defocus method for small particles distributed in 3-D space

Shigeru MURATA*, Masayoshi KAWAMURA*

In this paper, a depth-from-defocus method has been applied to the depth measurement for small particles distributed in 3-D space. The method uses a pair of images that are simultaneously taken with different camera settings, and the difference of blur parameter between the two images is estimated with their Fourier transforms. In numerical simulation, we examine the reliability of the present method and the effect of overrunning gray level limit on the blur estimation. Experiment is performed for the small particles attached to a flat plate, particles of which depth is known. The performance test results show that the blur estimation can be successfully carried out and the present method is useful for the depth measurement of the small particles distributed in 3-D space.

1. 緒言

著者らは3次元粒子画像流速測定法における利用を念頭に、3次元空間にランダムに分布した微小粒子の分布測定法について検討してきた。従来から主流であるステレオ法はカメラ設置場所に制約がある、ステレオ画像間で粒子対応付けが煩雑であるなどの観点から、1台のCCDカメラで粒子群の3次元分布を求める手法として、インライン・ホログラフィに基づく手法と画像ぼけに基づく方法^{1) 2)}について提案してきた。後者の方法はSubbaraoら^{3) 4)}、Watanabeら⁵⁾の手法と同じ範疇のもので、画像ぼけの程度の異なる2つのカメラからの画像を用いて奥行距離を推定する焦点ぼけ深さ推定法 (Depth-from-defocus) であり、特殊な光源を必要としない点で汎用性に優れていると考えられる。彼らの測定対象はある大きさをもった物体の3次元形状・分布であり、奥行距離が空間的に比較的滑らかに変化している場合を想定しているが、著者らの測定対象は非常に微小で、空間的にランダムに分布している点群で彼らの手法がそのまま利用できる訳ではない。また、彼らは基本的に2台のカメラを用いているが、著者らの報告では1台の3板式CCDカラーカメラを用いて設置の簡便化を図っている。

本報では、前報で用いたラプラシアン・オペレータに替えて、Subbaraoらと同様の周波数空間の情報を基にした奥行推定量を取り上げており、その粒子群分布計測に対する有用性を数値シミュレーションおよび実験で検討している。

2. 検出法

本報で用いた焦点ぼけ法について説明する。焦点位置からのずれによって生じる画像ぼけはぼけ関数を用いて表現される。任意のぼけ画像を $i(x, y)$ 、合焦点時の画像を $i_f(x, y)$ 、ぼけ関数を $h(x, y)$ 、画像上の2次元直交座標を x, y と表すと、ぼけ画像は合成積 $*$ を用いて

$$i(x, y) = i_f(x, y) * h(x, y) \quad (1)$$

と表される。 (ξ, η) 平面で表される周波数領域では、上記変数 i, i_f, h それぞれのフーリエ変換を $I(\xi, \eta), I_f(\xi, \eta), H(\xi, \eta)$ として、

$$I(\xi, \eta) = I_f(\xi, \eta) H(\xi, \eta) \quad (2)$$

の関係が得られる。ぼけ関数は対象とする光学系の性質に依存するが、ここではしばしば用いられる2次元ガウス分布で表現できると仮定し、

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

と表す。但し、 σ^2 はぼけパラメータである。このぼけ関数のフーリエ変換は

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

であるので、 σ^2 について求めると

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

となる。ここで、合焦点位置の異なる2台のカメラで同じ方向からある対象物を観察し、異なるぼけ程度の像が2枚1組得られたとする。2枚それぞれの画像に関する量を添え字1、2で示すと、ぼけパラメータの差 D は式(2)を考慮して

$$D = \sigma_1^2 - \sigma_2^2 = -\frac{2}{\xi^2+\eta^2} \log \frac{H_1(\xi, \eta)}{H_2(\xi, \eta)} = -\frac{2}{\xi^2+\eta^2} \log \frac{I_1(\xi, \eta)}{I_2(\xi, \eta)} \quad (6)$$

と示される。上式は、カメラで捉えたぼけ程度の異なる2枚の入力画像をフーリエ変換し、その変換結果からぼけパラメータの差が推定できることを意味している。

3. 数値シミュレーション

始めに式(6)を用いてぼけパラメータの差の推定性能について数値シミュレーションにより検討した。但し、 $M \times M$ 画素の画像に対して離散フーリエ変換を適用し、 (x, y) 座標、 (ξ, η) 座標を画素単位で表した場合、式(6)右辺の分母中の ξ, η はいずれも $2\pi/M$ 倍しなければならない。図1は式(3)を用いて得た 32×32 画素のぼけ画像の一例であり、(a)は $\sigma = 2$ 、(b)は $\sigma = 3$ の場合の微小粒子を表している。 σ が大きくなると粒子像がぼけて、輝度分布が低く広がっている。これ

Fig.1 Blur functions

らのぼけ画像モデルを用いて、式(6)で示される奥行推定量 D を周波数空間の分布で示すと図2のようなになる。(a)は $\sigma_1 = 2$ 、 $\sigma_2 = 1$ の場合、(b)は $\sigma_1 = 3$ 、 $\sigma_2 = 1$ の場合であり、理論的には推定量 D はそれぞれ式(6)より3およ

び8となるが、いずれの場合も低周波成分の領域においてそれらの値を取っている。高周波成分はすべて値が0となっているが、これは式(6)右辺の演算時にスペクトル強度の著しく小さな 10^{-6} 以下の周波数成分の D を0とおいたためである。図2からわかるとおり、計算機誤差の影響を受けやすい高周波成分を除き、低周波成分の奥行推定値を平均して最終的に奥行きを求めることができる。

次に、輝度分布が最大量子化レベルを上回ってしまった場合、すなわちカメラゲインなどの設定値が明る過ぎて、各粒子像中央部の輝度値が最大濃度レベルで一定となる場合の奥行推定性能について検討する。 $\sigma_1 = 3$ (最大輝度値0.0398)、 $\sigma_2 = 2$ (最大輝度値0.0177)を取り上げ、最大濃度レベルを閾値としてそれを越えた画素値は最大濃度レベルに置き換えて処理を行った。その結果を横軸閾値、縦軸 D の平均値にとり図3に示す。約3.3%がカットされた閾値0.03の時、 D は本来の値5からおよそ10%低下しており、閾値が下がるにつれ急激に D は減少している。これより、輝度分布の頭打ちは奥行推定に少なからぬ影響があることがわかり、輝度レベルを低めに設定することが望ましいと言える。

4. 基本性能試験

本節では、上記手法の性能検討を実験的に行った結果を示す。X型光学レール上にCCDカメラ、白色微小粒子を付けたラバープレートを設置し、カメラレンズ設定を変えて画像取り込みを行った。粒子は流れの可視化に利用している粒径 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ のナイロン粉末である。CCDカメラには50mm標準レンズをカメラマウントアダプタを介して取付け、レンズ前面にクローズアップレンズ(ケンコーNo.2 または No.3)を取付けた。前報で報告した光学系を用いれば1度に2枚のぼけ程度の異なる画像が入力されるが、測定範囲の関係で本研究ではクローズアップレンズの種類を変え、2回に分けて撮影した。但し、カラー画像を利用する著者らの手法の特徴を考慮し、クローズアップレンズ No.2、No.3で撮影した画像はそれぞれ赤画像、緑画像のみ利用した。測定範囲は No.3のクローズアップレンズをつけた場合の合焦点位置から20mm遠方を相対深さの基準位置としており、カメラレンズ前面から基準位置までは約270mmである。画面内粒子位置は最も焦点の合った画像を2値化・ラベル付けした後、10画素以下の像を雑音として消去し、さらに円形度1.1以上のものを粒子像の対象から外して求めた。画像は相対深さ0, 10, 20, 30, 40mmで各1回撮影したが、サンプルされた粒子像は平均162.2個であった。また、画像サイズはソフトウェアの都合上 605×454 画素である。

図4はサンプルされた粒子像の一例であり、左側が赤画像、右側が緑画像、上段が相対深さ0mm、下段が20mmの場合で

Fig. 2 D-distributions

Fig. 3 Effect of quantization on D

Fig. 4 Blurred images of a particle

ある。切り出す画像サイズは 16×16 画素とした。この図からわかるように、ここで扱う画像は相対深さ 20mm に相当する中間的なぼけ程度の粒子像が丁度入る位の切り出しサイズとなっており、円形度の制限もあり、近接粒子の影響は認められない。図5、6はそれぞれ相対深さに対する奥行推定量 D とその標準偏差の変化を示している。図5より、赤画像と緑画像のぼけ程度が等しい $D = 0$ を中心として緩やかなS字状の変化を示している。この曲線を何らかの数式で表現することにより実験曲線が求められるが、図5の結果が滑らかであり、定性的な傾向が理論的に合致しているS字状であることから、適切な実験曲線が得られると予想される。測定結果のばらつきは図6に示されている。中間的なぼけ程度となる相対深さ 20mm で最小値を取り、赤画像、緑画像のぼけ程度の差が大きくなるとばらつきが大きくなる。これは焦点ぼけの大きい画像において、そのぼけパラメータが十分正確に表されていないことが原因と考えられる。図5の相対深さ $20 \sim 30\text{mm}$ の結果から D の変化率を求め、最もばらつきの少ない相対深さ 20mm における D の標準偏差を実深さに換算すると 1.6mm となる。これは、前報で報告したRMS誤差 2.4mm より小さく、このレンジでは測定精度が改善されていると言える。今後、ばらつきの小さい深さ範囲を拡大し、測定レンジを大きくすることが必要となると考えられる。

5. 結言

数値シミュレーションおよび基礎実験により、ランダムに3次元分布した粒子群に対するDepth-from-defocus法の有用性について検討した。その結果、粒子像のぼけが正確に捉えられるよう、輝度分布が最大量子化レベルで頭打ちすることは避けたほうが良いこと、実験曲線を求めるための測定結果は理論的な定性的傾向に一致し、適切な奥行推定が期待できることが明らかになった。

参考文献

- 1) 村田滋、竹内伸也：Defocus法によるトレーサ粒子奥行き位置検出、日本機械学会講演論文集（III）、No. 96-15、(1996)、197-198.
- 2) 川村雅義、村田滋：Defocus法を用いたトレーサ粒子奥行き位置計測、日本機械学会講演論文集（III）、No. 97-1、(1997)、224-225.
- 3) Subbarao, M., Surya, G.: Depth from defocus; a spatial domain approach, International Journal of Computer Vision, Vol. 13, No. 3, (1994), 271-294.
- 4) Subbarao, M., Wei, T.-C. & Surya, G.: Focused image recovery from two defocused images recorded with different camera settings, IEEE transactions on image processing, Vol. 4, No. 12, (1995), 1613-1628.
- 5) Watanabe, M., Nayar, S. K. & Noguchi, M.: Real-time computation of depth from defocus, Proceedings of SPIE, Vol. 2599, (1995), 14-25.

Fig. 5 Relative depth vs. D

Fig. 6 Standard deviation of D