A111 数値的ホログラム再生による粒子奥行き位置検出

京都工芸繊維大・大学院 増田 まつみ[○], 京都工芸繊維大 村田 滋

Depth measurement of tracer particles by means of a numerical reconstruction of hologram

Matsumi MASUDA^{*}, Shigeru MURATA^{*}

In this paper, we describe the measurement accuracy of numerical method detecting the depth of small tracer particles distributed in 3-D space. The detection method is based on the numerical reconstruction of in-line hologram patterns observed with a single CCD camera. In the computation of light intensity distribution, the numerical integration is performed for the domain up to the second dark fringe in order that the measurement accuracy is not affected by the depth of tracer particle. An averaging technique is employed for the radial light intensity profile to suppress the influence on the measurement accuracy of the difference between the origin of cylindrical coordinates in the numerical integration and the center of observed axisymmetric fringes. Performance test results show that the error of detected depth is not dependent on the difference between the origin of the coordinates and the center of the fringes if the difference is less than 0.07(mm).

1. 研究の背景

流れ場、特に速度場を全体として計測する有用な手段として粒子画像流速測定法 (PIV) が利用されており、現在2次元計測法から3次元計測法へと発展しつつある。3次元粒子画像流速測定法では、従来から複数台のカメラを用いたステレオ法により画像を捉えており、そのステレオ・ペア画像からトレーサ粒子位置を求めている。しかし、判別のつきにくい微小粒子像が多数記録されているため、ステレオ・ペア画像間での粒子像の対応付けは非常に困難である。よって、もし3次元的な粒子の奥行き位置を検出するために使うカメラを1台にすれば装置の設置も簡単にでき、手軽にまた経済的に3次元空間座標の検出をすることができる。

こうした観点から、著者らは前報^{*)}において、1台のカメラを用いた粒子の奥行き位置検出法として、インラインホログラフィを用いて計算機内部で奥行き位置を数値的に検出する手法について基本的性能の検討を行った。本報では、粒子が複数個存在する場合や、注目粒子中心の検出時に生ずる中心位置のずれが検出精度に及ぼす影響などについて検討をしている。計算には光の回折及び干渉の性質を考慮に入れた光学の基礎式を用い、粒子モデルから得られた計算ホログラムパターンを利用した数値シミュレーションによって検出の性能試験を行う。

^{*}Kyoto Institute of Technology, Matsugasaki, Sakyo-ku, 606 Kyoto

2. ホログラムの記録及び再生

ホログラフィとは光の回折及び干渉の性質を用いた記録及び再生の原理である。この原理を図1に示す。まず、光の基礎式²⁾よりホログラム面での光分布 $\psi_d(r_h)$ は平行光の光強度を単位強度とすると式(1)のように表せる。式(1)において、 r_{o_i} は i 番目の物体面の半径方向極座標、 r_{h_i} はホログラム面での半径方向極座標、 A_i は粒子半径、 d_i は i 番目の物体面とホログラム面との距離、 j は虚数単位、 $k=2\pi/\lambda$ 、 J_0 は0次のベッセル関数、 a_i は占有関数である。

$$\psi_d(r_h) = e^{jk d_1} \left[1 - \sum_{i=1}^N \frac{2\pi}{j\lambda d_i} e^{jk \frac{r_{h_i}^2}{2d_i}} \times \int_0^{A_i} a_i(r_{o_i}) r_{o_i} e^{jk \frac{r_{o_i}^2}{2d_i}} J_0 \left(\frac{k r_{h_i} r_{o_i}}{d_i} \right) dr_{o_i} \right] \quad (1)$$

よって、ホログラムとしては式(1)の光分布の強度が次のように記録される。

$$I_d(r_h) = |\psi_d(r_h)|^2 \quad (2)$$

また、このホログラムに入射光と同じ平行光を当てると後方面での光分布 $\phi_z(r_i)$ は次式で表せる。

$$\phi_z(r_i) = \frac{2\pi}{j\lambda z} e^{jk \left(\frac{r_i^2}{2z} \right)} \int_0^\infty I_d(r_h) r_h e^{jk \frac{r_h^2}{2z}} J_0 \left(\frac{k r_i r_h}{z} \right) dr_h \quad (3)$$

よって、ホログラム面後方での光強度分布 $R_z(r_i)$ は式(4)のように再生される。

$$R_z(r_i) = |\phi_z(r_i)|^2 \quad (4)$$

3. 奥行き位置検出手法

物体面上の ξ 軸上に粒子間距離 $\Delta\xi$ だけ離れて粒子が2個存在する場合のホログラムパターンを図2に示す。図2において、横軸は x 軸方向の距離、縦軸は光強度 $I_d(r_h)$ を示す。また、 $d_1=d_2=500$ (mm)、 $A_1=A_2=0.16$ (mm)である。実線は $\Delta\xi=1$ (mm)、1点鎖線は $\Delta\xi=3$ (mm)、破線は粒子が1個の場合の光強度分布を示している。これより、粒子が複数個存在する場合には、

Fig.1 In-line hologram.

Fig.2 Hologram pattern.

注目粒子のホログラムパターンは、他の粒子から影響を受けるために回転対称性を失っていることがわかる。式(3)はホログラムパターンが環状で、半径方向にのみ光強度分布が変化していることを前提にしているため、近接粒子の影響を受ける場合は、その影響を減少させるホログラムパターンの平均化操作が必要になる。ここでは、注目粒子中心に対して中心対称として光強度分布を平均している。これにより求めた注目粒子中心の光軸に沿った光強度分布が図3である。図3において、

Fig.3 Intensity distribution.

横軸はホログラム面後方の距離 z 、縦軸は注目粒子中心での光強度 $R_z(0)$ を示している。また、 $d_1=d_2=500$ (mm)、 $A_1=A_2=0.16$ (mm)、 $\Delta\xi=3$ (mm)、積分範囲 $r_{\max}=3$ (mm) であり、 $0-\pi$ は粒子が2個存在する軸(x-axis)方向について平均化したことを示す。これより、注目粒子中心の光強度は破線で示した粒子が1個存在する場合と同様に結像面付近で最小値を取っている。従って、光強度が最小となる位置を求めることにより、粒子の奥行き位置を検出できることがわかる。

また、パターンの中心が、積分中心からずれた場合についても、積分中心を中心対称として半径方向光強度分布を平均化することにより中心ずれの影響を減少させて粒子像を再生する。この時、注目粒子中心の光強度は図3と同様に再生面付近で最小となるので、この性質を用いて粒子の奥行き位置を検出する。

粒子が1個存在する場合には、積分範囲を広く取る方がパターンから得られる情報が多くなるため精度良く検出が行えることは前報¹⁾において報告している。しかし、粒子が複数個になると、積分範囲の拡大は近接粒子の影響を増大させるので、精度良く検出が行えるとは限らない。また、積分範囲を一定とすると、粒子奥行き位置に応じてその範囲に入るパターンが変化し、情報量が変わる。そこで、あるパターン形状の特徴量として第二暗線位置を取り上げ積分範囲を決定する。実際には、積分範囲を第一明線の1.3倍として第二暗線の代わりとして計算を行っている。これは、第一明線と第二暗線が正の一対一対応をしており、また、第一明線の方が自動検出しやすいためである。

4. 性能試験

100 (mm) ~ 1000 (mm) の測定範囲について粒子の奥行き位置を設定し、上記手法による検出精度について検討を行った。この性能試験では、2個の粒子が同一平面上に存在している場合について検出を行っている。ここで用いたホログラムパターンは式(1)、式(2)に従って計算した数値的ホログラムパターンである。この結果を図4~図6に示す。図4は、積分範囲 $r_{\max}$ が検出精度に及ぼす影響を示している。図5は、粒子間距離 $\Delta\xi$ が及ぼす影響について検討した図であり、また、図6は、中心位置のずれ δ が及ぼす影響について示したものである。

図4、図5、図6ともに、横軸は与えた奥行き位置 $d(\text{mm})$ を、縦軸は検出した奥行き位置 $d'(\text{mm})$ を示している。また、図4、図6における粒子間距離は $\Delta\xi=5(\text{mm})$ である。図4より、積分範囲を一定(○印)とすると、奥行き位置が深いほどパターン形状から得られる情報量が少なくなるために検出精度が悪くなっているが、積分範囲を第一明線の1.3倍(◇印)とした場合には奥行き位置が深くなっても検出は線形的に行えていることがわかる。また、図5より、奥行き位置が深い程、粒子間距離 $\Delta\xi$ が小さい方が検出精度が悪くなっている。これは、用いるホログラムパターンに対して、他の粒子から受ける影響が相対的に大きくなるためである。この時のRMS.誤差は、 $\Delta\xi=5(\text{mm})$ で $35.9(\text{mm})$ 、 $\Delta\xi=3(\text{mm})$ で $39.3(\text{mm})$ である。また、さらに、図6より、中心位置のずれが $0.07(\text{mm})$ 以下の時には、ずれがない場合とほぼ同程度の精度で検出が行われていることがわかる。

5. まとめ

積分範囲を第二暗線とすることにより、粒子の奥行き深さに関係なく同精度の検出を行うことができる。また、粒子が複数個存在する場合においても光分布を平均することにより、近接粒子の影響を減少させて次元の計算で検出を行うことができ、そのRMS.誤差は $35.9(\text{mm})$ である。さらに、中心位置がずれていても光分布を平均することにより、ずれが $0.07(\text{mm})$ までは、ずれがない場合と同様に検出を行うことができる。

参考文献

- 1)村田、増田、竹内、機講論、No.964-1 (1996) 461-462.
- 2)Onural,L.&Scott,P.D., Opt.Eng. 26-11 (1987) 1124-1132.

Fig.4 Effect of $r_{\max}$ on measurement accuracy.

Fig.5 Effect of $\Delta\xi$ on measurement accuracy.

Fig.6 Effect of δ on measurement accuracy.