B302

三次元三成分 PIV を用いた二次元噴流の三次元計測*

湯澤 教雄[○](宇都宮大院), 渡辺淳史(いすゞ自動車), 二宮 尚(宇都宮大)

3-D Measurement in a 2-D Jet by a 3-D 3-C PIV

Norio YUZAWA, Atsushi WATANABE and Nao NINOMIYA

ABSTRACT

Presently, a new measurement algorithm for PIV is proposed that enables us to obtain the three-dimensional velocity vectors at three-dimensional measuring points, i.e., 3-D 3-C PIV. According to the recent progress in PIV, the three-dimensional velocity vectors in a two-dimensional plane, i.e., 2-D 3-C PIV, are easily obtained and have revealed the many features in many kinds of applications. With the use of the cameras under the Scheimpflug condition, clear focus can be obtained for both cameras at different viewing angles and this stereoscopic arrangement enables the 2-D 3-C PIV. In order to obtain the third velocity component, three-dimensional camera calibration is necessary. This means that the three-dimensional position of a particle can also be calculated without implementing any additional devices to 2-D 3-C PIV. Presently, the 3-D 3-C PIV algorithm has been proposed and an actual 3-D 3-C measurement is carried out for a two-dimensional jet.

Keywords: Camera calibration, Scheimpflug condition, PIV

1. 緒 論

粒子画像流速計(PIV)は流体中に混入されたトレーサ粒子にシート状のレーザー光を照射することにより流れ場を可視化し、撮影した画像から流速情報を取り出す手法であり、二次元平面内における速度二成分の計測(2-D 2-C PIV)を行う事が出来る。また、ステレオ撮影法を用いた二次元平面内での速度三成分を計測する手法(2-D 3-C PIV)も提案されているが、カメラの校正段階では計測位置の奥行き方向の情報が無く、三次元の位置測定は不可能である。しかし、三次元座標と画像座標との関係が定式化出来れば、原理的には三次元三成分の計測が可能であると考えられる。本研究では、三次元座標と画像座標との間の新たな校正式を考案し、式の評価を行う。そして、ステレオ PIV に三次元のカメラ校正を加えることで、三次元三成分 PIV(3-D 3-C PIV)の開発を行い、実際の乱流場として二次元自由噴流において、三次元乱流計測を行い、本手法の有効性を示すことを目的とする。

2. シャインフラグ配置

ステレオ撮影法において、各カメラが同一領域でピントを合わせるため、シャインフラグ配置を用いた。シャインフラグ配置では Fig.1 に示すように、撮像面、レンズ面、シート面の延長線が一点で交わるように配置され、撮像面全体にピントを合せる事が出来る。このため本研究では、撮像面が回転可能なカメラマウントを自作した。

Fig.1 Scheimpflug condition

3. シャインフラグ配置を考慮したカメラ校正式

一般に、カメラと対象物の三次元位置の関係を求める方法は色々あるが、その一つに単写真標定¹⁾という手法がある。単写真標定とは、一枚の画像に写された複数の基準点の画像座標と絶対座標から、カメラの位置や向きといった標定要素を求め、画像座標(x, y)と絶対座標(X, Y, Z)の関係を確立する手法である。しかし、従来の単写真標定ではシャインフラグ配置における撮像面の傾きを考慮しておらず、画像座標と絶対座標の間の正確な校正は不可能である。そこで本研究では、Fig.2 のように傾いた面における焦点距離と像の関係を考え、Fig.3 のように

Fig.2 Focus distance to inclined image sensor

Fig.3 Camera calibration model

従来の単写真標定の標定要素であるカメラ位置(X_0, Y_0, Z_0), カメラの向き(ω, ϕ, κ), 画像距離 c , レンズ歪に関する主点位置のずれ(x_0, y_0), レンズ歪の補正項 k_1, k_2 に加え, 撮像面の傾き θ を考慮した校正式²⁾を考案した。

$$x = -c \frac{X'}{X' \sin \theta - Z' \cos \theta} + \Delta x, \quad y = -c \frac{Y'}{X' \sin \theta - Z' \cos \theta} + \Delta y \quad (1)$$

$$\begin{aligned} X' &= a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0) \\ Y' &= a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0) \\ Z' &= a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0) \\ \Delta x &= x_0 + \bar{x} \left(k_1 r^2 / c^2 + k_2 r^4 / c^4 \right), \quad \Delta y = y_0 + \bar{y} \left(k_1 r^2 / c^2 + k_2 r^4 / c^4 \right) \\ r^2 &= \bar{x}^2 \cos^2 \theta + \bar{y}^2, \quad \bar{x} = x - x_0, \quad \bar{y} = y - y_0 \end{aligned}$$

(1)式を用いることで, シャインフラグ配置における正確な三次元カメラ校正が可能となる。厳密にはレンズ歪みに現れる r^2 の式は複雑な表現になるが, $x \ll c$ を仮定し高次の微小項を無視した。

4. 校正式の評価

本研究で考案した三次元カメラ校正式の精度を評価するために, 予め位置の分かった基準点の画像を撮影し, 種々のカメラモデルについて校正式との残差の比較を行った。比較した校正式は, 本研究で考案した校正式(1)式²⁾, 二次元多項式近似(2)式, ピンホールモデルに独自

$$\begin{aligned} x &= a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3 + a_4 Y + a_5 XY + a_6 X^2 Y + a_7 Y^2 + a_8 XY^2 + a_9 Y^3 \\ y &= b_0 + b_1 X + b_2 X^2 + b_3 X^3 + b_4 Y + b_5 XY + b_6 X^2 Y + b_7 Y^2 + b_8 XY^2 + b_9 Y^3 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} x &= -\frac{a_1 X + a_2 Y + a_3 + a_4 X^2 + a_5 Y^2 + a_6 XY}{c_1 X + c_2 Y + 1 + c_4 X^2 + c_5 Y^2 + c_6 XY} \\ y &= -\frac{b_1 X + b_2 Y + b_3 + b_4 X^2 + b_5 Y^2 + b_6 XY}{c_1 X + c_2 Y + 1 + c_4 X^2 + c_5 Y^2 + c_6 XY} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} f_x(X, Y, Z) &= a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 Z + a_4 X^2 + a_5 XY + a_6 Y^2 + a_7 XZ \\ &+ a_8 YZ + a_9 Z^2 + a_{10} X^3 + a_{11} X^2 Y + a_{12} XY^2 + a_{13} Y^3 + a_{14} X^2 Z \\ &+ a_{15} XYZ + a_{16} Y^2 Z + a_{17} XZ^2 + a_{18} YZ^2 + a_{19} X^4 + a_{20} X^3 Y + a_{21} X^2 Y^2 \\ &+ a_{22} XY^3 + a_{23} Y^4 + a_{24} X^3 Z + a_{25} X^2 YZ + a_{26} XY^2 Z + a_{27} Y^3 Z \\ &+ a_{28} X^2 Z^2 + a_{29} XYZ^2 + a_{30} Y^2 Z^2 \end{aligned} \quad (4)$$

の歪み補正項を加えた(3)式³⁾, 三次元多項式近似(4)式⁴⁾, である。Table.1 に, 各校正式を用いて基準点の絶対座標から計算した画像座標と, 基準点を撮影した時に得られた画像座標との残差の値を比較した結果を示す。(2), (3)式は比較的小さい残差を示しているが, 二次元の校正式であるため奥行き方向に一断面しか使用しておらず, 三次元のカメラ校正は不可能である。

次に, Fig.4 は基準点の奥行き方向の移動量を変化させた実験の結果である。比較には三次元の校正式のみを用いた。本研究で考案した校正式は, 奥行き方向の移動量に関わらず, 常に低い残差を示した。また, 三次元多項式近似の残差が全体に非常に小さくなることが分かった。三次元多項式近似によるカメラ校正には, 光学的根拠が無いが, 本研究で考案した校正式との比較によって, その有効性が確認された。但し, 三次元多項式は奥行き方向に三断面しか用いないため, どの断面を用いてカメラの三次元校正を行うかによって, 結果が変化するので十分注意が必要である。

Table.1 Residuals by different camera models

2-D/ 3-D	Camera models	residual <pixel>
2-D	2-D Polynomial: Eq.(2)	(0.4267)
2-D	Pin-hole model: Eq.(3)	(0.1469)
3-D	3-D Polynomial: Eq.(4)	0.4310
3-D	Present scheme: Eq.(1)	0.7222

Fig.4 Residual with different thickness

5. 三次元三成分粒子画像流速計 (3-D 3-C PIV)

2-D 3-C PIV, いわゆるステレオ PIV による計測における誤差については, カメラ校正の際のレーザーシートと基準面との平行度のずれが最も影響を与える要因であるとの報告がある⁵⁾。これはレーザーシートに奥行きがある三次元的な計測を二次元と仮定することに起因しているものと思われる。しかし, 本研究で考案した校正式を用いれば, レーザーシートの厚み方向の任意の位置での

Fig.5 Algorithm of 3-D 3-C PIV

Fig.6 Definition of the measurement point

計測が可能であり、原理的には三次元三成分計測が行えるものと考えられる。Fig.5 に本研究で提案する三次元三成分粒子画像流速計(3-D 3-C PIV)の概念図を示す。

まず、本研究で提案する 3-D 3-C PIV において、各カメラから見た粒子群の変位は一般的な相互相関法を用いて求める。カメラの三次元校正は既に確立されているので、後は三次元速度ベクトルの始点が定義出来れば、三次元三成分の速度ベクトル計測が可能となる。本研究では、Fig.6 に示すように、検査体積内で最も鮮明な三個以下の粒子群の重心位置をベクトルの始点と定義した。

6. 二次元噴流の三次元 PIV 計測

本手法の有効性を検証するために、実際の乱流場において三次元計測を行った。計測対象としては、平均速度分布などが既知の二次元自由噴流を選択した。Fig.7 が本研究で使用した実験装置の概略図である。噴流は三角関数形状の縮流部を介し、幅 10mm、長さ 100mm のスリットから放出される。光源であるダブルパルスレーザは、図の左方より照射され、シリンドリカルレンズ群を通すことで、有限の厚みの有したレーザシートとした。

トレーサには、フォグマシンの煙を用い、二台のカメラは前方散乱のシャインフラグ配置とした。撮影領域は鉛直方向 Y にノズルから 70~90mm、スパン方向 X に 20mm、噴流の幅方向 Z に噴流中心から 11mm~14mm の奥行きのある領域とした。

Fig.8 は撮影した画像の一例で、二時刻の画像を合成して示してある。Fig.9 は、このような画像から得られた瞬時の三次元速度分布の一例である。

Fig.7 Experimental apparatus for 2-D jet

Fig.8 Typical images obtained for 3-D 3-C PIV

Fig.9 Instantaneous velocity distributions

Fig.10 Velocity vectors in the depth direction.

Fig.11 Axial velocity profile of a 2-D jet

この図では、奥行き方向の分布が不明瞭であるので、得られた三次元速度ベクトル分布をZ-Y断面から見た図をFig.10に示す。このように、全体としては上に向かう流れがあり、奥行き方向にも明確な流れがあることが分かる。このような瞬時の速度ベクトル分布を100セット平均し、Fig.11に示す平均速度分布を得た。横軸は噴流中心からの距離であり、レーザーシートの厚み方向に対応する。このように、噴流中心から離れるに従って、軸方向平均速度が遅くなる様子が明確に捉えられており、本手法によって、三次元場の計測が可能であることが示された。

7. 結 論

以下に本研究で得られた結論を示す。

1. シャインフラグ配置を考慮した三次元カメラ校正法を考案した。
2. 各種カメラモデルについての三次元カメラ校正の

残差の比較を行い、三次元多項式近似が取り扱いが簡単でありながら、高精度であることを示した。

3. 三次元三成分PIV(3-D 3-C PIV)のアルゴリズムを提案した。
4. 実際に、3-D 3-C PIVを用いて、二次元噴流の三次元計測を行い、本手法が三次元計測に有効であることを示した。

参 考 文 献

- 1) 日本写真測量学会, 写真による三次元計測, (1983)
- 2) 渡辺他, 可視化情報, Vol.24 Suppl., No.1 (2004) pp.185-188.
- 3) Willert, Measurement Science and Technology, Vol.8 (1997) pp.1465-1479.
- 4) H. Hu 他, Experiments in Fluids, Vol.31 (2001) pp.277-293.
- 5) J. A. Mullin and W. J. A. Dahm, Highly-Resolved Three-Dimensional Velocity Measurements via Dual-Plane Stereo Particle Image Velocimetry (DSPIV) (2002) AIAA2002-0290.