149 相関法を利用した簡易 3 次元粒子位置計測法

東京大学 岡本 孝司^{*},

Texas A&M Univ. W.D. Schmidl and Y.A. Hassan

Simple 3D Calibration Technique using Image Cross-Correlation

Koji OKAMOTO*, W. D. SCHMIDL** and Y. A. HASSAN**

Three-dimensional Particle Image Velocimetry (PIV) requires that the three-dimensional positions of particle tracers in a flow field be found. In this study, a simple and easy calibration technique is proposed, which uses a cross-correlation technique between camera images. The function between image distortion and the Z coordinate (perpendicular to the image) is obtained using a cross-correlation between camera images. The function includes the error of the camera setup and refraction at the test section tank wall. Then the 3D positions can be easily calculated with high accuracy using the calculated function. The technique is applied to the natural convective field, showing the high effectiveness.

1. はじめに

3次元粒子画像流速測定法においては、粒子の3次元位置 (x, y, z) を画像データから決定する必要がある。従来のステレオマッチングによる手法では2もしくは3台のカメラを用い、空間的な位置情報から複雑な関係式を解く事により位置を決定している。さらに、容器壁面での屈折を考慮する場合には算出式がさらに複雑となる。

西野ら¹⁾は、3台のカメラを用い、多数のカメラパラメータを校正画像から決定している。これらのカメラパラメータ設定のためには複雑な計算が必要であり、かつ容器壁面などにおける屈折の影響を導入する事は比較的難しい。山本ら²⁾は、カメラの設定位置を球面上に設置する事により、カメラパラメータ算出のための解析及び粒子位置計算法を簡易化できる事を示している。いずれの場合にも、容器壁面での屈折を考慮するために、複雑な関係式を解く事になる。また、実験誤差などにより、容器壁面位置が傾いている様な状況では計測誤差が増大する事が懸念される。

本研究においては、3次元位置のうち奥行き方向の (z) 位置に関しては視差関数を利用して算出する。視差関数は相関法を用いて画像相関により算出する。この手法を用いる事により、簡易にかつ精度良く3次元粒子位置を計測できる。

2. 相関法を用いた校正手法

視差関数 本研究においては3台のカメラによる2次元の画像データから3次元の粒子位置を算出する。画像データは2次元であるので、2次元の投影位置情報 (x, y) は比較的精度良く算出する事が出来る。そこで、本研究においては、第3の次元である奥行き方向 (z) の位置を精度良くかつ簡易に計測する事を考える。つまり、1台のカメラで (x, y) 方向を、3台のカメラで (z) 方向を計測する。

* Nuclear Engineering Research Lab., University of Tokyo, Tokai-mura, Ibaraki

** Dept. Nuclear Engineering, Texas A&M University, College Station, Texas, U.S.A.

図1に本研究で考える3台のカメラ配置を示す。カメラはそれぞれほぼ同一の平面上に角度を持って配置される。中心のカメラは、対象の正面に設置し容器壁面における屈折による影響を出るだけ少なくする。この中心カメラで (x, y) 方向を決める。今、対象空間上の1点 (X, Y, Z) に対する、各カメラへの像をそれぞれ (x_l, y_l) , (x_c, y_c) , (x_r, y_r) とおく(図2)。これらの点は、カメラ設置位置、容器壁屈折などを含みユニークに決定される。今、中心カメラの像 (x_c, y_c) は、ほぼ空間上の座標 (X, Y) に対応していると考え、右カメラにおける像 (x_r, y_r) は、 (x_c, y_c) および (Z) の関数と考える事ができる。すなわち、

$$(\Delta x_r, \Delta y_r) \equiv (x_r, y_r) - (x_c, y_c) = f_r(x_c, y_c, Z) \quad (1)$$

の様に、右と中心画像の視差 $(\Delta x_r, \Delta y_r)$ は、中心画像位置と Z 座標の視差関数 f_r で決定できる(図3)。逆に考えると、もし視差関数 f_r がわかれば、奥行き方向の座標 (Z) は中心と右画像の位置 $(x_c, y_c), (x_r, y_r)$ から決定できる事になる。

なお、本研究においては、3つのカメラをほぼ水平に設置したので、 Y 方向の視差 Δy_r はほぼ無視できる。よって、式(1)は以下のように書き換える事が出来る。

$$\Delta x_r = f_r(x_c, Z) \quad (2)$$

つまり、関数 f_r がわかれば、画像上の粒子位置 $(x_c), (x_r)$ から Z 座標を決定する事が出来る。

中央と左画像に関しても同様に、視差関数 f_l を考える事によって、画像上の粒子位置 $(x_c), (x_l)$ から Z 座標を決定する事が出来る。

相関法を用いた視差関数の算出 視差関数 f_r, f_l は、以下のように画像相関を用いて算出する。図4に関数算出のための照明方法を示す。カメラ、実験装置、実験容器などを実際に実験を行う状況に設置する。実験流体内には、トレーサとなる粒子を混入する。この状態で、 Z 平面に平行となるようにシート状のレーザ光を照明する。この時の画像を、3台のカメラで同時に記録する。この画像は、同一 Z 座標位置に存在する粒子画像を記録する事になる。これらの3画像のうち、中心と右画像の相互相関をとることにより、両画像の視差 (Δx_r) を算出できる。すなわち、任意の位置 Z における視差関数 $(\Delta x_r = f_r(x_c))$ を算出する事が出来る。

以上の操作を複数の Z 平面に対して実施する事によって、視差関数 $f_r(x_c, Z)$ を構築できる。なお、視差関数 $f_l(x_c, Z)$ も同様に中心と左画像の相互相関をとることによって算出できる。図5に実際の実験で得られた視差関数の一例を示す。 Z 座標の位置によってはっきりと視差を分離する事が出来る。

なお、視差関数の算出は実際の実験装置を用いて実施しているため、この視差関数には、カメラ位置や容器壁における屈折の影響などが全て含まれている。

3次元位置の決定 実験においては、レーザ光をシート状ではなく円筒状にし、対象となる3次元領域全体に照明を行う。対象内に存在するトレーサ粒子の像を3台のカメラで同時に記録する。中心カメラのデータを解析する事によって、カメラに平行な方向 (x, y) の座標位置を決定する。さらに、左右のカメラ画像に記録されている粒子位置の内、ほぼ同じ y 座標に記録されている粒子データを探索し、これらのデータから視差 (Δx_r) を求める。この視差に視差関数を適用し、粒子の奥行き方向位置 (z) を決定する。なお、左右の画像データそれぞれ独立に奥行き方向位置 (z) を決定し、双方のデータの差が大きい場合には、誤対応とみなし棄却する。

以上の手続きを行う事により、精度良く3次元位置を決定する事が出来る。なお、前述のように校正により求めた視差関数にはカメラ位置や屈折などの情報が全て含まれており、あらためて位置や屈折などの補正を行う必要は全くない。つまり、レーザシートを用いた簡単な校正で視差関数を求める事により、3次元粒子位置が容易に求まる事となる。

3. 実験

精度 本研究で提案した校正法を用いて自然対流の 3 次元流速分布を計測した。対象中にまずレーザシートを照射し、計測精度に対する検討を行う。 $Z = 4.75\text{cm}$ の位置に 0.1mm の幅を持ったレーザシートを照射し、得られた画像データから Z 座標を解析した。その結果を図 6 に示す。ここに示すように、90%以上のデータはほぼ 4.75 ± 0.1 の範囲に分布している。しかしながら、幾つか大きく座標位置が異なるデータも見受けられた。これは、たまたま視差関数による結果が同じようになってしまったためであると考えられる。これらの誤対応を減らすためには、3 台ではなく 4 台、5 台のカメラを用いる必要がある。しかしながら、本手法は基本的にカメラ校正が大変単純であり、カメラの台数が増えても、実験の手間はさほど変わらない。カメラの位置設定も、さほど重要ではなく、カメラ位置の誤差などもすべて視差関数の中に含まれ、自動的に修正する事が出来る。よって、手間をかけずにカメラ台数を増加する事が可能である。

自然対流 直径 6.7cm 高さ 9cm の円筒容器の下部中央に直径 1.6cm の円形ヒータを設置し自然対流を発生させ、このようすを本手法によって計測した。円筒容器は矩形容器内に設置し屈折の影響が少なくなるようにした。なお、視差関数 f の中にこれらの影響は含まれている。直径 $6\mu\text{m}$ 、比重 1.01 の粒子を挿入し、直径 2cm の円筒レーザ光を照射し可視化した。

本研究による 3 次元粒子位置計測法により粒子の 3 次元位置を算出した後、3 次元相関法 [3] による粒子追跡を行い、流速ベクトルを算出した。計測された 3 次元粒子の個数が少なかったため、3 次元相関法の精度が非常に悪く、はっきりとした計測は出来なかった。粒子の個数を増やし、かつカメラの台数を増やす事により簡単でかつ精度の良い計測手法の開発が可能である。

4. 結論

視差関数を画像間の相互相関によって算出し、これを利用して 3 次元粒子位置を簡易に計測する手法を提案した。本手法の有効性を実験によって示した。カメラ個数を増やす、粒子密度を増やすなどの改良が必要であるが、従来の手法に比べて簡易に計測できる手法を示す事が出来た。

参考文献

- 1) Nishino, K., et al., 1989, Trans ASME FED, pp.384-391.
- 2) Yamamoto F. et al., 1993, Comp. Methods and Exp. Measure. pp.229.
- 3) Hassan. Y.A. et al., 1994, Proc. New Trends in Nucl. System. Thermodynamics, pp.39

Figure 1. Experimental Setup

Figure 2. Particle Position in Space

Figure 3. Shift images of the particle at (X, Y, Z)

Figure 4. Calibration Planes in View Volume

Figure 5. Shift Function f_r

Figure 6. Verification of Z using laser sheet