論文

三色照明光を用いた PTV 法による 三次元流速測定技術の開発*

菅原 弘之**, 森 貞雄***, 依田 真一†, 今井 良二†, 大津 誠††, 高草木 常彦††, 渡部 成夫***

Development of Three-Dimensional Flow Measurement Technology with a Three-Color Flashlight for Particle Tracking Velocimetry

Hiroyuki SUGAWARA, Sadao MORI, Shinichi YODA, Ryouji IMAI,
Makoto OHTSU, Tsunehiko TAKAKUSAGI, Naruo WATANABE

ABSTRACT

We developed a technique for measuring instantaneous, three-dimensional velocity components in liquid flows by using a digital image processing system, and here we describe a particle tracking velocimetry technique improving the tracking of the initial and terminal positions of tracer particles. By using color cameras and a RGB flashlight source three images of the tracer particles are obtained: one at their initial positions; their terminal positions, and along their pathline. The images of the initial and the terminal positions are paired by using the pathline image, and the velocity vectors are calculated. We studied image processing algorithms for obtaining three-dimensional-flow vectors from the images produced by the two cameras and for distinguishing duplicate images of the tracer particles. We confirmed this technique is useful for three-dimensional flow observation.

Keywords: Flow measurements, Digital image processing, Flow visualization, Three-dimensional flow

1. 緒言

流体の流速分布を定量的に測定する方法のひとつに、流体中にトレーサ粒子を混入して、その動きをカメラ等で撮影された画像から間接的に測定する方法がある。この方法は微小領域にあるトレーサ群の濃度分布の移動量を求める方法¹⁾と個々のトレーサ粒子の移動量を直接追跡して求める方法²⁾に分けられる。特に後者は粒子追跡流速計測法 (Particle Tracking Velocimetry, 以後 PTV と称す) と呼ばれ、複数台のカメラで撮影されたステレオ画像を画像処理することで、三次元の流速分布が得られる。PTV では僅かな時間差をつけて 2 枚の画像を取得し、この画像間で同一と見なされるトレーサ像を抽出、対応付けてトレーサの移動量と時間間隔から速度を求める。トレーサ像の抽出、対応付け方法には種々の方法^{3), 4), 5)}が提案されている。このうち、トレーサ粒子が描く流跡

を利用する方法は、流跡を用いて同一と見なせる粒子を一意に対応付けることができる特長がある。しかし、モノクロ画像を利用する場合、始点と終点の位置情報を得るためのカメラと、流跡を得るためのカメラの双方が必要となり、カメラ同士の位置ずれ等による誤差要因が増える問題があった。この問題はステレオ画像が必要となる三次元計測においては、さらにカメラの数が増えるので厳しくなる。

この問題を解決する方法のひとつにカラー画像を利用して、1 台のカラーカメラで 3 つの位置情報を色別に記録する方法^{6), 7), 8)}が報告されている。しかし、いずれの報告も二次元計測であり、三次元計測に適用した例は報告されていない。

本研究ではカラー画像を利用した方法 (以後、三色 PTV 法と称す) を、実際の流れ場の三次元計測に適用する目的で、三色光源、トレーサ等のハードウェアを検討した。また、1 画面内での始点および終点トレーサ像の対応付けや重畳した流跡像の分離処理、さらには 2 台のカメラで撮影したステレオ画像間のトレーサ対応付け処理等の画像処理アルゴリズムを開発した。

* 原稿受付 1999 年 4 月 12 日

** 正会員, (株)日立製作所 機械研究所

*** (株)日立製作所 機械研究所

† 宇宙開発事業団 筑波宇宙センタ

†† (株)日立製作所 日立事業所

2. 三色 PTV 法の測定原理

Fig. 1 を用いて三色 PTV 法の原理を説明する。流体中に混入したトレーサを三色光源で間欠的に照明し、これをカラーカメラを用いてフレームメモリに取り込む。ここで、三色光源は赤、緑、青の光の三原色を用い、各光はカラーカメラの画像取得時間内に Fig. 2 に示すタイミングで発光させる。Fig. 2 は、標準的な NTSC 信号方式のカラーカメラを使用した場合の説明図である。1 回のフィールド画面のサンプリング時間は $1/60$ s であり、1 回のフレーム画面（サンプリング時間 $1/30$ s）で 2 回の観測を行うことができる。この $1/60$ s の間に、次の発光操作を行う。

- (1) 始点像を得るために緑色光をパルス発光させると同時に、流跡像を得るための赤色光の発光を開始する。
- (2) 緑色光の発光から一定時間後に終点像を得るために青色光をパルス発光させる。
- (3) 青色光の発光の終了と共に、赤色光の発光も同時に終了させる。

Fig. 1 Schematic diagram of a measurement system.

Fig. 2 RGB flash timing.

Fig. 3 Three-color images.

これにより、Fig. 3 に示す赤、緑、青の三枚一組の画像を $1/60$ 秒毎に得ることができる。Fig. 3 において、緑色画像と青色画像は照明時間が短いのでトレーサが静止しているように観測される。カメラの取り込み時間の最初に照明した緑色画像を始点像、最後に照明した青色画像を終点像と呼ぶ。また、赤色画像はトレーサが移動する軌跡を表すので流跡像と呼ぶ。Fig. 3 から明らかに任意のトレーサの位置情報を始点、流跡、終点に分けて色別に得ることにより、赤色の流跡像を用いて緑色の始点像と青色の終点像を一意に対応付けることが容易に可能となる。

3. 開発の概要

Fig. 4 に測定対象を円柱内の流速測定とした場合の三色 PTV 法を用いた測定装置の概要を示す。φ30×50 mm の透明円筒内にポンプでトレーサを混入した水を循環させて、乱流を模擬した複雑な流れ場を作る。これを三色光源で照明して、2 台の 3 CCD プリズム分離方式のカラーカメラ（有効画素数 768×494 ）で撮影し、画像を画像取込装置で取り込む。この画像から画像処理装置で、透明円筒内の流速ベクトルを求める。

本章では、開発課題となる三色光源と画像処理アルゴリズムの 2 点について述べる。

3.1 三色光源の開発

本測定法に使用する光源は、カラーカメラの分光特性と一致する波長の光を発光させる必要がある。また、三色すべての光を測定領域内で照明むらがないようにする必要もある。そのため近年、赤色、緑色、青色の各色で高輝度のものが発売されている LED を多数並べて光源に用いることにした。Fig. 5 に各色の LED の発光波長特性とカラーカメラの分光特性を示す。Fig. 5 に示すように LED はカラーカメラの分光特性に概ね一致するものを選択した。しかし、実際にカラーカメラで観測するのは、トレーサで乱反射した散乱光なので、その波長依存性を確認する必要がある。そこで、各 LED によりトレーサを照明し、カラーカメラで観測したときの波長依存性を実験的にも確認した。

波長依存性は照明した LED と同じ色の CCD 素子で受光した像の明るさと、その他の色の CCD 素子で受光した像の明るさの比（以後、漏洩率と称す）で評価した。

Fig. 4 Measurement system for a three-color PTV method.

Fig. 6 に実験装置を示す。透明シリコンオイル中に、本研究で使用したトレーサ（粒径 300 μm ，比重 1.02）を固定し，それに各色ごとに照明して，カラーカメラでトレーサ像を取得し，その像の明るさから漏洩率を求めた。Table 2 に測定結果を示す。

Table 1 から漏洩率は概ね 5 % 以下であるが，緑色 LED で照明したときの赤色 CCD 素子への値が 11.6 % とやや大きい。このとき，漏洩率が大きい緑色 LED を流跡像の照明に使用すると，漏洩した流跡像が赤色 LED で照明した始点像または終点像と一緒に得られてしまう。これは，漏洩する色すなわち赤色を流跡照明用に，始点

Fig. 5 Sensitivity spectrum for RGB cells of a color camera and LED radiation spectrum.

Fig. 6 Experimental setup.

Table 1 Experimental results (come through rate).

Radiation color	RGB component of reflected light	Signal component (Come through component)	Come through rate = $\frac{\text{Come through}}{\text{Signal}}$
R	R	165	100%
	G	(8)	4.8%
	B	(7)	3.8%
G	R	(24)	11.6%
	G	199	100%
	B	(1)	1.5%
B	R	(0)	0.6%
	G	(2)	2.2%
	B	181	100%

Table 2 The specification of the LED lamp

	Optical characteristics			Power supply	
	Luminous Output	Peak Wavelength	Half Width	Pulse-Width Control	Current Control
R_LED	2.4mW	635nm	20nm	1.67~167ms	0~100mA
G_LED	2.0mW	521nm	18nm	0.167~1.67ms	0~100mA
B_LED	3.0mW	470nm	30nm	0.167~1.67ms	0~100mA

像および終点像用には緑色と青色のどちらかを使用することで回避できる。本研究では始点用に緑色，流跡用に赤色，始点用に青色の LED を割り当てた。この割り当てから発光パルス幅はカメラの 1 フィールド時間に対して赤色が 1/10~10 倍，緑色と青色が 1/100~1/10 倍の時間で独立に調整ができるようにした。なお，Table 2 に製作した光源の仕様を示す。

3.2 画像処理アルゴリズムの開発

本測定法の画像処理アルゴリズムのフローを Fig. 7 に示す。まず，カメラ A と B の 2 台のカラーカメラからフレームメモリに RGB 画像を取り込み，各々の色画像ごとに 2 値化，不要な画像情報の削除，個々のトレーサ像の認識処理を行う。つぎに，流跡像（赤色）に重なっている始点像（緑色）と終点像（青色）を探索する。そして，流跡像が重畳しているか否かの判断を行い，重畳している像は重畳トレーサ像分離法で分離する。重畳していない像と重畳分離した像の始点像と終点像を対応付け，各々の重心座標を求める。さらに，カメラ A と B のステレオ画像から対応付けた始点と終点の三次元座標を求める。以上の手法で対応付けた始点像と終点像の重心間の距離と，LED の照明時間間隔から速度ベクトルを求めることができる。

つぎに，重畳判断からステレオ画像対応付けまでの処理方法を具体的に説明する。まず，重畳判断を Fig. 8 を用いて説明する。Fig. 8 のカメラ A 画像に示す始点像 5 番と終点像 21 番のように，1 つの流跡像に対して始点像と終点像が各 1 つだけ重なっている場合には，1 つのトレーサ粒子が描いた像と判断して，始点像と終点像を対応付ける。

一方，カメラ A 画像の A 部およびカメラ B 画像の B 部のように，複数のトレーサ像が交差して流跡像が一体化したため，1 つの流跡像に対して，始点像または終点

Fig. 7 Image processing algorithm flow.

像が2つ以上重なっている場合には、対応付けるべき始点像と終点像が一意に決定できない。そこで、筆者らは交差した重畳トレーサ像を次のようにして分離した。

その方法を Fig. 9 を用いて述べる。Fig. 9(a) に示すように、始点と終点の重心を結ぶ線の中点を求める。この中点が Fig. 9(b) に示すように流跡像内に含まれていれば、正しい対応付けと判断し、Fig. 9(c) のように外れていれば、誤った対応付けと判断する。なお、3つ以上の重畳トレーサ像は本方法を用いても誤って対応付ける可能性があるため、処理対象から除外した。

この分離方法を用いても、カメラ B 画像の B 部のように分離できる像と、カメラ A 画像の A 部のように片方の流跡像が短いため全ての中心が流跡像内に含まれてしまう等の理由により、1 画面内では分離できない像がある。前者の重畳画像と先に述べた始点像と終点像が一意に対応する像には、始点像と終点像の組合せにラベルを付ける。一方、後者の重畳画像は 1 画面内では分離できなくとも、ステレオ画像を用いると分離できる可能性があるため、考えられる全ての組合せにラベルを付ける。その結果を Fig. 10 に示した。Fig. 10 に示す結果からカメラ A および B ごとに、Table 3 に示すような 1 画面内での始点像と終点像の対応付けのテーブルが得られる。

つぎに、カメラ A と B のステレオ画像を用いてトレーサ像の三次元位置の算出方法について述べる。ステレオ画像による三次元位置の算出方法は、幾何光学の中心投影の原理に基づいた方法が提案⁹⁾されており、さらに媒質境界での屈折の影響を取り除くカメラ校正方法も提案¹⁰⁾されている。筆者らも上述した方法により、空气中で絶対座標が既知の基準点を 2 台のカメラで撮影し、取得した画像上の座標（以後、写真座標と称す）から絶対座標を同定するカメラパラメータを実験的に求めた。また、空気とガラスディスク、ガラスディスクと水の境界での屈折の影響はスネルの法則を用いて補正した。この方法では、2 台のカメラ写真座標から視線方向に延長した 2 直線の交点が三次元座標となる。しかし、実際には誤差があるため、2 直線は厳密には 1 点で交わらない。そのため、2 直線間の最短距離がある閾値以下になるときに交わっているとみなし、2 直線間の最短距離の中点を交点と考えて三次元座標を求める。Table 4 に始点像、Table 5 に終点像の三次元座標を求めた対応付けのテーブルを示す。なお、Table 4 と Table 5 には対応付けた始点像と終点像の組合せのラベルを、新しい始点像と終点像のラベルとして用いて示した。Table 4 および Table 5 において、例えば A4 に着目すると、Table 4 と Table 5 の両方で B4 のみが対応付けの候補である。この場合は、A4 と B4 の対応付けが正しいとして、始点像と終点像の三次元座標を結んでベクトルを得る。ところで、A2 に着目すると Table 4 では B2 と B4 の、Table 4 では B2 が対応候補となっている。各カメラの 1 画面内の

Fig. 8 Labeling patterns of trace particle images.

(a) Calculation of center position

(b) Correct judgment

(c) Mistaken judgment

Fig. 9 Distinction method for duplicated tracer images.

(a) Camera A image

(b) Camera B image

Fig. 10 Second labeling of trace particle images.

対応付けでは、対応した始点像と終点像に同じラベルを付け直しているため、始点像におけるカメラ A と B の像ラベルの組み合わせと、終点像におけるそれは一致するはずである。したがって、この場合は A2 と B2 を対応付ける。このように、筆者らは 1 画面で始点像と終点像が一意に対応できる三色 PTV 法の特長を活かした方法でトレーサ像を選択した。さらに、この方法は Fig. 9 に示す 1 画面内の分離法では分離できなかった重畳画像を、ステレオ画像を利用して分離する際にも有効となる。先に Fig. 8 のカメラ A 画像の A 部のように 1 画面内で

分離できなかった重畳画像は、Fig. 10(a)に示すように考えられる全ての組合せで、仮に対応付けて始点像と終点像に同じラベルを付け直した。ここで、ステレオ画像の対応付けをすると、Table 4（始点像）と Table 5（終点像）で同じラベルの組み合わせとなるのは、A1aとB1、A3bとB3であるから、これらが正しい組み合わせとなる。これは、1画面内で不可能であった重畳画像の分離がステレオ画像を利用することで分離可能となったことを意味する。

4. 実験

本章では、前章で開発した三色光源と画像処理アルゴリズムを用いて、三色 PTV 法の測定精度を実験的に確認した結果と乱流に近い複雑な流れ場の三次元流速測定を行った結果について述べる。

4.1 流速測定精度の確認

本節では三色 PTV 法の精度（計測誤差）の確認を行った結果について述べる。精度の確認はステッピングモータで一定速度で基準トレーサを移動させて行った。実験

Table 3 Pairing data matrix for one image .

Camera A						Camera B					
NO		T.P.				NO		T.P.			
		3	21	33	41			9	28	37	43
I.P.	3	A1a		A3a		I.P.	1	B1			
	5		A2				2		B2		
	6	A1b		A3b			4			B3	
	9				A4		8				B4

I.P.: Initial position T.P.: Terminal position

Table 4 Pairing data matrix for a three-dimensional position (Initial position).

NO		Camera A						
		A1a	A1b	A2	A3a	A3b	A4	
Camera B	B1	○	○					
	B2			○				
	B3				○	○		
	B4			○				○

Table 5 Pairing data matrix for a three-dimensional position (Terminal position).

NO		Camera A						
		A1a	A1b	A2	A3a	A3b	A4	
Camera B	B1	○			○			
	B2			○				
	B3		○			○		
	B4							○

装置は水平方向用と垂直方向用の 2 台を製作した。まず、水平方向の精度確認結果を述べる。水平方向の実験は Fig. 11 に示すように、直径 0.5 mm の疑似トレーサが 5 mm ピッチに配列された基準グリッド板を回転ステージに取り付けて、ステッピングモータで回転数(ω)を 4 段階に変化させて駆動し、2 台のカメラで Fig. 12 に示す画像を取得する。この取得画像から求まるトレーサの 3 次元位置と LED 光源の発光時間間隔から、前章で述べた流速ベクトル算出処理により、Fig. 13 に示す速度ベクトルを求める。この速度とステッピングモータの回転数(ω)と基準グリッド板の回転中心からの距離(r)から求まる速度($r\omega$)と比較することで確認した。基準グリッド板内の速度範囲は 4 段階に変化させたステッピングモータの回転数と基準グリッド板内のトレーサ位置 (5 mm ピッチ) から 24~96.7 mm/s である。

Fig. 11 Experimental setup (verification of measured error for vertical direction).

(a) Camera A (b) Camera B

Fig. 12 Captured images .

Fig. 13 Velocity vectors .

実験はZ方向の位置を0, -25, -50 mmの3段階に変化させて行った。Fig. 14に測定精度の速度依存性を示す。Fig. 14において横軸が速度であり、縦軸は誤差である。誤差は画像から求めた速度と与えた速度の差の絶対値で示した。Z方向の各位置において、速度が変化しても誤差はほぼ一定である。これは、測定精度が三次元の位置測定精度で決まり、速度には依存しないことを示している。また、Z方向の位置が円筒容器の底になるほど、誤差が大きくなっている。つぎに、3段階に変化させたZ方向の各位置における測定面（基準グリッド板）内の速度誤差分布について述べる。Fig. 15に誤差の最も大きいZ=-50 mmの位置における速度誤差を示す。Fig. 15(a)に水平(XY)方向成分を示し、Fig. 15(b)に垂直(Z)方向成分を示す。Fig. 15において横軸と縦軸は測定面内でのトレーサの始点位置を示し、矢印は速度誤差の大きさと方向を示す。

Fig. 15(a)に示した水平方向の測定誤差の大きさは約4 mm/s程度である。この値は測定時間間隔を考慮すると、西野らの研究で得られた結果と同等である^{4),5)}。

一方、Fig. 15(b)に示した垂直方向の測定誤差の大きさは約31 mm/sと垂直方向と比べて8倍程度大きくなっている。この原因は、誤差の方向が概ね上向きになっていることから、終点像の青色が始点像の緑色に比べて浮き上がって見える色収差と考えられる。つぎに、垂直方向の測定誤差について述べる。垂直方向の速度測定精

Fig. 14 Measured error as a function of speed.

(a) IN horizontal direction (b) IN vertical direction

Fig. 15 Measured error for horizontal movement.

度はFig. 16の装置を利用して円筒容器内の棒を上から下へ100 mm/sで移動させ、これを2台のカメラ像から求めた移動速度と比較して行った。

測定位置は円筒容器の中央、X方向に中央から10 mmの位置、Y方向に中央から10 mmの位置の3箇所である。結果をFig. 17に示す。Fig. 17(a)は1画面で得られた始点(G光)と終点(B光)から流速を求めた結果であり、水平方向の速度測定誤差に比べてかなり大きくなっている。この理由は次の2つと考える。

- (1) 水平方向の測定誤差の原因で述べた始点像と終点像での色収差の影響。
- (2) 垂直方向にトレーサが移動しても上からカメラで観測した場合像の位置移動が小さいので像の移動量測定誤差が大きい。

そこで、色収差の影響を排除するために、連続する2画面を使って、1画面目の始点(G光)と2画面目の始点(G光)を用いた2画面処理を行った。その結果をFig. 17(b)に示す。2画面処理では精度が低下する液柱下部(Z=-40 mm)で1画面処理に比べて、測定誤差が60%以上改善されている。以上の結果、流速の測定精度を向上させるには、2画面処理が有効であることが分かった。

4.2 三次元流速計測

本節では三色PTV法を液柱内の乱流状態に近い流れに適用した結果について述べる。Fig. 18に乱流模擬実験装置を示す。実験は透明アクリルで製作した円筒容器に粒径300 μm のトレーサを混入した水をポンプで循環させて乱流を模擬した。これをLED光源で照明して、2台のカメラで観測したFig. 19に示した画像からトレーサの三次元位置を計測して流速ベクトルを求めた。Fig. 20に流速ベクトル分布を示す。カメラAおよびカメラBの2次元（同一画面内）で対応付いたトレーサはカメラAで145個、カメラBで116個であった。カメラAとBの画像のステレオ対応づけで得られたベクトル数は83個であった。

また、Fig. 20に示す流速ベクトル分布は、yz平面に

Fig. 16 Experimental setup (verification of measured error for horizontal movement).

(a) Transaction with single field image

(b) Transaction with consecutive field image

Fig. 17 Measured error for vertical direction.

おいては、 y 軸上の -5 mm にある噴出口から水が上向きに吹き出し、ガラスディスクにぶつかって、下向きに流れが反転して吸込口に吸込まれる様子が確認できる。また、 xz 平面においては x 軸の $\pm 5\text{ mm}$ の間では z 軸の全般に渡って多くのベクトルが確認できるが、それ以外の x 軸の $\pm 5\text{ mm}$ より外側では確認できるベクトルが少ない。これは、噴出口と吸込口がある y 軸上に流れが集中しているためと考える。以上の結果から、噴出口と吸込口の位置の関係を考慮して、得られた速度ベクトル分布は円筒容器内の流れを再現していると判断する。

5. 結論

トレーサ粒子の位置情報を色別取得する三色 PTV 法を用いた計測技術を開発し、つぎの結論を得た。

- (1) カラーカメラの波長感度特性とトレーサの反射実験から LED を選定し、小型で高輝度で且つ他色への漏洩が少ない三色光源を開発した。
- (2) 1 画面内で流跡像を使って始点像と終点像を対応付け且つ、2 つのトレーサ像が重畳した場合にも分離・対応付けるアルゴリズムを開発した。
- (3) ステレオ画像間での対応付け及び重畳分離の処理は、1 画面内で始点像と終点像が一意に対応することを利用したアルゴリズムを採用し、その有効性を実験的に確認した。
- (4) 三色 PTV 法で乱流に近い複雑な流れ場の三次元流速測定を行い、83 個の流速ベクトルを得ることがで

Fig. 18 Experimental setup for Turbulent flow measurement.

Fig. 19 Captured images.

Fig. 20 Experimental results (Velocity distribution).

きた。これは、本方式の複雑な流れ場の三次元計測への適用可能性を示していると考えられる。

謝 辞

本研究は、平成7年度から平成9年度に宇宙開発事業団より弊社への業務委託契約「三色トレーサ追尾技術の開発」のなかで行われたことを付記し、関係各位への感謝の意を表するものである。

参考文献

- 1) 木村一郎・高森年・井上隆, 相関を利用した流れ場の速度ベクトル分布の画像計測, 計測自動制御学会論文集, 23, 2 (昭和62-2) pp.101-107.
- 2) 山川正剛・岩重健五・小林敏雄, TVカメラを用いた流速分布測定システムの開発, 流れの可視化, 6, 22 (1986) p.273.
- 3) 西野耕一・笠木伸英, 三次元画像処理流速計による二次元チャネル乱流の乱流統計量の測定, 機論 (B編), 56, 525 (1990-5) p.1338.
- 4) 西野耕一・笠木伸英・平田賢・佐田豊, 画像処理に基づく乱流三次元計測システムの開発, 機論 (B編), 55, 510 (1989) p.404.
- 5) 小林敏雄・佐賀徹雄・瀬川茂樹・唐司茂樹, 逆流を含む二次元流れ場の画像処理システムの開発, 流れの可視化, 5, 17 (1985-4) pp.129-136.
- 6) Busignani, S., Cenedese, A., Querzoli, G. and Romana, G. P., Combined streak-spot image analysis method using multi-color light sources, FED-Vol.172, Experimental and Numerical Flow Visualization ASME 1993.
- 7) 藤原忠男・西原秀司・広瀬幸治, 流れのカラー可視化写真と画像処理方法, 機論 (B編), 53, 493 (昭和62-9) p.2762.
- 8) 渡部成夫・吉富進・山脇敏彦・藤本信義・大津誠, 間欠発光するRGBカラー照明光を用いた粒子像追跡流速計測法の基本原理, 精密工学会誌 Vol.63, NO.6, (1997) pp.829-833.
- 9) 日本写真測量学会編, 写真による三次元測定 (1983) pp.1-11, pp.172-178.
- 10) 西野耕一・山根徹・鳥居薫, 3次元PTVのカメラ校正, 日本機械学会流体工学部門講演会論文集 (1992-8) pp.334-336.