3次元 PIV の実用化に向けて*

西野 耕一**

Toward Practical Three-Dimensional Particle Image Velocimetry

Koichi NISHINO

1. PIV の課題

効率的な流速計測手法として近年急速に普及しつつある粒子画像流速計 (Particle Image Velocimetry: PIV) は、そのほとんどが流れの断面の速度分布を測定する 2 次元 2 成分 (2D2C) 流速計である。普及の理由として、(1) 面倒な校正が必要ないこと、(2) 2 次元 2 成分の瞬時速度が測定できること、(3) デジタル PIV システムの登場によって測定が自動化されたこと、(4) 直感的な画像計測なので安心感があること、などが挙げられる。要するに「まあまあの測定精度で、簡単に流れ場の 2 次元情報が得られる」との特性が、多くの研究者や技術者にアピールした結果である。

そのような 2 次元 2 成分 PIV については、既に基本的な部分の開発は終わっており、教科書や解説書¹⁻⁴⁾と共に、ユーザフレンドリーで完成度の高い市販システムが幾つも登場している。そのような状況の中で、筆者は PIV の開発・実用化に向けて現在残されている研究課題は次の 6 項目であると考えている⁵⁾：

- (1) 高空間解像度化
- (2) 高時間分解能化
- (3) 3 次元化
- (4) ダイナミックレンジの拡大
- (5) 大空間の測定
- (6) 混相流の測定

本稿では、これらの研究課題の一つである「3 次元化」にスポットを当て、その実用化の現状と今後の展望について述べる。

2. 究極の流速計測手法

我々が遭遇する流れの多くは 3 次元性的である。特に、乱流の場合、流れは必然的に 3 次元性的となる。従って、流れ場を 3 次元的に測定したいとの要求は昔からあり、それに答えるべく多くの努力が払われてきた。例えば、既に 1956 年には 2 台のスチルカメラを用いたステレオ

撮影によって低速乱流噴流の測定 (乱れエネルギーの散逸率の測定) が報告されている⁶⁾。また、1961 年には円管乱流の壁近傍の速度測定をやはりステレオ撮影で行った研究が報告されている^{7,8)}。興味深いことに、当時は壁近傍の速度分布を流れを乱すことなく測定できる唯一の手法としてステレオ撮影法が考えられていたようである。その後、熱線・熱膜流速計 (Hot-Wire/Hot-Film Anemometry: HW/HF) やレーザドップラ流速計 (Laser Doppler Velocimetry: LDV) の開発・実用化に押されて、PIV の研究そのものが下火になった感があるが、画像処理のデジタル化が可能になった 1980 年代から PIV の研究が再開された。それに伴って、3 次元 PIV についても多くの研究報告がなされ、既に幾つかのレビュー⁹⁻¹¹⁾が出されている。また、1997 年の本学会誌にも「3 次元粒子画像流速測定法 (3DPIV)」の特集記事が掲載され¹²⁾、1999 年秋には本学会主催のワークショップ「最新情報：3 次元 PIV」¹³⁾が開催されている。

これまでの流速計測手法の開発の歴史を眺めると、「多次元化・多成分化」が大きな潮流であることが認識できる。Fig. 1 は各種の流速計測手法を測定次元数 (dimension) と測定成分数 (component) でプロットしたものである。

HW/HF と LDV は基本的に点計測手法であり、複雑な流れを対象とすることの多い近年の流体計測への要求を必ずしも満たせなくなっている。それを克服す

Fig. 1 Component-dimension map for fluid velocimetry

* 原稿受付 2000 年 1 月 5 日

** 正会員 横浜国立大学 大学院工学研究科

るものとして超音波流速計 (Ultrasonic Velocity Profile Monitor: UVP) や Doppler Global Velocimetry (DGV) が開発されているが、上述したように、近年急速に普及している手法が PIV である。通常の PIV は 2 次元 2 成分計測手法であるが、それを 2 次元 3 成分化したものがステレオ PIV (Stereo PIV)¹⁴⁻¹⁶⁾ である。さらに 3 次元化のために、シート光をスキャンする Scanning PIV¹⁷⁻¹⁹⁾、複眼視や多眼視を利用する 3 次元 PTV (3D PTV)²⁰⁻²⁶⁾、ホログラムを利用するホログラフィック PIV (HPIV)²⁷⁻²⁹⁾ などが開発されている。その他にも、マルチピンホール型³⁰⁾、粒子像サイズ判定型³¹⁾、カラーシート型³²⁾ などの 3 次元化が提案されている。

Fig. 1 には示されていないが、各流速計測手法の時間分解能も重要な特性である。PIV の時間分解能は、前節に挙げた「高時間分解能化」に関連して PIV の解決すべき重要課題の一つである。近年のデジタル高速度カメラの登場は PIV の時間分解能の改善にとって大きな追い風になっている。現状では、空間解像度を損なうことなく 4 kHz 程度までの時間分解能が得られるようになっている。ただ、時間分解能の改善はダイナミックレンジの拡大を伴わなければ意味を持たないことがあり (特に乱流計測では)、その点で PIV は依然として HW/HF や LDV に及ばない。さらに、本稿の主題である 3 次元 PIV は通常の PIV に比べても時間分解能の改善が容易でない。現時点では未だアイデア段階にあるが、100 万点もの瞬時速度ベクトルを得ることのできる HPIV を高速度化 (映画化) した「高時間分解能 3 次元 3 成分流速計」はまさに究極の流速計測手法と言ってよいであろう。

3. 「3 次元化」と「3 成分化」

「3 次元化」と「3 成分化」は PIV の世界では混用されることが多いが、明確に区別されるべき概念である。例えば、ステレオ PIV はシート光内の速度 3 成分を測

定するので「2 次元 3 成分」手法であって、「3 次元」手法ではない。余談ながら、最近のステレオ PIV 市販システムの中に「3 次元」を冠しているものがあるようであるが、誤解のないことを願いたい。例えば、シート光を奥行き方向にスキャンすれば 3 次元測定となり、ステレオ PIV のシート光をスキャンすれば 3 次元 3 成分測定が可能になる¹⁹⁾。

Fig. 2 に示すように、「3 成分化」を実現するステレオ PIV は、カメラ配置によって「傾斜配置 (angular displacement)」、「シフト配置 (translation)」、「アオリ配置 (Scheimpflug condition)」に分類される¹¹⁾。アオリ配置はシート光、レンズ主平面、撮像面の延長線が一点で交わるような光学的配置で、シート光の全域にピントが合うとの特徴を有する。最近のステレオ PIV はこのアオリ配置を採用しているものが多いが、それは被写界深度の浅い微小トレーサ粒子を撮影領域全域にわたって鮮明に撮影することができるからである。

4. 被写界深度

トレーサ粒子の被写界深度 (depth-of-focus) は PIV の 3 次元化を達成するためのキーワードである。被写界深度 Δ は、撮影系の横倍率 M と F 値を用いて、次式で評価できる³³⁾。

$$\Delta = 2(1+M)F\varepsilon/M^2 \quad (1)$$

ここで、 ε は撮像面上でのぼけの許容値である。ぼけの許容値として、光学関係者は次の回折限界を採用することが多い。

$$d_o = 2.44\lambda(1+M)F \quad (2)$$

ここで、 λ は光の波長である。この許容値は厳しい条件を与え、被写界深度は粒子径に依らず一定値となる。筆者は、PIV におけるぼけの許容値として、撮像面上での粒子像の大きさをを用いるとよいと考えている。それは次

Fig. 2 Camera arrangement for stereo PIV: shaded rectangular region represents a light sheet

式で与えられる¹⁾.

$$d_e = \sqrt{M^2 d_p^2 + d_a^2} \quad (3)$$

ここで、 d_p は粒子径である。上式は、撮影倍率で決まる粒子像の大きさと回折限界の2乗和平方根が実際の粒子像の大きさになることを意味しており、粒子径が大きいほど被写界深度が深くなることを表す。このことは、粒子の被写界深度の測定結果³⁴⁾と定性的に一致する。ちなみに、サブミクロン粒子を撮影するマイクロPIVにおいては、深度方向の像の回折を考慮する必要が生じるため、被写界深度はもはや式(1)では表せなくなる³⁵⁾。

被写界深度の具体例として、直径 $10\mu\text{m}$ のトレーサ粒子を Nd:YAG レーザの第2高調波 ($\lambda = 0.532\mu\text{m}$) を用いて照明し、40 mm の視野幅を CCD カメラ (素子サイズ $8.8\text{ mm} \times 6.6\text{ mm}$, 768×493 セル) で撮影する場合を考える (撮影系の F 値として $F = 16$ を仮定する)。すると、

$$\begin{aligned} M &= 8.8/40 = 0.22 \\ d_a &= 2.44 \times 0.532 \times (1 + 0.22) \times 16 \\ &= 25.3\mu\text{m} (= 11.5M d_p) \\ d_e &= \sqrt{0.22^2 \times 10^2 + 25.3^2} = 25.4\mu\text{m} (\cong d_a) \\ \therefore \Delta &= 2 \times (1 + 0.22) \times 16 \times 25.4/0.22^2 = 20.5\text{ mm} \end{aligned}$$

となる。この例では、 F 値が大きいため被写界深度はかなり深く、40 mm の視野幅に対して 20.5 mm の被写界深度が得られている。十分に3次元計測が可能値である。ここで気付くことは、撮像面上での粒子像の大きさが回折限界にほぼ等しいことである。これは、撮影系の倍率が小さくかつ F 値が大きいためである。CCD 素子のセルサイズが $\Delta x = 11\mu\text{m}$ ($= 8.8\text{ mm}/768\text{ pixel}$) であることから、粒子像の大きさは約 2.5 pixel に広がっている。粒子像の大きさが回折限界によって規定されているということは、もっと小さな粒子 (例えば、 $5\mu\text{m}$ や $1\mu\text{m}$) を用いても、粒子像の大きさと被写界深度が変わらないことを意味する。しかし、その粒子径範囲では光散乱強度が粒子径の2乗に比例するため、粒子からの散乱光が極めて微弱となる。従って、高出力パルスレーザーあるいはイメージインテンシファイアのような高価な装置を導入しないと、鮮明な粒子像を撮影できない恐れが高い (逆に言えば、そのような機器を導入すればミクロン粒子の3次元PIVが可能になる)。

上例と同様の計算を、直径 $1\mu\text{m}$ のトレーサ粒子について幾つかの F 値について行くと、Table 1 の結果を得る。 F 値が小さくなると回折による粒子像のぼけが改善されるため d_e が小さくなる。その結果、被写界深度は F 値の減少とともに急速に浅くなり、 $F = 2.8$ では僅か $\Delta = 0.62\text{ mm}$ となってしまう。これでは3次元計測は難しいと言わざるを得ない。この制約はボリューム照明を行う3DPTVのみならず、シート光を用いる Scanning PIV にも適用される。PIVの開発が、レーザー応用

流体計測手法としてLDVの延長線上で行われてきた欧米 (特に欧州) では、上述したような被写界深度の制約は当初より認識されていた。従って、そこでの考え方は「鮮明かつ明るい粒子像を得るため、できるだけ小さな F 値で撮影する。その結果、被写界深度は浅くなるが、シート光内しか撮影しないので問題ない。もし3次元計測をやりたければホログラムを使う。」であった。ホログラムは通常のカメラ撮影に比べて、被写界深度が深いからである。

5. 最適粒子像サイズと粒子像の重なり合い

上述のストーリーでは、今後の3次元PIVとして被写界深度の深いHPIVしか残されていないことになるが、本当に小さな F 値で粒子を撮影しなければならないのだろうか？ 実は、最近の研究によって³⁶⁻³⁸⁾、粒子像が広がって CCD 素子の2~3セルサイズの大きさに撮影された場合に最も高精度なPIV測定となることが分かっている。その詳細は本稿では割愛するが、意図的に F 値を大きくして回折による粒子像のぼけを大きくした方が得策という訳である。2~3セルサイズということは、Table 1 では $F = 16$ に対応し、20.4 mm の被写界深度が得られるので、ホログラムを使わなくても3次元PIVが可能になる。

さて、カメラ撮影で次に問題となるのは粒子像の重なり合いである。数万~数十万の瞬時速度ベクトルを取得するためには、同数程度以上の粒子像が必要になる。有限サイズの CCD 素子面に多数の粒子像が結像すれば当然重なり合いが発生する。単純に二粒子像の重なり合いの確率を考えると次式を得る。

$$N_{op}/N_p = (N_p - 1)\pi d_e^2/L_x L_y \quad (4)$$

ここで、 N_p は粒子像の数、 N_{op} は重なり合っている粒子像の数 (但し、一つの重なり合いが生じると二つの粒子像が重なったとカウントする)、 L_x と L_y はそれぞれ CCD 素子の水平セルサイズ ($= 768\Delta x$) と垂直セルサイズ ($= 493\Delta x$) である。Table 1 の条件 ($F = 16$, $d_e = 2.2\Delta x$) について、 N_p と N_{op} の関係を求めると、Table 2 のようになる。粒子像数が5000で、重なり合いが20%にも達する。この重なり合いは奥行き位置の異なる粒子

Table 1 Depth-of-focus of $1\mu\text{m}$ particle for different F -numbers of an imaging system with 0.22 magnification

F	2.8	5.6	8	16
$d_a (\mu\text{m})$	4.4	8.9	12.7	25.3
$d_e (\mu\text{m})$	4.4	8.9	12.7	25.3
$d_e/\Delta x$	0.38	0.78	1.1	2.2
$\Delta (\text{mm})$	0.62	2.5	5.1	20.4

Table 2 The number of overlapping particle images

N_p	500	2000	5000	10000
N_{op}	10	161	1004	4016
N_{op}/N_p	0.02	0.08	0.20	0.40

からのものが支配的と考えられるため、3次元PIVではそれを許容することはできない。この問題の解決策として次の方法が考えられる。

- (1) CCD素子のセル数を増す：4000×4000セルのCCD素子を使うことができれば、 $N_p=80000$ でも $N_{op}/N_p=0.076$ となり、許容範囲に収まる。既に、1920×1035セルのハイビジョンCCDカメラを用いた3次元PTVによって、4000の瞬時速度ベクトルを得たとの報告がなされている³⁹⁾。
- (2) 粒子像の重なり合いを分離する：3次元PIVのみならずPTVにとっても重要な技術で、近年優れたアルゴリズムの提案がなされている⁴⁰⁾。
- (3) カラーの利用：RGB照明あるいはマルチスペクトル照明を用いて奥行き位置を異なるカラーで照明し、粒子像の撮影にもRGBカメラやマルチスペクトルカメラを用いる方法である。例えば、RGB3色を用いれば、粒子像数を3倍に増やすことができる。

ホログラムは、粒子からの散乱光とそれとは別の参照光とが形成する干渉縞を記録する。ホログラム上で干渉縞が記録される範囲はMie散乱特性と撮影光学系で定まるが、普通は異なる粒子の干渉縞が部分的に互いに重なり合っている状態にある。重なり合いが生じると、再生される粒子像のS/N比が低下し、再生粒子像の鮮明さが失われるが、粒子像数が数十万～百万程度までなら個々の再生粒子像の認識が可能である。その理由はホログラム乾板の驚異的な解像力にある。HPIVでよく使われるアグファ8E56HD(4"×5"プレート、現在製造中止)の解像力は5000本/mm(0.2μm/本)と言われ⁴¹⁾、換算すると1000k×1270kセル($\Delta x=0.1\mu\text{m}$)に相当する。仮に、これに匹敵する撮像デバイスを利用することができれば、式(4)から、 $N_p=3\times 10^5$ に対して $N_{op}/N_p=0.05$ との結果を得る。もっとも、Table 1の粒子像サイズから判断して、0.2μm/本の解像力は不要で、せいぜい5μm/本で事足りる。この解像力は4"×5"プレートでは20k×25kセルに相当するので、 $N_{op}/N_p=0.05$ では $N_p=3\times 10^5$ となる。瞬時速度ベクトル数として十分に魅力的な値である。

6. カメラ校正

6.1 透視投影

3次元PIVに限らず、光学的に物体の位置や長さを測

定するためには、物体の3次元位置と撮像デバイス上の2次元位置との関係(透視投影)を校正する必要がある。この校正は「カメラ校正」と呼ばれ、光学系のセットアップを変更する度に行わなければならない作業である。当然ながら、シート光を用いる2次元2成分PIVについてもカメラ校正が必要で、例えば歪曲収差が大きい光学系を用いて撮影する場合には、その校正を精度よく行わないと思いがけぬ大きな測定誤差の入り込む危険性がある⁴²⁾。

透視投影は一般に次式で与えられる。

$$x_p = F_x(X_p, Y_p, Z_p; q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (5a)$$

$$y_p = F_y(X_p, Y_p, Z_p; q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (5b)$$

ここで、 (X_p, Y_p, Z_p) は粒子の物体座標、 (x_p, y_p) は像座標、 $(q_1, q_2, \dots, q_n)$ は投影パラメータである。 F_x, F_y が投影関数で、その具体形は光学系に依存する。投影パラメータは時間に依らない一定値であることが多いが、回転ミラーによるイメージシフトや投影経路の屈折率のゆらぎが存在する場合には一定値にならない。今、投影パラメータが時間に依らないとして上式を時間で微分すると次の速度投影式(velocity perspective equation)を得る。

$$u_p = \frac{\partial F_x}{\partial X_p} U_p + \frac{\partial F_x}{\partial Y_p} V_p + \frac{\partial F_x}{\partial Z_p} W_p \quad (6a)$$

$$v_p = \frac{\partial F_y}{\partial X_p} U_p + \frac{\partial F_y}{\partial Y_p} V_p + \frac{\partial F_y}{\partial Z_p} W_p \quad (6b)$$

ここで、 (U_p, V_p, W_p) は粒子速度、 (u_p, v_p) は粒子の像速度である。このように、当然のことであるが、像速度は粒子速度3成分全ての影響を受ける。今、物体座標系のXY方向と像座標系のxy方向とが一致しているものとする、式(6a, b)は次のように簡単化される。

$$u_p = \frac{\partial F_x}{\partial X_p} U_p + \frac{\partial F_x}{\partial Z_p} W_p \quad (7a)$$

$$v_p = \frac{\partial F_y}{\partial Y_p} V_p + \frac{\partial F_y}{\partial Z_p} W_p \quad (7b)$$

両式右辺第2項が視野奥行き方向の速度成分の影響を与える面外速度成分(out-of-plane velocity component)である。2次元2成分PIVでは面外速度成分項を単純に無視して、像速度 (u_p, v_p) と粒子速度 (U_p, W_p) を一対一対応させている。しかしながら、実際には面外速度成分の影響を無視できない場合があり、特に乱流では速度変動の面外成分と面内成分は同程度の大きさとなるため、影響が深刻になり得る。このことが、3成分測定(3次元測定でない!)を必要とする根本理由の一つである。

6.2 カメラモデル

式(5a, b)の投影関数の具体形を定めるためには透視投影のモデル化(=カメラモデル)が必要である。モデル化は、

- (1) 基本ピンホールカメラモデル
- (2) 一般ピンホールカメラモデル

- (3) レンズ歪みを含む一般ピンホールカメラモデル
- (4) その他の区分的カメラモデル

に分類される⁴³⁾。

「レンズ歪みを含む一般的ピンホールカメラモデル」は写真測量やロボットビジョン等の3次元計測でよく用いられているもので、幾何光学的な考察より次式が提案されている（その導出の詳細は文献^{43,44)}を参照されたい）。

$$x'_p = -c \frac{a_{11}(X_p - X_0) + a_{12}(Y_p - Y_0) + a_{13}(Z_p - Z_0)}{a_{31}(X_p - X_0) + a_{32}(Y_p - Y_0) + a_{33}(Z_p - Z_0)} + \Delta x'_p \quad (8a)$$

$$y'_p = -c \frac{a_{21}(X_p - X_0) + a_{22}(Y_p - Y_0) + a_{23}(Z_p - Z_0)}{a_{31}(X_p - X_0) + a_{32}(Y_p - Y_0) + a_{33}(Z_p - Z_0)} + \Delta y'_p \quad (8b)$$

ここで、 $[a]$ はカメラ座標系と物体座標系との間の回転変換を定義するマトリクス、 (X_0, Y_0, Z_0) はカメラ座標系原点座標、 $(\Delta x'_p, \Delta y'_p)$ はレンズ歪みの補正項である。像座標右肩のプライムは、レンズ歪みを含む像座標であることを意味する。レンズ歪みの補正項は

- ・ レンズ歪曲収差 (distortion)
- ・ 主点位置のずれ (shift of principal point)
- ・ 偏心歪み (decentering distortion)
- ・ 薄プリズム歪み (thin prism distortion)

を考慮したもので、どの歪みをどこまで補正するかに応じて多様なモデルが提案されている⁴⁵⁾。

「その他の区分的カメラモデル」は、最近のステレオPIVへの利用を念頭に考案されており⁴⁶⁻⁴⁸⁾、例えば次式が提案されている⁴⁷⁾。

$$x_p = -c \frac{a_{11}X_p + a_{12}Y_p + a_{13} + a_{14}X_p^2 + a_{15}Y_p^2 + a_{16}X_p Y_p}{a_{31}X_p + a_{32}Y_p + a_{33} + a_{34}X_p^2 + a_{35}Y_p^2 + a_{36}X_p Y_p} \quad (9a)$$

$$y_p = -c \frac{a_{21}X_p + a_{22}Y_p + a_{23} + a_{24}X_p^2 + a_{25}Y_p^2 + a_{26}X_p Y_p}{a_{31}X_p + a_{32}Y_p + a_{33} + a_{34}X_p^2 + a_{35}Y_p^2 + a_{36}X_p Y_p} \quad (9b)$$

区分的カメラモデルの重要な点は、上式のようなカメラモデル式を、1枚の画像を分割した小領域ごとに区分的に適用することである。従って、小領域ごとに異なるカメラパラメータセットが必要になる。小領域を無限に小さくすると、式(9a, b)は像座標と物体座標との間の数値的一対一対応を与える「ダイレクトマッピング」となる。一見すると、このカメラモデルは式(8a, b)の幾何光学的カメラモデルに類似しているが、レンズ歪みの補正を高次項($X_p^2, Y_p^2, X_p Y_p$)の導入で取り扱っている点が異なる。その物理的根拠は希薄であるが、小領域の中でレンズ歪みが定量的に表現できさえすればよいとの発想がベースになっているようである。PIV計測では、流体容器壁面での光の屈折など、幾何光学的カメラモデルでの取り扱いが難しい問題が存在する。その点で、区

分的カメラモデルは柔軟性に富んだアプローチといえることができる。

PIV計測においてどのようなカメラモデルを採用するかはシステム設計者の自由である。幾何光学的カメラモデルについては写真測量やロボットビジョンの分野での膨大な研究があり、基礎が確立していると言える。一方、区分的カメラモデルはシステムごとに全く相違しているのが現状で、それらの校正精度や a_{ij} を求める際の解の安定性などについて、基礎的検討が必要であると思われる。

6.3 基準点データ

どのカメラモデルを採用するにしても、測定ごとにカメラパラメータを具体的に決定しなければならない。そのためは、像座標と物体座標とが既知の基準点を流れ場に設置する必要がある。設置方法として、

- (1) 平板に基準点を描き、平板を奥行き方向に移動させる²²⁾
- (2) 奥行き方向に凹凸のあるブロックを使用する²⁵⁾
- (3) 3次元的に配置された基準点を使用する²³⁾

などがある。製作の容易さや精度の高さから、(1)の方法が最近の主流である。

Fig. 3はステレオPTVにおける基準点撮影の様子を示したものである。厚み2.5 mm、長さ230 mm、幅140 mmの亚克力平板に黒色塗装を施し、その上に直径5 mmの円形白色レタリングを貼り付けて基準点としている。基準点プレートは微動装置に取り付けられており、面法線方向に ± 0.2 mm程度の精度でトラバースされる。プレート上での基準点の重心位置はあらかじめ ± 0.2 mm程度の精度で測定されており、その測定値とトラバース量とから各基準点の物体座標(X_p, Y_p, Z_p)がわかる。一方、基準点を撮影した画像から、各基準点画像の重心位置を画像解析で求めることによって、その像座標(x_p, y_p)がわかる。このようにして得られる基準点データを用いて、カメラモデル式を解くことによってカメラパラメータを算出する。

この例のように、基準点の設置はかなり面倒である。カメラモデル式の解法アルゴリズムの進歩によって⁴⁵⁾、基準点データさえ得られればカメラパラメータは迅速に計算されるようになっている。それに比して、基準点の設置方法はどのシステムも旧態依然としており、工夫の余地が大きいように思われる。2次元2成分PIVの人気のポイントが「簡便さ」であることを鑑みると、3次元PIVにおけるカメラ校正の簡便化は、その実用化において避けて通れない課題であろう。

7. まとめ

3次元PIVの実用化の現状と今後の展望について筆者の考えを述べた。前述したように、「3次元化」は決して新しい目標ではなく、以前よりその時代の技術レベル

Fig. 3 Camera calibration for stereo PTV (left) and calibration plate (right)

に応じた3次元化が行われてきた。従って、今後、革新的計測原理を新たに提案することは容易ではないであろう。しかし、コンピュータの高速化・大容量化と撮像デバイスおよびレーザ照明装置の長足の進歩とによって、「高時間分解能3次元3成分計測」という究極の流速計測も決して夢物語ではなくなっている。その意味で、乱流数値計算において大規模直接数値シミュレーション(DNS)が可能になった直前の状況に類似していると筆者は感じている。

参考文献

- 1) Adrian, R. J., 1991, Particle-imaging technique for experimental fluid mechanics, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 23, pp. 261–304.
- 2) 日本機械学会編, 1998, 熱流体の新しい計測法, 養賢堂, pp. 96–123.
- 3) Raffel, M., Willert, C. and Kompenhans, J., 1998, Particle Image Velocimetry, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- 4) 可視化情報学会, 1998, 講習会テキスト「実践集中講義: PIVの要点」, VSJ-PIV-S 1.
- 5) 西野耕一, 1999, 粒子画像流速測定技術の動向, クリーンテクノロジー, Vol. 9, No. 6, pp. 25–28.
- 6) Chiu, W.-C. and Rib, L. N., 1956, The rate of dissipation of energy and the energy spectrum in a low-speed turbulent jet, Transactions of American Geophysical Union, Vol. 37, No. 1, pp. 13–26.
- 7) Nedderman, R. M., 1961, The use of stereoscopic photography for the measurement of velocities in liquids, Chemical Engineering Science, Vol. 16, pp. 113–119.
- 8) Nedderman, R. M., 1961, The measurement of velocities in the wall region of turbulent liquid pipe flow, Chemical Engineering Science, Vol. 16, pp. 120–126.
- 9) 笠木伸英, 西野耕一, 1990, 3次元画像処理流速計: 乱流計測における新たなツール, 流れの計測, Vol. 8, No. 11, pp. 2–11.
- 10) Kent, J. C., 1994, Three-dimensional particle tracking velocimetry: A review, Proceedings of Fluid Control and Measurement '94, Toulouse, France, Vol. 1, pp. 309–314.
- 11) Hinsch, K. D., 1995, Three-dimensional particle velocimetry, Measurement Science and Technology, Vol. 6, pp. 742–753.
- 12) 岡本孝司, 佐賀徹雄, 西尾茂, 小林敏雄, 1997, 三次元粒子画像流速測定法(3DPIV), 可視化情報, Vol. 17, No. 66, pp. 239–244.
- 13) 可視化情報学会, 1999, ワークショップテキスト「最新情報: 3次元PIV」, VSJ-PIV-S 2.
- 14) Arroyo, M. P. and Greated, C. A., 1991, Stereoscopic particle image velocimetry, Measurement Science and Technology, Vol. 2, pp. 1181–1186.
- 15) Sinha, S. K. and Kulman, P. S., 1992, Investigating the use of stereoscopic particle streak velocimetry for estimating the three-dimensional vorticity field, Experiments in Fluids, Vol. 12, pp. 377–384.
- 16) Prasad, A. K. and Adrian, R. J., 1993, Stereoscopic particle image velocimetry applied to liquid flows, Experiments in Fluids, Vol. 15, pp. 49–60.
- 17) Brücker, C. and Althaus, W., 1992, Study of vortex breakdown by particle tracking velocimetry (PTV), Experiments in Fluids, Vol. 13, pp. 339–349.
- 18) Ushijima, S. and Tanaka, N., 1996, Three-dimensional particle tracking velocimetry with laser-light sheet scanning, Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol. 118, pp. 352–357.
- 19) Brücker, Ch., 1995, 3-D DPIV using a scanning light-sheet and stereoscopy: study of flow development around a spherical cap, Laser Anemometry-1995, The American Society of Mechanical Engineers, FED-Vol. 229, pp. 497–503.
- 20) Kent, J. C. and Eaton, A. R., 1982, Stereo photography of neutral density He-filled bubbles for 3-D fluid motion studies in an engine cylinder, Applied Optics, Vol. 21, No. 5, pp. 904–912.
- 21) Chang, T. P. K., Watson, A. T. and Tattersson, G. B., 1985, Image processing of tracer particle motions as applied to mix-

- ing and turbulent flow-I: the technique, Chemical Engineering Science, Vol. 40, No. 2, pp. 269-275.
- 22) Nishino, K., Kasagi, N. and Hirata, M., 1989, Three-dimensional particle tracking velocimetry based on automated digital image processing, Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol. 111, No. 4, pp. 384-391.
 - 23) Kobayashi, T., Saga, T. and Sekimoto, K., 1989, Velocity measurement of three-dimensional flow around rotating parallel disks by digital image processing, Flow Visualization-1989, The American Society of Mechanical Engineers, FED-Vol. 85, pp. 29-36.
 - 24) Economikos, L., Shoemaker, C., Russ, K., Brodkey, R. S. and Jones, D., 1990, Toward full-field measurements of instantaneous visualizations of coherent structures in turbulent shear flows, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 3, pp. 74-86.
 - 25) Maas, H. G., Gruen, A. and Papantoniou, D. A., 1993, Particle tracking velocimetry in three-dimensional flows: part I. photogrammetric determination of particle coordinates, Experiments in Fluids, Vol. 15, pp. 133-146.
 - 26) Guezennec, T. G., Brodkey, R. S., Trigui, N. and Kent, J. C., 1994, Algorithms for fully automated three-dimensional particle tracking velocimetry, Experiments in Fluids, Vol. 17, pp. 209-219.
 - 27) Meng, H. and Hussain, F., 1991, Holographic particle velocimetry: a 3D measurement technique for vortex interactions, coherent structures and turbulence, Fluid Dynamic Research, Vol. 8, Nos. 1-4, pp. 33-52.
 - 28) Barnhart, D. H., Adrian, R. J. and Papen, G. C., 1994, Phase-conjugate holographic system for high-resolution particle-image velocimetry, Applied Optics, Vol. 33, No. 30, pp. 7159-7170.
 - 29) Zhang, J., Tao, B. and Katz, J., 1996, Three dimensional velocity measurements using hybrid HPIV, Proceedings of the 8th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, pp. 4.3.1-8.
 - 30) Willert, C. E. and Gharib, M., 1992, Three-dimensional particle imaging with a single camera, Experiments in Fluids, Vol. 12, pp. 353-358.
 - 31) Stolz, W. and Kohler, J., 1994, In-plane determination of 3D-velocity vectors using particle tracking anemometry (PTA), Experiments in Fluids, Vol. 17, pp. 105-109.
 - 32) Brückner, Ch., 1996, 3-D PIV via spatial correlation in a color-coded light-sheet, Experiments in Fluids, Vol. 21, pp. 312-314.
 - 33) 三宅和夫, 1979, 幾何光学-光学技術シリーズ 8, 共立出版, pp. 93-114.
 - 34) Oberdier, L. M., 1984, An instrumentation system to automate the analysis of fuel-spray images using computer vision, ASTM, Vol. 848, pp. 123-136.
 - 35) Wereley, S. T., Meinhart, C. D. and Gray, M. H. B., 1999, Depth effects in volume illuminated particle image velocimetry, Proceedings of The 3rd International Workshop on PIV '99, Santa Barbara, pp. 545-550.
 - 36) 文献 3) の pp. 136-139.
 - 37) Westerweel, J., 1999, Theoretical analysis of the measurement precision and reliability in PIV, Proceedings of The 3rd International Workshop on PIV '99, Santa Barbara, pp. 9-14.
 - 38) 可視化情報学会, 2000, PIV の実用化・標準化研究会最終報告書, 5.3 節.
 - 39) Suzuki, Y., Ikenoya, M. and Kasagi, N., 1999, Three-dimensional PIV measurement of the phase relationship between coherent structures and dispersed particles in a turbulent channel flow, Proceedings of The 3rd International Workshop on PIV '99, Santa Barbara, pp. 107-112.
 - 40) Etoh, T., Takehara, K. and Okamoto, K., Particle image extraction by means of particle mask correlation method, CD-ROM Proceedings of International Conference on Optical Technology and Image Processing in Fluid, Thermal and Combustion Flow, Yokohama, No. AB 001.
 - 41) 久保田敏弘, 1995, ホログラフィー入門—原理と実際—, 朝倉書店.
 - 42) 西野耕一, 1999, PIV による軸対称衝突噴流の計測とデータ処理—3成分同時計測の必要性?, 日本機械学会流体工学部門講演会論文集, No. 99-19, pp. 353-354.
 - 43) 文献 13) の pp. 23-39.
 - 44) 日本写真測量学会編, 1983, 写真による三次元測定, 共立出版, pp. 172-178.
 - 45) 出口光一郎, 1993, カメラキャリブレーション手法の最近の動向, コンピュータビジョン, 82-1, pp. 1-8.
 - 46) Lawson, N. J. and Wu, J., 1997, Three-dimensional particle image velocimetry: experimental error analysis of a digital angular stereoscopic system, Measurement Science and Technology, Vol. 8, pp. 1455-1464.
 - 47) Willert, C., 1997, Stereoscopic digital particle image velocimetry for application in wind tunnel flows, Measurement Science and Technology, Vol. 8, pp. 1465-1479.
 - 48) Soloff, S. M., Adrian, R. J. and Liu, Z.-C., 1997, Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry, Measurement Science and Technology, Vol. 8, pp. 1441-1454.