141 PIV標準画像の構築 (第1報: 標準画像生成手法の検討)

東京大学 岡本 孝司^{*}、小林 敏雄、佐賀 徹雄
大阪府立大学 西尾 茂

Development of PIV Standard Image (First Report: Study on Graphics Technique)

Koji OKAMOTO^{*}, Toshio KOBAYASHI^{**}, Shigeru NISHIO^{***} and Tetsuo SAGA^{**}

Particle Image Velocimetry (PIV) offers many advantages for the study of fluid flows. Lots of PIV technique and PIV system had been developed. However, there are no standard tool for the evaluation of the PIV system effectiveness and accuracy. To popularize the PIV for practical use, the PIV system should have some standard. The PIV has two processes, i.e., the image capture with visualization and the image analysis. In order to evaluate the image analysis system for the PIV, the standard images were proposed. Using the images, the evaluation of the effectiveness and accuracy for the PIV system will be carried out. The requirement of the standard images and the computer graphics technique for the images were investigated. The developed PIV standard images are distributed using the Internet, (<http://sap.gen.u-tokyo.ac.jp/>).

1. 序論

粒子画像流速測定法 (PIV; Particle Imaging Velocimetry) は、流れを微小粒子により可視化し、可視化画像を画像処理する事によって、定量的な流速分布を算出しようとするものである。従来からの熱線流速計などに比べて、流れ場全体の同時計測を高速自動化して行えるという特長を有するため、今日急速に発展普及している。世界中のさまざまな研究者により、さまざまな手法が提案され、幾つかの手法については実用化も図られている。

ところが、これらのさまざまな手法の開発は、各研究者毎に実施されており、その評価手法も各開発者独自のものとなっている。実用化を図られている汎用的な手法についても、そのシステム全体としての評価基準は無く、計測されたデータの誤差評価に対する一般的な評価データも無い。

さらに、機材ソフト一式を購入しただけでは、十分信頼度のあるデータが取れるわけではない。例えば、

レーザドップラ流速計は、システムを購入すれば、若干の熟練は要するものの、簡単に精度の高い計測が可能となっている。それに対し、PIV の場合には、測定手法自体に工夫が必要である事、精密な校正を必要とする事、誤差や過誤ベクトルをユーザが評価する必要がある事、など汎用化を阻む問題が多く、一般的な計測方法が確立されているとは言いがたい。

PIV を工学的に有効な手法として確立するためには、PIV システムや手法の利点欠点を定量的に評価する指標の制定が急務となっている。PIV は流速測定のためのシステムであり、大きく分類して、可視化により画像データを取得するシステムと画像データから流速分布情報を算出するための解析システムに分類できる。本研究では、まず後者の画像データ取得後の解析システムの評価に利用することができる標準画像を構築する。

Gharib ら [1] は、彼らの提案している DPIV を対象として、標準画像を公開している。その標準画像はクエット流、ランキン渦の2種類のみについて生成されており、3次元的な運動は考慮されていない。実際の流速計測においては、ノイズや3次元性の影響が大きく、これらの運動を考慮し、かつ、評価が容易な標準画像が必要である。

本研究では、PIV 評価のための標準画像として、より汎用的で、利用しやすい標準画像を構築することを目的とする。

* Nuclear Engineering Research Laboratory,
University of Tokyo, Tokai-mura, Ibaraki, 319-11

** Institute of Industrial Science,
University of Tokyo, Roppongi, Tokyo, 106

*** Dept. of Marine System Engineering,
University of Osaka Prefecture, Sakai, Osaka 593

Figure 1: Schematic of the target flow field

2. 標準画像

2.1 標準画像が満たすべき必要条件

PIV解析システム評価のための標準画像を構築するにあたり、その画像データベースが満足すべき必要条件を考察する。

1. 種々のパラメータを含むこと。
PIV画像には、トレーサ粒子の密度、濃度、流速条件、レーザ光など、画像撮影の際に考慮すべき種々のパラメータがある。これらのパラメータの典型的な状態を含むことが望ましい。また、パラメータを自由に変えられることが可能であることが望まれる。
2. 容易に評価可能であること。
正解がわかっている流れ場であれば、解析結果と正解を比較し容易に評価が可能である。また、画像生成のパラメータがわかれば、これらのパラメータに対する解析システムの評価も容易に可能となる。
3. より一般的な画像であること。
コンピュータグラフィックで生成される画像が実際の画像と近いものであることが望ましい。これには、バックグラウンドノイズや、光学的なノイズなども含まれる。
4. 容易に取得できること。
必要なときに必要な画像データを取得し、評価が可能であることが望ましい。

2.2 画像生成の対象

前項で述べたように、画像生成のためには数多くのパラメータが存在する。また、PIVの画像取得法にもさまざまな手法が存在する。さらに、3次元流れ場をステレオ法やホログラムを用いて解析する手法や、流速情報だけではなく粒子径や温度情報まで同時に計測しようとする手法も提案されている。

この標準画像で全ての対象を網羅することが望ましいが、現実的には困難であり、比較的汎用的な対象に絞らざるを得ない。ここでは、以下の対象について画像を生成することとする。

1. 流速分布は3次元であるが、照明はレーザシート光によって流れ場の一断面のみ可視化したものとする。2次元PIVに相当する。
2. トレーサ粒子はプラスチック粒子のような球状のものとし、1つ1つの識別が可能な大きさとする。

2.3 流速分布

必要条件に記載されているように、画像生成のためのベースとなる流速分布は既知である必要がある。また、より一般的な流れ場を対象とするため、3次元流であることが望ましい。この様なことから、本研究では流速分布として3次元LES(Large Eddy Simulation)による衝突噴流場[2]を対象とする事とした。これは、3次元的な流れ場を含むとともに、細かいスケールから大きなスケールまでの複雑な運動が含まれていると考えられるためである。

対象とした流れ場をFig.1に示す。二次元噴流が平面に衝突する流れ場であり、噴流レイノルズ数(Re) 6000の乱流状態である。解析領域は、ノズル巾をBとして、x方向53B、y方向10B、z方向3.9Bである。この領域を、 $300 \times 100 \times 34$ の不等間隔メッシュに分割し、LESを用いて3次元過渡解析を実施した[2]。この時のある瞬間の流速分布をベースとし、画像データを生成した。実際の流れ場では、流速分布が時間とともに変動する。画像データ生成においても、過渡流速場を用いることが望ましいが、まず、簡単のため、瞬間値を用いることとした。なお、過渡流速場を用いた標準画像は現在作成中である。

Figure 2に噴流中央から右半分の、あるx-y断面を切り出した流速分布を示す。また、Fig.3には、このx-y平面と鉛直方向(z)の流速分布を等高線で示す。ここに示すように、噴流が壁面に衝突する領域で、複雑な3次元流となっていることがわかる。また、噴流の流入口付近では、渦が生成されている。

本標準画像では、これらの流速分布のうち、図中□で囲んだ3つの領域に対して標準画像の生成を行った。画像領域01は、比較的3次元性が少ない壁面噴流部であり、領域21は、噴流が壁に衝突する3次元性が大きな領域である。さらに領域41は、噴流流入口付近の2次元性の強い、しかし、渦が生成されている領域である。

2.4 パラメータ

画像生成の際に考慮すべきパラメータをまとめる。流れ場は次元を持っているが、画像上に投影される段階で、その次元は画像上の次元となる。画像上の代表長さとして画素(pixel)の大きさを取る。また画像上の代表時間としては、連続する2画像間の時間間隔(interval)をとる。この2つの代表量を用いて、画像内の流れ場を表現する。

1. 平均画像流速(v)

画像上での面内流速を、pixel/intervalの単位で表示する。対象領域内のLES流速データから、平

均流速、最大流速を算出し、画像上の単位に変換する。具体的には、粒子が連続する 2 画像間で何 pixel 移動するかを表す。

2. 面外流速 ($|W|$)

3 次元性を表すパラメータとして、面外方向の流速を考える。面外方向の流速分布 (w) を LES データから算出する。これの絶対値 ($|w|$) をレーザシートの中 ($2\sigma_l$) により無次元化し、その平均値を算出する。このパラメータの物理的な意味は、連続する 2 画像間で、面外方向にシート巾の何%移動するかを表すものである。

3. 画像渦度 (Ω)

画像の歪みを表すパラメータである。具体的には、LES データより対象領域内任意の点の渦度 ($\omega = du/dy - dv/dx$) を算出する。このデータに時間間隔 (interval) を乗ずることにより、無次元化したものを画像渦度と定義する。画像渦度が大きいもの程、回転や剪断による歪みが大きい。

4. 粒子個数 (N)

画像中での粒子個数。個数が多い程画像が密になる。小さな粒子を多数入れることで、煙による可視化画像のような状況を生成することも可能である。

5. 粒子径 (d)

平均粒子径とその標準偏差を pixel 単位で表す。

2.5 画像生成 (CG)

画像データは 256×256 画素、256 階調 (8bit) の画像を対象とする。この画像に粒子を配置することで粒子画像を生成する。CG ではレンダリングなどの手法を用いて、光の軌跡を追跡し画像上に投影する手法がよく用いられている。本研究では、画像中に多数の粒子が混入している画像を対象とするため、レンダリングは計算時間が多量に掛かりすぎるためふさわしくない。そこで、Gharib ら [1] が実施している手法と同様に粒子の輝度分布をガウシアンで直接与える手法を用いた。

具体的には粒子 (x_p, y_p) の輝度を、

$$I(x, y) = I_0 \exp \left(-\frac{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2}{(d_p/2)^2} \right) \quad (1)$$

により画像上に投影した。ここで、レーザライトシートによる投影を模擬するため、粒子の最大輝度 I_0 を粒子の 3 次元位置から決定する。レーザは幅 $2\sigma_l$ のガウス分布をしていると仮定し、

$$I_0 = 240 \exp \left(-\frac{z_p^2}{\sigma_l^2} \right) \quad (2)$$

により求めた。以上より、粒子の 3 次元位置 (x_p, y_p, z_p) および粒子径 (d_p) が決定されれば、その粒子の画像は式 (1), (2) より生成できる。

初期条件として、乱数により領域内に一様に粒子を発生させる。粒子径は平均値と標準偏差より乱数で決定する。

粒子が重なるオクルージョン (隠れ) の場合には、輝度の大きな粒子像が画像上に投影されるとして取り扱った。さらに、オクルージョンによる画像の不連続性を取り除くため、まず仮想的に 512×512 画素の領域に粒子像を生成し、これを 4 画素毎に空間平均して 256×256 画素の画像に再構築した。

粒子の 3 次元位置より、その位置における流体の流速を LES データより算出できる。その流速を元に粒子を移動させ、連続的に画像を生成する。粒子の運動を記述するための前提は以下の通りである。

- 粒子の運動は、流れ場に完全に追従するとする。
- 粒子の持つ速度は、線形補間により求める。(スタガード格子を用いる)

3. 生成画像の例

前記のような手法によって生成した画像データは、現在インターネット上の WWW を用い、<http://sap.gen.u-tokyo.ac.jp/> において公開されている。ここでは、画像データを JAVA を用いた Animator により動画として参照することができる。さらに、FTP などを用いて、各自のコンピュータに画像データが取得できる。インターネットを用いる事で、

Table 1: Parameter of standard images

No.	$\bar{v}$	v_x	$ W $	$ W _x$	N	$\bar{d}$	σ_d
01	7.4	15.0	0.017	0.10	4000	5.0	1.4
02	22.0	45.0	0.060	0.30	4000	5.0	1.4
03	2.5	5.1	0.006	0.03	4000	5.0	1.4
04	7.4	15.0	0.017	0.10	10000	5.0	1.4
05	7.4	15.0	0.017	0.10	1000	5.0	1.4
06	7.4	15.0	0.017	0.10	4000	5.0	0.0
07	7.4	15.0	0.017	0.10	4000	10.0	4.0
08	7.4	15.0	0.17	0.99	4000	5.0	1.4
21	4.2	9.5	0.04	0.23	4000	7.0	2.0
22	4.2	9.5	0.15	0.93	4000	7.0	2.0
23	4.2	9.5	0.04	0.23	12000	7.0	2.0
24	4.2	9.5	0.04	0.23	1000	7.0	2.0
41	4.1	7.1	0.006	0.02	3000	6.0	2.0

$\bar{v}$	: Average Image Velocity	pixel/interval
v_x	: Maximum Image Velocity	pixel/interval
$ W $	: Average Out-of-plane Velocity	-/interval
$ W _x$	: Maximum Out-of-plane velocity	-/interval
N	: Number of Particle	-
$\bar{d}$	: Average Particle Diameter	pixel
σ_d	: Standard Deviation of d	pixel

Figure 2: Velocity distribution of the target flow field

Figure 3: Out-of-plane velocity of the target flow field

(a) $t=0$

(b) $t=1$

Figure 4: Example of the standard image (01)

データの配付および参照が世界規模で容易に行なう事ができる。また、一般的なブラウザでサポートされている JAVA を用いて、動画を表現する事が可能であることも利点の一つである。

Figure 4 に本研究で生成した標準画像の一例を示す。比較的、実画像に近い画像データが生成できている。また、現在上記サイトに収録されている標準画像のパラメータを表 1 に示す。画像番号の上 1 桁が、Figs.2,3 に示す流速分布を用いた領域を表す。

なお、標準画像のパラメータは多岐にわたっており、表 1 に示すデータだけで全部を表現できているとはいえない。そこで、WWW に附属している CGI を用い、任意のパラメータによる画像を利用者がカスタムメイドで作成できるようになっている。上記のパラメータをブラウザ上で設定し、Submit ボタンをクリックすることにより数十秒から数分でそのパラメータを元に画像を生成する。このカスタムメイドの画像は、標準画像データベースに収録されるとともに、JAVA Animator で動画を、また FTP によって画像データを取得することが可能となっている。

4. 今後の課題

現在の標準画像では、2 次元瞬時値の流速データを元に粒子の移動を解析している。これを、3 次元過渡データを用いることにより、より実際に近いデータを

得ることが出来る。また、現状ではノイズによる影響を無視している。実際の画像では画像取得ハードウェアに起因するノイズの他に、照明手法などに起因するバックグラウンドノイズなども存在する。これらのノイズを含んだ画像データの生成も重要である。

さらに、この標準画像データを用いた解析の評価を、より簡単に実施するためのツールを開発する必要がある。これらの評価結果をデータベース化し、分析することによって、必要な画像処理手法などの標準化を行うことができる。

5. 結論

PIV のための標準画像を構築するための要件に関して考察し、標準画像を構築した。標準画像はインターネットを通じて公開され、誰でもが利用できる。今後、この画像のバージョンアップを実施するとともに解析結果評価のためのツールを整備する必要がある。

参考文献

- [1] Gharib, M. et al., "Center for Quantitative Visualization," <http://www.cqv.caltech.edu/>
- [2] 坪倉誠、「平面衝突噴流の LES 数値解析に関する研究」、東京大学博士論文 (1997)