140 PIV ベンチマークテストの試み

速水 洋[○] (九州大学), 岡本孝司 (東京大学), 荒巻森一朗 (九州大学)

A Trial of Bench Mark Test for PIV

Hiroshi HAYAMI, Koji OKAMOTO and Shin-ichiro ARAMAKI

ABSTRACT

Many types of 2D-PIV system have been come onto the market, and there are various techniques for the calculation of velocity vectors. In the present paper, a bench mark test for the calculation technique of PIV was tried. Four pictured images of a real flow were distributed through internet as digital image files. The flow in the problem was that induced by an oscillating flat plate and the 2D relative flow was pictured using a CCD video camera moving with the plate. The calculation was pursued without any information on the flow. Then, the evaluated results of velocity vectors were compared with each other. The problems to utilize images of a real fluid flow as a standard image of bench mark test were also discussed.

1. はじめに

粒子画像流速計 (PIV) は 2 枚の粒子 (群) 画像間の粒子の移動ベクトルから流れの速度ベクトルを求めるシステムであり、画像面内の多点同時計測が可能でかつ流れ場の空間構造を把握できるなどの特徴を有している。ただ、流れの中の粒子群は流れの乱れなどによる配置崩れのために対応する粒子 (あるいは粒子群) を誤ったまま認定することも少なくない。これが PIV システムの最大の弱点である。二次元 PIV システムはすでに市販されているが、解析手法は多種多彩である。ここでは、解析手法に関するベンチマークテストの試みの一つを議論したもので、デジタル化した 4 時刻の実写粒子画像のみをインターネットを通じて配布して、回答を得た速度ベクトル計算結果を比較した。解析対象は振動平板まわり二次元相対流れであり、平板に固定した CCD カメラで撮影したものであるが、解析は流れに関する情報が一切不明のままに行われた。実写画像をベンチマークテストの基準画像として使用する場合の問題点も議論した。

2. 実験装置および実験方法

実験装置および PIV システムの概略を Fig. 1 に示す。本実験装置は水槽、移動台車、台車駆動部、振動平板、CCD カメラにより構成される。水槽は厚さ 10mm のアクリル板製で、長さ×高さ×幅は 1000×250×250mm である。移動台車は、水槽長手方向に配した高精度軌道に沿って

安定した直線運動が可能である。台車駆動にはステッピングモータを使用し、クランク機構により往復運動に転換した。振動平板は移動台車に固定され、断面 (幅×厚み) は 15mm×3mm、深さ方向の長さは 200mm である。なお、振動板は水槽のほぼ中央部に位置している。

平板の振動はほぼ正弦波的であり、振動数は 0.16Hz、両振幅は 30mm である。振動板の幅および最大速度に基づくレイノルズ数は 224 である。可視化は水深約 210mm の水槽の底面から 110mm の水平断面位置で行った。

トレーサ粒子としては、PIV および PTV (粒子追跡流速計) いずれの手法にも適用可能な直径 0.2~0.7mm、比重 1.02 の球形粒子 (三菱化成製ダイヤイオン HP20) を用いた。なお、体積濃度は約 580ppm であり、水槽内の水道水に混入した。照明は、2 台の 750W のスライドプロジェクターを光源として用い、水槽両側面から厚さ 3mm のス

Fig.1 Experimental set up and PIV system

リット光を入射した。

撮影には移動台車に固定した CCD カメラ（東芝製 IK-C40）を用いて振動平板に相対的な流れを撮影した。Hi-8 VCR（SONY 製 EV-NS7000）に 30 fps で記録された画像は、再生一時停止状態を繰り返して、各フレーム毎に画像処理ボード（Micro-Technica 製 MT-98-CVFM01）によりデジタイズした。なお、取込み、記録にはパソコン（NEC 製 PC-9821 Ap2/U2）を用いた。静止画像取込みは奇数フィールドのみで、偶数フィールドは補間される。また、NTSC コンポジットカラー出力信号の R（赤）信号のみを、 512×512 pixel, 256 階調の画像とし、コントラスト強調および平滑化処理を行った。

3. テスト画像

4 枚のテスト画像を Fig. 2 に、テスト画像の特性を Table 1 に示す。画像中央部にある黒く映っている長方形が振動板の断面である。真上から撮影してはいるが視差の関係で周辺がやや明確でない。4 枚の画像は 1/30s 間隔の連続画像である。輝度平均値が 1 画像毎に変化しており、特にここで基準とした #0 と #1 の 2 画像間の平均輝度差が大きかった。ただ、輝度値の標準偏差値は 4 画像ともほぼ同程度であった。PIV あるいは PTV に重要なパラメータは粒子数（粒子濃度）、平均粒子径および平均粒子間距離などであろう。ただし、これらの値は輝度レベルをどこに設定するかによって変わる。ここでは輝度しきい値を 160（開放側）および 192（絞り側）の 2 種類の場合の値を表中に示した。概数としては、粒子数 900 個、平均粒子径 3.3 pixels, 平均粒子間距離 9 pixels である。

4. インターネットを利用した画像配布

本ベンチマーク実験を実施するにあたり、画像データ

Fig.2 Test images

Table 1 Characteristics of test images

画像	# 0	# 1	# 2	# 3
時刻	$t = t_0$	$t = t_0 + 1/30s$	$t = t_0 + 2/30s$	$t = t_0 + 3/30s$
輝度平均値	103.5	127.0	109.1	117.4
輝度標準偏差	24.3	24.3	24.7	24.8
粒子数	976 - 605	1572 - 824	1111 - 655	1294 - 726
平均粒子径	3.4 - 3.0	3.7 - 3.3	3.4 - 3.1	3.6 - 3.2
平均粒子間距離	8.9 - 11.3	7.0 - 9.7	8.3 - 10.9	7.7 - 10.3

をインターネットを用いて配布することとした。画像配布を実施した 1996 年は、ネットワークインフラストラクチャが各大学間にひろがった時点であり、フロッピーディスクやテープによる配布よりも容易にデータ配布を実施することが出来た。データ配布には、FTP (File Transfer Protocol) を使い、匿名 FTP (Anonymous FTP) と呼ばれる手法で、参加者が各自で画像を取り込むことで実施した。ネットワークを通じて、誰もが自由にデータを取得可能である。URL で記述すると、

<ftp://bluebonnet.utnl.gen.u-tokyo.ac.jp/pub/piv>

に収録されており、画像データは現在も取得可能である。

画像データのフォーマットは生データの他に、各種フォーマットを準備した。これは、参加者の画像解析プラットフォームが不明であるためである。生データ以外では、Unix 系で良く利用される PGM 形式、Mac 等で良く利用される GIF 形式、TIFF 形式、Windows で利用される BMP 形式を準備した。GIF および TIFF は可逆データ圧縮を行うが、この画像に関しては圧縮率はたかだか 1/1.3 であり、データ圧縮の効果はあまり無かった。なお、JPEG などを用いると圧縮率が大幅に改善（ $\sim 1/20$ ）されるが、画像の質が劣化するため、今回は不可逆圧縮フォーマットは用いなかった。なお、実際に各研究者が取得したデータフォーマットはほとんどが生データ (RAW) であり、他のフォーマット形式のデータは人気が無かった。これは、GIF や PGM 等のフォーマットに対応した PIV プログラム自体が少ないことや、画像形式変換はデータ取得後に各自で容易に実施できるためであったと考えられる。

画像データは、 512×512 のサイズで 256 階調であり、1 画像が約 260KB になる。ネットワークインフラの問題で、10KB/s 程度の転送スピードであったことを考慮すると 1 画像あたり約 30 秒の転送時間がかかる。モデムなどを通じた回線であれば、さらに速度が低下し、1 画像の転送に 5 分程度かかる場合も生じる。一般に画像データは容量が膨大であることから、PIV に適した不可逆圧縮手法の考案も今後の課題である。

5. 結果および考察

濃度パターン法および粒子パターン法それぞれ 4 通りの速度ベクトル計算結果を得た。速度ベクトル図を Fig.

Fig.3 Velocity vectors

3に、また、対応する手法一覧および画像処理手法等をTable 2に示す。Case 8の4時刻追跡法ではFig. 2の4画像全てを用いるが、他の方法では任意の2画像の選択が可能である。ここでは、#0と#1の2画像を用いた計算結果を基準に比較した。なお、Case 3では#0と#2の2画像を用いており、Case 4では4画像を用いてベクトル平均化処理している。なお、ベクトルの長さは1/30s間移動量の3倍に換算した。

Case 1からCase 4の濃度パターン法とCase 5からCase 8の粒子パターン法の一つの相違点は、前者が任意の点における流速計算が可能（したがって通常正方形格子が選

択される）であることに対して、後者は粒子位置が基準となることである。もちろん、粒子座標の場合でも内挿によって任意の点の流速が計算可能であるが、ここでは生のデータが提供されている。正方形格子の場合、格子間隔のとり方によって結果の見え方が変わる。本来、相関マトリックス法は大きさ n の参照領域内の平均速度が得られるので、それ以下の小さな格子間隔は単なる内挿に近い値を示すはずであるが、渦流れや平均流れがより強調されているように見える（Case 4）。濃度パターン法では相関マトリックスの大きさが問題となる^{2),3)}。過誤ベクトル数の大小はあるが、 $n=19$ から51pixelsと広い範囲にわ

Table 2 List of calculation technique

Case	手 法		画像処理等	ベクトル数 採用／計算	参照領域 [*]	備 考
1	濃度 パター ン法	相関マトリックス法	コントラスト強調・3*3平均化	625／625	n = 19	
2		フーリエ変換法	正規化処理 低域強制フィルタ	900／900	n = 32	
3		輝度差累積法	ノイズ除去 サブピクセル(1/10)	883／891	n = 51	#0, 2 画像間
4		逐次棄却 輝度差累積法	画像間輝度平均化 ニューラルネットワーク法	1574／1600	n = 25	3 画面間平均
5	粒子 パター ン法	二値化相関法	階調補正・境界強調	650／804	Np ≒ 6	
6				804／1000		
7		パネモデル法	背景ノイズ除去	850／900	Np ≒ 12	過誤ベクトル 除去ではない
8	法	4 時刻追跡法	背景濃度値処理・3*3平均化	604／780	ds = 8	円形探索領域

※ n: 相関マトリックスの大きさ (pixel), Np: 粒子数, ds: 領域の半径 (pixel)

Fig.4 Stacking of four images

たって得られた結果に大きな差異はなかった。

一方、粒子パターン法では、計算対象粒子数が780から1000と幅が広い。これは前述したように、粒子認定に輝度レベルのしきい値が必要であるためである。粒子数が他の場合に比べて多いCase 6では、渦周辺の流れ様子は細かく計算されているものの、渦流はとらえられていない。輝度レベルしきい値の最適選定法は今後の課題のひとつである。

過誤ベクトルの問題は避けて通れない。本テスト画像は流れの代表速度の情報が一切与えられていないので、捜査対象となる領域の選定には困ったはずである。Case 4ではニューラルネットワーク法による過誤ベクトル除去が施されている。他の場合について、処理の有無については明確でないが、過誤ベクトルを含むものも多い。特に、Case 7に注目すれば、明らかに過誤ベクトルと思われる大ベクトルも表示されている。これは、他の手法と比較して、大きな領域を対象に計算した結果であり、逆にかなり広い領域を対象にしても過誤ベクトルの発生率は大きくないことも示している。

Fig. 2の画像中の上下の黒い帯は流れとは全く関係がない画像の境界であり、固体境界ではない。Case 1では、この黒い帯もかつ振動平板の領域も関係なく計算されている。その結果、最下端部のベクトルは横向きものが多い。固体境界でも相関マトリックスの大きさを適当に選べば妥当なベクトルが得られる²⁾が、この場合は固体境界でなく、かつ流れが本境界に垂直であるために流れとは全く関係のないベクトルが算出されている。

Case 3ではサブピクセルを用いる計算が試みられている。一般に粒子パターン法が粒子位置精度が高く、従って速度ベクトルの精度も高い。計算時間は膨大となるが、サブピクセル計算による精度向上は魅力的である。

Fig. 4に4時刻における粒子を重ね書きしたものを示す。重ね書きの際には、画像間の輝度を合わせ、かつ粒子数がいずれの画像でも約800個となるようにしきい値をきめ、二値化処理した。これは、ほぼCase 8の4時刻粒子追跡法に対応する。なお、4時刻すべてではなく、例え

ば、中間の1画像を除くことによって、流れ方向の情報も得られるはずである。パソコンによるデジタル画像処理が容易であり、この種のチェック法も有効と思われる。流れは振動平板が下死点に近づく際の平板周りの相対流れであり、周囲には上向きの一様流が、一方、平板後流(Fig. 4では上側)には非対称の一对の大きな渦流れが存在する。なお、流れはほぼ二次元流れである。

6. まとめ

PIVやPTVの解析手法が多いのは、原理は簡単ではあるが完璧な手法が確立されていないためである。実際の流れであっても常識的でない流れを基準画像として比較検討することは、先入観が少ない分、解析手法の相違が現われて興味深い。供試画像の画質に問題はあるが、それをデジタル画像処理でカバーする手法もまた重要と思われる。本画像例では、平均移動量/平均粒子間距離の比が約0.2、最大移動量/平均粒子間距離の比でも0.6程度と移動量に比べて粒子濃度がやや小さく、どちらかといえ、粒子パターン法が有利であったといえる。それでも流れの様子をいずれの手法も的確に把握したといえる。なお、評価指標の確立が今後の課題のひとつである。

謝 辞

本計算にご協力いただいた、植村知正、吉本元信(関西大学)、加賀昭和(大阪大学)、小林敏雄、佐賀徹雄(東京大学)、塩崎孝壽(埼玉大学)、宗向群(福井大学山本研)、村田滋(京都工芸繊維大学)諸氏に謝意を表します。なお、実験、撮影、デジタル画像製作は清谷明寿氏(九大院、現三菱重工)によるものである。

参考文献

- 1) 速水, PIV・PTVの具体的手法とその適用範囲, 日本機械学会講習会教材, 96-14 (1996), 9-18.
- 2) 速水・荒巻・筒井・高曾, トレーサ濃度パターン画像流速計における問題点と対策, 九州大学機能物質科学研究所報告, 8-2 (1995), 245-251.
- 3) 速水・荒巻・高曾・小林, 濃度パターン相関法の適用限界について, 可視化情報, 15-Supple.2 (1995), 189-192.