平成14年6月11日

最近の P I V / P T V 技術における話題

関西大学 工学部

システムマネジメント工学科

植村知正

近年,速度分布の画像計測法(Whole Field Velocimetry, **PIV** [Particle Image Velocimetry]と**PTV** [Particle Tracking Velocimetry])が注目されている.

初期(1985~90頃)においては,画像から瞬時の速度分布を定量的に計測でき るという特性(or 珍しさ)がもてはやされたが,計測誤差が大きいとか,信頼性が薄い (過誤ベクトルの発生),解析が容易でないなど,種々の問題があった.なお,計測の 空間分解能や位置精度が低いとの指摘もされたが,それはどちらかと言えば誤解であっ た.(現在でも,そう思い込んでいる人がある)

その後,機器の急速な性能向上を背景にして,可視化・撮影や解析手法が改良された 結果, PIV / PTVの計測性能は大幅に向上してきた.

現在では,1回の撮影で数千枚の画像を撮影し,解析時間は1画面あたり数秒~30 秒以下で数千本の速度ベクトルを確からしさ5%以下の精度で計測ができるようになっている.

上記のような性能を生かして、PIV / PTVは流体の基本的現象から機器の開発や性能改善の実験計測手段として広く利用されているが,新しい計測対象や計測の要求に対応するために,技術開発や技術改良が継続的に行なわれている.

ここでは,技術的な側面からの簡単な展望を行ない,ついで最近の話題(PIV/PTVの 応用例,新しい計測対象)をいくつか紹介する.

標準的なPIVシステム

・市販されている P I Vシステムのメーカー:

Dantec(松下インターテクノ), TSI(西華・カノマックス), Oxford Laser(日本レー ザー), LaVision(丸文), IDT(オプトサイエンス).

・標準的な機器構成:

高解像度ビデオカメラ,ツインYAGレーザ,解析装置(パソコン).

・標準的なトレーサ:

気流用には,煙,微小油滴(10µm以下),微粉末,中空球など. 水流用には,着色液,微粉末など

- PIV解析の手法と内容:
 - ・Euler的立場からの速度.
 - P I Vシステムはあまり見かけない。
 - 1.パターンマッチングのための手法
 - a) 2次元相関計算,
 - b) FFTを利用した2次元相関計算,
 - c)輝度差の累積値計算
 - d) その他
 - 2.相関解析の補強処理,データ処理.
 - Ex.エラー処理,高精度解析,境界識別など
 - 3.流体計測としてのデータ処理,
 - Ex.流線,渦度,乱れなど.
- PIVによる計測内容: Euler的立場の速度
 - ・シート光で照明された2次元面内の速度ベクトル
 - 2 C 2 D ; 2 方向成分(u, v) , 3 C 2 D ; 3 方向成分(u, v, w) .
 - ・シート光を面に垂直方向に掃引して計測空間を3次元に拡大する.

スキャニング PIV

・顕微鏡下で焦点深度内で計測する2次元速度ベクトル. マイクロPIV

PTV解析:

- ・Lagrange的立場からの速度.
- ・ P I Vのような総合的な市販システムはあまり見かけない.
 a) P T Vシステム, b) ソフトのみ.
- PTVによる計測内容:Lagrange的立場からの速度
 - ・シート光で照明された2次元面内の速度ベクトル
 - 2方向成分(u, v),3方向成分(u, v, w)
 - ・3次元空間で速度の3方向成分を計測.
 - ・顕微鏡下で焦点深度内で計測する2次元速度ベクトル.(マイクロPIV)
 - PTV計測に適した現象
 - ・攪拌・混合現象
 - ・境界に近接した領域の現象

PIVの計測例

1.標準実験

PIVの計測システムは大学や研究機関で独自に開発した多種多様なシステム,計測器メーカが供給しているシステム,ソフトウェアだけ分離したものなどがあり,それぞれの特徴や信頼性などに付いて客観的なデータが無かった.可視化情報学会では1996年11月にPIV技術を総合的に検討する研究会(PIVの実用化・標準化研究会)を発足させ,2000年3月に報告書を纏めるまで, PIVに付いて3年間余りの調査研究を行なった.研究会活動の一環として,同じ現象を種々のPIVシステムで計測して,結果を検討する「標準実験プロジェクト」が実施された.計測対象は開水面を持った容器内に,流体が流入し,下部の流出口から流出するように設定すると,流入条件によっては液面が自励振動し,スロッシングが発生する.この現象の実験装置を5基製作し,国内15カ所と韓国1カ所(ゲスト)の研究機関を持ち回りで実験計測した.その内容と結果は研究会の最終報告書に詳しく記述されている.ここでは,最終的に最も信頼性が高い方法で大量のデータ処理をして得られた結果の一部を紹介する.

・PIV システム

トレーサ:ナイロン粒子, 35µm,比重1.02
照明:20mJ,ツインYAG,波長532nm,6ns, 発光間隔:4ms
シート厚さ: 1mm
流入速度:4~6pixel/ t,
カメラ:1016×1008,8bit 解像度:0.16mm/pix

相関領域: 32*32pix = 5.12 × 5.12mm

相関領域内のトレーサ数:30~50 個

・計測結果:

本実験条件では,容器内には図1に示す3種類の流動パターンが現れる.

解析に使用した画像の1例を図2に示す.

1次のスロッシングモードの状態で計測した速度分布を図3に示す.

図3aは瞬時の速度分布であり、図3bは1000枚の瞬時速度分布を加算平均して得られた平均速度分布である.瞬時の速度分布では噴流の波打ちと渦流れの相互関係がよく判るが、平均流動分布からは噴流部とその変動を抑制している循環流部分を明瞭に認識できる.また、この速度分布から渦度や流線も算出できる.

ref. E1.

 Saga, T., Hu, H., Kobayashi, T., Murata, S., Okamoto, K., Nishio, S., A comparative study of the PIV and LDV Measurements on a self-induced sloshing flow, J. Visualization, vol.3-2(2000) pp.145-156.

2.翼端渦,

NACA0012 翼型(コード長 9.1 cm)の長さ 33.7 cm の翼を,翼端が風洞中央に来るように固定し, 翼の後縁より4コード長分下流位置をレーザでシート光で照明した2次元面内の速度の2成分を PIV計測している.本計測例は,計測面に垂直方向主流方向であるため,2回の照明時間内に大 多数のトレーサが照明面内に残っているように,時間間隔とトレーサ濃度を調整する必要がある. 計測条件は下記の通り.

風速:25m/s,
トレーサ: 1µmの油滴.
CCDカメラ: 768×748 pixel,30フレーム/s,
シート光厚さ:5mm,パルス間隔:35µm

ベクトル数:5400

エラー率 4%

図4aは瞬時速度分布,図4bはエラーベクトル除去・補正処理後の瞬時速度分布,図4cは50 0画面の平均速度分布である.なお,渦の中心が一致するように位置をずらして平均している.

ref. E $\mathbf{2}$.

Vogt. A., Baumann, P., Gharib, M. Kompenhans, J. Investigations of a wing up vortex in air by means of DPIV, proc. 19th AIAA Advanced Measurement and Ground Testing Technology, New Orleans, L.A.. 17-20 June(1996), Paper#AIAA 96-2254.

3. 旋回噴流のスーパーレゾリューション解析

旋回噴流の軸断面で二次元速度分布を計測した例.原論文の内容は解析アルゴリズムであるため, 流れに関する詳しいデータは掲載していない.高密度に速度ベクトルを求める PIV 手法は Super Resolution PIV と呼ばれているが,まず粗い格子間隔で速度分布を求めて置き,その格子間隔を段 階的に細分化する方法が取られる.そうすることによって,既に求めた近傍の速度分布から,未知 の位置の速度を予測できるため,移動先の探索が容易になる.しかし,一方では,予測に使った速 度が正しくない場合(過誤ベクトル,虚偽ベクトルなどと言う)には,過誤ベクトルが大量に発生 することになる.この計測例の論文は,過誤ベクトルを発生させずに能率よくパターンの移動先を 検出する方法を提案し,その有効性の例としてこの計測例を示している.

実験条件:レイノルズ数=35,000,Swirl数=2.4,ノズル出口平均速度=1 m/s 画像解像度:486x512 画素,画像領域:10cmx10cm, シート光厚さ: 1 mm.
解析条件:初期相関領域サイズ=64x64画素,格子間隔=32画素, 最終サイズ=4×4 画素,格子間隔=2 画素
図5a:格子間隔16画素,ベクトル= 750本,
図5b:格子間隔4画素,ベクトル=15,000本.

論文には,格子間隔 2 画素まで計測した図が掲載されているが,塗りつぶしたように見える.

ref. E3 .

Douglas P. Hart, Super-Resolution PIV by Recursive Local-Correlation, *Journal of Visualization*, The Visualization Society of Japan, Vol.3-2, 2000.9. 上の論文の内容は'98 年に下記の論文で発表されている.

PIV Error Correction, D.P.Hart, pp.19-36, Laser Techniques Applied to Fluid Mechanics, selected papers from the 9th International Symposium, Lisbon 13-16 July, 1998.

4.毛細血管内の血流

PIV分野では微細な流路の流れの計測に関心を持つ者が増えている.本計測例は毛細血管内の 血流を構成土で計測している.

管径10-40µm程度のねずみの腸間膜にある細動脈を流れる血流の計測例である.撮影には対物レンズとして40倍の水浸レンズと,0.45倍のCCD用リレーレンズの顕微鏡を用いている.赤血球の大きさは5µm,赤血球速度が5-10mm/secであり,視野内の速度が速いため,秒1000コマの高速度ビデオカメラ(解像度512x512,8bit/pixel)で撮影している.

得られる画像上での管径は32-160画素,赤血球の大きさは16画素,画像間の赤血球の移動量は 16-32画素となる.照明には直流点灯をした100Wのハロゲンライトによる透過光を用い,光学フィルタ(550nm付近を透過)を用いて,赤血球のコントラストを上げている.

高精度画像計測法を用いて,テンプレート寸法 7×7 画素,計測点間隔は5 画素(約1.5µm)で ある.計測点数は88×88 となり,内径30µmの細動脈では断面方向に20 点程度の速度ベクトル が得られた.管中心付近の画像間の移動量が25 画素,流速が約7.8mm/sec に相当し,従来報告さ

NEE 研究会 第4回講演討論会

れているラットの細動脈での血流速度と一致している.分岐している内径10µmの細動脈の断面 中心流速は約0.9mm/sec で,画像間の移動量は3画素と非常に小さい.解析に要する時間(CPU: Pentium 400MHz)は42sec/枚であり,2047枚で25時間弱を要している. 図6aは解析した原画像,図6bは計測された平均速度分布である. ref.E4.

杉井康彦,中野厚史,西尾茂,南山求,高精度**種類は測法を用いた**微小血幹,ウ6r‰m } パターン

> 図2 スロッシングパターン の 流動状態のPIV画像



NEE 研究会 第4回講演討論会







図3b スロッシングパターン の 平均速度分布(1000 画面).



- 図4 翼端渦の計測例.
 - a) 瞬時速度分布, 過誤ベクトル処理前.

b) 瞬時速度分布, 過誤ベクトル処理後.

c) 500画面の平均速度分布

NEE 研究会 第4回講演討論会



図7a) 混合気の炎のPIV画像