画像処理による３次元速度計測法の精度検討

大阪大学　大脇 哲生[é] , 加賀 昭和 , 山口 克人 , 井上 義雄 , 近藤 明

1. はじめに

我々の身の周りには気体・液体を含めて数々の流体が存在し、環境問題に直結している。例えば大気・海洋・河川の流れは降水・気候・汚染物の動向に大きく関わり、室内での気流の流れは熱負荷の点からエネルギーの問題につながる。そのため地球環境問題を考える上で流体の動態を解明することは中心課題の一つである。そしてその解明のための一つの手段として流れ場の計測が行われてきた。

気流を計測するための方法としては実際に風速計などを用いて測定する方法や、煙や浮遊物質などをトレーサとして流れを可視化し画像計測によって風向風速を測るものがあげられる。前者は問題点として計測が点計測であるため計測値が低密度であり、また計測装置により流れを乱してしまう可能性がある、更に低流速では高い精度を持つセンサがない、空間内のセンサ移動ならびに位置決めに労力を要するなど、短所が多々存在する。一方、後者は通常の点計測では実現できない高密度の気流計測の可能性を持つ計測手法であるが、トレーサが入り込みにくい渦部などは計測しにくい (トレーサが入り込まず可視化できなければ画像処理は適用できない)、トレーサに浮力・重力などが働き厳密に流れを再現できない場合がある、という問題点がある。たばこの煙はその温度から得られる浮力によって上方に移動してしまうが、これは周囲の空気の流れを適切に表してはいない。しかし、流体と同じ密度を持つトレーサを使うことや、浮力・重力を無視できるある程度以上の速さの流れでは、後者は非接触型であり流れを乱さない、かつ高密度な計測データが得られる、という点で強力な長所を持っている。

画像処理によるトレーサ追跡法にはトレーサに粒子を使い個々の粒子を追跡する粒子追跡法、煙を使用するパターン追跡法があるが、粒子追跡法は 3 次元に拡張しやすい反面、実験後のトレーサの後処理が煩雑である、トレーサの大量供給が容易でない、などの短所を持っている。また、速度ベクトルが得られる位置が粒子の存在する位置に制限され、望むポイントで計測データを得ることが難しい。一方パターン追跡法は煙を使うため、大量にトレーサを供給することができ、かつ任意の位置にベクトルを求めることができる。本研究室では CFD と PIV の融合という手法も開発しているため、格子上にデータを得られる煙追跡法を 3 次元に拡張する研究を行っている。

本報ではまず三次元計測法の性能確認のために、CG(Computer Graphic) を用いた疑似可視化画像にそれを適用することによって計測精度を求め、精度向上の方法を検討した。

2. 気流場の３次元画像計測 (PTSD 法)

速度場を 3 次元的に測定する手法は 2 段階に分けられる。

1. スリット光で可視化された画像上で 2 次元速度を求める
2. 1. で求めた結果を基に 3 次元成分 (面外速度) を PTSD 法を用いて算出する

著者らが開発してきた この 3 次元速度計測法は、従来からのパターン追跡法 (相関法、輝度差累積法など) と、トレーサパターンの移動をその濃度分布の時間的、空間的な微係数から求める時空間微分法のうちの空間微分の考え方を組み合わせたものなので、PTSD(Pattern Tracking and Spatial Derivative) 法と呼んでいる。

2-1 2 次元速度計算

PIV の速度算出の手法として相関法 [1] や輝度差累積法 [2] があるが、相関係数の計算には相当の演算時間を要するので演算時間を短縮するために輝度差累積法を更に高速化した逐次棄却法[3]を用いている。これによって、前準備として撮影画面内の $x; z$方向の煙の移動を 2 次元的に求めるが、アルゴリズム上偶然に、答え以外の似た模様を解だとしてしまうことがあるため、明らかに過誤だと考えられるベクトルは前もって除外しておく。

2-2 面外速度計算

PTSD 法では 3 次元的に速度場を求めるため、図 1 に示したようにわずかな距離 d だけ離れた 2 枚の平行スリット光で照明して撮影を行う。

図 1:PTSD 法におけるカメラ配置

スリット光上で 2 次元速度を求めた後、奥行き速度 v(y方向) を求めることになるが、その方法についてまず直感的な説明を行う。

i. 直感的説明

図 2:奥行き方向移動の模式図

まず仮に図 2 に示すように点 P1 を始点とする模様が時間Åt の間の奥行き方向へ Åy 移動したとする。このとき点 P3 と P4 を結ぶ直線上で、yと輝度 fをグラフに表示すると、断面間距離 d が十分小さいときは、図 3 のように線形近似できる。つまり輝度は f_{P3}から f_{P4}の間で yに対して直線的に変化しているとみなせる。一方トレーサパターンの移動に伴い、点 P1 の輝度 f_{P1}が時刻 t = t0 + Åt には、P3 と P4 を結ぶ直線上の点 P3 からÅy奥の位置に現れるはずである。以上のことからÅyは、簡単な比例計算で求まることが判る。

図 3:yと輝度 fの線形関係

ii. 論理的説明

いま 3 次元のトレーサ濃度分布を $f(x;y;z;t)$ とする。そしてこれが時間Åt 後に位置 $(x + Åx;y + Åy;z + Åz;t + Åt)$ にそのまま移動したとすると、

$$f(x;y;z;t) = f(x+Åx;y+Åy;z+Åz;t+Åt) \quad (1)$$

となる。Åt は通常ビデオのコマ送り間隔 (1/30 秒) である。一方Åyが微少であるとして右辺を展開し、Åyの 2 次以上の項を無視すると、

$$\begin{aligned} & f(x + Åx;y + Åy;z + Åz;t + Åt) \\ &\quad = f(x + Åx;y;z + Åz;t + Åt) \\ &\qquad + Åy\frac{@}{@y}f(x + Åx;y;z + Åz;t + Åt) \quad (2) \end{aligned}$$

式 (2) の右辺第 2 項の微分を、距離 d 離れた 2 断面での濃度の差分で近似し、式 (1) の左辺と等しいとおけば

$$\begin{aligned} & f(x;y;z;t)\ Ä\ f(x + Åx;y;z + Åz;t + Åt) \\ &\quad ë\ Åy\frac{1}{d}[f(x + Åx;y + d;z + Åz;t + Åt) \\ &\qquad Äf(x + Åx;y;z + Åz;t + Åt)] \quad (3) \end{aligned}$$

処理対象とする画像を、例えば

1．時刻 t = t の画像 2 枚は、画像 1R と画像 1L(奥行き方向に d 離れている)

2．時刻 t = t + Åt の画像 2 枚は、画像 2R と 2L と呼ぶことにすると、式 (3) は

$$\text{画像 1R Ä 画像 2R} = \frac{\text{Åy}}{\text{d}} \text{ Ç (画像 2L Ä 2R)} \quad (4)$$

さらに

$$\text{Åy} = \text{d Ç} \frac{\text{画像 1R Ä 画像 2R}}{\text{画像 2L Ä 2R}} \quad (5)$$

と表現できる。

実際にはパターン追跡の場合と同様に、ベクトル抽出点のまわりに画像小領域をとり、式 (5) の関係を領域内の全点について当てはめ、この式をÅyを回帰母数とする回帰式と考えることによって、領域内の平均的なÅyを求めている。

なお、ここまでの説明ではÅy > 0 と仮定したが、実際に計測を行う場合にはあらかじめ正負の符号を輝度差の絶対値の比較から求めておく。もしÅy < 0 ならば画像 1R,2R を 1L,2L と入れ替えれば全く同様の計算が行える。

2-3 PTSD 法のための奥行き方向移動量の符号推定

PTSD 法では、前もってÅyの符号を与えずに両方の符号を想定して回帰残差の大小で符号を決めようとした場合、一般には正しい符号を決定できず過誤が生じる。そのため以下に述べるように、各速度抽出点において前もってÅyの符号を推定しておく。

図 4 に示すように、速度抽出点の座標を (x; z)、二次元追跡によって求まったその点からの移動量をÅx; Åzとすれば、まず画像 1R での (x; z) を中心とする小領域と画像 2L での (x + Åx; z + Åz) を中心とする小領域の間で、輝度差の絶対値の和 S_1を求める。さらに同様に、画像 1L での (x; z) を中心とする小領域と画像 2R での (x + Åx; z + Åz) を中心とする小領域の間で、輝度差の絶対値の和 S_2を求める。この S_1と S_2で大小比較を行い、

1. $S_1 < S_2$ならばÅyは R 断面から L 断面方向の符号を持つ
2. $S_1 > S_2$なら L 断面から R 断面方向の符号を持つ
3. $S_1 = S_2$ならば判定不能

と推定する。なお判定不能のときは両方のÅyの符号を想定して PTSD 計算を行った後、回帰残差の小さい方を採用する。

図 4:ベクトルの方向付け

2-4 PTSD 法の測定限界

前節での説明どおり、PTSD 法は線形内挿を柱にしている手法であるため、Åy > d になるような点では値を外挿から計算しなければならず、精度が落ちてしまう。そのため $v_{max} = \frac{d}{\text{Åt}}$が測定限界となる。

3.CG を用いた PTSD 法の精度検討

「可視化情報学会 PIV の標準化・実用委員会」では、その活動の一環として CG(Computer Graphic) により模倣的に作成した粒子懸濁法による流れの可視化画像をインターネット上に公開している。[4)]本研究では後処理の簡便さ、大量のトレーサ供給能力等から煙を使用しているため、上記で使用された速度データを元に煙の可視化 CG 画像を作成し、これまで精度がわからなかった PTSD 法の精度を検討し、改善方法を検討した。

3-1 PTSD 法の精度

煙画像のパターンの大きさをパラメータとして画像を作成し、PTSD 法の精度を求めた。パターンサイズが小さい時作成画像は粒子画像に近づき、大きくなれば画像は平坦なものになっていく。これまで研究室で撮影してきた画像はパターンサイズ 5 のものに近く、今回はパターン 3,4,5,7 の 4 種類で検証を行った。その結果を表 1 に示す。

図 5:パターンサイズ=3 の画像

図 6:パターンサイズ=4 の画像

図 7:パターンサイズ=5 の画像

図 8:パターンサイズ=7 の画像

表 1:PTSD 法の誤差

Pattern	V 誤差 [pixel]	DATA 生存率 [%]
3	0.99	34.7
4	1.19	29.9
5	1.64	28.5
7	2.28	23.0

ここで、表の DATA 生存率については 3-3 で述べることにする。

2 次元速度場を求めることができる、パターン追跡 (ここでは輝度差累積法、逐次棄却法) について CG 画像による精度検証を行った結果、誤差がおおよそ 0.5[pixel/frame](1frame=1/30 秒) であることがわかっている。それに比べると表 1 でわかるように、パターン追跡で得ることができる u; w成分よりも PTSD 法で求める奥行き成分 vの精度が若干劣ることがわかる。そこで以下に述べるようにアルゴリズムの改善を試みた。

3-2 輝度値のサブピクセル化

前章でも触れたが、PTSD 法はあらかじめ求めた 2 次元ベクトルの終点の輝度値を使用する。しかし、近年サブピクセル単位まで 2 次元追跡を求める研究が行われており、また、定常流を扱う場合は、複数枚の画像を用いて数秒間の平均を求めた方がデータの信頼性を上げることができる。この場合、得られるベクトルは一般にサブピクセル単位である。一方、その結果を受けて行う PTSD 法にはベクトル終点の輝度値が使用されるが、これはピクセル単位である。そこで、サブピクセル単位で求まったベクトル終点の輝度値を、周囲 4 点から重み付けによって求め直す改良を行った。

図 9:輝度値の再構築

図 9 のように、ベクトルはサブピクセルまで求められるが、輝度値はピクセル単位でしか値がない。そこで式 (6) を用いてサブピクセル精度での輝度値を求めた。

G = (G1 Ç s4 + G2 Ç s3 + G3 Ç s2 + G4 Ç s1) (6)

ここで、G; G1〜G4 は輝度値、S1〜S4 は面積 (図 9 参照) を示す。

このようにしてサブピクセル単位まで求めた輝度値 G を用いて PTSD 法を行った結果、以下のような変化が見られた。

横軸として式 (5) に用いた 画像 2L Ä 画像 2R、縦軸に 画像 1R Ä 画像 2R をとったときのグラフの一例を図 10〜15 に示す。

図 10:ピクセル単位での回帰直線 (例 1)
傾き=-0.444, 残差平均=4.40[-]

図 11:サブピクセル単位での回帰直線 (例 1)
傾き=-0.379, 残差平均=4.75[-]

図 12:ピクセル単位での回帰直線 (例 2)
傾き=-0.230, 残差平均=9.59[-]

図 13:サブピクセル単位での回帰直線 (例 2)
傾き=-0.286, 残差平均=4.68[-]

図 14:ピクセル単位での回帰直線 (例 3)
傾き＝-0.307, 残差平均＝6.10[-]

図 15:サブピクセル単位での回帰直線 (例 3)
傾き＝-0.381, 残差平均＝20.79[-]

ここで、実線がプロットから得られた値、破線が解であり、傾き-0.4 が答えである。サブピクセル精度に改良することにより求めるべき回帰直線にプロットが近づいているのがわかる。この変更を行った後の誤差を表 2 に示す。

表 2:サブピクセルへの改良後の誤差

Pattern	V 誤差 [pixel]	DATA 生存率 [%]
3	0.81(0.99)	37.4(34.7)
4	0.91(1.19)	30.2(29.9)
5	1.43(1.64)	25.1(28.5)
7	1.80(2.28)	22.1(23.0)

ここで、() の中の数値は改良前のデータを示す。

3-3 棄却条件の変更

先に述べたアルゴリズムでは、プロットされたデータから原点を通るという条件付きで傾きを求め、スリット幅 d を乗ずることにより vを求めている (式 (5) 参照)。しかし、プロットされたデータが散在する場合には信頼性の高い結果が得られない。本手法ではこの時条件を課して欠測となるようにしている (データの棄却)。この条件如何によって、得られる結果・データ生存率が異なってくる。そのため従来まで使用していた条件を変更してみた。

i. 従来の採択条件

$$\frac{\text{近似直線との残差自乗和}}{\text{母データの分散}} \text{ î } \mathrm{ERR1} \qquad (7)$$

表 1,2 で求めた結果は ERR1＝0.8 という少々甘い制限を課している。それでもデータ生存率はあまり高くない。この条件は相関係数の定義であるが、プロットデータが図 16 で示すように 1 点に密集するような場合、式 (7) の左辺の値が大きくなってしまい、棄却されてしまう。しかし、複数の点が近い傾きを示していることを考えればこの場合は採択されるべきである。そこで棄却条件の変更を行った。

図 16:式 (7) で棄却されてしまう例

ii. 変更後の採択条件

(近似直線との傾きの差 î ERR2 を満たす)

$$\text{プロット数 ï ERR3} \qquad (8)$$

棄却条件を式 (8) に変更して計算を行って見た結果を表 3 に示す。

表 3:棄却条件変更後の誤差

Pattern	V 誤差 [pixel]	DATA 生存率 [%]
3	0.73	33.8
4	0.90	28.8
5	1.10	28.6
7	1.56	24.6

ここで、式 (8) の ERR2,ERR3 は従来条件で求めたときと近いデータ生存率になるように設定した。

表 4 に本発表で行った改良の結果をまとめる。

表 4:誤差のまとめ

Pattern	V 誤差 [pixel]			
	従来	改良 1	改良 2	改良 1,2
3	0.99	0.81	0.73	0.66
4	1.19	0.91	0.90	0.75
5	1.64	1.43	1.10	0.96
7	2.28	1.80	1.56	1.43

改良 1 がサブピクセル精度にした場合、改良 2 は棄却条件を改善した場合、改良 1,2 は両方を行った場合である。また、データ生存率がそろうように棄却条件のパラメータ ERR2,ERR3 を変化させてある。表 4 からサブピクセルにすることで 10-20%、棄却条件の改善で 25-35%、両方を使用することで 30-40%の誤差を減少させることができた。

4. 結論

従来は知ることのできなかった PTSD 法の測定精度を CG 画像を用いて知ることができた。その結果、煙画像を用いて 3 次元速度成分を求める PTSD 法は、PIV による 2 次元速度計測に比べると若干精度が落ちるものの、おおむね良好な結果を得ることがわかった。

また、精度を向上させるための方法として 2 点の改良を加えることができた。

1. 輝度値をサブピクセル単位で求めることにより、計測誤差を 10-20%程度減少させることができた。

2. 欠測を決める条件を適切に選ぶことによって、得られる解の精度を向上できることが示された。

5. 今後の課題

1. PIV による 2 次元速度計測は、複数枚の画像を使用して時間平均化を行うことによって精度を上げることができる。そこで PTSD 法についても使用する画像枚数により精度があがるかどうか、また使用した枚数と誤差の関係についても調査を行う。

2. 回帰直線が原点に載るかどうかは奥行き yだけ離れた 2 枚の画像の明るさが近いかどうかに依存する。2 台のカメラを使わない撮影法について開発を進める。

3. 棄却条件を画像によって自動的に決定できるアルゴリズムの開発

参考文献

1)C.E.Willert and M.Gharlib, Digital Particle Image Velocimetry, Exp. in Fluids, 104,pp.181-193,1991

2,3) 加賀, 井上, 山口:気流分布の画像計測のためのパターン追跡アルゴリズム, 可視化情報,vol.14,No.53,pp.38-45,1994

4) 岡本, 小林, 佐賀, 西尾:PIV 標準画像の構築 (第 1 報:標準画像生成手法の検討), 可視化情報,vol.17,suppl.No.1,pp.167-170,1997