132 画像の時空間微分を用いた流場の計測手法とその応用

大阪府立大学 奥野 武俊, 西尾 茂, 杉井 康彦[○]Image Measurement System through the Spatio-Temporal Derivatives
of Visualized Images and Its ApplicationsTaketoshi OKUNO*, Shigeru NISHIO* and Yasuhiko SUGII[†]

ABSTRACT

The change of luminance of visualized image is caused by the motion of tracer particles or dyne transported by fluid, and it is expressed by a governing equation using the Lagrange's derivatives. The so-called spatio-temporal derivative method is well known as an image measurement technique which has a high spatial resolution. The technique also has disadvantages such as small dynamic range and the unsteadiness for the image noise. In the present paper, the principles of the measurement techniques based on the spatio-temporal derivatives are explained, and the applications are shown. The spatio-temporal derivative method would have much wide application field.

1 緒言

可視化画像の輝度変化は、トレーサ粒子や染料などが流体に輸送されることによって引き起こされ、この変化はLagrange微分を用いた画像の拘束式として記述することができる。この画像の拘束式を用いて画像の移動量(オブティカルフロー)を計測する手法は、Horn[1]、安藤[2]、三池[3]らによって手法の整備・拡張がなされてきた。これらの手法は勾配法とも呼ばれ、高い空間解像度をもつ手法として知られている。しかし、画像の空間周波数に対する画像の移動距離の制限からダイナミックレンジが狭いことやノイズに鋭敏であるなど、画像に対する制約が多いことから流場計測の分野では必ずしも広く用いられているとはいえない状況にある。

時空間微分法は、画像の条件が整えば他の手法では解析不能な微小な画像の変化や移動、粒子密度の極端に高い画像などの解析が可能である。著者らは時空間微分法を流場計測に適用する試みを続けており、これまでに速度場のみならず壁面摩擦応力、流場モデルを用いた計測など時空間微分法の特性を生かした応用分野の開拓を行ってきた。本論文では、時空間微分法の原理と、それから派生する計測手法ならびに応用について述べる。

Fig.1 Measurement principle of the spatio-temporal derivative method.

2 時空間微分法の計測原理

トレーサ粒子や染料を用いて流れを可視化した場合、可視化された情報は場所 (x, y, z) と時刻 t を変数にもつ輝度関数 $f(x, y, z, t)$ で表わすことができる。Fig.1 に示すように、時刻 t から $t + \Delta t$ の間にトレーサが流体によって輸送され $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ だけ移動したとき、移動前後の輝度変化は(1)式のように表わされる。

$$\begin{aligned} & f(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z, t + \Delta t) \\ & - f(x - \Delta x, y - \Delta y, z - \Delta z, t - \Delta t) \\ & = \Delta g(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $g(x, y, z, t)$ はバックグラウンドの場を表わす関数で、可視化の場合には照明強度に相当し、 Δg は時間的ならびに空間的な照明強度の変化を示す。さて、画像の輝度

*Department of Marine System Engineering, Osaka Prefecture University, Sakai, Osaka 593

[†]Graduate School of Osaka Prefecture University

変化が滑らかであるとする輝度関数はTaylor展開可能となり、(2)式のように表わせる。

$$f(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z, t + \Delta t) = f(x, y, z, t) + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial f}{\partial z} \Delta z + O(\delta^2). \quad (2)$$

また、 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ は Δt における流体粒子の移動量であるから、流速 $u(u, v, w)$ を用いて次のように表現できる。

$$\Delta x = u(x, y, z) \Delta t + O(\delta^2). \quad (3)$$

$\Delta y, \Delta z$ についても同様の展開ができるから、(3)式を(2)式に代入して $\Delta t \rightarrow 0$ の極限における輝度変化を考えると、画像の拘束式が微分方程式として求めることができる。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} + w \frac{\partial f}{\partial z} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta g(x, y, z, t)}{2\Delta t}. \quad (4)$$

(4)式右边は、通常可視化の条件を整えてなるべく小さくするように努めて、解析の時には近似的に0として扱うことが多い。また、照明強度の変化が大きくて右边が無視できない場合には、何らかの検定を行ってその分布を求めた上で拘束式に加える必要がある。また、ここでは $\Delta t \rightarrow 0$ の極限において画像の拘束式を求めたが、実際の計測においては Δt が有限であるから、(2),(3)式の高次の項は必ずしも無視できるほど小さいとは限らないので、これらの展開式における高次近似項を考慮した解法も提案されている[4]。

(4)式の解を求めるには、輝度値ならびにその勾配が可視化画像から得られているので流速 $u(u, v, w)$ を未知数として解けばよいが、(4)式単独では条件が不足する。したがって、計測において流速を求めるときには、空間的に狭い領域において速度が一定と仮定するなどの条件を付加し、これにより得られる連立方程式から速度ベクトルを求める。この付加条件については、空間的な速度の均一性だけでなく他の条件を考えることによって、派生的に新しい解法が得られる。例えば、時間的な定常性を仮定して各画素単位で速度ベクトルを求める統計的な解法や、連続の式などの物理的な法則を付加した流場モデルを用いる方法などがそれであるが、これらについては後節で述べる。

Fig.2 Measured velocity field around a ship model.

Fig.3 Measured velocity field around a wing model.

3 流場計測への応用

空間的には流場の変化が大きい場合には、狭い領域において流速を一定とみなし、その領域内で流速 $u(u, v, w)$ を未知数とする連立方程式の解を最小二乗法などを用いて求めることができる。このとき、画像ノイズの影響を低減させることも同時に行うために、 10×10 pixel²程度の解析領域を設けるのが通常である。

Fig.2は、船体模型まわりの流れの計測例である[5]。船首前方の中心面をトレーサー粒子とレーザーシート光を用いて可視化し、速度場を求めた。船首水面近くには、首飾り渦が形成されることはよく知られているが、本計測においては首飾り渦の断面を表わす流れのパターンが得られていることがわかる。Fig.3は翼背面の計測例である。

Fig.4 Measured wall shear stress and the limiting stream lines.

翼前端付近で生成された渦が、後流に流れ去る様子がベクトル分布図からわかる。

4 壁面摩擦応力の計測

時空間微分法を速度場の計測に適用する場合、計測可能な画像の移動距離は画像の空間周波数によって制限を受け、計測のダイナミックレンジは必ずしも広いとは言えない。逆に、画像の移動距離が非常に小さくて数ピクセル以下の場合には、サブピクセルオーダーの空間解像度をもつ時空間微分法は他の手法では不可能な計測を可能とする。

物体表面に塗布した油膜は、壁面の摩擦応力によってゆっくりと移動する。この移動速度を求めると、摩擦応力の分布と限界流線の計測を行うことができる[6]。油膜の塗布には、従来限界流線の可視化法として用いられてきた油膜法の手順を踏襲し、まずエンジンオイルを表面に薄く塗り、その上から流動パラフィンにオレイン酸と顔料を混ぜたものを押しつけるようにして塗る。このようにすると、油膜の移動と共に顔料の移動が可視化できる。ここで、従来の油膜法と異なるのは、油膜法が限界流線を可視化するために流線方向の筋が現れるまで10~20分程度の時間を要したのに対し、本計測では油膜の移動を画像計測するので計測は1~2分のごく短時間に行われることである。Fig.4は、円柱が壁面に垂直に取り付けられた時の壁面摩擦応力の分布と計測された摩擦応力から計算した限界流線である。この接合部流れにおいては、壁面近くに円柱を取りまくように渦が発生する。本計測においては限界流線からみられるように円柱背面に渦状点が

Fig.5 Measured wake distribution by means of statistical analysis.

現れることから、円柱前方の壁面近くで生成される渦が、円柱後方で壁面から離れる方向に流れ出ていることがわかる。

5 統計的解析手法を用いた計測

可視化画像の拘束式(1)を、流れの方向に ξ をもつ流線座標 (ξ, η, ζ) で書きかえると、 $u_\eta = u_\zeta = 0$ であるから、

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u_\xi \frac{\partial f}{\partial \xi} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta g(\xi, \eta, \zeta, t)}{\Delta t} \quad (5)$$

となる。このとき、 u_ξ が定常で $\bar{u}_\xi$ とおくことができ、過程がエルゴード性を満たすならば、

$$|\bar{u}_\xi| = \frac{E \left[\left| \frac{\partial f}{\partial t} \right| \right]}{E \left[\left| \frac{\partial f}{\partial \xi} \right| \right]} \quad (6)$$

として $|\bar{u}_\xi|$ を求めることができる[7]。ここで、 $E[\]$ はサンプルデータの集合平均を表わし、(5)式右辺の極限は十分に小さいと仮定している。(6)式は、可視化画像の時間微分と空間微分の絶対値の比が流速に比例し、画像の統計処理により流速分布が求められることを示している。

従来の解法が、速度の空間的な均一性を仮定して速度ベクトルを求めていたのに対して、本解法は時間的な定常性を仮定し、しかも支配方程式の係数を統計的に処理することにより、流速を求めている。Fig.5に円柱後流の伴流分布の計測例を示す。Fig.5において、明るい部分は流速の大きな領域を示し、暗い部分は流速の小さな領域を示す。ここでは、流速の絶対値のみを求める解法を示したが、画像の拘束式をベクトル演算とみなして統計的に処理することにより、速度ベクトルを求める手法の開発も行われている[8]。

6. 流場モデルを用いた解法

これまでに述べたように、(4)式で表わされる画像の拘束式は、それ単独では条件不足から速度ベクトルを求めることはできない。従来は時間的または空間的な速度場の均一性を仮定した付加条件を用いることにより速度場を求めてきたが、計測対象が流場であることから流場のもつ物理的な性質を付加条件として用いることもできる[9]。ここでは、画像の拘束式に加える付加条件として非圧縮性流体の連続の式、さらに局所的には粘性の影響は小さいとして非粘性の渦度の輸送方程式を用いた。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

$$u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

この場合、速度場に関する1階ならびに2階の偏微分方程式が付加されているため、繰り返し計算や最適化の手順を経て速度場が求められる。Fig.6は、流れに垂直に置かれた円柱後流の速度場を計測した例で、一様流速 $U=0.05$ m/sec でレイノルズ数 $Re=1472$ の場合である。流場モデルを用いた場合と局所的な速度の均一性を仮定した従来の方法を比較すると、速度場の大きな改善をベクトル図からみることが難しいが、連続の式のノルムが84%、渦度方程式のノルムが91%減少している。

Fig.6 Measured velocity distribution using a model-based technique.

このような流場モデルを用いた手法は、流れ場の物理法則と計測の支配方程式を連立させて計測を行う場合が多いが、時空間微分法は計測に用いる支配方程式が微分方程式で記述されているため、運動方程式などの物理法則との連立がとりやすく、このような手法に適しているものと考えられる。

7. 結 言

可視化画像の時空間微分を用いた流場の計測手法とその応用で、従来の計測手法の壁面摩擦応力計測への応用や統計的手法の適用、流場モデルを用いた新しい計測手法について述べた。時空間微分法は、高い空間解像度を持ちながらも、画像に対する制約やその特性があまり知られていないため、必ずしも広く用いられていないのが現状である。本論文で示した新しい計測手法の可能性や応用が、時空間微分法の実用化に貢献できるものと期待する。

参考文献

- [1] Horn, B.K.P. and Schunk, B.G., Determining Optical Flow, Artificial Intelligence, Vol.17, 1981, pp.185-203.
- [2] 安藤 繁, 画像の時空間微分法を用いた速度ベクトル分布計測システム, 計測自動制御学会論文集, Vol.22, No.12, 1986, pp.1330-1336.
- [3] 古賀和利, 三池秀敏, 同画像の時空間相関に基づくオプティカルフローの解析, 電子情報通信学会論文集, J72-D 2, 1989, pp.507-516.
- [4] 西尾 茂, 奥野武俊, 可視化画像の時空間微分を利用した流場の画像計測 (第2報) -高次微分項を採用した場合-, 関西造船協会誌, 第218号, 1992, pp.41-45.
- [5] 奥野武俊, 中岡 淳, 可視化画像の時空間微分を利用した流場の画像計測, 関西造船協会誌, 第215号, 1991, pp.69-74.
- [6] 奥野武俊, 西尾 茂, 堀内宏史, 油膜を用いた限界流線と壁面摩擦応力の計測, 日本造船学会論文集, 第176号, 1994, pp.59-65.
- [7] 西尾 茂, 奥野武俊, 平田奈美, 粒子の通過頻度を用いた流場の画像計測, 可視化情報学会誌, Vol.15, Suppl. No.2, 1995, pp.201-204.
- [8] 西尾 茂, 平田奈美, 奥野武俊, 粒子の通過頻度を用いた流場の画像計測 (第2報) -2次元速度場の計測-, 可視化情報学会誌, Vol.16, Suppl. No.1, 1996, pp.199-202.
- [9] 杉井康彦, 奥野武俊, 西尾 茂, 流場モデルを用いた速度場の画像計測, 可視化情報学会誌, Vol.16, Suppl. No.1, 1996, 207-210.