

研究速報

画素時系列の相互相関解析を用いた動画処理による速度ベクトル場計測法の改良

正員 三池 秀敏[†] 正員 栗原 靖[†]
正員 古賀 和利^{††}

Improvement of a Velocity-Field Measurement with Pixel-Based Temporal Mutual-Correlation Analysis of Dynamic Image

Hidetoshi MIHKE[†], Yasushi KURIHARA[†] and Kazutoshi KOGA^{††}, *Members*

[†] 山口大学工学部電気工学科, 宇部市

Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Ube-shi, 755 Japan

^{††} 山口大学工業短期大学部情報処理工学科, 宇部市

Information Processing Engineering, Technical College of Yamaguchi University, Ube-shi, 755 Japan

あらまし 動画処理により速度ベクトル場を自動的に解析する方法として提案してきた, 画素時系列間の相互相関解析法を改良する方法を示す. 相互相関係数が最大となる真の方向, および真の遅れ時間 (Lag Time) の評価に 2 次補間法を導入し, 0.1~1.3 Pixel/Frame の速度範囲で角度誤差 $\pm 3^\circ$ 以内, スピードの誤差 $\pm 2\%$ 以内の精度を得た.

1. はじめに

動画より画面内の速度場を自動的に解析する方法の確立は, 運動物体の速度や運動軌跡を計測するためだけでなく, 画像の領域分割や画像中の 3 次元情報の解析 (形状, 奥行き認識等) という知能情報処理の立場からも重要であることが認識されつつある⁽¹⁾⁻⁽³⁾. 速度ベクトルの解析法は大別して二通りの方法がある. 一つは画像中の特に目立つ点 (Prominent Point) に注目し, その点がどのように動くかを画像フレーム間のマッチングをとることにより解析する方法である^{(4),(5)}. この方法では比較的正確に速度ベクトルは求まるものの Prominent Point の自動的な決定法が問題であり, また画像中の速度ベクトルの計算できる Prominent Point の数が制限されるという問題がある. 一方マッチングによらない方法として, 運動物体の輝度の時間変化と空間変化が独立でなく一定の関係を満たすことを基礎とした解析法がいくつか提案されている. Horn & Schunck⁽⁶⁾ は速度ベクトルが空間的になめらかに変化するという仮説を加えた解析法を示した. Yachida⁽³⁾ はこのときの初期値の決定に Prominent Point による解析を併用し現実の画像にも適用できる方法を提案している. 更に, Horn & Schunck の解析法は Nagel⁽⁷⁾ により一般化した形で与えられ, 最近では速度ベクトルの連続性の仮説を導入した解析法⁽⁸⁾も報告されている. し

かし, 基本的には運動物体が Rigid であることや, 輝度が時間・空間的に微分可能 (なめらかに変化) であることが仮定されている. 我々はこうした制約に左右されない新しい解析法を模索してきた. すなわち観測点を固定し, ある画素の輝度の時系列とその周囲の画素の輝度の時系列との相互相関解析より速度場を決定する方法を提案してきた^{(9),(10)}. 本報告ではその方法を改良した解析法を示し, 速度ベクトルの方向と大きさ (Speed) が十分な精度で得られることをシミュレーション動画 (ガウスの輝度分布を持つ, 同一サイズの多粒子集団の一方向運動) を用いて明らかにするとともに, 現実の動画 (輝度分布不定のサイズの異なる多粒子集団の渦運動) の解析にも有効であることを示す.

2. 解析原理

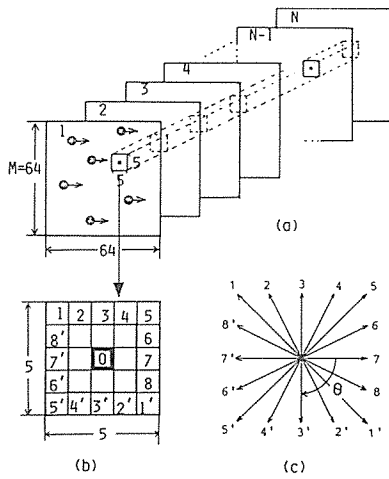
図 1(a) に示すような 64×64 の画素と $N=128$ のフレーム数を持つ動画を考える. この中で速度を求めたい目標の画素 (0) と, その周囲にある 16 の近傍画素を考える. この 5×5 画素からなる局所領域 (図 1(b)) で速度が一定と仮定すると, 目標画素を通過する粒子による輝度の時間変化 $A_0(t)$ と周囲の画素での輝度の時間変化 $A_k(t)$ ($k=1, 1', 2, 2', \dots, 8, 8'$) との相互相関関数 $M_0^k(\tau)$ の解析により速度ベクトルが決定できる. すなわち 16 の相互相関関数の中で, 最大の相関値を示す方向 (図 1(c) 参照) が速度ベクトルの方向を与え, その相互相関関数が最大となる遅れ時間 (Lag Time) τ_0 より速度ベクトルの絶対値 (スピード) が決定できる. 実際には $M_0^k(\tau)$ をそのまま用いたのでは解析誤差が多いことから

$$M_0^{k,k'}(\tau) = M_0^k(\tau) \times M_0^{k'}(-\tau) \quad (1)$$

で定義される対向方向をペアとした相互相関関数の積を採用している. ここで $M_0^k(\tau)$ は次式により与えられる.

$$M_0^k(\tau) = (1/T) \int_{-T/2}^{T/2} (A_0(t) - \langle A_0 \rangle) \times (A_k(t+\tau) - \langle A_k \rangle) dt \quad (2)$$

更に $M_0^k(\tau)$ は規格化して (1) 式に代入する. ここで $\langle A_0 \rangle$ および $\langle A_k \rangle$ は, 各々 $A_0(t)$ および $A_k(t)$ の平均値を示す. 解析結果の一例を図 2 に示している. ここでは, $7'$ から 7 の方向に一樣な速度で動く粒子群 ($M=200$) の場合をシミュレーション画像として発生させた. 各粒子のサイズは約 6×6 画素で, 輝度分布はガウス分布に近いものを考えた. 予想どおり $k=7$ の方向が最大の相関値を持つ相互相関関数を与えている. このときの Lag Time τ_0 は正であり (1) 式の定義よりこの点の



(a) Sequential image of 64×64 pixels and N=128 frames. (b) A target pixel (0) and its neighbouring 16 pixels of the velocity analysis. (c) Definition of 16 directions.

図1 動画像処理の原理

Fig. 1 Principle of the dynamic image processing.

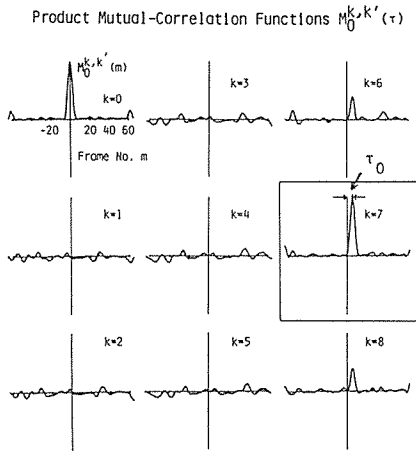


図2 ある目標画素における積の相互相関関数 $M_0^{k,k'}(\tau)$ の解析例

Fig. 2 Examples of product-mutualcorrelation functions around a target pixel.

速度ベクトルは7'から7の方向に向かっていることを示している。また、 τ_0 の値と、中心画素(0)と最大相関をしめす方向($k=7$)の画素との距離 R_0^k を用いて、速度の絶対値 V は $V = R_0^k / \tau_0$ として求まる。こうした手続きを全画素について繰り返し実行することで画像全体の速度場が決定できる⁽¹⁰⁾。しかしこの方法では角度は16方向のいずれかに限定され、速度の大きさの精度も Speed が大きくなる程悪くなる。ここでは、こ

したデジタル誤差を少なくし、速度ベクトルを精度よく決定できる方法を提案する。

3. 解析法の改良

まず、方向分解能の改良についていくつかの方法を検討した結果、目標画素の時系列との相互相関係数の幾何平均 $\gamma_k = (M_0^{k,k'}(\tau))^{1/2}$ が最大となる真の方向 θ_0 (図3参照)を推定する方法が有効であることが分かった。 θ_0 は8方向のうち最も強い相関を持つ方向とその両隣りの三点の相関係数の角度依存性より、相関係数の真の極大方向を最も簡単な2次曲線 $\gamma_k = a + b\theta + c\theta^2$ にフィットさせることで決定した。

一方、Speedのデジタル誤差の改良にも同様の考えを導入した。すなわち、図2の相互相関関数 $M_0^{k,k'}(\tau)$ ($k \neq 0$) が示す真の極大点を同様の方法で評価し τ_0 の精度を改良した。図4はこれらの改良例を示している。図は角度 $\theta = 11^\circ$ (角度の定義は図1(c)参照)、 $V = 1.1$ (Pixel/Frame: 以下 P/F と略記) を持つ一様な速度場の解析結果である。従来の方法 (ORIGINAL) は $V = 1.0$ (P/F)、 $\theta = 0^\circ$ と大きな誤差を与えているのに対して、

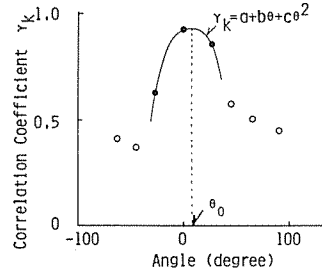


図3 相互相関係数 γ_k の角度依存性と相関の極大点 (θ_0) の推定
Fig. 3 Angular dependence of mutual correlation coefficient and a determination of maximum correlation angle.

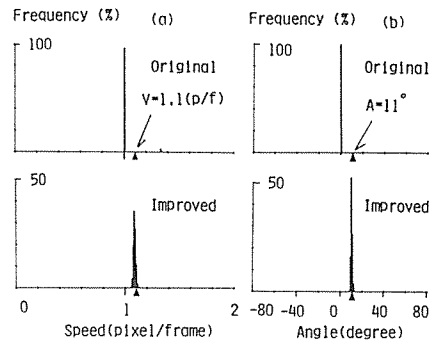


図4 速度ベクトルの計測精度の改良例。改良法では与えた速度 $V = 1.1$ P/F (図a)、角度 $\theta = 11^\circ$ (図b) とほぼ一致した結果が得られる。

Fig. 4 An example of improved results in the velocity analysis. The improved method gives more consistent results. (a) given speed $V = 1.1$ P/F, (b) given angle $\theta = 11^\circ$.

改良した方法 (IMPROVED) では $V=1.083(P/F)$, $\theta=10.2^\circ$ と与えた方向とスピードの値にはほぼ一致した結果が得られた (角度誤差 0.8° , スピード誤差 1.7%). スピードと角度をかえて, この方法の有効性を確認した結果を図5に示す. 図5(a)は与えたスピードと解析によって得られたスピード (●印) の関係を示している. $0.1(P/F)$ から $1.3(P/F)$ まで十分な精度があることがわかる. 階段状のグラフは ORIGINAL の方法でのデジタル誤差の程度を示している. また図5(b)は角度を変えたときに, 与えた角度と解析により得られた角度 (●印) の関係をしめす. ここでは 0° から 50° の範囲を示しているが, 対称性より $0\sim 45^\circ$ の範囲を調べておけば十分と考えられる. 約 30° の方向で誤差が最大となっているが, この場合も 3° 以内の誤差におさえられている. 改良する前の誤差 (約 $\pm 13^\circ$) に比べて大きく改善されており, 実用的にも十分な精度が得られたと言える.

図6は解析した速度場の一例を示した. (a)は $\theta=15^\circ$,

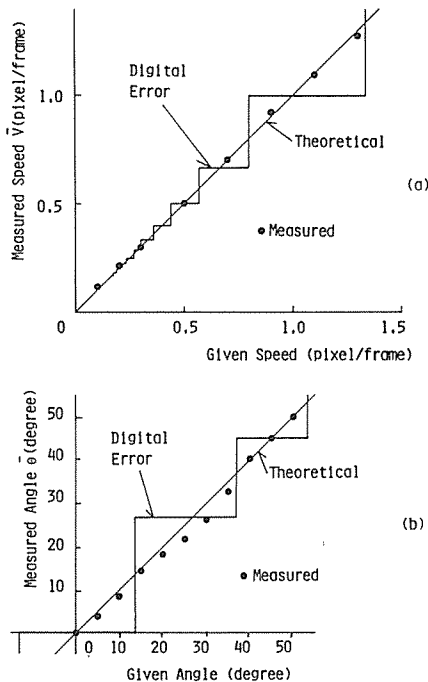


図5 与えた速度と解析結果の比較. (a)与えた速さ $V : 0.1P/F \sim 1.3P/F$, (b)与えた角度 $\theta : 0\sim 50^\circ$. 解析結果は 64×64 画素についての平均値.

Fig. 5 Comparison of the analysed velocities and given ones. A range of given speed is $0.1 P/F$ to $1.3 P/F$ (Fig. 5 (a)), and one of given angle in 0 to 50 degree (Fig. 5 (b)). The analysed results are represented by an averaged value over 64×64 pixels.

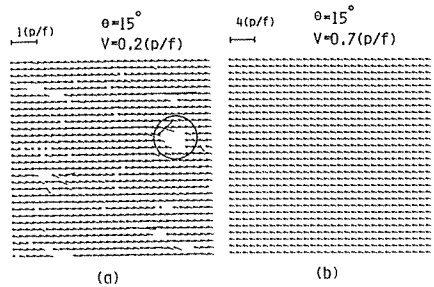


図6 一樣な速度場の解析例. 与えた角度 $\theta=15^\circ$. (a) $V=0.2P/F$, (b) $V=0.7P/F$. 低速の領域 ($V \leq 0.2P/F$) では, 粒子の通過しない領域と通過した領域の境界域 (図中○で囲んだ領域) で解析差が大きい.

Fig. 6 Example of velocity-field analysis. Given angle is $\theta = 15^\circ$. Given speeds are $V = 0.2 P/F$ (Fig. 6 (a)) and $V = 0.7 P/F$ (Fig. 6 (b)), respectively. In the lower speed region ($V \leq 0.2 P/F$), mis-analysis is observed occasional around a boundary region (circled region in the figure).

$V=0.2(P/F)$ でスピードの遅い場合である. このスピードでは, 一部粒子の通過しない領域が残っており, こうした領域の周囲では速度ベクトルの解析誤差が大きくなっている (図中○で囲まれた領域). この点については改良の余地があるが, 速度ベクトルの連続性を考慮し周囲のベクトルとの平均化を行うなどの方法で対処できると考えられる. 一方スピードの大きい領域(b)では与えた速度場とよく一致している. なおこの図ではスピードの絶対値を(a)の $1/4$ の縮尺でしめしている.

4. 現実の動画像への適用

以上提案した方法の有効性を確認するために, 現実の動画像として吸い込み口のまわりに発生する渦を取りあげ, その速度場の解析を行った. $380 \times 300 \text{ mm}^2$ の底面と 100 mm の高さを持つ直方体の容器の底に $5 \text{ mm} \phi$ の穴をあけ, 水の自然流出に伴い発生する渦をポリスチレン粒子を可視化粒子として用いて, 我々の開発した動画像解析システム⁽¹¹⁾により捉えた. サンプル周波数は 10 Hz で, 連続して, 128 枚の画像を取り込んだ. 図7は5フレームごと (約 0.5 秒) の原画像の時間変化を示す. 解析結果を図8に示す. 図は有向線分を用いて速度場を示している (2×2 画素ごと). 渦が左回りで中心ほど流速が大きくなっていることが確認でき, 視察による結果と良い一致を示した. また中心からの距離 R にたいする流速 V の依存性を求めると, ほぼ $V \propto 1/R$ の振舞いが得られ, 流体物理の分野で知られている結果と矛盾のないことが確認された⁽¹²⁾.

5. むすび

画素時系列間の相互相関解析を利用した新しい動画

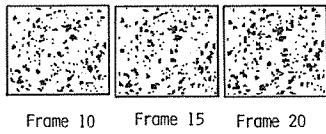


図7 現実の動画像の一例として捉えた渦の画像の時間変化、約0.5秒ごと。

Fig. 7 Sequential image of a vortex motion (every 0.5 seconds).

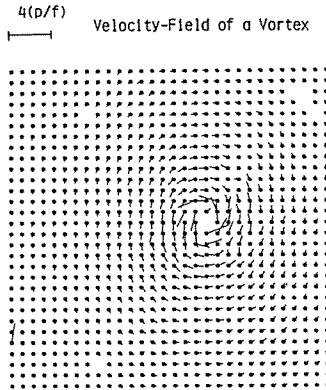


図8 渦の速度場の解析結果

Fig. 8 Obtained velocity-field of the vortex with pixel-based mutual-correlation analysis proposed in this study.

像処理法を改良し、定常な速度場の解析が精度良く行えることを示した。この方法の性格上、Prominent Pointの存在や画像の微分可能性等は特に必要なく、ある程度対象物体の形状が変化する場合にも適用できることが期待される。現在、解析にかなりの時間を要するが、高速のコンピュータの導入と解析アルゴリズムの改良により、より短い時系列のデータで短時間の解析が実行できる方法を検討中であり、動的な速度場の解析にも適用することを考えている。こうした方法の確立は現在マニュアル操作を含んだ形で行われている種々の流体の渦の場の解析⁽¹³⁾をはじめ、画像中の3次元情報の解析(奥行き⁽²⁾、形状の認識⁽¹⁾)等の幅広い分野への応用が期待される。

謝辞 本研究を進めるに際し、討論に参加頂いた山口大学工学部橋本基氏および徳山高専百田正広氏に感謝します。

文 献

- (1) H. Westphal and H. -H. Nagel : "Toward the derivation of three-dimensional descriptions from image sequences for nonconvex objects", *Comput. Graphics Image Process.*, **34**, pp. 302-320 (1986).
- (2) A. M. Waxman and S. S. Sinha : "Dynamic stereo : Passive ranging to moving objects from relative image flows", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, **PAMI-8**, **4**, pp. 406-412 (1986).
- (3) M. Yachida : "Determining velocity maps by spatio-temporal neighborhoods from image sequences", *Comput. Graphics Image Process.*, **21**, pp. 262-279 (1983).
- (4) S. T. Barnard and W. B. Thompson : "Disparity analysis of images", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, **PAMI-2**, **4**, pp. 334-340 (1980).
- (5) L. Dreschler and H. -H. Nagel : "Volumetric model and 3-D trajectory of a moving car derived from monocular TV frame sequences of a street scene", *Comput. Graphics Image Process.*, **20**, pp. 199-228 (1982).
- (6) B. K. P. Horn and B. G. Schunck : "Determining optical flow", *Artificial Intelligence*, **17**, 1-3, pp. 185-203 (1981).
- (7) H. -H. Nagel : "Displacement vectors derived from second-order intensity variations in image sequences", *Comput. Graphics Image Process.*, **21**, pp. 85-117 (1983).
- (8) H. -H. Nagel and W. Enkelmann : "An investigation of smoothness constrains for the estimation of displacement vector fields from image sequences", *IEEE Trans. Pattern Anal. Machin. Intell.*, **PAMI-8**, **5**, pp. 565-593 (1986).
- (9) H. Miike, Y. Kurihara, K. Koga and H. Hashimoto : "Velocity-field measurement of a vortex by dynamic image processing", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **25**, **5**, pp. L409-L412 (1986).
- (10) H. Miike, Y. Kurihara, H. Hashimoto and K. Koga : "Velocity-field measurement by pixel-based temporal mutual-correlation analysis of dynamic image", *Trans. IECE Japan*, **E69**, **8**, pp. 877-882 (1986).
- (11) H. Miike, K. Shimada, K. Ochiai and H. Hashimoto : "Measurement of particle movement using time correlation analysis of dynamic image", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **25**, **4**, pp. 634-639 (1986).
- (12) T. Kawakubo, Y. Tsuchiya, M. Sugaya and K. Matsuura : "Formation of a vortex around a sink : a Kind of phase transition in a non-equilibrium open system", *Phys. Lett.*, **68A**, **1**, pp. 65-66 (1978).
- (13) K. Imaichi and K. Ohmi : "Numerical processing of flow-visualization pictures-measurement of two-dimensional vortex flow", *J. Fluid. Mech.*, **129**, pp. 283-311 (1983).

(昭和61年11月21日受付)