

時間変動する照明下での動画像からの速度ベクトル場の検出

正 員 野村 厚志<sup>†</sup>      正 員 三池 秀敏<sup>†</sup>      正 員 古賀 和利<sup>††</sup>

Detection of a Velocity Field from Sequential Images under Temporally Varying Illumination

Atsushi NOMURA<sup>†</sup>, Hidetoshi MIIKE<sup>†</sup> and Kazutoshi KOGA<sup>††</sup>, Members

あらまし 現実の動画像においては時間的な照明強度の変動が頻繁に起こり、動画像から速度ベクトル場を検出する場合に問題となる。本論文では、その条件下においても速度ベクトル場検出可能な手法を提案する。その手法で用いる拘束条件式は、画像平面上に固定された観測領域での濃淡値の総和の時間変化に注目し、これが濃淡パターンの運動と、非剛体な濃淡パターンの濃淡値の増加・減少を表す単位時間当りの濃淡値の生成・消滅量とによって表現される。提案法はその拘束条件式の積分形式と微分形式とに基づく。また速度ベクトル場の定常性と単位時間当りの濃淡値の生成・消滅量の時間依存性が仮定される。シミュレーション動画像と現実の動画像からの速度ベクトル場検出を通じて提案法の有効性を確認した。

キーワード 速度ベクトル場, オプティカルフロー, 濃淡値の生成・消滅, 動画像解析

1. ま え が き

従来、動画像からの速度ベクトル場検出法が数多く提案されている。その中でも、マッチング法<sup>(1)-(7)</sup>とグラディエント法<sup>(8)-(12)</sup>がよく知られている。マッチング法は、連続する2枚の画像間で対応する濃淡パターン(領域)を探し出し、その対応付けに基づいて計算される単位時間当りの変位ベクトル、すなわち速度ベクトルを求める手法である。一方、グラディエント法もマッチング法と同様の考え方に従い、動画像の濃淡分布の時間・空間に関する偏微分係数と速度ベクトルとを結びつける式を導き<sup>(8)</sup>、その式に基づいて速度ベクトルを求める。マッチング法は、パターンの対応付けが可能であれば大きな速度ベクトル(1 pixel/frame以上)をもった動画像に対しても適用可能である。また、連続する2枚の画像間で、相関関数<sup>(1),(3),(5)</sup>や特徴抽出<sup>(2),(4),(6)</sup>の手法を用いて濃淡パターンの対応付けを行うが、画像の濃淡分布に対応付け可能なだけの特徴がなければ、高密度の速度ベクトル場を得ることが困難であり、なおかつ偽対応(ミスマッチ)を生じることもある。一方、グラディエント法は基本的に大きさが1

(pixel/frame)以下の小さな速度ベクトルの検出に有効である。また高密度の速度ベクトル場を得ることも可能である。

これらの速度ベクトル場検出法は主に、気象学、計測、コンピュータビジョン、そして動画像圧縮の分野で改良・適用されている。気象学<sup>(1),(2)</sup>の分野では、気象衛星画像によって撮影された雲動画像から雲の運動速度を求めることが目的となる。可視光画像を対象とした場合には、太陽の昇降により動画像全体にわたって雲パターン自身の濃淡値が変動する。流体<sup>(3),(4),(9)</sup>を始めとするさまざまな物理現象<sup>(14)</sup>を対象とした場合、実験装置の制約から照明強度における時間・空間的な不均一性を避けることが困難な場合も考えられる。そして、コンピュータとテレビカメラによる人間の視覚機能の代行を目的としたコンピュータビジョン<sup>(5),(6),(8),(10),(11)</sup>やフレーム間符号化法による動画像圧縮<sup>(7),(12)</sup>の分野では、さまざまな条件下においてカメラに映るすべてのものが対象となり得るが、人間の生活環境のみを考えても、物体の影による照明強度の不均一性や、カメラのAGC回路による絞りの変化がもたらす時間的な光量の変動など、照明強度の変動の原因が数多く考えられる。上述のどの分野においても照明強度の時間・空間における不均一性は観測され、現実の動画像からの速度ベクトル場の検出において重要な問

<sup>†</sup> 山口大学工学部電気電子工学科, 宇都市

<sup>††</sup> 山口大学工学部知能情報システム工学科, 宇都市

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

題である。

筆者らの一部は物理計測の立場から特に高密度・高精度で定常な速度ベクトル場検出を目的とした時空間相関法<sup>(13),(14)</sup>を提案してきた。この手法では、従来のマッチング法やグラディエント法のように物体の運動を追跡するのではなく、観測領域を固定し、その領域中の各画素における濃淡値の時系列間の相互相関関数をもとに速度ベクトル場を検出する。更に筆者らは最近、グラディエント法のように濃淡パターンの対応付けの考え方ではなく時空間相関法の考え方に従い、画像平面上に固定された観測領域での濃淡値の総和の時間変化に注目し、グラディエント法で用いられる基本式よりも広範な目的に対応可能な、速度ベクトル場検出の基本となる式を提案した<sup>(15),(16)</sup>。その式は濃淡値の時間・空間分布と速度ベクトル、および濃淡値の生成・消滅量を結びつける式となっている。また、その式には積分形式と微分形式が存在し、微分形式は従来のグラディエント法で用いられた式を含んでいる。従来筆者らは、濃淡値の生成・消滅のない場合において高密度・高精度で定常な速度ベクトル場検出可能な手法を提案した<sup>(15),(16)</sup>。しかし、グラディエント法による照明強度の変動に対応可能な手法の研究は、他の重要な問題(オクルージョン問題や3次元・多重速度ベクトル場)に比べて、一部<sup>(17)</sup>を除いてあまり活発に研究されていない。また照明強度の変動は、筆者らの提案式の濃淡値の生成・消滅量の項により表現可能である。そこで本論文では、照明強度の時間変動を伴う条件下において、高密度・高精度で定常な速度ベクトル場検出可能な手法の提案を目的とする。提案法には、筆者らの基本式に、速度ベクトル場の定常性と濃淡値の生成・消滅量の時間軸方向に沿った仮定が付け加えられている。また基本式の積分形式と微分形式とに基づく2通りの検出法があり、シミュレーション動画像と現実の動画像に適用することで、両手法の特徴の違いと有効性を示す。

## 2. 原 理

### 2.1 基本式

動画像中の速度ベクトル場を検出するための基本式を導く。まず、3次元空間中を物体がテレビカメラの光軸に垂直な平面内で運動する場合を考える。得られる動画像中では、図1で示すように物体の濃淡パターンAがある速度ベクトルで運動する。画像平面上に、閉領域 $\delta S$ を考えれば、ある瞬間での閉領域における濃

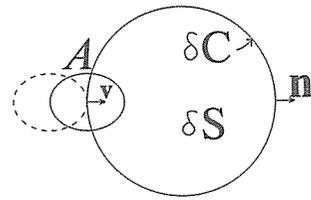


図1 濃淡パターンAが閉領域 $\delta S$ 内へ流入することにより、 $\delta S$ 内の濃淡値の総和に時間変化が生じる。

Fig. 1 Temporal change of total brightness in  $\delta S$  is observed when the pattern A moves into the  $\delta S$ .

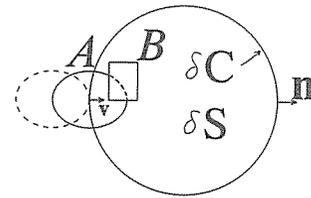


図2 濃淡パターンAが濃淡パターンBに隠れるオクルージョン領域において濃淡値の消滅(負の生成)が観測される

Fig. 2 Along the occluding boundary between the patterns A and B, the negative generation of brightness is observed.

淡値の総和の時間変化は、閉領域内への(閉領域外への)濃淡パターンAの流入(流出)によるものと考えられる。これを定式化すれば、

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\delta S} f ds = - \int_{\delta C} f v \cdot n dc \quad (1)$$

となる。但し、 $f(x, y, t)$ は動画像の時間・空間に関する濃淡値分布、 $\delta C$ は閉領域 $\delta S$ を囲む閉曲線、 $v(x, y, t)$ は濃淡パターンの速度ベクトル、そして $n$ は閉曲線 $\delta C$ に対して外向きの法線ベクトルを表す。しかし、照明強度の変動までを考えた場合には式(1)では不十分であり、筆者らは以下の式を提案している。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\delta S} f ds = - \int_{\delta C} f v \cdot n dc + \int_{\delta S} \phi ds \quad (2)$$

すなわち式(1)に対して、単位時間当りの濃淡値の生成量分布 $\phi$ をも考慮した式となっている。照明強度の変動やカメラの絞りの変動による濃淡パターン自身の濃淡値の変化に対しては、その濃淡値の増加・減少量が $\phi$ と考えられる。この $\phi$ は照明強度の変動ばかりでなく、例えば図2のようにオクルージョン(物体の影に他の物体が入っていく、あるいはその逆に物体の影から他の物体が現れること)の生じる複数の濃淡パターンの境界においては、 $\phi$ は単位時間当りの濃淡パターンの影

に隠れていった(影から出てきた)他の濃淡パターンの濃淡値に相当すると考えられる。また、カメラに対しての奥行き方向への物体の運動をとらえた動画像においては、濃淡パターンが縮小あるいは拡大する。この場合、その濃淡パターンの変形による濃淡値の減少・増加量が  $\phi$  に相当する。これらの考察から、速度ベクトル場検出の基本式には  $\phi$  を考慮する必要がある。

さて、式(2)の右辺1項をガウスの定理によって線積分から面積分へ変換すると、

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{s_s} f ds = - \int_{s_s} \text{div}(fv) ds + \int_{s_s} \phi ds \quad (3)$$

式(3)中のすべての項は積分領域が等しくかつ任意であるので、非積分項のみによって表現すれば次式を得る。

$$\frac{\partial f}{\partial t} = - \text{div}(fv) + \phi \quad (4)$$

この式(4)の右辺1項を分解すると、

$$\frac{\partial f}{\partial t} = - f \text{div}(v) - v \cdot \text{grad}(f) + \phi \quad (5)$$

が得られる。式(2)および、その微分形式としての式(4)あるいは式(5)が筆者らが提案してきた濃淡値の生成・消滅をも考慮した速度ベクトル場検出法の基本となる拘束条件式である。本論文では、 $\text{div}(v)=0$ の仮定は残すものの、照明強度の変動量に関係する  $\phi$  の項を考慮した以下の積分形式・微分形式に基づく速度ベクトル場検出法を提案する。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{s_s} f ds = - \int_{s_c} fv \cdot ndc + \int_{s_s} \phi ds \quad (v: \text{定ベクトル in } \delta S) \quad (6)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = - v \cdot \text{grad}(f) + \phi \quad (7)$$

## 2.2 制約条件

速度ベクトル場検出の基本となる式(6)、(7)において、 $f(x, y, t)$ は既知の動画像データである。速度ベクトルの2成分  $v=(u, v)$ と単位時間当りの濃淡値の生成・消滅量を表す  $\phi$ は未知数であり、これらを各画素・各時刻で独立に求めることが目的となる。しかしながら、各画素・各時刻において基本式は式(6)あるいは式(7)の一つであり、更に  $v$ と  $\phi$ に関する制約条件式が必要となる。従来、 $v$ に関する制約条件式がいくつか提案されている。Horn, Schunck<sup>(8)</sup>は速度ベクトルが画像平面全体にわたって滑らかに変化することを制約条件として付け加えた(空間大域的最適化法)。安藤<sup>(9)</sup>は画像平面上の局所領域において速度ベクトル場が一定であると仮定した(空間局所的最適化法)。Davis,

Wu, Sun<sup>(10)</sup>は濃淡パターンの輪郭に沿って速度ベクトルが一定であることを制約条件として付け加えた。Hildreth<sup>(11)</sup>は濃淡パターンの輪郭に沿った速度ベクトルの滑らかさを仮定した。筆者らは、速度ベクトル場に関して以下の仮定( $N=0$ の場合)を提案してきた<sup>(15),(16)</sup>。

$$\frac{\partial^N v}{\partial t^N} = C: \text{定ベクトル}(N \text{ はゼロ以上の整数}) \quad (8)$$

基本式が導出される際には、画像平面上で観測領域が固定されているので、空間座標を固定し、時間方向のみについて仮定した式(8)は自然である。更に定常な速度ベクトル場をもつ動画像に対しては2,3枚の画像ではなく多数枚の画像を用いることが容易であり、速度ベクトル場の高精度検出が期待される。これらの理由から速度ベクトルに関する仮定として式(8)( $N=0$ とする)を用いる。更に単位時間当りの濃淡値の生成量  $\phi$ についても、時間方向のみについての制約条件を付け加える。

$$\frac{\partial^N \phi}{\partial t^N} = C: \text{定数}(N \text{ はゼロ以上の整数}) \quad (9)$$

この仮定は、ある画素における時間方向の濃淡値の生成量分布が、時間に関する  $N$  次関数で表現できることを示している。

## 2.3 他の論文との関連

本節では、動画像の濃淡分布のこの配を基本とする他の手法で用いられる基本式と、筆者らの提案している基本式(5)との関連を議論する。式(5)において  $\phi = f \text{div}(v)$ と仮定すれば、Horn, Schunckの提案したオプティカルフローの基本式<sup>(8)</sup>が得られる。

$$\frac{\partial f}{\partial t} = - v \cdot \text{grad}(f) \quad (10)$$

一方、Cornelius, Kanade<sup>(17)</sup>は、

$$\frac{df}{dt} = v \cdot \text{grad}(f) + \frac{\partial f}{\partial t} \neq 0 \quad (11)$$

を提案している。 $(df/dt)$ ラグランジェ微分を意味し、濃淡パターン自身の時間的な濃淡分布の変化を表している。式(11)はそれがゼロでないこと、すなわち濃淡パターン自身の濃淡分布に変化があることを許している。つまり式(5)において、条件  $\text{div}(v)=0$ のもとでの濃淡値の生成量  $\phi$ が  $(df/dt)$ と考えられ、式(11)も式(5)に含まれる。但し、式(11)は濃淡パターンを追跡する考え方から導出されている。それに対して、式(5)は画像平面上に固定された観測領域での濃淡値の総和の時間変化に注目している点が異なる。また彼らの手法では制

約条件として、速度ベクトル場と  $\phi$  の空間的な滑らかさを仮定しているため、空間分解能の高い速度ベクトル場を得ることは困難である。また、2, 3枚の動画像を対象として、瞬間的な速度ベクトル場の検出を目的としていることから、多数フレームを用いた定常な速度ベクトル場の検出には向いていない。Fitzpatrick<sup>(18)</sup> や Schunck<sup>(19)</sup> は式(4)において  $\phi=0$  の場合の式

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\text{div}(fv) \tag{12}$$

を提案している。Aisbett は式(12)が、式(4)に含まれることを指摘した<sup>(20)</sup> が、式(4)を利用した具体的な速度ベクトル場検出法は提案していない。筆者らも式(2), (4), (5)がより一般性のある基本式であり、オクルージョンや照明強度の変動などの速度ベクトル場検出の困難な問題に応用可能であると考え、これらを速度ベクトル場検出の基本式とすることを提案してきた。既に筆者らは  $\phi = f\text{div}(v)$  の場合について微分形式<sup>(15)</sup>、積分形式<sup>(16)</sup> それぞれに基づいた具体的な計算アルゴリズムを提案している。

### 3. 計算機上での実現

本章では、積分形式・微分形式による基本式(6), (7)に、式(8) ( $N=0$  の場合), (9)の仮定を付け加えた計算機上での速度ベクトル場検出法を提案する。

#### 3.1 積分形式での実現

まず、積分形式で記述された式(6)をもとにした具体的な速度ベクトル場検出法を提案する。はじめに積分領域を決定する。一般には図3に示すように  $L \times M$  画素の積分領域を考えることができる。時刻  $k$  における、その領域の左上隅(最も原点に近い)画素の座標を  $(i, j, k)$  とする。式(2)の左辺の濃淡値の積分領域にわたる総和の時間変化は、次式により近似する。

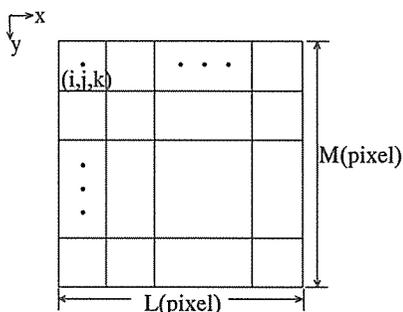


図3 積分計算のための空間領域  
Fig. 3 A spatial domain for integral calculus.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\delta s} f ds \approx \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{M-1} \{f(i+l, j+m, k+1) - f(i+l, j+m, k-1)\} / 2 \tag{13}$$

式(6)の右辺1項の線積分を積分領域に適用すれば次式となる。

$$\int_{\delta c} fv \cdot ndc \approx u \sum_{m=0}^{M-1} \{f(i+L-0.5, j+m, k) - f(i-0.5, j+m, k)\} + v \sum_{l=0}^{L-1} \{f(i+l, j+M-0.5, k) - f(i+l, j-0.5, k)\} \tag{14}$$

但し閉曲線上の濃淡値は、

$$f(i-0.5, j, k) = \{f(i, j, k) + f(i-1, j, k)\} / 2 \tag{15}$$

として求める。式(6)の右辺2項は、式(9)の仮定により、積分された  $\int_{\delta s} \phi ds$  も時間の  $N$  次関数で表すことができる。すなわち、

$$\int_{\delta s} \phi ds \approx \sum_{n=0}^N \eta_n k^n \tag{16}$$

式(6)をもとに、式(13)を  $F_t(k)$ 、式(14)の  $u, v$  それぞれの係数項を  $F_x(k), F_y(k)$  とおき、次の評価関数を定義する。

$$E = \sum_{k=0}^{K-1} \left\{ F_t(k) + uF_x(k) + vF_y(k) - \sum_{n=0}^N \eta_n k^n \right\}^2 \tag{17}$$

上式には  $\{2+(N+1)\}$  個の未知数が含まれる。 $\{2+(N+1)\}$  枚以上の  $K$  枚の動画像において式(8), (9)の仮定が満足されれば、最小2乗法を用いて速度ベクトルと濃淡値の生成量を決定することができる。

#### 3.2 微分形式での実現

次に微分形式で記述された式(7)をもとにした速度ベクトル場検出法を提案する。まず動画像の時間・空間に関する偏微分方法を述べる。図4のように  $3 \times 3$  画素3枚の領域を考える。その領域の中心画素の離散座標を  $(x, y, t) = (i, j, k)$  とする。その座標における  $x, y, t$  に関する濃淡値の偏微分  $f_x, f_y, f_t$  は差分を用いて次

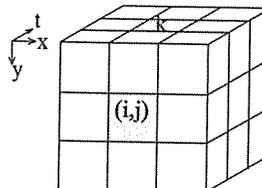


図4 動画像の濃淡値の偏微分計算のための時間・空間領域  
Fig. 4 A spatio-temporal domain for the spatio-temporal partial derivatives of image brightness.

式により求める。

$$f_x(i, j, k) \approx \frac{1}{m} \sum_{m=-1}^1 \{f(i+1, j+m, k+n) - f(i-1, j+m, k+n)\} / 2 \quad (18)$$

$$f_y(i, j, k) \approx \frac{1}{l} \sum_{l=-1}^1 \{f(i+l, j+1, k+n) - f(i+l, j-1, k+n)\} / 2 \quad (19)$$

$$f_t(i, j, k) \approx \frac{1}{t} \sum_{t=-1}^1 \{f(i+l, j+m, k+1) - f(i+l, j+m, k-1)\} / 2 \quad (20)$$

式(7)に式(8), (9)の仮定を付け加え, 評価関数を定める。

$$E(i, j) = \sum_{k=0}^{K-1} \left\{ f_t + f_x u + f_y v - \sum_{n=0}^N \zeta_n(i, j) k^n \right\}^2 \quad (21)$$

但し式(9)の仮定より濃淡値の生成量分布を  $\phi(i, j, k) = \sum_{n=0}^N \zeta_n(i, j) k^n$  とおいた。各空間座標において得られる式(21)は求めるべき未知数を  $\{2+(N+1)\}$ 個含んでいる。故に式(8), (9)の仮定が  $\{2+(N+1)\}$ 枚以上の  $K$ 枚の動画像にわたって満足されれば, 最小2乗法を用いて各画素において速度ベクトルと濃淡値の生成量を決定することが可能となる。

#### 4. シミュレーション実験

本実験で用いられたシミュレーション動画像はすべて1枚の静止画像をもとに計算機上で人工的に作成された。その静止画像を図5に示す。この画像は, 研究室内の風景をテレビカメラを用いて,  $128 \times 128$ 画素の解像度で取り込んだものである。濃淡値は256段階に量



図5  $128 \times 128$ 画素の解像度をもつ静止画像。濃淡値は256段階に量子化されている

Fig. 5 A static image with resolution of 128 by 128 pixels. Brightness is quantized into 256 levels.

子化されている。この静止画像をもとに4種類の動画像を作成し, 提案した2種類の速度ベクトル場検出法(積分形式と微分形式に基づく検出法)により速度ベクトル場検出した。得られた結果の誤差は次式で評価する。

$$E = \frac{1}{I \cdot J} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{\|v_t(i, j) - v(i, j)\|}{\|v_t(i, j)\|} \times 100(\%) \quad (22)$$

ここで,  $(i, j)$ は画像の空間座標,  $v_t$ は真の速度ベクトル,  $v$ は速度ベクトル場検出の結果得られた速度ベクトル,  $I \cdot J$ は画像の空間的な大きさ(画素数)を表している。式(22)は誤差ベクトルの大きさを真のベクトルの大きさを割り, 画像全体にわたって平均しているため,  $E$ の値が小さいほど検出誤差の少ない高精度検出法と考えられる。以下の各々の節では, 動画像の作成方法と, それらの速度ベクトル場検出結果について考察する。

#### 4.1 回転動画像

先の静止画像を, その画像の中央を中心として時計回りに1(degree/frame)の一定角速度によって回転させ,  $96 \times 96$ 画素, 64枚の動画像を作成した。この場合, 速度ベクトル場は定常であり濃淡値の生成・消滅もない。この動画像に対して, 提案した積分形式と微分形式に基づく速度ベクトル場検出法を適用した。検出結果の誤差を表1に示した。表中の  $N$ の値は単位時間当りの濃淡値の生成量を  $N$ 次関数で近似したことを示している。但し無視と示してある欄は, 濃淡値の生成量を考慮していない(無視した)従来の検出法による結果を示している。濃淡値の生成量を無視した検出法が最も精度が良いが,  $N=0 \sim 3$ の場合も誤差20(%)以下の検出精度をもっている。また微分形式に基づく検出法よりも積分形式に基づく検出法の方が誤差が少ない。微係数の推定が一般に困難であることや, 利用可能な情報量が微分形式に比べて積分形式の方が多いことに原因があると思われる。

#### 4.2 照明変動を伴う回転動画像

4.1で用いた動画像をもとに, 時間的な照明強度の変動を考慮したシミュレーション動画像を作成した。回転動画像を  $f(x, y, t)$ , 新たに得られる動画像を

表1 回転動画像の検出誤差(%)

N	無視	0	1	2	3	13
積分形式	3.45	4.57	6.33	9.42	13.1	25.8
微分形式	9.88	10.9	12.6	14.8	16.9	47.5

表2 照明強度変動下での回転動画像の検出誤差 (%)  
(時間の1次関数に従って照明強度が変動する場合)

N	無視	0	1	2	3	13
積分形式	166	23.3	25.1	25.2	25.8	108
微分形式	120	21.3	20.6	20.7	21.7	52.2

表3 照明強度の変動下での回転動画像の検出誤差 (%)  
(時間の2次関数に従って照明強度が変動する場合)

N	無視	0	1	2	3	13
積分形式	307	363	31.5	27.9	27.6	164
微分形式	193	227	25.2	24.2	25.4	55.8

$g(x, y, t)$  とすると、それらは次式で結びつけられる。

$$g(x, y, t) = f(x, y, t) \cdot \{a(t-1) + b\} \\ (a = 1.50^{-2}, b = 0) \quad (23)$$

上式によって作成された動画像では、時刻  $t=1$  においてすべての濃淡値がゼロとなり、時間と共に回転を伴いながら徐々に明るくなっていく。時刻  $t=64$  における最終画像では  $at + b = 0.95$  となり、もとの動画像とほぼ同じ濃淡分布をもつ。積分形式と微分形式に基づく手法による結果を表2に示す。濃淡値の生成量を無視した手法では検出誤差が大きく、全く速度ベクトル場検出不可能であることが確認できる。最も精度良く検出できたのは、積分形式に基づく検出法では  $N=0$  の場合、微分形式に基づく検出法では  $N=1$  の場合であるが、両手法とも  $N=0 \sim 3$  までは他の場合と比べて同程度の検出誤差を示していると言える。参考のため  $N=0$  の場合の積分形式に基づく検出法によって得られた速度ベクトル場を図6に示す。黒丸が位置を、そこから伸びている直線が速度ベクトルを示している。多少の誤差ベクトルは見られるが、ほぼ全体にわたって時計回りの速度ベクトルが得られているのが確認される。

更に照明強度が時間の2次関数に従って変動している場合を想定したシミュレーション動画像を作成した。すなわち、回転動画像  $f(x, y, t)$  と得られるシミュレーション動画像  $g(x, y, t)$  とは、以下の式により関係づけられる。

$$g(x, y, t) = f(x, y, t) \cdot \{a(t-1)^2 + b(t-1) + c\} \\ (a = -9.77 \times 10^{-4}, b = 6.25 \times 10^{-2}, c = 0) \quad (24)$$

上式によって作成された動画像の時刻  $t=1$  における画像では、すべての濃淡値はゼロである。その後時間と共に濃淡値は増加して行くが、時刻  $t=32$  の中央画像において、濃淡値はもとの動画像とほぼ同じ濃淡分布を

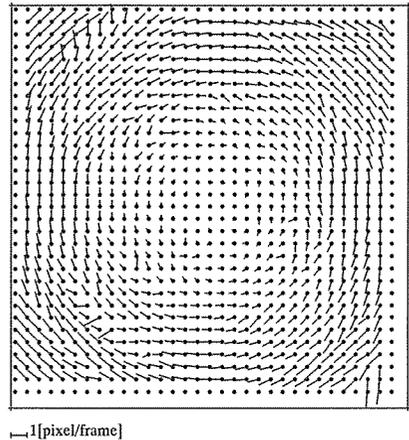


図6 人工的に作成された照明強度の変動を伴う回転動画像の提案法 ( $N=0$ , 積分形式に基づく) による速度ベクトル場検出結果

Fig. 6 The velocity field is obtained from an artificial image sequence, which is generated by rotating the static image under temporally varying illumination, by the proposed method ( $N=0$ , based on the integral form).

もち、その後徐々に濃淡値は減少し、時刻  $t=64$  の最終画像においてすべての濃淡値は再びゼロとなる。この動画像の積分形式と微分形式とに基づく検出法による結果を表3に示す。誤差を比較すると、濃淡値の生成量を無視、あるいは一定と仮定した手法では全く検出不可能である。積分形式に基づく手法では  $N=3$  の場合、微分形式に基づく手法では  $N=2$  の場合が最も少ない誤差で検出できている。

#### 4.3 ノイズを含む照明強度変動下での回転動画像

現実の動画像への速度ベクトル場検出法の適用を考えた場合、その検出法のノイズに対する強じんさを確認することが必要である。そこで前節の式(23)によって作成された照明強度の変動を伴った回転動画像にノイズを加えたものを対象動画像とし、提案法の検出精度を確認する。ノイズを加える前の動画像を  $f(x, y, t)$ 、ノイズを加えて得られる動画像を  $g(x, y, t)$  とすれば、両者は次式の関係となる。

$$g(x, y, t) = (1 - m) \cdot f(x, y, t) + m \cdot \text{rand}() \quad (25)$$

ここで、 $\text{rand}()$  は  $0 \sim 255$  の範囲の一樣乱数整数を発生する関数である。また  $m$  は  $0$  以上  $1$  以下の実数であり、原動画像  $f(x, y, t)$  とノイズとの相対的な重みを決定する。本節では  $m=0.1$  の場合に得られる動画像に対して、積分形式・微分形式に基づき、濃淡値の生成・消滅量を時間の1次関数と仮定する手法のみについて

検出誤差を比較した。積分形式に基づく手法による検出誤差は 35.4 (%)、微分形式に基づく手法による検出誤差は 45.4 (%) であった。積分形式に基づく検出法が微分形式に基づく検出法よりも、誤差が少ないことがわかる。この理由としては、積分形式はより多くの空間情報が利用可能なために、ノイズを平滑化する効果があるためだと思われる。

本章では時間的な照明強度の変動を想定してシミュレーション実験を行った。具体的に、現実の世界での照明強度の変化としては次の原因が考えられる。

- (1) 時間・空間的に不均一な照明下を物体あるいはカメラが移動する場合。
- (2) 照明機器の特性。
- (3) カメラの絞りの変化(例えば、カメラの AGC 回路による)。

これらの原因において、(1)の場合には、動画像のサンプリング周波数を物体やカメラの移動速度に比べて十分高速にすれば、濃淡値の生成量を 1 次あるいは 2

次程度の時間の関数で近似可能であると考えられる。また(2)、(3)の原因に対しては、その時間についての関数形がわかっているならばそれに応じて濃淡値の生成量を近似することが可能であると思われる。

## 5. 実画像からの速度ベクトル場検出

気象学においては、定量的な雲の運動(風速)の計測が試みられてきた。Leese ら<sup>(1)</sup>や Endlich ら<sup>(2)</sup>は、気象衛星画像を用いて雲の速度ベクトル場の検出を試みている。また深尾は、レーダを用いて風速の測定を行っている<sup>(21)</sup>。そこで本論文では、照明強度の変動を伴う現実の動画像の例として、夕暮れの空に浮かぶ雲を地上よりテレビカメラで撮影し、計算機内に取り込んだ動画像を取りあげる。サンプリング周期は 1/2 秒である。濃淡値は 256 段階に量子化された。動画像の解像度は 160×64 画素である。64 枚の動画像を速度ベクトル場検出に用いた。その動画像の 1, 33 および 64 枚目の画像を図 7 (a), (b) および (c) に示した。太陽が西

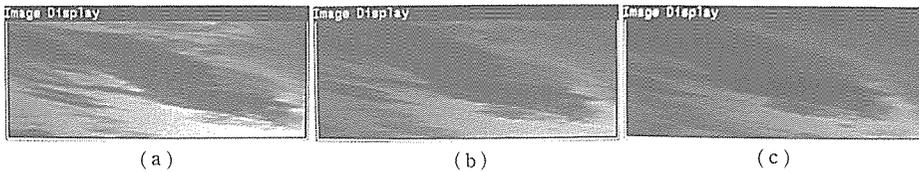


図 7 雲の運動を地上よりテレビカメラを用いて撮影した現実の動画像。160×64 画素、64 枚の画像からなる。濃淡値は 256 段階に量子化されている。(a) 1 枚目、(b) 33 枚目、(c) 64 枚目の画像

Fig. 7 A real sequence of cloud motion is acquired through a TV camera in the evening from the earth. The sequence has 64 image frames with resolution of 160 by 64 pixels. Brightness is quantized into 256 levels. (a) 1st, (b) 33rd and (c) 64th image frame.

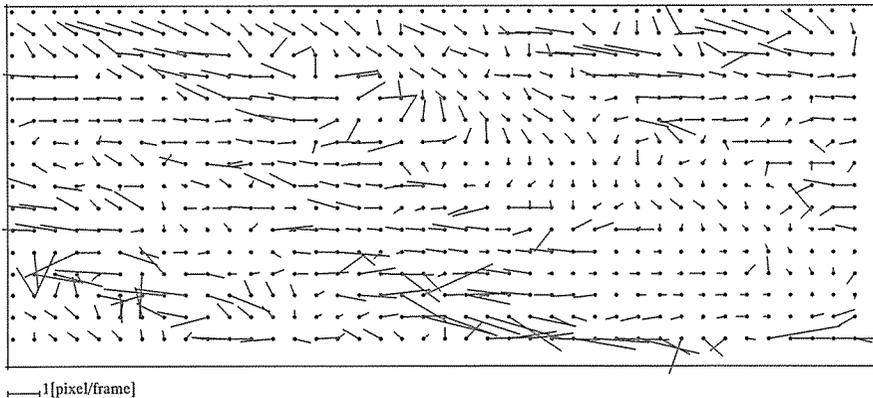


図 8 積分形式に基づき、濃淡値の生成量を無視した ( $\phi=0$ ) 従来の速度ベクトル場検出法による現実の動画像の検出結果の速度ベクトル場

Fig. 8 The velocity field is computed by a method based on the integral form for the real image sequences. The method assumes  $\phi=0$ .

の空に沈んでいくために、動画像中の濃淡パターンは徐々に暗くなっている。観測時間は32秒と十分短いので、照明強度はほぼ線形変化と考えてよい。視察の結果、雲は画像平面の左上方向にほぼ一定速度で進んでいる。積分形式に基づき濃淡値の生成量を考慮しない従来法と、考慮した提案法による検出結果の速度ベクトル場をそれぞれ図8, 9に示す。濃淡値の生成量を考慮した手法の結果が先の観察のとおり、左上方向の正しい速度ベクトルを得ている。濃淡値の生成を考慮しない手法による速度ベクトル場検出結果においては、観察結果と逆向きや全く異なった方向への速度ベクトルが目立つ。すなわち、人間の脳が判断する結果と同じ結果を得るには、濃淡値の生成・消滅を考慮した検出法の導入が必要であることがわかる。また微分形式に基づき濃淡値の生成量を1次関数で近似した手法による検出結果を図10に示す。この場合も、積分形式の濃淡値の生成量を考慮しない従来の手法による検出結果と比較して、目視による観察結果により一致している。すなわち、積分形式あるいは微分形式のどちらの検出法においても、濃淡値の生成量を考慮する手法がより人間の観察に近い結果を与え得ると言える。以上より、実画像においても濃淡値の生成・消滅を考慮する

ルが目立つ。すなわち、人間の脳が判断する結果と同じ結果を得るには、濃淡値の生成・消滅を考慮した検出法の導入が必要であることがわかる。また微分形式に基づき濃淡値の生成量を1次関数で近似した手法による検出結果を図10に示す。この場合も、積分形式の濃淡値の生成量を考慮しない従来の手法による検出結果と比較して、目視による観察結果により一致している。すなわち、積分形式あるいは微分形式のどちらの検出法においても、濃淡値の生成量を考慮する手法がより人間の観察に近い結果を与え得ると言える。以上より、実画像においても濃淡値の生成・消滅を考慮する

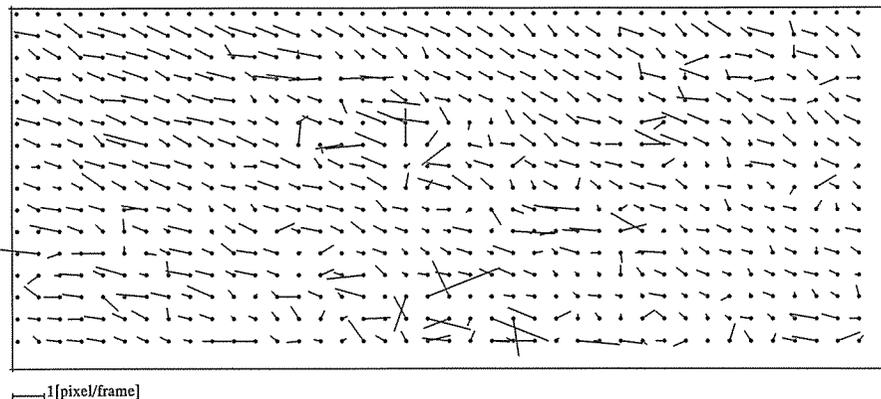


図9 積分形式に基づく速度ベクトル場検出法による現実の動画像の検出結果の速度ベクトル場。単位時間当りの濃淡値の生成量を時間に関する1次関数で記述可能と仮定している

Fig. 9 The velocity field is computed by a method based on the integral form for the real image sequences. The method assumes that the temporal change of generation of brightness is linear with time.

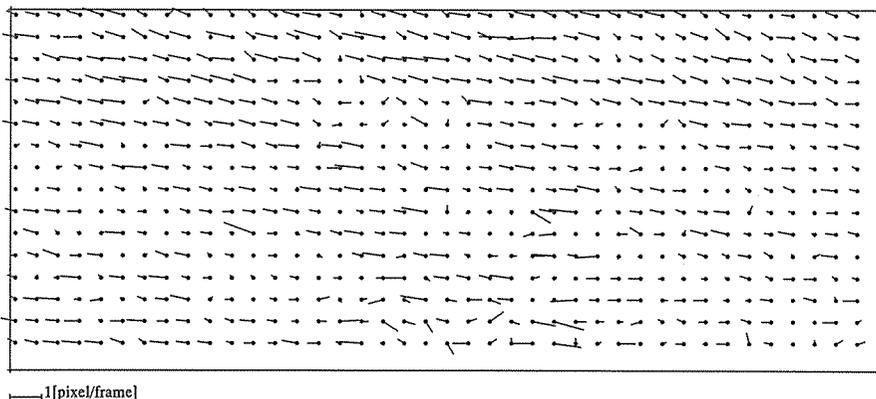


図10 微分形式に基づく速度ベクトル検出法による現実の動画像の検出結果の速度ベクトル場。単位時間当りの濃淡値の生成量を時間に関する1次関数で記述可能と仮定している

Fig. 10 The velocity field is computed by a method based on the differential form for the real image sequence. The method assumes that the temporal change of generation of brightness can be described as a linear function of time.

ことの必要性和提案法の有効性が確認できた。

## 6. む す び

筆者らが従来提案してきた濃淡値の生成・消滅を考慮した速度ベクトル場の拘束条件式に基づき、照明強度の時間的変動を伴った動画像に対しても適用可能な速度ベクトル場検出法を提案した。提案法では積分形式と微分形式に基づく2種類の手法がある。シミュレーション実験と現実の動画像の速度ベクトル場検出により、以下のように濃淡値の生成量分布を考慮することの有効性と、両検出法の特徴の違いが確認された。

(1) 時間的に照明強度が変動する条件下では、濃淡値の生成量分布を考慮することが必要である。つまり濃淡値の生成による濃淡分布の時間変化と、濃淡パターンの運動によるそれとを区別することにより、誤った速度ベクトルの出現を防ぐことが可能である。

(2) 照明強度の変動を伴った動画像に対しては微分形式に基づく手法が積分形式に基づく手法よりも精度良く速度ベクトル場検出できた。

(3) 積分形式に基づく手法は微分形式に基づく手法に比べてランダムなノイズに強い。

今後の課題としては、まず濃淡値の生成・消滅量に関する仮定をより緩やかなものにする事が挙げられる。また、従来我々は主に定常な速度ベクトル場検出法を提案してきた。一般的な動画像を対象とする場合、非定常な速度ベクトル場をもつ動画像からも検出可能とすることが必要である。

**謝辞** 現実の動画像を計算機に取り込む際に御助力頂いた山口大学大学院工学研究科知能情報システム工学専攻の掛部健君をはじめ、当研究室の諸氏に感謝します。

## 文 献

- (1) Leese J. A., Novak C. S. and Clark B. B. : "An Automated Technique for Obtaining Cloud Motion from Geosynchronous Satellite Data Using Cross Correlation", *Journal of Applied Meteorology*, **10**, pp. 118-132 (Feb. 1971).
- (2) Endlich R. M., Wolf D. E. and Brain A. E. : "Use of a Pattern Recognition Technique for Determining Cloud Motions from Sequences of Satellite Photographs", *Journal of Applied Meteorology*, **10**, pp. 105-117 (Feb. 1971).
- (3) 木村一郎, 高森 年, 井上 隆 : "相関を利用した流れ場の速度ベクトル分布の画像計測", 計測自動制御学会論文集, **23**, 2, pp. 101-107 (1987-02).
- (4) 小林敏雄, 佐賀徹雄, 瀬川茂樹, 神田 宏 : "二次元流れ場の実時間デジタル画像計測システムの開発", 日本機械学会論文集 (B 編), **55**-509, pp. 107-115 (1991-01).
- (5) Glazer F., Reynolds G. and Anandan P. : "Scene Matching by Hierarchical Correlation", *Proc. IEEE CVPR conference*, pp. 432-411 (June 1983).
- (6) Barnard S. T. and Thompson W. B. : "Disparity Analysis of Images", *IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell.*, **PAMI-2**, 4, pp. 333-340 (July 1980).
- (7) 二宮佑一, 大塚吉道 : "フレーム間符号化における動き予測方式", 信学論(B), **J64-B**, 1, pp. 24-31 (1981-01).
- (8) Horn B. K. P. and Schunck B. G. : "Determining Optical Flow", *Artif. Intell.*, **17**, pp. 185-203 (1981).
- (9) 安藤 繁 : "画像の時空間微分算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, **22**, 12, pp. 1330-1336 (1986-12).
- (10) Davis L. S., Wu Z. and Sun H. : "Contour-Based Motion Estimation", *Comput. Vision, Graphics & Image Process.*, **23**, pp. 313-326 (1983).
- (11) Hildreth E. C. : "Computations Underlying the Measurement of Visual Motion", *Artif. Intell.*, **23**, pp. 309-354 (1984).
- (12) 和田正裕, 山田博久 : "反復こう配法による動画像信号の動き量検出", 信学論(D), **J68-D**, 4, pp. 663-670 (1985-04).
- (13) 古賀和利, 三池秀敏 : "動画像の時空間相関に基づくオプティカルフローの解析", 信学論(D-II), **J72-D-II**, 4, pp. 507-516 (1989-04).
- (14) Steinbock O., Hashimoto H. and Müller S. C. : "Quantitative Analysis of Periodic Chemotaxis in Aggregation Patterns of Dictyostelium Discoideum", *Physica*, **D49**, pp. 233-239 (1991).
- (15) Nomura A., Miike H. and Koga K. : "Field Theory Approach for Determining Optical Flow", *Pattern Recognition Letters*, **12**, pp. 183-190 (1991).
- (16) 野村厚志, 三池秀敏, 古賀和利 : "時間的定常性を用いた光流動場の決定", 情報処理学会コンピュータビジョン研究会, 69-2 (1990.11.22).
- (17) Cornelius N. and Kanade T. : "Adapting Optical Flow to Measure Object Motion in Reflectance and X-ray Image Sequences", *Proc. ACM SIGGRAPH/SIGGART Interdisciplinary Workshop Motion : Representation and Perception, Toronto/Canada* (April 4-6, 1983).
- (18) Fitzpatrick J. M. : "A Method For Calculating Velocity In Time Dependent Images Based on The Continuity Equation", *Proc. IEEE Conf. Computer Vision, Pattern Recognition*, pp. 78-81 (1983).
- (19) Schunck B. G. : "Image Flow Continuity Equation for Motion and Density", *Proc. Workshop Motion : Representation and Analysis, Charleston, SC*, pp. 89-94 (May 7-9 1986).
- (20) Aisbett J. : "Optical Flow with Intensity-Weighted Smoothing", *IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell.*, **11**, 5, pp. 512-522 (1989).
- (21) 深尾昌一郎 : "大型レーダーで高層大気の"像をとる"", 流れの可視化, **9**, 33, pp. 77-82 (1989-04).

(平成5年3月31日受付)



野村 厚志

平1 山口大・工・電気卒，平3 同大大学院工学研究科修士課程電気工学専攻了，現在同大大学院工学研究科博士後期課程システム工学専攻在学中，動画像計測の研究に従事。



三池 秀敏

昭46 九大・工・電子卒，昭51 同大大学院博士課程了，同年山口大・工・電気助手，現在同大学電気電子工学科教授，昭62 西独マックスプランク研究所(ドルトムント)博士研究員，動画像計測処理による科学計測，非線形パターンダイナミックス，コンピュータビジョン等に関する研究に従事，工博，電気学会，情報処理学会，日本物理学会，形の科学会各会員。



古賀 和利

昭49 山口大・工・電気卒，昭51 同大大学院博士課程了，同年同大助手，昭54 同大工業短期大学部講師，平1 同助教授，平2 同大学工学部助教授，現在に至る，その間，昭53 東北大電子工学科に内地留学，動画像処理，立体視などの研究に従事，工博，日本 ME 学会会員。