

時間的定常性を用いた光流動場の決定

野村厚志* 三池秀敏* 古賀和利**

*山口大学工学部電気電子工学科

**山口大学工学部知能情報システム工学科

光流動を記述する式としては、動画像の輝度パターン中の点を時間的に追跡することにより得られるグラディエントの式がよく知られている。これに対し動画像中の固定した領域における輝度の総和の時間変化に注目し、輝度の流れや湧き出しを考慮することから得られる積分形式での記述式を提案する。グラディエントの式と提案した記述式を、画像中の各画素における光流動場の時間的局所定常性の仮定から最小二乗法を用いて解く。得られた手法をシミュレーション実験を通じて、従来より提案されていた光流動場の空間的局所領域での均一性を仮定した手法と比較し、その有効性を確認している。

Determination of Optical Flow with Temporal Local-Optimization

A. Nomura *, H. Miike * and K. Koga **

* Department of Electrical and Electronic
Engineering, Yamaguchi University

** Department of Computer Science and Systems
Engineering, Yamaguchi University

The gradient method, a representative for determining optical flow, is based on constant brightness assumption in coordinate traveling with moving object. We present a new approach utilizing the continuity equation of transport theory. Observer's visual point is fixed on a local area. A relationship among rate of temporal changes of total brightness within the area, divergence of optical flux out of the area and an additional flux caused by sources or sinks in the area is shown explicitly. Under assumptions of temporal constancy of the flow field, an overdetermined set of constraint equations is solved by least square optimization method.

1. はじめに

光流動場を決定する手法としては様々な手法が提案されている。一つは、画像中で抽出された特徴点を時間的に追跡することによりその速度場(速度=移動ベクトル/移動時間)を決定しようとするものである⁽¹⁾。この手法では、特徴点の自動抽出の問題により得られる特徴点の数が限定され、一般には高密度の光流動場を得ることは困難である。そこで物体追跡の考えを基に、画像輝度パターン中の点を追跡することにより画像輝度の時間・空間微分と光流動ベクトルを結び付ける(光流動を記述する)グラディエントの式が導かれた⁽²⁾。この式は画像輝度の時間・空間微分を含んでいるため、そのまま輝度画像に適用する場合ノイズの影響を受けやすい等の問題点があった。このような観点からの光流動の記述式に対し、本報告では画像中の個々の輝度パターンの運動を観測するのではなく、画像中の固定した観測領域での輝度の総和の時間変化とその観測領域への輝度を持った点の流入出量と湧き出し(吸い込み)とを結び付ける式を提案する。この提案式によると、光流動ベクトルの発散と輝度を持った点の湧き出しがないという仮定のもとでは、グラディエントの式が導けることが示される。

さらに、我々の研究室で今までに提案してきた時空間相関法⁽³⁾で仮定していた速度場の時間的局所定常性の仮定を、グラディエントの式や今回提案した積分形式による光流動ベクトルの記述式に適用した光流動場の解析法を示すとともに、光流動場に回転みのが存在する動画のシミュレーション実験によりその解析法の有効性を確認した。

2. 理論

この章では、光流動場のグラディエントの式と、今回提案する積分形式による記述を示す。積分形式による光流動の記述自体の提案は既になされているが^(4,5,6,7)、我々独自の観点からの解釈を記す。なお動画像に関しては、理想的な条件として画像の輝度分布が時間・空間的に微積分可能であることを仮定しておく。

(A) グラディエントの式の復習⁽²⁾

輝度パターンが微小時間 δt の間にその形を保ったまま二次元運動するような動画像を仮定する。この間に δx , δy だけ移動した輝度パターン中の点は、その対応付けより、

$$\rho(x, y, t) = \rho(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t) \quad (1)$$

と書ける。ここで $\rho = \rho(x, y, t)$ は画像の輝度分布を示している。この ρ が時間・空間で偏微分可能であるという仮定のもとで式(1)の右辺を (x, y, t) のまわりでテーラー展開し、 $\delta x, \delta y, \delta t$ の一次の項までで近似する(つまり時間 δt の間、パターンは直線運動をすると見なす)と、

$$\rho(x, y, t) = \rho(x, y, t) + \delta x \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} + \delta y \cdot \frac{\partial \rho}{\partial y} + \delta t \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2)$$

これを整理し両辺を δt で割ると、

$$\frac{\delta x}{\delta t} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\delta y}{\delta t} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

δt の極限として $\delta t \rightarrow 0$ とすると、

$$\frac{dx}{dt} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{dy}{dt} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

が得られる。これがB. K. P. HornとB. G. Schunckによって提案された光流動ベクトルの記述式である。現在までこの式を出発点とした様々な光流動場解析法が提案されてきており、今もなお改良が続けられている⁽⁸⁾。

(B) 光流動の積分形式による記述の提案

画像は輝度分布の定義された完全拡散放射面であり、その構成要素としてある輝度を持った無限に小さな点の集合と考える。動画像は画像の時系列方向への集合と考えることができ時間・空間の関数として $\rho = \rho(x, y, t)$ と書く。一般に輝度分布は時間・空間的に非定常である。

いまこの画像平面中に有限の領域 δS を考える。この領域中の輝度を持った点が放射する時刻 t での輝度の総和は、

$$\int_{\delta S} \rho \, dS \quad (5)$$

で与えられる。上式が時間に関して微分可能であると仮定することにより、観測領域における輝度の総和の時間変化は次式のように求まる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\delta S} \rho \, dS \quad (6)$$

この輝度の総和の見かけ上の時間変化は輝度分布の実際の時間変化や空間分布と速度の関係に起因するものである。輝度分布の時間変化の原因としては、画像の輝度を持った点の流れ $\vec{v} = v(x, y, t)$ や湧き出し(吸い込み) $\phi = \phi(x, y, t)$ が考えられる(図1)。 δS を囲む閉曲線 δC を通って δS 内に流入する輝度の点から放射される輝度の総和と、湧き出した輝度の点から放射する輝度の総和との和は、

$$-\oint_{\delta C} \rho \vec{v} \cdot \vec{n} \, dC + \int_{\delta S} \phi \, dS \quad (7)$$

と表現できる。但し \vec{n} は δC に対して閉領域の外側に向かう単位法線ベクトル、 $\phi = \phi(x, y, t)$ は画面上への輝度を持った点の湧き出し量分布である。一般に ϕ は時間・空間的に一定ではない。式(6)と式(7)がその観測領域での輝度の総和に関して等しいとして等号で結ぶと、

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\delta S} \rho \, dS = -\oint_{\delta C} \rho \vec{v} \cdot \vec{n} \, dC + \int_{\delta S} \phi \, dS \quad (8)$$

Gaussの定理より閉曲線での積分をそれが囲む閉領域の面積分に変換し、観測領域を時間的に固定することにより被積分関数のみで表現できるので、

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = \phi \quad (9)$$

ベクトル演算に関する公式を用いて、

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \text{div}(\vec{v}) + \vec{v} \cdot \text{grad}(\rho) = \phi \quad (10)$$

ここで光流動ベクトル \vec{v} の発散がなく ($\text{div}(\vec{v})=0$) なおかつ輝度を持った点の湧き出しもない ($\phi=0$) と仮定すると、

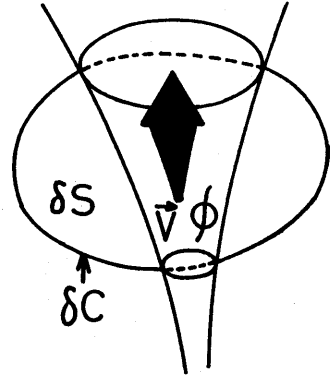


図1. 輝度点の湧き出し(吸い込み)のある画像

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v} \cdot \text{grad}(\rho) = 0 \quad (11)$$

となる。光流動ベクトルを $\vec{v} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j}$ (\vec{i}, \vec{j} はそれぞれ x, y 方向の単位ベクトル) で表示すると、

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + v_y \frac{\partial \rho}{\partial y} = 0 \quad (12)$$

となる。この式は(A)で導いた式(4)において光流動ベクトルの x, y 成分を $v_x = dx/dt, v_y = dy/dt$ で置き替えた式にほかならない。

つまり一般的な光流動場を記述する式としては式(9)が適当であるが、光流動ベクトルの発散と輝度を持った点との湧き出しがないという仮定のあてはまる画像に関しては式(4)で十分記述できるものと考えられる。

このような観点からの自然現象の考察は流体力学の分野での流体の記述方法として古くから考察されており、グラディエントの記述式はLagrange式記述の考え方に似ており、今回提案する記述式はEuler式記述と呼ばれる方法の考え方に似ている。しかしながら流体力学との決定的な違いとして挙げられることは、流体運動を記述する場合には流体を無数の微小部分に分けたと考えた時その各微小部分の近傍で速度の連続性が保証されているのに対し、三次元

のシーンを撮影したような動画像では複数の物体が重なり合うオクルージョンの問題等により必ずしも光流動場の連続性が保証されていないことである。また流体は自然界に存在するものであり、質量が存在するために質量の保存則がなり立つ。しかしながら画像に関していえば、その画像のもととなる世界は現実には存在することが多いが動画像自体は質量の存在しない非現実で仮想的な二次元空間に過ぎない。このような違いを考慮すると基本的な部分で流体との対応付けは大変困難である。しかしながら動画像自体虚偽的なものであるので、質量の存在しない理想的な輝度を持った点を考え、それらの仮想的な運動より生じる輝度についての保存関係を考えることにより、動画像上で起こりうる様々な現象を説明しようと試みた。事実パターンとパターンとの境界における速度場の不連続性は無限小の輝度を持った点の湧き出し(吸い込み)で説明できる。またカメラが光軸方向へ並進運動を行なった時の画像中のパターンの拡大(縮小)現象も、輝度を持った点の湧き出し(吸い込み)の時間空間分布を考えることで説明できる。

3. 計算機での実現

二次元の光流動場を記述する式(4)は未知数 v_x , v_y の二つを含んでいる。そこで実際に光流動場を決定しようとする場合もう一つの拘束条件が必要となる。B. K. P. HornとB. G. Schunckは光流動場が連続であるとして解いた⁽²⁾。またW. B. Tompsonらは空間的局所領域内で光流動場が一定であるとして、その領域内の各画素で式(2)をたて最小二乗法により速度場を計算した(Spatial Local Optimization Method; SLO)⁽⁹⁾。これに対し我々は画像中の各画素の速度ベクトルが解析に必要な動画像中で時間的に定常

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

と仮定し解くことを提案する(Temporal Local Optimization Method; TLO)。

また今回提案した光流動場の記述式の中で積分演算を含んだ式(8)を計算機上で実現した。式(8)では正方形の積分領域を考えている。ここでは積分領域内で光流動が一定であると仮定することで式を立てる。すると式(8)の右辺第一項の積分は図2のようにx軸に垂直な辺では v_x のみで表わせ、y軸に垂直な辺では v_y のみで表わせる。なお一般的な画像には大変大きな仮定となるが、輝度を持った点の湧き出し(吸い込み)はないと仮定する。すると式(8)に関しても速度ベクトルの二つの成分を含んだ式となるので、これに式(13)の条件を付加し速度場を求める(Integration Formula of Temporal Local Optimization Method; IF-TLO)。図2のような場合、座標 (x_0, y_0) での速度ベクトルを求める式を離散式で表わすと、

$$\begin{aligned} & \sum_{j=-1}^1 \sum_{i=-1}^1 (\rho(x_0+i, y_0+j, t+1) - \rho(x_0+i, y_0+j, t-1)) / 2 \\ &= v_x \cdot \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=0}^1 (\rho(x_0+i, y, t) - \rho(x_0-i, y, t)) / 2 \\ &+ v_y \cdot \sum_{i=0}^1 \sum_{j=-1}^1 (\rho(x, y_0+i, t) - \rho(x, y_0-i, t)) / 2 \quad (14) \end{aligned}$$

となる。また積分領域内で速度場が一定ではなく、各画素に対してベクトルを対応付ける方法が式(8)には適当であると思われるが、解析に必要なフレーム数が増えるので本報告では積分領域内で光流動ベクトルは一定であるとする。

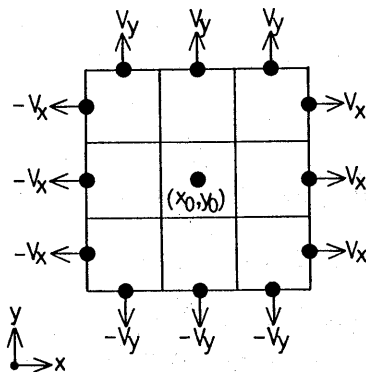


図2. 提案された式のデジタル画像への適用

4. シミュレーション実験

今回提案した光流動場を記述する式と計算手法の有効性を確認するために、シミュレーション実験を通してTLO, IF-TLOとSLOの各手法による解析精度の比較検討を行なった。グラディエントの式を用いたSLOとTLOでは画像輝度の時間・空間微分を含んでおりIF-TLOでは画像輝度の空間積分の時間微分を求めているが、これらの空間・時間微分演算の方法は3点を用いて最小二乗法により二次関数を決定することで、その微係数を求める方法に統一している。またSLOでは速度一定と考える領域は 5×5 画素とし、IF-TLOでは図2のように積分領域を 3×3 画素と設定した。このような設定により最小二乗法で用いる方程式の数がほぼ同じとなる。

対象となる動画象は我々の研究室で画像取り込み装置により取り込んだ画像(パーソナル・コンピュータを撮影した)を、その中央を中心として角速度 $1.0(\text{deg./frame})$ で時計回りに回転させた動画象25 frameを用いた(図3)。但しSLOは光流動場の空間的局所定常性を仮定しており時間的局所定常性は仮定していない。よって、この手法では動画象の時間微分を求めるのに必要な画像数のみを用いた。画像中に湧き出しはなく、3手法に必要な仮定を満足している。

解析して得られた光流動場と、画像の中心から各画素までの距離 R に対しその画素での速度の大きさ V とを対応させた特性図($R \cdot V$ 特性図)とを図4, 5, 6(順にSLO, TLO, IF-TLOによる解析結果)に示す。それぞれ(a)が光流動場(黒丸が得られたベクトルの画像中の位置を示しており、線の長さがベクトルの大きさを、角度が方向を示している)、(b)が $R \cdot V$ 特性図を示している。ともにそのばらつきはIF-TLOによる解析結果が最も小さく、 $R \cdot V$ 特性図に関してはIF-TLOによる結果が最も原点を通る比例関係をあらわしている。これらのことから今回提案した手法の有効性が確認できた。

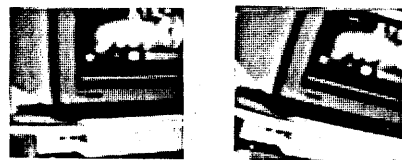


図3. シミュレーションの対象となった回転画像のうち1frameめと20frameめの画像。横128画素、縦128画素の解像度である。角速度 1.0deg./frame で時計回りに回転している。

5. まとめ

本報告では、動画象中に固定した観測領域での輝度の変化に注目した光流動場を記述する式を提案した。またグラディエントの式と今回提案した光流動ベクトルの記述式を光流動場の時間的局所定常性を仮定し、その解析アルゴリズムを示した。さらにそれらのアルゴリズムと、従来より提案されているグラディエントの式に光流動場の空間的局所定常性を付加した解析アルゴリズムとをシミュレーションを通じてその解析精度を比較した。これらにより、提案した画像中の固定された観測領域で得られる輝度の時間変化に注目した光流動場の記述式の、時間的局所定常性を仮定した解析法の有効性が確認された。

今後の方針としては、式(8)において無視した ϕ の面積分の項も考慮したアルゴリズムを計算機上で実現する。すなわち三次元空間中をカメラの光軸方向にそって運動する場合に得られる画像(例えば一定の速さで動く自動車に乗った時に前方や後方に見る風景が挙げられる)については、無限遠点の位置さえ検出できればカメラの自己運動の情報より ϕ の具体的な関数形も明らかになると思われるので、その情報を基に式(8)を用いて光流動場が計算できる。逆にいえばオクルージョンに関する問題は、湧き出し分布 ϕ の具体的な関数が簡単には明らかにできないという点で大変困難である。

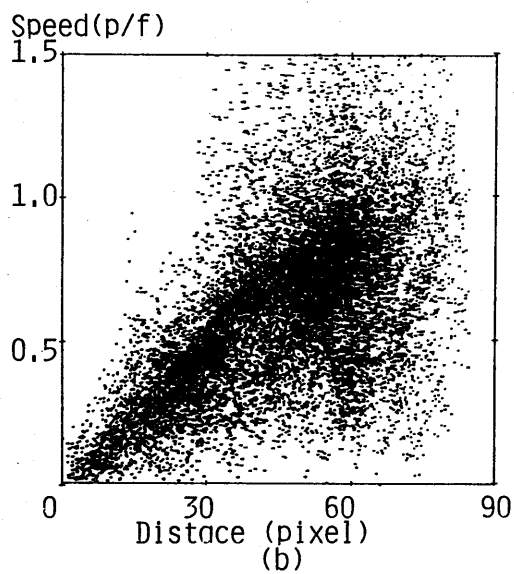
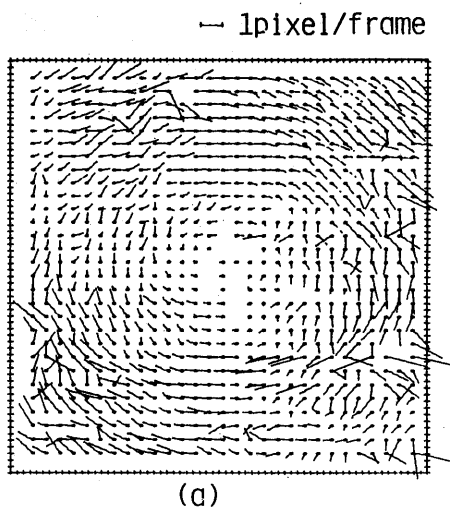


図4. グラディエントの式に光流動場が局所空間的に一定という仮定を設けた解法(SLO)を用いて図2のシミュレーション画像を解析した解析結果。(a)光流動場、(b)画像中央からの距離と速さの関係図(RV特性図)。

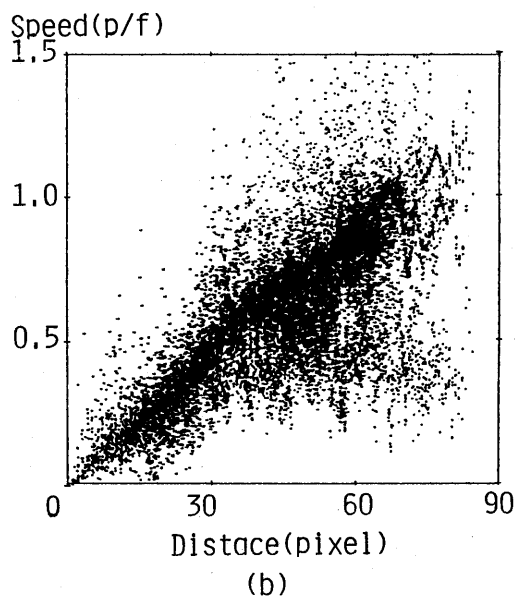
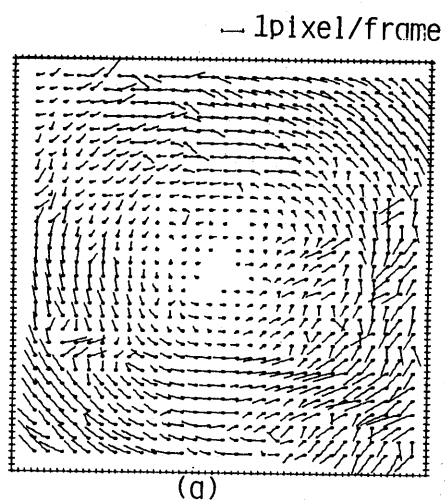
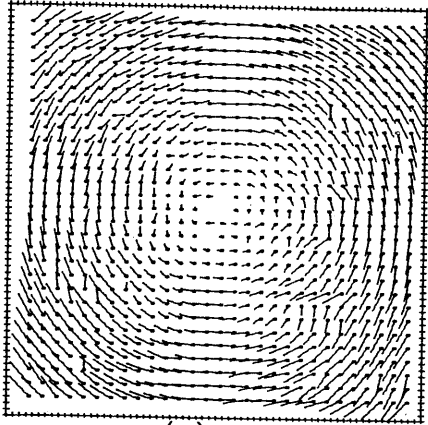
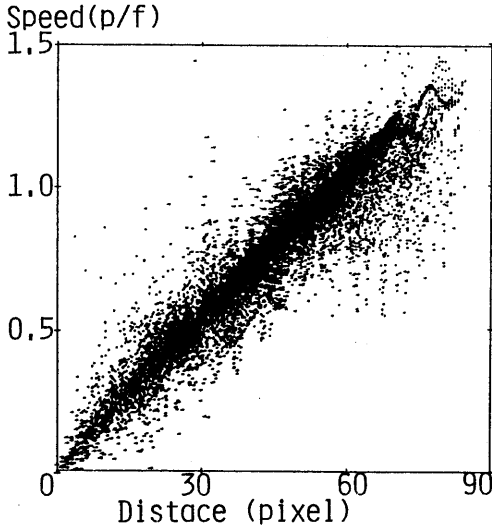


図5. グラディエントの式に光流動場が局所時間的に一定という仮定を設けた解法(TLO)による図2の解析結果。(a)光流動場、(b)RV特性図。

-1pixel/frame



(a)



(b)

図6. 積分形式による(8)式に、光流動場が局所時間空間的に一定という仮定を設けた解法(IF-TLO)による図2の解析結果。

(a)光流動場、(b)RV特性図。

謝辞

本研究を進めるにあたり有用な御指摘を頂いた群馬大学工学部情報工学科の金谷健一教授に感謝する。また日頃より御指導いただく山口大学工学部電気基礎工学講座の皆様にも感謝する。なお本研究の一部は大川情報通信基金の援助によった。

参考文献:

- (1) J.M. Prager and M.A. Arbib: "Computing the optic flow: The MATCH algorithm and prediction", *Comput. Graphics Image Process.*, 24, (1983) 271-304
- (2) B.K.P. Horn and B.G. Scunck: "Determining Optical Flow", *Artificial Intell.*, 17(1981) 185-203
- (3) 古賀和利, 三池秀敏: "動画像の時空間相関法に基づくオプティカル・フローの解析", *信学論(D)*, J72-D, 4(1989) 507-516
- (4) J.M. Fitzpatrick: "A METHOD FOR CALCULATING VELOCITY IN TIME DEPENDENT IMAGES BASED ON THE CONTINUITY EQUATION", *Proc. IEEE Conf. Computer Vision, Pattern Recognition*(1985) 78-81
- (5) B.G. Scunck: "Image Flow Continuity Equations for Motion and Density", *Proc. Workshop Motion: Representation and Analysis; Charleston S.C.*, (1986) 89-94
- (6) H.-H. Nagel: "On a Constraint Equation for The Estimation of Displacement Rates in Image Sequence", *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, 11(1989) 12-30
- (7) J. Aisbett: "Optical Flow with an Intensity-Weighted Smoothing", *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, 11, (1989) 512-522
- (8) J.K. Kerney, W.B. Thompson and D.L. Boley: "Optical Flow Estimation: An Error Analysis of Gradient-Based Methods with Local Optimization", *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, PAMI-9(1987) 229-244