

時間・空間的な照明の変化を伴う環境下での物体運動における オプティカルフロー抽出

三池秀敏*, 長 篤志*, 杉村敦彦**

*山口大学大学院理工学研究科、情報・デザイン工学系専攻

**徳山工業高等専門学校、情報電子工学科

勾配法は、動画像から運動物体のみかけの二次元速度ベクトル場（オプティカルフロー）を検出する代表的手法として知られている。本稿では、Horn & Schunck の提案手法以来のオプティカルフロー検出手法の研究史を概説すると共に、筆者らの研究グループで独自に開発を行ってきた、照明の時間的変動や空間的不均一が存在する環境下で運動する物体の速度情報を推定する方法（一般化勾配法）を紹介する。一般化勾配法は、濃淡値の保存則を仮定し、三次元世界から透視投影で映し出された二次元画像中の物体運動の速度ベクトル場と照明の不均一場を同時に推定する。

Extracting Optical Flow from Object Motion under Non-uniform and Non-stationary Illumination

Hidetoshi Miike*, Atsushi Osa*, and Atsuhiko Sugimura**

*Division of Information and Design Engineering, Graduate School of
Science and Engineering, Yamaguchi University

**Department of Computer Science and Electronic Engineering,
Tokuyama College of Technology

The gradient-based approach is known as a representative method to extract optical flow (an apparent velocity field of two-dimension) from an image sequence. In this paper, we discuss a historical sketch of the study of optical flow since Horn and Schunck proposed their approach of global optimization. And we introduce our original approach of a generalized gradient-based method, which enables to evaluate optical flow under non-uniform and/or non-stationary illumination. The generalized method assumes a conservation law of gray values in the image sequence, and evaluates not only the velocity vector field (optical flow) but also the distribution of non-uniform and/or non-stationary illuminations.

1. はじめに

画像（空間2次元情報）や動画像（空間2次元+時間1次元情報）は、人間の視覚映像との対応から、3次元世界の映像情報を2次元のカメラセンサー（フィルムや CCD）の上に透視投影した像（イメージ）として理解される。また、3次元実世界で展開される動的現象を2次元面上に投影して得られる、動画像中の濃淡パターンの見かけの動き（2次元速度ベクトル場）はオプティカルフローと呼ばれ（図1参照）、カメラと運動物体の相対運動に伴って出現する画面内の運動から検出する。3次元世界での物体運動の情報を2次元の平面に投影して記録することにより、元の情報の一部は失われる。人間の視覚システムは、失われた3次元情報を復元すべく、数多くの手がかり（両眼視差、運動視差、陰影、テクスチャー等）を利用している。こうした逆光学の問題は、通常「不良設定問題」であり解の一意性を確保することは困難である。しかし、脳の視覚機能は、経験により得られる「知識」や「常識」を拘束条件として、この種の問題を解決するアルゴリズムを自己組織的に獲得している¹⁾。こうした自己組織型の情報処理アルゴリズムの獲得は、人間の視覚機能を機械（カメラとコンピュータ）で実現しようとする、ロボットビジョン研究の目標の一つである。

ロボットビジョン研究におけるオプティカルフローの位置付けは、

- 1) 動画像からの正確なオプティカルフローの検出、
- 2) 検出されたオプティカルフローを用いた三次元中の運動情報の復元、

の二つの側面に分けられる。本論文では、1) の側面に注目し、オプティカルフローの正確な検出を妨げる要因の整理と、その要因にロバスト（頑強）な検出理論を紹介するとともに、その応用事例を示す。特に、濃淡値の対応付けと正則化手法を基本とする「勾配法」²⁾を取り上げ、その研究の歴史を紹介すると共に、照明の時間的な変動や空間的な不均一が存在する環境下でのオプティカルフロー検出理論（一般化勾配法）とその最近の研究動向を示す。

2. オプティカルフロー研究の流れ

動画像からの速度情報の検出に関する論文は、気象衛星画像などを対象に、1970年頃から³⁾数多く発表されるようになった。多くの論文では、動画像中の濃淡パターンの対応付け（マッチング）の考え方により、みかけの2次元速度ベクトル場としてのオプティカルフローを計算する手

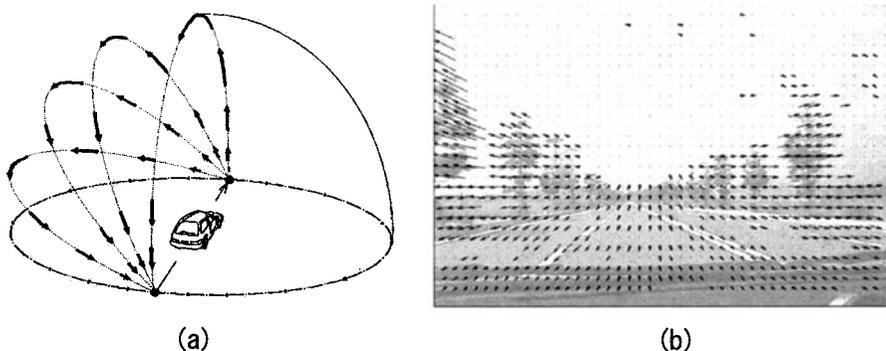


図1 物体の運動に伴うオプティカルフローの発生。(a)車の移動に伴い発生するオプティカルフローの概念図、(b)勾配法で求めたオプティカルフローの場

法が一般的である。連続する画像フレーム間において、適当なサイズのテンプレートの濃淡パターンの対応付けを実行し、得られる変位ベクトル場からオプティカルフローを検出する手法はテンプレート・マッチング法として良く知られている。この方法は、「特徴の対応付け」手法として分類でき、画像中の速度 Pixels/Frame の大きな画像の解析に適すが、誤対応などの本質的な問題を抱えている⁴⁾。誤対応の問題解決には多くの研究者の提案が有り、階層化手法⁵⁻⁷⁾や基線長を可変とする手法⁸⁾など非常に数多くの試みがある。コンピュータビジョンと離れば、流体表面の可視化粒子の運動を計測する粒子画像速度計測法 (PIV) や粒子追跡速度計測法 (PTV) もマッチング手法の一つとして分類できる^{9,10)}。流体の流れの速度ベクトル場が推定できれば、流体の渦度分布や発散場、圧力分布などの物理量が推定できることになり、有用な情報が得られる。

一方、コンピュータビジョンにおけるオプティカルフロー研究の原点となる重要な論文は、Horn と Schunck により 1981 年に発表されている²⁾。彼らは、動画像中の各画素において、濃淡値の時間勾配 (スカラー) と空間勾配 (ベクトル) とを速度ベクトルと結びつける基本式を導き、検出したいオプティカルフロー場に対する付加的な拘束条件式 (主にベクトル場の連続性) を組み合わせ、これを正則化の枠組みによって変分法で最適化して解を得ている (大域的最適化手法)。この Horn と Schunck に刺激されて、その後多数の論文が提出されている。濃淡値の高次勾配まで取り入れた Nagel と Enkelmann の提案や、その階層化手法の提案などがその代表である^{11,12)}。また、この「濃淡に基づく手法」と「特徴に基づく手法の」両方の長所を取り入れた提案や¹³⁾、多重のオプティカルフローが存在する場合への拡張なども行われている¹⁴⁾。

勾配法はその後、Kerney らの局所最適化手法の提案¹⁵⁾や Ohta によるオプティカルフローベクトルの信頼性指標の導入¹⁶⁾、そして照明の時間変動や空間的不均一への対応など¹⁷⁻²²⁾、本質的な改良が加えられ、誤差や信頼性が定量的に評価できる物理計測手法としても確立していった。ただ、勾配法の本質的な問題点として、

- 1) 速度 Pixels/Frame の大きな画像の解析には適していない (基本的に 1Pixel/Frame 以下)、
- 2) 運動境界の部分で速度ベクトルの推定に誤差が出やすい、
- 3) 照明が時間・空間的に変動する環境での検出が困難である、
- 4) 速度場の発散がゼロで無いような物体運動 (カメラの光軸に平行な運動による物体の拡大縮小を含む場合) の検出が困難である、

などが認識されている。2) の運動境界の問題は、多重オプティカルフローの問題と共通し¹⁴⁾、3)、4) は濃淡値の対応付けが単純には適用できない場合である。本稿では、3 章で Horn と Schunck の提案の概要を示すとともに、4 章では上記の問題点の 3) に対応できる一般化勾配法の考え方を紹介し、勾配法が抱える本質的な問題の解決へのアプローチ手法を提案している。

3. 勾配法の基礎：基本式と正則化手法 (大域的最適化と局所最適化)

この章では、Horn と Schunck によって提案された勾配法の考え方を主に紹介し、次章で議論する一般化勾配法の準備とする。画像の濃淡パターンを画像関数 $f(x, y, t)$ で表現すると、濃淡パターンの運動に伴い、時刻 $t + \delta t$ では対応する点は $f(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t)$ に移動する。この二つの点の濃淡値が等しい場合は、 $f(x, y, t) = f(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t)$ が成立し、右辺をテーラー展開することで次式が成立する (図 2 (a) 参照)。

$$f(x, y, t) = f(x, y, t) + \frac{\partial f}{\partial x} \delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \delta y + \frac{\partial f}{\partial t} \delta t + \dots \quad (1)$$

2次以上の微分項を無視して $\delta \rightarrow 0$ の極限を取ると、次式を得る。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial x} \mathbf{u} + \frac{\partial f}{\partial y} \mathbf{v} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{u} = \lim(\delta \rightarrow 0) \frac{\delta x}{\delta t}$ 、 $\mathbf{v} = \lim(\delta \rightarrow 0) \frac{\delta y}{\delta t}$ であり、それぞれ運動物体の速度ベクトル \mathbf{V} (オプティカルフロー) の2成分である ($\mathbf{V} = (\mathbf{u}, \mathbf{v})$)。 (2) 式は勾配法の基本式であり、2次元空間微分演算子 $\nabla f = \frac{\partial f}{\partial x} \bar{i} + \frac{\partial f}{\partial y} \bar{j}$ を用いて表現すれば、次式を得る。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla f \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (3)$$

この式は、濃淡値の空間勾配、時間勾配とオプティカルフロー速度とを結びつける基本式であるが、これだけでは未知数が二つ (\mathbf{u} と \mathbf{v}) で式が一つであり解けない。この不良設定問題を解くためには付加的な拘束条件式 (知識や経験に基づく) が必要である。コンピュータビジョンの分野で研究されてきた勾配法の多くは、幅広い現象に適用可能な拘束条件式を提案することを中心課題としてきた。この拘束条件式は大別して、大域的な拘束と局所的な拘束条件に分類される。

大域的最適化手法は Horn と Shunck により提案され、次式の拘束条件を仮定する。

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 = 0 \quad \& \quad \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 = 0 \quad (4)$$

すなわち、得られるオプティカルフローの場が滑らか (空間勾配が零) とする。実際には、(3) と (4) の二つの条件がオプティカルフロー場全体 \mathbf{S} で満たされるように次式を最小とする拘束を課す。ここに、 $f_x = \partial f / \partial x$ 、 $f_y = \partial f / \partial y$ 、 $f_t = \partial f / \partial t$ であり、 α^2 は (3) の誤差と (4) の滑らかさの拘束の相対的な重みを決めるパラメータである。

$$\alpha^2 \iint_{\mathbf{S}} (\mathbf{u}_x^2 + \mathbf{u}_y^2 + \mathbf{v}_x^2 + \mathbf{v}_y^2) dx dy + \iint_{\mathbf{S}} (f_x \mathbf{u} + f_y \mathbf{v} + f_t)^2 dx dy \rightarrow \min. \quad (5)$$

(5) 式の最小化問題は、変分法を用いて解かれ、次式のオイラー・ラグランジェ方程式を得る。この連立方程式は、Gauss-Sidel 法などで計算される²⁾。

$$\begin{aligned} f_x (f_x \mathbf{u} + f_y \mathbf{v} + f_t) - \alpha^2 \nabla^2 \mathbf{u} &= 0 \\ f_y (f_x \mathbf{u} + f_y \mathbf{v} + f_t) - \alpha^2 \nabla^2 \mathbf{v} &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

一方、局所的最適化手法は、(4) の拘束条件の代わりに、時間・空間にまたがるある局所領域 $\delta \mathbf{V} = \delta \mathbf{x} \times \delta \mathbf{y} \times \delta t$ 内での勾配法の基本式 (3) が共通の解 $\vec{\mathbf{V}} = (\mathbf{u}, \mathbf{v})$ を持つことから、次式で与

える評価関数 E が解 (\mathbf{u}, \mathbf{v}) に対して最小となるような解を求める (最小二乗法) ¹⁵⁾。

$$E = \iiint_{\delta V} (f_x \mathbf{u} + f_y \mathbf{v} + f_t)^2 dx dy dt \rightarrow \min \left(\frac{\partial E}{\partial \mathbf{u}} = 0, \frac{\partial E}{\partial \mathbf{v}} = 0 \text{ を解く} \right) \quad (7)$$

4. 一般化勾配法：照明の時間・空間的不均一への対応

勾配法の基礎式 (3) は、運動物体の濃淡値が一定に保たれるという仮定の下での対応付けを表している。この式を移動現象に伴う保存則の立場で捉え直してみよう。観測領域を固定し、この局所領域 δS に流入・流出そして生成・消滅する濃淡値の量に注目してみよう。通常、こうした保存則は質量のような示量変数に対して成り立つが、ここでは濃淡値 (あるいは輝度) のような示強変数についても成り立つと仮定し以下の議論を行う。すなわち、 δS 内での濃淡値の時間変化の割合は、 δS を囲む境界 δC を通り δS 内に流入する濃淡値の量と δS 内で単位時間当たりに生成・消滅する濃淡値の量 ϕ との和に等しい (保存則：図 2 参照)。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\delta S} f dS = - \oint_{\delta C} f \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} dC + \int_{\delta S} \phi dS = - \int_{\delta S} \nabla \cdot (f \mathbf{V}) dS + \int_{\delta S} \phi dS \quad (8)$$

ここで、 \mathbf{n} は δC に対する外向き単位法線ベクトルであり、ガウスの定理(2次元)により右辺第 1 項の線積分を面積分に変換している。従って、微分形での表現が次式のように得られる。

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\nabla \cdot (f \mathbf{V}) + \phi \quad (9)$$

さらに、移動現象が拡散まで含むとすると、拡散係数 D を用いて

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\nabla \cdot (f \mathbf{V}) + \nabla \cdot (D \nabla f) + \phi \quad (10)$$

と表現され、この式が最も一般的な濃淡値の保存則を表現すると考えられる。この式で、 $\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$ 、 $D = 0$ 、 $\phi = 0$ とおけば、勾配法の基礎式 (3) が得られる。画像の場合、拡散係数は焦点が時間と共に変化し画像がボケて行く場合に利用できる。なお、 $\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$ は速度場の発散が無い事 (非圧縮性流体の特徴) を意味し、 $\nabla \cdot \mathbf{V} \neq 0$ は運動物体の拡大縮小や変形を伴う場合を表す。ここでは、以下 $D = 0$ 、 $\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$ のみを仮定し、照明の不均一に対応する。すなわち、

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla f \cdot \mathbf{V} = \phi \quad (11)$$

となる。なお、式 (10) の一般化勾配法に対して、Schunck²¹⁾ は $D = 0$ 、 $\phi = 0$ を仮定した式から

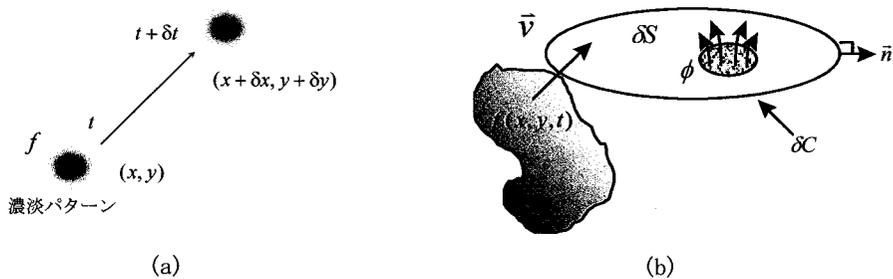


図 2. 濃淡パターンの対応付け (a) と、固定観測領域 δS での濃淡値量の変化と保存則 (b)

出発し ($\frac{\partial f}{\partial t} = -\nabla \cdot (fV) = -\nabla f \cdot V - f\nabla \cdot V$)、得られる速度ベクトルを **Image Flow** と呼んで

いる。Bimbo ら²²⁾は $(u, v, \nabla \cdot V)$ の三つの未知数を最小二乗法によって推定する手法を提案している。Cornelius と Kanade²³⁾は式 (11) と等価な式を提案し、武川は²⁰⁾この式と光学モデルを用いて照明の時間変化が生じた場合にも対応可能な、オプティカルフロー、光源方向、及び 3 次元形状の推定法を提案している。

一方、Nomura ら¹⁹⁾は、式 (11) において、画像関数を均一照明下の濃淡分布 $r(x, y, t)$ と照明の影響を表す $g(x, y, t)$ との積と捉え、照明の空間的不均一と時間的変動の影響を表現する光学モデルを提案した。すなわち、不均一照明条件下 $r = r(x, y)$ で、

$$\phi = g(V \cdot \nabla r) = f \frac{V \cdot \nabla r}{r} = fq\sqrt{u^2 + v^2} \quad (12)$$

ここで、 q は動きベクトルと ∇r のなす角 θ を用いて、 $q = |\nabla r / r| \cos \theta$ で表される。また、非常照明条件下 $r = r(t)$ で、下記のように表現できる。

$$\phi = g \frac{\partial r}{\partial t} = fw \quad (13)$$

式 (12) あるいは (13) を式 (11) に代入し、非線形の最小二乗法等で最適化することで、 (u, v, q) あるいは (u, v, w) が推定でき、速度場と照明場の両方が決定できる。その後、照明の時間変化と空間的不均一が同時に存在する場合への拡張²⁴⁾や、信頼性指標を導入した場合への拡張²⁵⁾などが行われ、物理計測手法としてのロバスト性・信頼性や誤差の定量評価が可能となっている。

5. 応用例

この章では、一般化勾配法(主に式(11))をベースとしたいくつかの検出手法の適用例を示し、その可能性と限界の議論を行う。図3は、オプティカルフロー検出のアルゴリズムの能力をテストする動画像としてよく知られている「Yosemite」のシーンである。背景部分の雲の照度が時間変化したり、奥行き方向へのカメラの運動により速度ベクトル場が発散的傾向を示すなど、本質的に困難な課題を含んでいる。画像はコンピュータグラフィックス(CG)で作成されているため、理論値が存在し、オプティカルフロー推定値の誤差が定量的に評価できる。図4は Yosemite 動画像からのオプティカルフローの検出結果を示す。図4(左)は理論値、(右)は照明の不均一と信頼性指標を考慮した結果の例を示す。理論値との平均誤差は 5.24 と種々の手法中最小である。

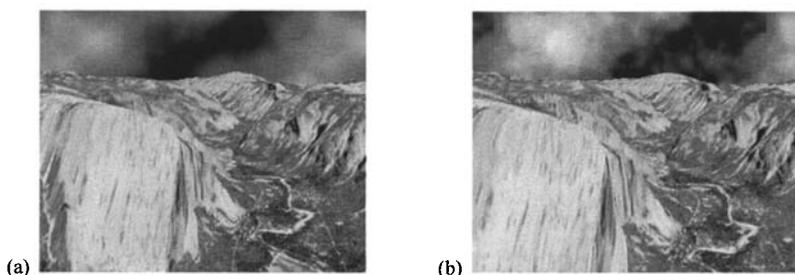


図3. CGで作成された Yosemite 動画像。背景部分に照明の時間・空間変化が存在する。

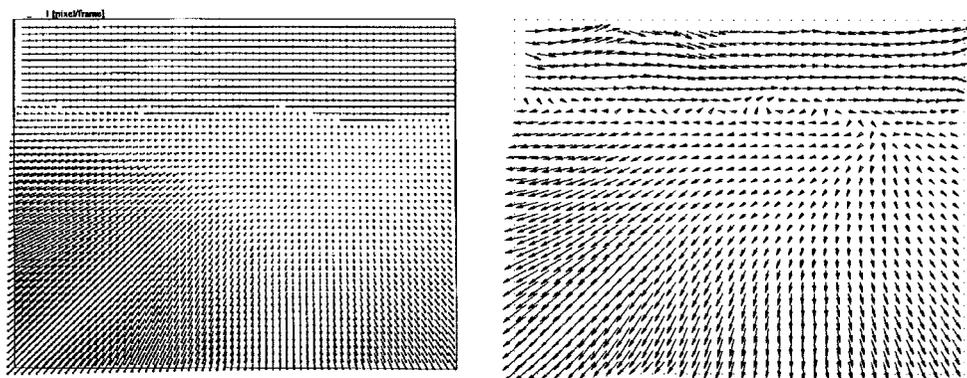


図4. Yosemite 動画像のオプティカルフローの理論値(左)と、照明の不均一と信頼性指標を考慮した結果(右)。

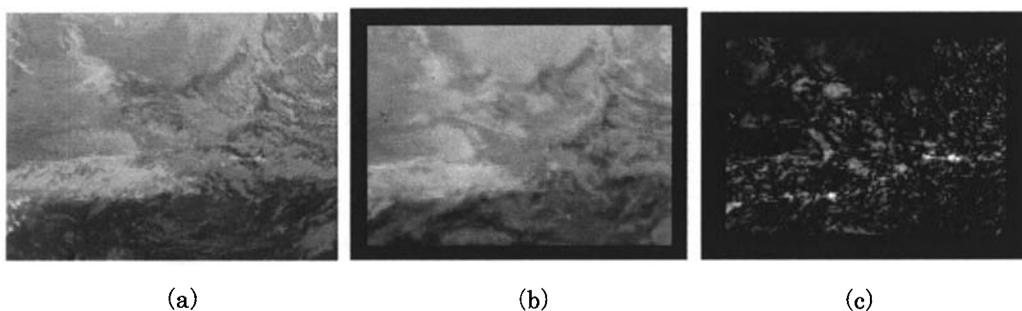


図5. 勾配法による気象衛星動画像の雲移動の予測：ある時点（2001年12月10日9時）の衛星画像と、その前後各1時間のサンプルデータ3枚から2時間後（11時）の雲の位置を予測（b）。（c）は誤差の分布を示す。

図5は気象衛星雲画像の解析に適用した結果で、ある時点の気象衛星雲画像とその前後の3枚の画像から2時間後の雲の位置を予測し、実際の結果との比較を行っている。雲は単に並進移動するのではなく、形状の変化や生成消滅が有り計測困難な対象である。また、冬場は大陸部分の温度の日周期（24時間）変化が加わり、計測誤差を生む。いくつかの手法を適用し比較検討しているが、現時点で最も信頼性のある結果を得ているのは、24時間周期の変動を取り除き、式(11)で $\phi = \mathbf{f} \cdot \mathbf{w}$ とおいて、時空間局所最適化法で $(\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w})$ を推定した場合である。信頼性指標と大域的最適化を組み合わせた手法では、速度場の平滑化が行き過ぎる嫌いがある。今後、各季節での違いや、雲の生成消滅を考慮し $\nabla \cdot \mathbf{V} \neq 0$ を含む解析法の検討、及び速度 (Pixels/Frame) の大きな場合への対応²⁶⁾等を進める必要が有る。

参考文献

- 1) 松本、小野共編、情と意の脳科学「人とは何か」、培風館（2002）
- 2) B.K.P. Horn and B.G. Schunck, Determining Optical Flow, Artificial Intell., 17(1981)pp.185-203
- 3) J.A. Leese, C.S. Novak, and V.R. Taylor, The Determination of Cloud Pattern Motions from Geosynchronous Satellite Image Data, Pattern Recognition, 2(1970)pp.279-292

- 4) 三池、古賀、橋本、百田、野村「パソコンによる動画像処理」森北出版 (1993)
- 5) F. Glazer, G. Reynolds and P. Anandan, Scene Matching by Hierarchical Correlation, IEEE CVPR Conference (June 1983)pp.432-441
- 6) D. Terzopoulos, Image Analysis Using Multigrid Relaxation Methods, IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., PAMI-8(1986)pp.129-139
- 7) 佐藤、佐々木、動画像における動きベクトルの階層的推定法、電子通信学会論文誌、J69-D (1986) pp. 771-776
- 8) 奥富、金出、複数の基線長を利用したステレオマッチング、信学論 J75-D-II (1992)、pp.1317-1327
- 9) M. Raffel, C.E. Willert, and J. Kompenhaus, Particle Image Velocimetry, Springer-Verlag, Berlin (1998)
- 10) 木村、植村、奥野、可視化情報計測、近代科学社 (2001)
- 11) H.-H. Nagel, Displacement Vector Derived from Second-Order Intensity Variations in Image Sequence, Computer Vision, Graphics, and Image Process. (CVGIP), 21(1983)pp.85-117.
- 12) H.-H. Nagel and W. Enkelmann, An Investigation of Smoothness Constraints for the Estimation of Displacement Vector Fields from Image Sequences, IEEE-PAMI, 8(1986)pp.565-593
- 13) M. Yachida, Determining Velocity Maps by Spatio-temporal Neighborhoods from Image Sequences, CVGIP, 21(1983)pp.262-279
- 14) 志沢、間瀬、多重オプティカルフロー (基本拘束式と運動透明視・運動境界検出の統一理論)、信学論、J-76-D-II (1993)pp.987-1005
- 15) J.K. Kearney, W.B. Thompson and D.L. Boley, Optical Flow Estimation: An Error Analysis of Gradient-based Methods with Local Optimization, IEEE-PAMI,9(1987)pp.229-244
- 16) N. Ohta, Image Movement Detection with Reliability Indices, IEICE, Trans., E74(1991)pp.3379-3388
- 17) A. Nomura, H. Miike and K. Koga, Field Theory Approach for Determining Optical Flow, Pattern Recognition Letter, 12(1991)pp.183-190
- 18) 野村、三池、横山、動画像からの運動・拡散現象の検出、電学論 C、115(1995)pp.403-409
- 19) A. Nomura, H. Miike and K. Koga, Determining Motion Fields under Non-uniform Illumination, Pattern Recognition Letter, 16(1995)pp.285-296
- 20) N. Mukawa, Optical Model-based Analysis of Consecutive Images, Computer Vision and Image Understanding, 66(1997)pp.25-32
- 21) B.G. Schunck, The Image Flow Constraint Equation, CVGIP, 35(1986)pp.20-46
- 22) A.D. Bimbo, P. Nesi, and L.C. Sanz, Analysis of Optical Flow Constraints, IEEE-IP, 4(1995)pp.460-469
- 23) N. Cornelius and T. Kanade, Adapting Optical Flow to Measure Object Motion in Reflectance and X-ray Image Sequence, Proc., ACM SIGGRAPH/SIGART (1983)pp.145-153, Toronto, Canada, April 4-6.
- 24) L. Zhang, T. Sakurai and H. Miike, Detection of Motion Fields under Spatio-temporal Non-uniform Illumination, Image and Vision Computing, 17(1999)pp.309-320
- 25) A. Osa, and H. Miike, An Accurate Determination of Motion Field and Illumination Conditions, IEICE Trans. Inf. & Syst., E87-D(2004)pp.2221-2228
- 26) 橋本、石原、グラディエント法に基づいた PIV 法、宇部高専研究報告、53(2006)pp.1-5.