JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	３次元投票空間を用いた照明条件の変化を考慮したオプティカルフロー推定
Author(s)	今村，弘樹；剣持，雪子；小谷，一孔
Citation	電子情報通信学会論文誌 D，J85-D2(1)：12-22
Issue Date	2002-01-01
Type	Journal Article
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/4716
Rights	Copyright (C)2002 IEICE. 今村　弘樹，剣持　雪子，小谷　一孔，電子情報通信学会論文誌 D，J85-D2(1)，2002，12-22. http://www.ieice.org/jpn/trans_online/
Description	

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

論　文

3次元投票空間を用いた照明条件の変化を考慮したオプティカルフロー推定

今村　弘樹[†]　　剣持　雪子[†]　　小谷　一孔[†]

Estimation of Optical Flow for Brightness Change Using a Three-Dimensional Voting Space

Hiroki IMAMURA[†], Yukiko KENMOCHI[†], and Kazunori KOTANI[†]

あらまし　動物体解析の有力な手法としてオプティカルフロー推定法がある．しかし，照明条件の変化する状況下においてフローの推定精度が低下するという問題点がある．この問題点を解決するためにいくつかの手法が提案されている．これら従来手法はそれぞれ異なる特性を有している．本研究は，従来手法の特性をすべて有する高精度なオプティカルフロー推定法の提案を目的とする．

キーワード　オプティカルフロー，照明条件の変化，投票，投票可能条件，重み関数

1. まえがき

時間的に連続する画像から物体の動きを解析する有力な手法であるオプティカルフロー推定法の基本的手法 [1], [2] は，こう配法 [3], [4] に基づく，周波数展開法 [5]〜[7]，多重運動モデル法 [8]〜[10]，テンポラルリファインメント法 [11] と相関法とも呼ばれるブロックマッチング法 [12], [13] に大別される．

上記のオプティカルフロー推定法は，フレーム間の対応点の輝度値が等しいと仮定してオプティカルフロー推定を行うために，照明条件の変化によって，フレーム間の対応点の輝度値が変化すると，フローの推定精度が著しく低下するという問題点がある．高精度な動物体解析が求められる気象学や流体をはじめとする様々な物理現象を対象とした場合，対象物や測定装置の物理的な特性により照明条件の変化を避けることが困難な場合がある [14]．例えば，気象学では実時間レートで撮影した画像は雲の動きが微小なために十分な時間間隔で撮影した画像を用いて雲の運動を解析している．衛星写真を用いて雲の運動を解析した場合，十分な時間間隔で撮影した画像は地球の自転により，陰影の影響で雲の輝度値の変化が生じる．また，地上から雲を撮影した場合，十分な時間間隔で撮影した雲の画像は，地球の公転により太陽光の入射角が変化し，照明強度の変化が起こり，雲の輝度値の変化が生じる．流体のような 3 次元的に高速運動する物体において，物体の形状と光源の位置によっては陰影，また影による照明強度の変化，かつ，物体の運動が高速なことにより，通常の NTSC のビデオフレームレートでは輝度値の変化が生じる可能性がある．このように高精度なオプティカルフロー推定を行うためには陰影と照明強度の変化による照明条件の変化を考慮しなければならない場面がある．

この問題を解決するために，照明条件の変化を考慮したオプティカルフロー拘束方程式を用いた手法が提案されている．代表的な手法を挙げると，

（1）　輝度値の時間に関する拘束を用いた手法 [14], [15]

（2）　輝度値の時空間に関する拘束を用いた手法 [16], [17]

などがあり，これらの手法はこう配法に分類される．これらがこう配法を用いているのは，フリッカのように画像全体で輝度値が変化する場合にはマッチングに正規化相関や空間微分の後に SAD [1] を行うなどの手法が適用可能であると思われるが，照明光の強度変化や陰影の変化のように局所的に輝度値が変化する場合

[†] 北陸先端科学技術大学院大学，石川県
Japan Advanced Institute of Science and Technology, Hokuriku, 1–1 Asahidai, Tatsunokuchi-machi, Nomi-gun, Ishikawa-ken, 923–1292 Japan

にはこう配法のような局所的な拘束方程式を用いる方が有利なためと考えられる．従来手法 [14]〜[17] は照明条件の変化する状況下において高精度にオプティカルフロー推定するために有効な特性をそれぞれ有している．

本研究は，照明条件の変化を考慮した従来手法 [14]〜[17] の特性をすべて有する高精度なオプティカルフロー推定法の提案を目的とする．このために，まず，従来手法の特性を整理する．次に，従来手法の特性をすべて有する 3 次元投票空間を用いたオプティカルフロー推定法を提案する．最後に，モデル画像に対して本手法と従来手法のオプティカルフロー推定精度の定量的な比較実験を行い，本手法が従来手法の特性をすべて有することを評価する．

2. 照明条件の変化を考慮した従来手法の特性

Negahdaripour [17]，野村 [14]，Cornelius [15]，武川 [16] らの手法は，照明条件の変化を考慮したオプティカルフロー拘束方程式 [23]

$$E_x u + E_y v + E_t = w \qquad (1)$$

に基づきオプティカルフロー推定を行っている．ただし，時刻 t における画像中のある座標 (x, y) 上の画素を (x, y, t) とし，E_x，E_y は，それぞれ (x, y, t) における x 軸，y 軸方向の輝度値の空間的こう配を表し，E_t は，(x, y, t) における輝度値の時間的こう配を表し，w は，(x, y, t) とその対応点 $(x+\Delta x, y+\Delta y, t+\Delta t)$ の輝度値の変化量を表す．また，u，v は，それぞれオプティカルフローベクトルの x 軸，y 軸方向成分を表す．従来手法は，式 (1) のパラメータ u，v，w を推定するための付加条件として輝度値の変化の時間的拘束を用いた手法と輝度値の変化の時空間的拘束を用いた手法の二つに大別できる．

野村 [14] と Cornelius [15] らの手法は，輝度値の変化の時間的拘束を用いたものに分類できる．野村は，輝度値の流入・流出原理に基づき式 (1) を導出し，導出した拘束方程式と $N(\geqq 3)$ フレーム間においてフローの空間的変化と輝度値の変化量は等しいという付加条件を用いてフロー推定を行っている．更に，積分形式に基づく速度ベクトル場検出法を用いてノイズに対するロバスト性を考慮している．また，Cornelius は，照明条件の変化による対応点の輝度値の変化量は反射モデル [18] の拡散反射成分のみに依存すると仮定し，式 (1) を導出し，導出した拘束方程式の誤差を評価する関数を用いてフロー推定を行っている．これにより，陰影によるフレーム間の対応点の輝度変化を考慮している．

表 1　各手法の特性
Table 1　Properties of each method.

	特性					
	1	2	3	4	5	6
野村 [14]	×	-	-	○	○	-
Cornelius [15]	○	×	○	-	-	-
武川 [16]	○	○	○	×	-	-
Negahdaripour [17]	○	○	○	○	-	-

武川 [16] と Negahdaripour [17] らの手法は，輝度値の変化の時空間的拘束を用いたものに分類できる．武川は，反射モデル [18] の拡散反射成分の空間的変化だけでなく，鏡面反射成分の空間的変化も考慮し，ある画素における輝度値の時間的変化と空間的変化を関係づける拘束方程式を導出した．これにより，物体の反射率の空間的変化を考慮している．Negahdaripour は，武川の手法を光源強度の変化によるフレーム間の対応点の輝度変化を考慮したものに拡張した．

各手法の特性を表 1 に示す．表中の ○ は，発表論文中にその特性を有することを明示していることを表し，× は，発表論文中にその特性を有していないことを明示していることを表す．また，– は，これらを明示していないことを表す．表中の特性 1 から特性 6 は，それぞれ以下の特性を表す．

- 特性 1： 3 フレーム以上において u，v，w が一定でなくてもよい．
- 特性 2： 物体表面の反射率が一定でなくてもよい．
- 特性 3： 陰影によるフレーム間の対応点の輝度変化を考慮している．
- 特性 4： 光源強度の変化によるフレーム間の対応点の輝度変化を考慮している．
- 特性 5： ノイズに対するロバスト性がある．
- 特性 6： パターンの変化の激しい領域に対するロバスト性がある．

3. 3 次元投票空間を用いたオプティカルフロー推定法

従来手法は，照明条件が変化する状況下において高精度にオプティカルフロー推定を行うために有効な特性をそれぞれ有している．本研究では，表 1 に示す六つの特性をすべて有する高精度なオプティカルフロー推定法を提案する．まず特性 1 を有するために付加条

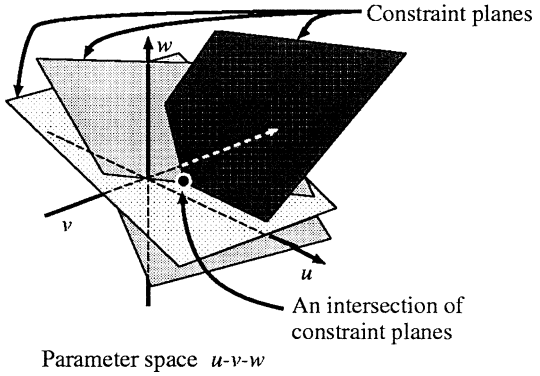

図 1　u-v-w 空間における拘束平面と交点
Fig. 1　Constraint planes in parameter space u-v-w and an intersection point.

件を設定する．次に，特性 2 から特性 5 を有するために u-v-w の 3 次元投票空間を用いる．最後に特性 6 を有するために投票可能条件を設定する．

3.1　本手法で用いる付加条件

式 (1) は，パラメータ空間 u-v-w において平面を表す．これを拘束平面と呼ぶ．画像中の 1 画素につき一つの拘束平面が得られるが，決定するパラメータが u，v，w と 3 個あるために，一つの拘束平面のみではこれらのパラメータを一意に決定することができない．そこで，「注目画素とその近傍画素の拘束平面の各パラメータは等しい」という付加条件を設定する．この付加条件により，注目画素とその近傍画素の少なくとも三つの拘束平面が平行でないならば，交点を一意に決定でき，その交点から注目画素のフロー (u, v) を推定できる（図 1）．拘束平面の各係数 E_x，E_y，E_t は 2 フレームから決定できるため，この付加条件により，拘束平面のパラメータを決定できる．したがって，本手法は特性 1 を得ることができる．

3.2　3 次元投票空間によるパラメータ u，v，w の推定

付加条件が成り立つならば，拘束平面の交点は一意に決定できるが，実際には，拘束平面の交点は次の (A) から (C) の要因により分散する．

(A) パラメータ空間 u-v-w における w の分散

輝度値 $E(x, y, t)$ は，反射モデル [16], [18] によって次式で表せる．

$$E(x,y,t) = R_a I_a + R_d \frac{I_q}{r^2}\cos\theta_1 + R_f \frac{I_q}{r^2}\cos^n\theta_2 \tag{2}$$

ただし，

I_a： 環境光の強度
I_q： 光源の強度
R_a： 物体表面の環境光の反射率
R_d： 拡散反射率
θ_1： 入射光と物体表面の法線のなす角
θ_2： 反射光と視線のなす角
r： 光源と物体表面の距離
R_f： 物体の鏡面反射率
n： ハイライトのシャープさのパラメータ

とする．$E(x, y, t)$ の次の $t+\Delta t$ フレームにおける対応点 $(x+\Delta x, y+\Delta y)$ の輝度値 $E(x+\Delta x, y+\Delta y, t+\Delta t)$ を反射モデルで表すと，

$$\begin{aligned} &E(x+\Delta x, y+\Delta y, t+\Delta t) \\ &\quad = R_a I_a' + R_d \frac{I_q'}{r'^2}\cos\theta_1' + R_f \frac{I_q'}{r'^2}\cos^n\theta_2' \end{aligned} \tag{3}$$

となる．ただし，

I_a'： 対応点における環境光の強度
I_q'： 対応点における光源の強度
θ_1'： 対応点における入射光と物体表面の法線のなす角
θ_2'： 対応点における反射光と視線のなす角
r'： 対応点における光源と物体表面の距離

ここで，式 (1) の w は，以下のように表せる [23].

$$w = \frac{1}{dt}\{E(x+\Delta x, y+\Delta y, t+\Delta t) - E(x,y,t)\} \tag{4}$$

上式に式 (2)，式 (3) を代入すると，

$$\begin{aligned} w = \frac{1}{dt}\Bigg\{ & R_a(I_a' - I_a) \\ & + R_d\left(\frac{I_q'}{r'^2}\cos\theta_1' - \frac{I_q}{r^2}\cos\theta_1\right) \\ & + R_f\left(\frac{I_q'}{r'^2}\cos^n\theta_2' - \frac{I_q}{r^2}\cos^n\theta_2\right)\Bigg\} \end{aligned} \tag{5}$$

となる．式 (5) において，空間的に変化するパラメータは r，θ_1，θ_2，R_a，R_d，R_f である．したがって，w の空間的変化量 Δw は，次式で表せる．

$$\begin{aligned} \Delta w = \frac{1}{dt}\Bigg[& \left\{(R_a+\Delta R_a)(I_a'-I_a) - R_a(I_a'-I_a)\right\} \\ & + (R_d+\Delta R_d)\left\{\frac{I_q'}{(r+\Delta r)'^2}\cos(\theta_1+\Delta\theta_1)'\right. \\ & \left. - \frac{I_q}{(r+\Delta r)^2}\cos(\theta_1+\Delta\theta_1)\right\} \end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
&- R_d \left\{ \frac{I'_q}{r'^2} \cos\theta'_1 - \frac{I_q}{r^2} \cos\theta_1 \right\} \\
&+ (R_f + \Delta R_f) \left\{ \frac{I'_q}{(r+\Delta r)'^2} \cos^n(\theta_2 + \Delta\theta_2)' \right. \\
&\left. - \frac{I_q}{(r+\Delta r)^2} \cos^n(\theta_2 + \Delta\theta_2) \right\} \\
&- R_f \left\{ \frac{I'_q}{r'^2} \cos^n \theta_2{}' - \frac{I'_q}{r^2} \cos^n \theta_2 \right\} \Bigg] \quad (6)
\end{aligned}
$$

ここで，もし，$\Delta r \to 0$，$\Delta\theta_1 \to 0$，$\Delta\theta_2 \to 0$，$\Delta R_a \to 0$，$\Delta R_d \to 0$，$\Delta R_f \to 0$ ならば，Δw は 0 となる．しかし，実際の離散化された画像において各パラメータ Δr，$\Delta\theta_1$，$\Delta\theta_2$，ΔR_a，ΔR_d，ΔR_f は，それぞれ十分大きい値をもち，Δw は 0 とならない．よって，w はパラメータ空間 u-v-w 内で分散する．

(B) パラメータ空間 u-v-w における u，v の分散

3 次元空間におけるある点 $(x, y, z)^\top$ を 2 次元平面上のある点 $(X, Y)^\top$ に投影する．$(x, y, z)^\top$ と $(X, Y)^\top$ の関係は次式で表せる．

$$
\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = f \begin{pmatrix} \frac{x}{z} \\ \frac{y}{z} \end{pmatrix} \quad (7)
$$

ただし，f はカメラの焦点距離とする．同様に，3 次元空間において点 $(x, y, z)^\top$ から移動した点 $(x', y', z')^\top$ とその点を 2 次元平面上のに投影した点 $(X', Y')^\top$ の関係は次式で表せる．

$$
\begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix} = f \begin{pmatrix} \frac{x'}{z'} \\ \frac{y'}{z'} \end{pmatrix} \quad (8)
$$

ここで，2 次元平面上のオプティカルフロー $(u, v)^\top$ は $(X', Y')^\top$ と $(X, Y)^\top$ を用いて次式で表せる．

$$
\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} \quad (9)
$$

式 (7) と式 (8) を式 (9) に代入すると，

$$
\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = f \begin{pmatrix} \frac{x'}{z'} - \frac{x}{z} \\ \frac{y'}{z'} - \frac{y}{z} \end{pmatrix} \quad (10)
$$

となる．同様に，3 次元空間中の点 $(x+\Delta x, y+\Delta y, z+\Delta z)^\top$ の 2 次元投影面上の点におけるオプティカルフロー $(u^*, v^*)^\top$ は，次式で表せる．

$$
\begin{pmatrix} u^* \\ v^* \end{pmatrix} = f \begin{pmatrix} \frac{(x+\Delta x)'}{(z+\Delta z)'} - \frac{(x+\Delta x)}{(z+\Delta z)} \\ \frac{(y+\Delta y)'}{(z+\Delta z)'} - \frac{(y+\Delta y)}{(z+\Delta z)} \end{pmatrix} \quad (11)
$$

ここで，オプティカルフローの空間的変化 $(\Delta u, \Delta v)^\top$ を次の式で定義する．

$$
\begin{aligned}
\begin{pmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} u^* \\ v^* \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (12) \\
&= f \begin{pmatrix} \frac{(x+\Delta x)'}{(z+\Delta z)'} - \frac{x+\Delta x}{z+\Delta z} \\ \frac{(y+\Delta y)'}{(z+\Delta z)'} - \frac{y+\Delta y}{z+\Delta z} \end{pmatrix} \\
&\quad - f \begin{pmatrix} \frac{x'}{z'} - \frac{x}{z} \\ \frac{y'}{z'} - \frac{y}{z} \end{pmatrix} \quad (13)
\end{aligned}
$$

物体の運動が等方的である場合，$(x, y, z)^\top$ と $(x', y', z')^\top$ の関係は次式で表せる．

$$
\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \boldsymbol{E}\boldsymbol{R} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \boldsymbol{T} \quad (14)
$$

ただし，

$$
\boldsymbol{E} = \begin{pmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & c \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{T} = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix},
$$

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{R} = &\begin{pmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
&\begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix}
\end{aligned}
$$

とする．なお，a，b，c はそれぞれ x，y，z 軸方向の拡大･縮小率を表し，α，β，γ はそれぞれ x，y，z 軸方向の回転角を表し，t_x，t_y，t_z はそれぞれ x，y，z 軸方向の並進移動量を表す．同様に，$(x+\Delta x, y+\Delta y, z+\Delta z)^\top$ における等方的な運動は，次式で表せる．

$$
\begin{pmatrix} (x+\Delta x)' \\ (y+\Delta y)' \\ (z+\Delta z)' \end{pmatrix} = \boldsymbol{E}\boldsymbol{R} \begin{pmatrix} x+\Delta x \\ y+\Delta y \\ z+\Delta z \end{pmatrix} + \boldsymbol{T} \quad (15)
$$

ただし，$((x+\Delta x)', (y+\Delta y)', (z+\Delta z)')^\top$ は，$(x+\Delta x, y+\Delta y, z+\Delta z)^\top$ の移動後の点を表す．式 (14)，式 (15) を式 (13) の右辺の各要素に代入し，$\boldsymbol{E}$, $\boldsymbol{R}$, $\boldsymbol{T}$ の各要素は空間的に変化しないので，これらを定数とすると，$(\Delta u, \Delta v)^\top$ の各要素の値は，Δx, Δy, Δz のみに依存する．もし，$\Delta x \to 0$, $\Delta y \to 0$, $\Delta z \to 0$ ならば，$(\Delta u, \Delta v)^\top$ の各要素は 0 となり，フローの空間的変化はないことになる．しかし，実際の離散化された画像において各パラメータ Δx, Δy, Δz は，それぞれ十分大きい値をもち，0 とならない．よって $(\Delta u, \Delta v)^\top$ の各要素は 0 とならず，u, v はパラメータ空間 u-v-w 内で分散する．

(C) ノイズの影響によるパラメータ空間 u-v-w における交点の分散

画像にノイズがある場合，画像中の時空間的な輝度こう配が変化する．よって，式 (1) は，

$$E'_x u + E'_y v + E'_t = w' \tag{16}$$

となる．ただし，E'_x と E'_y は，それぞれ x, y 軸方向のノイズの影響を受けた空間的な輝度こう配を表し，E'_t はノイズの影響を受けた時間的な輝度こう配，w' はノイズの影響を受けた対応点の輝度値の変化量を表す．ノイズのない理想的な場合において拘束平面の交点がある点に集中したとしても，画像にノイズを付加した場合，ノイズの影響により，各拘束平面の係数が変化することにより，交点が分散する．

特性 2 から特性 4 は (A) による交点の分散を考慮することにより得られ，特性 5 は (C) による交点の分散を考慮することにより得られる．よって，(A) から (C) の原因により，拘束平面の交点が分散する状況下においてパラメータ u, v, w を高精度に求められれば特性 2 から特性 5 を得ることができる．オプティカルフロー拘束方程式の交点が分散する状況下において高精度に拘束方程式のパラメータを推定する手法として M 推定 [24]，LMedS 推定 [25]，投票法 [26] があるが，今回は，フローを求めるための繰返し計算の必要がなく，比較的高精度にパラメータ推定が可能な投票法を用いることとする．投票法を用いたオプティカルフロー推定法として，u-v 投票空間を用いた手法 [19]〜[22] が提案されている．この手法は，まず，速度空間中の拘束直線の交点をある幅をもつセルから構成される u-v 投票空間に投票する．投票空間内の最大投票値を得たセルの座標をフロー $(u, v)^\top$ とする．本手法では，u-v 投票空間を u-v-w に拡張した 3 次元投票空間を用いる．u, v, w の分散が投票空間のあるセル内に集中すれば，そのセルの投票値が最大投票値となり，分散した拘束平面の交点からフロー $(u, v)^\top$ を高精度に決定できる（図 2）．したがって，本手法は特性 2 から特性 5 を有することが可能となる．

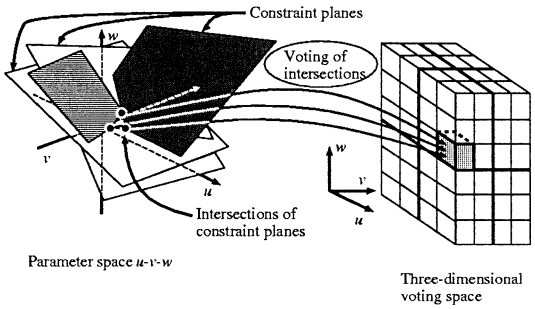

図 2　3 次元投票空間への交点の投票
Fig. 2　Voting of intersection to three-dimensional voting space.

3.3　投票に用いる拘束平面の投票可能条件

オプティカルフローの成立条件を満たさない画素の拘束平面の交点を投票によるオプティカルフロー推定に考慮した場合，オプティカルフロー推定精度が低下する可能性がある．そこで，オプティカルフローの成立条件を満たさない画素の拘束平面を投票可能条件により除外する．

投票可能条件 1：　同じ物体の注目画素と近傍画素は輝度値の類似性がある．

フローを決定する注目画素を含む物体とそれ以外の物体は動きが大きく異なる場合がある．この場合，注目画素と異なる物体の拘束平面を考慮してオプティカルフロー推定すると推定精度が著しく低下する [20]．そこで，注目画素と同じ物体の画素の輝度値は，注目画素の輝度値とほぼ等しいと仮定し，条件 1 により，注目画素を含む物体の画素の拘束平面のみを投票に用いる．

投票可能条件 2：　輝度値は時空間的に滑らかに変化する．

オプティカルフロー拘束方程式は，輝度値が時空間的に滑らかに変化する場合に成り立つので，条件 2 を用いて，輝度値が時空間的に滑らかに変化する画素の拘束平面のみを投票に用いる．

投票可能条件 3：　空間的な輝度こう配は時間的に滑らかに変化する．

オプティカルフロー拘束方程式は，空間的な輝度こう

配の時間変化がない場合に成り立つので，条件 3 を用いて，空間的な輝度こう配が時間的に滑らかに変化する画素の拘束平面のみを投票に用いる．

投票可能条件 1 を式で表すと

$$|E(x,y,t)-E(a,b,t)|\leqq Th_1 \tag{17}$$

となる．ただし，$E(a,b,t)$ は，時刻 t における注目画素 (a,b) の輝度値，$E(x,y,t)$ は，(a,b) を中心とした方形領域内の画素 (x,y) における輝度値，Th_1 は，投票可能条件 1 におけるしきい値を表す．

投票可能条件 2 を式で表すと

$$\left.\begin{aligned}|E_x(x,y,t)|\leqq Th_2\\ |E_y(x,y,t)|\leqq Th_2\\ |E_t(x,y,t)|\leqq Th_2\end{aligned}\right\} \tag{18}$$

となる．ただし，$E_x(x,y,t)$，$E_y(x,y,t)$，$E_t(x,y,t)$ は，それぞれ $E(x,y,t)$ の x，y，t による微分を表し，Th_2 は，投票可能条件 2 におけるしきい値を表す．

投票可能条件 3 を式で表すと

$$\left.\begin{aligned}|E_x(x,y,t)-E_x(x,y,t+\Delta t)|\leqq Th_3\\ |E_y(x,y,t)-E_y(x,y,t+\Delta t)|\leqq Th_3\end{aligned}\right\} \tag{19}$$

となる．ただし，Th_3 は，投票可能条件 3 におけるしきい値を表す．

式 (17) から式 (19) をすべて満たす画素の拘束平面のみ投票に用いる．投票可能条件を用いることにより，パターンの変化の激しい物体境界領域の拘束平面を除外することが可能となる．したがって，本手法は特性 6 を有することができる．

3.4 重み関数による投票値の重み付け

投票空間は離散化されているために，拘束平面の交点の離散化誤差が生じる可能性がある．そこで，投票空間中の任意の投票値 $f(u,v,w)$ に対して重み付けを行う．

$$\begin{aligned}&f'(u,v,w)\\ &\quad=f(u,v,w)g(u-u_{med},v-v_{med},w-w_{med})\end{aligned} \tag{20}$$

ただし，$(u_{med},v_{med},w_{med})$ を投票空間における最大投票値の座標とし，$g(u-u_{med},v-v_{med},w-w_{med})$ を重み関数とする．次に重み付けされた値 $f'(u,v,w)$ の重心 (u_c,v_c,w_c)

$$(u_c,v_c,w_c)$$

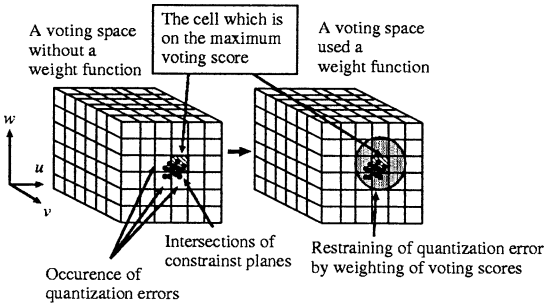

図 3　投票値の重み付けにより効果
Fig. 3　The effectiveness by weighting of voting scores.

$$=\left(\frac{\sum_s uf'}{\sum_s f'},\frac{\sum_s vf'}{\sum_s f'},\frac{\sum_s wf'}{\sum_s f'}\right) \tag{21}$$

を求め，(u_c,v_c) を求めるフローとする．ただし，

$$f'=f'(u,v,w) \tag{22}$$

$$\sum_s=\sum_{u=-V/2}^{V/2}\sum_{v=-V/2}^{V/2}\sum_{w=-V/2}^{V/2} \tag{23}$$

とする．ここでの V は投票空間のそれぞれ u 軸，v 軸，w 軸の範囲とする．ここでは重み関数として，ガウス関数

$$\begin{aligned}&g(u-u_{med},v-v_{med},w-w_{med})\\ &\quad=\frac{1}{2\pi\sigma^2}e^{\left\{-\frac{(u-u_{med})^2+(v-v_{med})^2}{2\sigma^2}-\frac{(w-w_{med})^2}{2S\sigma^2}\right\}}\end{aligned} \tag{24}$$

を用いる．ただし，u，v 軸と w 軸はスケールが異なるために，式 (24) の係数 S を用いて，u，v の分散 σ^2 に対して w の分散値を決定する．最大投票値の座標を中心に投票値の重み付けを行い，その重心を求めるフローとすることより，最大投票値周辺の投票値分布を考慮し，離散化誤差の影響を抑える（図 3）．

4. 本手法の特性評価実験

本手法が特性 1 から特性 6 を有することを評価するために，以下の実験を行った．なお，各手法におけるフローを求めるための各パラメータは，実験的に最良のものとした．

4.1 反射率が異なる物体に対するオプティカルフロー推定精度の比較実験（実験 1）

本手法が以下の特性を有することを示すために，反

射率が異なることにより，フレーム間で輝度値の変化量が異なる物体のモデル画像に対して，本手法と従来手法のオプティカルフロー推定精度の比較実験を行った．

特性 1： 3 フレーム以上において，u，v，w が一定でなくてもよい．

特性 2： 物体表面の反射率が一定でなくてもよい．

特性 6： パターンの変化の激しい領域に対するロバスト性がある．

この実験に用いたモデル画像を図 4 に示す．実験に用いた画像は，画像サイズが 128×128 [pixels]，量子化レベルが 8 [bit/pixel] で，特性 6 を評価するために物体と背景を設定し，物体と背景の境界でパターンの変化の激しい領域が生じるようにし，物体の運動は右に 2 [pixels/frame] 並進運動するようにした．また，特性 2 を評価するために，物体の外側と内側の反射率が異なることにより，物体の外側と内側では，フレーム間で輝度値の変化量が異なるものとした．このため，物体の外側の輝度値は 5 [intensity/frame] 低下し，物体の内側の輝度値は 10 [intensity/frame] 低下するものとした．野村の手法以外は，1 フレームと 2 フレームのみを用いた．

オプティカルフロー推定精度を定量的に評価するために，ここでは，誤差の平均 $\bar{e}$

$$\bar{e} = \frac{1}{M}\frac{1}{N}\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1}||\tilde{\boldsymbol{f}}_{xy} - \hat{\boldsymbol{f}}_{xy}|| \qquad (25)$$

を用いる．ただし，M，N はそれぞれ画像の縦，横のサイズを表し，$\tilde{\boldsymbol{f}}_{xy}$ は，画素 (x, y) における正解のフローを表し，$\hat{\boldsymbol{f}}_{xy}$ は，画素 (x, y) における推定したフローを表す．ここでは，$\bar{e}$ の値が小さいほどフロー推定精度が向上したと評価する．なお，投票空間の単位セルの幅の決定は，交点の分散の許容量とフローの空間解像度のトレードオフがあるため，セルの幅の最小単位を 0.1×10^{-2} とし，そこから徐々に幅を広げ，$\bar{e}$ が最小となる幅とした．ここでは $V = 20$，投票空間の単位セルの幅を 0.5×10^{-2} とした．

正解のフローと各手法によって推定したフローを図 5 に示す．また，各手法における $\bar{e}$ を表 2 に示す．図 5 において，本手法以外の手法は，物体と背景の境界でパターンの変化の激しい領域においてエラーフローが目立つ．また，フレーム間で輝度値の変化量が異なる領域においても，エラーフローが目立つ．従来手法に比べ，本手法によるオプティカルフロー推定結果は，良好であることがわかる．表 2 において，本手法における $\bar{e}$ の値が最小となり，最も良いフロー推定結果を得た．この実験では，フロー推定手法が，特性 1，2 及び 6 のいずれか一つでも満たさないと大きな誤差を生じるため，本手法はこれら三つの特性を良好に有していると考えられる．

4.2 陰影と光源強度の変化が生じるモデル画像に対するオプティカルフロー推定精度の比較実験（実験 2）

本手法が以下の特性を有することを評価するために，光源強度の変化，または陰影の影響により，フレーム間の対応点の輝度値の変化する物体のモデル画像に対して，本手法と従来手法のオプティカルフロー推定精度の比較実験を行った．

特性 3： 陰影によるフレーム間の対応点の輝度変化を考慮している．

特性 4： 光源強度の変化によるフレーム間の対応点の輝度変化を考慮している．

ここでは，特性 3 を評価するために，点光源下を物体が運動する場合，陰影の影響により，フレーム間の対応点の輝度変化が生じる画像を用いる．物体の運動は，並進，拡大，縮小，回転の 4 種類を考える．また，特性 4 を評価するために，光源強度の変化により，フレーム間の対応点の輝度変化が生じる画像を用いる．

実験に用いた画像は，画像サイズが 125×108[pixels],

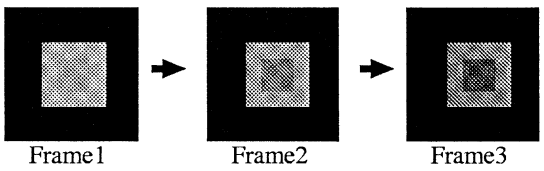

図 4 実験 1 において用いた画像フレーム
Fig. 4 The image sequence used in experiment 1.

表 2 実験 1 における各手法の誤差の平均 $\bar{e}$
Table 2 The mean of error $\bar{e}$ of each method in experiment 1.

手法	$\bar{e}$
本手法	5.13×10^{-2}
野村 [14]	3.38×10^{-1}
Cornelius [15]	2.83×10^{-1}
武川 [16]	1.98×10^{-1}
Negahdaripour [17]	1.93×10^{-1}

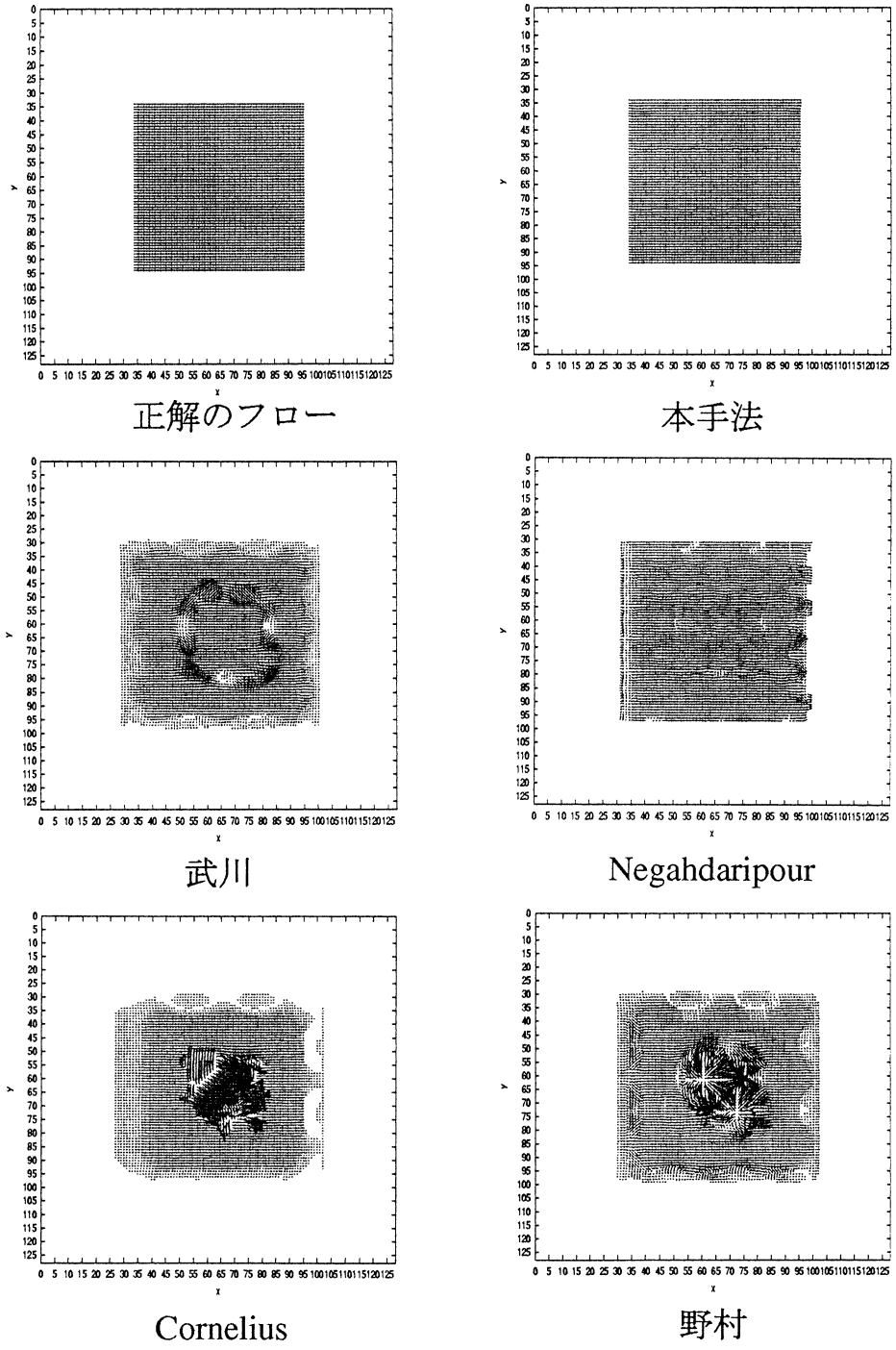

図５　実験１における正解のフローと各手法によって推定したフロー
Fig. 5　Correct flow and estimated flow by using each method in experiment 1.

量子化レベルが 8 [bit/pixel] で，光源は，向かって右上手前に位置し，物体に向けて光を照射しているものとした．図 6 のモデル画像を第 1 フレームとし，表 3 に示す運動，あるいは，光源強度の変化を与えた画像を第 2 フレームとした．なお，ここでは $V = 20$，投票空間の単位セルの幅を 1.0×10^{-2} とした．

実験結果を表 4 に示す．実験に用いたすべての画像において，従来手法に比べ，本手法ではフロー推定精度が向上した．この要因は本手法が特性 3 と特性 4 を有するためと考えられる．

4.3 ノイズを付加したモデル画像に対するオプティカルフロー推定精度の比較実験（実験 3）

本手法が以下の特性を有することを評価するために，ノイズを付加したモデル画像に対して，本手法と従来手法のオプティカルフロー推定精の比較実験を行った．

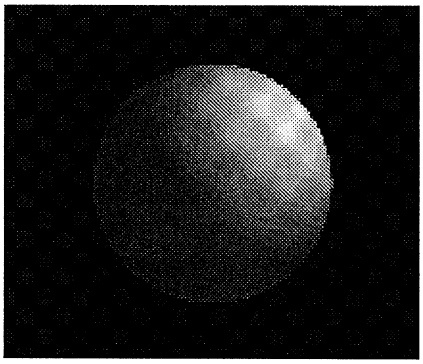

図 6　実験 2 において用いたモデル画像
Fig. 6　A model image used in experiment 2.

表 3　実験 2 において用いた各モデル画像の内容
Table 3　Contents of each model image used in experiment 2.

画像	物体の運動	光源強度の変化
光源強度の変化	なし	徐々に弱く
並進	右に 2[pixels/frame]	なし
拡大	1.05[times/frame]	なし
縮小	0.95[times/frame]	なし
回転	右に 2[deg./frame]	なし

特性 5：　ノイズに対するロバスト性がある．

特性 5 を評価するために，生起確率 $P(n)$ が

$$P(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{n^2}{2\sigma^2}} \tag{26}$$

で与えられるガウスノイズを実験 2 で用いたモデル画像 $E(x, y, t)$ に付加した画像 $E'(x, y, t)$

$$E'(x, y, t) = E(x, y, t) + n \tag{27}$$

を用いる．ノイズの付加量の尺度として，$PSNR$

$$PSNR[\mathrm{dB}] = 20 \log \frac{255}{\sigma} \tag{28}$$

を用いた．なお，ここでは $V = 20$，投票空間の単位セルの幅を 2.0×10^{-2} とした．

実験結果を図 7 に示す．図 7 より，従来手法に比べ，本手法ではオプティカルフロー推定精度が向上したことがわかる．この要因は本手法が特性 5 を有するためと考えられる．

5. むすび

照明条件が変化する状況下において，高精度にオプティカルフロー推定を行うために有効な従来手法の特性をすべて有する手法を提案した．まず，照明条件の変化を考慮した従来のオプティカルフロー推定法の特性を整理した．次に，拘束方程式のパラメータを決定するために，3 次元投票空間を用いたオプティカルフロー推定法を提案した．最後に，本手法が特性 1 から特性 6 までを有することを評価するために，物体の反射率が一定でないモデル画像，光源強度の変化と陰影による対応点の輝度値の変化が生じるモデル画像，また，それらの画像にノイズを付加したモデル画像に対して，従来手法と本手法のオプティカルフロー推定精度の比較実験を行った．実験の結果，すべての画像において，従来手法に比べ，本手法を用いることにより，オプティカルフロー推定精度が向上した．この結果，本手法は特性 1 から特性 6 までを有していると考えら

表 4　実験 2 における各手法の誤差の平均 $\bar{e}$
Table 4　The mean of error $\bar{e}$ of each method in experiment 2.

画像	手法				
	本手法	野村	Cornelius	武川	Negahdaripour
並進	9.70×10^{-2}	2.18×10^{-1}	1.76×10^{-1}	1.63×10^{-1}	2.38×10^{-1}
拡大	1.43×10^{-1}	2.44×10^{-1}	2.39×10^{-1}	1.93×10^{-1}	2.06×10^{-1}
縮小	1.13×10^{-1}	2.01×10^{-1}	1.54×10^{-1}	1.42×10^{-1}	2.00×10^{-1}
回転	1.03×10^{-1}	1.21×10^{-1}	1.57×10^{-1}	1.32×10^{-1}	1.20×10^{-1}
光源強度の変化	9.80×10^{-4}	4.70×10^{-2}	2.02×10^{-2}	4.53×10^{-2}	5.89×10^{-3}

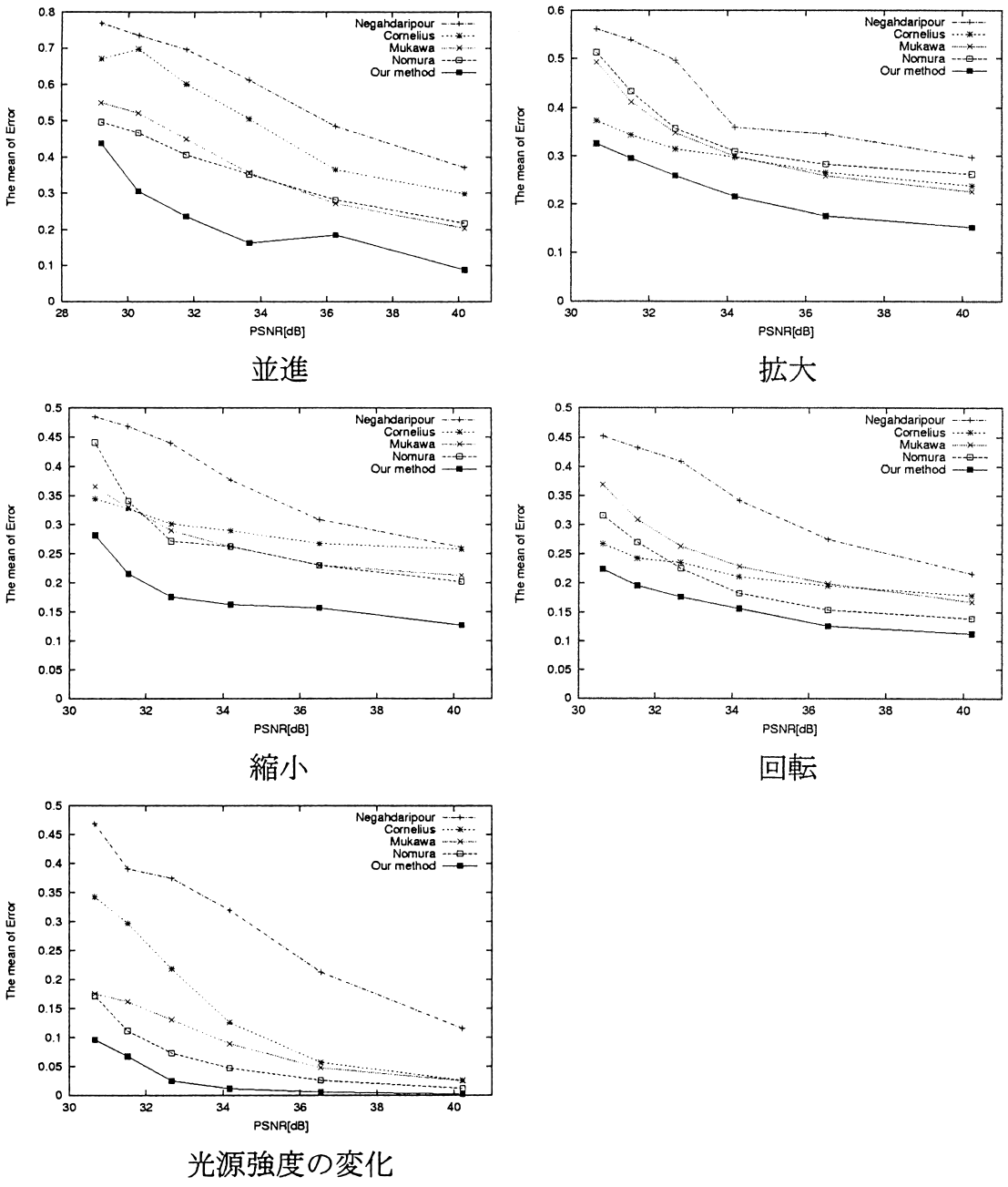

図7　実験3における各手法の誤差の平均 $\bar{e}$
Fig. 7　The mean of error $\bar{e}$ of each method in experiment 3.

れる．今後は，本手法を実画像へ適用し，本手法の有効性を評価する．

文　献

[1] J.L. Barron, D.J. Fleet, and S.S. Beauchemin, “Performance of optical flow techniques,” Int. J. Computer Vision, vol.12, no.1, pp.185–203, 1994.

[2] S.S. Beauchemin and J.L. Barron, “The computation of optical flow,” ACM Computing Surveys, vol.27, no.3, pp.433–467, 1996.

[3] B.K.P. Horn and B.G. Schunck, “Determining optical flow,” Artif. Intell., vol.17, pp.185–203, 1981.

[4] B. Lucas and T. Kanade, “An iterative image registration technique with an application to stereo vision,” Proc. DARPA Image Understanding Workshop, pp.121–130, 1981.
[5] E.H. Adelson and J.R. Bergen, “Spatiotemporal energy models for the perception of motion,” J. Opt. Soc. Am., vol.A2, no.2, pp.284–299, 1985.
[6] D.J. Fleet and A.D. Jepson, “Computation of component image velocity from local phase information,” IJCV, vol.5, no.1, pp.77–104, 1990.
[7] D.J. Heeger, “Optical flow using spatiotemporal filters,” IJCV, vol.1, pp.279–302, 1988.
[8] S. Geman and D. Geman, “Stochastic relaxation, gibbs distributions, and the bayesian restoration of images,” PAMI, vol.6, no.6, pp.721–741, 1984.
[9] B.G. Schunck, “Image flow segmentation and estimation by constraint line clustering,” PAMI, vol.11, no.10, pp.1010–1027, 1989.
[10] M.J. Black and A. Jepson, “Estimating optical flow in segmented images using variable-order parametric models with local deformations,” Technical Report SPL-94-053, Xero. Sys. and Prac. Lab., 1994.
[11] M.J. Black, Robust Incremental Optical Flow, PhD Thesis, Yale University, 1992.
[12] J.J. Little, Accurate Early Detection on Discontinuities, In Vision Interface, pp.2–7, 1992.
[13] M. Ogata and T. Sato, “Motion-detection model with two stages: Spatiotemporal filtering and feature matching,” J. Opt. Soc. Am., vol.A9, no.3, pp.377–387, 1992.
[14] 野村厚志，三池秀敏，古賀和利，“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,” 信学論（D-II），vol.J76-D-II, no.9, pp.1977–1986, Sept. 1993.
[15] N. Cornelius and T. Kanade, “Adapting optical-flow to measure object motion in reflectance and X-ray image sequences,” ACM SIGGRAPH/SIGART Interdisciplinary Workshop on Motion: Representation and Perception, pp.50–58, 1983.
[16] 武川直樹，“陰影モデルに基づく画像の動き場の推定,” 信学論（D-II），vol.J74-D-II, no.8, pp.1004–1011, Aug. 1991.
[17] S. Negahdaripour and C. Yu, “A generalized brightness change model for computing optical flow,” Proc. ICCV, pp.2–11, 1993.
[18] J.D. Foley, A. van Dam, S.K. Feiner, and J.F. Hughes, Computer Graphics: Principle and Practice, second edition, Addison-Wesley, 1990.
[19] 井関　徹，小谷一孔，“速度空間と動きの連続性に基づいた物体遮蔽判定法に関する研究,” 情処研技 CVIM, CVIM108-9, pp.63–70, 1997.
[20] 今村弘樹，剣持雪子，小谷一孔，“フロー外挿による遮蔽，発生領域のオプティカルフロー推定,” 信学技報，CS98-123, 1998.
[21] 千葉昌孝，小沢慎治，“明度拘束式のモードによるオプティカルフローの検出,” テレビ誌，vol.45, no.10, pp.1199–1206, 1991.
[22] 井宮　淳，岩脇圭介，“ランダム標本化と投票によるオプティカルフローの計算,” 情処研技 CVIM, CVIM119-9, pp.63–70, 1999.
[23] H. Imamura, Y. Kenmochi, and K. Kotani, “Estimation of optical flow in a three-dimensional voting space for brightness change,” Proc. SPIE, Intelligent Robots and Computer Vision XIX: Algorithms, pp.328–339, Techniques, and Active Vision, 2000.
[24] 梅山伸二，“ロバスト統計の考え方に基づいた正則化における不連続の検出について,” 信学技報，PRMU95-217, 1996.
[25] 梅山伸二，“ロバスト回帰に基づく多重オプティカルフロー推定について,” 信学技報，PRMU96-108, 1996.
[26] 森本正志，尺長　健，赤松　茂，末永康仁，“可変フィルタによるハフ変換の高精度化,” 信学論（D-II），vol.J75-D-II, no.1, pp.21–30, Jan. 1992.

（平成 12 年 12 月 11 日受付，13 年 6 月 11 日再受付）

今村　弘樹　（学生員）

平 9 創価大・工・情報システム卒．現在，北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程に在学中．動画像解析の研究に従事．情報処理学会会員．

剣持　雪子　（正員）

平 7 千葉大大学院修士課程了．平 10 同大大学院博士課程了．現在，北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手．工博．ディジタル幾何学，ディジタル画像解析，コンピュータビジョンの研究に従事．情報処理学会会員．

小谷　一孔　（正員）

昭 58 長岡技科大修士課程了．昭 58 日立製作所家電研究所に勤務．平 2 長岡技科大博士課程了．同年長岡技術科学大学工学部助手．平 3 同助教授．現在，北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教授．工博．画像の高能率符号化，画質の評価モデル，表情解析，CG の研究に従事．IEEE，映像メディア学会，日本顔学会各会員．