多重解像度解析を用いたオプティカルフロー推定の検討

安　達　栄　輔[†,☆]　堀　口　　進[††]

本論文では，時系列画像の多重解像度解析によるオプティカルフロー推定法について議論する．多重解像度解析は，勾配法において発生する時間的エイリアシングの影響を除去するために用いられる．まず，各解像度画像におけるオプティカルフロー推定において，オプティカルフローの拘束式をフィッティングさせる局所領域の大きさをどのように設定すべきかの指針を与える．次に，各解像度間のオプティカルフロー統合法についても議論する．オプティカルフロー統合法は，画像歪曲型と解像度選択型に分類される．画像歪曲型と解像度選択型を比較したところ，画像歪曲型が速度の大きい場所特に動きの境界において解像度選択型よりも有利であることが分かった．また，解像度選択型において，多重解像度処理を各解像度毎の処理に並列化し，その有効性を示した．

Investigation on optical flow estimation using multiresolution analysis

Eisuke Adachi[†,☆] and Susumu Horiguchi[††]

This paper discusses optical flow estimation method using multiresolution analysis of image sequence. The multiresolution analysis is used to eliminate the time aliasing in gradient based method. This paper presents a guideline how to ajust a size of local region that constraint equation of optical flow is fit in optical flow estimation of each resolution image. We also discuss two optical flow unification methods; *Image Warping type* and *Resolution Selection type*. It is found that *Image Warping type* is more accurate than *Resolution Selection type* where speed is large particularly on motion boundary. In *Resolution selection type*, multiresolution processes are parallelized to different resolution processes to reduce computation times. It is shown that the parallelization can effectively reduce the computation times.

1. はじめに

時系列画像から推定されるオプティカルフローは，画像の領域分割や動物体の抽出に重要な特徴量である．画像の時空間輝度勾配とオプティカルフローの間に成り立つ一次方程式を用いる勾配法[1),2)]は，画像の局所テンプレートマッチングに基づくブロックマッチング法と比べて計算時間が短いという長所があり，現在までに様々な様式の手法が提案されている．しかし，勾配法は，オプティカルフローベクトルの絶対値が大きくなると時間的なエイリアシングによって正確なフローが推定できなくなるという問題があり，これは空間的ローパスフィルタ（以下 LPF）を施すことによって解決できることが知られている[3),4)]．また空間的 LPF を時系列画像に施すと得られるオプティカルフローの解像度が低くなってしまうことから，ガウシアンピラミッド[5),6)]や離散ウェーブレット変換による多重解像度解析を用いた粗密戦略 (coarse-to-fine strategy)[7)~10)]が提案されている．

勾配法は，時系列画像の次空間輝度勾配とオプティカルフローの間に成り立つ拘束式（オプティカルフローの拘束式）をある局所領域においてフィッティングさせることによってオプティカルフローを求める方法である．一般的に，オプティカルフローの拘束式をフィッティングさせる局所領域の大きさをどのように選択するかが一つのテーマになっている．本論文では，まずこの局所領域の大きさを，多重解像度画像の各解像度においてどのように決めたら良いのかという問題に対して，時系列画像に加えられた雑音の観点から一つの指針を示す．

次に，多重解像度画像を用いたオプティカルフロー推定法において，各解像度で求めたオプティカルフローの統合法に関して検討を行う．各解像度間でのオプティカルフロー統合法は，主に二種類ある．一つ目は，解

† 北陸先端科学技術大学院大学
Japan Advanced Institute of Science and Technology
☆ 現在，産業技術総合研究所
Presently with National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
†† 東北大学
Tohoku University

像度の低い画像で推定されたオプティカルフローに基づいて解像度の高い画像を歪曲させて，高い解像度における動きの大きさを小さくし，徐々に画像の解像度を高くしながら動きの細部を推定していく手法である．二つ目は，各解像度画像から推定されたオプティカルフローの内，各位置において最適と思われる解像度で推定されたものを選択する手法である．ここで，前者を画像歪曲型（Image Warping type : IW）後者を解像度選択型（Resolution Selection type : RS）と呼ぶことにする．本論文では，多重解像度画像を用いたオプティカルフロー推定法において，画像歪曲型及び解像度選択型の性能を比較する．このとき，解像度選択型では，多重解像度処理を各解像度毎の処理に並列化できることを示す．

第 2 節では，雑音の振る舞いから，各解像度毎のオプティカルフローの拘束式フィッティングさせる局所領域の大きさを決める指針を示し，第 3 節でその評価を行う．第 4 節では，多重解像度解析を用いたオプティカルフロー推定法を述べる．第 5 節では，オプティカルフローの精度について画像歪曲型と解像度選択型の比較を行う．第 6 節では，オプティカルフロー計算時間について画像歪曲型と解像度選択型の比較を行う．また，解像度選択型を並列計算機で実行し，その性能を評価する．

2. 各解像度における局所領域の大きさの決定

2.1 オプティカルフローの推定

オプティカルフローを推定するとは，画像内のある局所領域に着目したとき，次式に示す J を最小化する $\mathbf{v}$ を見つけることである．

$$J = \sum_{\mathbf{u}\in\Omega} \epsilon(\mathbf{u},\mathbf{v})^2 \tag{1}$$
$$\epsilon(\mathbf{u},\mathbf{v}) = I_1(\mathbf{u}+\mathbf{v}) - I_0(\mathbf{u})$$

但し，I_1 は現フレーム，I_0 は前フレームにおける画像の輝度値を表す．また，座標 $\mathbf{u}$ の原点は局所領域の中心であり，Ω は着目する局所領域内に属する座標の集合を表す．各解像度におけるオプティカルフロー計算は，異なる遮断周波数 $\omega_l(l = 0, 1, ..., L)$ を持つ空間的ローパスフィルタ (LPF) 群を施して得られた多重解像度時系列画像 I_l に対して，式 (1) を最小化することによって行う．

ここで，局所領域 Ω の大きさを，各解像度レベル毎にどのように設定するかという問題がでてくる．以下に時系列画像に加えられた雑音が各解像度画像を生成するときに使用する空間的ローパスフィルタ (LPF) によって，その共分散どうなるかを調べることにより，Ω の大きさの設定の指針を示す．

2.2 空間的ローパスフィルタ（LPF）適用時における雑音の共分散

ある局所領域 Ω における真の動きベクトルを $\bar{\mathbf{v}}$ とする．このとき，時系列画像に雑音が加えられていた場合や局所領域内で動きが一定でない場合，次式に示す残差が発生する．

$$\bar{J} = \sum_{\mathbf{u}\in\Omega} \epsilon(\mathbf{u},\bar{\mathbf{v}})^2 \tag{2}$$

ここで，$\delta(\mathbf{u}) = \epsilon(\mathbf{u},\bar{\mathbf{v}})$ と置き，$\delta(\mathbf{u})$ は，各位置 $\mathbf{u}$ において平均値 $E\{\delta\} = 0$，分散 $E\{\delta^2\} = \sigma^2$ のガウス分布に従って生成されると仮定する．また，各位置 $\mathbf{u}_i$，$\mathbf{u}_j$ 間 $(i \neq j)$ での δ の共分散は $E\{\delta(\mathbf{u}_i)\delta(\mathbf{u}_j)\} = 0$ とする．ここで雑音成分 δ は，真の時系列画像 $\bar{I}$ に加えられた雑音とみなすことができる．従って，時系列画像 I に空間的 LPF を施すと，雑音 δ も同様にフィルタリングされることになる．空間的 LPF を施された雑音成分 n_δ は，次式で表される．

$$n_\delta(\mathbf{u}) = \int_{\mathbf{m}\in\Gamma} h(\mathbf{u}-\mathbf{m})\delta(\mathbf{m})d\mathbf{m} \tag{3}$$

但し，$h(\mathbf{m})$ はフィルタの伝達関数であり，$\Gamma = [-\infty,\infty]\times[-\infty,\infty]$ としたとき，$\int_{\mathbf{m}\in\Gamma} h(\mathbf{m})^2 d\mathbf{m}$ は零でない有限の値を持つとする．フィルタを施された雑音 n_δ の位置 $\mathbf{u}_i$ における平均 M_i は次式となる．

$$\begin{aligned} M_i &= E\{n_\delta(\mathbf{u}_i)\} \\ &= \int_{\mathbf{m}\in\Gamma} h(\mathbf{u}_i-\mathbf{m})E\{\delta(\mathbf{m})\}d\mathbf{m} \\ &= 0 \end{aligned} \tag{4}$$

フィルタを施された雑音 n_δ の位置 $\mathbf{u}_i$，$\mathbf{u}_j$ における分散共分散 R_{ij} は次式となる．

$$\begin{aligned} R_{ij} &= E\{n_\delta(\mathbf{u}_i)n_\delta(\mathbf{u}_j)\} \\ &= \int_{\mathbf{m}\in\Gamma}\int_{\mathbf{m}'\in\Gamma} h(\mathbf{u}_i-\mathbf{m})h(\mathbf{u}_j-\mathbf{m}') \\ &\quad \times E\{\delta(\mathbf{m})\delta(\mathbf{m}')\}d\mathbf{m}d\mathbf{m}' \\ &= \sigma^2 \int_{\mathbf{m}\in\Gamma} h(\mathbf{u}_i-\mathbf{m})h(\mathbf{u}_j-\mathbf{m})d\mathbf{m} \end{aligned} \tag{5}$$

ここで，$\mathbf{y} = \mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i$ と置き，以下のように R_{ij} を $\mathbf{y}$ の関数として表すと次式となる．

$$R(\mathbf{y}) = \sigma^2 \int_{\mathbf{m}\in\Gamma} h(\mathbf{m})h(\mathbf{y}+\mathbf{m})d\mathbf{m} \tag{6}$$

式 (6) からわかることは，フィルタの伝達関数の形状によってはフィルタを施された雑音 n_δ の各位置間で共分散行列が零にならないことである．これは，最小二乗法における前提条件に反し，推定に誤差が生じる．どの程度の誤差が生じるかは，次式に示す信号成分のパワー P_s に対する雑音の共分散 $R(\mathbf{y})$ の比 r_s で見積

もることができると考えられる．

$$r_s = \frac{R}{P_s} = \frac{P_n}{P_s} r \tag{7}$$

但し，$P_n(=R(\mathbf{0}))$ はフィルタリングされた雑音 n_δ の分散，r は次式に示す h の正規化自己相関関数である．

$$r(\mathbf{y}) = \frac{R(\mathbf{y})}{R(\mathbf{0})} \tag{8}$$

ここで，$r(\mathbf{y})$ は $\mathbf{y} = \mathbf{0}$ で最大値 $r(\mathbf{0}) = 1$ を示し，$h(\mathbf{m})$ の台が有限の場合 $r(\mathbf{y})$ も有限の台を持つ．また，$h(\mathbf{m})$ の台が有限でない場合，$\mathbf{y} \to \infty$ のとき $r(\mathbf{y}) \to 0$ となる．

一般的に，式 (7) における雑音と信号のパワーの比 P_n/P_s は，信号の周波数成分の分布の仕方によって変化する．例えば，信号がローパスフィルタの遮断周波数以上の周波数成分を持たない場合，信号のパワー P_s は変化せず，雑音のパワー P_n のみが減少することになる．逆に，遮断周波数以上の周波数の信号成分を持つ場合，ローパスフィルタによって P_s も減少する．ここでは簡単のため，信号は雑音とほぼ同じ周波数成分を持ち，ローパスフィルタをかけても P_n/P_s が変化しないと仮定する．すると，r_s は r の大きさに支配的になる．以下，r を考える．フィルタの伝達関数を次のように定義する．

$$h_a(\mathbf{m}) = \frac{1}{a^2} h\left(\frac{\mathbf{m}}{a}\right) \tag{9}$$

但し，伝達関数のスケール a はフィルタの遮断周波数 ω に反比例する値である．h_a の正規化自己相関 r_a は次式のようになる．

$$r_a(\mathbf{y}) = r\left(\frac{\mathbf{y}}{a}\right) \tag{10}$$

ここで，ある関数 $f(\mathbf{x})$ の広がりを次式に示す標準偏差 σ で表す．

$$\sigma = \sqrt{\frac{\int \mathbf{x}^T \mathbf{x} f(\mathbf{x}) d\mathbf{x}}{\int f(\mathbf{x}) d\mathbf{x}}} \tag{11}$$

関数 $r(\mathbf{y})$ の広がりを σ_r としたとき，$r_a(\mathbf{y})$ の広がり σ_a は次式となる．

$$\sigma_a = a\sigma_r \tag{12}$$

これは，a に比例して r_a の広がりが大きくなることを意味する．従って，局所領域から任意に取り出した標本間において，雑音の共分散値の期待値が a が増大するに従って高くなる．これに対処するためには，画像の空間方向を $\mathbf{u}' = \mathbf{u}/a$ のようにスケーリングし直すか，局所領域の大きさを次式のように a に比例するように調節することが必要となる．

$$\Omega_a = [-an, an] \times [-an, an] \tag{13}$$

3. ローパスフィルタと局所領域及びオプティカルフロー推定誤差の関係の評価

3.1 実験方法

式 (2) に示すフレーム間でのマッチング誤差の原因として，時系列画像に加えられている雑音を仮定した場合と局所領域内での動きの変動によると仮定した場合に対して実験を行い，空間的 LPF の遮断周波数と局所領域のサイズ，動きベクトル推定誤差の間の関係を調べる．

オプティカルフローの推定法としては，式 (1) の代わりに次式を使う．

$$J = \sum_{\mathbf{u}\in\Omega} w(\mathbf{u}) \epsilon(\mathbf{u}, \mathbf{v})^2 \tag{14}$$

重み関数 w としては，局所領域 Ω の中心を $\mathbf{x}$ としたとき，標準偏差 σ_w のガウス関数を用いた．局所領域 Ω は，このガウス関数の標準偏差 σ_w に応じて，次のように設定した．

$$\Omega = [-K\sigma_w, K\sigma_w] \times [-K\sigma_w, K\sigma_w] \tag{15}$$

但し，K は適当な定数である．標準偏差 σ_f のガウス関数を畳み込むことで空間的 LPF を時系列画像に施し，勾配法の一種である Lucas と Kanade の方法[2] を用いて式 (14) を最小化する $\mathbf{v}$ を各位置 $\mathbf{x}$ に対して求めた．ここで，σ_f は 2.2 節における a に対応する．また，オプティカルフロー推定誤差として，以下に示す角度誤差[2] を用いる．

$$\phi_E = \cos^{-1} \frac{\mathbf{v}_e^T \mathbf{v}_c}{|\mathbf{v}_e||\mathbf{v}_c|} \tag{16}$$

但し，$\mathbf{v}_e = (u_e, v_e, 1)^T$，$\mathbf{v}_c = (u_c, v_c, 1)^T$，$(u_e, v_e)^T$ は推定されたオプティカルフロー，$(u_c, v_c)^T$ は真のオプティカルフローである．

3.2 画面内で速度一定の時系列画像に対する実験

まず始めに，テスト時系列画像として画像の濃度単位で平均パワーが 30^2 のガウス分布にしたがって発生させたガウス雑音パターンが画面内で静止しているような時系列画像に対し，平均パワーが σ_n^2 のガウス雑音を加えたものを用意した．

この時系列画像に対し，施す空間的 LPF の σ_f 及び σ_n を変化させながらオプティカルフローを推定し，推定したオプティカルフローの誤差を算出した．但し，$\sigma_w = 2$ とした．これを図 1 に示す． これを見ると，$\sigma_n = 0$ の時は σ_f を大きくする，すなわち遮断周波数を低くしてもオプティカルフロー推定誤差はほとんど発生していない．これに対し σ_n を大きくすると，それに従って σ_f を大きくしたときに発生するオプティカルフロー推定誤差が大きくなっているのがわかる．

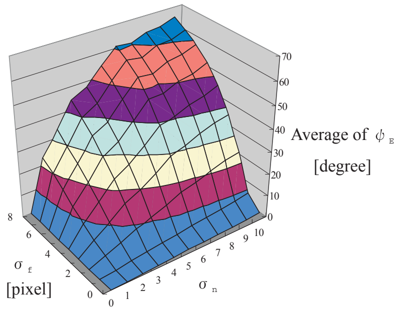

図 1　ガウス雑音パターンの時系列画像に対する，雑音の強さと LPF の遮断周波数及びオプティカルフロー推定誤差の関係 ($\sigma_w = 2$)

Fig. 1　Relationship among power of noise, cutoff frequency of LPF and optical flow estimation error in image sequence of gaussian noise pattern ($\sigma_w = 2$).

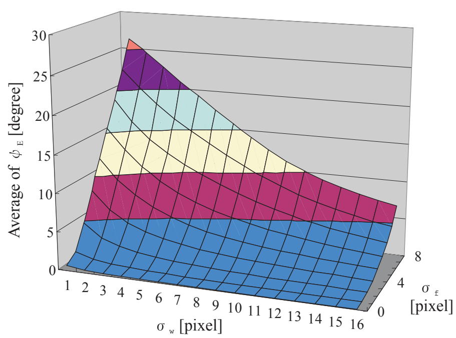

図 2　ガウス雑音パターンに対する，LPF の遮断周波数と局所領域の大きさ及びオプティカルフロー推定誤差の関係 ($\sigma_n = 1$)

Fig. 2　Relationships among cutoff frequency of LPF, size of local patch and optical flow estimation error in image sequences of gaussian noise pattern ($\sigma_n = 1$).

すなわち，雑音が存在するときに LPF の遮断周波数を低くすると，オプティカルフロー推定誤差が増加することがわかる．これは，式 (7) において $P_n = 0$ のとき $r_s = 0$ となる事から妥当と考えられる．

同様の時系列画像において，今度は雑音の平均パワーを $\sigma_n^2 = 1$ に固定し，σ_f と σ_w を変化させながらオプティカルフローを推定し誤差を算出した．この結果を図 2 に示す．これを見ると，σ_f を増加させるに従って増加したオプティカルフロー推定誤差が，σ_w を大きく設定することによって今度は減少しているのがわかる．これは，LPF による雑音の画素間の相関による影響が，局所領域を大きくすることで緩和されたと考えられる．

ガウス雑音パターン以外の画像についても実験を行った．テスト時系列画像は，図 3 に示す 2 枚の画像パターンが静止しているものにガウス雑音を加えたも

図 3　テスト画像パターン A（左），B（右）

Fig. 3　Test image pattern A(left), B(right).

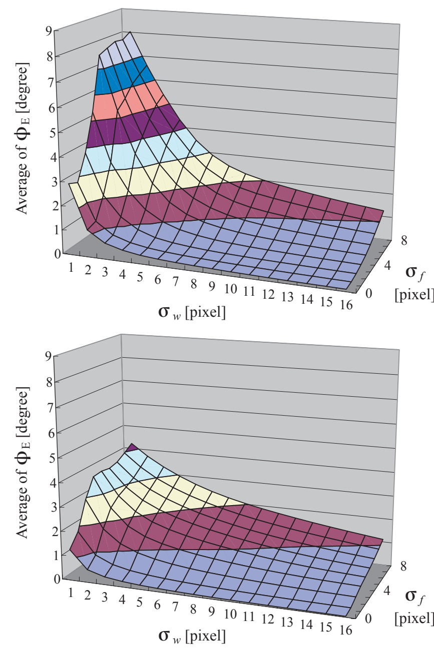

図 4　画像パターン A（上）及び B（下）の時系列画像に対する，LPF の遮断周波数と局所領域の大きさ及びオプティカルフロー推定誤差の関係

Fig. 4　Relationships among cutoff frequency of LPF, size of local patch and optical flow estimation error in image sequences of pattern A(upper) and B(under).

のを用いた．図 4 に画像パターン A 及び B の時系列画像に対して，σ_f と σ_w を変化させながら推定したオプティカルフロー誤差を示す．ガウス雑音パターン同様の傾向があることがわかる．

3.3　速度一定でない時系列画像に対する実験

次に，図 12，13 に示す合成時系列画像に対して実験を行った．ここで，“Diverging Tree” は 150 × 150[pixel]，“Yosemite” は 256 × 256[pixel] のデータである．これらの時系列画像に対して，σ_f 及び σ_w を変化させながらオプティカルフローを推定し，その誤差を算出した．図 5 に “Diverging Tree” に対する結果を，図 6 に “Yosemite” に対する結果を示

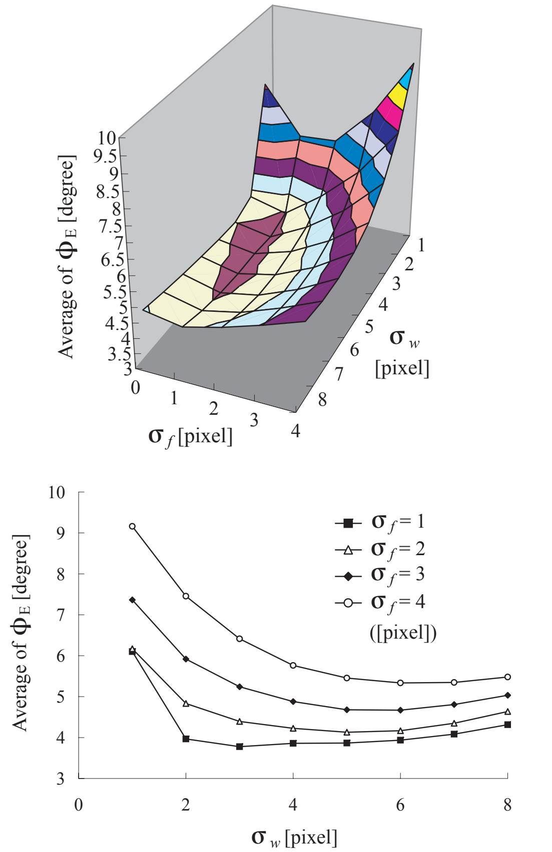

図 5 時系列画像 “Diverging Tree” に対する，LPF の遮断周波数と局所領域の大きさ及びオプティカルフロー推定誤差の関係

Fig. 5 Relationship among cutoff frequency of LPF, size of local patch and optical flow estimation error in image sequence ‘Diverging Tree’.

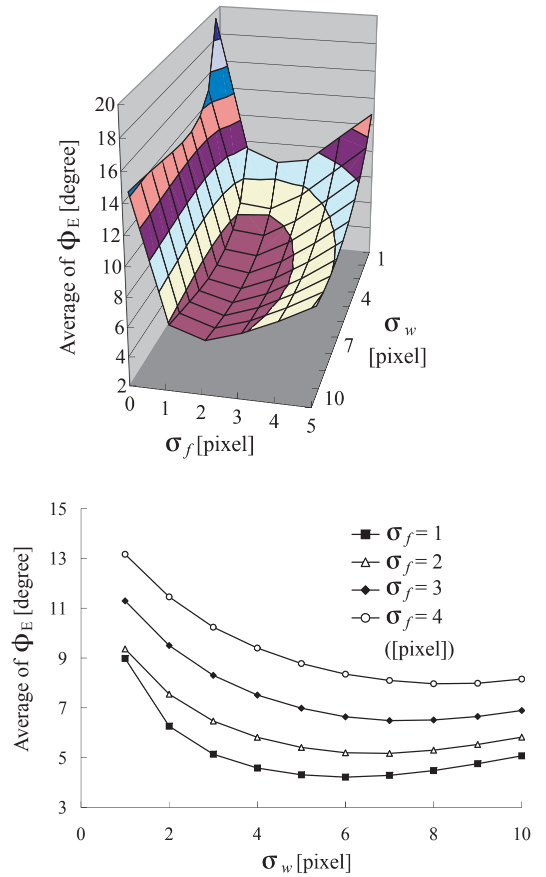

図 6 時系列画像 “Yosemite” に対する，LPF の遮断周波数と局所領域の大きさ及びオプティカルフロー推定誤差の関係

Fig. 6 Relationship among cutoff frequency of LPF, size of local patch and optical flow estimation error in image sequence ‘Yosemite’.

す．但し，“Diverging Tree” に対しては，画像の左上隅を $(0,0)$[pixel] としたときに $(38,38)$[pixel] の位置から 76×76[pixel] のサイズの領域において誤差の平均値を取った．“Yosemite” に対しては，同様に $(80,80)$[pixel] の位置から 96×96[pixel] のサイズの領域において誤差の平均値を取った．

まず，図 5（上）を見てみると，σ_f が 0 から 2 まで増加するにつれてオプティカルフローの推定誤差が一旦減少しているのがわかる．これは，オプティカルフローを計算した領域内のオプティカルフローの大きさが大きかったため，LPF の遮断周波数を低くすることで，勾配法の拘束式が成り立つようになり誤差が減少したものと考えられる．図 6（上）における $\sigma_f = 0$ から 2 までのオプティカルフロー推定誤差の減少も同様の理由によるものと考えられる．

図 5（下）は，図 5（上）の内，$\sigma_f = 1$ から 4 までのグラフを見方を変えて表示したものである．同様に，図 6（下）は，図 6（上）の内，$\sigma_f = 2$ から 5 までのグラフを見方を変えて表示したものである．これらを見ると，図 2 とほぼ同様に σ_f を増加させるに従って増加したオプティカルフロー推定誤差が，σ_w を大きく設定することによって減少しているのがわかる．また，σ_w を増加させすぎると再びオプティカルフロー推定誤差が上昇を始めるが，これは局所領域 Ω が広がることで，この中に様々な種類の動きが含まれてしまうため，これらの動きの平均が推定されてしまい実際の動きとずれてしまうからであると考えられる．従って，各 σ_f 毎に最適な σ_w が存在するが，同図を見ると σ_f が大きいほどこの最適な σ_w も増加する方向にずれていく傾向があることがわかる．

4. 多重解像度解析を用いたオプティカルフロー推定法の構築

4.1 各解像度におけるオプティカルフローの推定

各解像度 l におけるオプティカルフロー $\mathbf{v}_l$ は，次式に示す正規方程式を解くことで推定する（Lucas と Kanade の方法[2)]）．

$$A_l \mathbf{v}_l = \mathbf{b}_l \tag{17}$$

$$A_l = \begin{bmatrix} a_{xx,l} & a_{xy,l} \\ a_{yx,l} & a_{yy,l} \end{bmatrix}, \mathbf{b}_l = -\begin{bmatrix} a_{xt,l} \\ a_{yt,l} \end{bmatrix}$$

但し，$a_{pq,l}(p,q \in \{x,y,t\})$ は次式となる．

$$a_{pq,l}(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{u}\in\Omega_l} w_l(\mathbf{u})\eta_{p,l}\left(\frac{\mathbf{u}+\mathbf{x}}{2^l}\right)\eta_{q,l}\left(\frac{\mathbf{u}+\mathbf{x}}{2^l}\right) \tag{18}$$

ここで，$(\mathbf{u}+\mathbf{x})/2^l$ が整数のときのみ加算を行うものとする．また，Ω_l は式 (1) における局所領域 Ω と同じものである．式 (18) における $\eta_{p,l}$ は，次式の様に原時系列画像における時空間輝度勾配 I_p に対してフィルタリングとダウンサンプリングを行うことで求める．

$$\eta_{p,l}(\mathbf{x}') = \sum_{\mathbf{u}\in\Gamma_l} h_l(-\mathbf{u})I_p(\mathbf{u}+2^l\mathbf{x}',t) \tag{19}$$

$$\Gamma_l = [-m_l, m_l] \times [-m_l, m_l]$$

但し，m_l は h_l の台に比例するように設定する．また，原時系列画像における時空間輝度勾配 I_p は次式の様に，微分フィルタ d を畳み込むことにより計算する．

$$I_p(\mathbf{z}) = \sum_{\Delta=-k}^{k} d(-\Delta)I(\mathbf{z}+\mathbf{e}_p\Delta) \tag{20}$$

但し，$\mathbf{z} = (x,y,t)^T$，$\mathbf{e}_x = (1,0,0)^T$，$\mathbf{e}_y = (0,1,0)^T$，$\mathbf{e}_t = (0,0,1)^T$ である．

多重解像度画像としては，ラプラシアンピラミッド[5)]を用いた．ラプラシアンピラミッドのある層は，制限周波数の異なるローパスフィルタをかけた画像の差からなる．具体的には，ラプラシアンピラミッドを生成するフィルタの伝達関数 h_l は次式となる．

$$h_l(\mathbf{x}) = g_l(\mathbf{x}) - g_{l+1}(\mathbf{x}) \tag{21}$$

$$g_l(\mathbf{x}) = \frac{1}{2\pi\sigma_l^2}\exp\left(-\frac{\mathbf{x}^T\mathbf{x}}{2\sigma_l^2}\right)$$

$$\sigma_l = 0.56 \times 2^l$$

但し，g_l はガウシアンピラミッド[5)] を生成するフィルタの伝達関数である．これにより，画像信号の直流成分が除去でき，全体的な時間方向の明るさの変化はオプティカルフローに影響しなくなる．ラプラシアンピラミッドを生成するためのフィルタ群の伝達関数 h_l は，スケール因子が $a = 2^l$ となる．そこで，オプティカルフロー推定時に速度一定と仮定する局所領域を $\Omega_l = [-2^l n, 2^l n] \times [-2^l n, 2^l n]$ のように設定する．以後の実験では $n = 3$ とした．また，局所領域内の重み関数 w_l は，標準偏差 $\sigma_w = 2\sigma_l$ の等方性二次元ガウス関数を用いた．

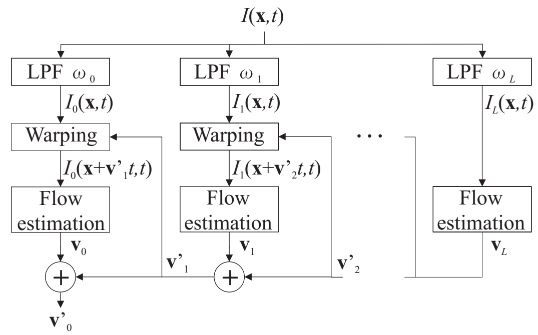

図 7　画像歪曲型
Fig. 7　Image warping type.

4.2 各解像度間でのオプティカルフローの統合法

4.2.1 画像歪曲型

画像歪曲型の概略図を図 7 に示す．$l = L$，$(u'_{l+1}, v'_{l+1})^T = (0,0)^T$ と設定し，次の処理を $l = 0$ まで繰り返す．

(1) オプティカルフロー $(u_l, v_l)^T$ を推定する．但し，式 (20) の代わりに次式に示す $\hat{I}_t$ を用いる．

$$\hat{I}_t(\mathbf{z},\mathbf{w}) = \sum_{\Delta=-k}^{k} d(-\Delta)I(\mathbf{z}+\mathbf{w}\Delta) \tag{22}$$

ここで，$\mathbf{w} = (u'_{l+1}, v'_{l+1}, 1)^T$ である．

(2) $(u'_l, v'_l)^T = (u'_{l+1}, v'_{l+1})^T + (u_l, v_l)^T$ とする．

(3) $l = l - 1$ とする．

次式に示す $(u,v)^T$ が最終的に出力されるオプティカルフローである．

$$(u,v)^T = (u'_0, v'_0)^T = \left(\sum_{l=0}^{L} u_l, \sum_{l=0}^{L} v_l\right)^T \tag{23}$$

4.2.2 解像度選択型

解像度選択型の概略図を図 8 に示す．まず，時系列画像 I_l からオプティカルフロー $(u_l, v_l)^T (l = 0,1,...,L)$ を推定する．その後，最適と思われる解像度で推定されたオプティカルフローを選択する．図 9 に解像度選択のフローチャートを示す．解像度選択は次のような戦略で行う．まず，オプティカルフローが推定される解像度は高ければ高いほど良いとする．これは，な

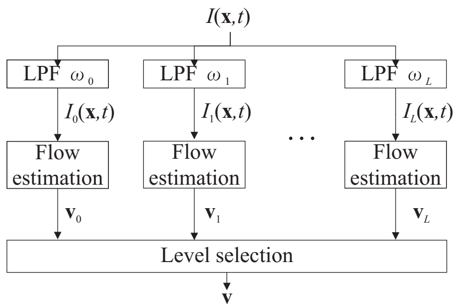

図 8 解像度選択型
Fig. 8 Resolution selection type.

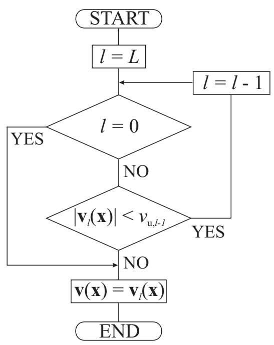

図 9 解像度レベルの選択法
Fig. 9 Method of resolution selection.

るべく細部までオプティカルフローの振る舞いを調べるためである．しかしながら，推定されるオプティカルフローは，時間的エイリアシングの影響のため，その真の速度によって，推定できる解像度の最大値が制限されてしまう．画像の空間的サンプリング周波数を ϕ_s，画像に含まれる空間的な周波数成分の最大値を ω_u とすると，時間的エイリアシングの発生しない最大の速度の大きさ v_u は，$v_u = \phi_s/2\omega_u$ となる[3)]．各解像度の時系列画像は，遮断周波数 ω_l の空間的ローパスフィルタを施されて生成されるため，解像度レベル l での推定できる最大の速度は，次式の様に設定する．

$$v_{u,l} = \phi_s/2\omega_l \tag{24}$$

オプティカルフロー $\mathbf{v}(\mathbf{x})$ は，次の様にして求める．

(1) $l = L$ とする．
(2) $l = 0$ ならば (4) へ．
(3) $|\mathbf{v}_l(\mathbf{x})| < v_{u,l-1}$ の場合，もう一段階解像度を上げてもフローを推定できると考えられるため，$l = l - 1$ として (2) へ．
(4) $\mathbf{v}(\mathbf{x}) = \mathbf{v}_l(\mathbf{x})$ とし，終了する．

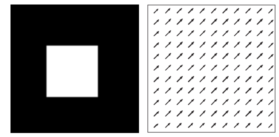

図 10 時系列画像 “Square”（100×100[pixel]）
Fig. 10 Image sequence “Square” (100×100[pixel]).

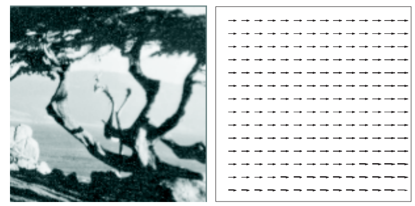

図 11 時系列画像 “Translating tree”（150×150[pixel]）
Fig. 11 Image sequence “Translating tree” (150×150[pixel]).

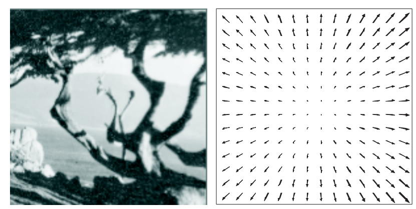

図 12 時系列画像 “Diverging tree”（150×150[pixel]）
Fig. 12 Image sequence “Diverging tree” (150×150[pixel]).

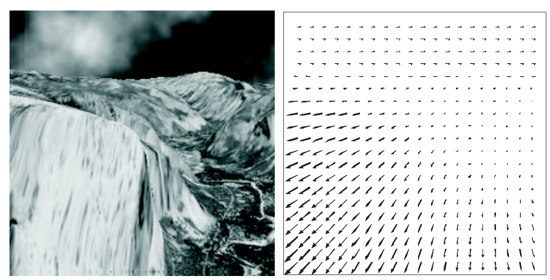

図 13 時系列画像 “Yosemite”（256×256[pixel]）
Fig. 13 Image sequence “Yosemite” (256×256[pixel]).

5. オプティカルフロー推定誤差の検討

5.1 実験条件

各解像度におけるオプティカルフローの統合法において，オプティカルフロー推定誤差について検討する．テスト時系列画像を図に示す．最大の解像度レベルを $L = 3$ とした．また，解像度選択型の式 (24) における $v_{u,l}$ は，前実験により式 (25) のように設定した．

$$v_{u,l} = 0.5 \times 2^l \tag{25}$$

各テスト時系列画像に対して，画像歪曲型（以下

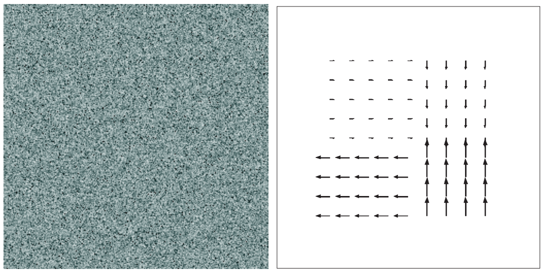

図 14　時系列画像 “Blocks”（257×257[pixel]）
Fig. 14　Image sequence “Blocks” (257×257[pixel]).

IW）及び解像度選択型（以下 RS）の手法でオプティカルフローを推定し，その誤差を求めた．誤差測度としては，以下に示す角度誤差（Angular error）及び絶対誤差（Absolute error）を用いた．

$$\text{Angular error} = \cos^{-1}\frac{\mathbf{v}_e^T\mathbf{v}_c}{|\mathbf{v}_e||\mathbf{v}_c|} \tag{26}$$

$$\text{Absolute error} = |\,\mathbf{v}_e - \mathbf{v}_c\,| \tag{27}$$

但し，$\mathbf{v}_e = (u_e, v_e, 1)^T$，$\mathbf{v}_c = (u_c, v_c, 1)^T$，$(u_e, v_e)^T$ は推定されたオプティカルフロー，$(u_c, v_c)^T$ は真のオプティカルフローである．このとき，式 (17) において，$|\,A_l\,| = 0$ の時オプティカルフロー計算を行わないとした．

5.2　推 定 誤 差

表 1 に画像全体に対するオプティカルフロー推定誤差の平均値（Av.）と標準偏差（St. dev.）を示す．同時に，オプティカルフローを算出した画素数の画像全体の画素数に対する割合（Dens.）も算出した．まず，誤差測度によって手法毎の傾向が異なるということはなかった．“Translating Tree”，“Blocks” を除いては，IW 型の方がややオプティカルフロー推定誤差が小さかった．今回のテストでは，“Blocks” を除いては，IW 型と RS 型の間に重大な差は現れなかった．

“Blocks” の結果を見ると，IW に比べて RS での誤差が著しく増大しているのが分かる．図 15 は，時系列画像 “Blocks” におけるオプティカルフローの (a) 真値，(b)IW による推定値及び (c)RS による推定値の絶対値 $|\,\mathbf{v}\,|$ を表示した物である． この図を見ると RS の推定値において，特に速度が大きい場合，オプティカルフローの形が崩れているのが分かる．これは，RS では，速度の大きい場所では低い解像度が選ばれるため，オプティカルフロー一定と仮定する局所領域のサイズが大きくなってしまい，異なるフローを持つ領域の境界付近において他の領域の影響を受けやすくなっているためと考えられる．これが IW では，解像度を高くしていく課程でオプティカルフローを徐々に改善されていくため，RS よりも領域境界におけるフ

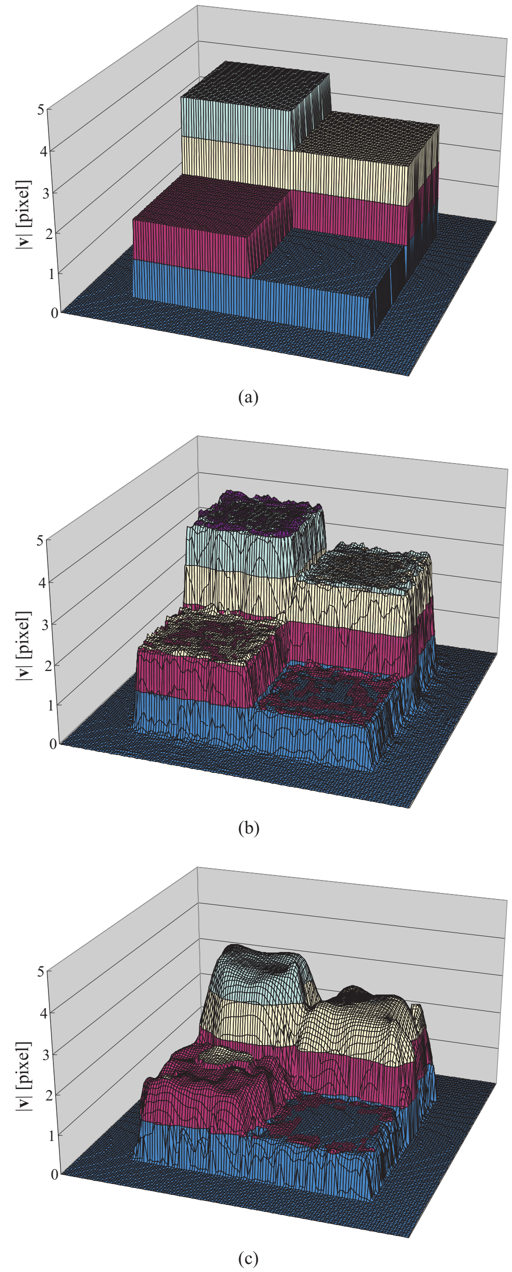

図 15　“Blocks” におけるオプティカルフローの絶対値 $|\,\mathbf{v}\,|$: (a) 真値，(b)IW による推定値，(c)RS による推定値
Fig. 15　Absolute value of optical flow $|\,\mathbf{v}\,|$ for “Blocks” : (a)true value, (b)estimate from IW, (c)estimate from RS.

ローの形状が真値に近くなっていると考えられる．

5.3　ガウス雑音パターンにおける推定誤差

表 2 に，ガウス雑音パターンを 1 フレーム当り $(u, 0)$[pixel] だけ平行移動させて作成した時系列画像に対するオプティカルフロー推定誤差 (Abs.　error

表 1 オプティカルフロー推定誤差
Table 1 Optical flow estimation error.

Image Sequence	Method	Ang. error [degree] Av.	Ang. error [degree] St. dev.	Abs. error [pixel] Av.	Abs. error [pixel] St. dev.	Dens. [%]
Square	IW	0.0206	0.0830	0.000768	0.00309	8.51
	RS	0.123	0.0701	0.00566	0.00319	8.51
Trans. Tree	IW	1.39	1.85	0.0821	0.106	100
	RS	0.710	0.720	0.0464	0.0510	100
Div. Tree	IW	3.98	3.36	0.109	0.105	100
	RS	4.07	3.63	0.109	0.0981	100
Yos. 256	IW	8.78	11.0	0.432	0.492	100
	RS	9.46	12.2	0.472	0.514	100
Blocks	IW	2.87	9.53	0.124	0.424	100
	RS	5.18	13.6	0.320	0.683	100

表 2 ガウス雑音パターンを 1 フレーム当り $(u, 0)$[pixel] だけ平行移動させて作成した時系列画像に対するオプティカルフロー推定誤差 (Abs. error [pixel]) の平均値
Table 2 Average of optical flow estimation error (Abs. error [pixel]) from a image sequence that gaussian noise pattern is translated in $(u, 0)$[pixel] per frame.

	$u=1$	$u=2$	$u=3$	$u=4$
$l=0$	7.32×10^{-17}	2.26	3.00	4.01
$l=1$	8.74×10^{-17}	0.906	2.63	4.12
$l=2$	1.34×10^{-16}	0.153	0.751	2.01
$l=3$	1.24×10^{-4}	1.18×10^{-2}	7.96×10^{-2}	0.277
IW	2.09×10^{-5}	2.32×10^{-4}	1.07×10^{-3}	4.17×10^{-3}

[pixel]) の平均値を示す．表中の $l = 0 \sim 3$ は，各解像度レベルにおける結果である． 特に $l = 3$ と IW を比べてみる．$l = 3$ を見ると，速度 u が大きくなるに従って誤差が増大しているのが分かる．これは，画像に施す空間的 LPF が理想 LPF でないため，高周波成分が画像内に残ってしまい，これが時間的エイリアシングとにより雑音となったためと考えられる．一方，IW を見るとこちらも $l = 3$ と同様に速度 u の増大に従って誤差が増大しているが，$l = 3$ のときに比べて誤差の増加が抑制されているのが分かる．これは，低い解像度から高い解像度へオプティカルフローを更新することによって，低い解像度で発生したオプティカルフロー推定誤差が高い解像度で改善されたためと考えられる．

6. 計算時間の評価

6.1 実 験 条 件

実験には，共有メモリ型並列計算機 SGI Altix3700（Processor: Intel(R) Itanium(R) 2 ×128，Memory: 768GB）を用いた．時系列画像の 1 フレーム当りの画像サイズは，257×257[pixel] に固定した．また，テスト時系列画像として白色雑音を用いることにより，全ての画素においてオプティカルフローの計算を実行させるようにした．最大の解像度レベルは $L = 5$ とした．

6.2 逐次処理時間

IW 型及び RS 型において，逐次処理によってオプティカルフローを計算した．この時，計測した計算時間を表 3 に示す． 同表には，各解像度における計算時間も併記した．まず，IW と RS においてオプティカルフロー計算にかかった全時間（all）を見ると，IW の方が RS に比べてやや計算時間が大きいことが分かる．これは，画像の歪曲及び各解像度におけるオプティカルフローの加算等の処理によるものと考えられる．次に，各解像度における計算時間を見てみると，$l = 0$ で最も時間がかかり，l が増大するに従って計算時間が緩やかに減少していくことがわかる．

6.3 並列処理時間

RS 型のプログラムを「OpenMP」によって各解像度毎の処理に並列化した．並列化したプログラムを CPU 数を変えながら並列処理させたときの計算時間を表 4 に示す．同表には，同時に全処理に対する計算時間（all）が CPU を増やすことによってどれだけ減少したのかを，CPU 数 1 に対する結果を 100% として表示した．ここで，解像度のレベル数は 6 なので，CPU 数は 6 の約数とした． まず，表中の “all” を見ると，CPU 数を増加させるに従って全計算時間が減少しているのがわかる．次に全計算時間のパーセンテー

表 3 逐次処理による計算時間（単位:[sec]）
Table 3 Process time of serial processing (unit:[sec]).

Method	l=0	l=1	l=2	l=3	l=4	l=5	all
IW	0.235	0.198	0.167	0.158	0.151	0.156	1.07
RS	0.224	0.180	0.141	0.133	0.126	0.126	0.931

表 4 並列処理による計算時間
Table 4 Process time of parallel processing.

CPU Number	Process time [sec]							Percentage of all [%]
	l=0	l=1	l=2	l=3	l=4	l=5	all	
1	0.224	0.181	0.141	0.133	0.126	0.125	0.933	100
2	0.235	0.192	0.170	0.135	0.128	0.141	0.601	64.4
3	0.244	0.226	0.159	0.181	0.130	0.151	0.473	50.7
6	0.308	0.273	0.245	0.230	0.226	0.201	0.312	33.4

ジを見ると，単純に 1/(CPU 数) にはなっていないのが分かる．これは，もともと各解像度における計算時間が異なっているためと，CPU 数を増やすに従って各解像度における処理時間が増加しているためと言うことが表から分かる．

7. おわりに

本論文では，多重解像度解析を用いたオプティカルフロー推定法の詳細な検討を行った．まず，勾配法を用いることを想定し，オプティカルフローの拘束式をフィッティングさせる局所領域の大きさに対して，空間的ローパスフィルタ（LPF）を画像に施した時の雑音の共分散から，局所領域の大きさを，施した空間的 LPF の遮断周波数に反比例して設定することを提案した．

次に，各解像度間での推定されたオプティカルフロー同士を統合する方法として，画像歪曲型と解像度選択型の二つを紹介し，精度及び計算時間の観点から比較した．実験から，画像歪曲型において，動きの速い領域での特に動きの境界における精度が良いという結果が得られた．はっきりとした動きの境界が存在しない場合においては，画像歪曲型が解像度選択型に比べて僅かに誤差が小さい程度であった．更に，解像度選択型において各解像度毎の処理に並列化する事により高速にオプティカルフローが計算できることを示した．

参考文献

1) W. B. Thompson and D. L. Boley, “Optical flow estimation: An error analysis of gradient-based methods with local optimazation,”IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.9, no.2, pp.229–244, March 1987.
2) J. L. Barron, D. J. Fleet and S. S. Beauchemin, “Systems and experiment performance of optical flow techniques,” Int. J. Comp. Vision, vol.12, no.1, pp.43–77, February 1994.
3) W. J. Christmas, “Filtering requirements for gradient-based optical flow measurement,” IEEE Trans. Image Processing, vol.9, no.10, pp.1817–1820, October 2000.
4) J. Weber and J. Malik, “Robust computation of optical flow in a multi-scale differential framework,” Int. J. Comp. Vision, vol.14, no.1, pp.5–19, 1995.
5) P. J. Burt and E. H. Adelson, “The laplacian pyramid as a compact image code,” IEEE Transactions on communications, vol.31, no.4, pp.532–540, April 1983.
6) P. J. Burt, “Fast filter transform for image processing,” Computer Vision and Image Processing, vol.16, pp.20–51, 1981.
7) R. Szeliski, J. Coughlan, “Spline-based image registration,” Int. J. Comp. Vision, vol.22, no.3, pp.199–218, 1997.
8) Y. T. Wu, T. Kanade, C. C. Li and J. Cohn, “Image Registration Using Wavelet-Based Motion Model,” Int. J. Comp. Vision, vol.38, no.2, pp.129–152, 2000.
9) C. P. Bernard, “Discrete wavelet analysis: a new framework for fast optic flow computation,” Proc. of ECCV’98, pp.354–368, 1998.
10) L. F. Chen, J. C. Lin and H. Y. M. Liao, “Wavelet-based optical flow estimation,” Proc. ICPR’00, Barcelona, vol.3, pp.1068–1071, 2000.
11) B. D. Lucas, and T. Kanade, “An iterative image registration technique with an application to stereo vision,” Proc. DARPA Image Understanding Workshop, pp.121–217, 1981.

(平成 12 年 2 月 4 日受付)
(平成 12 年 5 月 11 日採録)

安達　栄輔（正会員）

平成13年長岡技術科学大学大学院工学研究科修士課程修了．平成16年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単位取得退学．現在，産業技術総合研究所に勤務．動画像処理に関する研究に従事．画像電子学会会員．

堀口　　進

昭和56年東北大学大学院工学研究科博士課程修了．昭和61年-昭和62年まで米国IBMトーマスワトソン研究所研究員．平成4年-平成16年まで北陸先端大情報科学研究科教授．現在，東北大学大学院情報科学研究科教授．画像処理，並列計算機，並列処理ならびにネットワークの研究に従事．工学博士．IEEE Computer Societyシニア会員，IEICE，IPS，IASTED学会正員．