

Wavelet 変換を用いた投票法による動物体の 速度ベクトル推定法に関する研究

岡崎 好孝[†] 小谷 一孔[†]

[†] 北陸先端科学技術大学院大学 〒923-1292 石川県能美郡辰口町旭台 1-1

E-mail: [†]{okazakiy, ikko}@jaist.ac.jp

あらまし オプティカルフロー推定法では、動画像中の動物体の境界部分、遮蔽・発生領域では拘束条件を逸脱し、大きな推定誤差を生じる。この問題に対して、我々は投票法を用いた速度ベクトル推定法により速度ベクトルを高精度に推定する手法を提案し、上記部分においても高精度に速度ベクトルを推定できた。しかしながら投票法では、投票値のピーク検出精度と、速度ベクトルの分解能との間にトレードオフ問題があった。本報告は、Wavelet 変換により得た多重解像度画像に投票法を適用することにより上記のトレードオフ問題の改善を試みる。多重解像度画像により速度空間における拘束直線の数を増やすことができるため、速度ベクトルの分解能をほとんど下げずに投票値のピーク検出精度を改善でき、速度ベクトルの推定精度を改善できるものと期待している。

キーワード 速度ベクトル推定, Wavelet 変換, 多重解像度解析

Velocity Vector of Moving Object Estimation based on Voting Method using Wavelet Transform

Yoshitaka OKAZAKI[†] Kazunori KOTANI[†]

[†] Japan Advanced Institute of Science and Technology

1-1 asahidai, Tatsunokuchi-machi, Nomi-gun, Ishikawa, 923-1292 Japan

E-mail: [†]{okazakiy, ikko}@jaist.ac.jp

Abstract The accuracy of optical flow estimation falls remarkably in occluded, appeared and boundary of moving objects. We had proposed a new estimation method of a velocity vector by using voting, and our new method obtained fairly good results. However the voting method had a trade off problem between the accuracy of peak detection for votes and the resolution of the estimation for velocity vectors. This report describes a new estimation method by the voting for multi-resolution images which are obtained by wavelet transform. Since multi-resolution images make more restraint lines in a velocity space, it will improve the accuracy of peak detection and the trade off problem.

Keyword Velocity vector Estimation, Wavelet Transform, Multi-Resolution Analysis

1. はじめに

オプティカルフロー推定法は動物体の境界部分や輝度値の変化が大きい部分、発生・遮蔽部分では拘束方程式からの逸脱が顕著になりフロー推定精度が著しく低下するという問題がある。

上記の問題に対して、我々は速度空間における拘束直線の交点群から投票法を用いてロバスト推定を行う速度ベクトル推定法を提案した[1][2]。この手法は、上記の問題に対して高精度に速度ベクトルを推定できたが、投票法での考慮領域の決定において投票値のピーク検出精度と分解能との間にトレードオフ問題が存

在した。

本報告は、Wavelet 変換による多重解像度解析を用いて各階層での投票を選択的に行うことでトレードオフ問題を解決する高精度な速度ベクトル推定法を提案する事を目的とする。

本研究では、勾配法で仮定していた拘束方程式を十分に満足する部分と、物体境界部のような拘束方程式の成立条件を大きく逸脱する部分とを、多重解像度解析により分解し、各階層より選択的に投票することによって、高い速度ベクトル推定精度を維持するように適用化させる。

2. 速度ベクトル推定法

2.1. オプティカルフロー推定法

オプティカルフロー拘束方程式は、次式で表される。
[1]

$$I_x u + I_y v + I_t = 0 \quad (1)$$

ただし、

$$I_x = \frac{\partial I(x,y,t)}{\partial x}, \quad I_y = \frac{\partial I(x,y,t)}{\partial y}, \quad I_t = \frac{\partial I(x,y,t)}{\partial t}$$

$I(x,y,t)$: 画像中の座標 x,y , 時間 t における輝度値

u,v : それぞれ速度ベクトルの x,y 成分

オプティカルフロー推定法は、空間的な輝度勾配である I_x, I_y と、時間的な輝度勾配である I_t を画像中の輝度値から求め、オプティカルフロー拘束方程式を用いて速度ベクトル成分 (u, v) を推定する手法である。

画像中の輝度情報からオプティカルフロー拘束方程式を用いて速度ベクトルを決定する際に、オプティカルフロー拘束方程式は2つの変数 (u, v) を含んでおり、1つの画素のオプティカルフロー拘束方程式のみでは変数 (u, v) を一意に決定することはできない。

そこで、拘束方程式以外にもう一つの制約条件(付加条件)が必要となる。一般的には注目画素とその近傍画素の動きは類似しているという仮定を基に、付加条件として「注目画素のフローはその近傍画素のフローと等しい」という条件を加える。これにより注目画素と近傍画素からなる領域を設定し、この領域内の画素から複数の拘束方程式を算出して注目画素の速度ベクトルを決定する(図1)。この領域を考慮領域、複数の拘束方程式を (u, v) の2次元空間に写像したものを速度空間と呼んでいる。

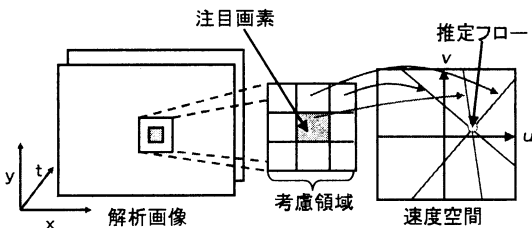


図1 オプティカルフロー推定法の概要

2.2. 拘束直線の交点分散の要因

理想的には速度空間上で拘束直線は一点で交わり、その交点を注目画素のフロー成分として割り当てることができる。しかしながら、拘束直線の交点は分散する傾向が強く、その原因として文献[1]では以下の例が挙げられ、実験により確認されている。

運動による分散要因

並進運動時には設定した動物体内部の運動はすべて等しいため、「画像中の注目画素とその近傍の画素の

フローは等しい」という制約条件を満たしており、拘束直線の交点は分散せず高精度なフロー推定が可能である。しかし、拡大・縮小・回転といった複雑な運動をする場合には注目画素と考慮領域内の画素の運動は等しくなく、制約条件が満たされない場合が多い。よって、拘束直線の交点は分散する。

物体の境界における分散要因

ここでの境界部分とは運動している物体と背景領域との境界を指す。オプティカルフロー拘束方程式(式1)は「物体の輝度値は時間的・空間的に滑らかである」という制約条件が満たされる時には高精度なフロー推定が期待できる。しかし、物体の境界部分は運動に伴い遮蔽領域や発生領域が生じるため、物体境界部分の輝度値の変化は大きくなる。また、一般的に物体境界部分は輝度変化の大きい部分である。よって、上記の制約条件は満たされず、拘束直線の交点は分散する。

2.3. 投票法を用いた速度ベクトル推定法

拘束直線の交点が分散する場合においても速度ベクトルを高精度に決定する手法として、我々は「投票法を用いた速度ベクトル推定法」を提案した[1][2]。投票法とは離散化した投票空間に速度空間上の拘束直線の交点を投票していき、最も投票数の多い数値をその領域の数値とする手法である。投票法を用いた速度ベクトル推定の概要を以下に示す。

1. ある注目画素の速度ベクトル推定を行う時、注目画素の近傍の一定範囲を考慮領域とする。(図2)
2. 考慮領域内のそれぞれの画素の輝度値より拘束直線を算出し、速度空間に写像する。(図2)
3. 各拘束直線の交点を離散化された投票空間へ写像し、最も投票数の多い値を推定速度ベクトルとする。(図3)

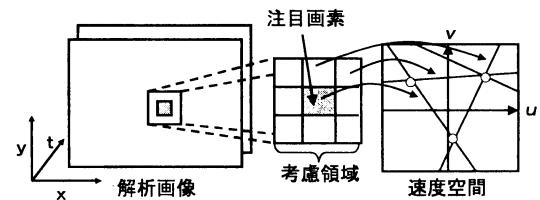


図2 拘束直線の速度空間への写像

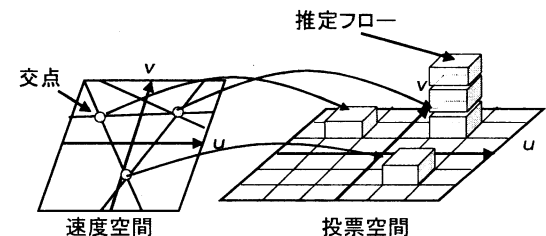


図3 速度空間から投票空間への投票例

2.3.1. 投票法を用いた速度ベクトル推定法の問題点

投票法を用いた速度ベクトル推定法では、投票空間の分解能を上げると投票が分散し、投票値のピーク検出精度が低下する。一方、投票空間の分解能を下げるとピーク検出精度は向上するが、速度ベクトルの推定精度が低下する。このため、投票空間の分解能と速度ベクトルの推定精度にはトレードオフ問題が存在する(図4)。

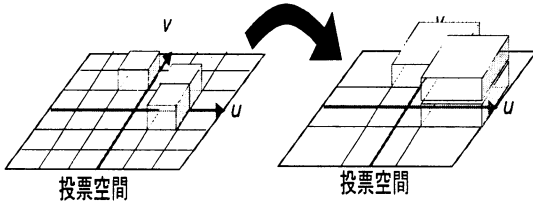


図4 投票法のトレードオフ問題の概要

3. Wavelet 変換を用いた速度ベクトル推定法

本研究では投票法を用いた速度ベクトル推定法に存在するトレードオフ問題を解決する方法として「Wavelet 変換を用いた投票法による速度ベクトル推定法」を検討する。Wavelet 変換を用いることによる投票法を用いた速度ベクトル推定法のトレードオフ問題の解決手法は以下の2つの手法が考えられる。

手法1

解析画像を Wavelet 変換し元画像と多重解像度画像とに分解し、これらから拘束直線を得ることで拘束直線の交点の数を増す手法である。

オプティカルフロー拘束方程式(式(1))の両辺に Wavelet 関数 $\psi_{j,k}^n(x,y) = 2^j \psi(2^j x - k_x, 2^j y - k_y)$ を掛けて積分し、

$$\iint (I_x u + I_y v + I_t) \psi_{j,k}^n(x,y) dx dy = 0$$

$$\forall n=1..N, \quad \mathbf{k} = (k_x, k_y) \quad (2)$$

を得る。ここで、内積 $\langle f, g \rangle = \iint f(x) \overline{g(x)} dx dy$ を用いると式(2)は次のように書ける。

$$\langle I_x, \psi_{j,k}^n \rangle u + \langle I_y, \psi_{j,k}^n \rangle v + \langle I_t, \psi_{j,k}^n \rangle = 0$$

$$\forall n=1..N \quad (3)$$

Wavelet 関数は局所的な関数であるので、そのサポート領域内の速度 (u, v) は一定であると仮定し、式(3)を部分積分すると

$$\langle I_x, \psi_{j,k}^n \rangle u + \langle I_y, \psi_{j,k}^n \rangle v + \langle I_t, \psi_{j,k}^n \rangle = 0$$

$$\forall n=1..N \quad (4)$$

が得られる。式(4)の括弧内はすべて定数となり、2つの変数をもつ方程式が導かれ、これは Wavelet 変換

した多重解像度画像に対する拘束方程式となる。これらより拘束方程式が増え、投票数を増加させることができる(図5)。

トータル投票数を増やすことで、必ずしも投票値のピーク検出精度が向上するとは限らない。しかしながら、それぞれの拘束直線が多重解像度画像から得られていることから、

◇低解像度成分からは空間分解能は低いが、ノイズなどの影響が小さい拘束直線

◇高解像度成分からは高い分解能特性を持つ拘束直線

が組み合わせられ、投票空間の分解能を下げると生じる交点検出の分解能低下を防ぎつつ、各特性を持つ拘束直線が増えることからピーク検出精度の向上が期待できると考えている。

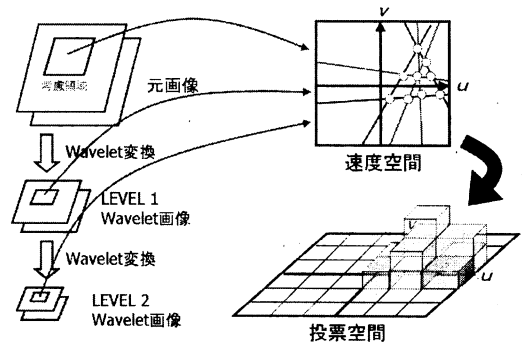


図5 提案手法1の概要

手法2

上述したように、投票空間の分解能がピーク検出精度と交点検出の分解能との間にトレードオフ問題を生じさせ、速度ベクトルの推定精度が制限される。投票値が分散してピークの検出ができなくては速度ベクトルの推定ができないので、投票空間の分解能を下げ的操作は避けられない。投票空間を複数の解像度(分解能)に分解し、高解像度の投票空間から順次投票を実施してピーク検出の正否を判定し、投票空間を選択することで交点検出の分解能をできるだけ下げないようにする。

図6に投票法による速度ベクトル推定手法の流れと、手法1、2との関係を示す。

手法2は投票空間を多重解像度に分解し、順次、高解像度から投票値のピークが検出可能か判定しながら解像度を下げていくことで、投票法におけるトレードオフ問題を解決するもので、投票が分散する原因に直接作用するのではなく、悪い条件が続くと最低の解像度(分解能)での投票が長い区間続く可能性がある。

一方、手法1は多重解像度画像に対する異なる特性の拘束直線を新たに速度空間上にひけるので、投票空間の分解能を下げなくとも投票値の分散を改善できる可能性がある。手法1で新たに得られた拘束直線が必ず投票値の分散を下げるとは限らないが、多重解像度画像からの拘束直線の効果を期待して、本報告は手法

1 について記述し、手法 2 については別の機会に報告を考えている。

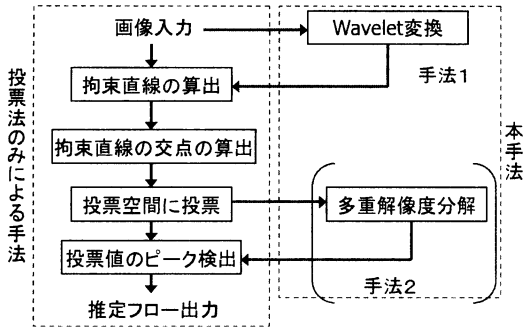


図6 本手法の解析の流れ図

3.1. 速度ベクトルの推定精度比較実験

本手法の有効性を確認するためにモデル画像を作成し、投票法のみの場合と Wavelet 変換を適用させた本手法との速度ベクトル推定精度の比較実験を行った。

3.1.1. 実験用モデル画像の設定条件

実験用のモデル画像は物体内部と背景の輝度値の差は大きく、物体内部の輝度値は空間的・時間的になめらかに変化するものとして、以下の運動をする場合の各モデル画像 (128×128[pixels], 8bit グレイスケール) を生成した (図 7)。

- 並進運動：1pixel/frame (右方向)
- 拡大運動：1pixel/frame and 1.02 倍/frame
- 縮小運動：1pixel/frame and 0.98 倍/frame
- 回転運動：1pixel/frame and 0.5 度/frame(左回転)

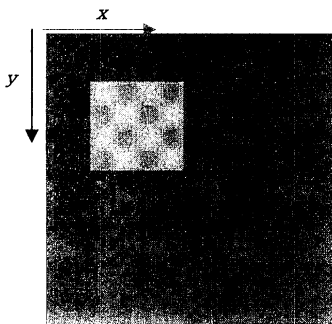


図7 実験用モデル画像例

3.1.2. 速度ベクトルの推定精度比較実験の結果

本手法と投票法のみの場合との速度ベクトル推定精度を定量的に評価する。評価尺度は、実験用モデル画像の正解速度ベクトルと得られた推定速度ベクトルとの平均二乗誤差 (式(5)) を用いる。

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \|v_{xy} - \hat{v}_{xy}\|^2 \quad (5)$$

ただし、

M, N : 画像の縦,横の画素数

v_{xy} : 画素(x,y)における正解速度ベクトル

\hat{v}_{xy} : 画素(x,y)における推定速度ベクトル

ここでは、MSE の値が小さいほど速度ベクトル推定精度が高いと評価する。

推定精度比較実験の結果を表 1 に示す。各運動すべてにおいて本手法の平均二乗誤差は小さい。

これらの運動の中で速度ベクトル推定精度が最も向上した回転運動について図 7 中のオブジェクト部分の速度ベクトルを可視化したものを図 8~10 に示す。グラフ中の矢印は、その画素の移動方向と移動速度を長さとして表す。

表1 各手法による速度ベクトルの推定精度 (MSE)

	並進運動	拡大運動	縮小運動	回転運動
投票法のみ	3.04×10^{-2}	3.48×10^{-2}	3.54×10^{-2}	5.57×10^{-2}
本手法	1.57×10^{-2}	2.81×10^{-2}	3.37×10^{-2}	4.06×10^{-2}

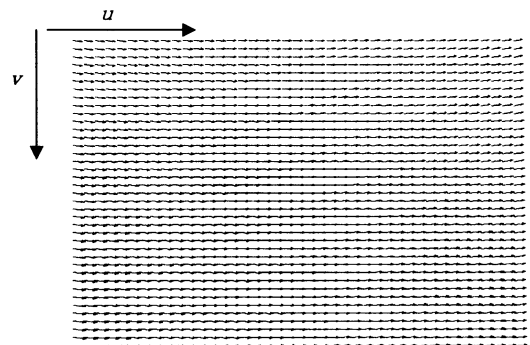


図8 実験用モデル画像の正解速度ベクトル (回転運動)

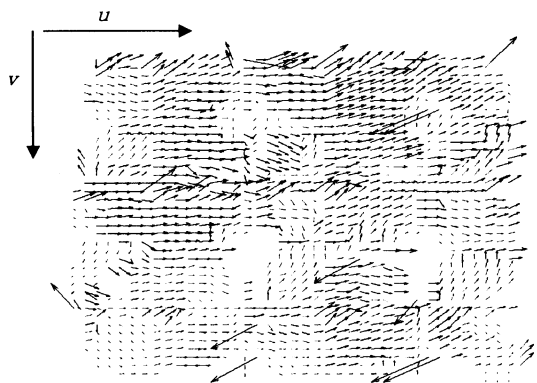


図9 投票法のみによる速度ベクトルの推定結果 (回転運動)

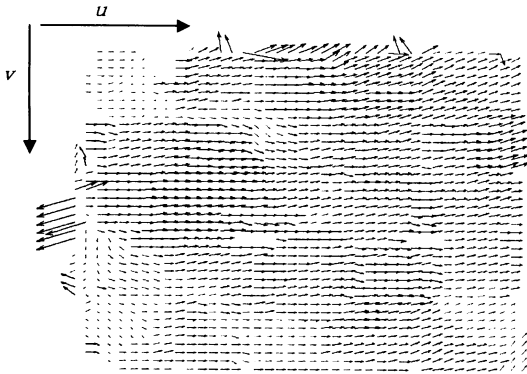


図10 本手法による速度ベクトルの推定結果
(回転運動)

本手法による速度ベクトルの推定特性について考察する。

◇投票法のみによる手法では全体的に推定誤差が見られ、更に大きな推定誤差を生じる部分が多く見られる。これに比べ、本手法は誤差の発生は少なく、特に物体内部では良好な推定精度が得られている。しかしながら、物体境界部では大きな推定誤差が生じる部分がある。

◇物体内部の推定精度が向上した理由としては、Wavelet 変換を用いることで輝度勾配がより滑らかになることで拘束条件により当てはまり、速度ベクトル推定精度が向上したと考えられる。

◇物体境界部では Wavelet 変換の影響により物体の境界がぼやけることで、大きな速度ベクトル推定誤差が発生したと考えられる。

これらより、物体内部では Wavelet 変換を適用した本手法が有効であり、物体境界部では投票法のみ的手法が有効であるといえる。

3.2. Wavelet 変換を用いた選択的投票法による速度ベクトル推定法

Wavelet 変換を適用することにより物体境界部がぼやけ、物体境界部の速度ベクトル推定精度が低下することが分かった。そこで、物体内部と境界部とを選択的に投票することにより、速度ベクトルの推定精度の改善を試みる。

選択的投票法は物体内部と境界部とを判別する関数により、物体内部では Wavelet 変換を用いた拘束直線の交点を投票し、境界部では元画像からの拘束直線の交点を投票して速度ベクトルを推定する。

3.2.1. 選択的投票法に用いる判別関数の生成

物体内部と境界部とを判別するために判別関数を作成する。物体境界部は輝度変化が大きい部分であり、高周波成分の大きい部分であるから、判別関数 $D(x,y)$ は Wavelet 変換の高周波成分の絶対値を加算した式(6)とする。

$$D(x,y) = |W_{HH}(x,y)| + |W_{LH}(x,y)| + |W_{HL}(x,y)| \quad (6)$$

ただし、

x,y : 画像中の横、縦の画素番号

$W_{HH}(x,y)$: Wavelet 変換の HH 成分

$W_{LH}(x,y)$: Wavelet 変換の LH 成分

$W_{HL}(x,y)$: Wavelet 変換の HL 成分

図7より作成された判別関数の例を図11に示す。高さ方向は輝度勾配の大きさを表し、数値の大きい部分が物体境界部となる。

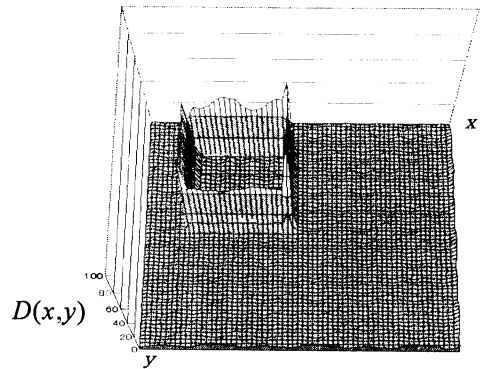


図11 判別関数の一例

3.2.2. 選択的投票法の判別関数の閾値の決定

判別関数により、投票を選択的に行うため適切な閾値の決定が必要である。閾値と推定精度の関係を図12に示す。この閾値を超えない部分は Wavelet 変換を用いた手法を用い、超える部分は、Wavelet 変換を用いないこととする。実験の結果、推定誤差は閾値が15の時点で最小となった。

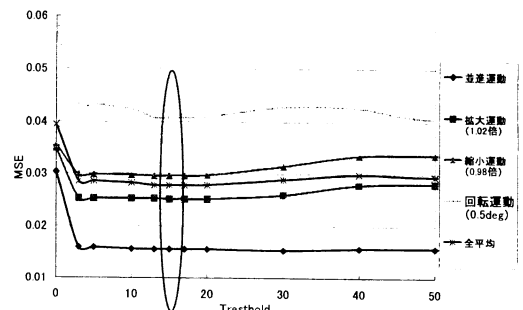


図12 判別関数の閾値と速度ベクトル推定誤差の関係

3.2.3. 選択的投票法による速度ベクトルの推定実験結果

選択的投票法を適用した手法と手法1の回転運動の時の推定誤差を表2に示す。評価は平均二乗誤差(式(5))を用いて、物体境界近傍5画素の平均値を式(7)により算出した。

$$MSE_{border} = \frac{1}{44^2 - 34^2} \left(\sum_{x=17}^{61} \sum_{y=17}^{61} \|v_{xy} - \hat{v}_{xy}\|^2 - \sum_{x=22}^{56} \sum_{y=22}^{56} \|v_{xy} - \hat{v}_{xy}\|^2 \right) \quad (7)$$

ただし、

v_{xy} : 画素(x,y)における正解速度ベクトル

\hat{v}_{xy} : 画素(x,y)における推定速度ベクトル

選択的投票法を適用することにより、手法1で物体境界部に生じていた速度ベクトル推定誤差が減少した。

表2 選択的投票法適用後の精度比較実験結果 (MSE)

	並進運動	拡大運動	縮小運動	回転運動
手法1	0.192	0.317	0.436	0.612
選択的投票法	0.191	0.257	0.351	0.600

3.3. 精度比較実験結果のまとめ

これまでの実験の結果をまとめる。各運動のモデル画像において、投票法のみの場合とWavelet変換を適用させた場合、そして選択的投票法を適用させた場合の速度ベクトル推定実験の結果を表3に示す。ここでは、評価は平均二乗誤差(式(5))を用いる。

結果の要約を以下に示す。

表3 速度ベクトルの精度比較実験結果 (MSE)

	並進運動	拡大運動	縮小運動	回転運動
投票法のみ	3.04×10^{-2}	3.48×10^{-2}	3.54×10^{-2}	5.57×10^{-2}
手法1	1.57×10^{-2}	2.81×10^{-2}	3.37×10^{-2}	4.06×10^{-2}
選択的投票法	1.56×10^{-2}	2.51×10^{-2}	2.96×10^{-2}	4.05×10^{-2}

Wavelet変換を適用させた手法1についてのまとめ

物体内部の速度ベクトル推定精度は向上できたが、物体境界部で推定誤差が発生した。境界部の変化が少ない並進運動の推定精度は大幅に向上したが、拡大・縮小運動では境界部の変化が大きいため精度の向上が小さいと考えられる。

選択的投票法を適用させた手法1についてのまとめ

物体内部と境界部を選択的に投票することにより、物体境界部の速度ベクトル推定精度が向上した。その結果、Wavelet変換の適用で速度ベクトルの推定精度

の向上が少なかった拡大・縮小運動に対しても速度ベクトルの推定精度が向上し、すべての運動に対して本手法による推定精度が高くなった。

4. おわりに

オプティカルフロー推定法では動物体の境界部や輝度値の変化が大きい部分、発生・遮蔽部分の速度ベクトル推定精度が著しく低下する。この問題に対して、我々は速度空間における拘束直線の交点群から投票法を用いたロバスト推定法による速度ベクトルの推定法を提案し、各問題に対して高精度に速度ベクトルを推定できた[1][2]。しかし、投票法での考慮領域の決定において投票値のピークの検出精度と分解能とにトレードオフ問題が存在した。

本研究は投票法に存在するトレードオフ問題を解決する手法として、Wavelet変換を用いた投票法による速度ベクトル推定法を検討した。

本手法と投票法のみを用いた手法との速度ベクトルの推定精度を比較したところ物体内部では本手法の推定精度が高く、境界部では投票法のみによる手法の精度が高くなった。このため、Wavelet変換の影響で発生した物体境界部の速度ベクトル推定誤差を軽減するよう、Wavelet変換の高周波成分を用いた物体境界部判別関数を作成し、物体内部と境界部とを選択的に投票することで全体の速度ベクトル推定の精度向上を試み、良好な結果を得た。

今後は、手法2を導入し有効性を確かめ、2つの手法が共に有効ならば、これらの手法を組み合わせた高精度な速度ベクトル推定法を構築する。

文 献

- [1] 今村 弘樹, 剣持 雪子, 小谷 一孔, “外挿予測を用いた遮へい・発生領域におけるオプティカルフロー推定”, 電子情報通信学会論文誌 Vol.J84-D-II No.8, pp.1636-1644, 2001.
- [2] 今村 弘樹, 剣持 雪子, 小谷 一孔, “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”, 電子情報通信学会論文誌 Vol.J85-D-II No.1, pp.12-22, 2002.
- [3] Ch. Bernard, “Wavelets and ill-posed problems: optic flow estimation and scattered data interpolation”, PhD thesis, Ecole Polytechnique, pp37-40, 1999.
- [4] Ch. Bernard, “Fast Optic Flow Computation with Discrete Wavelets”, 応用数学研究所の所内レポート RI365, Ecole Polytechnique, pp1-3, 1997.
- [5] 秋山智彦, 高野茂, 新島耕一, “ウェーブレットを用いた高速なオプティカルフロー計算法”, 情報処理学会第62回全国大会, 2001.
- [6] 新井 康平, “ウェーブレット解析の基礎理論”, 森北出版株式会社, pp80-82, 2000.
- [7] 三池 秀敏, 古賀 和利, “パソコンによる動画像処理”, 森北出版, pp133-169, 1993.
- [8] 中野 宏毅, 山本 鎮男, 吉田 靖夫, “ウェーブレットによる信号処理と画像処理”, 共立出版, pp49-77, 1999.