

特徴の安定性を利用した剛体の3次元運動の推定

宮鍋 庄悟, 金子 俊一, 本多 庸悟

東京農工大学 工学部 電子情報工学科

〒184 東京都小金井市 中町 2-24-16

あらまし 本論文は、特徴照合型のオプティカルフロー計算において抽出した速度情報の信頼性を高めるための手法を示すものである。すなわち、特徴の対応付け精度を確保しオプティカルフローの信頼度を定量的に評価するために、「動的安定性」の概念を導入することを提案する。この動的安定性は、①単一フレーム内での特徴の安定性を示す特徴評価値、②フレーム間での対応付けの度合を示す照合評価値、および③連続するフレームにわたる継続した出現の度合を示す継続評価値により定量化される。これらの評価値を対応付け処理に利用するための手法を検討し、さらに基礎的実験により、この対応付け手法が3次元剛体対象物などに現れる遮蔽部分や新たな出現部分を検出するために有効であることを示す。

和文キーワード 動画処理, オプティカルフロー, 3次元運動, 対応付け, 動的安定性

Estimating 3D Motion of Solid Objects based on Stability of Features

Syogo MIYANABE, Shun'ichi KANEKO and Tsunenori HONDA

Department of Computer Science, Tokyo University of Agriculture and Technology

2-24-16 Naka-machi Koganei-shi, Tokyo 184

Abstract This paper describes an approach for increasing the reliability of computation of velocity information derived by the optical flow calculation based on geometric features. In this approach, dynamic stability is proposed to introduce into optical flow computation for increasing precision of feature correspondence processing and for quantitatively evaluating reliability of optical flows. The dynamic stability consists of three criteria: the feature criterion for describing stability in single image frame, the correspondence criterion for describing a measure of matching between the temporal frame and the previous one, and the continuation criterion for describing stability of occurrence over sequential frames. A method of utilizing the dynamic stability for finding corresponding feature pairs is proposed. Fundamental experiments show that the method is feasible to detect occlusion and emergence of features which should be considered in the case of three dimensional objects.

英文 key words image processing of motion, optical flow, 3D motion, feature correspondence, dynamic stability

1. はじめに

本論文は、特徴照合型のオプティカルフロー計算において抽出した速度情報の信頼性を高めるための手法について検討することを目的としている。従来は、滑らかな輝度変化をもつ物体を対象物とした輝度と投影速度とによる微分恒等式に基づく手法⁽¹⁾と、エッジなどの急峻な輝度変化を特徴として抽出し継続するフレーム間にわたって照合する手法⁽²⁾⁽³⁾がよく用いられてきた。前者は微分算法に基づいているため、実画像に現れるようなコントラストの強い部分で大きな計算誤差を生じる。一方、後者は選択された特徴の照合結果における誤対応に非常に敏感である。本論文では、後者の特徴照合型算法をより信頼性のあるものとするために、動的安定性を考慮することを新たに提案する。これは継続する差分フレームにわたる個々の特徴の現れや対応付けの安定性を示すものであり、特徴としては差分フレーム間に定義した時空間エッジセグメントを用いる。さらに動的安定性を示す3種類の評価値を導入する。すなわち特徴の大きさおよび形状の特性、継続性、および照合の度合を表す量により定量化される。さらに動的安定性を時々刻々に評価することにより、遮蔽(occlusion)や出現も検出可能となる。

本研究は文献(3)の研究を継続して行うものである。そこにおいては、両眼ステレオ計算とオプティカルフロー(以下、OFと呼ぶ)を結合した構成によって、剛体の3次元運動を推定する手法を提案している。今回の報告では、特にOF計算の安定化手法を中心として述べることにする。

本論文では、エッジセグメントの抽出処理の概要、折れ線近似および曲率極大点分割に基づくエッジセグメントの記述および類似度の定義、動的安定性の定義、差分フレームにわたる対応付け処理や遮蔽・出現の検出処理における評価値の利用について述べ、実画像を用いた基礎的実験によって提案した手法を評価する。

2. 特徴抽出処理

2.1 時空間エッジ⁽³⁾

本論文では物体の輪郭などの、コントラストの差の大きい部分を表すエッジセグメント(以下、ESと呼ぶ)を特徴とし、原画像から移動物体を表す時空間エッジセグメントと呼ばれるESを抽出する。この時空間エッジセグメントは図1に示すように、時間的に継続する画像を差分することにより得られる時間エッジセグメントと、画像全体を微分することで得られる空間エッジセグメントとの論理積から得ることができる。ESなどの説明に用いるフレーム番号は、画像フレーム番号ではなく差分フレーム番号を用いる。ここで空間エッジは、 $\nabla^2 G$ オペレータとSobelオペレータを併用し、その結果得られるゼロ交差点(以下、ZCと呼ぶ)である⁽⁴⁾。

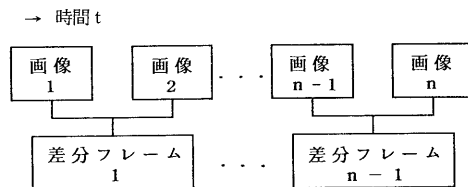


図1 差分フレーム

次に、抽出した時空間エッジを特徴として利用するために、本論文では画像上方から走査し、エッジ部分を見つけたら、そこから8方向の追跡を行う。この手法で最初に抽出される時空間エッジは、ほとんどの場合エッジの端点ではなく途中の部分を表している。また、理想的にはZCは正と負の領域の境界線を表しているため1本のESとして抽出されるはずであるが、コントラストの差が小さくフィルタの値が0に近いところでは、量子化の影響によりESが結合し、枝のある時空間エッジセグメントとなる場合が存在する⁽⁴⁾。そこで最初に抽出したZCから左右2方向に検索を行い、枝が現れたらコントラストの高い方を幹と見なし追跡を行い、枝は別のESと考えている。そして両端点を見つけたら、一つのエッジとして結合する。

2.2 SLES (折線化エッジセグメント) の定義

一般に単眼のカメラから抽出した ES の対応付けなどを行う場合、両眼視で用いられているようなエッジ拘束は利用できない。そこで、ES のどの部分を基準にするかが重要な問題であると考えられる。実際、剛体の移動に伴う歪みや、画素レベルでの量子化誤差などを含むので、画素単位に対応付けを行うのは困難である。そこで本論文では、ES の基準点として形状的に特徴がある曲率極大点を利用する。ES から曲率極大点を抽出するために、図 2 に示すマスクを利用する。

19	20	21	22	23	24	1
18						2
17						3
16			*			4
15						5
14						6
13	12	11	10	9	8	7

図2 エッジ分割用マスク

特徴点の抽出方法は、まずそれぞれの時空間エッジセグメントごとにその構成画素が図 2 のマスクの中心にくるようにする。そしてエッジの一方の端からもう一方の端まで追跡して行き、このマスクと ES とが 2 点で交差するとき、それぞれの部分のマスク値の絶対差を求め、ずれを示す値とする。ここでもしその時空間エッジが直線的に連結しているものであれば、値はマスクの輪郭画素数の半分近くになる。そこでまずこの値を基準値として持ち、ES 上を追跡する。そしてマスク値と基準値の比較を閾値を設定して行い、曲率極大点を求める。実際にはエッジ上の曲率極大点付近で、基準値とマスク値の差が閾値以上の部分が数画素存在する。しかしながら最も曲率の大きい部分を示す画素部分は、この基準値との差が最大値を示すのでその画素部分を曲率極大点としている。

この曲率極大点でエッジを分割し、直線近似したものを、SLES (Splitted Linearized Edge Segment) と呼び、本手法における基本的

な特徴量とする。これはそれぞれの SLES の端点の単純な距離評価によって対応付けを行うためである。式(1)に i 番目の差分フレーム中にある j 番目の SLES $_j^i$ の始点および終点を示す。

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_j^i &= (x_h, y_h) \\ \mathbf{t}_j^i &= (x_t, y_t) \end{aligned} \quad (1)$$

また、各 SLES は位置情報に加えて、次節で述べる固有の 3 種類の評価値を保持している。

3. 動的安定性の定義

特徴照合型の OF 計算法においてはまず誤対応を低減することが重要である。そのために相対的に大きく安定に抽出できる特徴だけを利用することが有効である。しかしながら、速度場としての OF を求めるためには画像全体にわたる密な速度情報が得られることが必要である。このため特徴数をあまり少なくすることは望ましくない。そこで本研究では、特徴数を低減するのではなく、特徴ごとに得られた個々の速度情報の信頼性を評価するというアプローチをとる。すなわち、個々の特徴ごとに動的に定義される評価値を算出し、その値によって OF のデータ数と信頼性とを制御できるようにすることを目的とする。

特徴評価値、照合評価値、継続評価値の 3 種類を定義し、それぞれについて詳述する。

(1) 特徴評価値: f_j^i

i 番目の差分フレームにおける j 番目の SLES $_j^i$ の特徴評価値は、SLES の長さコントラストの大きさに基づき次式で定義される。

$$f_j^i = \alpha n_j^i + (1 - \alpha) g_j^i \quad (2)$$

ここで n 、 g はそれぞれ、各差分フレーム内の SLES の長さ (SLES の構成画素数) と輝度差を表し、この評価値は SLES そのものの静的な安定性を示すと考えられる。 α は調整係数である。

(2) 照合評価値: m_j^i

照合評価値は SLES $_j^{i-1}$ と、対応する SLES $_j^i$ との照合の度合を表し、次式で定義される。

$$m_j^i = \frac{1}{d+1} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} d &= \beta (d_h + d_t) \\ &+ (1 - \beta) |f_{j^*}^{i-1} - f_j^i| \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \hat{h}_j^i &= h_j^i + r h_j^i \\ \hat{t}_j^i &= t_j^i + r t_j^i \end{aligned} \quad (8)$$

次に、図5に示すようにこの推定移動ベクトルを用いて求めた予測 SLES : \widehat{SLES} の両端点から、一定範囲内にある SLES を選出する(実験では、正方形領域を使用している)。このとき、照合評価値も元の SLES ではなく \widehat{SLES} と次の SLES との間に定義されることになる。

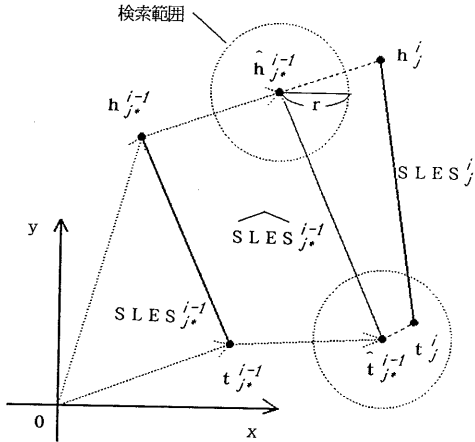


図5 SLES の対応候補の選定

しかし実際には、前節の処理③において選定した対応候補の中で最も照合評価値の大きいものを対応する SLES としただけでは、誤対応を増やす原因となる。これは、ES から SLES への変換誤差、または前段階での誤対応の継承などが考えられるためである。そこで本研究では、継続評価値の値により制御される動的閾値をもうけ、正対応のいわゆる絶対評価を行う手法を用いている。動的閾値 M_j^i は次式により決定される。

$$M_j^i = m_{max} - P \times \Delta M_j^i \quad (9)$$

$$\Delta M_j^i = \frac{1}{P_{max}} \times \frac{1}{c_j^{i+1}} \quad (10)$$

ここで、 m_{max} は照合評価値の最大値 (=1)、 P ($\leq P_{max}$) はオプティカルフロー計算全体の信頼性を制御するためのパラメータであり、 $P=1$ が信頼度最大である。この閾値に達しない照合評価値を持つ対応を誤対応と考え、継続評価値を初期化して対応付け処理を行う。またこの

動的閾値を導入することで、照合の割合によって対応の信頼性を P_{max} 段階のレベルに分けることが可能となり、信頼性の異なる OF を得ることもできるようになる。

OF は差分フレームにわたって対応する SLES どうしの始点および終点の差ベクトル

$$\Delta h_j^i = h_j^i - h_{j*}^{i-1} \quad (11)$$

$$\Delta t_j^i = t_j^i - t_{j*}^{i-1}$$

の空間分布として求められる。

5. 3次元運動の推定 (3)

図6に3次元運動の推定のための処理の流れを示す。最初の両眼視ステレオから得られる SLES の奥行き値と、次のステップから得られてくる OF の値を用いて3次元運動を逐次的に再構成する。

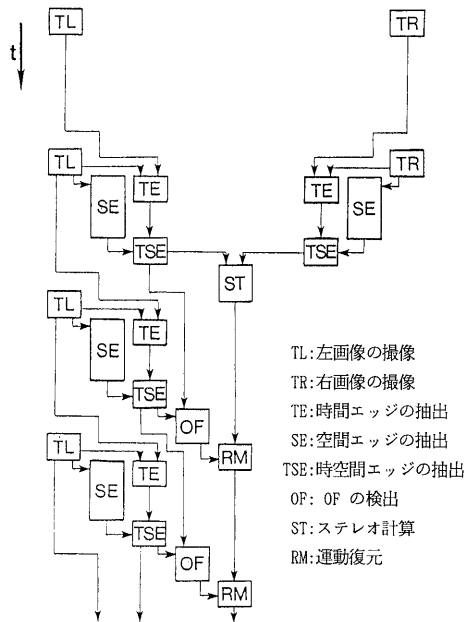


図6 3次元運動の推定

6. 遮蔽と出現の検出

移動している物体は部分的に見え隠れする。これは、回転運動だけではなく平行移動についても言えることである。本論文のように対応付け処理のために ES などの特徴を利用する場合には、このような見え隠れする部分の検出が非常に重要となる。そこで、動的安定性を利用して遮蔽部分や出現部分の検出を行う手法について検討する。

既に述べたように、照合評価値は現在の差分フレームにおける照合の度合を示し、継続評価値は過去の差分フレームにおける照合の傾向を示している。この2つの動的安定性を用いると次のように局所的な遮蔽および出現の現象を表現することができる。すなわち、いくつかの差分フレームにわたって対応が成立してきた ES が、対応しなくなった場合に、その ES は遮蔽部分を表すと考えられ、継続評価値は高いが照合評価値は低くなる。一方、ある時点で現れた ES が数フレームにわたって継続的に対応に成功する場合には、その ES は出現部分を表すと考えられ、照合評価値は高いが継続評価値は低くなると考えられる。しかしながら、出現直後の照合評価値だけに頼ると誤対応を生じることがあるので、連続する差分フレームにわたって継続評価値の上昇を確認する必要がある。したがって、出現部分の検出にはいくらかの時間遅れが生じることとなる。このように照合評価値の累積が継続評価値であることを考慮すると、継続評価値の時間変化を観測することにより遮蔽および出現部分の検出が可能になると考えられる。図7は、理想的な SLES の持つ継続評価値の時間的変化を示したものである。

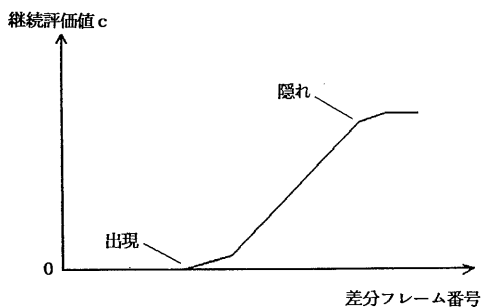


図7 遮蔽および出現部分の検出

7. 実験

7.1 実験方法

これまで述べてきた流れに従い、動的安定性を利用して次の処理を実行した。

- (1) オプティカルフロー計算
- (2) 遮蔽、出現部分の検出

カメラはソニー製 XC-711 (NTSCモデル) CCD カラーカメラモジュールを使用し、焦点距離は 16 mm である。画像データはフレームメモリから UNIX SUN4/2 システムに転送し処理を行う。フレームメモリは画像サイズ 640×484 画素、濃淡レベルは 256 階調である。

動的安定性を評価するための基本的な実験を行うために、グリーススプレー缶を 10 枚程度移動させながら撮像する。対象物の移動は、固定カメラの前方に固定して回転運動させる。この運動により画像上での移動に、平行移動と加速度のある SLES の移動を模擬した実験を行った。このとき各時点での処理結果から得られた動的安定性を評価し、遮蔽部分や出現部分の検出についても検討を行う。

7.2 実験結果と考察

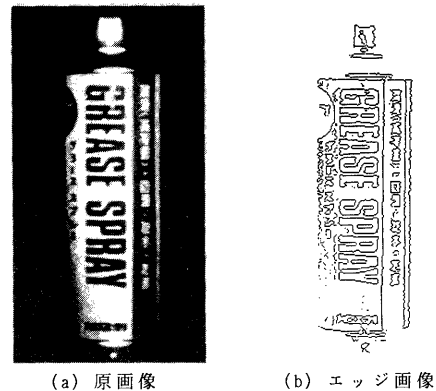


図8 原画像から時空間エッジの抽出

図8に実験で用いた対象物の原画像とその時空間エッジセグメントを示し、図9に対象物を回転移動させたときの連続したフレームにおける SLES を示す。実験では、対象物はカメラの前方 700 mm の位置を画像平面に平行な方向に 10 度の間隔で回転運動させた。



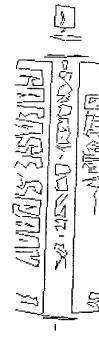
差分フレーム 2
SLES の個数:342)



差分フレーム 3
(SLES の個数:331)

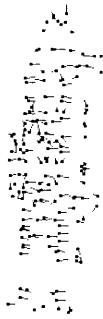


差分フレーム 4
(SLES の個数:342)

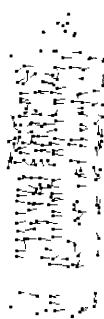


差分フレーム 5
(SLES の個数:330)

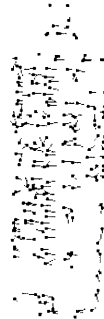
図9 SLES の時間的変化



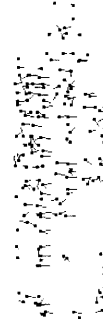
(OF の個数:161)



(OF の個数:179)



(OF の個数:188)

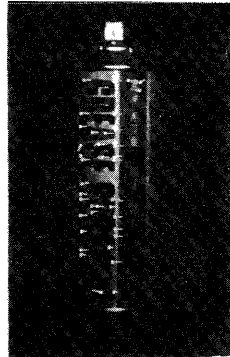


(OF の個数:163)

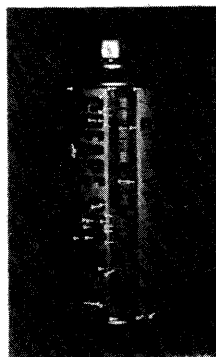
(a) 動的閾値を利用した場合



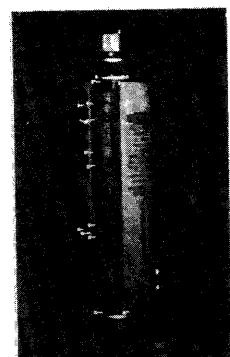
(OF の個数:161)



(OF の個数: 42)



(OF の個数: 37)



(OF の個数: 23)

(b) 継続評価値および照合評価値の高い場合

図10 オプティカルフローの時間的変化

図9により、今回実験に用いた曲率極大点抽出マスクが、曲線形状を示すESに対しては適合していないことがわかる。しかしそのほかの部分では、特徴を再現するSLESが抽出できた。

図10は、各差分フレームから抽出したそれぞれのSLESを、動的安定性を評価することで対応付け処理し、そこから得られたオプティカルフローである。(a)は、動的閾値を利用してすべての閾値以上の対応を初期の対応付け処理から連続的に示したものである。(b)は、対応が2フレーム以上にわたり継続し、かつ照合評価値の高いOFを連続に原画像に重ねて表示したものである。図10(a),(b)に示されるように、スプレー缶の太字の英字部分が対応付けしやすく、移動の継続性から、缶の端部分で遮蔽や出現のために不安定な対応を生じている。このように、継続的にOFを見ることで、遮蔽部分や出現部分を検出できる。

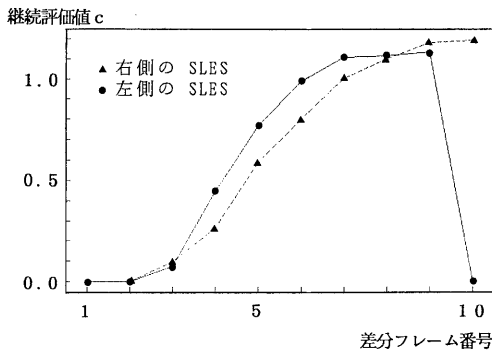


図11 継続評価値の時間変化

実際に、数フレームにわたる対応付けを行い得られたSLESに対する継続評価値の時間変化をグラフに示すと図11のようになる。ここでこのSLESは、図9においてすべてのSLES画像に存在する縦方向の長い2本のSLESである。このように、各差分フレーム間でそれほど特徴変化が少ない場合には、特徴的なSLESの持つ継続評価値を見ることで遮蔽部分を検出できる。しかしながら、今回の実験において、文字などを表すSLESが継続できるのは、だいたい3から5フレームの間であることが確認された。これは移動によって照明が変化したり、ESの形状の変化によるものであると考えられる。このような継続性の弱いSLESから遮蔽部分を検出す

るには、部分的な対応の継続性を評価するのではなく、全体的な継続性を評価する必要がある。

8. まとめ

本論文では、動画像における対応付け処理に動的安定性を導入することを提案し、また、実験によりその有効性を確認した。それらを次に示す。

- (1) SLESの動的安定性を評価し、安定なOFを抽出する手法の確認。
- (2) 継続評価値の時間的変化を評価し、遮蔽・出現部分を検出する手法の確認。

今回の対応付け実験においては、同一フレーム内の個々のSLES間の連結関係や位置関係などは利用していなかった。しかしながら、さらに複雑な画像を処理することを考慮すると、ノイズによる影響や、移動に伴うESそのものの形状変化によって安定な対応付けを行うことは困難であると考えられる。そこで今後の課題として、曲線形状を持つESから、安定なSLESへの変換手法を確立し、また、SLES間の連結関係なども考慮し、さらに信頼性の高い対応付け処理を行うことを考えている。

謝辞 本研究にご協力いただいた小野真氏(現在日立製作所生産技術研究所)に感謝いたします。

参考文献

- (1) B. K. P. Horn and B. G. Schunk: Determining Optical Flow, Artificial Intelligence, Vol. 17, pp. 185-203 (1981).
- (2) J. K. Aggarwal, L. S. Davis and W. N. Martin: Correspondence Process in Dynamic Scene Analysis, Proc. of the IEEE, Vol. 69, No. 5, pp. 562-572 (1981).
- (3) 金子, 小野, 本多: 時空間エッジを特徴とする動的ステレオ法の一手法, 第8回日本ロボット学会学術講演会, pp171-172(1990).
- (4) 金子, 大町, 本多: 両眼視奥行き計算への顕著度エントロピーに基づくエッジセグメントグループの構造化の導入, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J75-D-II, No. 10 (1992) (掲載予定).
- (5) 山口, 白井, 中山, 浅田: 信頼性の高い対応を優先した多段階ステレオ法, 電子通信学会論文誌, Vol. J74-D-II, No. 7, pp. 918-925 (1991).