

Simulated Annealing によるステレオ対応付けにおける 隠れ部分の評価について

嶋崎真一、金子俊一、本多庸悟

東京農工大学

概要 エッジ特徴に基づく両眼視ステレオ計算に Simulated Annealing 法を導入し、全てのエッジ特徴の組合せ最適化問題として奥行き計算を行う手法について検討する。このアプローチにおいては、エッジ特徴の組合せ状態を評価するための評価関数をどのように設計するかが大きな問題となる。そのための基本的評価関数として、エッジ形状、エッジ寸法、コントラスト（輝度差分）、視差の連続性、順序の不変性などを設計する。さらに、隠れ部分の合理的な検出を指向して、ヌル対応の検出、ヌル対応近傍での視差の不連続性、順序不変性の強調を導入することなどを検討する。

Evaluation of Occluded Regions in Stereo-corresponding Processing based on Simulated Annealing

Shin'ichi Shimazaki, Shun'ichi Kaneko, Tsunenori Honda

Tokyo University of Agriculture and Thechnology

A binocular stereoscopic method for obtaining depth information as combinatorial optimization problems with edge features is considered, in which a corresponding problem is solved by a simulated annealing. In this approach, it is difficult and important to design good criteria for evaluation of correspondence of edges. In this study, some fundamental functions for evaluation of edge shape, dimension, contrast value, smoothness of depth contour, invariance of edge order, are designed. Futhermore, in order to detect occluded regions the following new criteria are introduced: detection of null correspondence, non-smoothness of disparities in the neighbourhood of null correspondence.

1. はじめに

局所的な特徴に基づくステレオ対応問題では、局所的な相違度評価による個々の特徴の照合と、特徴の順序や配置などの全体構造を考慮した処理が重要となる[1][2][3]。特に、ノイズの多い室外ステレオ画像処理や、隠れの多い疎な対象物の3次元形状の復元などの場合には、局所的な相違性の評価の信頼性が著しく低下し、個々の相違度の総和の最小化問題としてだけで、対応問題を捉えることに限界がある。いわゆる局所解に陥る状況が頻繁に起こる。これに対処するために、多重尺度空間での定式化による大域的情報の利用[4]や、知識処理による構造情報の利用[5]などが提案されている。

ここでは、従来型のエッジに基づくステレオ対応問題を扱う。エッジ特徴の相違度に基づく評価関数の局所解からの脱出を意図して、Simulated Annealing (以下、SA)法を導入する。SA法は組合せ最適化問題に対する大域的最適化手法の一つであり、二次評価関数の勾配に基づく降下法では扱えない評価関数を持つ問題や、局所最小解が数多く存在する問題に対する有効な手法として知られている[6]。ステレオ視の対応問題への応用も報告されている[7]。

さらに、SA法における評価関数設計の自由度の大きさをうまく利用することを考える。すなわち、微分可能性をもたない評価関数でも利用できる。本研究では、隠れ部分の検出及び隠れ特徴を除いた最適な対応付けを行うために、この隠れに特有の評価方式を導入することを検討する。これによって、ノイズの混在に対するロバスト性を確保し、たとえば枝葉をもつ植物形状の計測などへの応用を指向できると考えている。

2. SA法の適用

図1に全体の処理の流れを示す。本研究では、ラプラシアンガウシアンフィルタにより抽出したエッジ点を、縦方向に連結したエッジセグメント(以下、ES)を基本特徴として、その左右の特徴集合の対応問題を扱う。縦方向ESを扱う理由は、特徴の配置構造を評価するために、その対応順序を評価するためと、特徴の視差が連続することを利用し、視差連続性も評価するためである。局所的な照合評価のためには相関処理を用いる。この処理の中で、ESの組合せを対応問題の部分

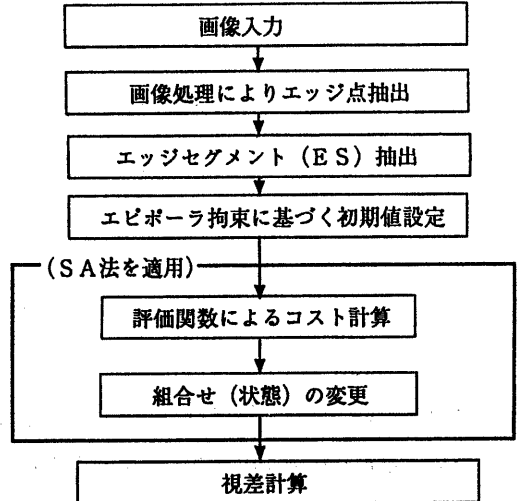


図1 ステレオ対応処理の流れ図

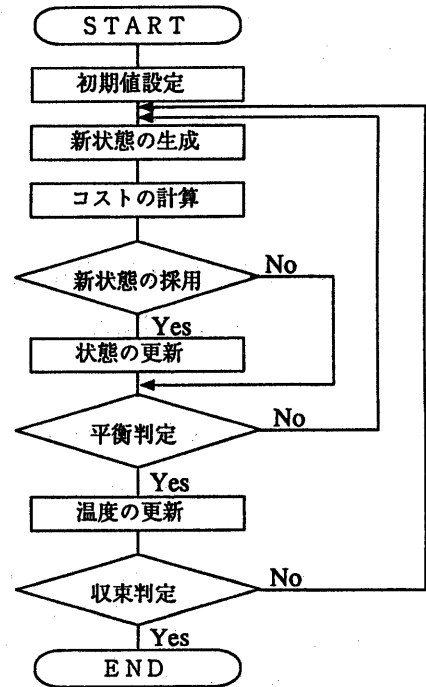


図2 SA法の処理の流れ図

にSA法を適用する。

図2にSA法の基本的手続きを示す。左右のES集合の画像の組合せを状態 x とする。ここでの状態とは図3のような対応リストとする。

Combination Number	1	2	3	4	5	6	
Left ES Number	1	2	6	3	7	N	--
Right ES Number	1	4	9	11	N	10	

図3 組合せリスト

コスト関数を $F(x)$ 、制御パラメータを $T(T \geq 0)$ とする。

初期状態の設定：ESの検出順に、エビポーラ拘束条件を満たすESの組合せを対応付けていく。他のESはヌル対応とする。

新状態の生成：対応リストの順番で、左右どちらかのESを選択し、注目ESとする。注目ESのエビポーラ拘束条件を満たすESをランダムに選択する。前の状態でペアとなっていたESはヌル対応にする。

新状態 y へ遷移するための条件は次の二つのいずれかである。

$$(a) \Delta F = F(x) - F(y) < 0 \quad (1)$$

$$(b) \Delta F > 0, \text{ かつ } r \leq \exp(-\Delta F/T) \quad (2)$$

($0 \leq r \leq 1$ は一様乱数)

条件(a)は直接コスト関数の減少を意図する。条件(b)は大域的収束を狙ったものであり、たとえコスト関数は増加しても、ある確率で状態遷移を実行することを示す。

コスト関数 F は次のように定義する。

$$F = \sum_{m=1}^5 (a_m \times J_m) \quad (3)$$

ここで、 a_m は加重定数を表し、 J_m は後述する各コスト関数を表す。

冷却戦略として次式の戦略を用いる。

$$T = T - \Delta T, \quad \Delta T = c / \log(g) \quad (4)$$

ただし、 g は状態遷移回数を表す。

ここでは処理の簡略化のために、平衡状態の確認は行わず、固定回数の状態更新の後、制御パラメータ T の更新を行う。

3. 多重対応問題

特徴としてエッジ点を連結し、ESとして扱うので、連結する際に左右の画像の異なる位置でESが途切れてしまうことがある(図4参照)。このように、形式的に複数のエッジどうしが対応しあい、合理的な視差を形成する場合を多重対応と呼ぶ。

対応させる左右のESをエビポーララインにより切り揃える(トリミング)。残った部分には、他のESを対応させることで解決する。

図4の例では

L1-R4

L1-R5

L2-R5

と対応させる。

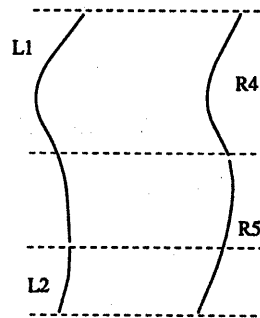


図4 多重対応の例

4. 評価関数の設計

4.1 個々のESの評価とヌル対応の定義

対応付けした個々のESの形状、長さ、コントラストの違いを評価する。また、対応のつかないものをヌル対応と定義する(図3のリストの中でNと対応しているもの)。ヌル対応は状態遷移の過程で起こりえる組合せの一つであるが、実際には隠れである場合がある。これを区別するために、隠れ判定を行う。この隠れ判定処理は“5. 隠れの判定”で定義する。ここでは、左右で対応づいているESの評価方法を定義する。

4.1.1 形状の相違度

ESの形状の違いを評価するために、相関法を用いる。計算方法は次のように行う(図5参照)。

(1) ESをエビポーラ拘束条件により長さを切り揃

える (トリミング)。

(2) 水平距離の差の総和を取り、その平均値を算出する。

(3) (2)を全てのエッジ点についてエッジ起点を移して計算し、最小の値を形状の相違度とする。

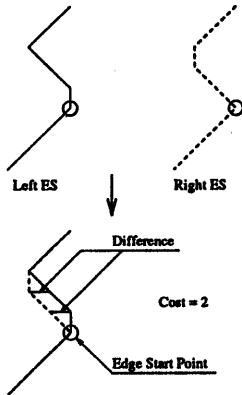


図5 形状の相違度の計算例

j_1 を個々のESの形状に関する相違度とする。

$$j_1 = \min_n \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{t_len} |(RP_i + n) - LP_i|}{t_len} \right\} \quad -Ws \leq n \leq Wb \quad (5)$$

t_len : トリミングしたESの長さ

RP_i : i のスキャンライン上での右ESのX座標

LP_i : i のスキャンライン上での左ESのX座標

Ws : 幅の狭い方のESの幅

Wb : 幅の広い方のESの幅

$$J_1 = \sum_{k=1}^n j_{1k} \quad (6)$$

k はESの組合せ番号を表し、 n は組合せ総数を表す。

4.1.2 長さの相違度

ESの長さの相違度を j_2 とする。

$$j_2 = \frac{|R_{len} - L_{len}|}{R_{len} + L_{len}} \quad (7)$$

R_{len} : 右ESの長さ

L_{len} : 左ESの長さ

$$J_2 = \sum_{k=1}^n j_{2k} \quad (8)$$

4.2.3 コントラストの相違度

ラブラシアンガウシアン値の勾配 (コントラスト) の相違度を j_3 とする。

$$j_3 = \frac{|R_{con} - L_{con}|}{|R_{con}| + |L_{con}|} \quad (9)$$

R_{con} : 右ESのラブラシアンガウシアン値の平均勾配値

L_{con} : 左ESのラブラシアンガウシアン値の平均勾配値

$$J_3 = \sum_{k=1}^n j_{3k} \quad (10)$$

4.2 ESの順序拘束

空間内に局在する立体などでは、対応するESどうしの左右画像にわたるその順序が反転することは少ない。言い換えると、左右ESの並びは反転することが少ないという仮定を設けることである。このような状態を評価できる順序拘束コストを定義する。ここでは、2組のESの組合せに関してのみ順序を調べる。この順序拘束コスト j_4 を決めるアルゴリズムを次に示す。

(1) 初期化: 左画像中の全ESに関して、最も近い右隣のESを登録する。

(2) 左画像中のESと対応する右画像中のESを探索する。

(3) 順序拘束コストを設定する。すなわち、左画像中のESと右画像中のESの順序が等しいとき0、等しくないとき1とする。

(4) 先の(2)と(3)をすべての左画像中のESに対して繰り返し、その総和をとったものを J_4 とする。

例えば、図6のようなとき、左画像で1、2の順序と、これに対応する右画像の1'、2'の順序は正しいので0。次に左画像で2、3と右画像での3'、2'は順序が異なるので1となり、この組合せにおける全体の順序拘束コストは1となる。

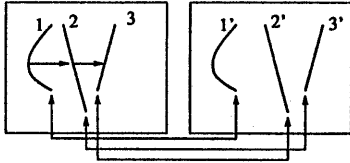


図6 順序拘束コストの求め方の例

4.3 視差の連続性評価

図7の丸で囲ったESの視差は、周りとの視差の差が非常に大きい、このような対応は起こりにくい。一般的に撮像する対象物は、ある奥行き範囲内に限られていると仮定する。この仮定に基づき、対応させたESも、ある視差範囲内にあるときコストを低くするように視差の連続性評価を行う。視差コストとして、図8のように注目しているESの右隣のESの視差との差によりコストを与える。

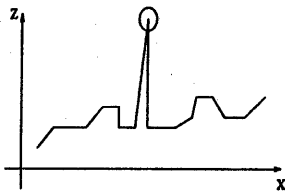


図7 視差の連続性

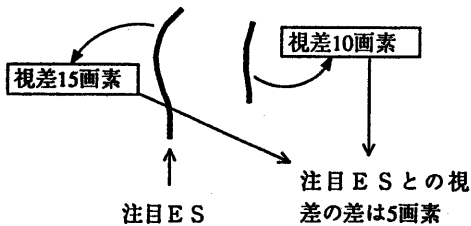


図8 視差コストの計算例

視差コスト j_5 を定式化したものを次に示す。

$$j_5 = \frac{|d_A - d_{RN}|}{D_{max}} \quad (11)$$

d_A : 注目ESの視差

d_{RN} : 注目ESの右隣のESの視差

D_{max} : あるしきい値による視差範囲

$$J_5 = \sum_{k=1}^n j_{5k} \quad (12)$$

以上の J_1 から J_5 までの評価関数によるコスト計算を行い、式(3)の F に代入する。

5. 隠れの判定

ステレオ視は2台のカメラで、離れた位置から見るので、その性質上片方のカメラでは写っている特徴がもう一方のカメラには写らないことがある。これを隠れというが、通常ステレオ視では扱いが難しい問題である。本研究では、ヌル対応と隠れを区別し、積極的に評価、認識することを試みる。

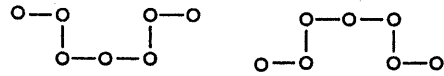
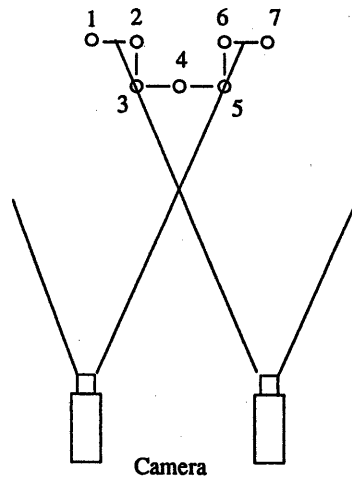


図9 S型の基本的形状(左が凸形、右が凹形)



図10 T型の基本的形状(左が凸形、右が凹形)



Left aspect

Right aspect

123457

134567

図11 T型凸形の左右カメラからのアスペクトパターンの例

表1 T型凸形のアスペクトとヌル対応

Num.	Appearance pattern of ES	Left aspect	Right aspect	Combination
0-1		1235, 12345	12345, 1345	12345 12345 1345 1345 1235 1235 135 135
1-1		124, 1234	1234, 234	1234 1234 234 234 124 124 123 234
1-2		124, 1234	1234	1234 1234 123 1234
1-3		124, 1234	1234, 134	1234 1234 134 134 124 124 134 134

表2 S型凸形のアスペクトとヌル対応

Num.	Appearance pattern of ES	Left aspect	Right aspect	Combination
0-1		13457, 123457	134567, 13457	13457 134567 13457 134567 13457 13457
1-1		2346, 12346	23456, 2346	2346 23456 2346 23456 2346 2346
1-2		12346	123456, 12346	12346, 123456 12346, 12346
1-3		1346, 12346	13456, 1346	1346 13456 1346 13456 1346 1346

ここで、二つの基本的三次元形状について、その現れ方、近傍のESの並び方について考察する。(a) Triangle (以降、T)型 (b) Square (以降、S)型とし、それぞれがカメラに対し凸形のとときと凹形のとときに分けて考える。図9、10は隠れの起こる二つの基本的三次元形状のモデルを、エピソード平面の鉛直方向から見た図である。丸がESの出現可能位置を示し、線分は平面を表す。

このモデルにおいて、ESの出現パターンすべての組合せに関して検討する。それぞれの組合

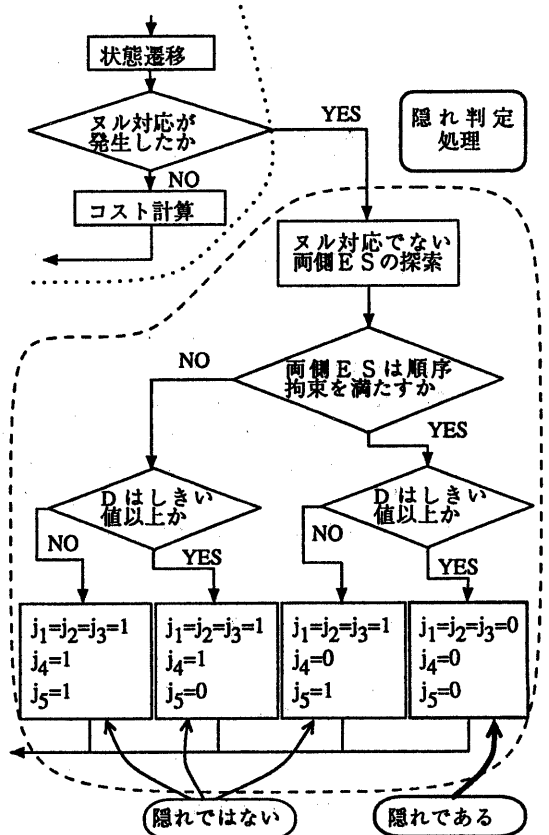


図12 隠れ判定処理

ここでの j_1 から j_5 は j_{1k} から j_{5k} に対応する。

せに対し左カメラからの見え方 (アスペクト)、右カメラからの見え方 (アスペクト) を調べ、その際どのように隠れが現れるかを考察する (図11参照)。これをまとめたものの一部が表1、2である。

表のNumの列は、左の数字がESの現れていない数を示し、右の数字はパターン番号を示している。Appearance pattern of ESの列は基本的三次元形状のモデルのESの出現パターンを表している。白丸はESが存在することを、黒丸はESが存在しないことを示している。Left aspectの列は左カメラからのアスペクトのパターンをES番号で示し、Right aspectは右カメラからのアスペクトを示している。ここでは、隠れが一つしか起こらない

場合を仮定している。Combination の列が左右のアスペクトの組合せを表し、そのときヌル対応となるESの番号を四角で囲んで示している。表1、2はそれぞれ凸形のときのものだが、凹形に対しても同様に調べる。表1、2から次のことが分かる。

(1) ヌル対応の両隣りのESの対応は順序拘束が崩れない。(片側しか対応するESがない場合は判定不可能)

(2) ヌル対応の両隣りのESの視差の差Dがしきい値以上になるとき隠れが現れる。(片側しか対応するESがない場合は判定不可能)

上記の二点から、ヌル対応が発生したときに最も近いヌル対応でない隣りのESの並び順序、視差の差を評価を行うことにより、隠れか誤対応かを判定することができると思われる。(ただし、ヌル対応の両側に対応するESが存在しない場合、片側だけでは順序、視差の差をとることができない。この点に関しては検討を要する。)この考察に基づいて設定した隠れ判定処理のアルゴリズムを図12に示す。

このアルゴリズムでは、ヌル対応に対し各コストを合理的に割り付けることを可能としている。隠れと判定したら個々のESの相違度 j_1 、 j_2 、 j_3 は0、順序拘束コスト、視差コスト j_4 、 j_5 も0とすることで、SA法の対応付け処理の中で隠れを積極的に受理させることができる。隠れと判定されない場合でも、順序拘束コスト及び視差コストに対して、その条件に見合ったコストを与える。それによりコストギャップを下げ、新しい状態を受理しやすくすることができる。

6. 実験

現段階では、隠れ判定処理に関して実験中である。実験結果は発表の際に示す。奥行き異なる対象物をステレオカメラ(基線長約100mm)で撮像した。図13、14はこの隠れをほとんど含まない原画像から縦方向ESだけを抽出した画像(横638画素×縦480画素)である。図15は隠れ判定処理を含まないSA法による対応付け結果である。正しい対応率は画素単位で約60%である。

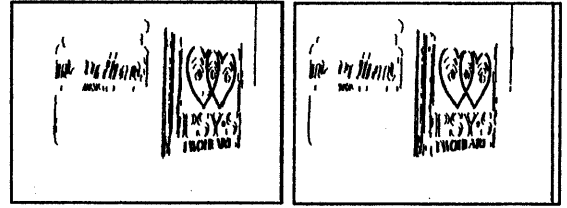


図13 左エッジ画像

図14 右エッジ画像

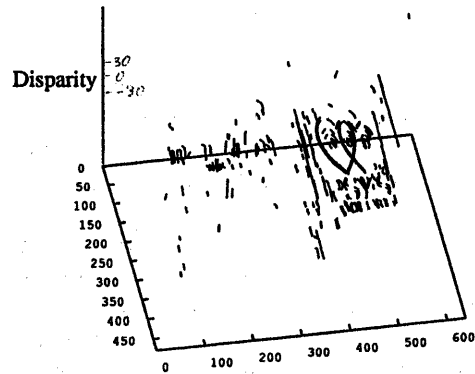


図15 視差マップ

7. まとめ

本研究では、特徴としてESを用いるステレオ対応問題に対し、エッジ形状、エッジ寸法、コントラスト、視差の連続性、順序の不変性の各評価関数を設計した。また、ESの組合せ対応問題にSA法を適用した。実験の結果、約60%しか正しい対応がとれなかったのは、SA法の処理における初期値の設定、平衡状態の判定、収束判定等のパラメータ調整が十分行えなかったためと思われる。今後の課題として、このSA法による隠れ判定関数を実装したステレオ対応問題を解く実験を行い、その有効性を検討するために、隠れの多い画像を扱っていくことを目指す。また、より正しい対応率を上げるために、横方向エッジの利用方法の検討、隠れ判定による他の評価関数の重み付けの変更、もしくは、評価関数自体の変更等を検討していく。

参考文献

- [1]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-2, No.10, pp.1649-1659(1992).
- [2]嶋崎, 金子, 本多: 顕著度を利用したシミュレートッドアニーリング法による両眼立体視, 情報処理学会第48回全国大会, 2-91, (1993).
- [3]嶋崎, 金子, 本多: S A法に基づくステレオ対応アルゴリズム, 情報処理学会第49回全国大会, 2-81, (1994).
- [4]William Hoff and Narendra Ahuja:"Surfaces from Stereo :Integrating Feature Matching,Disparity Estimation,and Contour Detection",IEEE Transactions on Pattern Analysis and Nachine Intelligence, Vol11, No.2,Februay(1989).
- [5]K.L.Boyer and A.C.Kak:"Structural Stereopsis for 3-D Vision",IEEE Transactions on Pattern Analyeis and Machine Intelligence,Vol.10,No.2, March(1988).
- [6]P.J.M.van Laarhoven & E.H.L.Aarts:"Simulated Annealing :Theory and Applications",Kluwer Academic Publishers (Holland) (1987) (book).
- [7]S.T.Barnard:"Stochastic Stereo Matching over Scale" , International Journal of Computer Vision,3,pp.17-32 (1989).