確率的弛緩法と勾配法の併用によるステレオ画像対応点の高精度自動抽出

Automatic High Accuracy Tie Points Detection in Stereo Images Using Relaxation Method and Gradient Method

坂元 光輝・内田 修・汪 平涛

Mitsuteru SAKAMOTO, Osamu UCHIDA and Pingtao WANG

Abstract : It is necessary for fully automatic relative orientation to realize precise and stable detection of tie points in stereo images. However, usual approaches such as template matching are not applicable to images of different conditions because parameters depend on features of images strongly. In this paper we proposed a series of techniques based on combination of probabilistic relaxation method and gradient method. By our approach, insensibility on setting parameters is achieved in individual methods and as a result total process is more robust. In addition, by examining detected points using relative orientation equation, it is possible to select points that satisfy required accuracy. The validity of proposed technique was verified by experiments using differently conditioned images.

1. はじめに

写真測量作業の自動化に関するテーマの中でも相互標定処理は比較的、計算機による自動化を行いやすい項目であり、ステレオペアの画像から対応点を自動抽出する問題に置き換えて考えることが出来る。実際、航空写真や衛星写真のような撮影距離に対して比高差が小さな画像においては、共線条件式等による簡単な数学モデルの仮定と、階層的な特徴点の追跡や多段階のテンプレートマッチング処理等との組み合わせによって、比較的良好に画像間の対応を求めることが出来る^{1),2)}。しかしながら、近接写真測量のように視差の影響が大きくなる画像においては、物体の幾何学的位相の逆転やオクルージョン等の問題により、良好な画像対応点を抽出することは必ずしも容易ではない³⁾。また、テンプレートマッチングでは、対応付けの妥当性を相互相関係数等の類似度によって判定することがしばしば行われるが、通常その閾値は撮影条件、撮影対象毎に変更する必要がある。自動処理において、こ

れは大きな問題となる。従って、相互標定処理の自動化を行うにあたっては、対応点の取得処理が種々の撮影条件に対してロバストな手法であることと、得られる対応結果の信頼性の高いことが要求される。

画像間の対応付けのアルゴリズムは、テンプレートマッチングと構造マッチングの二つに大別される⁴⁾。テンプレートマッチングは発見的探索手法であることから、画像のテクスチャー変化が乏しい場合や、オクルージョンが存在する場合、また探索範囲以上の視差を持つ対応において、マッチングの迷走が発生するという問題がある。通常、幾何学的な拘束条件の設定や、多段階のマッチングの実施等によってこれらの影響を軽減させることが試みられるが、本質的には解決しない。また、撮影シーンに応じてテンプレートサイズの変更や不適切な対応の除去を目的とした類似度の設定閾値の変更等が必要となり、様々な撮影対象に対してロバストな手法とはなりにくい。一方、構造マッチングの一つとして位置付けられる弛緩法は、特徴間の対応付けにおいて、局所並列的な反復処理によって対応付けの矛盾と曖昧さを低減させる処理である^{4),5)}。確率的弛緩法では、特徴が有する対応付けが確率として表現され、その確率が周辺に存在する特徴との整合性によって更新されていくため、たとえ初期に小さな確率しか持たない対応であっても正しい対応付けである場

合、最終的には高い確率を持つように更新される。また、理想的には視差が同程度の位置にある特徴からまとまった対応が得られるため、テンプレートマッチングのように個々の対応がそれぞれに迷走するといった状況は生じない。その反面、配置の類似した特徴が複数存在する場合、局所的にまとまった点数での誤対応を生じる場合もある。周辺との整合性を探索に組み入れられるマッチング手法としては、DP マッチング⁶⁾もよく知られており、1 次元探索間の整合性を考慮した 2 次元探索への拡張も試みられている⁷⁾。しかし、同手法は基本的に標定要素が既知のモデルに対して効果的な手法であり、本研究のように標定要素を決定するために対応点の算出を行うような処理には適していない。

本研究では、撮影条件、撮影対象の異なる様々なステレオ画像対から、特に相互標定の自動化を目的とした安定かつ高精度な対応点の抽出を行えるようにするために、確率的弛緩法と動体計測の分野において開発された勾配法^{3),8)}の組み合わせを基本とした一連の処理プロセスを提案する。確率的弛緩法においては、誤対応抽出の軽減のために、援用点の数による制約条件を設定するという改良を行った。改良後の確率的弛緩法によって、対応付けの正解率が飛躍的に向上し、処理時間の短縮が図られることを実験によって確認した。また、確率的弛緩法の適用結果に対して、勾配法による対応点の選定を行うことの効果についても検証し、有効な結果が得られたことについても報告する。相互相関係数を CC (Cubic Convolution) 手法によって補間することで、対応点位置をサブピクセル精度で算出すると共に、最終的な対応点对の決定では、相互標定に用いられる視差方程式に対して、可変 LQS (Least Quantile of Squares) 手法⁹⁾を適用する検定処理を行うことによって、より高精度な対応点の算出を行うことを可能とした。本手法によって、指定された精度を有する対応点のみを抽出することが可能となった。これら個別の処理を一連の処理として組み合わせることで、個々の処理パラメータ設定の処理画像に対する依存度 (パラメータの拘束条件) を低くすることが可能となるため、結果的に撮影状況の異なる画像に対する高いロバスト性が実現されることになる。提案手法が、条件の異なる撮影対象に対して安定した手法となっていることを 6 組の画像を対象とした実験によって検証し、良好な結果が得られたことを報告する。本手法では、数学モデルを検定時にのみ参照すること

から、計算過程でのモデルの修正に伴う対応点位置の修正を必要としないため、より高速な処理が可能となる。

2. 提案手法について

今回提案する処理手法のフローを図 1 に示す。以下、個々の手法について概説する。

図 1 処理フロー図

2.1 SSDA 法による画像間オーバーラップ領域の推定

ステレオ画像対から大まかなオーバーラップ領域を抽出するために、SSDA (Sequential Similarity Detection Algorithm) 法^{4),5)}による演算結果の平均値 E を用いた評価を行う。ステレオ画像対におけるそれぞれの画像を P, Q で表すとき、 E は式 (1) で表される。

$$E = \frac{1}{n} \sum_{P_i \in P_T, Q_i \in Q_T} |P_i - Q_i| \quad (1)$$

ただし、

P_T, Q_T : 画像 P, Q を重ねたときのそれぞれの画像のラップする領域 (テンプレート)

P_i, Q_i : テンプレート P_T, Q_T を重ねたときの対応する画素

n : テンプレート内の画素数

$|P_i - Q_i|$ の i 番目の点の計算において、 i が設定数を超えたら、前回までの E の最小値 (閾値) との比較を行い、この値を上回った場合は処理を打ち切ってテン

プレート領域を移動する。テンプレート全体に渡って計算した結果が前回までの閾値 E' より小さい場合は、これを新たな閾値として設定する。設定した全てのテンプレート領域の計算を終了した時点で、 E が最小となったときのテンプレート領域をオーバーラップ部分と判定する。大まかなラップ領域を算定することによって、確率的弛緩法適用時の対応付けの探索範囲を狭め、処理時間を短縮することが出来る。実際の計算においては、処理時間短縮のためにサイズの異なる様々なシーンの原画像（表 1 参照）を 100 画素程度に間引いて計算させ、実用上の観点から画像全体の 30% 以上がラップすると判断される場合にのみ式 (1) による判定を行うこととした。

2.2 縮小画像の作成と画像の平滑化

対象とする画像のサイズによって確率的弛緩法等の処理パラメータをその都度変更することは、処理の自動化におけるパラメータチューニング上の観点から望ましくない。従って、処理画像に対して式 (2) で表されるような画像の縮小を行い、縮小後の画像のサイズがほぼ 500 ピクセル程度となるようにした（原画像のサイズについては表 1 を参照）。

画像の縮小率を m 、縮小前の原画像の各画素を $P_{x,y}$ 、縮小後の画像の各画素を $P'_{x,y}$ とするとき、

$$m = \min\{[x_{size0}/x_{size}], [y_{size0}/y_{size}]\} \quad (2)$$

$$P'_{x,y} = \frac{1}{m^2} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{m-1} P_{mx+i, my+j} \quad (3)$$

ただし、

$\min\{i, j\}$: 小さい方の値を返す関数

$[i]$: i を超えない最大の整数値

x_{size0}, y_{size0} : 原画像のサイズ

x_{size}, y_{size} : 縮小後の画像のサイズ

同時に、次処理の特徴点の抽出精度を高めるために、画像の平滑化処理を行った。平滑化フィルタとしては、 5×5 サイズのメディアンフィルタを使用した。

2.3 SUSAN 演算子による画像特徴点の抽出

ステレオ画像対の各々から対応付けの候補となる特徴点を抽出する。特徴点は画像中の物体のコーナー等、出来るだけユニークな点であることが望ましい。本研究では、コーナー抽出に使用する interest 演算子として、Smith 等によって提案された SUSAN (Smallest Univalued Segment Assimilating Nucleus) 演算子¹⁰⁾

を使用した。1 画像あたり 1000 点前後の特徴点を確保するために、SUSAN 演算子のパラメータ（画素の輝度差の設定）を自動調整するようにしている。

2.4 確率的弛緩法による特徴点の対応付け^{4),5)}

ステレオ画像対の各々から抽出した特徴点を確率的弛緩法によって対応付けすることを考える。いま、一方の画像内のある特徴点 $a_i : (x_i, y_i)$ がもう一方の画像の特徴点 $b_k : (x_k, y_k)$ に対応すると仮定した場合、特徴点間の変位ベクトル $\lambda_k : (x_k - x_i, y_k - y_i)$ をラベルとして、特徴点 a_i がラベル λ_k を持つ確率を $P_i(\lambda_k)$ と定義する。 a_i に対応する b_k の候補が L 個存在するとき、その候補を $b_{kl}, l=1, 2, \dots, L$ 、それぞれのラベルを λ_{kl} 、 a_i がどのラベルも持たないときのラベル（空集合）を λ_m で表すと、 a_i がこれらのラベル集合に対して持つラベル確率はそれぞれ $P_i(\lambda_{kl}), P_i(\lambda_m)$ と表される。反復計算によってこれらのラベル確率の増減を繰り返して、最終的に最も確率の高いラベルを持つ組み合わせが対応として選択される。

(1) 初期のラベル確率

初期のラベル確率は、特徴点 a_i とその対応点候補 b_{kl} のそれぞれの画像座標位置を中心とする矩形領域を設定し、矩形領域間の画像の類似度 $S_i(\lambda_{kl})$ を用いて次式のように定義する。なお、本研究では類似度として相互相関係数を使用した。

$$P_i^{(0)}(\lambda_m) = 1 - \max(S_i(\lambda_{kl})) \quad (4)$$

$$P_i^{(0)*}(\lambda_{kl}) = \frac{S_i(\lambda_{kl})}{\sum_{l=1}^L S_i(\lambda_{kl})} (1 - P_i^{(0)}(\lambda_m)) \quad (5)$$

$l=1, 2, \dots, L$

(2) ラベル確率の更新

特徴点 a_i が対応点候補 b_{kl} を持つラベル確率は、 a_i の近傍に存在する特徴点 a_j （以後、援用点と呼ぶ）によって計算される適合係数 $Q_i(\lambda_{kl})$ を用いて、式 (7) のように更新される。

$$Q_i^K(\lambda_{kl}) = \sum_j \sum_{\lambda_{kl'} \in \{|\lambda_{kl} - \lambda_{kl'}| \leq \theta\}} P_j^K(\lambda_{kl'}) \quad (6)$$

$$P_i^{K+1}(\lambda_{kl}) = \frac{P_i^K(\lambda_{kl}) \times (A + B \times Q_i^K(\lambda_{kl}))}{\sum_{l \in L} (P_i^K(\lambda_{kl}) \times (A + B \times Q_i^K(\lambda_{kl})))} \quad (7)$$

$l=1, 2, \dots, L$

ただし、

K : 処理の反復回数

$\lambda_{kl'}$: a_j が $b_{kl'}$ に対して持つラベル

θ : a_i が持つラベル λ_{kl} と a_j が持つラベル $\lambda_{kl'}$

を矛盾しないとみなすときの許容量

A, B : 確率的弛緩法の収束特性を決定する定数
更新後のラベル確率が極端に小さいものは、値を強制的に 0 とする。また、ラベル λ_{kl} の数が 0 となった特徴 a_i はどの点にも対応しないので、対応点の候補から削除する。

(3) 確率的弛緩法に対する拘束条件

本研究では確率的弛緩法に対して、誤対応付けの軽減を目的として以下の拘束条件を設定した。

(a) ラベル更新の初期における援用点数による拘束

設定回数 K_m 以内のラベル確率の更新において、援用点数 n_λ が設定数 n_0 より少ない場合に適合係数 $Q_i(\lambda_{kl})$ の値を 0 とし、設定回数以降の反復計算では援用点数による拘束を外す（援用点の設定数を 0 とする）かまたは弱める（ n_0 より小さな値 n_0' とする）。

$$Q_i^k(\lambda_{kl})=0: K < K_m \text{ and } n_\lambda < n_0 (K \geq K_m \text{ and } n_\lambda < n_0', n_0' < n_0) \quad (8)$$

$Q_i^k(\lambda_{kl})$: 上記以外

これにより、反復計算の初期の段階で不適切なラベルを大幅に削減することが可能となる。また、指定回数以上の反復で拘束条件を弱くすることによって、反復回数の増加に伴って、対応点の数が著しく減少することを防ぐことが出来る。

(b) 援用点を選択する領域の設定

適合係数を計算する際の援用点の選定領域に対して、式(9)のような拘束を設定する。

$$R_{\min} \leq \max\{|x_i - x_j|, |y_i - y_j|\} \leq R_{\max} \quad (9)$$

ただし、

$\max\{i, j\}$: 大きい方の値を返す関数

$R_{\min}$: 近すぎる援用点を選択しないように指定するサイズパラメータ

$R_{\max}$: 援用点として選択する最大の領域を指定するサイズパラメータ

$R_{\min}$ を設定することにより、近すぎる援用点を選択されないため、局所的に極めて類似した配置を持つ特徴点群の存在による誤った対応付けの可能性をより小さくすることが出来る。

(4) 収束判定

次のいずれかの条件を満たした場合に収束したものと判断する。

(a) ラベル確率に変化がなくなった場合（設定閾

値以内の変動量となったとき）

- (b) 規定の反復回数に達した場合（その時点で最も高い確率を持つラベルを選択する）

2.5 テンプレートマッチングによる対応点位置の修正（粗マッチング）

確率的弛緩法によって行われた特徴点間の対応付けは、各々の画像から独立に取得された特徴点を対象としたものであることから、厳密に対応する位置にあるとは限らない。そこで、前段の処理において使用されたものと同じ縮小画像上でテンプレートマッチング処理を行うことによって、縮小画像上におけるピクセル単位での対応点位置の微小修正（粗マッチング処理）を行う。確率的弛緩法によるマッチングによって、原理的にオクルージョン部分に相当する地点の対応点はほぼ除去されるため、テンプレートマッチングによる位置修正によってオクルージョンに起因する迷走は発生しないと考えられる。

2.6 勾配法による高確度な対応点抽出

確率的弛緩法によって得られた対応点の結果（対応点グループ G_a とする）から、より整合性の高い対応点を絞り込む（絞り込まれた対応点のグループを G_b とする）ために、勾配法を適用することを考える。これは、後段の処理である縦視差検定による対応点の検定処理において、より確度の高い対応点を検定の標本とすることと、標本点の組み合わせの絶対数（検定処理の試行数）を減らすことを目的とするほか、対応点の推定法として全く異なる二つの手法を複合的に使用することで、対応点算出のロバスト性を高めるために行うものである。

勾配法は Horn 等によって導出されたオプティカルフロー推定手法の一つであり、動体の小さな動きの推定に有効な手法である⁸⁾。勾配法の基本方程式は式(10)のように表される。

$$\frac{\partial E}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial t} = 0 \quad (10)$$

ただし、

t : 時刻

E : 時刻 t における画像上の点 (x, y) の明るさ
式(10)を満足するような変位ベクトルを算出することがオプティカルフロー推定であるが、視差が小さい対応点を対象とすれば、動体の動きと視差による物体の

移動とを同一視することにより、確率的弛緩法によって算出された変位ベクトルを検定することに式(10)を用いることが出来る。ここで、弛緩法によって算出された変位ベクトルを式(10)の左辺に代入した場合、右辺が必ずしも0とはならないため、ある許容値 T を設定し、これを満たす変位ベクトルを持つ対応は、勾配法による推定結果と矛盾しないものとする。実際の適用においては、確率的弛緩法による変位ベクトル結果から、SSDA 法によって推定されたステレオ画像対間のずれ量分の値を差し引いた変位量をオプティカルフローに相当する移動量であるとみなした。

2.7 テンプレートマッチングと CC 法による対応点位置修正 (精密マッチング)

前段までの処理は、画像サイズの違いによるパラメータ修正の回避と処理の高速化のために、縮小した画像を対象として処理を行っている。ここでは、実サイズの画像(原画像)を用いて相互相関係数によるテンプレートマッチング(精密マッチング)を実施する。また、ピクセル単位で算出した相互相関係数値を CC 法によって補間し、最大のピークを示すサブピクセル位置を対応点位置として修正する。対応点位置の修正は、対応点のグループ G_a , G_b の両方に対して実施する。さらに、相互相関係数値が極端に小さな対応をこの時点で棄却する。

2.8 視差方程式と可変 LQS 法による対応点対の検定

視差方程式と可変 LQS 法⁹⁾に基づいた縦視差検定によって、高精度な対応点対の選定を行うための処理について述べる。対応点グループ G_a には視差の大きな点等、本来適切な対応点ではあるが、勾配法を満足しなかった点対が含まれている。そこで、確率的弛緩法と勾配法の両方を満足する確度の高い対応点グループである G_b に含まれる対応点をサンプリングして視差方程式を決定(標定要素を算出)し、可変 LQS 法によってグループ G_a 中から最終的に正しい対応点のみを抽出することを考える。

LQS 法¹¹⁾は、 n 個のデータの自乗誤差を小さい順に並べたとき、 $an(0 < a \leq 1)$ 番目に位置するデータの値が最小となるようなパラメータを推定するロバスト推定手法である。可変 LQS 法はこれを拡張し、対象とするデータ列に存在する不適切なデータの割合が未知の場合に、検定結果を参照して a を可変とするものであ

る⁹⁾。

いま、対応点グループ G_b の中から設定した点数の対応点を任意にサンプリングし、これらの点列を用いて、相互標定で使用される視差方程式(縦視差消去による相互標定式)¹²⁾を最小二乗法によって解く。視差方程式の安定した決定には最低6組の対応点を選択する必要がある³⁾、これを1試行あたりの標本数とする。本研究では、文献¹²⁾の視差方程式を厳密に解いた式を使用した。計算によって得られた外部標定要素を用いて、対応点グループ G_a に含まれる各点対の縦視差(誤差)の絶対値 d_{ij} を算出し、小さい順に並べる(i は試行の回数, j は点対のデータの並びを表す)。各試行の d_{ij} の組に対して LQS 法に基づいて、誤差の小さい方から an 番目のデータが最小となったときの試行 i を選択し、試行 i 時の an 番目の誤差より大きい点対を棄却する。棄却後に残った全ての点対を使用して、再度視差方程式を解く。縦視差の最大値が設定している閾値を超える場合には、 a の値を小さくして処理をやり直す(可変 LQS 法)。最終的に残った点対を対応点として判定し、標定要素の算出を行う。

3. 検証実験

3.1 実験方法

提案手法の妥当性を検証するために、以下の3項目に関する実験を行った。

- (1) 確率的弛緩法における援用点の拘束条件による効果の検証実験
- (2) 勾配法による対応点選定の効果の検証実験
- (3) 提案手法の適用実験

実験に使用した対象画像の特徴を表1に示す。また、実験時に設定した基本的な処理パラメータは表2の通りである。

- (1) 実験1: 確率的弛緩法における援用点の拘束条件による効果の検証実験

対象画像として近接撮影と航空写真の中間的な撮影状況にある「造成地」の画像を選び、本手法で設定した援用点による拘束条件の有用性を確認するための実験を行った。次のような状況を考慮した6ケースを設定した。設定したケースを表3に示す。

- (a) 援用点による拘束を有効とする反復回数(有効反復数)を制限せず、援用点数のみを変化させた場合(3ケース)

表 1 実験対象画像の特徴

撮影シーン名	分類	画像サイズ (ピクセル)	画素サイズ (μm)	画像の特徴
室内	近接平行撮影 (地上写真)	1280×1000	6.8	・デジタルカメラ画像 ・視差の影響大
交差点	近接平行撮影 (地上写真)	1280×1000	6.8	・デジタルカメラ画像 ・構造物に類似パターンが多数出現
遺構跡	近接平行撮影 (地上写真)	2036×3060	9.0	・デジタルカメラ画像 ・影の映り込みの影響大
造成地	近接平行撮影 (地上写真)	1280×1000	6.8	・デジタルカメラ画像 ・テクスチャの変化小
市街地A	直下視撮影 (航空写真)	5409×5436	42.3	・航空写真のA/D変換画像 ・テクスチャの変化大
市街地B	収斂撮影 (航空写真)	2048×2048	9.0	・撮影角 $\pm 30^\circ$ (衛星) をシミュレート ・テクスチャの変化大

表 2 主要な処理パラメータ

処理パラメータ項目	設定値	処理パラメータ項目	設定値
縮小画像サイズ	500	収束判定用ラベル確率変動量	1.0×10^{-5}
画像特徴点取得点数	1000	拘束援用点数 (設定反復回数以内)	4
対応点対候補探索サイズ	60 (± 30)	拘束援用点数 (設定反復回数以降)	2
類似度計算時の矩形領域サイズ	15	援用点の拘束が有効な反復回数	10
ラベルの矛盾を許容するずれ量	1	勾配法適用時の局所領域サイズ	11
援用点取得領域サイズ (最大値)	100 (± 50)	勾配法による演算結果の許容値	20
援用点取得領域サイズ (最小値)	20 (± 10)	精密マッチング時の相関係数閾値	0.3
弛緩法の最大反復回数	100	視差方程式計算時の対応点標本数	6
弛緩法収束特性決定パラメータA	0.5	縦視差検定の各 α における試行数	1000
弛緩法収束特性決定パラメータB	5.0	縦視差精度設定閾値 (ピクセル数)	0.2

表 3 確率的弛緩法に対して設定された拘束条件の異なる実験ケース

ケース	拘束条件		
	援用点数 (有効反復数内)	援用点数 (有効反復数以降)	援用点有効 反復数
(a)-1	0	0	制限なし
(a)-2	4	4	制限なし
(a)-3	8	8	制限なし
(b)-1	6	0	10
(b)-2	6	0	50
(c)-1	6	4	10

(b) 援用点数を固定して、有効反復数のみを変化させた場合 (2 ケース)

(c) 有効反復数を固定して、有効反復数以降の援用点の拘束点数を少なくした場合 (1 ケース)

なお、対応の妥当性の判断は、対応点を 1 組ずつ画

面に拡大表示させ、対応点位置の目視によるチェックによって行った (以下の実験でも同様)。また、確率的弛緩法によるマッチングは特徴間の対応付けであり、位置の修正がなされていないので、明らかに対応が間違っているものを誤対応として判断した。

(2) 実験 2 : 勾配法による対応点選定の効果の検証実験

確率的弛緩法によって得られた対応点算出結果に対して、勾配法を適用した場合の対応点選定の効果を確認するために、次の二つのケースに対する検証実験を行った。

(a) 援用点の拘束条件を設定しない確率的弛緩法による対応点算出結果に適用した場合

(b) 援用点の拘束条件を設定した確率的弛緩法による対応点算出結果に適用した場合

確率的弛緩法による算出対応点の変位ベクトル量を式(10)に代入したときに、勾配法との矛盾を許容する

許容値 T (2.6を参照)をパラメータとした場合の対応点の選定結果を比較する。「室内」の画像を対象とし、ケース(b)では援用点に関する拘束条件を表2に掲載のものよりやや弱め、故意に誤対応を増やすことで、勾配法による効果を確認することとした。

(3) 実験3：提案手法の適用実験

提案手法を撮影状況および撮影対象の異なる様々なシーンに対して適用することによって、提案手法の有効性を確認した。その際、処理パラメータは全ての画像で同一のもの(表2)を使用した。これによって、パラメータの処理画像への依存度の低さを実証することが出来る。また、取得可能な対応点数を増やすため、確率的弛緩法に対する援用点についての拘束条件は弱めに設定した。なお、弛緩法終了時点での対応点については位置の修正が行われていないので、対応が明らかに矛盾する点を誤対応であると判断した。

3.2 実験結果

(1) 実験1

確率的弛緩法に設定した援用点に関する拘束条件を変えた場合の各ケース毎の対応点正解率を表4に示す。拘束条件を全く設定しないケース(a)-1、最も拘束の強いケース(a)-3、それらの中間的な条件であるケース(c)-1の反復回数に対する対応点の候補が有するラベル数の推移を図2に示す。

(2) 実験2

確率的弛緩法に対する拘束条件の有無によって設定された二つのケースにおける勾配法許容値 T に対する対応点の正解率と対応点数の関係をそれぞれ図3、図4に示す。

(3) 実験3

SSDA 法によって推定された対象シーン毎のオーバーラップ率と特徴点抽出処理によって取得された特

図2 確率的弛緩法の拘束条件が異なるケースの反復回数とラベル数の関係

図3 勾配法許容値 T に対する対応点数と正解率の推移 (拘束条件なし)

表4 確率的弛緩法に対する拘束条件の違いによる対応の正解率

ケース	誤対応数/対応数	対応正解率 (%)
(a)-1	38/239	84.1
(a)-2	2/145	98.6
(a)-3	0/63	100.0
(b)-1	5/185	97.3
(b)-2	0/103	100.0
(c)-1	0/139	100.0

徴点数を表5に示す。また、各処理の終了段階での誤対応点数と最終正解率、推定された標定要素による残存縦視差のRMSE (Root Mean Square Error) 結果を表6に示す。最終的に選択された対応点画像を図5～図10に示す。

(4) 処理時間

処理時間は画像サイズやオーバーラップ部分の割合、取得可能な対応点数の違い等によって多少変動するものの、パソコン環境 (CPU: Pentium II 300MHz, メモリ: 96MB) で概ね60秒程度であった。

図4 勾配法許容値 T に対する対応点数と正解率の推移 (拘束条件あり)

表5 対象シーンのオーバーラップ率と抽出された特徴点数

撮影シーン名	オーバーラップ率 (%)	初期特徴点数 (点)	
		左画像	右画像
室内	72	1018	1088
交差点	81	1078	973
遺構跡	74	1194	1238
造成地	91	1034	1084
市街地A	60	1185	1246
市街地B	100	1153	1226

表6 各処理段階の終了時における誤対応点数の推移と最終正解率

撮影シーン名	確率的弛緩法 (点数)	勾配法 (点数)	縦視差検定 (点数)	最終正解率 (%)	縦視差最大値 (μm)	縦視差 RMSE (μm)
室内	16/106	2/35	0/29	100.0	1.18 (6.8)	0.66 (6.8)
交差点	33/148	6/62	0/39	100.0	1.05 (6.8)	0.60 (6.8)
遺構跡	3/188	0/102	0/74	100.0	1.61 (9.0)	0.74 (9.0)
造成地	6/190	3/153	0/111	100.0	1.04 (6.8)	0.50 (6.8)
市街地A	4/149	0/81	0/59	100.0	7.81 (42.3)	3.77 (42.3)
市街地B	11/367	4/319	0/107	100.0	1.58 (9.0)	0.80 (9.0)

(注1) 表記「X/Y」は、各処理の終了時における「誤対応点数/対応点数」を表す。

(注2) ()内の数値は1ピクセル (1 CCDあたり) の画素サイズを表す。

(a) 左画像

(b) 右画像

図5 対応点抽出結果：室内

(a) 左画像

(b) 右画像

図6 対応点抽出結果：交差点

(a) 左画像

(b) 右画像

図7 対応点抽出結果：遺構跡

(a) 左画像

(b) 右画像

図8 対応点抽出結果：造成地

(a) 左画像

(b) 右画像

図9 対応点抽出結果：市街地A

処理レベル毎の概略的な処理時間を表7に示す。

3.3 実験結果の考察

(1) 確率的弛緩法に対する拘束条件の設定について

表4より確率的弛緩法において、提案手法の一つである援用点による拘束を強めるほど、拘束条件を設定しない場合と比較して対応付けの精度が飛躍的に向上することが確認された。図2の結果から拘束条件を強くすると、ラベルの削除される速度が反復処理の初期では緩やかであるが次第に早くなり、処理の収束に要

する反復回数が少なくなることが分かる。一方、収束時のラベル数は対応点数に相当するが、図より拘束を強めるほど取得可能な対応点数が減少する様子も確認出来る。

(2) 勾配法の効果について

図3、図4の結果から確率的弛緩法によって算出した対応点の中から勾配法を利用して対応点の選別を行うと、許容値を小さくするに従って対応付けの正解率が上昇する傾向にあることが確認された。許容値が小さくなくても正解率が減少する箇所も存在するもの

(a) 左画像

(b) 右画像

図10 対応点抽出結果：市街地B

表 7 概算処理時間

処理項目	処理時間 (sec)
画像オーバーラップ領域算出	1 ~ 2
縮小画像作成 (原画像サイズにより変動)	1 ~ 20 (2 画像分)
画像平滑化	1 (2 画像分)
画像特徴点抽出 (閾値自動決定により変動)	1 ~ 4
確率的弛緩法 (収束回数により変動)	10 ~ 25
粗マッチング	1
勾配法によるチェック	1
精密マッチング (対応点数により変動)	1 ~ 5
縦視差検定 (算出対応点精度により変動)	2 ~ 20

の、対応の正解率自体は手法の適用前よりも上昇していることが分かる。すなわち、勾配法の適用は確度の高い対応点の絞り込みに効果があると言える。表6の結果より、勾配法による対応点の選定が最も有効であるのは、視差の影響が強くなる画像（室内や交差点のシーン）を対象とした場合であると考えられる。縦視差検定時の標定要素の推定（モデルの作成）において、対応点の標本として対応の確度の高いものを選定するという目的に対し、同手法の有効性を確認することが出来たと考えられる。

(3) 対応点の算出結果について

全ての処理画像に対して、良好な対応点の算出結果

を得ることが出来た（図5～図10）。表6のRMSE結果より精度的にも極めて高精度な対応が取得されていることが確認出来る。対応点数については、視差の影響の小さな画像ほど多数の対応点が取得される傾向にある。

(4) 処理パラメータについて

今回の実験では、取得可能な対応点の数を多くするために、確率的弛緩法における提案手法の拘束条件に関するパラメータを弱めに設定した。その結果、確率的弛緩法適用時における誤対応の発生率がやや大きくなっているが、その後の処理で誤対応が着実に棄却されていく様子が表6より確認出来る。適用実験では、

全ての処理画像に対して同一のパラメータを用いたにもかかわらず、ほぼ完全に妥当な対応結果を算出することが出来た。提案手法の処理画像の違いに対する安定性が確認されたものと考えられる。

4. ま と め

撮影対象の異なる様々な画像に対して、ロバストな対応点取得を目的とした自動処理アルゴリズムを提案し、実画像による検証実験を行った。確率的弛緩法に対して、援用点による拘束条件を設定することで、対応付けの精度を飛躍的に向上させることが可能であることが明らかとなった。また、対応点抽出において勾配法を併用することで、確率的弛緩法の結果からより確度の高い対応を選び出すことが可能なことも分かった。可変 LQS 法を利用した視差方程式により最終的な対応の検定を行うことで、極めて高精度な対応点抽出が可能となることも実験によって確認された。これらの手法の複合的な使用によって、処理のロバスト性が高められるため、個々の処理のパラメータ設定を比較的緩くすることが可能となり、その結果各種処理画像への依存度の小さい安定した相互標定の自動処理を実現することが可能となった。

5. 今後の課題

対応点の算出結果を見ると、撮影地点に接近するに従って視差の影響が増大するような画像（交差点や造成地のシーン）では、そのような領域から対応点が取得出来ていないことが分かる。これは視差の影響が強くなると、対応点間の幾何学的な位置関係が大きく変化する結果、確率的弛緩法による対応付けがうまく行われなためである。より安定な相互標定モデルを構築するには、画像全体から対応点を取得する必要性があることから、今後はこのような領域からも対応点を取得可能とするような工夫が必要である。一方で、標定処理と depth map 作成処理の一元化というようなことも視野に入れながら、今後も検討を続けていきたいと考えている。

(受付日1998.7.16, 受理日1998.9.14)

参考文献

- 1) L. Tang and C. Heipke, "Automatic Relative Orientation of Aerial Images", PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING & REMOTE SENSING, vol. LXII, No. 1, pp.47-55, 1996.
- 2) L. Tang, J. Braun, R. Debitsch, "Automatic aerotriangulation-concept, realization and results", PHOTOGRAMMETRY & REMOTE SENSING, vol. 52, No. 3, pp.122-131, 1997.
- 3) 高木幹雄, 鳥脇純一郎, 田村秀行 編, "画像処理アルゴリズムの最新動向", (株)新技術コミュニケーションズ, pp.108-144, 1986.
- 4) 高木幹雄, 下田陽久 監修, "画像解析ハンドブック", 東京大学出版会, pp.707-722, 1991.
- 5) 画像処理ハンドブック編集委員会, "画像処理ハンドブック", (株)昭晃堂, pp.249-250, pp.304-306, 1987.
- 6) 大田友一, 山田博三, "動的計画法によるパターンマッチング", 情報処理, Vol. 30, No. 9, pp. 1058-1066, 1989.
- 7) 大田友一, 金出武雄, "走査線間の整合性を考慮した2段の動的計画法によるステレオ対応探索", 情報処理, Vol. 26, No. 11, pp.1356-1363, 1985.
- 8) 動体計測研究会 編, "イメージセンシング", (社)日本測量協会, pp.96-97, 1997.
- 9) 野口卓, 奥富正敏, "ステレオ画像を用いた道路領域の抽出", 第4回画像センシングシンポジウム講演論文集, 画像センシング技術研究会, pp.73-78, 1998.
- 10) S. M. Smith and J. M. Brady, "SUSAN-A New Approach to Low Level Image Processing", Int. Journal of Computer Vision, vol. 23, No. 1, pp.45-78, 1997.
- 11) P. J. Rousseeuw and A. M. Leroy, "Robust Regression and Outlier Detection", John Wiley & Sons, New York, 1987.
- 12) (社)日本写真測量学会・解析写真測量委員会, "解析写真測量 改訂版", (社)日本写真測量学会, pp. 66-70, 1997.