

都市域を対象とした航空写真によるステレオ マッチングの高精度化に関する研究

— [第1報] カメラパラメータの自動推定処理とエッジ線の利用について —

坂元 光輝[†] 土居原 健[†] 小杉 幸夫^{††}

[†] アジア航測株式会社 総合研究所

〒243-0016 厚木市田村町 8-10 Tel: 046-295-1886

E-mail: mi.sakamoto@ajiko.co.jp ta.doihara@ajiko.co.jp

^{††} 東京工業大学 フロンティア創造共同研究センター

〒226-8503 横浜市緑区長津田 4259 Tel: 045-924-5465

E-mail: kosugi@pms.titech.ac.jp

あらまし 都市空間3次元モデルを構築する際の初期データ構築では、上空からステレオ撮影された画像を使用して、専門のオペレータによる図化と呼ばれる工程によって、地物の形状と空間位置の取得が行われる。本研究は、都市域を対象とした航空写真による人工地物の形状と位置の自動抽出を行う上での基礎となるステレオマッチング処理の高精度化を目的とする。前半では、カメラパラメータの高精度な自動推定手法について概説する。後半では、投影変換後の画像のマッチングにおけるエピポーラ線間整合の問題について論じ、エッジ線による初期対応付けの有効性について述べる。また、航空写真によるエッジ線の抽出およびマッチング手法について提案し、その処理結果を示す。

キーワード ステレオマッチング, 自動標定, エッジ抽出, 図化, 航空写真

A Study on Improvements of Stereo Matching Techniques for Urban Area

— Automatic Estimation of Camera Parameters and Utilization of Edge Segments —

Mitsuteru SAKAMOTO[†], Takeshi DOIHARA[†] and Yukio KOSUGI^{††}

[†] Asia Air Survey Co., Ltd. R&D Department

8-10, Tamura-cho, Atsugi 243-0016 Japan Tel: 046-295-1886

E-mail: mi.sakamoto@ajiko.co.jp ta.doihara@ajiko.co.jp

^{††} Frontier Collaborative Research Center, Tokyo Institute of Technology

4259 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama 226-8503 Japan Tel: 045-924-5465

E-mail: kosugi@pms.titech.ac.jp

Abstract In order to retrieve initial data for 3D city models, mapping processes of ground objects are needed by professional operators using stereo aerial images. In this paper, we purpose a method for improving the precision of stereo matching that ultimately aims at extracting the shape and position of ground object with aerial images. In the first part, we will describe an automatic method for estimating the parameters of the camera. In the second part, we will describe the consistency of objects across epipolar lines, and the feasibility of using line segment for initial correspondence verification. In the third part, we will describe a method for line segment extraction and the matching of line segments. Some typical experimental results are also presented to show the validity of our proposed method.

key words Stereo matching, Automatic Orientation, Edge Detection, Mapping, Aerial Image

1. はじめに

国土空間情報の整備における都市空間の3次元モデルを構築する際の初期データの構築, および更新作業においては, 上空から撮影された航空写真などのステレオペアの画像を使用して, 人工構造物などの地物や地形表面の幾何学形状と空間位置を取得する作業を必要とする. この構築作業は従来, 専門のオペレータによる標定(カメラパラメータの推定)および図化(地物をベクトル化する作業)などの工程を経て行われており, 多大な労力を要するものとなっている. 一方, これらの作業を従来のアナログ方式の装置に換えてPC上で効率的に行う, いわゆるソフトコピー図化機と呼ばれるシステムの実用化も進んでいる[1]. PCを採用することで, いくつかの工程については自動化を図ることが可能となる.

図化の支援もしくは自動化を図る問題では, ステレオマッチング処理が重要な意味を持つ. 特に図化は単なるステレオ対応点群の取得ではなく, 地物の形状に沿った対応点列の取得を必要とすることから, 非常に難易度の高い問題となっている.

これまで, 航空写真や衛星画像などの地理画像を対象としたステレオマッチング技術が数多く提案されている. しかしながら, 都市域においては, 視差の変化が非常に変則的であること, オクルージョン領域が多数出現すること, 加えて解像度が向上すればするほど, 逆にマッチングが困難になるなど, 対応点群の算出を目的としたマッチングでさえ, 困難な問題となっている.

著者らの研究の最終目標は, 都市域を対象とした人工地物の形状と位置の自動抽出(図化の自動化に相当)を行うことであり, そのための基礎となる都市部におけるステレオマッチング処理を高精度化することを当面の目的としている.

本稿の前半では, 3次元形状の復元に必要なカメラパラメータを高精度に自動推定するための手法と処理結果について概略を述べる. この処理の結果に基づいて, エピポーラ線の探索を1次元方向に限定するようなステレオ画像の投影変換(射影変換)を行う. 後半では, 投影変換後の画像(偏位修正画像)のマッチングにおけるエピポーラ線間整合に関する

問題点について論じ, その問題を解決するための一つの試みとして, 画像中のエッジ線のマッチング手法について提案し, その処理結果について示す. 提案手法は, エッジ線分の実空間における幾何学的な拘束条件と, エッジ境界に着目したラスタ画像間の類似度評価に基づくものである.

エッジ線に対するマッチング結果によって, 対応点探索における2次元方向の整合性に対して, 有力な拘束条件を付加することができると共に, 地物抽出処理のためのアプリオリ情報としての利用が可能となる.

2. カメラパラメータの高精度自動推定

2.1 原理

カメラパラメータの推定とは, ステレオ画像撮影時のカメラの幾何学的な関係を定めるための位置や姿勢に関するパラメータを推定するものである. カメラ間の相対的な幾何学関係を定めた場合, ステレオペア画像の対応位置を特定すると, 三角測量の原理により実世界に対する3次元の相似モデルを得ることができる(任意のモデル座標で表現される). 相似モデルを実世界上に設定する座標系(絶対座標またはワールド座標)において表現したい場合には, 3点以上のステレオ対応点に対して, 実世界での座標値(基準点)を与えればよい(3次元直交座標系であるモデル座標系と絶対座標系の間のスケールと回転の決定を行う).

前者のカメラ間の相対的な幾何学関係を定める処理(相互標定処理)については, 自動化を考えることができる. 図1において, カメラ O_1 , O_2 間の相対的な関係を定めるには, 位置または姿勢のうち, 5つの独立したパラメータを選択すればよく(図は姿勢角をパラメータとして選んだ例), 原理的には5点以上の対応点を与えて観測方程式を解けば, 解を得ることができる[2].

ここで, ステレオペアの画像から正確な対応点のみを自動的に算出してやることができれば, 処理の自動化を実現することができる.

著者らは[3]において, 相互標定の自動化に必要なステレオ対応点を正確かつ高精度に抽出する

ためのアルゴリズムについて提案した。このアルゴリズムは、写真計測的な観点からみて、撮影対象の違いや処理パラメータの設定値に影響されにくいステレオ画像対応点の探索手法の確立を目指して構築されたものである。

2.2 処理の概要

処理フローを図2に示す。処理は大別して、特徴点をベースとするマッチング処理と標定モデルの仮定による幾何学的な検定処理からなる。以下、処理の概要について述べる。

オーバーラップ領域の推定は、SSDA法によってステレオペア画像間の概略的な位置関係を知るためのものである。次に同一の処理パラメータを使用可能とするために、画像を縮小し、同時にメディアンフィルタによって画像の平滑化を行う。この画像に対して、マッチングの候補とするための画像特徴量（コーナー点）をSUSAN演算子[4]によって抽出する。SUSAN演算子は、円形のマスクを使用し、マスク中心の画素領域の面積変動に着目したユニークなinterest演算子であり、画像のノイズに強く比較的安定した特徴抽出を実現する。

特徴点の対応付けは、周辺特徴のサポートに関して改良を加えた確率的弛緩法によって行っている。以下、対応度の評価基準は正規化相関係数が使用されている。対応が取れた特徴点に対して、テンプレートマッチングによる位置の微調整を行った後、さらにオプティカルフロー推定に使用される勾配法を検定に用いて処理の安定性を高めている。画像を縮小画像から原画像に戻し、それによって生じる微小な位置ずれを調整するため、再度テンプレートマッチングを行う。ここで、内挿計算により対応点の位置はサブピクセル単位で求められている。

最後に、誤対応点を含む母集団の中から確率的な試行を伴って、高精度な対応点の組み合わせを求める手法（可変LQS法）を適用し、高精度対応点の推定と標定モデルの同時決定を行う。

2.3 画像の再配置

前述までの手続きによって、カメラのパラメータ

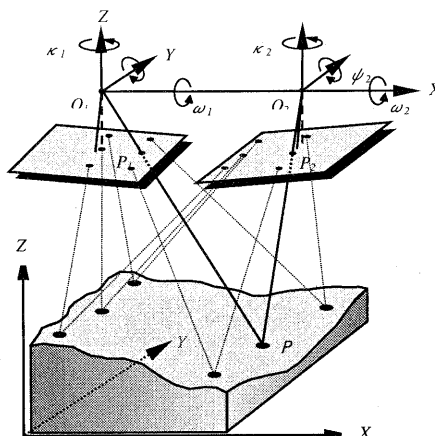


図1 相互標定の概念図

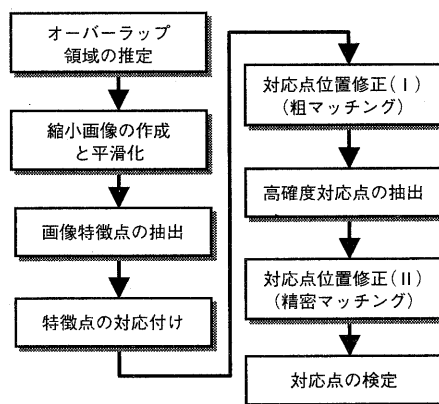


図2 自動相互標定処理フロー

が推定されたことによって、ステレオペアの画像上で対応する一組の点を指定すると、任意のモデル座標系における3次元座標が算出可能となっている。

図1において、ステレオ画像の一方における投影点 p_1 に着目すると、空間における点 P の位置は直線 O_1p_1 上に存在するので、その直線をカメラ視点 O_2 から観察すると、投影点は直線（エピポーラ線）上に並ぶ。すなわち、 P を探索するためのマッチング処理は1次元方向に限定される。ここでは、エピポーラ幾何学に基づいた画像の再配置によって、エピポーラ線が画像の x 方向に平行となるようなモデル座標系へと投影変換（射影変換）を行う[2], [5]。このようにして得られた画像は、一般に偏位修正画像（またはエピポーラ画像）と呼ばれている。

2.4 処理結果

図3にカメラパラメータを自動推定するために、都市域の航空写真を対象として行った対応点抽出結果の例を示す。対応点は作成された偏位修正画像上に重ねて表示されている。これらの対応点の誤差は、推定した標定モデルにおいて、0.1ピクセル以下となっている。



図3 偏位修正画像と推定された対応点

3. 偏位修正画像におけるマッチング

3.1 問題点

偏位修正画像によるステレオ対応点の探索は、画像のスキャン方向（y座標が同一のエピポーラ線）におけるピクセル間のマッチング問題となる。これらの対応付けには、しばしば動的計画法などの手法が利用される。動的計画法では、マッチングの評価関数において最適解に達することが保証されるが、対象に対してどのような評価関数を選ぶかが問題となる。また、各エピポーラ線間を横切る方向の整合性については最適化が保証されていない。[6]では、これに対応するため、エピポーラ線を横切るエッジ成分に着目し、より高度な情報量である連結エッジに対して動的計画法を適用し、その拘束下で低次元エッジ要素を最適化するという2段階の処理によってこの問題に対応しようとした。

本研究では処理の対象が都市部であるという特殊性に鑑み、上記の手法では考慮されなかった点、すなわち対象物の幾何学的特徴などのアプリアリ情報を有効に利用することを考える。図4を例にこのこ

とを考える。(a)はエピポーラ線間に何の拘束も設定しない通常のステレオマッチング結果、(b)は地物の形状に沿ってエッジ線を設定し、(a)によるマッチング結果を修正した結果、(c)は(b)にさらにポリゴンとなるエッジ線内部のマッチング点を消去して作成した結果（正射投影画像）を表している。重要なことは、対応点の個々の関係を最適化する以上に、少数ではあっても、より高度な情報を持つ要素（線や面など）が与えられた場合の方がより合理的な解釈を与えるケースがあり得るということである。

本稿では、[6]の手法にならない、まずはステレオ画像間の第一次的な対応関係の探索手段として、後工程におけるアプリアリ情報としても利用可能なエッジ情報を利用することを考える。その後の戦略としては、対応付けられたエッジ区間を境界として、そこから派生する二次的な線要素の追跡や面の推定を行う上で、構造物に特有な幾何学情報やラスタ画像からもたらされるアプリアリな情報を活用し、より高度な特徴の形成によって、マッチング処理の安定化を図る方向性を考える。1次元探索間の整合性を主体とする評価基準の取り扱いも別な観点から取り組むことが必要になると考えられる。

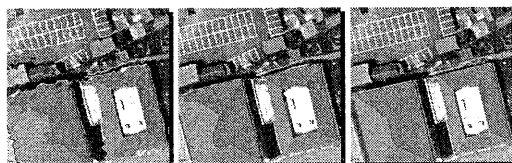


図4 マッチングにおける拘束線の効果

3.2 エッジ線分の抽出

マッチングの初期探索としては、少数ではあっても得られる対応関係ができるだけ正確であることが望まれる。ここでは、様々な制約条件を設定することによって、初期探索として利用するに足る線要素の抽出を行うを試みる。

画像からエッジ成分を抽出する手法として、SUSAN演算子[4]を利用する方法や、ウェーブレット解析に基づく方法[7]などがある。ここでは、これら2つの手法について検討を行うこととした。

SUSAN演算子は、円形のマスクを用いる独特の

フィルターであり、円の中心における画素値と同程度の輝度を持つ領域の面積変動を追跡することによって、エッジを抽出する。理想的にはマスクの中心位置がエッジやコーナーにくると、中心と同程度の輝度を持つ領域の面積が最小化されることから、このような地点を順次連結していくことでエッジが抽出される。面積を判定条件とすることから、微分を用いる手法に比べてノイズに対する耐性が大きい。

ウェーブレット変換による建物エッジの抽出は、[7]において有用性が主張されている。本研究では、都市域での人工構造物において観察される階段状の視差変動に着目し、Haar によるマザー・ウェーブレットを使用してエッジ成分の抽出を行うこととした。また、エッジ線からの直線情報の抽出法としては、ハフ変換ではなく、[8]の手法などによるエッジ線の直線近似による直接的抽出処理によって行うこととした。ハフ変換では、短いエッジ線を抽出する上で特別な配慮が必要なことや、演算量が多いことなどがその理由である。処理フローを以下に述べる。

(1) 画像の平滑化

画像をメディアンフィルターによって平滑化する。

(2) エッジ画像の作成

SUSAN 演算子による方法では、エッジは直接2値化画像として取得される。Haar ウェーブレットによる方法では、スキャン方向に処理をかけ、レベル1の処理結果を2値化する。

(3) エッジ画像の細線化

モルフォロジー演算を用いて、エッジ画像の局所的な連結と細線化処理を行う。

(4) エッジ線の追跡

8近傍探索によってエッジ線を追跡し、ベクトル化を行う。

(5) エッジ線の直線化

[8]に基づいて、ベクトル線分列を直線近似して線分化する。距離の短い線分は信頼性が低いとみなし、棄却する。

(6) エッジ線のフィルタリング I (幾何学条件)

ステレオの各々の画像から得られた各エッジ線において、設定したスキャン方向の探索範囲において、エピポーラ線を共有する全ての組み合わせについて、

共有線分区間の3次元座標を計算する。算出された3次元線分において、(a)絶対座標が異常(標高が負など)、(b)距離が設定値よりも短い、(c)水平面に対する角度が設定値を超える、などの条件に適合する線分の組み合わせを除いていく。

(7) エッジ線のフィルタリング II (適合度)

上記で残った組み合わせについて、エッジ線のマッチングを行う。マッチングの評価基準としては、エッジ線を境界とする左側および右側のそれぞれの領域に、エッジに平行する原画像テンプレート(平行四辺形)を設定し、各々相関係数を算出し、値の高い方を採用する。各エッジ線について探索を行い、相関度が最も高い組み合わせを選択していく。

(8) エッジ線の伸張・縮退

対応関係が仮定されている長さの短い方の線分を他方の線分の長さまで探索し、評価基準がそれまでの値を上回る場合には、長さを伸張させる。その後、対応が仮定されているエッジ線の長さを同一にする(線の縮退)。この際、一方の画像における複数のエッジ線が他方の画像における同一のエッジ線に対応付けられている可能性があるため、対応の相手側エッジ情報のコピーに対して処理を行う。

(9) 一意の対応付け

それぞれの画像から抽出されたエッジ線がお互いに最良の対応付けとなっている場合には、無条件に組み合わせを採用する。そうでない場合に、相手側エッジ線から最大の対応付けの候補として参照されていれば、その中から最も高い相関を与える相手側エッジ線を採用する(線の縮退処理も行う)。

3.3 処理結果と考察

図5に処理に使用した航空写真画像(図3の一部でサイズは1000×1000ピクセル)、図6にエッジ成分の強調結果(拡大図)、図8、図9にエッジ線のマッチング結果(拡大図)を示す。

実験結果から、SUSAN 演算子による処理結果、ウェーブレット解析を用いた処理結果とも、対応付けに関しては比較的良好な結果を得ていることが確認された。しかし、SUSAN 演算子では多数取得することができたエッジ線が、ウェーブレット解析で

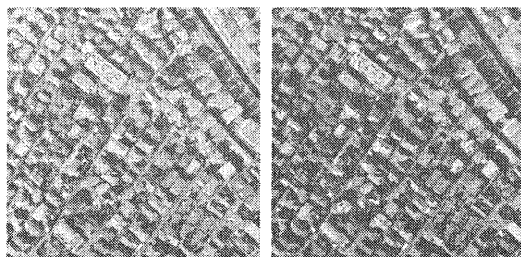
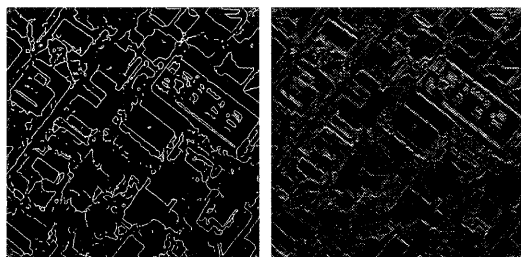


図5 処理対象画像



(左：SUSAN, 右：ウェーブレット)

図6 エッジ強調画像

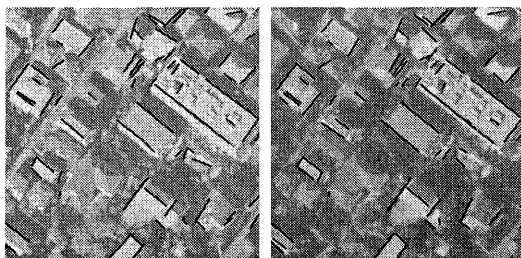


図7 エッジ線マッチング結果
(SUSAN)

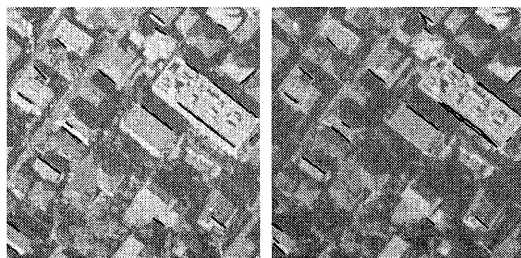


図8 エッジ線マッチング結果
(ウェーブレット)

は非常に少なくなっている。これは、ウェーブレットによるエッジ強調画像を2値化するプロセスで、エッジ強度のピーク位置のみを検出できていない結果、エッジ領域が過分に検出され、その後のエッジ線の探索処理がうまくいかなることによると考えられる。また、一部の線分については明らかな対応の間違いが認められる。これらの点については今後の検討課題としたい。現状、SUSAN 演算子に基づく処理結果は、初期の対応探索情報として十分に利用可能な程度の情報を与えることが確認された。

4. おわりに

都市域におけるステレオマッチング処理の高精度化というテーマの枠組みにおいて、カメラパラメータの高精度自動推定手法、偏位修正画像におけるマッチングの整合性に関する問題、および、エッジ線の抽出手法とその利用法について論じた。エッジ線抽出に関しては、処理の手法や手順、パラメータの設定に関し、なお検討を要する部分がある。都市域における地物のアプリオリな情報という観点から見た場合、エッジ線は低次な特徴の範疇に属すると考えられる。次の研究段階では、ここからより高次な

特徴量を導き出し、マッチングの精度を高める方向性を模索していきたいと考えている。

文 献

- [1] Mitsuteru Sakamoto, Osamu Uchida, Takeshi Doihara, Kazuo Oda, Wei Lu, Masayoshi Obata, "Geo-Plotter a Softcopy Mapping System for Low Cost Digital Mapping Process", IAPRS XXXIII-B4/2, pp.889-892, 2000.
- [2] (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, 1997.
- [3] 坂元光輝, 内田修, 汪平涛, "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", 写真測量とリモートセンシング, (社)日本写真測量学会, vol.37, No.5, pp.35-46, 1998.
- [4] 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.
- [5] 徐剛, 辻三郎, 3次元ビジョン, 共立出版, 1998.
- [6] 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.
- [7] 史中超, 柴崎亮介, "高分解能衛星シミュレーション画像を用いた建物閉領域の自動抽出に関する研究", 写真測量とリモートセンシング, (社)日本写真測量学会, vol.37, No.5, pp.4-12, 1998.
- [8] Hiroshi Aoyama and Masahiro Kawagoe, "A Piecewise Linear Approximation Method Preserving Visual Feature Points of Original Figures", CVGIP GRAPHICAL MODELS AND IMAGE PROCESSING, Vol.53, No.5, pp.435-446, 1991.