

標定点選定のためのコーナー検出法の比較 — Foerstner 演算子と SUSAN 演算子

藤原 遊*, 山本 允彦*, 服部 進**

Comparison of Corner Detection Algorithms for Orientation Points Selection – Foerstner and Susan Operators

Yu FUJIWARA* Masahiko YAMAMOTO* and Susumu HATTORI

ABSTRACT

Typical two corner detection algorithms, the Foerstner operator and the SUSAN operator, are compared in terms of applicability to stereo-matching or registration of aerial and industrial images. The Foerstner operator exploits reliability of intersection of edges in a mask (or window) derived from first derivative information to detect corners, while the SUSAN operator uses only simple counting of pixels of neighborhood assimilating to a kernel (center of every mask). Stereo digital aerial images and images of soil dumped on a truck are used in this experiment. The two detection methods do not yield equal effects on these images and the corners detected by them alter sensitively depending on parameters.

キーワード：コーナー検知, SUSAN 演算子, Foerstner 演算子, ステレオ
Key words: Corner Detection, SUSAN Operator, Foerstner Operator, Stereo

1. はじめに

画像のコーナーを局所的に検出する代表的な方法として、Foerstner 演算子を使う方法と SUSAN 演算子を使う方法がある。前者は小さなウィンドウごとに処理し、その中に1つコーナーがあると仮定する。ウィンドウの中のエッジがコーナーを通るという条件から最小2乗法でコーナーの当てはめ計算を行なう。エッジ検出の微分演算を explicit に入れているところに特徴がある。

後者は調整計算を伴わない高速な方法で、すべての画素ごとに円形の Window (以下原著論文[1] に従い、マスクと呼ぶ) をとり、その中の画素と当該中心画素 (核) の画素値の差が大きい画素の個数を調べることでコーナーを検出する。SUSAN 演算子は雑音に強く、高速、簡便でリアルタイムのコーナー検出ができることが利点である。また任意のパラメータ値の設定が原理上少ないというのも大きな利点である。この両者は0次、1次

の微分量を使う検出法といえる。これ以外に2次の微分量を使うものとして LoG フィルタのゼロ交差をエッジとみなす方法もあるが、コーナーが丸くなってしまう欠点があるためここではとりあげない。

Foerstner 演算子[2] を使って、空中写真画像からコーナーを検出した実験についてはすでに報告した[3],[4]。実験によれば良質のコーナーが得られるが、検出されるコーナーの数は、ウィンドウの大きさ、コーナー当てはめを判断する閾値の値に大きく依存した。また小さなウィンドウごとに調整計算をするため計算時間がかかることも問題であった。

そこでこの論文では同じ空中写真画像を使って、SUSAN 演算子の検出力、パラメータの依存性、立体画像での対応のようすを調べ、Foerstner 演算子での検出の結果と比較する。また SUSAN 演算子では、コントラストのある画像とない画像では閾値を変えるため、コントラストのない画像例として、ダンプに載せた土砂の画像

を準備した。

2. SUSAN 演算子によるコーナーの検出

SUSAN 演算子は、画像の局所ごとに円形のマスクをかぶせ、マスク中心の画素とマスク内の他の画素との差を計算して、差が大きい画素がたくさんあれば、マスク中心がコーナーであるとみなす方法である。そのアルゴリズムは原著論文[1]によれば次のようである。①②などはこの論文で検討した点である。

(1) 直径 r 画素 ($r = 5$) の円形マスクを各画素にかぶせる。マスクの中心画素を核と呼ぶ。

(2) 次の式 1 または式 2 によって、核の画素値と近い画素値の画素 $n(r_0)$ をマスク内でカウントする。

$$c(r, r_0) = \exp\left(-\left(\frac{I(r) - I(r_0)}{t}\right)^6\right) \quad (1)$$

$$c(r, r_0) = \begin{cases} 1 & \text{if } |I(r) - I(r_0)| \leq t \\ 0 & \text{if } |I(r) - I(r_0)| > t \end{cases} \quad (2)$$

$$n(r_0) = \sum_r c(r, r_0) \quad (3)$$

ここで r, r_0 はそれぞれマスク内の画素の位置、核の位置を示す位置ベクトルである。 $I(r)$ は画素値をあらわす。

t は閾値で SUSAN 演算子の唯一のパラメータである。マスク内の核と似た画素値を持つ画素を USAN (Univalue Segment Assimilating Nucleus) と呼び、これが演算子の名前 SUSAN (Smallest Univalue Segment Assimilating Nucleus) になっている。USAN のカウント法は式 1 のほうがややよい結果を与えるとのある。ただしこれによる違いは他の要素よりも小さいのでこの論文では式 2 を使い、比較は行なわなかった。

① r の値については原論文では $r=5$ になっているが、 $r=7$ に大きくすると影響があるか。

② 閾値 t については、原著論文によれば一般の画像では $t=25$ 程度がよく、コントラストのない画像では $t=7$ 程度がよいとあるがただしいか。

(3) 次に式 3 から幾何的なコーナー強度 $R(r_0)$ を計算する。

$$R(r_0) = \begin{cases} g - n(r_0) & \text{if } n(r_0) < g \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

ここで閾値 g は

$$g = n_{\max} / 2$$

であり、 n_{\max} はマスク内の画素数である。

(4) USAN の重心とその連結性を調べて偽のコーナーでないかをテストする。自然画像ではコーナーの周辺にも核の画素値に近い画素値をもつ画素が点在する。そのため、式 3 のみでは真のコーナーか判断するのは難しい。そこで USAN の重心を求め中心画素からの距離が離れていることを確認する。また USAN が集まっている (連結している) かどうかを調べる。

原著論文ではこうになっているが、その方法は述べていない。実際にこれを実行するのはあまり容易ではない。そこで

③ USAN の重心と核の距離 d の有効性はどうか。のみを調べる。

(5) 見出したコーナーの候補が極値であることを調べる。各画素 r_0 で $R(r_0)$ を計算し、それが r_0 の周囲 3×3 画素で極大になっていればコーナーである。

3. 実験

3. 1 実験に使った画像

実験に使った画像は次の 3 つである。福山大学を撮影した、モノクロスステレオ空中写真画像である[3]。エピソードに沿って再サンプリングしている。この画像から平坦な地形と比高のある地形を抜き出した。図 1, 2 に再掲する。また 3 つ目は、特殊な工事現場用大型トラックに積んだ土砂をデジタルカメラで撮影したステレオ画像である。エピソードに沿って再サンプリングしてあり縦視差はない。土砂は黒っぽくコントラストが低い。

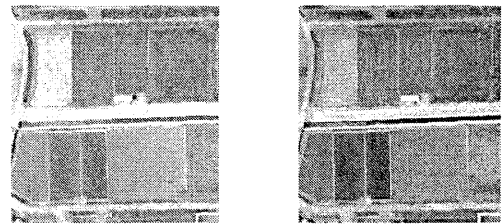


図 1 平坦な地形の立体空中写真画像 (平坦地)

426*426 画素, 1 画素は地上 2.5m にあたる。

Fig.1 Stereo aerial images of flat terrain (Flat)

426*426 pixels with a pixel being 0.5m on the ground



図2 比高のある地形の立体空中写真画像 (ビル)
426*426 画素, 1画素は地上0.5m
Fig.2 Stereo aerial images with height difference (Bldg.)

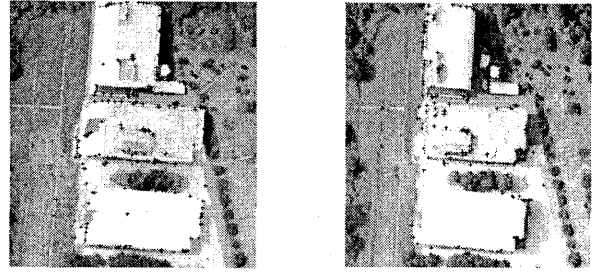


図5 比高のある地形のコーナー $r=5; t=25; d=0$
Fig.5 Corners detected in Bldg. $r=5; t=25; d=0$

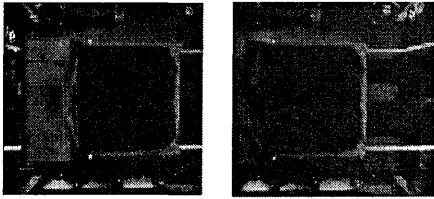


図3 土砂を積んだトラックの立体画像 (土砂)
150*232 画素(実空間 4.5m*3.01m)
Fig.3 Stereo images with soil on a truck (Soil)
150*232 pixels (4.5m*3.01m on the ground)

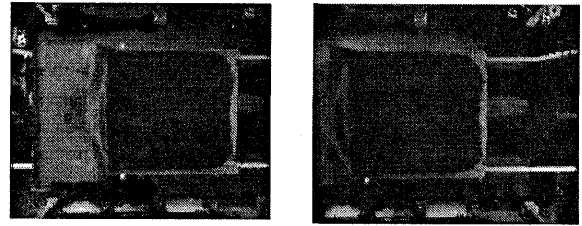


図6 土砂のコーナー $r=5; t=25; d=0$
Fig.6 Corners detected in Soil $r=5; t=25; d=0$

3. 2 SUSAN 演算子を使ったコーナー検出の特性

まず, 原著論文の設定に従ったときのコーナー検出の結果を図4, 5, 6に示す. また $d=0$ はUSANの重心位置を考慮していないことを示す. 立体画像のコーナーの対応は必ずしも取れていない.

③USANの重心について: コーナーでは核と重心が1画素以上はなれるという条件を図5の条件に加えると, コーナーはほとんど検知されない. また図7の条件にこれをつけ加えると図9が得られた. あまり適切にコーナーが検知できていないとはいえない. このことからUSANの重心は多くの場合核の近くにあり, USANは核の周りに広がっていることがわかる.

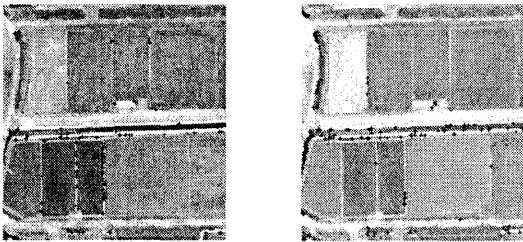


図4 平坦地のコーナー $r=5; t=25; d=0$
Fig.4 Corners detected in Flat $r=5; t=25; d=0$

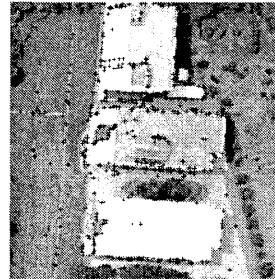


図7 ビルのコーナー
 $r=7; t=25; d=0$
Fig.7 Corners detected in Bldg.
 $r=7; t=25; d=0$

①から③についての比較の結果は次のようであった.
①maskの大きさについて: 図5左に対比して $r=7$ としたときのコーナーを図7に示す. エッジの検出度はmaskの大きさには敏感であり, 検出されるコーナーは激増する. またより直線エッジを好んで検出している.
②閾値 t について: 図6のようにコントラストがない画像では $t=25$ ではコーナーは検出されない. $t=7$ では図8のようになり, 感度は閾値に敏感に影響する.

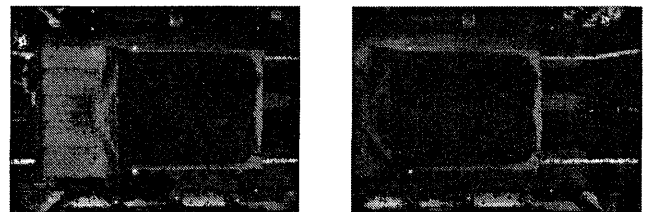


図8 土砂のコーナー $r=5; t=7; d=0$
Fig.8 Corners detected in Soil $r=5; t=7; d=0$

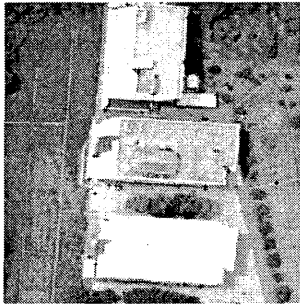


図9 ビルのコー
ナー
 $r=7; t=25; d<1$
Fig.9 Corners
detected in Bldg.
 $r=7; t=25; d>1$

3. 4 Foeresnter 演算子 との比較

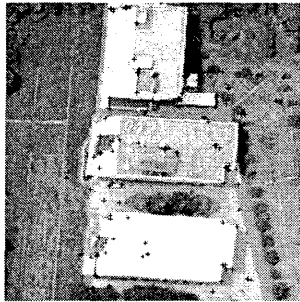


図10 Foerstner 演算子
で検知したビル（左図）
のコーナー
Fig.10 Corners detected in
Bldg. (left) by Foerstner
operator

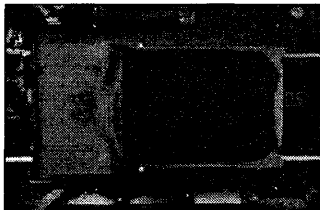


図11 Foerster 演算
子で検知した土砂
（左図）のコーナー
Fig.11 Corners
detected in Soil (left)
by Foerstner operator

SUSAN 演算子は単純な構造にもかかわらず比較的良
好なコーナーを検出する。次に比較のために、Foerstner
演算子で求めたコーナーの図を図 10, 11 に示す。SUSAN
演算子の条件とあわすため、前論文[3]のパラメータの値
を少し変えている。図 10 は図 2 左図に軽い Gauss フィル
タを掛けた後コーナーを検出した。誤差楕円の短半径 $a=$
 0.05 画素以下、離心率 $e=0.7$ 以下、Window の大きさを
 7×7 画素とし、画像全体を 1 画素ずつずらして走査し、
求めたエッジの交点が Window の中心（核）と 0.5 画素
以内で一致した点のみをコーナーとした。2 つの演算子
で共通に検知されるコーナーも多いが、SUSAN 演算子
は直線エッジをより強く検出している。

図 11 は Foerstner 演算子をつかって、図 3 左図から同
じ条件でコーナーを求めたものである。適切なコーナー
が得られていない。ただし条件を変えると図 5, 図 8 同
様の結果を得ることもできたが、パラメータの変化に敏
感で制御することは困難であった。

文献[3], [4]の結果も参照して、SUSAN 演算子と
Foerster 演算子を比較して見ると次のことが言える。

(1) 両者は必ずしも同等なコーナーを与えない。とく
に立体画像からの特徴点抽出という意味では明瞭な優

劣は見当たらないように感じる。

(2) 両者とも検知感度はパラメータの値に大きく依存
するし、必ずしも期待した点をコーナーと判断しない。
この論文では SUSAN の連結性を考慮しないためであろ
うが、期待したコーナーを検出するという意味の安定性
からは Foerster 演算子がやや優れているように感じる。
Foerster 演算子は explicit にコーナーを検出するが、
SUSAN 演算子では、コーナーでない場合も含むからで
ある。

4. 結論

この論文はコーナー検出の SUSAN 演算子の特徴を調べ、
Foerstner 演算子でのコーナー抽出と比較した。優劣の比
較は困難であったが、定性的な比較では次のようである。

計算時間では SUSAN 演算子が優れているが、コーナ
ーではない画素も検知してしまう。比較が困難な理由は
両者ともパラメータ依存性が強いためであるが、適切な
パラメータを選んだときは Foerstner 演算子の方がやや
期待通りのコーナーを検出できるように感じる。ただし
立体画像のコーナーの対応は両者とも、安定して付ける
ことはできなかった（対応することもしないこともあっ
た）。

参考文献

- [1] Smith, S.M. and J.M. Brady: SUSAN- A New Approach
to Low Level Image Processing, *International Journal of
Computer Vision*, **23**, **1**, pp.45-78, (1995)
- [2] Foerstner W. and E. Guelch: A Fast Operator for Detection
and Precise Location of Distinct Points, Corners and Centers
of Circular Features, *ISPRS Inter-commission Workshop,
Interlaken*, pp.281-305, June (1987)
- [3] 服部進, 秋本圭一, 井本治孝, 小野 徹; Foerstner
演算子による立体画像のコーナーの検出について, 平成
16 年度日本写真測量学会年次学術講演会発表論文集
pp.65-68, (2004)
- [4] 大西芳幸, 服部進: 標定点自動探索のためのコーナ
ーの検出, 福山大学工学部紀要, 第 27 巻, pp.205-210,
(2003)