

エッジ接合点, 角, エッジを検出するファン・オペレータ The Fan Operator for Detection of Junctions, Corners and Edges

中村 高宏 徐 剛 辻 三郎
Takahiro Nakamura, Gang Xu, Saburo Tsuji

大阪大学 基礎工学部
Faculty of Engineering Science
1-1, Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560 Japan

ABSTRACT

Both edges (1D features) and junctions and corners (2D features) are very important cues for image segmentation. This paper proposes the Fan Operator to detect junctions, corners and edges directly from image. We model junctions, corners and edges as intersections of straight intensity changes. The Fan Operator is a fan-shaped set of concentric circular arcs which are the first derivative of a Gaussian scaled proportionally with the radius along the axis. For each point, the operator is rotated around its origin every 5 degrees, and each time convolved with the image to produce a sequence of 72 values corresponding to the image changes across each direction. By analyzing these values, the intensity changes are classified into a T-junction, Y-junction, arrow-junction, a corner, or a straight edge. We also show that at true junctions, corners and edge points each extremum in the sequence of convolution values is also extremal among its neighborhood. By suppressing local non-extrema, we eliminate those points which have directional extrema but are not true corner, junction or edge points. We also show that the Fan Operator has nice properties in terms of good directional localization and signal-to-noise ratio. Finally we present experimental results on real images, which show that this approach is very promising.

1. はじめに

物体認識において、エッジは面の位置、反射、強度（明るさ）の不連続性を示す重要な特徴である。エッジの接合点及び角はその「不連続性」の不連続性を示すとも考えられ、面の相互関係を示す重要な特徴として利用される [Guzman, 1968; Waltz, 1975; Segawa, Xu & Tsuji, 1991]。エッジの接合点及び角の検出を行う従来のアプローチは大きく2つに分けられる。1つはエッジの検出結果に基づき、エッジの交点として求める方法である [Poggio et al, 1989; Nitzberg & Munford, 1990; Asada & Brady, 1986]。これはエッジの精度に依存するが、多くのエッジオペレータはエッジの直線性を仮定しており [Marr & Hildreth, 1980; Canny, 1986] エッジの接合点や角の近傍でエッジを正確に検出できないため精度が良くない。もう一つはある仮説をもとに画像から直接「角らしさ」を各画素について計算し、大きな値を持つ画素を角とするものである [Moravec, 1977; Dreschler & Nagel, 1982;

Nagel, 1983; Kitchen & Rosenfeld, 1982]。DericheとGiraudon (1990) はこれらのアプローチには位置の正確さに問題があることを示し、正確に角を検出できるアルゴリズムを提案した。

我々はこれらとは別の、より厳密なアプローチによってエッジの接合点と角の検出を行う。すなわち、各画素において、我々の提案する扇形のオペレータ「ファン・オペレータ」によって、各方向の強度変化をハーフエッジとして画像から直接検出する。ファン・オペレータは、円弧方向には半径に比例した標準偏差をもつガウシアン的一次微分であり、それが半径方向の軸にそって並ぶような形状をもつ。これを回転させてたたみこみ積分を行うと、ハーフエッジの存在する方向が極大値、極小値として現れる。したがって極値の個数及び相互関係からエッジ点、エッジの接合点、角及びそのタイプを分類できる。エッジの接合点及び角は2本以上のハーフエッジが接合する点、エッジ点は2本のハーフエッジが180度

の角度で接合する点として定義される。真のエッジの接合点や角の点ではその極値が最大になることが証明されるので、真のエッジの接合点や角の近傍の偽の出力は非極大点抑制の手法で除去できる。

ファン・オペレータはCannyのオペレータ [Canny, 1986] と数学的に類似性を持ち、S/N 比や検出位置の正確さ、応答の唯一性に対し良好な結果が得られる一方、エッジと異なりエッジの接合点及び角は2次元的な特徴変化であるため、特徴の検出方法はまったく異なる。本論文では、まず2章でエッジの接合点及び角を定義し、ファン・オペレータのモデルを紹介する。3章ではCannyのオペレータ評価基準 [Canny, 1986] を用いてオペレータを設計する。4章ではエッジの接合点及び角の近傍でのオペレータの出力の変化を示し、真のエッジの接合点以外の偽の出力を除去するアルゴリズムを示す。

2. ファン・オペレータのモデル

2.1 ファン・オペレータの表現

エッジの接合点の型は表1のように1点で結合するハーフエッジの数及びそれらの間の角度で定義される。

図1のような理想的なY-エッジの接合点を考える。













$$I(r, \theta) = I_0 + (I_1 - I_0) u(\theta - \theta_1) + (I_2 - I_1) u(\theta - \theta_2) + (I_0 - I_2) u(\theta - \theta_3)$$

$$0 \leq \theta < 2\pi, \quad r > 0$$

$$u(\theta) = \begin{cases} 0 & ; \theta < 0 \\ 1 & ; 0 \leq \theta \end{cases}$$

図2は任意の半径 r の円上の強度変化である。

表1 ジャンクションの型

ハーフエッジ数	ハーフエッジ間の角度	ジャンクションの型
2	$\theta = \pi$	(straight) Edge 
	$\theta \neq \pi$	Corner 
3	$\theta_{\max} = \pi$	T 
	$< \pi$	Y (Fork) 
	$> \pi$	Arrow 
4	$\theta_{\max} = \pi$	K 
	$\theta_{\max} > \pi$	Peak 
	$\theta_1 = \theta_3, \theta_2 = \theta_4$	X 
	$\theta_1 + \theta_2 = \pi$	Psi 
	other	Multi 
≥ 5	$\theta_{\max} > \pi$	Peak 
	other	Multi 

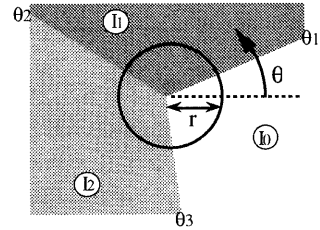


図1 理想的なY-エッジの接合点

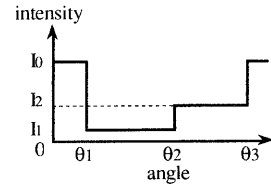


図2 Y-エッジの接合点を中心とする円上の画像強度

これを一次微分すると強度の変化が存在する角度が正の極大値または負の極小値として現れるので、ハーフエッジとして検出できる。ノイズを抑えるため、一般にガウス関数による平滑化が併用される。従って、角度 θ を変数としたフィルタは次のような式であらわされる。

$$G'(\theta) = k \theta \exp(-\theta^2 / 2\sigma^2), \quad -\pi \leq \theta \leq \pi$$

ここではガウス関数の幅は無限大とすることはできないので、角度 θ は $[-\pi, +\pi]$ に制限される。

安定性のため、このフィルタを以下の投影関数 $p(r)$ により半径方向に拡張する。

$$p(r) = 1; \quad 0 < r \leq R$$

または、両端をガウス関数でなめらかにすると

$$p(r) = \begin{cases} \exp(-(r - R_s)^2 / 2\sigma_r^2) & ; 0 < r \leq R_s \\ 1 & ; R_s < r \leq R - R_s \\ \exp(-(r - R + R_s)^2 / 2\sigma_r^2) & ; R - R_s < r \leq R \end{cases}$$

これによりオペレータは次のように表現される。

$$F(r, \theta) = p(r) G'(\theta) \\ = p(r) k \theta \exp(-\theta^2 / 2\sigma^2) \\ 0 < r \leq R, \quad -\pi \leq \theta \leq \pi$$

図1の画像モデルとのたたみこみ積分 H は、エッジの接合点の位置する原点 $(0, 0)$ で次のようになる。

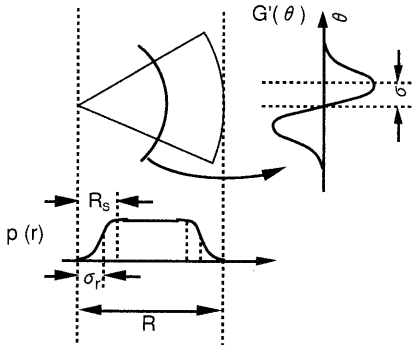
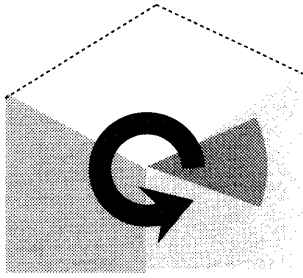


図3 ファン・オペレータ

$$\begin{aligned}
 H(0, 0; \alpha) &= I * F(\theta - \alpha) \\
 &= K_p \{ (I_1 - I_0) G(\alpha - \theta_1) w(\alpha - \theta_1) \\
 &\quad + (I_2 - I_1) G(\alpha - \theta_2) w(\alpha - \theta_2) \\
 &\quad + (I_0 - I_2) G(\alpha - \theta_3) w(\alpha - \theta_3) \}
 \end{aligned}$$

$$K_p = \left(\int_0^R r p(r) dr \right)$$

$$w(\theta) = u(\theta + \pi) - u(\theta - \pi)$$

但し、 w は窓関数、 α はオペレータの偏角。

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ の間隔がガウス関数の幅 σ に対して充分離れていれば、 H は $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ において極値を持つことが容易にわかる。

2.2 オペレータの角度分解能

検出角度の分解能は σ で決定される。図4のように2つの強度変化が近接している場合を考える。簡単のため、2つの強度変化の絶対値は等しいとする。($|a| = |b|$)

(a) 強度変化が同符号の場合、これらが検出可能であるための条件は、 $\theta \approx 0$ 及び ψ に存在する積分値の極値よりその間に存在する逆符号の極値のほうが絶対値が小さいことである。

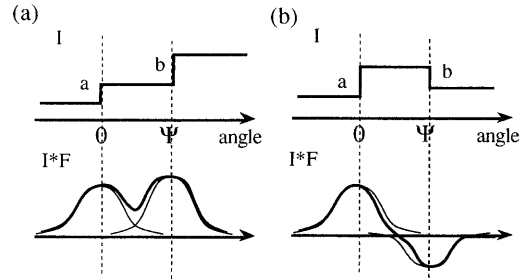


図4 角度の近接する強度変化に対する出力

$$(I * F)' \left(\frac{\psi}{2} \right) = k G' \left(\frac{\psi}{2} \right) + k G' \left(\frac{\psi}{2} - \psi \right) \equiv 0$$

(k は定数) であるから、 $\theta = \psi/2$ で極値となる。従って、 $\theta \approx 0$ 及び ψ で極値を持つための条件は、

$$(I * F)'' \left(\frac{\psi}{2} \right) = 2 k G'' \left(\frac{\psi}{2} \right) > 0$$

すなわち、

$$\psi > 2\sigma$$

(b) 強度変化が異符号の場合は

$$(I * F) \left(\frac{\psi}{2} \right) = k G \left(\frac{\psi}{2} \right) + k G \left(\frac{\psi}{2} - \psi \right) \equiv 0$$

$\theta = \psi/2$ の両側に極値が存在するための条件は、単に次のようになる。

$$(I * F)' \left(\frac{\psi}{2} \right) = 2 k G' \left(\frac{\psi}{2} \right) \neq 0$$

上式は $\psi > 0$ であれば常に真であるが、 ψ が小さくなると積分値も小さくなり、ある値を下回ると閾値処理される。

検出角の正確さは、ハーフエッジ間の角度が小さくなるにつれて精度が悪くなる。実際にはオペレータ幅は無限にすることはできないのである値 W とされる。現在のインプリメンテーションでは σ は 5 degrees、 W は約 50 degrees である。したがって図4 (a) の場合はハーフエッジの検出に 10 degrees 以上の間隔が必要である。また、間隔が 25 degrees 以上であると相互干渉のない正確な角度が検出される。

3. オペレータの評価

オペレータはノイズの加わった画像に対する S / N 比 (SNR)、検出位置の正確さ (Localization)、応答の単一性 (Singleness) の観点から評価することができる。Canny (1986) はこれらの基準に対する数学的な定義を行った。以下では、Canny による評価基準をファン・オペレータに適用し、Canny のオペレータ (1986) と比較する。オペレータ幅を $2W$ ($W < \pi$) とし、ハーフエッジ間の角度は W より大きいものとする。エッジの接合点を中心とする円周上の値を考えると入力は 1 次元となる。ハーフエッジはステップ関数として扱われ、 $\theta = 0$ のハーフエッジは次のように表される。

$$I(\theta) = A u(\theta) + n(\theta)$$

n は白色ガウシアンノイズで次のような分散を持つ。

$$n_0^2 = E(n^2(\theta))$$

この円周上ではオペレータは次式で扱われる。(簡単のため、係数は 1 とする)

$$F(\theta) = G'(\theta)$$

SNR は信号成分とノイズ成分に対するオペレータの出力比で示され、次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{SNR} &= \frac{A}{n_0} \frac{\int_{-W}^W I(\theta) F(-\theta) d\theta}{\sqrt{\int_{-W}^W F^2(\theta) d\theta}} = \frac{A}{n_0} \frac{\int_{-W}^W F(\theta) d\theta}{\sqrt{\int_{-W}^W F^2(\theta) d\theta}} \\ &\equiv \frac{A}{n_0} \Sigma \end{aligned}$$

Localization は、ノイズによる検出位置の誤差の逆数で示され、次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{Localization} &= \frac{A}{n_0} \frac{|F'(0)|}{\sqrt{\int_{-W}^W F^2(\theta) d\theta}} \\ &\equiv \frac{A}{n_0} \Lambda \end{aligned}$$

ノイズにより、複数の極値があらわれる。これらの間の角度差の平均値は

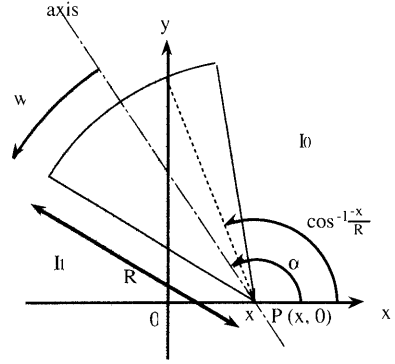


図5 理想的なエッジの場合のモデル

$$E(\theta) = \pi \left(\frac{\int_{-\infty}^{\infty} F'^2(\theta) d\theta}{\int_{-\infty}^{\infty} F''(\theta) d\theta} \right)^{\frac{1}{2}} \approx \pi \left(\frac{\int_{-\pi}^{\pi} F'^2(\theta) d\theta}{\int_{-\pi}^{\pi} F''(\theta) d\theta} \right)^{\frac{1}{2}}$$

となり、これをある値に設定することで応答の単一性 (Singleness) を得る。

Canny (1986) は SNR と Localization の積を応答の単一性 (Singleness) の制約のもとで最大にすることにより理想的なエッジオペレータを求め、それがガウス関数の一次微分で近似できることを示唆した。この近似により、SNR と Localization の積は約 20%、Singleness は約 10% 悪くなる。上記のように、ファン・オペレータは Canny のオペレータと数学的に等価であり (x 軸と角度 θ の違いのみ)、これら 3 つの評価基準に対する性能も Canny のオペレータとほぼ同様である。

$$\Sigma \Lambda = \sqrt{\frac{8}{3\pi}} \approx 0.92$$

4. 非エッジの接合点の抑制

前章までは真のエッジの接合点及び角におけるハーフエッジの検出を議論した。ハーフエッジは画像とオペレータのたたみこみ積分から θ に対する正の極大値または負の極小値 (以下ではこれらを方向に対する極値とよぶ) として検出できた。ところで、方向に対する極値は真のエッジの接合点や角の近傍でも出力される。本章では、方向に対する極値が真のエッジの接合点や角においてその近傍領域でもまた極値 (以下ではこれを位置に対する極値とよぶ) となることを証明する。さらに、この性質を基に真のエッジの接合点及び角以外の点を抑制するアルゴリズムを紹介する。

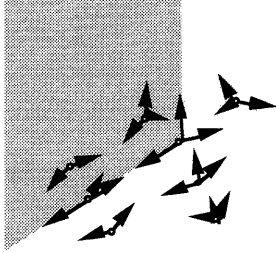


図6 仮の方向に対する極値

4.1 位置に対する極値に関する証明

図5のように、(ハーフ)エッジがちょうどy軸に重なっているモデルを考える。

$$I(x, y) = I_0 + (I_1 - I_0) u(-x)$$

簡単のため、オペレータの投影関数 $p(r)$ は1とする。

定理：たたみこみ積分はオペレータの頂点(原点)がエッジ上にあるとき極値をとる

証明：オペレータの出力はy方向に依存しないので、 x 及び α の関数になる。

$$\begin{aligned} H(x, \alpha) &= \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\infty} I_0 G'(\alpha - \theta) r dr d\theta \\ &+ \int_{\cos^{-1}(\frac{x}{R})}^{W+\alpha} \int_{\frac{x}{\cos \theta}}^R (I_1 - I_0) G'(\alpha - \theta) r dr d\theta \\ &= \frac{I_1 - I_0}{2} \int_{\cos^{-1}(\frac{x}{R})}^{W+\alpha} \left(R^2 - \left(\frac{x}{\cos \theta} \right)^2 \right) G'(\alpha - \theta) d\theta \\ \frac{\partial H}{\partial x} &= (I_1 - I_0) x \int_{\cos^{-1}(\frac{x}{R})}^{W+\alpha} \frac{G'(\theta - \alpha)}{\cos^2 \theta} d\theta \\ &= 0 \quad \text{at } x = 0 \end{aligned}$$

α についてはオペレータの定義からほぼ自明である。(証明おわり)

したがって、真のエッジの接合点及び角では全てのハーフエッジが位置に対する極値となる。2つのハーフエッジ間の角度が小さいと、オペレータの出力は複雑になる(図6参照)。この場合、普通方向に対する極値を3個有する点の領域と4個有する点の領域が角の近傍に現れる。エッジの接合点でも同様の結果とな

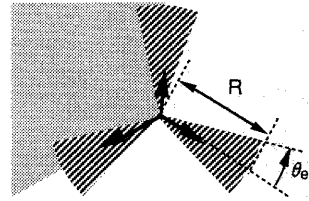


図7 エッジ検出のための抑制領域(斜線部分)

る。このような場合の一般的な証明は難しい。

4.2 非エッジの接合点の抑制

前節の結果より、方向に対する極値の絶対値の和をとると真のエッジの接合点及び角が極大値となることがわかる。また極値の和をとることで、画像やオペレータの離散化誤差によって方向に対する極値が同時に最大絶対値とならない場合がある問題が解決される。

したがって以下の方法により真のエッジの接合点及び角及びエッジ点を検出することができる。約180度離れた方向に対する極値を2個有する点に対してはエッジ点であると仮定し、その極値の方向の垂直方向に隣あう2点と極値の絶対値の和の比較を行い、それらより小さな値でなければエッジ点として採用する。上記以外の点に対しては、その点の8近傍点と比較を行い、それらのどの値よりも大きければエッジの接合点又は角として採用され、さらに方向に対する極値の個数及びそれらの関係からエッジの接合点の型が決定される。エッジに対して前者のような別の方法を取る理由は、後者の方法では隣りあうエッジ点のうち極値の絶対値の和が少しでも小さな方が抑制されてしまい、エッジが途切れるからである。

4.3 エッジの接合点近傍のエッジ検出

エッジの接合点及び角が前節で述べた方法により極大値として検出されるということは同時にその近傍ではエッジ点は前節の方法で極大値として検出できないことを意味する。そこで、エッジの接合点及び角を中心とするオペレータ半径 R の近傍領域(図7参照)では以下のような方法でエッジ点を検出する。

エッジは先に検出されたエッジの接合点及び角のハーフエッジの方向に存在する。したがって、ハーフエッジの方向 $\pm \theta_0$ の扇形領域内についてハーフエッジの方向 $\pm k_0 \sigma$ の角度の方向に対する極値のみについて、極値の垂直方向に隣あう2点と絶対値の比較を行い、それが最大値である場合にエッジ点として採用する。

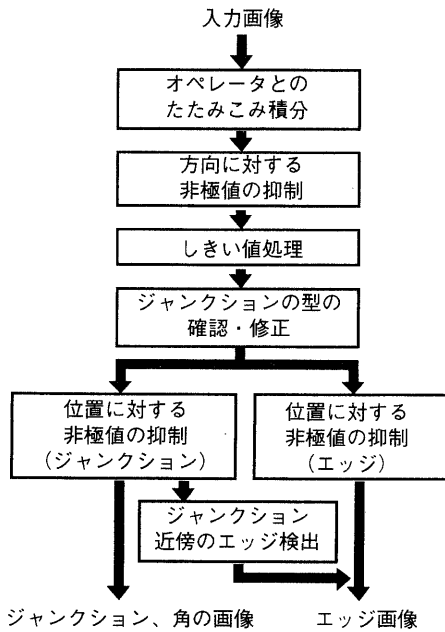


図8 処理の流れ

5. インプリメンテーション及び実験結果

本章では、この新たなアプローチによる実画像を使用した実験結果を示す。

5.1 インプリメンテーション

エッジの接合点及び角とエッジ点は以下の手順で検出する。(図8参照)

- (1) 画像を $\sigma = 5$ degrees 間隔でオペレータとたたみこみ積分し、各画素ごとに76個の値からなる出力を得る。
- (2) 各画素ごとに正の極大値または負の極小値以外の値を除去し、方向に対する極値を得る。(方向に対する非極値の抑制)
- (3) 2段階の閾値による処理により、ノイズによる出力を除去する。
 - i] カメラ入力のノイズの除去 (入力レンジの4%以下)
 - ii] 相対的に小さな値の除去 (最大の絶対値をとる値の25%以下)
- (4) 8近傍点とエッジの接合点の型の比較・確認を行う。8近傍点と比較して方向に対する極値の個数が多い場合、

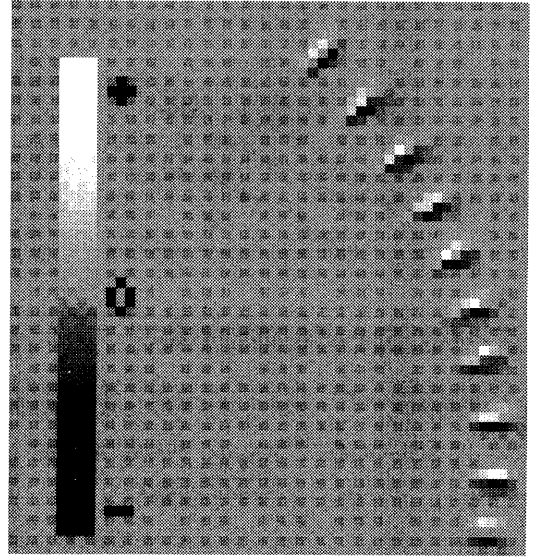


図9 ファン・オペレータのマスク (0 ~ 45 degrees)

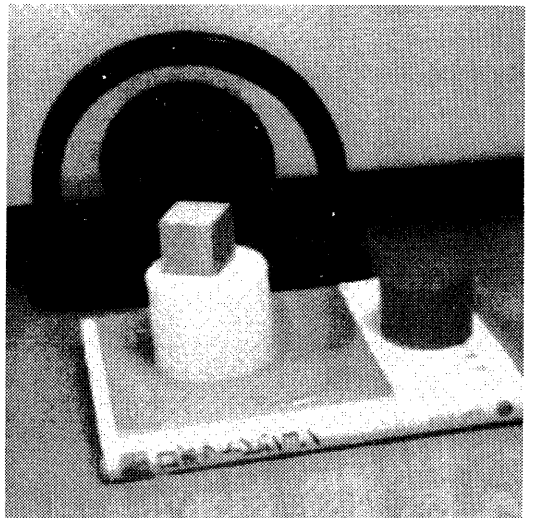


図10 実験に用いた画像 (400*400*8 bits)

8近傍点のものに対応が取れない極値はノイズによるものとして除去する。

(5) 位置に対する非極値の抑制を a] エッジの接合点及び角、b] エッジ点に対して行う。

a] (エッジの接合点、角) 方向に対する極値の絶対値の和を8近傍点と比較し、最大値でなければ除去する。

b] (エッジ点) 方向に対する極値の絶対値の和

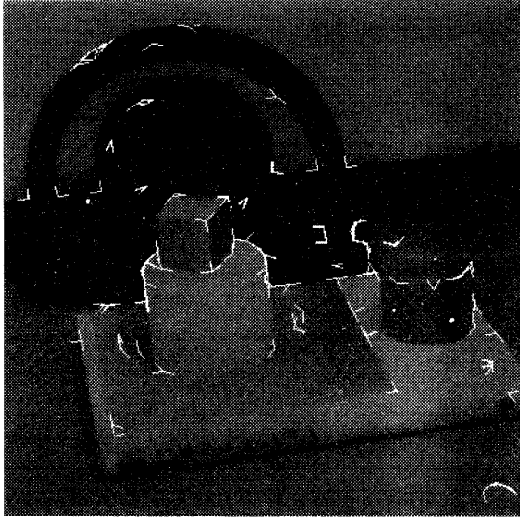


図11 検出されたエッジの接合点及び角 (ハーフエッジ3本以下)

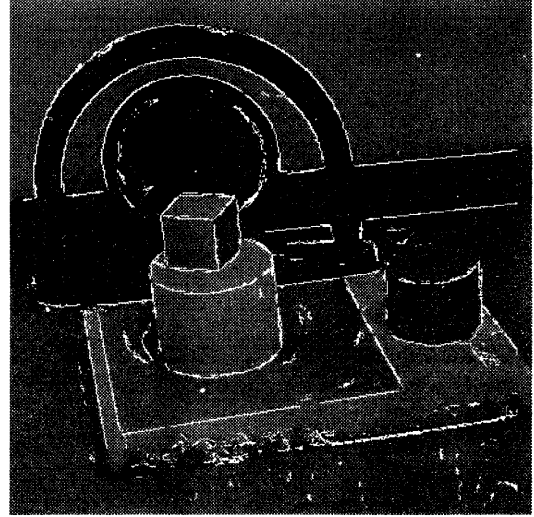


図12 エッジの接合点及び角の近傍まで検出されたエッジ

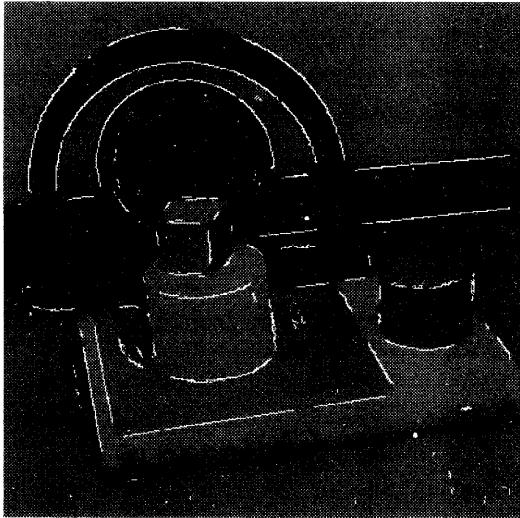


図13 検出されたエッジ (第1段階)

をエッジの垂直方向の2個の近傍点と比較し、最大値でなければ除去する。

(6) 検出されたエッジの接合点及び角の積分処理領域のエッジを、エッジの接合点のハーフエッジの情報及びそれに対応する極値より検出し、(5) b の出力に加える。

5.2 実験結果

ファン・オペレータの各パラメータは、 $\sigma = 5$ degrees、 $R = 10$ pixels、 $\sigma_r = 0.5$ pixels、 $R_s = 2$ pixelsとして実験を行った。また4.3節のエッジ検出におけるパラメータは、

$\theta_e = 10$ degrees、 $k_e = 1$ である。図10にエッジの接合点及び角の検出結果を示す。エッジの接合点の型とハーフエッジの方向は中心から放射状に伸びる線分で表されている。ほとんどのエッジの接合点及び角が正確な位置とハーフエッジの方向で検出されている。図12、図13にエッジの検出結果を示す。多くのエッジオペレータが検出できないエッジの接合点や角の近傍までエッジが検出できることがわかる。

6. おわりに

画像から直接エッジの接合点及び角を検出するファン・オペレータを提案した。画像とオペレータのたたみこみ積分は真のエッジの接合点及び角で位置、方向に対する極値となることが理論的に証明され、非極大点抑制を行うことによってこれらの検出を行った。また同時にエッジを検出し、さらにエッジの接合点及び角の情報を利用してその近傍のエッジも検出した。

ファン・オペレータは次のような利点をもつ。

- ・オペレータの形状が扇形であるため、放射状の強度変化をもつエッジの接合点や角をハーフエッジ間の干渉を最小限に抑えて精度良く検出できる。

- ・エッジの接合点及び角に加えエッジも同時に得ることができるため、画像認識のシステムは他のエッジオペレータを用意する必要がない。また、エッジの接合点の型も直接得ることができる。

- ・いくつかの良いエッジオペレータ [Marr & Hildreth,

1980; Canny, 1986]と同様に、ガウス関数を使用し、特徴近傍の広い領域を積分処理することによってノイズの少ない出力が得られる。

現在のインプリメンテーションではオペレータの大きさは画像特徴のスケールからヒューリスティックに設定されている。そのため、エッジの接合点や角がオペレータの積分処理領域に複数個存在すると正確に検出できない。coarse-to-fine の手法を取り入れ、幅広いスケールを持つ画像特徴に対応することが今後の課題である。

参考文献

Asada, H. and Brady, M. (1986) "The Curvature Primal Skatch," IEEE PAMI, Vol. 8, pp. 214.

Canny, J. (1986) "A Computational Approach to Edge Detection," IEEE Trans. Patt. Anal. and Mach. Intel. Vol. PAMI-8 No. 6, pp.679-698

Deriche, R. and Giraudon, G. (1990) "Accurate Corner Detection: An Analytical Study," in Int. Conf, Computer Vision , pp. 66-70.

Dreschler, L. and Nagel, H. (1972) "On the Selection of Critical Points and local Curvature Extrema of Region Boundaries for Interframe Matching," in Int. Conf., Pattern Recognition, pp. 542-544.

Guzman, A. (1968) "Decomposition of a Visual Scene into Three-Dimensional Bodies," AFIPS Proceedings Fall Joint Comp. Conf., Vol.33.

Kitchen, L. and Rosenfeld, A. (1982) "Gray-Level Corner Detection," in Pattern Recognition Letters, December, pp. 95-102.

Marr, D. and Hildreth, E. (1980) "Theory of Edge Detection," Proceedings of the Royal Society of London, B207, pp. 187-217

Moravec, H. (1977) "Towards automatic visual obstacle avoidance," in IJCAI-5.

Nakamura, T., Xu, G. and Tsuji, S. (1991) "The Fan Operator for Detection of Junctions and Corners," Proc. of First Korea-Japan Joint Conference on Computer Vision, pp. 480-486.

Nitzberg, M. and Mumford, D. (1990) "The 2.1D sketch", Proc. of 2nd Int. Conf. on Computer Vision, to appear.

Noble, J. (1988) "Finding Corners," in Image and Vision Computing, Vol. 6, May, pp. 121-128.

Poggio, T. and the staff (1989) "MIT Progress in Image understanding", Proc. of DARPA Workshop in Image

Understanding, pp.56-73

Segawa, E., Xu, G. and Tsuji, S. (1991) "Contour Image Construction and Segmentation based on Output of the Fan Operator" Proc. of First Korea-Japan Joint Conference on Computer Vision, pp. 390-395

Waltz, D. (1975) "Understanding Line Drawings of Scenes with Shadows," in The Psychology of Computer Vision, P. H. Winston (ed.), McGraw-Hill, New York, pp. 19-91.

Xu, G. and Tsuji, S. (1991a) "Object Learning and Recognition: Two-Dimensional or three-Dimensional?," Technical Report 91-01, Department of Control Engineering, Osaka Univ.

Xu, G. and Tsuji, S. (1991b) "A revision of Marr's vision paradigm", Proc. of First Korea-Japan Joint Conference on Computer Vision, pp. 290-297.