

## 研究速報

## エッジ検出のための最適フィルタ ISEF の改良

渡辺 孝志<sup>†</sup> (正員) 佐々木貴志<sup>†</sup>木村 彰男<sup>†</sup> (正員)

An Improvement of the Optimal Filter ISEF for Edge Detection

Takashi WATANABE<sup>†</sup>, Member,Takashi SASAKI<sup>†</sup>, Nonmember, and Akio KIMURA<sup>†</sup>, Member<sup>†</sup> 岩手大学工学部情報システム工学科, 盛岡市

Department of Computer and Information Sciences, Iwate University, 4-3-5 Ueda, Morioka-shi, 020-8551 Japan

あらし 最適フィルタを用いるタイプのエッジ検出法としては Canny フィルタ [1] が広く知られているが, ISEF フィルタ [2] は Canny フィルタを上回るエッジ検出法という触れ込みで提案されている. 本論文では, 評価実験を行って両フィルタのエッジ検出性能について比較検討する. 特に, ISEF フィルタの使用法を若干変更することで, その耐雑音性能をかなり改善でき, 既存の ISEF フィルタと Canny フィルタを上回るエッジ検出性能が実現できることを示す.

キーワード エッジ検出, 最適フィルタ, Canny フィルタ, ISEF フィルタ, ロバスト性

## 1. まえがき

エッジや輪郭線の検出は画像処理アルゴリズムの中で最も基本的な処理であり, 物体認識や画像計測のシステム性能を左右する重要な処理である. そのため, これまでに数多くのエッジ検出法が提案されている (例えば [3]). 最近では, エッジ画像から各エッジ点の接線情報を直接抽出して効率的な物体認識法を構成しようとする研究も提案されており [4], [5], より高精度でロバストなエッジ検出法が必要とされている.

このようなエッジ検出を実現するためには, 単なる  $3 \times 3$  画素の窓を処理単位とする微分オペレータよりも更に広い窓を処理単位とする最適フィルタによるエッジ検出法が適しており, その代表的な手法が Canny フィルタ [1] と ISEF (Infinite Symmetric Exponential Filter) フィルタ [2] である.

本論文では, この二つのフィルタに対して性能評価実験を行って, その特徴と問題点を明らかにする. 特に, ISEF フィルタの使用法を若干変更することによって, その耐雑音性能がかなり改善され, 既存の ISEF フィルタと Canny フィルタを上回るエッジ検出性能が実現できることを示す.

## 2. 最適フィルタによるエッジ検出

## 2.1 Canny フィルタ

Canny [1] は, 1 次微分的なフィルタ処理でエッジ検出を行うために, 次の三つの評価基準を定めた.

- (1) 真のエッジの検出に失敗する確率とエッジでない点をエッジと誤る確率がともに低いこと.
- (2) 検出したエッジは真のエッジ近くにあること.
- (3) 一つのエッジに対して複数のエッジ応答を与えないこと.

そして, その最適フィルタの一般解として

$$f_C(x) = a_1 e^{\alpha x} \sin \omega x + a_2 e^{\alpha x} \cos \omega x + a_3 e^{-\alpha x} \sin \omega x + a_4 e^{-\alpha x} \cos \omega x + c \quad (1)$$

を導出して ( $\alpha, \omega, c, a_1 \sim a_4$  は定数), これがガウス関数  $G(x) = (1/\sqrt{2\pi}\sigma) \exp(-x^2/2\sigma^2)$  の 1 次導関数

$$G'(x) = -\frac{x}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

で近似できることを示した. 実際にもこちらの近似形が広く利用されているので, 以下, 本論文で Canny フィルタという場合は近似形を指すものとする. 図 1 にガウス関数とその 1 次導関数の形状を示す.

具体的なエッジ検出手順としては, 各画素位置において多くの方向 (例えば,  $22.5$  度ごとの 8 方向) に対してフィルタの出力値を求め, それらの最大値を与える方向を見つける. そして, その最大値が同じ方向の両隣の画素におけるフィルタ出力値よりも大きくて, しきい値を超える場合に, その画素をエッジ点とする.

## 2.2 ISEF フィルタ

Shen ら [2] は, エッジ検出に 2 次微分 (ラプラシアン) 処理による零交差点を用いるものとし, 零交差点を効果的に検出できる平滑化フィルタを求めた. その際, 最適フィルタ  $f(x)$  は次の評価関数

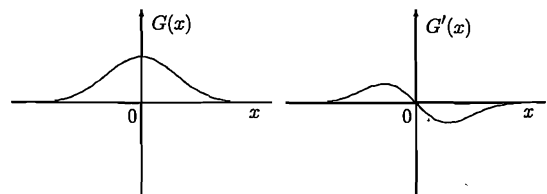


図 1 ガウス関数  $G(x)$  とその 1 次導関数  $G'(x)$   
Fig. 1 Outlines of Gaussian  $G(x)$  and its derivative  $G'(x)$ .

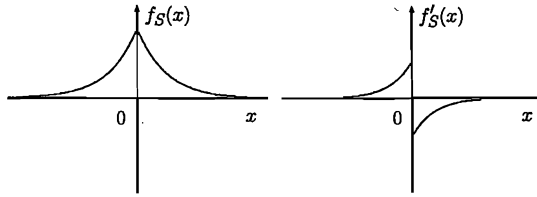


図2 ISEF フィルタ  $f_S(x)$  とその1次導関数  $f'_S(x)$   
 Fig.2 Outlines of the filter ISEF  $f_S(x)$  and its derivative  $f'_S(x)$ .

$$C_N = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} f^2(x) dx \int_{-\infty}^{\infty} f'^2(x) dx}{f^2(0)}} \quad (3)$$

を最小化するものとした。これは信号対雑音比 (SNR) の逆数に対応するものであり、その解は

$$f_S(x) = \frac{p}{2} \exp(-p|x|) \quad (4)$$

となる。ここで、 $p > 0$  であり、 $|x|$  は  $x$  の絶対値を表す。これを ISEF フィルタと呼ぶ。図2に ISEF フィルタ  $f_S(x)$  とその1次導関数の形状を示す。画像に適用する場合の2次元 ISEF フィルタは次となる。

$$f_S(x, y) = \frac{p^2}{4} \exp(-p(|x| + |y|)) \quad (5)$$

ISEF フィルタによるエッジ検出手順は次となる。

(手順1) 入力画像  $I$  を ISEF フィルタで平滑化した画像  $I_S$  を作成する。

(手順2) 画像  $I_S$  のラプラシアン画像を求め (画像の引き算  $I_S - I$  で実現できる)、その正負で2値化した画像 BLI (Binary Laplacian Image) を作成する。

(手順3) 画像 BLI において、雑音としての微小領域を消した後、正領域と負領域の境界画素を零交差点とする。次に、符号対応原理で偽の零交差点を削除する。

(手順4) 残った零交差点の中で AG 値がしきい値以上のものをエッジ点とする。

ここで符号対応原理とは、真の零交差点位置では1次微分値が正(負)ならば2次微分値が正(負)から負(正)へと変化することをいう。また AG (Adaptive Gradient) 値とは、注目画素の近傍における画像  $I_S$  の濃度値こう配の平均値である。

### 2.3 評価実験

Shenら[2]は、ISEF フィルタは Canny フィルタよりもエッジの検出性能が優れている、と主張している。そこで、これを確認するために両フィルタの評価実験を行った。以下に実験結果として示す画像は、両フィ

ルタを様々なパラメータで適用して、目視でエッジが最もよく検出されたと判断されたものである。具体的には、Canny フィルタの標準偏差  $\sigma$  は 1.0~2.5 の範囲を間隔 0.5 で、ISEF フィルタの指数  $p$  は 0.1~1.0 の範囲を間隔 0.1 で、AG のしきい値  $T$  は 5~50 の範囲を間隔 5 で変化させて、エッジの検出度合が高く、誤りエッジが少ないものを選んだ。なお、テスト画像のサイズはいずれも  $256 \times 256$  画素である。

#### 2.3.1 テスト画像1 (雑音が小さい人工画像)

図3(a)に示すテスト画像1は、エッジの両側での濃淡値差が32である水平垂直方向のエッジをもつ画像に対して、標準偏差8の正規分布に従う小さな雑音を各画素ごとに独立に付加した画像である。実験に使用したパラメータは、Canny フィルタでは標準偏差  $\sigma = 1.5$  であり、ISEF フィルタでは指数  $p = 0.3$ 、適応的グラジエント (AG) の窓サイズ  $W = 7$ 、AG のしきい値  $T = 25$  である。

図3(b), (c)に示す実験結果より、Canny フィルタはほぼ良好にエッジを検出しているが、エッジ点が真の位置から若干ずれている。これに対して、ISEF フィルタはエッジ点位置をかなり正確に検出している。

#### 2.3.2 テスト画像2 (雑音大きい人工画像)

図4(a)に示すテスト画像2は、テスト画像1と同じ原画像に対して標準偏差16の正規分布に従う大きな雑音を付加した画像である。実験パラメータでテスト画像1と違ったものは、Canny フィルタの標準偏差  $\sigma = 2.0$ 、ISEF フィルタのしきい値  $T = 35$  である。

図4(b), (c)に示す実験結果より、Canny フィルタはエッジ点が真の位置から若干ずれているが、雑音が小さい場合と比べて、雑音の影響をそれほど受けていない。これに対して、ISEF フィルタでは真のエッジはそれなりに検出されているが、雑音が小さい場合と比べて、エッジが十分に検出できていないといえない。

なお、テスト画像1と2を45度回転させた画像についても実験を試みたが、同様な結果であった[6]。

#### 2.3.3 テスト画像3 (雑音大きい実画像)

図5(a)に示すテスト画像3は、文献[7]の図2(a)の実画像に対して、標準偏差16の正規分布に従う大きな雑音を付加した画像である。実験パラメータでテスト画像1と違ったものは、Canny フィルタでは標準偏差  $\sigma = 2.0$  であり、ISEF フィルタでは指数  $p = 0.4$ 、しきい値  $T = 35$  である。

図5(b), (c)に示す実験結果より、Canny フィルタ

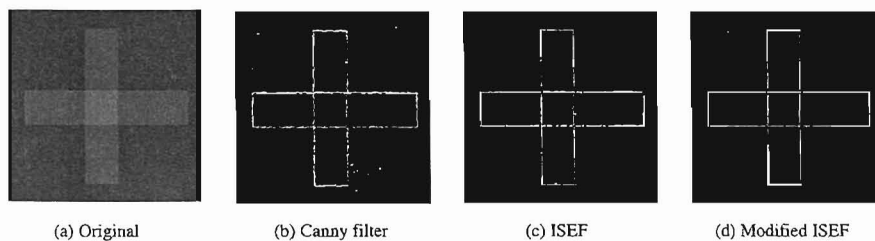


図 3 テスト画像 1 の実験結果  
Fig. 3 The edge detection results for the tested image 1.

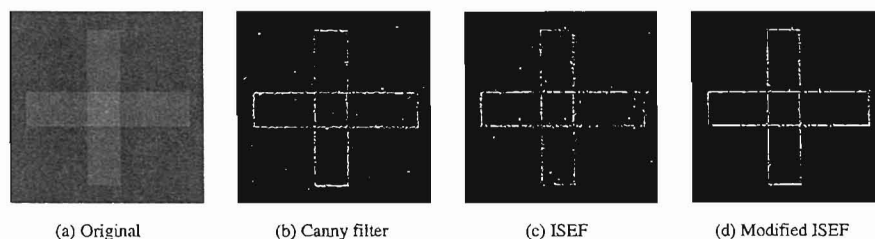


図 4 テスト画像 2 の実験結果  
Fig. 4 The edge detection results for the tested image 2.

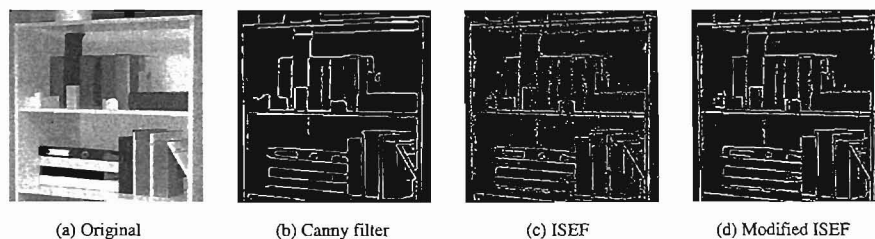


図 5 テスト画像 3 の実験結果  
Fig. 5 The edge detection results for the tested image 3.

では雑音の影響は少ないが、検出できていないエッジ点や、エッジ点が真の位置からずれているものが見られる。これに対して、ISEF フィルタではエッジ点の位置は十分に精度良く検出できているが、雑音の影響を受けやすいことが分かる。

以上の評価実験により、耐雑音性に関しては Canny フィルタが優れており、エッジ点位置の検出精度に関しては ISEF フィルタが優れていることが分かる。したがって、ISEF フィルタの耐雑音性を高めることができれば、Canny フィルタを超えるエッジ検出法が実現できると期待される。

### 3. ISEF フィルタの改良

#### 3.1 新しい平滑化処理の必要性

ISEF フィルタの耐雑音性を高める手段として、入力画像に前処理として平滑化を施すことが考えられる。そこで、予備実験として、二つの平滑化手法（メ

ジアンフィルタとエッジを保ったスムージング）を選び、これらを前処理として入力画像にそれぞれ施し、その後に ISEF フィルタを適用する形でエッジ検出を試みた。しかしその結果は、どちらの場合も平滑化を施さない場合に比べてエッジ検出結果を若干は改善できるが、検出エッジ点が真の位置からずれてしまい、Canny フィルタの結果を超えることはできなかった [6]。すなわち、これらの局所的な平滑化処理では、ISEF フィルタの特徴である高精度なエッジ検出性能を十分に生かせないことが分かった。

#### 3.2 改良 ISEF フィルタの提案

そこで本論文では、より大局的な平滑化処理を実現するために、ISEF フィルタ自体の平滑化機能を反復して用いることを新たに提案する。

すなわち、入力画像に ISEF フィルタによる平滑化を前処理として施し、その後に ISEF フィルタによる

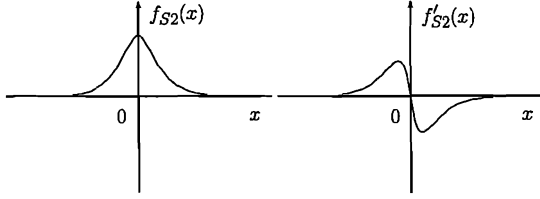


図 6 改良 ISEF フィルタ  $f_{S2}(x)$  とその 1 次導関数  $f'_{S2}(x)$

Fig. 6 Outlines of the modified ISEF  $f_{S2}(x)$  and its derivative  $f'_{S2}(x)$ .

エッジ検出を行う。入力信号を  $I(x)$ 、ISEF フィルタのフィルタ関数を  $f_S(x)$  とすると、

$$(I(x) * f_S(x)) * f_S(x) = I(x) * (f_S(x) * f_S(x)) \quad (6)$$

となるので、ISEF フィルタによる平滑化を前処理に用いたものは前処理を行わないでフィルタ関数を  $f_{S2}(x) \equiv f_S(x) * f_S(x)$  とした ISEF フィルタに一致することを意味している。

以下、このフィルタ関数  $f_{S2}(x)$  の意味と妥当性について検討しよう。まず、 $f_S(x)$  は式 (3) の ISEF フィルタの最適基準  $C_N$  から導かれるオイラー方程式

$$f_S''(x) - \lambda f_S(x) = 0 \quad (7)$$

を満たす [2]。  $f_S(x)$  の代わりに  $f_{S2}(x)$  を代入すると

$$\{f_{S2}(x)\}'' - \lambda f_{S2}(x) = \{f_S''(x) - \lambda f_S(x)\} * f_S(x) = 0 \quad (8)$$

となって、 $f_{S2}(x)$  も同じオイラー方程式を満たす。このことは  $f_{S2}(x)$  を ISEF のフィルタ関数として用いることの妥当性を示している。

そして、式 (4) より、 $f_{S2}(x)$  は次式

$$f_{S2}(x) = \frac{p^2}{4} \left( \frac{1}{p} + |x| \right) e^{-p|x|} \quad (9)$$

となる。以下では、 $f_{S2}(x)$  を改良 ISEF フィルタと呼ぶことにする。図 6 に改良 ISEF フィルタ  $f_{S2}(x)$  とその 1 次導関数の形状を示す。

### 3.3 改良 ISEF フィルタの性能比較

#### 3.3.1 雑音/信号比 (NSR)

式 (3) の評価関数  $C_N$  を用いて、各フィルタの雑音対信号比 (NSR) を評価しよう。改良 ISEF フィルタ  $f_{S2}(x)$  については、式 (9) より

$$C_N(f_{S2}) = \sqrt{4 \cdot \left( \frac{5}{4p^3} \right) \cdot \left( \frac{1}{4p} \right) / \frac{1}{p^2}} = \sqrt{5/2} \approx 1.118 \quad (10)$$

となる。一方、ISEF フィルタ  $f_S(x)$  については

$$C_N(f_S) = 1 \quad (11)$$

となり、Canny フィルタについては  $G(x)$  を用いて

$$C_N(G) = \sqrt{\pi/2} \approx 1.253 \quad (12)$$

と評価できる [2]。これらより、NSR に関して、改良 ISEF フィルタは ISEF フィルタよりも劣るが、Canny フィルタよりは良い性能を示すことが分かる。

#### 3.3.2 エッジ位置の検出精度

Shen ら [2] は、雑音がある場合のエッジ位置の誤差尺度として、次の  $L_e$  を用いた。

$$L_e = \lim_{\epsilon \rightarrow +0} \frac{\epsilon}{\int_{-\frac{\epsilon}{2}}^{\frac{\epsilon}{2}} |f''(x)| dx} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} |f''(x)| dx \quad (13)$$

ここで、 $f(x)$  はフィルタの平滑化機能を表す関数である。改良 ISEF フィルタ  $f_{S2}(x)$  については

$$L_e(f_{S2}) = (4/p^3) \cdot (p^2/e) = 4/pe \quad (14)$$

となる。一方、ISEF フィルタ  $f_S(x)$  については

$$L_e(f_S) = 0 \quad (15)$$

となり [2]、Canny フィルタについては  $G(x)$  を用いて

$$L_e(G) = (\sqrt{2\pi}\sigma^3) \cdot (4/\sqrt{2\pi e}\sigma^2) = 4\sigma/\sqrt{e} \quad (16)$$

と評価できる。これから、ISEF フィルタが最も良いことになる。また、改良 ISEF フィルタが Canny フィルタよりも良いためには、 $L_e(f_{S2}) < L_e(G)$  でなければならない。すなわち、

$$p > (1/\sqrt{e})\sigma^{-1} \approx 0.6065 \cdot \sigma^{-1} \quad (17)$$

である。これは平均的な意味においてであり、より良好な結果を得るには、 $p$  を更に 2 倍ほど大きくする必要がある。これは次のような考察から裏づけられる。

ステップエッジの検出では、雑音をもたらす零交差点位置の検出誤差は平滑化機能を与える関数の 1 次導関数が原点付近で大ききなこう配をもつほど小さいことが知られている (文献 [2] の図 4 参照)。したがって、図 2 と図 6 より、改良 ISEF フィルタは ISEF フィル

タよりもエッジ位置の検出精度が低下することになる。

Canny フィルタについては、平滑化機能を与える関数はガウス関数  $G(x)$  であり、その 2 次導関数は

$$G''(x) = (1/\sigma^4)(x^2 - \sigma^2)G(x) \quad (18)$$

となる。したがって、 $G'(x)$  の原点での傾き  $m_G$  は

$$m_G = |G''(0)| = 1/\sqrt{2\pi}\sigma^3 \quad (19)$$

となる。また、式 (18) より、 $x = \pm\sigma$  で  $G''(x) = 0$  となるので、 $G'(x)$  の最大点と最小点を結ぶ直線の傾きを平均の傾きと呼ぶことにすれば、 $G'(x)$  の奇関数性より、平均の傾き  $\overline{m_G}$  は次で与えられる。

$$\overline{m_G} = |G'(\sigma)|/\sigma = 1/\sqrt{2\pi}\sigma^3 \quad (20)$$

次に、改良 ISEF フィルタについては、平滑化機能を与える関数は  $f_{S2}(x)$  であり、式 (9) より、その 1 次導関数と 2 次導関数は  $x \geq 0$  について考えると

$$f'_{S2}(x) = -(p^3/4)xe^{-px} \quad (21)$$

$$f''_{S2}(x) = (p^3/4)(px - 1)e^{-px} \quad (22)$$

となる。したがって、 $f'_{S2}(x)$  の原点での傾き  $m_{S2}$  は

$$m_{S2} = |f''_{S2}(0)| = p^3/4 \quad (23)$$

となる。また、式 (22) より、 $f'_{S2}(x)$  の奇関数性から  $x = \pm p^{-1}$  で  $f''_{S2}(x) = 0$  となる。そこで、 $f'_{S2}(x)$  についてもその平均の傾き  $\overline{m_{S2}}$  は次で与えられる。

$$\overline{m_{S2}} = |f'_{S2}(p^{-1})|/p^{-1} = p^3/4e \quad (24)$$

したがって、改良 ISEF フィルタが Canny フィルタよりも効果的となる条件は、原点での傾きに対しては  $m_{S2} > m_G$  から

$$p > (8/\pi)^{1/6} \cdot \sigma^{-1} \approx 1.1686 \cdot \sigma^{-1} \quad (25)$$

となり、平均の傾きに対しては  $\overline{m_{S2}} > \overline{m_G}$  から

$$p > (8e/\pi)^{1/6} \cdot \sigma^{-1} \approx 1.3805 \cdot \sigma^{-1} \quad (26)$$

となる。よって、式 (25) と式 (26) より、指数  $p$  は先の式 (17) よりも 2 倍ほど大きくする必要がある。

### 3.4 改良 ISEF フィルタの評価実験

改良 ISEF フィルタの評価実験を行った。図 3 (d) はテスト画像 1 に対する適用結果である。実験に使用したパラメータは、指数  $p = 0.7$ 、窓サイズ  $W = 7$ 、しきい値  $T = 5$  である。図 3 (b), (c) と比較して、極め

て正確にエッジを検出していることが分かる。図 4 (d) はテスト画像 2 に対する適用結果である。図 3 (d) と変えたパラメータは、しきい値  $T = 10$  である。図 4 (b), (c) と比較して、これもかなり正確にエッジを検出していることが分かる。図 5 (d) はテスト画像 3 に対する適用結果である。図 3 (d) と変えたパラメータは、指数  $p = 0.9$ 、しきい値  $T = 15$  である。図 5 (b), (c) と比較して、良好にエッジを検出していることが分かる。

以上から、改良 ISEF フィルタはもとの ISEF フィルタの高いエッジ検出精度を維持したまま耐雑音性能を更に向上させていることが分かる。その結果、改良 ISEF フィルタは Canny フィルタを超えるエッジ検出性能を獲得できたといえる。その要因は、改良 ISEF フィルタの平滑化関数  $f_{S2}(x)$  がガウス関数  $G(x)$  と ISEF フィルタ  $f_S(x)$  の中間的形状となり (図 1, 図 2, 図 6), これによって両者の中間的な平滑化機能を実現できた点にあると考えられる。

### 4. むすび

ISEF フィルタの使用法を若干変更することで、その耐雑音性能をかなり改善でき、結果として、Canny フィルタを上回るエッジ検出性能が実現できたと考える。今後、提案する改良 ISEF フィルタは標準的なエッジ検出法として広く利用されることが期待されるが、そのためにはパラメータの変化に対して検出結果がどう変化するかについてより詳しい検討も必要である。

### 文 献

- [1] J. Canny, "A computational approach to edge detection," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.PAMI-8, no.6, pp.679-698, 1986.
- [2] J. Shen and S. Castan, "An optimal linear operator for step edge detection," Comput. Vision, Graphics & Image Process., Graphical Models and Image Process., vol.54, no.2, pp.112-133, 1992.
- [3] B.K.P. Horn, *Rovot Vision*, MIT Press, 1986.
- [4] 渡辺孝志, 畠山雅充, 木村彰男, "ハフ変換を用いた接続情報の抽出と欠損楕円の検出," 信学論 (D-II), vol.J82-D-II, no.12, pp.2221-2229, Dec. 1999.
- [5] 木村彰男, 渡辺孝志, "アフィン変換に不変な任意図形検出法として拡張された一般化ハフ変換," 信学論 (D-II), vol.J84-D-II, no.5, pp.789-798, May 2001.
- [6] 佐々木貴志, 最適フィルタに基づいた輪郭線抽出法に関する研究, 岩手大学大学院工学研究科修士論文, 2002.
- [7] H. Kälviäinen and P. Hirvonen, "Connective randomized Hough transform (CRHT)," Proc. 9th Scandinavian Conference on Image Analysis, pp.1029-1036, 1995.

(平成 15 年 7 月 9 日受付, 9 月 29 日再受付)