

Ridgelet-Hough 変換を用いた足跡画像符号化に関する考察 符号化方法の提案および従来法との特徴比較

長谷川 誠[†] 田中 一基[†] 石原 聖司[†] 徐 丙鉄[†] 金指 正和[†]
森脇 博史^{††}

[†] 近畿大学工学部 〒739-2116 東広島市高屋うめの辺 1 番
^{††} (株) 広島情報シンフォニー 〒732-0068 広島市東区牛田新町 2-2-7
E-mail: †hasegawa@hiro.kindai.ac.jp

あらまし 足跡画像を Ridgelet 変換し, Hough 変換によってパターン認識する方法を提案する. 足跡画像を Fourier 変換する従来の方法と比較して有効性を示す. Ridgelet ドメイン内の操作によって画像を柔軟に拡大縮小, 移動, 回転し, パターンマッチングすることが可能である. また, 多重解像度解析も実現できる. 一般 Hough 変換によって靴底の模様を検出することも可能である.

キーワード 科学犯罪捜査, 足跡画像, Ridgelet 変換, Hough 変換, パターンマッチング

Studies of the Shoeprint Coding Based on the Ridgelet-Hough Transform A Proposition of Coding and Comparisons with the Conventional Method

Makoto HASEGAWA[†], Kazumoto TANAKA[†], Seiji ISHIHARA[†], Byon-chol SO[†], Masakazu
KANEZASHI[†], and Hiroshi MORIWAKI^{††}

[†] School of Engineering, Kinki Univ. 1 Takayaumenobe, Higashihiroshima, 739-2116 Japan
^{††} Hiroshima Information Symphony Co., Ltd. 2-2-1, Ushitashinmachi, Higashi-ku, Hiroshima City 732-0068
Japan
E-mail: †hasegawa@hiro.kindai.ac.jp

Abstract A shoeprint coding based on the ridgelet transform is proposed. The method of pattern matching using the Hough transform in the coding is described in this paper. Some profits in our method are shown by comparison with the conventional method using the Fourier transform. Shoeprints can be scaled, shifted, and rotated by some operations in the Ridgelet domain. The multi-resolution analysis is also applicable to our method. We can detect some patterns in shoeprints by the generalized Hough transform.

Key words Forensic science, shoeprint, ridgelet transform, Hough transform, pattern matching

1. はじめに

足跡画像による個人認証は犯罪捜査の有効な手段となっている. 被疑者が犯罪を否認した場合でも, 犯罪現場から採取した足跡を鑑定し, 特徴が合致すれば同人の犯行を認定できる場合がある [1]. 科学捜査による鑑定件数は増加する一方であり, 膨大な捜査資料を都道府県警察に勤務する限られた技術職員が処理している. 鑑定には精密性, 迅速性が要請されることはいままでもなく, コンピュータを用いた高速な情報処理が必要である. これまでの足跡鑑定では, 靴底の模様を円, 矩形, 波型, 山

型, 直線, その他のパターンによって分類し, キーワードを付与して足跡画像データベースを構築している. また, データベースに登録されている画像と遺留画像とを手作業で照合している. 近年, コンピュータシステムが導入されてキーワード検索が自動化されたが, 足跡画像の分類は手作業である [2]. P.Chazalらは足跡画像を Fourier 変換し, パターンマッチングによって検索するシステムを提案している [3]. また, A. Alexander は, フラクタル符号化を用いる方法を提案している [4]. 文献 [3] で述べられているように, 足跡は劣悪な環境で遺留するために欠損や雑音が多い. 現在は, 理想的な画像を用いたシミュレ-

ジョン段階であり、実用化に至っていない。

ここでは、足跡画像を Ridgelet 変換して保存し、Hough 変換によってパターン認識する方法を提案する。Ridgelet 変換は Candès によって提案された信号処理技術であり、信号を Radon 変換した後に Wavelet 変換して得られる [5]。輝度値を線積分する Radon 変換の性質により、直線上のエッジを効果的に表現することが可能である。また、雑音を効果的に除去できる [6]。長谷川らは、画像から被写体を抽出した後に Ridgelet 変換することによって物体を容易に回転できることを示した。これは、Radon 変換が極座標で表現されていることを利用している [7], [8]。Ridgelet 変換は変換ドメイン内の操作によって、画像の拡大縮小、移動、回転が可能である。ところで、Radon ドメインは Hough 変換のパラメータ空間と等しいことが知られている [9]。そこで、Ridgelet 変換された足跡画像を段階的に解像度を上げながら Radon ドメインを再生し、Hough 変換によってパターンマッチングする。ところで、Radon 変換は変換ドメイン内の操作によって輝度値を任意の方向に微分することが可能であり [10]、一般化 Hough 変換へ応用することも考えられる。次の 2. では、足跡画像を Ridgelet 変換する方法を示し、3. では Hough 変換によってパターンマッチングする方法を示す。また、一般 Hough 変換へ応用する方法を 4. で提案する。5. で従来の Fourier 変換する方法と比較し、本方法の特徴をまとめる。

2. 足跡画像の Ridgelet 変換

足跡画像は図 1 のように与えられる。図 1(a) は犯罪現場に遺留された足跡画像とし、(b) は該当している靴の靴底写真とする。図 1(a) は雑音や欠損が多く、複数の足跡が重なっている。靴底素材の色による濃淡は図 1(a) には見られず、靴底の突起物が白く表示されている。すなわち、2つの濃淡画像における輝度値の相関は小さい。そこで、輝度値を直接マッチングするのではなく、微分フィルタによって輪郭線を抽出した画像を用いる。ここでは、微分フィルタとして Sobel フィルタ適用し、その後輝度値を 2 値化する。図 2 は輪郭線画像の例である。

図 2 の画像を Ridgelet 変換する。まず、画像が与えられている 2 次元領域 R^2 の座標を位置ベクトル \mathbf{x} で表し、輝度値を $f(\mathbf{x})$ とする。なお、前処理直後の輝度値 $f(\mathbf{x})$ は 0 または 1 となる。 $f(\mathbf{x})$ の Ridgelet 変換 D は、

$$Df = \hat{f}(a, b, \theta) = \int_{R^2} \psi_{a,b,\theta}(\mathbf{x}) f(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (1)$$

と定義される。なお、 $\psi_{a,b,\theta}(\mathbf{x})$ は Wavelet 変換関数 $\psi(\mathbf{x})$ を

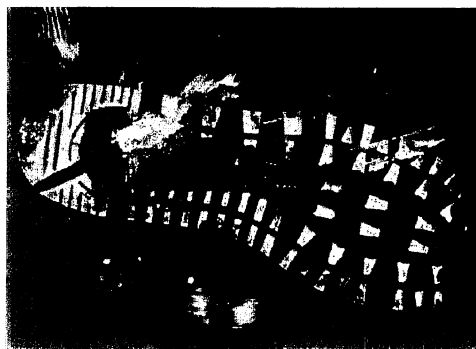
$$\psi_{a,b,\theta}(\mathbf{x}) = a^{-1/2} \psi((\mathbf{x} \cdot \boldsymbol{\xi} - b)/a) \quad (2)$$

と拡大縮小 a 、平行移動 b 、回転 θ したものである (図 3)。また、 $\boldsymbol{\xi} = (\cos \theta, \sin \theta)$ とする。Ridgelet 変換 D は、Radon 変換

$$Rf = \tilde{f}(\theta, t) = \int_{R^2} f(\mathbf{x}) \delta(\mathbf{x} \cdot \boldsymbol{\xi} - t) d\mathbf{x} \quad (3)$$

を用いて、

$$Df = WRf = \int_{\mathcal{H}} \psi_{a,b,\theta}(t) \tilde{f}(\theta, t) dt \quad (4)$$



(a)



(b)

図 1 足跡画像の例 遺留画像 (a)、靴底の写真 (b)

Fig. 1 Examples of shoeprints. (a) a shoeprint in crime scenes, (b) a picture of a sole.

と書き換えることができる。すなわち、Ridgelet 変換は濃淡画像を Radon 変換した後に Wavelet 変換することと等しい。

図 2 を Ridgelet 変換した結果を図 4 に示す。なお、ここでは Wavelet 変換で 4 つのサブバンドに分解する。また、基底関数として Haar 基底を用いている。Radon ドメインは Ridgelet ドメインを逆 Wavelet 変換して再生される (図 5)。Ridgelet ドメインにおけるサブバンドの一部を用いて、Radon ドメインを再生した結果を図 6 に示す。

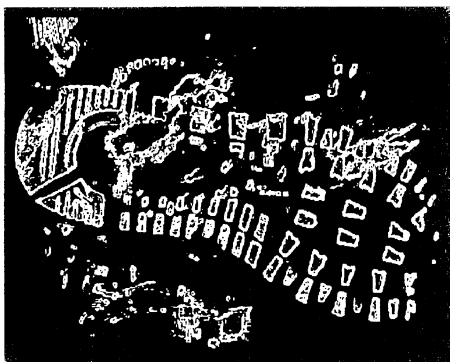
図 5 の Radon ドメインを縦方向に拡大縮小すると、図 2 の原画像が縦横方向に拡大縮小される。また、

$$Rf(\mathbf{x} - \mathbf{a}) = \int_{R^2} f(\mathbf{x}) \delta(\mathbf{x} \cdot \boldsymbol{\xi} - \mathbf{a} \cdot \boldsymbol{\xi} - t) d\mathbf{x} \quad (5)$$

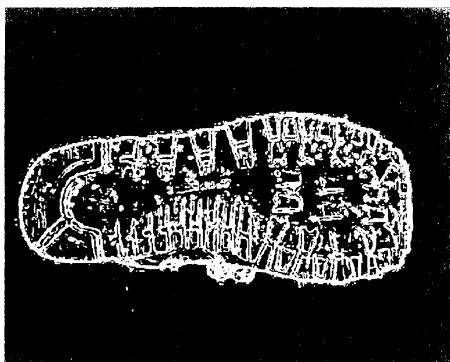
であるため、Radon ドメインを偏角 θ (または $\boldsymbol{\xi}$) に応じて上下すると、図 2 がベクトル \mathbf{a} 方向へ並行移動する。Ridgelet ドメインを左右にシフトすることによって図 7 に示すように図 2 を回転することが可能である。なお、ドメインを左にシフトする場合、左側に突出したドメインが右側にくるが、この場合、この部分を上下反転させなくてはならないことに注意しよう。詳細は文献 [8] を参照されたい。

3. Ridgelet ドメインによる Hough 変換

Radon ドメインと Hough 変換パラメータ空間は等しいこと



(a)



(b)

図 2 前処理後の画像例 遺留画像 (a), 靴底画像 (b)

Fig. 2 Examples of shoeprints after pre-processing. (a) a shoeprint in crime scenes, (b) a image of a sole.

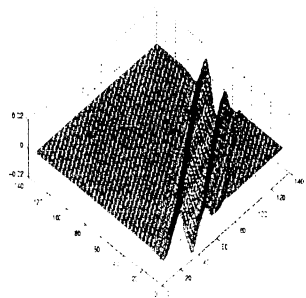
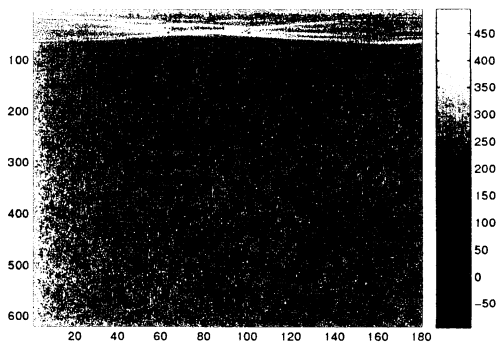


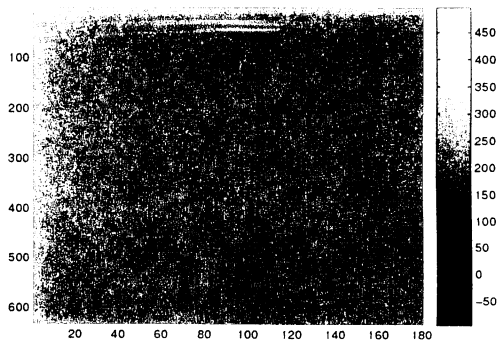
図 3 Ridgelet 基底関数 $\psi_{a,b,\theta}(\mathbf{x})$ の例

Fig. 3 An example of ridgelet $\psi_{a,b,\theta}(\mathbf{x})$.

が知られている。すなわち、Radon ドメインを用いて直線成分を検出することが可能である。図 8 は直線成分を検出した例である。絶対値の大きな Radon 変換係数を抽出し、逆 Radon 変換して直線成分を検出する。靴の踵における直線状の溝が検出



(a)



(b)

図 4 Ridgelet ドメインの例 遺留画像 (a), 靴底画像 (b)

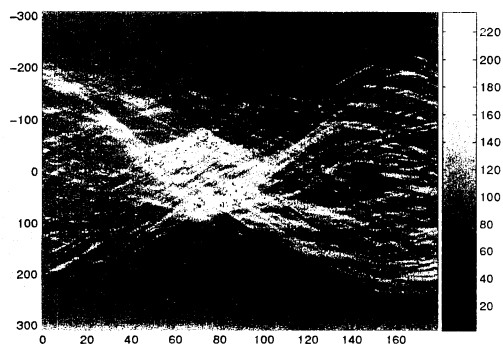
Fig. 4 Examples of the ridgelet domains. (a) a shoeprint in crime scenes, (b) a image of a sole.

されている。検出された直線をマッチングすることによって靴を同定することが考えられる。なお、直線上にのらない雑音を検出されている。直線成分のみを抽出することによって雑音を除去することが可能である。

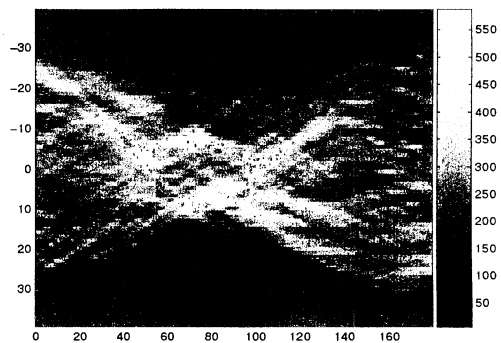
ところで、R.Krishnapuram らは、直線の検出のみならず、Hough パラメータ空間をテンプレートとして相互相関を求め、任意形状の物体を認識する方法を提案している [11]。そこで、ここでは Ridgelet ドメインから解像度ごとに段階的に再生された Radon ドメインを用い、その相関を算出してパターンマッチングする。2つの画像の Radon ドメインをそれぞれ、 $\hat{f}_1(\theta, t)$ 、 $\hat{f}_2(\theta, t)$ とし、拡大縮小、移動、回転させた結果を、それぞれ $f_1(\theta, t)$ 、 $f_2(\theta, t)$ とし、相関係数 R を

$$\begin{aligned} \hat{f}_1(\theta, t) &= [f_1(\theta, t) - \text{mean}(f_1)] / \text{std}(f_1) \\ \hat{f}_2(\theta, t) &= [f_2(\theta, t) - \text{mean}(f_2)] / \text{std}(f_1) \\ R &= \frac{1}{p} \sum \sum \hat{f}_1(\theta, t) \hat{f}_2(\theta, t) \end{aligned} \quad (6)$$

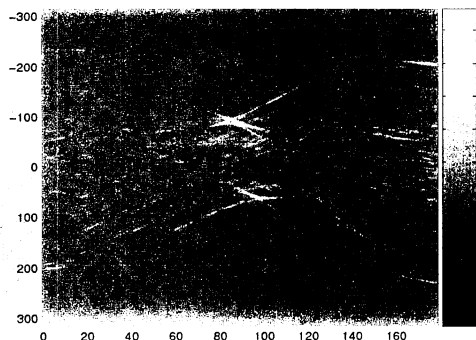
とする。なお、ここでの $\text{mean}()$ は平均、 $\text{std}()$ は標準偏差とする。また、 p はドメイン内における係数の個数である。低解像度では Radon ドメインを保持する際のメモリ量は少なく、マッ



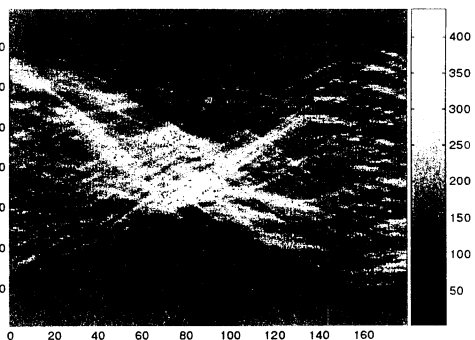
(a)



(a)



(b)



(b)

図 5 Radon ドメインの例 遺留画像 (a), 靴底画像 (b)

Fig. 5 Examples of radon domains. (a) a shoeprint in crime scenes, (b) a image of a sole.

チングに要する時間も小さい。低解像度の段階で靴の候補を絞り込むことが可能である。また、候補となる靴底画像の論理和画像を作成し、その画像と遺留画像との論理積画像を抽出することによって、遺留画像における雑音や不必要なパターンの除去が可能である。雑音除去された画像を再度 Ridgelet 変換し、高解像度におけるマッチングへと処理を進める。

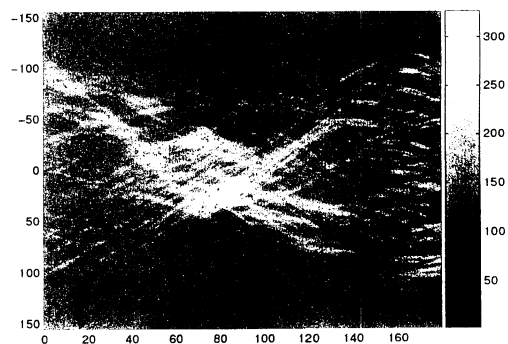
ここでは、Radon ドメインをマッチングしたが、直接 Ridgelet ドメインをマッチングすることも考えられる。Ridgelet ドメインの縦方向の拡大縮小で画像のサイズを変更することができる。また、Ridgelet ドメインを左右にシフトすることによって画像を回転させることも可能である。なお、移動については Wavelet 変換の係数が比較的複雑に変動するために難しい。考察を深めて報告する予定である。

4. 一般 Hough 変換への応用

Radon 変換は次式によって、ドメイン内の操作で原画像の輝度値を任意の方向に微分することが可能である。

$$R \frac{\partial f}{\partial x} = \xi \frac{\hat{f}(p, \xi)}{\partial p} \quad (7)$$

輪郭線の法線方向を検出し、一般化 Hough 変換へ応用するこ

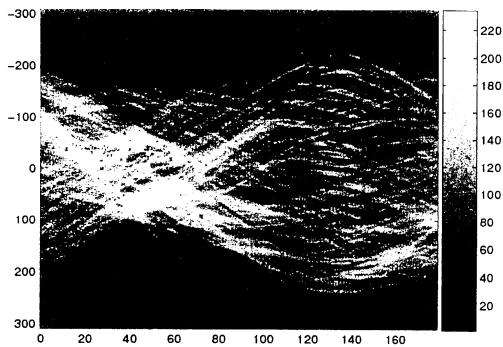


(c)

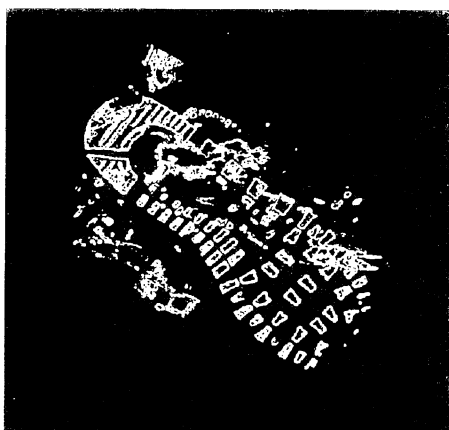
図 6 各解像度における Radon ドメインの例 バイアス成分のみ (a), 第 2 サブバンドを含む (b), 第 3 サブバンドを含む (c)

Fig. 6 Examples of radon domains in each resolution. (a) a bias component, (b) the second sub-band inclusion, (c) the third sub-band inclusion.

とが可能となる。足跡画像の輪郭線を示す各点について、その位置と法線方向を R テーブルに配列し、一般化 Hough 変換する。一般化 Hough 変換によって、より柔軟に任意の形状を検出することが可能となる。先に述べたが、これまでの足跡鑑定は、靴底の模様を円、矩形、波型、山型、直線、その他のテン



(a)



(b)

図7 Radon ドメイン内での操作による回転 ドメインの左シフト (a), 時計回りの回転 (b)

Fig. 7 An Example of rotation by a operation in the radon domain. (a) shifting left in the domain, (b) the result of the rotation.

プレートによって分類し、キーワードを付与して照合している。この分類は手作業で行っているが、一般化 Hough 変換による自動化が期待できる。画像全体を同定する処理に加え、模様によるキーワード検索も可能である。従来の足跡画像データベースを継続して利用することが可能であり、また、捜査上の経験を有効利用できる利点は大きい。

5. Fourier 変換を用いる方法との比較

Fourier 変換を用いる従来の方法は、靴底写真および遺留された足跡画像を Fourier 変換し、バンドパスフィルタを適用してテンプレートマッチングしている。図9に足跡画像を Fourier 変換した結果を示す。先に、靴底素材の色による濃淡と遺留画像の濃淡とは相関が小さいことを述べたが、濃淡画像を直接 Fourier 変換しても相関は小さく効果的ではない。

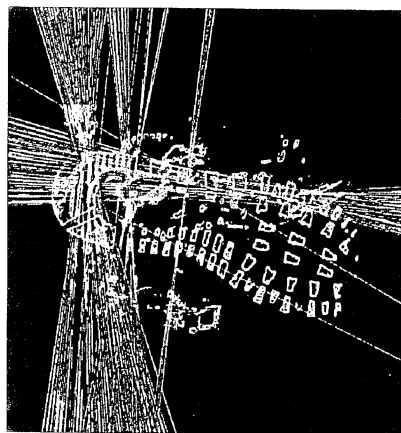
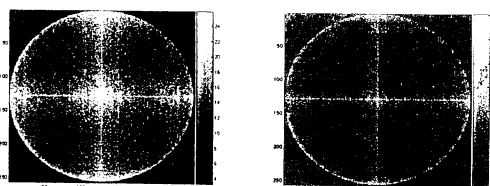


図8 Hough 変換による直線検出

Fig. 8 Results of line detection using the Hough transform.



(a)

(b)

図9 Fourier 変換の結果遺留画像 (a), 靴底画像 (b)

Fig. 9 Results of the Fourier Transform. (a) a shoeprint in crime scenes, (b) a image of a sole.

ところで、Fourier 変換する方法では、拡大縮小は前処理で実施し、移動については変換係数のエネルギーを用いることによって移動量を不変としている。また、回転については変換ドメインを回転する。すなわち、補正のタイミングが一致せず柔軟な位置合わせは難しい。一方、本方法では Ridgelet ドメイン内で各種補正を順不同に実施することが可能である。

Fourier 変換する方法は周波数成分が検出されるものの、具体的な形状をとらえることはできない。画像全体を対象に同定することは可能であるが、画像の部分的なマッチングはできない。本方法では画像全体を同定する処理に加え、一般化 Hough 変換による靴底模様のテンプレートマッチングが可能である。

Fourier 変換する方法は、ハイパスフィルタによる白色雑音の除去が可能である。本方法では雑音除去に加えて不必要なパターンを除去することが可能である。

6. まとめ

足跡画像を Ridgelet 変換し、Hough 変換を導入してパターン認識する方法を提案した。この方法には次の利点がある。

(1) Radon ドメイン内の操作によって画像を拡大縮小、移

動、回転することが可能である。足跡画像を Fourier 変換する方法では、拡大縮小は前処理で行い、移動については変換係数のエネルギーを用いることによって移動量を不変としている。回転については変換ドメインで実施している。補正のタイミングが一致せず、柔軟な位置合わせが難しい。従って、本方法は Fourier 変換する方法よりも柔軟な位置合わせが可能である。

(2) Ridgelet ドメインから各解像度ごとに Radon ドメインを再生し、Hough 変換することによって段階的なテンプレートマッチングが可能である。雑音や不必要なパターンを削除することもできる。

(3) Radon 変換は輝度値を任意の方向に微分することが容易であり、一般化 Hough 変換へ応用することができる。具体的な形状を抽出することが可能となり、画像全体を同定する処理の他、靴底の模様で分類してキーワード検索する従来の手法も採用できる。

(4) Fourier 変換する方法は濃淡画像を直接変換するが、靴底写真の濃淡と遺留画像の濃淡との相関は小さい。本方法では濃淡画像の輪郭線を抽出してマッチングする。

ところで、近年、Radon 変換に関連した信号処理技術が活発に研究されている。特に、Kadyrov と Maria とが検討している。Trace 変換は興味深い [12]。Trace 変換は Radon 変換を含む広い概念の変換であり、この方法を用いてデータベースを構築する方法が検討されている。また、Radon 変換を用いたテキスト解析が勢力的に考察されている [13]。平井と坪井らによる Radon 変換を用いたビジョンアルゴリズムの研究は多くの成果を生んでいる [14]。渡部と田中とは、Radon 変換と位相限定相関とを組み合わせる静脈認証する方法を検討している [15]。本方法を含め、Radon 変換の利点が多く報告されている。

今後、Ridgelet ドメインをマッチングする方法や、一般化 Hough 変換を応用する方法をより詳しく示していく予定である。また、本方法を用いて実用的なデータベースシステムを開発する。足跡認識の全自動化にはこだわらず、相関の高い順位にデータベース内の足跡画像を並び替え、鑑定作業を支援するしくみを構築する。

文 献

- [1] “昭和 51 年警察白書,” 警察庁, 1976.
- [2] “足跡検索照合システム画面サンプル,” 広島情報シンフォニー, 2005.
- [3] P.Chazal, J.Flynn, and B.Reilly, “Automated Processing of Images Based on the Fourier Transform for Use in Forensic Science,” *IEEE Trans.*, Vol. PAMI-27, 3, pp.341-350 (Mar. 2005).
- [4] A.Alexander, A.Bouridane, and D.Crookes, “Automatic Classification and Recognition of Shoeprints,” *Proc. Seventh Int'l Conf. Image Processing and Its Applications*, 2, pp. 638-641 (Feb. 1999).
- [5] E.J.Candès, “Ridgelets: Theory and application,” Ph.D. dissertation, Dept. Statistics, Stanford Univ., Stanford, CA (1998).
- [6] Minh N. Do and M. Vetterli, “The Finite Ridgelet Transform for Image Representation,” *IEEE Trans. Image Processing*, 12, pp.16-28 (Jan. 2003).
- [7] M. Hasegawa and S. Tajima, “A Ridgelet Representation of Semantic Object Using Watershed Segmentation,” in *Proc. of IEEE ISIT 2004, Sapporo, Japan*, (Oct. 2004).
- [8] 長谷川誠, 田島慎一, “Watershed 分割による Semantic Object の Ridgelet 表現,” *映像メ誌*, 59, 5, pp.786-790 (May 2005).
- [9] 松山隆司, 興水大和, “Hough 変換とパターンマッチング,” *情報処理*, 30, 9, pp.1035-1046 (Sep. 1989).
- [10] S.R.Deans, *The Radon Transform and Some of Its Applications*, John Wiley and Sons (1983).
- [11] R.Krishnapuram and D.Casasent, “Hough Space Transformations for Discrimination and Distortion Estimation,” *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 38, pp.299-316 (1987).
- [12] Alexander Kadyrov and Maria Petrou, “The Trace Transform and Its Applications,” *IEEE Trans. PAMI*, 23, 8, pp.811-828 (Aug. 2001).
- [13] K. Jafari-Khouzani and H.Soitanian-Zadeh, “Rotation-Invariant Multiresolution Texture Analysis Using Radon and Watershed Transforms,” *IEEE Trans. Image Processing*, 14, 6, pp.783-795 (June 2005).
- [14] 平井慎一, 坪井辰彦, 増渕章洋, 座光寺正和, “ラドン変換に基づくビジョンアルゴリズムの並列化と FPGA への実装,” *信学技報*, DSP2001-114, 101, 384, pp.31-38 (2001).
- [15] 渡部伸一郎, 田中敏幸, “バイオメトリックス認証のための回転を考慮した位相限定相関法,” 第 22 回センシングフォーラム, 計測自動制御学会 (2005).