

H o u g h 変換に関する 最近の研究動向

興 水 大 和
中 京 大 学 教 養 部

画像処理やビジョン処理において、H o u g h 変換は直線や円等の特徴抽出によく用いられる。本稿では、1962年に始まるH o u g h 変換の最近の研究動向をサーベイする。このH o u g h 変換研究の動機の多くは、直線検出の場合も一般化Hough変換の場合も、計算効率化、つまり、計算時間コストとメモリコストの削減にある。またHough変換研究のもう一つのテーマは、パラメータ空間上における特徴抽出法の開発にある。これらの観点から、まず詳しく調べた。

また、Hough変換の専用ハードウェア化の試み、種々の応用事例研究など、多くの取り組みが成されている。これらについても調査した。今後、個々の効率化手法を、広く一般化Hough変換に組み込むこと、変換平面上でより多くの特徴抽出手法を開発すること、などが重要となろう。

ON THE CURRENT TRENDS OF HOUGH TRANSFORM IN PATTERN PROCESSING

Hiroyasu KOSHIMIZU

Faculty of Liberal Arts, Chukyo University
101 Tokodate, Kaizu-cho, Toyota, 470-03 Japan

Hough transform is one of the useful methods in image processing. The current trends of the Hough transform are surveyed from the following viewpoints :

- a. generalization and extension of Hough transform,
- b. reduction methodologies of time and memory costs,
- c. feature extraction methods in Hough space,
- d. hardware implementations,
- e. applications, and
- f. the others.

Over typical 50 papers are refered in this survey article.

1. サーベイの諸観点

クラスタ化されていない候補点列からでも直線群(一般に、パターン群)を抽出できることが、Hough変換の有効性の根拠である。ところが、検出精度を保つためには、パラメータ空間用のメモリコスト、処理時間コストが共に膨大となる。これが、Hough変換実用上の大きな障害となっていた。円や楕円といったパターンの検出を想定した一般化Hough変換 (generalized Hough transform) では、図形のパラメータ数の増大量に比例して、この状況が増幅される。類似した問題は、パターンの表現空間の次元数を増やしたHough変換 (このケースを、一般化Hough変換と区別して、ここでは、多次元化Hough変換 (extended Hough transform)と呼ぶことにする。) においても発生する。

Hough変換に関する研究のテーマの多くは、このような計算コストを抑えるための効率化アルゴリズム開発に注がれてきた。どのような効率化の工夫が行われてきているかを、先ず見ておかなければならない。

Hough変換 (によるパターン抽出) のプロセスは、 $x-y$ 平面からパラメータ平面への変換サブプロセスと、パラメータ平面における特徴抽出サブプロセスとから成り立っている。特徴抽出という見方をすると、直線パターン抽出における度数ピーク探索は、最もプリミティブなパターン特徴抽出である、と考えることが出来る。

このように考えると、Hough変換の特徴抽出サブプロセスにおいては、変換平面中の度数ピークを見つけ出すという最も単純な特徴抽出を含む様な、広範多岐な特徴抽出法が開発されると、Hough変換の機能面の厚みが増す。このような観点から、どのような工夫が行われているかを見ておこう。

Hough変換の応用例についても見ておこう。しかし今回は、特に応用例については、十分な文献に当たっていない。また、通常のHough変換利用の場合は、実際には使用していても、論文の表題中陽に現れていないことが多いので、実際にどの程度利用されて入るかを掴むのは、なかなか難しいであろう。

専用ボード化が、Hough変換においても幾つか試みられている。その数は余り多くはないが、このようなハードウェア化の試みについても拾っておく。

Hough変換は、形式的にみると、図形の表現形式を $x-y$ 座標系から $\theta-\rho$ 座標系に置き換えるものである。したがって、 $x-y$ 座標系の分解能と $\theta-\rho$ 座標系の分解能の関係や、 $x-y$ 座標系におけるノイズの影響など、検討すべき問題も幾つか存在する。最後に、このような観点からの研究についても見ておく。

画像処理・図形処理の一手法であるHough変換に関する論文が最近、多数出されて、「静かなブーム」となっている。一つの理由は、パソコンを用いた簡易型画像処理が普及して、この処理手法の高速度性、省メモリ性追求に実用的意味が大きくなったことである。もう一つの理由は、検査自動化など画像処理・ビジョン応用システム開発において、局所処理主導のローレベル特徴抽出部分のツール

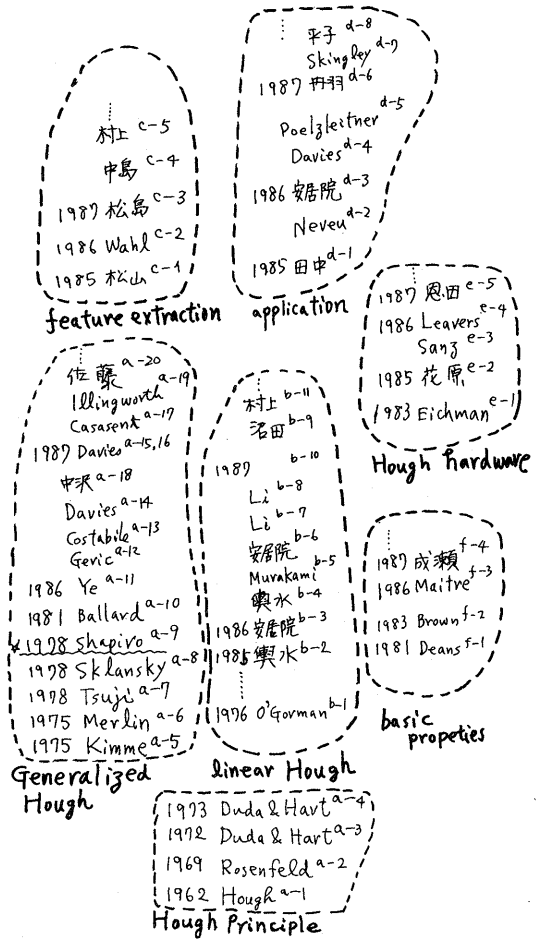


図0 Hough変換研究の動向

不足や限界をカバーするマクロ的手法の代表として、Hough変換が改めて注目されている、と考えられる。図0に、以降の各章で詳説する代表的なトピックスとともに、このような動向を、まず図解しておく。

2. Hough変換の原理と拡張

2.1 Hough変換の歴史

Hough(1962)^{a-1} は、傾き a -切片 b パラメータ表現された式 (1) の直線を、そのパラメータ a , b で張られる空間上で抽出する基本方式を提案した。図1に、この原理を示す。これによりHoughは、泡箱の粒子飛跡パターンから直線抽出を行った。

その後、Rosenfeld(1969)^{a-2} が著書の中で、このパラメータ平面を2次元配列に対応させ、画像中の直線要素を抽出する具体的な方法を示した。これ以来、画像から直線要素を抽出するこの手法が、「Hough変換(Hough transform)」と呼ばれて、画像処理基本手法の一つとして定着した。

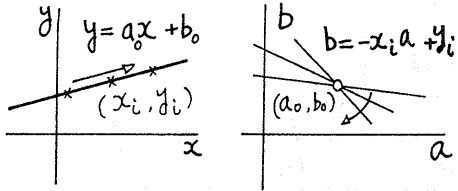


図1 傾き-切片(a-b)パラメータのHough変換

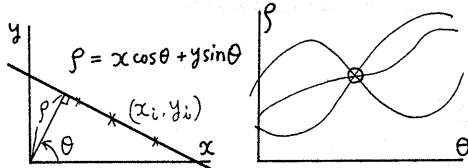


図2 垂角-距離(theta-rho)パラメータのHough変換

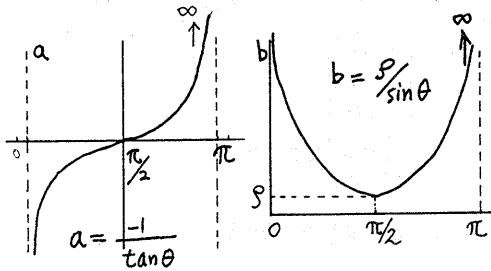


図3 (a-b)パラメータと(theta-rho)パラメータの関係

$$y = ax + b \quad (1)$$

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (2)$$

$$y = -x / \tan \theta + \rho / \sin \theta \quad (3)$$

x-y座標系の直線は、式(2)のような極座標表現、または正規表現することができる。式(2)のような三角関数の合成関数を、Hough曲線(Hough curve)と呼んでおく。すなわち図2に示すように、垂角theta-距離rhoパラメータ表現できる。両式の関係は、式(2)が(3)に変形されるので、 $a = -1/\tan \theta$ 、 $b = \rho/\sin \theta$ の意味で、数学的には同等である。ところが図3に示すように、有限の大きさの画像空間上の直線でも、その垂角 $\theta \rightarrow 0$ となると、切片 $b \rightarrow \pm \infty$ となる。また、垂角 $\theta \rightarrow \pi/2$ となると、傾き $a \rightarrow \pm \infty$ となる。よってa-b表現法では、パラメータ空間を2次元配列に対応させるHough変換では、a軸、b軸方向の配列の分割数を際限なく増加させなければならず、メモリ効率からみて禁止的なパラメータ表現法である。Duda & Hart (1972)^{a-3}は、このことについて指摘し、その後Hough変換と言えば、このtheta-rho表現を用いるようになっている。

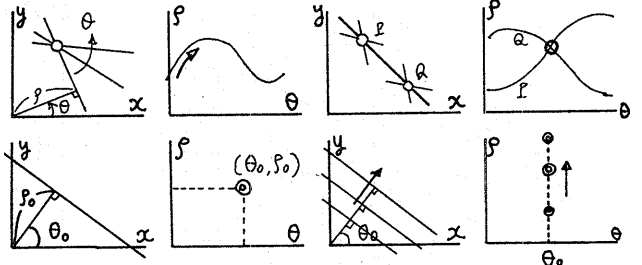


図4 Hough変換の基本的性質

2.2 Hough変換の原理と適用範囲の拡張

(1) Hough変換の原理

以上のような経過を経て、直線(群)検出のHough変換(linear Hough transform)の原理は、次のようにまとめられる。Duda&Hart(1973)^{a-4} 所で用いられる基本的性質を、図4とともに、要約しておく。

性質1: (x,y)を通過する全ての直線群は、パラメータ平面上の一本のHough曲線で表される。

性質2: パラメータ平面上の一点は、直線一本に対応する。

性質3: 共線上の任意の二点Hough曲線は、パラメータ平面上でただ一回だけ交差する。

性質4: 互いに平行な直線群は、パラメータ平面上のtheta軸に直行するスリット上に存在する。原点を中心とする円の接線群は、これと直交するスリット上に存在する。

パラメータ平面(空間)上のN個の候補点列 $(x_i, y_i); i=1, 2, \dots, N$ に対して、式(4)によりthetaの関数rhoを定め、図5のように、用意した2次元配列(大きさKxL)にその軌跡を累積する。N個のデータ全てにこの操作を適用した後、この累積分布の中から度数の極大点群を抽出する。この極大点群 $(\theta_i, \rho_i); i=1, 2, \dots, p$ が、x-y平面上の直線群となる。

$$\rho = x_i \cos \theta + y_i \sin \theta \quad (4)$$

(2) 一般化Hough変換(generalized Hough transform)

x-y平面上的基本パターンとして、式(5)のような円や楕円を考えると、それらは各々3次元、5(4+方向)次元パラメータ空間の要素点として表現される。このような場合のHough変換、一般化Hough変換(generalized Hough transform; GHT)は、Duda & Hart(1972)^{a-3}の中で初めて言及された。その後、Kimme(1975)^{a-5}以降多数の試みが発表されてきたが、これらの研究の主目的は、多次元パラメータ空間のメモリコスト低減と計算時間コスト低減に置かれている。用語としてGHTを用いたのは、Shapiro(1978)^{a-9}と思われる。

$$\begin{aligned} (x-a)^2 + (y-b)^2 &= r^2 \\ (x-x_0)^2/a^2 + (y-y_0)^2/b^2 &= 1 \end{aligned} \quad (5)$$

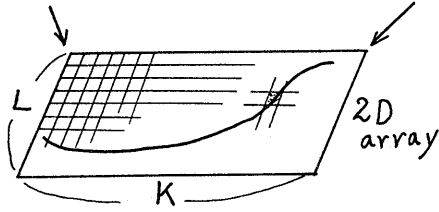
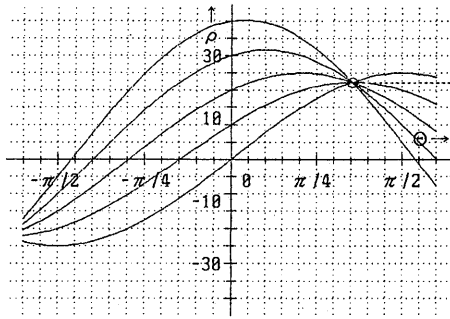


図5 Hough変換による直線群検出の原理

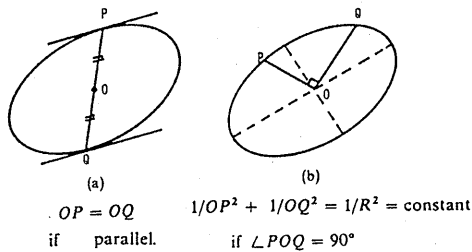


図6 楕円の性質と一般化Hough変換の高速化

Tsuji(1978)^{a-7}(ここでは、modified Hough trans.と呼んでいる)では、楕円ハッチング検出を扱ったが、2次元(原点对称点対の接線は互いに平行)と1次元(原点に対する挟角90度を成す周点対は、一定の関係を保存する)の二つのパラメータ平面を順次適用する多段的クラスリングにより、効率化を達成している。この試みでは、図6に示すような楕円の形状的特徴を利用している。

Ballard(1981)^{a-10}は、直線(2次元)、円(3)、放物線(4)、楕円(5)ハッチングなど解析的曲線のHough変換を総合的に論じた。更に、任意形状曲線の場合のHough変換についても述べている。ここでは、画像中のハッチング点の持つ gradient情報を用い、図7に示すような円の場合では、3次元パラメータ空間内の円錐状のHough曲面がHough直線に縮退させることができることを利用して、計算コストを抑えている。

1986年頃になって、CVPRやICPRなどの国際会議(a-11, ..., a-14)、Pattern Recog.誌(a-15, ..., a-17)において多数の論文が発表された。各々の詳細は省略するが、全体からみてもこのGHTに関する研究が最も多く、現在も同様である。

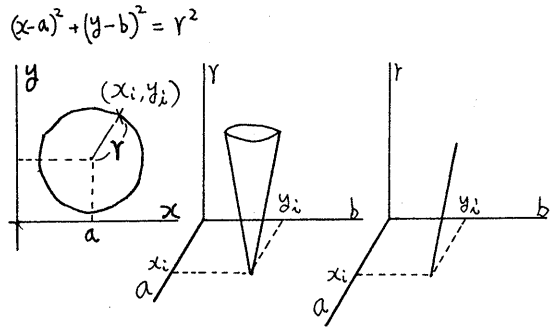


図7 円の性質と一般化Hough変換の高速化

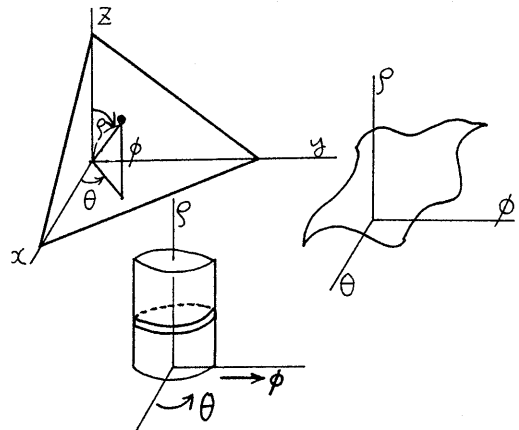


図8 多次元化Hough変換の適用と高速化

(3) 多次元化Hough変換(extended Hough transform)

一般化Hough変換と類似しているが、パターン空間の次元数の多くなった場合のHough変換の試みも存在する。このようなHough変換を、GHTと区別して、多次元化Hough変換(extended Hough transform; EHT)と呼んでおく。

$$x \cos \theta \sin \phi + y \sin \theta \sin \phi + z \cos \phi = \rho \quad (6)$$

図8(a)(b)に示すx-y-z空間上の平面は、 (θ, ϕ, ρ) 極座標表現すると、式(6)で表される。中沢(1986)^{a-18}は、ファク「グレンジング」と呼ばれる特殊なレンジデータに対して、この (θ, ϕ, ρ) パラメータ空間を同図(c)に示すように設け、Hough変換を適用し平面検出を試みた。計算効率化は、計測データ点近傍の面の傾きに注目して、 θ, ϕ の範囲を限定することにより実現している。

EHTの試みは、この例以外に見つけていないが、レンジデータが使われるビジョンシステムなどでは、今後扱われる機会が増えるであろう。

3. 直線検出Hough変換の効率化アルゴリズム

一般化Hough(GHT)、多次元化Hough(EHT)と同様に、直線検出のHough変換(Linear Hough transform; LHTと呼んでおく)においても、効率化アルゴリズム開発の試みが行われている。高速化とメモリコスト削減の方法を見つけ出すことが、ここでの目的である。

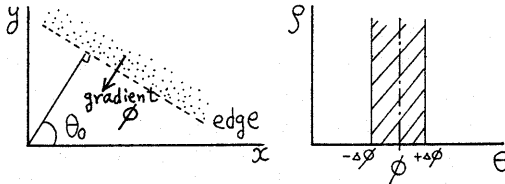


図9 エッジのgradient方向φを用いた高速Hough変換

0'Gorman(1976)^{b-1} による高速化の手法は、次のような原理にもとずいて、計算回数を減らすものである。原点からエッジ直線に下ろした垂線の角度θは、画像中のエッジ直線点のもつgradient vectorの方向φの近傍に、図9のように入る。0'Gormanは、式(7)のΔφ=5度程度に抑えた高速化の結果を示した。

$$\phi + \Delta\phi < \theta < \phi - \Delta\phi \quad (7)$$

これと同じ考え方をを用いた沼田(1987)^{b-9} は、エッジ検出にSobelオペレータを用い、その場合のエッジ方向モデルを導入することで、式(7)のΔφ=1~2度程度に削減できることを示した。

このようにして変換パラメータ平面を制限すると、一般に、高速化と同時に、メモリ削減の効果ももたらされる。安居院(1986)^{b-3} は、画像中にはば水平な平行線群が存在する特殊な場合に、ρ軸に平行なパラメータ領域のみの計算で済ませる方法を工夫した。

興水(1985)^{b-2} は、この問題を一般的に扱い、図10に示すように、度数計算プロセスとピーク抽出プロセスの実行順序を変更する事により、パラメータ平面用配列を1次元化した(1D配列×1個)。興水(1986)^{b-4}、Murakami(1986)^{b-5} は、それを直線群検出用に拡張したアルゴリズム(1D配列×3個)、さらに村上(1987)^{b-11} は、これのピーク探索を2次元化したアルゴリズム(1D配列×5個)を提案した。

パラメータ平面の分割数を階層的に変化させることにより、図11のように、高速化Hough変換を実現した試みがある。例えば、安居院(1986)^{b-6}、Li(1986)^{b-7, b-8} が、この方法によって、計算回数を減らした高速化手法を示した。

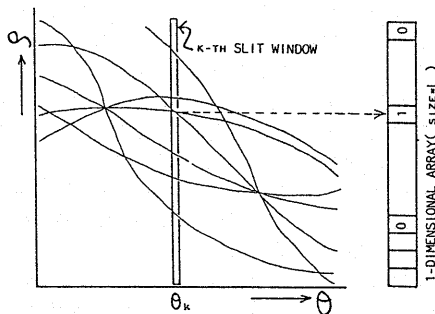


図10 直線群検出の1-D Hough変換7D"リスト

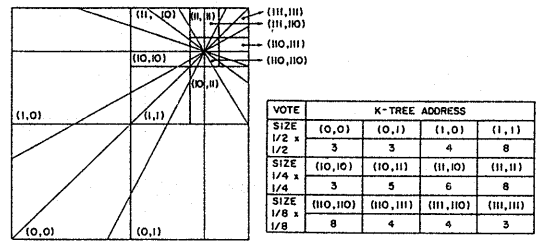


図11 パラメータ平面の階層的分割による高速化

Hough変換の基本演算部は、三角関数計算である。三角関数の周期性を利用して変換を高速化した試みもある。恩田(1987)^{b-10} は、K分割されたθ軸をMブロック分割し、ブロック間の重複する三角関数計算を1回で済ませる方法である。せいぜい30~40%の高速化ではあるが、着眼点として見逃さない。

4. 変換平面における特徴抽出法

Hough変換の機能面の厚みを増すための最も重要な方向は、変換平面においてパターン特徴抽出法を発見することである。

松山(1985)^{c-1} は、x-y平面上の直線要素の性質とパラメータ平面のHough曲線群の性質との関係を明らかにし、これに基づいて、安定した直線群検出法を示した。例えば、候補点列の密度の大小は、図12に示すように、Hough曲線群の交差角度の大小に対応するので、度数ピークの近傍を調べることで、直線要素の長さの制約を持たせた直線検出が可能とした。

Wahl(1986)^{c-2} は、一枚の画像からの多面体シーン解釈を、Hough変換平面上で行う試みである。図13のように、多面体エッジ直線群とHough平面のクラス群との関係を詳しく論じている。

松島(1987)^{c-3} は、無限遠点に相当する仮想的交点(x₀, y₀)のHough曲線上に、図14に示すように、無限遠点に伸びる直線群を表す度数のピーク群が散在する筈である。ここでは、度数ピーク群(θ_j, ρ_j), j=1, 2, ... に対して、式(4)を用いて最小自乗法でHough曲線を当てはめ、仮想点(x₀, y₀)を推定した。

中島(1987)^{c-4} は、図15のように、可変スリット法と全く等価なパターン特徴抽出法が、Hough変換平面上においても実現できることを証明した。これは直感的にも理解し易く、Fourier変換における射影断面定理に似た、興味ある結果である。

村上(1987)^{c-5} は、Hough変換平面において図形の凸包(Convex Hull)を求めるアルゴリズムを示した。図16に示すように、Hough曲線度数分布の上または下側包絡を構成するHough曲線群のみを抽出すると、それらに対応するパターン平面の点列は、凸包を構成する。

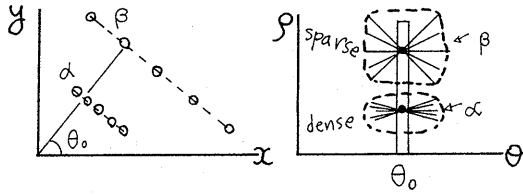


図12 Hough平面における図形の幾何学的特徴抽出

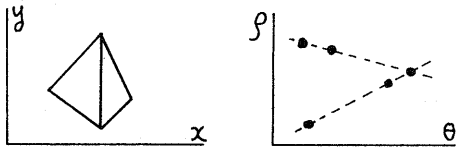


図13 多面体の性質とHough変換平面との関係

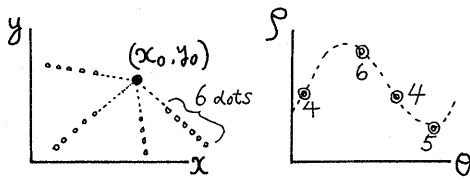


図14 Hough変換平面での無限遠点の抽出

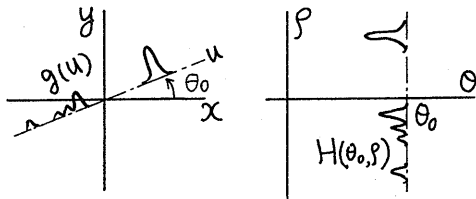


図15 可変リット法とHough変換との関係

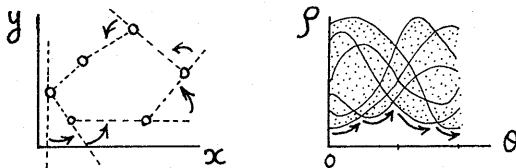


図16 Hough変換平面における凸包抽出

5. Hough変換の応用

田中(1985)^{d-1} は、シーン中の多面体群抽出に一般化Hough変換を用いた。Neveu(1985)^{d-2} は、ワッパヤキの重なったシーンから、一般化Hough変換を用いてパターンを抽出した。ここでは、多重解像度の複数枚の画像を用いている。安居院(1986)^{d-3} は、自動車ナンバープレートの抽出にHough変換を利用した。Davies(1986)^{d-4} は、機械部品画像から直線エッジ群の抽出を試みた。エッジgradientを考慮して、精度向上を図っている。

Poetzleitner(1986)^{d-5} は、木板表面の節や割れの領域分割にHough変換を適用した。丹羽(1987)^{d-6} は、多面体エッジの抽出に、Hough変換(b-2)を用いた。

Skingley(1987)^{d-7} は、SAR画像中から細い直線成分抽出に、Hough変換を利用した。平子(1987)^{d-8} は、市街地図から道路境界直線を抽出するために、高速化の工夫をしたHough変換を用いた。

6. ハードウェア化

まず、ハードウェア化とは異なるが、Eichman(1983)^{e-1} が、オプティカルにHough変換を求める方式を示している点が、注目される。今のところ、装置の規模や精度など、細かいことは判らないが、興味深い。

花原(1985)^{e-2} は、512×512×8bitのハイアマダ用メモリ、三角関数LUT、乗算器×2、ハイライン型画像処理部、等からなる専用ハードウェアを構成し、1画像につき1秒以内で処理した。恩田(1987)^{e-5} もほぼ同様な試みであるが、三角関数計算に高速化の工夫がある点が、特徴である。

Sanz(1985)^{e-3} は、ハイライン型汎用画像処理装置上で、Hough変換の高速化について検討している。Leavers(1986)^{e-4} は、PDP/11に接続したアレイ回路でHough変換を実現した。

7. その他のHough変換の研究

Deans(1981)^{f-1} は、式(8)に示す2D1-カット空間のRadon変換の性質が、一般化Hough変換の性質に適用できることを示した。

$$R[f] = \iint f(x, y) \delta(\rho - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy \quad (8)$$

Brown(1983)^{f-2} は、Hough変換における統計的ノイズの影響、量子化標本化ノイズなどについて論じた。これは、ピーク群抽出時の閾値選択(背景=bias)に参考になる。

Maitre(1986)^{f-3} は、同様の観点から、矩形の網膜モデル(デカルト座標系の場合)と円形の網膜モデル(極座標系)を用いて、画像中のランダム雑音の影響を調べた。

成瀬(1987)^{f-4} は、候補点近傍の微分値を用いた重み付き度数累積により、パラメータ平面の分割精度以上の精度で直線検出できる方法を提案した。

Hough変換は、理論的にきれいでも、パラメータ平面の分割数選択や、ノイズの影響等、不明瞭な問題が依然として多い。

8. むすび

Hough変換手法の現状の問題点やこれまでの諸研究の動向を知るために、その原理や歴史の変遷を、簡単に整理し、更に、一般化Hough変換、各種の効率化アルゴリズム、変換平面上における特徴抽出手法、など幾つかの視点からサーベイした。なお、末尾に挙げた参考文献は短期間に収集したものなので、多くの不備があるだろうことを、予めお断りしておきたい。しかし、大まかな研究動向は、一応捕らえている筈である。勿論、細部の検討については、各々の文献に当て頂き、各自の微調整にお任せしたい。

今後検討されると面白いと考えられる課題を、以下に思い付くまま掲げて、本稿のまとめとする。

- ①一般化Hough変換(GHT)の諸成果を、多次元化Hough変換(EHT)に適用すること。
- ②直線検出Hough変換(LHT)の諸効率化手法を、GHT(またEHT)に組み込むこと。
- ③パターンの幾何学的/トポロジ的/その他の特徴抽出を、Hough変換平面上で実現すること。(LHT,GHT,EHT)
- ④パターンの幾何学的/トポロジ的/その他の特徴抽出を利用して、直線(パターン)群検出の質を向上させること。
- ⑤専用チップ化、専用ボード化。(LHT用→GHT,EHT適用可能であること)
- ⑥x-y平面の分割数(画素数,分解能)と $\theta-\rho$ 平面の分割数の関係を分かり易くすること。(wrt.パターン検出精度)
- ⑦応用例、その他

謝辞 本稿をまとめるに際し、名古屋市工研村上和人氏より有益な討論を得た。文献収集の協力とあわせて感謝する。

参考文献

- a[Historical/generalized/extended Hough]
- 1)Hough,P.V.C.(1962): "Method and means for recognizing complex patterns,"U.S.Patent 3069654(Dec.18,1962)
 - 2)Rosenfeld,A.(1969): Picture processing by computer,Academic Press,New York(1969)
 - 3)R.O.Duda and P.E.Hart(1972): "Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures,"Comm.ACM,15,1,pp.11-15(Jan.1972)
 - 4)R.O.Duda and P.E.Hart(1973): Pattern classification and scene analysis,John Wiley & Sons(1973)
 - 5)Kimme,C.,Ballard,D.H. and Sklansky,J.(1975): "Finding circles by an array accumulators"Comm.ACM,18,2,pp.120-122(Feb.1975)
 - 6)Merlin,P.M. and Farber,D.J.(1975): "A parallel mechanism for detecting curves in pictures," IEEE Trans.C,C-24,1,pp.96-98(Jan.1975)

- 7)Tsuji,S. and Matsumoto,F.(1978): "Detection of ellipses by a modified Hough transformation," IEEE Trans.C,C-27,8,pp.777-781(Aug.1978)
 - 8)Sklansky,J.(1978): "On the Hough technique for curve detection," IEEE Trans.C,C-27,10,pp.923-926(Oct.1978)
 - 9)Shapiro,S.D.(1978):"Generalization of the Hough transform for curve detection in noisy pictures," Proc.4-th ICPR,Kyoto Japan(Nov,1978)
 - 10)Ballard,D.H.(1981): "Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes," Pattern Recognition,13,2,pp.111-122(Feb.1981)
 - 11)Qin-Zhong,Ye(1986):"A preprocessing method for Hough transform to detect circles," Proc.CVPR,pp.651-653(1986)
 - 12)Geric,G. and Klein,F(1986): "Fast contour identification through efficient Hough transform and simplified interpretation strategy," Proc.8th-ICPR,pp.498-500(Oct.1986)
 - 13)Costabile,M.F. and Pieroni,G.G(1986):"Detecting shape correspondences using the generalized Hough transform,"Proc.8th-ICPR,pp.589-591(Oct.1986)
 - 14)Davies,E.R.(1986):"Reduced parameter spaces for polygon detection using the generalized Hough transform,"Proc.8th-ICPR,pp.495-497(Oct.1986)
 - 15)Davies,E.R.(1987):"A new framework for analysing the properties of the generalized Hough transform,"Pattern Recognition Letters,6,1,pp.1-7(Jun.1987)
 - 16)Davies,E.R.(1987):"A new parametrisation of the straight line and its application for the optimal detection of objects with straight edges," Pattern Recognition Letters,6,1,pp.9-14(Jun.1987)
 - 17)Casasent,D. and Kirshnapuram,R.(1987): "Curved object location by Hough transformations and inversions," Pattern Recognition,20,2,pp.181-188(Mar.1987)
 - 18)中沢、大矢、中島、油田(1986):"ファイン・グレインクを用いた3次元形状計測における要素平面群の抽出法,"第17回画像工学コンファレンス,3-8 (Dec.1986)
 - 19)Illingworth,J. and Kittler,J.(1987): "The adaptive Hough transform,"IEEE Trans.PAMI, PAMI-9, 5,pp.690-698(Sep.1987)
 - 20)佐藤、石瀬、小川(1987):"一般化Hough変換の最適性について,"第19回画像工学コンファレンス,18-3(Dec.1987)
- b[Linear Hough / efficient algorithms]
- 1)O'Gorman,F. and Clowes,M.B.(1976): "Finding picture edges through collinearity of feature points," IEEE Trans.C,C-25,4,PP.449-456(Apr.1976)
 - 2)興水大和(1985):"直線パターン検出のためのHough曲線追跡型アルゴリズムについて," 信学論誌,J68-D,10,pp.1767-1776(Oct.1985)

3)安居院, 崔, 中嶋(1986): "Hough変換を用いた車両番号抽出法," 昭和61年信学総大会, 1631, (Mar. 1986)

4)興水, 村上(1986): "直線群検出のためのHough曲線追跡型アルゴリズム," 信学論誌, J69-D, 4, pp.631-633(Apr. 1986)

5)Murakami, K., Koshimizu, H. and Hasegawa, K.(1986): "On the new Hough algorithms without two-dimensional array for parameter space to detect a set of straight lines," proc. 8th-ICPR, pp.831-833(Oct. 1986)

6)安居院, 崔, 中嶋(1986): "ヒラミット階層を利用した高速Hough変換について," 電情信学研資, IE86-67(Vol. 86, no. 203)(Oct. 1986)

7)Li, H. and Lavin, M.A.(1986): "Fast Hough transform based on bintree data structure," Proc. CVPR, pp.640-642(1986)

8)Li, H., Lavin, M.A. and Le Master, R.J.(1986): "Fast Hough transform: A hierarchical Approach," CVGIP, 36, pp. 139-161(1986)

9)沼田, 興水(1987): "Gradient型超高速Hough変換アルゴリズム," 情報処理学会研資, CV51-2(Nov. 1987)

10)恩田, 松島, 青木(1987): "三角関数の周期性を利用したHough変換の高速計算法," 信情学論誌, J70-D, , pp. (. 1987)

11)村上, 興水, 長谷川(1987): "2次元的極大点探索可能な1-Houghアルゴリズム," 第18回画像工学コンファレンス, 15-6, (Dec. 1987発表予定)

c[Hough特徴抽出]

1)松山, 長尾(1985): "Hough変換の幾何学的性質と直線群検出への応用," 情報処理学論誌, 26, 6, pp.1069-1078 (Jun. 1985)

2)Wahl, F.M. and Biland, H.P.(1986): "Decomposition of polyhedra scene in Hough space," Proc. 8th-ICPR, pp. 78-84(Oct. 1986)

3)松島, 恩田, 青木(1987): "Hough変換の性質を利用した無限遠点抽出法," 信情学論誌, J70-D, 5, pp. 1051-1052(May, 1987)

4)中島, 長尾(1987): "可変スリット法とHough変換の関係," 情報処理学研資, CV47-4(Mar. 1987)

5)村上, 興水, 長谷川(1987): "Hough変換平面における図形の凸包抽出アルゴリズム," 情報処理学研資, CV51-3(Nov. 1987)

d[Hough応用]

1)田中, 辻(1985): "多面体の認識の並列処理," 情報処理学研資, CV34-3(Jan. 1985)

2)Neveu, C.F., Dyer, C.R. and Chin, R.T.(1985): "Object recognition using Hough pyramids," Proc. CVPR, pp.328-333(1985)

3)安居院, 崔, 中嶋(1986): "画像処理による車両番号の抽出," 第1回産業における画像ビジョンシンポジウム, pp.141-146(Jun. 1986)

4)Davies, E.R.(1986): "Image space transforms for detecting straight edges in industrial images," Pattern Recognition Letters, 4, 3, pp.185-192(Jul. 1986)

5)Poelzleitner, W.(1986): "A Hough transform method to segment images of wooden boards," Proc. 8-ICPR, pp.262-264(Oct. 1986)

6)丹羽, 渡辺(1987): "スレ法による多面体の再構成," 情報処理学研資, CV48-3(Vol. 87, no. 31)(May, 1987)

7)Skingley, J. and Rye, A.J.(1987): "The Hough transform applied to SAR image for thin line detection," Pattern Recognition Letters, 6, 1, pp. 61-67(Jun. 1987)

8)平子, 吉田, 福村(1987): "市街地図からの道路情報の抽出," 昭62年度電気関係学会東海支部大会, 545(Oct. 1987)

e[Hough応用]

1)Eichman, G. and Dong, B.Z.(1983): "Coherent optical production of the Hough transform," Appl. Opt., 22, pp.830-834(1983)

2)花原, 丸山, 内山(1985): "実時間Hough変換プロセッサ," 昭和60信学会情報システム部門大会, 92, (1985)

3)Sanz, J.L.C., Hinkei, E.B. and Distein, I.(1985): "Computing geometric features of digital objects in general purpose image processing pipeline architectures," Proc. CVPR, pp.265-270(1985)

4)Leavers, V.F. and Boyce, J.F.(1986): "An implementation of the Hough transform using a linear array processor in conjunction with a PDP/11," NPL Report(UK), DITC 74/86, pp.1-17(Oct. 1986)

5)恩田, 松島, 青木(1987): "ROMを用いたHough変換プロセッサ," 昭和62年度情信学会総合全国大会, 1587(Mar. 1987)

f[Houghその他]

1)Deans, S.R.(1981): "Hough transform from Radon transform," IEEE Trans. PAMI, PAMI-3, 2, pp. 185-188(Mar. 1981)

2)Brown, C.M.(1983): "Inherent bias and noise in the Hough transform," IEEE Trans. PAMI, PAMI-5, 5, pp.493-505(Sep. 1983)

3)Maitre, H.(1986): "Contribution to the prediction of performances of the Hough transform," IEEE Trans. PAMI, PAMI-8, 5, pp. 669-674(Sep. 1986)

4)成瀬, 野村(1987): "重み付けによるHough変換の高精度化," 昭62年度情信学会総合全国大会, 1585(Mar. 1987)