

高速インクリメンタルHough変換法 (FIHT 2)

FIHT 2 : A Fast Incremental Hough Transform

——— 拡張Hough変換法 ———

——— a new method in the class of Extended Hough Transform ———

沼田宗敏*

奥水大和**

Munetoshi NUMADA*

Hiroyasu KOSHIMIZU **

*(株)ロゼフテクノロジー

**中京大学教養部

*Lossev Technology Corp.

**Chukyo University

あらまし パターン平面上の点群から直線群検出を行うHough変換の計算コストは、 $\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$ における関数計算と掛算に起因する。関数計算も掛算もデータテーブルも用いる事なく、初期値 x と y から加減算と算術シフト演算のみを用いてインクリメンタルに発生できる変換関数系が、直線群検出の為の基本的性質を保存している事を示し、これに基づいてインクリメンタルな高速Hough変換法を提案する。

Abstract The usual Hough transform defined by the equation $\rho = x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta$ is considered only as a method among the wide scope of the pattern mapping functions applicable to the pattern detector. This class of mapping functions is called here as the "extended Hough transform (EHT)" in this paper.

In this paper, a fast incremental Hough transform (FIHT2), a new method of the EHT, is proposed. Instead of the functional operations of $\sin \theta$ and $\cos \theta$, and the multiplication operations, an incremental generation of the Hough curve is realized without functional operations. Especially when the resolution k of the θ -axis is selected carefully, only the addition operation and the shift operation are required.

The basic principle of this incremental method is derived from the fact that the basic Hough equation can be exactly approximated by the differential equation. Experimental results using the vision data of the industrial parts demonstrate that the computing cost can be reduced to less than 1/4 of the cost of the usual Hough transform. Further subject is to clarify the pictorial interpretation of FIHT2 in comparison with the usual one.

1. まえがき

画像上の直線検出の有力な基本特徴抽出手法としてHough変換が知られている¹⁾²⁾³⁾。この手法ではまず、 $x-y$ パターン平面上のエッジ候補点 (x_i, y_i) に対し(1)式で記述される変換を施し、 $\theta-\rho$ パラメータ平面上に、この変換に関

してエッジ点と相対関係を持つ正弦的軌跡(Hough曲線)を書き込む。原点からの距離が ρ^* 、垂角が θ^* である直線上のエッジ候補点は、パラメータ平面では点 (θ^*, ρ^*) で書き込み度数の極大点を持つので、(2)式によって直線が検出できる(図1)。この場合この処理には多くの計算が必要であり、これがHough変換利用上

の大きな課題となっている。

$$\rho = x_1 \cos \theta + y_1 \sin \theta \quad (1)$$

$$\rho^* = x_2 \cos \theta^* + y_2 \sin \theta^* \quad (2)$$

さてHough変換高速化の試みとして、最近有用な2つの方法を我々は提案した。1つは、(1)式の合成三角関数の近似計算を三角関数もデータテーブルも掛算も用いずに、比較と加減算のみでインクリメンタルに行う手法で高速インクリメンタルHough変換(FIHT)と呼んだ。これは、若干の誤差はあるものの、高速なHough変換を可能にしている⁴⁾。今1つは、(1)式に代わる新しい変換関数を導入した拡張Hough変換法で⁷⁾、区分的Hough変換法PLHT⁸⁾に代表されるいくつかの高速演算可能な関数系の存在を明らかにしている。

本論文では、(1)式の近似式をインクリメンタルに発生できる関数を拡張Hough変換の枠組で改めて把え直し、直線検出可能な拡張Hough変換法の新しい一具体例を明らかにし、高速に直線検出ができる方法を提案する。以下、2.では拡張Hough変換の概念について述べ、3.でインクリメンタルな高速Hough変換法FIHTについて、4.ではFIHTで定義される変換関数を用いた拡張Hough変換法FIHT 2を紹介する。さらに5.では高速化の効果を理論的かつ実験的に評価し、最後に6.で全体をまとめる。

2. 拡張Hough変換

2-1. で述べる4条件を満たす次式の変換

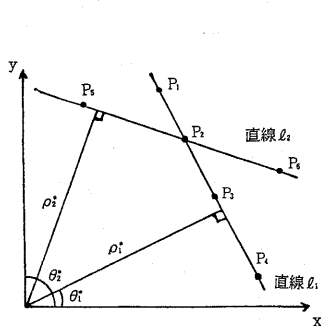


図1. Hough変換の原理

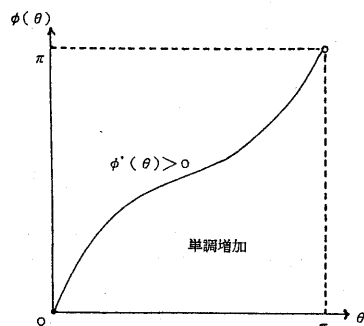
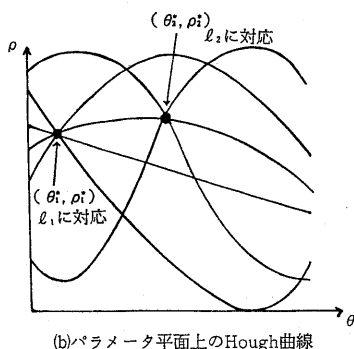


図2. Hough変換の垂角 θ と拡張Hough変換の $\phi(\theta)$ の関係

関数FによるHough変換を、拡張Hough変換(Extended Hough Transform)と呼ぶことにする⁷⁾。
 $F(\theta, \rho, x, y) = 0: 0 \leq \theta \leq \pi$

2-1. 拡張Hough変換の必要条件

関数Fは以下の条件を満たさなければならぬと考える。

条件1: $f_1(\theta), f_2(\theta)$ を θ のみを変数とする1価関数として、関数Fは、次式で記述できる。

$$\rho = x \cdot f_1(\theta) + y \cdot f_2(\theta) \quad (3)$$

条件2: $f_1(\theta), f_2(\theta)$ が定義される区間で
 $f_1(\theta) f_2'(\theta) - f_2(\theta) f_1'(\theta) > 0$

条件3: $\phi(\theta) = \tan^{-1}(f_2(\theta)/f_1(\theta))$

は区間内で連続

ただし $f_1(\theta) = 0$ なら $\phi(\theta) = \pi/2$ とする。

条件4: $\phi(0) = 0, \lim_{\theta \rightarrow \pi-0} \phi(\theta) = \pi$

(3)式は(5)式の変換により、(4)式のように変形できる。

$$R = x \cos \phi + y \sin \phi \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \phi &= \tan^{-1}(f_2(\theta)/f_1(\theta)) \\ R &= \rho / \sqrt{f_1(\theta)^2 + f_2(\theta)^2} \end{aligned} \right\} (5)$$

上の4条件は図2に示すように、パラメータ対 (θ, ρ) とパラメータ対 (ϕ, R) が $0 \leq \phi < \pi$ において一対一対応であることを規定しており、(4)式は通常のHough変換の変換式であるから、その変形である(3)式を用いても直線検出が可能になる。

パターン平面上の1点 (x, y) に対応する(3)式で表現されるパラメータ平面上の軌跡を拡張Hough曲線と呼ぶ。

2-2. 拡張Hough変換関数の例

— Hough放物線 —

拡張Hough変換の1例として、次に示すようなHough放物線を用いた直線検出について述べる⁷⁾。

(6)式で定義される変換関数を考える。

$$\rho = x(1 - 2\theta/\pi) + 4y\theta(\sqrt{\pi} - \theta/\pi) \quad (6)$$

ここで $f_1(\theta) = 1 - 2\theta/\pi$,

$f_2(\theta) = 4\theta(\sqrt{\pi} - \theta/\pi)$ とすれば、上式は拡張Hough変換の4条件を満足する。

図3に2本の直線 l_1, l_2 上の点群に対応する拡張Hough曲線群を示す。曲線群は2点 (θ_1, ρ_1) と (θ_2, ρ_2) で交わり、2本の直線は(7)式により求める事ができる。この拡張Hough曲線をHough放物線と呼ぶ。

$$\rho^* = x(1 - 2\theta^*/\pi) + 4y\theta^*(\sqrt{\pi} - \theta^*/\pi) \quad (7)$$

3. インクリメンタルなHough変換FIHT

文献4)で提案したHough曲線を逐次的に発生させるインクリメンタルHough変換(FIHT)法の要点をまとめておく。

$\theta - \rho$ パラメータ平面の θ 軸方向分割数をKとすると、(1)式は次式で記述できる。

$$\rho_n = x_1 \cos \theta_n + y_1 \sin \theta_n : n = 0, 1, \dots, K-1 \quad (8)$$

(ただし $\theta_n = n\pi/K$)

さてこの(8)式の近似式は、(9)式の階差方程式で記述できる事が後で容易に証明される。

$$\left. \begin{aligned} \rho_{n+1} &= \rho_n + \varepsilon \cdot \rho'_n \\ \rho'_{n+1} &= \rho'_n - \varepsilon \cdot \rho_{n+1} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここに $\rho_0 = x_1, \rho'_0 = y_1, \varepsilon = \pi/K$

3-1. 階差方程式の解

次式(10)の階差方程式を考える⁵⁾。

$$\left. \begin{aligned} U_{n+1} &= U_n - C \cdot V_n \\ V_{n+1} &= V_n + C \cdot U_{n+1} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

この階差方程式の解は穂坂によって与えられており⁶⁾、

$$\left. \begin{aligned} U_n &= \frac{1}{\cos \Delta/2} \{ U_0 \cos(n\Delta - \Delta/2) - V_0 \sin n\Delta \} \\ V_n &= \frac{1}{\cos \Delta/2} \{ U_0 \sin n\Delta + V_0 \cos(n\Delta + \Delta/2) \} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

である。

ただし、 $\Delta = \tan^{-1} \frac{C\sqrt{1-C^2/4}}{1-C^2/2}$ とする。

ここで $\rho_0 = x_1, \rho'_0 = y_1, \rho_n = U_n,$

$\rho'_n = V_n, \varepsilon = -C$ とおけば、(9)式の解は(11)、

(12)式より

$$\left. \begin{aligned} \rho_n &= \frac{1}{\cos \Delta/2} \{ x_1 \cos(n\Delta - \Delta/2) + y_1 \sin n\Delta \} \\ \rho'_n &= \frac{1}{\cos \Delta/2} \{ -x_1 \sin n\Delta + y_1 \cos(n\Delta + \Delta/2) \} \\ \varepsilon &= 2\sin \Delta/2 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

3-2. インリメンタルなHough変換FIHT

さて、(13)式において $\Delta = \pi/K$ とすれば、

$\theta_n = n\pi/K = n\Delta$ となる。

また、Maclaurinの定理より、

$$2\sin \Delta/2 = \Delta - \Delta^3/4 \cdot \sin(\xi \cdot \Delta/2)$$

$$\cos \Delta/2 = 1 - \Delta^2/8 \cdot \cos(\xi \cdot \Delta/2)$$

なる $\xi (0 < \xi < 1)$ が存在する。

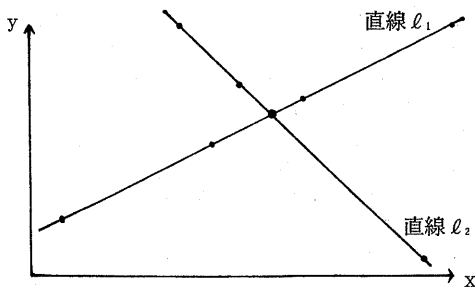
ここで、 θ 軸分割数Kが十分大きい時、 $\Delta \ll 1$ であるから Δ^2 の項を0とみなす事により

$\varepsilon = 2\sin \Delta/2 = \Delta, \cos \Delta/2 = 1$ と考えてよい。それ故Kが十分大きい時、(13)式より

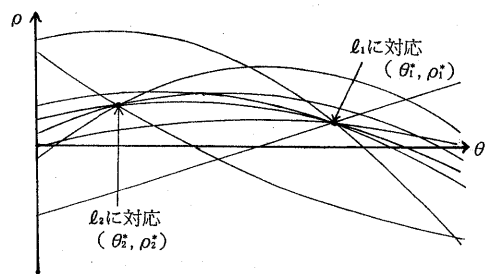
$\rho_n = x_1 \cos \theta_n + y_1 \sin \theta_n + \pi/K \cdot x_1 \sin \theta_n$

$$\left. \begin{aligned} \rho'_n &= -x_1 \sin \theta_n + y_1 \cos \theta_n - \pi/K \cdot y_1 \sin \theta_n \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

これが $\varepsilon = \pi/K$ とした時の階差方程式(9)の解である。



(a)パターン平面上的エッジ点



(b)パラメータ平面上的Hough放物線

図3. Hough放物線

$\frac{\pi}{K} = \Delta \ll 1$ であるから、(14)式は $\rho'_n = \rho_{K/2+n}$; $n=0, 1, 2, \dots, K/2-1$ として(8)式の近似式とみる事ができる。

故に、今度は(9)式を連立漸化式とみて、初期値 $\rho_0 = x_1$, $\rho'_0 = y_1$ として与え、インクリメンタルに曲線を発生させると、この発生させた曲線は(14)式のような合成三角関数を生成していることになる。よって(14)式がHough曲線と十分一致できるような条件が見い出せれば、効率よくHough曲線をインクリメンタルに発生できる事になる(図4)。

(9)式の計算は、三角関数の演算が不要で、加減算と乗算のみでインクリメンタルに行える。さらに、 $\varepsilon = \frac{1}{2^m}$ (m は自然数)とおいた場合には、 $\varepsilon \cdot \rho'_n$ は ρ'_n に対応するデータレジスタの m 回の右方向算術シフト演算で計算できるから、(9)式の計算は加減算とシフト演算のみでインクリメンタルに実行できることがわかる。

このように三角関数演算も乗算も行う事なく、Hough変換式(8)を近似的にインクリメンタルに発生する方法をFast Incremental Hough Transform (略してFIHT)と呼んでいる。

4. インクリメンタルな拡張Hough変換 FIHT 2

拡張Hough変換の関数 F に、インクリメンタルに関数計算可能な(14)式を用いる。

4-1. 拡張Hough変換法 FIHT 2

(14)式において $\rho'_n = \rho_{n+K/2}$, $\theta_{n-K/2} = \theta_n - \frac{\pi}{2}$ とおいた次式の変換関数を考える。ただし、 K はパラメータ平面の θ 軸分割数とする。

$$\left. \begin{aligned} \rho_n &= x_1 \cos \theta_n + y_1 \sin \theta_n + \frac{\pi}{2K} \cdot x_1 \sin \theta_n \\ 0 &\leq n < \frac{K}{2} \text{ または } 0 \leq \theta_n < \frac{\pi}{2} \\ \rho_n &= x_1 \cos \theta_n + y_1 \sin \theta_n + \frac{\pi}{2K} \cdot y_1 \cos \theta_n \\ \frac{K}{2} &\leq n < K \text{ または } \frac{\pi}{2} \leq \theta_n < \pi \end{aligned} \right\} (15)$$

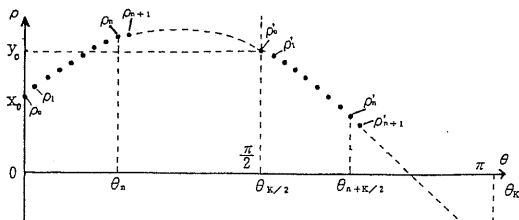


図4. 漸化式による近似Hough曲線発生

(15)式の関数は拡張Hough変換の4条件を満たす(付録参照)。

(15)式の実施は、次式でインクリメンタルに計算できる。

$$\left. \begin{aligned} \rho_0 &= x_1, \quad \rho'_0 = y_1, \quad \varepsilon = \frac{\pi}{K} \\ \rho_{n+1} &= \rho_n + \varepsilon \cdot \rho'_n \\ \rho'_{n+1} &= \rho'_n - \varepsilon \cdot \rho_{n+1} \end{aligned} \right\} (16)$$

ただし、 $n=0, 1, \dots, \frac{K}{2}-2$; $\rho'_n = \rho_{n+K/2}$ である。

直線 l 上の点群に対応する拡張Hough曲線群はパラメータ平面上の1点 (θ^*, ρ^*) で交わる。求める直線 l は次式で計算できる。

$$\left. \begin{aligned} \rho^* &= x (\cos \theta^* + \frac{\pi}{2K} \sin \theta^*) + y \sin \theta^* \\ 0 &\leq \theta^* < \frac{\pi}{2} \\ \rho^* &= x \cos \theta^* + y (\sin \theta^* + \frac{\pi}{2K} \cos \theta^*) \\ \frac{\pi}{2} &\leq \theta^* < \pi \end{aligned} \right\} (17)$$

(16)式、(17)式を用いた拡張Hough変換法をFIHT 2と呼ぶ。

4-2. シフト演算による高速化

デジタル計算機上で(16)の連立漸化式を実行する場合には、 $\varepsilon = \frac{1}{2^m}$ となるような自然数 m を選んでやれば、(16)式における乗算はシフト演算で置き換える事ができるので、高速な拡張Hough変換が可能になる。

θ 軸分割数を $K = [2^m \cdot \pi]$ 、また $K_1 = [2^{m-1} \cdot \pi]$ 、 ρ 軸分割数を L 、パラメータ平面用2次元配列を $A(k, l)$; 大きさ $K \times L$: $k=0, 1, \dots, K-1$; $l=0, 1, \dots, L-1$ とする。ここに $[\dots]$ はガウス記号である。拡張Hough変換の式は(16)式に $\varepsilon = \frac{1}{2^m}$ を代入した(18)式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \rho_0 &= x_1, \quad \rho'_0 = y_1 \\ \rho_{n+1} &= \rho_n + \rho'_n / 2^m \\ \rho'_{n+1} &= \rho'_n - \rho_{n+1} / 2^m \end{aligned} \right\} (18)$$

ただし、 $\rho'_n = \rho_{n+K_1}$; $n=0, 1, \dots, K_1-2$ である。

1点 (x_1, y_1) に対応する拡張Hough曲線の生成アルゴリズムを図5に示す。ここに $\langle \dots \rangle$ はパラメータ値から配列 A の要素番号への変換を表わし、 $(k, l) = (\langle \theta_k \rangle, \langle \rho_k \rangle)$ が配列 A への書き込みアドレスとなる。

直線 l 上の点群に対応する拡張Hough曲線群は、パラメータ平面上の1点 (θ^*, ρ^*) で交わる。求める直線 l は(14)式より、次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \rho^* &= x \cos \theta^* + y \sin \theta^* + (x \sin \theta^*) / 2^{m+1} \\ 0 &\leq k^* < K_1 \\ \rho^* &= -x \sin \theta^* + y \cos \theta^* - (y \sin \theta^*) / 2^{m+1} \\ K_1 &\leq k^* < K \end{aligned} \right\} (19)$$

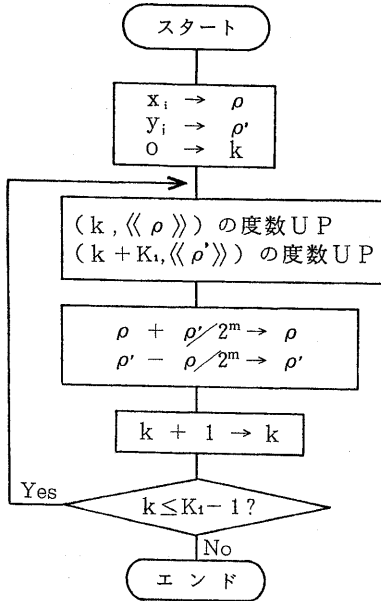


図5. FIHT 2による拡張Hough曲線作成アルゴリズム

ここに θ^* は、パラメータ平面用配列A上では、要素番号を $\langle \theta^* \rangle = k^*$ として与えられているものとすれば、次のように計算される。

$$\left. \begin{aligned} \theta^* &= k^* / 2^m : 0 \leq k^* < K_1 \\ \theta^* &= (k^* - K_1) / 2^m : K_1 \leq k^* < K \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

シフト演算を用いたFIHT 2と三角関数テーブルを用いたHough変換との変換式演算回数の比較を表1に載せる。

表1. 演算回数の比較

	メモリ読出	加減算	乗算	シフト演算
Hough変換	2NK	NK	2NK	0
FIHT 2	0	N(K-2)	0	N(K-2)

4-3. 誤差

シフト演算によるFIHT 2の式(18)の誤差について考える。

まず第1に、Hough変換(8)式の ρ_n を(8)'式のように R_n に置き換えて、(18)式の ρ_n との誤差 $|\rho_n - R_n| : n=0, 1, \dots, K-1$ の最大値 $\text{MAX}(|\rho_n - R_n|)$ を求めた。シフト回数 $m=1 \sim 9$ 、パラメータ平面の θ 軸方向分割数 $K = [2^m \cdot \pi]$ 、 x_i と y_i の範囲は便宜上 $-2^{m+1} + 1$ から $2^{m+1} - 1$ とした。

結果を表2に示す。 $|\rho_n - R_n|$ の最大値は $m=1 \sim 9$ で1.5であるから、(18)式はHough変換式(8)のよい近似式になっている事がわかる。

第2に、(18)式によって度数分布作成されたパラメータ平面上の極大点からパターン平面に戻す変換式(19)の ρ_n^* を(19)'式のように ρ_n^* に置き換えて、(18)式の ρ_n との誤差 $|\rho_n - \rho_n^*| : n=0, 1, \dots, K-1$ の最大値 $\text{MAX}(|\rho_n - \rho_n^*|)$ を求めた。 $m=1 \sim 9$ 、 $K = [2^m \cdot \pi]$ 、 x_i と y_i の範囲は便宜上、 $-2^{m+1} + 1$ から $2^{m+1} - 1$ とした。結果を表2に示す。

ρ_n と ρ_n^* の持つ誤差は、(13)式で $\varepsilon = 2 \sin \frac{\Delta}{2} = \Delta$ 、 $\cos \frac{\Delta}{2} = 1$ (ただし $\varepsilon = \frac{1}{2} \Delta$) と置き換えた近似誤差に起因するが、全ての m について、(19)式はパターン平面に戻す変換式として実用上の問題はない。

表2. 連立漸化式の誤差

m	K	$ \text{MAX}(x_i, y_i) $	$\text{MAX} \rho_n - R_n $	$\text{MAX} \rho_n - \rho_n^* $
1	6	3	0.777	0.153
2	12	7	1.270	0.089
3	25	15	1.026	0.047
4	50	31	1.206	0.024
5	100	63	1.505	0.012
6	201	127	1.053	0.006
7	402	255	1.119	0.003
8	804	511	1.246	0.002
9	1608	1023	1.501	0.001

$$R_n = x_i \cos(n \frac{\pi}{K}) + y_i \sin(n \frac{\pi}{K}) \quad n=0, 1, \dots, K-1 \quad (8)'$$

$$\left. \begin{aligned} \rho_n^* &= x_i \cos(\frac{n}{2} \frac{\pi}{2^m}) + y_i \sin(\frac{n}{2} \frac{\pi}{2^m}) + 2^{-(m+1)} \\ &\quad \cdot x_i \sin(\frac{n}{2} \frac{\pi}{2^m}) : 0 \leq n < K_1 \\ \rho_n^* &= -x_i \sin(\frac{n}{2} \frac{\pi}{2^m}) + y_i \cos(\frac{n}{2} \frac{\pi}{2^m}) - 2^{-(m+1)} \\ &\quad \cdot y_i \sin(\frac{n}{2} \frac{\pi}{2^m}) : K_1 \leq n < K \end{aligned} \right\} \quad (19)'$$

ただし、 $K_1 = [2^{m-1} \cdot \pi]$ 、 $n' = n - K_1$

5. 実験例

FIHT 2 と通常の Hough 変換の手法とで、計算時間の違いを調べた。

θ 軸分割数は共に $K = 201$ で、FIHT 2 はシフト回数を $m = 6$ とし、(18)式を用いてインクリメンタルに計算を行う。通常のHough変換も、 $\cos \theta$ と $\sin \theta$ の値はあらかじめテーブルに入

れておくテーブル参照方式で実行する。

5-1. パラメータ平面への書き込みアドレス計算時間

θ 軸分割数を $K=201$, ρ 軸分割数を $L=240$, 乱数で発生させたデータ数を $N=100$ とした。プログラム言語は PC-9801 (10 MHz) 上で作動する BASIC と、汎用画像処理装置 LIP-10 (68000CPU:12.5MHz) 上で作動するアセンブリ言語で記述し、パラメータ平面への書き込みアドレス計算時間を調べた。アセンブリ言語での計算時間は、計算処理を100回繰り返して、100で割った値とした。実験結果を表3に示す。

通常の Hough 変換における乗算回数は $2NK$ 回であるが、FIHT 2 ではこれを $N(K-2)$ 回のシフト演算で置き換えられる為、アセンブリ言語なら、約4倍の高速化を達成できる。

表3 FIHT 2 アルゴリズムの実験結果 (1)

	BASIC (PC 9810 VM)	アセンブリ言語(68000)
Hough変換	50 sec	0.20 sec
FIHT 2	25 sec	0.052sec
高速化	2.0倍	3.8倍

データ数 $N=100$, θ 軸分割数 $K=201$
(ただし、度数書き込みをしない ρ 計算時間のみ)

5-2. 機械部品の稜線検出

写真1は、ITVカメラから入力した機械部品の濃淡画像(大きさ 256×240 、濃度レベル数8ビット)である。この画像から抽出(Sobel)したエッジ候補点数 $N=2968$, 変換平面の分割数 $K=201$, $L=240$ で通常の Hough 変換と FIHT 2 とで直線1本を抽出した。使用マシンは LIP-10, プログラム言語は68Kアセンブラで画像メモリ、パラメータ平面メモリ、プログラムメモリ全てにスタックRAM (85 ns) を用いた。

写真2は、通常の Hough 変換と FIHT 2 の度数分布であり、写真3にはこの度数分布からピークを求め、パターン空間に戻した結果を重ね書きした。Hough 変換の度数分布と FIHT 2 の度数分布はほぼ一致しており、4-3. で明らかにしたように(8)式は Hough 変換式(8)のよ

い近似式になっている事がわかる。この時の計算時間の実測値を表4に示す。

表4. FIHT 2 アルゴリズムの実験結果 (2)

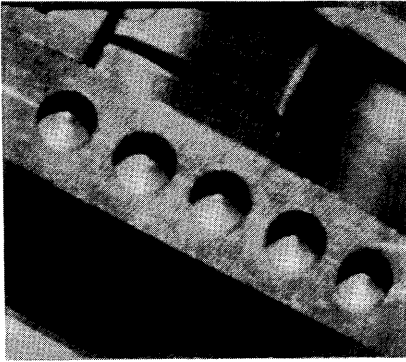
直線検出				
F I H T	エッジ 検出	変換プロセス		特徴抽出プロセス (直線1本)
		アドレス 計算	度数 書き込み	
2	1.1 sec	*1.5 sec	*1.2 sec	0.2 sec
		2.7 sec		
2.9 sec				
4.0 sec				

直線検出				
H o u g h 変 換	エッジ 検出	変換プロセス		特徴抽出プロセス (直線1本)
		アドレス 計算	度数 書き込み	
2	1.1 sec	*6.0 sec	*1.2 sec	0.2 sec
		7.2 sec		
7.4 sec				
8.5 sec				

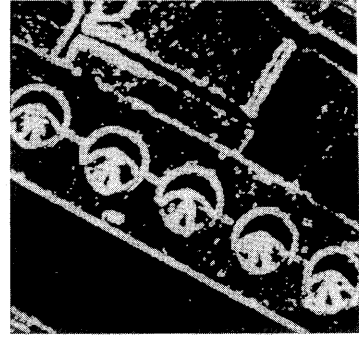
$K=201, L=240, N=2968$ *理論推定値

6. む す び

三関関数用データテーブルも乗算も用いる事なく、インクリメンタルに近似Hough曲線を発生できるFIHT法を拡張Hough変換法の下で再構築し、新たに高速に直線検出する方法FIHT 2を確立した。本手法ではHough変換の $2NK$ 回の乗算をたかだか $N(K-2)$ 回のシフト演算で置き換える事ができ、また三角関数テーブルからのメモリ読出し処理も不要である為、アセンブリ言語のような低級言語ほど高速化の効果は大きい。実験では、約4倍の高速化が確認できた。今後は直線検出法としての通常のHough変換とFIHT 2の性質の違いについて検討したい。



(a) 機械部品の画像(大きさ 256×240)

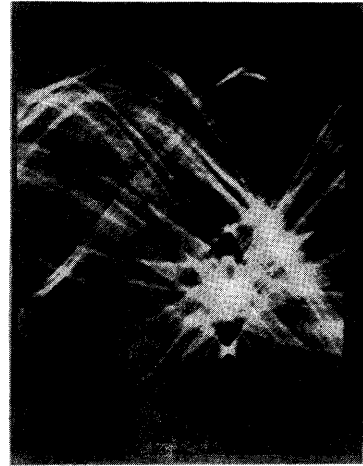


(b) エッジ画像 (Sobel)

写真1. 機械部品の画像とエッジ画像

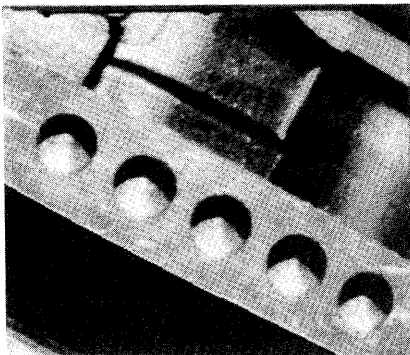


(a) Hough変換

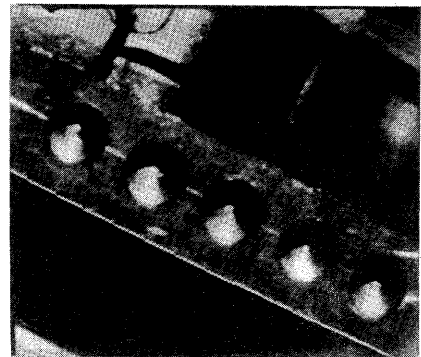


(b) FIHT 2

写真2. 変換平面の拡張Hough曲線群の度数分布



(a) Hough変換



(b) FIHT 2

写真3. 機械部品の稜線抽出

謝 辞

日ごろ、有益なご助言を頂く、(株)ロゼフテク
ノロジー山本常務取締役役に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) P.V.C.Hough: "Method and means for recognizing complex patterns", U.S. Patent 3069654 (1962)
- 2) R.O.Duda and P.E.Hart: "Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures", Comm.ACM, 15, 1, pp.11-15 (1972)
- 3) 興水大和: "Hough変換に関する最近の研究動向", 情報研資, CV51-1, pp.1-8 (1987)
- 4) 沼田, 興水: "インクリメンタルな高速Hough変換 FIHT", 信学技法, PRU87-93, pp.1-6 (1988)
- 5) 柿下, 穂坂: "インクリメンタルな曲線の発生", 情報処理学会第13回大会, 134 (1972)
- 6) 穂坂衛: "コンピュータ・グラフィックス", 産業図書 (1974)
- 7) 沼田, 興水: "拡張Hough変換法", 情報処理学会第37回全国大会, 4V-5 (1988)
- 8) 興水, 沼田: "区分的Hough直線による高速Hough変換法 PLHT について", 信学論 (D), J72-D-II, 1, pp.1-10 (1989)

付 録

[(15)式により拡張Hough変換できる事の証明]

次式の関数を考える。

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta + \pi / 2k \cdot x \sin \theta \quad 0 \leq \theta \leq \pi / 2 - \pi / k \quad (f1.1)$$

$$\rho = -3/2 \cdot x (\theta - \pi / 2) + y \quad \pi / 2 - \pi / k < \theta < \pi / 2 \quad (f1.2)$$

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta + \pi / 2k \cdot y \cos \theta \quad \pi / 2 \leq \theta \leq \pi - \pi / k \quad (f1.3)$$

$$\rho = -y / 2 \cdot (\theta - \pi) - x \quad \pi - \pi / k < \theta < \pi \quad (f1.4)$$

(f1.1)、(f1.2)、(f1.3)、(f1.4)式を総称して、(f1)式と呼ぶことにし、以下に (f1)式が拡張Hough変換の4条件を満たす事を示す。

(条件1)

$$f_1(\theta) = \cos \theta + \pi / 2k \cdot \sin \theta, f_2(\theta) = \sin \theta \quad 0 \leq \theta \leq \pi / 2 - \pi / k$$

$$f_1(\theta) = -3/2 \cdot (\theta - \pi / 2), f_2(\theta) = 1 \quad \pi / 2 - \pi / k < \theta < \pi / 2$$

$$f_1(\theta) = \cos \theta, f_2(\theta) = \sin \theta + \pi / 2k \cdot \cos \theta \quad \pi / 2 \leq \theta \leq \pi - \pi / k$$

$$f_1(\theta) = -1, f_2(\theta) = -1/2 \cdot (\theta - \pi) \quad \pi - \pi / k < \theta < \pi$$

と置くと、(f1)式は次式で記述できる。

$$\rho = x \cdot f_1(\theta) + y \cdot f_2(\theta)$$

(条件2)

$$f_1(\theta) f_2'(\theta) - f_2(\theta) f_1'(\theta) = 1 \quad 0 \leq \theta \leq \pi / 2 - \pi / k$$

$$\pi / 2 \leq \theta \leq \pi - \pi / k$$

$$= 3/2 \quad \pi / 2 - \pi / k < \theta < \pi / 2$$

$$= 1/2 \quad \pi - \pi / k < \theta < \pi$$

より、 $f_1(\theta) f_2'(\theta) - f_2(\theta) f_1'(\theta) > 0$ が成立する。

(条件3)

$$\cos \pi / k = 1, \sin \pi / k = \pi / k \text{ と考えると}$$

区間 $0 \leq \theta < \pi$ に於て

$\phi(\theta) = \tan^{-1}(f_2(\theta)/f_1(\theta))$ は連続である。

(条件4)

$$\phi(0) = 0$$

$$\lim_{\theta \rightarrow \pi-0} \phi(\theta) = \lim_{\theta \rightarrow \pi-0} \{\tan^{-1}(\theta - \pi) / 2\} = \pi$$

以上より (f1)式は拡張Hough変換の4条件を満たすことが証明された。(f1.1)式と(f1.3)式で $x = x_n, y = y_n, \theta = \theta_n, \rho = \rho_n; n = 0, 1, \dots, k-1$ とおくと $\theta_{k-1} = \pi / 2 - \pi / k, \theta_n = \pi - \pi / k$ より、(15)式が成立する。故に(15)式を用いても拡張Hough変換が可能である。