

7D-1

超並列ハードウェアによる Hough 変換高速化の検討*

中西 衛† 藤野 雄一† 小倉 武†
NTT LSI 研究所‡

1 はじめに

直線検出 Hough 変換は、 $x-y$ 座標の画像空間から直線を定める傾き (θ) と原点からの距離 (ρ) をパラメータとする Hough 空間への変換であり、0 以外の値を持つ画素 (x_i, y_j) に対し、式 (1) の曲線が $\theta-\rho$ 空間に voting される。

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (1)$$

この Hough 変換処理は、扱う画素数が多く処理量は $O(N^3)$ であり、メモリアクセス量も大きいため、並列ハードウェアによる高速化が必要とされている。voting 終了後、Hough 空間のヒストグラムの極大点抽出処理を実行し、画像の特徴である直線を抽出する。従って、voting 処理から極大点検出処理まで含めた Hough 変換の高速化が必要である。

これまで、画素空間で並列に処理を行うシステムとして、Hough 変換の定義式 (1) に代わり、投影の概念を取り入れた並列アルゴリズムを導入し、プロセッサアレイで実現した例が報告されている^{(1),(2)}。

一方、Hough パラメータ空間を並列に処理するシステムも考えられる。本稿では、Hough パラメータ空間を並列に処理する超並列ハードウェアとして CAM(連想メモリ)⁽³⁾ を採用した Hough 変換の高速化手法を提案する。

2 CAM による Hough 変換ハードウェア構成

Hough 空間メモリに CAM を用い、図 1 に示すハードウェア構成とする。ホストプロセッサは画像メモリを走査し、同時に CAM を制御している。CAM は、マスク検索機能、演算機能などを備えており、これらの機能を利用した Hough 変換処理法を実現する。CAM のワード構成を図 2 に示す。FLD0~3 までのフィールドは ROM 型の CAM で、 ρ 及び θ は交番 2 進数 (Gray code) で記録する。また FLD4~6 は RAM 型の CAM とし、最終的に voting の結果が FLD6 に、極大点判定結果が FLD5 にそれぞれ出力される。

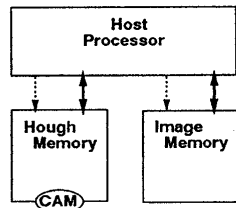


図 1: ハードウェア構成

査し、同時に CAM を制御している。CAM は、マスク検索機能、演算機能などを備えており、これらの機能を利用した Hough 変換処理法を実現する。CAM のワード構成を図 2 に示す。FLD0~3 までのフィールドは ROM 型の CAM で、 ρ 及び θ は交番 2 進数 (Gray code) で記録する。また FLD4~6 は RAM 型の CAM とし、最終的に voting の結果が FLD6 に、極大点判定結果が FLD5 にそれぞれ出力される。

FLD0	FLD1	FLD2	FLD3	FLD4	FLD5	FLD6
$\cos \theta$	$\sin \theta$	θ	ρ	$x \cos \theta + y \sin \theta - \rho$	$x \cos \theta - \rho$	BIN
(ROM)			GrayCode(ROM)			
$\cos \theta_0$	$\sin \theta_0$	0	ρ_0			
$\cos \theta_0$	$\sin \theta_0$	0	ρ_1			
$\cos \theta_0$	$\sin \theta_0$	0	ρ_2			
...			
$\cos \theta_0$	$\sin \theta_0$	0	ρ_{N-1}			
$\cos \theta_1$	$\sin \theta_1$	1	ρ_0			
$\cos \theta_1$	$\sin \theta_1$	1	ρ_1			
$\cos \theta_1$	$\sin \theta_1$	1	ρ_2			
...			
$\cos \theta_1$	$\sin \theta_1$	1	ρ_{N-1}			
...			
$\cos \theta_{N-1}$	$\sin \theta_{N-1}$	$N-1$	ρ_0			
$\cos \theta_{N-1}$	$\sin \theta_{N-1}$	$N-1$	ρ_1			
$\cos \theta_{N-1}$	$\sin \theta_{N-1}$	$N-1$	ρ_2			
...			
$\cos \theta_{N-1}$	$\sin \theta_{N-1}$	$N-1$	ρ_{N-1}			

図 2: CAM のワード構成

3 CAM を用いた Hough 変換処理法

3.1 voting 処理

CAM の 1 ワードは、Hough 空間の 1 座標点、即ち画像上での 1 直線に 1 対 1 対応させる。各 CAM は演算機能を用いて、現在処理中の画素とその CAM の担当する直線との距離をそれぞれ並列に計算する。距離の演算は $x \cos \theta + y \sin \theta - \rho$ であるが、ホストプロセッサによる画像の走査に同期させて、 x 走査のときは $\cos \theta$ を、 y 走査のときは $\sin \theta$ をそれぞれ加算し求める。距離演算後、voting 処理を行う。

実際の CAM の動作は、以下の通りに行われる。

1. ρ を交番 2 進数から 2 進数に変換、 $-\rho$ を FLD4,5 に転送し voting する
2. FLD4 に $\cos \theta$ を加算 (X 走査)、voting する
3. X 走査終了時、FLD5 に $\sin \theta$ を加算する
更に FLD5 を FLD4 に転送 (Y 走査)、voting する
4. 2,3 を全画像に対し終了するまで繰り返す

本処理法における voting 処理は、距離が 0 であるワードに対し、そのワードの BIN (FLD6) の値を +1 する。

図 3 に示すような幅 (2ϵ) を持った直線への voting により、量子化雑音によるピーク値の低下を防ぐことができる。CAM を用いた本処理法においては、ある値 (ϵ) 以下である距離を持つワードを選択し voting することで容易に実現可能である。例えば、距離 (FLD4) が整数部 4bit、小数部 4bit の 8bit であるとし、上位 5bit がすべて 0 またはすべて 1 である数は、 $-\frac{8}{16} \leq FLD4 \leq \frac{7}{16}$ の範囲に限定され、幅 1 の直線が選択できる。また隣接する範囲の点を -1 し、疑似極大点を除去する Hough 変換も容易に実現可能である。

3.2 極大点検出処理

Hough 空間を分割した各局所領域において最大値検索を行い、その検出点を極大点とみなす、極大点検出

*Highly Parallel Hardware Algorithm for Hough-Transform on CAM.
†Mamoru NAKANISHI, Yuichi FUJINO, Takeshi OGURA
‡NTT LSI Laboratories

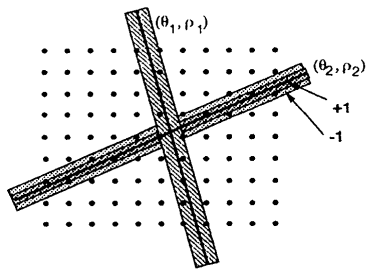


図3: 幅を持つ直線への voting

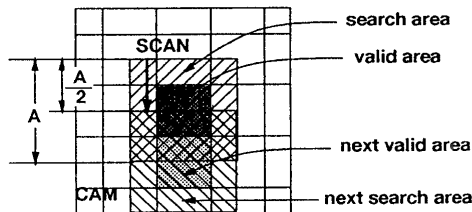


図4: CAM の分割極大値検出処理

処理をCAMで実現した。CAMによる最大値検索処理は、検出対象フィールドのビット長にのみ比例した処理時間で高速に行うことができる。

図4に示すように、順次最大値検出処理の対象であるCAMのsearch areaを走査する。その検出結果がある閾値より大きく、かつ、valid areaに存在した場合、その点を極大点と決定し、CAMに記憶する。valid areaは、search areaの1/2のサイズである。このsearch area走査時の移動量を、valid areaサイズと同じにすることで、連続したvalid areaを扱うことを可能とする。

局所領域の大きさは、目的とする分解能に応じて決定する。例えば、Hough空間のサイズ: 256、 θ 方向の分解能: 3° の場合、search area: 8×8 、valid area: 4×4 の大きさとすればよい。

CAMにおいて2次元局所閉領域 (search area & valid area) を選択するには、その領域のアドレスの条件をマスクデータとして、設定する必要がある。通常の2進数を用いたアドレッシングにおいては、閉領域を1つのマスクで表すことができないが、交番2進数によるアドレッシングを用いると、閉領域を1つのマスクで表すことが可能となる。図5に、交番2進数を使った閉領域のマスクアドレスの例を示す。この領域の位置指定は領域サイズの1/2間隔のグリッド位置に限られるが、本極大点検出処理ではsearch areaをその1/2サイズの走査が行われるため、この交番2進指定法で十分である。また、交番2進数から2進数へは容易に変換可能であるため、 θ, ρ を交番2進数でCAMに格納し、容量を削減している。

4 処理速度

voting処理は、1回のCAMアクセスに対し kN 点のワードが ± 1 されるため、実質 kN 並列に処理が行われていることになる。但し、 k は直線の幅などにより与えられる定数である。 N^2 画素を順に走査する時間は、

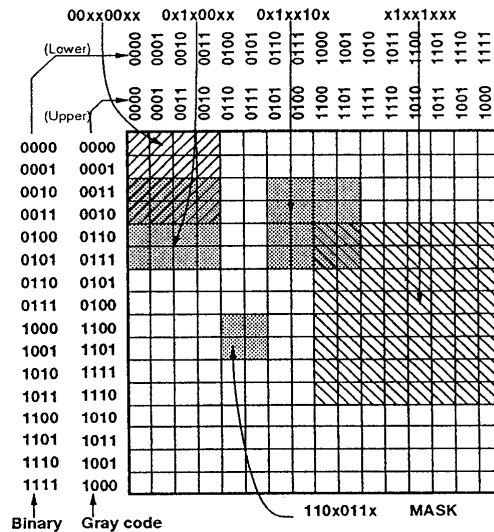


図5: 交番2進数を用いたマスクアドレス例

CAMの加算時間 $\times N^2$ と、Hough変換の対象点数(画素値 $\neq 0$ の点数)回のvoting時間の和となり、 256×256 の画像の場合、0.1秒程度である。

1局所領域の極大値検出処理は、search area用マスクアドレスの設定、最大値検出、valid area用マスクアドレスの設定、検出結果格納の順で十数サイクルで実行でき、全空間に対し、数ミリ秒である。

5 まとめ

Hough変換による線形認識処理において、Houghパラメータ空間のメモリにCAMを用いた処理方式の検討を行った。Hough空間の各座標点にCAMのワードを割り当て、サイン曲線上にあるすべての点の同時votingを可能にした。また、交番2進数をアドレスする局所領域指定法を用いた、分割型極大点検出処理法を提案した。また、直線検出精度を向上するための各種Hough変換もCAMを用いた本処理法では効率良く実行することができる。

今後の課題として、他の実現法との処理時間比較、Hough変換の性能、精度の評価及び、votingの処理速度向上が挙げられる。

参考文献

- (1) A.L.Fisher, P.T.Highnam, "Computing the Hough Transform on a Scan Line Array Processor", IEEE Workshop on Computer Architecture for Pattern Analysis and Machine Intelligence, pp.83-87, 1987.
- (2) R.E.Cypher, J.L.C.Sanz, I.Snyder, "The Hough Transform Has $O(N)$ Complexity On SIMD $N \times N$ Mesh Array Architectures", IEEE Workshop on Computer Architecture for Pattern Analysis and Machine Intelligence, pp.115-121, 1987.
- (3) 小倉, 山田, "連想メモリ", 情報処理 vol.27, No.6, pp.593-600. 1986.