

超並列型2次元セルラーオートマトンCAM²を用いた Discrete-Time CNN

5M-5

池永 剛 小倉 武

NTTシステムエレクトニクス研究所

1 はじめに

Discrete-Time CNN(DTCNN)^[1]は、Cellular Neural Networks(CNN)^[2]を2値化、離散化したものであり、画素対応画像処理に有効な様々なテンプレートが報告されている。しかし、数十万画素といった実用サイズの画像を処理できる小型で高性能なマシンは存在しなかつた。本稿では、ボードレベルで数十万のセルラーオートマトン(CA)セルを実現可能な超並列型2次元セルラーオートマトンCAM²^[3]を用いたDTCNN処理手法を提案する。また、様々なDTCNNテンプレートに対する処理時間評価結果、DTCNNおよび他のCA処理の組み合わせによる画像処理例を示す。

2 CAM²の特徴

CAM²^[3]は、図1に示すように、集積度が極めて高いメモリ技術をベースとして実現され、各ワードを任意の演算が可能なPE(Processing element)として利用可能な連想メモリ(CAM)により超並列PEアレイを構成している。これにより、コンパクトでかつ数十万オーダの極めて多数のCAセル(=PE)をPCボード1枚に搭載可能にしている。また、CAM²は、再構成可能なFPGAから生成される命令列により制御される。よって、このFPGAを様々な書き換えることにより、単一テンプレートのDTCNNだけでなく、時間可変なテンプレートに対するDTCNN、あるいは、他のCA処理との組み合わせといった実用性の高い画像処理を行なうことができる。

3 CAM²を用いたDTCNN

3.1 DTCNNの定義

DTCNN^[1]は、次式で定義される。

$$x^c(k) = \sum_{d \in N_r(c)} a_d^c y^d(k) + \sum_{d \in N_r(c)} b_d^c u^d(k) + i^c \quad (1)$$

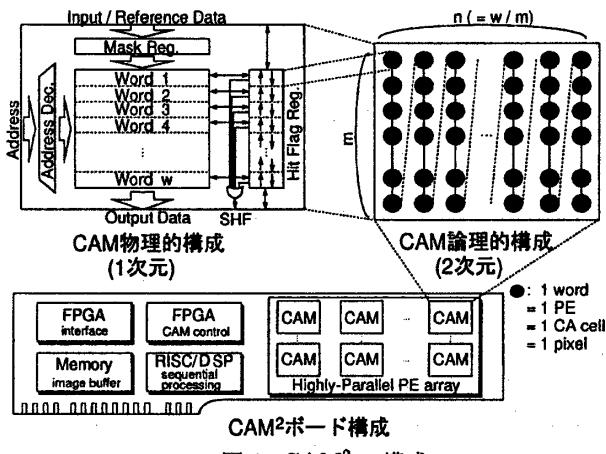
$$y^c(k) = f(x^c(k-1)) = \begin{cases} 1 & (x^c(k-1) \geq 0) \\ -1 & (x^c(k-1) < 0) \end{cases} \quad (2)$$

上式において、 x^c はセルcの状態、 y^c は出力、 u^c は入力を示す。セルの次状態は、r近傍($N_r(c)$)内のセルの入力、出力の疊み込みによって計算される。また、 y^c は、 x^c に対し閾値関数fをかけた結果である。DTCNNは、遷移規則をニューラルネットワークの概念を用いた

Discrete-time CNN using CAM².

Takeshi IKENAGA, Takeshi OGURA

NTT LSI Laboratories

図1: CAM²の構成

式(1)、(2)で定式化したCAと考えることができ、テンプレート a^c 、 b^c 、 i^c に従った演算処理を行なうことにより、CAM²を用いて処理できる。

3.2 CAM²への効率的マッピング法

CAM²での演算、データ転送は、CAM²の基本機能であるExOR等を組み合わせてビットシリアルに行なう。このため、乗算等の高度な演算が必要な式(1)(2)をそのまま実行すると処理時間を多く必要とする。よって、次の工夫により、処理の高速化を図っている。

yの1ビット符号化 (2)式により、yは“1”か“-1”をとり、正負の数値として表すと2ビット必要になるが、情報量としては1ビットしかない。よって、“1”を“1”に、“-1”を“0”に符号化することにより、yを1ビットで表現可能にしている。これにより、隣接セル間のデータ転送時間等が削減される。

テーブル参照方式による重み乗算 (1)式では、重み係数 a_d^c 、 b_d^c と y^d 、 u^d の乗算が必要であるが、 a_d^c 、 b_d^c は固定値であり、 y^d 、 u^d は限られた値しか取らないので、テーブル参照方式により $a_d^c y^d$ 、 $b_d^c u^d$ を求める。例えば、 y^d は“1”か“-1”しかとらないので、 y^d が“1”的時は a_d^c 、“-1”的時は $-a_d^c$ を書き込む。これらの処理は、CAM²のマスク検索機能(入力ポートから与える検索データとワードの内容を並列に照合し、一致したワードに対しひットフラグを立てる)、並列部分書き込み機能(ヒットフラグの立っているワードに対し、入力ポートから与えるデータを並列に書き込む)により高速に実行できる。

ダイナミックレンジに応じた累算 (1)式では、 $a_d^c y^d$ 、 $b_d^c u^d$ の累算が必要であるが、DTCNNではテンプレ

$$a = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 0 & 4 & 0 \end{bmatrix} \quad i = -1$$

図 2: 穴埋め (hole filling) のテンプレート

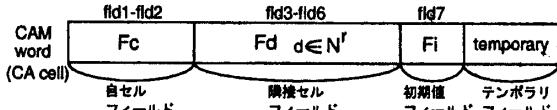


図 3: DTCNN 处理のための CAM ワードの構成

トの値によって、 x のダイナミックレンジが明確できる。このダイナミックレンジに応じた加算を行なうことにより累算時間を短縮できる。

単一ヒットフラグ出力による収束判定 DTCNN のダイナミクスがいつ終了するかは、入力データに依存する場合が多い。よって、無駄な状態更新を行なわないようするため、その収束判定が必要となる。この収束判定は、マスク検索機能を用い、 $y^c(k)$ と $y^c(k-1)$ の値がそれぞれ “1, -1” あるいは “-1, 1” のものを検索し、ヒットしているものが 0 になったかどうかで行なう。CAM² では、ヒットフラグが全て “0” になると单一ヒットフラグ出力 (SHF) が “0” になるので、この収束判定を瞬時に行なうことができる。

3.3 DTCNN の処理手順

CAM² を用いた DTCNN の処理手順を穴埋め (図 2) を例に説明する。

まず、CAM ワードのフィールド構成を図 3 に示す。各 CAM ワードは、自セルの x, y を格納する自セルフィールド F_c 、隣接セルの x, y を格納する隣接セルフィールド F_d 、 $\sum b_d^c u^d(k) + i^c$ の値を格納する初期値フィールド F_i およびテンポラリフィールドから構成される。

DTCNN 演算は次の手順に従って行なう。

1. $\sum b_d^c u^d(k) + i^c$ を計算し F_i に格納
2. y の初期化 ($y := 1$)
3. セル間データ転送により、隣接セルの y をそれぞれ対応する F_d に転送
4. (1) 式により、 X^c を算出
5. (2) 式により、 Y^c を更新
6. 収束するまで 3 ~ 5 の繰り返し

上の 1、4、5、6 の重み乗算、閾値演算、収束判定処理は、前述のようにマスク検索、並列部分書き込みを用いて行なう。穴埋め処理における x のダイナミックレンジは、“-11” から “9” なので、3 の累積は 5 ビット加算で行なう。

4 評価

CAM² の VerilogHDL 記述を用いた機能シミュレーションにより行なった評価結果を示す。CAM² のシステムクロックは 40MHz を仮定している。まず、表 1 に、512 × 512 の画素に対する DTCNN の処理時間評価結果

表 1: 1 回の状態遷移 ($k \Rightarrow k+1$) に要する処理時間

テンプレート	処理時間 (μ秒)
hole filling	14.1
connected component detector	9.5
concentric contours	14.1
shadow creator	6.0
decreasing object (8 隣接)	18.3

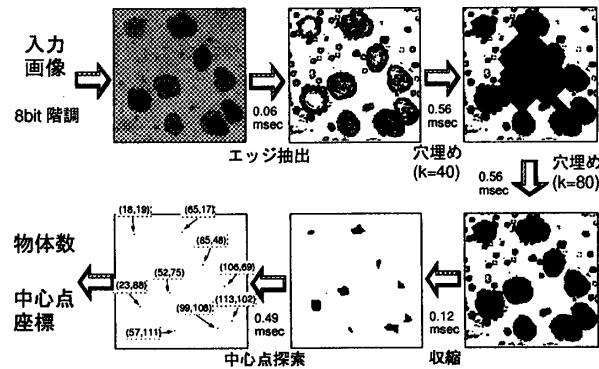


図 4: 画像処理例

果を示す。表に示すように、CAM² は、様々な DTCNN テンプレートに対する 1 回の状態遷移を 20μ秒以内で処理できる。次に、CAM² を用いた画像処理例を図 4 に示す。図に示すように、エッジ抽出 (sobel filter)、穴埋め (DTCNN)、収縮 (DTCNN)、中心点探索 (DTCNN + DTCNN 以外の定義式による CA 处理^[1]) といった処理を組み合わせることにより、8 ビット階調画像から物体数および物体の中心点座標を算出するといった画像処理を行なうことができる。総処理時間は、2msec 程度であり Video レートでの処理が可能である。

5 おわりに

本稿では、CAM² を用いた DTCNN 処理手法を提案した。CAM² のマスク検索、並列部分書き込み命令等を用いた新アルゴリズムにより、DTCNN 处理に必要な疊み込み演算、閾値演算、収束判定演算等を効率良く行なえる。また、DTCNN を他の CA 处理と組み合わせることにより多物体検出等の高度な画像処理を高速に行なえることを確認した。CAM² は、DTCNN 等を用いた様々な実時間画素対応画像処理システム実現に威力を発揮すると考えられる。

参考文献

1. H. Harrer, et al, "Skeletonization: A New Application for Discrete-Time Cellular Neural Networks," Proc. of the ISCAS'92 (1992)
2. L. O. Chua, et al, "Cellular Neural Networks: Theory," IEEE Trans. Circuits and Systems, vol. CAS-35 (1988)
3. 池永、小倉: 超並列型 2 次元セルラー・オートマトン:CAM²、信学技法 CPSY96-15 (1996)