

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24500287

研究課題名(和文)隣接結合セルによる計算原理とシステム化

研究課題名(英文)Computational principle using cellular architecture system and its implementation

研究代表者

藤田 智弘 (FUJITA, Tomohiro)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：40340492

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：隣接結合セルによる計算パラダイム(セルラーオートマトン, セルラーニューラルネットワーク, モルフォロジなど)を包括的に処理するハードウェアの実装と応用, そのためのアルゴリズムまでを統合して扱い, 次世代型の情報処理パラダイムの基盤構築を行った. 得られた成果として, セルオートマトンによる動的輪郭抽出のリアルタイム処理, ハードウェアによる隣接結合セルによる計算処理の専用マシンの開発とFPGAによる実装, モルフォロジを用いた画像改竄検知や画像圧縮があげられる.

研究成果の概要(英文)：In this study we developed the computational system based on the cellular architecture.

The cellular architecture is the category of computational models which are based on cellular architecture. Cellular Automaton (CA), Cellular Neural Network (CNN), and mathematical morphology are categorized this computational model. The common feature of this model is that the cells are locally connected and evolve their states by the states of their neighbor cells.

We progressed our research from three categories: algorithm, hardware architecture, and application. Our achievements are as follows. Active contour algorithm is developed based on CA, and implemented on the dedicated hardware. The real time processing was achieved. The dedicated hardware: CAM was implemented on FPGA. CAM on FPGA can easily change its capacity and configuration. That makes the evaluation of hardware algorithm capable. Mathematical morphology based image processing is developed as the application of this system.

研究分野：電子工学

キーワード：動的輪郭法 連想メモリ セルラーオートマトン セルラーニューラルネットワーク モルフォロジ

1. 研究開始当初の背景

セルオートマトン (CA), セルラーニューラルネットワーク (CNN), モルフォロジーなどに代表される計算処理に共通するのは, 格子状に配置されたセルと呼ばれる基本演算エレメントが, 隣接セルの状態により次状態へと更新される点にある. これらは隣接結合セルをもとにしたハードウェアで処理可能である. これら隣接結合セルによる計算パラダイムに関しては, フォンノイマンによる CA の研究などが古くからある. CA, CNN などがチューリングマシンと等価であることが証明されていることや, 画像処理分野などにおける応用研究から高い計算能力が期待される. また, これらの計算パラダイムはハードウェアとしては並列処理マシンとして実装でき, ノイマン型コンピュータの欠点を克服可能なアーキテクチャとして注目されている. 本研究では隣接結合セルによるこれらの計算パラダイムを包括的に処理するハードウェアの実装と応用, そのためのアルゴリズムまでを統合して扱い, 次世代型の情報処理パラダイムの基盤構築を目指す.

2. 研究の目的

セルオートマトン (CA), セルラーニューラルネットワーク (CNN), モルフォロジーなど隣接結合セルによる, 新しい計算原理の構築とシステム化を目指す. まず, CA, CNN など複数の処理を結合させ融合させることで可能となる情報処理手法を探求する. また, これらを包括的に実装可能なハードウェアプラットフォームの開発を行う. 本研究では隣接結合セルによるこれらの計算パラダイムを包括的に処理するハードウェアの実装と応用, そのためのアルゴリズムまでを統合して扱い, 次世代型の情報処理パラダイムの基盤構築を目指す.

本申請では, 隣接結合セルをもとにした計算パラダイムを複合的な処理のためのアルゴリズムからハードソフトを含めたシステム化までを扱う. このために, 「アルゴリズム」, 「ハードウェアアーキテクチャ」, 「アプリケーション」の3つを柱に互いに連携をとりながら研究を進めた.

このような隣接結合セルによる計算パラダイムを複合的に処理することで可能となる情報処理技術によって, 新たな応用分野を切り拓く. また, ハードウェア化による並列処理を実現することで, これまでのノイマン型コンピュータの限界を打ち破ることを目指した. さらに, 画像処理以外の分野への応用を探る点でも独自性を求めた.

3. 研究の方法

本研究の特色は, 単なるアルゴリズムとアプリケーションの開発ではなく, ハードウェアを含むシステムを提案することにある. ここでハードウェアとして研究分担者の一人が開発した CAM² を念頭に研究を推進する.

CAM² は Contents Addressable Memory (CAM) をベースにしている. 各メモリセルはプロセッサエレメント (PE) とみなすことができ, SIMD (Single Instruction Multiple Data) として動作する並列マシンとみなすことができる. 各 PE を 2 次元に隣接結合されたセルとしてマッピングすると, 隣接結合セルによる計算パラダイムを並列に高速に処理することができる. すなわち, 隣接結合セルの計算パラダイムのための専用ハードウェアである.

CAM² の使用を前提に本課題では (1) アルゴリズム, (2) ハードウェアアーキテクチャ (3) アプリケーションの3つの観点から研究を行っている. 以下, それぞれの方法を記す.

(1) アルゴリズム

CNN, CA といった計算原理を, どのようなアプリケーションでどのように使い分けていけば良いのか検討した. ここでは画像処理の分野における輪郭抽出技術の一つ動的輪郭法を取り上げ, ケーススタディとした. 動画像における物体追跡のアプリケーションを意識しリアルタイム処理を追求した.

(2) ハードウェアアーキテクチャ

CA, CNN などの単一処理をレイヤーという概念でとらえ, 複数の処理が切り替え可能なマルチレイヤー型のシステムを検討した. 課題として (1) アルゴリズムで検討される物体抽出, 追跡処理の実時間処理に取り組んだ. コンピュータシミュレーションによる実行速度の見積もり, 現有する CAM² チップ搭載ボードを用いた評価実験の二つの方法を通して, 問題点の抽出さらにアーキテクチャの検討を行った.

(3) アプリケーション

隣接結合セルによる包括的処理ハードウェア上で処理するアプリケーションは, 現在の逐次処理型ノイマン型ハードウェアでは, 実現が困難なものを選択した. 特に画像処理は必須のアルゴリズムであり, 各画素とその近傍画素を並列に処理するモルフォロジカルアルゴリズムは将来性も大きく, 研究としての新規性も高い. 本研究ではこのアルゴリズムをベースに画像の特徴量を抽出するパターンスペクトラム処理やウェーブレット変換を実現した. また, 画像処理実装で得た知見を基に, 計算モデルにゆらぎを含ませるハードウェアの開発とその応用の提案を行った.

4. 研究成果

研究の方法でも述べた通り, (1) アルゴリズム, (2) ハードウェアアーキテクチャ (3) アプリケーションの三つの観点ごとに成果をまとめる.

(1) アルゴリズム

まず動的輪郭抽出 (Snake アルゴリズム)

を CNN により CAM² 上に実装した。実装のもととなるアルゴリズムはすでに先行研究として Pixel Level Snakes の名で提案されているものをういた。CAM² 上の実装におけるアルゴリズムの最適化を目指す手始めとして、もとの提案そのままに CNN をベースとした実装を行った。アルゴリズムは六つのブロックからなり、それぞれを実装している。結果、輪郭抽出の処理時間が 493ms となった。これは標準ビデオレート 33ms よりも大きく、リアルタイム処理には適さないことがわかった。原因は CNN の処理中に加算、乗算が多数存在しているためである。CAM² はこれらの処理には比較的大きなタイムステップを必要とする。動的輪郭法のように多くの処理ブロックを CNN で構成することの限界が見えた。また、ブロック中には拡散方程式をモデルとした処理が含まれており、処理は隣接セルへと順次伝播させる必要があるため、画像サイズに依存することもわかった。

次の試みは CNN による処理を CA に置き換えることである。CA は自セルと周辺パターンから、定められたルールに従い、次状態を定める。周辺を含むパターン検索にマッチしたものに対してルールに従い次状態を遷移させればよい。CA は CAM² への実装に最も適合する。新たな実装では、輪郭を動かすためのルールを五つと輪郭を適正に保つための追加のルール二つという簡素なルール群で実装をおこなった。動的輪郭法として十分な性能を有することが確認できた。

動的輪郭法は輪郭の物体への進展距離（ピクセル数）により処理時間が依存する。これは輪郭の動的な変形が、1 ピクセルずつ隣に移動することで進むためである。これは画像サイズが大きくなりピクセル数が増えるほど、移動しなければいけないピクセル数が増え、このアルゴリズムの処理時間が増えることを意味する。この問題を解決するために多数の輪郭を初期配置する方法を提案した。この方法では、輪郭の伸展に従い隣接する輪郭が衝突し、これらがマージされるようにルールを工夫している。個々の輪郭は衝突までの距離を伸展すればよいだけである。微小輪郭をアレイ状に敷き詰めた初期状態からアルゴリズムを開始することで、サイズ依存がなくなることを実験で確かめられた。なお、処理に関しては、単一の輪郭から始める場合と比べてもオーバーヘッドは存在しない。この方法により、並列化することのメリット-サイズに依存せずに処理が行われること-を活かすことができる。

最後に CA を基にした動的輪郭法アルゴリズムを CAM² 上に実装した。複数の輪郭を初期配置する方法により、30ms のフレームレートに対してリアルタイム処理が可能なが確認できた。

以上、動的輪郭法の実装を行い CAM² 上でのリアルタイム処理へ、道筋をつけたことが

本研究の成果である。計算原理を使い分けるという観点では CAM² を前提とした場合、その親和性から CA を利用することが処理速度の向上につながる。CNN の処理の多くは CA のルールベースの処理へ置き換えることができる。アルゴリズムの設計には極力そのような置き換えが必要である。また、隣接セルへと順次状態の変化が伝播するような処理では、並列化のメリットが享受できないことも分かった。今回の複数の輪郭を用意したアルゴリズムのように何らかの工夫が必要である。

(2) ハードウェアアーキテクチャ

検討した各種アルゴリズムを現有する CAM² チップ搭載ボードへ実装、評価する取組みを通じ、CAM² チップの構成が固定化されていることによる現有ハードウェアアーキテクチャの限界を明らかにした。この限界を打破するため、FPGA による次世代 CAM² チップの検討を行い、CAM² on FPGA の IP 化を実現するとともに、各種アルゴリズム、アプリケーションを実装、評価可能なハードウェアプラットフォームを開発した。

(3) アプリケーション

研究期間を通して実装を行ったアプリケーションごとにその成果を述べる。

モルフォロジカルパターンスペクトラム

CAM² チップが搭載されたシステムを用いて提案アルゴリズムの処理時間を計測するとともに、C 言語ベースのアセンブラシミュレータを利用してパターンスペクトラムを実装した。実装アルゴリズムはパターンスペクトラムと AES 暗号化である。算出したパターンスペクトラムを暗号化した上で画像データのヘッダに格納することで、この処理を画像の改ざん検知に用いることができる。その効果を確認した結果、改善検知においては画素全体の 0.0015% の改ざんも検知することができた。また、ノイズが混入された画像に対してもノイズと改ざんを上手く分離できることを確認した。既存のモバイルプロセッサと比較して 15 倍の消費電力あたりのスループットを達成した。本成果は映像メディア処理シンポジウムにおいてベストポスター賞の受賞に繋がった。

画像の方向性を加味したモルフォロジカルウェーブレット変換

一般に画像データをシステムで扱う場合には、画像サイズとその画質のトレードオフが重要となる。これは提案している隣接結合セルハードウェアでも同様である。そこで、画質を保ちつつも圧縮性能を上げるために、画像自体が固有に保持する方向性を加味したデータ圧縮方法を提案、及び実装した。方向性の検出については画像をブロック単位で区切り、画素値の勾配から適した方向パタ

ーンを当てはめている．実装に関しては，アルゴリズムの検証を主に行うため，パソコンを用いてC言語ベースでその効果を確認した．その結果通常のもルフォロジカルウェーブレット変換と比較して約 82%データを圧縮する事ができた．

ハードウェアゆらぎを出力する連想メモリ

隣接結合セルハードウェアでは，画像処理実装の次に，社会システムの実装を目的としている．そこで社会システムの様なランダム性を含むモデルに対して，CAM²チップが搭載されたシステムを適用するためにLSIのぼらつきを利用してゆらぎを出力できる連想メモリを開発した．連想メモリは3値を扱うことのできるものをベースとした．このメモリは，比較処理の際にデータを格納しているレジスタとそれにマスクをかけることのできるレジスタを持っている．そして，比較処理には排他的論理和の否定を利用する．この論理回路を数珠繋ぎにすることでリングオシレータを構成し，LSIのぼらつきを抽出することに成功した．FPGAを用いて実装を行った結果，チップ内，チップ間のそれぞれぼらつきがあることを確認し，これを利用できることを確認した．またこの成果はVDECにおけるIPアイデアの受賞に繋がった．

5．主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

T. Kumaki, Y. Tanito, T. Tokunaga, T. Fujita and T. Ogura, "Adaptive multi-directional max-plus algebra-based morphological wavelet transform," *Journal of Signal Processing*, Vol.20, No.1, pp. 9-19, Jan., 2016, 査読あり．

Sho Sawada, Tomohiro FUJITA, Kaihei Iwanaga, Takeshi Kumaki, Mamoru Nakanishi, and Takeshi Ogura, "A Method Using CA-Based Pixel Level Snakes for Multiple Contour Expansion," *J. of Signal Processing*, Vol. 18, No. 4, pp. 221-224, July, 2014, 査読あり．

Takeshi Kumaki, Tomohiro Fujita, Mamoru Nakanishi, and Takeshi Ogura, "Morphological pattern spectrum and block cipher processing based image-manipulation detection," *Nonlinear Theory and Its Applications*, IEICE, Vol.4, No.4, pp. 400-418, Oct., 2013, 査読あり．

[学会発表](計11件)

Shinya Kimura, Takuma Watanabe, Ryohei Yukawa, Takeshi Kumaki, Tomohiro Fujita, and Takeshi

Ogura, "Evaluation of Ternary Content Addressable Memory with Individuality on FPGA," *Proc. of 2016 RISP Int'l Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing*, pp. 375-378, Honolulu, USA, March 8, 2016.

Shogo Nishida, Takeshi Kumaki, Tomohiro Fujita, and Takeshi Ogura, "Implementation of Cellular Automata-based Pixel-Level Snakes on CAM2," *2016 RISP Int'l Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing*, pp. 85-88, Honolulu, USA, March 7, 2016.

Yusuke Hioki, Takeshi Kumaki, Tomohiro Fujita and Takeshi Ogura, "Cellular Hardware Platform:CAM² on FPGA," *2015 Int'l Symp. On Nonlinear Theory and its Applications*, pp.868-871, Hong Kong, China, Dec. 4, 2015.

Ryohei Yukawa, Takeshi Kumaki, Tomohiro Fujita and Takeshi Ogura, "Ternary Content Addressable Memory with Individuality on FPGA," *2015 Int'l Symp. on Nonlinear Theory and its Applications*, pp.652-655, Hong Kong, China, Dec. 3, 2015.

Tomohiro FUJITA, Shouta Mizoguchi, Takeshi Kumaki, and Takeshi Ogura, "A Method of Noise Generation with Cellular Automata for DT-CNN Annealing," *2014 Int'l Symp. on Nonlinear Theory and its Applications*, pp.573-576, Luzern, Swiss, Sept. 17, 2014.

Tomohiro Fujita, Syo Sawada, Kaihei Iwanaga, Takeshi Kumaki, Mamoru Nakanishi, and Takeshi Ogura, "Cellular Automaton Based Pixel-Level Snakes," *12th IEEE Int'l NEWCAS Conf.*, pp. 393-396, Trois-Rivieres, Canada, Jun 25, 2014

Tatsuki Tokunaga, Yuri Tanito, Takeshi Kumaki, Tomohiro Fujita, and Takeshi Ogura, "L2 Decomposition of Adaptive Directional Morphological Wavelet Transform," *2014 RISP Int'l Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing*, pp. 137-140, Honolulu, USA, March 1, 2014.

Sho Sawada, Tomohiro FUJITA, Kaihei Iwanaga, Takeshi Kumaki, Mamoru Nakanishi, and Takeshi Ogura, "Multiple contour expansion method by CA based pixel level snakes," *2014 RISP Int'l Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing*, pp. 133-136, Honolulu, USA, March 1, 2014.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤田 智弘 (FUJITA, Tomohiro)
立命館大学理工学部・教授
研究者番号：40340492

(2) 研究分担者

小倉 武 (OGURA, Takeshi)
立命館大学理工学部・教授
研究者番号：10388126

熊木 武志 (KUMAKI, Takeshi)
立命館大学理工学部・任期制講師
研究者番号：60452596