

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 9 月 5 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26280017

研究課題名(和文) 粒子群最適化(PSO)をベースとした高速組み込みDSPに関する研究

研究課題名(英文) A Research on High-Speed Embedded DSP based on PSO

研究代表者

馬場 孝明 (Baba, Takaaki)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：30367172

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究計画開発したPSOハードウェアエンジンの特徴は、粒子の収束状況に応じて複数のPSOアルゴリズムを適切に切替える「アダプティブ粒子情報更新モジュール」、パイプライン化に加えサブプロセッサを導入した「パイプライン式目的関数処理エンジン」、クロック信号に同期せず、任意のタイミングでデータを送信することで処理の並列化を図る「非同期制御ユニット」などを導入した点である。演算処理速度として、アーキテクチャ全体では10倍以上の向上を達成できた。

研究成果の概要(英文)：A high-speed PSO (Particle Swarm Optimization) hardware engine is proposed in this research. The proposed PSO hardware engine have three distinctive features which are adaptive particle calculation block (APCB), pipeline fitness calculation engine (PFCE) and asynchronous control unit (ACU). The APCB can selectively switch the multiple PSO algorithms based on the convergence statuses. The PFCE adopts a proposed sub-processor to reduce the calculation time with pipeline technology. The ACU can drastically improve the performance of each module for reducing the unnecessary waiting time. As the result, the proposed hardware engine can achieve 10 times processing speed compared the conventional approach.

研究分野：高速信号処理

キーワード：粒子群最適化 計算機システム 信号処理

1. 研究開始当初の背景

従来の PC や専用 DSP などの逐次型信号処理方式では不可能な高速信号処理を種々の応用分野で実現するために、粒子群最適化(PSO)アルゴリズムに基づいたリコンフィギュラブル(再構成可能)高速 PSO アーキテクチャの構築技術に関する研究を行う。自動車エンジンの完全燃焼モデルや原子炉の核反応等では、ミリ・マイクロ秒単位の超高速リアルタイム制御が要求され、スーパーコンピュータほどの演算速度が必要となり、これらを組み込みシステムとして導入するのは極めて困難である。

2. 研究の目的

本研究の目的はこの困難を解決する手段を開発する事である。すなわち、本研究では、LSI チップとして実装が出来、最適制御に対し高い求解性能を有する PSO アルゴリズムを基にして、スーパーコンピュータ相当の超高速演算アルゴリズムの開発と種々の応用分野に柔軟に対応できる汎用性を備えた(PSO 専用)リコンフィギュラブル DSP の設計方式を確立する。

3. 研究の方法

次世代の高速リアルタイム最適制御システムの達成には、現行逐次型 PC の処理性能(Core i7:約 220キガ FLOPS)と比較して30000倍以上の性能向上を図る必要があり、これまで研究代表者が開発してきた PSO ハードウェア技術と比較して、さらに 10 倍の処理速度向上が求められる。また、PSO ハードウェアを種々のシステムへ応用展開するには、その汎用化が不可欠となるが、汎用性の実現には処理速度を逆に低下させる可能性が高い。よって、従来技術の延長だけでは、PSO ハードウェアのさらなる高速化を図りつつ汎用性を達成することは極めて困難である。この問題を解決するために、まず、研究項目(1)~(4)では高速 PSO アーキテクチャを構築する。具体的なアーキテクチャの高速化としては、図1に示すようにアダプティブ粒子情報更新モジュール、非同期制御ユニット、パイプライン式目的関数処理エンジンを新規に開発し大幅な処理速度向上を図る。また、

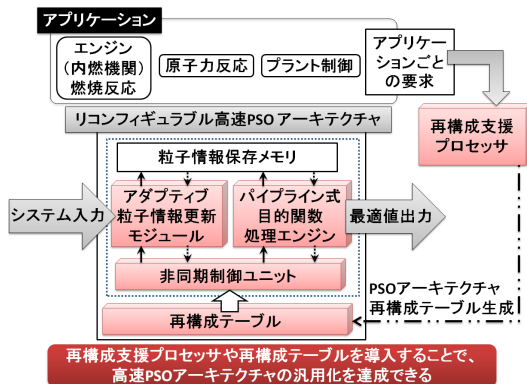


図1: 高速 PSO アーキテクチャ

研究項目(5)~(6)の取り組みは、再構成支援プロセッサを介してアプリケーションの要求を再構成テーブルに伝達できる新規なアーキテクチャを導入することで、処理性能を保持しつつ汎用性を達成する方式の研究並びに1チップLSI(DSP)の開発である。

4. 研究成果

研究項目(1) 粒子情報更新モジュールの高速化及び汎用化: 粒子情報更新モジュールは、PSO アルゴリズムに従い粒子を最適解へと収束させる役割を備えており、全体のアーキテクチャにおいて性能面で最も大きな影響を与える処理である。高速化には粒子の収束速度を向上させる必要があり、特に多種類の PSO を同時に動作させる手法が効率的な方式として証明されている。しかし、従来の固定型粒子情報更新モジュールでは、単一な PSO アルゴリズムで構成され、十分な収束速度を達成していない。加えて、種々のシステムに対し、より優れた最適解を提供するためには、多様な収束のトポロジーが必要になる。この問題を解決する為の試みとして研究代表者らは、10種類の PSO を一元化し、選択係数という概念を導入することで応用システムに最も適した PSO を選定するアルゴリズムの実装化を行い、PSO アーキテクチャ全体の処理速度を向上させた。これをさらに発展させ、10種類の PSO アルゴリズムを粒子群の収束状況に応じて同時に動作させ、並びを適切に切替えるアダプティブアルゴリズムを開発する(図2)。これは、実社会において異なる役割を持つ集団(例、技術者、教員、警察など)が、それぞれの適した場で時には他集団と協力しながら任務を遂行するような社会構成を模式したアルゴリズムで、異なる働きを持つ複数の PSO を粒子群の収束状況に応じて、適宜、切替えるものである。10種類の PSO アルゴリズムを一元化し、粒子群の収束状況に応じて同時に動作させ、アルゴリズムを適切に切替えるアダプティブ多粒子群最適化(AMSPSO)を開発した。適切な PSO の選択による最適な収束過程の実現により、どのような状況でも最適な探索を達成でき、収束速度としても従来と比較して2倍から3倍までに向上できた。

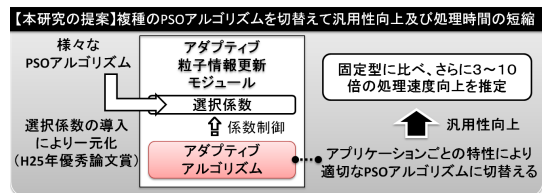


図2: 粒子情報更新モジュールの高速化及び汎用化

研究項目(2) 高性能パイプライン式目的関数処理エンジンの開発: 目的関数は三角、対数、指数関数などを含んだ複雑なシステムへ

の応用が想定されるため、プログラマブルCORDICを新規に導入した(図3)。ただし、従来型CORDICハードウェアは、三角、対数、指数関数などの数学関数を精密に計算するので、16クロックサイクルの計算時間が不可欠となる。これは全体のアーキテクチャにおいて性能面で最も大きな影響を与える。この問題を解決する手段として、従来のCORDICアルゴリズムを改良し、高速CORDICアルゴリズムを提案することで、従来のCORDICアルゴリズムと比較して、計算精度を保持しつつ計算時間を約70%短縮できた(表1)。以上の研究成果によって、PSOアーキテクチャ全体の処理速度を平均約3倍までに向上した(表2)。

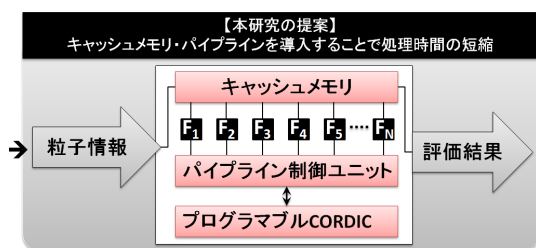


図3：パイプライン式目的関数処理エンジン

表1：パイプライン式目的関数処理エンジン

	Conventional Hardware [1]	Proposed Hardware	Improved Radio
Coarse rotation	—	5.381 ns	—
Precise rotation	—	7.277 ns	—
Max. iteration	32	7	78.1%
Mean iteration	32	5.09	84.1%
Avg. calculation time	640 ns	160 ns	400%

表2：PSOアーキテクチャ全体の処理速度

	Particle number	Iteration number	Logic elements	Calculation time for one particle	Total calculation time
Conventional hardware	10	50	3972	76.98ns	38.49μs
Proposed hardware	10	50	4167	34.83ns	17.41μs

研究項目(3)非同期制御ユニットの開発：前年度で開発した各モジュールを最大パフォーマンスで稼働させるため、非同期制御ユニットを導入し、高速PSOアーキテクチャを完成した。非同期制御ユニットの開発にあたり、これまでの同期式回路の設計資産を活かしつつ非同期式回路の利点可以享受できるGALS(Globally Asynchronous Locally Synchronous)とGSLA(Globally Synchronous Locally Asynchronous)の2種類の方式について検討した。汎用性と高速性を両立するため、非同期制御ユニットの構成はGALSを採用した。非同期方式の導入で前年度と比較してさらに1.5倍の処理速度向上を推測した。

研究項目(4)高速PSOアーキテクチャのFPGAボードへの実装評価：65nmプロセスのLSIチップ試作を円滑に推進する為に、ほぼ同じ処理速度の最先端FPGA上に完成した高速PSOアーキテクチャを実装し、その性能評価を行った。しかし、最先端FPGA(14nmプ

ロセス)ボードを入手することが困難であり、代替案として、90nmプロセスのFPGAボード上に実装を行った。その結果、前年度と比較するとPSOアーキテクチャの処理速度は3倍の性能向上となった(表3)。しかし、トレードオフとして、GALSにはハンドシェイク回路を不可欠となり、前年度開発したハードウェアと比較してチップコストが約23%増加した。

表3：非同期PSOハードウェアの計算時間

	Synchronous	Asynchronous	Improvement
Calculation Time	198.4 ms	63.5 ms	312.44%
Chip Cost	4,167 LEs	5,125 LEs	-22.99%

研究項目(5)~(6)では前年度で開発した高速PSOアーキテクチャをディープラーニングと太陽光発電の予測などのシステムで実装評価を実施した。その際に、PSOアーキテクチャの根幹を成す目的関数処理エンジンの汎用性と処理速度を共に向上させることを目標にした。具体的には、90nmプロセスのFPGAボード上に実装した高速PSOアーキテクチャを太陽光発電の予測に応用展開した(図4)。その結果、PSOアーキテクチャの処理速度は前年度と比較すると更に1.5倍性能向上となった(表4)。

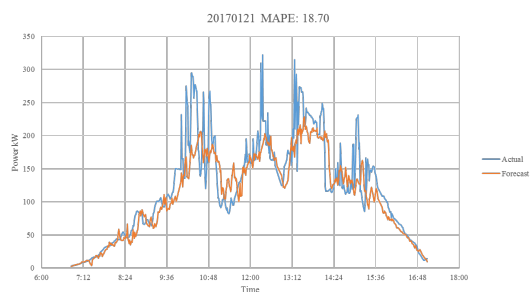


図4：太陽光発電の予測に関する結果

表4：目的関数処理エンジン

Function	Conventional CORDIC[8]	Proposed approach		
		Max Iteration	Min Iteration	Mean Iteration
$\sin(x)$	32	7	2	5.061
$\cos(x)$	32	7	2	5.061
$\tan(x)$	32	7	2	5.061
$\arcsin(x)$	32	11	3	8.916
$\arccos(x)$	32	11	3	8.916
$\arctan(x)$	32	6	3	4.580
$\sinh(x)$	32	7	2	4.655
$\cosh(x)$	32	7	2	4.655
$\tanh(x)$	32	7	2	4.655
$\exp(x)$	32	7	2	4.655
$\operatorname{arctanh}(x)$	32	7	3	5.217
$\ln(x)$	32	8	4	6.205
\sqrt{x}	32	7	3	5.531
$\operatorname{arcsinh}(x)$	32	7	3	5.428
$\operatorname{arcosh}(x)$	32	7	3	5.741

本研究計画で開発したPSOハードウェアエンジンの特徴は、粒子の収束状況に応じて複数のPSOアルゴリズムを適切に切替える「アダプティブ粒子情報更新モジュール」、パイ

プライン化に加えサブプロセッサを導入した「パイプライン式目的関数処理エンジン」クロック信号に同期せず、任意のタイミングでデータを送信することで処理の並列化を図る「非同期制御ユニット」などを導入した点である。要約すれば演算処理速度として、アーキテクチャ全体では 10 倍以上の向上を達成できた事になる。提案した PS0 ハードウェアのソフト IP 化を図る予定であり、再設計にかかる期間は 1/10 までに短縮できると考えている。この汎用性と高速性を両立しつつ、従来方式の問題点を本質的に解決した事が本研究の最大の意義である。さらに、本研究計画で研究開発したハードウェアエンジン技術をディープラーニング分野に応用することで、従来の逐次方式では実現不可能な高速信号処理が可能となり、種々のシステムへの応用展開が期待できる。すなわち、本研究計画の提案手法は既存技術を覆す独創的な方式であり、組込みシステム DSP の設計概念をも大きく変革させると予見できる。

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 5 件)

- [1] H. Tomimori, K.-T. Chen and T. Baba, “A Convolutional Neural Network with Incremental Learning” J. of Signal Processing, Vol. 21, No. 4, (pp. to be appear), July. 2017. (Accepted)
- [2] Y. Zhang, Y.-T. Liao, K.-T. Chen and T. Baba, “A Hardware Architecture of CORDIC with Improved Rotation Strategy” J. of Signal Processing, Vol. 20, No. 4, pp. 141-144, July. 2016. DOI:10.2299/jsp.20.141
- [3] K.-T. Chen, K. Fan, X. Han and T. Baba, “A CORDIC Algorithm with Improved Rotation Strategy for Embedded Applications,” J. of Industrial and Intelligent Information, Vol. 3, No. 4, pp. 274-279, Dec. 2015. DOI: 10.12720/jiii.3.4.274-279
- [4] K.-T. Chen, K. Fan, Y. Dai and T. Baba, “A Particle Swarm Optimization with Adaptive Multi-Swarm Strategy for Capacitated Vehicle Routing Problem,” EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems, Vol. 2, No. 5, pp. 1-8, Sep. 2015. DOI:10.4108/eai.17-9-2015.150285
- [5] K. Fan, K.-T. Chen, P. Wang and T. Baba, “Two-Level Pipeline Structure for Particle Swarm Optimization” J. of Signal Processing, Vol. 19, No. 4, pp. 115-118, July. 2015. DOI: 10.2299/jsp.19.115

〔学会発表〕(計 26 件)

- [1] H. Tomimori, K.-T. Chen and T. Baba, “A Convolutional Neural Network with Incremental Learning,” 2017 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (NCSP 2017), Guam, USA, pp. 9-12, Fed. 2017.
- [2] K. Zou, K.-T. Chen and T. Baba, “Performance Evaluation of Convolutional Neural Network for A Sentiment Analysis,” 2017 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (NCSP 2017), Guam, USA, pp. 13-16, Fed. 2017.
- [3] Z. Qiu, K.-T. Chen and T. Baba, “A Convolutional Neural Network Method for Solar Power Forecasting,” 2017 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (NCSP 2017), Guam, USA, pp. 393-396, Fed. 2017.
- [4] S. Wang, Y. Wu, K.-T. Chen and T. Baba, “Hardware Implementation of CORDIC with Unified Rotation Strategy,” 2017 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (NCSP 2017), Guam, USA, pp. 445-448, Fed. 2017.
- [5] Y. Wu, K.-T. Chen and T. Baba, “Optimized Parallel Architecture of Convolutional Neural Network,” 2017 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (NCSP 2017), Guam, USA, pp. 449-452, Fed. 2017.
- [6] S. Wang, K.-T. Chen and T. Baba, “A CORDIC with Unified Rotation Strategy,” 2016 IEEE International Conference Green Computing and Communications (Green-Com), Chengdu, China, pp. 744-749, Dec. 2016. DOI:10.1109/iThings-GreenCom-CPSCo-SmartData.2016.157
- [7] Y.-T. Liao, N. Akieda, K.-T. Chen and T. Baba, “A Particle Swarm Optimization with Hybrid Multi-Swarm Strategy,” 2016 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (NCSP 2016), Hawaii, USA, pp. 213-216, Mar. 2016.
- [8] C.-A. Chen, Y.-T. Liao, K.-T. Chen, T. Baba, “Rain noise detection based on Kalman Filter for Image Processing,” 2016 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (NCSP 2016), Hawaii, USA, pp. 141-144, Mar. 2016.
- [9] Y. Zheng, Y.-T. Liao, K.-T. Chen and T. Baba, “AMSPSO with a Boundary Customer Assignment for Multi-Depot Vehicle Routing Problem,” 2016 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (NCSP 2016), Hawaii, USA, pp. 367-370, Mar. 2016.
- [10] Q. Liang, Y.-T. Liao, K.-T. Chen and T. Ba

- ba, "A Decoding Method of AMSPSO for CVRPPD," 2016 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (NCSP 2016), Hawaii, USA, pp. 217-220, Mar. 2016.
- [11] Y. Zhang, Y.-T. Liao, K.-T. Chen and T. Baba, "A Hardware Architecture of CORDIC with Improved Rotation Strategy," 2016 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (NCSP 2016), Hawaii, USA, pp. 213-216, Mar. 2016.
- [12] K.-T. Chen, P. Wang, Y.-T. Liao and T. Baba, "Hardware Implementation of AMSPSO based on Asynchronous Technology," 2016 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (NCSP 2016), Hawaii, USA, pp. 307-310, Mar. 2016.
- [13] K.-T. Chen, S. Sasaki, Y.-T. Liao and T. Baba, "Hardware Implementation of CNN for Accelerating Training Procedure," 2016 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (NCSP 2016), Hawaii, USA, pp. 610-613, Mar. 2016.
- [14] 秋枝直弥, 陳奎廷, 馬場孝明, "ハイブリッド多粒子群最適化(HMSPSO)に関する研究," 第 68 回電気関係学会九州支部連合大会, pp. 549, Sep. 2015.
- [15] 佐々木俊介, 陳奎廷, 馬場孝明, "畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を用いた手書き日本語文字認識システムの試作," 第 68 回電気関係学会九州支部連合大会, pp. 348, Sep. 2015.
- [16] C.-A. Chen, J.-Y. Tong, K.-T. Chen and T. Baba, "A Mechanism of Rain Noise Reduction based on Kalman Filter for Image Processing," The 68th Joint Conference on Electrical and Electronics Engineers in Kyushu, pp. 15, Sep. 2015.
- [17] Y. Zeng, K.-T. Chen and T. Baba, "A Software Simulation of PSO with Adaptive Multi-Swarm for Multi-Depot Vehicle Routing Problem," The 68th Joint Conference on Electrical and Electronics Engineers in Kyushu, pp. 535, Sep. 2015.
- [18] P. Wang, K.-T. Chen and T. Baba, "An Asynchronous Hardware Structure of PSO with Adaptive Multi-Swarm Strategy," The 68th Joint Conference on Electrical and Electronics Engineers in Kyushu, pp. 535, Sep. 2015.
- [19] K.-T. Chen, K. Fan, X. Han and T. Baba, "A CORDIC Algorithm with Improved Rotation Strategy for Embedded Applications," 2015 4th International Conference on Industrial and Intelligent Information (ICIII 2015), Rome, Italy, May 2015.
- [20] K.-T. Chen, Y. Dai, K. Fan, T. Baba, "A Particle Swarm Optimization with Adaptive Multi-Swarm Strategy for Capacitated Vehicle Routing Problem," 1st International Conference on Industrial Networks and Intelligent Systems (INISCom), Tokyo, Japan, pp. 79-83, Mar. 2015.
DOI: 10.4108/icst.iniscom.2015.258972
- [21] K.-T. Chen, Y. Dai, K. Fan, T. Baba, "Performance Analysis of AMSPSO on Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Window," 2015 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (NCSP 2015), Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 334-337, Feb. 2015.
- [22] K. Fan, K.-T. Chen, P. Wang and T. Baba, "Two-level Pipeline Structure of Particle Swarm Optimization," 2015 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (NCSP 2015), Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 178-181, Feb. 2015.
- [23] P. Wang, K.-T. Chen, K. Fan and T. Baba, "A Hardware Implementation of Particle Swarm Optimization with Adaptive Multi-Swarm Strategy," 2015 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing (NCSP 2015), Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 182-185, Feb. 2015.
- [24] 夏雷, 林浩森, 陳奎廷, 馬場孝明, "瞬時トレーニング能力を備えた改良型ファジィニューラルネットワーク(FNN)," 第 67 回電気関係学会九州支部連合大会, pp. 376, Sep. 2014.
- [25] X. Han, K.-T. Chen, K. Fan and T. Baba, "A High-Speed CORDIC Processor for PSO Application," The 67th Joint Conference on Electrical and Electronics Engineers in Kyushu, pp. 417, Sep. 2014.
- [26] 戴毅君, 陳奎廷, 范珂, 馬場孝明, "アダプティブ探索トポロジーを備えた多粒子群最適化(MSPSO)に関する研究," 第 67 回電気関係学会九州支部連合大会, pp. 535, Sep. 2014.

〔その他〕
ホームページ
<http://www.f.waseda.jp/tbaba>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

馬場 孝明 (BABA, Takaaki)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号 : 30367172