

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26870303

研究課題名(和文)環境エネルギーで動作する組込みシステムのスケーラビリティ管理プラットフォーム

研究課題名(英文) A scalability management platform for embedded systems operated with harvested energy

研究代表者

高瀬 英希 (Takase, Hideki)

京都大学・情報学研究科・助教

研究者番号：50633690

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：太陽光や振動などの外部環境からエネルギーを取り入れて稼働する組込みシステムについて、アプリケーションの動作可能時間を最大化する基盤ソフトウェア技術の開発に取り組んだ。まず、同一命令セットヘテロジニアスマルチコアと呼ばれるプロセッサ・アーキテクチャを搭載した組込みリアルタイムシステムについて、消費エネルギー最適化のための新たなタスクスケジューリング技術を提案した。また、組込みシステムのための種々の消費電力管理手法の有効性を、実機上で定量的に評価できる環境を開発した。そして、プロセッサとFPGAを混載したプログラマブルSoCに着目し、ソフトウェア志向の協調設計環境を研究開発した。

研究成果の概要(英文)：We have been working on the research and development of infrastructure software technology to maximize the operation time of applications for embedded systems that operated with harvested energy from external environments such as sunlight or vibration. We proposed a task scheduling method for energy optimization of embedded real-time systems equipped with a processor architecture called single instruction set heterogeneous multicore. In addition, we developed an quantitatively evaluation environment for the effectiveness of various power management methods for embedded real-time systems. We further researched and developed a software oriented design and synthesis framework for programmable SoCs that consists of processor and FPGA for embedded systems.

研究分野：組込みシステム

キーワード：組込みシステム 消費エネルギー最適化 環境発電 基板ソフトウェア 協調設計

1. 研究開始当初の背景

いつでもどこでも利用可能な情報システムを実現する方策として、環境エネルギーの活用が注目されている。環境エネルギーとは、太陽光や振動といった発電要素から取り入れることができる再生可能エネルギーのことを指す。環境エネルギーは、近年ではセンサネットワーク分野のシステムへの適用が進んでいる。ただし、安定した供給が見込めないため、現状で環境エネルギーが適用できるアプリケーションは、要求負荷が一定かつ周期的なものに限られる。

組み込みシステムの消費エネルギー最適化のアプローチとして、スケーラビリティの管理が挙げられる。ここで、スケーラビリティとは、計算資源が持つ処理性能や機能にある伸縮性を意味する。既存研究としては、処理性能を伸縮させることで消費エネルギー削減を実現するシステム・アーキテクチャが提案されている。ただし、実行時にスケーラビリティを効率よく管理できる基盤ソフトウェア技術は、これまでに確立されていない。また、近年の組み込みシステム分野では再構成可能なハードウェアである FPGA の活用が注目を集めているが、協調設計において技術者に求められる習熟の難易度は高く、システムレベル設計の観点から設計生産性（設計工数に対する性能や価値の割合）の低下が課題となっている。

2. 研究の目的

外部環境からエネルギーを取り入れて動作する組み込みシステムのアプリケーションの動作時間を最大化する、基盤ソフトウェア技術を開発する。具体的には、次の研究目的を掲げる。

- (1) システムを構成する各計算資源が持つスケーラビリティを適切に管理することで、環境エネルギーを効率的に活用できる最適化技術の確立
- (2) 環境エネルギーで動作する組み込みシステムのアプリケーション開発を支援するための協調設計環境の構築

3. 研究の方法

本研究では、環境エネルギーで動作する組み込みシステムのスケーラビリティを管理できる基盤ソフトウェア技術を確立するため、下記項目について研究を実施した。

- (1) 対象システムの安定動作時間や消費エネルギーを測定できる評価環境の整備
- (2) 環境エネルギーで動作する組み込みシステムを構成する各計算資源のスケーラビリティを統合的に管理し、安定した QoS を長期的に提供する最適化技術の開発
- (3) 最適化技術の基盤ソフトウェアへの実装ならびにツールチェーン化

4. 研究成果

まず、研究目的(1)については、組み込みリアルタイムシステムの消費エネルギー最適化に関する種々の研究成果を挙げた。

- (1) 環境電力で動作する組み込みシステムにおける信頼性の向上に着目し、要求される信頼性を保証しつつ消費エネルギーを最小化するコンパイル技術を開発した。具体的には、部分的に高信頼な領域を持つオンチップメモリを活用し、高い信頼性が求められるプログラムコードやデータのみを本領域に集中的に配置することで目的を達成する。
- (2) 同一命令セットヘテロジニアス・マルチコアと呼ばれるプロセッサ・アーキテクチャに着目し、新たなタスクスケジューリング手法を提案した。本手法は、高性能コアと高電力効率コアを1対1に対応付けて構成したコアペアをタスク割当て対象として扱い、コアペア間におけるタスクスケジューリングを静的かつ動的の2段階で決定する。さらに、稼働させるコア種類およびコアへの供給電力/動作周波数を適切に制御することで、組み込みシステムの消費エネルギー最適化を実現する。
- (3) タスクのスラック時間（余裕時間）に着目し、これを効率的に収集して活用することで消費エネルギー最適化を達成するタスクスケジューリング技術を開発した。本技術では、実環境への適用を想定してプロセッサのアイドル時状態を考慮しており、静的消費エネルギーを含めた最適化が行われる。
- (4) 同一命令セットヘテロジニアスを採用した組み込みリアルタイムシステムにおいて、様々な消費電力管理手法を定量的に比較評価できる環境を開発した。システム設計者は、種々の消費電力管理手法を本評価環境上で試行することで、対象システムに最適な消費電力管理手法を適切に探索することができる。

研究目的(2)については、プロセッサとFPGAを混載したプログラマブルSoCに着目し、ソフトウェア志向の協調設計環境を研究開発した。具体的に達成した研究成果は、次の通りである。

- (1) SW/HW間の通信を効率化するための通信インタフェースを開発した。本環境の入力となる設計記述および構成記述の仕様についても詳細定義した。
- (2) 本環境を活用して、設計対象の最適なシステム構成を効率的に探索できる協調設計空間探索手法を提案した。本環境の出力するシステム合成結果の一部に対して機械学習を適用し、未合成のシステム構成における性能を高精度に見積もることができる。
- (3) 協調設計環境をツールチェーンとして

実装し、オープンソース・ソフトウェアとして公開した。本環境は無償で入手可能なツール・ライブラリ群のみで構成されており、ソフトウェア技術者は一般的なプログラミング環境で利用することができる。

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 3 件)

Hideki Takase, Gang Zeng, Lovic Gauthier, Hirotaka Kawashima, Noritoshi Atsumi, Tomohiro Tatematsu, Yoshitake Kobayashi, Tekenori Koshiro, Tohru Ishihara, Hiroyuki Tomiyama and Hiroaki Takada, "An Integrated Framework for Energy Optimization of Embedded Real-Time Applications," *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, reviewed, Vol. E97-A, No. 12, pp. 2477-2487, Dec 2014.
DOI: 10.1587/transfun.E97.A.2477

Akihiro Suda, Hideki Takase, Kazuyoshi Takagi and Naofumi Takagi, "Nested Loop Parallelization Using Polyhedral Optimization in High-Level Synthesis," *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, reviewed, Vol. E97-A, No. 12, pp. 2498-2506, Dec 2014.
DOI: 10.1587/transfun.E97.A.2498

Takuya Hatayama, Hideki Takase, Kazuyoshi Takagi and Naofumi Takagi, "An Allocation Optimization Method for Partially-reliable Scratch-pad Memory in Embedded Systems," *IPSS Transactions on System LSI Design Methodology*, reviewed, Vol. 8, No. 2, pp. 100-104, Aug 2015.
DOI: 10.2197/ipsjtsldm.8.100

[学会発表](計 15 件)

Kazumi Aono, Atsushi Iwata, Hideki Takase, Kazuyoshi Takagi and Naofumi Takagi, "An Operation Scenario Model for Energy Harvesting Embedded Systems and an Algorithm to Maximize the Operation Quality," in Proc. of 2014 IEEE 11th International Conference on Embedded Software and Systems (ICESSE2014), reviewed, pp. 554-557, Aug 2014.

Takuya Hatayama, Hideki Takase, Kazuyoshi Takagi and Naofumi Takagi,

"An Allocation Optimization Method for Partially-Reliable Instruction Scratch-Pad Memory in Embedded Systems," in Proc. of 11th International SoC Design Conference (ISOCC2014), reviewed, pp. 118-119, Nov 2014.

畑山拓也, 高瀬英希, 高木一義, 高木直史, 部分的に高信頼なスクラッチパッドメモリを持つ組み込みシステムにおける命令配置最適化, 第 27 回 回路とシステムワークショップ 論文集, 査読有り, pp. 410-415, 淡路島, 2014 年 8 月.

岩田淳, 高瀬英希, 高木一義, 高木直史, 同一命令セットヘテロジニアスマルチコアに適したリアルタイムシステム向けタスクマイグレーション手法, 情報処理学会研究報告, Vol. 2014-SLDM-168, No. 4, pp. 1-6, 2014 年 11 月.

岩田淳, 高瀬英希, 高木一義, 高木直史, 同一命令セットヘテロジニアスマルチコアのための消費エネルギーを削減するタスクスケジューリング, 情報処理学会研究報告, Vol. 2015-EMB-36, No. 33, pp. 1-6, 2015 年 3 月.

高瀬英希, 岩田淳, 高木一義, 高木直史, 同一命令セットヘテロジニアスマルチコアのコアペア間におけるタスクスケジューリング, 情報処理学会研究報告, Vol. 2015-EMB-37, No. 9, pp. 1-6, 2015 年 6 月.

谷祐輔, 畑山拓也, 高瀬英希, 高木一義, 高木直史, プログラマブル SoC のためのシステム設計環境における SW/HW インタフェース生成手法, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 115, No. 109, pp. 73-78, 2015 年 6 月.

青野和巳, 高瀬英希, 松原豊, 高木一義, 高木直史, 同一命令セットヘテロジニアスマルチコア向け消費電力管理手法の評価環境, 組み込みシステムシンポジウム 2015 論文集, 査読有り, Vol. 2015, pp. 65-73, 2015 年 10 月.

畑山拓也, 谷祐輔, 高瀬英希, 高木一義, 高木直史, プログラマブル SoC におけるリアルタイムシステム構築のためのソフトウェア指向の協調設計環境, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 115, No. 343, pp. 27-32, 2015 年 12 月.

谷祐輔, 高瀬英希, 大川猛, 高木一義, 高木直史, プログラマブル SoC のためのシステム設計環境における SW/HW 間通信方式の比較評価, 情報処理学会研究報告, Vol. 2016-SLDM-175, No. 24, pp. 1-6, 2016 年 3 月.

森智也, 高瀬英希, 高木一義, 高木直史, 自律走行ロボットにおける SLAM のプログラマブル SoC を用いた実現, 第 60 回システム制御情報学会研究発表講演会, No. 111-2, pp. 1-6, 2016 年 5 月.

Hideki Takase, Kazumi Aono, Yutaka Matsubara, Kazuyoshi Takagi and Naofumi Takagi, "An Evaluation Framework of OS-Level Power Managements for the big.LITTLE Architecture," in Proc. of the 14th IEEE International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS), reviewed, pp. 1-4, Jun 2016.

高瀬英希, 組込みシステム設計における FPGA 活用技術の最新動向と SWORDS フレームワーク, 2016 年度情報処理学会関西支部 定期講演会, 招待講演, 2016 年 12 月.

谷祐輔, 高瀬英希, 高木一義, 高木直史, 協調設計環境 SWORDS フレームワークのツールチェーン実装および設計空間探索への適用, 情報処理学会研究報告, Vol. 2017-SLDM-179, No. 18, pp. 1-6, 2017 年 3 月.

松井健太郎, 高瀬英希, 高木一義, 高木直史, コア状態を考慮したスラック収集型リアルタイムタスクスケジューリング, 情報処理学会研究報告, Vol. 2017-SLDM-179, No. 16, pp. 1-6, 2017 年 3 月.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

〔その他〕

ホームページ等
<http://www.lab3.kuis.kyoto-u.ac.jp/~takase/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高瀬 英希 (TAKASE, Hideki)
京都大学・大学院情報学研究科・助教

研究者番号 : 50633690

(2) 研究分担者
()

研究者番号 :

(3) 連携研究者
()

研究者番号 :

(4) 研究協力者
()