

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24500036

研究課題名(和文) マルチプロセッサを対象とした組込みソフトウェアの低消費電力化

研究課題名(英文) Energy optimization for multiprocessor embedded software

研究代表者

曾 剛 (ZENG, GANG)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：90456632

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：まず、組込みリアルタイムシステムのエネルギー消費を低減するための最適化ツールチェーンと低消費リアルタイムオペレーティングシステムを提案した。設計時と実行時の最適化によって、エネルギー消費を最小化した。シミュレーションと実チップで提案方法の有効性を確認した。次に、実行時間の長い大きなタスクを、複数のプロセッサで実行できる小さなタスクに分割する問題を整数計画問題として定式化し、分割したタスクを実行するプロセッサを実行時にマイグレーションするスケジューリングアルゴリズムを提案した。シミュレーションによる評価の結果、従来方法より消費エネルギーを最大10%以上削減できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：First, we have proposed a tool chain and a real time operating system for energy optimization of embedded real-time application. The framework conducts both design time and run time optimization so that the energy consumption can be minimized. Its effectiveness has been validated by simulation and experiments on a real chip. Second, to save energy for task with long execution time, we have proposed a task migration model and an ILP (Integer linear Programming) formulation to divide the large task into two small subtasks which can migrate between two processors. The simulation results demonstrated our method can save as much as 10% energy than existing methods.

研究分野：ソフトウェア

キーワード：組込みリアルタイムシステム マルチプロセッサ 省エネルギー タスクスケジューリング

1. 研究開始当初の背景

近年、組込みシステムの大規模化、複雑化により、マルチプロセッサの応用はますます重要になってきた。組込みシステムの消費エネルギー最適化を目指す研究がこれまでに数多く存在するが、その多くはハードウェア主導で構築されており、また、ソフトウェアに着目しても、殆ど理論的な研究にとどまり、RTOS上に実際の組込みソフトウェアを実装した評価は行われていない。さらに、マルチプロセッサの低消費電力化はシングルプロセッサと比較して格段に複雑になり、十分に研究されていない。現状の低消費電力化技術は必ずしもマルチプロセッサ向けの組込みソフトウェアの電力管理に適していない。

2. 研究の目的

本研究では、マルチプロセッサ用の低消費電力で動作する組込みアプリケーションソフトウェア（組込みソフトウェアと呼ぶ）を構築するための基礎理論の提案とそれを実現するための低消費電力リアルタイムオペレーティングシステム（Low Power RTOS:LP-RTOS）の開発を目的とする。申請者らが研究開発したシングルプロセッサ用の低消費電力 RTOS とその開発環境を基に、マルチプロセッサにおける、組込みソフトウェアの消費エネルギー特性の解析、マルチプロセッサの電源管理アルゴリズムの研究、とマルチプロセッサ低消費スケジューリングアルゴリズムの研究を実施することが特徴である。

3. 研究の方法

本研究計画では、主に以下のサブテーマを研究する。①組込みソフトウェアの消費エネルギー特性の解析、②マルチプロセッサの電源管理アルゴリズムの研究、③マルチプロセッサ向け RTOS の低消費電力化スケジューリングの研究。申請者らは、これまで主にシングルプロセッサを対象として、組込みシステムの低消費電力化の研究を行ってきた。本研究では、その研究成果を踏まえ、マルチプロセッサを対象として、組込みソフトウェアの低消費電力化解析方法、電源管理アルゴリズムと低消費電力化タスクスケジューリング方法を提案する。

4. 研究成果

(1) 組込みリアルタイムシステムのエネルギー消費を低減するためのフレームワークを提案した (図 1)。最適化ツールチェーンと低消費リアルタイムオペレーティングシステム (RTOS) を実装した。提案方法は、MPP (multi-performance processor) プロセッサを対象にした。異なるプロセッサ構成による性能とエネルギー消費のトレードオフを利用して、タスクチェックポイント間で最適なプロセッサ構成を実行中自動的に選択することで、タスク実行のエネルギーを削減す

る。目標アプリを静的な解析により、最適なチェックポイントを挿入する場所を抽出する。さらに、実行中の実際の実行時間情報も利用することで、エネルギーを最大限に削減するのが特徴である。ケーススタディでは、提案したツールチェーンおよび ROTS によって、エネルギーの削減とリアルタイム性を両立できていることを示した。本研究は、シミュレーション上の検証を踏まえて、実チップでの動作確認も行った (図 2)。本研究成果は、学術雑誌で発表した [雑誌論文 1]。

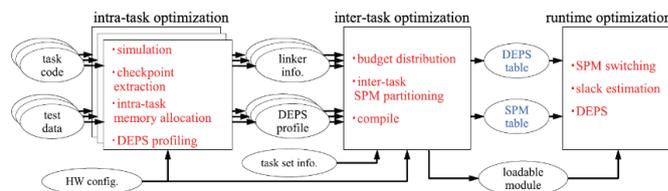


図 1 提案した低消費フレームワーク (DEPS: Dynamic Energy/Performance Scaling)。

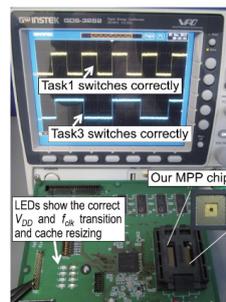


図 2 実チップでの検証実験

(2) マルチプロセッサは、低消費と高性能の両立ができることから注目されている。これまで、様々な低消費タスク割り当て方法が提案されているが、低消費タスクマイグレーションアルゴリズムは、まだ提案されていない。そこで、我々は、静的なタスク割り当て方法に基づく、タスクマイグレーションのモデルとタスク分割手法を提案した (図 3)。この方法は、静的に割り当てた大きなタスクを整数線形問題として二つのサブタスクに分割し、それらを二つのプロセッサでそれぞれの周波数と電圧で実行することによって、タスク実行のエネルギーを削減することが可能である。シミュレーションによる評価の結果、従来方法より消費エネルギーを最大 10%削減できることを確認した (図 4)。本研究成果は、国際学術雑誌と国際会議で発表した [雑誌論文 2] [学会発表 1]

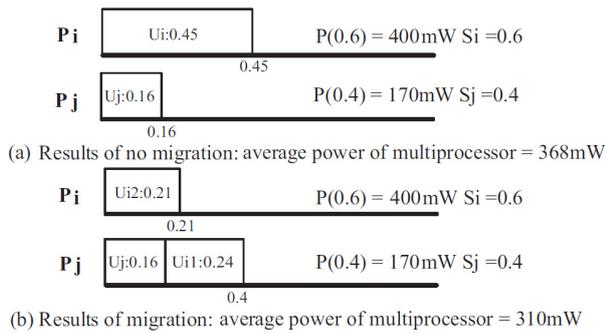


図3 タスクマイグレーションの例 (大きいタスク U_i を分割して、ふたつのプロセッサ上で実行することでエネルギーを削減する)

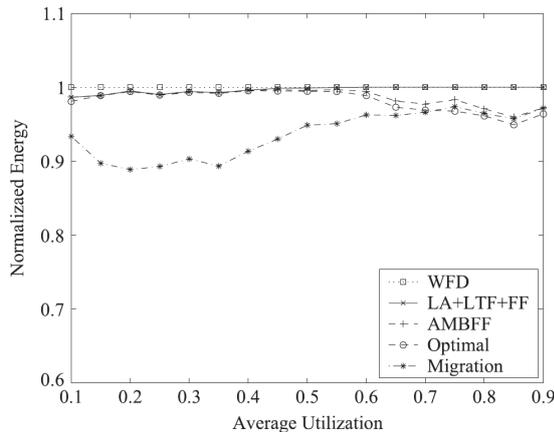


図4 XScaleにおけるマイグレーションによるエネルギー削減効果の評価 (WFD, LA+LTF+FF, AMBFF は従来方法、Optimal はマイグレーションなしの最適なタスク割当方法)

(3) 当初の研究提案書には記載していなかったが、研究を実施する過程で以下の派生した研究課題を実施した。今までのヘテロジニアスマルチプロセッサにおける分散型 mixed-criticality functions (MCF) のスケジューリングは、システムの性能しか考慮していなかった。本研究では、機能毎の時間制約の重要さとシステムの性能を同時に考慮する新しいスケジューリング方法を提案した。実験では、従来方法と比べて、提案方法は、時間制約の高いタスクのリアルタイム性を守りながら、システム性能の低下を最小限にできることを確認した。今後は、さらにエネルギー消費の最小化も考慮する予定である。本研究成果は、国際学術雑誌で採用された[雑誌論文3] [雑誌論文4]。

(4) 同一命令セットヘテロジニアスマルチコアを採用した組込みリアルタイムシステムにおいて、消費電力管理手法を実機上で評価する手法を提案した。同一命令セットヘテロジニアスマルチコアとは、コアと高電力効率コアを排他的に動作させて性能向上と消費電力削減の両立を狙うプロセッサアーキテ

クチャである。本アーキテクチャを搭載した組込みボードにおいて、性質の異なるタスクセットを対象に複数の消費電力管理手法を適用し、リアルタイム性制約下で消費電力を評価することで、提案手法の有用性を示した。本研究成果は、国内シンポジウムで発表し、学生奨励賞を受賞した[学会発表5]。

(5) 室内での利用を想定した人物監視ロボットを対象に、リアルタイム処理と省電力を支援するための共通ミドルウェアを開発した。さらに、ロボット制御アルゴリズムの工夫によるロボット省電力化を試み、実験により省電力化の効果を確認した。本研究成果は、国内研究会で発表した[学会発表2]。

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 4 件)

1. Hideki Takase, Gang Zeng, Lovic Gauthier et.al, “An Integrated Framework for Energy Optimization of Embedded Real-Time Applications”, IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E97-A, No.12, pp.2477-2487, Dec. 2014. 査読有
2. Gang Zeng, Yutaka Matsubara, Hiroyuki Tomiyama and Hiroaki Takada, “Energy-aware task migration for multiprocessor real-time systems”, ELSEVIER Journal of Future Generation Computer Systems, Volume 56, pp.220–228, Mar 2016. 査読有
3. Guoqi Xie, Gang Zeng, Liangjiao Liu, Renfa Li, and Keqin Li, “High performance real-time scheduling of multiple mixed-criticality functions in heterogeneous distributed embedded systems,” Journal of Systems Architecture (Special Issue High Performance Computing, Communication and Embedded Software/Systems), 査読有、印刷中 (発行年、ページ番号未定)
4. Guoqi Xie, Gang Zeng, Liangjiao Liu, Renfa Li, and Keqin Li, “Mixed real-time scheduling of multiple DAGs-based applications on heterogeneous multi-core processors,” Microprocessors and Microsystems (MICPRO) (Special Issue on Real-Time Scheduling on Heterogeneous Multi-core Processors), 査読有、印刷中 (発行年、ページ番号未定)

[学会発表] (計 5 件)

1. Gang Zeng, Yutaka Matsubara, Hiroyuki Tomiyama, and Hiroaki Takada, “Task Migration for Energy Saving in Real-Time Multiprocessor Systems”, IEEE International Conference on Embedded Software and Systems (ICCESS), pp.693-700, August, 2014.
2. 住谷拓馬, 松原豊, 中野美由紀, 菅谷みどり, “リアルタイム処理と省電力を支援するロボットミドルウェア”, コンピュータシステムシンポジウム 2014 (Comsys2014), 豊洲, Nov 2014.
3. Guoqi Xie, Gang Zeng, Ryo Kurachi, Hiroaki Takada, and Renfa Li, “Gateway Modeling and Response Time Analysis on CAN Clusters of Automobiles”, IEEE International Conference on Embedded software and Systems (ICCESS), pp.1147-1153, Aug. 2015.
4. Ryo Kurachi, Yang Chen, Gang Zeng and Hiroaki Takada, “An Integrated Framework for Topology Design of CAN Networks under Real-Time Constraints”, IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC), pp.1-5, Sep., 2015.
5. 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”, 組込みシステムシンポジウム (ESS2015), 東京, Oct 2015. (学生奨励賞 受賞)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

曾剛 (ZENG GANG)

名古屋大学・工学研究科・講師

研究者番号：90456632

(2) 研究分担者

松原豊 (MATSUBARA YUTAKA)

名古屋大学・情報科学研究科・助教

研究者番号：30547500