

## 研究課題別事後評価結果

### 1. 研究課題名:

ソフトウェアとハードウェアの協調による組込みシステムの消費エネルギー最適化

### 2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点):

研究代表者

高田 広章(名古屋大学大学院情報科学研究科 教授)

主たる共同研究者

石原 亨(九州大学システム LSI 研究センター設計技術研究部門 准教授)

深谷 哲司((株)東芝ソフトウェア技術センターソフトウェアイノベーション戦略部 部長)

富山 宏之(立命館大学理工学部 教授)

### 3. 研究実施概要

本研究課題では、組込みシステムを対象として、サービス品質(リアルタイム性能、顧客満足度、信頼性など)を保証しつつ、消費エネルギーを最小限にするためのソフトウェア/ハードウェア協調最適化技術を開発した。

まず、高速で消費エネルギーの大きい PE と低速で消費エネルギーの小さい PE を CPU コア内に複数搭載して状況に応じて適切な PE を稼働させ、キャッシュウェイを動的に選択する機能も有するマルチパフォーマンスプロセッサを開発した。東芝製の RISC プロセッサ MeP をベースにプロトタイプを設計し、その実用可能性についてポストレイアウトシミュレーションで評価した。既存の DVFS プロセッサと比較して性能切り替えのオーバーヘッドを約 2 桁小さくすることを可能にした。また DVFS プロセッサと比較して低電圧動作時の電力効率が 30% 以上良いことを HSPICE による解析で確認した。

次に、マルチパフォーマンスプロセッサを対象に、リアルタイム性を保証しつつ、消費エネルギーを最小化する ULP ソフトウェア開発環境を開発した。この開発環境は、アプリケーションタスクの QoS を適正化するソフトウェア工学技術、スラッチパッドメモリの活用でメモリアクセスの消費エネルギーを最小化するコンパイラ/リアルタイム OS 協調技術、ハードウェア構成を変更するポイント(チェックポイント)を決定するプログラム解析技術、実行時にデッドラインまでの余裕時間(スラック時間)を計算する技術、チェックポイントにおいて最適なハードウェア構成を決定するリアルタイム OS を中心とした DEPS (Dynamic Energy/Performance Scaling) 技術、命令セットシミュレーションを元に消費エネルギーを正確に見積もる技術などを含む。ITRON 仕様ベースのマルチプロセッサ向けリアルタイム OS「TOPPERS/FMP カーネル」や MeP 用ソフトウェア開発環境(コンパイラ、シミュレータ等)の拡張と新たなツールの開発により、この開発環境を構築した。

最終年度には、本課題の成果を総合的に評価する目的で、統合評価システムを開発した。開発した統合評価システムは、テレビ会議システム向け組込みシステムのバーチャルプロトタイプ(シミュレーション環境)である。テレビ会議システムアプリケーションを実行したときの消費エネルギーを評価した結果、本課題の成果を適用することにより、プロセッサの消費エネルギーを 32.6%、オンチップメモリ(キャッシュとスラッチパッドメモリ)の消費エネルギーを 73.8%、オフチップメモリの消費エネルギーを 37.2% 削減可能であることを示した。また、本課題を通じて開発したすべての技術を適用する場合には、90% 以上の消費エネルギー削減を達成できる見通しを得た。

### 4. 事後評価結果

#### 4-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果(論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む)

本研究課題は「情報通信システム・ネットワークにおいて、回路・デバイス、アーキテクチャ、システム・ソフトウェア、アルゴリズム・プロトコル、応用・サービスにおける革新的要素技術の階層統合的な管理、制御によって既存技術による低消費電力化の限界を打破する」ことを目指す本領域の趣旨に最も良く合致した代表的プロジェクト

であり、組み込みシステムを対象として、サービス品質(リアルタイム性能、顧客満足度、信頼性など)を保証しつつ、消費エネルギーを最小限にするためのソフトウェア／ハードウェア協調最適化技術を開発した。

複雑なシステムに対して多くの個別技術を組み合わせることで低消費電力化を実現するためのハードウェアとソフトウェアのプラットフォームの指針を示し、アルゴリズムや要求仕様ベースにおけるエネルギー管理について新しい考え方を整理している点は評価できる。また、要素技術・統合化技術の両面で、ほぼ当初計画に沿った技術開発を行っており、その意味では計画は概ね達成されたと評価できる。

一方、研究開始当初に掲げた低消費電力化の到達目標 1/100 を途中から 1/60 に変更したにもかかわらず、その目標は達成できなかった。テレビ会議システムアプリケーションを実行したときの消費エネルギーの評価では、プロセッサの消費エネルギーを 33%、オンチップメモリの消費エネルギーを 74%、オフチップメモリの消費エネルギーを 37%削減可能であることを示すにとどまっている。机上検討でシステム全体の削減率を示しているが、それでも 24 分の 1 にとどまっている。

また、マルチパフォーマンスプロセッサのコアチップ試作や消費電力の総合評価システムはまだ完成しておらず、達成度はじゅうぶんであるとはいいがたい。今後、これらを完成させて次年度以降の領域ワークショップに出展できる状態にできる限り早く到達することを期待する。

開発した低電力技術を実装したリアルタイム OS は、研究期間終了後にオープンソースソフトウェアとして公開することを予定している点は新たな展開である。リアルタイム OS は、公開されて初めて他の研究機関が手に入られるので、望ましい展開になったといえる。

個々の技術はそれぞれの専門分野の学会などで活発に発表されている。DEPS の概念の提案は評価できるので、適当な時期にしっかり纏めて本(英文等)などの形態で出版することが望ましい。一方、プロセッサの低消費電力化を含む研究課題で特許出願が 1 件しかないのは物足りない。知的財産権の出願と活用に向けた取り組みが十分ではなかったと言わざるを得ない。

地域的に分散している若い研究者をよくまとめた研究体制と研究代表者のリーダーシップは評価できるので、できるだけ早い時期にまだ未達成の研究項目を完成させることを期待する。

#### 4-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト、戦略目標への貢献

本研究課題は本領域が掲げる趣旨と狙いに最もよく合致しており、目標には到達していないものの、組み込みシステムに対して多くの個別技術を組み合わせることで低消費電力化を実現するためのハードウェアとソフトウェアのプラットフォームの構築指針を示し、アルゴリズムや要求仕様ベースにおけるエネルギー管理について新しい考え方を整理した例は世界的にもめずらしいので、その成果が適切にまとめられれば科学的、技術的に一定のインパクトを与えるものとして評価できる。

構築されたプラットフォームの上で今後の産業化を見据えた開発型研究の推進が期待できるので、これらの成果でより大きな影響を世の中に与えるようにするため、個々の技術をさらに深く掘り下げることが望ましい。

開発した低電力化技術を実装したリアルタイム OS を、研究期間終了後にオープンソースソフトウェアとして公開することを予定しており、公開されたソフトウェアをベースに本研究成果の一部でも実用化できることが期待できる。

開発・評価ツールを早期に完成させて公開することにより産業界への展開を図り、社会に貢献すること期待する。

#### 4-3. 総合的評価

本研究課題は「情報通信システム・ネットワークにおいて、回路・デバイス、アーキテクチャ、システム・ソフトウェア、アルゴリズム・プロトコル、応用・サービスにおける革新的要素技術の階層統合的な管理、制御によって既存技術による低消費電力化の限界を打破する」ことを目指す本領域の趣旨に最も良く合致しており、優れた研究構想のプロジェクトである。組み込みシステムを対象に多くの個別技術を組み合わせることで低消費電力化を実現す

るためのハードウェアとソフトウェアのプラットフォームの指針を示し、アルゴリズムや要求仕様ベースにおけるエネルギー管理について新しい考え方を整理している点は技術的なインパクトもあり評価できる。

しかしながら、研究開始時に掲げた低消費電力化目標へ到達する可能性を示すには至らなかった。また、研究成果の主要な柱であるマルチパフォーマンスプロセッサのコアチップ試作や消費電力の総合評価システムはまだ完成しておらず、達成度は十分であるとはいいがたい。今後、これらを完成させて次年度以降の領域ワークショップにその成果を出展できる状態に到達することを期待する。

構築されたプラットフォームの上で今後の産業化に向けた開発型研究の推進が期待できるので、個々の技術をさらに深く掘り下げ、開発・評価ツールを早期に完成させ、公開することにより、世の中により大きなインパクトを与える展開となることを期待する。