

報告番号	※甲	第	号
------	----	---	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目 組込みシステムにおける消費エネルギー最適化のための
スクラッチパッドメモリ管理技術

氏 名 高瀬 英希

論 文 内 容 の 要 旨

組込みリアルタイムシステムにおいて、性能や計算精度を保証しながら消費エネルギーを最適化することは、非常に重要な課題となっている。消費エネルギーを削減することによって、製造・運用コストの節減や信頼性の向上などの様々な利益が得られる。近年の組込み向けプロセッサでは、キャッシュに代表されるメモリシステムの消費エネルギーが、プロセッサ全体の約半分を占めている。このことは、メモリシステムで消費されるエネルギーを削減することは、組込みシステム全体の消費エネルギー削減に繋がることを示している。そこで本研究では、小容量かつ高速なオンチップSRAMであるスクラッチパッドメモリ（以下、SPM）の活用に着目する。SPMは、回路面積、実時間性、および、消費エネルギーの面で組込みシステムに適したオンチップメモリである。ただし、SPMは、保持する内容を更新するハードウェア機構を内部に持たない。このため、SPMの配置内容はソフトウェアによって明示的に管理する必要がある。

本研究の目的は、組込みシステムのプロセッサおよびメモリシステムの消費エネルギーを最小化することである。キャッシュとSPMを組み合わせて一次メモリが構成されるシステムにおいて、SPMを効率良く活用する技術を確立し、システム全体の消費エネルギー最適化を目指す。さらに、提案するSPM管理技術を、実用システムに適用可能なソフトウェア・ツールチェーンとして開発する。

本論文では、以下に示す5つの研究課題の成果を報告する。まず、組込みシステムにSPMを導入することの有効性を、リーク電力も含めて評価した。2つめの研究では、組込みシステムのマルチタスク環境におけるSPM領域活用手法を提案した。3つめの研究では、プリエンプティブな固定優先度ベースの組込みリアルタイムシステムに適用可能なSPM活用戦略およびSPM管理のためのワークフローを提案した。4つめの研究では、特別なハードウェアを使用することなくSPMの配

置内容を実行時に効率良く管理できるリアルタイム OS を開発した。最後に、5つめの研究では、多階層の協調による組込みリアルタイムシステムの消費エネルギー協調最適化フレームワークを構築した。

リーク電力とは、メモリの動作とは無関係に定常的に漏れ流れる電流に起因する電力のことを指す。半導体設計技術の微細化が進む最先端のメモリデバイスでは、リーク電力の消費量は増大の一途を辿っているといわれている。そこで1つめの研究では、評価実験によって、リーク電力を考慮に含めてもなお、キャッシュと SPM を組み合わせて組込みシステムの一次メモリを構成することの有効性の高さを明らかにした。また、リーク電力の消費量が顕著となる次世代、次々世代の製造技術のメモリシステムにおいても、組込みシステムにおける SPM の優位性は変わらず高いという傾向も示した。本研究は、従来研究と比較して、リーク電力も SPM の有効性の議論に考慮しているところに新規性があり、組込みシステムにおける SPM の有効性をより妥当に検証できている。

高いリアルタイム応答性が要求される組込みマルチタスクシステムでは、固定優先度ベースのスケジューリング方式が一般的に採用される。2つめの研究では、非プリエンティブなマルチタスク環境に対応した、効率的な SPM 領域分割法を示した。提案手法は、空間分割法（使用可能な SPM の容量を各タスクに分配して与える手法）、時間分割法（実行状態のタスクが SPM の全領域を占有する手法）、および、混合分割法（上記2方針の組み合わせ）の3種類である。これらの SPM 領域分割法は、組込みシステムの命令メモリの消費エネルギー最小化に貢献する。それぞれの領域分割法は、各タスクに割当てする SPM 容量と SPM 領域へのコード配置とを同時に探索可能な整数計画問題として定式化した。

次に、3つめの研究では、上記の手法を発展させ、プリエンティブな固定優先度ベースのリアルタイム・タスクスケジューリング方式に従う環境に適用可能な SPM 活用戦略を提案した。これに伴い、前述の混合分割法を発展させた SPM 活用戦略である混合活用法を提案した。本研究における混合活用法は、高優先度タスクは、より優先度が低いタスクの SPM 領域を横取りして使用できる。これにより、SPM の配置内容の入れ替えにかかるオーバヘッドを抑制しつつ、より柔軟に SPM を活用できる。それぞれの SPM 活用戦略は、定式化の際にタスクの優先度や起動周期といったスケジューリングの性質を考慮することにより、消費エネルギー最適となる SPM の管理方法を決定しているのが特徴である。それぞれの SPM 活用戦略は、整数線形計画問題として形式的に定式化した。さらに、SPM の保持する内容を実行時に管理するために求められるシステム要件を明らかにした。本要件は、リアルタイム OS とハードウェアの協調動作によって SPM 管理を実現するワークフローとして構築した。提案したワークフローを実験環境に実装して評価を行い、SPM 活用戦略の有効性を確認した。

マルチタスク環境においては、限られたメモリ容量を有効に活用できるよう、タスク間でSPM領域の配置内容を時間的に再配置するのが望ましい。そこで4つめの研究では、複数のタスクで共有して活用されるSPM領域を実行時に管理する機能を有するリアルタイムOSを開発した。提案手法は、全てソフトウェアの機能のみで動作し、小メモリサイズおよび低オーバヘッドで実現できるよう設計した。実行時のSPM管理機能は、SPM管理情報および実行時SPM管理機構から構成される。SPM管理情報とは、リアルタイムOSがSPM管理の実現のために持つ静的な情報のことである。実行時SPM管理機構は、リアルタイムOSの内部動作として実現できるように設計した。タスクのスケジューリング時にSPM管理情報を参照することで、SPM領域のうち再配置が必要な部分のみを選択できる。これにより、SPM領域の配置内容の効率的な管理を実現する。提案手法をTOPPERS/ASPカーネル上に実装し、SPM管理機能のメモリサイズと性能のオーバヘッド、および、アプリケーション実行時の消費エネルギーを評価した。これらの評価を通して、本研究の有効性を明らかにした。

5つめの研究では、多階層に跨る消費エネルギー協調最適化フレームワークを構築した。本フレームワークは、複数の要素技術を統合することで、組込みリアルタイムシステム全体の協調最適化を実現する。統合した要素技術としては、タスクの振り舞いや特性を実行トレース群から自動抽出するプロファイラ技術、コードおよびデータのメモリ領域配置先を最適に決定するコンパイラ技術、および、ハードウェア資源におけるエネルギーと性能のトレードオフを実行時に最適に制御するリアルタイムOS技術がある。複数の要素技術を統合するため、本フレームワークは設計時のタスク毎およびタスク間、実行時の3段階にて対象システムの最適化を行う形態をとる。段階的なアプローチを取ることで、統合した各要素技術の最適化効果を効率的に活かすことができる。さらに、本フレームワークは、組込みシステムのアプリケーション開発支援環境となるソフトウェア・ツールチェーンとして開発した。ツールチェーンによる消費エネルギー最適化処理は、自動的に適用されるよう設計されている。テレビ会議システムを例題とした評価を行うことにより、開発成果が実用的な組込みアプリケーションに適用可能であり、かつ、組込みリアルタイムシステムの消費エネルギー最適化を実現することを示した。

以上の研究は、次に挙げる特色および独創的な点がある。まず、実用製品に則ったシステム環境を強く考慮して研究に取り組んできている。1つめの研究では、消費量が年々増大しているリーク電力にも着目し、SPMの有効性をより妥当に評価した。2つめおよび3つめの研究では、組込みシステムにおいてひろく一般に採用される固定優先度ベースのマルチタスク環境において、SPMの有効な活用手法を示した世界初の成果である。さらに、本研究は、単なる理論研究にとどまらず、提案手法を実用的なものとして実装に取り組んでいる。4つめの研究で提案するSPM

管理機能は、 μ ITRON 仕様に準拠したリアルタイム OS である TOPPERS/ASP カーネル上に実装されることを想定して設計している。このため、実用的な組込みアプリケーションにおいてひろく提案手法を適用できる。さらに、5つめの研究のような、複数の設計階層が統合された革新的な最適化フレームワークを提示した例は、私の知る限り存在しない。開発したソフトウェア・ツールチェーンは、テレビ会議システムという実用システムに適用できている。このことは、開発成果物が産業界で利用できる実用化に近いレベルまで完成度が高められていることを証明している。これらの研究成果が、組込みシステム製品の消費エネルギー最適化を促進することにつながり、社会全体のエネルギー問題に貢献することが期待できる。