

## 論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第	号
------	-------	---

氏 名 丸山 修孝

論 文 題 目 リアルタイム OS のハードウェア化によるマルチコア組込みシステムの高速化

論文審査担当者

主 査 名古屋大学 教授 高田 広章

名古屋大学 教授 枝廣 正人

名古屋大学 准教授 本田 晋也

## 論文審査の結果の要旨

丸山修孝君提出の論文「リアルタイム OS のハードウェア化によるマルチコア組込みシステムの高速化」は、組込みシステムの高速化を目的としたリアルタイム OS のハードウェア化に関する一連の研究をまとめたものであり、全体は 7 章から構成される。

第 1 章は序論であり、本研究の背景として、組込みシステムにおいてアプリケーションやネットワーク処理の高速化と低コスト化が求められている現状を説明し、アプリケーションやネットワーク処理の高速化のためにリアルタイム OS をハードウェア化することの有用性について説明している。また、組込みシステムにおいてもマルチコアが導入されていることについて説明し、ハードウェア化したリアルタイム OS においてもマルチコアに対応する必要性について述べている。さらに、本論文の概要と構成についても述べている。

第 2 章は、本論に入るための準備の章である。組込みシステムで求められる高速化の要求について概観した後、組込みシステムの高速化技術について、本論文に関係のあるリアルタイム OS のハードウェア化やマルチコアの適用を中心に解説している。

第 3 章では、シングルプロセッサ向けのハードウェア化したリアルタイム OS (HWRTOS) の提案と、その有用性を示すことを目的に、HWRTOS の設計と実装及び HWRTOS を用いた TCP/IP 処理の処理時間の評価について述べている。HWRTOS の実装には複数のキューが必要となるが、単なる FIFO キューとして実装するとハードウェア面積が増大してしまうという問題がある。本論文では、仮想キューと呼ぶ、キュー情報を圧縮して少ない回路量で実現する技術を提案し、HWRTOS を実現した。また、HWRTOS 向けの専用のプロセッサコアを開発し、HWRTOS と専用インターフェースで接続し、高速なタスク切り替えが可能な密結合 HWRTOS を実現した。実現した HWRTOS により、TCP/IP 処理の高速化と消費電力の削減が達成できることを示した。

第 4 章では、第 3 章で実現した HWRTOS に対して、tick オフローディング機能、割り込みオフローディング機能を提案し、拡張している。提案した tick オフローディング機能は、長い割り込み禁止状態を作り出す原因となるリアルタイム OS の tick 処理をハードウェアで実現することで、システムの割り込み応答性を悪化させないという特徴がある。割り込みオフローディング機能は、割り込み応答時間の高速化と実行中の処理を中断する頻度を下げることができる。本論文では、これらの機能を実現して割り込み応答時間を評価し、ソフトウェアで実現されたリアルタイム OS (SWRTOS) と比べて、割り込み応答性が大幅に改善されることを示した。

第 5 章では、第 4 章で実現した HWRTOS を、産業ネットワークの分野で標準的に使われている ARM プロセッサで使用可能とする疎結合 HWRTOS を提案している。第 3 章で実現した HWRTOS は、専用に用意したプロセッサコアと専用バスにより接続され、高速なタスク切り替えを実現しているのに対して、ARM プロセッサは、プロセッサコア自身を変更することが不可能であるため、一般のバスを介して HWRTOS

## 論文審査の結果の要旨

と接続する必要がある。本論文では、ARM プロセッサでサポートされる標準的なバスを介して ARM プロセッサと HWRTOS を接続する疎結合 HWRTOS を提案し実現した。評価実験により、SWRTOS と比較して RTOS の実行時間が高速なこと、密結合 RTOS と同様に、割込みオフローディング機能により割込み応答性が高速化されることを示した。なお、開発した疎結合 HWRTOS は、ルネサスエレクトロニクスから産業ネットワーク用の LSI として実現され販売されている。

第 6 章では、第 4 章で実現した密結合型 HWRTOS をマルチコアに対応させた HWRTOS を提案している。マルチコア対応で重要となる RTOS 内におけるコア間の排他制御の機構について検討を行い、ジャイアントロック方式に基づくアーキテクチャを提案した。提案アーキテクチャでは、マルチコア特有の課題であるスタベーションや排他制御の課題を防止する回路も実現している。また、評価実験により、マルチコア対応の SWRTOS と比較して、HWRTOS の実行時間が大幅に高速であることを示した。

第 7 章は結論であり、本論文の成果をまとめるとともに、今後の課題について論じている。

以上のように、本論文は、高速な処理やリアルタイム性が求められる組込みシステム向けに、リアルタイム OS のハードウェアによる実現方法の研究に取り組み、いずれにおいても有効な成果を挙げている。提案した技術はいずれも、学術的な新規性に加えて、実用性も高いものであり、情報科学の学術上・技術上の寄与が大きい。よって、本論文提出者、丸山修孝君は、博士（情報科学）の学位を受けるに十分な資格があるものと判定した。

## 試験の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 号	氏 名	丸山 修孝
試験担当者	主査 名古屋大学 教授 委員 名古屋大学 教授 委員 名古屋大学 准教授	高田 広章 枝廣 正人 本田 晋也	
(試験の結果の要旨)			
学位審査委員会において、提出論文の内容を中心として、これに関連ある専門分野の学識及び高度の研究能力について試問し、慎重に審査した結果、合格と判定した。			