

## RTOS の FPGA によるハードウェア化の検討

宮内 哲夫<sup>†</sup> 田中 清史<sup>‡</sup>北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科<sup>†</sup>北陸先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科<sup>‡</sup>

## 1. はじめに

近年, 組み込みシステムにおいてはシステムの複雑化, 開発の効率化のため, リアルタイム OS (RTOS) の使用が一般的になっている. RTOS の処理時間, RTOS が占めるメモリはアプリケーションにとってはオーバヘッドであるため, できるだけ小さくすることが望ましい. ソフトウェアのオーバヘッドを削減するために, RTOS の機能をハードウェア化する研究が従来から行われている.

本研究では, これまでに行われた RTOS の機能のハードウェア化に関する研究を概観し, アプリケーションに適応したハードウェア化を行うことを目指す.

## 2. 背景と関連研究

RTOS のハードウェア化に関する研究は 1990 年代から継続して行われている. 文献[1] では  $\mu$ ITRON 仕様のスケジューラ, セマフォ, イベントフラグをハードウェア化している. 文献[2] では  $\mu$ ITRON 仕様の RTOS に対して 21 種類のシステムコールに対応した処理をプロセッサの周辺チップとして VLSI 化した STRON というシステムを構築している. 文献[3] では, 専用のプロセッサと RTOS の機能をハードウェアで実装し, タスクの実行制御を行っている. また, 文献[4] では RTOS の機能をハードウェア化した RTM (Real-Time Task Manager) と呼ばれるシステムを提案しており, 最高優先度のタスクをトーナメント式に選択する回路などの具体的な実装が示されている. これらの研究は RTOS の機能の一部をハードウェアで実装することにより, ソフトウェアのみでの実装に比べて RTOS によるオーバヘッドが小さくなることが示されてい

るが, ソフトウェアでの実装による RTOS に比べて, 実装されているシステムコールの数や登録できる資源の数が少ない, または, 機能が限定されている.

文献[5]においては, 従来のソフトウェアの RTOS とほとんど同じ機能を有したハードウェア化が行われている. ARTESSO (Advanced Real Time Embedded Silicon System Operator) と呼ばれる専用のプロセッサとハードウェア化を行った RTOS が ASIC で実現されており, 文献[6]ではマルチコア化を行っている. さらに, 文献[7]においてはプロセッサコアを ARM ベースとしたアーキテクチャが提案されている. 仮想キューと呼ばれる機構を導入し, キュー領域として使用するメモリ量を削減していることが特徴である. また, 文献[8]では, HartOS という通常の RTOS が持つほとんどの機能を FPGA 上に実装したハードウェア RTOS が紹介されている. このシステムでは RTOS の API のインタフェースとして専用の CISC プロセッサを搭載し, 割込み管理, タスク管理, セマフォ, ミューテックス管理をハードウェアで実現しており, RTOS のオーバヘッドやジッタが削減されていることが示されている.

RTOS の機能の特徴づけるものとしてタスクのスケジューリング機能がある. 従来からスケジューリング方式については様々な研究が行われているが, 実際の RTOS に複雑なスケジューリング方式をソフトウェアで実装する場合, スケジューラのオーバヘッドが大きく実用的でない場合が多い. そのため, スケジューリング機能のハードウェア化を行う意義は大きく, いくつかの先行研究がある. 文献[9]では, 固定プライオリティ, RM (Rate Monotonic), EDF (Earliest Deadline First) によるスケジューリング方式をハードウェア化している. 文献[10]では, キューの要素の追加, 削除を行う機構を実現し, Slack stealing アルゴリズムのスケジューラをハードウェアで実装している.

A Study of Hardware Acceleration of RTOS using FPGA

Tetsuo Miyauchi<sup>†</sup> and Kiyofumi Tanaka<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Japan Advanced Institute of Science and Technology, School of Information Science

<sup>‡</sup> Japan Advanced Institute of Science and Technology, Graduate School of Advanced Science and Technology

### 3. RTOS の機能のハードウェア化

先行研究をふまえ、アプリケーションに適応した RTOS の機能のハードウェア化を提案する。頻出するシステムコールのハードウェア化、アプリケーションに適応するスケジューラのハードウェア化を対象とする。

FPGA 上に構成したソフトプロセッサと組み合わせ、 $\mu$ ITRON で採用されている最高優先順位のタスクの ID を得られるスケジューラを FPGA 上のハードウェアとして実装した。図 1 に最高優先順位のタスク ID を取得する回路を示す。各優先度に対して、同一の優先度のタスクのキューを作り、同一優先度のタスクが複数ある場合には、キューの先頭のタスクの ID を取得する。タスクをキューに接続する場合にはキューの最後尾に接続する。

上記回路は組み合わせ回路で構成され、1 クロックサイクルで実行するのに対して、ソフトウェアでの実装では最高優先順位のタスクをサーチして選択するのに平均 23.4 クロックかかる。(ソフトウェアの評価は ARM Cortex-A9 を対象として実装された  $\mu$ ITRON4.0 仕様の RTOS をシミュレータ上で動作させ実行クロック数を測定することにより行った。)

### 4. まとめ

従来、RTOS のハードウェア化についていくつかの研究が行われている。RTOS のオーバヘッドを最小にするため、アプリケーションに適応した RTOS 機能のハードウェア化が期待される。本研究ではスケジューリング方式のハードウェア化によりオーバヘッドが削減可能であることの確認を行った。今後さらにハードウェア化とアプリケーションに適応するシステムを自動生成するフレームワークの構築を進める。

### 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP 15K00073 の助成を受けて行われた。

### 参考文献

- [1] 森 久直, 坂巻 佳壽美, 重松 宏志: 組込み制御システム向けリアルタイム OS のハードウェア化, 東京都立産業技術研究所研究報告 第8号 pp.55-58, 2005.
- [2] 仲野 巧, アンディウタマ, 板橋 光義, 塩見 彰睦, 今井 正治: リアルタイム OS の VLSI 化とその評価, 電子情報通信学会論文誌 D Vol.J78-D1 No.8, pp.679-686, 1995.

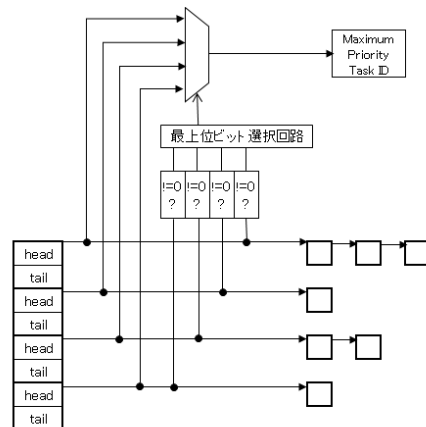


図 1: 最高優先順位タスクの ID 取得回路。

- [3] J.Adomat, J.Furunus, L.Lindh, J.Starner: Real-Time Kernel in Hardware RTU: A Step Towards Deterministic and High-performance Real-Time Systems, Proceedings of EURWRTS '96, 1996.
- [4] P.Kohout, B.Ganesh, B.Jacob, 11th IFAC, IEEE International Conference on Programmable Devices and Embedded Systems, Volume 45, Issue 7, pp. 207-213, 2012.
- [5] N.Maruyama, T.Ishihara, H.Yasuura: An RTOS in Hardware for Energy Efficient Software-based TCP/IP Processing, IEEE 8th Symposium on Application Specific Processors (SASP), 2010.
- [6] 丸山 修孝, 一場 利幸, 本田 晋也, 高田 広章: マルチコア対応 RTOS のハードウェア化による性能向上, 電子情報通信学会論文誌 D Vol.J96-D No.10 pp.2150-2162, 2013.
- [7] N.Maruyama, T.Ishikawa, S.Honda, H.Takada, K.Suzuki: ARM-based SoC with Loosely coupled type hardware RTOS for industrial network systems, the 10th Annual Workshop on Operating Systems Platforms for Embedded Real-Time Applications, 2014.
- [8] A.B.Lange, K.H.Andersen, U.P.Schultz, A.S.Sorensen: HartOS - a Hardware Implemented RTOS for Hard Real-Time Applications, 11th IFAC, IEEE International Conference on Programmable Devices and Embedded Systems, Volume 45, Issue 7, pp. 207-213, 2012.
- [9] P.Kuacharoen, M.A.Shalan, V.J.Mooney III: A Configurable Hardware Scheduler for Real-Time Systems, Proceedings of the International Conference on Engineering of Reconfigurable Systems and Algorithms, 2003.
- [10] S.Saez, J.Vila, A.Crespo, A.Garcia: A Hardware Scheduler for Complex Real-Time Systems, Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 1999.