

# WindowsCE における割り込み制御機能の強化

水篠 公範<sup>†</sup> 太田 貴之<sup>†</sup> 飯田 康志<sup>†</sup> 南角 茂樹<sup>†</sup>

大阪電気通信大学大学院<sup>†</sup>

## 1. 概要

近年、組み込み分野でも表示装置のついた機器が普及してきており、GUI 設計が容易な組み込みリアルタイム OS(以下リアルタイム OS)である Microsoft Windows Embedded CE(以下 Windows CE)が広く利用されてきている。しかしながら、Windows CE では割り込み処理をスレッド上で行うため、割り込み応答時間が厳しく要求される処理を扱うことは難しい。また、Windows CE のカーネルに、割り込み処理を直接組み込むことも可能であるが、カーネルでは、割り込み禁止状態で処理が行われるため、割り込み応答時間の低下や割り込み応答時間の予測が困難等の問題がある。

そこで、本研究では割り込み制御に Real-Time Embedded Monitor(以下 REMON)を利用したので報告する。REMON は割り込み処理に対して待ち状態を付加する。それにより、割り込み禁止状態にすることなく割り込み処理を行うことができ、割り込み処理間での排他制御も実現することができる。

## 2. 提案手法

### 2.1 REMON

REMON の基本構造を図 1 に示す。REMON は、割り込みが発生すると、その割り込みに対応した割り込みサービスルーチン(以下 ISR)を開始する。この REMON が管理する ISR は、ICB(Interrupt Control Block)と呼ぶデータ構造を持つ。

### 2.2 ICB

ICB のデータ構造を図 2 に示す。ISR 1 つに対して 1 つの ICB を持つ。この ICB はリアルタイム OS における TCB(Task Control Block)と似た構造であり、CPU の状態を保存するためのコンテキスト領域を設けることで、割り込みは待ち状態になることができる。また、ICB は優先度順に並んだ配列となっており、ISR の番号(配列の番号)が優先度となっている。

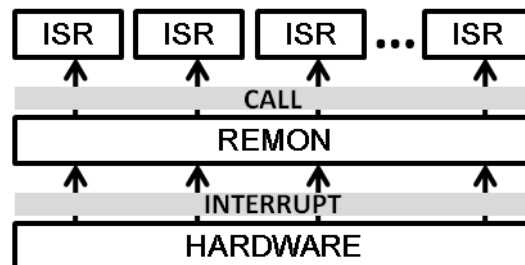


図 1 : REMON の基本構造

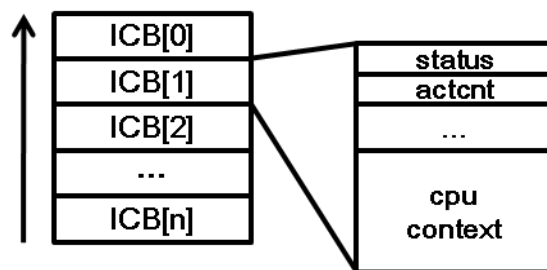


図 2 : ICB のデータ構造

### 2.3 ISR の状態

REMON では、ISR が実行可能状態であるか、待ち状態であるかが分かれば十分である。そこで、ICB の状態レジスタは、ビットごとに待ち状態を表し、全てのビットがクリアされている場合、実行可能状態を表す。待ち状態のビットはセマフォ解放待ちやタイマー待ちの他に、割り込みが発生していない場合も割り込み待ち用のビットをセットすることで待ち状態を表している。状態を共通化することで条件分岐を最低限に抑え、高速に ISR の状態を判定することができる。

## 3. WindowsCE への実装

### 3.1 REMON のスケジューラ

REMON のスケジューラを図 3 に示す。REMON のスケジューラは優先度の高い順番に ISR を実行していく。WindowsCE は、REMON の中で最も優先度の低い ISR として扱う。その結果、全ての ISR が待ち状態になった時、WindowsCE が再開されることとなる。

### 3.2 CPU による効率化

本研究では WindowsCE で最も利用されている CPU である ARM に実装する。ARM には IRQ と FIQ と呼ばれる 2 つのレベルの割り込みが実装され

Enhanced interrupt control for WindowsCE

<sup>†</sup> Kiminori Mizushino <sup>†</sup> Takayuki Ohta

<sup>†</sup> Yasushi Iida <sup>†</sup> Shigeki Nankaku

<sup>†</sup>Osaka Electro-Communication University

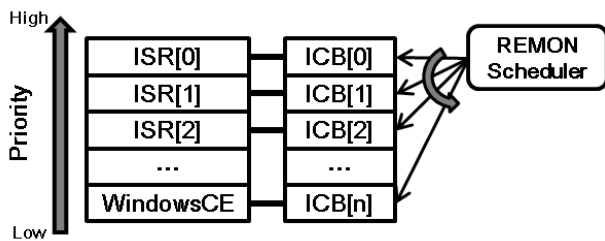


図 3 : REMON のスケジューラ

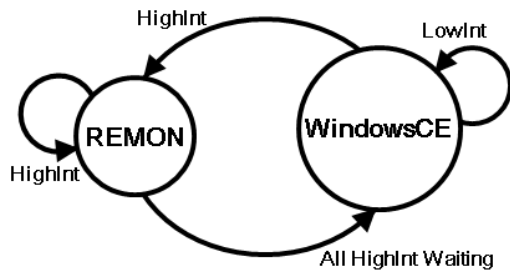


図 4 : WindowsCE と REMON の状態遷移

ている。FIQ は IRQ より高速に処理を行うために、一部のレジスタが切り替わるバンクレジスタを実装している。また、この二つレベルの割り込みは、個別に無効化することが可能である。

WindowsCE のカーネルでは FIQ は使用されていない。そこで、FIQ 割り込みを REMON で使用することによって、効率化を行う。REMON の ISR が実行されている場合、IRQ 割り込みを一時的に無効化することによって、WindowsCE の割り込みのオーバーヘッドなく高速な割り込み処理を行うことが可能となる。

また、他の多くの CPU でも、割り込みに優先度を持たせ、優先度によって割り込みを禁止することといった機能が実装されている。そのため、他の CPU でもこの手法により効率化することが可能である。

### 3.3 高速な ISR の切り替え

割り込み応答時間の厳しい割り込みを処理するためには、割り込み発生から高速に ISR に移行する必要がある。また、発生した割り込みの優先度が低ければ、すみやかに処理を戻さなければならない。そのため、切り替えには FIQ のバンクレジスタを利用し、最低限の処理で移行できるように設計した。割り込み発生からの動作をリスト 1 に示す。

## 4. 実験

今回提案したシステムを ARM アーキテクチャの CPU である Samsung 社の S3C2440 (405MHz) 上に実装した。WindowsCE は Windows Embedded CE6

1. 発生した割り込みに対応する ISR 番号をテーブルより取得する。
2. ICB の起動要求回数を 1 増やす。
3. 起動要求回数が 2 回以上になった場合、元の制御に戻る。
4. ICB の割り込み待ち状態ビットを解除する。
5. 直前まで走っていた ISR の優先度より、発生した ISR の割り込みの優先度が低い場合、元の制御に戻る。
6. 直前まで走っていたコンテキストを保存し、新しい ISR に制御を移す。

リスト 1 : FIQ 割り込み発生時の動作

のバージョンに実装した。割り込みが発生してから割り込み処理が開始されるまでの時間を計測した。WindowsCE で割り込みを処理する場合、32.09  $\mu$  秒、REMON で割り込みを処理する場合、4.58  $\mu$  秒となった。十分実用的な割り込み応答速度で実現することができている。

## 5. まとめ

WindowsCE と REMON を組み合わせることで、WindowsCE では処理できなかったような割り込み応答時間が、厳しく要求される処理を扱うこと可能となった。また、割り込み処理に排他制御を実現することで、割り込みにおける信頼性向上にも繋がっていくと考えられる。今後の課題として、WindowsCE と REMON のリソースの共有の実現をすることである。

## 参考文献

- [1] 南角茂樹：組込みシステムにおける応答性能の保証；システム/制御/情報, Vo151, No9, pp. 14-18 (2007)
- [2] 南角茂樹・水篠公範・浅田佳司：組込みシステムにおける割り込みスケジューラ REMON の展開；電気学会 電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp. 47-448 (2009)
- [3] 太田貴之・水篠公範・飯田康志・南角茂樹：リアルタイム OS の割り込み制御の強化；システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, (2010)
- [4] 松岡正人 監修：WindowsEmbeddedCE6.0 組込み OS 構築技法入門；日経 BP ソフトプレス