

仮想計算機モニタ Xen における RTOS 向けタイマ割り込み 管理機構の構築と評価

渡邊 和樹[†] 片山 吉章[‡] 松本 利夫[‡] 瀧本 栄二[†] 樫山 武浩[†] 毛利 公一[†]
[†]立命館大学 [‡]三菱電機株式会社 情報技術総合研究所

1 はじめに

携帯端末など組込みシステムは、多機能化に伴い、リアルタイム性と高機能性の両立や、小型化や省電力化の達成が求められている。RTOS は、制御を主目的とした最小限の機能提供により、処理時間の予測可能性を高めリアルタイム性を保証する。高機能 OS は、高機能性を実現するために複雑な構成をしており、処理時間の予測可能性は低い。このように、リアルタイム性と高機能性は相反する性質であり両立は容易ではない。

リアルタイム性と高機能性を両立する方法として、2つの既存手法がある。一つは、両方の性質を併せ持ったハイブリッド OS による手法である。もう一つは、複数の計算機を用いて、RTOS と高機能 OS を共存させる手法である。いずれの手法もコストが高い傾向がある。

これらを解決する新たな方法として、仮想化技術により単一計算機で RTOS と高機能 OS を共存させる手法が考えられる。この手法は、目的を達成でき、かつマルチコアや仮想化支援機能を搭載した組込み CPU も発表されている現状から考えて、適切な解法であると言える。以上から、既存の仮想計算機モニタ (VMM) である Xen[1] を拡張し、RTOS と高機能 OS を共存させる Natsume-Xen を開発している。

仮想計算機 (VM) で RTOS を動作させる際の課題として、リアルタイム性を意識した資源管理がある。一般に、VM では資源が仮想化・共有されるため、性能が他の VM の負荷に影響される。これは、RTOS にとって重要な処理時間の予測可能性を低下させる原因となる。そこで、RTOS へ資源を占有させることで、解決を試みている。これまで、デバイスから発生する割り込みに着目し、その占有を可能にする RTOS 向け割り込み通知機構を提案し、実装・評価結果を報告した [2]。本論文では、この機構をタイマに適用し、更なるリアルタイム性向上を試みたので、その成果を述べる。

2 仮想計算機モニタ Natsume-Xen

2.1 概要

Natsume-Xen は、VM を用いて RTOS と高機能 OS を共存させる。リアルタイム性が必要な処理を RTOS で

行い、高度な情報処理を高機能 OS で行うことで、リアルタイム性と高機能性を両立する。また、単一計算機で複数 OS を実行し、小型化や省電力化に寄与する。さらに、Xen を基にすることで、ゲスト OS や管理ツールなど豊富なソフトウェア資産の流用を可能にする。

Natsume-Xen は、RTOS を動作させるために、3つの資源を占有させる。「CPU」と「主記憶」は、Xen の Xen-Tools を用いる。「入出力」は、Xen の PCI Pass-through と [2] で提案した RTOS 向け割り込み通知機構を用いる。

2.2 Xen のリアルタイム性における課題

入出力における、デバイスへのアクセスは PCI Pass-through を用いることで、RTOS に占有させることができる。しかし、発生する割り込みは汎用の割り込み通知機構であるイベントチャネルにより通知される。イベントチャネルは、全割り込みを平等に扱い、直列化する。結果、RTOS へ割り込みを即座に通知することができない。

この解決に向け、イベントチャネルと独立した割り込みハンドラ (Natsume ハンドラ) を提供し、効率的に割り込みを通知する RTOS 向け割り込み通知機構を開発した [2]。結果、一般的なデバイス割り込みにおける最大処理時間を $3.52 \mu \text{sec}$ 、平均処理時間を $0.57 \mu \text{sec}$ に削減した。

しかし、Xen のタイマは、デバイスと異なる仕組みにより、イベントチャネルへ割り込み通知を依頼する。そこで、提案機構をタイマにも適用する仕組みを検討する。

3 Xen におけるタイマ管理

Xen は、実時刻を計測するプラットフォームタイマとタイマ割り込みの契機となるローカルタイマを扱う。通常、前者は HPET、後者は Local APIC Timer を利用する。また、データ構造として、VM にタイマ割り込みを通知する時刻を記録した仮想タイマを扱う。

ローカルタイマ割り込みの発生時、プラットフォームタイマから実時刻を取得し、仮想タイマと比較する。実時刻が超過している場合、イベントチャネルでタイマ割り込みを通知する。ゲスト OS はタイマ割り込みを受信した後、VMM から実時刻を取得し、同期を行う。

複数の VM が CPU を共有する場合、実行中の VM へののみ割り込みを通知する。また、割り込み処理の度に仮想タイマへ次の割り込み時刻を設定する。これは、割り込みの損失や遅延の原因になる。また、イベントチャネルを用いるため、割り込みの直列化も問題となる。そこで、専用タイマと Natsume ハンドラで割り込みを効率的に通知する RTOS 向けタイマ割り込み管理機構を提案する。

Development and evaluation of timer interrupt manager for RTOS in Xen Hypervisor

Kazuki WATANABE[†], Yoshiaki KATAYAMA[‡], Toshio MATSUMOTO[‡], Eiji TAKIMOTO[†], Takehiro KASHIYAMA[†], and Koichi MOURI[†]

[†]Ritsumeikan University

[‡]Information Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation

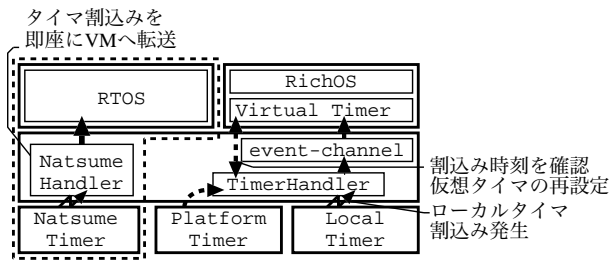


図1: Xenのタイマ管理とRTOS向けタイマ管理機構

表1: 評価環境

CPU	Core i7 920 (2.66GHz)
負荷用 NIC	82541GI Gigabit Ethernet Controller
評価用ゲスト OS (RTOS)	mini-os(CPU1 個/RAM1GB)
負荷用ゲスト OS (高機能 OS)	linux-2.6.18-xen(CPU1 個/RAM1GB)
タイマ割込み周期 (目標値)	1msec (PIT:0.999847msec)

4 RTOS 向けタイマ割込み管理機構

4.1 概要

提案機構は、VMを仮想タイマから分離し、Natsumeハンドラを介した割込みを実現する。概要を図1に示す。

1. CPUをRTOSへ固定しつつ、関連付けられた仮想タイマを無効にする
2. 専用タイマの割込み周期を任意の値にセットする
3. 専用タイマ割込みをNatsumeハンドラで転送する

4.2 実装

提案機構の実現に向け、以下の機能を新たに実装した。専用タイマにはPITを用いた。

仮想タイマを無効にする機能 RTOSを既存機構から分離するため、仮想タイマを無効化する機能を実装した。

PITとHPETを共存させる機能 Xenは、HPETをPITの代替とするLegacy Replacement Optionに設定する。PITとHPETを共存させるため、HPETをPCIデバイスとして用いるStandard Optionにする機能を実装した。

PITの再設定機能 Xenは初期化時にPITを利用するため、RTOS起動時に割込み周期を再設定し、割込みハンドラをNatsumeハンドラに変更する機能を実装した。

5 評価

提案機構により、負荷の影響を抑制し、タイマ割込み間隔の揺らぎを軽減できることを確認する。上述の機構を適用し、評価を行った。評価環境を表1に示す。

1. 負荷用OSに負荷用NICを割り当て、外部からUDPパケットを送信し、割込み負荷を生成する
2. 計測用OSのタイマ割込みハンドラで、TSCから割込みを検知した時刻を取得する
3. 2を5001回繰り返し、連続するサンプルとサンプルの差分から割込み間隔を算出する

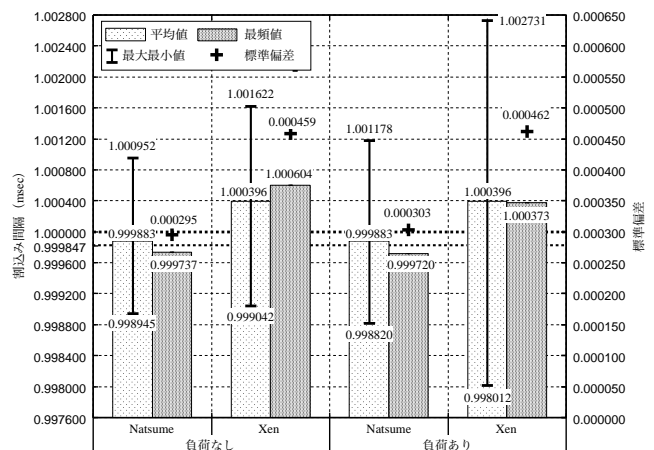


図2: 実験結果

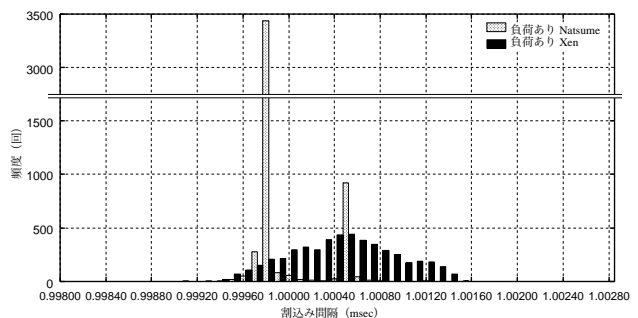


図3: ヒストグラム

結果を図2と図3に示す。図2は、最大、最小、平均、最頻、標準偏差を表し、図3はヒストグラムを表す。図2から、提案機構は負荷によらず、平均・最頻が目標値に近く、標準偏差も低いことが分かる。また、負荷生成時、Xenは最大最小の幅が増加するが、提案機構は負荷のない時と同等となった。次に図3の結果では、Xenは0.9991から10.0150msecにかけて分布するが、提案機構は約70%が0.9998から0.9999msec、約20%が10.0005から10.0006msecに集約した。以上より、提案機構により、タイマ割込み処理のオーバーヘッドが削減され、負荷の影響も抑制されたことが分かる。また、デバイスだけでなく、タイマ割込みにおいてもRTOS向け割込み通知機構の有効性が確認できた。

6 おわりに

本論文では、組込みシステムにおける高機能化の要求に対し、RTOSと高機能OSを共存させるNatsume-Xenを提案した。また、タイマ割込み処理のリアルタイム性を向上させる目的で、RTOS向けタイマ割込み管理機構を開発し、評価した。結果、タイマ割込み間隔の揺らぎが軽減され、リアルタイム性の向上が確認された。

参考文献

[1] P. Barham, B. Dragovic, K. Fraser, S. Hand, T. Harris, A. Ho, R. Neugebauer, I. Pratt, and A. Warfield. Xen and the Art of Virtualization. *SOSP '03*, Vol. 37, pp. 164–177, oct 2003.

[2] 渡邊和樹, 片山吉章, 松本利夫, 瀧本栄二, 榎山武浩, 毛利公一. 仮想計算機モニタXenにおけるRTOS向け割込み通知機構. *ComSys2011*, Vol. 2011, pp. 22–31, nov 2011.