

産業用計算機のマルチコアCPU適用

井登純一*
 畔英之*
 増田大樹**

Application of Multi-Core CPU for Industrial Computer System

Junichi Ito, Hideyuki Kuro, Hiroki Masuda

要旨

三菱電機(株)電力システム製作所では、従来監視制御システムにシングルコアCPU(Central Processing Unit)を搭載した産業用計算機(Single Core Industrial Computer System: SC-ICS)を適用し、リアルタイム性に加えて、高品質・高信頼・故障解析容易性を実現してきた。産業用プラントでは、設備の新設工事や既存設備の更新工事が行われており、過去にエンジニアリングツールで作成した画面や、実績のあるソフトウェア資産の継承が求められるため、既存機種からの継承性を確保した機種開発を実施している。

近年のCPU市場動向では、シングルコアCPUの性能向上が限界に近づいていることから、CPUコア数を増やすことで性能を向上させたマルチコアCPUが主流となってきた。そのため産業用計算機でも、マルチコアCPUを搭載した産業用計算機(Multi-Core Industrial Computer System: MC-ICS)の開発が必要となった。

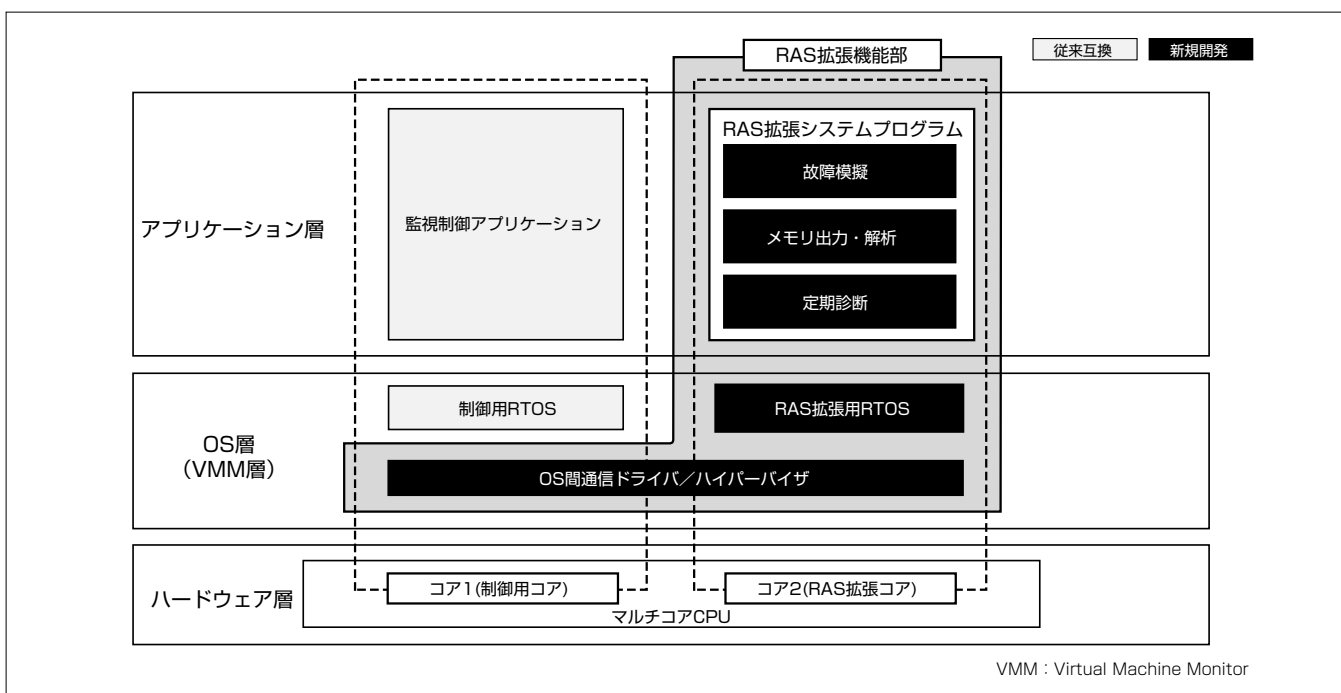
マルチコアCPUの並列処理方式には、各CPUコアに均一に処理を割り当てる対称型と、各CPUコアに別々の処

理を割り当てる非対称型があり、いずれの方式を採用するか決める必要がある。非対称型では、各CPUコアへのアプリケーションの割当て方法も決定しなければならない。

MC-ICSでは、非対称型を採用し、一方のCPUコアに従来の制御用RTOS(Real Time Operating System)を割り当てることで、監視制御アプリケーションなどのSC-ICSの資産を継承可能にした。

また、マルチコアCPUは各コアが独立して動作できるという利点を生かし、もう一方のCPUコアには制御用RTOSのRAS(Reliability Availability Serviceability)機能を拡張するソフトウェア(RAS拡張システムプログラム)を搭載することとした。これによって、一方のコアで動作している監視制御アプリケーションの処理に影響を与えることなく、かつ監視制御処理と独立して動作するRAS機能を追加することができた。

本稿では、産業用計算機におけるマルチコアCPUの適用手法と、拡張したRAS機能について述べる。



産業用計算機のマルチコアCPU適用例

図のマルチコアCPU適用例では、SC-ICSに搭載していた制御用RTOSと監視制御アプリケーションをCPUコア1(制御用コア)にそのまま移設し、RAS拡張機能部としてRAS拡張用RTOSとRAS拡張システムプログラムをCPUコア2(RAS拡張コア)に搭載している。このうちRAS拡張システムプログラムでは、故障模擬、メモリ出力・解析、定期診断の3機能を実現した。また、CPUコア1(制御用コア)とCPUコア2(RAS拡張コア)間は、ハイパーバイザとOS間通信ドライバによって双方向に通信する。

1. ま え が き

監視制御システムに適用してきたSC-ICSは、リアルタイム性に加えて、高品質・高信頼・故障解析容易性を実現してきた。また、既存設備の更新工事では、過去にエンジニアリングツールで作成した画面や、実績のあるソフトウェア資産の継承も求められるため、既存機種からの継承性を確保した機種開発を実施している。

近年のCPU市場動向では、シングルコアCPUの性能向上が限界に近づいていることから、CPUコア数を増やすことで性能向上したマルチコアCPUが主流となってきている。そのため産業用計算機でも、マルチコアCPUを搭載したMC-ICSの開発が必要になってきた。

マルチコアCPUの並列処理方式には、各CPUコアに均一に処理を割り当てる対称型と、各CPUコアに別々の処理を割り当てる非対称型があり、非対称型は、各CPUコアへのアプリケーションの割当て方法も決める必要がある。

本稿では、産業用計算機におけるマルチコアCPUの適用手法と、マルチコアCPUの特徴を生かして拡張したRAS機能について述べる。

2. MC-ICS開発における課題

2.1 マルチコアCPUの並列処理方式

マルチコアCPUとは、複数のCPUコアを1素子にパッケージングし、複数の演算処理を同時に実行できるようにしたものである。マルチコアCPUの並列処理方式は、次の2種類に大別できる(図1)。

- (1) 対称型マルチプロセッシング(Symmetric Multi-Processor : SMP)

各CPUコアに均一に処理を割り当てる方法

- (2) 非対称型マルチプロセッシング(Asymmetric Multi-Processing : AMP)

各CPUコアに別々の処理を割り当てる方法

SMPは複数CPUコアを均等(対称的)に有効活用でき、AMPは既存ソフトウェア資産を有効活用できる。双方のメリットとデメリットはトレードオフの関係にある。

2.2 SMPの製品適用時の問題点

MC-ICSに搭載するようなホモジニアスマルチコア

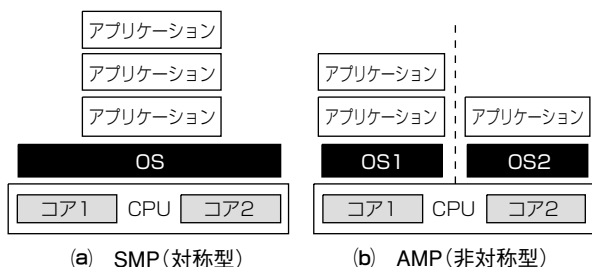


図1. SMPとAMPの比較

CPU(同種のコアを複数実装したCPU)を利用する場合、複数のCPUコアを効率良く利用できるSMP方式を適用するケースが多い。しかし、SC-ICS用に製作したソフトウェアをマルチコアCPUに搭載する場合、SMP方式で利用すると表1に示す問題がある。

2.3 AMPの製品適用時の利点

マルチコアCPUは、外見上は1つのLSIだが、複数のCPUとして機能する。さらに、CPUコア間は高速な内部バスで接続されており、AMP方式で利用すると2台の計算機が接続されているものと同等の環境が実現される。この特徴を利用し、シングルコアCPUではCPU負荷の問題で実現が難しかった機能の実現が可能となる。その機能の例を表2に示す。

SC-ICSでは、1つのCPUコアで制御用RTOSを稼働させており、リアルタイム性を確保するため、重要な処理以外のタスクは低優先度で動作させる又は通常は停止させるなどの処置を講じていた。

3. MC-ICSで実現した仕組み

2.2節に示す問題から、MC-ICSでは、既存ソフトウェア資産を有効活用するためにAMP方式を採用した。これは、CPUコアの一方を従来の制御用RTOSの動作に割り当てることで、実績のあるアプリケーション資産を継承可能とするためである。

また、2.3節に示す利点から、マルチコアを有効活用するため、もう一方のCPUコアには、制御用RTOSのRAS機能を拡張するソフトウェア(以下“RAS拡張機能”という。)を搭載(マルチOS化)し、継承性を確保しつつ、高信頼化を実現した。

3.1 MC-ICSのソフトウェア構成

図2にSC-ICSとMC-ICSのソフトウェア構成を示す。従来機種では、CPU(ハードウェア層)-制御用RTOS(OS層)-監視制御アプリケーション(アプリケーション層)という構成であった。これに対し、MC-ICSでは、CPU

表1. SMP適用時の問題点

項目	問題点
リアルタイム性	タスクがCPUコアに動的に割り当てられるため、実行順序が常に変化し、リアルタイム性の保証が難しい。
スケジューリング	CPUコア数だけタスクが同時に実行されるため、優先度により排他制御している箇所、排他される側のタスクが動作する。
影響範囲	全アプリケーションの再生成および再評価が必要になる。

表2. AMP適用によって実現容易となった機能

機能	適用例
故障模擬	・ 検証試験 ・ 異常検出機構の(稼働中)健全性確認
メモリ出力・解析	OS動作不能な異常発生時の解析データ収集
定期診断	ハードウェア(接続機器)・ソフトウェア(機能モジュール)ごとの健全性確認

コア1(ハードウェア層)にハイパーバイザ(VMM層) - OS間通信ドライバと制御用RTOS(OS層) - 監視制御アプリケーション(アプリケーション層), CPUコア2(ハードウェア層)にハイパーバイザ(VMM層) - OS間通信ドライバとRAS拡張用RTOS(OS層) - RAS拡張システムプログラム(アプリケーション層)という構成とした。

ハイパーバイザは、システム起動時に制御用RTOSに先立って起動し、CPUからの割り込みや、制御用RTOSの動作を管理する役割を担う。ハイパーバイザ設計に際しては、CPUの仮想化支援機能を利用し、ハイパーバイザが介在することによる制御用RTOSへの影響が最小限となるよう配慮した。

CPUコア2のRAS拡張用RTOSには、軽量・高い安定性などの特長があり、使用実績が多く信頼性が高いOSを採用した。設計上の留意点としては、不要な機能を徹底的に排除するようカスタマイズを施し、安定性を維持しつつ品質を確保した。

RAS拡張システムプログラムでは、次に述べる故障模擬、メモリ出力・解析、定期診断の3機能を実現した。

これによって、既設システムで利用していた制御用

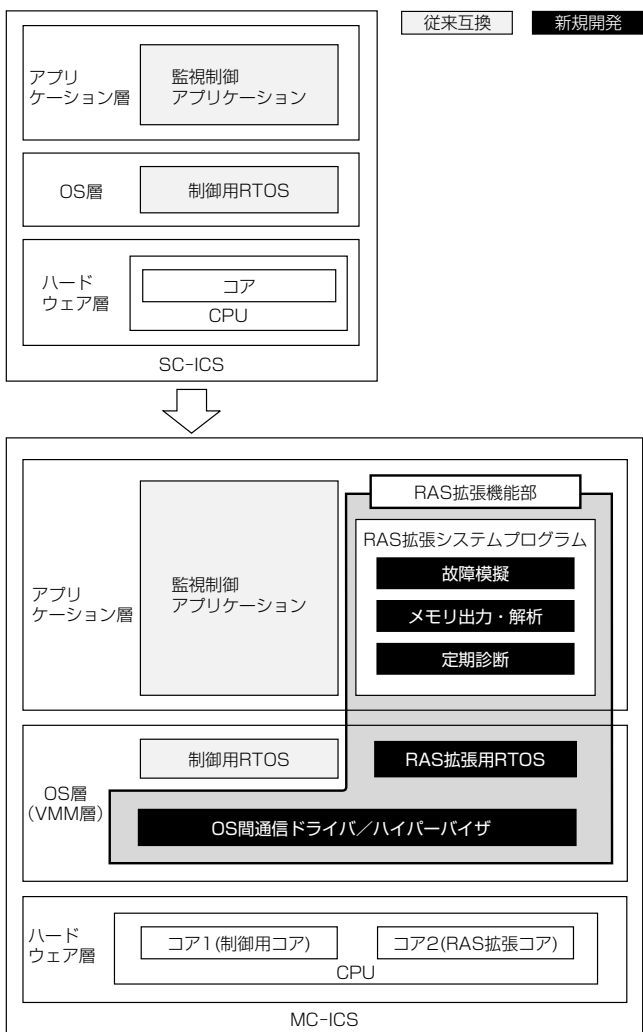


図2. SC-ICSとMC-ICSのソフトウェア構成

RTOSやアプリケーション資産を継承しながら、従来のシングルコアCPUでは実現が難しかったRAS拡張機能をCPUコア2の利用によって実現した。

3.2 故障模擬機能

故障模擬機能とは、ハードウェア故障が原因の障害(マシントラップ, ECC(Error Check and Correct)エラーなど)を、ハイパーバイザによって擬似的に発生させる機能である。

従来は、OSやアプリケーションのハードウェア故障検出機能の試験の際に、ハードウェア故障を実機上で発生させるために、ハードウェア又はソフトウェアを改造して試験していた。

ハードウェア改造による故障模擬では、試験対象カードからリード線を引き出し、回路を強制的に短絡させるためのスイッチを取り付けて実現していた。人手で操作するため、故障発生タイミングのコントロールが困難であった。

また、CPUやチップセット内に組み込まれた機能などのハードウェア改造が困難な試験については、制御用RTOSを改造した試験用OSを作成して、ソフトウェアで擬似的に故障を発生させていた。OS試験では、試験対象のOS自体を改造することになるため、使用可能な範囲が限られていた。さらに故障発生タイミングをコントロールするには、OSの故障検出箇所を改造する必要があり、OS試験では任意のタイミングで故障を発生させられなかった。

これに対しMC-ICSでは、故障模擬機能によってソフトウェアで擬似的に故障を発生させることができる。故障模擬機能では、故障発生のための特別な改造が不要な分、実際の動作により近い状態で故障を模擬することができる。また、ハイパーバイザで故障発生をコントロール可能なため、任意のタイミングで故障を発生させて試験を行うことができる。これによって、ハードウェア故障検出試験の密度を高めることができ、また障害の再現試験などでも活用できるようになった。

図3にSC-ICSのハードウェア故障模擬と、MC-ICSでの故障模擬機能の差異を示す。図中、SC-ICSの割り込み

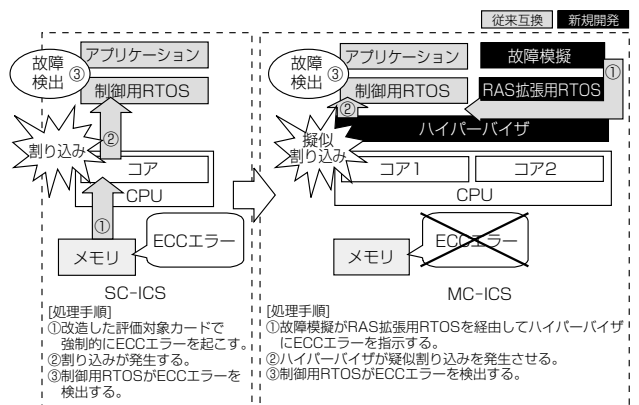


図3. 故障模擬機能(例: ECCエラー)

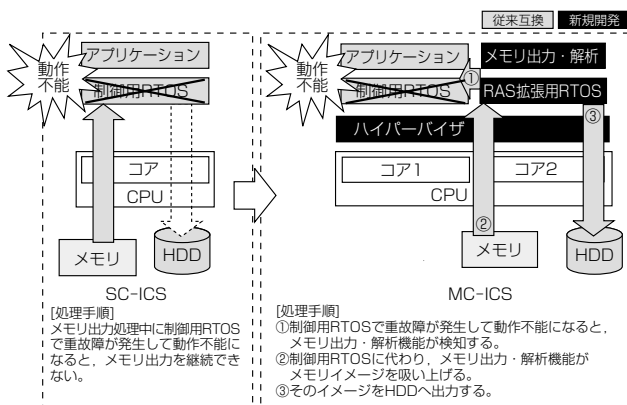


図4. メモリ出力・解析機能

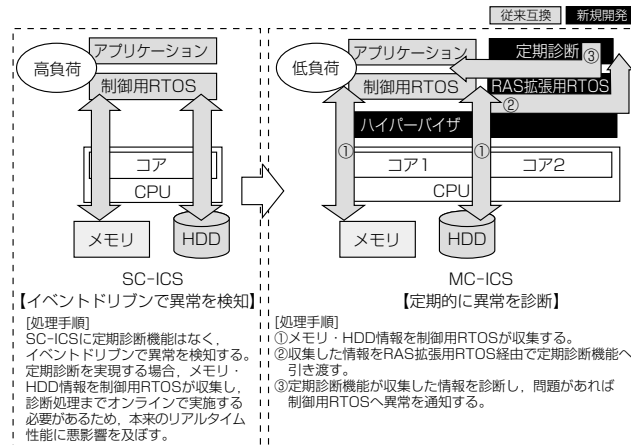


図5. 定期診断機能

とMC-ICSの擬似割り込みは、制御用RTOSからはどちらも同じものに見え、その違いを識別することはできない。

3.3 メモリ出力・解析機能

メモリ出力・解析機能とは、故障が発生した瞬間のメモリイメージをHDDに保存することで、保存したメモリイメージを後から解析して障害を調査するために利用する機能である(図4)。

SC-ICSでは、常に制御用RTOSがメモリ出力を行うが、MC-ICSでは、制御用RTOSが動作できない異常が発生した場合に、CPUコア2側のメモリ出力・解析機能からメモリ出力する機能を追加した。これによって、CPUコア1に搭載された制御用RTOSやアプリケーションが動作できない障害発生時にも、メモリイメージを取得・解析することが可能となる(ただし、CPUカードなどのハードウェア異常は除く)。CPUコア2側には必要な機能だけをカスタマイズしたRAS拡張用RTOSを採用することによって安定出力を可能とし、故障解析容易性を向上させた。

3.4 定期診断機能

定期診断機能とは、制御用RTOS, RAS拡張用RTOS, ハードウェアなどの健全性を定期的に診断する機能である(図5)。従来のSC-ICSでは、監視制御アプリケーションへの影響を考慮し、故障情報の収集は、ほとんどが異常を検知したときであった。また、その情報も故障時の対応に必要な情報に限定していた。MC-ICSでは、定期診断を監視制御アプリケーションとは別のコアで動作させ、異常を検知したときだけでなく、定常状態の診断情報を収集・解析可能とした。例えばHDD/SSD(Solid State Drive)の

リードエラーレートなどを収集・解析し、制御用RTOSが動作できなくなる前に異常を検出できるようにした。これによって信頼性を向上させることができた。

診断は、次の項目について実施する。

- (1) 各CPUコアの健全性・負荷状況
- (2) HDD, SSDの故障・寿命予測(S.M.A.R.T.(Self-Monitoring, Analysis and Reporting Technology) 解析)

4. むすび

マルチコアCPUを適用した産業用計算機MC-ICSで、次の機能を実現した。

- (1) AMP型マルチOS(制御用RTOS+RAS拡張用RTOS)を適用し、実績のあるアプリケーション資産を継承可能とした。
- (2) RAS拡張機能を搭載し、制御用RTOSの動作は変更せずに(リアルタイム性を確保し)、次の項目を実現した。
 - ①品質向上(故障模擬機能)
 - ②解析性向上(OS異常時のメモリ出力・解析機能)
 - ③信頼性向上(定期診断機能)

今後は、RAS拡張システムプログラムの機能拡充として、次の項目への対応を実施予定である。

- (1) 拡張カードなどを含めたシステム全体の故障模擬
- (2) 障害の自動解析機能
- (3) 診断情報を用いた(HDD・SSD以外のデバイスの)故障予測・寿命予測