

平成 27 年 6 月 24 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500046

研究課題名(和文) マルチコア・シングルコア混在型組み込み制御システム向け並列・分散処理環境

研究課題名(英文) A Parallel and Distributed Computing Environment for Embedded Control Systems with Multi-Core Processors and Single-Core Processors

研究代表者

横山 孝典 (Yokoyama, Takanori)

東京都市大学・知識工学部・教授

研究者番号：60386357

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：マルチコア・プロセッサとシングルコア・プロセッサが混在する分散型組み込み制御システムを対象に、ハードウェア構成やタスクの分散配置を意識せずにアプリケーションプログラムを開発可能とするため、位置透過タスク管理機構、位置透過同期機構、分散共有メモリ機構を有し、他ノード上や他CPUコア上のタスクを統合的に管理できる並列・分散リアルタイムOSを開発した。また、並列・分散システム上で動作する制御ソフトウェアをモデルベース設計に基づいて効率よく開発可能とするため、モデル変換ツールや設計検証ツール等から成る並列・分散制御ソフトウェア開発支援環境を開発するとともに、スケジューリング方式の提案を行った。

研究成果の概要(英文)：We have developed a parallel and distributed real-time operating system that supports multi-core parallel processing and distributed computing for embedded control systems. The real-time operating system provides location-transparent system calls for task management, inter-task synchronization and distributed shared memory. We have also developed a software development environment for parallel and distributed control systems and presented scheduling algorithms for multi-core parallel processing. The development environment provides a model transformation tool and a software design verification tool that support efficient model-based control software development.

研究分野：組み込みシステム

キーワード：組み込みソフトウェア 分散処理 並列処理 リアルタイムシステム オペレーティングシステム モデルベース開発

1. 研究開始当初の背景

自動車等の組み込み制御システムでは、複数の組み込みコンピュータをネットワーク接続した分散システム構成が広く用いられている。例えば自動車制御システムは、数十個から百個以上の ECU (Electronic Control Unit) と呼ばれる組み込みコンピュータを複数のリアルタイムネットワークで接続した、複雑なシステム構成となっている。

そのような中、近年、消費電力を抑えながら性能向上を実現できるという利点から、複数の CPU コアをひとつの半導体チップに搭載したマルチコア・プロセッサが注目され、組み込みシステム向けのマルチコア組み込みプロセッサも発表されている。例えば、自動車制御システムにおいて、特に性能を要求される ECU をマルチコア組み込みプロセッサ搭載 ECU に置き換えることで、より高度な制御を実現することが期待される。

マルチコア・プロセッサを対象とした組み込み OS として、μITRON 仕様をベースとした TOPPERS/FMP カーネルや AUTOSAR OS のマルチコア向け仕様等が提案されている。しかしこれらは、マルチコア・プロセッサを搭載した 1 台の組み込みコンピュータ上の並列処理タスクを対象としたもので、ネットワーク接続された複数の組み込みコンピュータから成る分散システム全体を対象としたものではない。

マルチコア・プロセッサを含む分散制御システムでは、1 CPU 内でのマルチタスク処理、マルチコア・プロセッサ上の並列処理、ネットワーク接続された複数の組み込みコンピュータによる分散処理が混在することになる。マルチコア・プロセッサとシングルコア・プロセッサが混在する分散型組み込み制御システムを容易に開発できる実行環境および開発環境が求められている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、マルチコア・プロセッサ搭載組み込みコンピュータとシングルコア・プロセッサ搭載組み込みコンピュータが混在する分散型組み込み制御システムを対象に、1 CPU 内と同様の環境を提供することで、ハードウェア構成やタスクの分散配置を意識せずにアプリケーションプログラムを開発可能とするとともに、リアルタイム性の保証を容易にする、並列・分散処理環境を開発することである。

具体的には、(1)位置透過タスク管理機構、位置透過同期機構、分散共有メモリ機構を有する「並列・分散リアルタイム OS」、(2)モデルベース制御設計に基づいて並列・分散処理向けソフトウェアを効率よく開発可能とする「並列・分散制御ソフトウェア開発支援環境」を開発する。

3. 研究の方法

並列・分散リアルタイム OS の研究方法、

並列・分散制御ソフトウェア開発支援環境の研究手法、研究体制について、以下具体的に述べる。

(1) 並列・分散リアルタイム OS の研究方法

図 1 に示すような、マルチコア・プロセッサ搭載組み込みコンピュータとシングルコア・プロセッサ搭載組み込みコンピュータが混在する分散型組み込み制御システムを対象に、1 CPU 内と同様のタスク管理やタスク間同期、リソースの共有が可能な環境を実現する。

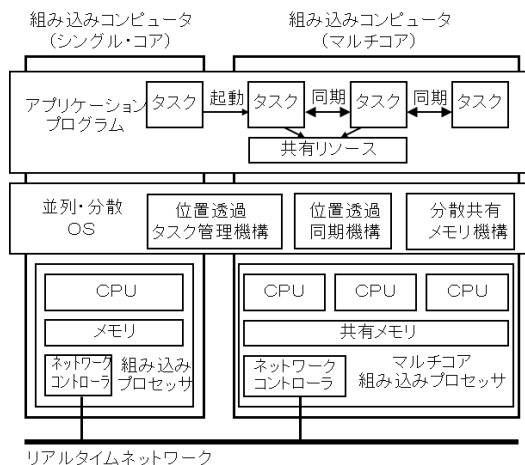


図1 並列・分散処理環境

具体的には、自動車制御分野における標準仕様である OSEK OS 仕様に基づくオープンソースのリアルタイム OS である TOPPERS/ATK1 を拡張し、位置透過なタスク管理機能、位置透過なタスク間同期機能、分散共有メモリ機能を実装する。タスク間同期機能にはイベント制御機能とリソース管理機能が含まれる。

まず、位置透過なタスク管理とイベント制御を実現するため、タスク管理用のシステムコールとイベント管理用のシステムコールについて、他の CPU コア上や他のノード (以下、ネットワーク接続された個々のコンピュータをノードと呼ぶ) 上のタスクを対象にできるように拡張する。他 CPU コア上や他ノード上のタスクを対象にしたシステムコールを遠隔システムコールと呼ぶ。タスク管理用システムコールとイベント制御用システムコールを遠隔システムコール可能とすることで、位置透過性のあるタスク管理やイベント制御を実現する。一方リソース管理用システムコールについては、ノード間でリソースを共有することはほとんど考えられないため、CPU コア間で共有するリソースを扱えるように拡張する。

組み込みシステム向けのマルチコア・プロセッサは共有メモリを有しているものが多く、共有メモリ上にデータを置くことで、異なる CPU 上のタスク間でデータを共有できる。そこで、ネットワーク接続された異なる

るノード上のタスク間でもデータを共有できるように、分散共有メモリ機構を実現する。一般に、同一CPU上のタスク間でデータを共有する場合や、マルチコア・プロセッサにおいて異なるCPUコア上のタスク間でデータを共有する場合には、リソース管理用システムコールを用いて相互排除を行うのが普通である。そこで、分散共有メモリ上の共有データにアクセスする場合も同じリソース管理用のシステムコールを発行することとし、リソース管理用システムコールに分散共有メモリ機能を実装する。また、共有データの一貫性を保証する機能も実装する。

マルチコア・プロセッサとシングルコア・プロセッサが混在するとともに、実装する制御機能がノードによって異なる分散型組み込み制御システムでは、各ノードに搭載するリアルタイムOSに対する要求機能が異なることがある。また、前述のように、本並列・分散リアルタイムOSは、オープンソースのTOPPERS/ATK1をカスタマイズすることで実装するが、オリジナルのソースコードとカスタマイズしたソースコードが混在するため、構成管理が複雑になる。

そこで、オリジナルのソースコードを直接修正することなく、アスペクト指向プログラミングを用いてカスタマイズする手法も開発する。具体的には、位置透過性のあるタスク管理やタスク間同期のための遠隔システムコール機構を追加するアスペクトを提案する。また、様々な制御アプリケーションに対応するため、固定優先度スケジューリング機構を動的優先度スケジューリング機構に置き換えるアスペクトも提案する。

## (2) 並列・分散制御ソフトウェア開発支援環境の研究手法

リアルタイム性のある並列・分散制御ソフトウェアを、モデルベース制御設計に基づいて効率よく開発するための開発支援環境を開発する。具体的には、図2に示すように、制御ロジック設計により構築した制御モデルをソフトウェア設計に適したソフトウェアモデルに変換するモデル変換ツールと、設計したソフトウェアモデルがマルチコア・プロセッサ上で正しく動作することを検証する設計検証ツールを開発する。また、リアルタイム性の実現に必要なスケジューリング方式の検討も行う。

モデル変換ツールは、制御ロジック設計において広く使用されているMATLAB/Simulinkを用いて構築した制御モデル(Simulinkモデル)を、ソフトウェア設計において広く使用されているUML(Unified Modeling Language)で記述したソフトウェアモデル(UMLモデル)に変換する。これまでに我々が開発したモデル変換ツールをベースに、状態遷移や条件分岐等を含むSimulinkモデルを、複数のタスクで実行されるUMLモデルに変換できるように拡張する。

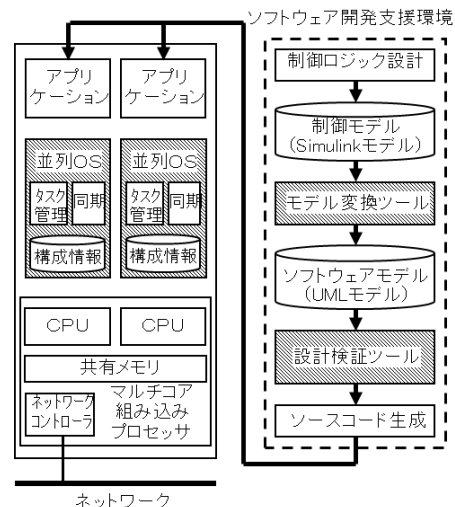


図2 並列・分散制御ソフトウェア開発環境

設計検証ツールは、UML記述されたソフトウェアモデルがマルチコア・プロセッサ上で正しく動くことを検証するツールである。制御ロジック設計で使用されるMATLAB/Simulinkは計算時間がゼロとしてシミュレーションを行うため、制御モデルをソフトウェアモデルにそのまま変換して実装した場合、マルチタスク環境におけるプリエンブションやマルチコア・プロセッサにおける並列動作により、データの不整合が発生する可能性がある。このため、ソフトウェア設計の段階で検証を行い、データの不整合が発生する場合には、正しく動作するようにソフトウェアモデルを修正する必要がある。

そこで、並行プロセスの検証が可能なモデル検査ツールSPINを用いて検証を行うこととし、SPINによりデータの不整合を検出する手法を提案する。具体的には、SPINで用いられるPromelaと呼ばれるモデル記述言語を用いて、データの不整合を検出可能な並行プロセスの記述方法を提案するとともに、UML記述されたモデルを提案したPromela記述に変換するツールを開発する。

スケジューリング方式については、マルチコア・プロセッサ上で高いスケジュール可能性が得られるスケジューリング・アルゴリズムを提案するとともに、提案したアルゴリズムにおいてスケジュール可能となる条件を明らかにする。また、メタヒューリスティクスを用いたスケジューリングについても検討する。

## (3) 研究体制

研究代表者が研究全体の管理を行う。研究代表者と研究分担者は方式検討及び基本設計を担当し、その指導のもと、大学院生および学部4年生の計7名程度の体制で、設計、実装、実験・評価を行う。また、組み込み制御システムの研究開発をしている企業の研究協力者との意見交換やレビューを通して、実用性の高い技術の開発を目指す。

#### 4. 研究成果

本研究では、タスク管理やタスク間同期のための位置透過性のあるシステムコールや分散共有メモリ機構を有する並列・分散リアルタイムOSと、モデルベース制御設計に基づいて並列・分散処理向けソフトウェアを効率よく開発可能とする並列・分散制御ソフトウェア開発支援環境を開発した。以下、それらの成果について具体的に述べる。

##### (1) 並列・分散リアルタイムOSの研究成果

開発した並列・分散リアルタイムOSの構成を図3に示す。本並列・分散OSは、OSEK OS仕様におけるタスク管理およびイベント制御のためのシステムコールを拡張し、単一CPU上のタスクのみでなく、他CPUコア上のタスクや他ノード上のタスクを指定してタスクの起動やイベントの設定を行える遠隔システムコール機構を実装した。また、OSEK OS仕様におけるリソース管理のためのシステムコールを拡張し、同一CPU上のタスク間のみでなく、異なるCPUコア上のタスク間で共有するリソースに対する相互排除を可能とした。

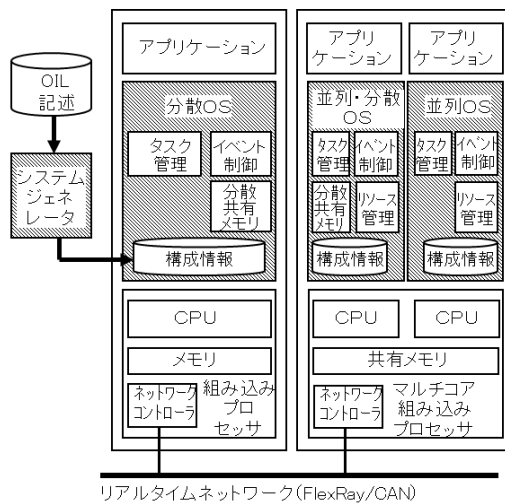


図3 並列・分散リアルタイムOS

さらに、マルチコア・プロセッサにおいて異なるCPUコア上のタスクが共有メモリを介してデータを共有するのと同様に、異なるノード上のタスクがデータを共有可能とする、分散共有メモリ機構を開発した。一般に、タスク間でデータを共有する場合には、リソース管理のためのシステムコールを利用して相互排除を行うのが普通であるため、OSEK OS仕様におけるリソース管理のためのシステムコールに、分散共有メモリ機構を組み込んだ。また、モデルベース制御設計に基づいて設計された分散制御ソフトウェアに対して、順序一貫性と等価な一貫性を保証することのできるデータ一貫性機構を実装した。

開発した並列・分散リアルタイムOSを用いることで、マルチコア・プロセッサ搭載組

み込みコンピュータとシングルコア・プロセッサ搭載組み込みコンピュータが混在する分散型組み込み制御システムにおいて、位置透過性のあるタスク管理やタスク間同期、分散共有メモリを用いたデータの共有が可能になる。これにより、ハードウェア構成やタスクの分散配置を意識せずにアプリケーションプログラムが開発可能になるとともに、リアルタイム性への対応も容易になる。

そして、以上述べた並列・分散リアルタイムOSの開発内容に関して、学会発表、他計6件の発表を行った。

また、アスペクト指向プログラミングを用いてリアルタイムOSをカスタマイズする手法を開発した。具体的には、他CPUコア上や他ノード上のタスクを対象にした遠隔システムコール機構を追加するアスペクトや、固定優先度スケジューリングを動的優先度スケジューリングに置き換えるアスペクトを提案するとともに、実用上問題ないオーバヘッドで実装できることを確認した。これにより、オリジナルのソースコードを直接修正することなくリアルタイムOSをカスタマイズでき、ノードにより要求される機能が異なるリアルタイムOSの開発や構成管理が容易になる。

そして、アスペクト指向によるリアルタイムOSのカスタマイズに関して、学会発表、他計6件の発表を行った。

##### (2) 並列・分散制御ソフトウェア開発支援環境の研究成果

リアルタイム性のある並列・分散制御ソフトウェアを効率よく開発可能とするソフトウェア開発支援環境として、モデルベース制御設計により構築した制御モデルをソフトウェア設計に適したソフトウェアモデルに変換するためのモデル変換ツールと、設計したソフトウェアモデルがマルチコア・プロセッサ上で正しく動作することを検証するための設計検証ツールを開発した。また、リアルタイム性の実現に適したマルチコア・プロセッサ向けのスケジューリング方式を提案した。

モデル変換ツールに関しては、従来のモデル変換ツールをベースに、状態遷移や条件分岐等を含む Simulink モデルを UML モデルに変換できるように拡張した。これにより、様々な制御機能を実現するためのタスク群から構成される並列・分散制御ソフトウェアについて、制御モデルからソフトウェアモデルへの自動変換が可能になる。

そしてモデル変換ツールに関して、雑誌論文、および学会発表 他計2件の学会発表を行った。

また、UML により記述したソフトウェアモデルがマルチコア・プロセッサ上で正しく動作することを検証するため、設計検証ツールを開発した。具体的には、マルチコア・プロセッサ上におけるタスクの並列動作やプリ

エンブションにより、データの不整合が発生するかどうかの検証を、SPIN を用いて行うことを可能とした。すなわち、データ不整合の検出を可能とするための Promela による並行プロセス記述法を提案するとともに、ソフトウェア構成を記述した UML モデルから Promela 記述に変換するツールを開発した。これにより、UML 記述したソフトウェアモデルがマルチコア・プロセッサ上で正しく動作するかどうかの検証を可能とした。

そして設計検証ツールに関して、学会発表他計 2 件の発表を行った。

スケジューリング方式については、マルチコア・プロセッサ上のタスクのスケジューリングを主な対象として研究を行った。具体的には、RM (Rate Monotonic) スケジューリングをベースに余裕時間を考慮した RMZL を拡張し、スケジュール可能性をより向上させたスケジューリングアルゴリズムや、メタヒューリスティクスのひとつである ACO (Ant Colony Optimization) を用いたスケジューリングアルゴリズムを提案し、その有効性を評価した。

そしてスケジューリング関連の研究成果として、雑誌論文、 、 、および学会発表、 、他計 12 件の学会発表を行った。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 4 件)

Zhao, C., Yoo, M. and Yokoyama, T., On-Line Scheduling Algorithm for Real-Time Multiprocessor Systems with ACO, International Journal of Intelligent Information Systems, 査読有, Vol.4, No.2-1, 13-17, 2015, DOI:10.11648/j.ijis.s.2015040201.13

Omori, K., Yoo, M. and Yokoyama, T., Packet Switch Scheduler for Increasing Sending Packet, International Journal of Intelligent Information Systems, 査読有, Vol.4, No.2-1, 7-12, 2015, DOI:10.11648/j.ijis.s.2015040201.12

Yanai, K., Yoo, M. and Yokoyama, T., Real-Time Scheduling Algorithm Based on RMZL and Schedulability, International Journal of Engineering Innovation & Research, 査読有, Vol.2, No.6, 542-547, 2013

Kamiyama, T., Tamura, M., Soeda, T., Yoo, M. and Yokoyama, T., An Embedded Control Software Development Environment with Simulink Models and UML Models, IAENG International Journal of Computer Science, 査読有, Vol.39, 262-268, 2012

[学会発表](計 28 件)

石橋航太, 横山幸太郎, 兪明連, 横山孝典, 位置透過性のあるシステムコールを有するマルチコアプロセッサ向けリアルタイ

ム OS, 情報処理学会組込みシステム研究会, Vol.2015-EMB-37, No.8, 1-7, 2015, 2015 年 6 月 5 日, 株式会社東芝 スマートコミュニティセンター(神奈川県・川崎市)

原田祐輔, 阿部一樹, 兪明連, 横山孝典, アスペクト指向プログラミングによるリアルタイム OS スケジューラのカスタマイズ, 情報処理学会組込みシステム研究会, Vol.2015-EMB-37, No.7, 1-8, 2015, 2015 年 6 月 5 日, 株式会社東芝 スマートコミュニティセンター(神奈川県・川崎市)

黒木裕太, 田中亨佑, 兪明連, 横山孝典, 状態遷移や条件分岐を含む制御モデルを対象とした Simulink・UML モデル変換ツール, 情報処理学会組込みシステム研究会, Vol.2015-EMB-37, No.1, 1-7, 2015 年 6 月 4 日, 株式会社東芝 スマートコミュニティセンター(神奈川県・川崎市)

横山幸太郎, 齊藤政典, 兪明連, 横山孝典, マルチコア並列処理・分散処理統合機能を有するリアルタイム OS, 情報処理学会組込みシステム研究会, Vol.2016-EMB-36, No.36, 1-6, 2015 年 3 月 7 日, 奄美市社会福祉協議会(鹿児島県・奄美市)

Ito, T., Yoo, M. and Yokoyama, T., An Embedded Control Software Development Environment with Data Consistency Verification for Preemptive Multi-Task Systems, International Conference on Advances in Computing, Control and Networking 2015, 46-50, 2015 年 2 月 22 日, バンコク(タイ), DOI:10.15224/978-1-63248-038-5-09

Saito, N., Yoo, M. and Yokoyama, T., A Distributed Real-Time Operating System Built with Aspect-Oriented Programming for Distributed Embedded Control Systems, 20th IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems, 436-443, 2014 年 12 月 17 日, 新竹(台湾), DOI:10.1109/PADSW.2014.7097839

Chiba, T., Yoo, M., Yokoyama, T., A Distributed Real-Time Operating System with Distributed Shared Memory for Embedded Control Systems, 11th IEEE International Conference on Embedded Computing, 248-255, 2013 年 12 月 22 日, 成都(中国), DOI:10.1109/DASC.2013.71

Abe, K., Yoo, M. and Yokoyama, T., Aspect-Oriented Customization of the Scheduling Algorithm and the Resource Access Protocol of a Real-Time Operating System, 10th IEEE International Conference on Embedded Software and Systems, 627-634, 2013 年 12 月 3 日, シドニー(オーストラリア), DOI:10.1109/CSE.2013.98

Omori, K., Yoo, M., Yokoyama, T., A Packet Switch Scheduler based on 2DRR for

High-Throughput, 17th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems, 3-8, 2013年11月8日, ソウル(韓国),

DOI:10.1016/j.procs.2013.10.021

Yanai, K., Yoo, M., Yokoyama, T., A Proposal of Real-Time Scheduling Algorithm based on RMZL and Schedulability Analysis, 17th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems, 9-14, 2013年11月9日, ソウル(韓国),

DOI:10.1016/j.procs.2013.10.022

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

横山 孝典 (YOKOYAMA TAKANORI)

東京都市大学・知識工学部・教授

研究者番号：60386357

### (2) 研究分担者

兪 明連 (YOO MYUNGRYUN)

東京都市大学・知識工学部・准教授

研究者番号：80451384