

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00084

研究課題名(和文)ヘテロジニアスな分散型組み込み制御システムのための時間駆動分散処理環境

研究課題名(英文)A Time-Triggered Distributed Computing Environment for Heterogeneous Distributed Embedded Control Systems

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)：有線ネットワークと無線ネットワークが混在したヘテロジニアスな分散型組み込み制御システムにおいて、複数の組み込みコンピュータが高精度に同期して処理を実行できる分散処理環境を実現することを目的に、GNSS(全地球航法衛星システム)を用いた時刻同期機構を有する分散リアルタイムOSを開発するとともに、アスペクト指向プログラミングを用いて仕様の異なる複数のバージョンから成るリアルタイムOSファミリを開発する手法を提案した。また、開発した分散処理環境で動作するアプリケーションプログラムを効率的に開発するためのモデル変換ツールや検証ツールを開発するとともに、スケジューリング方式を提案した。

研究成果の概要(英文)：The goal of the research is to provide a distributed computing environment for heterogeneous distributed embedded control systems with wired networks and wireless networks, in which a number of embedded computers execute precisely synchronized control processing. We have developed a distributed real-time operating system with GNSS(Global Navigation Satellite Systems)-based tick synchronization and have presented an aspect-oriented development method of a real-time operating system family with variants. We have also developed a model transformation tool and a verification tool and have presented scheduling algorithms for distributed embedded control systems.

研究分野：情報学

キーワード：組み込みシステム リアルタイムシステム サイバーフィジカルシステム 分散処理 オペレーティングシステム 時間駆動アーキテクチャ

1. 研究開始当初の背景

情報通信技術を用いて実世界のセンシングや制御を行うサイバーフィジカルシステム (Cyber-Physical Systems, CPS) が注目されている。その中でも特にハードリアルタイム性が求められるのが組み込み制御システムである。組み込み制御システムは、実世界に存在する制御対象を組み込みコンピュータにより制御する。フィジカルな世界は単一の物理時間に従って動作するのに対し、コンピュータ上のソフトウェアはコンピュータ毎に異なる仮想的な時間に従って動作するのが普通である。しかし、関連の強い複数の制御対象を正確に制御するには、複数のコンピュータが同一の時間に基づいて処理を実行することが必要になる。

ネットワーク化が進んでいる自動車制御システムでは、同一時間に従った処理が可能な時間駆動 (Time-Triggered) アーキテクチャに基づく分散制御システムが実用化されている。時間駆動アーキテクチャに基づく自動車制御システムでは、ECU (Electronic Control Unit) と呼ばれる組み込みコンピュータを、時刻同期機能を持つ時間駆動ネットワーク FlexRay で接続することで、同一時間に基づいて同期した制御処理を可能としている。

そして最近では、図1に示すように、自動車間をつなぐ車々間通信や、自動車と道路上に設置された機器をつなぐ路車間通信を利用することで、安全性を向上したり、自動走行や隊列走行を実現することが期待されている。そのためのシステムは、有線ネットワークと無線ネットワークが混在したヘテロジニアスな分散型組み込み制御システムとなる。空間的な広がりの中に存在する複数の対象を正確に制御するには、ヘテロジニアスな構成でも高精度に同期して動作可能な時間駆動アーキテクチャを実現する必要がある。このようなシステムは、列車、電力、産業等の分野でも必要になると考えられるが、それを実現できる分散処理環境は提案されていない。

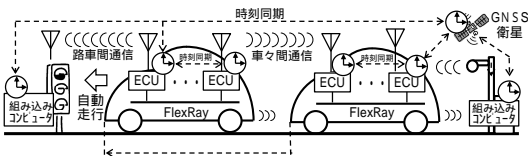


図1 ヘテロジニアスな分散型組み込み制御システムの例

2. 研究の目的

本研究の目的は、ヘテロジニアスな分散型組み込み制御システムを対象に、同期したシステム時刻に基づいたスケジューリングが可能な分散リアルタイムOS (Real-Time Operating System, RTOS) と、その分散RTOS上で動作するアプリケーションを効率よく開発するためのソフトウェア開発環境を実現することである。

上記目的を達成するため、本研究では、(1)ヘテロジニアスな環境でも同一時刻に基づいたタスク管理を可能とする「分散リアルタイムOSファミリ」、(2)上記分散RTOSファミリを用いた分散型組み込み制御システムの開発を支援する「ソフトウェア開発環境」を開発する。

図2は本研究で開発する分散RTOSを搭載した複数の組み込みコンピュータから成る分散型組み込み制御システムが、実世界 (物理世界) に存在する制御対象を制御しているようすを表している。全ての組み込みコンピュータが、GNSSにより同期したシステム時刻に従って制御処理を実行することで、高い精度での制御を実現できる。

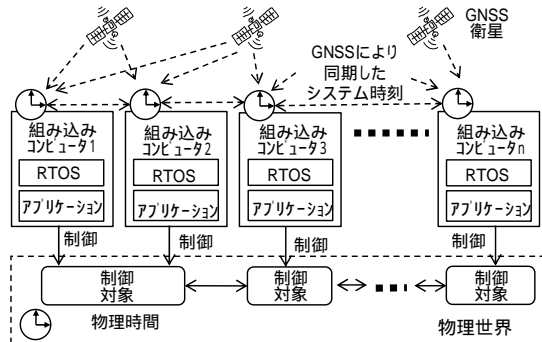


図2 同期したシステム時刻に基づいて処理を行う分散型組み込み制御システム

3. 研究の方法

分散リアルタイムOSファミリとソフトウェア開発環境のそれぞれの研究方法について、以下述べる。

(1)分散リアルタイムOSファミリ

まず、ヘテロジニアスな分散システムにおいて全てのノードが同期して処理を実行することを可能とするため、GNSSにより提供されるUTC (協定世界時) に同期したシステム時刻に従ってタスクのスケジューリングが可能なRTOSを開発する。

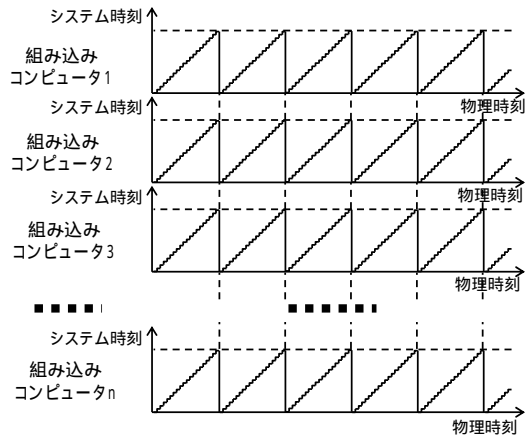


図3 同期したシステム時刻

図3は、分散型組み込み制御システムを構成する各組み込みコンピュータのシステム

時刻が同期しているようすを示したものである。グラフの横軸は物理時刻、縦軸は各組み込みコンピュータ上の RTOS のシステム時刻である。図 3 を見るとわかるように、どの組み込みコンピュータ上のシステム時刻も常に一致しており、開発した RTOS を用いることで、同期したシステム時刻に基づいてタスクをスケジューリングし、実行することができる。

RTOS のシステム時刻の単位はティックと呼ばれ、ティック毎に起動される割り込み処理(以下、ティック割り込みと呼ぶ)によってシステム時刻は更新される。

同期したシステム時刻の実現方法は以下の通りである。GNSS 衛星からの電波を受信した GNSS モジュールが発生する高精度な高周波クロック信号を、組み込みコンピュータのハードウェアタイマでカウントする。RTOS は、ティック割り込み時にそのハードウェアタイマ値を読み出して、ティックの周期にずれがないかをチェックし、ずれが発生していた場合はティック周期を補正する。

また、GNSS モジュールが発生する 1 秒周期の PPS 信号により 1 秒毎に割り込みを発生させ、その割り込み処理でティックの位相にずれがないかをチェックし、ずれが発生していた場合は、ティック位相を補正する。同様に、1 秒周期の割り込み処理でシステム時刻の値が正しいことをチェックし、ずれが発生していた場合は、システム時刻を補正する。

上記ティック周期補正機能、ティック位相補正機能、システム時刻補正機能を、OSEK OS 仕様に基づくオープンソース RTOS である TOPPERS/ATK1 に追加することで、GNSS に基づく時刻同期機構を有する分散 RTOS を実装する。

次に、有線ネットワークのみでなく、無線ネットワークにも対応可能な分散処理機能を開発する。一般に無線ネットワークは通信時間の変動が大きく、ジッタの少ない分散処理を実現することは難しい。そこで本研究では、メッセージデータに時刻を表すタイムスタンプを付加して送信し、受信側では受信メッセージに付加されたタイムスタンプ情報を用いてタスク起動時刻を決定する。これにより、通信時間の変動の影響を受けず、ジッタのない処理を実現する。

また、分散制御プログラムの開発を容易にするための分散共有メモリ機能も開発する。一般に組み込み制御システムでは、同一コンピュータ上で実行されるタスク間でのデータのやりとりは共有変数(グローバル変数)を用いることが多い。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のデータのやりとりも、共有メモリ上に配置された共有変数を用いることが多い。これに対し、ネットワーク接続された異なるコンピュータ上のタスク間のデータのやりとりはメッセージ通信を用いることが多い。このため、各コンピュータへのタスクの配置を変更し

た場合には、プログラムの書き換えが必要となる。そこで、ネットワーク接続されたコンピュータ間で仮想的な共有変数を実現するため、分散共有メモリ機能を有する分散 RTOS を開発する。

さらに、分散 RTOS ファミリを効率的に開発する手法も提案する。ヘテロジニアスな分散制御システムにおいて RTOS が提供すべき機能は、対象とするアプリケーションによって異なる。しかしながら、組み込みシステムにおけるリソース制約により、全ての機能を有する RTOS を搭載することは困難である。このため、対象システム毎に必要な最小限の機能を有する RTOS を提供することが望ましく、仕様の異なる複数のバージョン(バリエーション)から成る RTOS ファミリの開発が必要となる。

そこで本研究では、アスペクト指向プログラミングを用いることで、効率的に RTOS ファミリを開発する手法を提案する。これにより、ベースとする RTOS のソースコードを直接修正することなく、織り込むアスペクトを変えることで、仕様の異なる RTOS を実装できる。

具体的には、分散システムにおいて他ノード上のタスクも自ノード上のタスクと同様に管理可能とする機能や、マルチコアプロセッサを搭載した組み込みコンピュータにおいて他 CPU コア上のタスクを自 CPU コア上のタスクと同様に管理可能とする機能を、アスペクトを用いて追加可能とする。また、ベースとする RTOS の固定優先度スケジューリング機能を、EDF(Earliest Deadline First)のような動的優先度スケジューリング機能に置き換えることを、アスペクトを用いて実現する。

(2)ソフトウェア開発環境

ヘテロジニアスな分散型組み込み制御システムのアプリケーションソフトウェアを効率よく開発するための、ソフトウェア開発環境を開発する。具体的には、制御モデルを入力してリアルタイム設計や分散システム設計がしやすいソフトウェアモデルに変換するモデル変換ツールと、リアルタイム設計およびその検証を支援するリアルタイム設計・検証ツールを開発する。また、リアルタイム性を保証するために必要となるスケジューリングアルゴリズムも提案する。

制御ソフトウェアの開発の流れと、その開発を支援するためのツールを図 4 に示す。まず、制御ロジック設計において、制御モデルである Simulink モデルを作成する。次に、作成した Simulink モデルを、モデル変換ツールを用いて、ソフトウェアモデルである UML モデルに変換する。そして、UML モデルで記述されたソフトウェアが RTOS 上で正しく動作するかを、リアルタイム設計・検証ツールを用いて検証する。最後に、UML モデルからソースコードを生成する。

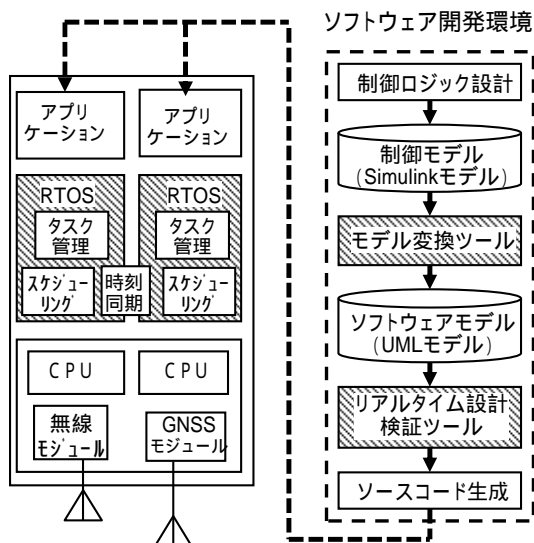


図4ソフトウェア開発の流れと開発ツール

モデル変換ツールは、制御ロジックを記述した Simulink モデルをソフトウェア設計に適した UML モデルに変換する。我々はすでに、状態遷移や条件分岐を表すブロックを含まない Simulink モデルを、クラス図、オブジェクト図、シーケンス図等の UML モデルに変換するツールを開発している。本研究ではこのモデル変換ツールをベースに、ヘテロジニアスな分散型組み込み制御システムに必要な機能拡張を行う。

まず、状態遷移や条件分岐を表すブロックを含む Simulink モデルを扱えるようにするとともに、無駄な計算を行わない効率の良い UML モデルに変換できるように拡張する。具体的には、Simulink モデル中のデータフローと制御フローを解析し、状態遷移や条件分岐に応じて実行する処理を切り替えられる UML モデルを生成する。また、タスクに関する記述を含むモデルを扱えるようにする。

さらに、より広範囲なアプリケーションに対応可能とするため、生成する UML モデルの図の種類も増やす。具体的には、クラス図、オブジェクト図、シーケンス図のほか、アクティビティ図、ステートマシン図、コミュニケーション図を生成可能とする。

Simulink は制御ロジックの設計に有用なツールであるが、プリエンプションのあるマルチタスク環境を考慮したシミュレーションはできない。このため、Simulink モデルから生成した UML モデルをそのままプログラム化した場合に、プリエンプションによるデータの不整合が発生する可能性がある。そこでリアルタイム設計・検証ツールとして、SPIN と呼ばれるモデル検査ツールを用いてデータの整合性を検証可能とするツールを開発する。具体的には、モデル変換ツールが生成した UML モデルを、SPIN による検証を行うための Promela コードに変換するツールを開発する。

また、マルチコアプロセッサや複数の組み

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においてリアルタイム性を保証するため、マルチプロセッサを対象としたスケジューリングアルゴリズムを提案する。

4. 研究成果

分散リアルタイム OS ファミリとソフトウェア開発環境のそれぞれの研究成果について、以下述べる。

(1) 分散リアルタイム OS ファミリの研究成果

ヘテロジニアスな分散型組み込み制御システムを構成する組み込みコンピュータと、その上で動作する分散 RTOS ファミリの構成を図5に示す。開発した分散 RTOS ファミリは、シングルコアプロセッサのみでなくマルチコアプロセッサにも対応している。各 RTOS には、タスク管理やスケジューリングという RTOS の基本機能の他、本研究で新規に開発した時刻同期機能や分散共有メモリ機能を有している。また、有線ネットワークのみでなく無線ネットワークにも対応している。

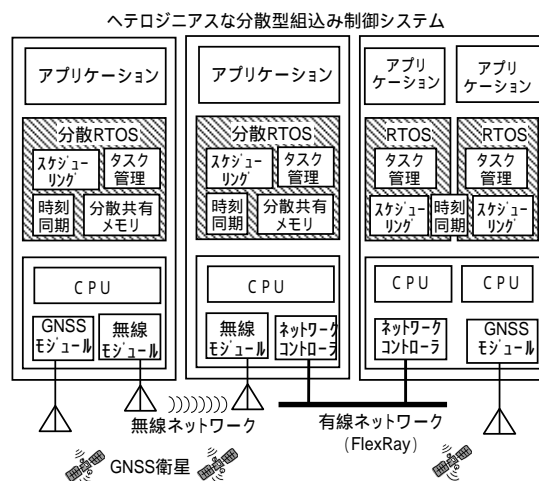


図5 分散リアルタイム OS ファミリ

まず基本的な機能として、シングルコアプロセッサとマルチコアプロセッサが混在する環境において、位置透過なタスク管理を行う機能を開発した。そして、学会発表、その他2件の発表を行った。

次に、ヘテロジニアスな環境でも同一時刻に基づいたタスク管理を可能とするために必要となる基本機能である時刻同期機能を開発した。これにより、GNSS 衛星からの電波を受信する GNSS モジュールから出力されるクロック信号を利用して、各 RTOS のシステム時刻を UTC に高精度に同期させることができる。そして、同期したシステム時刻に基づいてスケジューリングを行うことで、分散配置された組み込みコンピュータが同期して処理を実行することが可能になる。

システム時刻はタスクのスケジューリングに用いられるため、スケジューリング性能に影響を及ぼさない程度の精度で同期する

必要がある。開発した時刻同期機能の精度を測定したところ、時刻同期の誤差は最大でもタスク起動のオーバーヘッド（タスク起動にかかる処理時間）程度以下であることを確認した。したがって、実用上十分な精度で同期できていると考えている。

そして、以上述べた時刻同期機能を有するRTOSの研究成果について、雑誌論文、および学会発表、その他1件の発表を行った。

また、2種類の分散共有メモリ機能を開発した。ひとつはFlexRayネットワークを用いて、ノード間の同期を行わずに一貫性を保証する分散共有メモリ機能である。提供する一貫性はSimulinkで開発した制御アプリケーションを対象としたもので、分散共有メモリ上の全変数について順序一貫性と同等の一貫性を保証する等価的順序一貫性と、ひとつの変数のみに着目した場合にアクセス順序を保証する部分的順序一貫性である。そして本分散共有メモリ機能を搭載した分散RTOSを実装し、実用上問題のない性能であることを確認した。そして、雑誌論文、学会発表、その他1件の発表を行った。

もうひとつの分散共有メモリ機能は、CANネットワークを対象とし、CANのアービトレーション機能を用いて排他制御を行うことで、共有変数の値の一貫性を保証する。CANコントローラのハードウェアで行うアービトレーション機能を利用することで、効率がよくリアルタイム性に優れた排他制御を実現できる。そして本分散共有メモリ機能を搭載した分散RTOSを実装し、実用上問題のない性能が得られたことを確認した。そして、学会発表、 を行った。

次に、分散RTOS上で動作し、無線ネットワークにも対応可能な分散処理ミドルウェアを開発した。本ミドルウェアは有線ネットワークのCANと無線ネットワークのZigBeeを扱うことができる。

一般に分散型組み込み制御システムは、入力処理を行うタスク（入力タスク）、出力処理を行うタスク（出力タスク）、入力処理や出力処理を行わず算出処理のみを行うタスク（算出タスク）から構成される。本ミドルウェアでは、直接制御対象とやりとりする入力タスクと出力タスク（入出力タスク）については同期したシステム時刻に従って周期的にタスクを起動し、算出タスクについてはメッセージ受信イベントで起動する。また、通信時間が変動するとともに、必ずしも通信順序が保証されないネットワークに対応するため、ノード間でやりとりするメッセージにタイムスタンプを付加し、そのタイムスタンプを用いた論理的な時間によって算出タスクを管理する。算出タスクをメッセージの受信イベントで起動することで通信時間の変動を許容するとともに、入出力タスクを同期した時刻で起動することでジッタのない入出力処理を実現している。

そして、開発したミドルウェアの評価を行

い、実用上問題のない性能であることを確認した。また本分散処理ミドルウェアについて、学会発表、その他1件の発表を行った。

さらに、仕様の異なる複数のバージョン（バリエーション）から成るRTOSファミリを効率的に開発する手法を開発した。本手法はアスペクト指向プログラミングを用いることで、ベースとするRTOSのソースコードを直接修正することなく、RTOSの機能の追加や置き換えが可能となる。具体的には、重複の少ないモジュール化に優れた記述を可能とするテンプレートアスペクトを提案して、RTOSのマルチコアプロセッサ向け機能や分散処理向け機能、スケジューリング機能の追加や置き換えを行うアスペクトを実装し、実用上問題ないオーバーヘッドでRTOSファミリを実現できることを確認した。そして、雑誌論文、学会発表、その他2件の発表を行った。また、分散RTOSファミリ向けのシステムジェネレータも開発し、1件の発表を行った。

(2)ソフトウェア開発環境の研究成果

まず、制御ロジック設計で作成した制御モデルであるSimulinkモデルからソフトウェアモデルであるUMLモデルに変換するモデル変換ツールを開発した。具体的には、ヘテロジニアスな分散型組み込み制御システムのソフトウェア開発に対応するため、状態遷移や条件分岐を含むSimulinkモデルを扱えるよう、既存のモデル変換ツールを拡張した。

モデル変換ツールの処理の流れは以下の通りである。まず、Simulinkモデルの表現形式であるmdlファイルを入力して解析し、変換に必要なデータを抽出したSimulinkモデルデータを生成する。次に、生成したSimulinkデータをもとに、データフローの解析を行い、クラス図とオブジェクト図のデータを生成する。また、制御フローの解析を行い、シーケンス図、コミュニケーション図、アクティビティ図のデータを生成する。そして状態遷移の解析を行い、ステートマシン図のデータを生成する。データフローおよび制御フローを解析することで、無駄な計算を行わない効率の良いUMLモデルを生成できる。最後に、生成した各UML図のデータから、XMI形式で記述されたクラス図、オブジェクト図、シーケンス図、コミュニケーション図、アクティビティ図、ステートマシン図のファイルを生成する。XMIファイルは、XML形式で記述したUMLモデルの標準フォーマットである。そして、モデル変換ツールの研究成果について、雑誌論文、および学会発表、その他1件の発表を行った。

また、生成したソフトウェアモデルが、ブリエンプションのあるマルチタスク環境で正しく動作するかを検証するため、モデル検査ツールSPINによってデータの整合性を検証する手法を提案するとともに、UMLモデルで記述されたソフトウェアをSPINによる検

証を行うための Promela コードに変換するツールを開発した。そして、その成果について 1 件の発表を行った。

さらに、ヘテロジニアスな分散型組み込み制御システムにおけるリアルタイム性を保証するために必要となる、スケジューリングアルゴリズムの提案を行った。具体的には、マルチプロセッサを対象に、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) などを用いたスケジューリング方式を提案した。そしてこれらについて、学会発表、その他 4 件の発表を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

Tamura, Y., Doan, T. T., Chiba, T., Yoo, M., Yokoyama, T., A Real-Time Operating System Supporting Distributed Shared Memory for Embedded Control Systems, Cluster Computing, 査読有, First Online: 04 September, 2017, pp.1-10
DOI:10.1007/s10586-017-1140-9

黒木裕太, 田中亨祐, 愈明連, 横山孝典, 組み込み制御ソフトウェア開発のための Simulink モデルから UML モデルへの変換ツール, 情報処理学会論文誌, 査読有, Vol.57, No.8, 2016, pp.1703-1717

原田祐輔, 阿部一樹, 愈明連, 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, 情報処理学会論文誌, 査読有, Vol.57, No.8, 2016, pp.1752-1764

松原彩音, 愈明連, 横山孝典, GNSS を用いた時刻同期機能を有するリアルタイム OS, 情報処理学会論文誌, 査読有, Vol.57, No.8, 2016, pp.1765-1774

〔学会発表〕(計 27 件)

市村歩, 愈明連, 横山孝典, タイムスタンプ付きメッセージを用いた時間駆動分散処理環境, 情報処理学会組込みシステム研究会, Vol.2018-EMB-47, No.23, pp.1-6, 2018

Harada, Y., Yoo, M., Yokoyama, T., A Distributed Multicore Real-Time Operating System Family Based on Aspect-Oriented Programming, 19th IEEE International Conference on Industrial Technology, pp.1389-1394, 2018

Yoo, M., Yokoyama, T., GA with Two Objective for Real-Time Task Scheduling with Communication Time, Hong Kong International Conference on Engineering and Applied Science, pp.74-85, 2018

Tanaka, K., Inaho, S., Hatano, M., Kuroki, Y., Yoo, M., Yokoyama, T., An Extended Simulink to UML Model Transformation Tool for Embedded Control Software Development, 9th International Conference on Software

Technology and Engineering, TE018, 2017
Ishibashi, K., Yoo, M., Yokoyama T., A Real-Time Operating System with CAN-Based Inter-Node Shared Resource Management and Distributed Shared Memory, 14th IEEE International Conference on Embedded Software and Systems, pp.798-805, 2017

Tamura, Y., Doan, T., T., Chiba, T., Yoo, M., Yokoyama, T., A Real-Time Operating System Supporting Distributed Shared Memory for Embedded Control Systems, 8th iCatse Conference on Information Science and Applications, pp.202-210, 2017

Ishibashi, K., Yokoyama K., Yoo, M., Yokoyama T. A Real-Time Operating System with Location-Transparent Shared Resource Management for Multi-Core Processors, 13th IEEE International Conference on Embedded Software and Systems, pp.93-98, 2016

Kuroki, Y., Yoo, M., Yokoyama, T., A Simulink to UML Model Transformation Tool for Embedded Control Software Development, 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology, pp.700-706, 2016

Yoo, M., Yokoyama, T., Multiobjective GA for Real Time Task Scheduling, International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2016, Vol. I, pp.174-178, 2016

Harada, Y. Abe, K., Yoo, M., Yokoyama, T., Aspect-Oriented Customization of the Scheduling Algorithms and the Resource Access Protocols of a Real-Time Operating System Family, 2015 IEEE International Conference on Smart City, pp.87-94, 2015

Yokoyama, K., Saito, M., Yoo, M., Yokoyama, T., A Real-Time Operating System with Location-Transparent Inter-Core and Inter-Node System Calls for Distributed Embedded Control Systems, 2015 IEEE Region 10 Conference (TENCON 2015), Paper ID: 494, pp.1-4, 2015

Yokoyama, T., Matsubara, A., Yoo, M., A Real-Time Operating System with GNSS-Based Tick Synchronization, 3rd IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications, pp.19-24, 2015

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

愈 明連 (YOO, MYUNGRYUN)

東京都市大学・知識工学部・准教授

研究者番号: 80451384