

令和 6 年 6 月 15 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K11225

研究課題名（和文）物理時間と論理時間に基づくサイバーフィジカルシステム向け時間駆動分散処理環境

研究課題名（英文）A Time-Triggered Distributed Computing Environment Based on Physical Time and Logical Time for Cyber-Physical Systems

研究代表者

横山 孝典（Yokoyama, Takanori）

東京都市大学・情報工学部・教授

研究者番号：60386357

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、無線通信のように通信時間が変動するネットワークを用いてリアルタイム性に優れたサイバーフィジカルシステムを実現することが可能な分散処理環境を開発した。本分散処理環境は、物理時間駆動処理に加えて通信時間の変動を許容可能な論理時間駆動処理をサポートする分散処理実行環境と、その分散処理実行環境上で動作するアプリケーションの開発を支援するためのソフトウェア開発環境から成る。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した物理時間駆動処理と論理時間駆動処理に基づく分散処理環境は、無線通信のように通信時間が変動するネットワークを用いて、通信時間が変動しない時間駆動ネットワークを必要とする時間駆動アーキテクチャと同等のリアルタイム性を実現できる。これにより、車々間通信や路車間通信を用いた自動走行システムや道路交通システムなど、最近増えている無線通信を用いたサイバーフィジカルシステムの実現に有効である。

研究成果の概要（英文）：The research has developed a distributed computing environment for real-time cyber-physical systems that utilize networks with communication time fluctuations, such as wireless networks. The environment consists of a distributed computing platform that supports both physical time-triggered processing and logical time-triggered processing, which tolerates communication time fluctuations, and a software development environment that supports the efficient development of application software.

研究分野：組み込みシステム

キーワード：組み込みシステム サイバーフィジカルシステム 分散処理 リアルタイム処理

1. 研究開始当初の背景

実世界のセンシングや制御を行う処理とサイバー空間での計算処理とが融合したコンピュータシステムはサイバーフィジカルシステム (Cyber-Physical System, CPS) と呼ばれる。代表的な CPS として、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制御システムがある。特に、関連の強い複数の制御対象を精度よく制御するには、複数の組み込みコンピュータが同一の時間に基づいて同期して処理を行う時間駆動 (Time-Triggered) アーキテクチャが有効である。自動車制御分野では、ECU (Electronic Control Unit) と呼ばれる組み込みコンピュータを時間駆動ネットワークで接続したシステムが実用化されている。時間駆動アーキテクチャを採用することで、ジッタ (周期の変動) のない高精度なリアルタイム制御を実現できる。

そして研究開始時点には、車々間通信や路車間通信を用いた自動走行システムや車間距離制御システムなど、複数の自動車や地上の機器で構成する高機能な制御システムの実用化が期待されていた。また、自動車 (道路交通) 分野に限らず、列車、電力、産業等の分野でも無線通信を利用したシステムが増えていくと予測されていた。しかしながら、無線通信は通信時間の変動が大きく、全ての処理を同期実行させる必要のある時間駆動アーキテクチャをそのまま適用することは困難であった。

2. 研究の目的

前記背景のもと、通信時間の変動が大きい無線通信を含む分散制御システム等のサイバーフィジカルシステムにおいて、通信時間の変動を許容しながら、全ての処理の同期実行を必要とせずに、時間駆動アーキテクチャと同等のリアルタイム性を実現することが望まれていた。

そこで本研究の目的は、通信時間が変動する環境においてもジッタが少なく高いリアルタイム性を有するサイバーフィジカルシステムを実現できる分散処理環境を開発することである。

3. 研究の方法

(1) 物理時間と論理時間に基づく時間駆動分散処理

一般に制御システムはセンサからの入力処理、アクチュエータへの出力処理、および制御ロジックを構成する多くの算出処理から成る。そこで、実世界との接点である入力処理と出力処理のみを物理時間に同期して実行し (これを物理時間駆動処理と呼ぶ) その他の算出処理は仮想的な時間 (論理時間) を用いたスケジューリングにより実行する (これを論理時間駆動処理と呼ぶ) ことで、通信時間の変動を許容しながらリアルタイム性を保証する方式を提案する。

図1は4ノードから成る分散型組み込み制御システムの構成例である。各ノードには入力タスク、算出タスクA、算出タスクB、出力タスクが分散配置されている。以下、このシステム構成を例に、

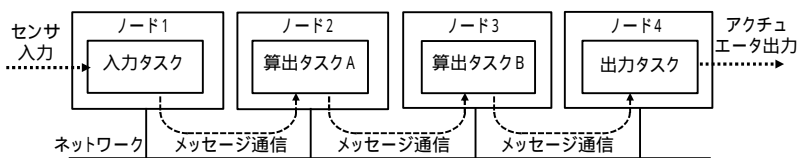


図1 分散型組み込み制御システムの構成例

物理時間と論理時間に基づく時間駆動分散処理について説明する。

図1に示したシステム構成における従来の時間駆動アーキテクチャによる分散処理のタイムチャートの例を図2に示す。この例のタスクの周期は全て10である。入力タスクはセンサ入力を行い算出タスクAにメッセ

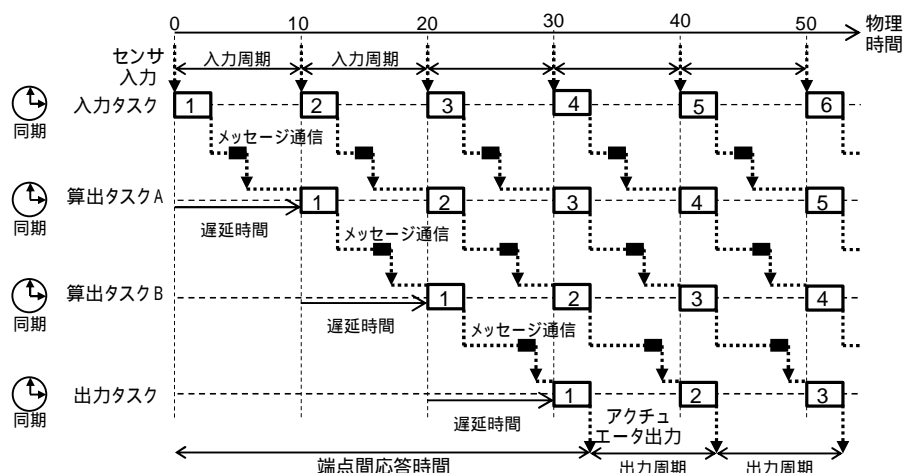


図2 時間駆動アーキテクチャによる分散処理のタイムチャート

ージを送信する。算出タスク A は入力タスクからのメッセージを受信して計算を行い、算出タスク B にメッセージを送信する。算出タスク B は算出タスク A からのメッセージを受信して計算を行い、出力タスクにメッセージを送信する。出力タスクは算出タスク B からのメッセージを受信しアクチュエータ出力を行う。あるタスクの起動時刻と後続タスクの起動時刻の差を遅延時間と呼び、この例ではいずれも 10 である。時間駆動ネットワークを使用しているため全ノードのタスクを同期して実行できるとともに、通信時間の変動はなく、いずれのタスクもジッタのない動作が可能である。

次に提案方式に基づく分散処理のタイムチャートの例を図 3 に示す。入力タスクと出力タスクは物理時間に従って同期実行している。これを物理時間駆動処理と呼ぶ。物理時間

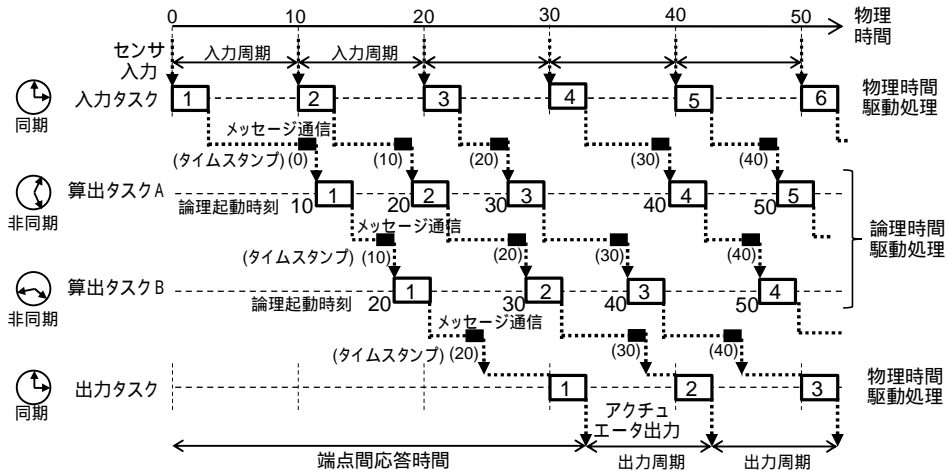


図 3 物理時間と論理時間に基づく時間駆動分散処理のタイムチャート

間駆動ではジッタは発生しない。一方、2 つの算出タスクはメッセージの受信イベントで起動され、非同期に動作する。通信時間が変動するネットワークを用いるため 2 つの算出タスクの起動時刻には物理時間上ではジッタが発生している。そこで本分散処理環境では仮想的な論理時間を導入し、それによって算出タスクを管理する。論理時間によって表現した起動時刻を論理起動時刻と呼ぶ。図 3 には算出タスクの起動位置に論理起動時刻を記している。論理起動時刻は、対応する図 2 の時間駆動分散処理における各タスクの起動時刻と一致するように与える。したがって、論理時間上では時間駆動アーキテクチャと同一の動作と見なすことができる。論理時間はタスク毎に管理する。また、入力タスクと出力タスクは論理時間と物理時間が一致しているものと見なす。

各タスクはメッセージ送信時にその論理起動時刻をタイムスタンプとしてメッセージに付加する。図 3 には各メッセージに付加されているタイムスタンプの値を()内に記している。受信したメッセージに付加されているタイムスタンプに論理遅延時間を加えた値が、そのメッセージを処理するタスクの論理起動時刻となる。論理起動時刻は物理時間における時刻と一致する必要はないため、通信時間の変動を許容しながら、時間駆動アーキテクチャと同等の動作を実現可能である。

(2) 分散処理環境

(1)で提案した物理時間と論理時間に基づく時間駆動分散処理を実現するため、本研究では、物理時間駆動処理と論理時間駆動処理をサポートする分散処理実行環境と、その上で動作するアプリケーションを開発するためのソフトウェア開発環境を開発する。

開発する分散処理環境の構成を図 4 に示す。分散処理実行環境はリアルタイム OS と分散処理ミドルウェアから成る。リアルタイム OS は、物理時間駆動処理と論理時間駆動処理向けのスケジューリング機能を有する。また分散処理ミドルウェアは、論理時間管理機能やタイムスタンプを扱う機能を提供する。これらにより、アプリケーション開発者は意識することなく、物理時間駆動処理と論理時間駆動処理から成る分散制御システムを実現できる。

ソフトウェア開発環境は、MATLAB/Simulink で作成した制御モデル (Simulink モデル) を分散制御ソフトウェアの UML モデルに変換するモデル変換ツールを開発する。これにより、分散処理を意識せずに作成した制御モデルをベースに、分散システムの構成情報を与えることで、分散制御ソフトウェアのモデルを自動生成でき、効率的なアプリケーション開発を可能になる。

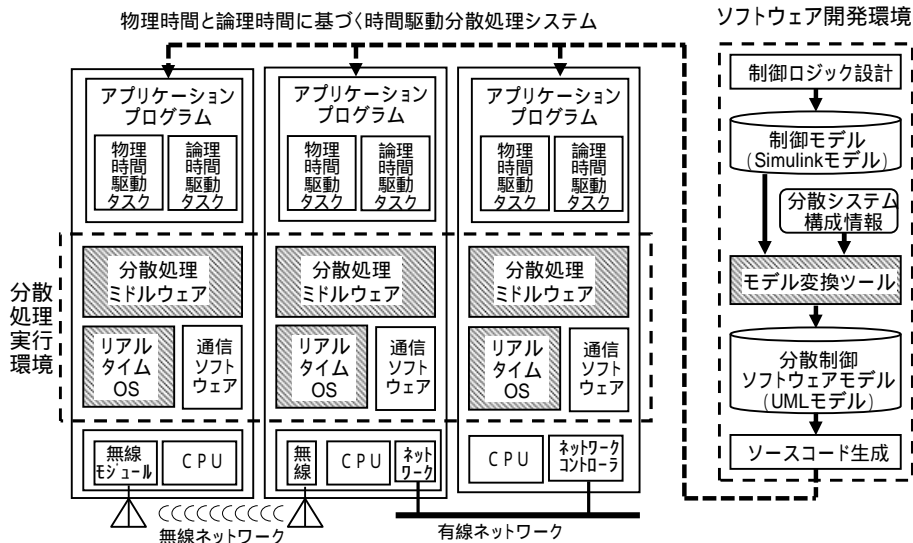


図4 物理時間と論理時間に基づく時間駆動分散処理環境

4. 研究成果

(1) 分散処理実行環境

分散処理実行環境のソフトウェア構成を図5に示す。分散処理実行環境は分散処理ミドルウェア、リアルタイム OS、通信ソフトウェアから成り、その上でアプリケーションプログラムが動作する。本研究では分散処理ミドルウェアとリアルタイム OSを開発し、通信ソフトウェアは既存のものをベースに必要により新規機能を追加した。

分散処理ミドルウェアは、イベント処理、タスク起動時処理、メッセージ受信処理、メッセージ送信処理から成る。また、それらの処理に必要なとするタスクやメッセージに関する情報はコンフィギュレーションデータとして記憶される。

イベント処理はメッセージ受信イベント時に実行する処理で、タイムスタンプ情報を参照しながら、メッセージを受信して時系列順に受信バッファに記憶するとともに、リアルタイム OSの論理時間カウンタを更新する。タスク起動時処理は、アプリケーションタスクの処理を実行する前にタスクの論理起動時刻等の更新を行う。メッセージ受信処理はアプリケーションがメッセージ受信 API (Application Programming Interface) を呼び出した時に実行する処理で、呼び出したタスクが必要とする受信メッセージを渡す。メッセージ送信処理はアプリケーションがメッセージ送信 API を呼び出した時に実行する処理で、タイムスタンプを付加してメッセージを送信する。

そして、開発した分散処理ミドルウェアの処理にかかる CPU 処理時間の評価を行い、実用上問題ない処理時間で実現できていることを確認した。分散処理ミドルウェア(通信ソフトウェア含む)の研究成果については、学会発表、その他2件の発表を行った。

リアルタイム OS は既存のリアルタイム OS を拡張して、物理時間駆動処理と論理時間駆動処理の両者をサポートするスケジューリング機構を実装した。物理時間駆動で動作する入出力タスクはジッタをできるだけ小さくしたいので、算出タスクより優先度を高くして固定優先度スケジューリングでスケジューリングする。論理時間駆動で動作する算出タスクは応答時間の増大を防ぐため、論理デッドラインを用いた EDF (Earliest Deadline First) スケジューリングによるスケジューリングする。論理デッドラインは論理時間における絶対デッドラインで、論理起動時刻に相対デッドラインを加えることで算出する。相対デッドラインは周期と等しいものとする。そして、起動された算出タスクの論理デッドラインを比較し、その値が小さいタスクを優先して実行する。論理時間はタスク毎にリアルタイム OS 内の論理時間カウンタにより表現され、前述のように分散処理ミドルウェアのイベント処理により更新される。

そして、開発したリアルタイム OS の拡張機能の CPU 処理時間の評価を行い、実用上問題ないオーバヘッドで実現できていることを確認した。リアルタイム OS の研究成果については、学会

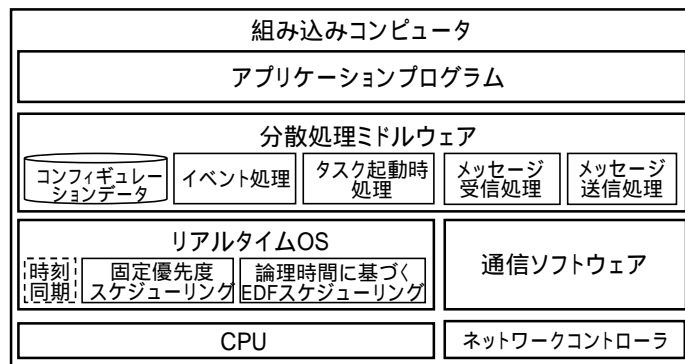


図5 分散処理実行環境のソフトウェア構成

発表、その他8件の発表を行った。

入出力タスクが存在するノードでは物理時間駆動を実現するため時刻同期機能が必要である。本研究では、時間駆動ネットワークを用いずに時刻同期を実現するため、GNSS (Global Navigation Satellite Systems) を用いた時刻同期機構を開発した。そして評価を行い、十分な時刻同期精度を得られていること、および、実用上問題ないオーバヘッドで実装できたことを確認した。GNSS を用いた時刻同期機構については、雑誌論文、その他2件の学会発表を行った。

一方位置透過性のある分散処理を実現するためには、当該ノード上のタスクのみでなく、他ノード上のタスクも管理できるリアルタイムOSが望まれる。また、マルチコア・プロセッサの場合は当該CPUコア上のタスクのみでなく、他CPUコア上のタスク管理も可能としたい。しかしながら、リソースの限られた組み込みシステムにそれら全ての機能を有するリアルタイムOSを常に搭載することは望ましくない。そこで、アプリケーションに応じて必要最小限の機能を持つリアルタイムOSを搭載可能とするため、アスペクト指向プログラミングを用いた分散マルチコアリアルタイムOSファミリを開発した。そして、アスペクト指向プログラミングによるオーバヘッド(処理時間およびメモリ消費量)の評価を行い、実用上問題ないオーバヘッドに収まっていることを確認した。本リアルタイムOSのアスペクト指向開発の研究成果については、雑誌論文、その他3件の学会発表を行った。

(2) ソフトウェア開発環境

ソフトウェア開発環境については、制御ロジック設計で作成したSimulinkモデルを分散処理ソフトウェアのUMLモデルに変換するモデル変換ツールを開発した。本モデル変換ツールが対象とするのは、レプリカを用いて位置透過性を実現する時間駆動分散オブジェクトモデルに基づいた分散処理ソフトウェアである。制御ロジック設計で作成したSimulinkモデルには制御ロジックのみが記述されているため、分散処理ソフトウェアのモデルを生成するには、分散システムを構成する各ノードに制御処理をどのように配置するかを表す情報が必要である。そこで本研究では、各制御処理を実行するタスクの分散配置情報をUMLの配置図を用いて表現し、モデル変換ツールに与えることとした。

モデル変換ツールの入出力を図6に示す。本モデル変換ツールは、制御ロジック設計で作成したSimulinkモデルとタスク配置設計で作成した配置図を入力し、分散処理ソフトウェアのモデルをクラス図、オブジェクト図、シーケンス図、アクティビティ図で記述したUMLモデルを出力する。

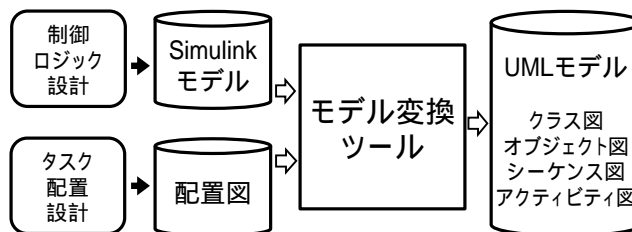


図6 モデル変換ツールの入出力

そして、実際の制御モデルを用いて本モデル変換ツールの適用実験を行い、実際の制御モデルに適用可能であるとの見通しを得た。また、分散処理ソフトウェアのコンフィギュレーションデータを自動生成するツールも開発した。モデル変換ツールおよびコンフィギュレーションツールの研究成果については、学会発表、その他2件の学会発表を行った。

<引用文献>

- Ichimura, A., Yokoyama, T. and Yoo, M., A Time-Triggered Distributed Computing Environment for Cyber-Physical Systems Based on Physical Time and Logical Time, 2018 IEEE Region 10 Conference (TENCON2018), 2018
- Nakajima, S., Shimabukuro, K., Takehara, E., Yokoyama, T. and Yoo, M., A Logical Time-Triggered Distributed Computing Environment for Cyber-Physical Systems with V2X Wireless Communication, 17th International Conference on Information Technology and Applications, 2023
- Amadera, K., Ichimura, A., Yokoyama, T. and Yoo, M., A Real-Time Operating System for Cyber-Physical Systems Based on Physical Time and Logical Time, 6th International Embedded Systems Symposium, 2019
- Harayama, K., Yokoyama, T. and Yoo, M., GNSS-Based System Time Synchronization Mechanism for Cyber-Physical Systems, International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications, Vol.9, 2020, 94-99
- 原田祐輔、山内健司、横山孝典、兪明連、アスペクト指向プログラミングを用いた分散マルチコアリアルタイムOSファミリの開発、電子情報通信学会論文誌、J105-D 巻、2022、13-25
- Nishimura, T., Yokoyama, T. and Yoo, M., A Simulink to UML Model Transformation Tool for Distributed Embedded Control System Development, 4th International Conference on Computer Communication and Information Systems, 2024

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 原田祐輔、山内健司、横山孝典、兪明連	4. 巻 J105-D
2. 論文標題 アスペクト指向プログラミングを用いた分散マルチコアリアルタイムOSファミリの開発	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌	6. 最初と最後の頁 13-25
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Harayama, K., Yokoyama, T., Yoo, M.	4. 巻 9
2. 論文標題 GNSS-Based System Time Synchronization Mechanism for Cyber-Physical Systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications	6. 最初と最後の頁 94-99
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18178/ijeetc.9.2.94-99	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 藤島大暉、石橋航太、横山孝典、兪明連	4. 巻 J106-D
2. 論文標題 CANアービトレーションを用いたノード間リソース管理機能及び分散共有メモリ機能を有するリアルタイムOS	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌	6. 最初と最後の頁 375-387
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計22件（うち招待講演 0件／うち国際学会 9件）

1. 発表者名 溝呂木裕規、横山孝典、兪明連
2. 発表標題 アスペクト指向プログラミングによる並列・分散アラーム管理機能を有するリアルタイムOSの実現
3. 学会等名 情報処理学会 第60回組込みシステム研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川田陸、竹原永也、横山孝典、兪明連
2. 発表標題 Linux上のリアルタイムOSエミュレータ
3. 学会等名 情報処理学会 第85回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小日向大祐、飯田友樹、横山孝典、兪明連
2. 発表標題 GNSSを用いた協定世界時同期機能を有するリアルタイムOS
3. 学会等名 情報処理学会 第85回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小林万里、横山孝典、兪明連
2. 発表標題 物理時間駆動と論理時間駆動に対応したリアルタイムOS
3. 学会等名 情報処理学会 第85回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 橋本優太、横山孝典、兪明連
2. 発表標題 デッドラインに基づくスケジューリングが可能なCAN通信ソフトウェア
3. 学会等名 情報処理学会 第85回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 溝呂木裕規、横山孝典、兪明連
2. 発表標題 アスペクト指向プログラミングによる並列・分散アラーム管理機能を有するリアルタイムOSの実現
3. 学会等名 情報処理学会第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菊池優輔、横山孝典、兪明連
2. 発表標題 無線ネットワーク環境向けアラーム管理機能を有する分散リアルタイムOS
3. 学会等名 情報処理学会第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高堂航希、横山孝典、兪明連
2. 発表標題 物理時間駆動と論理時間駆動に対応したリソース管理機能を有するリアルタイムOS
3. 学会等名 情報処理学会第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西村太凱、横山孝典、兪明連
2. 発表標題 分散処理に対応したSimulink・UMLモデル変換ツール
3. 学会等名 情報処理学会第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fujishima, H., Yokoyama, T., Yoo, M.
2. 発表標題 Distributed Shared Memory with CAN-Based Prioritized Mutual Exclusion for Embedded Control Systems
3. 学会等名 7th International Conference on Computer and Communications Management (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Amadera, K., Ichimura, A., Yokoyama, T., Yoo, M.
2. 発表標題 A Real-Time Operating System for Cyber-Physical Systems Based on Physical Time and Logical Time
3. 学会等名 6th International Embedded Systems Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Harayama, K., Yokoyama, T., Yoo, M.
2. 発表標題 GNSS-Based System Time Synchronization Mechanism for Cyber-Physical Systems
3. 学会等名 6th International Conference on Advances in Electronics Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々木智礼、横山孝典、兪明連
2. 発表標題 周期タスクと非周期タスクが混在する分散制御システムのためのリアルタイムOS
3. 学会等名 情報処理学会大82回全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鳥袋健司、横山孝典、兪明連
2. 発表標題 論理時間を用いた組み込み制御システム向け時間駆動分散処理環境
3. 学会等名 情報処理学会大82回全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田口峻平、横山孝典、兪明連
2. 発表標題 論理時間を用いた分散型組み込み制御システムのためのコンフィギュレーションデータ生成ツール
3. 学会等名 情報処理学会大82回全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ichimura, A., Yokoyama, T., Yoo, M.
2. 発表標題 A Time-Triggered Distributed Computing Environment for Cyber-Physical Systems Based on Physical Time and Logical Time
3. 学会等名 2018 IEEE Region 10 Conference (TENCON2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hosoyama, H., Yokoyama, T., Yoo, M.
2. 発表標題 A Distributed Real-Time Operating System with Prioritized Inter-Node System Calls for Distributed Embedded Control Systems
3. 学会等名 2018 International Conference on Robotics, Control and Automation Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山内健司、兪明連、横山孝典
2. 発表標題 リアルタイムOSファミリ開発のためのアスペクト指向プログラミング
3. 学会等名 情報処理学会大81回全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shimabukuro, K., Yokoyama, T., Yoo, M.
2. 発表標題 A Logical Time-Triggered Distributed Computing Environment for Cyber-Physical Systems
3. 学会等名 6th International Conference on Information Science and Systems (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nakajima, S., Shimabukuro, K., Takehara, E., Yokoyama, T., Yoo, M.
2. 発表標題 A Logical Time-Triggered Distributed Computing Environment for Cyber-Physical Systems with V2X Wireless Communication
3. 学会等名 17th International Conference on Information Technology and Applications (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takado, K., Yokoyama, T., Yoo, M.
2. 発表標題 A Real-Time Operating System for Physical and Logical Time-Triggered Distributed Computing
3. 学会等名 6th Asia Pacific Information Technology Conference (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Nishimura, T., Yokoyama, T., Yoo, M.
2. 発表標題 A Simulink to UML Model Transformation Tool for Distributed Embedded Control System Development
3. 学会等名 4th International Conference on Computer Communication and Information Systems (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------