

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 18 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24700027

研究課題名(和文) 制御モデルと組み込みソフトウェアの連携スケジューリングシミュレーション環境

研究課題名(英文) Collaborative simulation environment for scheduling control model and embedded software

研究代表者

松原 豊 (Matsubara, Yutaka)

名古屋大学・情報科学研究科・助教

研究者番号：30547500

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：自動車やロボットシステムに代表される組み込みリアルタイムシステムに搭載される制御ソフトウェアの開発と動作検証を支援するスケジューリングシミュレーション環境を構築した。研究代表者らが過去に研究開発したスケジューリングシミュレータschesimを基に、(1)制御モデルとリアルタイムOSの連携機構、(2)マルチコアプロセッサシステムのシミュレーション技術、(3)分散ネットワークシステムのシミュレーション技術の3つの研究開発テーマを実施した。研究成果の一部は、学術論文として発表するだけでなく、シミュレータのソースコードを無償で公開し、他の研究者や技術者にも利用できるようにしている。

研究成果の概要(英文)：In this project, we have developed a new scheduling simulation environment in order to support to develop and verify embedded software for embedded real-time systems such as automobiles and robots. Based on the scheduling simulator schesim we developed so far, we have implemented (1) cooperative mechanism between control models and real-time OS, (2) simulation techniques for multicore systems, and (3) simulation techniques for distributed networks. Part of the results have not only published as academic papers, but also distributed as open-source software. This means that this project encourage researchers and engineers who have interested in this theme to advance their activities.

研究分野：組み込みシステムの設計・開発技術(リアルタイムOS, リアルタイムスケジューリング, シミュレーション等)

キーワード：組み込みソフトウェア シミュレーション 車載ネットワーク 動作検証

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 時間制約の厳しい組込みシステム(例えば、自動車制御システムやロボット制御システム)に搭載される組込み制御ソフトウェア(アプリケーションと呼ぶ)を対象に、アプリケーションがリアルタイム性や応答性などの時間要件を満たすことを、アプリケーション開発の初期段階で高速かつ容易に検証することを目的として、リアルタイムスケジューリングに特化したシミュレータ(スケジューリングシミュレータと呼ぶ)が開発されてきた。スケジューリングシミュレータは、アプリケーションの動作をモデル化した情報(アプリケーションモデルと呼ぶ)を入力すると指定したスケジューリングアルゴリズムでスケジュールした動作結果を出力するツールである。

(2) 従来のスケジューリングシミュレータは、実際の自動車エンジン制御アプリケーションやロボット制御アプリケーションなど、複雑なアプリケーションの動作を正確にモデル化することができない(例えば、処理の実行時間や起動周期などを固定値でモデル化するものが多く、条件分岐により実行時間が大きく変動する処理をモデル化できない)ため、シミュレーション結果と実機上で動作結果が大きく異なるという問題があった。

(3) 研究代表者らは、これらの問題を解決するスケジューリングシミュレータ

schesim を単独で研究開発した。自動車メーカーとの共同研究において実際のエンジン制御システムに適用した結果、シミュレーション結果と実機で動作させた場合との誤差を5%程度にまで抑えられることを実証した。この成果をまとめた研究論文は、特に有用性の面で高い評価を得た。(佐野、松原ら、ESS2011 優秀論文賞を受賞)さらに、研究代表者らは、このシミュレータのプログラムソースコードとマニュアルを、国内で最初に一般公開してきた(<http://www.schesim.org>)。この活動は、スケジューリングアルゴリズムの研究者だけでなく、アプリケーション開発技術者に対して、自由に利用できるシミュレーション環境を提供するという意味で大変有意義なものである。国際的にも、ソースコードを公開し、現在も活発な開発を継続しているプロジェクトは少ないため、研究代表者らのシミュレータ研究開発は、国際的にも希少性が高いと考えている。

## 2. 研究の目的

本研究では、研究代表者らの研究成果と開発したシミュレータを発展させる形で進める。これまでの研究開発及び自動車メーカーとの共同研究を通じて得られた、次の研究課題の一部を解決することを目的とする。

- ・ 制御システムの動作検証段階で制御要求

を満たせない場合に、制御アプリケーションを再設計しなければならないという開発の手戻りを防ぐためには、アプリケーション設計の初期段階で、アプリケーションの設計変更が制御結果に与える影響を把握することが有効である。そのためには、制御モデル(例えば、MATLAB/Simulink モデル)とスケジューリングシミュレータを連携して、アプリケーションの動作をシミュレーションできる環境が必要があること。

- ・ シミュレーションを実施する前に実施するアプリケーションモデルの作成においては、独自知識(シミュレータや RTOS の仕様、モデル化の技法など)と多大な時間が必要となったことから、開発、検証効率を劇的に向上するためには、モデルを自動的に生成する技術が必要であること。

- ・ 将来的な制御システムは、分散連携制御システム(モータやセンサが接続されたネットワークに、複数の高性能制御システムが接続されて、それらが連携して高度な制御を実現するシステム)になることが予想されることから、マルチコアプロセッサシステムと分散ネットワークシステムに対応できるシミュレーション環境を構築する必要があること。

## 3. 研究の方法

本研究では、主に3つのサブテーマを実施する。

(1) 「制御モデルとのスケジューリングシミュレータとの連携技術の確立」  
制御モデルとシミュレーションモデルを連携させてシミュレーションするために、制御モデルと制御アプリケーション間のインタフェースを規定し、システム内の時刻の同期を取りながら、それぞれのモデルが並列して動作する連携機構を開発する。この技術を確立することで、制御アプリケーションのタスク設計を変更した場合に、制御アルゴリズムの動作と制御精度に与える影響を容易に検証できるようになる。さらに、アプリケーションモデルを作成する負担を減らすために、制御モデルからアプリケーションモデルを自動的に生成する仕組みを確立する。

(2) 「マルチコア向けスケジューリングアルゴリズムのシミュレーション技術の確立」  
現在のスケジューリングシミュレータでは、主にシングルコアプロセッサ向けのスケジューリングアルゴリズムのみをシミュレーションの対象としている。本研究では、対称型マルチコアシステムを対象にしたグローバルスケジューリングアルゴリズムと、非対称型マルチコアプロセッサを対象に各コアの処理負荷を平準化するアルゴリズムを実装することで、マルチコア向けスケジューリングアルゴリズムをシミュレーションするための技術を確立する。

(3) 「分散ネットワークシステムのシミュ

レーション技術の確立」  
 スケジューリングシミュレータを分散ネットワークシステムへ対応する手法を研究開発する。具体的には、車載制御システムで採用されているCANを対象として、CN用の通信ミドルウェア、ネットワークコントローラ、通信バス上のメッセージバッファリングとメッセージ送信が競合した際の調停動作などをシミュレーションする技術を確立する。

#### 4. 研究成果

本研究では、制御モデルとのスケジューリングシミュレータとの連携技術の確立、マルチコア向けスケジューリングアルゴリズムのシミュレーション技術の確立、分散ネットワークシステムのシミュレーション技術の確立、の3つのサブテーマを掲げて実施し、概ね目標を達成することができた。以下では、サブテーマごとの成果概要と今後の計画について説明する。

(1) 制御モデルとシミュレーションモデルを連携させてシミュレーションするために、制御モデルと制御アプリケーションの間のインタフェースを規定し、システム内の時刻の同期を取りながらそれぞれのモデルが並列して動作する連携機構を開発した。今後、論文等での成果発表に向けて、完成度を高めていく予定である。

(2) 称型マルチコアシステムを対象にしたグローバルスケジューリングアルゴリズムと、非対称型マルチコアプロセッサを対象とした対象に、書くコアの処理負荷を平準化するアルゴリズムを実装し、マルチコア向けスケジューリングアルゴリズムをシミュレーションするための技術を確立した。前者のアルゴリズムの開発成果は、我々が開発しているスケジューリングシミュレータ schesim のウェブサイトから公開済である。

(3) 分散ネットワークシステムを対象に、プロセッサとネットワークを含めて全体をシミュレーションするための技術を確立した。具体的には、オープンソースのネットワークシミュレータである OMNeT++を用いて、車載制御システムで採用されているCAN (Controller Area Network) プロトコルのシミュレーション環境を開発した(図1)。

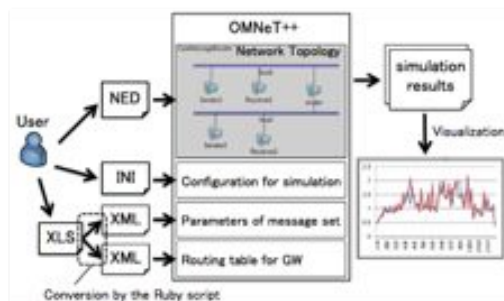


図1: ネットワークシミュレーション環境

このシミュレーション環境を用いることで、システムの設計段階において、制御アプリケーション、

通信メッセージの構成、ネットワークプロトコルの評価を容易に実施できる特徴がある。この技術の評価として、将来の車載ネットワークを想定したCAN-Ethernet混在ネットワークにおけるプロトコル性能を評価し、メッセージの最悪応答時間解析を実施した(図2)。

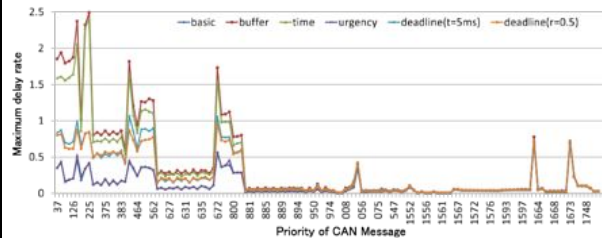


図2: 車載ネットワークの設計段階での評価事例

さらに、当初の計画には入っていなかったが、この成果を基に、近年注目されているEthernet AVBのシミュレーション技術を開発し、国内研究会、国際会議等で成果を発表することができた。

(4) 開発した成果の一部は、オープンソースとしてウェブサイトで公開しており、国内外の研究者・技術者から問い合わせを受けている。このことから、研究者・技術者に対して有用なシミュレーション環境を提供し、学術的な発展と、産業界に対する一定の波及効果を生むことが出来たと考えている。今後も、開発した技術の完成度向上、論文としての成果発表、オープンソースソフトウェアとして一般公開等を継続・拡大していく予定である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

佐野泰正, 松原豊, 本田晋也, 高田広章, "schesim:リアルタイムアプリケーション向けスケジューリングシミュレータ", 電子情報通信学会論文誌Dシステム開発論文, 査読有, Vol. J95-D, No.12, pp.2008-2020. Dec 2012.

[学会発表](計 8 件)

Keigo Kawahara, Yutaka Matsubara and Hiroaki Takada, "A Simulation Environment and Preliminary Evaluation for Automotive CAN-Ethernet AVB Networks", Proceedings of the 1st OMNeT++ Community Summit (Successor of the International Workshop on OMNeT++), 査読有, pp. xx-xx, Hamburg, Germany, Sep 2014.

川原慶悟, 松原豊, 高田広章, "OMNeT++を用いたCAN-EthernetAVB混在ネットワークのシミュレーション環境開発", 第16回組込みシステム技術に関するサマワークショップ(SWEST16)予稿集, 査読無, 岐阜, Sep 2014. (ベストポスター 学生発表賞 受賞)

佐藤祐一, 松原豊, 本田晋也, 高田広章,

“高応答性を要求するリアルタイムアプリケーション統合のための ARINC 653 拡張スケジューリングアルゴリズム”，情報処理学会研究報告，査読無，Vol.2014-EMB-32, No.3, pp. 1-6, 石垣市, Mar 2014.

佐藤祐一，松原豊，高田広章，“オーバヘッドを考慮したシミュレータによる階層型スケジューリングアルゴリズムの評価”，情報処理学会研究報告，査読無，Vol.2013-EMB-31, 東京, Dec. 2013.

佐藤祐一，松原豊，高田広章，“オーバヘッドを考慮したスケジューリングシミュレータによる統合アルゴリズムの評価”，第15回組込みシステム技術に関するサマークンワークショップ（SWEST15）予稿集，査読無，岐阜，Sep 2013.

Jun Matsumura, Yutaka Matsubara, Hioaki Takada, Masaya Oi, Masumi Toyoshima and Akihito Iwai, "A Simulation Environment based on OMNeT++ for Automotive CAN-Ethernet Networks", Proceedings of the 4th International Workshop on Analysis Tools and Methodologies for Embedded and Real-time Systems (WATERS2013), 査読有，pp.1-6, Paris, France, Jul 2013.

松村潤，松原豊，高田広章，大井正也，豊島真澄，岩井明史，“車載ネットワークにおける CAN-Ethernet プロトコル変換アルゴリズム”，組込み技術とネットワークに関するワークショップ（ETNET2013），査読無，対馬，Mar 2013.

Yutaka Matsubara, Yasumasa Sano, Shinya Honda and Hiroaki Takada, "An Open-Source Flexible Scheduling Simulator for Real-time Applications", Proceedings of IEEE International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC 2012), 査読有，pp.16-22, Shenzhen, China, Apr 2012.

〔その他〕

ホームページ等

スケジューリングシミュレータ schesim の公式サイト

<http://www.schesim.org>

車載ネットワークのシミュレーションモデル公開用サイト

[https://sites.google.com/site/yutakaertl/omnetpp\\_canmodel](https://sites.google.com/site/yutakaertl/omnetpp_canmodel)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松原 豊 (MATSUBARA, Yutaka)

名古屋大学・大学院情報科学研究科・助教  
研究者番号：30547500

### (2) 研究協力者

松村 潤 (MATSUMURA, Jun)

佐藤 祐一 (SATO, Yuichi)

李 奕驍 (LI, Yixiao)

川原 慶悟 (KAWAHARA, Keigo)