

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 12 日現在

機関番号：24506
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2009 ～ 2011
 課題番号：21500040
 研究課題名（和文）
 大規模分散組込みソフトウェア開発のための仮想ソフトウェア実行環境の研究
 研究課題名（英文）
 Study on Virtual Software Execution Environment for Large-scale Distributed Embedded Software Development
 研究代表者
 中本 幸一（Yukikazu Nakamoto）
 兵庫県立大学・大学院応用情報科学研究科・教授
 研究者番号：70382273

研究成果の概要（和文）：

大規模分散組込みシステムにおける高生産、高品質のソフトウェアの開発支援のために、CPU と制御対象装置のシミュレーション環境とこれらを統合させる分散プラットフォームの基盤技術の研究を行った。CPU シミュレータは命令変換型 CPU シミュレータ QEMU を利用して実装し、数 10MIPS 相当の実効速度を実現できた。通信ミドルウェアには CORBA を利用し、実行速度、実ハードウェアとの接続が可能であることが分かった。

研究成果の概要（英文）：

To develop large-scale distributed embedded systems with high quality and productivity, we have developed a virtual execution environment platform, which integrates CPU simulators and plant simulators through the network. A CPU simulator, which is developed by translation-based technology QEMU, has dozens of MIPS as effect speed. Network-wide simulation is implemented as Common Object Request Broker Architecture objects, and messages in the simulation objects are transferred at the actual rate in the target setting.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・ソフトウェア

キーワード：組み込みソフトウェア、開発環境、ソフトウェア工学、高信頼性、分散システム

1. 研究開始当初の背景

大規模分散組込みシステムは多くの CPU や物理空間と制御を行う装置から構成されること、さらに大規模なネットワークシステムであることが特徴である。制御を行う装置には物理空間での物体、自動車や航空機を構成する部品、様々なハードウェアがある。自動車システムでの例では約 100 個以上のコンピュータ(車載システムでは ECU という)が使

用され、センサーがデータを取得し、ECU がデータ処理、アクチュエータを通じて必要な制御コマンドを制御対象に送る(下図参照)。一方、市場からは組込みシステムの開発コストの削減、より短期間での開発が要請されている。特にソフトウェアの規模と複雑さが増大しており、これが開発期間の長期化と開発コストの増大の主要因となっている。このため、製品のハードウェアとソフトウェアを並

行同時開発する必要があり、製品のハードウェアが存在しなくてもソフトウェアの開発を進めるための各種のシミュレータが利用されてきている。CPU ボードの代替としてソフトウェアを稼働させる CPU シミュレータがその代表的なものである。これだけでなく、エンジンやブレーキといった制御プラントをシミュレーションするシミュレータも利用されている。今後、より安全、より快適、環境に配慮したサービス提供のために、周辺車両も含めた多数のセンサーからデータ取得を行い、プラントを制御することが必要となってくるため、組み込みシステムは必然的にネットワーク化、分散化、大規模化してくる。また、制御のための入力データはこれまでのアナログデータだけでなく、インターネットなどサイバー空間からのデジタルデータも必要となる。例えば、オートクルーズ制御で、地図データや渋滞情報を利用すると言うものである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、こうした大規模分散組み込みシステムにおける高生産、高品質のソフトウェアの開発支援のために、CPU と制御対象の環境シミュレーション環境とこれらを統合させる分散プラットフォームの基盤技術の研究を行い開発することである。

3. 研究の方法

システムの構成図を図 1 に示す。各サブテーマ毎に研究の方法と成果を説明する。

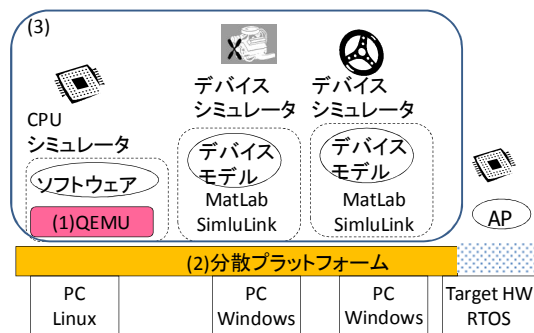


図 1 仮想ソフトウェア実行環境

(1)CPU シミュレータの研究：高生産、高品質の組み込みソフトウェア開発を支援する CPU シミュレータを QEMU をベースに開発する。QEMU 自身は仮想マシンジェネレータである。QEMU を選択したのは、ARM や SH など既に多くの CPU シミュレーション機能を有する汎用的な仮想実行環境であること、シミュレーションが命令変換方式であり高速実行が期待できることである。

(2)分散プラットフォームの研究：本分散プ

ラットフォーム構築にあたっては、OMG で提案された CORBA ベースでオープンソースの Mico を利用する。また、実環境との接続のために CORBA のプロトコルである GIOP/IIOP を実環境での実装を試みる。これは、欧州において標準的な設計手法として提案されている AUTOSAR の VFB シミュレーション環境の実現にも繋がるものである。

(3)環境シミュレーション構築技術の研究：現在、制御系システムの設計には MATLAB/Simulink により、制御対象環境と制御システムを一体化してモデル化し設計を行うモデルベース開発が進められている。MATLAB/Simulink によるプラントモデルシミュレータ、上記の CPU シミュレータに加えて、制御アルゴリズムシミュレーションを統合した異種シミュレーション環境を実現し、有効性を検証する。

4. 研究成果

(1)CPU シミュレータの研究：命令変換方式をとる QEMU を利用して、NEC 製マイクロプロセッサ V850 の CPU シミュレータを開発した。CPU シミュレータの動作を図 2 に示す。

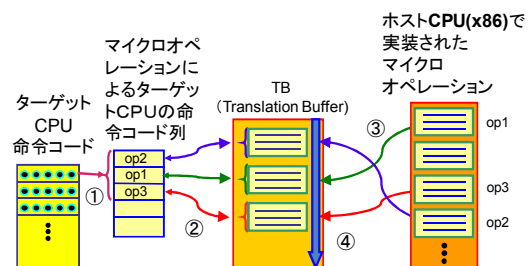


図 2 QEMU による命令実行

ターゲット CPU の命令コードを V850 QEMU が解釈し、定義されたマイクロオペレーションの列に変換する (①)。マイクロオペレーションは対応したホストマシン (PC の場合は x86) で実装されたおり、マイクロオペレーション列の順に x86 コードを Translation Buffer と呼ばれるキャッシュに読み込んで (②, ③)、実行する (④)。

QEMU は、マイクロコードを開発者が定義するタイプ (バージョン 0.9) と TCG と呼ばれる QEMU でバージョン 0.10 以降で採用されたタタイプ (バージョン 0.10) の両方で実装した。ベンチマークとして Dhrystone2.1 を利用して評価した。

表 1 と表 2 にバージョン 0.9 とバージョン 1.0 のベンチマーク値を示す。QEMU ではホストコードに変換された結果を TB でキャッシュしている。表 1 では、TB がある場合とない場合で 80 倍の差があり、TB によるキャッシュの効果を示している。表 2 は、マイクロコードを開発者自身が定義した場合と、QEMU で採用された TCG を利用した場合の比較結果を示す。

TCGを利用したQEMU(0.10)の方が使用しないQEMU(0.9)に比べて、1.5~2倍高速であること示している。これはTCGを利用したQEMU内の最適化によるものと考えられる。

表1 QEMU(0.9)のベンチマーク値

QEMU(TB サイズ)	Dhrystone 値	
	平均	偏差
QEMU V850 (16MB)	58450	546
QEMU V850 E1 (16MB)	81094	3441
QEMU V850 (0)	1946	138
ネイティブ x86	6752154	510201

表2 QEMU(0.10)のベンチマーク値

QEMU(TB サイズ)	Dhrystone 値	
	平均	偏差
QEMU V850 (16MB)	72335	204
QEMU V850 E1 (16MB)	106724	221
QEMU V850 (16MB)	123508	297
QEMU V850 E1 (16MB)	195319	1091

表3にV850 QEMUの開発規模を示す。全体で243KLのうち、V850に関係する改造規模は3KLほどで行うことができた。これもQEMUのようなオープンソースソフトウェアを利用した成果と考えている。

表3 V850 QEMUの開発規模

モジュール名	サイズ(KL)
共通部	77
ハードウェアドライバエミュレータ	55
ターゲット CPU 実行部 (ARM, SH など)	58
その他	53
V850 実行部変更部	3
合計	243

上述したように命令変換型CPUシミュレータであるQEMUは従来のCPUシミュレータに比較すると非常に高速な実行が可能であり、40MIPS相当の処理能力を有することが分かった。したがって、実機を接続して実機とシミュレーションの混在実行は、数10MIPS相当のCPUでは可能である。これより高速なCPUでは、シミュレーション環境のCPU速度は高速化が望めないことから、残念ながら難しく、実機のクロックを数倍遅くした実行にせざるをえない状況である(発表論文②, ③, ④, ⑤)。

(2)分散プラットフォームの研究:CPUシミュ

レータと環境シミュレータを統合するソフトウェアプラットフォームとして、オープンソースCORBAであるMICOを評価した。

表4に、1バイトのデータの往復時間を測定した結果を示す。UDPによる通信は、CORBAの仕様にはないがMICOでの独自の実装を用いた。測定環境は、2-GHz CPU, 2-GM RAM, 100/10M bps Ethernetを有するデスクトップPCである。表4の結果から、CANのような実環境でのデータ転送をシミュレーションするのに十分な通信速度を有すると考えている。

表4 MICOの通信速度

	TCP	UDP
総通信時間	739 μ 秒	405 μ 秒
ORBを除く通信時間	405 μ 秒	345 μ 秒
ORBの通信時間	334 μ 秒	60 μ 秒

次に、本仮想実行環境と実環境を統合を試みた。実環境には、ターゲットハードウェア、リアルタイムOS上にイーサネットとTCP/IPが具備され、ミドルウェアにはAUTOSAR/COMを想定した。AUTOSARは欧州で制定された次世代車載ソフトウェアの標準で、COMはその通信機能である。このCOMをCORBAと接続するための、GIOP/IIOPライブラリを開発した。その結果を表5に示す。MICOによるORBライブラリを使用するよりもはるかに小さいサイズで開発することができ、実環境でも使用できるとの見通しを得た(発表論文②, ③)。

表5 GIOP/IIOPライブラリのサイズ

プログラム	サイズ(バイト)
MICOでのクライアントプログラム	25180+660+160396=1826236
GIOP/IIOPライブラリによるクライアントプログラム	5562+320+32=5914

上述したように、CORBAを本仮想実行環境の分散プラットフォームとして利用する見通しを得た。しかしながら、仮想実行環境をインターネットを介したサイトで実現したい、あるいはクラウド内で実現したいなどの新たな要求が出てきており、現在MicrosoftのWindows Communication Foundationの利用の検討を進めている(発表論文①)。

(3) 環境シミュレーション構築技術の研究
現在、制御系システムの設計にはMATLab/Simulinkにより、制御対象環境と制御システムを一体化してモデル化し設計を行うモデルベース開発が進められている。このため、アンチブレイキシステムを対象とし

て、MATLab/Simulink で制御モデルを作成し、そのうち制御システム側を改めてプログラムを作成、これを(1)で述べた V850 QEMU で実行させた。この結果は、アンチブレイキシステムをMATLab/Simulink 上で単独で制御シミュレーションした結果と同じであり、MATLab/Simulink を利用したモデルが環境シミュレーションとして有効であることを示している。また、MATLab/Simulink によるプラントモデルシミュレータ、上記のCPUシミュレータに加えて、制御アルゴリズムシミュレーションを統合した異種シミュレーション環境を実現し、有効性を検証した(発表論文①)。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 5 件)

- ① Yukikazu Nakamoto, Tadahiro Ito, Kenji Yabuuchi, Tatsunori Osaki, “Geographically Distributed Virtual Test Environments for Distributed Embedded Control System using Model-based Design”, Proc. 18th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, Work-In-Progress Session, 査読有, pp.9-12, Beijing, April, 2012.
- ② Yukikazu Nakamoto, Kenji Yabuuchi, Tatsunori Osaki, “ Virtual Software Execution Environments for Distributed Embedded Control Systems”, Proc. 14th IEEE International Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing Workshops, 査読有, pp.288-296, Newport Beach, USA, March 2011
- ③ Yukikazu Nakamoto, Kenji Yabuuchi, Tatsunori Osaki, Takanari Kishida, Teruya Hara, Issei Abe, and Akira Kitamura, “Proposing A Hybrid Software Execution Environment for Distributed Embedded Systems”, Proc.13th IEEE International Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing Workshops, 査読有, pp.176-183, Carmona, Spain, May 2010.
- ④ 中本幸一, 藪内健二, 尾崎辰典, 原央哉, 岸田貴成, 阿部一晴, 北村章, “大規模分散組み込みシステム向け仮想実行環境の開発—現状報告”, 電子情報通信学会技術研究報告(コンカレント工学), Vol. 109, No. 367, pp. 37-42, 名古屋, 2010年1月.
- ⑤ 尾崎辰典, 中本幸一, 藪内健二, “QEMU を利用した V850 シミュレータの開発と評

価” 情報処理学会研究報告(組み込みシステム), Vol. 2009-EMB-014, No. 11, pp. 1-7, 名古屋, 2009年7月.

[その他]

ホームページ等

<http://www.ai.u-hyogo.ac.jp/~nakamoto>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中本幸一 (Yukikazu Nakamoto)

兵庫県立大学・大学院応用情報科学研究科・教授

研究者番号 : 70382273

(3) 連携研究者

阿部一晴 (Issei Abe)

京都光華女子大学・准教授

研究者番号 : 60340452