

機関番号：32678

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20500037

研究課題名（和文） 組み込みシステム向け時間駆動分散オブジェクト環境及び
ソフトウェア開発法研究課題名（英文） A Time-Triggered Distributed Object Computing Environment
and a Development Method for Embedded 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

研究成果の概要（和文）：自動車制御等の分散型組み込み制御システムの開発効率向上を目的に、時間駆動ネットワークにより接続された組み込みコンピュータ上で動作するOSと分散オブジェクトミドルウェアを開発した。また、組み込み制御ソフトウェアを効率よく開発する手法を提案し、制御ロジック設計で作成した制御モデルをソフトウェアの機能モデルに変換するツールや、機能モデルにリアルタイム性の処理を織り込むためのモデルウィーバを開発した。

研究成果の概要（英文）：The goal of the research is to improve the productivity of distributed embedded control systems such as automotive control systems. We have developed an operating system and a distributed object computing environment for embedded computers connected with a time-triggered network. We have also presented a development method and developed a transformation tool to transform a controller model to a functional software model and a model weaver to weave real-time processing mechanisms into the functional model.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,300,000	690,000	2,990,000

研究分野：組み込みシステム

科研費の分科・細目：情報学・ソフトウェア

キーワード：組み込みシステム、リアルタイムシステム、分散システム、時間駆動アーキテクチャ、アスペクト指向開発

1. 研究開始当初の背景

自動車、家電、FA等の広い分野において組み込みシステムが使用され、そのソフトウェアの開発規模が飛躍的に増大している。このため、組み込みソフトウェアの部品化・再利用を促進することで、開発効率の向上が求められている。

ソフトウェアの部品化・再利用を促進し、生産性を向上させるものとして、オブジェクト指向技術があり、情報分野の計算機システ

ムのソフトウェア開発において広く使用されている。そこで、組み込みソフトウェアの開発量増大に対応するため、リアルタイムシステム向けのオブジェクト指向開発法がいくつか提案されている。しかしその多くは、応答時間の制約がそれほどきびしくない、いわゆるソフトリアルタイムシステム向けである。

組み込みシステムの中でも、自動車、列車等の組み込み制御システムは、応答時間の制

約のきびしいハードリアルタイムシステムである。ハードリアルタイムシステムは、許容時間内に応答しないと事故を起こす恐れのあるシステムで、その開発は容易ではない。このようなハードリアルタイムシステム向けのオブジェクト指向ソフトウェア開発法の研究は多くはない。

また近年、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一般化しており、その開発はますます複雑化している。例えば、最近の自動車では数十個のマイクロコンピュータが搭載され、大量のソフトウェアがエンジン、ステアリング、エアバッグ等を制御している。しかし、ネットワーク通信時間を含む分散システム全体の応答時間を保証するのは容易ではない。

分散システム向けのオブジェクト指向技術として、CORBA (Common Object Request Broker Architecture) に代表される分散オブジェクト技術があるが、その多くは非リアルタイムシステム向けで、そのままでは組み込みシステムには適用できない。リアルタイムシステム向けの分散オブジェクト環境が求められている。

リアルタイムシステム向けの分散オブジェクトを実現するには、まず、時間保証が可能なネットワークプロトコルが必要である。最近、通信時間の保証が可能な時間駆動プロトコル (Time-Triggered Protocol) に基づいた、TTP や FlexRay と呼ばれる時間駆動ネットワークが提案され、その実験環境 (ハードウェア) が整いつつある。しかし、時間駆動ネットワークを用いた環境での分散オブジェクト環境や、分散環境での時間保証を考慮したソフトウェアの開発法など、システムレベルの研究はほとんど行われていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、分散型の組み込み制御システムを対象に、時間保証が容易な分散オブジェクト環境を実現するとともに、組み込み制御ソフトウェアの効率よい開発法を確立することを狙いとする。具体的には、分散型組み込み制御システム向けの時間駆動ネットワーク対応分散オブジェクト環境、及び、分散環境での時間保証を考慮したソフトウェア開発法を開発することを目的とする。

対象とするシステムは、CPU とメモリを内蔵したワンチップマイクロコントローラを用いた組み込みコンピュータを、時間駆動ネットワークにより接続した分散システムであり、その代表的な適用先は自動車制御である。

3. 研究の方法

まず、時間駆動ネットワーク対応分散オブ

ジェクト環境を実現するため、その実行環境 (OS 及び分散処理ミドルウェア) と開発支援環境を開発する。時間駆動ネットワークとして、自動車分野で注目されている FlexRay を使用する。

具体的には、自動車制御分野の標準 OS である OSEK OS をベースに、時間駆動タスクの実現や、位置透過性のあるタスク管理機能を追加した、時間駆動ネットワーク対応分散オブジェクト環境向けの OS を開発する。また、時間駆動分散オブジェクトを実現するため、時間駆動とイベント駆動を扱える分散オブジェクトミドルウェアと、その開発支援環境を開発する。

次に、分散環境での時間保証を考慮したソフトウェア開発法を実現するため、組み込み制御システムの制御ロジック設計からスムーズにソフトウェア設計に移行できるとともに、ソフトウェア設計において、リアルタイム性を効率よく実現する手法と開発ツールを開発する。

具体的には、まず、組み込み制御分野で広く使用されている制御ロジック設計ツールである Simulink を用いて構築した制御モデルを、ソフトウェア開発で広く使用されている UML 記述されたモデルに変換するツールを開発する。そして、リアルタイム性実現のため、静的スケジューリングを考慮して設計したタスク構成の実現に必要な処理を、アスペクトのパターンとして記述する手法と、そのアスペクトパターンをアプリケーションのモデルに織り込むモデルウィーバと呼ぶツールを開発する。

研究体制は、研究代表者と研究分担者が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 6 名程度が設計、実装、評価を行う。また、研究協力者として、組み込み制御システムを開発している企業の複数の研究者と議論を行い、研究にフィードバックする。

4. 研究成果

本研究では、分散型組み込み制御システム向けの時間駆動ネットワーク対応分散オブジェクト環境、及び、分散環境での時間保証を考慮したソフトウェア開発法を開発した。以下、それらの成果について具体的に述べる。

(1) 時間駆動ネットワーク対応分散オブジェクト環境

開発した時間駆動ネットワーク対応分散オブジェクト環境の構成を図 1 に示す。分散オブジェクト実行環境として、OS と分散処理ミドルウェアを、また、開発支援環境として IDL コンパイラとコンフィギュレータを開発した。

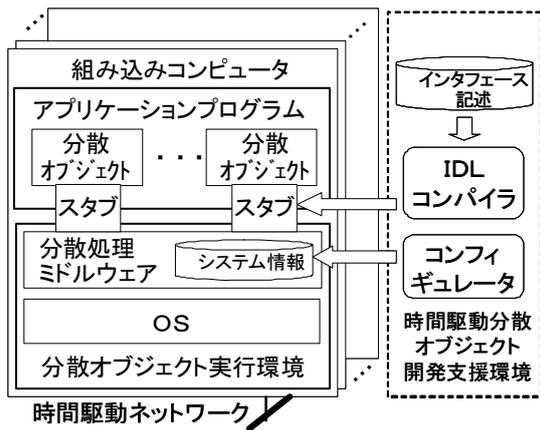


図1 時間駆動ネットワーク対応分散オブジェクト環境

まず、自動車制御分野の標準的なOSであるOSEK-OSに、時間駆動機能を追加することで、時間駆動OSを開発した。これにより、通常の周期タスクよりもジッタの少ない時間駆動タスクを実現できる。

次に、時間駆動ネットワーク FlexRay を用いた分散処理システムを対象に、ジッタの少ない時間駆動分散処理に基づく分散オブジェクトを実現する分散処理ミドルウェアを開発した。また、イベント駆動に基づく分散処理も可能とする機能も実現した。

また、時間駆動分散オブジェクト開発支援環境として、CORBA IDL により記述した分散オブジェクトのインタフェース記述から、分散オブジェクトと実行環境を接続するスタブを自動生成するIDLコンパイラと、実行環境の動作に必要なシステム情報を生成するコンフィギュレータを開発した。

さらに、分散処理環境におけるリアルタイム性を強化するため、OSEK OS に、位置透過なタスク制御やタスク間同期を実現する機能を追加した、分散OSを開発した。本分散OSは、タスク制御やタスク間同期のためのシステムコールの最悪実行時間が予測可能であるという特徴を持つ。

以上の研究成果を、雑誌論文②、学会発表①②⑦⑫として発表した。

(2) 分散環境での時間保障を考慮したソフトウェア開発法

分散環境での時間保障を考慮した開発法として、制御ロジックを表現した Simulink モデルをソフトウェアの構造や振る舞いを表現した UML モデルに変換し、その UML モデルにアスペクト記述したリアルタイム性実現のための処理を織り込むことにより、効率よく組み込み制御ソフトウェアを開発する手法を提案した。また、リアルタイム性実現のためのスケジューリング手法についても検討した。

時間制約のきびしい組み込み制御システムでは、制御システムとしての機能そのものを実現する処理のみでなく、リアルタイム性を実現するための処理も必要なため、ソフトウェアの設計は非常に複雑なものとなっている。そこで、機能側面とリアルタイム側面を独立に設計可能な、アスペクト指向に基づくソフトウェア開発手法を提案した。すなわち、リアルタイム側面の処理をアスペクトで記述しておき、それを、制御モデルから自動変換して生成した機能的側面のみモデルに織り込むことで、効率よいソフトウェア設計を実現する。

そして、上記開発法をサポートするための開発ツールとして、Simulink・UML モデル変換ツールとモデルウィーバを開発した。開発した組み込み制御ソフトウェア開発環境を図2に示す。

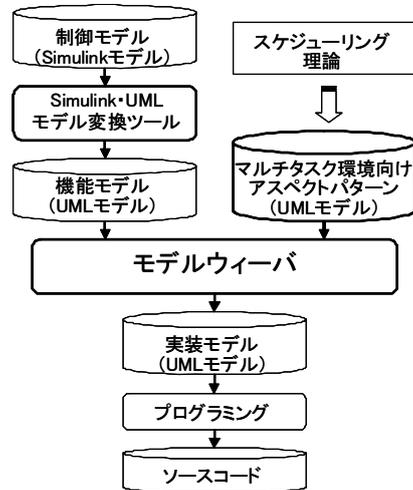


図2 組み込み制御ソフトウェア開発環境

まず、制御設計者が Simulink により作成した制御モデル (Simulink モデル) から、ソフトウェア設計に適した UML モデルに変換する Simulink・UML モデル変換ツールを開発した。これにより、Simulink を用いた制御ロジック設計からスムーズにソフトウェア設計に移行できるとともに、UML 記述された機能モデルを効率よく生成することができる。

そして、その機能モデルに、リアルタイム側面の処理を記述したアスペクトを織り込むモデルウィーバを開発した。組み込み制御システムでは、マルチタスク環境を用いて、リアルタイム性を実現している。そこで、マルチタスク環境において必要となる、タスク間の同期やデータの整合性を保つ処理をアスペクトのパターンとして記述し、ライブラリ化しておく。ソフトウェア設計時には、必要なアスペクトパターンを選択して、モデルウィーバにより機能モデルに織り込むのみで、マルチタスク環境でリアルタイム性のあ

る処理が可能なソフトウェアを容易に開発できる。

また、分散処理環境でのスケジューリング手法の理論的検討も行った。単一プロセッサによる組み込み制御システムでは、レートモニタリング (RM) スケジューリングアルゴリズムが広く用いられているが、複数のプロセッサから成るシステムで上のスケジューリング理論は確立されていない。本研究では、マルチプロセッサ環境向けにRMを拡張したスケジューリング方式を提案した。

以上の研究成果を、雑誌論文①、学会発表③④⑤⑥⑧⑨⑩⑪として発表した。

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2件)

- ① Soeda, T., Yanagidate, Y. and Yokoyama, T., Embedded Control Software Design with Aspect Patterns, Journal of the Chinese Institute of Engineers, 査読有, Vol. 34, Issue 2, 2011, 213-225
- ② 石郷岡祐、伊丹悠一、兪明連、横山孝典、時間駆動とイベント駆動が共存する組み込み制御システムのための分散処理環境、情報処理学会論文誌、査読有、Vol. 51、No. 3、2010、pp. 1056-1067

[学会発表] (計12件)

- ① 知場貴洋、伊丹悠一、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組み込み制御システム向け分散リアルタイムOS、電子情報通信学会ソフトウェアサイエンス研究会、2011年3月7日、沖縄、信学技報 Vol. 110 No. 458
- ② 阿部一樹、横山孝典、兪明連、アスペクト指向プログラミングによる組み込みOSのカスタマイズ手法の提案、電子情報通信学会ソフトウェアサイエンス研究会、2011年3月7日、沖縄、信学技報 Vol. 110、No. 458、pp. 25-30
- ③ 岡崎旭、兪明連、横山孝典、利用率をベースにしたリアルタイムスケジューリングアルゴリズムの提案、電子情報通信学会ソフトウェアサイエンス研究会、2011年3月7日、沖縄、信学技報 Vol. 110、No. 458、pp. 31-36
- ④ 西垣公平、兪明連、横山孝典、RMに基づいたマルチプロセッサ用プリエンブション低減リアルタイムスケジューリングアルゴリズムの提案、電子情報通信学会ソフトウェアサイエンス研究会、2011年3月7日、沖縄、信学技報 Vol. 110、No. 458、pp. 37-42
- ⑤ 田村雅成、神山達哉、添田隆弘、兪明連、

横山孝典、振る舞いモデル生成機能を持つ Simulink・UML モデル変換ツール、電子情報通信学会ソフトウェアサイエンス研究会、2011年3月7日、沖縄、信学技報 Vol. 110、No. 458、pp. 43-48

- ⑥ Kamiyama, T., Soeda, T., Yoo, M. and Yokoyama, T., A Simulink to UML Transformation Tool for Embedded Control Software Design, International Conference on Computer and Software Modeling, 2010年12月5日、マニラ (フィリピン), pp. 93-97
 - ⑦ Itami, Y., Yoo, M., and Yokoyama, T., A Distributed Real-Time Operating System for Embedded Control Systems, Annual International Conference on Real-Time and Embedded Systems, 2010年11月1日、シンガポール, pp. 15-20
 - ⑧ 神山達哉、添田隆弘、兪明連、横山孝典、組み込み制御ソフトウェア開発のための Simulink・UML モデル変換ツール、情報処理学会組み込みシステム研究会、2010年8月9日、はこだて未来大学、Vol. 2010-EMB-18 No. 7、pp. 1-7
 - ⑨ 神山達哉、横山孝典、志田晃一郎、兪明連、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、情報処理学会全国大会、2010年3月9日、東京大学、1Q-1
 - ⑩ Soeda, T., Yanagidate, Y. and Yokoyama, T., Embedded Control Software Design with Aspect Patterns, International Conference on Advanced Software Engineering and Its Applications, 2009年12月10日、済州島 (韓国), pp. 34-41
 - ⑪ 添田隆弘、横山孝典、志田晃一郎、兪明連、静的構造モデリングのためのアスペクト指向設計環境、情報処理学会全国大会、2009年3月11日、立命館大学、4L-2
 - ⑫ Itami, Y., Ishigooka, T. and Yokoyama, T., A Distributed Computing Environment for Embedded Control Systems with Time-Triggered and Event-Triggered Processing, 14th IEEE Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, 2008年8月25日、高雄 (台湾), pp. 45-54
- ## 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