

氏名(本籍)	横山孝典 (茨城県)
学位の種類	博士 (情報科学)
学位記番号	情 第 27 号
学位授与年月日	平成 14 年 9 月 12 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
最終学歴	昭和 58 年 3 月 東北大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻 博士課程前期 2 年の課程
論文題目	自律的分散処理モデルに基づく分散システムの構成に関する研究
論文審査委員	(主 査) 東北大学教授 白鳥 則郎 東北大学教授 鈴木 陽一 東北大学教授 木下 哲男

## 論文内容要旨

### 第 1 章 序論

近年、計算機システムの分散化が進展している。文書処理システムや金融システムのような情報処理分野においては、必要とする機能がどの計算機上に存在するかを意識せずすむ位置透過性や、新しい計算機やソフトウェアの追加が容易な拡張性などの機能が重要視される。そしてこのような要求に答えるものとして、オブジェクト指向に基づく分散システムが広く浸透しつつある。

一方、電力システム、交通システム、自動車制御システムなどの制御分野や、設計システムやシミュレーションシステムのような設計分野においては、それら分野特有の要求のため、情報処理分野における分散システム構成をそのまま適用することはできない。

制御分野では、厳密な時間制約を守るハードリアルタイム処理や、24時間連続運転可能な信頼性が要求される。例えば、自動車や列車などの組込み制御システムは、デッドラインまでに制御を完了できなければ事故につながる可能性がある。また、電力、交通などの産業システムでは、一部に障害が発生しても処理を継続できるフォールトトレランスや、連続運転中に保守・拡張が可能なことが要求される。

また、設計分野の分散システムでは並列協調処理が求められている。設計システムやシミュレーションシステムは大量のデータを扱うため、並列処理による高速化が期待されている。また、複雑な問題を定式化可能な部分問題に分割し、協調して全体の解を求める協調問題解決が要求される。

以上述べた要求を満足するため、制御分野や設計分野ではこれまで、専用のハードウェアやOSを用いた分散システムが普通であった。しかし専用システムは位置透過性や拡張性の点で問題が残る。位置透過性や拡張性を持ちながら、ハードリアルタイム処理、信頼性、並列協調処理を統一的な枠組みで実現できる分散システム構成法が要求されている。

本研究の目的は、制御分野や設計分野における一般性のある分散システム構成法を確立することである。

本論文では、ハードリアルタイム処理、信頼性、並列協調処理を容易に実現するための分散処理モデルとして、自律的分散処理モデルを提案する。次に、本モデルに基づく分散システムの具体的構成法を提案し、制御分野としてハードリアルタイム分散システムおよび高信頼分散システム、設計分野として並列協調問題解決システムを取り上げ、実際に分散システムを実装し、有効性の評価を行う。そして、一般性のある分散システム設計法の基礎を与える。

## 第2章 自律的分散処理モデル

制御および設計分野に適した分散処理モデルとして、本論文では自律的分散処理モデルを提案する。

自律的分散処理モデルは、自律的動作、自律的管理、自律的並列処理が可能なオブジェクトの集合から成る。自律的動作とは、時間条件により自発的に処理を起動し、自分自身の状態を更新するように動作する機能である。自律的管理とは、オブジェクト内の動作の監視や構造の動的操作を、自分自身で行う機能である。自律的並列処理とは、単一オブジェクト内で複数のコンテキストを同時に処理し、管理する機能である。

一般にオブジェクト指向に基づく分散システムは、互いにメッセージ通信が可能な複数のオブジェクトの集合から成る。従来システムにおけるオブジェクトの動作は下記のように表現できる。

メッセージ受信 → (状態更新, 他へのメッセージ送信)

オブジェクトの処理はメッセージ受信により起動され、そのオブジェクトの状態の更新や、他のオブジェクトへのメッセージ送信が可能である。

これに対し、自律的分散処理モデルにおけるオブジェクトは下記のように表現できる。

(時間条件 | メッセージ受信) →

(複数コンテキスト状態更新, 構造・動作の監視・操作, 他へのメッセージ送信)

まず自律的動作を実現するため、メッセージ受信のみでなく、時間条件によって処理を

起動可能としている。次に自律的管理を実現するため、オブジェクト自身がその構造や動作の監視および操作する機能を新たに付加している。さらに、自律的並列処理を実現するため、単一オブジェクト内に複数のコンテキストを持ち、それらの状態を並列に更新可能とする。

自律的分散処理モデルを適用すれば、その自律的動作によりハードリアルタイム分散処理に適した位置透過な時間駆動動作を、自律的管理により信頼性を実現するための状態監視や障害回復等の動的監視・操作機能を、自律的並列処理により並列協調処理に適した複数コンテキスト同時処理を実現できる。

### 第3章 ハードリアルタイム分散システムの構成

本章では、自動車や列車などの組込み制御システムに代表されるハードリアルタイム分散システムの構成法の基盤を確立することを目的に、自律的分散処理モデルを適用する。そして、その自律的動作により、処理時間の予測が容易な時間駆動アーキテクチャに基づくハードリアルタイム分散システムを実現する。

自律的動作を実現するため、ひとつのオブジェクトをデータ値オブジェクトとコントローラオブジェクトの組み合わせで実装する。データ値オブジェクトは処理に必要なデータの算出を行うオブジェクトで、必要により他のオブジェクトの持つ属性値を読み出して、自分自身の値を自律的に算出し、記憶する。一方コントローラオブジェクトはデータオブジェクトの算出処理の起動タイミングを規定するオブジェクトで、周期的にデータ値オブジェクトの処理を起動することで時間駆動アーキテクチャを実現する。

また、データ値オブジェクトのレプリカを、そのオブジェクトを参照する計算機上に置くレプリカ方式により、位置透過性のある分散処理を実現する。レプリカ機能は、上書き可能な状態メッセージを用いることで効率良い実装が可能である。

そして、上記レプリカ機能や、無駄な時間遅れの発生を防ぐ計算機間同期実行等の機能を提供する、組込み制御システム向けの分散処理環境を開発し、実際に自動車分散制御システムに適用して、その有効性を確認した。

### 第4章 高信頼分散システムの構成

本章では、電力、交通、FAなどの産業システムに代表される高信頼分散システムの構成法の基盤を確立することを目的に、自律的分散処理モデルを適用する。そして、その自律的管理機能により障害回復機能や連続運転時の保守・拡張機能を実現する。

自律分散処理モデルの自律的管理機能は、分散システムを構成するオブジェクトに、その管理や制御を行うメタオブジェクトを付加することで実現する。従来実現が困難であった汎用のOSおよび言語を用いてメタオブジェクトを実現するため、本研究では、コンパイラに基づくリフレクティブアーキテクチャと呼ぶ手法を開発した。本手法はコンパイル時にオブジェクトの構造に関する情報（メタデータ）を抽出しておき、実行時にメタオブジェクトがメタデータを参照してオブジェクトに対する操作を行うことで、特殊な処理系を用いずにメタオブジェクトを実現できる。

メタオブジェクトにより、データのバックアップ、メッセージのロギング、フォールトトレランス、ノンストップバージョンアップ等の機能を提供できる。これにより高い信頼性や可用性、保守・拡張性を持つ分散システムを構築できる。またオブジェクトを修正することなく、メタオブジェクトのプログラムを修正するのみで、対象アプリケーションの要求に応じた新たな機能の追加、修正も容易に行うことができる。

そして、電力等の産業システム向けの分散処理環境ソフトウェアを汎用ワークステーション上に開発し、その有効性を確認した。

## 第5章 並列協調問題解決システムの構成

本章では、並列協調問題解決システムの構成法の基盤を確立することを目的に、自律的分散処理モデルを適用する。そしてその自律的並列処理により、複数のコンテキストを同時に処理できる並列協調問題解決システムを実現する。

まず、並列処理を意識せずに自然な並列動作を実現するため、宣言的な制約表現と制約充足に基づく問題解決を導入した。オブジェクトを属性と制約で表現し、制約充足により属性値を算出する。また制約伝播を利用することで、オブジェクト間や、オブジェクトを介したエージェント間の協調動作を実現できる。

次に、同時に複数のコンテキストを処理できるマルチコンテキスト・オブジェクトによる自律的並列処理を実現した。本手法は、オブジェクトの属性値の組み合わせを記憶するノード網を形成し、ノード単位で制約評価することで、ノード数分の並列処理が可能である。さらに、制約に違反する属性値の組み合わせを排除することで、コンテキストの爆発を回避できる。

また、設計対象モデルをマルチコンテキスト・オブジェクトで表現し、設計手続きに関する知識を持つ複数のエージェントが設計対象モデルに並列にアクセスしながら協調動作を行う、並列協調設計システムのモデルを提案した。

そして、マルチプロセッサ計算機上に、マイクロプロセッサを対象にした並列協調設計システムのプロトタイプを開発し、その有効性を確認した。

## 第6章 結論

本論文の結論として、制御分野および設計分野における分散システムの設計法の基礎を与える。

制御および設計分野における分散システムを設計するには、以下の点に留意する必要がある。すなわち、制御分野ではハードリアルタイム処理に対応できること、および高い信頼性を提供することが重要である。設計分野では並列協調処理を実現することが重要である。また、分散システム一般に対する要求であるが、位置透過性があること、拡張性が高いことにも留意する必要がある。

制御および設計分野における分散システムを設計する指針は以下の通りである。制御分野ではまず、ハードリアルタイム処理を実現するため、処理時間の予測が容易な時間駆動アーキテクチャを採用する。その実現方法として自律的分散処理モデルの自律的動作の適用が有効である。次に、高い信頼性を実現するため、オブジェクト単位の状態や構造の監視および操作機能を実装する。その実現方法として自律的分散処理モデルの自律的監視機能の適用が有効である。また設計分野では、並列協調処理を実現するため、単一オブジェクト内での複数コンテキスト同時処理を採用する。その実現方法として自律的分散処理モデルの自律的並列処理機能の適用が有効である。

以上本論文では、制御および設計分野向けの一般性のある分散システムの構成法について述べた。まず、制御および設計分野特有の要求を満足する分散処理モデルとして、自律的分散処理モデルを提案した。そして、自律的分散処理モデルに基づくハードリアルタイム分散システム、高信頼分散システム、並列協調問題解決システムの構成法を提案し、実際に自動車制御システム、電力等の産業システム、マイクロプロセッサ方式設計システム等を試作し、その有効性を確認した。また、制御および設計分野における分散システム設計の基礎となる留意事項と指針を与えた。

## 論文審査の結果の要旨

様々な情報機器をネットワーク接続した分散システムが広く浸透し、情報通信分野においては、汎用的な分散システムの研究および実用化が進んでいる。一方、リアルタイム性や信頼性が要求される制御分野や、並列処理による高性能化が要求される設計分野においては、系統的な分散システム構成法は確立されていない。しかし、開発工数やコストの低減、拡張性や相互接続性の向上等のためには、汎用性の高い系統的な分散システム構成法が必要となる。そこで著者は、リアルタイム性、信頼性、並列協調処理を効率よく実現できる、制御および設計分野向けの系統的な分散システム構成法に関する詳細な研究を行った。本論文はその成果をまとめたものであり、全編6章から成る。

第1章は序論である。

第2章では、時間的な条件に基づき自律的に処理を起動する機能、プログラムの動作の監視や構造の操作を自分自身で行う機能、および並列処理動作の管理を自動的に行う機能を持つ、自律的分散処理モデルを提案している。本モデルは、リアルタイム性、信頼性、並列協調処理を実現するための系統的な分散処理モデルであり、興味深い提案である。

以下の章では、本章で構築した自律的分散処理モデルに基づく分散システムについて、その具体的構成法を提案し、実際のシステムに適用している。

第3章では、時間的な条件で自律的に処理を起動する時間駆動アーキテクチャを開発し、処理時間の予測が容易なリアルタイム分散システムの構成法を提案している。また、自動車の分散制御システムに適用して、その有効性を確認している。

第4章では、プログラム自身が動作状態の監視やバージョンアップ等を自律的に行う手法を開発し、障害回復や無停止保守・拡張が可能な高信頼分散システムの構成法を提案している。また、電力システム等の分散システムに適用して、その有効性を確認している。本手法は、実用上重要な成果である。

第5章では、設計解の複数の候補を並列に処理することで、制約条件を満足する解を効率的に求めることができる並列協調問題解決システムの構成法を提案している。また、LSI設計分散システムに適用して、その有効性を確認している。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、リアルタイム処理、信頼性、並列協調処理を実現する系統的な分散処理モデルを提案するとともに、そのモデルに基づく分散システムの具体的構成法を開発し、様々な分散システムに適用し評価することにより、制御および設計分野向けの分散システム構成法の基礎を与えたものであり、情報基礎科学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。