

# 分散制御システムのモデリングとシミュレーションのための オブジェクト指向デザインパターン

## 学位論文内容の要旨

近年,集中管理型の制御システムに代わり,通信ネットワークを介してセンサやアクチュエータなどの計装機器同士が直接デジタル通信する分散制御システム (Distributed Control System, DCS) が,ファクトリオートメーション (FA),ビルオートメーション (BA),車載 LAN といった分野に導入され始めている.一般的な DCS は,制御対象,センサ・アクチュエータ,制御ノード,ネットワークから構成される.DCS は,配線コストが低い,正確かつ信頼性の高いデータ通信が可能,システム構成の変更に対する柔軟性が高い,といった利点を持つ.

一般的な DCS の開発プロセスは,DCS の要求仕様記述・設計・実装・試験運転・計測・調整の順に進められる.DCS は制御ノードの数や通信頻度によって通信信号の遅延特性が変化するため,制御上の問題が明らかになるのは試験運転以降であり,問題発生時の設計・実装への手戻りコストが大きくなってしまう.さらに,DCS の一部を拡張または変更する時,この DCS を一旦停止後に調整・再始動するのは効率上・安全上望ましくない.

これらの問題点を根本的に解決するためには,DCS の動的挙動を予測し機能検証を行うための DCS シミュレータを設計に導入する事が必要不可欠であり,このようなシミュレータを短期間で効率的に開発できる事が DCS 開発者から強く望まれている.しかし,既存の DCS シミュレータは特定のネットワーク規格のみでしか動作しなかったり,センサ・アクチュエータと制御対象の挙動予測が不可能であったり,他の制御対象シミュレータとの連携を要する,といった問題点を有している.

そこで本論文では,DCS の稼働時の挙動を予測し機能検証できる,特定のネットワーク規格に依存しない汎用的な DCS のモデリングとシミュレーションのための体系的な方法論を提案するとともに,この方法論に基づく DCS シミュレータを開発し,その有効性を実験的に検証する事を目的とする.まず,DCS モデルの静的構造を効率的に記述する事を目的として,本論文では,DCS の静的構造モデリングに特化した3つのデザインパターンを新たに提案する.デザインパターンとは,オブジェクト指向に基づくソフトウェア設計において,繰り返し出現する設計上の問題の解決に適用できる,再利用可能なクラス間の関係とオブジェクト間の相互作用の雛形である.本論文では,これらの3パターンを BA 用 DCS シミュレータの開発へ適用する事により,このシミュレータ上で同一の機器構成と制御機能を持つデバイスや,他のデバイスと類似した機器構成と制御機能を持つデバイス等

のモデルを効率的に記述できるようになった。その結果、従来4~5ヶ月を要したBA用DCSの開発期間を2週間へと大幅に短縮できる事が明らかとなった。

次に、DCSモデルの連続・離散混合型の動的挙動を記述する事を目的として、本論文では、DCSの動的挙動モデリングに特化した2つのパターンを新たに提案する。まず、第一のパターンでは、制御ノード、センサ・アクチュエータ、制御対象の動的挙動を有限状態機械として記述でき、さらに、有限状態機械における各状態に対して連立微分代数方程式を定義する事もできる。一方、第二のパターンでは、各モデルの状態遷移を引き起こすイベントの通信経路を規定できる。BA用DCSシミュレータの開発において、制御ノード間の通信シナリオ定義機能とシミュレーション実行時のパケットログ出力機能へこれらのパターンを適用した結果、シミュレーションの実行結果より、空調用DCSの通信挙動の通信シナリオに沿った予測が可能である事を確認できた。

次に、ネットワークの通信プロトコルモデルを含むDCSモデルにおいて、各構成要素モデルが並列動作するシミュレーション機構を実現する事を目的として、本論文では2つのデザインパターンを新たに提案する。さらに、これらのパターンをBA用と車載LAN用のDCSシミュレータ開発に適用する事により、通信プロトコルを持つDCSモデルを実際に構築した後、シミュレーションを実行して、通信挙動を正しく予測できる事を確認できた。

さらに、DCSモデルの記述をどのようなプログラミング言語へも自動変換可能な汎用的なデザインパターンを提案し、これを利用して、DCSモデルからDCSを構成する各制御ノード用のC言語ソースコードを自動生成できることを、具体的なFAシステムを対象に検証することで、提案するDCSモデルが、シミュレーションのみならず、DCS実システム開発にも有効に再利用可能であることを実証している。

最後に、提案手法を用いて開発されたDCSシミュレータと、DCS実システムにおける通信挙動の比較を行う事で、提案手法により開発されたDCSシミュレータの有効性を検証する。まず、車載LAN用DCSの実機を用い、制御ノード内での送信・受信に伴う遅延時間の測定実験を行い、この実験結果から得られた送信・受信遅れの近似式をDCSモデルへ実装した後、4台の制御ノードによるシミュレーションと通信実験を行った結果、このシミュレータは通信に伴う遅延を1ビットあたりの送信時間の約1/2の誤差で高精度に模擬できる事を確認できた。次に、BA用DCSの実機を用いて、制御ノードにおける送信・受信に伴う遅延時間の測定実験を行い、この実験結果を、乱数を用いた各制御ノードにおける送信・受信遅延モデルで近似し、この遅延モデルをDCSモデルへ実装した。その後、3台の制御ノードによるシミュレーションと通信実験を行い、両結果から得られるパケットの受信時刻を比較した結果、このシミュレータは実システムとの相関性が高い通信挙動を模擬できる事を確認できた。さらに、このDCSシミュレータ上で制御ノード数を増加させた場合、各制御ノードの送信待ち時間等の通信パラメータが適切に設定されていない場合は、ある個数以上のノード数で通信の呼損率が1となり、制御不可能となることが予測できた。そこで、各制御ノードの通信パラメータの調整とシミュレーションを再実行を繰り返した結果、ある適切な通信パラメータの設定では、呼損率が0にまで抑制できる事を、実システム実装前に予測できることを明らかにした。

以上の結果より、本論文で提案したデザインパターンによるDCSのモデリング・シミュレーション

のための体系的方法論は、特定のネットワーク規格に依存しない汎用的なものであり、かつ、DCS の稼働時の挙動を予測し機能検証できる DCS シミュレータの開発ならびに DCS 実システム実装の効率化に極めて有用である事を明らかにした。

# 学位論文審査の要旨

主査 教授 金井 理  
副査 教授 小野里 雅彦  
副査 教授 山下 裕  
副査 教授 古川 正志

学位論文題名

## 分散制御システムのモデリングとシミュレーションのための オブジェクト指向デザインパターン

近年、センサやアクチュエータなどの計装機器同士がネットワークを介して直接デジタル通信する分散制御システム (Distributed Control System, DCS) が、工場やプラント内の自動機器制御、ビル制御、自動車電子制御などに急速に普及している。DCS は、配線コストの低さ、通信の信頼性、構成変更の柔軟性といった利点をもつ反面、物理的な通信路が単一のため、機器間の通信頻度が高まると、最悪の場合、要求される制御を果たせなくなる欠点をもつ。実システム設置前にこのような制御上の問題を予測し回避するには、様々な規格の DCS の動的挙動を予測できるシミュレーション技術が必要不可欠となる。しかし既存の DCS シミュレータは、模擬できる DCS の規格が限定されていたり、システム全体のモデリングが不可能であったり、挙動の予測精度が十分でなかったり、またモデルの構造やシミュレータ内部機構が公開されておらず、拡張や変更が困難であるといった問題があり、その解決が早急に望まれている。

本論文は、このような分散制御システム (DCS) のモデリングとシミュレーションの問題を解決すべく、DCS 各構成要素の静的構造や動的挙動のみならず、ネットワーク通信プロトコルやシミュレーション機構までもを包括的に表現できる参照モデルと、そのモデルをシミュレーション実装コードへ曖昧さなく変換する規則からなる DCS 専用のデザインパターンを新たに提案することで、汎用的で体系的な DCS のモデリング・シミュレーションのソフトウェア構築方法論を確立し、その有効性を実験的に検証する事を目的としたものである。

第 1 章では、DCS の特徴と開発における技術課題を述べ、DCS の開発にとってシミュレータが不可欠であるにも関わらず、既存の DCS シミュレータは、汎用性や挙動の予測精度、モデルや機構のオープン性などが不十分であり、その解決には、より汎用的で体系的な DCS のモデリングとシミュレーションの方法論が必要であり、その提案と実験的検証が本論文の目的であることを述べている。

第 2 章では、DCS のモデリングとシミュレーションに適用できる可能性のあるソフトウェア工学分野の既存技術を網羅的に調査し、シミュレータの要件に照らし合わせて評価した結果、DCS のモデリングとシミュレーション専用のオブジェクト指向デザインパターンを適用する方法論が、研究

目的の実現に最も適した形態であることを示している。

第3章では、DCS のモデリングとシミュレーション専用のオブジェクト指向デザインパターンが、主として静的構造、動的挙動、並列離散事象シミュレーション、制御ソフトウェア生成といった4部分から構成できることを明らかにし、それらパターンを用いて具体的な DCS シミュレータを開発実装する手順を明らかにしている。

第4章では、DCS の静的構造モデリングに特化したデザインパターンとして、制御ノード、センサ・アクチュエータ・コントローラからなるデバイスの機器構成を効率よく記述できる Device-Constructor パターン、複数デバイス集合体を効率よく記述できる Composite-Device-Constructor パターン、さらに複数制御対象の構成を効率よく記述できる Plant-Constructor といった3種類のデザインパターンを提案し、その構造と機能を示している。またこれらパターンを DCS シミュレータのモデリング部に組み込み、これを実際のビル空調システム制御用 DCS の設計作業に導入した結果、従来4~5ヶ月を要していたシステムのモデリング期間を、約2週間へと大幅に短縮できた事を明らかにしている。

第5章では、DCS の各構成要素がもつ連続・離散混合型の動的挙動モデリングに特化したデザインパターンとして、制御ノード・センサ・アクチュエータの離散的挙動を記述する Statechart パターン、制御対象の連続・離散混合型の挙動を記述する Hybrid-Statechart パターン、さらに DCS 内で各構成要素モデルの状態遷移を連鎖させるイベント伝達経路を規定する Event-Chain パターンといった3種類のデザインパターンを提案し、その構造と機能を示している。

第6章では、DCS 内の複数構成要素がもつ挙動モデル群を、効率よく並列動作させるシミュレーション機構を実現するデザインパターンとして Time-Warp パターンを、また DCS 規格の全てに共通利用できる通信プロトコルスタックを表現したパターンとして Protocol パターンをそれぞれ提案している。これら2つのパターンを DCS シミュレータの実行部に組み込み、ビル空調システム制御用 LonWorks と自動車電子制御用 CAN といった2つの異なる通信プロトコルをもつ規格の DCS に対するシミュレーションを実行し、いずれの場合も、通信を含めたシステムの動的挙動を正しく模擬できる事を示している。

第7章では、Statechart パターンで表現された DCS の制御ノード向け動的挙動モデルの記述を、制御ノード内に実装される様々プログラミング言語へ体系的に変換する Statechart-Compiler パターンを提案している。これを利用して、LonWorks で制御される部品搬送システムの制御ノード実装用 Neuron-C 言語を自動生成し、その実システムの動作確認を行うことで、提案する DCS モデルが、シミュレーションのみならず実装にまで有効に再利用できることを示している。

第8章では、CAN と LonWorks といった2種類の DCS 規格を対象に、本 DCS シミュレータが予測した通信遅延時間と、実 DCS の通信遅延時間との比較実験を行い、いずれの DCS 規格においても、本シミュレータは実システムの通信遅延を高精度に予測できることを検証している。また DCS ノード数が増加する実際の設計条件におけるネットワーク呼損率の増加を定量的に予測できるとともに、本シミュレータを用いて、その呼損率を改善する通信パラメータ設定を対話的に発見することも示している。

第9章では、本研究で得られた結論を要約している。

これを要するに、本論文は、分散制御システムのモデリングとシミュレーションを目的とした、高い汎用性と体系的構造を有するソフトウェア構築の方法論に関し新知見を与えたものであり、システム工学、ソフトウェア工学、シミュレーション工学、制御工学の発展に対し貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(情報科学)の学位を授与される資格あるものと認める。