

早稲田大学大学院情報生産システム研究科

# 博士論文審査結果報告書

## 論 文 題 目

Agent-based Material Transportation Scheduling of AGV  
Systems and Its Manufacturing Applications

申 請 者

Muhammad Hafidz Fazil MD FAUADI

情報生産システム工学専攻  
生産情報制御研究

2012年 9月

顧客ニーズの多様化や製品ライフサイクルの短期化にともない、ダイナミックな品目変更や生産量変更に即応しうるフレキシブル生産システムのニーズが増大している。これに対し、従来のライン型大量生産方式に代わり、多能工化した作業者が複数工程を一貫して処理するセル生産方式の導入が進んでおり、多機能ロボット、自動搬送車（Automated Guided Vehicle : AGV）等を利用し、セル生産システムの自動化とフレキシビリティを追求する知的マニュファクチャリングシステム（Intelligent Manufacturing System : IMS）の取組みが進められてきている。IMSの実現には、自動化機械（ハードウェア）の多機能化に加え、それらをシステム化しスケラブルに運用する生産システムアーキテクチャとその実装方法が主要課題の一つとなる。これに対し、A・ケストラーが80年代に提唱した協調的階層自律分散システムであるホロン(Holon)の概念を生産システムアーキテクチャに導入した、ホロニック生産システム（Holon Manufacturing System : HMS）が提唱され、90年末期から2000年初頭にかけて、日本を中心とする産官学実証プロジェクト（HMSプロジェクト）において、生産システム向け疎結合システムアーキテクチャ（Loosely Coupled System Architecture）の研究が行われた。一方、インターネット利用が拡大する中、ネット上で自律的に動作する分散型アプリケーション・アーキテクチャであるマルチエージェントシステム(Multi-Agent System : MAS)が80年代に提唱され、90年代後半にはエージェント実装のインタオペラビリティと再利用に関する国際標準化団体 FIPA（Foundation of Intelligent Physical Agents)が組織され、エージェント間の処理要求割当交渉プロトコルである契約ネットプロトコル（Contract Net Protocol : CNP）が提案された。CNPはHMS実証システムの中でも利用されたが、搬送機器の物理的移動によりその位置や配置が変化する搬送システム（Material Transportation System: MTS)を対象としたマルチエージェントシステムの応用や設計支援方法についての研究は十分とは言えなかった。

本論文は、このような課題に対し、マルチエージェント・アーキテクチャによる搬送システムについて検討した内容をまとめたものである。以下、各章の概略を述べ評価を行う。

**第1章 Introduction** では、本研究の背景とフレキシブル生産システムやセル生産システム導入の動向について述べ、本研究の位置づけと達成すべき目標を示している。

**第2章 Literature Review and Problem Description** では、本研究に関連する技術としてマルチエージェント・アーキテクチャについて紹介し、フレキシブル生産システムを実現する上で搬送システムに要求される技術課題について述べている。

**第3章 MAS Based MTS Architecture using Predictive-Reactive Approach** では、拡張性、再利用性、再構成性に優れた搬送システムを実現するアイデアとして、マルチエージェント・アーキテクチャに基づく搬送システム（マルチエージェント搬送システム）を提案し、搬送要求の発生と依頼を行う搬送要求エージェント、搬送の実施を行う搬送処理エージェント、搬送システム全体の実施状況監視を行うモニタエージェントからなるマルチエージェントシステム構成とエージェント間インタフェースの仕様について述べている。

**4章 Dynamic Task Assignment Protocol for MAS-based AGV system** では、単一積載・ポイントツーポイント移動型 AGV を利用してマルチエージェント搬送システムを実現するケースを対象に、AGV の位置情報に基づき動的搬送要求割当を行なうことで搬送スループットを最大化する Location Aware CNP を提案している。加工機械と AGV を、それぞれ搬送要求エージェント、搬送処理エージェントとして実装し、搬送要求エージェントが搬送要求の引受エージェントを募集するオークション（1 対多オークション）を開設する。新たな搬送処理エージェントがオークションに参加する毎に、AGV の位置情報に基づいて搬送物ピックアップ作業の着手可能時間を計算し、それが搬送遅延を生じないための制約条件（作業着手スラック時間）の充足可否を混合整数計画問題を解いて判定することにより、搬送処理エージェントの専有時間の総和を最小化する動的搬送要求割当を行っている。6 種類の納期付き生産要求（以下、ジョブと記す）に対し、6 台の加工・組立機械間でワーク搬送を行い 6 種類のオペレーションを処理する標準的規模のジョブショップシステムにおいて、異なるジョブ発生レート（最小 5 ジョブ/hour～最大 20 ジョブ/hour）と異なる AGV 台数（2 台～13 台）のもとで、CNP と Location Aware CNP によるシミュレーション実験（それぞれ 112 ケース）を実施・比較した結果、平均ジョブ処理スループット、平均実荷走行時間割合がそれぞれ 32%、45%増加し、平均搬送待時間が 84%減少することを明らかにしている。以上の内容から、Location Aware CNP により、AGV を利用して効率的なマルチエージェント搬送システムを実現する方法を示した点が評価できる。

**第 5 章 Distributed Transportation Scheduling for AGV with Multiple-Loading Capacity** では、複数の搬送先に複数の搬送物を巡回搬送可能な混載・巡回移動型 AGV を利用してマルチエージェント搬送システムを実現する目的で、Location Aware CNP をさらに拡張している。すなわち、異なる搬送要求への同一搬送処理エージェントの重複割当て競合解消を行う調停エージェントを Location Aware CNP のオークションモデルに追加し、搬送要求エージェントと搬送処理エージェント間で多対多のオークションを可能とする拡張型 Location Aware CNP を提案している。前章同様のジョブショップシステムにおいて、ジョブ発生レートが 15 ジョブ/hour、混載積載容量（1 個～7 個）を有する複数の混載・巡回移動型 AGV（2 台～12 台）のもとで、シミュレーション実験（24 ケース）を実施した結果、ジョブ処理に必要な十分なスループット達成には、単一積載・ポイントツーポイント移動型 AGV を Location Aware CNP で運用する場合 AGV 8 台が、積載容量 5 個の混載・巡回移動型 AGV を拡張型 Location Aware CNP で運用する場合 AGV 2 台が必要であることを示し、AGV 台数を 65%削減するとともに総走行距離を 73%削減できることを明らかにしている。一方で、混載・巡回移動型 AGV を利用する搬送システムでは、故障や保守による AGV 台数減少に対するジョブ処理スループットの低下割合が大きくなるため、感度解析を行なうことによりシステムの可用性の観点から適当な AGV 台数と積載容量を決定すべきことを指摘している。競合解消アルゴリズムの実装では、競合解消問題をナップサック問題と巡回セールスマン問題を融合した多目的組合せ最適化

問題に定式化して分割統治法で解くことにより計算時間を削減している。積載容量 3 個の混載巡回移動型 AGV10 台を用いて 12 個のジョブを処理するジョブショップシステムのケースで、提案した分割統治法により調停エージェントと搬送処理エージェントが階層分散処理により競合解消を行う場合と、調停エージェントが単独で集中して競合解消を行う場合について計算時間を比較した結果（評価環境 Intel i5-CPU, 2.8GHz, 4GB）、提案方式では計算時間が 700ms から 70ms に約 90%削減された。AGV 台数が増加するほど提案方式による計算時間削減効果が高くなる結果も示されており、拡張型 Location Aware CNP により、数十台規模の混載・巡回移動型 AGV を利用した効率的なマルチエージェント搬送システムを実現できることを示した点が評価できる。

**第 6 章 Multi Objective Design for AGV System and Its Case Study** では、混載・巡回移動型 AGV と拡張型 Location Aware CNP を実装した搬送システムシミュレータによる多目的最適化設計支援方法について提案している。設計パラメータとシステム出力間の応答関係を分析する方法である応答局面法をシミュレーション結果に対して適用することにより、多目的最適化の観点から AGV の積載容量と台数を決定する方法を述べている。実際のタイヤ製造ラインモデル（加工機械 19 台、5 種類のジョブ、ジョブ発生レート 65 ジョブ/hour）をケースとし、2 つの設計パラメータ（AGV 積載容量および台数）と 3 種類のシステム性能指標（ジョブ処理スループット、平均搬送時間、平均搬送距離）の応答関係を分析することにより、AGV 積載容量 14 個、台数 22 台を決定しており、マルチエージェント搬送システムの多目的最適化設計支援方法を示したものとして評価できる。

**第 7 章 Conclusions and Future Works** では、本研究の成果をまとめ、今後の課題について述べている。

以上を要約すると、本論文は、フレキシブル生産システムを実現するために有効なマルチエージェント搬送システムのアーキテクチャとその実装方法を提案するとともに、それらを用いた搬送システムのシミュレーション結果を解析し、多目的設計最適化支援の観点から、搬送システムの主要な設計パラメータ値の最良組合せを決定する方法を示したものである。これらの成果は、拡張性、再利用性、再構成性に優れたフレキシブルな搬送システムを構築するためのシステム技術として有効かつ実用的なものであり、今後の生産システムの進展に貢献しうるものであると考えられる。また、本論文で提案している拡張型 Location Aware CNP は、マルチエージェント応用の可能性を広げる技術として、学術的にも新規性が高いものである。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2012年 8月 27日

主査	早稲田大学	教授	工学博士（東京工業大学）	村田 智洋
	早稲田大学	教授	工学博士（東京工業大学）	大貝 晴俊
	早稲田大学	教授	博士(工学)（早稲田大学）	藤村 茂