

早稲田大学大学院 基幹理工学研究科

博士論文審査報告書

論文題目

協調エージェントによる輸送問題のための動的計画生成法の研究

Studies on Dynamic Planning for Transportation Problems by
Cooperative Agents

申請者

山内 智貴

Tomoki YAMAUCHI

情報理工・情報通信専攻 知識ソフトウェア研究

2023年2月

近年の ICT 技術の発展に伴い、ネットワークで繋がれた複数の機器が連携し、単独では実現が難しい複合的で高度なシステムやサービスが着目されている。そこでは個々のデバイスやソフトウェアを自律したエージェントとモデル化し、複数エージェントの協調や調整によって高度なシステムなどを実現するマルチエージェントシステムの研究が注目されている。その応用例として、エレベータ群制御や複数ロボットの協調行動の研究がある。たとえば建設業では、労働人口の減少や高齢化に伴い、複数の建設ロボットの協調による省人化・自動化への応用が期待されている。本論文では、建設中の高層ビルにおいて、夜間に次の日の作業のための建設資材を作業箇所へ移動させるために、それらを水平輸送する自律輸送ロボット (autonomous vehicle, AV) と、垂直輸送を担うエレベータ群制御 (elevator group control system, EGCS) を合わせた 3 次元物資輸送システムを研究題材として、同種・異種エージェント間の協調による連続集配問題 (multi-agent pickup and delivery, MAPD) に着目している。

本論文では、同種・異種エージェント間の協調による MAPD 問題に対応するため、既存研究より一般的な環境で柔軟かつ効率的な輸送を実現する動的計画生成法を提案している。本論文における MAPD 研究の特徴は大きく 2 つある。第 1 に、予め輸送ロボット用にデザインされた自動倉庫のような理想的移動経路環境に限定しない点である。MAPD の多くの既存研究は自動倉庫を前提としており、輸送ロボットの移動経路や衝突回避の迂回路が多数存在し、さらに並行作業を可能とするためにロボット数より資材の積み込み・積み下ろし箇所が多い環境を想定している。一方、建設現場などでは、(1) 輸送のための専用の環境設計は非現実的であり、さらに、(2) 作業箇所には位置的な偏りがある、(3) 建設資材を積むことでロボットのサイズが一時的に変わる、(4) 壁の設置等によりレイアウトが頻繁に変化するなどの特徴があり、既存研究をそのまま利用できない。第 2 は、エレベータと AV のように異なる性質を持つ異種エージェントの連携を想定したことである。異種エージェント・システム間の連携は、エレベータ以外にも、AV の水平輸送と長距離輸送用トラックへの積み込みなど他にも存在するが、問題の複雑さから MAPD の既存研究では議論されていない。

第 1 章では、本研究の背景と課題、目的、本論文の構成をまとめている。

第 2 章では、関連研究を体系的にまとめ、本研究の位置付けを述べている。

第 3 章では、本論文で共通的に使われる EGCS や MAPD の抽象化モデルを提案・定式化している。具体的には、多様な大きさの荷物を持つエージェント（ここでは乗客や AV を想定）が、垂直輸送・水平輸送において、そのサイズの大小に係わらず空きリソースや経路幅の制約などを考慮した公平な輸送手法と、衝突回避などの競合解消問題の重要性を述べ、それを定式化している。

第 4 章では、垂直輸送のための EGCS における輸送リソース割当の公平性を実現する一手法を提案し、評価している。AV や人をエージェントとしてモデル化し、エレベータの各カゴやエージェント達が待機する各ホールを観測するカメラ情報からカゴ内の空き占有量やホールで待機中のエージェントや資材（荷物）のサイズなどを推定

し、それらの情報を利用したカゴ割当制御手法を提案している。これにより、人間であればエレベータ待ち時間の短縮と公平性の向上を、資材の搬送であれば効率的で公平な垂直輸送を実現できる。本章では、他階での状況が動的に変わる一般的な EGCS を想定し、人間の乗客輸送を中心に評価しているが、建設現場での垂直輸送用エレベータにも活用できることを述べている。

第 5 章では、AV のサイズと経路幅を考慮した効率的な経路計画問題を議論している。AV 自体のサイズは、運搬する資材の大きさにより変わりうる。また実際の環境では経路幅も一定ではなく、向きを変える場所にも広さに関する制約がある。このような不均一な環境を考慮するために、MAPD 問題を拡張した MAPD in non-uniform environment (N-MAPD) 問題を定式化した。一般に(N-)MAPD は NP 困難であることが知られているため、N-MAPD において環境制約を満たし、衝突のない準最適な計画を効率的に生成する経路・動作計画アルゴリズムを提案した。比較実験から既存手法より効率的なアルゴリズムであることを確認した。

第 6 章では、特定の箇所に移動先が集中したときに、衝突を避けながらも効率的な配送を実現するアルゴリズム standby-based deadlock avoidance (SBDA) を提案している。既存研究では、多数の目的地となり得る状況のみで AV エージェントの並行作業が実現できている。SBDA はグラフ理論の知見を活用し、複数の AV エージェントが同一目的地を持つ場合に、その近隣で待機できる箇所を発見し、それを利用したデッドロックと衝突回避を実現している。これによりタスク実行の並列性を向上し、既存研究より輸送効率を大幅に改善した。また、SBDA が MAPD 問題を必ず完了できることも理論的に証明している。

第 7 章では、第 6 章の結果を利用し、水平輸送を担う AV エージェント群の観点から、垂直輸送を担う EGCS を外部システムと捉え、同期を取りながら互いに不要な待ちを避け、統合する手法を提案している。MAPD の困難性から、複数の MAPD を統合したシステムは実社会には存在するものの、それを対象とする研究はこれまで取り組まれていない。まず、AV エージェントと外部システムとの同期を考慮できるように MAPD 問題を拡張し、MAPD with time synchronization (MAPD-TS) 問題として定式化した。そこに SBDA と、新たな MAPD-TS 向けの自律的なタスク選択アルゴリズムを提案・統合し、両システム内のエージェントの不要な待ち時間の削減と両システムの輸送効率向上を実現した。

第 8 章では、得られた結果・知見を総括し、本研究の今後の展望を述べている。

以上を要するに、本研究では、自動輸送のための専用デザインを想定しない一般的环境において、同種・異種エージェント群の協調による MAPD 問題に着目し、垂直輸送・水平輸送の観点から柔軟かつ効率的な動的計画生成法を実現した。本研究の成果は、3 次元物資輸送システムの他、多くの台数・種類のエージェントが協調して効率化を達成できる大規模な輸送システムや、より複雑なロジスティックシステムに活用できると考えられる。よって本論文は博士(工学)の学位にふさわしいものと認める。

2023年2月

審査員 主査 早稲田大学教授 博士（工学）早稲田大学 菅原俊治

早稲田大学教授 工学博士（東京大学） 上田和紀

早稲田大学教授 工学博士（慶應義塾大学） 中島達夫

北海道大学教授 博士（工学）京都大学 野田五十樹
