

早稲田大学大学院 基幹理工学研究科

# 博士論文概要

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

2022年10月

近年の通信技術や計算機の発展に伴い，機器単独の機能に留まらず，複数の機器が連携した複合的なシステムやサービスが現実的となりつつある．例えば **Internet of Things (IoT)** や，複数の IoT デバイスを用いたクラウド（エッジ）コンピューティングや人工知能などの技術や，それらの技術を活用したアプリケーションとしてスマートビルディングなどが広く研究・実用化されている．

それらの技術の発展と浸透に伴い，個々のデバイス（ロボット等）やソフトウェアをエージェントと見なして，単体では実現不可能なシステムやサービスを複数エージェントの協調・調整によって実現するマルチエージェントシステムの活用が注目されている．しかし単純にエージェント数を増やすだけでは，タスク割当の重複や冗長な行動，各エージェントの行動中に発生する競合等が原因で，かえって非効率にもなる．例えば複数台の自動運転（**autonomous vehicle, AV**）による集配では，衝突やデッドロックの回避が必須である．したがって，エージェント間の競合を回避しつつ（準）全体最適となる協調行動が必要不可欠である．

ロボット工学のためのマルチエージェントシステムの活用も長く研究されてきた．近年では，例えば農業や医療，建設業における労働人口の減少や高齢化に伴って，ロボットによる省人化・自動化の需要が拡大している．複数ロボットの協調による省人化・自動化の対象として，人や物の輸送アプリケーションが挙げられる．輸送は移動方向によって垂直輸送と水平輸送に大別できるが，拡張性や保守性などの利点から，いずれもマルチエージェントシステムが活用される．

垂直輸送には，エレベータ群管理システム（**elevator group control system, EGCS**）による乗客輸送の制御がある．EGCS はカゴ内で行き先階ボタンを押すことで発生するカゴ呼びと，エレベータホールで行き先方向ボタンを押すことで発生するホール呼びに基づいて乗客輸送を制御するため，輸送リソースの配分はカゴ割当問題として定式化される．しかし，EGCS はホールでの待機乗客数や個々の乗客の目的階，将来到着する乗客数など多くの不確定要素を扱う必要がある．

水平輸送には，複数 AV エージェントによる集配システムがある．これは集配タスクが同時に複数エージェントに割り当てられる **multi-agent pickup and delivery (MAPD)** 問題として定式化される．タスクを実行する AV エージェントは資材置き場に移動し，指定された資材を積み込み，それを指定された場所に配送して積み下ろす．その後，別のタスクが割り当てられ，輸送を繰り返す．

MAPD 問題の研究は数多くあるが，多くの従来研究は自動倉庫のように容易となるよう専用にデザイン可能なグリッド状の環境を想定する．そのため，例えば建設現場や災害現場のような迷路状でデザイン不可能な環境への適応に限界がある．MAPD の主要技術は，経路・動作計画・競合回避，デッドロック回避，タスク割当に大別できるが，そのような環境への適応には各技術に関する様々な課題を解決する必要がある．また，これらの複雑な環境では AV エージェントのほか，例えば輸送トラックやエレベータなどの異種エージェントとの協調も必要になる

が、多くの従来研究では外部システムと干渉しない閉じたシステムを前提とする。実世界の輸送アプリケーションは一般に孤立した閉じたシステムではないため、外部システムとの干渉を考慮する必要がある。しかし、例えば AV とエレベータを考えた場合、それらは移動の方向や自由度、設置できる数、衝突・デッドロックの有無など、特性が大きく異なるため、同種エージェント間と比較して異種エージェント間の協調は容易ではない。そのため、この問題の解決は学術的・産業的に期待される一方で、問題の複雑さから従来研究ではほとんど議論されない。

そこで本研究では、上記背景に基づき、「同種・異種エージェント間の協調による、より一般環境での柔軟かつ効率的な輸送のための動的計画生成法の考案」を研究目的とした。ここで、ビルの建設現場での物資輸送を想定した、複数 AV とエレベータ群を組み合わせた 3次元物資輸送システムを研究題材とした。建設現場は物資輸送のための専用デザインが不可能な環境であり、かつ AV による水平輸送のほか、垂直輸送を担う建設用エレベータも必要なため、異種エージェント間の協調も必要になる。そのため、これは本研究目的に適した研究題材と言える。

一方、エレベータ制御エージェント群の協調による垂直輸送と、複数 AV エージェントの協調による水平輸送には以下の課題(1)~(4)がある。(1) ホールにおけるエレベータ待ち時間の長大化は水平輸送のリソース活用を非効率にするため、待ち時間を短縮可能なエレベータ配車制御が必要である。また、3次元物資輸送システムではエレベータが垂直輸送した資材を他フロアでも水平輸送するため、例えば大型資材を持った AV エージェントだけが長待ちするなど、不公平な待ち時間は垂直輸送先フロアの水平輸送効率にも悪影響を与える。したがって、カゴの空き占有量やホールの待機状況などを考慮した、待ち時間の公平性向上も必要とされる。(2) AV や資材の形状・サイズ・向き、ノード(場所)の広さ、通路の幅や距離などの環境制約を考慮した、より一般的な MAPD の定式化が必要である。また、それらの環境制約を考慮すると探索空間と計算コストは非常に大きくなる。そのため実応用には、環境制約を満たす、衝突のない計画を効率的に生成可能な経路・動作計画アルゴリズムが必須である。(3) 迷路状の環境には、他エージェントの移動を妨げずに有限時間滞在可能なノードや迂回路が非常に少なく、迂回路の経路長も様々である。そのため、AV エージェントの移動の自由度が低く、グリッド状の環境と比べて一般的に衝突やデッドロックが発生しやすい。しかし、迷路状の環境でもタスク実行の並列性を向上し、輸送効率を向上可能なデッドロック回避手法が必須である。また、エレベータへの資材搬入出を考慮すると、複数 AV エージェントが同一目的地付近で一時的待機し、立て続けに搬入出する必要がある。(4) AV エージェントの動きとエレベータ制御エージェントの動きの同期を考慮した MAPD の定式化が必要である。また、AV エージェントのタスク実行完了が遅れてエレベータ制御エージェントの待ち時間が増加すると、対象フロアの水平輸送だけでなく、エレベータによる垂直輸送と、他フロアの水平輸送にも

連鎖的な遅延が生じる。したがって、両エージェントの不要な待ち時間を削減して、3次元物資輸送システム全体の輸送効率を向上可能なタスク選択手法が必須である。以上の(1)~(4)より、最初から垂直・水平輸送を統合した3次元物資輸送システムとして扱うのは複雑なため、問題の細分化が必要である。そのため、最終的な統合を見据えて、本研究では垂直輸送と水平輸送を各観点から議論した。

4章では、EGCSのカゴ割当に着目して課題(1)を解決した。個別にカゴやホールを監視する複数エージェントがカメラ等を用いてカゴの空き占有量やホールの待機状況を推定し、それらの情報をカゴ割当に活用するマルチエージェント制御手法を提案した。これにより、エレベータ待ち時間の短縮と公平性の向上を実現した。また、カメラ情報からの推定誤差が提案手法に与える影響も分析した。4章ではより不確実性の強い一般的なEGCSを考慮して、人間の乗客輸送を扱った。

5章では、MAPD問題の経路・動作計画・競合回避に着目して課題(2)を解決した。まずAVや資材、ノードのサイズ、通路幅などが不均一な環境を考慮してMAPD問題を拡張したMAPD in non-uniform environment (N-MAPD)問題を定式化した。その後、N-MAPD問題において、環境制約を満たす、衝突のない準最適な計画を効率的に生成可能な経路・動作計画アルゴリズムを提案することで、より一般環境での効率的な水平輸送を実現した。

6章では、MAPD問題のデッドロック回避に着目して課題(3)を解決した。迷路状の環境でも輸送効率を向上可能な、グラフ理論を活用したデッドロック回避手法を提案した。これによりタスク実行の並列性を向上し、複数AVエージェントによる同一目的地への立て続けの搬入出を実現した。提案手法は特定の条件のもとで完全性を保証できる。提案手法が従来手法の輸送効率を大幅に上回ることを示し、さらにアブレーション研究を通じて提案手法の特性を詳細に解析した。

最後に7章では、MAPD問題のタスク割当に着目して課題(4)を解決した。まず、EGCSなどを外部システムと見なし、AVエージェントと外部システムのエージェント(エレベータ制御エージェント)の相互作用のため、動きの同期を考慮してMAPDを拡張したMAPD with time synchronization (MAPD-TS)問題を定式化した。そしてMAPD-TSに基づく自律的なタスク選択アルゴリズムを提案し、両エージェントの不要な待ち時間の削減とシステム全体の輸送効率向上を実現した。

本研究では、専用にデザイン不可能な一般環境における同種・異種エージェント間の協調による輸送問題に主眼を置き、垂直輸送・水平輸送の各観点から柔軟かつ効率的な動的計画生成法を提案した。評価実験により、EGCS・MAPDそれぞれの提案手法が従来手法の性能を上回ることに加えて、各提案手法の特徴を実験的に解析して、ユーザの目的や対象アプリケーションの特性に適したパラメータを設定可能にする指標を示した。本研究成果は、3次元物資輸送システムの他、多くの台数・種類の同種・異種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の実現に活用できる。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 山内 智貴

印

(2023年 2月 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	<p>○<b>Tomoki Yamauchi</b>, Yuki Miyashita and Toshiharu Sugawara, "Efficient Path and Action Planning Method for Multi-Agent Pickup and Delivery Tasks under Environmental Constraints," SN Computer Science, Vol. 4, Issue 1, Article No. 83, pp. 1-20, Springer Nature, Jan. 2023, Springer link, DOI: 10.1007/s42979-022-01475-5</p> <p>藤谷 雪太, <b>山内 智貴</b>, 宮下 裕貴, 菅原 俊治, "一時的な優先度と退避を用いた効率的なマルチエージェント配送," 情報処理学会論文誌トランザクション:数理モデル化と応用 (TOM), 情報処理学会, Vol. 15, No. 4, pp. 11-22, Dec. 2022. IPSJ digital library</p> <p>○<b>山内 智貴</b>, 井手 理菜, 菅原 俊治. "カメラ情報を用いた公平かつ効率的なエレベータ配車制御手法の提案と推定誤差の影響," 電子情報通信学会論文誌 D, 電子情報通信学会, Vol. J103-D, No. 11, pp. 776-787, Nov. 2020. DOI: 10.14923/transinfj.2019SGP0006</p>
講演（査読付き国際会議）	<p>Yuki Miyashita, <b>Tomoki Yamauchi</b> and Toshiharu Sugawara, "Distributed Planning with Asynchronous Execution with Local Navigation for Multi-agent Pickup and Delivery Problem," Proceedings of the 22nd International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS 2023), IFAAMAS, London, UK, May 28-June 2, 2023. (accepted as a full paper), Digital Library（掲載決定）</p> <p>○<b>Tomoki Yamauchi</b>, Yuki Miyashita and Toshiharu Sugawara, "Task Selection Algorithm for Multi-Agent Pickup and Delivery with Time Synchronization," Proceedings of the 24th International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems (PRIMA 2022), Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI), Vol. 13753, pp. 458-474, Springer Nature, Valencia, Spain, Nov. 16-18, 2022. (accepted as a full paper). Springer link, DOI: 10.1007/978-3-031-21203-1_27</p> <p>Yukita Fujitani, <b>Tomoki Yamauchi</b>, Yuki Miyashita, and Toshiharu Sugawara, "Deadlock-Free Method for Multi-Agent Pickup and Delivery Problem Using Priority Inheritance with Temporary Priority," Proceedings of 26th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems (KES 2022), Procedia Computer Science, Vol. 207, pp. 1552-1561, Elsevier, Verona, Italy, Sep. 7-9, 2022. ScienceDirect, DOI: 10.1016/j.procs.2022.09.212</p> <p>Yuki Miyashita, <b>Tomoki Yamauchi</b> and Toshiharu Sugawara, "Distributed and Asynchronous Planning and Execution for Multi-agent Systems through Short-Sighted Conflict Resolution," Proceedings of 2022 IEEE 46th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC 2022), pp. 14-23, IEEE, (Torino, Italy to) Online, June 27- July 1, 2022. (accepted as a full paper), ISBN: 978-1-6654-8810-5, DOI: 10.1109/COMPSAC54236.2022.00012, IEEE Xplore</p> <p>○<b>Tomoki Yamauchi</b>, Yuki Miyashita and Toshiharu Sugawara, "Standby-Based Deadlock Avoidance Method for Multi-Agent Pickup and Delivery Tasks," Proceedings of the 21st International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS 2022), pp. 1427-1435, IFAAMAS, (Auckland, New Zealand to) Online, May 9-13, 2022. (accepted as a full paper), ISBN: 978-1-4503-9213-6, DOI: 10.5555/3535850.3536009</p> <p>○<b>Tomoki Yamauchi</b>, Yuki Miyashita and Toshiharu Sugawara, "Path and Action Planning in Non-Uniform Environments for Multi-Agent Pickup and Delivery Tasks," Multi-Agent Systems; Proceedings of the 18th European Conference on Multi-Agent Systems (EUMAS 2021); Revised and Selected Papers, LNAI Vol. 12802, pp. 37-54, Springer, Online Conference, June 28-29, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-82254-5_3</p>

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 山内 智貴

印

(2023年 2月 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演（査読付き国内会議）	<p>○<b>Tomoki Yamauchi</b>, Rina Ide and Toshiharu Sugawara. "Fair and Effective Elevator Car Dispatching Method in Elevator Group Control System using Cameras," Proceedings of the 23rd International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems (KES 2019), Procedia Computer Science, Vol. 159, pp. 455-464, Elsevier, Budapest, Hungary, Sep. 4-6, 2019. DOI: 10.1016/j.procs.2019.09.200</p> <p><b>山内智貴</b>, 菅原 俊治. "カメラを用いたエレベータ群管理システムにおける優先対象者モデルの提案と検証," エージェント合同シンポジウム予稿集 (JAWS2018), 日本ソフトウェア科学会, 電子情報通信学会, 人工知能学会, 情報処理学会共催, pp. 1-7, 広島, Sep. 13-15, 2018. (ロング発表)</p>
講演（査読なし国内会議・研究会）	<p>宮下 裕貴, <b>山内智貴</b>, 菅原 俊治, "マルチエージェント資材搬送問題における動作遅延に対応した自律分散アルゴリズムの提案," 人工知能と知識処理研究会, 信学技報, Vol. 122, No. 322, AI2022-46, pp. 74-79, 福岡, Dec. 21, 2022.</p> <p><b>山内智貴</b>, 宮下 裕貴, 菅原 俊治, "時間同期を伴うマルチエージェント搬送問題のための自律的なタスク選択アルゴリズムの提案," 2022 Summer Symposium on Multi Agent Systems for Harmonization (SMASH 2022 Summer) 日本ソフトウェア科学会/知能システム研究会 (情報処理学会), Vol. 122, No. 186, pp. 42-47, Sep. 15-16, 2022.</p> <p>藤谷 雪太, <b>山内智貴</b>, 宮下 裕貴, 菅原 俊治, "暫時的な優先度を導入したPIBT手法の拡張," 第138回情報処理学会数理モデル化と問題解決研究会, Vol. 2022-MPS-138, No. 14, pp. 1-6, 琉球大学50周年記念館, June 27-29, 2022.</p> <p><b>山内智貴</b>, 宮下 裕貴, 菅原 俊治, "マルチエージェント搬送問題のためのグラフ理論を活用したデッドロック回避手法の提案," 2022 Winter Symposium on Multi Agent Systems for Harmonization (SMASH 2022 Winter) 日本ソフトウェア科学会/知能システム研究会 (情報処理学会), Vol. 2022-ICS-205, No. 4, pp. 1-7, 金沢, Feb. 21, 2022.</p> <p><b>山内智貴</b>, 宮下 裕貴, 菅原 俊治, "不均一環境におけるマルチエージェント搬送問題のための効率的な経路・動作計画アルゴリズムの提案," 2021 Summer Symposium on Multi Agent Systems for Harmonization (SMASH 2021 Summer) 日本ソフトウェア科学会/知能システム研究会 (情報処理学会), Vol. 2021-ICS-204, No. 2, pp. 1-8, online, Sep. 15-16, 2021.</p> <p>藤谷 雪北, <b>山内智貴</b>, 宮下 裕貴, 菅原 俊治, "マルチエージェント搬送のための環境制約を緩めたPIBT手法の拡張," 2021 Summer Symposium on Multi Agent Systems for Harmonization (SMASH 2021 Summer) 日本ソフトウェア科学会/知能システム研究会 (情報処理学会), Vol. 2021-ICS-204, No. 5, pp. 1-8, online, Sep. 15-16, 2021.</p> <p><b>山内智貴</b>, 宮下 裕貴, 菅原 俊治, "マルチエージェント搬送問題におけるエージェントの状態を考慮した動作計画と競合回避アルゴリズムの提案," 人工知能学会全国大会2020, 第34回人工知能学会全国大会予稿集, Vol. 34, pp. 1-4, online, June 9-12, 2020. DOI: 10.11517/pjsai.JSAI2020.0_2M1GS703</p> <p><b>山内智貴</b>, 宮下 裕貴, 菅原 俊治, "マルチエージェント搬送問題におけるエージェントの状態を考慮した動作計画," 人工知能と知識処理研究会, 信学技報, Vol. 119, No. 317, AI2019-33, pp. 19-24, 福岡市, Nov. 28, 2019.</p>

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 山内 智貴

印

(2023年 2月 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
その他（講演・査読なし国内会議・研究会）	<p><b>山内智貴</b>, 井手 理菜, 菅原 俊治. "カメラを用いたエレベータ群管理システムにおける一般乗客と優先対象者の待ち時間公平化," 人工知能学会全国大会2019, 第33回人工知能学会全国大会予稿集, Vol. 33, pp. 1-4, 新潟市, June 4-7, 2019. DOI: 10.11517/pjsai.JSAI2019.0_4N3J702</p> <p>井手 理菜, <b>山内智貴</b>, 菅原 俊治, "エレベータ群管理システムにおける人数推定を用いた呼び割当手法とスケジューリング手法," エージェント合同シンポジウム 予稿集 (JAWS 2017), 日本ソフトウェア科学会, 電子情報通信学会, 人工知能学会, 情報処理学会共催, pp. 1-2, 安房小湊, Sep. 15-17, 2017.</p> <p><b>山内智貴</b>, 中川 慧, 南 賢太郎, 今城 健太郎, "株価予測のためのMultiple-World Trader-Company法の提案とレジーム変化に対するロバスト性の評価," 人工知能学会全国大会2022, 第36回人工知能学会全国大会予稿集, Vol. 36, pp. 1-4, 京都市, June 14-17, 2022. DOI: 10.11517/pjsai.JSAI2022.0_2J4GS1001</p>
その他（受賞）	<p><b>山内智貴</b>, 中川 慧, 南 賢太郎, 今城 健太郎, "株価予測のためのMultiple-World Trader-Company法の提案とレジーム変化に対するロバスト性の評価," 人工知能学会全国大会2022, 第36回人工知能学会全国大会予稿集, Vol. 36, pp. 1-4, 京都市, June 14-17, 2022. DOI: 10.11517/pjsai.JSAI2022.0_2J4GS1001. 2022年度全国大会学生奨励賞</p> <p><b>山内智貴</b>, 宮下 裕貴, 菅原 俊治, "マルチエージェント搬送問題のためのグラフ理論を活用したデッドロック回避手法の提案," 2022 Winter Symposium on Multi Agent Systems for Harmonization (SMASH 2022 Winter) 日本ソフトウェア科学会/知能システム研究会 (情報処理学会), Vol. 2022-ICS-205, No. 4, pp. 1-7, 金沢, Feb. 21, 2022. SMASH2022優秀賞, SMASH2022奨励賞</p> <p><b>山内智貴</b>, 宮下 裕貴, 菅原 俊治, "不均一環境におけるマルチエージェント搬送問題のための 効率的な経路・動作計画アルゴリズムの提案," 2021 Summer Symposium on Multi Agent Systems for Harmonization (SMASH 2021 Summer) 日本ソフトウェア科学会/知能システム研究会 (情報処理学会), Vol. 2021-ICS-204, No. 2, pp. 1-8, online, Sep. 15-16, 2021. SMASH2021最優秀賞, SMASH2021奨励賞</p> <p><b>山内智貴</b>, 井手 理菜, 菅原 俊治. "カメラ情報を用いた公平かつ効率的なエレベータ配車制御手法の提案と推定誤差の影響," 電子情報通信学会論文誌 D, 電子情報通信学会, Vol. J103-D, No. 11, pp. 776-787, Nov. 2020. DOI: 10.14923/transinfj.2019SGP0006. 電子情報通信学会2021年度論文賞</p>