

## 複数エージェントの集配タスク計画における地図と交通状況に基づく 経路探索と制御手法の活用を検討

### A Study of Employing Pathfinding and Control Methods Based on Map and Traffic Situations in Multiagent Pickup and Delivery Task Planning

松井 俊浩<sup>†</sup>

Toshihiro Matsui

#### 1 はじめに

倉庫内の自動搬送ロボットの配送タスク計画などを動機づけとする複数エージェント集配問題が研究されている。その解法はエージェントへのタスク割り当てと、複数エージェントが衝突しない経路の計画に基づく。経路の決定のために、複数エージェント経路探索手法が適用される。しかし、地図の規模や特性と交通状況によっては、それらを集約した情報に基づき、他の経路割り当てや制御手法を活用できる可能性があると考えられる。そこで、経路探索手法と制御手法について、異なる状況における有効性の分析と、地図や交通の情報の効果的な活用を目指し、基礎的な MAPD の解法に、経路の制限と交通状況の要約を用いて移動先の優先度を変更する手法の効果について検討する。

#### 2 準備

##### 2.1 継続的複数エージェント集配 (MAPD) 問題

複数エージェント経路探索 (MAPF) 問題は、時空間を表すグラフ上で複数のエージェントが衝突せずに目的地に到達する、それぞれの経路を求める問題である。衝突は、エージェントがグラフの同一頂点に同時に位置すること、同一の辺を 2 体のエージェントが同時に逆向きに移動する状況である。解法として、A\*アルゴリズムによる時空間上の探索、衝突を解消するための木探索、進路を妨害するエージェントを押し出す操作に基づく手法が提案されている。継続的 MAPF 問題は、MAPF 問題の基本的な拡張であり、各エージェントは現在の経路の終端に到達後に、次の終端に移動することを繰り返す、それらの経路を継続的に求めることが目的である。

継続的複数エージェント集配 (MAPD) 問題 [1] は、継続的 MAPF 問題の一つであり、倉庫内で随時に発生する集配タスクを複数のエージェントに割り当て、それらの経路を求めることが目的である。問題は、倉庫の地図を表すグラフ、エージェントの集合、各時刻までに発生したタスクの集合から成る。各タスクは集配位置の情報を持つ。タスクを割り当てられたエージェントは現在地から集荷地点を経由し配達地点に移動する。解法は、各エージェントへのタスク割り当てと、それらに基づく MAPF 問題の経路探索から構成される。解法により、解くことができる問題の条件が異なる。well-formed MAPD 問題 [1] では、エージェントの経路の両端および集荷位置となりうる頂点である endpoint に関する条件を考慮する。基礎的な解法 TP [1] では、この条件を満足する状況において、貪欲的にタスクを割り当て、A\*アルゴリズムによる時空間上の探索により経路を求める。しかし、タスクの並行の程度が低く、改善が検討されている。本研究では、異なる種類の基礎的な解法である

PIBT [2] に注目する。

##### 2.2 解法 PIBT

PIBT [2] は従来研究の push と rotate と呼ばれる操作に、エージェントの優先度と限定的なバックトラッキングを導入した比較的簡潔な手法であり、各時刻に、各エージェントは次の時刻の移動先を決定する。各エージェントは自身に与えられている最初の目的地を目指す。優先度が高いエージェントは、自身の進路の妨げになる他のエージェントを押し出す (push)。Push されようとしているエージェントは自身の近傍の頂点のいずれかを選択して移動を試みる。その進路が他のエージェントに妨げられていれば、妨げているエージェントを push しようとする。これらにより、妨げとなっていたエージェントがすべて移動できればそれらの行動を決定する。最初に push したエージェントの現在の位置に push されたエージェントが移動する可能性がある。

いずれかのエージェントを push できない場合は、バックトラックし、他のエージェントを push しようとする。移動を試みたエージェントは、移動できない場合は現在の位置に留まる。各頂点からその頂点への閉路があり、それにより 3 つ以上のエージェントの位置を入れ替えられる場合は、PIBT により解が得られる。袋小路などがある状況を解決できない欠点がある一方で、条件を満足すれば、全ての頂点にエージェントがいる過密な状況でも解が得られる。

##### 2.3 課題

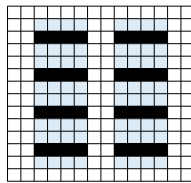
MAPF/MAPD 問題の解法では時空間上での経路探索にもとづく解法が用いられる機会が比較的多い。その一方で、最適な解法は計算コストが高く、貪欲的に実行でき、解がある条件を満足する問題と解法では、地図のスペースの冗長性や、エージェントの密度の制限、タスクの並行の程度が低いことなどが課題となる。また、これらは、エージェント毎の経路計画を行うため、地図や交通状況などの大域的な情報を十分に利用していない可能性があると考えられる。その一方で、push や rotate によりエージェントが毎回次の位置を決定する手法には、系全体の冗長な行動が含まれる可能性がある。これらの状況を分析し、大域的な経路の制御/設計や交通の状況に応じた制御の影響を検討する機会があると考えられる。

#### 3 地図と交通状況による経路の制御の検討

##### 3.1 経路の制限

地図の設計からの基本的な検討として、経路の制限によるエージェントの行動の統制を試みる。一方通行路を意図して、各頂点から移動できる近傍を制限する。これにより、エージェントの目的地への最短経路と、push 操作の際のエージェントの可能な移動先を制御する。地図

<sup>†</sup> Nagoya Institute of Technology



Case (a)



Case (b) and (c)

白: 通路, 黒: 障害物 (柵), 淡色: 集配地点 (通路)

図 1 環境

上の空間を比較的利用できる場合の適用として、対面通行を意図した移動先の制限を加える。対向する 2 つのレーンを想定し、各レーンは逆走できないが、他のレーンに移動して U ターンできるように設計する。各通路の幅が 1 セル/頂点のより制限された地図を表現する場合には、PIBT が必要とする閉路の条件を維持するために、一方通行路の導入の自由さが制限される。そこで、要所に一方通行路を意図した移動先の制限を導入して、エージェントの行動が整理される機会を得ることを試みる。一方通行路の設定においては、各セル/頂点からいずれの可能な隣接セル/頂点に移動しても、もとの頂点に到達する経路が途絶えないようにする必要がある。

### 3.2 経路の占有状況による移動先の選択の変更

交通状況を考慮するために、通路を交差点で分割し、各通路のエージェントの状況を考慮する。基本的な状況を検討するために、各通路の幅が 1 セル/頂点の地図を対象とする。各通路について、その通路を通過する途中のエージェントがあるとき、その優先順位が最も高いエージェントの進行方向の情報を保持する。これは、そのエージェントを起点として push が開始されるとき、そのエージェントが支配的であることを考慮する。各エージェントが次の時刻の移動先を選択するとき、別の通路に進入する場合は、その通路に自身と対向する向きに通過する途中の優先度が高いエージェントがいるか判定する。その場合には、その経路に移動する優先度を下げたためにその近傍への移動コストを若干高く評価する。これにより、迂回する経路の頂点がある場合は、そちらに移動することを促す。

## 4 評価

提案手法を実験により評価した。ランダムな集配位置の計 500 タスクを毎時刻ステップに、10 タスクずつ生成した。エージェントに最寄の集荷位置のタスクを割り当てた。全タスクの配達が終わるまでの時間である makespan (MS) と、各タスクの配達が終わるまでの時間であるサービス時間 (ST) を評価した。各設定について 10 インスタンスの結果を平均した。

図 1 の case (a) と (b) において経路を制限した場合の

表 1 Makespan (MS) とサービス時間 (ST)

Time	MS	ST	MS	ST	MS	ST	MS	ST	MS	ST	MS	ST		
Case (a)														
#Agent	10		20		30		40		50		60		150	
No dir.	630.5	277.9	368.8	152.9	289.1	114.0	245.5	94.6	226.1	84.3	219.1	80.4	293.4	115.9
Inv. dir.	614.7	269.0	336.6	135.7	247.4	93.6	206.4	75.4	193.4	67.6	185.7	64.4	193.6	67.0
Case (b)														
#Agent	10		20		30		40		50		60		67	
No dir.	747.8	339.9	556.4	247.0	516.6	223.7	558.9	246.8	623	274.7	744.8	333.2	1005.5	455.5
One dir.	739	336.6	518.8	224.8	464.1	198.4	477.5	206.4	531.1	230.2	643.4	282.7	893.4	393.5
Case (c)														
#Agent	10		20		30		40		50		60		67	
No info.	747.8	339.9	556.4	247.0	516.6	223.7	558.9	246.8	623	274.7	744.8	333.2	1005.5	455.5
Section	741.7	337.8	559.5	244.8	525	228.3	553.1	242.9	608.9	271.9	732.6	332.6	994.3	448.8

結果を、表 1 の case(a) と (b) に示す。Case (a) では、対面通行を意図して制限した場合の方が、移動の自由度が低いながらも平均的には評価値が改善した。push に伴う冗長な移動が制限される機会があったと考えられる。また、case (b) では、要所と考えられる中央の縦の通路について、上方向への移動を制限した場合に、平均的に評価値が改善した。

図 1 の case (c) に示す通路を交差点で分解し、各通路の交通状況によりエージェントの交差点での移動先の優先度を変更した場合の影響を、表 1 の case (c) に示す。情報の要約と活用が限定的であるため、必ずしも効果的ではないが、状況により平均的に評価値が若干改善する機会があった。その一方で、適用の方法により結果が悪化する場合もあり、さらに詳細な解析が必要である。

## 5 おわりに

経路探索手法と制御手法について、異なる状況における有効性の分析と、地図や交通の情報の効果的な活用を目指し、基礎的な MAPD の解法に、経路の制限と交通状況の要約を用いて移動先の優先度を変更する手法の効果について検討した。特に地図上の移動方向の制限により基礎的な解法の持つ冗長性を削減する効果が得られる場合がある一方で、動的な情報の集約に基づく制御についての効果を明らかにするためにさらに検討が必要である。より経路探索に依存する手法における影響や統合の手法が今後の課題である。

謝辞

本研究の一部は中部科学技術センター第 33 回人工知能研究助成による。

参考文献

- [1] H. Ma, J. Li, T. S. Kumar, and S. Koenig. Lifelong Multi-Agent Path Finding for Online Pickup and Delivery Tasks. In *Proceedings of the 16th Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems*, pages 837–845, 2017.
- [2] K. Okumura, M. Machida, X. Défago, and Y. Tamura. Priority Inheritance with Backtracking for Iterative Multi-Agent Path Finding. *Artif. Intell.*, 310, 2022.