

ブローカを伴う低 QoS の出版-購読型通信を用いる確率的分散制約最適化手法の検討 A Study of Stochastic Distributed Constraint Optimization Methods on Low QoS Pub/Sub Communication with Brokers

松井 俊浩†

Toshihiro Matsui

1 はじめに

分散制約最適化問題とその解法は、複数エージェントシステム上の協調問題解決の基礎的な枠組みとして研究されている。分散資源割り当て、分散スケジューリングなどを、系に分散して配置された制約最適化問題として記述し、非集中型の最適化手法により解決する。分散センサ網、ミーティングスケジューリング、電力スマートグリッドなどに内包される協調問題への応用が検討されている [1]。出版-購読型の通信モデルは、ROS2 の DDS や、MQTT など、ロボット用プラットフォームや、IoT 機器などのエッジ機器のための通信基盤として広く用いられている。これらの通信基盤上のエッジ機器間の協調に、分散制約最適化手法を適用するためには、通信基盤と固有の解法の実装方法の検討と実証が必要である。実際的には、メッセージ損失を許容する低品質の通信設定の下で、実時間性を優先する解法が必要になると考えられる。従来研究では、このような前提の下で、基礎的な解法の拡張と実装が模索され、ROS2/DDS 環境における実装と検証が行われている [4, 5, 6]。

これらの検討では、発行者と購読者からなる通信モデルを用いているが、MQTT などのようにブローカが存在する場合についての構成方法の検討も必要と考えられる。そこで、従来研究で用いられた、分散制約最適化問題の局所探索手法を、ベストエフォート設定の出版-購読型の通信基盤上で用いる手法の拡充として、ブローカを伴う構成における実装方法を検討する。

2 背景

2.1 分散制約最適化問題

基礎的な分散制約最適化問題は、

- エージェントの集合 A ,
- 変数の集合 X ,
- 変数の地域集合 D ,
- 目的関数の集合 F

により定義される [1]。変数 x_i は値域 $D_i \in D$ の値を取る。制約条件は目的関数の一部として表現される。基礎的な問題では、エージェント $a_i \in A$ は自身の状態を表す単一の変数 $x_i \in X$ を持ち、その値を決定する。目的関数は二項関数 $f_{i,j} : D_i \times D_j \rightarrow \mathbb{N}_0$ とし、変数 x_i と x_j に関する評価値が定義される。これらにより、エージェントの意思決定における変数の関係を記述する。ここでは効用関数の最大化問題を対象とし、エージェント間のメッセージ通信を伴う分散最適化アルゴリズムにより、系全体の効用値の合計を最大化する、全ての変数値についての (準) 最適解を得ることを目的とする。エージェントが単一の変数を持ち、二項関数のみからなる基礎的

な問題を、複数変数と、単項/多項関数をから成る問題に一般化できる。

多くの解法は、逐次型の最適化手法を基礎とする分散アルゴリズムであり、最適解を得る完全解法と、準最適解や近似解を得る準最適解を得る不完全解法に分類される。制約密度が高い大規模な問題では、一般には最適解を求めることは困難であるため、不完全な解法が用いられる。また、代表的な完全解法は、変数間の関係を反映する木構造に基づく木探索や動的計画法などの比較的複雑な処理からなるため、応用システムの実装を模索する初期の検討では、簡素であるがプログラミングが比較的容易な局所探索型の不完全解法が用いられる [7, 2]。従来研究では、最も簡単な局所探索型解法である MGM について、出版-購読型通信基盤上の実装方法を検討している [4, 5]。

2.2 MGM

MGM [3] は、分散制約最適化問題の最も基礎的な解法であり、各エージェントが近傍のエージェントと情報交換し、決定論的な山登り法に基づき局所探索を実行する。各エージェントは、近傍エージェントの変数値からなる部分解を保持するビューを持ち、受信したメッセージにより更新する。この情報と自身の変数値に基づき、各エージェントは、以下の処理を反復する。

1. 初期状態ではビューは空であり、自変数値の初期値を決定する。
2. 現在の自変数値を、近傍エージェントに同報する。近傍エージェントの現在の自変数値を受信し、ビューを更新する。
3. 現在のビューに含まれる近傍エージェントの変数値と自変数からなる部分解の下で、部分解の効用を局所的に最大化する自変数値を探索する。そのときの、効用の増加分を求め、近傍エージェントに同報する。
4. 近傍エージェントから受信した効用の増加分と、自身が効用を最大化した場合の増加分を比較する。自身が最大化した場合の効用の増加分が、全ての近傍エージェントの増加分よりも大きければ、対応する自変数値を選択する。
5. 上記 2 の手順から解法を反復する。

各段階の処理はエージェント間で同期して進行する。

この解法は極めて簡素であるが、応用を模索する初期の段階では、基礎的な解法としてしばしば用いられる [7, 2]。

2.3 出版-購読型通信モデルと低 QoS 通信における実時間処理

出版-購読モデルの通信は、ロボット用プラットフォーム ROS2 の DDS や、IoT 機器にも利用される MQTT な

† Nagoya Institute of Technology

ど、エッジ機器との通信基盤として、普及している。基礎的な出版-購読型通信モデルは、出版者と購読者から構成される同報型の通信である。出版者はメッセージを同報し、購読者は自身に関連する特定のメッセージを受信する。ここでは、メッセージに付与されたトピックにより受信の要否を判定する仕組みを用いる。

これらの出版-購読型通信モデルの通信基盤を用いるエッジ機器間の協調に、分散制約最適化手法を活用するためには、通信基盤に応じた解法の実装方法の検討と検証が必要である。また、移動ロボットなど、一次的な通信の遮蔽が起こりうる環境や、実時間性が優先される環境では、メッセージの損失を許容し、低 QoS、ベストエフォート設定の通信が用いられる場合がある。このような状況においては、一部のエージェントが一時的に欠落した状況においても、その影響を抑制しつつ、解法を進行させることが必要になる。このような前提の下で、従来研究では、基礎的な解法についてメッセージ損失を許容する拡張と出版-購読型通信基盤における実装方法が模索され、ROS2/DDS 環境における実装と検証が行われている [4, 5, 6]。従来研究では、規定の ROS2/DDS 環境を対象とし、メッセージは出版者から同報され、出版者と購読者の間に介在する明示的なブローカは考慮されていない。

2.4 一部のエージェントの一時的な欠落を許容する解法

従来研究では、一部のエージェントからの通信が欠落した場合に、そのエージェントを無視し解法を強行する仕組みを基本的として、解法の拡張と実装が模索されている。エージェントの通信が回復した場合は、可能であれば協調に復帰する。

不在のエージェントの影響は、情報の欠落による最適化の結果の劣化と、系の意思決定の不整合の発生である。特に、後者は意思決定の結果の解品質の劣化に直接的に影響する。この影響の発現箇所は解法により、個別の対処が必要である。従来研究では、解法 MGM において、協調から欠落したエージェントの選択しうる変数値を推定する戦略により、解品質が改善する例が示されている [4, 5]。また、各エージェントが大域的な完全解を維持する解法について、解の決定の段階での不整合を緩和するために、情報の伝達に冗長性を加える拡張が検討されている [6]。

2.5 解法の検討、実装、評価

特定の通信基盤における実装と、メッセージ損失へ対処を伴う解法の構築においては、シミュレーションの段階において、1) メッセージ損失により、エージェントが一時的に脱落する状況に対処する拡張された解法の検討、2) 想定される出版-購読モデルを模倣する環境上での、実装モデルの検証を進め、次に 3) 実際の通信基盤を伴う系のフレームワーク上に移植する手順が確実な作業の運びのために必要となる。

また、より応用的な系における実装に先立ち、4) シミュレーションと同様の解法の評価を、実装した解法を用いて行う実験環境の整備も必要になる。従来研究 [5, 6] では、ROS2 ノードとして動作するエージェント群を用いて、基本的なベンチマーク問題による評価を

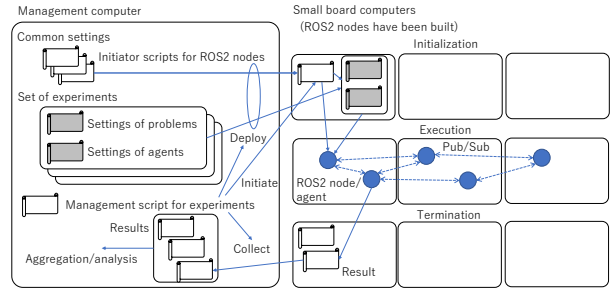


図 1 ROS2 ノードの実験環境 [5]

行う実験環境が試作されている (図 1)。ここでは、実験の設定の配布、実験の実行、結果の回収の手順を自動化し、各エージェントから得られた実験結果を集計して、大域的な結果を求め、その anytime 曲線を再構成する。

3 ブローカを伴う通信基盤における検討

3.1 情報の集約点とオーバーレイ通信

MQTT などの出版-購読型通信基盤は、出版者と購読者間の通信にブローカが介在する。このような構成の場合には、各出版社は特定のブローカ経由で情報を発信し、購読者は必要な情報を配信するブローカに接続して情報を受信する。

分散制約最適化問題と解法の観点からは、潜在的な情報の集約点と、情報の伝搬に介在する中継点を經由した通信に伴う、プライバシーや情報伝達効率を考慮する余地が生じると考えられる。エージェント間の関連性や、オーバーレイ通信網を考慮した解法などの関連研究を考慮する余地があると考えられる。また、低 QoS 設定や、一時的なエージェントの欠落に対応した解法も重要であると考えられる。本検討では、出版-購読型通信基盤上で、一次的なメッセージ損失を許容する実時間的解法に関する検討を、ブローカが介在する通信系に適用することを基礎として、将来的に上記の課題を含む検討を展開することを構想する。

3.2 複数ブローカを含む系とエージェントの構成

簡単な系では単一のブローカに複数のクライアントが接続し、特定のトピックの情報を出版、購読するが、情報の集約、中継点が、ボトルネック、単一故障点、プライバシー上の懸念となりうる観点から、複数のブローカが存在する一般的な系を想定して検討を進める。実装の基盤として MQTT を用いる。

MQTT フレームワークの Mosquitto などでは、単一クライアントは単一ブローカに接続する実装上の制限がある。各エージェントは複数クライアントを並行させ、複数ブローカと通信する。基礎的な検討として、各エージェントは自身の情報を単一のブローカに発行し、他のエージェントからの情報の購読は、該当する情報を中継するブローカから得る構成とする。トピックをエージェントの識別名とし、処理の段階に応じたメッセージを受受する。メッセージは、トピックに加え、解法の反復回数、各反復の処理の段階、段階に応じた変数値や効用の増加量などの解法のメッセージの情報をペイロードに含む。

従来研究と同様に、解法におけるエージェントの処理は、出版、購読、処理のコールバック関数により構成されるものとした。これにより、取り合いの調整により、従来研究の実装の大半を移植可能とした。購読は MQTT フレームワークの複数クライアントについて並行される、複数スレッド対応の主ループ処理が呼び出すコールバックそれぞれから実行され、ブローカからエージェントが受信した、近傍エージェントの情報のビューを更新する。

エージェントが実行する解法本体の主ループから、出版と解法の処理のコールバックを呼び出す。出版では、エージェントの現状に応じたメッセージをブローカに送信する。解法の処理では、エージェントのビューに応じて、エージェント間でバリア同期しつつ、解法の各段階が進行し、次の反復に進む。解法的主ループ内での、出版と発行の反復の間隔の比率を調整し、メッセージ再送の機会を得る。

一部のエージェントからのメッセージが一定回数欠落した場合は、そのエージェントは一時的に信頼できないものとして、協調から除外して解法の段階を進める。無視されたエージェントから通信があった場合には、可能であれば、反復と処理の段階を同期して協調に復帰させる。解法 MGM の拡張において、一時的に無視されたエージェントが取りうる変数値については、従来研究と同様の戦略に基づき推定、補完して解法を継続する。

4 評価

小型ボード計算機からなる解法の実験環境 (SBC) として、Raspberry PI 5, Ubuntu 24.04 LTS, Mosquitto, g++ の計算機 5 台を用いて、提案手法を実装し、実験により評価した。各 SBC は同一の無線アクセスポイントに接続した。

従来研究と同様の実験環境を用いて、設定の配布、実験の実行、結果の回収をし、複数エージェントの結果を結合して大域的な状況と結果を再構成した。結果の時刻同期を推定するために、各 SBC の同期された時刻とクロックの値を参照した。

単一ブローカがある SBC で実行する場合と、各 SBC に単一のブローカを実行する 5 ブローカの場合について実験した。

ベンチマーク問題は n エージェント/変数、変数の領域のサイズ 10, (ソフト) 制約数 c とした。制約に対応する 2 項関数は、一様分布乱数に基づく $[1, 100]$ の整数の効用値とした。MGM の拡張は従来研究と同様とした。出版と処理の間隔の比を、それぞれ 20, 100 ms とした。購読のタイミングにおいて、2 回以上メッセージが損失したエージェントを、無視することとした。

5 エージェントを超える場合は、各 SBC に同数のエージェントを配置した。各 SBC にブローカを配置する場合は、各エージェントは自身の SBC のブローカに対して出版するものとした。

解法のカットオフ時間を 30 秒とした。各問題設定の例題 5 問に対して、初期値を変えた解法を 5 回適用し、それらの結果を平均した。

解法 MGM の拡張において、一時的に無視されたエージェントが取りうる変数値を推定する戦略として、本実験のベンチマーク問題で比較的有效だった、最良値を用

表 1 解品質と無視された近傍エージェント数

#broker	n, c	alg	Utility	Avg. Ignr. Nbr.
1	5, 10	ignr-ub	799.5	0.11
		rcv-ub	801.3	0.16
	10, 25	ignr-ub	1925.4	0.26
		rcv-ub	1927.6	0.15
5	5, 10	ignr-ub	798.0	0.34
		rcv-ub	817.4	0.13
	10, 25	ignr-ub	1815.2	1.81
		rcv-ub	1918.2	0.43

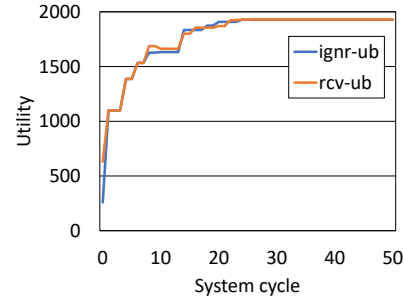


図 2 効用の例 ((n, c)=(10, 25), 1 broker)

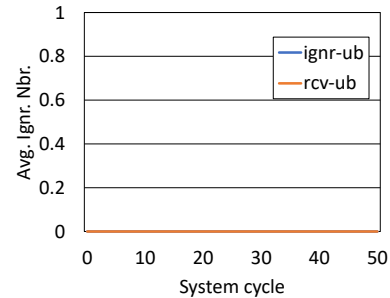


図 3 無視された近傍エージェント数の例 ((n, c)=(10, 25), 1 broker)

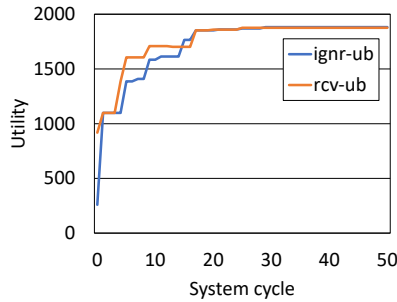
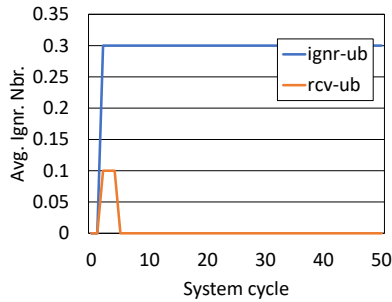
いる楽観的な戦略 (ub) を用いた。

無視されたエージェントを通信回復後に協調に復帰させるか、無視し続けるかの各場合 (rcv, ignr) を評価した。

各エージェントは起動後のタイミングが同一ではないため、解法の反復回数が異なる場合に再同期の機会を得る規則を設けた。

表 1 に、解品質と、各エージェントが無視した近傍エージェント数の平均値を示す。外乱の影響がみられ、結果の差異がごく小さい場合があるが、効用値の最大化、無視された近傍エージェント数の削減のいずれにおいても、エージェントの復帰の機会がある場合の方が、平均的には良好な傾向が見られた。ブローカ数が多い方が、ignr-ub と rcv-ub の結果に開きがある。これはノード間をまたがる通信の方向が多様になり増加したことが影響した可能性が考えられる。

図 2 から 5 に、あるインスタンスにおける結果の推移を示す。これらの結果では、欠落したエージェント数が比較的抑制されており、MQTT の QoS 設定は 0 としたが通信品質が比較的良好であったと考えられる。図 4 と 5 に示されるように、各エージェントの起動のタイミングにずれが生じた時に、その回復に協調の復帰が機能する結果となった。これらの結果では ignr-ub がエージェント間の協調を回復していないケースがあるが、立ち上がりを除いて解品質は rcv-ub と同等であった。これは、エージェントの欠落が皆無か小規模であること、

図4 効用の例 ((n, c)=(10, 25), 5 brokers)図5 無視された近傍エージェント数の例 ((n, c)=(10, 25), 5 brokers)

局所探索であること、不在のエージェントを補う戦略 ub の効果によるところがあると考えられる。これらの結果は、小規模な環境と問題においては、比較的安定した挙動が得られたことを示唆していると考えられる。

5 おわりに

分散制約最適化手法の、出版-購読系通信基盤上への実装と応用を目標とし、低品質設定の環境に対応する解法を、ブローカを伴う出版-購読通信基盤に適用する段階として、局所探索手法 MGM に基づく解法を MQTT 環境に実装し、実験により評価した。基礎的な結果からは提案手法の比較的安定した結果が示された。

今後の検討として、従来研究で検討されている、進化的計算に基づく解法 AED の実装方法とその効果につい

ての同様の検証の機会がある。本検討では通信トポロジについては未検討だが、ブローカのトラフィック、プライバシーなどを合わせて考慮したエージェントの最適配置も、次の段階の主要な検討事項である。さらに主要な解法についての検討の拡充および応用を念頭においたフレームワーク化やシミュレーションから実装に至るプログラム変換の支援なども課題として挙げられる。

謝辞

本研究の一部は、公益財団法人 電気通信普及財団 2022 年度研究調査助成および、科研費 基盤研究 (B) 22H03647 による。

参考文献

- [1] F. Fioretto, E. Pontelli, and W. Yeoh. Distributed constraint optimization problems and applications: A survey. *JAIR*, 61:623–698, 2018.
- [2] F. Fioretto, W. Yeoh, and E. Pontelli. A multiagent system approach to scheduling devices in smart homes. In *Proceedings of the 16th Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems*, page 981–989, 2017.
- [3] R. T. Maheswaran, J. P. Pearce, and M. Tambe. Distributed algorithms for dcopt: A graphical-game-based approach. In *the International Conference on Parallel and Distributed Computing Systems*, pages 432–439, 2004.
- [4] T. Matsui. An Investigation of Distributed Constraint Optimization with Non-Responding Agents Toward Real-Time Solution Method on Practical Messaging Platforms. In *16th International Conference on Agents and Artificial Intelligence*, 2024.
- [5] T. Matsui. Implementation of real-time local search method for distributed constraint optimization with message loss in pub/sub communication. In *Proceedings of the 22nd International Conference on Practical applications of Agents and Multi-Agent Systems (demo)*, 2024.
- [6] T. Matsui. Investigation of anytime evolutionary dcopt algorithm on pub/sub communication platform with message losses. In *2025 17th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE)*, pages 308–313, 2025.
- [7] R. Zivan, R. Glinton, and K. Sycara. Distributed constraint optimization for large teams of mobile sensing agents. In *2009 IEEE/WIC/ACM International Joint Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology*, volume 2, pages 347–354, 2009.