

報道関係者各位

国立大学法人筑波大学

分散制約最適化問題における代表的なアルゴリズムの完全性への反例を発見

分散制約最適化問題における代表的なアルゴリズムである ADOPT とその後継のアルゴリズムについて、それらが持つとされていた停止性と最適性という重要な性質に、反例が存在することを発見しました。また、その原因となる箇所を修正し、これら2つの性質を保証した修正版 ADOPT を提案しました。

分散制約最適化問題 (Distributed Constraint Optimization Problem: DCOP) は、複数のエージェント (行動主体) が協調するマルチエージェントシステムをモデル化するフレームワークの一つです。これを解く代表的なアルゴリズムに ADOPT (Asynchronous Distributed OPTimization) があります。ADOPT は、アルゴリズムが有限時間で停止する「停止性」と停止時に必ず最適解が得られる「最適性」という2つの重要な性質を持つとされ、ADOPT に基づく後継のアルゴリズムにおいても、同様の性質が成り立つと考えられていました。

本研究では、ADOPT とそれに基づくアルゴリズムの停止性と最適性に対する反例を示しました。これは、ADOPT や後継のアルゴリズムに対して与えられた証明に誤りがあり、実際にはアルゴリズムが停止しない、または、停止時に最適解が得られない可能性が存在することを意味しています。また、ADOPT において反例が存在する原因を特定し、それを修正したアルゴリズム (修正版 ADOPT) を提案しました。さらに、修正版 ADOPT における停止性と最適性を証明しました。

修正版 ADOPT を用いることで、ADOPT や後継のアルゴリズムで発生する可能性があった不具合が防止され、これらを活用したシステムの信頼性の向上が期待されます。

研究代表者

筑波大学システム情報系

長谷部 浩二 准教授

野城 滉司 (理工情報生命学術院システム情報工学研究群博士前期課程1年)

研究の背景

分散制約最適化問題 (Distributed Constraint Optimization Problem: DCOP) はネットワーク内に存在する複数のエージェント (行動主体) が協調し、それぞれが持つ変数に対する最適な変数値を見つける問題です。この問題は、多数のセンサから構成されるセンサネットワークの制御など、複数のエージェントが協調するマルチエージェントシステムをモデル化するフレームワークの一つとして知られています。

DCOP を解く代表的なアルゴリズムとして、ADOPT (Asynchronous Distributed OPTimization) があります。これは、理論的に最適解を得ることが保証された完全なアルゴリズムとして知られており、さらに、解の精度を保証しながら近似解を得ることができる bounded-error approximation^{注1)} という拡張手法も与えられています。このような利点から、ADOPT の登場以降、それに基づく後継のアルゴリズムが多く提案されてきました。

完全なアルゴリズムには、アルゴリズムが有限時間で停止する「停止性」と停止時に必ず最適解を得る「最適性」という2つの性質が必要です。ADOPT を提案した論文では、ADOPT がそれらの性質を持つことが定理として主張されており、また、その主張に従って、ADOPT に基づく後継のアルゴリズムも同様の性質を持つと考えられていました。

研究内容と成果

本研究では、ADOPT とそれに基づくアルゴリズムの停止性と最適性に対して、反例が存在することを示しました。まず ADOPT に関して、アルゴリズムが停止しない、もしくは、停止時に得られた解が非最適解となるような具体的な DCOP とエージェントの処理の手順を提示しました (図 1)。これにより、ADOPT では、停止性と最適性に対する反例が、合わせて3種類存在することが明らかになりました。また、ADOPT を基にした8つの後継のアルゴリズムについても分析した結果、それぞれ少なくとも1種類の同様の問題が発生することが分かりました (表 1)。このことは、既存の研究で与えられた ADOPT の停止性と最適性の証明に誤りがあり、その問題が後継のアルゴリズムにも引き継がれていることを意味します。加えて、ADOPT の拡張手法である bounded-error approximation にも、最適性と同様の反例が存在することを示しました。

さらに、ADOPT に存在する反例の原因を特定し、それに対する修正を行った修正版 ADOPT を提案しました。この修正におけるアルゴリズムの変更点は、従来の ADOPT の探索手法には影響を与えないため、計算量を変化させずに修正を行うことができます。また、この修正版 ADOPT が停止性と最適性を持つことを証明しました。すなわち、本研究で提案した修正によって、ADOPT が持つべき2つの重要な性質が改めて保証されたこととなります。

今後の展開

本研究で提案した修正版 ADOPT を用いることで、ADOPT や後継のアルゴリズムで発生する可能性があった不具合を防止し、これらを応用したシステムの信頼性を向上させて安全に利用できるようになることが期待されます。また、これまで ADOPT における問題点が発見されなかった要因の一つとして、複数のエージェントが分散かつ非同期的に処理を行うことによる挙動の分析の難しさが挙げられることから、今後、与えられた DCOP アルゴリズムにおいて成り立つ性質を自動的に検証する手法の開発を進める予定です。

参考図

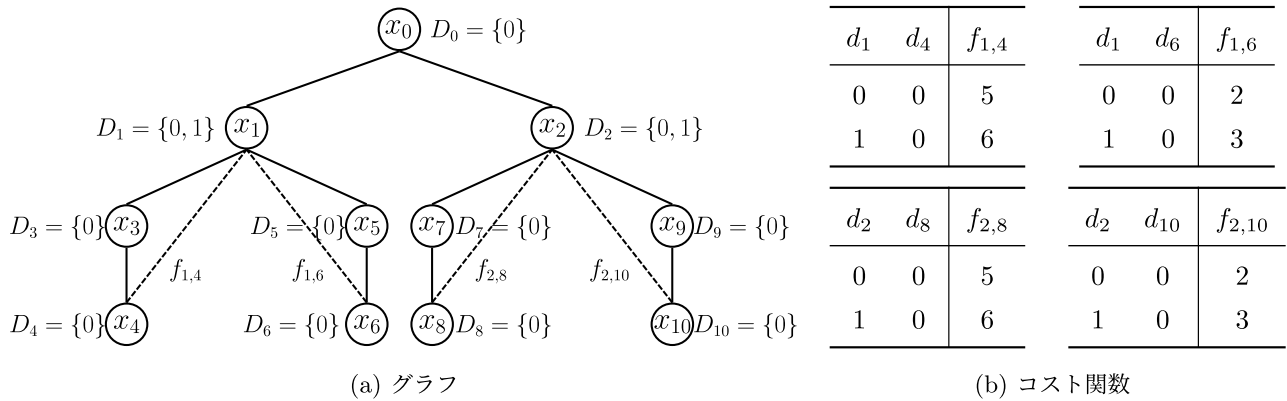


図1 ADOPT の停止性に対する反例が生じる DCOP

(a) ADOPT の停止性に対する反例は、それぞれ x_0, \dots, x_{10} のいずれかの変数を持つエージェントから成るグラフにおいて発生する。 D_i はエージェントが持つ変数の定義域を示し、 $f_{i,j}$ は2つの変数 x_i, x_j が関わるコスト関数^{注2)}を表す。(b) 一部のコスト関数における、変数値と関数値の対応を表す。これら以外のコスト関数（ラベルを持たない辺に対応する）は、常に関数値として0を取る定数関数である。

表1 ADOPT とそれに基づく8つのアルゴリズムに存在する反例

反例	ADOPT	N	+	IDB	BnB	BnB+	(k)	BD	ing(ATC)
(1)	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-
(2)	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-
(3)	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓

各アルゴリズムに存在する反例をチェックマークで示す。表中の記号とアルゴリズムは次のように対応する。N: ADOPT-N, +: ADOPT+, IDB: IDB-ADOPT, BnB: BnB-ADOPT, BnB+: BnB-ADOPT+, (k): ADOPT(k), BD: BD-ADOPT, ing(ATC): ADOPT の停止条件を用いた ADOPT-ing。また、反例は次の3種類に分類される。(1) 停止性に対する反例、(2) 初期化を原因とする最適性に対する反例、(3) TERMINATEメッセージを原因とする最適性に対する反例。

用語解説

注1) bounded-error approximation

厳密な最適解ではなく、近似解を求める ADOPT の拡張手法。事前にアルゴリズムに許容誤差を与え、アルゴリズムの実行で得られた近似解における目的関数値と最適解における目的関数値の差が、その許容誤差の範囲内に収まることが保証される。これを利用することで、解の精度を保証しながら、より短い実行時間で近似解を得ることができる。

注2) コスト関数

エージェントが持つ変数の上で定義される関数。DCOP では、コスト関数の総和が目的関数となる。

掲載論文

【題名】 Counterexamples and amendments to the termination and optimality of ADOPT-based algorithms

(ADOPT に基づくアルゴリズムの停止性と最適性に対する反例と修正)

【著者名】 Koji Noshiro and Koji Hasebe

【掲載誌】 *Artificial Intelligence*

【公開日】 2024 年 2 月 1 日

【DOI】 10.1016/j.artint.2024.104083

問い合わせ先

【研究に関すること】

長谷部 浩二 (はせべ こうじ)

筑波大学 システム情報系 准教授

URL: <https://mas.cs.tsukuba.ac.jp/>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp