

公平性を考慮した動的な分散資源配分のための協調問題解決手法の検討

松井 俊浩† 松尾 啓志†

†名古屋工業大学

1 はじめに

ネットワーク上の複数のノードに分散して存在する共有資源を、各ノードに適切に配分するような資源割り当て問題には、分散協調問題解決手法の応用が期待される。マルチエージェントシステムにおける基本的な問題である分散制約最適化問題 (DCOP) に共有資源の概念を導入した資源制約付き DCOP (RCDCOP) [1] が提案されている。DCOP では、マルチエージェントシステムの協調をエージェントに分散して配置された、組み合わせ最適化問題として表現する。そして、評価関数を結合した大域的な評価値を最適化する変数値の組み合わせを、エージェント間のメッセージ交換を伴う分散アルゴリズムを用いて探索する。RCDCOP では各エージェントは自身の変数の選択に関して、ある量の資源を要求する。利用可能な資源の総量は大域的制約により制限される。

従来の RCDCOP では、共有資源が複数のノードに分散して存在することを陽に扱わない。その一方で、複数のノードに存在する共有資源を適切に再配分する問題は、分散電源を含む電力スマートグリッドにおける資源の需要と供給などに類似する点で重要であると考えられる。また、従来の (RC)DCOP は、評価値の大域的な合計を最小化または最大化することが目的であり、個々のエージェントの評価値の公平性は考慮されていない。その一方で、資源の配分においては、各エージェントの要求に対する不均衡は減少されるべきである。そこで、本研究では、複数のノードに存在する共有資源を適切に再配分する問題を表す RCDCOP の部分クラスとその解法を示す。また、エージェント間の評価値の不均衡を軽減する手法を導入する。さらに、評価値が変化する問題列からなる動的 RCDCOP において、単一の問題の解では解消されない評価値の不均衡を問題の系列全体で軽減する手法を検討する。

2 分散資源の割り当てのモデル

資源供給ネットワーク上の複数のノードに分散して存在する資源を配分する、分散資源の割り当てのモデルを示す。ここでは、電力網におけるフィーダツリーのような木構造のネットワークを対象とする。ネット

ワークは、次の要素により構成される。

- ノード：資源の供給または需要の要求を持つ。要求される資源の量に関して評価値が与えられる。
- リンク：資源を移送する経路である。移送可能な資源の量には制限がある。

各ノード i における、資源についての需要と供給の要求は、次の要素により表される。

- R_i : 要求される資源の量の離散集合。資源の量 $r \in R_i$ が負値であれば供給を表し、正値であれば需要を表す。ノード i は R_i の要素のいずれかを選択する。
- $f_i(r)$: 資源の量 $r \in R_i$ のコスト値の関数。 $f_i(r)$ は非負の離散値である。

リンク j による資源の移送は次の要素により表される。

- L_j : リンクを移送される資源の量の離散集合。資源の量 $l \in L_j$ は、リンクの容量 l^c について $-l^c \leq l \leq l^c$ なる離散値であり、その値の組み合わせは原点に対して対象である。また、 l の値の正負は、資源の移送の方向を表す。その値は、上述の木構造のネットワークにおける根からのノード順序に従うとき正である。

各ノード i では、 i が要求する資源の量 r_i およびノード i と接続する各リンク j の資源の移送量 l_j の総和は、常に 0 でなければならない。この制約条件は、 i と接続するリンクの集合 E_i を用いて次式のように表される。

$$r_i + \sum_{j \in E_i, l_j \in L_j} l_j = 0 \quad (1)$$

この制約条件のもとで、資源の量のコスト値 $f_i(r)$ を大域的に結合した値を最適化する。

3 RCDCOP としての表現および解法

前節のモデルにおける各ノードを、RCDCOP におけるエージェントとして表現する。各エージェントは、木構造のネットワークにより順位づけされた親子関係を持つ。エージェント i の資源の要求の量 r_i を、 i の変数 x_i^r を用いて表す。また、 i は自身の子 j それぞれへの資源の配分を決定する。子 j への資源の配分の量を変数 $x_{i,j}^l$ を用いて表す。親 p_i からの資源の配分の量を変数 $x_{p_i,i}^l$ を用いて表す。 $x_{i,j}^l, x_{p_i,i}^l$ の値は、子または親との間のリンクを移送される資源の量と対応する。

上記の問題に対して、分枝限定法と動的計画法にもとづく、RCDCOP の従来解法 [1] を適用する。この解

A distributed cooperative resource allocation method reducing inequality

†Toshihiro MATSUI †Hiroshi MATSUO

†Nagoya Institute of Technology

表 1: 単一の問題における, 解探索の反復回数と, 各ノードのコスト値の分散

graph	linear				binary tree			
	2, 10		4, 20		2, 10		4, 20	
#prov., #cons.								
algorithm	iter.	var. of cost	iter.	var. of cost	iter.	var. of cost	iter.	var. of cost
sum, greedy	197	1.000	551	1.000	142	0.994	187	1.000
max, greedy	124	1.000	252	0.984	121	0.936	153	0.881
sum, center	197	0.333	551	0.337	142	0.333	187	0.343
max, center	124	0.333	252	0.337	121	0.340	153	0.337

法は制約網についての疑似木による変数順序に依存する. また, 複数の異なる種類の資源に関して, 要求量の総和それぞれを上限値以下とする制約条件を扱う. 本研究で扱う問題は, 木構造のネットワークと, 1 種類の資源の要求量の総和を 0 とする資源制約を用いるため, 従来解法で対象とされる問題のサブクラスであるといえる. 厳密には, 資源の量が正負値である点や, ノードの資源の要求量およびコスト関数の表現が異なる.

解法において集計される, 親からの資源の配分の量および, ノード i を根とする部分木に関する最適コスト $g_i^* (\{(x_{p_i,i}^l, d_{p_i,i})\})$ は次のように定義される.

$$g_i^* (\{(x_{p_i,i}^l, d_{p_i,i})\}) = \min_{d_i \in R_i, d_{i,j} \in L_{i,j}} g_i (\{(x_{p_i,i}^l, d_{p_i,i}), (x_i^r, d_i)\} \cup \bigcup_{j \in C_i} \{(x_{i,j}^l, d_{i,j})\}) \quad (2)$$

$$g_i (\{(x_{p_i,i}^l, d_{p_i,i}), (x_i^r, d_i)\} \cup \bigcup_{j \in C_i} \{(x_{i,j}^l, d_{i,j})\}) = \delta_i (\{(x_{p_i,i}^l, d_{p_i,i}), (x_i^r, d_i)\} \cup \bigcup_{j \in C_i, d'_{i,j} = d_{i,j}} \{(x_{i,j}^l, d'_{i,j})\}) \oplus \bigoplus_{j \in C_i, d'_{i,j} = d_{i,j}} g_i^* (\{(x_{i,j}^l, d'_{i,j})\}) \quad (3)$$

$$\delta_i (\{(x_{p_i,i}^l, d_{p_i,i}), (x_i^r, d_i)\} \cup \bigcup_{j \in C_i} \{(x_{i,j}^l, d_{i,j})\}) = \begin{cases} f_i(d_i) & \text{式 (1) の資源制約を満足する} \\ \infty & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

ここで, C_i は i の子ノードの集合である. 実際の計算では, 探索の過程の部分問題を評価するために, 下限値 0 と上限値 ∞ にもとづく上下界値が用いられる.

従来の (RC)DCOP では, 大域的なコストの合計を最適化するため, コストの結合演算 \oplus は加算である. しかし, 不均衡性の軽減を考慮する場合は別の結合演算を用いることも可能と考えられる. そこで提案手法では, 最大化関数 (max) を用い, エージェントのコストの最大値を減少することを意図する. また, 各エージェントが最適な変数値を選択する際に複数の候補がある場合は, 自身および各子以下のサブツリーの資源の要求量からなるベクトルが, 全候補のベクトルについての

表 2: 動的 RCD COP において不均衡を軽減する場合のコスト値 (algorithm: max, center)

graph	linear				binary tree			
	2, 10		4, 20		2, 10		4, 20	
#prov., #cons.								
incremented cost values	max. avg. cost	var. of cost						
\geq max. cost	1.250	0.345	1.574	0.359	1.288	0.371	1.587	0.403
$>$ min. cost	1.699	0.520	1.872	0.469	1.731	0.570	1.869	0.632

中間値からなるベクトルに最も近いものを選択し, コスト値の平均化を図る.

さらに, コスト値が変化する場合の問題列からなる動的 RCD COP において, 現在の問題で最大のコスト値のエージェントは, 次の問題の自身のコスト関数を変更し, 現在のコスト値以上の関数値を増加する. これにより, 次の問題では最大のコスト値となる割り当てを避ける.

4 実験結果

資源の (供給ノード数, 需要ノード数) が, (2,10) および (4,20) である例題についての提案手法の結果を示す. これらの問題では供給される資源の量は需要を十分に満足できない. 表 1 は単一の問題についての, 解探索の反復回数と, 解における各ノードのコスト値の分散を表す. コストの結合が加算である sum よりも最大化である max の方が, コスト空間の規模が小さいために反復回数が少ない. また, 解の選択では比較手法である貪欲的手法 greedy よりも, 提案手法 center の方がコスト値の分散は抑制される. 表 2 は動的 RCD COP において不均衡を軽減する場合の, ノードごとの平均コスト値の最大値と, 解における各ノードのコスト値の分散を表す. ノードごとの平均コスト値の最大値は, 単一の問題の最大コスト値 2 よりも削減される. 比較手法である, 最小コスト値より大きい関数値を増加する積極的な方法 $>$ min. cost よりも, 提案手法 \geq max. cost の方が最大の平均コスト値, 分散ともに小さい.

5 まとめ

ネットワーク上の複数のノードに分散して存在する共有資源を, 公平性を考慮して各ノードに配分する問題のための, RCD COP および解法を検討した. 今後の課題として, より高度な公平性のための指標やスケジューリングの導入, 探索の効率化が挙げられる.

謝辞 本研究の一部は, 科研費 若手 (B)22700144 の研究助成による.

参考文献

[1] T. Matsui, M. Silaghi, K. Hirayama, M. Yokoo, and H. Matsuo. Resource constrained distributed constraint optimization with virtual variables. In *AAAI 2008*, pp. 120–125, 2008.