5C-4

資源供給ネットワークにおける資源・経路割り当てモデルと協調的な解法の検討

松井　俊浩†　　松尾　啓志†
†名古屋工業大学

1　はじめに

分散システム上の資源割り当て問題は，分散協調問題解決の応用分野の一つである．資源割り当て問題の表現と解法を，設計，理解するための手段として，分散制約最適化問題 (DCOP) [1] を基礎とする手法が研究されている．分散制約最適化問題では，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．各エージェントは自身の状態や意思決定を表す変数を持つ．エージェント間の関係は，複数の変数に関する制約および評価関数により表現される．各エージェントの変数値は自身のみが決定する．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処理として構成された探索アルゴリズムより求める．関連研究では，電力網のフィーダツリーを構築する問題 (power supply restoration) のために，DCOP に基づく問題の表現と解法が提案されている [2]．一方で，このようなフィーダツリー上に分散電源がある場合，その電力資源の需要と供給の割り当ての決定も，スマートグリッドなどの資源供給ネットワークにおける重要な問題の一つであると考えられる．本研究では，このようなネットワーク上の資源・経路割り当て問題のための DCOP に基づく表現と解法を検討する．

2　資源割り当て問題の形式化

分散電源を持つ電力網のような資源供給ネットワークを動機付けとする，資源割り当て問題を形式化する．ここでは，フィーダツリーのような木構造のネットワークが前処理により構築されていることを前提とする．ネットワークは，次の要素により構成される．

- ノード：需要家もしくはその集合を表す．一部のノードは自身または他ノードに供給可能な資源を持つ．
- ソースノード：フィーダツリーの根に配置された大規模な資源を持つ設備を表す．ネットワーク上の需要に対し，十分に大きな量の資源を供給できる．
- リンク：資源を移送する経路．資源の移送の過程で，一部の資源が消費される．また，移送可能な資源の量には制限がある．

各ノードにおける，資源に対する需要と供給の要求は次のパラメータにより表される．

- P_i^{ch}: 最低限必要とする資源の量.
- P_i^{cs}: 可能であれば消費する資源の量.
- P_i^{g}: 供給可能な資源の量.

P_i^{ch} は必ず消費される必要があるが，P_i^{cs} は部分的に消費できる．また，P_i^{g} は自身で消費されるか，他のノードにリンクを経由して供給される．ただし，自身の消費には優先的に供給される．また，いずれにも供給が不可能な余剰があれば廃棄される．ソースノードが供給可能な資源の量は，上下限値 $P^{s\perp}, P^{s\top}$ により表される．$P^{s\perp}$ が負値の場合は資源を吸収する．リンクによる資源の移送は次のパラメータを用いて表される．

- p_i: ノード i からネットワークに流入する資源の量.
- v_i: 資源の移送における，ノード i のポテンシャル.
- $V_i^{\perp}, V_i^{\top}$: v_i の最小値と最大値.
- $G_{i,j}$: ノード i と j の間のリンクで移送される資源の量のためのパラメータ.
- $V_{i,j}^{dif\top}$: ノード i と j の間のリンクで移送される資源の量の最大値のためのパラメータ.

p_i は，需要であれば負値，供給であれば正値となる．ノード i からネットワークに流入する資源の潮流は p_i/v_i により表される．ノード j から i に移動する潮流は $G_{i,j} \cdot (v_j - v_i)$ により表される．各ノードに流入する潮流の合計は 0 となる．$|v_j - v_i|$ の値は $V_{i,j}^{dif\top}$ を超えてはならない．資源の消費と供給に関するコストと利得のために，次にパラメータを用いる．

- w_i^{inp} : ノード i が他ノードから得る資源のコスト.
- w_i^{exp} : ノード i が他ノードに供給する資源の利得.
- w_i^{utl} : ノード i の需要 P_i^{cs} の一部を消費したときに得る利得.

3　DCOP としての問題の形式化と解法

各ノード i を DCOP におけるエージェントとみなし，v_i の値をエージェントの変数 x_i を用いて表す．資源の需要および供給の量は v_i の値から間接的に決定される．v_i の値は本来は連続値であるが，x_i の値は離散値とす

A study of distributed cooperative resource allocation in resource supply networks
†Toshihiro MATSUI　†Hiroshi MATSUO
†Nagoya Institute of Technology

Copyright ©2011 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.

る．従って，得られる解は誤差を伴う値となる．x_i の下限値と上限値は，v_i の範囲 $V_i^{\perp}, V_i^{\top}$ を満足するようなパラメータ $x_i^{\perp}, x_i^{\top}$ により表される．v_i と x_i の関係は v_i の単位量のパラメータ v_i^{unit} を用いて $v_i = 1 + v_i^{unit} \cdot x_i$ のように定義される．ノード i の変数 x_i および i とリンクで関係する近傍ノードの変数の値により，対応する各ポテンシャルの値が計算される．これら v_i と各近傍 j の v_j の値により，i 以外のノードから i に流入する潮流 c_i は $c_i = \sum_{j \in \text{ neighborhood nodes of } i} G_{i,j} \cdot (v_j - v_i)$ のように表される．ノード i から流入する資源の量 p_i は $v_i \cdot (-c_i)$ により表される．p_i が負値であれば消費のコストの評価関数 $f_i^{inp}(p_i) = w_i^{inp} \cdot p_i$，正値であれば供給の利得の評価関数 $f_i^{exp}(p_i) = w_i^{exp} \cdot (-p_i)$ が評価される．また，p_i は $p_i = P_i^g - (P_i^{ch} + k_i^{cs} \cdot P_i^{cs}) - p_i^{gw}$ のように表される．ここで，係数 k_i^{cs}, 廃棄される資源の量 p_i^{gw} である．$k_i^{cs} \cdot P_i^{cs}$ は P_i^{cs} の部分的な消費を表す．可能な限り資源を廃棄しないという条件のもとで，p_i より $k_i^{cs} \cdot P_i^{cs}$ が一意に得られ，この消費のインセンティブとしての利得の評価関数 $f_i^{utl}(k_i^{cs} \cdot P_i^{cs}) = w_i^{utl} \cdot (-\lfloor k_i^{cs} \cdot P_i^{cs} / (P_i^{cs}/k^{csunit}) \rfloor \cdot (P_i^{cs}/k^{csunit}))$ が評価される．ここで k^{csunit} は利得の単位を与えるパラメータである．また，制約条件 $|v_i - v_j| \leq V_{i,j}^{dif\top}$，および p_i が $P_i^{ch}, P_i^{cs}, P_i^g$ のパラメータを満足するための制約条件が，評価関数 $f_{i,j}^{vdif}(v_i, v_j), f_i^p(p_i)$ として評価される．これらの評価値は制約条件を満足すれば 0，そうでなければ ∞ となる．ノード i が評価するコスト f_i^{cost} は各評価値の合計とし，コストの合計値を大域的に最小化する解を求める．

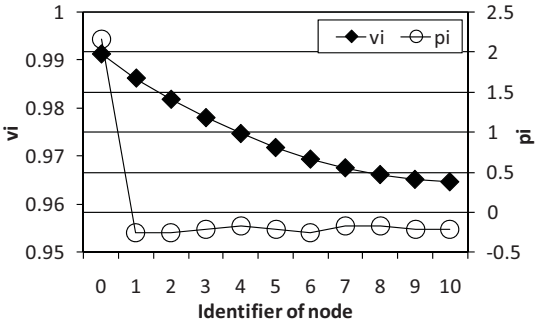
DCOP の疑似木に基づく解法 [1] を拡張し，上述の問題に適用した．疑似木はグラフの生成木の一つに対応し，グラフの頂点 (ここでは変数) に対する半順序関係を与える．この生成木の辺を木辺，それ以外の辺を後退辺と呼ぶ．x_i に対応する頂点を根とする部分木の，最適コスト値 $g_i^*(s_i)$ は次のように計算される．

$$\begin{aligned} &\delta_i(s_i \cup \{(x_i, d)\}) = f_i^{cost}(\{(x_i, d)\} \cup \\ &\bigcup_{(x_j, d_j) \in s_i,\ j \in Nbr_i^u} \{(x_j, d_j)\} \cup \\ &\bigcup_{(x_k, d_k) \in t_{i,s_h}, h \in Chld_i,\ k \in Nbr_i^l} \{(x_k, d_k)\}) \end{aligned} \tag{1}$$

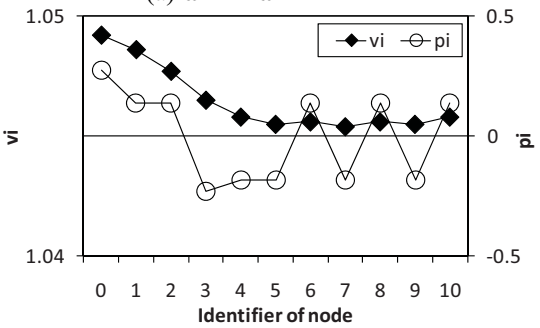
$$g_i^*(s_i) = \min_{d \in D_i} g_i(s_i \cup \{(x_i, d)\}) \tag{2}$$

$$\begin{aligned} g_i(s_i \cup \{(x_i, d)\}) &= \delta_i(s_i \cup \{(x_i, d)\}) \\ &+ \sum_{j \in Chld_i} g_j^*(s_j) \quad \text{s.t.} \quad s_j \subseteq (s_i \cup \{(x_i, d)\}) \end{aligned} \tag{3}$$

ただし，$Chld_i, Nbr_i^u, Nbr_i^l$，は疑似木に含まれる生成木における i の子，上位近傍と，下位近傍のノードの変数の集合を表す．また，s_i は，i を根とする部分木のいずれかの変数の近傍であるような i の祖先についての部分解である．特に，本研究における問題の形式化では，各ノードの評価値の計算には，下位近傍ノードの変数値も必要とする．これらの変数値は，各ノード i において子 h から，部分解 s_h についての h および子孫の該当ノードの局所最適解 t_{i,s_h} として伝搬される．本研究では探索空間の制限のために，元のグラフ (ネットワークが) 木であることを前提とするが，上式のコストの計算は疑似木が後退辺を含む場合にも適用できる．



(a) $w^{inp} : w^{utl} = 1 : 1$



(b) $w^{inp} : w^{utl} : w^{exp} = 1 : 1 : 1.5$

図 1: $n = 11$, linear graph

4 実験結果

11 ノードからなる問題の結果の例を図 1 に示す．同図 (a) では，ノードの供給可能な資源が無く，識別子 0 のソースノードから v_i が単調に減少している．(b) では，ノード 1,2,6,8,10 から資源が供給され，v_i の変化は非単調である．消費量と供給量は，各コストと利得の比，および解法における偏りに影響される．

5 まとめ

本研究では分散電源を含む電力網を動機付けとして，ネットワーク上の資源・経路割り当て問題のための DCOP に基づく表現と解法を検討した．精度向上と探索空間の規模削減のための手法の改良，および応用的な問題への適用が今後の課題である．

謝辞 本研究の一部は，科研費 若手 (B)22700144, 財団法人 大川情報通信基金の研究助成による．

参考文献

[1]Adrian Petcu et al. A scalable method for multiagent constraint optimization. 2005.

[2]Akshat et al. Kumar. Distributed constraint optimization with structured resource constraints. 2009.

Copyright ©2011 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.