

応用的な分散センサ網における観測資源割り当て問題の検討

松井 俊浩 松尾 啓志

分散センサ網に関する研究はマルチエージェントシステムの応用分野として広く行われてきた。本論文では、応用的な分散センサ網の資源割り当て問題について検討する。特に、分散制約充足・最適化問題として形式化されたモデルと、エージェントの概念に基づく分散協調モデルについて考察し、両者を融合するための一般化された分散制約最適化問題としての形式化を示す。また、得られた最適化問題に対して基礎的な解探索手法を適用し、その有効性を評価する。

Distributed sensor resource allocation problem is an important research area of multi agent systems. In this paper we propose a model of distributed resource allocation problem for distributed sensor networks. Several models based on constraint network and another model based on concept of agency, are compared. Then, 2 layered constraint network which are similar to resource allocation problem of agency model, is shown. The efficiency of proposed model is evaluated using simulation.

1 はじめに

分散センサ網に関する研究は、マルチエージェントシステムの応用分野の一つとして広く行われてきた。分散センサ網の目的や手法はさまざまであり、電池駆動の小規模なハードウェアで構成される多数のセンサと Ad-hoc な無線網により広域の観測情報の収集を行うものや、モバイルコンピューティング、移動ロボットなどの分野での研究が行われている。

本研究で検討の対象とする分散センサ網の一つは、図 1(a) に示すようなメッセージ通信網で接続されたカメラサーバ群による観測システムである。このような観測システムでは、各カメラサーバが単にカメラの画像を記録するのみではなく、侵入者等の監視対象の状況の変化の検出や、特定の観測対象の追跡や観測スケジュールに応じた重要な観測対象へのカメラの注視制御などの、より高度な処理を実現することが期待されている。このような処理を各カメラサーバが持つ計

算資源を利用して分散処理により実現することは有用である。本研究ではこのようなセンサノード(カメラサーバ)がインフラストラクチャの一つとして整備されることを想定し、センサノードを利己的な振る舞いをしない協力的なエージェントとして扱う。通信網や電源は下位のシステムにより整備されているものと仮定し、故障や省電力等は議論の対象としない。ここでは、例題として、各エージェントがそれぞれが観測可能な対象物に対して、事前に与えられた要求を満たすようなカメラの注視制御を行う問題を考える。このような問題は時系列的であるが、そのうちの一つのスナップショットに対する解法を検討する。

上記のような観測システムでは、センサ資源のスケジューリングや観測情報の統合を分散・協調処理により行うことが必要である。センサの観測資源を観測対象に割り当てる、資源割り当て問題は重要な問題の一つであり、さまざまな手法が提案されている。資源割り当て問題は本質的な部分において、最適化問題を含むため、分散アルゴリズムによる最適化問題の解法の適用を検討することは、問題の理解やプロトコル設計のために有効であると考えられる。

エージェントに分散して配置された、変数と制約・

A modeling of distributed resource allocation problem for distributed sensor networks.

Toshihiro Matsui and Hiroshi Matsuo, 名古屋工業大学, Nagoya Institute of Technology.

評価関数の情報を基に、分散アルゴリズムにより解を得る、分散制約充足・最適化問題が研究されている [1], [2], [3], [4], [5]. これらの研究により提案された解法は、各種の分散資源割り当て問題への応用が期待される。分散センサ網における資源割り当て問題を制約網により表現し、分散制約充足・最適化問題として扱う手法が提案されている [6], [7].

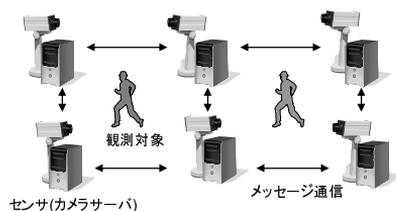
観測資源資源割り当て問題を分散制約充足・最適化問題として扱う研究の多くでは、実際の観測システムへの実装についての議論が簡略されていた。しかし、実際には、各センサノードによる観測対象の検出、複数の観測対象の対応付け、複数観測対象への複数観測資源の割り当てなどからなる、階層的な処理を統合したモデルやプロトコル体系が必要である。

一方で、他の関連研究としては、エージェントの概念を用いた分散協調処理による観測システムのモデルが提案されている [8], [9]. このモデルは、注視制御可能なカメラと入出力する自律的な計算機群を LAN 接続した、分散協調処理環境を対象としている。観測から観測資源の割り当てまでの処理を階層的に統合し、それらに対応したプロトコル体系を定義した実際的なモデルであり、実機を用いた小規模な実験環境で実証された。このようなプロトコルに含まれる資源割り当て問題を、制約網により表現された観測資源割り当て問題と比較・考察し、両者の融合の方法を検討することは、有用であると考えられる。

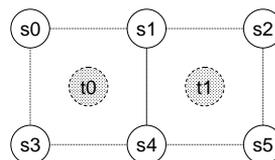
そこで、本研究では、分散制約充足・最適化問題として形式化された分散センサ網の資源割り当て問題と、エージェントのアーキテクチャに含まれる資源割り当て問題について考察する。そして、両者を融合することを目的として、エージェントのアーキテクチャに類似した観測資源割り当て問題を形式化する。また初期の検討として、基本的な解法の適用を行い、その有効性を評価する。

2 分散センサ網の観測資源割り当て問題

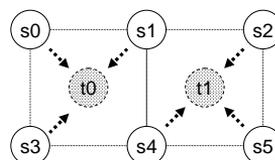
実際的な分散センサ網のモデルはさまざまな情報を含むが、本論文では、センサの持つ観測資源を観測対象の観測に割り当てる、資源割り当て問題を議論の対象とする。このような問題を図 1 のようにセン



(a) センサ (カメラサーバ) と観測対象



(b) グリッド状のモデルによる表現



(c) 観測資源の割り当て

図 1 センサ網

サがグリッド状に配置されたモデルにより簡略化して表現する。グリッド状のセンサ網の例題は関連研究 [7] などでも用いられる。図 1(b) において s_i はセンサノードを表し、 t_j は観測対象を表す。このとき、

- センサは観測範囲に制限がある。たとえば自身が隣接するグリッド内の観測対象のみを観測することができる。
- センサは観測資源に制限がある。たとえば同時に 1 つの観測対象のみ観測資源を割り当てることができる。
- 観測対象を十分観測するために必要な観測資源の要求がある。例えば方位情報から座標を推定するために 3 個以上のセンサを同時に割り当てる必要がある。

のような条件のもとで、各センサの観測資源を各観測対象に割り当てる問題を、分散・協調的な処理により解くことが目的である。例えば上記の条件を観測する割り当ては図 1(c) のように表される。

2.1 分散制約最適化問題

分散制約最適化問題 [1], [2], [3], [4], [5] は, マルチエージェントシステムを, 各エージェントに変数と制約・評価関数が分散して配置された最適化問題として, 形式化するものであり, マルチエージェントシステムの基礎的な問題の一つとして研究されている. 多くの分散協調システムは, 資源割り当て問題を含むため, マルチエージェントシステムを最適化問題の側面から検討することは有用である. 分散制約最適化問題は次のように形式化される.

- マルチエージェントシステムに含まれるエージェントの集合を A で表す.
- 変数の集合を X で表す. 各エージェント $i \in A$ は自身の変数 $x_i \in X$ を持つ.
- 変数 x_i の値域を D_i で表す. x_i の変数値 $d_i \in D_i$ はエージェント i のみが決定できる.
- 制約の集合を C で表す. 制約 $c_k \in C$ は複数の変数に関する制約を表す.
- 制約 c_k には評価関数 f_k が対応付けられる. 評価関数は, 制約に関連する変数の値の組み合わせから評価値への写像を表す.
- 問題の目的は, 全ての制約の評価関数の合計値を最適化する, 変数値の組み合わせを求めることである.

各エージェントはメッセージ交換を伴う分散制約最適化手法により解を求める. 分散制約最適化手法は, 逐次的な最適化問題のための探索手法を分散アルゴリズムに応用したものであり, 厳密解法, 山登り法や確率的解法が提案されている. センサ網における解法としては, スケーラビリティの観点からは山登り法や確率的解法が有用であると考えられるが, 局所解による解の精度が問題になる可能性がある.

2.2 観測資源割り当て問題の制約網による表現

観測資源割り当て問題を, 制約網を用いて表現し, 分散制約充足・最適化問題として形式化する手法が提案されている. このような形式化においては, 変数と制約・目的関数を, センサと観測対象の条件に合致するように定義する.

分散協調型の観測システムのモデルは, 観測対象と

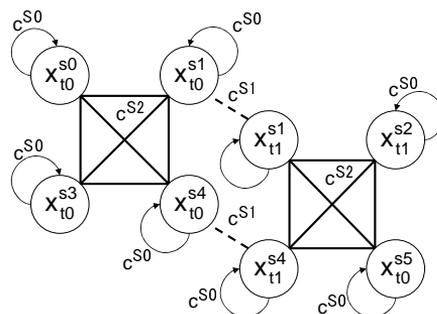


図 2 STAV

センサの機能により, 次のように分類できる.

1. 監視カメラ網のようにセンサノードが制御の対象になり得るが, 観測対象は制御の対象ではなくプロセッサを持たない.
2. 十分なセンサの機能を持たない移動ロボットに, 周辺のセンサノードからの情報が与えられるシステムのように, 観測対象が制御の対象に含まれる.

本論文では特に上記 1. の場合について検討する. この場合, 変数と制約は, 観測対象には配置できない. 特に, 本論文で対象とするセンサノード以外の計算資源の利用を前提とする観測システムの場合, 変数と制約はセンサノードに分散して配置する必要がある. 一方で, 変数と制約により表されるべき状態には, センサの情報のみではなく, 観測対象ごとに集約された情報も含まれる.

このような要件を考慮した, 観測資源割り当て問題の制約網による表現は文献 [6], [7] などに示されている. 以下では制約網による 2 つの表現 (STAV, TAV) について考慮する. また, 制約網による表現とは別のアプローチであるエージェントシシの概念に基づくモデル [8], [9] との関連性について考察する.

2.3 STAV (Sensor-Target As Variable)

センサと観測対象の組について変数を定義する制約網の表現 (STAV) について示す. 図 1 の例を STAV により表現すると図 2 の制約網のように表される.

変数 $x_{t_j}^{s_i}$ は, センサ s_i と, センサ s_i の観測可能な (視野内にある) 観測対象 t_j の組について, 定義される. 変数 $x_{t_j}^{s_i}$ の値は, 観測対象 t_j を観測可能な各センサが,

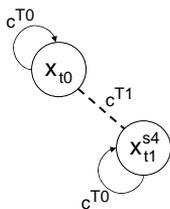


図 3 TAV

それぞれ t_j に割り当てられるか否かを表す．例えば， t_j を観測可能なセンサ $\{s_0, \dots, s_n\}$ についての組み合わせ， $\{\phi, \{s_0\}, \dots, \{s_n\}, \{s_0, s_1\}, \dots, \{s_0, \dots, s_n\}\}$ に対応する変数値により表現する．

各変数間には，次の制約が定義される．

- $c^{S0}(x_{t_j}^{s_i})$: 観測対象 t_j への資源の割り当ての要求を表す単項制約．
- $c^{S1}(x_{t_j}^{s_i}, x_{t_{j'}}^{s_{i'}})$: センサ s_i が複数の観測対象 $t_j, t_{j'}$ へ割り当てられることを制限する二項制約．
- $c^{S2}(x_{t_j}^{s_i}, x_{t_{j'}}^{s_{i'}})$: センサ s_i と $s_{i'}$ の，観測対象 t_j に関する割り当てが矛盾することを禁止する二項制約．

なお，この形式化では，簡単のためにセンサは単一の観測対象にのみ割り当てることができるものとし，制約 c^{S1} を二項制約としている．センサ s_i を許容数以内の複数の観測対象に割り当てる場合は n -ary 制約となる．

また，制約 c^{S2} は t_j に関する複数の 2 変数について定義されるが，これらを統合して n -ary 制約としても表現できる．

STAV は次項に示す TAV の変数を各センサに分散し，センサ間の合意を明示的に表現した形式化である．しかし，このような詳細な表現により，変数と制約の数が TAV より増加する．

2.4 TAV (Target As Variable)

観測対象について変数を定義する制約網の表現 (TAV) について示す．図 1 の例を TAV により表現すると図 3 の制約網のように表される．

変数 x_{t_j} は，観測対象 t_j について定義される．変数 x_{t_j} の値は，観測対象 t_j に観測可能な各センサがそれぞれ割り当てられるか否かを表す．この変数値の表現は STAV と同様である．

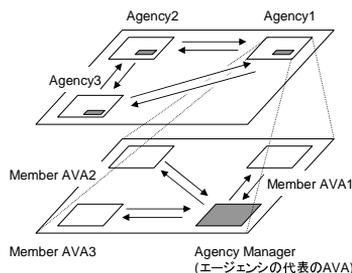


図 4 エージェンシの概念に基づく協調モデル文献 [8] 図 4 より一部を簡略して抜粋

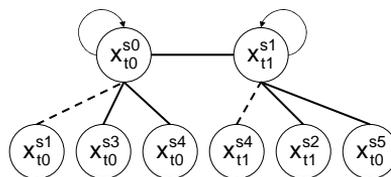


図 5 エージェンシを模倣した制約網の表現

各変数間には，次の制約が定義される．

- $c^{T0}(x_{t_j})$: 観測対象 t_j への資源の割り当ての要求を表す単項制約．
- $c^{T1}(x_{t_j}, x_{t_{j'}})$: 観測対象 $t_j, t_{j'}$ へのセンサの割り当てが，矛盾せず，かつセンサの資源の量の制限を満足する，ことを表す二項制約．

TAV はセンサ間の合意を簡略した表現であり，STAV から TAV への変換は次のようになされる．

1. 同一の観測対象 t_j についての c^{S0} を結合して単一の c^{T0} とする．
2. 同一の観測対象 t_j についての c^{S2} を除く．
3. 同一の観測対象のペア (t_i, t_j) についての c^{S1} を結合して単一の c^{T1} とする．

TAV は STAV よりも変数と制約の数は少ない．しかし，実際的には観測対象上に変数と制約を配置することは不可能な場合が多い．特に，本研究で議論の対象とするカメラサーバ群から構成される分散協調型の観測システムでは，計算資源はセンサ上のみ存在することを想定するため，変数をいずれかのセンサ上に配置する問題の解決が必要となる．

2.5 エージェンシ

分散制約充足・最適化の枠組みでの検討とは別に，エージェンシを用いた分散協調処理による観測システムが提案されている [8], [9]．このモデルは，注視制御

可能なカメラと入出力する自律的な計算機群を LAN 接続した、分散協調処理環境を対象としている。観測から観測資源の割り当てまでの処理を階層的に統合し、それらに対応したプロトコル体系を定義した実際的なモデルであり、実機を用いた小規模な実験環境で実証された。その概要は次のようである (図 4 参照)。

- 観測システムは AVA と呼ばれるセンサノード (エージェント) 群から構成される。各 AVA のハードウェアは、注視制御可能なカメラセンサと通信網で接続された計算機から構成される。本研究ではこの AVA を観測資源割り当てを行うセンサノードとして扱う。
- 各 AVA は観測対象を発見すると、同一の観測対象を観測する AVA ごとにグループ (エージェント) を構成する。
- エージェントのいずれかの AVA がエージェントを代表する。エージェント内の他の AVA は代表の AVA に従う。また、各エージェントの代表の AVA がエージェント間の資源の配分を交渉し決定する。

本論文では、特に観測資源割り当て問題とその解法としての面に注目する。観測資源割り当て問題としてのエージェントのモデルの要点は次のとおりである。

- TAV と同様に観測対象ごとに情報が集約される。
- 集約された情報は何れかの代表のセンサノードに割り当てられる。
- 同一の観測対象で関連するセンサノードは代表のノードの決定に従う。

上記の点より、このモデルは基本的には SAV と TAV の中間的なものとして解釈することができる。図 5 にエージェントを模倣した制約網の例を示す。STAV と同様の構成の変数を持つが、観測対象 t_0 についての変数はセンサ s_0 に配置されたものが優先され、観測対象 t_1 についての変数はセンサ s_1 に配置されたものが優先される。他の変数の値は同一の観測対象について優先される変数に従う。なお、図中の x_{i0}^{s1}, x_{i1}^{s1} や x_{i0}^{s4}, x_{i1}^{s4} のように、同一のセンサに関する変数が、複数の異なるセンサに関する変数に従う場合がある。

一方で、制約網を用いた基本的な資源割り当て問題

の表現と次の点が異なる。

- 実際的なモデルであるために、問題の構成と資源割り当ての問題の解法が統合されている。
- 資源割り当ての制約の指標が異なる。
- 特殊な観測対象として、観測対象の発見のための観測タスクに資源が割り当てられる。

エージェントによるモデルは実際的な環境で有効であると考えられるが、資源割り当て問題としての観点からは次の点に検討の余地があると考えられる。

- 実際的なモデルであるために比較的複雑であり、観測資源割り当て問題としての理解・表現が難しい。
- 観測資源割り当ての解法は基本的に山登り法であると考えられるが、その解探索処理の性能が不明である。

3 提案手法 - エージェントの資源割り当てモデルを考慮した問題の形式化

分散制約充足・最適化問題としてのモデルと、エージェントの概念に基づくモデルとの融合を目的として、観測資源割り当て問題を形式化する。また、初期の検討として、山登り法に基づく解法を適用する。

3.1 計算資源と観測資源の割り当て問題

TAV では変数をいずれのセンサノードに配置するかを事前に処理する必要がある。一方、エージェントを用いたモデルでは、センサノードへの変数の配置の決定とセンサの観測対象の割り当てが統合されている。実際的なモデルとして、このような統合の方法は有効性があるが、センサの観測対象への資源割り当て問題の解法に制限が生じると考えられる。本論文では、初期の検討としてこれらの問題を別の割り当て問題として検討する。すなわち、

- STAV における変数について、観測対象ごとに優先される変数を決定し、計算資源を割り当てる問題。
- 上記の問題の解として決定された、優先される変数のみで構成される TAV に基づく、観測資源割り当ての問題。

の 2 つの問題が階層的に結合された問題として表現

する．

3.2 計算資源の割り当て問題

計算資源の割り当て問題は STAV から TAV への変換を行うと同時に、TAV の各変数にどのセンサノード（計算資源）に割り当てるかを決定する問題として捉えられる．すなわち STAV の各変数について次の 2 つの制約を満たす問題として形式化できる．

- 同一の観測対象についての変数のいずれか一つが代表とならなければならない．
- 同一のセンサについての変数はいずれか一つのみしか代表にはなれない．これは計算資源の制限を意味する．ここでは単一の変数のみとするが、複数の変数を代表するよう一般できる．

計算資源の割り当ての問題は、観測資源割り当ての問題よりも下位の問題である．計算資源の割り当て問題が解けなければ、観測資源の割り当て問題を解けない．従って、これらの制約は計算資源の確保のために充足する必要がある．

3.3 観測資源の割り当て問題

計算資源の割り当て後の、観測資源の割り当て問題は TAV として考えられる．TAV の変数は計算資源の割り当てにより決定されたセンサノードに配置され、STAV において同一の観測対象を観測可能な他のセンサは、変数を持つノードの決定に従属するのみであるため、割り当て問題からは除外する．

3.4 TAV+SAV (Sensor As Variable) — センサノードの情報の集約

TAV の変数値の評価の際には、他の変数に含まれる同一のセンサと排他的な資源の制限を評価するために、通信が必要となる．例えば変数 x_{t_i} の値域が $\{\phi, \{s_0\}, \{s_1\}, \{s_0, s_1\}\}$ であるとき、 x_{t_i} の値を評価する際には、 s_0, s_1 で関連する他の変数と排他的に値を割り当てているかを確認する必要がある．このような冗長な通信を削減するために、変数の値域を変更し、各センサが観測可能な観測対象のいずれを観測するかを表現する．すなわち、 x_{t_i} の値域を s_0 と s_1 の 2 つの変数値の組とし、たとえば s_0 についての変数

値は s_0 が観測可能な観測対象 $\{\phi, t_k, \dots, t_{k'}\}$ のいずれかを表すものとする．ただし ϕ は何も割り当てないことを表す．このためには、各センサが観測可能な観測対象の情報を集約する必要がある．

このような表現の変更は、複数のエージェントに所属するセンサの意思決定のための情報を、各エージェントの代表に集約することに相当すると考えられる．一般に分散制約充足、最適化手法では変数を保持するエージェントに順序を与え、各変数値の決定は最も優先されるエージェントのみで行う．これにより、各センサは複数のエージェントに参加しつつ、同時にはいずれか一つのエージェントの代表の意思決定に従うことになる．このような概念に類似する手法が文献 [9] にも示されている．

3.5 解探索手法

計算資源の割り当て問題と観測資源の割り当て問題を分離して検討するため、その解法についてもそれぞれの問題を別に解くものとして検討する．なお、これらの解法を結合すること、あるいは単一の分散アルゴリズムとして統合することは重要であるが、本論文における基礎的な検討の対象とはしない．

解法は基本的には、まず計算資源の割り当て問題を解き、次に観測資源の割り当て問題を解く．それぞれの解法は、いずれも山登り法に基づく手法を用いた．これらは文献 [8] のプロトコルに内包される解法に類似することを意図した．変数値を決定する際の優先関係を表すために変数の識別子による順序付けを用いた．変数 x が x' より優先することを $x > x'$ で表す．それぞれの解法の概略を図 6, 7 に示す．いずれも各ノード（エージェント）は、(1) 近傍ノードからの状態の受信、(2) 近傍との変数の優先度に従った山登り法による自変数値の選択を反復する．これらの処理はいずれ収束する．ここでは停止検出処理については省略し、後述の実験では全ての変数の値が収束したとき、解法は終了するものとした．

4 評価と考察

シミュレーションにより提案手法の有効性を評価した．グリッド状に配置された複数のセンサの観測範囲

```

initialize:
前処理により STAV が構成される．自変数は  $x_{t_j}^{s_i}$ ．
 $flag_{t_j}^{s_i} \leftarrow false$ ．
 $terminate_{t_j}^{s_i} \leftarrow false$ ．
loop:
 $t_j$  についての全ての近傍ノード  $x_{t_j}^{s'_i}$  から
 $flag_{t_j}^{s'_i}$ ,  $terminate_{t_j}^{s'_i}$  を受信する．
if ある近傍ノード  $x_{t_j}^{s'_i}$  について,
 $flag_{t_j}^{s'_i} \wedge x_{t_j}^{s'_i} > x_{t_j}^{s_i}$  then
 $terminate_{t_j}^{s_i} \leftarrow true$ ．
elseif  $x_{t_j}^{s'_i} > x_{t_j}^{s_i}$  の全ての近傍ノードについて,
 $\neg flag_{t_j}^{s'_i} \wedge terminate_{t_j}^{s_i}$  then
 $flag_{t_j}^{s_i} \leftarrow true$ ．
 $terminate_{t_j}^{s_i} \leftarrow true$ ．
endif
 $t_j$  についての全ての近傍ノードへ
 $flag_{t_j}^{s_i}$ ,  $terminate_{t_j}^{s_i}$  を送信する．
goto loop:
    
```

図 6 計算資源の割り当て

```

initialize:
前処理により TAV+SAV が構成される．
自変数は  $x_{t_j}$ ．
loop:
全ての近傍ノード  $x_{t'_j}$  から変数値を受信．
 $x_{t_j}$  に含まれる各センサごとの成分のうち,
その成分を含む全ての他ノードの変数  $x_{t'_j}$ 
について  $x_{t_j} > x_{t'_j}$  であるものを  $x_{t_j}^{sub}$  とする．
近傍ノードの変数値について制約の評価値が最良
となる  $x_{t_j}^{sub}$  の値を選択し,  $x_{t_j}$  を更新する．
近傍ノードに  $x_{t_j}^{sub}$  を送信する．
goto loop:
    
```

図 7 観測資源の割り当て

内に複数の観測対象が存在する例題を用いた．グリッドの縦 w , 横 h とし, 各格子点にセンサを配置した．各センサは隣接するグリッドの範囲を観測できるものとした．STAV から TAV+SAV への変換 (計算資源の割り当て) においては, 各センサは単一の変数のみ代表できるものとした．観測資源の割り当てでは, 観測対象に割り当てられるセンサ数 $n = \{0, 1, 2, 3, 4\}$ について, $f(n) \gg f(n+1)$ のようなコスト $f(n)$ を与え, 最小化問題として形式化した．

観測対象は, 割り当て問題の制約網が単一の連結成分になることを意図し, つぎの規則で生成した．(1) 最初に 1 個の観測対象を任意のグリッドに配置する．(2) 観測対象が存在せず, かつ周囲 8 近傍のグリッド

表 1 問題の規模

w,h	c	STAV		TAV		TAV+SAV	
		変数	制約	変数	制約	変数	領域
3	3	30.4	65.8	7.6	12.5	16.0	1.9
3	4	34.0	78.2	8.5	16.9	16.0	2.1
4	1	28.8	52.8	7.2	6.2	19.2	1.5
4	2	42.0	84.5	10.5	13.5	24.3	1.7
4	3	49.6	107.0	12.4	20.4	25.0	2.0
5	1	46.8	85.4	11.7	10.7	31.6	1.5
5	2	62.0	126.9	15.5	21.7	34.7	1.8
10	1	172.4	321.4	43.1	42.1	109.6	1.6

に観測対象が 1 個以上 c 個以下存在するような, グリッドがある場合そのようなグリッドをランダムに一つ選び観測対象を配置する．各パラメータについて 10 個の例題を生成し結果を平均した．生成した問題の規模を表 1 に示す．

STAV の変数の数は, 各観測対象が周囲の 4 個のセンサから観測されるモデルのため, TAV の変数の数 (観測対象の数) の 4 倍になる．STAV, TAV についての制約数は 2 項制約の数のみ示した．STAV の制約数は制約 c^{S^2} が観測対象数ごとに 6 個生成され, さらに制約 c^{S^1} が TAV の制約数の数倍程度生成されることにより, TAV と比較すると大きい．また TAV+SAV の変数の数は 1 個以上の観測対象が観測範囲内に存在するセンサ数に等しい．

解法はまず, STAV を構成した後, 図 6, 7 に示した手順により, 解を得た．また, 図 6, 7 の処理のみ分散アルゴリズムを模擬した．

解法の実行結果を表 2 に示す．それぞれの解法が収束するまでの延べサイクル数はセンサ数と比較して比較的少ない．観測対象の変数をプロセッサ (センサ) に割り当てる問題では, センサ数に十分な余裕があるため, 全て充足解を得た．また, 観測対象へセンサを割り当てる問題では, 最適解の数は 80~100% となった．

この実験で用いた問題は比較的制約の密度が少なく, 山登り法のような貪欲解法でも最適解が得られる場合が多い．

一方で局所最適解に収束する場合があるため, より解の精度の良い探索手法を適用する余地があると考えられる．最適性が保証された解法としては, 近年提案された, pseudo-tree による変数順序を用いる

表 2 解法の実行結果

w,h	c	変数配置問題		観測資源割当て問題	
		実行サイ クル数	最適解の 数 (%)	実行サイ クル数	最適解の 数 (%)
3	3	9.9	100	17.5	80
3	4	9.4	100	16.2	80
4	1	10.1	100	13.0	100
4	2	28.4	100	20.0	100
4	3	19.8	100	31.0	80
5	1	26.9	100	30.4	100
5	2	34.1	100	41.9	90
10	1	103.4	100	116.4	80

表 3 pseudo-tree の規模

w,h	c	最大深さ	最大の幅
3	3	2.7	7.3
3	4	4.3	7.8
4	1	3.1	4
4	2	4.6	7
4	3	7	8.5
5	1	5.3	4
5	2	6.6	8.6
10	1	12.9	4

解法 [2], [5] の適用が考えられる。このような解法は生成される pseudo-tree の規模が探索処理の効率に影響する。TAV+SAV に対して、最大次数を優先する深さ優先により生成された pseudo-tree の最大の深さと幅 (induced width: ある変数ノードを根とするサブツリーに含まれる変数と制約で関連する、上位ノード変数の個数) を図 3 に示す。

これらの結果では、pseudo-tree の深さはグリッドの直径 w, h よりも比較的小さい。一方で幅は c に応じた増加は比較的大きい。動的計画法に基づく手法 [5] の適用する場合、空間複雑度は木の幅と値域のサイズに対して指数関数的に増加するため、 c の値が大きく、制約が密な問題への適用は向かない。このような問題については最良優先探索に基づく解法や、確率的な解法の適用について検討の余地があると考えられる。

5 おわりに

本論文では、応用的なセンサ網の観測資源割り当てについて検討した。分散制約充足・最適化問題として形式化されたモデルと、エージェントの概念に基づくモデルにおける、センサ資源の割り当て問題につい

て考察した。そして、両者を融合することを目的として、計算資源と観測資源の割り当て問題からなる形式化を行い、基本的な解法を適用した。

初期の検討としての比較的小規模な例題を用いた評価実験の結果では、貪欲法に基づく解法で一定の精度の解が得られ、手法の有効性が確認された。

各手法の分散アルゴリズムとしての整備と統合、大規模かつ制約密度の高い問題における検討、従来研究における分散制約充足・最適化手法の解法への適用、動的な状況の変化を含む実的な問題の検討は今後の課題である。

参考文献

- [1] J. Liu and K. Sycara, "Exploiting problem structure for distributed constraint optimization", *Proc. 1st Int. Conf. on Multiagent Systems*, (1995), pp. 246–253.
- [2] P. J. Modi, W. Shen, M. Tambe and M. Yokoo, "Adopt: asynchronous distributed constraint optimization with quality guarantees", *Artificial Intelligence*, Vol. 161, N1-2, (2005), pp. 149–180.
- [3] R. T. Maheswaran, M. Tambe, E. Bowring, J. P. Pearce and P. Varakantham, "Taking DCOP to the Real World: Efficient Complete Solutions for Distributed Multi-Event Scheduling", *Proc. 3rd Int. Joint Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, (2004), pp. 310–317.
- [4] S. M. Ali, S. Koenig and M. Tambe, "Preprocessing techniques for accelerating the DCOP algorithm ADOPT", *Proc. 4th Int. Joint Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, (2005), pp. 1041–1048.
- [5] Adrian Petcu, Boi Faltings, A Scalable Method for Multiagent Constraint Optimization, *Proc. 9th Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence*, Edinburgh, Scotland, (2005), pp. 266–271.
- [6] R. Bejar, B. Krishnamachari, C. Gomes, and B. Selman: Distributed Constraint Satisfaction in a Wireless Sensor Tracking System, *Proc. Workshop on Distributed Constraint of IJCAI01*, (2001).
- [7] R. Béjar, C. Domshlak, C. Fernández, C. Gomes, B. Krishnamachari and B. Selman, Magda Valls: Sensor networks and distributed CSP: communication, computation and complexity, *Artificial Intelligence*, Vol. 161, (2005), pp. 117–147.
- [8] 浮田宗伯 松山隆司: 能動視覚エージェント群による複数対象の実時間協調追跡, *情報処理学会論文誌 コンピュータビジョンとイメージメディア*, Vol. 43, No. SIG11, (2002), pp. 64–79.
- [9] 浮田宗伯: 能動視覚エージェント群の密な情報交換による多数対象の実時間協調追跡, *電子情報通信学会論文誌 D-I*, Vol. J88-D-I, No. 9, (2005), pp. 1438–1477.