

確率的な分散制約最適化手法を用いた分散カメラ資源割り当て手法の実装

加藤 伸哉[†] 松井 俊浩[†] 松尾 啓志[†]

近年、複数のカメラを用いて対象を観測するシステムについての研究が行われている。このようなマルチエージェントシステムに基づく観測処理においては、観測情報の統合だけでなく、観測資源の割り当てを分散協調的に行うことが重要である。一方、複数のエージェント間で制約と変数が分散している条件のもとで、分散アルゴリズムを用いて最適解を求める分散制約最適化問題 (DCOP) が研究されている。本研究では、複数カメラノードからなる協調的な観測システムに DCOP によるカメラ網のモデルと短時間で近似的な解を求めることができる確率的解法を適用した、協調型分散カメラ網を構築した。静止物体、移動物体を観測する実験により提案手法を評価した。提案手法は比較的短時間で協調のための制約を満たす解を発見でき、実時間性のある観測システムへの適用が可能である事が示された。

An implementation of distributed camera resource allocation using distributed stochastic optimization method

SHINYA KATO, TOSHIHIRO MATSUI and HIROSHI MATSUO

1. はじめに

近年、複数のカメラが協調して対象を観測する分散協調型のカメラ網の研究が行われている。このようなシステムは、自動監視などの様々な用途に応用でき、複数の対象物を観測するための基礎となる。本研究で議論の対象とする観測システムは、自律的に動作するカメラノードからなり、各カメラノードはメッセージ交換を用いて互いに通信するものとする。このような観測システムでは、複数のカメラ資源を複数の対象に対してどのように割り当てるか、という資源割当て問題を、複数のカメラノードが協調的に決定する必要があり、応用的なマルチエージェントシステムのひとつである。一方、複数のエージェントの協調を表現するための枠組として、分散制約最適化問題 (Distributed Constraint Optimisation Problem, DCOP)¹⁾ がある。DCOP では、エージェントの状態を変数で表現し、エージェント間の関係を制約と評価関数で表現する。そして、複数のエージェント間で制約を満足する変数の割り当てを分散協調的に決定する。DCOP を解を探索する手法としては最適解が得られることが保証されている厳密解法と確率的な手法を含む非厳密解法があり、確率的な手法は一般に、複雑かつ比較的大規模な問題の近似解を短時間で得る場合に有効である。また、DCOP を分散協調的な観測システムの資源割当て問題を解決するために適用する手法も提案されてい

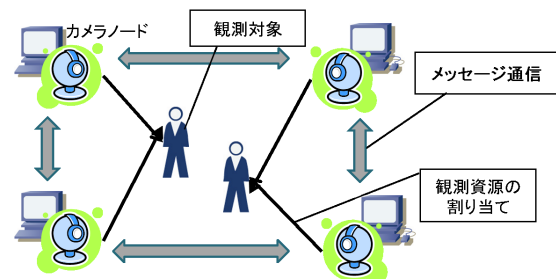


図 1 分散協調カメラ網の例

る。しかし、厳密解法を用いる場合、実際のシステム規模では解の探索時間が指数関数的に増加する場合がある。また、システム規模にかかわらず、変数間の制約が多い問題に対しては、厳密解法は効率的ではない。本研究では、複数のカメラノードからなる観測システムの観測対象への観測資源割当て処理を DCOP として定式化し、確率的な分散制約最適化手法である DSTS²⁾ を適用してカメラ資源の割り当て問題を解決する手法を提案する。また、提案手法を実装し、その有効性を検証する。

2. 分散制約最適化問題

分散制約最適化問題 (Distributed Constraint Optimisation Problem, DCOP) は、各エージェントの状態を n 個の変数 $x_1, x_2, \dots, x_n$ で表す。各変数はそれぞれ離散的な値域 $D_1, D_2, \dots, D_n$ を持つ。各変数は制約により関連付けられる。制約の集合を C_s で表す。

[†] 名古屋工業大学
Nagoya Institute of Technology

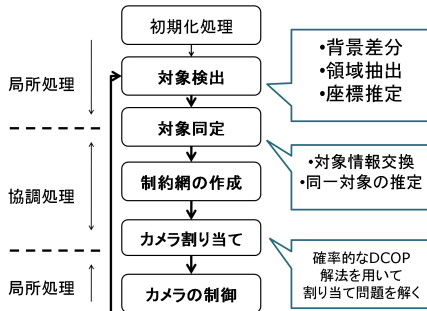


図 2 各カメラノードの処理

また、各制約には評価関数 f が関連付けられ、変数値の組合せのコストが評価される。変数と制約は複数のノードに分散して配置される。全ての制約に対する評価関数の総和である大域コストを最小にする変数の値の組を求める最適化問題である。変数をノード、制約を辺として描いたグラフを制約網とよび、グラフ上の問題として定式化される場合もある。この最適解を求める手法として、完全性を持つ手法である Adopt⁽³⁾、DPOP⁽⁴⁾ や、確率的な解法である DSA⁽⁵⁾、DSTS⁽⁶⁾ などが提案されている。完全性を持つ手法は与えられた DCOP の最適解を求めることができる。しかし、変数や制約が多い問題では探索時間、またはメッセージサイズが指数関数的に増大するため適用可能な問題に制限がある。一方、確率的な手法では、得られた解が最適解である保証はないが、変数や制約の多い問題における探索時間を改善できることから、大規模な問題への適用が期待される。本研究では、確率的な解法である DSTS を用いて DCOP の解を探索することとした。

3. 各カメラノードの処理の概要

各カメラノードの処理は図 2 の様になる。まず、各カメラノードは背景差分などで対象を検出する。検出された対象について、カメラの設置位置や角度などから、床面座標を推定する。そして、他カメラノードと通信を行い、床面座標に基づく対象の同定処理を行う。その後、観測資源割り当て問題としての DCOP への定式化を行い制約網を作成する。制約網への定式化については、4 章で詳しく述べる。制約網を確率的な解法である DSTS を改良した手法を用いて解き、各対象に割り当てるカメラノードを決定することで、自カメラノードが注視する対象を決定する。

4. DCOP への定式化

カメラ群に対して DCOP を用いて資源割り当てを行う場合は、何らかの手法を用いてカメラの動作を変数に、割り当ての整合性を変数間の制約に変換する必要がある。本研究では、対象に対するカメラの割り当てを変数とし、カメラの割り当てに対する以下の要請

を制約とする制約網を作成した。変数の値域は割り当て可能なカメラノードの組合せである。

- (1) 対象を追跡するカメラは 1 つ以上必要である (ignore 制約)
- (2) 同じカメラを複数の対象へ割り当てない (intra-agent 制約)
- (3) 同一対象への割り当ては互いに等しい (inter-agent 制約)
- (4) 対象への割り当ては頻繁に変更されない (keep 制約)

制約 3 が定義されるためには、各カメラノード間で同一対象の同定が行われる必要がある。本研究では各カメラノードが推定する対象の床面座標を $(xPosition, yPosition)$ として、

$$x = \lfloor xPosition / xStep \rfloor$$

$$y = \lfloor yPosition / yStep \rfloor$$

によって離散化し、同一座標の対象を同一の対象とみなすことで対象同定を行った。また、システムは同期しているものとし、各カメラノードは単一の時刻を持つものとする。システムを同期させることで、制約 4 を定量的に決定することができる。また、対象が移動することもあるが、ある時刻でスナップショットを撮り、各カメラノードが取得した画像は同時刻であるとして DCOP へ定式化を行う。よって、これらの制約は、時刻を t 、カメラノードを N_i 、対象の識別子を m の割り当てを変数 $T_{m,t}^{N_i}$ として、以下の数式で表される。ただし、変数の値はその対象へ割り当てるカメラノードの集合を表し。値域はその対象を追跡できるカメラノード全体の冪集合である。

- (1) (ignore 制約) $T_{m,t}^{N_i} \neq \phi$
- (2) (intra-agent 制約) $T_{m,t}^{N_i} \cap T_{n,t}^{N_j} = \phi (m \neq n)$
- (3) (inter-agent 制約) $T_{m,t}^{N_i} = T_{m,t}^{N_j} (i \neq j)$
- (4) (keep 制約) $T_{m,t}^{N_i} = T_{m,t-1}^{N_i}$

各制約について関連付けられた評価関数により重みが与えられる。各カメラノードが、自身に所属する全ての変数に対して違反している制約の重みを合計した数値を違反度と呼ぶ。この定式化によって、カメラ資源の割り当てを DCOP に帰着する。

5. DCOP の解探索

DCOP の解探索手法として、確率的解法である DSTS を改良した手法を用いる。DSTS は、DSA にタブー探索を組み合わせた確率的な手法である。DSTS では、各ノードはメッセージ通信を行い、近傍ノードの変数の値を知り、自らの変数を変更することで得られる改善量 δ と、改善量が最善となるときの変数の値を求める。 $\delta \geq 0$ の場合は確率 $p1$ で、 $\delta < 0$ の場合は自身の変数に制約違反がある時のみ確率 $p2$ で値を変更する。値を変更したら、タブーリストに値を書き込む。タブーリストに書き込む値、期間は問題に適應する様に選択する必要がある。本研究では、タブーリストへ書き込む値として、変更前の値を用いるものと

した。DSTS では、制約違反がある場合、違反度を悪化させてでも制約違反を解消しようとする。よって、対象に対して割り当てに必要なカメラが不足している場合には ignore 制約を満足できないので解を求めることができない。そこで、DSTS で、 $\delta < 0$ の場合に値を変更する条件を、自身の変数に intra-agent 制約、inter-agent 制約違反のどちらかがある時のみ確率 p_2 で値を変更するようにした。intra-agent 制約は違反している場合、複数の対象に割り当てられるカメラノードが存在するが、そのようなカメラノードは矛盾する動作を要求される場合があり、対象を追跡できるとは限らない。また、inter-agent 制約に違反している場合、他のカメラノードが知っている割り当てと、自身の割り当てが異なるカメラノードが存在していて、そのようなカメラノードは他のカメラノードと協調しているとはいえない。よってこれらの制約は必ず満たしている必要がある hard constraint である。しかし、ignore 制約は対象の数がカメラノードの数より多い場合は満たす事ができないし、keep 制約は、追跡する対象の切替えを行う際には必ず違反してしまう。よってこれらの違反は、満たしていることが望ましいが、満たしていない場合があってもよい soft constraint である。また、収束を早めるため、変数の値は、前回解いた問題の対象といま解いている問題の対象が等しいと判断されるとき、以前解いた値で初期化する。新しい対象と判断された場合は、ランダムな値で初期化する。また、intra-agent 制約違反の重みを大きくすることで、始めから intra-agent 制約違反の組合せに対する探索を行わないようにし、探索範囲を狭めた。全体のアルゴリズムは以下の様になる：

- (1) 変数の値を初期化する
- (2) 終了条件を満たしている場合は停止する
- (3) 新しい値が割り当てられた場合、現在の値の割り当てを近傍ノードへ送信する
- (4) 近傍エージェントからメッセージを受け取り、集計する
- (5) 集計した情報から、違反度が最小となる値 new_value と改善量 δ を求める
- (6) 改善量が正の値ならば確率 p_1 で、または改善量が負でかつ協調に関する制約 2,3 に対する違反があるなら確率 p_2 で値を更新する
- (7) 値を変更した場合、タブーリストへ変更前の値を書き込み、一定期間 (TABU.LEN) その値への遷移を禁止する
- (8) (2) へ戻る

6. 実験

実験環境として一つの部屋に 4 台のカメラを配置した。カメラは天井付近から部屋全体を見下ろし、視野を共有するように配置した。カメラノードの配置を図 6 に示す。追跡は静止物体と移動物体に対して行った。移動体の場合は、各時刻で観測情報のスナップショット

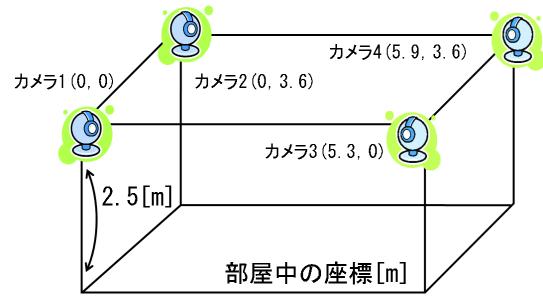


図 3 各カメラノードの配置

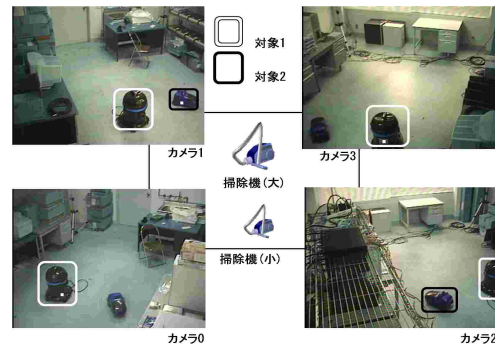


図 4 割り当て結果 (静止物体の観測)

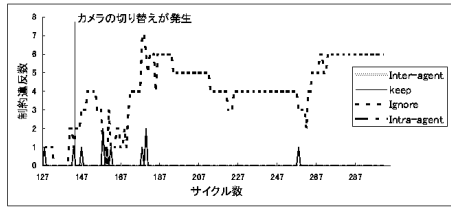
トを撮り、一時的に静止体とみなして制約網を作成する。また、対象はあらかじめ取得しておいた背景画像と差分をとり、閾値以上の差があれば対象物として切り出すものとした。対象の床面座標の推定においては、既知のカメラの座標およびカメラのパラメータを用いた。DSTS のパラメータである p_1 は 0.9、 p_2 は 0.5 とし、TABU リストに追加する期間は 1 サイクルとした。一般に、 p_1 の値が小さい場合は、局所解に陥りにくくなり、収束に時間がかかるようになる。また、 p_2 の値が大きくなると、局所解に陥った際に、別の解を探索しやすくなる。Tabu リストの大きさは、 p_2 による別解探索の距離を表している。今回の値は、予備実験の結果と収束速度を重視して決定した。

また、カメラノードは単一のホスト上に、分散環境をシミュレートするように実装した。また、カメラノード間の通信はメッセージ交換とした。

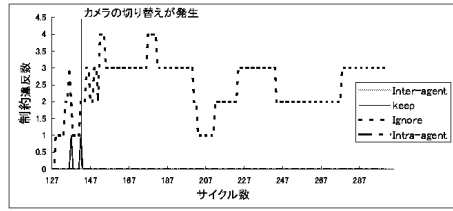
7. 実験結果

静止物体 2 つを観測した場合の実行結果を図 4 に示す。また、この場合の制約網と、求めた解の変数値を図 5 に示す。ただし、スペースの関係上 keep 制約は省略した。全てのカメラノードで対象 2 はカメラ 0 が、対象 1 はカメラ 1,2 が割り当てられていることがわかる。また、探索時間の平均は約 0.1 秒であり、実時間で対象の割り当てが行われた。

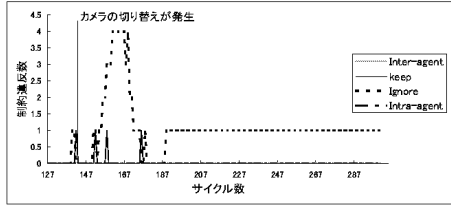
また、移動物体 2 つを観測した場合の違反度の変化を図 6 に示す。keep 制約に違反している 140 サイク



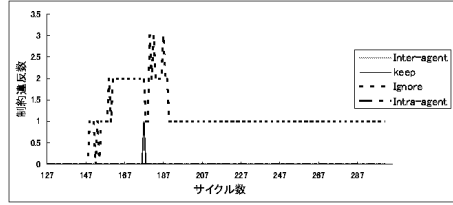
(a) Node0



(b) Node1



(c) Node2



(d) Node3

図 6 制約違反数の変化 (移動物体の観測)

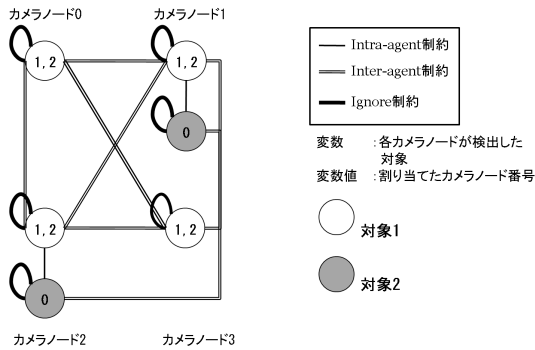


図 5 生成された制約網と解 (静止物体の観測)

ル付近などで追跡するカメラの切替えが起こっている。また、ignore 制約違反の数が比較的多く、減少していないように見える。これは、検出精度とノイズの影響で、偽の対象が多数検出され、追跡すべき対象が増加したためと考えられる。また、実行可能解の探索時間は 2.2 秒から 0.2 秒であった。一方で、各サイクルで協調に関する制約である intra-agent 制約、inter-agent 制約を全て満足する割り当てを発見している事が図 6 から確認でき、協調的に割り当てを決定していると言える。

8. ま と め

本研究では、複数のカメラノードからなる観測システムの観測対象への観測資源割当て処理を DCOP として定式化し、確率的な分散制約最適化手法である DSTS を適用してカメラ資源の割り当て問題を解決する手法を実装した。実験結果より、実時間での実行と、合理的な割り当ての両立が可能であるといえる。本研

究では、各々のエージェントがそれぞれ制約違反がないか協調してチェックしているが、各エージェント間に従属的で階層的な関係があれば、少数のエージェントが協調することで全体として整合性のとれた動作が可能であると考えられる。今後の課題としては、階層的な協調処理を行うことや、システムの大規模化のための検討、移動を考慮した制約網の作成、別の分散制約最適化手法の適用などが挙げられる。

参 考 文 献

- 1) A.Petcu: "A Framework for Distributed Constraint Optimization", *Technical Report (EPFL)* (2006).
- 2) 貝島浩次, 松井俊浩, 松尾啓志: "確率的な分散制約最適化手法を用いたセンサ網の資源割り当て手法の提案", *FIT2007*, pp.173-176 (2007).
- 3) Modi, P. J., Shen, W. M., Tambe, M., , Yokoo", M.: "ADOPT: Asynchronous Distributed Constraint Optimization with Quality Guarantees", *Artificial Intelligence*, Vol.161, pp. 149-180 (2006).
- 4) Petcu, A. and Faltings", B.: "DPOP: A Scalable Method for Multiagent Constraint Optimization", *IJCAI*, pp.266-271 (2005).
- 5) Zhang, W., Wang, G., Wittenburg", L.: "Distributed Stochastic Search for Constraint Satisfaction and Optimization", *AAAI-02 Workshop on Probabilistic Approaches in Search*, pp. 53-59 (2002).
- 6) "飯塚泰樹, 鈴木浩之": "Tabu Search を用いたマルチエージェント型分散制約充足手法の提案", "電子情報通信学会技術研究報告" (2006).