

協調プランニングにおける動的組織再編とメタレベル整合戦略 –追跡ゲームにおける考察–

大沢 英一* † ‡ §

本稿では、共通目標が動的に変化する環境でのマルチエージェントによる協調プランニングに関して、環境の変化に適応して動的に組織スキーマを再編しながら共通目標を達成する手法と、そのような動的組織再編を実現するためのメタレベル整合戦略(エージェント間で、どのような組織スキーマをとるかを決定するためのメタレベルの戦略)を提案し、追跡ゲームを用いてそれらの評価・考察を行なう。メタレベル整合戦略の設計に関しては、(1) 共通目標への接近度合の変化量、(2) エージェント間の共有知識量、そして、(3) 協調組織におけるエージェントの意思決定の自由度、の3つを考慮する。メタレベル整合戦略の概略は次のようになる。現在の組織スキーマによる協調プランニングで、ある定数ステップ以上の間、共通目標への距離が改良されない場合、その組織スキーマは有効でないと推定し、次に有効と思われる組織へと変更する。本稿の最後では、このメタレベル整合戦略に基づく動的組織再編による協調スキーマの限界性能について報告する。

1 はじめに

本稿では、共通目標が動的に変化 [9] する環境でのマルチエージェントによる協調プランニングに関して、環境の変化に適応して動的に組織スキーマを再編しながら共通目標を達成する手法

と、そのような動的再編組織を実現するためのメタレベル整合戦略(エージェント間で、どのような組織スキーマをとるかを決定するためのメタレベルの戦略)を提案し、追跡ゲームを用いてそれらの評価・考察を行なう。

共通目標を達成するためのマルチエージェントによる協調プランニングでは、各エージェントにおける適切な局所プランの生成と、それらの局所プランの大局的整合が要求される。特に、各エージェントのプラン生成と実行に対する問題空間の動特性(共通目標の変化する速度)が高い場合には、プランの生成と実行の小さなサイクルを繰り返す即応的な協調プランニングが要求される。なぜならば、そのような環境においては、生成にかなりの時間を要する複雑なプランを対象にすると、それを実行しようとした段階において、状況が変化していてプランの適用条件が未成立であるために実行できない、もしくは、そのプランがもはや有効ではない、などの状況が頻繁に生じるからである。

これまで、追跡ゲーム [1] などを基に即応的協調プランニングを達成するための様々なプランスキーマや組織スキーマが提案され、評価されてきた [1, 6, 2, 4, 3, 8, 7]。これまでの研究から、制御関係などが固定した組織よりも、交渉プロセスを基本にした柔軟な組織の方が共通目標を達成する確率において優れていることが知られている [6, 8]。また、さまざまな理由により問題空間の不確実度が高い場合は、問題空間の変化に適応して組織を動的に再編することが効率的に優れていることが報告されている [7]。このような動的組織再編が有効であるのは次のような理由による。

即応的協調プランニングにおける最終局面では、全てのエージェントが共通目標の近傍に集

* A Dynamic Re-Organization Scheme and Metalevel Coordination Strategy for Reactive Cooperative Planning –A Study on Pursuit Game–.

† Ei-Ichi Osawa, (株) ソニーコンピュータサイエンス研究所, Sony Computer Science Laboratory Inc.

‡ コンピュータソフトウェア, Vol.12, No.1(1995), pp.43–51.

§ 1994 年 5 月 12 日受付.

まる．共通目標の近傍では各局所プランが相互作用 (干渉) する可能性が高いために，精度の高い共通目標を効率よく達成するためには，エージェントの局所プランを大域的に¹ 整合させる必要が生じる．局所プランを整合させるためには，エージェント間で交渉を行ったり，いずれかのエージェントが制御を行ったりすることが考えられる．[7] で考察された動的組織再編では，共通目標の近傍で，特定のエージェントに制御を委ねた組織に切替えることにより，エージェントの自由度 (可能な局所プラン) を制限し，整合のための相互作用のオーバーヘッドを削減している．全てのエージェントが共通目標の近傍にいる局面では，共通目標を達成するための十分な情報が既に得られている場合が多いので，特定のエージェントに制御を委ねても効率が損なわれることは少ないと考えられた．

本稿では，このような動的組織再編による協調プランニングと，それを実現するためのメタレベル整合戦略を提案する．メタレベル整合戦略の設計に関しては，[7] での実験と考察に基づき，(1) 共通目標への接近度合の変化量，(2) エージェント間で共有される知識量，そして，(3) 協調組織におけるエージェントの意思決定の自由度，の3つを考慮する．メタレベル整合戦略の概略は次のようになる．現在の組織スキーマによる協調プランニングで，ある定数ステップ以上の間，共通目標への距離が改良されない場合，その組織スキーマは有効でないこと推定し，次に有効と思われる組織へと変更する．

本稿の構成は以下の通りである．第2章では，まず，評価環境として用いる追跡ゲームを説明し，関連研究についてまとめ，さらに動的組織再編の特性について述べる．その結果に基づいて，第3章ではメタレベル整合戦略について述べる．第4章では，各組織における局所プラン生成と整合のコストを考察し，達成可能な共通目標の変化率 (捕獲可能な獲物の最大移動速度) を求め，メタレベル整合戦略が有効となるための計算時間コストの上界を示す．第5章では結論を述べる．

¹ここでの大域的というのは，協調しているエージェントの組織全体に渡って，という意味である．

2 追跡ゲームと動的組織再編

本章では，まず，追跡ゲームを紹介する．次に，追跡ゲームに関するこれまでの研究を紹介する．最後に，本稿で議論するメタレベル整合戦略の基となった追跡ゲームにおける動的組織再編の実験結果と考察 [7] について要約する．

2.1 追跡ゲームとその背景

追跡ゲームは Benda らにより提案された [1] ．追跡ゲームでは，第??図のように無限に広がる2次元格子 (グリッド) 上に，4つの青いエージェント (捕獲エージェント) と1つの赤いエージェント (獲物) がいる．エージェント達は，2次元格子上を縦横方向に，一度に1グリッドずつ移動することができる．しばらく動かないでいることも可能である．また各エージェントの視界 (グリッド上で見える範囲) は限られている場合がある．この場合，獲得できる情報も限られてくる．ここで4つの捕獲エージェント達に与えられた使命は，なんとかして獲物を四方から取り囲む (捕捉する) ことである．

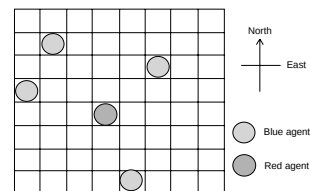


図 1: 追跡ゲーム

常に動作環境が変化するようなシステムにおいては，問題解決のための全体的な制御を行なうことが非常に困難である．このような環境で独立に動作するエージェントは，能力において限られており，世界に関する部分情報しか得ることができない．このような状況で，エージェントが，単独で解決できない問題に直面した時に，協調作業による解決が重要な意味を持ってくる．協調作業に関して考慮されるべき問題の一つは，エージェント間の相互作用の形態である．追跡ゲームは，このような背景の中で，エージェント間の組織的關係や通信が協調的作業に与える影響について調査することを目的として提案された．

2.2 関連研究

追跡ゲームに関する協調組織モデルの研究事例としては [1, 6, 2, 4, 3] などが知られている。以下では、本稿の内容と深く関係する [1, 6, 2] について述べる。

Bendaらのモデルでは、いくつかの2エージェント関係を基本的組織構造とし、それをもとに組織を構成する。Bendaらが定義している基本的組織構造は、通信、交渉、制御の各エージェント組織である。Bendaらはこのような2エージェント関係から構成できる様々な組織について実験を行ない、“システム全体として階層的な制御系統を持つ組織の方が、問題解決において優れている(少ないステップ数で獲物を獲得できる)”と結論付けている。彼らはその理由として階層的組織では通信量を十分削減できる点をあげている。

Stephensらは、Bendaらの定義した3つの基本的組織関係に、通信を行わないようなエージェント(自律エージェント)の組織を加えて実験を行なった。この結果として、

- 動的に変化する目標物に対する追従性に関しては、交渉し合う組織の方が階層的に制御する組織よりも優れている
- 完全に目的を遂行するためには、階層的に制御する組織が優れている

という結論を引き出している。この結論はBendaらのものと異なったものとなっているが、それはStephensらの採った評価方法がBendaらのものと異なることによる。Bendaらの実験で制御エージェント組織が良いとされた理由は、獲物を捕らえるまでに要した通信量が、他に比して少ないことにある。Stephensらは、これに対して、通信量²よりもむしろ、エージェントのヒューリスティック効率を考慮に入れた評価を行っている。ヒューリスティック効率は、急激に

²Stephensらの手法によると、各エージェントはまずローカルな黒板に(捕獲位置, コスト)の対をコスト順にソートして書きだし、この黒板上のデータを他の全てのエージェントに送る。後は、こうして集められたデータを元に、特定のアルゴリズムによって各エージェントに対して捕獲位置を割り当てる。このように、Stephensらの設定では、最初に共通知識を作り出すためにのみ通信が起こる。

取り囲むことができれば大きな値となり、なかなか取り囲むことができないと小さなものとなる。実際、Stephensらの実験においては、この効率において交渉エージェント組織は制御エージェント組織に勝つという結果が得られた。

以上の研究は固定したいくつかの組織スキーマに対する様々な評価であるが、Gasserらは、追跡ゲームを通して一般的協調機構モデルの考察を行なった。Gasserらは、まず、どのような問題解決が追跡問題において必要とされるのかを見るために問題分析を行ない、これが6フェーズからなっていると述べている。これらは、

1. 問題認識: 提示された獲物を発見する。
2. 同盟者を得る: 問題を解決するという約束のもとに捕獲エージェントのパートナーを集める。
3. 協調の枠組を形成する: 行為に対する期待と約束の集合及び不均衡の解消方法を例示する。
4. 中盤の問題解決: 問題状態を知られている解や割り当てられた“役割”に変換する。
5. 終盤の問題解決: 獲物をブロックするために、知られている文脈(例えば、下で述べるLieb configuration)中の小さな規則の集合に従う。
6. 終了: 最終的なブロックした状態(またはそれに到達できないこと)を認識する。

それぞれのフェーズは、現在のレベルの決定と行為のための文脈として、直前のフェーズで解決された課題を利用する。彼らはこれらの6フェーズが、数多く存在するマルチエージェント問題における解決過程というものを反映していると述べている。

また、Gasserらは終盤の問題解決において「4つの捕獲エージェントが“割り当てられた四分円(quadrant)”³から出ないようにして、獲物との距離を狭めることができるならば、かならず獲物を捕らえることができる」という事実があることに着目している。この事実に着目すると、捕獲エージェント達がゲームの終盤において解かねばならない問題は、“自分を含む4つのエー

³まず獲物を中心とする円を考え、獲物に対して前後左右に扇型ができるようにこれを分割する。前後左右はそれぞれ獲物が移動できる方向である。ここでいう四分円とは、このようにして作られた扇型を指している。

ジェントに対し四分円の割り当てを行なう”ことであり，次にこの“割り当てられた四分円から出ないようにして，その距離を狭める”ことである．この状況を，捕獲エージェント達が Lieb configuration にいるという (図 2 参照)．

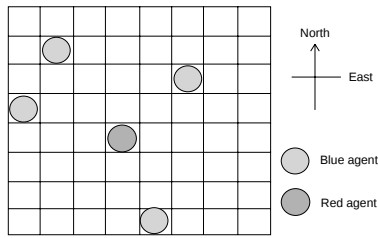


図 2: Lieb configuration の例

Gasser らのモデルは，問題解決の進行に伴い，組織のスキーマが変化するという意味で動的協調機構のモデルとなっている．しかしながら，モデルの提案だけにとどまっておらず，実験を通してのそのモデルの有効性や，評価結果などは報告されていない⁴．

2.3 動的組織再編とその特性

組織に基づく分散協調問題解決においては，大域解の精度と問題解決の効率の間のトレードオフを考慮して適応的に最良の組織形態をとることにより，さらに効率の良い問題解決組織を編成できることが予想される．一例として，初期局面においては各エージェントが自律的に局所的問題解決を行ない，最終局面に近づくにつれて大域的整合を考慮するといったような組織戦略が，効率の良い問題解決を与えてくれる場合があると予想される．大沢は [7] において，この予想を検証するために，追跡ゲームにおけるいくつかの基本的エージェント組織に関し，(1) 問題解決に関与する各種コストと問題空間の状態を観察し，さらに，(2) 問題解決の進行に伴う問題空間の変化に適応して動的に組織形態を変更することによる問題解決効率の改善について実験・評価した．

⁴Gasser らの研究では，協調問題解決における問題の認識や組織の形成 (パートナーの発見) という基本的側面に言及しているが，本稿で提案する手法においてはこれらのフェーズには言及しない．つまり，問題は設定されおらず，パートナーは最初から定義されていることとする．

実験環境として，Montgomery らにより開発された MICE[5] を用いた．まずはじめに実験の設定を列挙する．

- 30 × 30 のグリッドを用いる
- 全てのエージェントは 1 ステップに 1 動作 (上下左右 1 グリッドへの移動が可能)
- 獲物はランダムに逃げる
- 捕獲エージェントどうしは同一グリッドを占めることができる
- 捕獲エージェントの視界は制限されている⁵
- 自律，通信，交渉，制御の各エージェント組織は [6] に準ずる

以下では，自律，通信，交渉，制御の各エージェント組織の戦略を簡単に述べる．なお，捕獲エージェントの視界が制限されている場合，各捕獲エージェントは，その視界内にいる捕獲エージェントとだけ通信ができるものとする．

自律エージェント組織 捕獲エージェントは自分の現在位置と捕獲位置として選ばれた位置までの距離に基づいて動きを決める．捕獲位置としては，現在の捕獲エージェントと獲物の位置をもとに，最も距離の近い捕獲位置が選ばれる．この距離の計算は， A^* グラフ探索におけるヒューリスティック関数 $h(n)$ と同一のものである．捕獲位置に到達すると，捕獲エージェントは動かなくなる．獲物が視界内にない場合は，捕獲エージェントは現在のグリッドの近傍から同心円状に盤面を探索する．

通信エージェント組織 捕獲エージェントどうしは獲物の位置について通信することができる．

交渉エージェント組織 各捕獲エージェントはローカルに捕獲位置の優先リストを保持しており，これを毎ステップ更新する．優先リストは ((up 5.3) (left 6.0) (right 6.7) (down 7.2)) というデータ構造を持つ．これは獲物の上方隣接グリッドへの距離が 5.3 で最も

⁵視界範囲 (range) が r であるとは，捕獲エージェントの現在グリッド座標を (a, b) とすると，そのエージェントは $(a-r, b-r), (a-r, b+r), (a+r, b+r), (a+r, b-r)$ の 4 点で囲まれた範囲を見ることができることを意味する．

近く，続いて左方，右方，下方隣接グリッドの順に遠くなることを意味している．全ての捕獲エージェントは各ステップで自己の優先リストを他の3つの捕獲エージェントに送信する．優先リストの伝達が終了した後，それを基に次の動作を決める．先ず，各捕獲エージェントの第一捕獲位置候補への距離を比較し，それが最も遠いエージェントを優先する．その捕獲位置が確定したら，残りの捕獲エージェントは残りの捕獲位置に関して同様な戦略で捕獲位置を割り当てていく．

制御エージェント組織 4つの捕獲エージェントのうち1つが制御エージェントとなり他の3エージェントの動きを制御する．制御エージェントは Lie configuration[2] を実現し，維持するように他の捕獲エージェントの動作を決定する．

これらの組織に関して，以下の2種類の観察が行なわれた．

- 視界制限の捕獲過程に対する影響
- 通信コスト対移動コストの比率と総問題解決コストの関係

図3⁶は，自律エージェント組織と通信エージェント組織の視界の範囲 (range) を制限して，それにより囲い込み状況がどのように変化するかを示している．自律エージェント組織においては視界が制限されると，初期状態から最終局面付近への収束が非常に悪くなる．この実験での初期状態における4捕獲エージェントから最短捕獲位置への距離の平均は約4であるが，視界範囲がこの値よりも小さくなると，最終局面への収束が急激に悪くなる．特に初期局面における収束状態が非常に悪い．一方，視界制限を4としても通信エージェント組織の初期状態から最終局面への収束は非常に良い．また，この場合に獲物の現在位置を伝達するために行なわれた

⁶ 図の縦軸の enclosure distance (囲い込み接近距離) とは，各ステップにおける捕獲エージェントから獲物へのユークリッド距離の総和を，初期局面におけるそれで標準化したものである．距離として，ユークリッド距離と最大ノルム距離のいずれを採用しても性能的な差はないことが知られている [3] ．

通信も極わずかなもの (平均4通信単位) であった．しかしながら，最終的な捕獲には成功していない．

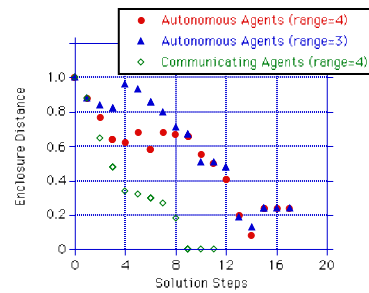


図 3: 視界制限による影響

また，図には示していないが，制御エージェント組織において視界制限がある場合，前者において制御を行なう捕獲エージェントは，環境に関する部分情報しか得られず，かつ環境が常に変化しているために，問題解決のための全体的な制御を行なうことが非常に困難となった．[6, 8] においても指摘されているように，制御エージェントの利点は，一つのエージェントが他の全ての動きを制御できるために，複雑な整合のための通信が不必要なことにある．しかしながら一方で，その組織は単一のエージェントの視点のみを反映しており，それが全ての捕獲エージェントの動きを決定してしまうので，交渉を通じてより良い可能性を見つけるという機会を逃してしまう可能性がある．

図4はエージェントの視界範囲を制限して，Communicating → Controlling Agents という動的再編組織 (ステップ8で組織を変更) と交渉エージェント組織の囲い込み状況がどのように変化するかを示している．この場合，視界範囲としては，初期状態における4捕獲エージェントから最短捕獲位置への距離の平均距離よりも大きな値を選んでいる．

追跡ゲームにおける自律 (もしくは通信) エージェント組織の囲い込み過程の観察から分ることは，複数の自律している (もしくは通信する) エージェントがある特定の捕獲位置を占有してしまうと，それ以降はもう改善⁷がなされないこ

⁷ 例えば，そのなかの1つのエージェントが他の捕獲位置を新たな目標とするということ．

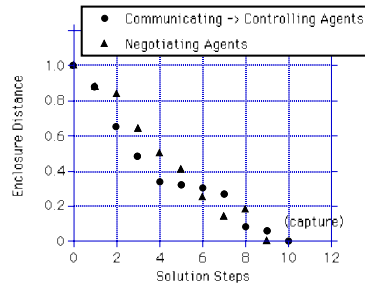


図 4: 視界制限による影響

とである。これは、自律 (もしくは通信) エージェント組織では各エージェントが局所的最適化を行なっていることから生じる。このような事情により、自律 (もしくは通信) エージェント組織が囲い込みに失敗する場合は、目標捕獲位置への距離の総和がある定数 (実験から得られた値は約 4 である) の近傍で定常化してしまう。よって、自律 (もしくは通信) エージェント組織による問題解決過程がこのような状況になった場合は、それを何らかの方法により検出し、他の組織に変更することが望ましい。その状態を検出し、組織を変更するための戦略が本稿で考察するメタレベル整合戦略である。そのような状態が検出できれば、自律 (もしくは通信) エージェント組織から制御エージェント組織に変更することにより、その後数ステップで捕獲に成功する (図 4 参照)。このように、問題空間の状況により、組織スキームを動的に変更することを動的組織再編と呼ぶことにする。

次に、問題解決のコストについてであるが、交渉エージェント組織と動的再編組織の総問題解決コストは、通信コストが無視できる場合は前者が優れているが、通信コストが移動コストに対して 10% 程度になると、ほぼコストが同等になり、それよりも比率が大きくなると交渉エージェント組織の総問題解決コストは急激に大きくなる (図 5 参照)。

動的再編組織が、コスト的に交渉エージェント組織よりも優れているのは次の理由による。一般に、協調問題解決における最終局面では、全てのエージェントが共通解の近傍に集まる。共通解の近傍では、精度の高い共通解を得るためにエージェントの局所解を整合させる必要が生

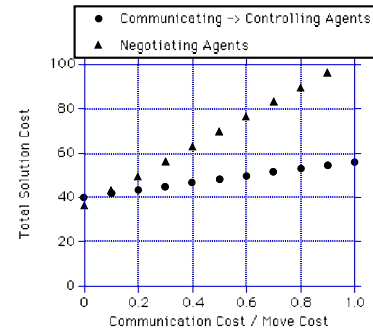


図 5: 通信コスト対移動コスト比率と総問題解決コスト

じる。局所解を整合させるためには、エージェント間で交渉を行ったり、いずれかのエージェントが制御を行ったりすることが考えられる。動的に再編した組織では、共通解の近傍で制御エージェント組織に切替えることにより、エージェントの自由度 (可能な局所解) を制限し、整合のための相互作用のオーバーヘッドを削減している。全てのエージェントが共通解の近傍にいる局面では、共通解を得るための十分な情報が既に得られている場合が多いので、特定のエージェントに制御を委ねても効率が損なわれることは少ないと考えられる。

3 メタレベル整合戦略

前章での考察を基に、メタレベル整合戦略を設計する上での重要な要因を挙げる。

共通目標への距離の定常化 ある組織が共通目標の達成に失敗する場合、その組織全体の共通目標への距離が特定の値で定常化する傾向がある。追跡ゲームにおいては、ある組織スキームが最終局面で獲物の捕獲に失敗する場合、各捕獲エージェントから獲物までの距離の総和が、特定の値の近傍で定常化する。このことは、その組織スキームではそれ以上、捕獲状況を改善できないことを意味する。

共有知識量 全てのエージェントが共通目標の近傍にいる局面では、共通目標を達成するための十分な情報を共有することが可能である。共通目標を達成する有効なプランを生

成するための情報がエージェント間で共有されている場合 (追跡ゲームにおいては、各捕獲エージェントが他の捕獲エージェントと獲物の現在位置を知っている場合) には、整合のためのオーバーヘッドの少ない制御戦略を利用することなどが可能となる。

自由度 共通目標達成への有効なプランがない場合は、各エージェントの局所プラン選択に自由度を与えて、可能な限り良い機会を発見することが重要である。逆に、共通目標を達成するための十分な共通情報が得られている場合は、各エージェントの自由度を制限することに整合のためのオーバーヘッドが削減できる。

前章の最後で述べた追跡ゲームに関する考察をもとに、上記の要素を用いると、メタレベル整合戦略の一般的枠組は次のように与えられる。

まずはじめに、追跡に用いる組織の候補を自由度の順に並べる。

[メタレベル整合戦略の一般的枠組]

1. 自由度が最も高い組織からスタート
2. 追跡を行なう
3. 共通目標の達成の判定
4. 共有知識を増加させる
5. 共通目標への距離の改善が見込めないようであれば、次に自由度の低い (つまり局所プランの整合にすぐれた) 組織へと変更し、2へ

追跡ゲームの場合におけるメタレベル整合戦略は以下のように与えられる。

まず、メタレベル整合戦略を記述するのに必要ないくつかの述語や変数を導入する。 $\mathcal{E}$ は、共通目標が達成された (追跡ゲームでは、捕獲エージェントが獲物を四方から取り囲んだ) 場合に真となる命題とする。1項述語 $\mathcal{V}$ は (獲物もしくは捕獲) エージェントを引数としてとり、それらが視界内に存在する場合に真となる述語とする。捕獲エージェントは、それぞれ B_1, B_2, B_3, B_4 で表し、獲物を R とする。 $d_i(B_j)$ をステップ i における捕獲エージェント B_j と獲物 R との距離とし、その全てのエージェントに対する総和を捕獲距

離 $D_i (= \sum_{j=1, \dots, 4} d_i(B_j))$ とする。また、前のステップの捕獲距離と現在のステップのそれとの差を捕獲距離差分 $\Delta_i (= D_{i-1} - D_i)$ とする。 S_k は1つの組織スキーマを表し、 $[S_0, S_1, \dots]$ は組織スキーマリストを表すこととする。但し、 $i < j$ であれば S_i は S_j よりも自由度が大きいとする。

[追跡ゲームにおけるメタレベル整合戦略] (B_1 について記述。他のエージェントの場合も同様。)

1. 追跡ステップ $i \leftarrow 0$, カウンタ $C \leftarrow 0$, $D_0 = \infty$, $\Delta_0 = \delta (\geq 0)$, 組織スキーマのインデックス $j \leftarrow 0$ とする。
2. $\mathcal{E}$ であれば、終了。
3. $\mathcal{V}(R) \wedge \mathcal{V}(B_2) \wedge \mathcal{V}(B_3) \wedge \mathcal{V}(B_4)$ が偽であれば、 S_j を実行し、 $D_i = \infty$, $i \leftarrow i + 1$ とし、2へ。
4. $\Delta_i \geq \delta$ であれば、 S_j を実行し、 $i \leftarrow i + 1$, $C \leftarrow 0$ として2へ。
5. $C \leftarrow C + 1$ とする。 $C < \tau$ であれば、 S_j を実行し、 $i \leftarrow i + 1$ とし、2へ。
6. $j \leftarrow j + 1$ とし、 S_j を実行し、 $i \leftarrow i + 1$, $C \leftarrow 0$ として2へ。

上の戦略において導入された定数 δ と τ について説明する。メタレベル整合戦略は、現在のステップにおける捕獲距離差分 Δ_i が δ よりも小さい場合、現在採用されている組織スキーマが有効でないと推定し、それが τ ステップ以上引続き起こった場合に、組織スキーマを次に自由度の低いものに変更する。

論文 [7] で考察された通信エージェント組織から制御エージェント組織への適応的組織を実現するためには、 S_0 を通信エージェント組織、 S_1 を制御エージェント組織とし、 $\delta = 0$, $\tau = 4$ とすればよい。

4 捕獲可能な獲物の最大移動速度

第2章で要約したように、[7] では、移動コストと通信コストの比率を基に、動的再編組織が交渉エージェント組織よりも有効であることが述べられた。この実験では、全てのエージェントは1ステップ内に次の移動目標の決定を行ない

1 動作を行なうことを仮定していた．追跡ゲームでは，捕獲エージェントの移動速度が獲物のそれを上回らなければ，最終的に獲物を捕獲することは保証されない（この証明は，石田による移動目標探索における完全性の証明 [9] と同様）．よって，追跡ゲームにおいては，捕獲エージェントの移動速度がより速くなれば，より速く移動する獲物を捕獲することが可能となる．捕獲エージェントの移動速度は，次の移動目標を決定することに消費される時間コストによって決定されと考えられる．以下では，まず，基本的ないくつかの組織スキーマに関して，それらが捕捉可能な獲物の最大移動速度を求め，それに基づいて，動的再編組織のメタレベル整合戦略のコスト限界について議論する．

4.1 基本的諸組織における捕獲可能な獲物の最大移動速度

まず，捕獲エージェントの動作決定に関する推論，通信などのコストを定める．各捕獲エージェントが，自己の現在位置と捕獲位置として選ばれた位置までの距離に基づいて自律的に動きを決定するのに要する推論時間コストを p とする．また，交渉や通信，そして制御のために行なう 1 単位通信のコストを c とする．なお，簡単のために通信コストはエージェント間の距離には依存しないこととする．さらに，第 2 章で述べた，交渉エージェントがローカルに保持している捕獲位置の優先リストから，自己の動作を決定するのに要する処理のコストを q とする．

これらのコスト定数から，第 2 章で述べた各基本エージェント組織の戦略をもとに，各ステップで次の動作を決定するのに要する 1 エージェント当たりの最大コストを求めると表 1 のようになる．

各捕獲エージェントにおいて，推論，通信，その他の処理が逐次的に行なわれ，かつ，上で導入したコストを時間コストと考えと，上記の各組織の処理コストの逆数が，その組織が捕獲することのできる獲物の最大移動速度となる．もしも，獲物がその速度以上で移動する場合，そのエージェント組織が獲物を捕獲できることは保証されない．

表 1: ステップ毎の 1 捕獲エージェント当たりの最大コスト

組織	処理コスト
自律エージェント	$C_{auto} = p$
通信エージェント	$C_{comm} = p + \alpha c$
交渉エージェント	$C_{nego} = p + 3c + q$
制御エージェント	$C_{cont} = 4p + 3c$

表 1 において，通信エージェントのコストの項で導入された定数 α は，1 ステップにおいて通信が行なわれる頻度を表している．実験から得られたこの値の平均値は約 0.4 である．また，実験から $q \approx 2p$ であることが分っている．よって，ステップ毎の 1 捕獲エージェント当たりの最大処理コストは，自律，通信，交渉，制御エージェント組織の順に大きくなっていることが分る．つまり，捕獲可能な獲物の最大移動速度はその順に小さくなる．

4.2 動的再編組織の有効性

表 1 より，通信エージェント組織におけるステップ毎の 1 捕獲エージェント当たりの最大処理コスト C_{comm} は，制御エージェント組織や交渉エージェント組織のそれに較べて比較的小さいことが分る．このことから，追跡ゲームにおいては，初期局面から最終局面までは通信エージェント組織を用い，最終局面において制御エージェント組織（もしくは交渉エージェント組織）に変更することが有効な手法であることが分る．

交渉エージェント組織は，獲物を捕獲する確率が高いが，その一方で，共通目標を達成するための全捕獲エージェントにおける問題解決総コストを考えた場合，通信コストが高い環境では，交渉エージェント組織は動的再編組織よりも効率が悪いことは第 2 章の最後でも述べた．交渉エージェント組織は整合をとるために頻繁に通信を行なうからである．

さらに，動的再編組織が捕獲可能な獲物の最大速度を，制御エージェントのそれと同等にするためには，通信エージェント組織の処理コストに

メタレベル整合戦略の平均計算コストを加えたものが制御エージェント組織の処理コストを超えないこと、つまり、メタレベル整合戦略の平均的計算時間コストが $C_{cont} - C_{comm} = 3p + 2.6c$ 以内である必要がある。

5 結論

追跡ゲームを基に、協調プランニングにおける動的組織再編と、それを実現するためのメタレベル整合戦略を提案した。また、動的組織再編が実時間性において有効となるための、メタレベル整合戦略の計算コストの上限を部分的に示した。

メタレベル整合戦略では、(1) 共通目標の接近度合の変化量、(2) エージェント間の共有知識量、そして、(3) 協調組織におけるエージェントの意思決定の自由度、の3つ要因が考慮される。メタレベル整合戦略の概略は次のようになる。現在の組織スキーマによる協調プランニングで、ある定数ステップ以上の間、共通目標への距離が改良されない場合、その組織スキーマは有効でないこと推定し、次に有効と思われる組織へと変更する。

動的再編組織において、メタレベル整合戦略の計算コストが、最も計算コストの高い組織の計算コストから次に計算コスト高い組織のそれを引いた値以下に抑えることができ、かつ、最も計算コストの高い組織の移動速度が、共通目標の変化速度よりも速ければ、その動的再編組織は共通目標を達成することが可能となる。

6 謝辞

本研究の機会をあたえて下さったソニーコンピュータサイエンス研究所の所真理雄副所長、および本研究に対して貴重な助言をいただいた同研究所の長尾確氏に感謝いたします。また、本稿の査読者の方々からは、内容や表記法に関する多くの有益なご指摘をいただきました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Benda, M., Jagannathan, V., and Dodhiawalla, R.: On Optimal Cooperation of Knowledge Sources, Technical Report BCS-G2010-28, Boeing AI Center, 1985.
- [2] Gasser, L., Rouquette, N., Hill, R. W., and Lieb, J.: Representing and Using Organizational Knowledge in Distributed AI Systems, *Distributed Artificial Intelligence, Volume II*(Gasser, L. and Huhns, M. N.(eds.)), Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1989, pp. 55-78.
- [3] Korf, R. E.: A Simple Solution to Pursuit Games, *Proceedings of the Eleventh International Workshop on Distributed Artificial Intelligence*, 1992.
- [4] Levy, R. and Rosenschein, J. S.: A Game Theoretic Approach to Distributed Artificial Intelligence, *Decentralized A.I. 3*(Werner, E. and Demazeau, Y.(eds.)), Elsevier/North Holland, 1992.
- [5] Montgomery, T. A., Lee, J., Musliner, D. J., and Durfee, E. H.: *MICE Users Guide*, 1992.
- [6] Stephens, L. M. and Merx, M.: Agent Organization as an Effector of DAI System Performance, *Proceedings of the Ninth Workshop on Distributed Artificial Intelligence*, 1989, pp. 263-292.
- [7] 大沢英一: 問題空間の変化に適應する協調的組織スキーマ - 追跡ゲームにおける考察 -, マルチエージェントと協調計算 II, 近代科学社, 1993. (第2回 JSSST マルチエージェントと協調計算ワークショップ MACC'92 論文選集).
- [8] 大沢英一, 沼岡千里, 石田亨: 分散人工知能における標準的小問題, コンピュータソフトウェア, Vol. 10, No. 3(1993), pp. 3-19.

- [9] 石田亨: 移動目標探索アルゴリズムとその性能改善, 人工知能学会誌, Vol. 8, No. 6(1993), pp. 66–74.