

分散人工知能

大沢英一，沼岡千里

ソニーコンピュータサイエンス研究所

概観

従来の人工知能が個の知能を解明し，また，それに基づくシステムを構築することに重点をおいているのに対して，分散人工知能 (以下，DAI と略す) では，人間の集団や社会などにみられる様々な知的な振舞いを生み出すメカニズムをモデル化し，また，それに基づいてアルゴリズムやシステムなどを構築することを目的としている。

DAI 研究が始まった背景には，分散センシング，ネットワーク管理，航空管制，協調ロボット，分散スケジューリングなどへの人工知能技術の応用があった。DAI 研究は，これらの応用分野における分散データの統合的解釈，タスクや資源の割り当て，そして，並列動作する複数システムの計画立案などを中心に行なわれてきた。さらに，コンピュータネットワークの発展により，複数の人工知能システムをネットワーク上で統合して利用するなどの動きとも合間って DAI 研究の重要性が増し，発展を続けてきている。

DAI の研究分野を分類すると，それは，(1) 並列/分散計算環境を基盤とした**分散問題解決**と呼ばれる分野と，(2) 人間の集団や社会をモデルとして，比較的小規模の知的な計算モジュールの集合が構成する分散システムを構築することを目的とする分野の二つに大きく分けることができる。後者における知的な計算モジュールは**エージェント**と呼ばれ，それが構成するシステムは

マルチエージェントシステム (MA システムと略す) と呼ばれる。以下の説明では便宜上，上記 (1) の領域における基本単位となる問題解決器もエージェントと呼ぶことにする。

ここで，DAI における研究課題を理解するために，典型的問題例の一つである追跡ゲーム (図 1) を取り上げる。

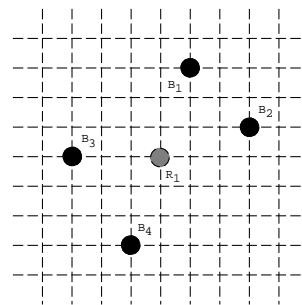


図 1: 追跡ゲーム

追跡ゲームでは，2次元格子に，四つの青エージェントと1つの赤エージェントがいる。エージェント達は，2次元格子を縦横方向に，一度に1マスずつ移動することができる。ここで四つの青エージェント達に与えられた使命は，なんとかして赤エージェントを四方から取り囲むことである。この際，青エージェント達は協力して赤エージェントを囲い込むことができる。この問題を青エージェント達の分散問題解決としてみた場合，(1) 各青エージェントが赤エージェントの動きをどう予測して追跡戦略を立てるか，(2) 他の青エージェントの追跡戦略をどの

ようにして知るか、(3) 他の青エージェントの追跡戦略と自己の戦略をどのように整合させるか、(4) 取り囲む効率をどのようにして向上させるか、などが問題となるであろう。

このように、分散問題解決や MA システムにおける基本的な研究課題としては、エージェントとそれらの相互作用のモデル化、相互作用に基づくさまざまな分散問題解決手法の考案とその特性の解明、効率の向上などが挙げられる。以下ではこれらについて概説する。

エージェントのモデル化

人工知能研究におけるエージェントに対する考え方には様々なものがある。その中でも特に重要な考え方の一つは「エージェントとは、その持つ基本意思決定原理に基づき自己の信念や興味(願望, 意図)に応じて行動するモジュールである」とするものである。エージェントの信念, 願望, そして意図に関する推論能力や行動規範をモデル化する場合の理論的基礎としては, Kripke によって提唱された可能世界意味論, Barwise と Perry によって提唱された状況意味論, および Von Neumann と Morgenstern によってその骨子が作られたゲーム理論などが挙げられる。実際, それらをベースとしたエージェント, および MA システムのモデル化が多く見受けられる。

エージェントの信念モデルの一例をみてみよう。Hintikka 流の認識論理 (epistemic logic) における一つの体系において, エージェント a が命題 p を信じるということを $B_a p$ と表現するとき, 以下の公理が一般になりつつ,

- A1. $B_a p \wedge B_a (p \supset q) \supset B_a q$
- A2. $B_a p \supset \neg B_a \neg p$
- A3. $B_a p \supset B_a B_a p$
- A4. $\neg B_a p \supset B_a \neg B_a p$

A3 と A4 は内省公理 (introspective axiom) と呼ばれており, それぞれ自分の知識ベースを調べることができ, 自分が何を知り何を知らないかを知っていることを表現している。A3 は正の内省公理, A4 は負の内省公理とそれぞれ呼ばれる。エージェントの信念モデルにおいては, 以下の推論規則が使われる。

- R1. もし $p \wedge (p \supset q)$ ならば q
- R2. もし p ならば $B_a p$

これらの命題と推論規則によって, エージェントは現在の信念をもとにして推論を行い, 行動するものと仮定される。

MA システムでは, 他のエージェントとの協調が必要とされ, このための手段として通信は必要不可欠である。MA システムでは, 各エージェントが環境から情報を獲得し, 行動によって環境に影響を与えることで処理が進行する (図 2)。

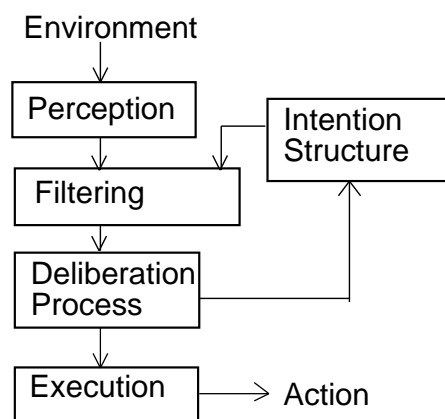


図 2: エージェントのアーキテクチャ

ここで, 環境には他のエージェントも含まれる。他のエージェントとの通信は, 情報伝達という側面において, 我々が日常の生活で用いる電子メールと類似しているし, また他のエージェントに指示を与えるという側面において, プロセス間通信におけるリモートプロシジャコール

やオブジェクト指向言語におけるメッセージ送信と類似している。また、エージェントをデータベースとしてみれば、データベースに対する問い合わせのような側面も持ち合わせている。

MAシステムにおける通信の研究においては、Austin や Searle による発話行為の理論に基づくモデルが一般に多く用いられる。彼らの理論は、もともと人間の発話が対象となっている。それにもかかわらず、MAシステムを人間の社会の簡略化された縮図として見ることにより、彼らの理論が利用可能である。Cohen と Perrault は、Austin や Searle による仕事を踏まえて、発話行為を計画立案の観点から再構築する仕事を行った。彼らの研究は、REQUEST と INFORM という発話行為のオペレータを用意することによって、複数のエージェントによる通信行為を含めた計画立案の方法の可能性を示唆するものである。

通信をするに当たって、他のエージェントのモデルを持つことは有益である。なぜなら、そのモデルを参照することによって、通信の結果予測される相手の行動や通信の必要性を判定できるからである。このようなモデルが、概観で述べた追跡ゲームにおいて、他の青いエージェントの動きを予測する上でも有益である。このモデルの中には、相手の能力、信念、状態といったものが含まれるべきである。相手をモデル化する方法はいくつか考えられる。一つは、利得最大化という考え方に基づいてモデル化するものである。二つめは、相手を有限状態オートマトンとして表現しようとするものである。相手の有限状態オートマトンがあらかじめ与えられる場合もあれば後天的に学習させるものもある。学習させる場合には、相手の行動パターンを観察することによって、オートマトンを形成する。三つめは、通信によって伝えられた信念を用いてモデル化するものである。

相互作用による分散問題解決

DAI 研究の初期から最も注目を集めている相互作用の一形態として協調が挙げられる。協調とは、複数のエージェントが共通の大域目標を達成する過程において、各エージェントが持つ個々の局所的戦略と共有目標達成のための大域的戦略を整合させる過程を指す。協調による問題解決手法の代表的なものとして、**黒板モデル**、**FA/C**、**契約ネット**、**マルチステージ交渉**などが挙げられる。各エージェントが独立の目標を持ち、共通の大域目標を持たない場合は、競合が生じることがあり、その場合は**競合解消**が必要となるであろう。協調と競合解消の両方を考慮した問題解決に関する研究は、主に**分散計画立案**や**交渉プロトコル**などを通して行なわれてきた。

黒板モデルは音声理解システム Hearsay-II で提案された協調問題解決手法である(図3)。黒

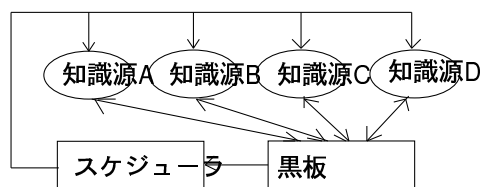


図 3: 黒板モデル

板モデルは、(1) 問題解決に必要な複数の異なる知識源、(2) 各知識源から得られる様々な仮説を格納するための黒板、そして、(3) 各知識源の実行を制御するスケジューラよりなる。黒板モデルでは、各知識源より得られた仮説とその信頼度を黒板に格納し、それらの比較により最も妥当と思われる解(音声理解においては解釈)を統合的に生成していく。

この黒板モデルは、その後に提案された**FA/C**(Functionally Accurate / Cooperative)と呼ばれる分散協調問題解決モデルの基となった。FA/Cでは、先ず、不十分な入力データを

基に各エージェントが独立に処理を行ない中間仮説を生成する。各エージェントはこの中間仮説を通信により交換しあって、相互に矛盾などが生じないように、より精度の高い仮説を生成していく。FA/Cでは、仮説の信頼性に対する通信コストと処理コストの間にトレードオフがあることが知られている。

契約ネットは、人間社会における契約入札の仕組みをもとにして、複雑なタスクを独立した個々のタスクに分割し、それらを複数のエージェントに割り当てるプロトコルである。契約の提案側をマネージャ、請負側を契約者と呼ぶ。契約ネットでは、先ずマネージャがタスクを提示する。次に、契約者(一般に複数)は、そのタスクを達成するための計画をマネージャに入札する。マネージャは、入札された複数の計画から最も適切なものを選択して、その計画の入札者に落札のメッセージを送信する。マネージャは、分割した部分タスクの結果を合成することにより最終的な解を得る。契約ネットでは、入札と落札が、それぞれ契約者とマネージャ独自の価値観に基づいて選択されることを許容しており、それを相互選択と呼ぶ。このような相互選択により、協調するエージェント間の交渉を実現している。

契約ネットでは、分割された部分タスクは異なる契約者により独立に達成されるとしている。部分タスク間に大域的制約が存在する場合の競合解消の手法として、**マルチステージ交渉**と呼ばれる手法が提案されている。マルチステージ交渉では、契約間に大域的制約がある場合、全ての契約間の制約が充足されるまで、何度も交渉が繰り返される。

さて、これまでは主に協調による分散問題解決の手法について述べてきた。以下では複数エージェントによる**分散計画立案**を通して、協調と競合解消の手法について述べる。

複数のエージェントが独立に生成したプラン

を同時に実行しようとする、異なるエージェントの計画の一部や、もしくは、全体が競合する場合がある。分散NOAHでは、連言的目標を分解し各部分目標を独立のエージェントに割り当て、それぞれの部分目標をさらに複数の部分目標に階層的に分解する過程で同期情報を抽出し、それに基づいてエージェント間の競合を回避する手法を提案している。

既に生成された複数の計画に含まれた競合する行為の同期をとることにより、競合解消を行なう手法も提案されている。この手法では、先ず各エージェントは独立に計画を生成し、次にこれらの計画を大局的スケジューラに伝達することにより各エージェントの意図(この場合、個々に生成した計画)を伝え、その後、大局的スケジューラがそれらの情報をもとに競合を解消する。具体的には、先ず、各エージェントの計画において競合する行為と競合の形態を解析し、次に、競合する部分に適当な同期行為を挿入することにより行なわれる。

また、単一エージェントでは不可能な目標を複数のエージェントで達成するための分散計画立案の手法として**共同計画生成**が提案されている。共同計画生成では、各エージェントが部分的(どのエージェントも環境に関する完全な知識や、その環境内で達成できる目標に対する完全な計画を持っていないこと)で相互に不整合な信念を有する可能性のある場合でも、機会に応じて共同の可能性を推定し、共同するための計画を整合的に生成する手法を提供する。

競合解消については、上で紹介した手法以外にも、先に述べたゲーム理論に基づく交渉プロトコルの研究が盛んになされており、これらの手法もたいへん有効である。