

マルチエージェントによる分散協調問題解決*

北村泰彦

大阪市立大学工学部情報工学科

kitamura@info.eng.osaka-cu.ac.jp

<http://www.kdel.info.eng.osaka-cu.ac.jp/kitamura/>

1.はじめに

このところ「エージェント」という言葉を盛んに耳にするようになった。具体的なアウトプットを期待しているというよりも、関心の方がむしろ先行しているように思える。本稿では、エージェントとは何かについて考えた後、分散協調問題解決の視点からエージェント技術についての解説を行う。また近年、産業界で注目されている Enterprise Integration へのエージェント技術の応用について紹介を行う。

2.エージェントとは何か

2.1.特徴

このところ「エージェント」という用語が様々な研究者によって、様々な場合に用いられており、いささが混乱気味である¹。ここではエージェントの厳密な定義というよりも、関連するキーワードとともに、その言葉に込められたエージェントに要求される性質をまとめてみたい。

- 自律性(autonomy)：エージェントは自律的なソフトウェアモジュールを指すことが多い。ここで自律性とは外面的には、「ある与えられた環境の中で他の介在を必要とせず存在できること」と定義できる。しばしば類似する概念であるオブジェクトとの違いを問われることが多いが、これに対して所²は、「オブジェクトが器官、細胞などの生物部品に対応する概念であるのに対して、エージェントは生物個体に対応する概念である」と述べている。部品は単体では存在できないが、その集合体である生物個体は単体で存在するわけである。また自律性は内面的には、「ある与えられた環境の中で他の指図なしにエージェントが自らの判断のみによりふるまうことができること」とも定義できる。ここでは他者の指図を全く受付ないという意味ではなく、判断の主体がエージェントにあることを意味している。環境が複雑にな

* TR96-2: 計測自動制御学会関西支部 30 周年記念講習会

ればそれだけ高度な判断が必要になり ,エージェントに知性(intelligence)や適応性(adaptability)が要求される .

- 相互作用性(interaction) : エージェントは環境に存在する他のエージェントと通信し , 相互作用することができる . エージェントは外部からのメッセージに対する自らの行動を調節する受動的なふるまいだけでなく , 外部に積極的に働きかけることもでき , 協調性(coordination)が要求される . またさらに , 他のエージェントと組織を構成して , 集団としてふるまうこともあり , そこにはエージェントの社会性(social ability)が要求される .
- 代行性(agency) : エージェントという言葉のもつ言語的な意味は「代理人」である . エージェントはその利用者である人間の代理人として , 利用者に接し , その命令や好みにしたがって行動することが要求される .

「エージェント」という言葉は以上の要求を一つ以上満たすものとして用いられている . さらに当然のことながら , マルチエージェントとは複数のエージェントから構成された分散システムを意味している .

2.2. 背景

近年 , マルチエージェントシステムが注目されるようになった背景について考えてみよう . やはり最も大きな要因は , パソコンとインターネットの普及により分散システムを支えるインフラが急速に整えられてきたことであろう . インターネットを基盤とした分散システムにはこれまでの分散システムにはない特徴があり , 従来の分散処理技術をそのまま用いることができない .

- ボトムアップ型情報ベース : インターネットにより構築される分散システムは地球規模で , 多種多数の情報ベースが相互接続されている . この分散システムは統一的な設計基準に基づきトップダウン的に構築されるのではなく , それぞれ個別に構築された情報ベースが次々と結合されてゆくことによりボトムアップ的に構築されてゆく . したがって局所情報ベースは個別に , また非同期に更新され , 局所的には正しくても , 全体的には整合性のない情報が存在することになる . このようなシステムに従来の中央集権的な視点を前提とした分散情報管理手法を用いることはできない . むしろ解決すべき問題に応じて , それぞれの情報ベース (エージェント) が自律的にふるまい , 必要に応じてその問題に関わるエージェント間で調整を図るような分権的な情報管理機構が望ましい .
- オープン環境 : インターネット上での電子取引などでは不特定多数の利用者がシステムにアクセスするようになる . このような取引を自動化する場合に

は、柔軟な交渉能力や様々な不正に対する頑健性を必要とする。従来の分散システムにおけるプロトコルは固定的なシステムにおいて固定的なメッセージのやりとりを扱う低レベルなものに限られていた。人間社会における様々な取引をベースするようなエージェント間プロトコル設計のための方法論が必要になる。

- 個別性：インターネットにより構築される分散システムには大量の情報が格納されているが、利用者の立場からすると必要な情報はそのごく一部であり、その要求は利用者毎に異なっている。したがって情報ベース側が利用者の要求にあわせた情報提供を行うには限度があり、利用者側で情報の取捨選択する機能が必要になる。そこでエージェントが代理人として、利用者の必要や好みに応じて、情報の検索、選択を行い、利用者に提供する機能が必要になる。

2.3.分類

現在のところ提案されているエージェントシステムはその機能の強調点に応じて大きく三つに分類できる。

- 問題解決エージェント：他のエージェントとの協調により問題を解決するエージェントである。分散協調問題解決やマルチエージェントシステムの分野で研究されているエージェントである。
- インタフェースエージェント：電子秘書のように利用者である人間をアシストするエージェントである。利用者の要求や好みに応じてネットワークにアクセスし、必要な情報を提供する。ソフトウェアエージェント、ネットワークエージェントと呼ばれることがある。またエージェントの臨在感を協調したビリーバブルエージェントもこの範疇に含まれる。
- モバイルエージェント：機動性のあるエージェントで、ネットワークを移動して必要な情報を収集する。Telescript エージェントが代表的である。実体は独立したシステムというよりもスクリプト言語とその実行環境である。

本稿ではこの中で分散協調問題解決における問題解決エージェントについて解説する。

3.分散協調問題解決

分散人工知能(Distributed Artificial Intelligence: DAI)は複数のエージェントから構成される組織におけるエージェント間の相互作用を研究の対象としている。AIが人間個人の知能をモデル化するのに対して、DAIは人間社会における相互作用

をモデル化する DAI におけるエージェントはその自律性と相互作用性が強調されている。DAI は大きく分散協調問題解決とマルチエージェントシステムの研究に分類される³。分散協調問題解決ではエージェント全体に共通の目標が存在することが前提とされ、エージェントの協力によりその目標を達成するための協調手法が主な研究の対象となる。一方で、マルチエージェントシステムはそれぞれのエージェントが個別の目標を有し、エージェント間で生じる競合を解消する調整手法が主な研究の対象となる。二つの研究分野を比較すれば、マルチエージェントシステムの方がよりオープンな環境を前提としているといえる。マルチエージェントシステムの解説に関しては他稿^{4,5}にゆずり、本稿では分散協調問題解決の技法に関して解説を行う。

3.1.分散協調問題解決の構造

分散協調問題解決は複数のエージェントによる協調的な問題解決であり、一般的な過程は以下の手順より成り立っている⁶。

1. 問題の割り当て：マネージャ（エージェント）に問題が与えられると部分問題に分割し、部分問題を適切なワーカーに割り当てる。
2. 問題の解決：ワーカーが部分問題を解決する。
3. 解の統合：各ワーカーで得られた解をマネージャが統合し、全体解を得る。

以上の過程は再帰的に実行されることもある。すなわち部分問題を割り当てられたワーカーエージェントはさらにそれを分割し、他のエージェントに割り当てることも可能である。また、対象とする問題によっては必ずしも三つの全てのステップを実行する必要のないものもある。例えば以下に示す二つの事例を考えてみよう。

- センサネットワーク：センサ（エージェント）が地理的に分散して配置されており、その中を航空機等の移動物体が通過する。エージェントは互いに情報交換して通過した物体の識別、進路、速度等を検出する。
- 工場スケジューリング：工場内に複数のロボット（エージェント）が存在し、工作専門あるいは運搬専門などそれぞれ専門分野が異なっている。エージェントが効率的に動作できるスケジュールを与え、目標（製品の生産）を達成する。

センサネットワークにおいてはエージェントがすでに配置されており、そのセンサ領域も決定されているので、エージェントが実行すべき部分問題（センサ

領域内の信号処理と解釈)はすでに自明となっている。そして問題解決の重要な点は各センサの情報を統合して、全体的な解釈を行う解統合の過程にある。次に、工場スケジューリングにおいてはロボット毎に目標を設定する必要があり、問題の割り当てが重要な課題となる。部分問題の解決がエージェント間の調整により適切に行われれば、解の統合は自明である。以上のことから分散協調問題解決のための推論方式は、問題解決と解統合を重視した結果共有(result sharing)方式と、問題の割り当てと解決を重視したタスク共有(task sharing)方式に分類することができる。

3.2. 結果共有方式

結果共有方式はボトムアップ型の問題解決手法である。各ワーカーは自らの知識を用いて問題の部分解となる仮説をマネージャに送る。マネージャはワーカーから送られてくる仮説を組み合わせることで全体解を構成する。しかしながら、ワーカーで得られる情報は局所的なものであり、また雑音などが混じり信頼度が低い場合もあり、仮説から全体解への導出は容易ではない。本節では、エージェントが互いの情報を参照しながら問題解決を進める黒板モデルとそれを分散化した分散型解釈モデル、局所的に得られる部分解の信頼度が低い場合においてエージェントの協調により信頼度を向上させる FA/C 手法、自律的に動作するエージェントがシステム全体として一貫性のある問題解決を行うための調整手法について紹介を行う。

3.2.1. 黒板モデル

分散協調問題解決における結果共有方式の基本となっているのは Hearsay-II 音声理解システム⁷に採用された黒板モデルである。黒板モデルは問題解決に必要な専門知識を記述した複数の知識源、知識源から得られる仮説を記述する共通データベースである黒板、スケジューラから構成されている(図 1参照)。それぞれの知識源は部分的な問題解決を行うことができ、黒板を通じて情報交換を行うことができる。知識源の動作は条件・行動という対で表すことができ、黒板に条件に適合する仮説が書き込まれると行動を引き起こし、黒板の仮説を更新する。黒板は階層的な構造をしており、最下位レベルに書き込まれた仮説が、知識源の操作により徐々に上位レベルの仮説に抽象化されてゆく。最上位レベルに仮説が書き込まれるとそれが解になるように設計されている。スケジューラは常に黒板の状況を監視し、仮説の信頼度をもとに各々の時点で適切な知識源の起動を行うようにスケジューリングを行っている。このような黒板モデルは、独立した複数の知識源が互いに協調して問題解決を行う協調型問題解決の一つの雛形を与えたといえる。

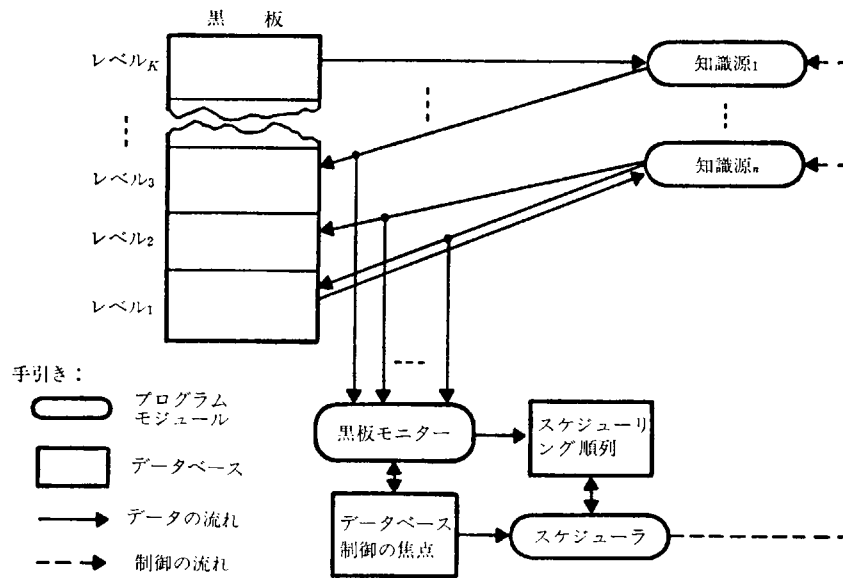


図 1：黑板モデル⁷

分散型解釈モデル⁸は複数の黑板システムを通信路で結合した分散型黑板モデルである。ノード^a間通信のために新たに、受信用知識源と送信用知識源が付加され、これら二種類の知識源と通信路を介して黑板間の仮説交換が行われる。各ノードは問題解決における受け持ち区域を表す関連域の情報を持っている。受信用知識源は通信路に流される情報のうち自ノードの関連域に含まれるもののみを選択して黑板に書き入れる。

さらに分散型解釈モデルを拡張した本格的な分散協調問題解決用実験ツールとして DVMT(Distributed Vehicle Monitoring Testbed)が開発された⁹。DVMT は一種のセンサネットワークであり、分散しているセンサからの情報をもとにその領域を移動する自動車などの物体の進路解析を行うシステムである。DVMT では各ノードの動作を調整するために新たに目標黑板が導入された。この DVMT 上で以下に述べる結果共有方式に関する様々な手法が提案され、評価された。

3.2.2.FA/C¹⁰

結果共有方式でまず問題になったのはノード間の通信量である。もし、曖昧な仮説が大量に存在する分散型解釈モデルで各ノードの黑板を無矛盾で完全なものにしようするならばそのために多量の通信が必要となる。Lesser はこのような従来の分散処理手法を completely accurate, nearly autonomous(CA/NA)法と呼んでいる。しかし分散型解釈モデルではこの条件を緩めて、たとえ各ノードの黑板間に部分的な矛盾が生じたとしてもノードが互いに協力することにより、正

^a Lesser らの研究ではエージェントのかわりにノードという用語が用いられている。

しい解を導き出せる手法として functionally accurate and cooperative(FA/C)法を提案した。すなわち，下位レベルの黑板では矛盾が存在するかもしれないが，中間レベルでデータ交換を行い，互いに修正することにより，上位レベルでは正しい解ができるようにしている。中間レベルでの仮説は抽象化がなされており，下位レベルでの仮説交換に比べ通信量が少なくすむ。FA/C法は不確定なデータの解釈を行う分散協調的解法の以後の研究のベースになっている¹¹。

3.2.3. 協調機構¹²

分散型解釈モデルではスケジューラはそれぞれのノードに分散して存在するので，各ノードの処理は冗長になったり不適切であったりすることが多くなる。そのためには各ノードの自律性は保ちつつも，システム全体で一貫性のある問題解決を行う必要が生じてきた。そこで，DurfeeらはDVMTシステムにおいて目標黑板を用いた制御機構を強化することにより，複数のノードが協調してより一貫性のある問題解決を行う調整機構を研究し，以下の三つの手法を提案した。

1. 組織構造(organizational structure)の利用：組織構造とはネットワーク全体における各ノードの役割，地位，行動の記述であり，DVMTでは各ノードの関連域に仮説や目標を送る時期や対象ノード，内部あるいは外部から得られる目標の選択法，目標の評価法を記述することにより実現している。このような組織構造を利用することにより，不適切なノード間通信が減少する。すなわち分散協調問題解決におけるノードの役割を明示的にすることによりシステムの一貫性を高めたといえる。ただし組織構造は静的な構造でしかなく，あるノードで局所的に生じた雑音の影響が他のノードに波及することを避けることができない。すなわち組織というのは固定的なものであるのでそれが不適切である場合には十分に機能しないということである。
2. 局所計画(planning)の利用：これは状況に応じた適切な知識源の起動の順序を記述した「計画」を利用することによって，各ノードで局所的に生じる雑音などの影響を減らそうとしたものである。計画をうまく利用するために各ノードの状況を適切に把握する必要がある。黑板に記述される仮説や目標を参照するにはその量が多すぎるので，それらの情報を圧縮したものとして新たに抽象化黑板が導入された。従って，このDVMTのスケジューラでは目標用黑板を用いた短期計画，抽象化黑板による中期計画，組織構造による長期計画をもとにそのノードにおける知識源の起動順序を決定している。以上の手法により，ノードの自律性が向上し，ノード内部における局所的な問題解決能力は大幅に改善された。しかし，ネットワーク全体でより一貫性のある

問題解決を行うためには局所的な問題解決能力の向上だけでなく、ノード間の協調処理が必要になる。

3. メタレベル通信(meta-level communication)の利用： ノード間の抽象化黑板の情報を互いに交換することにより、互いに他ノードの状況を把握しようとするものである。すなわちノードの自律性だけでなく、協調性が強化された。しかしながら、メタレベルの通信を多くすればするほどより協調的な問題解決が可能となるが、そのためのノード間の通信量が大きくなり、大規模なネットワークでは逆効果になってしまう。協調処理と通信量の減少とはトレードオフの関係であることが示された。

Durfee らは以上の協調機構を Partial Global Planning 機構として統一化を図った^{13,14}。

3.3.タスク共有方式

タスク共有方式では初期問題を分解し、部分問題を各エージェントに割り当て、それぞれのエージェントが部分問題を解決することにより全体的な問題解決が進められる。ここでの研究課題はいかにして部分問題を適切なエージェントに割り当てられるかという問題割り当てと、部分問題間での競合解消にある。本稿では問題割り当てのための代表的な手法として契約ネットプロトコル、競合解消の手法として分散制約充足について述べる。

3.3.1.契約ネットプロトコル^{15,16}

問題割り当てはオペレーションズリサーチや分散処理におけるスケジューリング技法や負荷分散技法との関連が深いが、一般にスケジューリング問題は計算量の面から、最適解を求めることが困難な NP 完全問題に分類される¹⁷。それに加えて、分散協調問題解決では以下に示すような不確実性がある。

- 割り当てるべき問題はあらかじめ明示的に与えられないかもしれない。すなわち問題解決の過程で問題が分割されてゆく場合には、あらかじめスケジュールすることが不可能である。
- それぞれのエージェントに関する完全な大局的情報を用いることはできない。すなわち、大局的情報を得るためには通信コストがかかる上、故障も含めてエージェントは非同期に動作するので完全な情報を持つことは不可能である。
- オープンな環境ではエージェントの関係は対等である。すなわち、あるエージェントが問題割り当てに関して、他のエージェントを完全に制御すること

ができない。

したがって、このような環境においては、動的な問題割り当てを行わなければならないが、分散問題解決の手法としては人間社会の交渉過程をメタファとした以下に示す契約ネットプロトコルが提案されている。

[契約ネットプロトコル]

Step1: 問題を持つエージェントはその問題を通知メッセージを用いて、他のエージェントに知らせる。

Step2: エージェントは受け取った通知メッセージの中から選択を行い、その解決コストを記述した入札メッセージを送り返す。

Step3: 入札メッセージを受け取ったエージェントは其中で、最もよいものを選択し、判定メッセージを用いて問題を入札したエージェントに割り当てる。

契約ネットプロトコルでは、エージェントが対等の立場で局所判断と相互選択に基づき、問題が割り当てられてゆく(契約が結ばれてゆく)。

3.3.2.分散制約充足¹⁸

複数のエージェントに割り当てられた部分問題が独立でない場合には、エージェント間で競合が生じる。横尾らはエージェント間での競合解消問題は分散制約充足問題として定式化した。分散制約充足問題の例を図 2 にあげよう。3つのエージェントが存在し、エージェントはそれぞれ変数 P_1, P_2, P_3 への値の割り当てをおこなう。ただし大局的な制約として、 $P_1 \leq P_3$, $P_2 \leq P_3$ という条件が与えられているとする。それぞれのエージェントが個別に変数を割り当てをおこなっては充足解が得られない場合がある。

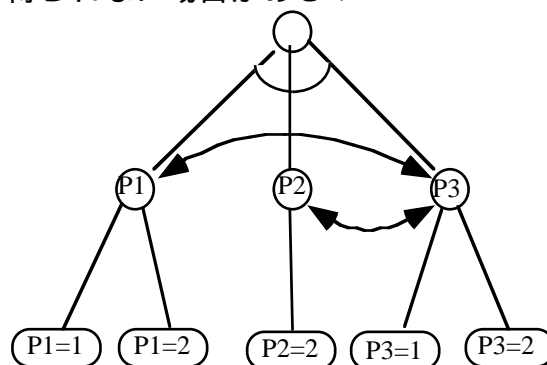


図 2 : 分散制約充足問題の例

この問題を解決するためのアルゴリズムの一つとして非同期バックトラックアルゴリズムが提案されている。

[非同期バックトラックアルゴリズム]

Step1: 各エージェントは自分の解を局所的に求める。

Step2: 大局的制約にかかわるエージェントは ID 番号の小さいものから大きいものへ、解を OK メッセージを用いて知らせる。

Step3: OK メッセージを受け取ったエージェントはその解を記録し、自分の解との無矛盾性を確認する。矛盾が存在すれば自分の解を他の可能な解に置き換え、その解を Step2 と同じように OK メッセージを用いて他のエージェントに知らせる。置き換えが不可能な場合は、そのエージェント以外の解集合を NOGOOD メッセージを用いて矛盾した解を持つ最も ID 番号の大きいエージェントに送る。

Step4: NOGOOD メッセージを受け取ったエージェントは無矛盾性の確認を Step3 と同様に行う。NOGOOD メッセージがそれ以上送れない状態になると解が存在せずに終了する。

以上のアルゴリズムではエージェントの全順序関係を示す ID 番号を用いることにより、エージェントの解が ID 番号の大きいものに集められてゆく。解に矛盾の存在する場合には NOGOOD メッセージが逆の方向に送られてゆくことにより、非同期バックトラックが行われ、アルゴリズムの完全性が保証される。

この手法はエージェント間の制約が密接になってくると制約を満たす解を求めるために必要な通信量が大きくなり、通信コストの大きい場合には性能が低下する。充足解を求めるためのもう一つの手法は一つのエージェントに情報を集中させて、そのエージェントにより充足解を求めようとする手法である。ただし、求解を集中的に行うことは、それだけ並列性が低下することでもあり、本手法において分散か集中かは通信オーバーヘッドと並列性のトレードオフの関係にあるといえる。

4. Enterprise Integration

4.1. CALS

CALS^bとはデジタル化された情報を組織間で共有し、企業活動全般の合理化、効率化を図ろうとするコンセプトとイニシアティブの総称である^{19,20}。デジタル化

^bCALS の語源は Computer Aided Logistic Support (全産業的電子取引システム)、Computer-aided Acquisition and Logistic Support (生産・調達・運用支援統合システム)、Computer Acquisition and Life-cycle Support (生産・調達・運用支援情報システム)、Commerce At Light Speed (継続的な調達と製品ライフサイクルの支援)というように時間とともに変化し、その概念自体拡大している。

された情報の活用により、コストダウン、品質向上、迅速生産などのメリットがあり、それは一組織にとどまらず、それに関わる全ての組織体に与えられることになる。この結果、全体として合理的で無駄のない企業統合(Enterprise Integration)が実現されることになる。

現在のところ、CALS 実現のためのインフラともいえる企業間情報の標準化に関する議論が多いが、本稿ではそのようなインフラが整備された上でのマルチエージェント技術の応用について University of Toronto の Mark Fox らによる Enterprise Integration に関する研究について紹介を行う。

4.2. Enterprise Integration²¹

情報通信技術をインフラとする今後の企業社会を生き抜いて行くためには、各企業は全世界を視野に入れた競争力が必要となる。将来的には、企業の競争力の基準となるものは、単に労働力や資本だけではなく、情報のアクセス能力と企業内の行動決定に関する調整能力になるという時代が来るであろう。従来の企業組織に関する基本的な考え方は階層構造であった。これにより管理職の負荷は軽減する反面、正しい情報を必要なときに得られなかったり、各部門間での調整も複雑になるといった組織の硬直性が問題になる。より柔軟な行動や意思決定を行うためには、組織は階層型から水平型へと構造変換する必要がある。各部門がタスクに関連する情報にアクセスでき、その行動が他の部門にどのように影響するかを理解し、組織の目標を最適化するような選択肢を選ぶことが重要になる。すなわち構成員の職階よりも個別の知識がより重要になる。このためには情報アクセス、意思決定支援、行動実行支援のための情報技術が重要になる。

企業における情報処理と通信技術は急速に進歩しているが、実際にはソフトウェアがそれに伴っていないのが現状である。個別の意思決定を支援するソフトウェアは大量にあるのだが、組織を越えた情報アクセスと意思決定を支援できるものが存在しない。エージェント技術は人と計算機を柔軟に統合し、大規模分散組織における情報の収集と分配、意思決定と行動の調整を支援することが期待できる。

4.3. Supply Chain Management²²

供給網管理は Enterprise Integration における典型的な具体例である。すなわち顧客からの受注、要求の分散、製造計画、資材調達、在庫管理、資材や製品の運搬などが密接に連携したネットワークを構成している。このような供給網においては各部門毎に様々な意思決定が必要になるが、それが企業全体としても統制の取れたものになっていなければならない。その意味からも供給網管理は本

来，集中化されているべきであるが，企業と市場のダイナミックスがこれを困難にしている．すなわち顧客からの注文の取り消し，製造機器の故障，資材コストの変動などにより，計画やスケジュールをその都度，変更しなければならない．以上のような予期しない外乱に対して迅速に対処してゆくためには，中央集権的な意思決定機構でなく，分散協調的な意思決定機構が望ましい．

Integrated Supply Chain Management (ISCM)プロジェクトでは複数の協調的エージェントによる供給網管理機構の実現を目指している．各エージェントは部分的な供給網管理を遂行し，関連するエージェントと調整しながら意思決定を行う．エージェントには機能エージェントと情報エージェントの2種類が存在し，機能エージェントが供給網の計画と制御，情報エージェントが情報と通信サービスの提供により機能エージェントを支援している．

本稿では以下，情報エージェントによる情報管理・提供機構，また制約充足に基づく機能エージェント間での調整機構について紹介する．

4.4.情報エージェントによる情報の管理と提供²³

情報エージェントはエージェント化された知識・データ管理システムであり，企業ネットワークを流れる情報に対して一貫性を保ちながら選択的なアクセスを利用者に許すものである．情報エージェントの機能には以下のものがある．

- 機能エージェント間で共有される情報の永続的保持機能
- 既存の情報と領域知識から新しい情報を推論できる演繹機能
- 時間に関する常識的表現と推論機能
- 協調的行動や問題解決に利用できる協調モデルの明示的表現機能
- 必要とするエージェントに対する内容指向情報配送機能
- エージェント間の信念の一貫性を保持するマルチエージェントの信念管理機能
- エージェントと組織のモデル化機能
- マルチエージェント環境における分散競合管理機能
- 情報の一貫性管理機構
- モデルの変化管理機構

本稿ではこの中からエージェント技術と特に関連の深い，内容指向情報配送と分散競合管理について述べる．

4.4.1.内容指向情報配送

内容指向情報配送機能は情報の内容とエージェントの興味に応じて情報を適切

なエージェントに配送する機能である。この機能実現のための必須の能力は、ある情報があるエージェントの興味を満たすかをいかにして判定するかというものである。情報エージェントではこれはサービスの分類と認識により実現されている。

情報を必要とするエージェントはその内容を subscribe メッセージを用いて情報エージェントに通知する。また情報を提供するエージェントはその内容を advertise メッセージを用いて情報エージェントに通知する。情報エージェントは情報提供エージェントから受け取った情報に対して、分類や推論をした後に必要とするエージェントに配送する。すなわち情報エージェントは情報配送に関してエージェント間の仲介を行うわけである。

ここで具体例を示そう。エージェント 1 は重量が 5000 グラム以上の部品に興味があるとし、そのことを subscribe メッセージを用いて情報エージェントに通知する。一方エージェント 2 は「部品 p-111 は c-12 と c-13 から組み立てられている。」、「部品 c-12 の重量は 2700 グラムである。」、「部品 c-13 の重量は 3400 グラムである。」という情報を情報エージェントに通知する。情報エージェントはエージェント 2 からの情報をもとに、「部品 p-111 の重量は 6100 グラムである」との推論を行う。そこでエージェント 1 に対して得られた情報を通知する。その後、エージェント 2 から「部品 c-12 の重量は 1000 グラムである。」という変更の通知を受け取ると、情報エージェントはエージェント 1 に対して先の情報が変更になったことを伝える。

以上のように情報エージェントは収集してきた情報に推論機能を用いて付加情報を得たうえで、その情報を必要とするエージェントに配送する。

4.4.2.分散競合管理

マルチエージェント推論システムにおいて、 $p \& q \Rightarrow false$ となるような矛盾はしばしば生じる。エージェントがそのような矛盾に遭遇した場合には p あるいは q を指示する信念を削除しなければならない。このような機能を実現するために信用度と削除コストに基づく手法が用いられている。

例えば、ある自動車会社において、販売部門エージェントはその売れ筋から「新車のエンジンは v6 型エンジンにする」という言明 A をしたとする。一方で設計部門エージェントは現場の判断で「新車のエンジンは 14 型エンジンにする」という言明 B をしたとする。これらの二つの言明は両立しない。情報エージェントは信用度(credibility)と削除可能度(deniability)をもとにこれらの言明のいずれかを選択する。信用度は言明を生み出したエージェントに関わることである。先の例における販売部門エージェントと設計部門エージェントとの比較では、車の製造に直接携わるという点において設計部門エージェントの信用度(言明 B)

の方が販売部門エージェントの信用度（言明 A）に優るであろう．一方，削除可能度は言明を利用するエージェントに関わることである．例えば，言明 B を先に得ていた資材調達部門エージェントが 14 型エンジンの外部調達を決定していたとする．このばあい言明 B の不採用は，外部調達のキャンセルを意味し，そのコストは大きく，削除可能度は言明 A に比べて低くなる．

4.5. 機能エージェント間での制約緩和

供給網管理においては機能エージェント間には様々な制約が存在し，それらを常に充足する必要がある．エージェント間の制約は制約グラフとして表すことができる．各エージェントには一つ以上のタスクが割り当てられており，タスクは制約に従う必要がある．したがって実行可能な制約グラフを見つけることが問題となる．しかしながら，あるイベントが生じると，もはや全ての制約を満たすことができない場合がある．その場合にはできるだけ全体に影響を与えないように制約を緩和する必要がある．制約緩和問題は過制約の制約グラフから修正コスト最小の実行可能な制約グラフを求める問題である．

Beck らは制約緩和問題に対して分散的な交渉アプローチではなく，むしろ集中的な調停(mediated)アプローチを採用している．ここで，運用管理エージェント L，資源管理エージェント RM，受注管理エージェント OA，3 台の工場エージェント（工作機械 M_{11} ， M_{12} をもつ F_1 ， M_{21} ， M_{22} をもつ F_2 ，工作機械 M_{31} ， M_{32} をもつ F_3 ）による制約緩和の例を示そう．三つの注文 O_1, O_2, O_3 があり，発注時刻は t_1 ，納期は t_3 である．工作機械のスケジュールは表のように与えられたとする．

表 1：工作機械スケジュール

Start Times	Machines					
	M_{11}	M_{12}	M_{21}	M_{22}	M_{31}	M_{32}
t_0		A_{11}				A_{13}
t_1	A_{31}	A_{12}	A_{22}		A_{21}	
t_2		A_{23}			A_{32}	
t_3			A_{33}			

時刻 t_1 に O_3 に関する A_{13} の作業を M_{12} で実行するように依頼があったとする．受注管理エージェントはそのような顧客からの要望を運用管理エージェントに伝える．運用管理エージェントは以下の二つの選択肢を得る．

1. 作業 A_{11} と A_{12} を他の機械に移動させる．
2. 製品の納期を延期する．

そして管理エージェントは以下のように，それぞれの選択肢に対してその評価

のための情報を他のエージェントから集める．1番目の選択肢に関しては，

- L から RM : M12 の代わりになる機械はあるか？
- RM から L : M22 が利用可能だ．しかし質は低下する．
- L から OA : 注文 O_1, O_2 で質を落とすとコストはどれくらいになるか？
- OA から L : それぞれ3だ．

また2番目の選択肢に関しては，

- L から OA : 各注文の納期を遅らせるコストはどれほどか？
- OA から L : O_1 に関しては，1日毎に5で，遅くとも t_0 までに．
- OA から L : O_2 に関しては，1日毎に5で，遅くとも t_0 までに．
- OA から L : O_3 に関しては，1日毎に2で，遅くとも t_0 までに．

以上のように制約グラフをもとに情報をあつめコスト最小の選択肢を選ぶ．

5.まとめ

本稿ではエージェントとは何かという問いに答えた後，マルチエージェントによる分散協調問題解決手法について代表的な研究事例を紹介し，Enterprise Integration への応用事例についての紹介を行った．4章での応用事例は必ずしも3章で紹介した自律分散的な手法をそのまま応用したものではない．むしろ集中的な問題解決手法を重視したオーソドックスなものとなっている．これは現時点における提供できる技術と要求される技術のギャップを示しているのかもしれない．しかしインターネットの普及とともに将来的にはオープン環境に適応できる情報処理システムの必要性は高まり，それとともに分散協調処理技術の重要性も高くなると予想される．

参考文献

- ¹ 石田亨：エージェントを考える，人工知能学会誌，10(5):663-667 (1995).
- ² 所真理雄：マルチエージェントシステム研究の目指すもの，コンピュータソフトウェア，12(1):78-84 (1995).
- ³ A.H. Bond and L. Gasser: An analysis of problems and research in distributed artificial intelligence, Readings in Distributed Artificial Intelligence, Morgan Kaufmann, pp.-35 (1988).
- ⁴ 桑原和宏,石田亨:分散人工知能(2):交渉と均衡化,人工知能学会誌 8(1):17-25 (1993).
- ⁵ 大沢英一：マルチエージェント環境における交渉のモデル，人工知能学会誌，10(5):690-696 (1995).
- ⁶ R.G. Smith and R. Davis: Framework for cooperation in distributed problem solving, IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-11(1):61-70 (1981).

- ⁷ L.D. Erman, F. Hayes-Roth, V.R. Lesser, and D.R. Reddy: Hearsay-II 音声認識システム : 不確実性の解決のための知識の統合 , bit 別冊コンピュータサイエンス , pp.53-91 , 共立出版 (1981).
- ⁸ V.R. Lesser and L.D. Erman: Distributed interpretation: a model and experiment, IEEE Transactions on Computers, C-29(12):1144-1163 (1980).
- ⁹ V.R. Lesser and D.D. Corkill: The distributed vehicle monitoring testbed: a tool for investigating distributed problem solving networks, The AI Magazine, Fall, 15-33, (1983).
- ¹⁰ V.R. Lesser and D.D. Corkill: Functionally accurate, cooperative distributed systems, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-11(1):81-96 (1981).
- ¹¹ V.R. Lesser: A Retrospective View of FA/C Distributed Problem Solving, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-21(6):1347-1362 (1991).
- ¹² E.H. Durfee, V.R. Lesser, and D.D. Corkill: Coherent cooperation among communicating problem solvers, IEEE Transactions on Computers, C-36(11):1275-1291 (1987).
- ¹³ E. H. Durfee and V.R. Lesser: Partial global planning: a coordination framework for distributed hypothesis formation, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-21(5):1167-1183 (1991).
- ¹⁴ E.H. Durfee: Coordination of Distributed Problem Solvers, Kluwer Academic Publishers (1988).
- ¹⁵ R.G. Smith: The contract net protocol: high-level communication and control in a distributed problem solver, IEEE Transactions on Computers, C-29(12):1104-1113 (1980).
- ¹⁶ R. Davis and R.G. Smith: Negotiation as a Metaphor for Distributed Problem Solving, Artificial Intelligence, 20:63-109 (1983).
- ¹⁷ 野下浩平他 : 基本的算法 , 岩波書店(1985).
- ¹⁸ 横尾真他 : 分散制約充足による分散協調問題解決の定式化とその解法 , 電子情報通信学会論文誌 , J75-D-I(8):704-713 (1992).
- ¹⁹ 後藤龍男 : CALS : 21 世紀における企業情報システムの国際標準確立と企業統合に向けて , 情報処理 , 36(1):1-7 (1995).
- ²⁰ 末松千尋 : CALS の世界 : 競争優位の最終兵器 , ダイアモンド社 (1995).
- ²¹ Mark S. Fox: 40 Month Progress Report NSERC Industrial Research Chair in Enterprise Integration, <http://www.ie.utoronto.ca/EIL/overview/overview.html>.
- ²² J. Christopher Beck and Mark S. Fox: Supply Chain Coordination via Mediated Constraint Relaxation, Proceeding of the First Workshop on Distributed Artificial Intelligence (1994).
- ²³ Mihai Barbuceanu and Mark S. Fox: The Information Agent: An Infrastructure for Collaboration in the Integrated Enterprise, Proceedings of CKBS94, 257-294 (1994).