

分散協調マルチエージェントシステム構築フレームワークとその評価

澤本 潤[†]、辻 秀一^{††}、小泉寿男^{†††}

[†]三菱電機株式会社

^{††}東海大学電子情報学部情報メディア学科

^{†††}東京電機大学理工学部

エージェントは、社会的な営みをネットワーク上で実現することが可能な自律性、社会性等をもったソフトウェアシステムとして研究開発成果が期待されている。しかしながら、エージェント技術の現状での研究は、特定の応用領域を対象にした研究が多く行われており、得られた結果が一般性に乏しく、既存の研究の枠組みが一般的には他の分野には適用しにくいといったレベルに留まっている。また、実用面でもシステムの開発方式の整備が不十分、実用問題への適用事例が少ないといった未成熟な状況であると考えられる。本研究では、こういった背景を踏まえ、まずエージェントによるアプリケーション構築基盤として、マルチエージェントによる協調問題解決方式の提示を行う。さらに、開発支援手法としてエージェントモデルとタスクモデルによるテンプレートを構築し利用する方式について述べ、計画問題やネットワークコミュニティ支援の分野での応用構築実験による有効性の検証について考察を行う。

Multi-Agent System Development Framework for Cooperative Problem Solving and its Evaluation

Jun Sawamoto[†], Hidekazu Tsuji^{††}, Hisao Koizumi^{†††}

[†]Mitsubishi Electric Corporation

^{††}Dept. of Information Media Technology, School of Information Technology and Electronics, Tokai University

^{†††}Dept. of Computers and Systems Engineering, Graduate School of Tokyo Denki University

The research and development results of agent technology are awaited as the software solution with autonomy and social ability, which can provide the way to realize social activities on the Internet. However, the current status of the agent research is that many researches are for a specific application domain and are lacking in generality, and it is hard to apply the framework of the existing research to other fields. Moreover, it is thought that practical usage of agent is in immature state that there are few practical application examples and the system development methodology is not sufficient. In this research, the cooperative problem solving system by the multi-agent is first shown as an application development framework by the agents. Then, we present usage of templates of the agent model and the task model as the development support technique. And the evaluation according to an application construction experiment in a planning problem or the field of network community support is discussed.

1. はじめに

コンピュータやデジタルネットワークの利用が広がり産業活動や生活の中に浸透してくるにつれ、高度なネットワークアプリケーションの実現が期待されている。企業などの組織内の知識を連携・協調させて柔軟な問題解決が行えるようなしくみや、ネットワーク上での人々の社会活動（協調、交渉、連携、仲介）を代行・支援し、ネットワーク社会での快適で効率的な生活を提供するしくみといったものが求められている。いわゆる分散処理システムによる協調問題解決型システムの重要性が増していると言える[1, 2]。

このような状況に対応して、アプリケーション構築の為のエージェントアーキテクチャとしてエージェン

トモデルや構築方法を開発し、実用レベルの評価を行いながら、アプリケーションの種類に対応した共通の構築基盤として整備していくことが求められている[3]。エージェント分散処理システムによる協調問題解決を行うことは、メッセージ通信機能等のプラットフォームの提供のみでは不十分であり、エージェント等の構成要素間の調整機能を提供するフレームワークやエージェントシステム開発のプロセスに対応した協調モデルが重要である[4, 5]。

しかしながら、エージェント技術研究の現状は、特定の応用領域を対象にした研究が多く行われており、得られた結果が一般的でなく、既存の研究の枠組みが他の分野に必ずしもそのまま適用されるものではない

といわれている [3]。

本研究では、マルチエージェントシステム構築基盤として、基本となるマルチエージェントによる協調問題解決フレームワークと、それらを用いたシステム構築手法を提案する。

分散システム構築のフレームワークとして、各エージェント間の問題解決手順に関する処理と、各エージェントでの内部処理を別け、前者をエージェントレベル、後者をタスクレベルとしてシステム構築を考える。さらに、エージェントレベルの典型モデルとしてエージェントシステム開発のプロセスに対応したトップダウンアプローチとボトムアップアプローチを対象にした協調問題解決の基本フレームワークを示す [9]。

マルチエージェントシステム構築手法としては、基本フレームワークにおける、エージェントモデルとタスクモデルの統合と各々のデザインパターンとしてのテンプレートを構築し利用する方法を支援する。

2. マルチエージェントによる協調問題解決フレームワーク

協調問題解決では、複数のエージェントが協力して組織を構成し、共通の目標を達成する。マルチエージェントによる協調問題解決フレームワークとして、エージェント間の協調的な問題解決手順に関する処理と、各エージェントにおける内部処理を分離して考える。前者をエージェントレベル、後者をタスクレベルとして考え効率的な分散システムの構築を可能にする。

本研究では、システム開発プロセスを考慮した開発支援が重要であると考え、典型的な問題解決プロセスとして、トップダウン的な分割・統合型エージェント方式とボトムアップ的な分散・連邦型エージェント方式を対象とする。前者では、事前に問題が与えられ、部分問題に分割された後、その部分問題に対して担当エージェントを設計する方式を取る。後者では、エージェントへの問題割当ては動的に行われる。

我々が提案するエージェントによる協調問題解決の基本フレームワークを図1に示す。

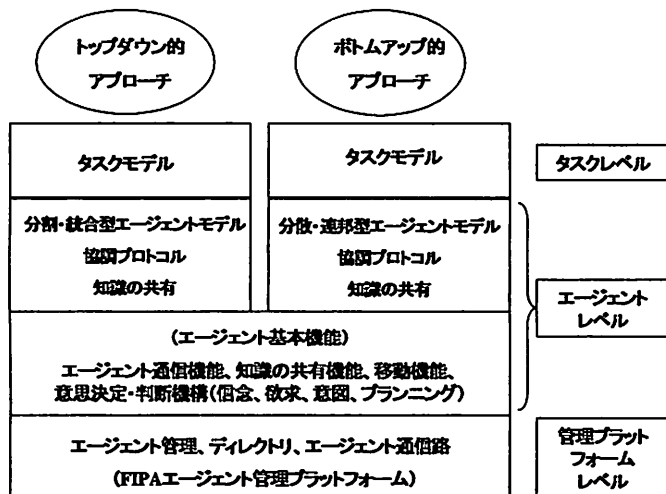


図1. 協調問題解決基本エージェントフレームワーク

基本フレームワークではタスクレベル、エージェントレベル、プラットフォームレベルの3階層構成とする。さらにエージェントレベルはエージェント基本機能の部分とエージェント方式に対応した部分の2階層で構成される。管理プラットフォームレベルは、FIPA [6] が提案する管理プラットフォーム機能であり、エージェント管理、ディレクトリ、エージェント通信路等の機能により構成される。

エージェント基本機能としては、共通的な機能の抽出を行い、エージェント通信機能、知識の共有化機能、移動機能、意思決定・判断機構を共通基盤ライブラリーとして持つものとする。意思決定機構は、内部機能として信念(状況に関する情報、知識)、意図(実行目標)、プランニング機能等を持つ。エージェントレベルのエージェント方式に対応した部分では、分割・統合型エージェント方式と分散・連邦型エージェント方式に対応したエージェントモデルに対応可能とする。タスクレベルでは、タスクオントロジーを考慮したタスクモデルに基づく問題解決構造とする。

3. マルチエージェントシステム構築手法

エージェントモデルとタスクモデルを統合したエージェントシステム構築の手法について述べる。

3.1 エージェント方式の開発

分割・統合型エージェントと分散・連邦型エージェントによる問題解決方式について述べる。

3.1.1 分割・統合型エージェント方式

大規模な設計、計画等の業務において複数の異なるレベルの知識を用いた問題解決モデルの設定、実用的な時間で制約を満たした許容解を導出する方式の確立、といった課題の解決を目指す。

(1) エージェントモデル

本方式では、与えられた問題は、分析・分割・整理により、いくつかの部分問題に分割される。そして、各部分問題を担当するいわゆるエージェント群をトップダウンに設計し、それらのエージェントを組み合わせることでエージェントシステムを実現する。図2に示すように、基本的なエージェント群は、複数の部分問題を解決する部分問題エージェント、全体解を統合する統合エージェント、各種の与えられた条件や制約等の

の管理を行う管理エージェントから構成される。また、マルチエージェント間協調プロトコルの汎用的な例を合わせて図2に示す。エージェント間には、「通知」、「依頼」、「拒否」、「問合せ」といったエージェント通信(ACL)に基づくメッセージ通信によって情報交換や協調動作を行う。

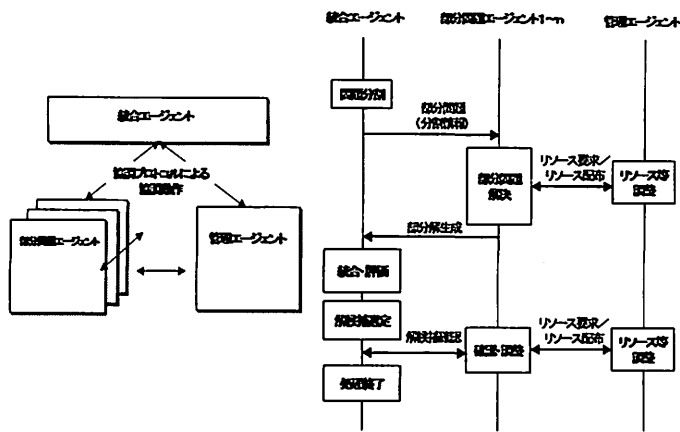


図2. 分割・統合型エージェント方式のエージェントモデルとマルチエージェント間協調プロトコル

(2) エージェントモデルとテンプレート

(1) で述べたエージェントモデルに基づくエージェントテンプレートの構築について述べる。分散・統合型エージェントの枠組みを適用したエージェントテンプレート階層を図3に示す。

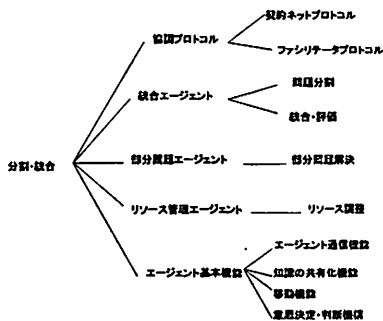


図3. エージェントテンプレートの階層 (一部)

テンプレートとして再利用を考慮して設計を行う。エージェントモデル設定の適否によりエージェントアプリケーション構築のやり易さが影響をうけると考えられるので使用による洗練が重要である。エージェントテンプレートの構築は、JAT (Java Agent Template)

[7] を参照し、そのクラスライブラリからプリミティブを抽出する。それらを機能ごとに組み合わせてテンプレートとして定義したものをエージェント方式に合わせてテンプレートライブラリとした。

3.1.2 分散・連邦型エージェント方式

分散・連邦型エージェントは、自律性の強い多数のエージェントが互いに協力し合い、ユーザのために様々な情報処理作業を代行していく環境を実現する。オープンなネットワークをベースにしたエージェント社会の実現には、既に存在しているエージェントの集団を組織化し問題解決に当たる事が重要になってくる。

(1) エージェントモデル

図4に示すように、フラットにエージェント群が集

団を形成する。エージェントは、情報と内部状態に応じてその時点での目標を決め、自律的にプランを生成して問題解決を行っていく。エージェントは、通常はネットワーク上の集団として構成される。集団を管理するエージェントが存在し、その働きによって緩く結合したコミュニティ的なものから、強い目的志向の集団まで特性が異なってくる。協調プロトコルとしては、例えば、管理エージェントを介した契約ネットプロトコルと呼ばれる、タスクの公開通知、応札、タスクの受託・実施、といった協調に基づくプロトコルを利用する。プロトコル例の概要を図5に示す。

(2) マルチエージェント間プロトコル

分散・連邦型マルチエージェント方式においては、例えば、管理エージェントを介した契約ネットプロトコルと呼ばれる、タスクの公開通知、応札、タスクの受託・実施、といった協調に基づくプロトコルを利用する。プロトコル例の概要を図5に示す。

(3) エージェントモデルとテンプレート

分散・連邦型の枠組みを適用したエージェントモデル階層を分割・統合型と同様の手順によりテンプレートライブラリとして準備する。計画実行システムにおけるマルチエージェント意思決定支援やコミュニティ形成支援の構築等への適用を対象とする。

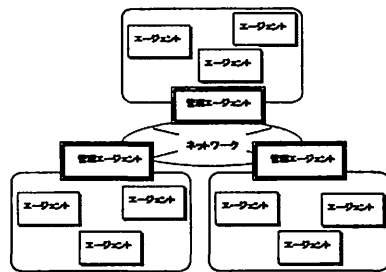


図4. 分散・連邦型エージェント方式のエージェントモデル

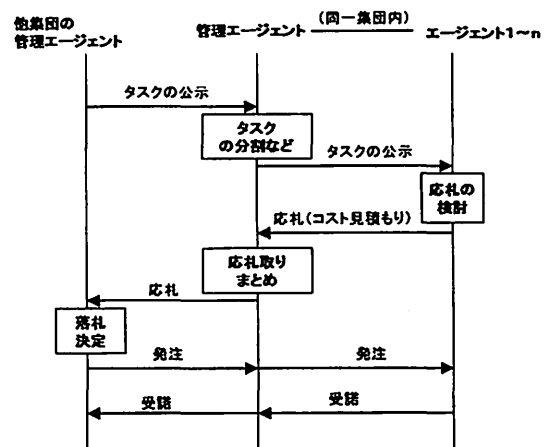


図5. マルチエージェント間プロトコル

3.2 タスクモデルとテンプレート

本研究では、エージェントシステム構築におけるタスクレベルのデザインパターンの利用を考え、タスクオントロジーの方式 [8] を導入することを考える。こ

れにより、再利用可能なライブラリを準備することにより、タスクレベルの抽象度を保ちつつ実装レベルの開発支援環境を提供することが可能となる。複雑で大規模な問題を解決するために、問題をサブ問題へと階層的に構造化することを考える。ここでの、タスクオントロジーは、問題解決のための知識を抽出し整理したものである。

3.3 エージェントとタスクの統合

タスクテンプレートの選択とエージェントテンプレートの選択によりシステムを構築する。エージェント方式によりその手順は異なってくる。以下に其々の手順について示す。

- (1) トップダウン的な分割・統合方式
 - ① 対象ドメインおよびタスクの分析
 - ② タスクテンプレートの選択とタスクモデルの詳細化
 - ③ タスクをエージェントに割振ることによるエージェント機能の定式化とエージェントテンプレートの選択およびエージェントモデルの詳細化
- (2) ボトムアップ的な分散・連邦方式
 - ① 対象ドメインの分析
 - ② マクロなエージェント構成（ファシリテータ、交渉モデル、コミュニティモデルなど）をエージェントテンプレートの選択により詳細化
 - ③ 対象タスクの分析
 - ④ タスクテンプレートの選択とタスクモデルの詳細化
 - ⑤ マクロなエージェント構成に応じたタスクのエージェントへの割振り
 - ⑥ エージェントモデルの詳細化

エージェントモデルとタスクモデルを階層的に配置し、それらを統合していくことによりシステムを構築していく。トップダウン的には、タスクをエージェントに割振ることになる。ボトムアップ的には、予め用意されたエージェント構成においてエージェント自らが与えられたタスクを交渉等により配分することにより問題解決を行っていく。

4. システムの構築と評価

4.1 分割・統合型エージェントによる物流配送計画支援システムの構築

配送計画問題を対象として、提案手法のメリットについて考察する。配送計画問題の典型的モデルを図5に示す[10]。

(1) 検証事例の設定

配送計画が解決しようとする問題は、複数のトラックが配送センターから多数の届先に荷物を届ける場合、乗務員、配車の割当、配送ルート選択等の計画を配送コストを考慮しながら立案する。評価パラメータは、乗務員と車両のコスト、乗務員の作業量の平均度、配送期限に対する余裕度とした。

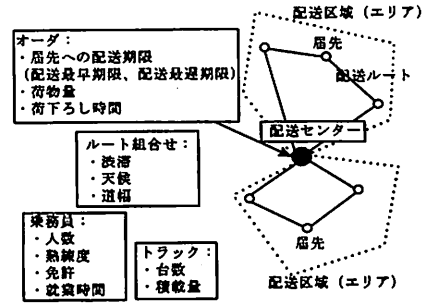


図5. 配送計画問題のモデル

配送対象地域を幾つかの配送区域に分割して考える。配送区域毎の問題解決エージェントと全体解の統合・評価を行うエージェント、乗務員・車両といったリソース管理を行うエージェントから構成される。

(2) 各エージェント間の相互作用プロセスの記述

図6に統合エージェントにおけるタスクと協調プロトコルの分離の例を示す。統合エージェントのタスクは、問題分割、統合・評価、解候補選定等である。統合エージェントと他のエージェントとの協調プロトコルは、inform, request, agree といった ACL プリミティブにより構成される。

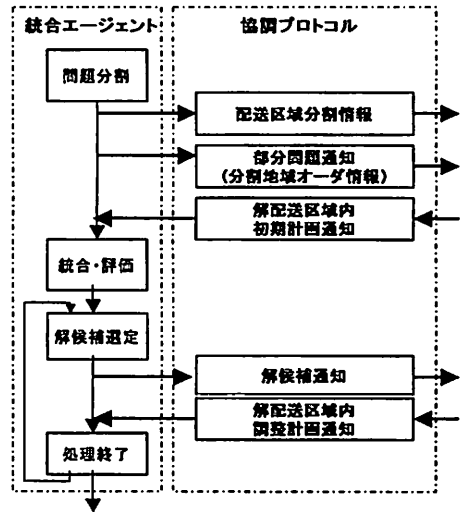


図6. 統合エージェントにおけるタスクと協調プロトコルの分離

(3) タスクテンプレートによるエージェント内部処理構成

統合エージェントにおける評価タスクを事例として示す。評価タスクは、各部分問題エージェントより通知された配送区域内ルート組合せによって、全配送区域のルート組合せを矛盾なく管理する。組合せを管理する為、一般的な選択木をデータ構造とする評価選択タスクを利用する。図7に今回の評価選択タスクテンプレートの例を示す。

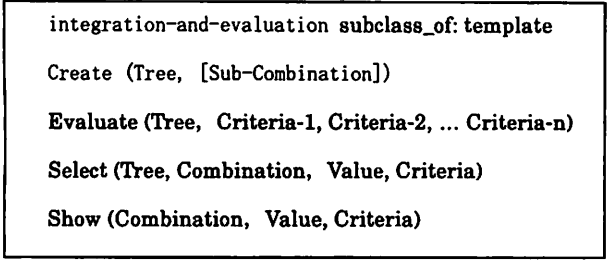


図 7. 評価選択タスクテンプレートの例

(4) 評価と考察

配送計画支援では、トップダウンの分割・統合型エージェント方式という枠組みを用いることにより、配送オーダー、乗務員、車両、道路情報等属性情報や各種制約条件を考慮した支援システムが構築できた。複数のエージェントによる配送計画支援のような制約充足問題では、エージェント間の協調プロトコルが問題対応に多様であり通信量等の効率を考えた設定は従来から課題であった。我々の手法では、幾つかの典型パターンをテンプレート化して利用することを提案しているが、エージェントテンプレートの利用率は他のテンプレートと比較して約 1/2 (40%→20%) 程度と低かった。したがって、協調プロトコルに関するエージェントモデルの検討がさらに必要である。

4.2 分散・連邦型エージェントによるコミュニティ形成支援システムの構築

ネットワーク社会において趣味などのサークル集団の形成をマルチエージェントによりモデル化し、ネットワークコミュニティの形成を支援するシステムを構築する。マルチエージェントを用いてサークル集団の形成をおこない、利用者にコミュニケーションの場を提供することにより、自分の欲しい情報の容易な取得などを支援する[11]。

(1) 検証事例の設定

ユーザは自分の代理人となるエージェントに自分の個人情報を主観情報としてあたえる。エージェントは、他のユーザの代理人であるエージェントと主観情報などをもとに相互作用し、コミュニティの形成を行う。こういったコミュニティ形成支援のエージェントモデルを分散・連邦型エージェント方式のエージェント構成に従って作成した (図 8)。

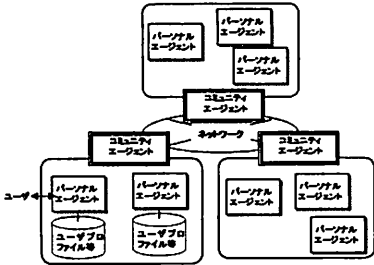


図 8. コミュニティのエージェントモデル
パーソナルエージェント (PA) は、コミュニティに

参加するユーザを代理する。ユーザの個人情報を管理し、ユーザの代行で他の PA やコミュニティエージェント (CA) と相互の情報交換、交渉を行う。同時にユーザとのやり取りを行いながらユーザの最大満足度を追求する。ユーザの個人情報を反映したコミュニティの形成により評価実験を行う。

(2) 各エージェント間の相互作用プロセスの記述

コミュニティエージェントとパーソナルエージェントにおけるタスクと協調プロトコルのシーケンスを図 9 に示す。

(3) 評価と考察

コミュニティ形成支援では、マルチエージェントによる主観情報を取り入れたコミュニティ形成支援システムの構築確認が出来た。今回対象としたコミュニティ形成はパーソナルエージェントが 100、コミュニティが 5 程度の規模であった。一方、インターネット上でのマッチング問題では、その 10 倍から 100 倍程度の規模を対象とする場合があり、さらに規模を拡大した評価が必要である。

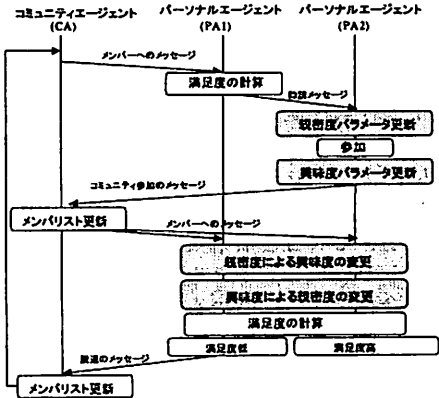


図 9. エージェント間の協調プロトコル

4.3 結果と考察

前章で述べた分割・統合型エージェント方式による配送計画支援システムの構築と分散・連邦型エージェント方式によるコミュニティ形成支援システムの構築による検証実験に基づき評価と考察を行う。

本論文では、エージェントによる問題解決の基本モデルを考えることにより、問題解決におけるエージェントの役割・機能を明確化した。モデルの役割が明確になりシステムがシンプル化し、変更に対しても強くなると考えられる。分割・統合型方式ではエージェントのオブジェクト的機能が有効であり、分散・連邦型方式ではエージェントの分散・自律的機能が有効であると思われる。このように、エージェントには広範囲の役割・機能を持たせることができる。問題の設定により問題解決方式を選択可能とすることにより、エージェントによる目的システムの構築を容易にする。

配送計画支援問題やネットワークコミュニティ支援の分野での応用構築実験により、方式の評価を行い有効性を確認した。

(1) 構築基盤の評価

配送計画支援システムでは、トップダウンフレームワークの分割・統合型エージェント方式という枠組みを用いることにより、配送オーダー、乗務員、車両、道路情報等に関する実用レベルでの属性情報や各種制約条件を考慮した支援システムが構築できた。コミュニティ形成支援では、マルチエージェントによる主観情報を取り入れたコミュニティ形成支援システムの構築確認が出来た。以下に課題と対応について述べる。

複数のエージェントが協調しながら配送計画支援のような制約充足問題、コミュニティ形成のようなマッチング問題等に対応していく場合、エージェント間の協調プロトコルが問題対応に多様であり通信量等の効率を考えた設定は従来から課題であった。協調プロトコルに関するモデルの検討がさらに必要である。

システムの構築にはオントロジなどの知識ベースの開発に膨大な時間が掛かる為、広く再利用できるオントロジーベースの仕組みが必要である。

(2) テンプレート利用の評価

本稿の提案は、エージェントテンプレートとタスクテンプレートの使用により、システム構築の効率化を目指すものである。これは、テンプレートの蓄積による対象とする領域のカバー率/再利用率、蓄積されたテンプレートの検索性能、個々の問題に合わせたテンプレートの修正の手間、といった観点の評価が必要である。一般に、テンプレートの粒度が大きくなると再利用率が低くなり、修正率が高くなると考えられる。逆に、粒度が小さくなると検索負荷が増加すると考えられる。これらのトレードオフを考慮したテンプレートの設計へと検討をさらに進める必要があると考える。

テンプレート利用によりシステム構築の効率化が図れるが、その反面、例えば連邦型エージェント方式によるコミュニティ形成では、エージェントのパーソナル履歴やユーザの反応に基づくパーソナライズが不十分になるといった課題が認識された。パーソナルエージェントやインターフェースエージェントのテンプレート設計に反映させていく。

エージェントテンプレートは、部分問題エージェントやパーソナルエージェントのように多数の同一エージェントの生成と実行に拡張性の点で有効であった。タスクテンプレートについて同様の評価を得ている。

(3) エージェントレベル、タスクレベル分けの評価

いわゆるエージェントラッパーの構成に類似性があると考えられるが、エージェントレベルとタスクレベルをより緊密に統合したものであり、新規のエージェントシステム構築の手法を与えるものである。

エージェントとタスクにレベル分けすることにより、問題の一部変更に対する柔軟性の向上が見られる。例えば、タスクレベルのアルゴリズムの変更は、ほとんどエージェントレベルの協調プロトコルの変更無く実施できる。逆に、エージェントの追加による外部環境の変更に対しても、エージェントの役割が変更なければ内部的なタスクの変更は行わずに済む。さらに、利用知識の洗練化の方策としてはドメインモデルの導入が今後考えられる。

5. まとめ

本研究では、基本となるマルチエージェントによる協調問題解決フレームワークと、それらを用いたシステム構築手法を含むマルチエージェントシステム構築基盤を提案した。基本となる問題解決フレームワークの上に、エージェントレベルの典型モデルとしてエージェントシステム開発のプロセスに対応したトップダウンアプローチ（分割・統合型）とボトムアップアプローチ（分散・連邦型）を導入した。問題解決方式に対応したシステム開発支援手法を考えることにより、より効率的なエージェントシステム開発支援が行えることを示した。開発支援手法としてエージェントモデルとタスクモデルによるテンプレートを構築し利用する方式について検討しその統合方式について述べた。

引き続き、エージェントによる支援技術の開発を進めていくことにより、ネットワークサービスのための問題解決方式の研究を進める。

参考文献

- [1] T. Ishida et al., Digital City Kyoto, "Towards a social information infrastructure," In Proc. CIA-99, LNAI 1652, (Springer, 1999).
- [2] 西田豊明 編 エージェントと創るインタラクティブネットワーク、倍風館 2003.
- [3] N. Jennings, "On agent-based software engineering," Artif. Intell., vol.117, no.2, pp.277-296, Elsevier, 2000.
- [4] C. A. Iglesias, M. Garijo, J. C. Gonzalez, J. R. Velasco, "Analysis and Design of Multiagent System using MAS-CommonKADS," Proc. ATAL'97, 1997.
- [5] Y. Adior, D.B. Lange, "Agent design patterns: Element of agent application design," Proc. Autonomous Agents'98, pp.108-115, 1998.
- [6] FIPA(Foundation for Intelligent Physical Agents): <http://www.fipa.org/>.
- [7] <http://java.stanford.edu/>
- [8] 和泉 憲明, 山口 高平, "オントロジーに基づくソフトウェアエージェントのパターン指向開発," 信学論 Vol.J84-D1 No.8, pp.1181-1190, 2001.
- [9] 澤本 潤, 辻 秀一, 小泉寿男, 協調問題解決型マルチエージェントシステム構築基盤とその評価、情報処理学会 研究報告「グループウェアとネットワークサービス」 IPSJ-GN-50-4, Jan.2004.
- [10] 澤本 潤, 辻 秀一, 徳永寿郎, 小泉寿男: 「分散協調による配送計画問題解決方式の提案とその実現法」, 電学論 C, Vol117, No7, pp.896-906(1997).
- [11] Jun Sawamoto, Kei Mutoh, Hidekazu Tsuji, Hisao Koizumi, Evaluation of Multi-Agent Model for Community Formation in Network Society, The International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA), FIT, Fukuoka, Japan, March 29- March 31, pp.131-136, 2004.