

エージェント組織の分散信念管理の適応的統合 —都市高速道路交通管制テストベッドによる実験—

渥美雅保

創価大学工学部情報システム学科

複数の相互干渉する問題が発生・変化・消滅する動的で予測不能な環境において、エージェント組織が、エージェント間の共有信念の整合性を維持して合理的に協調問題解決を遂行するための適応的分散信念管理システムについて述べる。本分散信念管理システムは、動的に編成されるエージェント間統合関係とタスクの優先度評価に基づく解信念への合理的なコミットメントの拘束のもとに、隣接エージェント間で統合条件とそれへの従属不能を交信することに基づき分散信念管理を遂行する。本論では、都市高速道路の分散交通管制を対象としたテストベッドEXCOAT/Mを用いたシミュレーション実験により、分散信念管理における動的な統合関係の編成と合理的コミットメントに基づく統合条件の選択が、エージェント組織の協調問題解決のパフォーマンスを向上させることを実証する。

Adaptive Coordination of Distributed Truth Maintenance among Agents - Experimental Evaluation with Expressway Control Agency Testbed -

Masayasu ATSUMI

Department of Information Systems Science,
Faculty of Engineering, Soka University

This paper describes the adaptive coordination of distributed truth maintenance among agents in dynamic and unpredictable environments where plural problems interact together. Main features of our distributed truth maintenance system are the dynamic reorganization of coordination structure among agents and the adaptive commitment to agent's belief. The coordination relation means that one agent puts restrictions on the other agent's autonomous belief selection in order to maintain shared belief's consistency. Adaptive commitment means rational belief selection among inconsistent beliefs based on dynamic evaluation of task priorities. The consistency among beliefs is maintained by the truth maintenance system. We show effectiveness of these features in adaptive cooperative problem solving by simulation experiments using an expressway control agency testbed EXCOAT/M(Expressway Control Agency Testbed/M).

1 はじめに

複数の相互干渉する問題が発生・変化・消滅する動的で予測不能な環境において、エージェント組織が、エージェント間の共有信念の整合性を維持して合理的に協調問題解決を遂行するための適応的分散信念管理システムについて述べる。

本分散信念管理システムは、動的に組織的合理性と個人的合理性を満たすために、分散信念管理に次のような2つの拘束を課する；①動的に編成されるエージェント間の統合関係により解信念の選択を拘束、②動的なタスクの優先度評価に基づき解信念へのコミットメントを拘束。ここで、統合関係とは、エージェント間で整合的な信念管理ができるように、統合側のエージェントが従属側のエージェントの自律的な信念選択を制限する関係をいう。特に、一方が他方を統合するとき単純統合関係、双方が互いに統合しあうとき相互統合関係という。また、コミットメント[Cohen 90]とは、エージェントがいったん選択した解信念の持続をいう。これら拘束のもとで、エージェントは、統合エージェントから受信した統合条件の制約下で優先度の高いタスクから順に解信念を求め、それに基づき自らの従属エージェントに対する統合条件を求めて送信する。その際、新たに求められた解信念と既に求めた解信念との間に不整合が生じた場合は、いずれの解信念にコミットするかを決定し、既に求めた解信念の更新も伴う統合条件の再選択を行う。

分散信念管理システムには、JTMS[Doyle 79]を分散化したDTMS[Bridgeland 90]やNDTMS[内藤 92]、ATMS[de Kleer 86]を分散化したDATMS[Mason 89]や階層型/交渉型信念管理[横尾 90]等がある。本システムは、上記2つの拘束のもとに、分散信念管理を環境変動に適応的に統合する点に特徴がある。

以下、2でエージェント組織アーキテクチャ、3で分散信念管理の適応的統合方法、4で都市高速道路交通管制テストベッドを用いた本システムの実験的評価について述べる。

2 エージェント組織

2.1 エージェント組織アーキテクチャ:SOCIAT

適応的分散信念管理を遂行するエージェント組織アーキテクチャSOCIAT(Supervised Organization self-design for Coordinated InterAgential Truth maintenance)の概要を図1に示す。SOCIATでは、エージェント組織を1つの組織監督エージェントと複数の問題解決エージェントから構成し、組織編成サイクルと分散信念管理の統合サイクルに基づき適応的に協調問題解決を遂行する。

組織編成サイクルでは、問題解決エージェントへの部分問題解決タスクの配分と問題解決エージェント間の統合関係の編成がなされる。統合関係の編成

は、組織監督エージェントによる単純統合関係もしくは相互統合関係の集中的編成と、問題解決エージェントによる相互統合関係にある隣接エージェント間での統合関係の分散的交渉によりなされる[渥美 95a]。ここで、2つのエージェント間に信念の共有関係があるときそれらエージェントは隣接関係にあるといい、隣接エージェント間で、一方のエージェントの帰結を他方のエージェントが前提として共有するとき、前者を上流エージェント、後者を下流エージェントという。

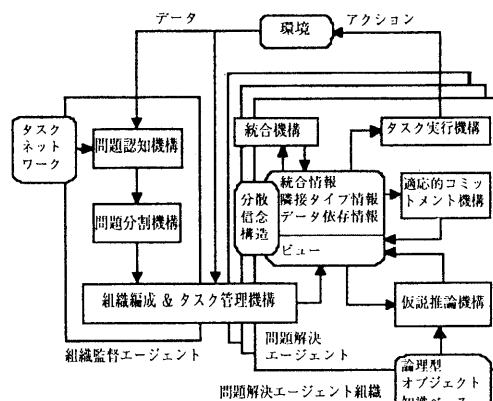


図1 エージェント組織アーキテクチャ:SOCIAT

分散信念管理の統合サイクルでは、各問題解決エージェントは、隣接エージェントとの間で、共有信念の整合維持を統合条件とそれへの従属不能の交信に基づき遂行する。エージェントは、自らの統合エージェントから受信した統合条件の制約下で、優先度の高いタスクにより強くコミットする様式で解信念を求め、それに基づき自らの従属エージェントに対する統合条件を求めて送信する。これらにより、エージェント間統合関係とエージェントのコミットメントにより拘束された分散信念管理の統合が遂行される。

2.2 エージェントの知識

問題解決エージェントはタスクについての知識と組織についての知識を持つ。

(1)タスクについての知識

エージェントは、自らに配分された部分問題解決タスクを定義する(1)のビューとそれらタスクを解決するための論理型オブジェクト[渥美 90]を持つ。

$$\text{ビュー} : V = \langle G, P, T \rangle \quad (1)$$

G:ゴール, ゴールはタスク記述子の連言

P:前提, 前提は基礎タスク記述子の連言

T:タスクネットワークの連結成分

タスクネットワーク[渥美 95b]は、タスク単位を記

ゴールは、統合条件による制約の課せられ方により次の3種類に分類される。

- ・直接束縛ゴール：下流エージェントからの統合条件が直接に制約として課せられるゴール。
- ・間接束縛ゴール：上流エージェントからの統合条件が、ゴールを帰結するノードまたはその子孫ノードの前件部に制約として課せられる(直接束縛されない)ゴール。
- ・自由ゴール：直接及び間接束縛されないゴール。このとき、ゴール G_i の優先度 p_i は、

$$\begin{aligned} G_i \text{が自由ゴールのとき,} & \quad p = p_0 \\ G_i \text{が間接束縛ゴールのとき,} & \quad p = p_0 + 0.5 \cdot P_B \\ G_i \text{が直接束縛ゴールのとき,} & \quad p = p_0 + P_B \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 p_0 ：タスク優先度($0 \leq p_0 \leq 1.0$)
 P_B ： $P_B \geq 2.0$ の定数

により求められる。これより、直接束縛ゴールの優先度は間接束縛ゴールの優先度より大きく、間接束縛ゴールの優先度は自由ゴールの優先度より大きくなる。

ゴールの優先度は、タスクノードに子から親の向きに伝播される。 t_p , t_c をタスクノード、 t_p は t_c の親ノードとする。このとき、親ノード t_p の優先度 $p[t_p]$ は、子ノード t_c の優先度 $p[t_c]$ の伝播により、伝播前の優先度 $p_d[t_p]$ から次の式

$$\text{propagate_prior}(p_1, p_2) = p_1 + p_2 - p_1 \cdot p_2 \quad (3)$$

により計算される。ゴールとタスクノードの優先度は、タスクの追加・削除・更新時に再計算される。

(2) 仮説に基づく信念の生成

エージェントの仮説推論は、タスクノードの前向き適用による仮説に基づく信念の生成、不整合ノードを用いた仮説の整合性テスト、及び不整合データベース[de Kleer 86]IDを用いた信念の整合維持により遂行される。タスクノードは優先度付きタスクノードキューを用いて優先度順に適用される。

上流統合エージェント集合を

$$CU = \{a_{p_i} \mid a_{p_i} \text{はタスクノードの前件} P_i \text{の}\} \quad (4)$$

信念に制約を課するエージェント}

とする。ただし、CUには統合側となった相互統合関係にある隣接エージェントも含まれる。 $\forall a_{p_i} \in CU$ に対して、 a_{p_i} から受信した統合条件を c_{p_i} とする。ここで、 c_{p_i} は基礎タスク記述子により与えられる。このとき、ゴール G_i の可能解集合 B_{G_i} は、エージェントが生成した仮説集合を H_0 とするとき、

$$B_{G_i} = \{ \langle b_{G_i,k}, E_{G_i,k} \rangle, CR_{G_i,k} \mid k \in \Lambda_{G_i} \} \quad (5)$$

ただし、 $b_{G_i,k}$ は信念(基礎タスク記述子)、 $E_{G_i,k}$ はその支持環境で $E_{G_i,k} \subset H = H_0 \cup \{c_{p_i} \mid \text{かつ} \forall e \in ID \text{ に対して} \neg(e \in E_{G_i,k})\}$ 、 $CR_{G_i,k}$ は信念の信用度として求められる。 H_0 の要素は、タスクノードに

より生成される次の形式の仮説である。

$$\pi_i : (s \leftarrow a_1, \dots, a_n) \theta_i @ \{h_1 \theta_{i_1}, \dots, h_l \theta_{i_l}\}, cr_i \quad (6)$$

ただし、 π_i は仮説を一意に識別する仮説識別子、 s は後件部、 a_1, \dots, a_n は前件部、 h_1, \dots, h_l は仮説形成部のタスク記述子、 (θ_{i_1}, cr_i) は論理型オブジェクト呼出し部のメッセージ式の実行により求められる連言 s 、 $a_1, \dots, a_n, h_1, \dots, h_l$ を満たすことが可能な基礎代入 θ_i と信用度 cr_i ($0 \leq cr_i \leq 1$)の組である。

3.2 適応的コミットメントに基づく統合条件選択

(1) 適応的コミットメントに基づく解信念選択

エージェントは、下流統合エージェントから受信した統合条件の制約下で、ゴールの可能解から信用度の高い1組の整合解を、次の解選択規則に従って、解選択ができる条件が整ったゴールから順に適応的コミットメントに基づき選択する。

[直接束縛ゴールの解選択規則] ゴールに統合条件が受信済のとき、統合条件を満たす解を選択。□

[間接束縛ゴールの解選択規則] 次の2条件が成立するとき選択；(条件1)すべての相互統合関係が統合側か従属側かに決定済、(条件2)すべての直接束縛ゴールに解が選択済。□

[自由ゴールの解選択規則] 次の2条件が成立するとき選択；(条件1)すべての相互統合関係が統合側か従属側かに決定済、(条件2)すべての直接束縛及び間接束縛ゴールに解が選択済。□

統合条件下での適応的コミットメントに基づく解信念選択は次のようになされる。解選択の対象となったゴールを $G_{(s)}$ 、解選択済ゴールを $G_{(1)}, \dots, G_{(m)}$

($i \in \{1, \dots, n\}, m \in n$)、下流統合エージェント集合を
 $CL = \{a_{G_i} \mid a_{G_i} \text{はゴール} G_i \text{の}\} \quad (7)$

信念に制約を課するエージェント}

とする。ただし、CLには統合側となった相互統合関係にある隣接エージェントも含まれる。また、 $\forall a_{G_i} \in CL$ に対して、 a_{G_i} から受信した統合条件を c_{G_i} とする。ここで、 c_{G_i} は基礎タスク記述子により与えられる。このとき、

step1: $G_{(s)}$ が直接束縛ゴールならば統合条件を満たす解、そうでないならば信用度最大の解($\langle b_{G_{(s)}}, E_{G_{(s)}} \rangle, CR_{G_{(s)}} \rangle$)が、選択済の解($\langle b_{G_{(1)}}, E_{G_{(1)}} \rangle, CR_{G_{(1)}} \rangle, \dots, \langle b_{G_{(m)}}, E_{G_{(m)}} \rangle, CR_{G_{(m)}} \rangle \in B_{G_{(1)}} \times \dots \times B_{G_{(m)}}$)と整合的ならば、($\langle b_{G_{(s)}}, E_{G_{(s)}} \rangle, CR_{G_{(s)}} \rangle$)を選択する。

step2: 整合的でない場合は、不整合な解信念の組に対して、統合条件の制約下で優先度の低いゴールについて別の解信念の選択を信用度順に試みることにより、選択済みの解の更新を伴う解信念の組の再選択を行う[渥美 95b]。

この結果、選択解 s は、

$s = ((b_{G(1)}, E_{G(1)}), CR_{G(1)}), \dots, (b_{G(m)}, E_{G(m)}), CR_{G(m)},$
 $(b_{G(s)}, E_{G(s)}), CR_{G(s)}) \in B_{G(1)} \times \dots \times B_{G(m)} \times G_{(s)} \quad (8)$
 ただし, $\forall c_{G(i)}$ に対して, $c_{G(i)} = b_{G(i)}$, かつ
 $\forall e \in ID$ に対して, $\neg(e \in E_{G(1)} \cup \dots \cup E_{G(m)} \cup E_{G(s)})$
 として求められる.

(2) 統合条件と従属不能の選択

エージェントは, 選択解 s から従属エージェントへの統合条件を求めて送信する. 上流従属エージェント集合, 下流従属エージェント集合をそれぞれ,
 $SU = \{a_{P_i} | a_{P_i}$ はタスクノードの前件 P_i の信念 (9)

により制約を課せられるエージェント,
 $SL = \{a_{G_i} | a_{G_i}$ はゴール G_i の信念 (10)

により制約を課せられるエージェント,
 とする. ただし, SU, SL は従属側となった相互統合関係にある隣接エージェントも含まれる. $\forall a_{G(i)} \in SL$ に対して, ゴール $G(i)$ の解信念 $b_{G(i)}$ が統合条件として用いられる. $\forall a_{P(i)} \in SU$ に対して, 前件部 $P(i)$ に対して生成した仮説 $\pi_{P(i)} \in E_{G(1)} \cup \dots \cup E_{G(m)} \cup E_{G(s)}$ (の後件)が統合条件として用いられる. 一方, 受信した統合条件のもとで解選択ができない場合は, その原因となる統合条件を送信した統合エージェントから一人を選んで従属不能を返信する. エージェントは従属不能の受信に対して, 別解の選択により別の統合条件を用いた再統合を試みる.

3.3 分散信念管理の統合の性質

エージェント間の統合関係とエージェントのコミットメントによる拘束のもとに統合される分散信念管理は次のような性質を持つ.

- ・ エージェントの解選択は統合側から従属側エージェントに向けて統合関係に沿って伝播する.
- ・ 統合条件への従属不能に対して, 別の統合条件を用いて再統合を試みることにより, 解の更新の伝播範囲が統合関係に沿って局所化される.

4 都市高速道路交通管制エージェント

テストベッド EXCOAT/M を用いた実験

4.1 EXCOAT/M の概要

EXCOAT/Mは, 都市高速道路の分散交通管制を対象にSOCIATアーキテクチャを評価するためのテストベッドである. EXCOAT/Mは, ユーザインタフェース, 交通流シミュレータ, 管制組織監督エージェント, 管制エージェント集団, 管制タスクネットワーク, 管制タスク解決論理型オブジェクト知識ベースから構成され, 並行アプリケーションとしてUNIX上に実装される. EXCOAT/M(EXpressway COntrol Agency Testbed/M)のメインウインドウを図3に示す.

EXCOAT/Mでは, 管制組織監督エージェントが

路線上のセンサーから送られてくる渋滞・事故データをもとに動的に発生・変化・消滅する渋滞や事故の状態を観測し, 管制タスクを管制エージェントに

動的に割り当て, 統合関係編成基準1に従い管制組織を編成する. 管制タスクとしては, 渋滞状況と事故状況に応じていくつかの管制箇所における次の管制アクション(流入制御(ブース数制御, 入路閉鎖), 流出制御(流出推奨, 流出指示), 経路制御(経路誘導, 迂回指示)を組み合わせた, または複数の渋滞に対してとるべき管制アクションに競合が生ずる場合にそれら競合を調整するタスクが選ばれる. 管制エージェントは, 相互統合関係にある隣接エージェント間で統合関係編成基準2に従い統合関係の交渉をすると共に, 渋滞を解消させかつ十分な利用台数を確保するために, 管制タスクを役割分担したエージェントと協調して解決することにより, 渋滞状況の変化に適応的な管制を実行する.

4.2 実験枠組

適応的分散信念管理の有効性を次の2点について交通管制性能(重み付渋滞長, 目的ゾーン流出率)の比較により実験的に評価する.

- ① 動的な統合構造編成: エージェント間統合関係を環境変動に反動的に編成する方法を, 一度定めた統合関係は変更しない方法と比較する.
- ② 適応的コミットメントに基づく統合: 合理的コミットメント(新たに変化した渋滞・事故状況に対する解と実行中の解のいずれにコミットするかを合理的に判断する)を, 敏感なコミットメント(新たに変化した状況に対する解に常にコミットし, 実行中の解をそれにあわせる), 鈍感なコミットメント(実行中の解に常にコミットし, 新たに変化した状況に対する解をそれにあわせる)と比較する. また, 動的なコミットメント(渋滞・事故状況の変化を観測するたびにタスクの優先度を再評価)を静的なコミットメント(渋滞・事故の発生時のみにタスクの優先度を評価)と比較する.

実験は, 交通流なしの初期状態から120分間の交通管制シミュレーションにより行う. 実験で用いた交通流の管制サイクルは5期(1分15秒)間隔である.

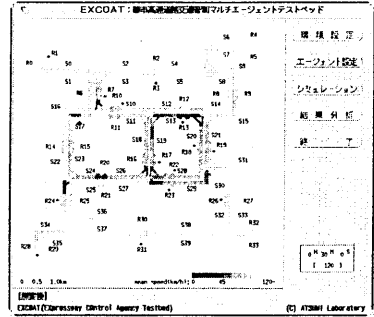


図3 EXCOAT/Mのメインウインドウ

4.3 動的な統合構造編成の有効性

・図4に重み付渋滞長の比較を示す。120分間の累積では、動的編成が407.85キロ、静的編成が534.74キロである。

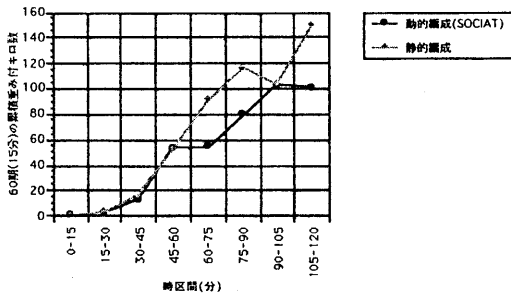


図4 重み付渋滞長(動的統合構造編成の有効性)

・目的ゾーン流出率に関して、動的編成が91.084% (流入台数:44719,流出台数:40732)、静的編成が88.464%(流入台数:46230,流出台数:40897)である。

4.4 適応的コミットメントに基づく統合の有効性

(1)合理的コミットメントに基づく統合の有効性

・図5に重み付渋滞長の比較を示す。120分間の累積では、合理的コミットメントが407.85キロ、敏感なコミットメントが487.47キロ、鈍感なコミットメントが487.8キロである。

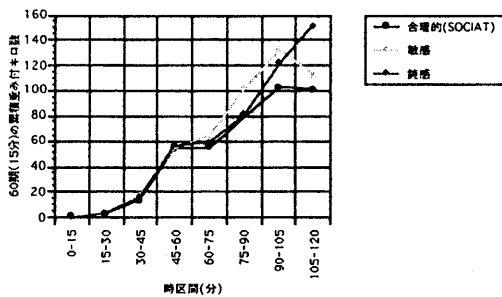


図5 重み付渋滞長(合理的コミットメントの有効性)

・目的ゾーン流出率に関して、合理的コミットメントが91.084% (流入台数:44719,流出台数:40732)、敏感なコミットメントが89.236% (流入台数:44829,流出台数:40004)、鈍感なコミットメントが89.056% (流入台数:45917,流出台数:40892)である。

(2)動的なコミットメントに基づく統合の有効性

・図6に重み付渋滞長の比較を示す。120分間の累積では、動的コミットメントが407.85キロ、静的コミットメントが555.48キロである。

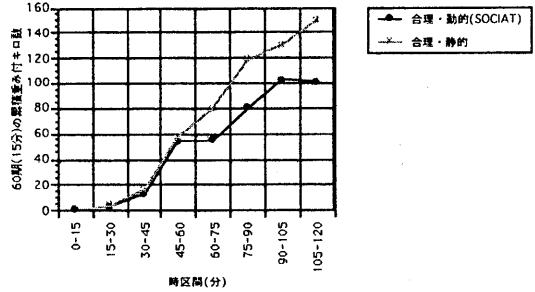


図6 重み付渋滞長(動的コミットメントの有効性)

・目的ゾーン流出率に関して、動的コミットメントが91.084% (流入台数:44719,流出台数:40732)、静的コミットメントが88.837% (流入台数:45519,流出台数:40438)である。

5 むすび

本論文では、動的で予測不能な環境において、エージェント組織が、動的に編成されるエージェント間統合関係とタスクの優先度評価に基づく合理的なコミットメントの拘束のもとに、環境変化に適応的に分散信念管理を統合する方法について述べた。そして、EXCOAT/Mを用いたシミュレーション実験により、分散信念管理の統合における動的な統合関係の編成と適応的コミットメントに基づく統合条件の選択が、エージェント組織の協調問題解決のパフォーマンスを向上させることを実証した。

◇ 参考文献 ◇

- [渥美 90]渥美雅保:多重視世界機構を持つオブジェクト指向・ルール指向・論理型の融合型知識システム/言語: WORLDS, 人工知能学会誌, Vol.5, No.5, pp.538-547(1990).
- [渥美 95a]エージェント集団の相互依存関係を利用した動的組織編成方式-集中的編成と分散的編成の融合型組織編成, SIG-FAI-9501-1, pp.1-8(1995).
- [渥美 95b]渥美雅保:動的環境下でのエージェントの適応的コミットメントに基づく信念選択, SIG-FAI-9403-3, pp.17-24(1995).
- [Bridgeland 90]Bridgeland, D.M. and Huhns, M.N.: Distributed Truth Maintenance, AAAI-90, pp.72-77(1990).
- [Cohen 90]Cohen, P.R. and Levesque, H.J.: Intention Is Choice with Commitment, Artif. Intell., Vol. 42, pp.213-261(1990).
- [de Kleer 86]de Kleer J.: An Assumption-based TMS, Artif. Intell., Vol.28, pp.127-162 (1986).
- [Doyle 79]Doyle, J.: A Truth Maintenance System, Artif. Intell., Vol.12, pp.231-272(1979).
- [Mason 89]Mason, C.L. and Johnson, R.R.: DATMS: A Framework for Distributed Assumption Based Reasoning, Distributed Artificial Intelligence, Vol. II, pp.293-317, Morgan Kaufmann(1989).
- [内藤 92]内藤剛人, 千村文彦, 所真理雄: NDTMS: ネゴシエーションによる分散信念管理, SIG-KBS-9202-14, pp.113-122 (1992).
- [横尾 90]横尾真, 石田亨: ATMSを用いた分散制約充足問題の解法, 情報処理学会論文誌, Vol.31, No.1, pp.106-114 (1990).