

マルチエージェント分散プランニングにおける共同プラン生成

大沢 英一 所 真理雄
(株) ソニーコンピュータサイエンス研究所

概要

マルチエージェントシステムの分散プランニングでは、単一行為者では達成不可能なゴールや組織的なタスクを達成するために、複数の行為者が共同してプランを生成し実行することが考えられる。各行為者はその局所性により世界に関する部分的な知識・技能しか持たないので、様々な技能を持つ複数の行為者がどの様にすれば共同できるのかを見い出すことは一般に困難な作業となる。本論文では部分的な知識を有する複数エージェントが機会に応じて共同の可能性を推定し、共同プランを生成する機会主導型共同スキーマについて述べる。

Collaborative Plan Construction for Multiagent Planning

Ei-Ichi Osawa Mario Tokoro
Sony Computer Science Laboratory Inc.
3-14-13 Higashi-Gotanda, Shinagawa-ku, Tokyo 141, JAPAN

Abstract

In multiagent planning an agent sometimes needs to collaborate with others to construct complex plans, or to accomplish large organizational tasks, which he cannot do alone. Since each agent in a group may have different partial knowledge of the world, construction of a coordinated plan can be confounded. In this paper we propose a scheme for organizing a group of potential agents dynamically and opportunistically, and for constructing plans for collaborating agents from their partial knowledge of the world. The proposed scheme makes it possible for each agent to decide, without excessive communication, what actions he should take in collaboration.

1 はじめに

マルチエージェントシステムとは、複数のエージェント（もしくは行為者）と呼ばれる知的システムが、相互作用により協調的問題解決を行なうシステムであり [Huhns 87] [Bond and Gasser 88]、そこでは行為者間で共有するデータの分散のみならず、計算制御の分散化、さらには相互作用による行為者間の協調的問題解決を可能とすることが重要な目的である。

マルチエージェントシステムは次の様な性質をもつ。各行為者は固有の信念、推論規則、行為規則などを有しており、単一行為者では解決不可能な複雑な問題に関しては動的に行為者達のグループを構成して解決する。マルチエージェントシステムでは行為者という比較的小さな知的システムから協調という機能に基づき、より大きな目的を達成する組織（システム）を構築するというのが基本的な目標であることから、そのアプローチは漸増的でかつ継続的に変化していくという性質を持つ大規模開放型分散システムのアーキテクチャとしても有望であることが予想される。現実に行為者の社会としてシステムを構築するというプログラミングの方法論（エージェント指向プログラミング）が提案されている [Shoham 90]。筆者達の提案する SocioAgent [Osawa and Tokoro 90b] [Osawa and Tokoro 90a] もこの様なアプローチに沿うものである。

しかしながら、開放型分散環境下での協調問題解決には未だ良く解明されていない問題も多い [Bond and Gasser 88]。その一つに分散協調プラン生成がある。これは各行為者の持つ世界に関する部分的知識や相互信念、行動規則等から、行為者が相互に協調するためのプランを、推論により生成し、行動する問題である。この協調により、マルチエージェントシステムは事前には予測困難な複雑な目標を達成しようとする。しかしながら協調は、各行為者の世界に関する知識の部分性により困難な問題となる。

本稿ではマルチエージェントの分散プランニングを通して前述の問題を考察し、特に協調を競合解消、行為のシナジー性、行為の整合の3つの側面に分類した後、複数行為者によるシナジー的¹行為を含む整合のとれた行為の系列を共同プランとみなし、機会主導型の共同プラン生成を実現するための動的組織スキーマと共同プラン生成アルゴリズムを提案する。

¹American Heritage によれば synergy とは "The action of two or more substances, organs, or organisms to achieve an effect of which each is individually incapable." である。

本稿の構成は、まず第2章では例題を通して背景となる上述の協調の問題を明確にし、第3章では行為者のモデルについて述べる。第4章では行為者の組織化スキーマと共同可能行為者の選定、そして共同プラン生成について述べる。第5章では他の組織スキーマや協調プラン生成に関する研究との関係について述べ、第6章で結論と今後の課題につて述べる。

2 動的協調組織 — 背景 —

マルチエージェントシステムにおいてある行為者が単独では達成できない目標を持ったとする。この場合この行為者は他の（一般的には複数）行為者にその目標の達成のために何らかのタスクの依頼をする必要が生じる。

契約ネット [Davis and Smith 83] はこの様な場合に（可能であれば）その目標を副目標に分解し、他の行為者に相互選択を通して割り当てることを可能にするプロトコルである。また、契約ネットは動的で機会主導型の制御を提供する。

マルチエージェントシステムでは各行為者の発生の局所的、そして環境内の行為者の漸増的でかつ継続的な変化などの理由のため、システム全体の性質を事前に把握しておくことが原理的に不可能であるため、行為者を組織化して複雑な目標を達成する場合、その機会に応じて動的に（つまり機会主導型に）その組織を構成することが望まれる。機会主導型が望ましい理由は、分散システムにおいてはあらゆる共同の可能性を網羅的に調べておくことが計算量的に高いことにも起因する。

契約ネットの様な機会主導型組織スキーマはマルチエージェントシステムの組織スキーマとしては基本的には好ましいものである。しかしながら開放型分散システムにおいてこの様な組織スキーマを用いて行為者の共同組織を機会主導的に構成する場合には次のような問題点が生ずる。

契約ネットにおいては先ずマネージャがタスクを分解して割り当ての単位を決定する。このマネージャの価値基準から行なわれるタスクの分解が開放型分散環境では適切ではない場合がある。マネージャはタスク分解の時点において、どの行為者に依頼できるかというのを事前に知ることができないだけでなく、契約の可能性のある行為者の技能を前もって知ることができない。よって特定の観点から行なわれるタスク分解が全体のタスクの達成の効率を下げてしまったり、極端な場合は他の分解方法であれば可能であったかも知

れない割り当てを不可能してしまう場合がある。

この問題は契約ネットをマルチエージェントプラン生成に応用しようとすると更に深刻なものとなる。マネージャがある複雑な目標の達成を誰かに依頼したいとしても、もしそのマネージャがその複雑な目標をその時点での分散環境に適切に分解できる十分な知識がないと、どの行為者にもそのゴールを依頼することができなくなってしまう。よってタスクの分解および契約者の相互選択にはさらに柔軟な戦略が必要になる。

仮にマネージャが何らかの方法により複数の共同する行為者の候補を選択できたとしてもまだ問題が残る。それは、これらの行為者が共同するには、つまり共同プラン生成を行なうためにはどのような情報が必要なのかということである。そしてその共同プランはどのように整合して組織化されるのかという問題である。

各行為者は世界に関する部分的な知識しか有しないということもこの共同プラン生成を困難にする。一つの実例を通してこれらの困難な問題を具体的にみる(図1)。この例における目標は行為者 g_3 が部屋 r_3 でブロック b を所有することである。(以下で論理式の引数に現れる小文字で始まる語は定項、大文字で始まる語は変項を意味する。)

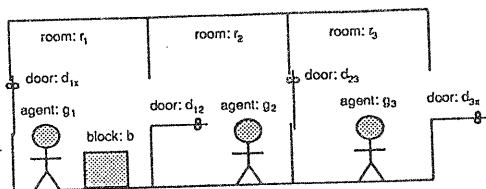


図1: 隣接した部屋の間におけるブロックの移動

この例で g_1, g_2, g_3 の各行為者は本稿末に添付した各行為規則と信念を持つとする。

我々の提案する行為者の信念モデルは、第一階述語論理に様相オペレータ B を加えたものである。 $B(A, P, t)$ は A が時点 t で P を信じていることを意味する。様相オペレータ B には Hintikka 流の公理系 [Halpern and Moses 85] とフレームの言明を仮定する(詳細は次章で述べる)。この章の以下の議論ではこれらとプラン生成の詳細な議論はとりあえず保留し、直感的に分かる形式でプラン生成の概略だけを見ることにする。

さて行為者 g_3 は部屋 r_3 においてブロック b を所持したい。彼は $\text{trans}(\text{Agent}, g_3, b)$ という行為を実行することによりそれが達成されることが分かる。しかしなが

らこの行為の前提条件の一部、つまり $(\text{holding}(\text{Agent}, b), \text{in}(\text{Agent}, r_3))$ は今の時点では成立していない。よって彼は他の行為者にこの目標を達成してもらう様に依頼する必要がある。

契約ネットを用いてこの目標の達成を他の行為者に割り当てることを考える。この場合行為者 g_3 がマネージャとなりその目標の達成をタスク提示としてアナウンスすると考える。もし行為者 g_1 もしくは g_2 が個々にその目標を達成するプランを生成できれば、契約者としてそのプランを入札として行為者 g_3 に送ることになる。行為者 g_3 は複数の契約者から入札を受信し、入札受け付け期間が過ぎた後に、各入札を評価し特定の契約者に落札を与えることとなる。

この例では g_1, g_2 の各行為者は当該目標を達成するに部分的な知識しか持たないため、どちらの行為者もその目標の完全なプラン²を生成することはできない。それゆえに、もしマネージャが入札として完全プランしか受け付けられない場合、 g_1, g_2 のどちらの行為者も入札を返すことができなくなる。そうではなく、もしマネージャが不完全プランも入札として受け付けるのであれば g_1, g_2 の各行為者は下に示す不完全プランを入札として返す場合が考えられる³。プラン生成は次章において述べられるが、基本的には DCOMP 型の後向き生成 [Nilsson 80] によって行なわれる。以下ではこの章での説明を簡単にするため便宜的に構成子 “,” と “||” を導入するが、それらはそれぞれ行為の順序と並列を意味する。次章以降では行為の順序に関する制約式を導入することにより、これらの構成子は扱われない。

行為者 g_1 のプラン P_{g_1} と g_2 の P_{g_2} は共に不完全プランであり、それらの中に含まれる行為 $\text{move}(g_1, b, r_2, r_3)$ と $\text{pickup}(g_2, b)$ はそれぞれ不完全行為である。

契約ネットではマネージャ g_3 がこれらの入札を受信したのち、不完全行為の部分は後にその契約者の下位契約において解決されるであろうと仮定してタスクの割り当てが行なわれる。しかしながら、この様に両方ともが不完全プランである場合、マネージャにとってはいずれの入札がより良いプランなのかを決定するこ

²本稿では充足されていない前提条件のある行為を含むようなプランを不完全プランと呼び、そうでないもの、つまり通常の意味でのプランを完全プランと呼ぶ。不完全プランは自己の目標を達成するプランの中に含まれる行為が必要とする前提条件に関して、自分ではその条件を充足することができず、なおかつ条件の真値を知らないことに起因する。

³ここで挙げる不完全プランは行為者 g_1 と g_2 において複数考えられる不完全プランの中の一つに過ぎない。

$$\begin{aligned}
P_{g_1} = & \{ \text{pickup}(g_1, b); \\
& \text{move}(g_1, b, r_1, r_2); \\
& \text{move}(g_1, b, r_2, r_3) \\
& \text{precond: boundary}(\text{Door}, r_2, r_3), \\
& \text{open}(\text{Door}) \} . \\
P_{g_2} = & \{ \{ \text{open}(g_2, d_{23}) \parallel \\
& \text{trans}(\text{Agent}, g_2, b) \\
& \text{precond: holding}(\text{Agent}, b), \\
& \text{in}(\text{Agent}, r_2) \}; \\
& \text{move}(g_2, b, r_2, r_3) \} .
\end{aligned}$$

とは一般には困難である。なぜならマネージャもまた現状に関する部分的な知識しか持たないからである。

契約ネットは複雑なタスクを分解して各部分タスクを契約者に割り当てる一般的なスキーマである。一般にはこの問題分割がマネージャの価値基準から行なわれ、各部分タスクを一人の契約者に割り当てることから、この様な割り当ては開放型分散環境においては最適でない場合がある。

例えばこの例において、もしマネージャがある価値基準に基づき契約者 g_2 に落札を伝えた場合、プラン P_{g_2} に含まれる不完全行為 $\text{trans}(\text{Agent}, g_2, b)$ は行為者 g_2 と g_1 の間の下位契約によって解決されうる。この場合その下位契約を考慮した、もとの目標を達成する完全プランの一例は以下の様になる。

$$\{ \{ \text{open}(g_2, d_{23}) \parallel \{ \text{pickup}(g_1, b); \text{move}(g_1, b, r_1, r_2); \text{trans}(g_1, g_2, b) \} \}; \text{move}(g_2, b, r_2, r_3) \} .$$

しかしながら、もし仮にこの状況に対する包括的な視点を持てば、このプランは二人の行為者がうまく協調した場合の以下のプラン $CP_{g_1g_2}$ よりも効率が悪いことが分かる。

$$CP_{g_1g_2} = \{ \{ \text{open}(g_2, d_{23}) \parallel \{ \text{pickup}(g_1, b); \text{move}(g_1, b, r_1, r_2) \} \}; \text{move}(g_1, b, r_2, r_3) \} .$$

逆に、もしマネージャ g_3 が契約者 g_1 に落札を与えた場合でも、 g_1 は自分自身ではドア d_{23} が開けられないので、そのドアを開けてもらうための下位契約が必要となる。マルチエージェントシステムにおいては契約は計算的に高いため、上で示した $CP_{g_1g_2}$ の様な共同プランが最初の契約の過程において得られた方が計算効率の点からは望ましい。

上で協調という言葉に言及したが、一般に協調行為といった場合、それには少なくとも3つの側面が考えられる。一つは行為の競合の解消としての協調であり、分散協調プランにおけるこれまでの多くの研究はこの側面に焦点を当てている [Corkill 79][Georgeff 83]。競合解消的協調の場合は競合するエージェント (本稿ではこれをプラン生成の最小単位とする) が同じ目標をもっているとは限らない。

もう一つ、協調行為にはシナジー的側面があり、これは単一の行為者では実行不可能な行為を、他の行為者と同時に行なうことにより達成されうる行為を指す。シナジー的協調を行なう複数行為者は同一の目標を持っている。

協調行為の最後の側面として複数行為の整合性を挙げる。これは複数エージェントがある目標を達成するために、個々の行為を整合させる場合をさす。整合した行為は典型的には、ある行為者の特定の行為を可能にするために、その行為が必要とする前提条件を結果として持つような行為を別のエージェントが実行するような場合をさす。

シナジー的行為を含む整合した行為の系列 (これは厳密に言えば有向非循環グラフになる) を本稿では特に共同 (collaboration)、もしくは共同プラン (collaborative plan) と呼ぶ。

3 SocioAgent モデル

本稿で提案する行為者のモデルは SocioAgent [Osawa and Tokoro 90b] [Osawa and Tokoro 90a] と呼ばれる。SocioAgent (以下簡単にエージェントと呼ぶ) は通信機能、対話機能、信念モデル、そしてプラン生成機能を有する行為者のモデルである。本章ではこれらについて説明する。

行為者間の通信は以下で述べる通信プリミティブを実行することにより行なわれる。対話は人間の発話行為をモデル化したいいくつかのプリミティブにより実現される。

行為者のプラン生成は二つのフェーズに分かれる。第一のものは自己プラン生成と呼ぶもので、これは行為者固有の信念 (世界の部分知識) に基づき行なわれるプラン (行為の系列) 生成で、不完全プランも含む。第二のフェーズは共同プラン生成である。これは行為者が組織的な目標を達成するプランを生成しようとする場合に行なわれる。このフェーズにおいて各行為者は共同の基になる自己プランを洗練化する。この共同プ

ラン生成は次章において組織化スキーマの一部として特徴付けられる。

3.1 通信プリミティブ

行為者は二つの通信プリミティブ *send* と *receive* によりメッセージの送受信を行なう。行為者 *Sender* が

$\text{send}(\{\text{Sender}\}, \text{Recipient}, \text{Message}),$

を実行すると、メッセージ (*Sender*, *Recipient*, *Message*) が行為者 *Sender* から行為者 *Recipient* へ送信される。 $\{\}$ はその引数が省略可能であることを意味する。もし *Sender* が省略されると、暗黙の了解によりそれはそのメッセージ送信プリミティブを実行した行為者の名前によって埋められる。メッセージは特定の行為者や組織に所属する複数行為者に送信⁴されうる。

メッセージ受信プリミティブ *receive* は各行為者の持つ到着メッセージ待ち行列からメッセージを読み出す。行為者が

$\text{receive}(\{\text{Sender}\}),$

を実行すると、その行為者の到着メッセージ待ち行列の中で、*Sender* から送られてきた最初のメッセージが (*Sender*, *Message*) の形式で読み出され、そのメッセージは待ち行列から削除される。これは選択的メッセージ受信機能である。*Sender* が省略されれば待ち行列の最初のメッセージが読み出される。

3.2 対話プリミティブ

行為者の対話は人間の発話行為を特徴付けるいくつかの発話行為プリミティブによりモデル化される。この発話行為にはタスク実行の要求 *request* と情報の通知 *inform* がある。

$\text{request}(\text{Sender}, \text{Recipient}, \text{TO-DO}),$

を送信することにより *Sender* 行為者は *Recipient* エージェントに行為 *TO-DO* を実行することを要求する。

以下のメッセージは行為者 *Agent* が行為者 *Recipient* に命題 *P* の成否を行為者 *Agent* に通知するよう要求する。もし *Agent* が省略されると結果が通知される相手は暗黙の了解によりこのメッセージの送信者となる。

$\text{request}(\{\text{Agent}\}, \text{Recipient}, \text{inform}(\text{Recipient}, \{\text{Agent}\}, P))$

⁴同報通信機能

3.3 信念モデル

我々の提案する行為者のモデルは第一階述語論理に様相オペレータ *B* を加えたものである。 $B(G, P, t)$ は行為者 *G* が時点⁵*t* で *P* を信じていることを意味する。様相オペレータ *B* には以下の公理系を仮定する。最後の公理はフレームの言明である。

1. $B(G, P, t) \wedge B(G, P \supset Q, t) \supset B(G, Q, t)$
2. $B(G, P, t) \supset B(B(G, P, t))$
3. $\neg B(G, P \wedge \neg P, t)$
4. $\forall t(> t') \nexists t''(t \geq t'' > t') B(G, P, t') \wedge B(G, \neg P, t'') \supset B(G, P, t)$

3.3.1 信念翻意

行為者は自己の信念を管理する信念データベースを持つ。行為者は行為を実行したり、他の行為者と対話することにより自己の信念を動的に更新する。行為を行なった場合は次で述べる行為規則に記述された *effect* で指定された論理式を信念データベースに加える。また他の行為者と対話することにより得られた他人 *G'* の信念 $B(G', P, t')$ が、フレームの言明公理を用いず得られる自分の信念に対し以下の条件を満たすか、もしくは自分の信念データベースに $\neg P$ に言及する信念が無い時は、その *G'* の信念を自己 (*G* とする) の信念として信念データベースに加える。

$\exists t(> t') B(G, \neg P, t')$

3.4 自己プラン生成

SocioAgent の行為規則は次の形式で表現される。

$\text{actionName}(\text{Agents}, \text{Parameters}, T, \tau)$
precond: $B(\text{Agent}, P, T), \dots$
body: *ActionSequence*
effect: $B(\text{Agent}, Q, T + \tau), \dots$

⁵時点は各エージェントの持つ仮想時計を基準にして与えられるが、この時計は厳密には各エージェント毎に指す時間が異なることがある (つまり絶対時間ではない) が、エージェントの推論、プラン生成といった計算プロセスに対して十分に細かな精度で暗黙の内に定期的に時計合わせが行なわれていると仮定する。

この行為規則の形式は、行為の引数に時点を表す変数と、各行為規則の本体部分の原始行為の時間コストの和として得られるコスト τ が付加されていることを除けば STRIPS[Fikes and Nilsson 71] のそれとほぼ同様である。原始行為のコストは各行為者の動作環境に依存して定まる値とする。また複数の行為者を必要とする様な行為はシナジーの行為である。

自己プラン生成は基本的には DCOMP 型の後向きプロダクション [Nilsson 80] により行なわれる。つまり先ず後向きプロダクションによるプラン生成を行ない、もしすべての前提条件が自明になれば、すなわち目標状態に現在の行為者の信念と照合しないリテラルが含まれていれば、それに対して行為規則を後向きに適用し、端節点がすべてエージェントの信念と照合するような、整合のとれた解グラフを生成する。そこで得られた整合した解グラフ、一般には有向非循環グラフと見なせるが、それを当座の解として得、次にその解グラフに関する相互作用を検出し、それらを排除したものを自己プランとする。

DCOMP で生成されるプランは完全プランであるが、SocioAgent の自己プランでは不完全プランの生成も許す点において DCOMP 型の後向きプロダクションとは異なる。SocioAgent の自己プラン生成で得られるプランは一般には次の形式となる。

$$\{O_1(\text{Agent}, \text{Object}_{s_1}, T_1, \tau_1) \text{Preconds}_{s_1}, \dots, \\ O_n(\text{Agent}, \text{Object}_{s_n}, T_n, \tau_n) \text{Preconds}_{s_n}\} \\ C(T_1, \dots, T_n, \tau_1, \dots, \tau_n)$$

但し $C(T_1, \dots, T_n, \tau_1, \dots, \tau_n)$ は行為の時点順序に関する制約式の集合である。この前章の例であげたプラン P_{g_1} をこの形式で表現すると以下の様になる。

$$P_{g_1} = \{\text{pickup}(g_1, b, T_j, \tau_{\text{pickup}}^{g_1}), \\ \text{move}(g_1, b, r_1, r_2, T_{j+1}, \tau_{\text{move}}^{g_1}), \\ \text{move}(g_1, b, r_2, r_3, T_{j+2}, \tau_{\text{move}}^{g_1}) \\ \text{precond: boundary}(\text{Door}, r_2, r_3), \\ \text{open}(\text{Door}) \} \\ T_j + \tau_{\text{pickup}}^{g_1} < T_{j+1}, T_{j+1} + \tau_{\text{move}}^{g_1} < T_{j+2}$$

従来のプラン生成は、本稿の意味でいう完全プランの生成を指し、プラン生成の過程において不完全なプランは棄却されてしまう。しかしながら SocioAgent では複数行為者の共同を考慮するので、もし単一エージェ

ントの自己プラン生成で完全プランが得られなかった場合には、下で述べる基準により生成された不完全プラン (例えば前章に現れた P_{g_1} や P_{g_2}) も、後の共同を前提とした上で考慮する。

しかしながら、もしこの不完全プランの生成を何ら制限なしに許すと、エージェントは (意味のないものも含めて) 必要以上に多くの不完全プランを生成してしまう可能性がある。ある不完全プランは有意義で、共同により完全プランになりうるが、全く有効でない不完全プランもある。不完全プランを生成したエージェントは後にどのような (不完全) 自己プランを提案する行為者と共同するのかを事前に知ることはできないので、多くの不完全プランの候補から良さそうなものだけを選択することは困難な問題である。我々は自己プラン生成における不完全プランの候補の選択に関して以下の三つの基準を与える。

3.5 不完全プラン選択基準

複数の不完全プランから自己プランの候補を選択するには次に述べる 3 つの基準に沿って合理的に行なわれる。これにより行為者は自己プラン生成において多くの不完全プランの候補から良い性質のプランを選択できるようになる。エージェントは以下で述べる様な個の合理性だけではなく、共同行為における決定・選択に関してもある種の組織的合理性を有する (次章で述べる)。行為者間でこの様な組織的合理性を共有することにより、共同において他のエージェントの選択・決定を予測することが可能となる。

3.5.1 再帰プランの棄却

再帰プランとはそのプランの目標が不完全な行為の前提条件に出現するものをさす。この様なプランの生成を許すと本来の目標が達成されないまま、エージェント間で目標達成のたらい回しが起こる可能性があるので棄却する。

3.5.2 コスト最小プランの選択

各行為規則には本体部分の原始行為の時間コストの和として得られる対応したコストが付加されている。原始行為の時間コストは各行為者の動作環境に依存して予測される値である。

複数の不完全プランが得られた場合、それらのコストを計算することにより、予測コスト最小のプランを選択することができる。

3.5.3 詳細プランの選択

プラン選択の最後の基準はプランの詳細の度合である。もし複数の不完全プランが得られた場合、行為者はより詳細に生成されたプランを選択する。プランの詳細さを前章の例を用いて説明する。

前章の例で g_2 は例えば以下の自己プランを生成することも可能である。

$$P'_{g_2} = \{ \text{open}(g_2, d_{23}, T_i, \tau_{\text{open}}^{g_2}), \\ \text{move}(g_2, \text{nil}, r_2, r_1, T_{i+1}, \tau_{\text{move}}^{g_2}), \\ \text{pickup}(g_2, b, T_{i+2}, \tau_{\text{pickup}}^{g_2}), \\ \text{precond: } B(g_2, \text{onfloor}(b, r_1), T_{i+2}), \\ \text{move}(g_2, b, r_1, r_2, T_{i+3}, \tau_{\text{move}}^{g_2}), \\ \text{move}(g_2, b, r_2, r_3, T_{i+4}, \tau_{\text{move}}^{g_2}) \} \\ T_i + \tau_{\text{open}}^{g_2} < T_{i+4}, T_{i+1} + \tau_{\text{move}}^{g_2} < T_{i+2}, \\ T_{i+2} + \tau_{\text{pickup}}^{g_2} < T_{i+3}, T_{i+3} + \tau_{\text{move}}^{g_2} < T_{i+4}$$

前章の P_{g_2} と P'_{g_2} はいずれも不完全プランである。前章の P_{g_2} は二つの充足されていない前提条件を含んでいるが、このプラン P'_{g_2} は一つの条件しか含んでいないという点においてより詳細であると考ええる。

一般にはより詳細なプランがより良いプランであるとは言えない。何故ならある一つの前提条件の充足が他の同様に充足されていない二つの前提条件の充足よりもはるかに困難な場合があるからである。これを解決するには充足されていない条件にも、それを充足するのに必要とされるプランのコストの推定値を割り当てる方法である。何らかのヒューリスティック、もしくは以前の経験からこの様な条件へのコストも同様に与えることができるのであれば、この選択基準は前に述べたコスト最小の基準と同一に扱うことが可能となる。この問題に関しては本稿ではこれ以上議論しない。

4 機会主導型組織スキーマと共同プラン生成

行為者は前章で述べた通信／対話プリミティブを用い、以下で述べるプロトコルに従って機会に応じ動的に組織を構成する。SocioAgent で用いられる組織スキーマはマネージャがタスクを提示（これを以下 RFP と呼ぶ）し入札を受信することに関しては契約ネットと同一である。その後マネージャは契約者に落札メッセージを送るが、SocioAgent ではこの落札において必ずしもタスク毎に一人の契約者を割り当てるのではな

く、複数契約者による共同落札を可能にする点で契約ネットとは異なる。

4.1 機会主導型組織スキーマ

SocioAgent の社会には揭示版（以下 BB と略す）と呼ばれる特殊な行為者が複数いる。BB は RFP を受け付け、その期限切れまで保存し、任意の行為者からの RFP 読み出し要求に応ずる。SocioAgent の社会に BB は複数いるが、それらは必ずしも同一の情報を保存しているとは限らない。任意の行為者は少なくとも一つの BB のアドレスを知っている様に生成される。

他の行為者にタスクを依頼したい行為者は、自分のアドレス、タスクのタイプ、達成目標、入札期限などを表現した RFP を BB に送る。BB はその RFP を入札期限切れまで保存する。現在タスクが課せられていない行為者は BB に現在保存されている RFP を送ってもらうように依頼する。この場合自分のタスクタイプを明示することにより、選択的に RFP を読み出すことができる。BB は（もしあればタスクタイプを検査しそれと照合する）最初の RFP を、要求した行為者に送る。

行為者は RFP を受信した後、不完全なものも含めて、もし自己プランが生成できれば、そのプランを RFP のマネージャに送り返す。この自己プランは契約ネットの入札に相当する。

RFP の入札期限切れを待って、マネージャはもし複数の入札を受信していれば、それらの入札から単一の契約者を選択するか、もしくは次節で述べる複数契約者による共同落札の可能性を調べる（入札が一つであった場合はそれを選択する）。この共同落札を調べる過程で、もしそれが可能であるならば共同の示唆を計算し、複数の契約者にその示唆を含んだ共同落札を送信する。この様にしてマネージャは契約者に共同プラン生成を依頼するが、もし共同が不可能な様であるならば、マネージャは単一契約者を独自の基準で選択し落札メッセージを送る。

4.2 共同落札と共同示唆

複数入札があった場合に、共同の可能性を探索し、共同示唆を計算するアルゴリズムを図 2 に示す。但し図 2 では簡単のために二人の契約者の場合について記述してある。ここでは行為者 G_x と G_y がそれぞれ自己プラン $P_x (= \{O_{x(1)}, \dots, O_{x(n)}\}C_x)$ と $P_y (= \{O_{y(1)}, \dots, O_{y(m)}\}C_y)$ をマネージャ G_m に入札した

とする。マネージャは共同示唆を計算する前に、 C_x や C_y などの各プランの行為の順序に関する制約から得られるプランの時間コストを計算し、自己基準に合わないプランは考慮しないようにする必要がある。また、最新の情報に基づく自己プランを提示している契約者を優先的に選出することが必要である。これらの選択基準は契約ネットにおける適格性検査の特殊なものとみなせる。

1. Copy P_y to P , and empty suggestion lists S_x and S_y .
2. Let $i = 1$. While $((1 \leq i \leq n)$ and P is not empty), do;
 - If $O_{x(i)}$ matches (see the note described below) $O_{y(j)}$ ($1 \leq j \leq m$), then
 - Add $O_{x(i)}$ and $O_{y(j)}$, with associated preconditions in case of an incomplete operator, to S_y and S_x , respectively.
 - Remove $O_{y(j)}$ from P .
 - Increment i .
 - 3. If S_x and S_y are not empty, then
 - Send the collaborative awards, CA_x and CA_y , to agents G_x and G_y , respectively.
 - Else
 - Compare cost of P_x and P_y , and allocate task to the agent whose self-plan is cheaper.

図 2: 共同示唆と共同落札の計算アルゴリズム

共同落札 CA_x および CA_y は次の形式で与えられる。

$$CA_x = \text{request}(G_m, G_x, \text{collaborate}(G_y, \text{suggestion}(S_x), P_x)).$$

$$CA_y = \text{request}(G_m, G_y, \text{collaborate}(G_x, \text{suggestion}(S_y), P_y)).$$

共同落札 CA_x の内容はマネージャ G_m が共同契約者 G_x に P_x を達成するために共同示唆 S_x を用いて G_y と共同する様に依頼していることを意味する。

この共同示唆には次の様な内容が含まれている。一つは共同する他方の契約者が共通に提案している行為、さらにその共同契約者における障害、つまり充足不能でかつ信念空間にない前提条件である。

第2章で扱った例題で、もし行為者 g_1 と g_2 が第2章であげた自己プラン P_{g_1} 、そして第3章であげた自己プラン P'_{g_2} をそれぞれ提案すると、それぞれの共同契約者に与えられる共同示唆 S_{g_1} 、 S_{g_2} はそれぞれ右上の様

$$S_{g_1} = \{\text{pickup}(g_2, b, T_{i+2}, \tau_{\text{pickup}}^{g_2}),$$

$$\text{precond on floor}(b, r_1),$$

$$\text{move}(g_2, b, r_1, r_2, T_{i+3}, \tau_{\text{move}}^{g_2}),$$

$$\text{move}(g_2, b, r_2, r_3, T_{i+4}, \tau_{\text{move}}^{g_2})\}$$

$$T_{i+2} + \tau_{\text{pickup}}^{g_2} < T_{i+3}, T_{i+3} + \tau_{\text{move}}^{g_2} < T_{i+4}$$

$$S_{g_2} = \{\text{pickup}(g_1, b, T_j, \tau_{\text{pickup}}^{g_1}),$$

$$\text{move}(g_1, b, r_1, r_2, T_{j+1}, \tau_{\text{move}}^{g_1}),$$

$$\text{move}(g_1, b, r_2, r_3, T_{j+2}, \tau_{\text{move}}^{g_1})$$

$$\text{precond: boundary}(\text{Door}, r_2, r_3),$$

$$\text{open}(\text{Door})\}$$

$$T_j + \tau_{\text{pickup}}^{g_1} < T_{j+1}, T_{j+1} + \tau_{\text{move}}^{g_1} < T_{j+2}$$

4.3 共同プラン生成

共同落札を受けた契約者は共同プランを生成する。これは元々の自己プラン、共同示唆、そして共同契約者間の信念に関する推論に基づいて行なわれる。この共同プラン生成において各共同契約者は元になる不完全な自己プランの洗練を行なう。

ここで共同プランに関する3つの問題を整理しておく。第一に、もし共同契約者達が共同の中のある行為をどちらも実行可能であることを知っている場合、どちらの契約者がどの行為を行なうのかという相互選択をいかに決定するかである。

第二に、もし契約者 G_x の自己プランのある行為が不完全であっても、他の共同契約者 G_y はそれを完全にするためのなんらかの行為を実行することが可能であった場合、 G_y はそれを実行するべきであるということを決定することができるかである。もし可能であるならそれはどの様に行なわれるのか？

第三には、これらの行為が協調的に行なわれるということを相互に信じる事が可能かどうかである。

共同契約者のこれらの相互選択には次に述べる三つの要因を考慮する。これらは組織的協調を実現する上での合理的選択の基準を与える。

(1) 障害の検出と削除

どちらかの自己プランに現れた不完全行為の充足されない条件はその共同契約者 (例えば G_x) にとつての直接的な障害であると見なす。もう一方の共同契約者 (例えば G_y) が自分のプランにその行為を含んでいたとする。もし G_y がその条件は実は充足されていると信じているか、もしくは他の行為によりその条件を充

足させることができると信じているなら、 G_y の自己プランにおけるその行為は完全である。そしてそのことは G_x へ送られた共同示唆に記述されている。それゆえに G_x が落札を受信すれば、彼はその条件は既に充足されているか、もしくはいつかは充足されることを信じることができる。

逆に G_y に送られた示唆には、 G_x はそれらの前提条件が成立していることを知らないということが記述されている。よってもし G_y がその条件を成立させるための部分プランを実行できるなら、それを実行し G_x の障害を除去しようとする。

第2章の例題における open(DOOR) は共同行為者 g_1 にとっては上の意味で障害であり、他の共同行為者 g_2 の行為 open(g_2, d_{23}) はその障害を除去する。

(2) 負荷の平衡

共同プランは複数契約者による整合した、もしくはシナジイ的行為をノードに持つ有向非循環グラフである。もし共同プランの中に並行に実行でき複数の部分プランが含まれている場合、共同契約者はそれらの部分プランの実行に関して契約者間の負荷を平衡させるようにする。

(3) 共同の時間コストの効率

共同プランに複数の可能性がある場合は、各行為の時間コストをもとにそれらの中から最もコストの低いものを選択する。

以上 (1)、(2)、(3) の基準を踏まえ、共同プラン生成アルゴリズムの概要を図3に示す(詳細は[Osawa and Tokoro 90a])。この共同プラン生成で各共同契約者は、与えられた共同示唆と上で述べた三つの基準を考慮に入れ、もとの自己プランを洗練し、共同において自分がいずれの行為を実行するかを決定する。以下に示すアルゴリズムの概要(共同契約者を G_x と G_y と仮定した場合の、 G_x における共同プラン生成を示している)に現れる CC、CI、IC、そして II というケースは、共同契約者 G_x の自己プラン P_x と共同示唆 S_x に記述された他の共同契約者の共通行為の完全さを表している。例えばプラン P_x の行為 $O_{x(i)}$ が IC であるとは行為 $O_{x(i)}$ が不完全で、共同示唆 S_x に示される他の共同契約者の共通行為 $O_{y(i)}$ が完全であることを意味する。さらに説明中の前提条件とは自己プランにおいて充足されていないとした前提条件のこととする。

共同契約者 G_x において、この共同プラン生成の結果得られた洗練された自己プランは共同プランとよばれ

1. 各共通行為 $O_{x(i)}$ に対し時点的に最後のものから順に、もし $O_{x(i)}$ がシナジイ的行為であり、もし $O_{x(i)}$ が II なら、 $O_{x(i)}$ と $O_{y(i)}$ で共有されない前提条件は充足されるものと仮定し、信念データベースを更新。さもなくて、もし $O_{x(i)}$ が IC か CI であれば、それらの前提条件はすべて充足されるものと仮定し、信念データベースを更新。さもなくて、もし $O_{x(i)}$ が CC なら、その行為より連続する共通部分プランを同定し、より低コストの契約者が実行する。相手が実行する場合はその効果を反映し信念データベースを更新。同コストの場合は決定を3まで保留。さもなくて、もし CI なら、その行為は自分が実行。さもなくて、もし IC なら、その行為は相手が実行。その効果を反映し信念データベースを更新。さもなくて、もし II なら、より低コストの契約者が実行する。相手が実行する場合はその効果を反映し信念データベースを更新。同コストの場合は決定を3まで保留。
2. 共通でない自己の行為の内、相手の障害除去となる行為と共同に必要な行為を除いて実行しない。さらに1で共同相手が実行すると判断した行為も実行しない。
3. 決定を保留した行為は共同契約者と対話することにより、相互の負荷を考慮に入れて選択し合い、その結果を反映し信念データベースを更新。
4. 3の後にも未だ自己プランに不完全行為が残る場合は、その前提条件の充足を依頼する RFP を BB へ送る。

図3: 共同プラン生成の概要

CP_x とかかれる。同様に G_y は CP_y を生成する。第2章の例を用いると共同契約者 g_1 と g_2 は以下の共同プラン CP_{g_1} と CP_{g_2} をそれぞれ生成する。各共同行為者は自己の行為を実行した後に、その効果を反映すべく信念データベースを更新する。

$$CP_{g_1} = \{\text{pickup}(g_1, b, T_j, \tau_{\text{pickup}}^{g_1}), \text{move}(g_1, b, r_1, r_2, T_{j+1}, \tau_{\text{move}}^{g_1}), \text{move}(g_1, b, r_2, r_3, T_{j+2}, \tau_{\text{move}}^{g_1})\}$$

$$T_j + \tau_{\text{pickup}}^{g_1} < T_{j+1}, T_{j+1} + \tau_{\text{move}}^{g_1} < T_{j+2}$$

$$CP_{g_2} = \{\text{open}(g_2, d_{23}, T_i, \tau_{\text{open}}^{g_2})\}$$

$$T_i + \tau_{\text{open}}^{g_2} < T_{j+2}$$

この CP_{g_1} と CP_{g_2} を適切に時点順序制約を満たすように実行すると第2章で述べた好ましい共同プラン

$CP_{g_1g_2}$ が得られる。

5 関連研究

第 2 章でも述べたように契約ネット [Davis and Smith 83] は目標を副目標に分解し、各副目標を単一契約者に相互選択を通して割り当てることを可能にする一般的なプロトコルである。契約ネットはまた動的で機会主導型の制御を提供する。我々の提案した組織スキーマは複雑なタスクの割り当てを複数の契約者に対して行ない、それらの契約者間で共同することを可能にする。これは契約ネットにおいては下位契約によって達成されていたような問題を、同じレベルの契約者による共同で解決しようというものである。

分散した複数のプラン生成器を制御する一般化された集中型プラン生成は Sacerdoti の NOAH システムに基づいて研究された [Corkill 79]。Corkill の論文では結合した目標をトップの制御により分解され、各副目標がまたトップの制御により分散プラン生成器に割り当てられるという状況の下で、いかに各分散階層プラン生成における競合を解消するかという問題に焦点を当てている。分散プラン生成を開放環境で考えた場合、この様なトップダウンの視点から行なわれる目標分解と副目標の割り当てには第 2 章で述べた様にいくつかの問題がある。我々のスキーマは複雑な目標を達成する共同するプランの機会主導型制御を与え、その様な問題の解決に一つの提案を行なっている。

プランの整合はマルチエージェントプラン生成において非常に重要な課題である。Georgeff は [Georgeff 83] において複数行為者間で個々のプランを結合したときに起きる相互干渉の問題を指摘し、解決策として元のプランに適切な同期行為を組み入れる方法を提案している。我々は行為の整合でも、この競合解消の側面ではなく、複数のエージェントが共同することにより以前は完全でなかったプランを完全にすることに着目し、それを実現する一つの方法を提案した。この協調における競合解消と共同はより適切な分散プラン生成を考える上では融合されるべきものであると考える。

Martial は分散マルチエージェントプラン生成における行為者間の積極的協調 (positive coopertion) について研究した [Martial 90]。上でも述べた様にこれまでの分散協調プラン生成の多くの研究はいかに競合を解消するかという点、つまり消極的協調に焦点を当てている。しかしながら Martial は、favor と呼ばれる行為

者間の関係により建設的效果を得る方法を提案している。彼の提案する方法は、様々な抽象化のレベルで表現されたプランを、それを実行する前にそれらの内容について通信しあえる自律的で知的な行為者の集まりを仮定し、それらの行為者間で整合的にプランを精練するものである。我々のスキーマではこの様な積極的協調は実際にその必要が生じた時に行なわれ、それが分散環境における機会主導型の共同を提供する。

6 結論と展望

マルチエージェントシステム、特にその開放型分散という性質に着目した場合の共同プラン生成スキーマを提案した。開放型分散環境においては、全ての行為者の信念や技能は部分的であり、様々な目標を達成することに関して単一の行為者が最初から完全であることはあり得ない。本稿で提案したスキーマは、その様な状況においても、単一行為者では達成できない様な複雑な目標を、それらの部分的な行為者が機会に応じて組織を構成し共同することにより達成することを可能にする。

今後は以下の様な展開を考えている。先ず包括的な組織的協調スキーマを実現するために、前章で挙げた競合解消と本稿で述べた共同という考えを融合していく必要がある。

また、本稿では各行為の抽象化に用いる語や抽象化レベルを暗黙の内に特定の行為者において共通であるとしたが、この仮定は開放型分散環境においては自然には成立しない。つまり開放型分散環境において、行為者間の共通の知識を何ら前提条件無しに持つことは原理的には不可能である。よってどの様な知識とメカニズムを仮定すれば、SocioAgent が必要とする共通知識を持てる様になるのかを明らかにしていく必要がある。

最後に、本稿では行為者の学習の側面には一切ふれなかった。しかしながら複数行為者が共同すれば、そこで得た相互の知識は後に再び有効になることがあると考えられる。一般に開放型分散環境における動的組織スキーマは計算量的には高いと考えられるので、この様な共同の結果得た様々な知識を各行為者において経験的知識として学習していくことが重要である。

これらの点について今後 SocioAgent モデルを発展させていく予定である。

参考文献

- [Bond and Gasser 88] Alan H. Bond and Les Gasser, editors. *Readings in Distributed Artificial Intelligence*. Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1988.
- [Corkill 79] Daniel D. Corkill. Hierarchical planning in a distributed environment. In *Proceedings of Sixth International Joint Conference on Artificial Intelligence*. IJCAI, Inc., 1979.
- [Davis and Smith 83] Randall Davis and Reid G. Smith. Negotiation as a Metaphor for Distributed Problem Solving. *Artificial Intelligence*, Vol. 20, pp.63-109, 1983.
- [Fikes and Nilsson 71] R. E. Fikes and Nils J. Nilsson. STRIPS: A New Approach to the Application of Theorem Proving to Problem Solving. *Artificial Intelligence*, Vol. 2, No. 3, pp.189-205, 1971.
- [Georgeff 83] Michael P. Georgeff. Communication and interaction in multi-agent planning. In *Proceedings of The Third National Conference on Artificial Intelligence in 1983*. AAAI, 1983.
- [Halpern and Moses 85] J. Y. Halpern and Y. O. Moses. A guide to the modal logics of knowledge and belief. In *Proceedings of Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Los Angeles, CA, August 1985. IJCAI, Inc.
- [Huhns 87] Michael N. Huhns. *Distributed Artificial Intelligence*. Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1987.
- [Martial 90] Frank von Martial. Coordination of plans in multiagent worlds by taking advantage of the favor relation. In *Proceedings of The Tenth International Workshop on Distributed Artificial Intelligence*. AAAI, 1990.
- [Nilsson 80] Nils J. Nilsson. *Principles of Artificial Intelligence*. Tioga Publishing Co., 1980.
- [Osawa and Tokoro 90a] Ei-Ichi Osawa and Mario Tokoro. Collaborative Plan Construction for Multiagent Mutual Planning. Technical Report SCSL-TR-90-013, Sony Computer Science Laboratory Inc., December 1990.
- [Osawa and Tokoro 90b] Ei-Ichi Osawa and Mario Tokoro. SocioAgent: A Society of Rational Speech Actors. In *Proceedings of 7th Conference of Japan Society for Software Science and Technology*, October 1990. also appeared in SCSL-TR-90-011 of Sony Computer Science Laboratory Inc. (in Japanese).
- [Shoham 90] Yoav Shoham. Agent-Oriented Programming. Technical Report STAN-CS-90-1335, Department of Computer Science, Stanford University, October 1990.

Appendix: 行為者の信念と行為規則の例

以下に各行為者の信念と行為規則を例題に関係する部分のみ記する。信念と行為規則の形式に関する詳細は第3章を参照のこと。以下で各行為者自身の信念は簡略化のためにBオペレータの引数となる行為者(自分自身)を省略してある。また仮想時計より得られた時点には実際は具体的な時間が与えられるが、ここではそれらをパラメータ化しておき、 $\forall i, \forall i(i \leq j \rightarrow t_i \leq t_j)$ であるとする。

agent: g_1

belief:

$B(\text{block}(b), t_0)$. $B(\text{handempty}(g_1), t_1)$. $B(\text{room}(r_1), t_6)$. $B(\text{room}(r_2), t_7)$. $B(\text{in}(g_1, r_1), t_8)$. $B(\text{onfloor}(b, r_1), t_6)$.
 $B(\text{boundary}(d_{1z}, r_1, r_z), t_6)$. $B(\neg \text{open}(d_{2z}), t_7)$. $B(\text{boundary}(d_{12}, r_1, r_2), t_7)$. $B(\text{boundary}(d_{2z}, r_2, R_x), t_7)$.
 $B(\text{open}(d_{12}), t_7)$. $B(\text{boundary}(D, R_1, R_2) \supset \text{boundary}(D, R_2, R_1), t_0)$. $B(\text{holding}(G, Obj) \supset \neg \text{handempty}(G))$.

action rule:

$\text{pickup}(G, Obj, T, \tau_{\text{pickup}}^{g_1})$
precond: $B(\text{handempty}(G), T)$, $B(\text{in}(G, R), T)$, $B(\text{onfloor}(Obj, R), T)$
effect: $B(\neg \text{handempty}(G), T + \tau_{\text{pickup}}^{g_1})$, $B(\neg \text{onfloor}(Obj, R), T + \tau_{\text{pickup}}^{g_1})$, $B(\text{holding}(G, Obj), T + \tau_{\text{pickup}}^{g_1})$.
 $\text{putdown}(G, Obj, T, \tau_{\text{put}}^{g_1})$
precond: $B(\text{holding}(G, Obj), T)$, $B(\text{in}(G, R), T)$
effect: $B(\neg \text{holding}(G, Obj), T + \tau_{\text{put}}^{g_1})$, $B(\text{handempty}(G), T + \tau_{\text{put}}^{g_1})$, $B(\text{onfloor}(Obj, R), T + \tau_{\text{put}}^{g_1})$.
 $\text{move}(G, Obj, R_z, R_y, T, \tau_{\text{move}}^{g_1})$
precond: $B(\text{in}(G, R_z), T)$, $B(\text{holding}(G, Obj), T)$, $B(\text{boundary}(DOOR, R_z, R_y), T)$, $B(\text{open}(DOOR), T)$
effect: $B(\neg \text{in}(G, R_z), T + \tau_{\text{move}}^{g_1})$, $B(\text{in}(G, R_y), T + \tau_{\text{move}}^{g_1})$.
 $\text{trans}(G_z, G_y, Obj, T, \tau_{\text{trans}}^{g_1})$
precond: $B(\text{holding}(G_z, Obj), T)$, $B(\text{in}(G_z, R), T)$, $B(\text{in}(G_y, R), T)$, $B(\text{handempty}(G_y), T)$
effect: $B(\neg \text{handempty}(G_y), T + \tau_{\text{trans}}^{g_1})$, $B(\neg \text{holding}(G_z, Obj), T + \tau_{\text{trans}}^{g_1})$,
 $B(\text{holding}(G_y, Obj), T + \tau_{\text{trans}}^{g_1})$, $B(\text{handempty}(G_z), T + \tau_{\text{trans}}^{g_1})$.

agent: g_2

belief:

$B(\text{block}(b), t_0)$. $B(\text{handempty}(g_2), t_1)$. $B(\text{room}(r_1), t_2)$. $B(\text{room}(r_2), t_3)$. $B(\text{room}(r_3), t_4)$. $B(\text{in}(g_2, r_2), t_5)$.
 $B(\text{boundary}(d_{12}, r_1, r_2), t_3)$. $B(\text{boundary}(d_{23}, r_2, r_3), t_4)$. $B(\text{open}(d_{12}), t_3)$. $B(\neg \text{open}(d_{23}), t_5)$.
 $B(\text{boundary}(D, R_1, R_2) \supset \text{boundary}(D, R_2, R_1), t_0)$. $B(\text{holding}(G, Obj) \supset \neg \text{handempty}(G))$.

action rule:

$\text{pickup}(G, Obj, T, \tau_{\text{pick}}^{g_2})$
similar with that of agent g_1 .
 $\text{move}(G, Obj, R_z, R_y, T, \tau_{\text{move}}^{g_2})$
similar with that of agent g_1 .
 $\text{trans}(G_z, G_y, Obj, T, \tau_{\text{trans}}^{g_2})$
similar with that of agent g_1 .
 $\text{open}(G, DOOR, T, \tau_{\text{open}}^{g_2})$
precond: $B(\text{in}(G, R), T)$, $B(\text{boundary}(DOOR, R, X), T)$, $B(\neg \text{open}(DOOR), T)$, $B(\text{handempty}(G), T)$
effect: $B(\text{open}(DOOR), T + \tau_{\text{open}}^{g_2})$.

agent: g_3

belief:

$B(\text{handempty}(g_3), t_1)$. $B(\text{block}(b), t_0)$. $B(\text{room}(r_3), t_7)$. $B(\text{in}(g_3, r_3), t_7)$. $B(\neg \text{open}(d_{y3}), t_7)$. $B(\text{open}(d_{3z}), t_6)$.

action rule:

$\text{trans}(G_z, G_y, Obj, T, \tau_{\text{trans}}^{g_3})$
similar with that of agent g_1 .