

## 対象領域の意味を重視した通信にもとづく協調問題解決

吉田哲也 堀浩一 中須賀真一

東京大学大学院工学系研究科先端学際工学

### 概要

通信の目的や意図の扱いを重視したマルチエージェントにおける協調の枠組に向けて、領域で扱われる対象自体をエージェント間の通信内容に反映させることを提案する。対象領域と協調を切り分け、直接的に意味を示す言葉の通信を可能にする基盤の提供により協調を目指す従来の枠組とは異なり、間接的に意味を具現するものを通信内容の基礎にし、内容の解釈を各エージェントに委ねることで、マルチエージェントの多元論的特質の利用の促進を目指す。また、直接的な協調戦略ではなく、他のエージェントからの自身の問題解決結果へのコメントを利用した協調方法を提案する。例題として人工衛星設計を取り上げ、設計における競合解消に対するこの枠組の適用例を報告する。

## Cooperative Problem Solving via Enriching Communication Contents

Tetsuya Yoshida Koichi Hori Shinichi Nakasuka

Interdisciplinary Course

Research Center for Advanced Science and Technology

University of Tokyo

### 概要

Toward the cooperation framework in multi-agent system, we propose to reflect the domain objects themselves in communication in order to enrich communication contents. Conventional approaches often aim at providing infrastructure for communicating words which are supposed to denote meaning directly. In the system we propose to use the domain objects which embody meaning indirectly as the basis of contents. This will lead to exploiting pluralism in multi-agent system effectively since each agent itself elicits meaning subjectively. As for the cooperation mechanism, instead of direct cooperation strategies, each agent utilizes "comment" from peers on its own proposal. Automatic satellite design by agents illustrates the application and working of our approach.

## 1 はじめに

マルチエージェント (MA) システムによる協調問題解決においてはしばしばエージェント間通信が利用されるが、従来の研究では KIF や KQML などのような、エージェント間通信を可能にするための形式的プロトコルの提供を目的とするものが多かった [6, 7]。形式的な通信規約により通信は可能となったが、エージェント間の協調の促進のために何を通信すべきかという通信の中身の問題にはあまり焦点が当てられてこなかった。本稿では通信の目的や意図の扱いを重視した協調の枠組に向けて、従来のような直接的に意味を示す言葉を通じて通信するのではなく、エージェントが扱う領域において間接的に意味を具現するものを通信内容に反映させることを提案する。この研究では、設計における意味を具現する設計解自体を通信内容の基礎にすることで協調を行うことを目指す。

協調問題解決においてしばしば発生する競合に対して、Klein [4] や Lander [5] の研究に代表されるような、問題領域とは独立に交渉戦略や競合解消戦略を備えておく研究が多い。しかし、問題領域と全く切り離された戦略を用意し適用することは汎用性をもたらす反面、領域固有の意味に沿った協調を阻害する可能性がある。本稿では領域における意味を重視したアプローチとして、各自の問題解決結果へのコメントを領域本来の表現で他のエージェントから受け取ることによって協調を促進する方法を提案する。ここでは、自身の提案を初期状態として問題解決を行ってもらった場合に生成される解を他のエージェントからのコメントとみなし、これを協調に利用することで競合解消を行う。

さらに、意味を具現するものを基礎にした通信内容の発展として、生成される解における各エージェントの意思決定に対する重要性の強弱を annotation として付加することで、解の中のどの部分が重要かという意図の伝達を助けることを提案する。

## 2 対象領域

本稿では複雑な問題解決の例として小型人工衛星の自動設計を扱う。人工衛星設計のような現実的な設計には様々な要求や制約が関与するが、

現実的な時間的制約のもとでは最適解を求めることは事実上不可能である。このため、種々の制約や要求の適切なバランスを取る準最適解を機会主義的に求めることが必要となる。

本研究では設計の上流工程にあたる制約や要求はユーザーから与えられると仮定する。ここでは指定された人工衛星の構体と搭載機器に対して、機器配置の決定、補助機器の選定と配置、表面素材の変更等によって制約充足する解を求めることで設計を行う。設計はパラメトリックな設計の枠組で行われ、用意された形式的な人工物の構造表現において適切なパラメータ値を設定することで設計解を構築する。本稿では表 1 に示される搭載機器を含み、表 2 の制約を満たす衛星設計を例に説明を行う。

サブシステム名	機器名称	重量 [kg]	消費電力 [W]
姿勢制御系	磁気トルカ × 2	1.5 × 2	1.5 × 2
	サンセンサー	2.0	7.0
電源系	PSU	1.9	7.0
	太陽電池	0.23	0.0
	バッテリー	4	0.0
ミッション機器	センサー × 2	1.5 × 2	4.0 × 2
	プローブ	3.0	0.0
通信系	コンピュータ	0.1	2.0
	レコーダー	2.0	2.0
	TT & C	2.49	8.75
	アンテナ	0.3	0.0

表 1: 搭載機器要求

項目	制約
構造	重心位置 5cm 以内
熱	各パネル面の温度が機器の許容範囲
通信	リンクマージンが 3 dB 以上

表 2: 人工衛星における制約の例

衛星の設計例を図 1 に示す。なお、以下では設計された人工衛星の物理的な構造表現をモデルと定義する。モデルの表現例は表 3 に示される。

## 3 システムの実装

### 3.1 エージェントの働き

複雑な設計においては制約や要求はその性質により自然にいくつかのグループに分けられることが多い。この研究ではそれぞれのグループを担当

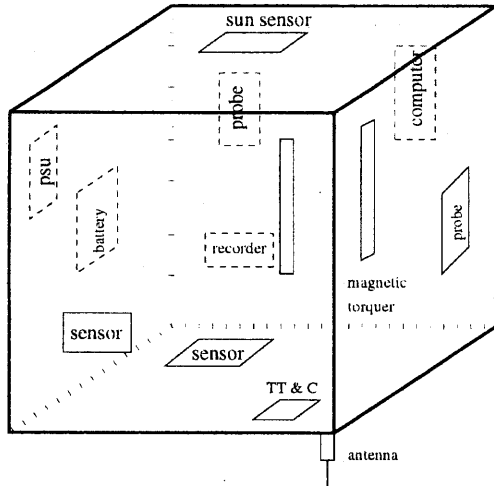


図 1: 人工衛星の設計例

当するエージェントを用意することで協調問題解決を行わせる枠組に基づき、ここでは人工衛星設計を構造設計、熱設計、通信設計に分割し、それぞれにエージェントを対応させる。

各エージェントはモデルに表現される物理的構造表現としての属性から、モデルの持つ機能としての性質を取り出す(図 2 参照)。本研究では

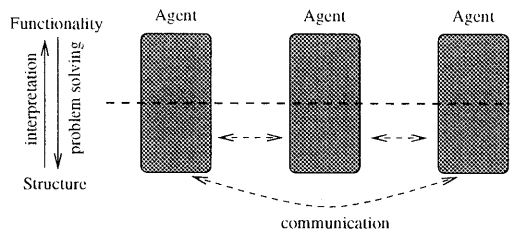


図 2: エージェントの働き

モデルの持つ機能的性質をエージェントにとってのモデルの意味と定義する。エージェントはモデルに対して Agenda に基づく古典的な局所問題解決を行い、探索途中の解をその機能的性質に基づいて評価し、備えられた知識(ここではオペレータ)を適用して解を修正することで設計を進めて行く。オペレータの例を表 4 に示す。

機器	パネル面	パネル上での	
		重心座標 (x y) (cm)	
磁気トルカ 1	3	(20 20)	
磁気トルカ 2	4	(20 20)	
サンセンサー	2	(17 17)	
PSU	2	(-1 8)	
バッテリー	6	(0 13)	
センサー 1	2	(0 0)	
センサー 2	1	(10 10)	
プローブ	4	(0 0)	
コンピュータ	2	(10 10)	
レコーダー	3	(10 0)	
TT & C	2	(11 -3)	
アンテナ	1	(17 17)	
表面素材	1	Epoxy White	
表面素材	2	Epoxy Black	
表面素材	3	Epoxy White	
表面素材	4	Epoxy White	
表面素材	5	Epoxy Black	
表面素材	6	Epoxy White	

表 3: 人工衛星のモデル表現例 (太陽電池は固定される)

### 3.2 システムアーキテクチャ

マルチエージェントによる人工衛星設計システムのアーキテクチャは図 3 に示される。環境はエージェントが相互作用により設計を行う場として働き、全体的な制約条件の提示と各エージェントの提案の集積から設計終了判断を行う。設計は同期的に行われ、各回の提案においてエージェントは許された探索ステップ数の制限内で機会主義的に局所問題解決を行い、その中で一番よいと思われる設計解をそれぞれが提案する。

エージェント	オペレータ
構造	機器の移動(パネル面と重心位置)
	バランスウェイトの追加
	パネル厚さの変更
熱	機器の移動(パネル面)
	ヒートパイプの追加
	表面素材の変更
通信	アンテナタイプの選定
	アンテナの長さの変更

表 4: オペレータの例

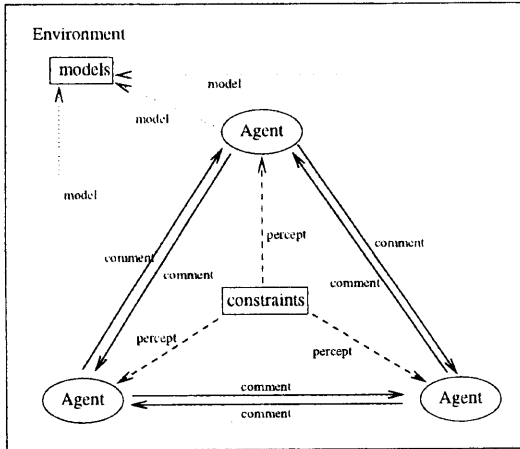


図 3: システムアーキテクチャ

全体システムにおいて各エージェントは割り当てられた機能を担当する対等の存在として扱われる。エージェント間には上司や部下のような関係は予め規定されず、担当する機能を満たす解を追求する際には他からの命令を受けはしないが、自身の必要性、たとえば自身の固執のために制約充足されない場合、には譲歩や妥協を行う。各エージェントが命令を受けずに役割を担うという意味で対等であるということでエージェントの自律性を保証している。

## 4 協調の枠組

### 4.1 協調のための通信内容

#### 4.1.1 意味を示す言葉

従来のマルチエージェントにおける通信の研究においては、KIF などの共通知識交換用言語や KQML などの形式的通信プロトコルを提供し、異種システム間の通信を可能にすることを目的とするものが多かった [6, 7]。この通信の枠組においては (図 4 参照)、領域における意味と共通知識交換用言語での表現の間の対応を (1), (5) において領域知識として整備しておき、領域での意味を抽象化して共通表現における意味を示す言葉に変換した後は、直接的に意味を示す言葉の通信を通じて協調を行う。

この枠組では  $tell(X)$ ,  $ask(X)$  のような形式的

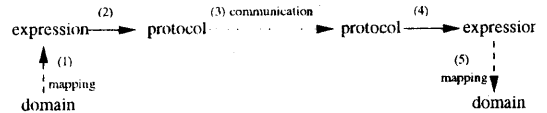


図 4: 形式的通信プロトコルの枠組

な通信プロトコルは提供されたが、意味を伝えあって協調を行うために具体的に何を通信すべきかに対する指針には焦点が当てられてこなかった。また、共通表現におけるエージェント間の意味に対する合意を要求し、各エージェントが扱える意味は共通表現への翻訳が可能なものに限定され、マルチエージェントによる多元論的な意味の扱いに制限が課せられている。

さらに、個々の対象領域に対してシステムを構築する際に、領域における意味と直接的に意味を示す言葉の間の対応に対して恣意性をどう排除するかという問題も残る。このため、エージェントの振舞を抽象化し、エージェントの外部から割り当てられた意味を示す言葉を通ずる枠組では、エージェントにとっての本来の意味を扱って協調を行うことに対して不十分となる可能性がある。

#### 4.1.2 意味を具現するもの

本研究では、直接的に意味を示す言葉ではなく、間接的に意味を具現するものを通信内容の基礎とし、各エージェントは通信内容から自身にとっての意味をそれぞれが抽出して協調を行うという枠組を提案する。ここでは設計対象であるモデルそのものを通信内容に反映させ、各エージェントはそのモデルの機能を自身が解釈することでモデルの意味を取り出す。これは、設計という問題解決では設計結果の物理的構造表現であるモデルが領域における意味を具現し、また各エージェントが行う問題解決の意図を要約して表現すると考えられるからである。

この枠組では意味を示す言葉ではなく設計対象のモデル表現自体が共通知識表現として働き、これが通信言語としての役割を果たす。複数のローバーが協調する際には、ローバーが抽出するセンサー情報に対して実世界が共通の Grounding [9, 3] を提供するのと同様に、モデル表現は対象領域において注目すべき共通の属性を (客観的に)

示す役割を果たし、これが各エージェントがモデルから抽出する(主観的な)意味に対する Grounding につながる可能性が生まれる。エージェントにとっての意味が対象領域における(客観的な)属性から導き出されることで、視点の違いによりモデルの意味(機能)の解釈が異なるエージェント間で、領域における意味を伝えあう通信の枠組に近付くことが期待される。

## 4.2 協調メカニズム

マルチエージェントによる協調問題解決においてはエージェント間にしばしば競合が発生する。ここではエージェント間で受け渡される通信内容を利用して競合解消を行い協調を促進するメカニズムを説明する。

### 4.2.1 直接的な指令

従来の研究では対象領域とは切り分けて競合解消戦略を独立に扱うものが多い [4, 5]。この枠組においては(図5参照)、エージェントは黑板モデルのようにそれぞれが直接的な提案を行い、提案の間に生じる競合を検出する。発生した競合に対し、提案するエージェント相互の信頼度や確信度の利用、あるいは一つのエージェントがリーダーとなることなどで競合解消戦略を起動する。一回の命令あるいは数回の交渉により戦略に対する合意を得、戦略に記述される直接的な指令に基づいてエージェントの振舞を変更させることで協調を実現する。

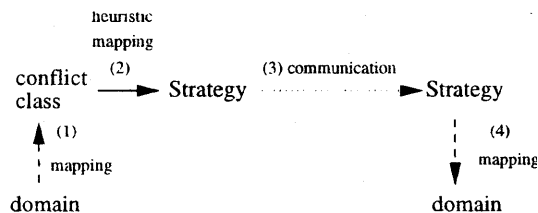


図 5: 競合解消戦略にもとづく枠組

### 4.2.2 コメントの利用

本研究ではエージェントの振舞に対する直接的な指令ではなく、自身の振舞に対する他からのコメントを間接的な情報として利用する協調方法

を提案する。自分の提案する解を出発点として他のエージェントに問題解決を行ってもらった結果の解を自身の解に対する「コメント」と捉え、そのコメントの解釈を通じて各自が協調の仕方を判断していく。設計のような機会主義的な問題解決では初期状態の影響が大きく、コメントとして返される解には自身の提案が強く影響を及ぼすため、コメントを自身の振舞へのフィードバックとして利用することが可能となる。

問題解決結果(ここではモデル)へのコメントから、各エージェントはどの部分は既に合意がとられているかを判断し、また自分の提案がどのように修正されるかによって相手はどんな解を望んでいるのかを自身の観点から解釈する。これによりシステム全体としての合意を得やすい解の性質に関する情報を取り出し、それを次回の問題解決に反映させる。

この方法の利点としては、他から渡されるデータ(設計解)に対して、なぜそのデータが渡されたのか、相手がどんな戦略に従って振舞っているのか等の他のエージェントの内部状態を明示的に扱わなくても、データに対する自身の解釈のみで協調が行われるという単純さが挙げられる。また、通信によって得られる情報が、対等な他のエージェントがどう考えているかではなく、自分の提案が修正されることで自分にとってその提案がどんな結果をもたらすのかを示しているため、自分が妥協や譲歩を行うことに対する必然性が生じやすく、エージェントの自律性を損ないにくいと考えられる。

通信に使用されるデータ表現は共通であることが要求されるが、それを解釈し情報とすることは各自がそれぞれの観点から行うので、明示的に要求や命令などの言語行為に沿った協調 [2, 8] よりもエージェントの自律性が保たれやすく、システム全体としてマルチエージェントの多元論的特質を利用しやすくなると期待される。

### 4.2.3 提案自体の利用

エージェントがコメントを介して自身の提案を修正することでそれぞれが独自の解を追求するだけでは、単なる並列処理によって複数の提案が生成されるに留まる。システム全体としての協調問題解決を積極的に利用して一つでも良い解を生

成するには、相互の提案自体も利用してより積極的な相互作用を行う必要がある。

エージェントが他からの提案にコメントを渡す際に、その提案が既に自身が担当する機能における制約を充足する場合には提案は修正されない。このため相手は提案や問題解決に対するフィードバックを受けることが不可能となる。この場合には提案の修正結果ではなく自身の提案を渡すことで提案そのものを利用し、相手が自分の提案にすりあってくるようになることを期待する。制約充足する提案を生成したエージェントがより積極的に自分以外の提案の影響を受けるため、独自の解の追求だけではなく、全体としての合意に向けてエージェントが協調していくことにつながると考えられる。

#### 4.2.4 Annotation の利用

設計解をそのまま通信しあうだけでは解がどのように修正されてきたのかが通信内容に表現されず、設計解を修正する際にループが発生する恐れがある。例えば、バッテリーは重く大量に発熱するため、構造エージェントが重心位置の制約を満たすためにバッテリーの機器位置を修正した解を提案した場合、熱エージェントがその修正を打ち消すようなコメントを返した場合にはループに陥ってしまうことがある。

ここでは、モデルを基礎にした通信内容の発展として、モデルにおけるパラメータ値の設定への相対的な重要性（エージェントにとっての意味を示す言葉ではない）を annotation として付加する。パラメータ値設定という意思決定に対する強弱を付加することで、解の中でどの部分が提案したエージェントにとって重要かという意図を伝えあい、これによりエージェント相互の協調を促進することを助けている。

重要と付加された部分は極力修正を避けるようにエージェントが相互に努力することでループ回避を期待するが、annotation が命令として利用されるのを防ぐために、相対的な扱いに留めて絶対に修正しないことは保証しない。このため、項書き換えによる定理証明で利用される annotation の役割 [11] に類似するが停止性を保証せず、弱いメカニズムとなっている。また、annotation の aging により重要度を下げていくことで、古い

annotation の悪影響がでないようにしている。

Annotation の利用スキーマはエージェント間で共通であることが要求されるが、あるエージェントが重要と付加した部分を別のエージェントも重要と解釈することを強制するわけではない。しかし、利用スキーマの共通性により相互の振舞の予測が可能となり、提案に対するプランニングに発展していくことが期待される。

## 5 システムによる設計例

ここでは本稿における枠組に沿ったシステムによる人工衛星の自動設計例を紹介する。各エージェントは表 1 に示される搭載機器を含み、表 2 にある制約条件を満たす設計解を、表 4 のオペレータを適用することでそれぞれ提案していく。なお、以下の例では協調の枠組に焦点を当てるために熱エージェントと構造エージェントが協調して設計を行う場合を紹介する。

問題解決に対する初期状態と分担する機能の違いにより、両者の提案する解の間には差異が生じる。これに対しエージェントは通信を通じて競合解消を行うことで差異の減少による合意と制約充足する解の追求を行う。同期的に提案を提示することを繰り返していく中で、各エージェントは自身の提案の履歴により、自分の固執により自身の提案が局所解に陥っているかを検出していく。

設計サイクルの初期において表 5 の提案がなされたとしよう。この場合にはまだ両者とも局所解に陥っていないため、提案に対するコメントとして修正された解が渡された場合、自分の担当する機能に影響を及ぼすパラメータの設定には固執し、そうでない場合には単純に平均をとったり受け入れたりするなどにより譲歩を行い、次の設計サイクルにおける初期状態を決定して合意をとうろと努力する。例えば、熱エージェントにとってはパネル面の番号のみが自身の設計に影響を及ぼし機器の重心位置は無関係なため、面番号が異なる場合には自分の考えに固執するが、同じ場合には単にコメントにおける修正を受け入れる。構造エージェントは熱エージェントがコメントにおいて提案するヒートパイプの意味（機能）は理解できないが、その重量が衛星の重心位置に影響を及ぼすために自分が担当する機能追求と干渉を生じ

機器		提案		コメント		初期状態	
		面	重心座標	面	重心座標	面	重心座標
熱	磁気トルカ1	3	(20 20)	3	(-10 5)	3	(-10 5)
	バッテリー	6	(0 13)	3	(10 -10)	6	(0 13)
構造	PSU	2	(5 20)	4	(-10 5)	2	(5 20)
	バッテリー	3	(20 -5)	6	(0 13)	3	(20 -5)
	表面素材	3	Epoxy White	3	Epoxy Black	3	Epoxy Black
	ヒートパイプ			2,4	10 cm		

表 5: コメント利用例 - 局所解でない場合

る。局所解に陥っていない場合にはそれを受け入れる必然性がないためにこの修正を却下する。

設計サイクルが進み、両者ともに局所解に陥った場合に表 6 の提案がなされたでしょう。この場合には自身の固執が局所解に陥った原因だと判断して、より積極的にコメントにおける修正を次の設計サイクルにおける初期状態に受け入れていく。例えば、熱エージェントはパネル面番号の修正を受け入れ、構造エージェントはヒートパイプがそれまでも繰り返し要求されていれば受け入れることで積極的な譲歩を行う。

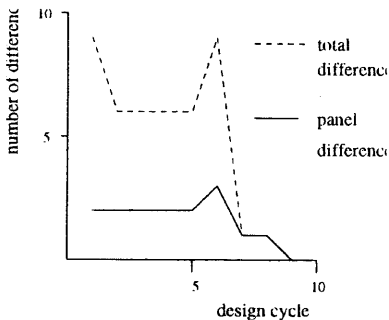


図 6: 設計における差異の変遷

以下、上記のプロセスを繰り返すことで、設計における差異は図 6 に示される様に変遷し、制約充足する解を両者が提案することで設計が終了する。

## 6 他の方法論との比較

KQML に代表される共通の知識交換用言語や通信言語を提供することを目指す方法論では、領域で扱う対象を抽象化することで通信量を減少させて効率的な通信を可能にしている。また、この

研究のように領域で扱われる対象と通信を密接に関連させることは、通信モジュールの領域依存性を強くし汎用性が損なわれる恐れがあるが、対象を抽象化して切り離すことで通信手段の汎用性もたらされている。

Klein は [4] において、Clancy の Heuristic Classification [1] の枠組に沿って競合解消を個々の問題領域と対等の独立した領域とみなし、競合解消における領域知識として競合のクラス分けとそれに対するヒューリスティック戦略を用意する枠組を示した。領域の性質を抽象化し、独立な領域として豊富な競合クラスと戦略を用意することで、競合解消に対して汎用的なシステムを提案している。

Sycara は [10] においてエージェントの提案への支持理由を明示的に扱い、その支持理由を変更させる説得案を提示することで競合解消を行う枠組を示した。定性的な指示理由の使用により競合解消の合理性や正当性が扱われ、人間にもエージェントの競合解消プロセスが理解しやすいという利点がある。

	KQML	Klein	Sycara	本研究
通信内容の一般化	○	○	×	×
一回の通信量	NA	○	○	△
通信回数	NA	○	△	△
競合解消	NA	◎	○	○
汎用性	◎	○	△	△
意味の扱い	×	△	◎	◎
対象の構造の扱い	NA	△	×	◎
交渉の粒度	NA	○	△	△

表 7: 協調方法論の比較

	機器	提案		コメント		初期状態	
		面	重心座標	面	重心座標	面	重心座標
熟	レコーダー	3	(10 0)	3	(-10 15)	3	(-10 15)
	バッテリー	6	(0 13)	3	(10 -10)	3	(10 -10)
構造	PSU	2	(5 20)	4	(-10 5)	2	(5 20)
	バッテリー	3	(20 -5)	6	(0 13)	6	(0 13)
	ヒートパイプ			2,4	10 cm	2,4	10 cm

表 6: コメント利用例 - 局所解に陥った場合

## 7 おわりに

本稿では人工衛星の自動設計をマルチエージェントによる協調問題解決の例題として取り上げ、エージェント間の協調に対する一つの枠組を提案した。対象領域と協調を切り分けて通信や協調の一般的なメカニズムや基盤の提供に焦点を当てる従来の研究とは異なり、ここでは領域における意味を伝えあうことによる協調の枠組に向けて、直接的に意味を示す言葉ではなく間接的に意味を具現するものを通信内容の基礎とすることを提案した。

本稿の通信の枠組における協調方法として、抽象化された情報に基づく競合解消戦略ではなく、各エージェントが自身の問題解決結果へのコメントを領域の言葉で他のエージェントから受け取り、コメントの解釈は各自に任せることによる協調方法を提案した。さらに annotation により意思決定に対する重要性の強弱を付加することで通信内容をより豊かにしている。本研究の枠組が相互の意図を伝えあってマルチエージェントシステムの多元論的特質を利用しやすくすることにつながることを期待している。

## 参考文献

- [1] W. J. Clancy. Heuristic classification. *Artificial Intelligence*, Vol. 27, pp. 289-350, 1985.
- [2] P. R. Cohen, J. Morgan, and M. E. Pollock, editors. *Intentions in Communication*. The MIT Press, 1990.
- [3] S. Harnard. The symbol grounding problem. *Physica D*, Vol. 42, pp. 335-346,

1990.

- [4] M. Klein. Supporting conflict resolution in cooperative design systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 21, No. 6, pp. 1379-1390, 1991.
- [5] S. Lander, V. R. Lesser, and M. E. Connell. Conflict resolution strategies for cooperating expert agents. In S. M. Deen, editor, *Cooperating Knowledge Based Systems*, pp. 183-200, 1990.
- [6] 西田豊明. 協調型アーキテクチャによる知識の共有と再利用. *人工知能学会誌*, Vol. 9, No. 1, pp. 23-28, 1994.
- [7] 西田豊明. ソフトウェアエージェント. *人工知能学会誌*, Vol. 10, No. 5, pp. 704-711, 1995.
- [8] J. R. Searle. *Speech Acts*. Cambridge University Press, 1969.
- [9] J. R. Searle. Minds, brains and programs. *Behavioral and Brain Sciences*, Vol. 3, pp. 417-424, 1980.
- [10] K. P. Sycara. Arguments: Planning other agents' plans. In *IJCAI-89*, pp. 517-523, 1989.
- [11] T. Yoshida, A. Bundy, I. Green, T. Walsh, and D. Basin. Coloured rippling: an extension of a theorem proving heuristics. In *11th European Conference on Artificial Intelligence*, pp. 85-89, 1994.