

# 意味的情報を扱う自律ロボットシステム

\*田中秀幸 矢入健久 町田和雄

東京大学先端科学技術研究センター 宇宙環境システム学

〒153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1 東京大学先端科学技術研究センター14号館

{hide,yairi,machida}@space.rcast.u-tokyo.ac.jp

<http://www.space.rcast.u-tokyo.ac.jp>

**Abstract:** 本稿は、モノや現象に付随する「意味的情報」をロボットが扱うための枠組みを提案し、その構築の試みを示すものである。意味的情報はロボットが直接知覚することが不可能な抽象概念であるが、これらを自律ロボット制御において活用するために、本研究ではロボットプラン表現を再考し、オントロジー工学を応用したタスク世界のモデル化と知識記述および推論による問題解決を試みる。本枠組みの例題として積み木世界のタスクを取り上げ、意味的情報利用の効果と課題について考察する。

## 1. はじめに

「賢いロボットを作る」ということは、人工知能やロボットの研究において魅力的なテーマのひとつである。だが、ここでいう「賢さ」とはいったい何なのだろうか。それを厳密に定義するのは難しいが、私は、賢いロボットとは結局、我々人間から見て「妥当だ」「合理的だ」と思えるような行動を生成・実行できるロボットのことを指すのではないかと考えている。そのため、あるロボットが「賢い」と認定されるためには、単純にデータ処理や動作の性能が高いだけでなく、その行動シーケンスが我々の頭にある合理性の感覚とマッチしなければならない。このことから、人間の有する概念構造は、ロボットの賢さを生み出すうえでも判定するうえでも重要な基盤であるといえよう。それゆえ、ロボット制御に人間の概念や常識、知識の構造を利用する意義は非常に大きいと考えられる。

さて、一般に自律ロボットはロボットプラン[1]と呼ばれる制御プログラムによって動作する。ロボットプランは「ロボットをいかにして制御するか」を記述した、一種の知識表現である。これらは元来、ロボットのアクションや判断基準等を設計者がタスクに合わせて記述したものであり、そこには「アクションの目的」や「注目するオブジェクト間の関係」といった、意味的な情報が背景知識として必ず付随している。これはまさに、人間の概念構造を反映したものである。しかし従来、こうした意味的情報はプラン表現の中に残っておらず、積極的に利用する方法はとられてこなかった。従来のロボットプランが対象としてきたのは、専ら物理世界とのインタラクションのレベルにおけるロボット制御であった。

意味的情報は、ロボットが直接知覚することが不可能な抽象世界の領域に存在する。今後、タスクが外界の認識やナビゲーションにとどまらず、自身のマニピュレータによって実世界の物体を取り扱うものへと拡大していく中で[2]、抽象世界の意味的情報を活用する重要性が高まるものと考えられる。なぜなら、実世界のオブジェクトは、物理的に知覚できる「オブジェクトそのもの」であると同時に、作業文脈に応じてさまざまな意味を動的に担うものとして扱う必要があるからである。例えば、あるブロックは「ブロックそのもの」でありながら、何かの建築で使用するときには「建築部材」となり、作業の邪魔になる場所に置かれていればそれが「障害物」となりうる。これらは「ブロック」を意味的に解釈した結果であり、単なるラベル付けを超えたレベルでその概念を認識し操作可能にすることは、真に知的な適応行動を生成するために必要不可欠である。本稿は、自律作業ロボットの作業実行と作業モニタリングにおいて、こうした意味的情報を利用するための枠組みを提案するものである。

## 2. 意味的情報の利用とその効果

我々は、まずは積み木世界のタスク(シミュレーション)をリファレンスタスクとし、本枠組みの適用可能性を探る。図1はタスク環境の例である。ロボットはHandを利用してBlockのタワーを積み上げる。簡単なタスクであっても、種々の不確定要因が存在する実環境においては、適切な作業モニタリングと行動修正が必要であ

る。本研究では、意味的情報を利用することでこれらの課題をよりロバストに実行することを目指す。意味的情報とその利用形態の例を以下に挙げる。

【意味的情報の例】

● 関係(上下関係, 把持関係, 接触関係, etc.) ● 機能(ブロックを把持する, 移動を妨げる, etc.) ● ロール(障害物, 土台, 認識対象, etc.)

上記の意味的情報に対し、「ブロック」「Block2」「運動」等, 物理世界において純粋に物理的知覚のみによって定義・識別される概念は, 文脈や視点に依存しない「物事そのもの」の概念であり, 意味的情報ではない。

【意味的情報の利用形態】

(1) 現象およびオブジェクトの意味的解釈

例) 「障害物によって動きが妨げられた」, 「Block1 が Block2 の土台となっている」等の解釈の実現。

(2) 意味的ルール適用

例) 「把持対象を認識する」, 「障害物は除去すべし」といった制御ルールの利用。

意味的情報を利用することの効果やメリットを, 以下に 3 点示す。

【意味的情報利用の効果】

(a) ドメインを越えて共有可能な意味的ルールが利用可能になる

(b) 物理レベルでの不確定性の幅を意味レベルで吸収できる

(c) 合理的な推論のガイド(制約)を提供する。

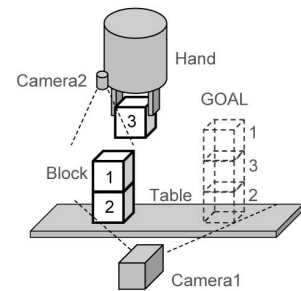


図 1: 積み木世界のタスク

### 3. オントロジーを用いたタスク世界のモデル化

意味的情報をロボットが扱えるようにするためには, ロボット内部で処理する語彙をオントロジーによって体系化し, 人間(設計者)が有する概念体系と対応させる必要がある(図 2)。我々はオントロジー工学の理論に則り, 積み木世界の概念化, すなわちオントロジー構築を試みている。図 3 はその上位部分であるが, タスク世界をモデル化する上でとくに「関係概念」「機能概念」「ルール概念」が重要であると考えている。

【関係概念】

関係概念[3]は 2 つの概念間に成り立つ関係の概念である。関係概念をタスク世界のモデリングに導入することにより, 概念化の視点を明示し, 一貫性のあるモデリングが可能となる。本システムにおける関係概念は, 2 つの参加概念と制約および観測値で定義される(図 4)。

【機能概念】

機能は, “振舞い”をあるゴールの下で解釈したもの[4]として捉えることができる。振舞いは物理パラメータの時間変化として表現される。ロボットのアクションは, それぞれ設計者が意図したゴールを達成する“機能”を実現するものである。しかし通常のロボット制御プログラムやプランに現れるコマンドは, アクチュエータやセンサへの指令に過ぎず, ロボットの“振舞い”を駆動するレベルのものと考えられる。振舞いは意味的情報ではなく, 機能は意味的情報である。したがって, ロボットプランを機能概念の観点で記述することにより, ロボットが自己の行動を意味的に解釈し, 文脈に沿った現象理解や行動生成を行なうための基盤が与えられる(図 5,6)。

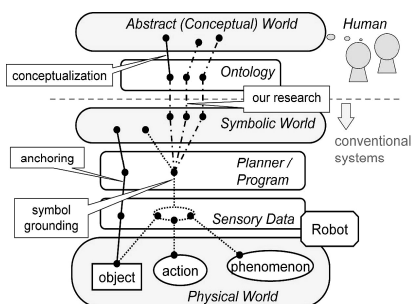


図 2: 物理世界と抽象世界とのリンク

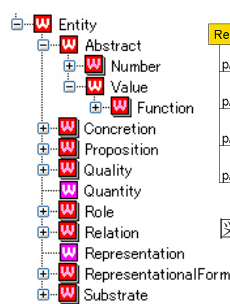


図 3: オントロジーの上位部分

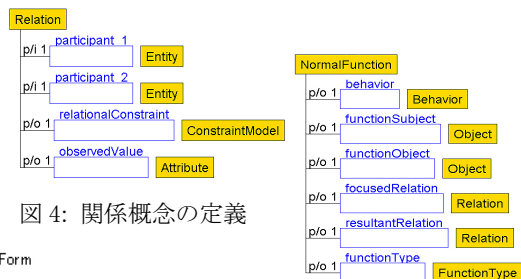


図 4: 関係概念の定義

図 5: 機能概念の定義

【ルール概念】

ルール概念[5][6]はある文脈において実在物(Entity)が果たす役割の概念である。一方, 他の概念を参照

することなく定義される概念は基本概念と呼ばれる。ルール概念を扱うことによって、タスク世界のモデリングをより現実に近いものとするができる。基本概念とルール概念を区別することは、インスタンスモデルの正しい管理を可能とする。ブロックが障害物になったとしても、実世界のブロックの数が増えるわけではない。ロボットが実世界を認識し合理的な行動生成を行なうためには、インスタンスモデルにおいてもこのことを正しく反映し、実体ではなくルールとしての障害物が生成したり消滅したりしている、ということ表現する必要がある。

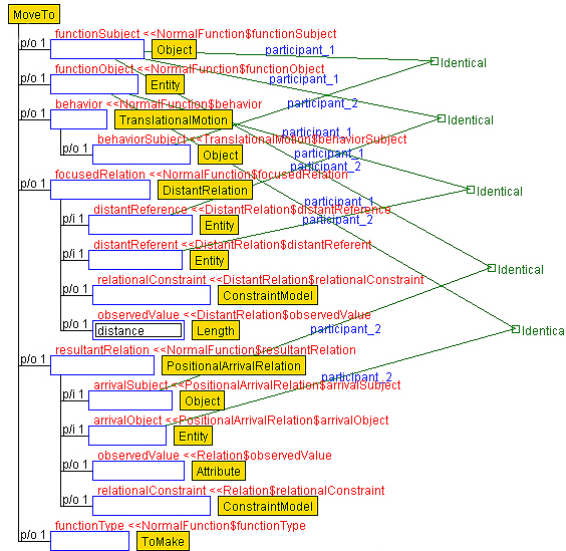


図 6: 機能概念の例 (MoveTo)

【関係、機能、ルール概念間の関係】

我々は、これら3概念間の関係を図7のように捉えてタスク世界のモデリングを行なう。機能はある関係からある関係を生成する。ルール概念は、機能概念や関係概念の中で定義される。

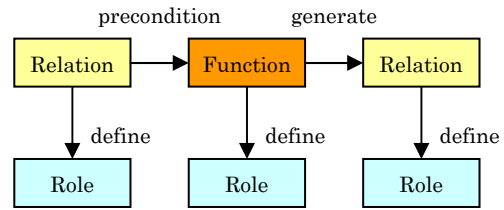


図 7:3 概念間の関係

#### 4. 意味的情報を利用するロボット制御システムの構築

##### 4.1. ロボットプランの表現と記述形式

我々は、プラン(制御プログラム)を「コマンド+注釈(annotation)」という形式で記述する(図 8)。コマンド系列は、ロボットを直接操作可能な一種の手続き的知識である。いっぽう注釈は、コマンドに関連する意味的情報を提供する宣言的知識である。注釈部の記述は通常のロボット制御時には使用されないが、異常発生時にはロボットがこれを参照し、意味的情報として推論プロセスで活用する。

このようなプラン表現により、コマンド部と注釈部を個別に管理することができる。また、既存のロボット制御プログラムに対しても後から注釈を加えることで、本システムの適用が可能である。注釈は XML シンタックスで記述し、機械による自動処理が可能なものとする。

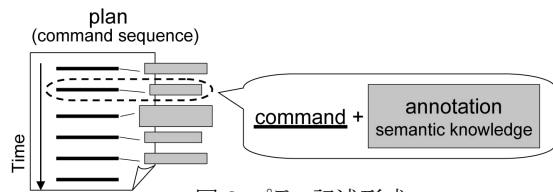


図 8: プラン記述形式

##### 4.2. システム構成

図 9 にシステムの構成を示す。各モジュールの活動を制御するのが CC である。Robot は CDB に保存されているコマンドを受け取って動作する。SIM はコマンド実行前の動作検証を行なう。予期せぬ事象が発生した場合は、IE が事象を解釈し、PL が原因検証のセンシング計画や復旧のためのプラン修正をする。IE と PL はコマンドに付加された意味的情報を読み取り、タスク世界の概念やそれらの関係をモデル化した STM を参照する。STM や annotation の記述で用いられる語彙は ONT で体系的に定義される。

##### 4.3. システムのプロトタイプ

図 10 は現在構築中のシステムプロトタイプのインターフェースである。SIM 中の Hand は CDB のコマンドによって自動制御されるほか、GUI を通じてマニュアルでも割り込み操作可能である。またブロックのサイズ、個数、配置等を自由に設定し、任意のタスク環境を作ることができる。CDB 内のコマンドや注釈記述は、オント

ロジーによる語彙定義の制約に従ってマニュアルおよび自動で編集可能である。Hand は異常を検知すると動きを止め、IE を起動して現象解釈と推論を行なう。

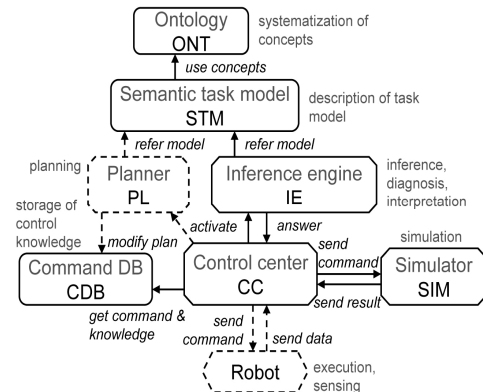


図 9: システム構成

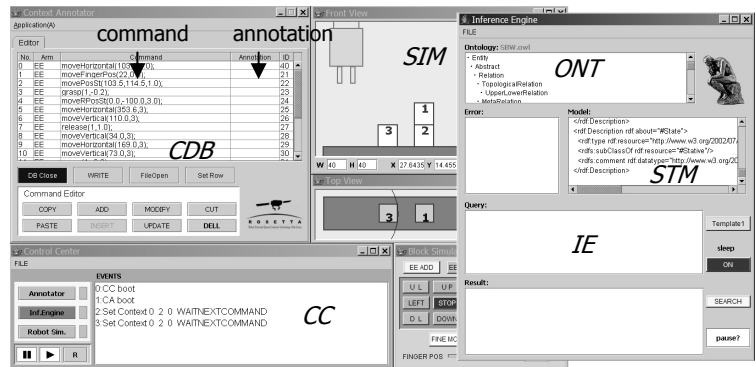


図 10: システムプロトタイプの内面

## 5. 今後の課題と展望

今後、構築中のオントロジーとロボット制御システムを一通り完成させ、具体的なタスクを行なう中で本システムの有効性を検証する予定である。意味的情報を利用することによる、以下のような効果を実証してみたいと考えている。

1. 文脈に基づく現象解釈  
 同じ現象でも意味が異なる, 異なる現象でも意味は同じ, 等の柔軟な解釈。
2. 意味的ルールによる制御プラン生成  
 タスクを支配する意味的ルールにより, 実環境の不確定事象を吸収するロバスタな制御。
3. 説明機能による人間との協調・ロボット間の協調  
 機械-人間双方に理解可能な形式で推論過程を表現し, 合理性の保証と作業文脈の共有を図る。
4. 意味的制約をいかした合理的学習  
 マクロな制約を活用し, ミクロな部分を効果的に学習する戦略の生成。

いずれのテーマにおいても、困難が予想されるのは従来から人工知能やロボティクスの研究で問題となっているような、物理世界と抽象世界のリンクに関する部分である。最終的に真に知的なロボットシステムとするためには、人間に可読で操作可能な概念シンボルから、統計的処理を要するようなセンサーデータまでをリンクさせる技術が必要となるであろう。今後、本研究が主張するような意味的情報がどのレベルまで有用なのか、その効果的な利用方法を探っていきたいと考えている。

## 6. 参考文献

- [1] D. McDermott, "Robot planning," AI Magazine, vol. 13, no. 2, pp. 55-79, Summer 1992.
- [2] M. Beetz, Ed, "A roadmap for research in robot planning," European Network of Excellence in AI Planning (PLANET), <http://www9.in.tum.de/research/tcu/roadmap.pdf>, 2003.
- [3] K. Kozaki, Y. Kitamura, M. Ikeda, and R. Mizoguchi, "Hozo: An environment for building/using ontologies based on a fundamental consideration of "role" and "relationship"," Proceedings of the 13th International Conference Knowledge Engineering and Knowledge Management (EKAW2002), pp. 213-218, 2002.
- [4] Y. Kitamura and R. Mizoguchi, "An Ontology of Functional Concepts of Artifacts," AI Technical Report 99-01, I.S.I.R., Osaka University, March 1999.
- [5] E. Sunagawa, K. Kozaki, Y. Kitamura and R. Mizoguchi, "A framework for organizing role concepts in ontology development tool: Hozo," AAI Fall Symposium Technical Report FS-05-08, pp. 136-143, 2005.
- [6] N. Guarino, "Concepts, attributes and arbitrary relations," Data and Knowledge Engineering, Vol. 8, pp. 249-261, 1992.