

世界モデルの自然言語から述語論理への変換と ロボット動作プランニングへの適用

原田実^{†1} 井出貴也^{†2}

概要: ロボットが人と共存するには、人の言葉を理解して適切に対応できることが望ましい。そこで、日本語で目標を与えるとロボット自らが目標の達成に必要な行動列を自動計画し、これを実行するロボット操作システム NPS を開発した。NPS は、まず、自然言語で表現されたオペレータや目的からなる世界モデルを意味解析システム SAGE で意味グラフに変換する。意味グラフでは全ての語に語意が与えられ、文節間にはそれらの役割関係が深層格として与えられる。この意味グラフを動詞節間の深層格に応じて 7 種の世界モデル構成句という部分グラフに分割する。次に、各構成句を述語の連言に変換する。この述語は文節の主辞の語意を述語記号とし、同一の対象を表す定数を連言内の述語の引数として共有することで各文節の係り受け関係を表す。この変換は連体修飾を含む文にも可能であり、多数の係り受けを持つ文による世界モデルも論理式に変換できる。これらを基に、論理式に変換された世界モデルからプランナで自動計画を行い、目標を達成できるオペレータ列を生成できた。

キーワード: 述語論理世界モデル, 自然言語世界モデル, 自動計画, 対話ロボット

World model conversion from natural language to predicate logic and its application to automatic robot action planning

Minoru Harada^{†1} Takaya Ide^{†2}

Abstract: We developed the robot operation system NPS which enables a robot to plan the sequence of actions necessary for attaining the given goal, and to execute these actions. NPS converts the world model written in Japanese which consists of operators, initial states and goal states into semantic graphs by using the semantic analysis system SAGE. In semantic graphs, every word is assigned its meaning, and every dependence between words is assigned a deep case representing its functional role. This semantic graph is divided into subgraphs of seven kinds, called world model component phrases. Each component phrase is converted into the conjunction of predicates which represent concepts identified by the meaning of words. This predicate conjunction shows the semantic dependency between those concepts by sharing constants identifying objects as predicate's arguments. This conversion can be applied to sentences having a lot of complex modifications. From the world model in the form of such predicates conjunction, a planner automatically generated a plan able to perform the object.

Keywords: Predicate logic world model, Natural language world model, Automatic planning and scheduling, Robot

1. はじめに

近年、人との共存を目的としたロボットの研究が増えている[8]。人間の生活空間で汎用的にロボットを活躍させるには人と円滑にコミュニケーションをとれる事が望ましい。このためには人が言葉で話した指示内容を正しく理解し、適切に応答できる必要がある。また、人と言葉で会話できるロボットは高齢化社会の進展に伴い痴呆予防や身の回りの手助けなど、今後の利用が期待される。

機械が言葉を理解するには、その意味を理解する必要がある。そこで、我々は 1997 年より意味解析システム SAGE を開発してきた[4,5]。意味解析とは文節の意味と文節間の役割的關係を解析し、自然言語を形式表現である意味グラフに変換することである。この研究をベースに、我々は自然言語でロボットを操作できるシステム Athena を開発し

ている[18]。現在、Athena は音声認識された自然言語を入力とし、「右手を上げて」「前に 30cm 歩いて」など言葉で行動を指示することが可能である。しかし Athena は、ある目標を達成したいとき、目標を達成する為に必要となる一連の動作を逐一指示する必要がある。ロボット自らが自然言語で与えられた動作機能や目標や初期状態などから推論により目標を達成する動作列を自動生成できることが望ましい。

自然言語で推論を行う研究として、英文から述語論理と等価な概念グラフを生成する研究がある[6]。概念グラフは「概念」、「概念間の関係」、「時制や様相などの属性」を頂点としたグラフ構造で、頂点情報から述語記号を作成し、接続関係にある頂点に対応する述語間で辺情報を項として共有することで述語論理と同等の推論をグラフ上で行うことができる。しかし、動作列の生成のように時間的に状態

^{†1} 青山学院大学理工学部情報テクノロジー学科
Dept. of Integrated Information Technology, Faculty of Science & Engineering,
AOYAMA GAKUIN Univ.

^{†2} 青山学院大学大学院理工学研究科知能情報コース

Intelligent Information Course, Graduate School of Science & Engineering,
AOYAMA GAKUIN Univ.

が変化する計画問題の推論はできない。また、英文から機械的に概念グラフを生成できるシステムも存在していない。さらに、概念グラフの記述量は「概念間の関係」にも1つの頂点を用いるので、SAGEによる意味グラフに比べてほぼ倍の頂点数を必要とし、推論が複雑になる。

動作列の生成のような計画問題を解く人工知能の手法としては自動計画が挙げられる。これはロボットが行える個々の動作機能や初期状態や目標状態を記述した論理式からなる世界モデルをプランナにかけることで行動列を生成する。この世界モデルを自然言語で与えることができれば、子供を言葉で教育するようにロボットを賢くすることができ、その利用を容易化できる。これには、世界モデルの自然言語表現から述語論理表現への変換が必要になる。

自然言語の述語論理への変換の研究として、英語では ATTEMPT Controlled English :ACE[14]という制限された英文によるモデル記述法、CCG Parser[3]という英文から論理式への変換器が提案されている。また、日本語では、日本語を命題論理風の形式表現へ変換する手法 CONV[17]が提案されている。ACEはソフトウェアの要求仕様などを自然言語風にモデル記述する(構文と意味論が定められている)形式言語であり、ACE記述から関数のない一階述語論理と等価な PRQ 言語への変換が自動化されている。ただ、PRQ 言語では述語の引数となっている変数間の役割を意味的に表現する手段がなく、実世界の複雑な概念間の関係を正確に表現するには、記述力が乏しい。また、関係代名詞による修飾表現は許されているが、過去分詞による連体修飾はできないので表現が長くなる。CCG Parserは、例えば「A spokesman had no comment」から「 $\exists x(\text{spokesman}(x) \wedge \forall y(\text{comment}(y) \rightarrow \neg \exists e(\text{have}(e) \wedge \text{agent}(e,x) \wedge \text{patient}(e,y))))$ 」という論理式を生成する。この手法は、後ほど説明する我々の手法とよく似ているが、SOWAの手法と同様に生成される述語数が多くなる。我々の手法では、ここで用いられる agent や patient 述語は動詞にとって名詞の深層格を表すものであるため、have 述語の変化形 have_ag_ob として扱い述語数の爆発を防いでいる。

一方、日本語から論理表現に変換するシステム CONV では、一文が一つの論理式に対応しており、連体修飾などの従属節は述語の連言ではなく被修飾名詞に埋め込むことで表現している。例えば、「刑事は犯人が隠れている家を探している」という文は「探す(agt:刑事, obj:[家]{隠れる(agt:犯人, gol:#)})」という入れ子構造を持つ述語に変換される。述語の入れ子構造は一階述語論理では許されないため、プランナによるプランの自動生成には用いることができない。

そこで、我々は SAGE から生成した意味グラフを基に、日本語文を自動計画に利用できる述語論理の連言に機械的に変換する手法を提案し、これを用いて自然言語の世界モデルから述語論理の世界モデルを生成する。これを基に述語論理の世界モデルから自動計画を行い、生成された行動

列を実行し、ロボットが目標を達成するロボット操作システム NPS を作成した。本稿では、自然言語で表現された世界モデルを述語論理表現に変換する手法を中心に NPS について論じる。

2. 意味解析

我々の手法では、まず日本語文として与えられた世界モデルを、JUMAN[9]と KNP[13]による形態素解析と係り受け解析の後、意味解析システム SAGE によって意味解析し、図 1 に示すような文節を頂点、文節間の係り受けを辺とする意味グラフに変換する。文節は形態素のリストで、形態素は EDR 品詞(例:普通名詞、形式名詞、接尾語など)と語意を表す EDR 概念辞書の概念を持つ。この品詞と概念は EDR 電子化辞書[12]に登録されているものを用いる。各概念には、概念を代表する 16 進 6 ケタの概念 ID と見出し語と概念説明が存在する。例えば、「ボール」という見出し語を持つ概念の概念 ID は「1090ac」で、概念説明は「スポーツなどに用いる球」である。各文節の中心の意味を表す形態素を主辞と言い、意味グラフの図表示では、文節はその原文表記と主辞の語意を表す概念 ID と概念説明が添えられている。また、SAGE による意味解析において、文節には主として主辞の品詞に「節」を付けた動詞節や名詞節などという文節品詞が与えられる。なお、名詞に断定の助動詞が付いている場合や文末の名詞からなる文節を特に断定節と呼ぶ。更に、文節には動詞節や形容詞節の場合「判断」、「発話」、「程度」の3つの観点から決定したモダリティ[11,13]が付与されている[20]。本研究では、特に、モダリティ「否定」を事実が否定されていることを判定する上で利用し、モダリティ「願望」、「要求」、「命令」、「依頼」をロボットへの指示の表明を判定するために利用している。

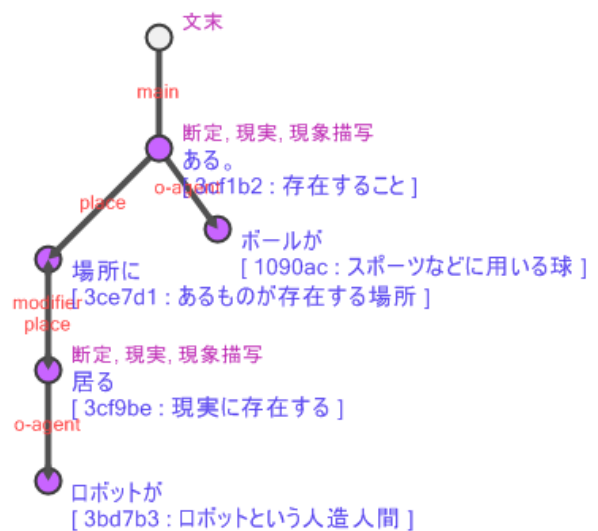


図 1 SAGE の意味解析結果を示す意味グラフ
 Figure 1 Semantic graph generated by SAGE

意味グラフの辺には、この係り受け関係において係り側が受け側にとってどんな意味的な役割を担っているかを示す深層格が付与されている。この深層格には表 1 に一部を示したような 37 種類の格が存在する。例えば、図 1 で文節「ロボット」は文節「居る」に対する動作主体 (o-agent) を表し、文節「場所に」は文節「ある」に対する場所 (place) を表す。但し、形容詞の修飾関係や動詞の連体修飾関係など、係り側と受け側それぞれに別の役割が存在するときは、図 1 の「場所に」と「居る」間のように、双方向にリンクが係り、深層格も 2 種類作成される。このように、SAGE によって生成された意味グラフに対して、文節にはその語意の概念見出しを名前とする述語が存在し、それが出力辺を持つ場合はその係り側文節が表す概念がその述語の項 (引数あるいは主語と言ってもよい) になると考えることができる。例えば図 1 の上部 3 頂点では、「存在する (ボール, 場所)」という述語の存在を表現している。この発想が自然言語文から述語論理式への変換を考える起点となった。

表 1 SAGE 深層格例
 Table 1 Example of SAGE deep case

深層格	コード	意味
agent	ag	有意志動作を引き起こす主体
o-agent	oa	無意志動作を引き起こす主体
object	ob	動作・変化の影響を受ける対象
place	pl	事象の成立する場所
condition	cd	事象・事実の条件関係
time	ti	事象の起こる時間
modifier	mo	修飾関係
sequence	se	事象・事実の時間的前後関係

3. 世界モデル

目標を実現するオペレータ列を生成するには、まず初期状態や目標状態やオペレータの機能を記述する必要がある。これらを記述したものを世界モデルと呼ぶ。我々の提案手法では世界モデルの記述内容として STRIPS[16]の考え方を採用する。例えば、事例として取り上げる「ボールを持ってきて」という要求を実現するための STRIPS 流の世界モデルの日本語文表現を図 2 に示す。ここで、③から⑦はオペレータに関する記述である。STRIPS ではオペレータの機能を、それが適用できる条件を表す前提リスト、その適用によって新たに成立する事実を表す追加リスト、その適用によって成立しなくなる事実を表す削除リストで表現する。日本文でのオペレータの記述はこれら 3 つのリストを正しく認識するため「<前提リスト>のとき、<オペレータ名>すると、<追加リスト>になる」と表現する。但

し、「<オペレータ名>すると」は「<オペレータ名>するならば」などであってもよい。これは SAGE による意味解析の結果、条件を表す深層格である condition 格が係り受け関係にある<オペレータ名>を表す動詞節と<追加リスト>を表す動詞節の間にあればよいためであり、表記の揺れは意味解析によって吸収される。また、この事例にあるように、削除リストは一般には前提リスト内の一部の述語がオペレータの実行によって成立しなくなることが多く、陽に書かない方が自然な表現となるので、我々の手法では書かないこととする。しかし、時にはオペレータ実行後に特定の事実が不成立となることを指定しないと、いわゆる「フレーム問題」が生じ、プランを生成できなくなる[15]。そこで我々の手法では、これを指定するために①と②のような、削除リストを生成するメタ知識という記述を作成する。このメタ知識により、オペレータごとに適切な削除リストが自動生成される。なお、変化しないものについての大量のフレーム言明の作成問題は、最近のプランナでは慣性の法則を用いて回避しているので変化しないものは生成なくて良い。最後に、⑧は初期状態で、⑨が目標状態である。なお、③や④内の「～が分かる」などの事実の認識に関する記述は日本語文の自然な表現に必要なだけで、NPS による述語論理式への変換では無視される。また、⑨の目標表現は、実際は () 内の表現「ボール B をここに持ってきて」から、NPS が「持ってくる」の語意が「指定された位置にあるようにすること」で、「ここ」が現在位置であることと認識し、変換したものである。

①	Aが場所Pに在るとき、Aは場所Qに存在しない。
②	ロボットRがボールBを持っているとき、ロボットRの手Handは空ではない。
③	ロボットRがボールBを探すとBが場所Posにあることが分かる。
④	ロボットRが場所Aに居るとき、RがAから場所Bへの経路探索をするならばAからBへ経路Pathで至ることができると分かる。
⑤	ロボットRの手Handが空でありRが場所Cに居てボールBがCにあるとき、RがCでBを掴むと、RはBを持つ。
⑥	ロボットRが場所Aに居てAから場所Bへ経路Pathで至ることができるとき、RがAからBにPathで移動すると、RはBに居る。
⑦	ロボットRが場所Aに居てボールDがAに在ってRがDを持っていてAから場所Bへ経路Pathで至ることができるとき、RがAからBにPathでボールDを運ぶならば、RはBに居てDはBにある。
⑧	ロボットNAOが場所Pに居て、NAOの手Handは空である。また、Bはボールである。
⑨	ボールBが場所Pにあるようにせよ。(ボールBをここに持ってきて)

図 2 自然言語による世界モデル表現
 Figure 2 World model in natural language

4. 自然言語文の述語論理式への変換

ここでは、世界モデルを記述した日本語による自然言語文を一階述語論理式に変換する手法について論じる。まず、自然言語文を SAGE によって意味解析し、図 3 に示したような意味グラフに変換する。次に、意味グラフの各

文節から下記に論じる手法に基づき、述語を生成しこれらを論理積で結合することで一階述語論理式を生成する。ここで生成される一階述語論理式には下記の特徴がある。

- 1) 関数は使用しない。
- 2) 記述中に現れる"x", "R", "NAO", "Pos"などの固有表現は、すべて定数として扱う。
- 3) 使用する論理記号は、論理積と否定のみである。

2の要件は、図2に示したような世界モデルの記述において、世界モデルの作者は名詞節中の固有表現で特定の対象を指定していると考えるのが普通であること、日本語文による世界モデルから生成された述語論理式による世界モデルに対して自動計画を行う時は、すべての変数には定数を代入して命題論理に変換してから行うからである。

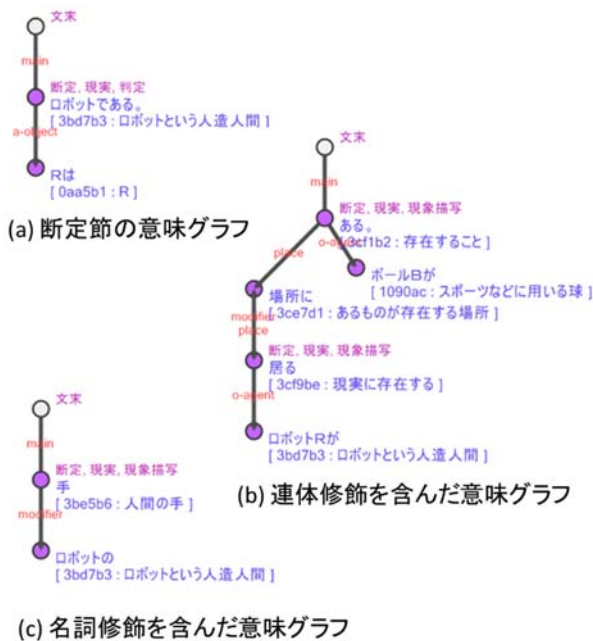


図3 変換に用いる意味グラフの例

Figure 3 Example of semantic graph used for conversion

4.1 定数の抽出

文節 N から述語を生成する際に、N が名詞節あるいは断定節であり、その構成要素に EDR 詳細品詞が表1に示すような英数字、固有名詞、単位、後置助数詞、数詞、記号、未定義語（これらをまとめて定数詞と呼ぶことにする）のいずれかである形態素 K がある場合、この形態素 K の文中表記文字列（例：図3(a)の R）を定数として取り出す。名詞節や断定節 N がこのような定数を生成する形態素を持たない時は、無名定数 c_m (m は 0 以上の整数) を生成する。但し、一文節につき項は最大でも一つまでとする。一文節内で複数の形態素が定数の条件を満たすとき、それらの形態素が連続していればそれらの表記を繋げた文字列を定数とし、不連続であれば最初に見つかった形態素の表記を定

数とする。なお、論理学では定数、変数、関数をまとめて項と呼ぶが、先の要件1と2により、項は定数のみとなる。

4.2 文節からの述語と項の生成

自然言語文を一階述語論理式に変換するのに用いる文節は、動詞節、形容詞節、形容動詞節、名詞節、断定節のみであり、これ以外の文節は主として様態の修飾を表すものでプラン生成に必要な論理表現ではないとして無視する。以下に、文節から生成される述語や項を、文節品詞ごとに説明する。

1) 名詞節 N からは項 t を生成する。ただし、N の主辞の EDR 詳細品詞が普通名詞の時は項と同時に述語「 $n_{ao}(t)$ 」を生成する。ここで、 n は文節 N の主辞の語意の EDR 辞書での概念見出しであり、 ao は「属性をもつ主体」を表す深層格 a-object の深層格コードである。項 t は、名詞節や断定節から先に述べた方法で生成した定数である。この述語を定義述語と呼ぶ。例えば、文節「ロボット R」には普通名詞（ロボット）と定数 (R) が存在するので、この文節を「R はロボットである」という表明と考え、定義述語「 $ロボット_{ao}(R)$ 」を作成する。

2) 断定節 D からは、主辞の EDR 詳細品詞が普通名詞の時は、定義述語「 $d_{ao}(t)$ 」を生成する。ここで、 d は文節 D の主辞の語意の EDR 辞書での概念見出しであり、 t は節 D に係る名詞節 N から生成される項である。例えば、図3(a)のような意味グラフで表される文「R はロボットである」は名詞節と断定節を含み、名詞節から生成される項 R を使って、断定節からは定義述語「 $ロボット_{ao}(R)$ 」を生成する。生成される結果は、1) の例と同じであるが、これは1)の事例が2)の事例の省略表現と考えられるからである。

表2 定数となる形態素の EDR 品詞

Table 2 EDR part of speech of morpheme that becomes constant

EDR 品詞	例
固有名詞	太郎
単位	cm, kg, ...
後置助数詞	「3 歩」の「歩」
数詞	11
記号	α , #
未定義語	Robot, Ball

一方、断定節の主辞の EDR 詳細品詞が定数詞の時は、項 c を生成し、文節 D に係る名詞節 N から生成される定義述語 n と項 t を使って、等値述語「 $EQ_{ao_mo}(t, c)$ 」を

生成する。例えば、「長さ x は 10m だ。」からは、述語「長さ_ao(x) \wedge EQ_ao_mo(x , 10m)」を生成する。ただし、項 t が無名定数のときは等値述語を作らず、「n_ao(c)」を作る。例えば、「ボールは A だ。」からは述語「ボール_ao(A)」のみが作られる。

3) 動詞節, 形容詞節, 形容動詞節 V からは、述語「v_ c_1 - c_2 -...- c_n (t_1, t_2, \dots, t_n)」を生成する。この述語を関係述語と呼ぶ。vは文節 V の主辞の語意の概念見出しであり、文節 V に係る名詞節 N_i (連体修飾の時は文節 V が修飾する名詞節も含む。言い換えれば文節 V からの出力辺の終端)があった時、 c_i は V と N_i を繋ぐリンクの深層格コードで、 t_i は名詞節 N_i から生成される項である。なお、述語中での c_i の出現順はそのアルファベットオーダーとする。但し、文節 V に係る名詞節が存在しない場合は、項の無い述語が生成される。例えば、「速く歩く」からは生成される述語は「素早く() \wedge 歩く()」となる。

なお、上記のいずれの場合も、文節のモダリティに「否定」が含まれているときは、生成された述語の前に否定記号「 \neg 」をつける。例えば、「ロボット R は場所 P に居ない」からは「場所_ao(P) \wedge ロボット_ao(R) \wedge \neg 存在する_ao_pl(P, R)」という連言が作成される。

これら述語の生成は、まず文末から文頭にかけて各文節に対し定義述語の生成を行い、その後、文頭から文末にかけて関係述語と等値述語を生成という手順で行なっている。

4.3 修飾による述語の連言と項の共有

複雑な条件を表現する文では、登場する概念が相互に修飾することがある。この場合、個々の文節から生成される述語は論理積で結合され、項をこれらの述語間で共有することで、この修飾関係を論理的に表現する。この修飾には動詞節による連体修飾と「の」による名詞修飾がある。

1) 連体修飾

例えば、図 3 (b)に示す「ロボット R が居る場所にボール B がある」には、「居る」と「場所」の間に連体修飾があり、さらに「place」格の出力辺を持つ。このため「ボール_ao(B) \wedge 場所_ao(c_0) \wedge ロボット_ao(R) \wedge 存在する_ao_pl(R, c_0) \wedge 存在する_ao_pl(B, c_0)」という述語の連言が生成される。ここで、 c_0 は無名定数である。

2) 名詞修飾

例えば、図 3 (c)に示す「ロボットの手」のように名詞節が名詞節を modifier 格で修飾しているときは、名詞節「ロボット」と「手」の間の修飾関係を表す述語「Mod」を用いて、述語「Mod_ao_mo(c_0, c_1) \wedge ロボット_ao(c_0) \wedge 手_ao(c_1)」が生成される。さらにこれらを混合した事例とし

て、「ロボット R の腕の長さ length は 50cm だ。」からは、「長さ_ao(c_0) \wedge 腕_ao(c_1) \wedge ロボット_ao(R) \wedge Mod_ao_mo(c_1, R) \wedge Mod_ao_mo(c_0, c_1) \wedge Mod_ao_mo(length, c_0) \wedge EQ_ao_mo(length, 50cm)」という述語の連言が生成される。

5. 自然言語による世界モデルから論理式による世界モデルへの変換

自動計画法で正しい推論を行うには、日本文中に現れる文節の並びからなる記述を、それが STRIPS 流世界モデルにおいて表す役割的な意味の観点から、更にもう少し詳しく分類する必要がある。一般にこのような文節の並びは、動詞節, 形容詞節, 形容動詞節, 断定節(これら 4 種を SAGE では述語節と呼ぶ)を根とする部分木で、句と呼ぶこととする。我々は、STRIPS 流世界モデルを記述する文を表 3 に示すような世界モデル構成句という 7 種類の句に分割する。

表 3 世界モデル構成句
 Table 3 World model component phrase

世界モデル構成句	世界モデルにおける役割
初期状態句	世界モデルの初期状態
目標状態句	世界モデルの目標状態
前提句	世界モデルのオペレータの前提リスト
主体句	世界モデルのオペレータの名称とパラメータ
効果句	世界モデルのオペレータの追加リスト
要件句	メタ知識によって削除リストが生成されるオペレータの前提リストの一部
削除句	メタ知識によって生成されるオペレータの削除リスト

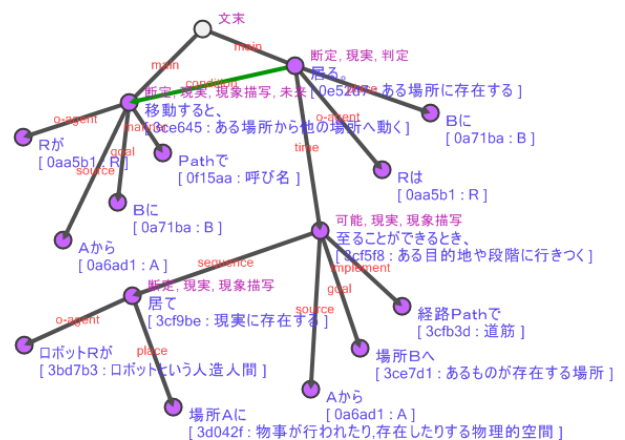


図 4 世界モデル構成句分割例

Figure 4 Division example of world model component phrases

世界モデル構成句の分割処理は、主として述語節間の深層格が condition 格や time 格である時に行われる。分割判定に採用されなかった述語節間の深層格(たとえば sequence 格や and 格)は、句内の文節を述語の連言に変換する際、論理積に変換される。例えば、図 2 の世界モデルの文⑥に対する意味グラフ図 4 を世界モデル構成句に分割すると、time 格に係る「至ることができるとき、」を根とする部分木が前提句となり、condition 格に係る「移動すると、」を根とする部分木が主体句となり、残りが効果句となる。sequence 格は分割処理に用いられないため、「居て」を根とする部分木は前提句を表す連言の一部となる。世界モデルが連言に変換された後、各オペレータの名前とパラメータ、削除リストを作成する。まず名称とパラメータを決定する。一般に世界モデルを日本語で記述する際に、記述者はオペレータが様々な状況で適用できるように考え、その状況をオペレータの前提条件リスト内の名詞節に現れる定数(4.1 節で述べたように、言語処理的には固有表現なので「定数」としたが、パラメータであるということ強調するならば「変数」と考えてもよい)として表現している。

例えば、図 2 の①と⑥から生成された前提句、主体句、効果句から「移動する」オペレータを作成するときは、主体句の部分木の根となる文節の主辞の概念見出し「移動する」をオペレータの名称とし、この節に係る節の定数詞である「R」、「A」、「B」、「Path」をオペレータのパラメータとする。このパラメータとなる定数には識別子として頭文字に「?」記号を加える。次に、前提句から生成された連言がオペレータの前提リストとなり、効果句から生成された連言が追加リストとなる。更に、図 2 の①で表現されるメタ知識を利用して削除リスト「存在する_oa_pl(R, A)」が生成される。このような処理を図 2 の日本語文全体に行うことで、図 5 に示される STRIPS 流世界モデルの論理表現が作成される。

6. 自動計画法の実行

日本語文から変換した述語論理式による STRIPS 流世界モデルから目標を達成する行動列(プラン)を得るために自動計画を行うシステム NPS を開発した。我々は NPS の中核となる自動プランニングエンジンとして graphplan[2]を用いる。graphplan による行動列生成を簡単に述べる。まず、初期状態の述語で前提リストを満たすオペレータを列挙しパラメータをインスタンス化して(定数を代入して)オペレータ適用後の状態を生成し、さらにこれらの状態で前提リストを満たすオペレータを列挙し再度パラメータをインスタンス化してオペレータ適用後の状態を生成することを繰り返し、目標状態に至ることができるオペレータ系列をすべて生成する。このオペレータ系列はグラフ構造を取る。その後、目標状態に繋がるオペレータ集合から同時には実行できないオペレータ群を含まない

オペレータ集合	
名称	: 探し求める
パラメータ	: ?R, ?B
前提リスト	: ボール_ao(?B) ∧ ロボット_ao(?R)
追加リスト	: 場所_ao(Pos) ∧ 存在する_oa_pl(?B, Pos)
削除リスト	:
名称	: 探査する
パラメータ	: ?B, ?R, ?A
前提リスト	: ロボット_ao(?R) ∧ 場所_ao(?A) ∧ 場所_ao(?B) ∧ 存在する_oa_pl(?R, ?A)
追加リスト	: 道筋_ao(Path) ∧ 到達する_so_go_ma(?A, ?B, Path)
削除リスト	:
名称	: 掴む
パラメータ	: ?R, ?B, ?C, ?Hand
前提リスト	: 空_ao(?Hand) ∧ ボール_ao(?B) ∧ ロボット_ao(?R) ∧ 手_ao(?Hand) ∧ 場所_ao(?C) ∧ 存在する_oa_pl(?R, ?C) ∧ 存在する_oa_pl(?B, ?C) ∧ Mod_ao_mo(?Hand, ?R)
追加リスト	: 携帯する_oa_ob(?R, ?B)
削除リスト	: 空_ao(?Hand)
名称	: 移動する
パラメータ	: ?R, ?A, ?B, ?Path
前提リスト	: ロボット_ao(?R) ∧ 場所_ao(?B) ∧ 場所_ao(?A) ∧ 道筋_ao(?Path) ∧ 存在する_oa_pl(?R, ?A) ∧ 到達する_so_go_ma(?A, ?B, ?Path)
追加リスト	: 存在する_oa_pl(?R, ?B)
削除リスト	: 存在する_oa_pl(?R, ?A)
名称	: 運ぶ
パラメータ	: ?R, ?A, ?B, ?Path, ?D
前提リスト	: ボール_ao(?D) ∧ ロボット_ao(?R) ∧ 場所_ao(?B) ∧ 場所_ao(?A) ∧ 道筋_ao(?Path) ∧ 存在する_oa_pl(?R, ?A) ∧ 存在する_oa_pl(?D, ?A) ∧ 持つ_oa_ob(?R, ?D) ∧ 到達する_so_go_ma(?A, ?B, ?Path)
追加リスト	: 存在する_oa_pl(?D, ?B) ∧ 存在する_oa_pl(?R, ?B)
削除リスト	: 存在する_oa_pl(?D, ?A) ∧ 存在する_oa_pl(?R, ?A)
初期状態	
場所_ao(P) ∧ ロボット_ao(NAO) ∧ 存在する_oa_pl(NAO, P) ∧ ボール_ao(B) ∧ 手_ao(Hand) ∧ Mod_ao_mo(Hand, NAO) ∧ 空_ao(Hand)	
目標状態	
存在する_oa_pl(B, P)	

図 5 世界モデルの自然語文から生成された述語論理式
 Figure 5 Predicate logic sentence generated from natural language sentence of world model

1. 探し求める (NAO, B; Pos)
2. 探査 (NAO, P, Pos; Path)
3. 移動する (NAO, Path, P, Pos)
4. 掴む (NAO, B, Pos)
5. 探査 (NAO, Path, P; Path)
6. 運ぶ (NAO, Path, Pos, P, B)

図 6 graphplan により世界モデルから生成された動作列
 Figure 6 Operation sequence generated by graphplan from world model sentence

(相互排他関係の無い)部分集合を選択し、更にその部分集合に繋がるオペレータ集合からも同様な部分集合を選択することを初期状態に繋がるまで繰り返すことで実行可能な行動列を決定し、その1つを正解オペレータ系列として生成する。ここで、同時には実行できないオペレータ(相互排他関係)とは「ボールAを場所Pに運ぶ」と「ボールAを場所Qに運ぶ」のように、一方のオペレータの追加リストや削除リストが他方の追加リストや削除リストを否定する場合などを指す。図5で示す世界モデルからNPSが実際に生成したプランを図6に示す。ここで、括弧内部は、セミコロンの前がオペレータのパラメータで、後が追加リストで明らかとなる定数である。このプランが示すロボットの動作は順に、1. ボールの位置(Pos)を探し、2. ボールのある位置まで経路(Path)を探索し、3. 探索した経路に沿って実際にロボットNAOが移動し、4. ボールを掴み、5. 帰り道の経路(Path)を探索し、6. ボールを最初の位置まで運ぶ、となる。

7. NPS アーキテクチャ

NPSにおける処理の流れの概要を図7に示す。入力は一文字ずつ音声で行う。音声データは音声認識ソフトAmiVoiceにより日本語に変換され、更に、意味解析システムSAGEにより意味グラフへと変換される。NPSは入力された文の文末節がモダリティ「願望」、「要求」、「命令」、「依頼」のどれかを持てば、目標状態の入力ととらえ、そうでなければ世界モデルの他の内容の入力と考える。後者の場合は、図7の点線矢印に示すように、メタ知識、初期状態、オペレータ記述のどれであるかを、意味グラフ内の述語節間の深層格としてcondition格やtime格があるかないかで判断し、それら深層格を持つ辺で意味グラフを分断する

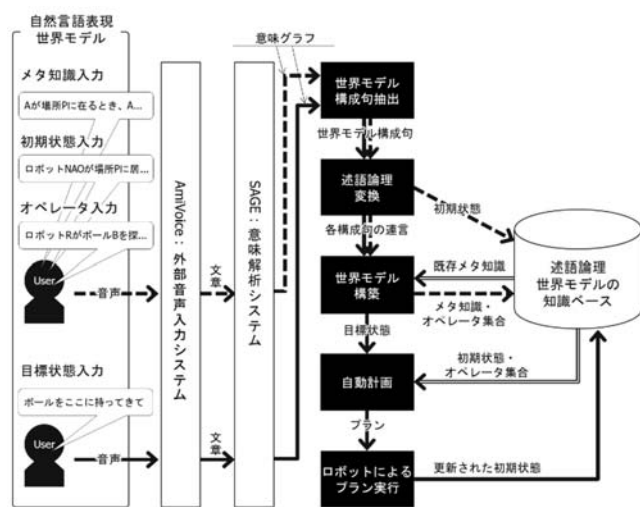


図7 NPS アーキテクチャ

Figure7 NPS architecture

ことで7種の世界モデル構成句という部分木に意味グラフを分割する。その後、世界モデル構成句毎に述語論理表現に変換し、知識ベースに蓄える。一方前者の目標状態の入力と判断した時は、図7の実線矢印に示すように述語論理表現に変換した後、知識ベース内の初期状態とオペレータ集合と合わせ、述語論理表現による世界モデルに統合し、プランナで動作列を自動計画する。なお、図7の二重線矢印は知識ベースからの知識の呼び出しを表す。知識ベースを利用することで、一度初期状態やオペレータを登録すると次回からは目標状態を入力するだけでロボット動作が可能となる。

8. 評価実験

被験者に事例問題に対する世界モデルを日本語で記述してもらい、これから正しいプランが生成されたかを調査し、生成されない場合には生成されるまで筆者が被験者のプランを修正することで、NPSによるプラン生成の成功率及び問題点を評価した。なお、音声認識は評価対象外として割愛し、プランナgraphplanは正しく動作するものと仮定する。

被験者は6名で、実験前に自動計画の概要と本稿に示したような世界モデルの日本語による書き方を説明される。被験者1~3にはBlocks World[19]を出題し、被験者4~6にはロケット問題[2]を出題した。Blocks Worldとはテーブルの上に置かれた四つのブロックを、ロボットアームを用いて使い正しい順番に積み上げる問題で、ロケット問題とは荷物の積載と移動できるロケットを利用し、場所Pにある積荷を場所Qへ移動させる問題である。これら問題の呈示は初期状態と目標状態を表現したイラストで行う。

世界モデルの日本語の修正では「追加」、「削除」、「訂正」の3種の作業を行った。これら修正は行単位で行うものとする。追加とは、世界モデルとして必要な項目があるオペレータの記述やメタ知識という単位で書かれていないとき、それらを追加する作業である。削除とは、意味が重複しているなど、世界モデルに不要な行を削除する作業である。但し、必要な記述が全て揃っていれば、不要内容があっても行動計画は正しく行えるので、削除作業は行わなくても問題は無い。訂正とは、記述された内容は正しいがプラン生成に必要な一部の条件が抜けているなどのわずかな修正作業である。

これら修正を、被験者が提出した世界モデルから正しいプランが生成されるまで筆者らが行った時の修正行を種別に集計すると図8のようになった。実験を通して、いずれの被験者のモデルも、日本語から述語論理への変換に関する誤りはなく、記述された内容の通りに出現した概念が正しく関係しあっている様子を論理的に記述した述語の連言が生成されていた。ただし、初期のモデルからはプランを

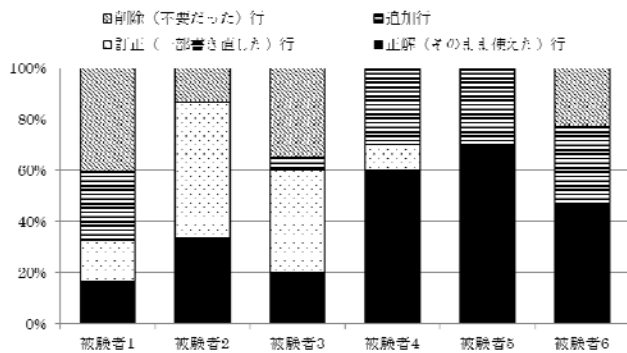


図 8 プランを生成するのに必要な世界モデル修正作業
Figure 8 World model correction necessary to generate plans

生成するには至らなかった。このときの初期モデル中の修正の必要のなかった行（正解行）の最終プラン全体に対する割合の平均は41%となった。

実験の結果、問題文により修正割合が異なることが分かる。Block World 問題を行った被験者 1 から 3 は大幅な修正が必要だった。この修正の殆どが「手 Arm が掴めるブロックは上にブロックが置かれていないものに限るが、ブロックの上が空かどうかの記述が抜けている」などのオペレータの要件定義のミスであった。このような誤りは全体の48%を占めていた。また、被験者 1 と 3 はオペレータ定義の汎化努力が欠けていた為か、オペレータ記述の13%において4つのブロックそれぞれに対し同様のオペレータ記述が作成されており、これらの重複記述に対する削除修正を行った。また、フレーム問題を回避するためにオペレータの削除リストを自動生成するというメタ知識の働きが理解されず、オペレータ適用後の状態が変化せずプラン生成に至らないことも多かった。

一方、ロケット問題を回答した被験者 4 から 6 には殆ど修正が必要なかった。この理由は、オペレータの前提条件をイラストから想像しやすかったためと考えられる。特に被験者 4 と 5 の結果は、「Q は場所である」という初期状態の一部と「荷物が別の場所に移動したとき、移動前の場所から荷物は無くなる」というメタ知識が欠けていた以外に問題は無く、複雑なオペレータを日本語で入力することができていた。

プラン生成にあたり障害となった言語処理上の問題で最も大きかったのは、KNP による係り受け解析の誤りである。例えば、「手 Arm がブロック C の上にあり、手 Arm は空であり、ブロック C がブロック A の上にあるとき、ブロック C を取ると手 Arm はブロック C を持つ。」という文において、「手 Arm がブロック C の上にあり、」が「手 Arm はブロック C を持つ。」に係ってしまい、オペレータの前

提リストを正しく認識できない等の係り受け解析の誤りが全記述中に 6 箇所あった。一方、SAGE による意味解析においては、「探索する」の語意を「細かいことまで知ろうとする;3cf1a0」と認識する問題があり、ロボットに登録した探査プログラムの起動につながらないことがあった。しかし、SAGE の誤りは、EDR の共起辞書に共起事例レコードを追加することで解消できた。

上記に述べたようにプラン生成の成否は STRIPS 流世界モデルの理解能力と問題に関するオペレータやメタ知識の設計能力に依存するというものであり、NPS の世界モデル構成句の認識や述語論理への変換方式には問題がないことが分かった。

一般に、計画問題で前提リスト・オペレータを論理的に書き下すには、

- 概念的に頭の中でオペレータの意味を前提条件や効果として整理し、
- これらを論理式に表現する必要がある。

一般的に a) の方が b) よりコストはかかるが、人間は結局母国語で考えているので、頭の中で考えた a) の結果をそのまま自然言語で書き下し、それが自動的に論理式に変換されて、そのままプランニングにつながれば、b) のコストを削減できるので効果がある。実際、このようなシステムが作成できれば、一般の人は論理式を扱うのは苦手なので有用性がある。

9. おわりに

我々は、自然言語で表現された STRIPS 流の世界モデルを述語論理式に変換し、これからプランナーで動作列を自動計画し、生成された動作列を実行することで、目標を達成するロボット操作システム NPS を提案した。本システムを用いれば、ロボットに新しい動作（オペレータ）を組み込むにはその前提リストと追加リストを日本語で記述することと、この動作の語意名で表されるロボットの動きを実際にロボットに行わせるプログラムを作成するだけでよい。

世界モデルの作成時におけるオペレータの記述しやすさは、記述実験によれば、STRIPS 流の世界モデルの簡単な説明の直後でも被験者が作成した初期モデルの41%程度が正しい記述であった。この時、NPS による日本語文から述語論理への変換の間違いはなかった。世界モデルは意味解析された後、述語に変換されるので、同じ語意を持てば表層上の表現が異なっても同じ述語や同じロボット動作に対応付けられる。動作は登録されればいつでも利用できる。徐々にロボットを賢くしていくことができる。また、ロボットに登録された動作が増えれば、より複雑な状況下でも目的を達成するプランをロボット自らが推論することができる。

自然言語によるプラン生成を行い、自律的に行動する対話ロボットを完成させるための今後の課題としては、個々のオペレータの意味を動作に対応付ける制御プログラムをオペレータごとに作成すること、これに伴い外界をロボットが認識することなどがある。前者に関しては個々にプログラムを作成する。後者については、パターン認識による外界認識結果を言語情報にバインドする問題があるが、これについては、視覚のディープラーニングと言語モデルを用いて解決する予定である。

謝辞 本研究の一部は、(財)テレコム先端技術研究支援センターからの助成研究「言語で推論し音声で対話応答する携帯型秘書システムの開発」の研究助成金を基に行われました。当財団に深く感謝いたします。GraphPlan システムを公開して下さった NPlanner 開発者 Foamliu 氏、MIT/X11 ライセンスの線形計算ライブラリ Math.Net Numerics を公開して下さった Christoph Rüegg 氏を始めとする Math.Net project の方々に感謝致します。

参考文献

- 1) Alastair Butler: The Semantics of Grammatical Dependencies (Current Research in the Semantics-Pragmatics), Brill Academic Pub(2010).
- 2) Avrim Blum, Merrick Furst: Fast planning through planning graph analysis, Artificial Intelligence, 90(1-2), pp.281-300(1997).
- 3) Bos, Johan, Clark, Stephen, Steedman, Mark J., Curran, James R., Hockenmaier, Julia: Wide-Coverage Semantic Representations from a CCG Parser, Proc. of the 20th. International Conference on Computational Linguistics (COLING '04), Geneva, pp. 1240-1246 (2004).
- 4) 原田実, 水野高宏: EDR を用いた日本語意味解析システム SAGE. 人工知能学会論文誌, 16(1), pp.85-93(2001).
- 5) 原田実, 田淵和幸, 大野博之: 日本語意味解析システム SAGE の高速化・高精度化とコーパスによる精度評価, 43(9), pp.2894-2902(2002).
- 6) John Sowa: Conceptual structures: information processing in mind and machine, Addison-Wesley Longman Publishing(1984).
- 7) Jan van Eijck, Christina Unger: Computational Semantics with Functional Programming: Cambridge University Press(2010).
- 8) 小林昭太郎, 山口高平: オントロジーを利用した人型ロボット Nao による動作を伴う対話の実現, 第 24 回人工知能学会全国大会, 3E2-2(2010).
- 9) 黒橋・河原研究室: JUMAN, <http://nlp.ist.i.kyoto-u.ac.jp/index.php?JUMAN> (2013).
- 10) 黒橋・河原研究室: KNP, <http://nlp.ist.i.kyoto-u.ac.jp/index.php?KNP> (2013).
- 11) 益岡隆志: 日本語モダリティ探求, くろしお出版(2007).
- 12) 日本語電子辞書研究所: EDR 電子化辞書仕様説明書 (第 2 版), (独) 情報通信研究機構(1995).
- 13) 仁田義雄: 日本語のモダリティと人称, ひつじ書房(1991).
- 14) Norbert Fuchs, Uta Schwertel, Sunna Torge: Controlled Natural Language Can Replace First-Order Logic, The 14th IEEE International Conference on ASE, pp.295-298(1991).
- 15) 太原育夫: 新人工知能の基礎知識, 近代科学社(2008).
- 16) Richard Fikes, Nils Nilsson: STRIPS: a new approach to the application of theorem proving to problem solving, Artificial Intelligence, 2(3-4), pp.189-208(1971).
- 17) 高柳俊祐, 上条敦史, 石川勉: 日本語文から拡張型述語論理

式への自動変換ツール: CONV, 人工知能学会論文誌 27(5), 271-280(2012).

18) 田村優樹, 長崎達也, 中野雅広, 原田実: 意味解析に基づくロボット指示システム Athena2011, 情報処理学会研究報告, 2012-NL-206(10), pp.1-8(2012).

19) Terry Winograd: Understanding natural language, Academic Press(1972).

20) 梅澤俊之, 西尾華織, 松田源立, 原田実: 意味解析システム SAGE の精度向上とモダリティの付与と辞書更新支援系の開発, 言語処理学会第 14 回年次大会発表論文集, 14, pp. 548-551(2008).