

## ルールと例題の類似性に基づく学習法

森 敏昭 大川 剛直 馬場口 登 手塚 慶一  
大阪大学工学部

例題と既存ルールの類似性に着目し、1つの例題を一般化することにより目標概念を定義する述語形式のルールを生成する手法を提案する。本手法ではルールと例題の類似度を、アトム間の引数の対応関係や述語の一般-特殊関係に基づいて求め、この類似度が高いルールを目標概念と類似した概念を定義するルールであると見なして知識ベースより抽出する。そしてそのルールを基準として、述語の抽象化、定数の変数化などを行い、目標概念を定義するルールを生成する。本稿では、ルールと例題が最も類似するようなアトムの対応付けを求めるために、述語の類似性、アトムの対応付けの最適化条件などについて議論する。

## Learning Based on Similarity Between Rules and Examples

Toshiaki Mori, Takenao Ohkawa, Noboru Babaguchi and Yoshikazu Tezuka

Faculty of Engineering, Osaka University  
2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565, Japan

We propose a learning method to generate rules from single example. To generalize the example, we use the similarity between the example and rules which already exist. First, we make pairs of atoms between them, and calculate the similarity, considering both the correspondence of arguments and the similarity of predicates based on their generality. Then the most similar rule to the example is used to generalize the example. To get such rules, we discuss the similarity between predicates, and the condition for the most suitable pair of atoms.

## 1. まえがき

帰納的学習は、与えられた複数の例題を一般化することにより、新たな一般的概念を獲得する学習法である[Cohen82]. 一般に、学習結果の信頼度を高めるためには例題を多数必要とする。また、概念の仮説が多数生成されるため、学習に要する計算量は膨大なものとなる。

一方、類推推論は、ある未知の事実に対し、類似した一つの既知の事実を用い、両者の類似性を利用してすることによって、演繹的には得られない結論を獲得する推論方式である[Carbon86]. しかしこれを学習という観点からとらえると、得られた結論が一般的概念ではないという意味で十分なものとはいえない。

そこで我々は、既存の知識を積極的に導入することにより、少数の例題に基づく帰納的学習が実現でき、また逆に類推推論により得られた結論は、帰納により一般的概念になし得るという考えのもとに、帰納的学習と類推推論の両者を補い合う新しい学習法を提案する[森90]. 提案手法は、入力された一つの例題に対して、類似した既存の知識を用いて一般化を図ることにより、新たな一般的概念を生成することを特徴とする。

本手法では知識表現形式としてルールを対象とし、ルールが定義する概念が類似しているならばルールの前件部も類似していると考え、この類似性を利用して例題の一般化を行う。この類似性は、目標概念の例題とルールにも現れていると考えられる。そこで本稿では、まず例題とルールの類似性を明確にし、続いてこの類似性を利用したルール生成アルゴリズムを示す。さらに、本手法によるルールの生成例を示し、類推推論に関する他手法との比較を行う。

## 2. 本学習法の概要

### 2.1 知識表現

ルールは次に示すように、複数のアトム の 連言から成る前件部と、単一のアトムで表される後件部から構成される。

$$\alpha_0 \leftarrow \alpha_1 \wedge \dots \wedge \alpha_n$$

ここで、アトム  $\alpha_i$  は次のような述語形式で表される。

$$\alpha_i = P_i(t_1, \dots, t_q)$$

述語  $P_i$  の引数  $t_1, \dots, t_q$  は定数または変数であり、本稿では、変数を  $?X$  のように“?”を前置することにより表す。また本研究では、 $\alpha_1, \dots, \alpha_n$  の述語がすべて  $\alpha_0$  の述語と異なるルール、即ち再帰構造を持たないルールのみを対象とする。

### 2.2 ルール生成のステップ

本手法では、入力された一つの例題を一般化することにより、前節で示された形式のルールを生成することを目標とする。これは、以下の手順により行われる(図1)。

- (1) 目標概念  $C$  とその例題  $E$  を入力。
- (2) 例題  $E$  を基に、目標概念と類似した概念を定義するルール  $\alpha_0 \leftarrow \alpha_1 \wedge \dots \wedge \alpha_n$  を、知識ベースより抽出。
- (3) 抽出されたルールを基に例題  $E$  を一般化した記述を前件、 $C$  を述語に持つ  $\beta_0$  を後件とするルール  $\beta_0 \leftarrow \beta_1 \wedge \dots \wedge \beta_m$  を生成。

ここで例題  $E$  は、教師が目標概念に関連していると判断した事実を、アトムの集合  $\{\varepsilon_0, \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_k\}$  により表現した記述である。

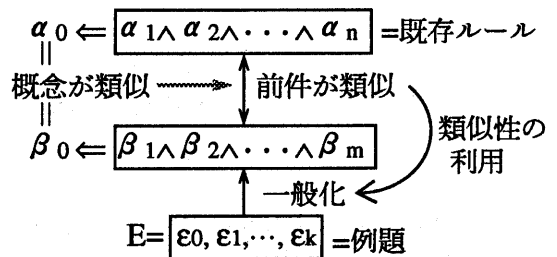


図1 ルール生成のステップ

## 3. ルールと例題の類似性

### 3.1 アトム間の対応付け

目標概念とルールの表す概念の類似性は、概念の例題と既存ルールの前件部との類似性により求める。この類似性は、例題のアトムとルールのア

トム間に対し、

(1) 引数の対応関係

(2) 述語の類似性

を用いてアトム間の対応関係を定めることにより、形式的に求める。そこでまずアトムの対応付けを次のように定義する。

[定義1] (アトムの対応付け

(Pairing of Atom))

アトム  $\alpha$  とアトム  $\beta$  が対応付けられていることを、“ $\alpha * \beta$ ” と表す。ここで、アトムの対応付けは次に示すように、対応付けられたアトムのペアの集合 PAT により表す。

$$PAT = \{\alpha_1 * \beta_1, \dots, \alpha_n * \beta_n\}$$

但し、 $\alpha_i \neq \alpha_j (i \neq j)$ 、 $\alpha_i$  と  $\beta_i$  の引数の数が同じでなければならない。

定義1における  $\alpha$  はルール中のアトム、 $\beta$  は例題中のアトムを表している。ここで、アトムの対応関係は例題とルール間で一對多の対応付けを許している。これはルールと例題の抽象度の違いに基づくものであり、後に一般化を行う際に、例題の一つの記述が複数の記述に一般化され得ることを意味している。図2にアトムの対応付けの例を示す。

PAT1 =  
{GRANDFATHER(?X, ?Z)\*GRANDMOTHER(PETER, MARY),  
FATHER(?Y, ?Z)\*MOTHER(PAUL, MARY),  
PARENT(?X, ?Y)\*FATHER(PETER, PAUL)}

図2 アトムの対応付けの例

### 3.2 引数の対応付け

引数の対応関係は、対応付けられたアトムの引数の順序に従って定める。以下にアトムの対応付けに対する引数の対応付けを定義する。

[定義2] (引数の対応付け

(Pairing of Argument))

$$\alpha = P(t_1, \dots, t_q),$$

$$\beta = Q(t_1', \dots, t_q')$$

とする。このとき、 $\alpha * \beta$  に対する引数の対応付けを次のように定義する。

$$PAR(\alpha * \beta) = \{t_1 o t_1', \dots, t_q o t_q'\}$$

また、

$$PAT = \{\alpha_1 * \beta_1, \dots, \alpha_n * \beta_n\}$$

のとき、PAR(PAT)を次のように定義する。

$$PAR(PAT) = PAR(\alpha_1 * \beta_1) \cup \dots \cup PAR(\alpha_n * \beta_n)$$

[定義3] (引数の対応付けの矛盾)

引数の対応付け  $PAR = \{t_1 o t_1', \dots, t_q o t_q'\}$  (但し、 $t_i' (i=1, \dots, q)$  は定数) において、 $t_i = t_j$  なる  $i, j (i \neq j)$  が存在するとき、または  $t_i, t_j$  が定数でかつ  $t_i' = t_j'$  なる  $i, j (i \neq j)$  が存在するとき、PARは矛盾しているという。

ここでは定数間の対応関係は1対1としているが、定数と変数の間では1対多の対応関係を許している。これは3.1で述べたように、ルールと例題の抽象度の違いに基づくものである。

図3に、図2のアトムの対応付けに対する引数の対応付けを示し、図4に矛盾した引数の対応付けの例を示す。

$$PAR(PAT1) = \{?X o PETER, ?Y o PAUL, ?Z o MARY\}$$

図3 引数の対応付けの例

$$PAR1 = \{?X o PETER, ?X o MARY\}$$
$$PAR2 = \{TOM o PAUL, LUCY o PAUL\}$$

図4 矛盾した引数の対応付けの例

### 3.3 述語の類似性

例題とルールの類似性は、対応付けられたアトムの述語間の類似性によっても求めることができる。類似性の尺度を、述語の一般-特殊関係を利用して形式的に定める。この一般-特殊関係は、次の定義で示すように既存のルールによって明示的に表されているものとする。

[定義4] (述語の一般-特殊関係)

$$P(t_1, \dots, t_q) \Leftarrow Q(t_1, \dots, t_q)$$

のようなルールに対し、述語PとQの関係を

$$P \Leftarrow Q$$

と表す。また、

$$P_0 \Leftarrow P_1, P_1 \Leftarrow P_2, \dots, P_{n-1} \Leftarrow P_n$$

であるとき、 $P_0 \Leftarrow_n P_n$  と表し、同じ述語に対して

は  $P \leftarrow_0 P$  が成り立つとする。ここで  $P_g, P_s$  間に

$$\exists i > 0 \quad P_g \leftarrow_i P_s$$

が成り立つとき、 $P_g$  は  $P_s$  より一般的な述語であるといい、逆に  $P_s$  は  $P_g$  より特殊な述語であるという。

[定義5] (述語の一般-特殊関係に基づく類似性, 同一レベル)

述語  $P, Q$  に対して,

$$\exists i, j \quad R \leftarrow_i P, R \leftarrow_j Q$$

なる述語  $R$  が存在するとき、 $P$  と  $Q$  には一般-特殊関係に基づく類似性が存在するという。特に  $i = j$  の場合、 $P$  と  $Q$  は同一レベルであるという。

複数の述語間で、ある述語との類似度を比較した場合、その述語と一般-特殊関係に基づく類似性が存在する述語の方が、存在しない述語よりも類似しているといえる。また、共に一般-特殊関係に基づく類似性が存在する述語間では、次に定義する述語の共通クラスを用いて類似度を比較する。

[定義6] (最小共通クラス集合  
(Least Common Class Set))

述語  $P_1, P_2$  に対して,

$$\exists i, j \quad Q \leftarrow_i P_1, Q \leftarrow_j P_2$$

が成り立つすべての  $Q$  を要素とする集合を  $\Psi$  とする。この  $\Psi$  から  $R \leftarrow_k R'$  ( $k > 0$ ) なる  $R' \in \Psi$  が存在する  $R$  をすべて除外して得られる集合を最小共通クラス集合といい、 $LCS(P_1, P_2)$  で表す。

[定義7] (述語の類似度の比較)

述語  $A, B, C$  に対し、 $LCS(A, B)$  の要素に少なくとも一つ、 $LCS(A, C)$  中のいずれかの要素よりも特殊な述語が存在し、 $LCS(A, C)$  のすべての要素が  $LCS(A, B)$  のどの要素よりも特殊でないならば、述語  $A$  は述語  $C$  よりも述語  $B$  に類似しているという。

例として、図5に示すような述語の一般-特殊

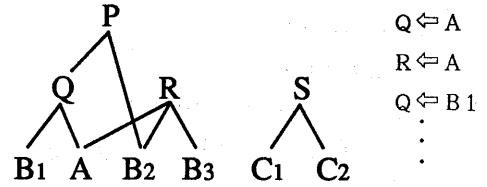


図5 述語の一般-特殊関係による階層

関係が存在した場合に、 $A$  という述語に対して、 $B_1$  と  $B_2$  のどちらが類似しているかを考える。このとき、 $LCS(A, B_1) = \{Q\}$ 、 $LCS(A, B_2) = \{P, R\}$  である。ここで、述語  $Q$  は述語  $P$  よりも特殊であるため、述語  $B_1$  の方が述語  $A$  に類似しているといえる。しかし、 $B_1$  と  $B_3$  のように、最小共通クラス集合のすべての要素間に直接の一般-特殊関係が存在しない場合、また、一方の最小共通クラス集合にもう一方の述語よりも一般的な述語と特殊な述語が存在する場合には、類似性の比較を行うことができない。

この述語の類似度の比較は、引数の対応付けが無矛盾であるアトムに対応付けが複数求められた場合に、できるだけルールと例題間の類似度が高くなるような対応付けを選択するために利用される。つまり、ルールと例題間の類似度の比較は、対応付けられている個々のアトム間の述語の類似度の比較に帰着できると考える。ここで、あるアトムの対応付けを他の対応付けと比較した際に、対応付けられているルールのアトムの述語の類似度がすべて他の対応付けよりも等しいか低いならば、そのアトムの対応付けはより類似度が低いため削除されるべきである。そのような対応付けを削除した結果残った対応付けが、類似度の高い対応付けである。そこで次に対応付けが満たすべき条件を定義する。

[定義8] (アトムの対応付けの最適化条件)

$$\text{ルール} : \alpha_0 \leq \alpha_1 \wedge \dots \wedge \alpha_n,$$

アトムの集合  $E$

を考える。ここで、アトムの対応付け

$$PAT = \{\alpha_0 * \beta_0, \alpha_1 * \beta_1, \dots, \alpha_n * \beta_n\}$$

に対し、PATとは異なるアトムに対応付け

$$PAT' = \{\alpha_0' * \beta_0', \alpha_1' * \beta_1', \dots, \alpha_n' * \beta_n'\}$$

を考える。PAR(PAT)とPAR(PAT')はどちらも矛盾しておらず、 $\{\beta_0, \dots, \beta_n\}$ と $\{\beta_0', \dots, \beta_n'\}$ は共にEの部分集合であるとする。このとき、PATに関する次の条件を最適化条件と呼ぶ。

「 $\alpha_i, \beta_i'$ の述語間に一般-特殊関係に基づく類似性が存在するすべてのiに対して、 $\alpha_i$ の述語が $\beta_i$ の述語よりも $\beta_i'$ の述語に類似しているようなPAT'が存在しない」

例として、図5のような述語の一般-特殊関係が存在したときに、次のようなアトムに対応付けが得られたとする。

$$PAT_2 = \{Q(?X) * B_1(T), R(?X) * A(T)\}$$

$$PAT_3 = \{Q(?X) * B_2(T), R(?X) * B_1(T)\}$$

$$PAT_4 = \{Q(?X) * B_3(T), R(?X) * B_2(T)\}$$

この時、PAT<sub>2</sub>が最適化条件を満たすかどうかを考察する。PAT<sub>2</sub>, PAT<sub>3</sub>, PAT<sub>4</sub>中でQ(?X)と対応付けられているアトムのうち、述語Qと一般-特殊関係に基づく類似性が存在する述語を持つアトムは、PAT<sub>2</sub>のB<sub>1</sub>(T)とPAT<sub>3</sub>のB<sub>2</sub>(T)であり、QはB<sub>2</sub>よりもB<sub>1</sub>に類似している。また、述語RについてはPAT<sub>2</sub>のAとPAT<sub>4</sub>のB<sub>2</sub>が最も類似している。従って、PAT<sub>2</sub>以外の対応付けにおいて、Q(?X)とR(?X)が共にB<sub>1</sub>, Aよりも類似した述語をもつアトムと対応付けられていないため、PAT<sub>2</sub>は最適化条件を満たしている。

このようにして選択されたアトムに対応付けは、ある1つのルールに対する最適な対応付けである。次に、異なるルールより得られた複数のアトムに対応付けの中から、類似度の低い対応付けを削除することによって最終的にルールの生成に用いられるものを選択する必要がある。そこで、類似度の低いアトムに対応付けを削除するための条件を次に定義する。

[定義9] (アトムに対応付けの削除条件)

$$\text{ルール} : \alpha_0 \Leftarrow \alpha_1 \wedge \dots \wedge \alpha_n,$$

$$\alpha_0' \Leftarrow \alpha_1' \wedge \dots \wedge \alpha_m',$$

アトムの集合E

に対する引数の対応付けが無矛盾なアトムに対応付け、

$$PAT = \{\alpha_0 * \beta_0, \dots, \alpha_n * \beta_n\},$$

$$PAT' = \{\alpha_0' * \beta_0', \dots, \alpha_n' * \beta_n'\}$$

を考える。ここで、 $\Sigma = \{\beta_0, \dots, \beta_n\} \subseteq E$ ,  $\Sigma' = \{\beta_0', \dots, \beta_n'\} \subseteq E$ , (但し $\Sigma \cap \Sigma' \neq \phi$ )とする。

ここで、 $\beta_i \in \Sigma \cap \Sigma'$ に対して、 $\beta_i$ と対応付けられているPAT'のアトムの述語より $\alpha_i$ の述語の方が $\beta_i$ の述語に類似しているようなiが存在せず、かつ $\alpha_i$ と $\beta_i$ の述語間に一般-特殊関係に基づく類似性が存在するような $\beta_i \in \Sigma / (\Sigma \cap \Sigma')$ が存在しない場合は、PATを削除する。

但し、 $\beta_i \in \Sigma \cap \Sigma'$ に対して、 $\beta_i$ と対応付けられているPATとPAT'中のすべての述語が $\beta_i$ の述語に対して類似度が等しい、または類似度の比較を行うことができない場合、次の(a)または(b)を満たすPATは削除されない。

(a)  $\alpha_i$ と $\beta_i$ の述語間に一般-特殊関係に基づく類似性が存在するような $\beta_i \in \Sigma / (\Sigma \cap \Sigma')$ が存在する。

(b)  $\alpha_i'$ と $\beta_i'$ の述語間に一般-特殊関係に基づく類似性が存在するような $\beta_i' \in \Sigma' / (\Sigma \cap \Sigma')$ が存在しない。

ここでも対応付けられたアトム間の述語の類似度を選択の基準として用いる。対応付けられている例題中のアトムとルールのアトムの述語の類似度を比較し、一方が他方に比べて、対応関係を持つすべてのアトムの類似度が同一か低いならば、その対応付けは類似度が低いと考え削除する。但し、一方のルールにしか対応付けられていない例題中のアトムとルールのアトムに、一般-特殊関係に基づく類似性が存在するならば、削除されない。

例として、図5のような述語の一般-特殊関係が存在したときに、次のようなアトムに対応付けを考える。

$$PAT_5 = \{A(?X) * B_1(T_1), S(?Y) * C_1(T_2)\}$$

$$PAT_6 = \{B_2(?X) * B_1(T_1), R(?Y) * C_2(T_3)\}$$

ここで、 $\Sigma = \{B1(T1), C1(T2)\}$ 、 $\Sigma' = \{B1(T1), C2(T3)\}$ とにおいて定義を適用する。まず $B1(T1) \in \Sigma \cap \Sigma'$ より、 $B1$ のルールのアトム述語との類似度を調べると、 $B1$ は $B2$ よりも $A$ に類似している。また、 $C2(T3) \in \Sigma' / (\Sigma \cap \Sigma')$ により $C2$ のルールのアトム述語との類似度を調べると、一般-特殊関係に基づく類似性は存在しない。従ってPAT6が削除される。

#### 4. ルール生成アルゴリズム

本章では、入力例題から目標概念を定義するルールを生成する手続きを示す。

入力は目標概念 $C$ 及びその例題 $E$ であり、またルールの集合 $KB = \{R1, \dots, Rp\}$ があらかじめ与えられているものとする。 $E$ はアトムの集合 $\{\varepsilon_0, \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_k\}$ で与えられ、 $\varepsilon_0$ の述語は $C$ であるとする。

アルゴリズムは、まず引数の対応関係が無矛盾なルールと例題のアトムの対応付けを求め、続いてその中で最適なアトムの対応付けを選択し、最後にその対応付けに基づき例題を一般化する、という3つのステップにより構成される。以下、各ステップごとにアルゴリズムの詳細について述べる。

##### [STEP 1]

例題とアトムの対応付けは、 $KB$ 中のすべてのルールに対して試みる。そして、引数の対応付けが無矛盾となるように、ルールのすべてのアトムを例題に対応づけることができたルールはすべてルールの生成に利用される。しかし、そのようなルールが存在しなかった場合はルールの生成は失敗となる。

まず、 $KB$ からルールを1つ選択する。そして、アトムの対応付けの初期状態として、ルールの後件部のアトムと $\varepsilon_0$ を対応付ける。これにより引数の対応関係の初期状態も同時に定まる。

続いて、求められた引数の対応関係と矛盾しないように順にアトムを対応付けていく。ここでアトムの対応付けを1つずつ確定させると選択する

アトムにより結果が変化するという問題が生じる。そこで、現在の状態で対応付けが可能なアトムの組み合わせをすべて求め、その中から引数の対応関係が無矛盾なアトムの対応付けを組み合わせしていく。そしてこの手順を繰り返し、ルールのすべてのアトムが例題のアトムと対応付けられれば、[STEP2]へ進む。

##### [STEP 2]

3.3節で述べたように、一つのルールに対して[STEP1]で引数の対応付けが無矛盾であるアトムの対応付けが複数求められた場合には、定義8の最適化条件を満たすアトムの対応付けを選択する。

また、 $KB$ 中のすべてのルールに対してアトムの対応付けが試みられた後に、ここで選択されたアトムの対応付けに対し定義9の削除条件を満たす対応付けを削除する。

##### [STEP 3]

[STEP2]で選択されたアトムの対応付けに基づき、例題を一般化する。即ち、例題中のアトムでルールと対応付けられたアトムのみをルール生成に用い、それ以外のアトムは削除される。ここで、一般化は、述語の一般-特殊関係に基づく述語の一般化、及び定数の変数化により行われる。ここでは、類似しているルール間で対応しているアトムの述語は同じ抽象度であると考え、例題の述語の一般化は、対応しているルールのアトムの述語と同一レベルとなるように行う。また、定数の変数化は引数の対応付けをそのまま利用して行う。即ち、 $PAR(PAT)$ の“o”の左辺が変数の場合にはその変数に置き換え、定数の場合はそのままにする。ここで、 $\varepsilon_0$ を一般化した結果を $\beta_0$ 、 $\varepsilon_1$ から $\varepsilon_m$ の中でルールのアトムと対応付けられたアトムに対し一般化を行った結果を $\beta_1, \dots, \beta_m$ と置く。そして最後に、 $\beta_0 \leftarrow \beta_1 \wedge \dots \wedge \beta_m$ を出力する。

#### 5. ルールの生成例

本章では、食器などの器具をその形状などで定義したルールを基に、SPOONとTEACUPを目標概念として、その例題よりルールを生成した結果を示す。

図6は既存のルールの一部であり、図7(a)はSPOON, (b)はTEACUPの例題である。図8では、生成されたSPOON及びTEACUPを定義したルールを示す。

FLYING-PAN(?X) ← PART-OF(?Y, ?X) ^ BAR(?Y)  
 ^ PART-OF(?Z, ?X) ^ CONCAVE(?Z)  
 ^ MEDIUM-WEIGHT(?X) ^ LARGE(?X)  
 ^ MADE-OF-STEEL(?X)

WINE-GLASS(?X) ← PART-OF(?Y, ?X) ^ BASE(?Y)  
 ^ PART-OF(?Z, ?X) ^ BAR(?Z) ^ PART-OF(?W, ?X)  
 ^ CONCAVE(?W) ^ ON(?W, ?Z) ^ ON(?Z, ?Y)  
 ^ LIGHT-WEIGHT(?X) ^ MADE-OF-GLASS(?X)

GLASS(?X) ← CONCAVE(?X) ^ FLAT-BOTTOM(?X)  
 ^ MADE-OF-GLASS(?X)

KNIFE(?X) ← PART-OF(?Y, ?X) ^ PLATE(?Y)  
 ^ MADE-OF-STEEL(?Y) ^ SHARP(?Y)  
 ^ PART-OF(?Z, ?X) ^ BAR(?Z)

SOUP-PLATE(?X) ← CONCAVE(?X) ^ FLAT-BOTTOM(?X)  
 ^ MADE-OF-CHINA(?X)

KETTLE(?X) ← PART-OF(?Y, ?X) ^ CUP-SHAPED(?Y)  
 ^ MADE-OF-STEEL(?Y) ^ PART-OF(?Z, ?X)  
 ^ SPOUT(?Z) ^ PART-OF(?W, ?X) ^ LID(?W)

MADE-OF-ANYMATERIAL(?X) ← MADE-OF-METAL(?X)  
 MADE-OF-ANYMATERIAL(?X) ← MADE-OF-GLASS(?X)  
 MADE-OF-ANYMATERIAL(?X) ← MADE-OF-CHINA(?X)  
 MADE-OF-METAL(?X) ← MADE-OF-STEEL(?X)  
 MADE-OF-METAL(?X) ← MADE-OF-LIGHTMETAL(?X)  
 MADE-OF-LIGHTMETAL(?X) ← MADE-OF-ALUMINUM(?X)  
 ANY-WEIGHT(?X) ← LIGHT-WEIGHT(?X)  
 ANY-WEIGHT(?X) ← MEDIUM-WEIGHT(?X) ✓  
 STABLE(?X) ← BASE(?X)  
 STABLE(?X) ← FLAT-BOTTOM(?X)  
 GRASPABLE(?X) ← HANDLE(?X)  
 GRASPABLE(?X) ← BAR(?X)

.....

図6 既存ルールの一部

{SPOON(S),	{TEACUP(TC),
LIGHT-WEIGHT(S),	LIGHT-WEIGHT(TC),
SILVER(S),	WHITE(TC),
MADE-OF-ALUMINUM(S),	MADE-OF-CHINA(TC),
SMALL(S),	SMALL(TC),
LUSTROUS(S),	PART-OF(HA, TC),
PART-OF(B, S),	HANDLE(HA),
BAR(B),	PART-OF(CO, TC),
PART-OF(C, S),	CONCAVE(CO),
CONCAVE(C)}	FLAT-BOTTOM(CO),
	SIDE-BY-SIDE(HA, CO),
	SIDE-BY-SIDE(CO, HA)}

(a) (b)

図7 入力例題

SPOON(?X) ← PART-OF(?Y, ?X) ^ BAR(?Y)  
 ^ PART-OF(?Z, ?X) ^ CONCAVE(?Z)  
 ^ LIGHT-WEIGHT(?X) ^ SMALL(?X)  
 ^ MADE-OF-LIGHTMETAL(?X)

TEACUP(?X) ← PART-OF(?Z, ?X) ^ HANDLE(?Z)  
 ^ PART-OF(?W, ?X) ^ CONCAVE(?W) ^ PART-OF(?Y, ?X)  
 ^ FLAT-BOTTOM(?Y) ^ SIDE-BY-SIDE(?W, ?Z)  
 ^ SIDE-BY-SIDE(?Z, ?Y) ^ LIGHT-WEIGHT(?X)  
 ^ MADE-OF-CHINA(?X)

図8 生成されたルール

図8に示したルールは、SPOONについてはFLYING-PANに関するルール、TEACUPはWINE-GLASSに関するルールを基に生成されたものである。SPOONの例では、例題中のSILVER(S)等のアトムが削除され、述語MADE-OF-ALUMINUMがMADE-OF-LIGHTMETALに一般化されている。またTEACUPの例では、定数COが?Wと?Yの異なる変数に対応付けられ、2通りに変数化されている。

なお、他に生成されたルールとして、TEACUPに関するルールがFLYING-PANのルールを基に生成されているが、このルールでは、FLAT-BOTTOMとSIDE-BY-SIDEを述語に持つアトムが削除され、SMALLを述語に持つアトムが加えられている。このルールは、WINE-GLASSのルールには対応付けられていない例題のSMALL(TC)がFLYING-PANのルールLARGE(?X)に対応付けられていたため削除されなかった。

ここに挙げたほとんどのルールに対し、SPOONやTEACUPと引数の対応関係が無矛盾なアトムの対応付けが得られ、そこでは類似性の存在しない述語を持つアトムが多く対応付けられていたが、生成されたルールに対するアトムの対応付けと比較されたことにより削除された。これにより、定義9のアトムの対応付けの削除条件の有効性が確認された。

## 6. 類推推論との比較検討

本章では、従来の類推推論に関する研究における手法について概観し、本手法との比較を行うことによりそれぞれの立場の差異を明確にする。

Russelは類推推論を、“ある状況またはオブジェクトT(ターゲット)が他の状況またはオブジ

ェクトS（ソース）と性質Pを共有し、Sが性質Qを有している、という事実からTに対して性質Qが成り立つことを推論する過程”であると定義している[Russel87]。つまり、領域知識の欠けているターゲットに対して、ターゲットと類似したソースを利用することにより、不足した知識の予測を行うものである。

この類推推論の結果は後の類推推論のソースとしても用いられるが、むしろ演繹推論により得ることのできない結論として重要な意味を持つ。それに対し、本手法の目的は例題をルールに基づく推論に用いられる形式に一般化することであり、一般の類推推論とは学習結果の利用に関する点で大きく異なる。一方、ソースと類推推論により得られた結果を一般化することにより、より抽象度の高い概念を獲得する手法もあるが[Winston80]、これはむしろ例題間の類似性に基づく学習であるといえる。

類推推論ではソースとターゲットの類似性の発見が非常に重要な要素となる。そのため的手段として、ソースとターゲットを構成する要素間のマッチングを行うことが多くの手法でとられている。そこで次にこのマッチングに関して、本手法と関連性の深い2つの手法との比較を行うことにする。

マッチングのための基準としては、本手法と同様、構成要素の対応関係と、それらの属性などに着目するものが多い。例えば、原口らは類推推論を演繹システム中で実現することを目的とし、一階述語論理を表現形式とした定式化を行っているが[原口86]、ここでは述語論理におけるルールの類似性の定義として「明白な類比」という考え方を導入しており、述語論理においてはこれは述語の一致であると定めている。また、この手法ではマッチングの対象となる2つの領域の等価性を考慮して、項の対応関係を1対1と定めている。

それに対し、本手法では抽象度の異なる2つの領域間のマッチングを行っているため項の対応関係は1対多を許し、また、新たなルールの生成が目的であるため述語の一致は必要ではない。

また、Falkenhainerらはこのマッチングのため

のアルゴリズムSMEを開発している[Falken89]。このアルゴリズムでは、まず述語が一致する記述を対応付け、次にその記述に含まれるオブジェクトを対応付ける。そしてその対応付けに基づき再び記述を対応付けることを繰り返す。その際に、述語はGREATERやCAUSEなどの記述間の関係に関する述語は一致する必要があるが、その他の述語に関する制限はない。最後にオブジェクトの対応関係が1対1となるように、記述の対応付けを組み合わせる。ここで、そのような組み合わせが複数求められた場合の選択の基準として、SMEでは述語の同一性や、対応付けられた記述数により定められる類似度を用いている。

このアルゴリズムは、オブジェクトを基準として記述の対応付けを求めた後にそれらを組み合わせる点で本手法と共通している。しかしSMEは、関係に関する述語を区別している点が本手法と異なる点である。一方、本手法では対応付けの選択の際に、SMEでは用いられていない述語の一般-特殊関係を利用しており、これにより、より詳細な類似度の判断ができるものと思われる。

## 7. むすび

本稿では述語形式のルールを対象とし、目標概念を定義するルールを、例題と既存のルールの類似性を利用することにより生成する手法を提案した。本手法は一つの例題からのルールの生成が可能であることが特徴である。

本稿ではアトムに対応付けに関して明確な基準を定めたが、より質の高いルールを生成するために様々なヒューリスティックスを導入することが必要であると思われる。その一つとして、述語の類似性に関し、ルールにより定義された一般-特殊関係に加え、より抽象度の高い概念に関する一般-特殊関係を外部で定義することが挙げられる。これにより、より柔軟性のある対応付けが可能になるものと考えられる。



## 参考文献

- [Cohen82] Cohen, P. R. and Feigenbaum, E. A.: "The hand-book of artificial intelligence vol. 3", William Kaufmann(1982).
- [Carbon86] Carbonell, J. G.: "Derivational analogy: A theory of reconstructive problem solving and expertise acquisition. In Michalski, R. S., Carbonell, J. G. and Mitchell, T. M. (Eds.), Machine learning Vol. II, pp. 371-392(1986).
- [森90] 森 敏昭, 大川 剛直, 馬場口 登, 手塚 慶一: "ルールと例題の類似性に基づく学習法の一提案", 情処第41回全大, 5L-5(1990).
- [Hall89] Hall, R. P.: "Computational approaches to analogical reasoning: A comparative analysis", Artificial Intelligence, Vol. 39, No. 1, pp. 39-120(1989).
- [Russel87] Davies, T. R. and Russel, S. J.: "A logical approach to reasoning by analogy", Proceedings of the Tenth International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp. 264-270(1987).
- [Winston80] Winston, P. H.: "Learning and reasoning by analogy", Communications of the ACM, Vol. 23, No. 12, pp. 689-703(1980).
- [原口86] 原口 誠, 有川 節夫: "類推の定式化とその実現", 人工知能学会誌, Vol. 1, No. 1, pp. 132-139(1986).
- [Falken89] Falkenhainer, B and Forbus, K. D and Gentner, D.: "The structure-mapping engine: Algorithm and examples", Artificial Intelligence, Vol. 41, No. 1, pp. 1-63(1989/90).