

# アナロジーを用いた仮説的設計知識の生成手法

## 概念ネットワークからのモデルの生成と利用

### A Method for Generating Hypothetic Design Knowledge with Analogy

森本 憲悟\*<sup>1</sup>  
Kengo MORIMOTO

鬼城 渉\*<sup>1</sup>  
Wataru ONIKI

藤本 裕\*<sup>1</sup>  
Yutaka FUJIMOTO

下村 芳樹\*<sup>2</sup>  
Yoshiki SHIMOMURA

吉岡 真治\*<sup>3</sup>  
Masaharu Yoshioka

武田 英明\*<sup>4</sup>  
Hideaki TAKEDA

\*<sup>1</sup> 東京大学人工物工学研究センター  
RACE, The University of Tokyo

\*<sup>2</sup> 首都大学東京  
Tokyo Metropolitan University

\*<sup>3</sup> 北海道大学  
Hokkaido University

\*<sup>4</sup> 国立情報学研究所  
National Institute of Informatics

It is important to unify different knowledge groups, which exist independently, and to extend knowledge gradually in order to obtain creative design solutions that are not obtained only with the existing design knowledge. With the aim of development of "Universal Abduction Studio", which is a system supporting creative design, a knowledge representation and a matching algorithm for creating hypothetic knowledge is proposed in this paper.

## 1. はじめに

近年、持続性社会実現への要請、消費者の価値意識の多様化、製造者責任法(PL法)など、人工物に対する要求の増加や複雑化にともない、設計者の負担が増大している。このような状況のもと、設計者には多様な問題を包括的に解決する創造的な設計が求められている。

本研究では、これまでに創造的設計を総合的に支援するための環境である Universal Abduction Studio の構築を目指し、設計におけるアブダクションの理論的性質の解明や、異なる領域知識における関係性の発見、そして設計支援としての枠組みについて研究を行ってきた[武田 2003]。

本稿では、設計における問題解決に有効な仮説的知識を生成するために、深層格やオントロジーを利用した概念ネットワークから知識のモデルを生成し、そのモデルに対してアナロジーを適用する手法を提案する。さらに実験により本手法の有効性を検証する。

## 2. Universal Abduction Studio

本研究では創造的設計を「ある設計問題において、その設計対象に強く関連する領域知識だけでは解決できないような課題が発生した場合、それまで対象としていた領域知識とは異なる領域に属する知識を発見し、その両者を統合的に用いることにより課題を解決する設計」と定義する。

このような創造的設計を支援する計算機環境として Universal Abduction Studio (UAS) を提案している[武田 2003]。UAS はアナロジーにより知識拡張を行い、さらに仮説的知識を生成・提示することで創造的設計の支援を行う。

UAS はワークスペース、知識ベース群、知識統合モジュール群からなる(図1)。設計者はワークスペースに暫定的な設計解や設計課題などを置き、その全体や部分に対して知識ベース

にある知識を適用して設計を行う。さまざまな知識を設計に適用するためには知識の統合が必要である。このとき知識統合モジュール群から適切な推論モジュールが選択的に使用される。このようにして設計の各場面で必要な知識を、そこでの適切な知識に変換し適用していくことで UAS における設計が進行する。

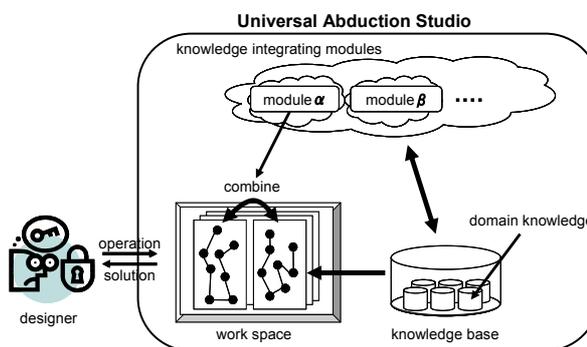


図1 UAS のシステム構成

## 3. アナロジー

アナロジーは人の柔軟な思考を支える柔軟なメカニズムのひとつであり[Holyoak 1995, 鈴木 1996]、それはアブダクションにおいても力を発揮すると考えられている[村上 1992]。アナロジーによる発想とは、ある分野(ターゲット)における未知のアイデアを、その分野とは異なる別の分野(ベース)との類似性に基づき、ベースの要素をターゲットに転写することで獲得するものである[JSAI 2001]。

アナロジーは対象レベル、関係レベル、システムレベルの三つのレベルに分類できる[Holyoak 1995]。

**対象レベル**は属性の類似性を、**関係レベル**は対象の関係を、**システムレベル**は高次の関係をもとに類推を行うものである。人間はこれら複数のレベルのアナロジーを統括的に利用していることが知られている。

## 4. 知識表現

本章では UAS における知識表現について述べる。UAS における知識表現は、3章で述べた複数のレベルのアナロジーを利用できる形式が望ましい。

### 4.1 if-then 型知識

UAS で取り扱う知識は **if-then 型知識**である。if-then 型知識とは、条件部と結論部によって構成される知識である。一般に if-then 型知識は多様な依存関係を表現しうる。例えば論理的含意、因果関係、義務、条件・行為、共起関係などである。これらは条件部と結論部に高次の関係を与えていることにほかならない。if-then 型知識を採用することで、システムレベルの対応付けを可能にする。なお今回は簡単のため、if-then 型知識は因果関係を表現するものだけに限定した。

### 4.2 グラフによる表現

UAS では、知識の条件部および結論部をグラフで表現する。このグラフは主に次のノードおよびアークから構成される。

#### (1) ノード

##### ● 対象ノード

対象を表す。ここで対象とは世の中、あるいは知識の中に存在する事物である。例えば犬やリンゴなどは対象にあたる。

##### ● 属性値ノード

属性値を表す。属性値は属性の特定の値である。ここで属性とは対象の性質であり、典型的には形、色、重さなどである。例えば色の属性値には赤や青がある。

##### ● 述語ノード

述語を表す。述語は、ここでは動詞述語に限定する。状態を表す場合は形容詞述語を使わず、属性値によって表現する。

#### (2) アーク

##### ● 対象-述語間アーク

対象ノードと述語ノードを接続するアークであり、対象と述語の関係を表現するものである。対象と述語の関係には、動作主格 (agent 格) の関係や対象格 (object 格) の関係など複数存在する。UAS ではより厳密な関係レベルの対応付けを実現するために、これら複数の関係を深層格によって区別する。深層格 [Fillmore 1968] は言語処理などの分野で利用されている概念で、対象と述語の意味的な関係を分類したものである。

##### ● 対象-属性値間アーク

対象ノードと属性値ノードを接続するアークであり、対象がある属性値を持っていることを表現する。

### 4.3 オントロジー

柔軟なアナロジーを行うために、UAS は次の三つのオントロジーを採用している。そして前節で述べたノードに対して各々のオントロジーへの参照情報を付加したグラフを、ここでは **概念ネットワーク**と呼ぶ。

#### (1) 述語オントロジー

**述語オントロジー**は述語を体系化したものである。前述の述語は全て、この述語オントロジー中の述語を参照している。述語オントロジー中の二つの述語間には概念距離が定義できる。関係レベルの対応付けに概念距離を用いることで対応付けに柔軟性を持たせることができる。すなわち、5章におけるターゲットとベースにおいて述語が完全に一致していなくても、類似した述語であれば対応付けを行うことが可能になる。

なお本研究では、述語オントロジーとして EDR 電子化辞書概念体系辞書[Yokoi 1995]の一部を利用している。

#### (2) 対象オントロジー

**対象オントロジー**には対象とその対象がデフォルトで持っている属性値が定義されている。前述の対象は全て、この対象オントロジー中の対象を参照している。この対象オントロジーは対象レベルの類似性評価の実現に利用する。

#### (3) 属性オントロジー群

**属性オントロジー群**は、属性毎に属性値を体系化したオントロジー群である。形状に関するオントロジーや硬度に関するオントロジーなどがある。前述の属性値は全て、この属性オントロジー中の属性値を参照している。

### 4.4 視点モデル

知識をグラフで表現し、知識のモデルを生成するためにはいくつかの過程が必要である(図2)。

知識を文書として記述する際に、暗黙的に理解できるという前提のもとで記述を省略する場合が存在する。そのため、文書に記述された知識をそこに記述されている対象や述語、属性値のみを用いてグラフ化するだけでは知識の記述として不十分な場合がある。よって、再利用性の高い知識を記述するためには、文書中には明示されていないが知識の前提となっている暗黙的な情報(関連する他の対象や属性値、オントロジーに基づく階層関係の情報)を補完する必要がある。このように文書が暗黙的に前提としている情報を明示的に補完することにより作成した概念ネットワークを**統合モデル**と呼ぶ。

しかしながら、統合モデルはアナロジーに適切なモデルとは言えない。対象レベルのアナロジーにおいては全ての属性が利用されるわけではなく、文脈により規定される一部の属性だけが利用される。例えば「**鋳鉄をフライス盤で加工するときの知識**」はアクリル材に利用できる可能性が高いのに対して、同じ金属である水銀には利用できる可能性が低い。ここでは対象が金属であるかどうかよりも対象の硬度に注目している。統合モデルはこの注目すべき属性の情報を保持しておらず、対象レベルのアナロジーを行うことができない。

本研究では対象レベルのアナロジーを可能にするために、さらに**視点**と呼ぶ情報を知識に付加する。視点とは知識の文脈において注目すべき属性と定義する。上記の例では鋳鉄の硬度が視点となりうる。統合モデルから視点以外の不要な属性値を取り除いたものを**視点モデル**と呼び、これを知識として取り扱う。

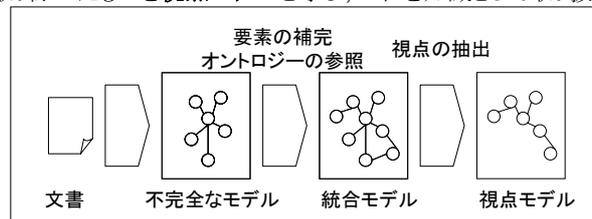


図2 モデル生成過程

### 4.5 RDF による知識表現形式

前節までに述べた知識表現を具体的に記述するために本研究では **RDF**[Beckett 2004]を採用する。RDF は、W3C(World Wide Web Consortium, <http://www.w3.org/>)が中心となり現在研究が行われているセマンティック・ウェブにおいて、知識記述形式の標準化を行うための要素技術である。

RDF 形式の知識はテキスト・エディタ等を用いて人手で記述・編集することが困難である。そのため本研究では RDF 形式

の知識を容易に記述し、生成することが可能な知識エディタ(図3)を開発している。この知識エディタはグラフィカルなインターフェイスによって知識記述を支援する。

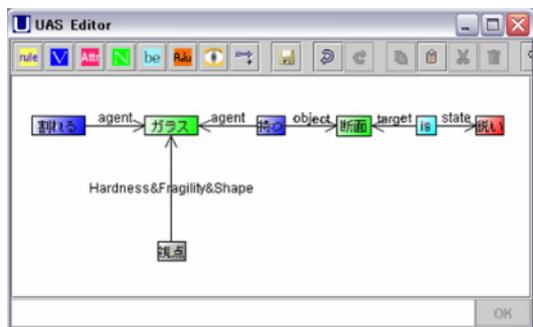


図3 知識エディタ

## 5. 知識マッチング

本章では、4章で述べた知識表現を利用した知識マッチングの手法について提案する。

知識マッチングとは、知識ベース中の知識(ベース)に登場する対象と、設計課題(ターゲット)に登場する対象との間に対応関係を生成することである。

実際の手順は深層格による関係レベルの類似性(構造的類似性)に基づき、ベースとターゲットの対象について複数の対応関係を生成する。その後、ベースの視点を用いて、それらの対象レベルの類似性(対象類似性)を評価する。最後に構造的類似性および対象類似性の高い対応関係を課題解決に有効な候補として出力する。

### 5.1 深層格による構造類似性を用いたマッチング

本節では、深層格をもとに対象の対応関係を作成する手法について詳細に説明する。本手法では、ターゲットとベースにおいて、類似する述語と同一の深層格によって結びつけられている対象のみを以下の手順により対応付ける。ただし作成する対応関係を一対一対応のみとし、一対多、および多対多の対応は許さないものとする。

#### (1) 設計課題の記述・キー述語の選択

ユーザが設計課題(ターゲット)を統合モデルとして記述し、ターゲットから重要と考える述語(キー述語)を選択する。キー述語の選択は、その述語とグラフ構造的に近い対象に対して構造的・一貫性の高い対応関係を生成する役割がある。一方で組み合わせ爆発を起こさないための制約としても機能する。

#### (2) 対象ポイントの設定

キー述語に直接深層格がつながっている対象に対して対象ポイントとして1を与える。ポイント1を与えられた対象と同じ述語につながっている対象に対してポイント2を与える。このようにポイントが  $n$  となる対象と同じ述語につながっている対象に対して与えるポイントを  $n+1$  とし、全ての対象に対してポイントを設定する。対象ポイントはキー述語とのグラフ構造上における距離を意味する。

#### (3) 述語ポイントの設定

(2)で設定した対象ポイントを利用して、述語ポイントを設定する。この述語ポイントはキー述語とグラフ構造的に近い述語に対して高いポイントが設定される。述語ポイントは次のように定義される。

$$\text{述語ポイント} = \frac{\sum_i 1/\text{述語の引数}i\text{の対象ポイント}}{\text{述語の引数の数}}$$

#### (4) ベースのキー述語の選出

ベースからターゲットのキー述語と類似する述語を選出し、ベースにおけるキー述語とする。

述語同士の類似度は一般的な類似度算出法[川島 2003]を利用する。例えば述語  $p$  と述語  $q$  の類似度は以下の式で与えられる。

$$\text{述語の類似度} = \frac{\text{述語}p, \text{述語}q\text{の共通段数}}{\text{述語}p\text{の段数} + \text{述語}q\text{の段数}}$$

ここで段数とは、階層構造のオントロジーにおける最上位のカテゴリを1段とし、それよりカテゴリが1つ下位になるごとに1つずつ段を加算したものである。本ステップではこの類似度がある閾値以上のとき、その述語は類似していると見なし、ベースのキー述語として選出する。

以降の手順では、このベースとターゲットのキー述語を基点として対応関係を作成していく。

#### (5) ベースの対象ポイントの設定

(2)と同様にベースの対象に対してポイントを設定する。

#### (6) ベースの述語ポイントの設定

(3)と同様にベースの述語に対してポイントを設定する。

#### (7) 構造対応ポイントの設定

次にターゲットとベースの対象の組に対して構造的対応ポイントを以下のようにして設定する。構造的対象ポイントとは、例えばターゲットの対象  $t$  とベースの対象  $b$  を対応付けるための指標である。この指標は対象-深層格-述語の結合関係が類似しているほど高くなる。

対象  $t$  と対象  $b$  の構造的対応ポイント =

$$\sum_{i,j} \text{述語}p_i\text{の述語ポイント} \times \text{述語}q_j\text{の述語ポイント} \times \text{述語}p_i\text{と述語}q_j\text{の類似度}$$

ここで述語  $p_i$  および述語  $q_j$  はそれぞれ対象  $t$  と対象  $b$  を引数に持つ述語であり、かつ、深層格が等しいものである。

#### (8) 対応表の作成

対応表とは一対一対応を満足するターゲットとベースの対象の対応関係をまとめたものである。(7)で設定した構造的対応ポイントをキーとして降順に対応関係を選出し対応表に登録する。すでに登録されている対応関係と矛盾を生じるような(一対一対応を満たさない)対応関係は採用せずにスキップする。

こうして得られた対応表の対応関係全ての構造対応ポイントの和を、この**対応表の構造的類似度**と呼ぶ。

なお(4)においてベースのキー述語となる述語が複数選出されている場合には、再び(5)に戻り、ベースのキー述語全てに対して、それぞれ対応表を作成する。

## 5.2 視点情報を用いた対象類似性の評価

前節で述べた手順により得られた対応表の各々の対応関係に対して、ベースにおける視点に注目した対象類似性の判定を行う。ひとつの対応関係に対して、視点に注目した対象類似度は以下の式で定義される。この類似度は、対象の組の視点となっている属性が一致および類似しているほど高くなる。

対象類似度 =

$$\sum_v \frac{\text{対象}a\text{の視点}v\text{の値と対象}b\text{の視点}v\text{の値の類似度}}{\text{対象}b\text{の視点の数}}$$

ここで視点  $v$  はベースの対象  $b$  の視点である。そして、対応表の対応関係全ての対象類似度の和を、その**対応表の対象類似度**と呼ぶ。

## 6. 実験

### 6.1 概要

前章までに提案した知識表現および知識マッチングを実装したシステムを作成した。本システムでは知識マッチングを行う部分を、「条件部のみ」、「結論部のみ」、「条件部と結論部」と選択可能にした。この選択を利用することで、より課題の目的にあった知識をマッチングさせることが可能になる。本システムは知識ベースとして複数の if-then 構造のルールを保持することができる。設計課題を入力すると、設計課題と知識ベースに蓄えられている知識との間で知識マッチングを行う。そして、それぞれに対して対応表を作成し、対象類似度を算出、表形式で提示する。

本実験では設計ノウハウ集[渡辺 1988]の中から if-then 構造のルールとして表現可能な知識を 30 個抜粋し、それらを知識ベースに登録した。

設計課題として次の二つをグラフ構造化し入力した。

- (1) カメラのフィルムに駆動を伝達し、かつ、撮影時に正確な位置にフィルムを停止させることが可能な機構
- (2) 気体を密封することが可能な保存容器

### 6.2 実験結果

設計課題(1)のキー述語を「停止させる」、設計課題(2)のキー述語を「密封する」として実験を行った。典型的な二つの例を紹介しよう。

#### (1) 構造的類似度, 対象類似度ともに高い例

設計課題(1)を入力した場合の結果において、構造的類似度, 対象類似度がともに高い対応表が得られた。そのような対応表が得られた知識のひとつを図4に示す。

```
<if>スプロケットでチェーンに大きな駆動を伝達する
<then>未駆動時にはスプロケットでチェーンを停止させることができる
<視点>チェーン{Shape, Hardness}
```

図4 知識1

この知識との対応表ではフィルムとチェーンが対応付けられた。この結果をもとに、例えば「スプロケットを用いることでフィルムをうまく制御することができる」という仮説知識が得られる。

#### (2) 構造的類似度は高いが, 対象類似度が低い例

設計課題(2)を入力した場合の結果において、構造的類似度は高いが、対象類似度が低い対応表が得られた。そのような対応表が得られた知識のひとつを図5に示す。

```
<if>上部ケーシングにエプロン部を設け、
油が合わせ面に直接付着するのを防ぐ
<then>ケーシングに油を密封することができる
<視点>油{State}
```

図5 知識2

この知識との対応表では、気体と油が対応付けられた。しかしながら、油が液体であることに視点が当てられているので、そ

の対象類似度は低い。この結果をもとに、例えば「容器にエプロン部を設け、気体が合わせ面に直接触れるのを防ぐと、気体を容器に密封することができる」という仮説的知識が得られる。

しかしながら、この仮説的知識において容器にエプロン部を設けても気体が合わせ面に触れてしまうので、気体を密封することができない。したがって、この仮説的知識の妥当性が高いとは言いがたい。

## 7. 考察

本実験では生成された対応表に対して、構造的類似度および対象類似度という二種類の類似度を算出した。

前章で紹介したように、対応表の構造的類似度, 対象類似度がともに高い場合、対象の入れ替えという単純な操作を行うだけで実用的な仮説的知識を得ることができた。

一方、対応表の構造的類似度は高いが対象類似度が低い場合、単純に対象の入れ替えを行って得た仮説的知識は妥当性に欠けるものが多かった。

また紹介していないが、構造的類似度は低いが、対象類似度が高い対応表も得られた。この対応表をもとに、単純に対象の入れ替えを行うことで得られる仮説的知識には、妥当性は高いが設計課題への適用がしづらいものが多かった。

これらのことから、構造的類似度が仮説的知識の適用性に大きく関わり、対象類似度が仮説的知識の妥当性と大きく関わっていることが考えられる。

## 8. まとめ

本稿では Universal Abduction Studio において仮説的知識を生成するための知識表現および知識マッチングの手法を提案した。本手法は柔軟で有効なアナロジーを実現するために複数のオントロジーを利用し、さらに構造的類似度や対象類似度など複数の類似度を評価し利用している。そして本手法を実装し、実験によって可能性を示した。また設計における各々の類似度の役割について示唆した。

今後もこの概念をより明確化するとともに継続的なシステム構築を行う予定である。

## 参考文献

- [武田 2003] 武田英明ら: 設計における創造性支援環境「ユニバーサル・アブダクション・スタジオ」の提案, 人工知能学会全国大会(第17回)論文集, 2003, (CDROM).
- [Holyoak 1995] Holyoak, K. J. & Thagard, R.: MENTAL LEAPS Analogy in Creative Thought, The MIT Press, 1995.
- [鈴木 1996] 鈴木宏昭: 類似と思考, 共立出版, 1996.
- [村上 1992] 村上陽一郎: アナロジーと知識活動, 数理科学, No.343, pp.5-9, 1992.
- [JSAI 2002] 特集「類似性に基づく推論」, 人工知能学会誌 Vol.17, No.1, 2002.
- [Fillmore 1968] Fillmore, C. J.: The Case for Case, *Universals in Linguistic Theory*, pp. 1-88, 1968.
- [Yokoi 1995] Yokoi, T.: The EDR electronic dictionary, *Communications of the ACM*, 38(11), pp.42-44, 1995.
- [Beckett 2004] Beckett, D. ed.: RDF/XML Syntax Specification (Revised), <http://www.w3.org/TR/rdf-syntax-grammar/>, 2004.
- [川島 2003] 川島貴広ら: 言葉の意味に関する類似性判別能力における概念ベースとシソーラスとの性能比較, 情報処理学会第65回全国大会, 2M-1, 2003.
- [渡辺 1988] 渡辺秀則: 続・機械設計心得ノートーベテラン設計者のノウハウ集一, 日刊工業新聞社, 1988.