決定関係の導入による概念設計知識の表現と獲得†

川上 浩司*・片井 修**・榎木 哲夫**
小西 忠孝*・岩井 壮介***

Knowledge Representation and Acquisition for Conceptual Design by Determination Relations

Hiroshi KAWAKAMI*, Osamu KATAI**, Testuo SAWARAGI**,
Tadataka KONISHI* and Sosuke IWAI***

This paper proposes methods of knowledge representation and acquisition for conceptual design of physical systems by introducing the notion of determination rules. From Value Engineering perspectives, physical systems are interpreted by their functions, structural attributes, and the means-ends relations relating with them, i.e., functional compositions, physical causal laws, and structural compositions. These knowledge are used as the initial domain theories of EBG (Explanation-Based Generalization), then they are refined through compilation. Through examining the fundamental structures of determination rules they are then introduced to the domain theory of EBG. They reflect relations among functions structures and their causes/effects by which various types of empirical design knowledge can be represented. Using determination rules as the domain theory of EBG, they are once instantiated for an exemplar object, and then generalized by identity elimination. Through these processes, they are reformed into efficient and rationalized design knowledge utilizable for systematic design processes. This method is implemented to a system in a logic programming environment.

Key Words: EBG, VE, determination rule, knowledge acquisition, CAD

1. はじめに

物理設計物の概念設計レベルを対象とした設計知識の表現法およびその獲得手法を提案する。まず、VE(価値工学: Value Engineering)¹⁾の視点から設計行為を捉えることによって、設計物の表現に必要な知識を機能・物理法則・構造それぞれに関する知識から組織化するとともに、厳密なルールよりもコーディングが容易である**決定関係**を導入した設計知識表現について検討を行う。決定関係の論理的表現である**決定則**^{2), 3)}を導入し、決定則のもつ情報構造を対象分割の概念を用いて明らかにする。さらに、これらの知識を獲得するために、EBG

(Explanation-Based Generalization)法⁴⁾の領域知識にメタ知識として、決定則を導入した方法を考える。その結果、決定則が事例記述に呼応して特殊化され、合理性・効果性の付与された設計知識が獲得される。

2. 物理設計物を表現する設計知識

2.1 概念設計のための設計物表現

新たなアイデアの付加、根本的な改良および新規設計などは、たとえ結果が表面的には材質・形状などの構造的な変更や付加という形で現れるとしても、背後にある機能に注目した情報処理によって実現される。

このような機能に注目した処理は設計プロセス上は**概念設計**と呼ばれ、基本設計・詳細設計などの下流工程において具現化される設計案を生成する重要な部分である。

設計の下流工程においては設計パラメータ最適化の種々の手法が提案され、計算機支援が実現されているが、より大きな効果が期待される概念設計レベルについては、系統的な方法はいまだ確立されていない。

VEの分野では、機能に注目した設計事例の解析および改善案導出をシステムティックに行う**機能分析法**

† 第17回知能システムシンポジウムで発表(1993・3)

* 岡山大学工学部 岡山市津島中3-1-1

** 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

*** 名城大学理工学部 名古屋市天白区塩釜口1-501

* Faculty of Engineering, Okayama University, Okayama

** Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto

*** Faculty of Science and Technology, Meijo University, Nagoya

(Received September 20, 1993)

(Revised March 24, 1994)

(Functional Analysis)が実践されている¹⁾。これは、分析対象物の目標(基本機能達成)にどのような手段(副機能)が用いられているか(機能構成)、それら機能がどの部分により実現されているか(機能と構造の結びつき)を機能系統図と呼ばれるダイアグラムで表現し、これに基づいて新機能追加、製造コスト低減などの設計改善を検討する手法である。

これによると、設計物は「基本機能(目標:G)を達成する手段として一連の副機能(F)が選択され、これらの機能を達成する手段として選択された構造属性(S)をもつ実体」であると解釈することができる。

これらの機能と構造を関係づけるためには、ある機能とそれを達成する構造条件とを媒介し、機能の追加や変更とそれに伴う構造的追加や変更とを対応させる知識を設定する必要がある。物理法則や物理現象に支配された構造物を作る機械設計を対象とする場合、これらを媒介する知識として物理因果法則が重要なものと考えられる。

以上の考察から、設計物を、機能・構造属性を表わすラベルと、目標-手段の組という統一的な形式をもつ、つぎの三つの知識によって表現する。すなわち、機能とそれを達成する副機能に関する知識(Fig. 1(a))、機能とそれを達成する構造属性を媒介する物理因果法則(Fig. 1(b))、およびある構造属性とそれを実現するほかの構造属性に関する知識(Fig. 1(c))である。

一般に、目標とする機能を実現する構造は一通りでない。したがって、ここで提案した知識表現も、目標達成のための一つの十分条件を表わすものとなる。設計物は、これらの知識を用いて Fig. 1 に示すように基本機能を頂点とし、表層的な構造上の属性を末端とした木構造で表現することができる。

この設計物表現において、物理因果法則は連鎖を形成している。これを物理因果連鎖と呼ぶ。一般に、目的に対する手段の選択が数理・物理的に合理的であることを因果合理性と呼ぶ⁵⁾。物理因果連鎖は、目標機能達成に対する手段として、Fig. 1 で表現された設計物が因果合理

性をもつことを裏付けるものである。

2.2 決定則の導入

上述の設計知識は、普遍的関係を表わす含意則として表現され、論理プログラミング環境下で操作することが可能である。ところが一般に、対象領域の知識の中で、含意則の形で厳密にコーディングすることができるのは一部に過ぎない。したがって、含意則よりも広範囲の対象領域知識を表現し利用することが可能な知識表現形式を導入する必要がある。そのような表現形式として、本研究では Russell らによる決定則について検討する。

彼らは、正当化される(妥当な)類推を可能にするための知識表現として決定則を提案している^{2),3)}。類推は、ソース事例 so において命題 p と q が成立するとき、(類似した)ターゲット事例 ta でも p が成立していれば、やはり q も成立することを結論とする。 p は、 so と ta の類似性を表わすものであり、類似性に基づく学習における推論結果のもっともらしさ(plausibility)の根拠となる。しかし、いかに類似点 p が多くて類推結果がもっともらしくても、論理的に正当であるとは限らない。

この類推プロセスの正当化を単一事例の一般化(SIG: Single Instance Generalization)の正当化問題に帰着させると、つぎに示す決定則が導入される。すなわち、事例のもつ性質(述語) $p_1, p_2, \dots, p_n$ が性質(述語) q を決定する関係(p_i 's determine q)を以下のように表わし、

$$\bigwedge_{i=1}^n p_i(x, y_i) > q(x, z)$$

つぎの条件の成立として定義する。

$$\begin{aligned} & \forall y_1 \forall y_2 \dots \forall y_n \forall z [(\exists a) \{ \bigwedge_{i=1}^n p_i(a, y_i) \wedge q(a, z) \} \\ & \rightarrow \{ (\forall x) (\bigwedge_{i=1}^n p_i(x, y_i) \rightarrow q(x, z)) \}] \end{aligned}$$

x は $p_1, p_2, \dots, p_n, q$ に共通に含まれる変数であり、対象(事例)を表わす。また、 p_i (あるいは q) だけに含まれる変数 $y_i(z)$ は属性 $p_i(q)$ の属性値を表わす^(注1)。

「構造と材質によって弾性が決まる」という決定関係を表現する決定則 $construction(x, y_1) \wedge material(x, y_2) > elasticity(x, z)$ によると、ある要素 a が $construction(a, 螺旋), material(a, 鋼鉄), elasticity(a, 大)$ という性質をもつことがわかれば、同じ構造(螺旋)と材質(鋼鉄)をもつ任意の要素も同じ弾性性質(大)をもつことが保証される。

通常、属性値 y_i の値(有限個と仮定) $b_{i1}, b_{i2}, \dots$ は互いに排他的であり、対象(事例)の全体 $\{a\}$ の上に分割(atom) $p_{ij} = \{x : p_i(x, b_{ij}) \text{ が成立}\}$ を導く。Fig. 2 に示すように、上記決定則は、性質 $p_1, p_2, \dots, p_n$ から導かれる

Fig. 1 Multilayered design knowledge

Fig. 2 Interpretation of determination rule

(生成される)分割(図中の矩形)が q から導かれる分割よりも細かいことを意味している。対象の分割は、述語のもたらし情報を意味しており⁹⁾、したがって決定則は $p_1, p_2, \dots, p_n$ の観測から得られる情報量のほうが q の観測からのものより大であるという、(個々の観測とは独立な)メタ知識を表わしている。

2.3 設計知識の決定則による表現

決定則は、含意則として表現することは困難であるが決定関係として捉えることができる対象領域知識を、論理プログラミング環境の下で取り扱うことを可能にする知識表現形式である。設計知識を決定則によって表現する場合、Fig. 1 の設計物表現から考えると、決定則における被決定項目(q)は機能または構造属性を表わす一つの述語、決定要因(p)は同じく述語 p_i の連言($\wedge p_i$)から構成され、決定則はそれらの間の関連を表現することになる。代表的なものとして、以下の三つが考えられる。

(1) 詳細な分析(説明)を省略する経験則 電流を伝える機能をもつ構造を考える場合、設計者はまず材質に注目する。また、部品を支持するという機能をもたせるためには、十分な剛性があることならびに支持する部品との結合方式に注目する。これは、設計者が経験から蓄積している、「どのような構造属性が目的機能達成の成否を決定するか」という決定関係と考えられる。この決定関係は、物理因果連鎖による詳細な説明に代わって機能と構造を連関させる経験的知識である。

また、注目する構造に弾性性質をもたせることを考えたとき、われわれはまず材質と構造に注目する。このような構造属性間の経験的な知識も、「弾性性質は材質と構造で決定する」という決定関係で捉えることができる。

(2) 多くの含意則を生成するメタ知識 多くの含意則を明示的にあらかじめ書きつくすことを避け、事例記述から複数の含意則を生成するためのメタ知識には、決

定関係で捉えることができるものがある。

物理設計物の要素や機構に関するデータ・情報は、従来から十分な整理が行われており、設計活動において利用価値が高い。これらは、機能・材質・形状などがカタログ形式で記述されており、これを推論に用いるためには、カタログ項目間の関連性を与える知識が必要である。そのような関連性の一つに決定関係がある。

(3) 複数事例間の類推を可能にする知識 過去に行った設計事例などの参照は設計における強力な手法である。このとき、論理的に正当(妥当)な類推を行わせるために、過去の事例のどの機能・構造の参照が必要であるかを示す知識は決定則として表現される。

3. 設計知識の獲得

3.1 説明に基づく知識獲得

設計知識は、一つの目的とそれを達成するための十分条件としての手段の組で表現すると、ホーン節論理で操作可能になる。そのため、知識獲得のツールとしてEBG(Explanation-Based Generalization)⁴⁾を導入することができる。

EBGは、解析対象事例(Training Example)が目標概念(Goal Concept)の正事例であることを領域知識(Domain Theory)を用いて説明し、その説明の履歴(説明木)を生成する。説明木生成時に事例記述によって特殊化された領域知識の各変数は、説明木内で拘束関係を維持したまま再び変数化され、同一の解釈が成り立つほかの事例をも包含するように一般化される。この説明木から、獲得したい知識がもつ性質を表わす規範(操作性規範: Operability Criterion)を満たす表現が選ばれ、新たな知識として獲得される。

われわれは、すでにEBGを用いた設計知識獲得手法を提案した⁷⁾。この手法は、EBGの目標概念(G)として解析対象事例の基本機能、解析対象事例記述(Ta)として事例の表層的な構造が入力されると、領域知識(D)として基本プラン・機能・物理因果法則・構造属性に関する知識

(注1) 一般には x, y, z はそれぞれ変数集合を表わすが、ここでは簡単のため単一変数としている。

Fig. 3 Two aspects on acquired knowledge

を用いて説明木を生成する。説明木は、基本機能の達成を機能構成および機能と構造の結び付きで表現するものであり、VEにおける機能系統図とみなすことができる。この機能系統図から、解析対象に依存しない一般的な設計知識が自動的に獲得される。

EBGによって獲得された知識は、領域知識を演繹的に組み合わせ特殊化した結果という側面と、単一事例を一般化(SIG)した結果という側面をもつ。前者に関しては、演繹推論によって導くことができる知識をわざわざ知識ベースに加えることの冗長性から、知識探索効率の低下が問題となる。したがって、多くの演繹可能な知識の中から、探索効率を低下させてまで生成しておくべき価値のある知識を限定するためのガイドが必要となる。後者に関しては、一般にはその論理的な正当性(妥当性)が保証されないことが問題となる。SIGによって生成された知識に正当性を与える一つの方法として、健全な推論を行わせるような背景知識を与えることが考えられる。EBG手法はこれらの問題を相補的に解決しているといえる。すなわち、演繹推論による知識生成はFig. 3に示すように実在する事例の記述にガイドされるとともに、そのSIGは領域知識によって正当化されている。

3.2 EBGへの決定則の導入

決定則をEBGの領域知識として利用することを考える。3.1節で示した視点からEBGを捉えたと、EBGの領域知識にはつぎの二つの性質が求められる。

性質 1 SIGを正当化する

性質 2 事例記述を加えて設計知識となる

決定則は、どのような対象知識に対していかなるSIGを行うことが正当化されるか、換言すればSIGにおいて一般化することができる p と q の関係の明示的な表現である。すなわち、決定則は領域知識に求められる性質1を満たす。

また、決定則は領域知識に求められる性質2を満たすことも知られている²⁾。 $p \rightarrow (p \text{ implies } q)$ ならば $p > q (p \text{ determines } q)$ であるが、逆は成立しない。すなわち、含意則($p \rightarrow q$)は決定関係($p > q$)の特殊な場合として考えることができ、決定関係を事例情報で特殊化することで含意則を獲得することができる。

3.3 決定則による知識獲得のアルゴリズム

EBGと決定則からの知識獲得は、いずれも単一事例記述を一般化するという側面をもつ。一般化を正当化する背景知識は、前者では含意則であるのに対して、後者では決定則という弱い規則である。このため、決定則からの知識獲得はEBGの一般化規則を用いることはできず、決定則の定義から導かれるように、「 $p_1, p_2, \dots, p_n$ と q に共通に含まれる変数だけが一般化される」ことになる。

本研究では、従来提案されているEBGエンジン⁸⁾を拡張し、説明木生成、標準的な事例一般化、ならびに上述の規則に従う一般化を行う推論エンジンを、prolog (SICStus-prolog)を用いて構築した。また、説明木生成過程を視覚化し、生成途中での証明済みの部分木からの知識獲得、ならびに生成された説明木の任意の部分木からの知識獲得を操作者対話的に行うことが可能なGUIを作成し、これと上述の推論エンジンとをUNIXのプロセス間通信によって結び付けた実験システムを、ワークステーション上に構築している。

以下に、含意則で記述された領域知識とターゲット事例記述では説明できない命題 q が説明木に現れたために、ターゲット事例の説明が中断した場合に、決定則を用いるときの推論エンジンの動作を示す。

1. 利用可能な決定則($p(X, Y) > q(X, Z)$)を探す^(注2)。
2. 決定則の p と q のおのおのを領域知識ならびに事例記述を用いて証明する。このとき、決定則は事例記述に特化される($p(x, y) > q(x, z)$)。
3. これを、先に示した決定則の一般化規則に従って一般化し、新たな領域知識($p(X, y) \rightarrow q(X, z)$)として登録する。
4. この領域知識を用いて、いったん中断されていたターゲット事例の説明を再開する。

3.4 決定則の利用形態

説明木生成に決定則 $p > q$ を利用する形態について考察する。標準的なEBGにおける説明木は、目標概念を表わす述語 G を頂点として、領域知識 D に含まれる含意

(注2) 以降、prologの表記法に合わせて大文字で表わす引数変数は変数、小文字は個体定数を表わす。

則を用いてその十分条件を探索し、 D および解析対象事例(ターゲット事例: ta)を記述した述語 Ta とマッチして終端する。すなわち、 D, Ta を用いた G の証明の履歴が説明木であるといえる。

この証明に決定則 $p > q$ を用いる場合、標準的な EBG との違いは、 q に対する陽な証明が必要なこと、および D, Ta だけでなく参考事例(ソース事例: so)を記述した述語 So も証明に利用可能であること、の2点である。ここで、決定則を説明木生成に利用する形態を、 q の証明方法によって分類する。 q の証明に利用することができる D, Ta, So および G の四つを組み合わせると Fig. 4 に示すように $(2^4 - 1) = 15$ 通りの証明方法が考えられる。

説明木中の任意のノードは G の十分条件の一つである。したがって、ノード q の証明に G を用いることができるのは $G \leftrightarrow q$ の場合に限られることになり、15 の組合せのうち G を含む 8 通りは一つに集約される。これを以下では形態 a と呼ぶ。

また、 D と Ta (またはその片方) から q が証明可能な場合(形態 b と呼ぶ)、標準的な EBG で説明木が生成されることになり、 So を利用する必要はない。したがって、 Ta と So がともに含まれる組合せ、すなわち形態 a に分類された証明方法の内の二つと、残りの七つの証明方法の内の二つ (Fig. 4 に斜線で示す) は排除される。

15 通りの組合せの中で形態 a, b に分類された残りの二つは、 D と参考事例記述 So (または So だけ) から q が証明される場合である。これを形態 c と呼ぶ。以下に、三つの決定則利用形態 a, b, c それぞれの内容を示す。

[形態 a] $G \leftrightarrow q$ が導かれる場合 (Fig. 5(a))

$G \leftrightarrow q$ となると、 $p > q$ を用いて説明木を生成可能であることが知られている²⁾。この形態での決定則の利用方法をつぎに示す。 $g, q_n, p_n (n=1, 2)$ を述語、 A は変数、 ta, so はそれぞれターゲット事例とソース事例を表わす。

目標概念(G) $g(A) \leftrightarrow p_1(A) \vee q_1(A)$
 領域知識(D) $p_2(A) > q_1(A), \dots$
 操作性規範 p_1, p_2 に限り操作的である
 事例記述(Ta) $\neg p_1(ta), p_2(ta), \dots$

Fig. 4 Various types of q 's proof

説明木は $g(ta)$ の証明履歴として生成される。 $g(ta)$ に対する p_1 による証明が失敗するとバックトラックし $g(ta) \leftrightarrow q_1(ta)$ となる。 ta は g の正事例であるから $g(ta)$ は真であり、決定則の右边が証明されることになる。ここで、変数 A に ta が代入されたので、決定則の左边は $p_2(ta)$ となり、事例記述とマッチして証明される。特化された q_1, p_2 に対し先に示した一般化規則を適用して含意則が得られるとともに、これを利用して生成された説明木から目標概念に対する操作性規範を満たした記述 $p_2(A) \rightarrow g(A)$ が得られる。

[形態 b] D と Ta (またはその片方) から q が証明可能な場合 (Fig. 5(b))

この場合、 D と Ta (またはその片方) から $g(ta)$ に対する説明木が生成されることとなり、決定則を用いて別の説明木を生成する必要はない。ただし、つぎの場合(形態 b') に限り決定則の利用が意味をもつ。

[形態 b'] Ta の中に q が含まれる場合 (Fig. 5(b'))

Ta に操作性規範を満たさない記述が含まれることを許し、 D と Ta から p が証明可能ならば、 $p > q$ を用いて操作性規範を満たす記述を得ることができる。

目標概念(G) $g(A) \leftrightarrow q_1(A)$
 領域知識(D) $q_2(A) \rightarrow q_1(A),$
 $p_1(A) > q_1(A), \dots$
 操作性規範 p_1 に限り操作的である
 事例記述(Ta) $q_2(ta), p_1(ta), \dots$

この場合、一つめの領域知識を用いた $g(ta)$ の証明履歴(標準的な説明木)から得られるのは $q_2(A) \rightarrow g(A)$ であり、これは操作性規範を満たさない。ここで、決定則の右边 (q_1) は証明済であり、変数 A に ta が代入されている。したがって、決定則の左边は $p_1(ta)$ となり、これが事例記述によって証明されると、形態 a と同様に $p_1(A) \rightarrow q_1(A)$ が得られる。これを用いて、目標概念に対する操

Fig. 5 Three usage types of determination rules

作性規範を満たした記述 $p_1(A) \rightarrow g(A)$ が得られる。

【形態 c】 D と So (または So だけ) から q が証明可能な場合 (Fig. 5(c))

この場合をつぎに示す。

目標概念 (G) $g(A) \rightarrow q_1(A)$
 領域知識 (D) $p_1(A) > q_1(A), \dots$
 操作性規範 p_1 に限り操作的である
 事例記述 $p_1(ta), q_1(so), p_1(so), \dots$

この場合、決定則は So の記述によって証明され、特化される。以下形態 a, b' と同様に、決定則から得られた $p_1(A) \rightarrow q_1(A)$ を用いて、目標概念に対する操作性規範を満たした記述 $p_1(A) \rightarrow g(A)$ が得られる。

【形態 c'】 q の証明に複数の参考事例 ($So, So', \dots$) が必要な場合 (Fig. 5(c'))

単一の参考事例 So だけでは証明できない場合、Fig. 5(c') に示すように、 q に対する So と D による証明の中に決定則 $p' > q'$ が使われ、 q' に対して別の参考事例 So' と D による証明が試みられる^(注3)。この形態は決定則を再帰的に用いるものであり、形態 b' によって終端する。形態 c は c' の再帰が一段で終端した特別な場合であると捉えることができる。

なお、上記の形態 a, b' の説明において、簡単のために決定則の左辺は Ta と直接マッチすると仮定しているが、一般にはその限りではない。すなわち、形態 a における $p_2(ta)$ および形態 b' における $p_1(ta)$ は節集合 $\{Ta, D\}$ によって証明されれば良く、さらに、その証明の中で決定則を用いることも可能である。同様に、形態 c における p_1 は $\{So, D\}$ によって、形態 c' における p' は $\{So', D\}$ によって証明されれば良い。

4. 物理設計物からの知識獲得

4.1 形態(c)による構造属性間の決定関係の利用

Fig. 6(a) に示す簡単な計測器 (バネばかり) を考える。あらかじめ与えられた計測に対するゴールコンセプトは、Table 1 中 G に示すように、機能の組合せとして定義されている。その表層的な構造特徴による記述を獲得することを考える。Table 1 において変数 X, Y, Z は (部品などの) 構造素、 P, Q, R はそれらのもつ構造属性または物理量を表わす。

領域知識 (Table 1 中 D) には、機能と構造属性を連関させる五つの含意則、二つの決定則、ならびに構造属性の継承に関する二つの含意則などが含まれている。解析対象 (ターゲット) 事例 Ta の基本機能 (G) は $objMa$ の質量を $obj3a$ の位置変化として計測することである。すなわち、説明木は $measure(objMa, mass, obj3a, displacement)$ を G, D, Ta ならびに So を用いて証明

する履歴として生成される。

(1) 式は、説明木中のノード $elasticity(obj2a, W)$ が、 Ta および D では説明できなくなったときに形態 (c) で用いられる。システムは、Fig. 7 に示すように、機械要素の規格表⁹⁾ などから得られる参考事例記述 (So) と、構造的に一般的に成立する規則 (D) によって決定則の変数 X, P_1, P_2, Q をいったん特殊化する。そののち、決定則の一般化規則に従って参考にした事例の名前 (jis_g_3512) を変数 X に戻し、つぎの知識を生成する。

$material(X, steel) \wedge construction(X, spiral) \rightarrow$
 $elasticity(X, high)$

これは、2.2 節で述べた、螺旋構造をした鋼鉄部品は一般に弾性をもつとの知識を表わしている。この決定則を用いなければ、全ての弾性体に対してのおおの弾性を有する要因を人間が判断し、領域知識ベースに記載しなければならない。この含意則を D に加えて説明木の生成が再開される。

4.2 形態(a)による構造属性間の決定関係の利用

Fig. 6(a) における $obj2a$ が、力を位置的变化に変える働き (機能) 達成のための部品であることが明らかな場合を考える。Table 2 に示すように、このときのゴールコンセプトの定義は、固定されていないかもしくは弾性が高いときにそのような機能があると与えられている。Table 1 に示す D, Ta を用いて $transmit(obj2a, normal_stress, obj2a, displacement)$ の証明を行うと、 $obj2a$ は $obj4a$ に固定されているにもかかわらずゴールコンセプトを満たしていることから、弾性が高いことが保証され、形態 (a) の形で (1) 式が活用される。

4.3 形態(c)による構造-機能間の決定関係の利用

Fig. 6(b) に示す流速測定器を考える。これは、測定対象の流速に関連した撓 (たわ) めを棒状の弾性体が発生させ、これにより表面に発生する歪みを歪みゲージで電気

Fig. 6 Examples of target instance

(注3) 偶発的に So' として Ta が用いられ、 Ta と D で q' が証明される場合を考えることができる。これは、 q の証明に D, So, Ta が用いられる特別な形態に分類される。

Table 1 An example problem for knowledge acquisition style(a)

G :	$measure(X, P, Z, R) \leftrightarrow detect(X, P, Y, Q) \wedge transmit(Y, Q, Z, R) \wedge transduce(Z, R).$	
D :	$hang(X, Y) \rightarrow detect(X, mass, Y, normal_stress).$	
	$phase(X, solid), located_in(Y, X) \rightarrow detect(X, mass_flow, Y, normal_stress).$	
	$connect(Y, Z) \rightarrow transmit(Y, Q, Z, R).$	
	$elasticity(Y, high) \rightarrow transmit(Y, normal_stress, Y, displacement).$	
	$is_a(Z, indicator) \rightarrow transduce(Z, displacement).$	
	$construction(X, P) \wedge material(X, P_2) > elasticity(X, Q).$	(1)
	$is_a(X, P) > transduce(X, Q_1, X, Q_2).$	(2)
	$is_a(X, Y) \wedge elasticity(Y, P) \rightarrow elasticity(X, P).$	
	$is_a(X, Y) \wedge material(Y, P) \rightarrow material(X, P).$	
	$elasticity(spring, high). is_a('SWB', steel). \dots$	
Ta :	$hang(objMa, obj1a) \wedge connect(obj1a, obj2a) \wedge connect(obj2a, obj3a) \wedge fixed(obj2a, obj4a) \wedge$ $material(obj1a, steel) \wedge material(obj2a, steel) \wedge$ $construction(obj1a, hook) \wedge construction(obj2a, spiral) \wedge is_a(obj3a, indicator) \wedge \dots$	
So :	$is_a(jis_g_3512, spring) \wedge material(jis_g_3512, 'SWB') \wedge construction(jis_g_3512, spiral) \wedge \dots$	
Operationality Criterion :		
Ta , ならびに So に見られるような表層的な構造的特徴による記述を操作的であるとする

Fig. 7 An example of utilizing determination rules

Table 2 A definition of goal concept "transmit"

G :	$transmit(Y, normal_stress, Y, displacement) \leftrightarrow \neg fixed(Y, _) \vee elasticity(Y, high).$
-------	--

Table 3 An example problem for knowledge acquisition style(b)

G :	$measure(X, P, Z, R) \leftrightarrow detect(X, P, Y, Q) \wedge transmit(Y, Q, Z, R) \wedge transduce(Z, R, W, S).$
Ta :	$phase(objMb, solid) \wedge located_in(objld, objMb) \wedge connect(obj1b, obj2b) \wedge connect(obj2b, obj3b) \wedge$ $is_a(obj3b, strain_gauge) \wedge \dots$
So :	$is_a(transducer1, strain_gauge) \wedge transduce(transducer1, strain, change_in_resistance) \wedge$ $is_a(transducer2, voltmeter) \wedge transduce(transducer2, voltage, displacement) \wedge \dots$

抵抗変化に変換するものである。先に示した例と同じく、機能の形で定義されているゴールコンセプトを表層的な構造特徴記述に変換する場合を考える。 G , Ta , So は Table 3 のように与えられている。 D と操作性規範は Table 1 に示したものである。事例の基本機能は $objMb$ の速度を $obj3b$ の電気抵抗変化として測定することであり、 $measure(objMb, velocity, obj3b, change_in_resistance)$ の証明履歴として説明木が生成される。

(2) 式の右辺は、構造物 X のもつ物理量 Q_1 を物理量 Q_2 に変換する機能を構造物 X がもつことを表わす述語、左辺は、構造物 X がデバイス P であることを表わす

述語とする。この場合、決定則は「変換機能を達成することはどのようなデバイスであるかで決まる」ことを表わしている。

これは、第2章で述べたように、物理因果連鎖による詳細な説明に代わって機能と構造を連関させる経験的知識を表わしていると考えられる。

(2) 式を含意則に読み代えると、任意のデバイスは任意の物理量変換機能をもつことになり、明らかに過度の一般化となる。(2) 式は、説明木のノード $transduce(obj3b, strain, change_in_resistance)$ が、 Ta および D では証明できなくなったときに形態 (c)

で用いられる。システムは、決定則を *So* に記述されたモジュール化された変換デバイスのリストにいったん特殊化したのち、*transducer 1* を変数に戻して、

is_a(A, strain-gauge) →

transduce(A, strain, A, change_in_resistance)

を獲得し、これを利用して説明木が完成される。

4.4 形態(b')による構造-機能間の決定関係の利用

Fig. 6(b)の *Ta* において *obj3b* が歪みを電気抵抗変化に変換するデバイスであることが明示的に記述されている場合、すなわち、Table 3 の *Ta* に *transduce(obj3b, strain, obj3b, change_in_resistance)* が含まれているとき、決定則は形態(b')の形で使われる。すなわち、ほかの事例やデバイスカタログ *So* を参照することなく決定則を用いることができる。

5. 設計支援知識の評価

決定則を事例情報により特化する形で設計知識を獲得した。これを以後“決定則からの知識”と呼ぶ。決定則からの知識およびあらかじめ含意則として与えられた領域知識から、説明木が生成・一般化される。一般化された説明木の任意の部分木を抽出すると、部分木の末端にある機能・構造の連言が、部分木の根にあたる機能・構造に対する十分条件となっている。これを“説明木からの知識”と呼ぶ。

ここで、獲得された知識(決定則からの知識および説明木からの知識)と、あらかじめ与えられていた知識(初期領域知識および決定則)を、知識利用の合理性、設計プロセス進展の効果性の二つの視点⁷⁾から評価する。

5.1 知識の合理性

目標とする機能を達成する十分条件としての構造(設計解)を、獲得した設計知識を組み合わせる形で生成するプロセスを考える。この場合、設計知識の組合せを変えることによっていくつもの設計解を得ることができるが、それらが全て物理的に実現可能であるとは限らない。この実現可能な設計解を導くことが裏付けられていることを、知識の合理性と呼ぶ。

初期領域知識は、どのような対象の説明にも用いることができるように、一般的に与えられなければならない。したがって、初期領域知識を任意に組み合わせた知識は、必ずしも設計に有効な知識である保証はない。

これに対し、2.1 節に示したように、説明木で表現された解析対象事例が目標機能達成の一つの手段であることの因果合理性は、物理因果連鎖によって裏付けられている。したがって、説明木の部分木を構成するいくつかの知識も、その組み合わせ方の因果合理性が裏付けられている。すなわち、初期領域知識の任意の組合せの中から、

合理性の高いものが実在事例によって選び出されたものが説明木からの知識であるといえる。

逆に、これらの知識を利用することができる自由度を考えると、説明木からの知識は、解析対象事例にガイドされたかたちで、領域知識をいくつか組み合わせたものであるため、解析対象事例に類似の設計に適用範囲が限定される。

決定則は、4.3 節で述べたように、含意則として演繹推論に用いることはできない。また、決定則はある種過去の経験によって得られたバイアスのメタ知識であり、初期領域知識のような物理法則に基づいた理論的な記述ではない。したがって、合理性は保証されないが、多くの設計局面に適用を試みることができる。

決定則からの知識は、実在事例に用いられている含意則であるという点で、説明木からの知識と同等である。すなわち、決定関係という本来合理性をもっていない経験的な知識は、本研究で提案した手法によって、合理性の保証された知識に変換される。

Fig. 8 の横軸は以上の関係を示したものである。

5.2 知識の効果性

設計プロセスを、“目的とする基本機能が与えられると、それを詳細な副機能列に展開し、つぎにおおの副機能を達成することのできる構造属性をもつ物理的実体を生成するプロセス”であると捉えると、設計知識はこの設計プロセスを進展させる度合、すなわち設計知識の効果性で評価することができる。

説明木から得られた知識は、いくつもの初期領域知識をチャンク化した知識であるため、その効果性は、概略チャンク化される部分木の大きさと対応する。もちろん、プロセスを進展させる度合は、チャンクされる前の個々の初期領域知識より小さくなることはない。また、部分木の大きさは任意に選択可能であるため、進展の度合の大きな知識から小さな知識まで、獲得することができる。

経験則的な側面をもつ決定則は、詳細な分析を省略し一気にプロセスを進展させるメタ知識を含む。したがって、初期領域知識と比べると、要求機能からそれを実現する構造を発見するプロセスを進める度合が大きい(効

Fig. 8 Assessments of design knowledge

果的である)反面,組合せの自由度が小さくなり,新奇な設計解を得る可能性が小さい,すなわち,新奇なアイデアを導入する余地の少ない**固定的な側面**をもつ知識が多い。

決定則からの知識は,効果性に関しては元の決定則と等しくなる。決定則からの知識を用いた部分を含む形で部分木を抜きだした場合,すなわち決定則と含意則をとともに利用して獲得された知識は,部分木を構成するために用いられた個々の知識よりも効果性は高くなる。

Fig. 8の縦軸によって以上の関係を示す。

6. ま と め

本研究では,目標-手段の連鎖的選択行為の結果として設計物を捉え,その選択肢を与える設計知識として,含意則と決定則を提案した。これらの知識をEBGの領域知識として用いることにより,新たな設計知識を獲得する方法を提案し,計算機上にシステムを実装し,検討を行った。

一般に知識獲得手法は,獲得された知識があらかじめ与えられた知識に比して,知識の利用者のパフォーマンスをどのように向上させるかで評価される¹⁰⁾。

本研究では,それぞれの知識には,合理性と利用範囲の大きさとトレードオフ,および効果性と新奇性とのトレードオフがあることを明らかにした。何れに重点をおくかは,知識利用者の目的や,進行する設計フェイズに依存して判断されるべきものであり,この判断支援を含め,獲得知識の効果的活用は今後の検討課題である。

末筆ながら,実験システムのコーディングと動作確認に御協力いただいた三洋電機(株)近藤文剛氏に心より御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 玉井正寿: 価値分析, 現代経営工学全書, 森北出版(1978)
- 2) S. J. Russell: Analogy and Single Instance Generalization, Int. Workshop on Machine Learning, 390/397(1987)
- 3) T. R. Davies and S. J. Russell: A Logical Approach to Reasoning by Analogy, Proc. of 9th IJCAI, 264/270(1987)
- 4) T. M. Mitchell, R. M. Keller and S. T. Kedar-Cabelli: Explanation-Based Generalization: An Unifying View, Machine Learning, 1, 47/80(1986)
- 5) 渡辺大助: VE理論の研究-設計学的アプローチ, 第17回VE全国大会 VE研究論文集, 117/124(1984)
- 6) 本橋信義: 現代論理学入門-情報から論理へ-, 岩波書店(1989)
- 7) 片井, 川上, 樫木, 岩井, 小西: 説明に基づく学習手法を用いた事例からの操作的設計知識獲得, 計測自動制御学会論文集, 26-8, 916/923(1990)
- 8) S. T. Kedar-Cabelli and L. T. McCarty: Explanation-

Based Generalization as Resolution Theorem Proving, Proc. of 4th Int. Workshop on Machine Learning, 383/389(1987)

- 9) 日本規格協会: JISハンドブック機械要素(1984)
- 10) R. M. Keller: Defining Operationality for Explanation-Based Learning, Proc. of AAAI 87, 482/487(1987)

[著 者 紹 介]

川 上 浩 司 (正会員)

1987年, 京都大学工学部精密工学科卒業。89年同大学大学院工学研究科修士課程修了。同年岡山大学工学部情報工学科助手, 現在に至る(工学博士)。知識情報処理の研究に従事。人工知能学会の会員。

片 井 修 (正会員)

1969年, 京都大学工学部機械工学科卒業。同大学大学院博士課程, 助手, 助教授を経て, 現在教授(精密工学)。その間, 80~81年INRIA(フランス国国立情報処理・自動化研究所)客員研究員。主にシステムの知能化に関する研究に従事(工学博士)。

樫 木 哲 夫 (正会員)

1983年, 京都大学工学研究科修士課程, 86年同博士後期課程修了。同年同大学工学部精密工学科助手を経て, 94年より同助教授。91~92年スタンフォード大学客員研究員。知識情報処理, マンマシンシステムの研究に従事(工学博士)。

小 西 忠 孝 (正会員)

1960年, 京都大学工学部機械工学科卒業。65年同大学大学院博士課程修了(工学博士)。同年同大学工学部助教授, 82年岡山大学工学部機械工学科教授, 89年同情報工学科教授, 現在に至る。設計工学・計測工学などの研究に従事。日本機械学会の会員。

岩 井 壮 介 (正会員)

1956年, 京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。三菱造船(株)を経て, 57年京都大学工学部電子工学科助手, 講師を経て, 65年同精密工学科助教授, 74年教授, 94年退官。現在, 名城大学理工学部交通機械学科教授。主に制御工学, システム知能化の教育・研究に従事(工学博士)。