物理因果に関連する設計知識を反映した人工物の記述とその利用[†]

川上 浩 司*・小西 忠 孝**

須藤 秀 紹***・片井 修*

A Method for Extracting and Utilizing Design Knowledge on Physical Causal Laws on Artifacts[†]

Hiroshi KAWAKAMI*, Tadataka KONISHI**,
Hidetsugu SUTO*** and Osamu KATAI*

For supporting functional design process by using computer, one of the promising way is to utilize knowledge or tips on design. One practical way for supporting functional design is to facilitate designers to refer to well-organized and sophisticated knowledge-bases of inventive principles and of physical effects. Designers are, however, required training to deal with these kinds of abstract pieces of knowledge and to combine them for creating design concepts. Thus, we will examine a case-based reasoning framework in which design examples instead of highly abstract inventive principles are utilized. Based on the assumption that each example in the case-base functions by employing physical laws and effects, and the examples are selected so as to be subject to Design Axioms introduced by Suh, the present work proposes a method to acquire physical causal networks which reflect design knowledge and to utilize them for re-design process for supporting designers.

Key Words: design knowledge, causal analysis, case-based reasoning, computer aided design

1. はじめに

本稿では、物理システムの設計活動を事例ベース推論の枠組で支援する方法の一つを提案する。

一般にデザイナーは、新規な設計を考えるときでさえ、全く抽象的な思考をするのではなく過去の経験から類似の設計物の構造を想起するといわれる。それゆえに「大部分の設計は多かれ少なかれ類似設計である」という捉え方をする場合もある¹⁾。類似設計物の想起は非常に効果的であり、想起できる選択肢の多さに熟練度が関連するようにも思える。しかし、要求される新規性が高いときには類似設計物の想起は「心理的惰性²⁾」を生み、新規な発想を妨げることになる。本稿ではこのような具体構造物ではなく、抽象的な「機能」や背景にある「物理因果」に注目して設計活動を進めるべき段階を計算機支援する方法を検討する。

設計の完全な自動化は、困難であるばかりか倫理的な問題も含まれる。そこで、デザイナーと計算機との間でそれぞれの特性を活かした形での協調の在り方が重要になる。

人間は、未経験の事象を既知事象と結び付けることや総合的な状況判断などに優れる反面、一度に処理しうる認知資源に制限があり、見落としや勘違いなどを起こす。

一方、計算機は膨大な情報の整理、集約、提示が容易に実現できる。この特性を利用して、われわれと同じ設計段階に注目した TRIZ²⁾理論は、数百万件の特許情報を解析し「問題解決原理」と「物理法則・効果」の二つの側面から索引を付けたシステムとして実装されている。これは、協調の形態として、デザイナーが思考の過程で知識を検索・表示するデータベースとして計算機を使用するアプローチと捉えることができる。この場合、提示された抽象的な設計知識を解釈して直面する問題に適用するのはデザイナーであり、多大な修練が要求される。

異なるアプローチとして、本稿では高度に抽象的な設計知識の代りに事例を保存し活用する事例ベースシステムの枠組に注目する。事例ベース推論の研究分野では、その黎明期から設計支援が応用対象の一つとして注目されており³⁾、近年では進化型計算の援用や創造的設計教育において心的惰性を生まない形で既存事例を提示する方法、あるいは逆に図的な索引を使う事によって事例理解を促進する方法などが検討されている⁴⁾。この場合、構造レベルの変更に焦点を当てると新規性よりも現実的な解が求められる傾向があるが、本研究

[†] 第16回設計シンポジウムで発表(1998・7)

* 京都大学大学院情報学研究科 京都市左京区吉田本町

** 中国職業能力開発大学校 倉敷市玉島長尾 1242-1

*** 秋田公立美術工芸短期大学 秋田市新屋大川町 12-3

* Graduate School of Informatics, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto

** Chugoku Polytechnic College, Nagao, Tamashima, Kurasiki

*** Akita Municipal Junior College of Arts and Crafts, 12-3, Okawamachi, Araya, Akita

(Received May 7, 2001)

(Revised April 26, 2002)

Fig. 1 Fragmentally physical-causal codes linked together by using structural descriptions of an artifact

で提案する枠組では事例ベースには心理的惰性を防ぐためにも、その定量的かつ表層的構造情報ではなく、それを解析して得られる深層情報が検索ラベルとして与えられ、このレベルでの情報処理によって、構造変更だけでは導出が困難な設計物の物理因果連鎖レベルでの実現方法の提示を指向する。

物理因果構造によって表現された事例を用いた創造的設計支援手法としては、たとえば5)を挙げることができる。この手法は構造を原因、機能を結果とする因果関係を設定するものであり、計算機による機械的な処理のために各種の因果の型が導入されているのに対して、本稿で採用する物理因果の表現方法は原因と結果をそれぞれ等しい型の「事象」に設定するものであり、本稿で提案する機械的な処理の導入が可能となっている。

第2章では、物理量の伝達・変換や、機能とその機能達成の背景原理を表現する一つの形式である物理因果連鎖網および機能系統図を導入する。

第3章では、この形式で表現された既存の設計物から以下の指針にしたがって設計知識を抽出する方法を提案する。

- 「良い」機構は多くの設計物に常套的に多用される。
- 一見すると奇異に見える機構にはデザイナーのアイデアが隠されている。

こうして得られたものは、再利用可能な設計知識を反映した記述であると考え、その特徴に応じたラベルを付けて事例の検索ラベルとする。

第4章では、上記の方法で構築された事例ベースを利用する設計支援方法の一例を示すと同時に、試作システムを用いた実験結果を通して提案手法の有効性を検討する。

2. 物理システムの表現法

本節では、物理システムの構造属性だけでは判別しにくい物理量の変化や物理システムの挙動の扱いを容易にするため、機能系統図と物理因果連鎖網による表現を導入する。

2.1 物理システムの目的論的因果解析

われわれはすでに物理因果連鎖（Physical Causal Chain: PCC）と価値工学における機能系統図（Functional Diagram: FD）に基づく物理システムの表現法を提案している^{6),7)}。ここでは、それらを導入するとともに、PCCを物理因果連鎖網（Physical Causal Net.: PCN）に拡張する。

機能系統図（FD）は、「機能と副機能」および「機能とそれを達成する構造属性」という「目的-手段関係」を用いて物理システムの機能構成を木構造で表わしたものであり、価値工学における機能解析手法に用いられる。ここで導入する因果解析手法は、あらかじめ一般的な形で用意された「目的-手段関係」を用いて、解析対象の表層的構造記述がその基本機能に対する十分条件であることを証明する。その後、証明の履歴の中でいったん事例に特殊化されていた変数部分をEBL（説明に基づく学習）⁸⁾におけるidentity eliminationと同様の方法で、単一関係を保存したまま再び変数に戻す⁹⁾。このプロセスは価値工学の機能分析法とは異なるが、その証明履歴は木構造であり、また機能に着目して解析するという点で、その解析結果は価値工学の機能系統図と捉えることができる。

一般に、ある構造によって機能が実現される背景は、物理法則や効果によって説明することができる。「機能とそれを達成する構造属性」の間に物理法則から導かれる断片的な物理因果関係を設定することによって、Fig. 1の左半面に示すように上述の証明履歴の中の機能と構造の境界に埋め込まれる形で「物理因果関係の連鎖」が自動的に生成される。これを物理因果連鎖（physical causal chain: PCC）と呼ぶ。

2.2 物理システムの客観的因果解析

PCCはある一つの注目する機能を達成するために本質的な物理現象から構成される。一方、構造によっては予期しない物理現象が発生し得る。これらは、注目する機能がいかにか達成されているかの後付的解析（analysis）という視点からは毒にも薬にもならないが、再設計（synthesis）という視点

からは、それらは流用できる、あるいは邪魔になる可能性がある。そこで、このような現象を構造記述からボトムアップに推論して付加することによってPCCを物理因果連鎖網(PCN)に拡張する。

PCNの理論的背景と自動生成法は別報で報告しており¹⁰⁾、ここではPCN生成の概略を示す。

たとえば、Fig.1右端に矩形で囲って示す断片的な物理因果関係と^(注1)、同図左端に矩形で囲って示す解析対象事例記述が与えられた場合を考える。同図に示す物理因果関係のノードは原因事象と結果事象、アークは因果関係、アークに添えられた記述は因果関係の構造的成立条件を表わす。解析対象事例が構造的成立条件を満足することを確認するための簡単な推論(重力場にあれば加速されている、*whole structure*には*obj1*, *table* も含まれる、など)を経ると、変数 *X* と *Z* に同じ *obj1*, *Y* に *table* が代入される。この時、同図に示すように変数 *X*, *Y* および *Z* はノードにも含まれており、これらは構造的成立条件に含まれる変数 *X*, *Y*, *Z* と同一であるため、変数の同一性を辿って上記の代入がノードにも反映される。その結果、二つの物理因果関係に共通するノード(*obj1*, *stress*)が生じる。これらを単一化(unification)することによってFig.1下部に示すようにこの2つの物理因果関係は連鎖し、*obj1*の質量が(*table*の反作用をうけて)自らの内部応力、ひいてはひずみをひき起こす因果説明構造が生成される。当該事例で発生するすべての因果関係が確認されたあと、PCNは機能系統図と同じくidentity eliminationによって一般化される。その結果、Fig.1に示す例では、元来異なる物理因果関係に含まれていた変数 *X* と *Z* は同図下部に示すように同一の変数 *A* となる。

3. 設計知識を反映した記述の抽出と再利用

既存の物理システムには、デザイナーのアイデアや知識が埋め込まれている。これらは設計の指針として有用であると考え、その抽出と再利用を試みる。提案する枠組では、まず、既存の物理システムを前章で導入した機能系統図およびPCNで表現して事例ベースに登録する。つぎに、この事例から設計知識を反映した記述を抽出し、その特徴に応じたラベルを付けて検索キーとする。

提案する手法は、以下の二つの条件の下で解析対象事例が選ばれていることを前提とする。

- 物理法則や効果を用いて機能するものであり、その機構はPCNによって記述される。

- Suhの設計公理¹¹⁾に照らして理想的である。

Suhは、設計プロセスを経験や技能のレベルにとどめずにサイエンスのレベルに押し上げる戦略として、公理的なアプローチを採用している¹¹⁾。そこでは、合理的な設計は以下の公理にしたがうとされている。

公理 1: 機能要求の独立性を維持せよ

公理 2: 情報量を最小化せよ

これらをまとめると「要求が満たされている限り単純な設計が良い」という公理であると解釈できる。

提案する手法は、以下の2つの指針にしたがう。

- “良い”機構は多くの設計物に常套的に多用される。
- 一見すると奇異に見える機構にはデザイナーのアイデアが隠されている。

前者を具現化する方策として、複数の事例記述を比較して頻繁に用いられている部分を抽出する。このような事例からの知識の抽出は、大量の事例データを対象とした場合にはデータマイニングと呼ばれる¹²⁾。データマイニングの視点から見れば、この指針はパターンの出現頻度を評価基準として知識を抽出することに相当する。

後者を具現化する方策として、ある物理システムを表わすPCN全体とその基本機能達成のために最小限必要とされるPCNとを比較して、基本機能達成に必要なではないにもかかわらず付加されている部分を抽出する。これは、解析対象が設計公理に照らして理想的であるという仮定に強く依存する。理想的でなければ、奇異な機構が単にデザイナーのミスか設計戦略の結果であるかの判断ができない。

一般には、ある機構はいくつもの実装方法がある。言い換えると、表層的な構造記述が異なっている、それらは機構レベルでは同じ場合がある。それゆえ、“頻出”あるいは“奇異”であることは設計物の表層的構造ではなくPCNレベルで判断する。機構を表現するにはさまざまなレベル・視点が有り得るが、PCNは粒度の細かな機構表現の一つとして捉えられる。

3.1 頻出機構を表わす類似部分ネットの検出

PCNは、設計物が機能する背景にある物理法則や効果から導かれる因果関係を表わしている。もっとも単純な場合、Fig.2(b)と(c)に示すように二つのPCNが同じ部分構造を持っていれば、類似性はネットワーク構造のマッチングで判断することができる。しかし、多くの場合には同じ機構を暗に表現していても異なったネットワーク表現となる。この隠された類似性を検出するために、ここではまずはじめに“類似する部分ネットの候補”を大まかに特定した後、ネットの冗長部分を排除して基本構造を表出させ、同一性を判断する。

類似部分を有する可能性がある物理システムの特定

物理システム内で類似している可能性がある部分は、以下の指標を用いて探索する。

- (1) 二つの物理システムの機能系統図を比較し、等しい機能語彙ラベルがつけられているノードがあり、それらを頂点(根)とした部分木も単一化可能である場合。
- (2) 異なるPCNの中に、始点と終点の物理量の組が単一化可能である部分ネットが存在する場合。
- (3) 事例ベースに事例を登録する際に入力された操作方法と目的が同じである場合。

ここでいう操作方法とは、物理因果連鎖の起点となるもので

(注1) 以降、大文字または_で始まる文字列を変数とする。

Fig. 2 An example of network consolidations

Fig. 3 Consolidation patterns of causal chains

あり、因果と操作の様相性に対する考察¹³⁾から導かれた条件を満たす操作語彙と操作対象部の組によって表現される。

Fig. 2 (a) は圧力計、(c) はライターの着火部を解析した結果得られた PCN の一部を切り出したものである。これらは開始/終了ノードが互いに単一化可能である ($A = E$, $pressure = pressure$, $D = F$, $current = current$) ことから、2 つめの指標にしたがって類似部分ネットの候補として切り出される。

物理システム間の類似部分比較・抽出

ネットワーク構造としては表層的には異なっている、それが暗に示す機構が類似していることを判断するため、切り出されたネットの冗長部分を排除する。冗長部排除には、consolidation rule¹⁴⁾を応用した統合則を用いる。

consolidation rule は、プラント系のモデリングに見られるような作動流体を仮定し、流体の入出力で規定される局所デバイスの挙動を allow, pump, expel, move, create, destroy のいずれかに抽象化し、この抽象レベルで与えられた統合則である。ここでは、作動流体を物理量に読み替えるとともに、局所デバイスを単位にするのではなくデバイス間の因果関係を単位とする PCN の書式にあわせた上で、詳細に検討して導出した規則^{7), 15)}を用いる。Fig. 3 に示すのは統合則の一部であり、異なる構造素 X, Y, Z が持つ物理量 P, Q に対して、consolidation rule における serial allow と create+allow に対応する。

統合の結果、たとえば Fig. 2 (a) に示す PCN の基本構造

Fig. 4 Minimizing the structure of a manometer with U tube caused by a network consolidation

は同図 (b) となり、(b), (c) より圧力計とライターは類似の基本構造を持つことが判断できる。この基本構造は索引として事例ベースに格納される。また、統合されるノードへのアーク、および、そのノードを起点とするアークは、統合後のノードに受け継がれる。

3.2 奇異な付加部分ネットの検出

PCN には (ある特定の側面からは) 不必要でありその存在自体が奇異な部分が含まれる。解析対象は設計公理に照らして理想的であるものが選ばれているという前提の下では、この部分はほかの視点から必要とされており、設計要求を同時に実現するためのデザイナーのアイデアが具体化されたものである。

たとえば、Fig. 4 (a) 右に示すのは同図左に示す U 字管マノメータの PCN の一部である。同図中破線で囲った部分は圧力の伝達を表わしている。この部分は基本機能達成には冗長であり、その機能達成だけの視点からは Fig. 4 (b) 左に示すように省略して PCN を小さくすることができる。実際に、この物理システムの基本機能は Fig. 4 (b) 右に示す構造で実現可能である。しかし、実はこの冗長な部分は、基本機能達成とは独立の視点、すなわち A への加圧が無いときにピストン F を定位置に戻すという機能を、独立した機構の外付けによって実現するのではなく圧力の伝達という機構を流用して実現するというデザイナーのアイデアが具体化された部分である。このような特徴を考慮して、PCN の奇異な部分は以下の方法で検出する。

まず、選択した物理システムの PCN を最小化することによってその物理システムの必要最小限の構造を求める。PCN の最小化方法として前節で導入した統合則を利用する。これにより、機構の基本部分が抽出される。この基本部分を実現

する構造が、物理システムが機能を達成するために必要最小限な構造であると考え、最後に、最少化プロセス適用前後の PCN を比較して、付加されている部分を抽出する。

3.3 事例ベース検索

前節で示した方法で検出された「頻出・奇異な機構」を表わす部分 PCN は、設計知識を反映した記述であると考え、これを索引としながら設計要求に応じて事例ベースを検索する方法について考察する。なお、部分 PCN はネットワーク表現されるものであり、正確には「設計知識を反映した記述」に過ぎないが、以降は簡単のため「設計知識」と表現する。

事例ベースを効果的に検索するためには、索引として事例に付与された設計知識に、適切に表現された検索用ラベルが付加されていることが望ましい。そこで本研究では、抽出した設計知識に以下の三項目を検索用ラベルとして付加する。

- (1) PCN の始点、終点ノードの物理量
- (2) PCN のアークに含まれる構造的成立条件
- (3) 事例ベース作成時に入力された操作方法、目的

(1) のラベルは、設計知識はどのような物理量を変換することを目的としているか、また、どのような物理量に変換可能であるのかを表わしている。

(2) をラベルとすることにより、設計知識の特徴が反映される。PCN は、それを構成する各物理因果関係が持っていた構造的成立条件の連言を、自らの成立条件とする。

(3) をラベルとすることにより、副次的目的を達成するために用いられる設計知識を表現可能となる。たとえば、溶融鉛の流速測定装置は、「流速を測る」ことが主機能であるが、測定対象が高温であるために通常の測定プランとは異なる方策が採られるはずであり、そこにデザイナーのアイデアが含まれている。そこで、このような事例には事例ベース登録時に副次的機能「熱伝達を防ぐ」などを入力することとし、これをラベルとして用いる。

一つの設計知識に対して複数のラベルを与えるのは、多面的に表現して多くの再設計要求に適用することを指向しているためである。

3.4 再設計対象物への設計知識を反映した記述の適用

提案する枠組では、設計知識や事例だけでなく、再設計対象物に適用した例も提示する。この適用例生成手法の詳細は別報で報告する予定であるが、基本となるのは再設計対象物理システムの PCN と、設計知識を反映する PCN との「重ね合わせ」である。

まず、再設計対象物と設計知識を反映したそれぞれの PCN 内で同じ物理量を持つノードを検出する。たとえば、Fig. 5 に示す (a), (b) の二つの部分 PCN には変数 X, Y, A, B が含まれる。ここで同じ物理量をもつノードとしては (i) Y, A の load, (ii) X, B の stress, (iii) X, A の stress の 3 通りの組合せが存在する。

つぎに、検出したすべてのノードの組をそれぞれ単一化する。Fig. 5 に示す例では、それぞれの組合せに対して Fig. 5 (i), (ii), (iii) に示す PCN になる。

Fig. 5 Examples of PCN Merging

Table 1 Indices of each example

example	operation	purpose
Electric torch	push, switch	obj, light
Electric lighter	push, obj	generate, fire
Manometer	fix, obj	measure, pressure
Thermocouples	heat, heater	generate, electric_energy
dynamo		
U-shaped	fix, obj	measure, pressure
manometer		

4. 試作システムを用いた実験および考察

本章では、提案する枠組を計算機上に実装した試作システムと、得られた実験結果に対して考察を加える。

4.1 事例ベースの作成

実験では、Fig. 4 に示した U 字管式マノメータのほか、懐中電灯、電子式ライター、圧力計、熱電対発電機を加えた 5 つの既存物理システムについて、それぞれの操作方法と目的を Table 1 に示すように入力した。これらの物理システムに対し、2 章で述べた機能系統図と PCN を生成して事例ベースを作成した。Fig. 6 に懐中電灯の事例ベース内記述を示す。ほかの事例も同様に、機能系統図と、ほぼ 10 前後のノード数の PCN で記述される。

4.1.1 類似部分抽出

「機能系統図内に同じ部分木が存在する」という指標からは、圧力計と U 字管式マノメータから 2 個所に構造が等しい部分木が得られた。Fig. 7 (a) (b) に示すのは、1 個所目の部分木に対応する物理因果連鎖網を抽出したものであり、それぞれに統合ルールを適用すると Fig. 7 (a') (b') に示すように等しくなるため、これを設計知識（事例の索引）として登録する。これは、電磁誘導を表わすものと解釈できる。2 個所目の部分木に対応する部分 PCN は Fig. 7 (c) (d) に示すものであるが、これらに対して統合ルールを適用しても等

Fig. 6 PCN and FD for an electric torch

Fig. 7 Examples of PCNs extracted under criterion: "same FD"

しいネットワーク構造とはならないので、設計知識とはみなさない。

「始点と終点の物理量の組が同じである部分 PCN が存在する」指標からは、Fig. 8 に示す部分 PCN が検出された。(a), (b) は、それぞれ、電子式ライターおよび圧力計に対する PCN 内の「圧力」から「電流」への変換を表現する部分 PCN である。これらに対して統合ルールを適用した結果、

Fig. 8 Examples of PCNs extracted under criterion: "same start/end node"

Fig. 9 Examples of PCNs extracted under criterion: "same usage or purpose"

Fig. 10 The minimal PCN for electric torch

Fig. 11 The minimal PCN for thermocouples dynamo

(b) は同図 (b') となり (a) と等しくなるため、設計知識とみなされる。これはピエゾ効果を表わしていると解釈することができる。試作システムに登録した事例が少ないため、この指標からはほかに 1 つの知識が得られるにとどまっている。

「操作方法・目的が同じ」指標からは、圧力計と U 字管式マノメータの組合せが得られるが、統合ルールを適用すると、Fig. 9 (a), (b) に示すそれぞれ異なった PCN に統合されるため、設計知識は得られない。

4.1.2 付加部分抽出

事例に対して付加部分抽出を施す。懐中電灯の PCN に対して統合ルールを適用した場合、Fig. 10 に示す最小 PCN が得られた。これをもとの PCN と比較することにより、反射特性を持つ構造素が「光を受けて光を出す」ことが奇異な特徴として検出された。また、熱電対発電機からは Fig. 11 が得られた。抽出された付加部分はすべて索引として事例に付与する。また、電子式ライターは Fig. 12 に示すように統合され、付加部分が得られない。これは、基本機能達成に直

Fig. 12 The minimal PCN for lighter

接関係しない構造素は含まれていないためであると考ええる。

以上、実験で用いた5つの事例からは53個の設計知識が得られた。

4.2 簡易謄写版の再設計

本節では、Fig. 13 (a) に示す簡易謄写版を再設計対象として実験した結果を報告する。この謄写版は、原稿とマスターを重ねて装着し、電池を用いて電球を発光させる。発光時の熱により、原稿の黒い部分と接触しているマスターの一部が溶け、印刷用の版が作成される。この謄写版の起因操作は構造素 obj を押すことであり、これにより switch1 と switch2 が接触して回路が形成され、電球が発光する。Table 2 に示すのは発光時の表層の構造の一部であり、これを含めた全体構造記述を再設計対象としてシステムに入力し、機能系統図と PCN を得る。

Fig. 13 An example of the experimental results of the re-design support system

Table 2 Structural Description of Handy Mimeography

ex(connect(obj,	body2	)).
ex(phase(obj,	solid	)).
ex(phase(body2,	solid	)).
ex(connect(body2,	switch1	)).
ex(connect(body1,	switch2	)).
ex(connect(switch1,	switch2	)).
ex(has(switch1,	conductance	)).
ex(has(switch2,	conductance	)).

4.2.1 再設計要求に基づく検索

デザイナーの持つ再設計要求をシステムに入力する場合、計算機処理を容易にするためには、自由な表現を用いるのではなく、統一した語彙から選択する方法が望ましい。また、このような語彙は、さまざまな要求を網羅し、適切な抽象度で整理されていることが必要である。

本来ならばオントロジカルな考察を待つべきであろうが、試作システムでは、本研究と同じ設計段階に注目した TRIZ 理論を実装したソフトウェア^(注2)に準拠した約300の選択肢を用いる。

たとえば、Fig. 13 (a) に示す簡易謄写版に対して、実験では「電池を排除したい」という要求を想定し、上述の300の選択肢の中から最も近いものとして「電流を生成する」を選択した。この場合、「電流 (current)」, 「生成する (generate)」の二つの検索ラベルで事例ベースが検索される。

4.2.2 再設計案の生成

事例ベース検索の結果、27個の索引とマッチした。その中には Fig. 8 に示した圧力計と電子式ライターから与えた索引(設計知識を反映した記述)も含まれる。これを適用した結果、電池に代えて圧電素子を用いるとどのような物理因果関係の成立によって要求が満足されるかを表わす PCN が得られた。それを解釈して具体構造イメージにしたものを Fig. 13 (b) に示す。

4.3 考察

4.3.1 抽出された設計知識の絞り込み

頻出部分に着目した設計知識抽出法では、隣合った二つのノードからなる部分 PCN や、同じ物理量の伝達が設計知識として多数抽出される。これらは、ほぼすべての物理システムに含まれる基本的な物理法則であり、特別な設計知識とは考えられない。付加部分を抽出して得られる設計知識にも、単に電流を伝達するために必要な構造などが含まれ、必ずしも有意義な設計知識だけを得ることはできない。このような、“とりたてて設計知識というまでもない常套手段”と“有用な設計知識”が混在する問題は、設計知識の検索ラベルを増やし、数多くマッチする知識を提示することで解決できると考えている。

また、提案手法によって索引が付けられた事例ベースを、TRIZ に見られるように設計者の思考を補助する情報を提示するシステムという形で利用することを考えた場合、事例のインデックスとして表層の構造情報を用いると、多数の類似事例が検索されるばかりか、設計対象分野が限定される事も指摘されている¹⁶⁾。これに対して、広い分野で共通に利用できる情報として「物理現象」に注目し、各設計事例がその機能実現のために利用している物理量の次元を用いて類似度を定義する方法などが知られている¹⁶⁾。物理量に注目する点ではこの手法と立場は共通しているものの、われわれの手法は物理現象の間に因果構造を持ち込んでいるため、フラットな構造だけが与えられた物理量のリストを用いた場合よりも検索結果は大きく絞り込まれることになる。

ただし、検索結果がいかに絞り込まれたものであろうとも、フラットにリストアップされるよりも、そこに「ユーザが事例を選択するために活用できる情報」を加える方が好ましいと言われる。特定の始点から階層状に事例を整理する方法や上述のように類似度を与える方法などが知られているが、本稿の場合では3つの検索ラベル(始点と終点の物理量/構造的成立条件/操作方法や目的)のいずれがマッチしたか、あるいはネットワークの同一性判定のために排除した冗長部分の量などの情報の利用を検討している。

(注2) TechOptimizer J ver.3.1

4.3.2 定性的な記述による設計支援

物理システム内での物理量の流れや物理現象などに対する定性的な処理にどとめることによって、実験結果に示したように機械的に構造属性を変更するだけでは得ることの難しい結果を得ることが可能になる。このとき、「電池を排除」という再設計要求からピエゾ効果を適用した例が得られた場合、電球発光に十分な電流が得られるかは解析しない。同様に、構造的成立条件として「弾性体である」、「接合している」などの定性的な記述を採用しているため、その具体構造は一意に定まらない。また、提示される複数の再設計案に対する評価もしない。しかし、これらの結果はすべてデザイナーに提示される。

これは、デザイナーと計算機の協調のありかたとして計算機にはデザイナーに対してアイデアを提供させることを指向し、同時に、最終的な決定はデザイナーが下すことを前提としているためである。

ただし、ある特定の物理現象を発生させる具体構造は一意に定まらないことから明らかに、PCNを見ただけではユーザはその具体的実現方法をイメージすることはできない。このことは逆に「心的惰性」を防ぐことにもなっているが、提案手法を実システムに発展させるためには、抽象的な解決案を想起するだけでなくその後に続く具体的な実現方法を考える段階までも支援できる事が望ましい。この場合、抽出された部分ネットを索引として、ネットワークを抽出した母体設計事例のデータ（具体構造例、操作方法、目的）ならびに抽出されたネットワークの構造的成立条件がたどれるという形態を想定している。

4.3.3 発展課題

事例ベースに与える既存物理システムの個数を増やすことによって、提案システムをより実用的な方向に発展させることを検討している。このとき、設計知識や知識適用結果のバリエーションが広がる反面、試作システムを構築した経験からは再設計要求を満たさない設計解も増加すると予想される。

この問題に対しては、知識の適用結果に対する評価や定量的な解析を担うモジュールとの連携が考えられる。たとえば、具体構造例管理を担うモジュールとの連携は、形状実現可能性という視点からの適用結果の評価が、デザイナーに提示する候補の絞り込みに利用できる。また、定量的解析を担うモジュールとの連携は、たとえば上述したピエゾ効果により発生する電流が電球発光に十分であるかなどの定量的評価が期待できる。

また、一般にグラフ同形性の判定はNP問題であり、事例の数を増やした場合、現実的な時間内にネットワークの構造マッチングによるPCNの比較が困難になるとと思われるが、PCNのノードはすべてが単一化可能ではなく、そこに記述されている物理量によって数種類に制限できるため、実際には上記の問題は生じない。

5. 結 言

本研究は、設計活動に対する計算機支援の一環として、既存物理システムから物理因果に関連する設計知識を反映した記述をシステムティックに抽出する方法および、抽出した設計知識を再設計対象に適用した例を提示する方法を提案した。また、その枠組を計算機上に試作システムとして実装することによって、提案した枠組の有用性を検証した。試作システムが抽出した部分PCNの中にはピエゾ効果や電磁誘導を用いた知識と解釈できるものなども見られ、有意義な設計知識を得る手法であると考えられる。また、PCNを重ね合わせることにより、得られた知識を再設計対象物理システムに適用した例を提示可能であることを確認した。

提案手法の基本的な方針は、自動設計ではなく人間との協調により設計活動を支援することである。システムが出力したどの案を採用するか、また、どのように具体化するかは、デザイナーが決定することである。ほかのモジュールと連携することによりその決定に関するさらなる指針を提供することが望まれる。

PCNは、解析対象システムのいわば「仕掛け」を物理因果連鎖によって表わす一つの形態と解釈することができる。試作システムは、これらを既存の物理システムの構造にとらわれることなく抽出する。その仕掛けを再設計対象物に適用する際には、一つの再設計要求に対して複数の設計知識が検索結果として得られ、一つの設計知識から複数の適用例を提示可能である。これは、デザイナーが見逃していた、あるいは思い浮かばなかった仕掛けを提示する形での、計算機とデザイナーとの協調という枠組の一つである。

参 考 文 献

- 1) 赤木新介：設計工学（上）、コロナ社（1991）
- 2) Yuri Salamatov: 創造的問題解決の極意, 92, 日経 BP 社（2000）
- 3) J. Kolodner: Case-Based Reasoning, Morgan Kaufman（1993）
- 4) J.S. Gero ed.: Case-Based Reasoning in Design, Artificial Intelligence in Design '00, 371/432, Kluwer Academic Press（2000）
- 5) L. Qian and J. S. Gero: Function-behavior-structure paths and their role in analogy-based design, AI EDAM, 10, 289/312（1996）
- 6) 片井, 川上, 榎木, 小西: 設計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）
- 7) H. Kawakami, O. Katai, T. Sawaragi, T. Konishi and S. Iwai: Knowledge Acquisition Method or Conceptual Design based on Value Engineering and Axiomatic Design Theory, Artificial Intelligence in Engineering, 10-3, 187/202（1996）
- 8) T.M. Mitchell, R.M. Keller and S.T. Kedar-Cabelli: Explanation-Based Generalization: A Unifying View, Machine Learning, 1-1, 47/80（1986）
- 9) 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）
- 10) 川上, 野村, 須藤, 小西, 片井: シンセシス支援のための物理

- 因果説明構造とその導出法, 計測自動制御学会論文集, 37-8, 786/794 (2001)
- 11) N.P. Suh: The Principles of Design, Oxford University Press (1990)
 - 12) 大規模データベースからの知識獲得, 人工知能学会誌, 12-4, 496/549 (1997)
 - 13) 須藤, 川上, 片井: 操作と状態の様相性に着目した人工物表現モデル, 計測自動制御学会論文集, 37-11, 1078/1086 (2001)
 - 14) T. Bylander and B. Chandrasekaran: Understanding Behavior Using Consolidation, Proceedings of the Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence, 450/454 (1985)
 - 15) 片井, 川上, 樫木, 小西, 岩井: 設計公理論に基づいた人工物解析からの深層設計プラン抽出, 計測自動制御学会論文集, 31-3, 347/356 (1995)
 - 16) 村上, 嶋村, 久志本: 設計事例データの類似度・関連度に基づく設計支援に関する研究, 日本機械学会第 11 回設計工学・システム部門講演会論文集, 26/29 (2001)

=====

[著 者 紹 介]

川 上 浩 司 (正会員)

1989 年, 京都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, 98 年, 京都大学大学院情報学研究科助教授, 現在に至る。共生システム設計方法論の研究に従事。人工知能学会などの会員 (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 年同大学院博士過程機械工学専攻終了, 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。2001 年中国職業能力開発大学校校長, 現在に至る。設計制御, 計測工学などの研究に従事。日本機械学会, 日本トライボロジー学会などの会員 (工学博士)。

須 藤 秀 紹 (正会員)

91 年徳島大学総合科学部卒業。同年 (株) ジャストシステム入社, 97 年より大阪教育大学大学院修士過程を経て, 2002 年京都大学大学院情報学研究科博士後期課程研究指導認定退学。同年, 秋田公立美術工芸短期大学産業デザイン学科講師, 現在に至る。関係性に注目した人工物の設計支援に関する研究に従事。(学術修士)。

片 井 修 (正会員)

1969 年京都大学工学部機械工学科卒業。同大学院博士課程機械工学科第二専攻修了。74 年同大学助手。83 年同助教授。94 年同教授。96 年同大学院工学研究科教授。98 年同大学院情報学研究科教授, 現在に至る。その間, 80~81 年フランス国 INRIA 客員研究員。主として共生的なシステム構築法に関する研究に従事。(工学博士)。

=====