



距離の導入による知的設計支援方法論の構築(第3報) : 抽象概念への距離の導入に対する思考の効率の観点からの考察

田浦, 俊春
吉川, 弘之

(Citation)

精密工学会誌, 58(11):1843-1848

(Issue Date)

1992-11-05

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90001539>





距離の導入による知的設計支援方法論の構築

(第3報)*

——抽象概念への距離の導入に対する思考の効率の観点からの考察——

田 浦 俊 春** 吉 川 弘 之**

A Methodology of Intelligent CAD using a Metric Space Concept
(3rd Report)

—A Discussion on a Metric Space from the Viewpoint of Thinking Efficiency—

Toshiharu TAURA and Hiroyuki YOSHIKAWA

The purpose of this study is to find out an ideal design principle which has the characteristics of generality, practicality and computability. In this study, the attention is paid to topology which has a metric space concept in itself. And the design knowledge is organized in this metric space. This organization is expected to optimize the structure of the design knowledge and deal with the synthetic nature of design. In the 1st report, the mechanism of function operation is modeled mathematically. In the 2nd report, a mathematical model of conceptual design process is deduced and convergence policy to find out design solutions is discussed from the viewpoint of a metric in function space. And a methodology of Intelligent CAD is deduced based on these mathematical models. In this paper, the design principles deduced in the previous papers are discussed from the viewpoint of thinking efficiency. First, they are discussed from the viewpoint of operation of the abstract concepts. Secondly, they are discussed from the viewpoint of generating the abstract concepts. At last, this study is described as one approach to abduction.

Key words: design, design process, metric space, abduction, NP complete

1. 序

本研究の目標は、対象分野に依存しない一般性と実際に活用可能である実用性を有し、かつ計算可能な設計原理を見い出すことである。前々報では¹⁾、一般設計学²⁾の考え方に基づいて、設計知識の構造とその操作を位相空間上で議論した。前報³⁾では、概念設計過程の数学的モデルと設計解収束政策を機能空間上の距離に注目して導出し、既知の事例（組立品及びそれらの構成部品）から所望の機能を満足する部品構造を探索するアルゴリズムを導出した。既報における議論の最大の特徴は、位相空間に内在する距離の概念に注目し、設計知識の構造化を距離空間上で行ったことである。本報では、既報で議論してきた設計原理に対して、思考の効率化の観点から考察を加える。具体的には、まず、設計知識における距離の役割に対して、抽象概念の操作の視点から考察を加える。次に、設計知識における距離の役割に対して、抽象概念の形成の視

点から考察を加える。最後に、本研究はアブダクションの形式化へのひとつのアプローチでもあることを述べる。

2. 前報までの結果と本論文の課題

前々報では、全体機能空間（距1・義5）[†]と部分機能空間（距1・義9）を定義した。本研究における全体機能とは実体がそれ自身として発現する機能のことであり、部分機能とは実体を構成する各部分の発現する機能のことである。

また、機能演算（機能合成・機能分解）を定義し（距1・義10）、その性質として、次の仮定を数学的に導出した。

（距1・仮1）機能分解では、全体機能空間上で互いに近い元は、部分機能空間上でも互いに近い元に写像される。逆も成り立つ。

[†] 引用を簡単にするために、文献1) 距離の導入による知的設計支援方法論の構築（第1報）の定義を（距1・義）、仮定を（距1・仮）と書く。数字は、それぞれの番号を示す。同様に、文献2) 一般設計学序説は、序と書く。

* 原稿受付 平成4年1月6日

** 正 会 員 東京大学工学部（東京都文京区本郷7-3-1）

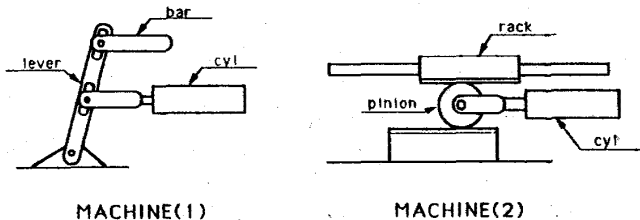


Fig. 1 An example of functional similarity

1.0	1.0	0.4	0.4	0.31	0.57	0.4	0.1	0.4	0.57
1.0	1.0	0.4	0.4	0.31	0.57	0.4	0.1	0.4	0.57
0.4	0.4	1.0	1.0	0.77	0.5	0.5	0.7	0.5	0.5
0.4	0.4	1.0	1.0	0.77	0.5	0.5	0.7	0.5	0.5
0.31	0.31	0.77	0.77	1.0	0.39	0.62	0.62	0.62	0.39
0.57	0.57	0.5	0.5	0.39	1.0	0.2	0.4	0.2	0.29
0.4	0.4	0.5	0.5	0.62	0.2	1.0	0.5	1.0	0.7
0.1	0.1	0.7	0.7	0.62	0.4	0.5	1.0	0.5	0.4
0.4	0.4	0.5	0.5	0.62	0.2	1.0	0.5	1.0	0.7
0.57	0.57	0.5	0.5	0.39	0.29	0.7	0.4	0.7	1.0

Fig. 2 Similarity matrix in the example

全体機能と部分機能の関係を図1の例で説明する。機械①の全体機能とは、例えば、ストローク増幅機能や直進機能である。これらの全体機能は機械②によっても発現されることに留意しよう。次に、部分機能について考える。まず、機械①に注目する。機械①は、cyl, lever, barの各部品から構成されている。ここで、部分機能として、move(直進運動)とrotate(円運動)に注目してみると、cylとbarは部分機能moveを発現し、leverは部分機能rotateを発現するということになる。機械②に対しても同様に部分機能を求めることができる。得られた部分機能を入力側から出力側に並べてみると、機械①と機械②の発現する部分機能はいずれも move, rotate, moveであり同じである。すなわち、部分の発現する機能に注目することで機械①と機械②の間に部分に注目した共通性を見出すことができた。これが、「仮定1」の意味することである。

前々報では、位相空間上の距離を計算可能な形で表現するひとつの試みとして類似度行列を提案した。前々報の例題では図1の機械を含む10の機械に関して任意の2つの機械の間の類似度を求め、その結果を類似度行列として表現した。類似度は、2つの機械の部分機能に共通性があれば1点、共通性が連続していれば更に2点を与え、その合計点を同一機械間の得点で割った値とした。求められた類似度行列を図2に示す。

前々報では、更に、類似度行列の表現する空間を多次元尺度構成法の一つである主座標分析法を用いてユークリッド空間に変換することを試みた。図3に主座標分析法で計算した結果を示す。

図3は部分機能空間として求められたものである

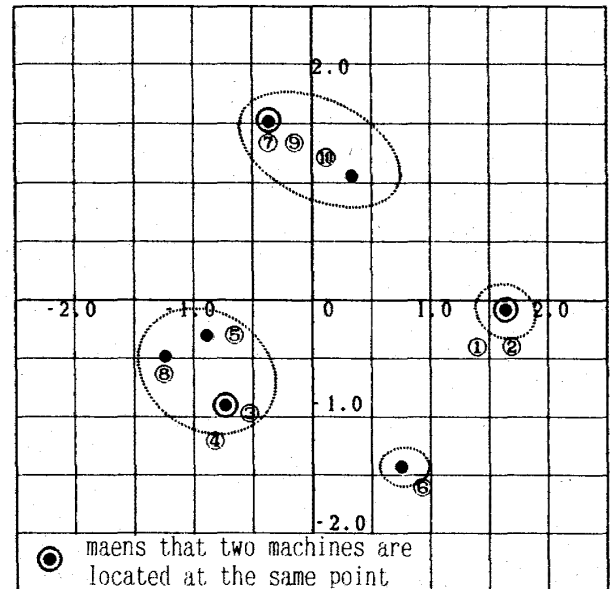


Fig. 3 Result of principal coordinates analysis applied to the similarity matrix

が、前々報の考察では全体機能空間としても意味があると述べた。すなわち、第1軸によって直線運動と揺動運動が区別され、第2軸によって両端減速の有無が区別されていると解釈可能であり、全体機能空間としても意味のあることを述べた。

本報では、主座標分析における固有ベクトルの計算に着目し、概念形成の観点から考察を加えるを試みる。

前報では、「仮定1」を基本として、既知の事例(組立品及びそれらの構成部品)から所望の機能概念(直進運動でかつ両端減速と増速機能)を満たす部品構造を探索するアルゴリズムを導出した。前報の例題における部品構造及び部分機能構造(設計解)の推移の一部分を図4に示す。

前報で提案した方法論では、まず、部分機能構造の近傍が生成されて、次に、その部分機能構造を満足する部品構造が求められる。その際に、ある仮説の近傍探索の操作は部品の集合としての部分機能概念に注目して行われており、部品の抽象概念が操作されている。

本報では、このような抽象概念の操作に注目し、思考の効率の観点からの考察を試みる。

前々報で述べたように、本研究の目的の一つは設計の研究を通じてアブダクションへアプローチすることである。前々報では、設計は一般的にはアブダクションとしてとらえられているが、その理由は設計知識の構造から理論的に導出されるような厳密なものではないと述べた。本論文では、一般設計学の結果を用いて設計とアブダクションの関係に考察を加える。

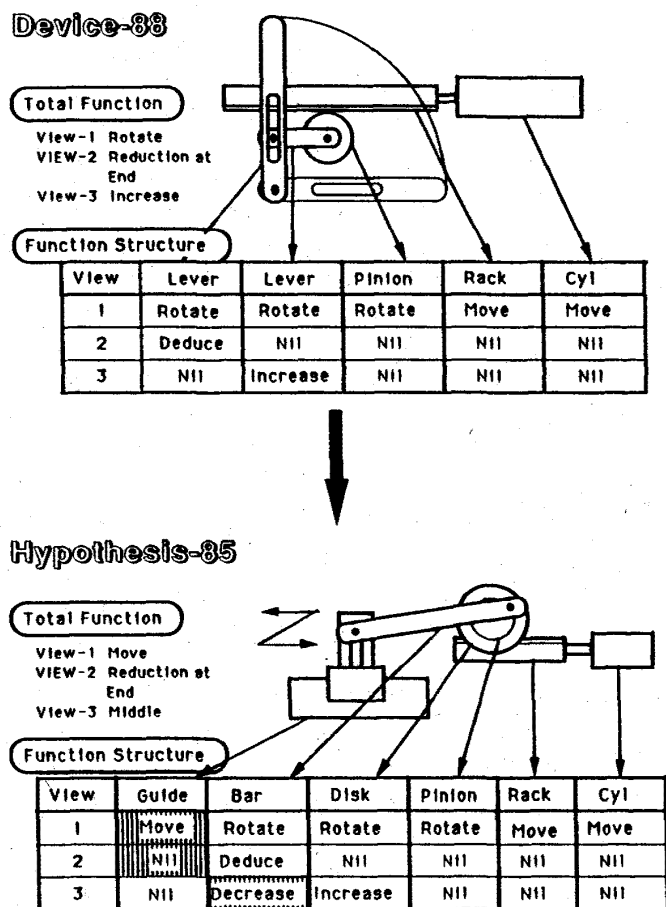


Fig. 4 Transformation of component structure and partial function structure

アブダクションの本質のひとつは、仮説を発見するメカニズムにあると考えられる。仮説を発見するメカニズムに関する課題は下記のようにまとめられる。

まず、Peirceの言葉⁴⁾を用いれば、下記の表現となる。「われわれは、事実について考えられ得る説明は厳密には無数にあるだろう。」「しかし、われわれの精神はある有限回の推測でもってそれらの事実に関する唯一の真なる説明を考え当てることができるであろう。」

仮説推論の枠組みで説明すれば、仮説選択や仮説同定の問題が挙げられよう⁵⁾。本研究の提案する設計原理の枠組みでは、次のような課題として説明される。すなわち、ある要求仕様に対する設計解の候補を部品の組合せで考えると、その組合せは極めて大きな数である。具体的には、知っている部品の種類を n とすると、 n に対してNP完全な問題である。しかし、人間は何らかの方法を用いて有限時間に解を求める。更に言えば、経験が蓄積されて知っている部品の数が増えれば増える程、経験者の解の探索時間は短くなる。このような現象に対しては、人間の思考に知識の組合せ的爆発を解決する何らかの仕組みがあると考えられる。

が自然である。本論文では、設計において設計者が機能という抽象概念を操作することが思考の組合せ的爆発を回避するという観点において重要な役割を果たしている可能性を述べて、本研究がアブダクションの形式化へのひとつのアプローチでもあることを示す。

3. 抽象概念の操作と距離

3.1 操作対象としての機能概念

知識を抽象化して操作することの一般的な効果と問題点は、次のように考えられる。

まず、効果としては、思考の効率化が期待される。すなわち、知識を集約することで、操作対象とすべき知識のまとまりの数を少なくすることができる。この結果、探索すべき知識空間を狭める効果が期待される。

次に、問題点としては、演算性の悪化が懸念される。知識の抽象化に伴う演算性の悪化は、前報における属性または挙動と機能概念の区別に関する議論に関係がある。すなわち、属性または挙動に関しては、部品の組合せに伴う全体の属性や挙動の推定が算術として求められやすいのに対して、属性または挙動を抽象化して得られる機能概念に関しては、部品の組合せに伴う全体の機能概念を計算する算術関数は一般には求められないという立場である。例えば、図4の例において、組立品（全体）としての増減速機能は、各部品の増減速機能からは一意に定められないというようなことである。

設計者は、設計過程において、演算性の悪化をなんらかの方法で補完しながら、思考の効率を目的として抽象度の極めて高い機能概念を操作の対象にしていると考えられる。

3.2 抽象概念の演算に対する距離の役割

本研究では、機能概念の操作の方法が機能空間における距離に注目して導出されている。従って、本方法論は、機能概念の有する演算性の悪さを補完するひとつの方法を提案していると言えよう。すなわち、一般には演算性の悪い極めて抽象度の高い機能概念が実際には設計者によって効率よく操作されていることに対して、設計者の知識が距離の作動するように構造化されているのではないだろうかということが理由のひとつとして考えられよう。そのように考えると、設計者は知識の数が増えたからといって思考に余計の時間がかかる訳ではないという事実も説明できる。一般に、知識への距離の導入に対しては検索の容易性の観点からの効果が期待されるが、本研究の結果では抽象度の高い概念の操作の方法論としての意味もあることが示

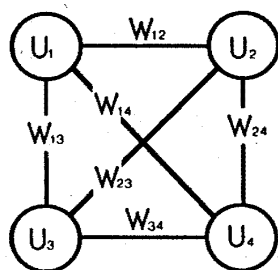


Fig. 5 Network

されたのである。

4. 抽象概念の形成メカニズムと距離

本章では、行列の固有ベクトルを求めることとネットワークのエネルギー極小化問題の関係を示し、類似度行列に対する主座標分析法の適用が概念形成過程としても解釈可能なことを示す。

主座標分析 (principal coordinates analysis) は、多次元尺度構成法の一つであり、次に示す行列 $\alpha = (\alpha_{ij})$ の固有値と固有ベクトルの計算に帰着する。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{ij} &= a_{ij} - \bar{a}_i - \bar{a}_j + \bar{a} \\ \bar{a}_i &= \frac{1}{n} \sum_j a_{ij}, \quad \bar{a} = \frac{1}{n} \sum_i \bar{a}_i \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 a_{ij} は、対象 i と対象 j の間の親近性である。前々報の例題では、各 2 つの機械の間の類似度を式 (1) における親近性としてとらえ、行列 α の固有ベクトルを計算した。図 3 は、固有値の大きい 2 つの固有ベクトルについて、各ベクトルの各要素を各々第 1 軸、第 2 軸の座標値としてプロットしたものである。

一方で、最近、ネットワークメカニズムの概念形成モデルへの応用に関する研究が試みられている。ここでは、ネットワークのエネルギー極小化問題が概念の形成過程として意味づけされている。

$$\begin{bmatrix} u_1(t+1) \\ u_2(t+1) \\ u_3(t+1) \\ u_4(t+1) \end{bmatrix} = \phi \left\{ \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} & w_{14} \\ w_{12} & w_{22} & w_{23} & w_{24} \\ w_{13} & w_{23} & w_{33} & w_{34} \\ w_{14} & w_{24} & w_{34} & w_{44} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \\ u_4(t) \end{bmatrix} \right\}$$

図 5 の例において、ネットワークは上記のような動作で表現される。

ここで、 $u_i(t)$ は、ユニット u_i の時刻 t における状態を示し、 w_{ij} は、ユニット間の結合の重みを示す。又、 ϕ は、入出力関数である。ここでは、 w_{ij} は対称であると仮定されている。

ところで、 n 行 n 列の行列 $W(w_{ij})$ の固有ベクトルは、

$$Gn = \sum_i \sum_j w_{ij} u_i u_j \quad (2)$$

なる関数 Gn の $\{u_i\}$ の分散が一定という条件下での

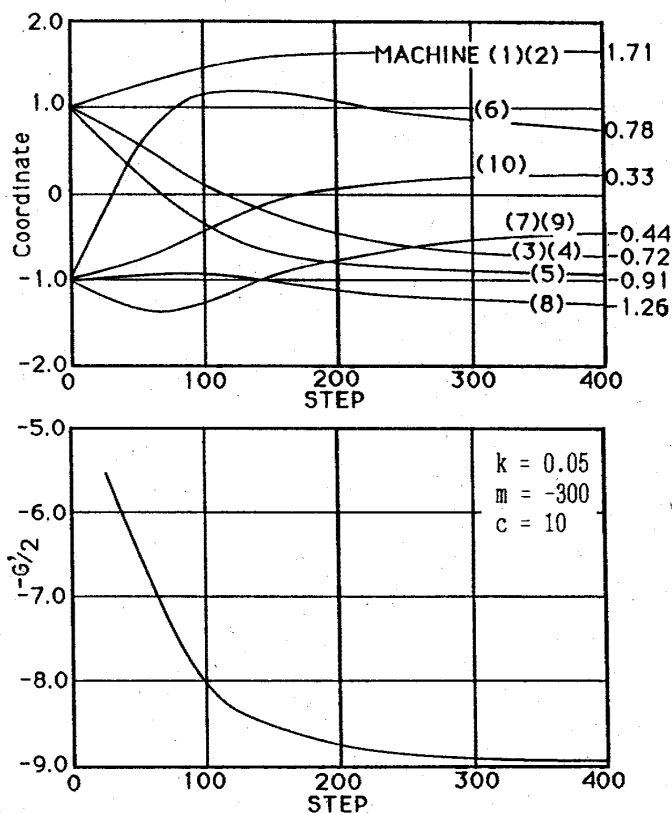


Fig. 6 Calculation of the eigenvector using Network Mechanism

停留値としても求められる⁶⁾ので、行列 W の固有ベクトルは、例えば下記の式の停留値として計算される。

$$G' = Gn + m(V - C)^2 \quad (3)$$

ここでは、 m は極めて大きな値の定数とする。

式 (3) に最大傾斜法を適用することで、ネットワークメカニズムにおける入出力関数 ϕ が求められる。特に行列 W が式 (1) の行列 α の性質を満たす場合には、次のようになる。

$$u_i(t+1) = k * \sum_j w_{ij} u_j + \left(1 + 2km \frac{v(t) - c}{n} \right) * u_i(t) \quad (4)$$

ここで、 $v(t)$ は、時刻 t における分散を表し、 k はインクルメントの程度を意味する係数である。

図 2 の類似度行列を式 (1) に適用して得られる行列 α の固有ベクトルの計算を、式 (4) を用いて試みる。結果を図 6 に示す。この結果では、図 3 の第 1 軸の座標値が求められている。例えば、機械 ① と ② は図 6 の結果では 1.71 と得られているが、この値は図 3 において機械 ① と ② の第 1 軸上の値に同じである。

以上の議論で、主座標分析法における計算はネットワークメカニズムに関連していることが分かった。そこで、主座標分析法の計算のもつ意味を抽象概念の形成の観点からまとめてみよう。すなわち、類似度行列

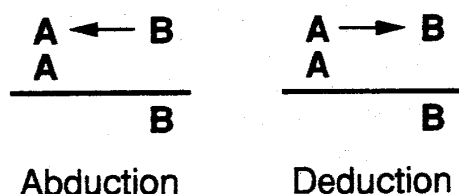


Fig. 7 Abduction and deduction

に主座標分析法を適用することは、概念形成の観点からはどのような概念の形成を意味しているのだろうか。主座標分析の結果得られた空間は、前々報の考察によると全体機能空間としても意味のあるものである。このことから、全体機能概念が部分機能概念のより抽象的な概念として形成されたという解釈が可能になる。Rumelhart ら⁷⁾の部屋に関する概念形成の例においても、部屋という全体に関する概念がベッド等の部分に関する概念から形成されている。従って、概念形成の視点からとらえることで、全体機能空間と部分機能空間の関係に次のような仮説が得られる。

「仮定2」部分機能概念に対して抽象化の操作を加えると、全体機能概念が形成される。

ところで、類似度行列は、距離の導入された位相空間の別の表現である。そこで、本章の議論のまとめとして、設計知識上において距離を考えることは抽象概念の形成に関するモデルに対しても広く問題を提起していると言えよう。

5. 設計知識への距離の導入とアブダクションの関係

本章では、まず設計とアブダクションの関係を一般設計学の結果を用いて集合論の枠組みのなかで議論する。次に、本研究の結果とアブダクションの関係について述べる。

5.1 設計とアブダクションの関係

アブダクションとディダクションの違いを図7を用いて概説する。図7において、Aを要求仕様を表現する機能空間上の集合とし、Bを設計解を表現する属性空間上の集合とする。そうすると、図7の左右いずれの表現も、要求仕様Aと、AとBを関係づける知識から、設計解Bが求まる過程を示している。一方で、この図におけるアブダクションとディダクションの表現の違いはAとBの間の含意の向きである。集合論における2つの集合の間の含意の向きはそれらの包含関係によって決定されるが、機能空間と属性空間の間には以下の関係があることが一般設計学の結果として得られている。

「序・理10」設計が可能ならば、属性空間から機能空

間への恒等写像が連続写像となる。

この定理の意味は、設計可能な設計知識においては、属性空間の位相は機能空間の位相より強いということである。ここで、属性空間の位相が機能空間の位相よりも強いということは、属性空間の類は機能空間のいずれかの類に含まれることである。この結果を図7のAとBの関係で述べれば、Aの集合がBの集合を含む包含関係である。従って、AとBの関係は、設計過程のアブダクションとしての表現における含意の向きである。すなわち、機能空間上の集合Aから属性空間上Bへの写像としての設計過程は、アブダクションとして表現されるのが妥当である。

5.2 抽象概念への距離の導入とアブダクションの関係

本研究の提案する設計原理の意味は、第3章で考察したように抽象概念の操作による思考の効率化である。すなわち、各部品に注目することによる計算量の爆発の回避を目的として、それらの集合である部分機能概念を操作の対象としたり、また、部分機能概念の操作における組合せ的探索を避けて近傍探索を行ったことであった。

本研究におけるこのような工夫は、Peirceの言うアブダクションの説明に対しては、無数にある設計解の候補を有限の候補に絞りこむメカニズムを提案したことになる。また、仮説推論の枠組みに対しては、仮説選択や仮説同定の順位を、距離として与えることになる。従って、本研究の提案する距離の導入による設計解への収束政策は、アブダクションのメカニズムのひとつの形式化であると言えよう。

6. 本論文の結言

本報告では、次の結果が得られた。

- (1) 設計知識へ距離を導入することは、抽象度の高い概念の操作の方法論としての意味もあることが分かった。
- (2) 設計知識上において距離を考えることは抽象概念の形成に関するモデルに対しても広く問題を提起していることが分かった。
- (3) 前報で導出した設計解収束政策は、アブダクションのメカニズムのひとつの形式化であることが分かった。

7. 本研究のまとめと今後の課題

7.1 本研究の方法論の適用範囲

既報での結果も含んで本研究の結論をまとめるに先だって、本研究は図8の例に示されるような設計知識

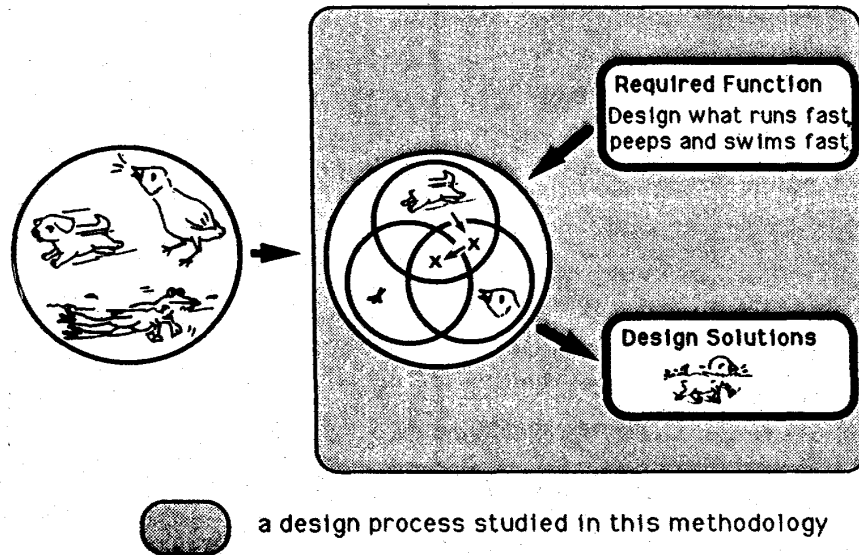


Fig. 8 Design Process studies in this research

や設計過程を対象にしていることを確認する。

まず、本研究の前提とする設計知識の性質は、要求仕様の表現される全体機能概念の集合と各全体機能概念に影響を与える部分機能概念の集合は既知であり、かつ、部分機能概念に関しては、(1) 設計対象物の分析的類別が可能で、(2) 各部分機能概念に対してその機能概念しか発現しない「部品」が存在することである。従って、本研究の提案する設計原理や設計方法論は、上記のように整理され得る設計分野を対象としており、かつ、整理された後の知識の操作に関するものであることを確認する。

次に、設計過程に関しては、一般設計学における「範例モデル」⁸⁾を基本としている。その意図は、部品や機能概念の合成や分解を陽に取り扱うことである。

7.2 本研究の結論

以上の前提の確認を踏まえて、本研究の主題である知識空間上の距離に注目することに対して、設計との関係を次のようにまとめる。

「設計における知識処理の特徴のひとつは、思考の効率化は期待されるが一般には演算性の悪い極めて抽象度の高い概念をあえて操作することであると考えられる。演算性の悪いはずの抽象概念が実際には設計者によって効率よく操作されていることに対して、設計知識の距離がひとつの重要な役割を果たしていることが分かった」

7.3 今後の課題

今後の研究の第1の課題は、与えられた仕様に対して注目すべき機能概念集合の選択を支援する仕組みを見い出すことである。この課題に対しては、大別して

2通りのアプローチがあると考えられる。第1は、既存の物理法則を調べることである。ただし、機能空間における概念は、属性空間における概念が抽象化されたものであると考える。第2は、先行事例の活用である。設計は、既に述べたように、機能概念という抽象度の高い概念を操作するところに特徴があると考えられる。しかし、あまりにも機能概念の抽象度が高くなるとはや全体機能概念と部分機能概念を関連させることは不可能になると思われる。このように考えると、思考の効率化に対して適切な抽象度が存在するはずである。この適切なレベルを経験のある設計者に学ぶという意味において、先行事例の活用は特に有効であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 田浦俊春, 吉川弘之: 距離の導入による知的設計支援方法論の構築(第1報)——設計における機能演算の数学的モデル, 精密工学会誌, 57, 4 (1991) 718.
- 2) 吉川弘之: 一般設計学序説, 精密機械, 45, 8 (1979) 906.
- 3) 田浦俊春, 吉川弘之: 距離の導入による知的設計支援方法論の構築(第2報)——概念設計過程の数学的モデルと機能空間の距離に注目した収束政策, 精密工学会誌, 57, 10 (1991) 1768.
- 4) 米盛祐二: パースの記号学, 勁草書房, (1989) 198.
- 5) 国藤 進: 仮説推論, 人工知能学会誌, 2, 1 (1987) 22.
- 6) 例えば, 田浦俊春: 機能空間への距離の導入による知的設計支援方法論, 東京大学博士論文, (1991).
- 7) D. E. Rumelhart et al.: Schemata and Sequential Thought Processings in PDP Models, in *Parallel Distributed Processing*, Vol. 2, MIT Press, (1986) 7.
- 8) 吉川弘之: 一般設計過程, 精密機械, 47, 4 (1981) 405.