



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

田浦, 俊春
吉川, 弘之

(Citation)

精密工学会誌, 57(10):1768-1773

(Issue Date)

1991-10-05

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90001538>





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——

田 浦 俊 春** 吉 川 弘 之***

A Methodology of Intelligent CAD using a Metric Space Concept
(2nd Report)

—A Mathematical Model of Conceptual Design Process and Convergence Policy—

Toshiharu TAURA and Hiroyuki YOSHIKAWA

The purpose of this study is to observe an ideal design principle with 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 the metric space. In the previous paper, the mechanism of function operation is modeled mathematically. In this paper, a mathematical model of conceptual design process is deduced and convergence policy to generate the design solutions is discussed from the viewpoint of a metric in function space. And a methodology of generating the component structures which satisfy the required functions is deduced based on these mathematical models. This methodology is a kind of generate and test methods, but it is distinct by paying attention to the metrized function space in searching for the starting point and refining the hypothesis. This paper also describes a computer system developed and applied for mechanical field.

Key words : intelligent CAD, design, design process, metric space, function, computer system

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。前報¹⁾では、一般設計学²⁾³⁾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、まず、前報の結果を踏まえて概念設計過程の数学的モデルの構築と設計収束政策の導出を機能空間上の距離に注目して行う。次に、これらの数学的モデルを基にして、既知の事例（組立品及びそれらの構成部品）から所望の機能を満足する部品構造を探索するアルゴリズムを導出する。最後に、機械分野への適用例を示す。

シンセシス問題は、生成検査法が一般的な手法として使われ探索問題として定式化されると言われている⁴⁾。本報において導出するアルゴリズムも基本的には生成検査法の枠組みにおける一つの解探索のアルゴリズムであるが、解探索の出発点の選択及び仮説の修正において機能空間上の距離に注目することに特徴がある。

2. 前報の結果

前報では、まず、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）が定義され（距1・義10）、その性質として、次の仮定が数学的に導出された。

* 原稿受付 平成3年1月23日。1990年度精密工学会秋季大会学術講演会（平成2年9月30日）にて発表

** 正会員 新日本製鐵(株)エレクトロニクス研究所（相模原市淵野辺5-10-1）

*** 正会員 東京大学工学部（東京都文京区本郷7-3-1）

† 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。

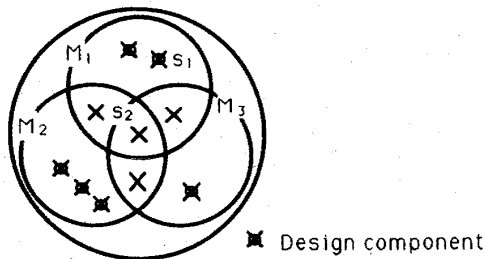


Fig. 1 Design component

（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．

3. 概念設計過程の数学的モデル

3.1 概念設計過程の数学的モデル

本章における議論は，次の定義から出発する．

（序・義12）設計とは，抽象概念空間上に示された領域に対応する属性（概念）空間上の領域を指定することである．

本論文では，設計解を大まかにとらえる空間，すなわち属性の項目として部品名に注目する空間を考える．まず，前報で定義された理想的機能概念集合（距1・義1）に対して，部品に関する下記の定義を設定する．

定義1 理想的機能概念集合 M の各機能概念に対して，実体概念集合 S の元で，その機能概念のみに属し他の機能概念に属さないものを，その機能概念の部品と呼ぶ．

例えば，図1において s_1 は機能概念 M_1 の「部品」であるが， s_2 はそうではないということである．「部品」の設計知識における意味に関しては，4.1節の②において更に詳しく述べる．なお，定義1の「部品」は，前報の例題で述べた拡張された構成要素のことである．

定義2 部品のべき集合を台集合とする離散位相空間を，理想的機能概念集合 M の部品空間 $(S_p, \tilde{T}_d)$ と呼ぶ．

定義3 概念設計過程とは，次の操作を順に組み合わせたものである．

phase 1 全体機能空間上に示された領域に対応する部分機能空間上の領域を指定する．

phase 2 phase 1 で指定された部分機能空間上の領域に対応する部品空間上の領域を指定する．

phase 3 phase 2 で指定された部品空間上の領域に対応する属性空間上の領域を指定する．

phase 4 phase 3 で指定された属性空間上の領域に対応する全体機能空間上の領域を指定する．

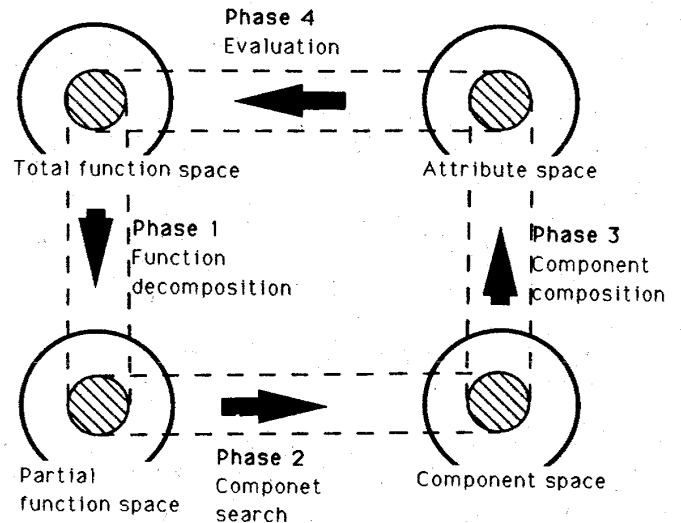


Fig. 2 A mathematical model of conceptual design process

ここで，phase 4 は（序・義12）の範囲においては設計過程に含まれるものではないが，設計行為には不可欠な過程であると考えられるのでここでは含めておく．

各 phase は，次のような操作である．

phase 1 は，機能概念の分解操作である．

phase 2 は，部品の探索操作である．

phase 3 は，部品の合成操作である．

phase 4 は，実体概念の評価操作である．

概念設計過程に関するモデルの概念図を図2に示す．

3.2 機能空間の距離に注目した設計解収束政策

定義3の概念設計過程を駆動させるための具体的な政策を考える．基本的な考え方は，文献3)で紹介されている範例モデルである．範例モデルとは，以下のようのものであった．

仕様 T が与えられていて， $T = T_1 \cap T_2 \cap \dots$ とする．

ここである解 s_1 を提案したところ，

$$s_1 \in T(s_1) = T_1 \cap T_2 \cap \dots \cap T_k \cap \bar{T}_{k+1} \cap \dots$$

となり， T_1 から T_k までの項目を充足するが T_{k+1} 以上は充足しないとする．次の提案 s_2 が，少なくとも

$$s_2 \in T(s_2) = T_1 \cap T_2 \cap \dots \cap T_{k+1}$$

を満たすとする． $s_1 \rightarrow s_2$ は有向点列の性質を満足する．ここでこのような s_1, s_2 などを範例（パラダイム）と呼ぶ．

ここで，問題となるのは $s_1 \rightarrow s_2$ を具体的に導く方法論である．文献3)の例題のように部分の機能がそのまま全体機能である場合は収束政策は容易であるが，一般にはそうではない．全体機能概念の観点から解に近付けさせるために，部分をどのように改善・改良したらよいかは，一般には求められていない．

本研究では、前報の仮定1が範例モデルの駆動源の基本に成り得ると考える。

仮定1を基本として、範例モデルの具体的な収束政策を次のように考える。 s_1 を階層の一段下の構成要素に分割するまでは、範例モデルに同じである。今回提案する政策では、構成要素のうちの幾つかを別の要素と交換する際に、とりあえず部分機能空間上で評価して s_1 に近い候補を選択する。ところで、「仮定1」の示しているのは、これらの候補は全体機能空間上において解に近い可能性があるということであって、有向点列として解に近づく方向であることは保証していない。そこで、これらの候補は、全体機能空間上で評価して、与えられた仕様に近づいていることが検証される必要がある。この検証の結果、解に近づいていることの確認できた候補を s_2 とする。これらの手順を繰り返し行うことで得られる点列は、解に収束する有向点列である。

4. 所望の機能を満足する部品構造の探索方法

4.1 本方法の対象とする機能概念の性質

前報及び本報における今までの議論では、設計に関するモデルを数学的な表現で議論してきた。設計解探索の具体的な方法論を導くにあたり、設計方法論の立場からの意味づけを行う。

① 機能概念の記述方法

本研究においては、実体とそれの発現する機能概念の関係は、集合論における元と類の関係である。従って、機能概念は注目している実体の属する類で記述される。

② 機能演算（合成・分解）の可能な知識構造

機能演算を可能とする設計知識構造は、本研究では定義1の「部品」の存在に帰着する。図3の例を用いて説明しよう。図3の右図において、例えば「鳴く」という機能概念に対しては、「鳥のくちばし」という部品が存在している。ここで注意すべきことは、「鳥のくちばし」は「鳴く」という機能概念のみを発現し、「速く走る」や「速く泳ぐ」という機能概念は発現しないことである。このように、各機能概念に対して、その機能概念のみを発現する「部品」が存在することが、本方法論の前提とする設計知識の構造である。前報で示したように、このような部品の存在を前提とすることで、機能演算を部品に関する合成・分解操作のなかに取り込むことが可能になっている。

③ 機能概念の抽象度

本研究では、属性（概念）や挙動（概念）と機能概念の関係を次のように区別して考える。

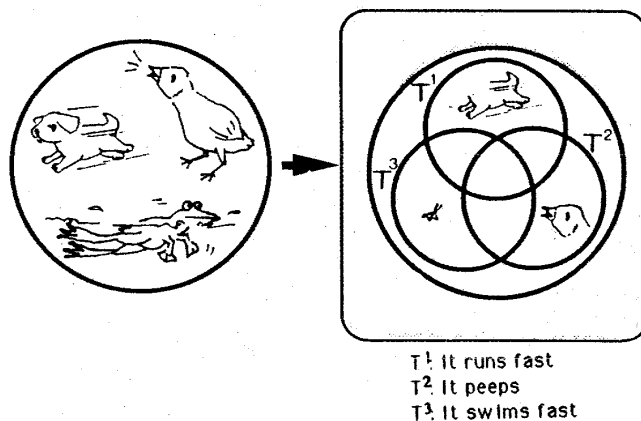


Fig. 3 An example of knowledge structure in this study

属性（概念）または挙動（概念）…属性や属性概念の定義は文献2)の定義に従う。ここで、挙動は属性の時間的変化とする。なお、属性概念や挙動概念は、実体概念の属性や挙動に注目して得られる類（実体概念の部分集合）である。

機能概念…機能概念は、数学的には属性概念または挙動概念に関する位相を弱くして得られる概念である。これを設計方法論の立場で表現すると、各組立品や各部品の発現する機能概念は、それぞれの属性や挙動からある規則に基づいて抽出された特徴ということになる。

このように、本研究では、機能概念は属性概念や挙動概念を抽象化して得られる概念であるとする。両者の抽象度に関する差は、部分と全体の関係を表現する（算術的）関数が求められるか否かを一つの目安と考える。従って、部品の変更が行われた後の組立品を含めて、各組立品の全体機能概念は各組立品の属性や挙動から抽出されるとする。

④ 機能概念の構造

機能抽出は複数の視点（view）より行われるとする。各viewは、互いに関係のある機能概念から構成される機能空間である。すなわち、全体機能空間や部分機能空間はある視点（view）より認識される一つの機能空間であると考え、実際の機能空間はそれらの複合であるとする。また、前報の例題で述べたように、実問題においては構成要素の接続関係に意味がある場合が多い。viewや接続関係を考慮に入れることで、部分機能概念は図4に示すように構造としてとらえられる。これを部分機能構造と呼ぶことにする。

4.2 部品構造探索のアルゴリズム

前章で提案された収束政策の特徴は、下記のようにまとめられる。

(1) 既知の事例から出発する。

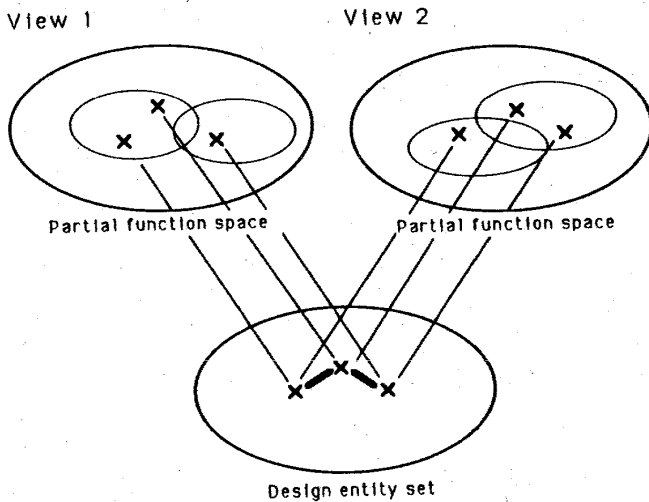


Fig. 4 Partial function structure

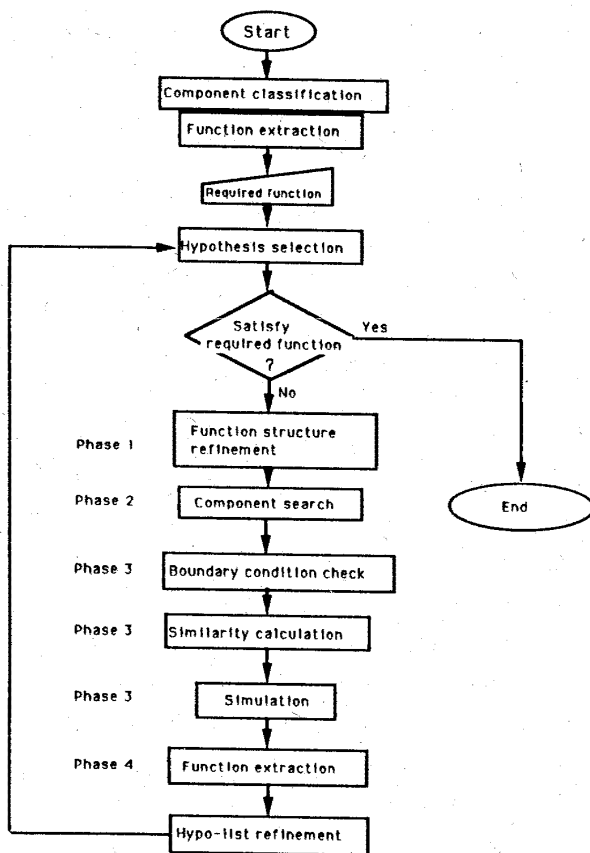


Fig. 5 Algorithm of searching for the part structures

(2) 仮説は、全体機能概念に注目して評価される。

(3) 仮説は、部分機能空間上の距離に注目して修正される。

事例に記述されている知識を操作の対象とし、定義3の概念設計過程のモデルを具体的に駆動するアルゴリズムを図5に示す。図中のPHASEの番号は定義3に対応している。

以下、いくつかのモジュールに関して説明する。

4.2.1 機能抽出部 (FUNCTION EXTRAC-

TION)

このモジュールでは、組立品や各部品の機能概念が知識ベースに記述されている規則を用いて抽出される。

4.2.2 部品分類部 (COMPONENT CLASSIFICATION)

本方法論では、同じような部品が重複して用いられないように、各部品は知識ベースに記述されている規則に従って分類される。

4.2.3 仮説選択部 (HYPOTHESIS SELECTION)

解として可能性のあるものを仮説リストとして管理する。解探索のスタート直後における仮説リストは、組立品の事例のリストに同じである。ある事例を部分変更して得られたものは仮説として仮説リストに登録される。ここでは仮説は実体概念としてとらえられ、全体機能空間の評価において要求機能の満足度（類似度）の最も高い仮説が選択される。類似度の考え方は、前報に同じである。

4.2.4 部分機能構造修正部 (FUNCTION STRUCTURE REFINEMENT)

選択された仮説に関して部分機能構造の修正を行う。ここでは、仮説は設計実体概念（距1・義7）としてとらえられ、部分機能空間上で操作が行われる。その操作の基本的考え方は以下の通りである。なお、近傍の評価に際しては、前報と同様に部分機能概念の順番にも意味があるとする。

① 部分機能構造の修正は、各 view ごとに行われる。

② 部分機能構造の修正は、部分機能空間における近傍探索である。部分機能空間では、仮説はそれを構成する部品の発現する部分機能概念の積として表現されているので、その近傍探索の具体的な操作は以下のようになる。

- ・部分機能概念の追加
- ・部分機能概念の変更
- ・部分機能概念の削除
- ・部分機能概念の順序の変更

③ 各 view ごとに求められた修正案は、追加・変更・削除ごとに組み合わせられる。組合せの結果、仮説の修正案としての部分機能構造が得られる。

4.2.5 部品探索部 (COMPONENT SEARCH)

修正された部分機能構造に対して、それを満足する既知の部品の組合せを探索する。

4.2.6 類似度計算部 (SIMILARITY CALCULATION)

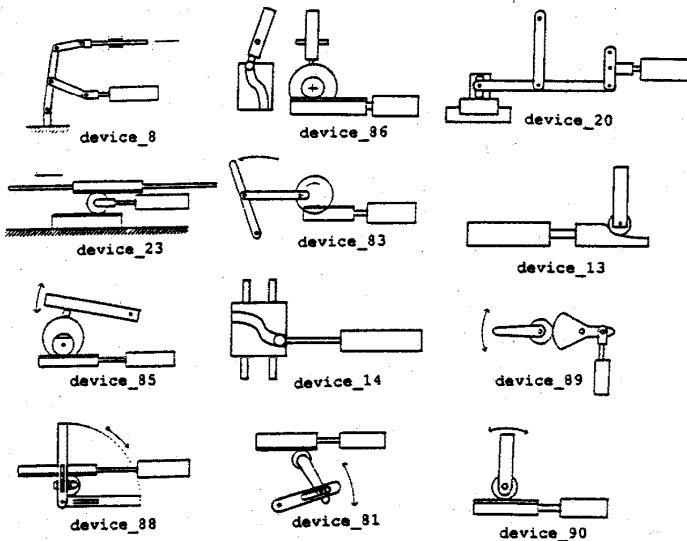


Fig. 6 Machines in data base

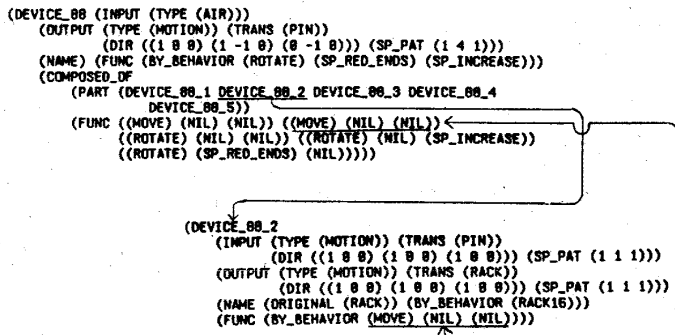


Fig. 7 A description of an assembly and its components

シミュレーションを行う優先順位が、修正前の仮説に対する部分機能空間上の類似度で与えられる。

5. 例題

5.1 システムの試作

前章で導出したアルゴリズムに基づいて、システムを試作した。本システムは、LISP (KCL) を用いて Sun ワークステーション上にインプリメントされている。

5.2 機械分野への適用

運動に関する所望の機能を満足する部品構造の探索を試みる。機械の性質としてはエネルギーフローに注目する。エネルギーフローは、入力側から出力側へ単純に連続した状態を取り扱う。

5.2.1 データベース

データベースには、図6の各組立品とそれらを構成する部品に関して、それらの属性や挙動が図7のようにフレーム形式で記述されている。図7を例にデータの内容を説明する。スロット“INPUT”には入力に関する情報が、“OUTPUT”には出力に関する情報

があらかじめデータとして記述される。そこには、入力点と出力点における運動の初期・中期・終期の3つの時刻における挙動が記述される。例えば、スロット“DIR”には3次元座標系における運動の方向が書かれ、スロット“SP_PAT”には各時刻の運動の速さが記述される。速さの基準としては、入力点における中期の速さを“1”の速さとし各点の各時刻における速さが記述される。なお、本システムで取り扱う属性や挙動は、運動の方向や速度に関するものであり幾何的な図面情報は取り扱わない。

本実施例においては、組立品の全体機能概念や各部品の部分機能概念は、3つのview (視点) により評価される。第1の視点は、運動が直進運動であるか、あるいは回転運動であるかであり、第2の視点は、運動の両端において減速が行われるか否かであり、第3の視点は運動が増減速されるか否かである。これらの機能概念は、属性や挙動からあらかじめ知識ベースに記述されている規則を用いて抽出される。

図7の例においては、抽出された機能概念は、組立品や各部品のスロット“FUNC”のスロット“BY-BEHAVIOR”に挿入されている。

5.2.2 知識ベース

知識ベースには、動的な設計知識のなかで設計対象に固有なものが書かれる。知識ベースには、(1) 機能抽出に関する知識、(2) 部品の分類に関する知識、(3) 拘束条件解決に関する知識、(4) シミュレーションに関する知識が記述されている。

機能抽出に関しては、例えば、スロット“DIR”が初期・中期・終期の各時刻とも等しければ直進運動であるとみなすというような知識が記述されている。

拘束条件解決に関する知識としては、両端の部品に関する条件と、互いに隣合う2つの部品の間の条件が記述されている。例えば、互いに隣接する2つの部品の接合可能性の判定としては、前の部品の“OUTPUT”の“DIR”が、次の部品の“INPUT”の“DIR”に座標回転の操作で一致させることが可能かどうかを調べるようになっている。

組立品のシミュレーションは、運動の方向と速度パターンに関して行う。運動の方向に関しては、エネルギーフローの上流側の部品の“OUTPUT”の運動の方向“DIR”を、下流側の部品の“INPUT”の方向に一致させる座標変換の回転角を求め、新しい座標系における下流側の部品の“OUTPUT”の運動の方向を計算するような知識が記述されている。

5.3 本システムの動作例

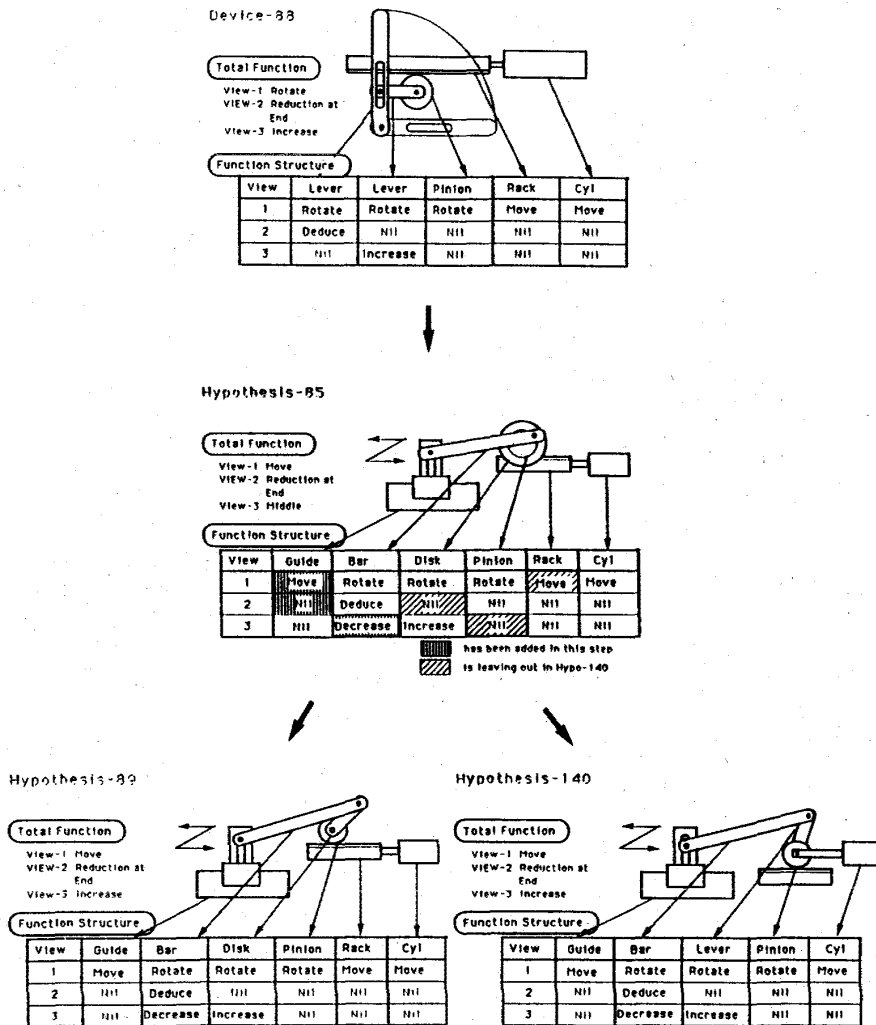


Fig. 8 Transformation of component structure and partial function structure

今回の実施例では、直進運動でかつ両端減速機能と増速機能を備えている部品構造の探索を試みた。今回の例では、DEVICE_20, DEVICE_13, DEVICE_14を出発点とする探索に3度失敗した後に、DEVICE_88を出発点として、中間仮説としての組立品HYPOTHESIS_85を経由して、所望の機能概念を満たす部品構造を2例導出している。解に達するまでの部品構造及び部分機能構造の推移を図8に示す。なお、今回の実施例は図7に示される属性や挙動を対象にした所望の機能のみに注目した探索であり、幾何的な構造として実現可能であるか否かは別途評価する必要がある。図8においても、システムの示す解は既知の部品の列であり、構造図面は筆者の作図である。

本方法論では、ある仮説の修正は、その近傍にある部分機能構造の生成から始まる。具体的な方法は、4.2.4項の②に示した操作である。図8を用いて例説しよう。DEVICE_88からHYPOTHESIS_85への変更では、部分機能空間の近傍探索の結果の中で、部分機能概念の追加によって得られた仮説が新たな候補と

して生成されている。また、HYPOTHESIS_85からHYPOTHESIS_140への変更では、図中で斜線の引かれた部分機能概念の削除により部分機能構造が修正されている。このように、本方法論における仮説の修正は、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。このような政策は、仮説の修正（部品の追加・削除・交換）に対して、具体的でかつ、その候補の部品構造に依存しない一般的な政策を与えている。例えばDEVICE_88からHYPOTHESIS_85への変更では、約半数の部品が一度に変更されている。これらの部品の交換の方法が、本方法論では、部分機能構造の近傍探索という操作を中心に与えられているのである。

全体機能概念としては、解に対する類似度は、DEVICE_88が2/3で、HYPOTHESIS_85が5/6である。すなわち、部分機能構造に注目することで解に収束する有効点列が得られる状況が示されている。

6. 結 言

本報では、次の結果が得られた。

- (1) 概念設計過程の数学的モデルを、機能演算（合成・分解）の数学的モデルを基本にして構築した。
- (2) 設計解の収束政策を、機能空間上の距離に注目して構築した。
- (3) 既知の事例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。
- (4) システムを試作し、機械分野への適用例を示した。

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) 吉川弘之: 一般設計過程, 精密機械, 47, 4 (1981) 405.
- 4) 小林重信: 知識工学 (人工知能シリーズ10), 昭晃堂, (1986) 77.