

設計とオントロジー

溝口理一郎 来村徳信
{miz,kita}@ei.sanken.osaka-u.ac.jp
大阪大学 産業科学研究所

1. まえがき

知的な設計支援システムでは、システムアーキテクチャの優秀さもさることながら、システムが持つ「知識の質」がきわめて重要な役割を演じる。これは筆者等が提唱している「内容指向研究」[溝口 96]の一つの論拠となっている。一般に知識ベースシステムの性能は対象とする問題解決の構造を反映したアーキテクチャとそれに対応した知識の蓄積(知識ベース)で決定されるが、問題解決固有のアーキテクチャの貢献は実行時の性能よりも知識ベース構築やその保守に対して顕著である。実行時の性能はほとんど知識ベースの質、すなわちどのような知識を使うことができるかに掛かっている。その意味では依然として Feigenbaum の「Knowledge principle」は生きている。

しかし、問題は従来の様なルールベースに大きく依存した知識ベースであっては無意味であることである。なぜならルールベース技術は単なる知識表現であって、「知識の内容」に関しては何も言及しない、言い換えれば、どのような知識を蓄積すれば良いかに関する示唆は大きくないからである。確かに経験則をルールで表現してエキスパートシステムは一時成功した。しかし、よく考えてみればルールは本質的には「条件→結論(行為)」のみを示唆するものであり、それを埋める知識は多種多様であってよく、知識の組織化に対する貢献は小さい。

さて知的設計支援システムであるが、その知識ベースはどのような知識を保有しているべきであろうか？この問はルールかフレームかという知識表現の議論ではなく、内容指向研究が答えなければならない本質的な問である。本稿は、筆者らの内容指向の研究方針に基づいてこの問に答えようとして努力してきた研究活動の中間成果をまとめたものである。

次節では内容指向 AI 研究の基盤となるオントロジー工学、及びタスクオントロジーとドメインオントロジーの二つのオントロジーについて簡単に触れる。3節では設計に固有なドメインオントロジーである、機能のオントロジーの必要性について論じる。4節では機能のオントロジーに関する我々の研究成果を概観する。ここでは、機能を振る舞いに grounding するメカニズムとしての機能モデル記述言語 FBRL、機能分解を洗練した結果得られた方式・方法オントロジー、そしてメタ機能オントロジーを詳述する。最後に、それらの3種類の機能オントロジーを用いて開発中である再設計支援システムを紹介する。

2. オントロジー工学[溝口 97][溝口 98]

2.1 オントロジーとは

本来、「オントロジー」は哲学の用語であり、「存在に関する体系的な理論(存在論)」という意味を持っている。しかし、人工知能研究者の間では以下の二つの意味で使われることが多い。

- (1) 「概念化の明示的な記述」[Gruber, 93]. ここで概念化とは、対象世界において興味を持つ概念とそれらの間の関係とを指す。
- (2) 「人工システムを構築する際のビルディングブロックとして用いられる概念/語彙の体系とその理論」[Mizoguchi, 93].

いずれにせよ、『情報処理が対象とする世界のモデル構築者がその世界をどのように「眺めたか」、言い換えるとその世界には「何が存在している」と見なしてモデルを構築したかを明示的にしたものであり、その結果得られた基本概念や概念間の関係を土台にしてモデルを記述する事ができる』、オントロジーとはそういうものとして捉えることができる。その結果、多くの人が合意し得る基本的な概念の体系を作ることができ、それに基づいて構築された知識ベースは、従来の知識ベースが持つ、共有・再利用性の欠如という大きな問題点の解消に貢献すると期待されている。オントロジーの性質や期待される貢献に関する詳細な議論は文献[溝口 98]に譲る。

2.2 タスクオントロジーとドメインオントロジー

オントロジーには少なくとも (1)タスクオントロジーと (2)ドメインオントロジーの2種類がある。ドメインオントロジーは通常オントロジーと呼ばれるものに対応するものであって、対象とする世界のオントロジーである。一方、タスクオントロジーはエキスパートシステムに深く関わる概念であり、問題解決過程を対象世界として見て構築されたオントロジーであり、「問題解決過程に存在する概念と関係を領域独立に抽出し、組織化したもの(とその理論)」をいう[Mizoguchi, 93]. 従って、タスクオントロジーに現れる語彙・概念を用いて、対象とする問題解決過程を領域独立に記述することができる。

タスクオントロジーは記述した問題解決過程の各フェーズにおいて必要となるドメインの概念の役割をも

明示化するが、その役割の下にドメインに固有の概念を抽出・組織化したものがドメインオントロジーであるといえる。

オントロジーの数多くの特長の中で重要なものに、「人間とコンピュータとが対象理解を共有する」というものがある[溝口 98]。これはオントロジーを何らかの方法でコンピュータに記述する事による「コンピュータの対象世界理解」と、自然言語に現れる語彙レベルでオントロジーを記述することによる「人間の対象世界理解」とが可能になる事を意味している。

3. 機能のオントロジー

設計問題では、ドメインオントロジーのトップレベルオントロジーに属する概念として「機能」や「振る舞い」という概念が存在する。これらの概念は第3のオントロジーに属するとも言えるかもしれない。機構設計、プラント設計、電気回路設計などのいわゆる「領域」に依存しない振る舞いや機能の概念があり、それらはかなり一般的に論じることができるからである。もちろん、「往復運動」、「トルク伝達」など領域に固有の振る舞いや機能が存在する。しかし、「駆動」、「変換」など同時にかなり一般性のある機能概念も存在する。機能にはいくつかのカテゴリがあってそれらはどのような関係になるのか？機能と振る舞いの関係はどのようにになっているのか？機能と振る舞い概念は領域に独立か？このような基本的な疑問に答えることを通して機能に関する理解を深めるために機能のオントロジーを構築することは本研究の目的の一つになっている。

一方で、設計支援システム構築という立場から見て「機能」の概念は極めて重要である。実際、これまでに機能に関する多くの研究がなされてきた[Chandra 96][Iwasaki 92][Lind 94][笹島 96][Umeda 90]。IJCAI, AAAI, ECAI という人工知能に関する大きな国際会議では毎回のよう機能に関するワークショップが開かれてきたことがそれを表している。言うまでもなく、人工物は「構造、振る舞い、機能、目的」という4つの異なった概念レベルで捉えることができることはよく知られている。また、要求仕様は目的や機能の概念を用いて記述されることが多く、設計行為の本質は「機能レベルの要求から構造レベルの記述への写像」として捉えられることは周知の通りである。このように「機能」は設計における本質的な概念である。

機能に関する理解は設計に関する理解を深めることに貢献する。なぜなら、

- (1) 要求仕様の獲得や理解のシステム化を考えたとき、そこで使われる用語と概念をシステムが理解することが不可欠となる。これは上に述べたオントロジーの効用の一つである、「人間とコンピュータの『機能』に関する理解の共有」を本質的に要求することになる。
- (2) 機能を実現する「もの」を設計するとき機能に関する理解、すなわち機能と振る舞いの関係の理解が必要となる。
- (3) 新しい機能を持つ「もの」の設計を行うには機能レベルでの推論が不可欠である。
- (4) Design Rationale の多くの部分は機能レベルの記述である。
- (5) システムが持つ一貫した全体性は機能レベルでの統合性によって与えられている。これが意味するところは大きく、哲学的な意味での人工物の全体性の理解には「機能的統合性」無しには考えられない。からである。以下ではこのような意味で重要な「機能」のオントロジー的考察を行った結果について述べる。

4. 機能と振る舞い、方式分解、メタ機能

4.1 基本概念

まず初めに、我々の基本的立場であるデバイスオントロジーに関わる基本概念を整理する。研究の最終ゴールは「Ontology of artifacts(人工物オントロジー)」の構築にある。遠大な計画であるので、「設計というタスクから見た」という制限の下で研究を進めている。デバイスオントロジーとは、対象が集中定数系で表現できて「部品」といった、現象を起こす「主体」の集合で記述できることを前提としている考え方、及びその概念の体系である。部品が明確な電気回路や発電プラント、「処理」概念が中心である生産プロセスなどはこれらの概念で表現できると思われる。しかし、すべての対象がこれで表現できるというわけではない。

Entity と Role は対比される概念であり、前者は客観的な存在物、後者はそれらが使用されるプロセスの途中で担う「役割」である。Role 概念の中心に存在する概念として、作用を及ぼす動作を行う「主体」(Agent)と、その操作の「対象物」(Object)がある。ある主体(agent)の他動詞的振舞い(transitive behavior;例えば「溶かす」とはその作用を受ける対象物(object)の変化(change)を主体の観点から概念化したものである、と定義される。自動詞的振る舞い(intransitive behavior;例えば「回転する」)は対象物を必要としない主体の変化を主体の観点から概念化したものである。中立的な振る舞い概念は「状態」の時間変化として定義される。Agent の他動詞的振舞いを目標(goal)のもとで解釈したものが機能(function)である[笹島 96]。自動詞的振る舞いは直接機能に解釈されることはないが、「シャフトが回転することによってトルクを伝達する」という例から理解されるように、「トルク伝達」という機能の「手段」になる場合に機能概念形成に関与する。この2種類の振る舞い概念は重要であり、他動詞的振る舞いは4.2 で述べる振る舞い(1)に対応し、自動詞的振る舞いは振る舞い(2)に対応する。

ある機能がある部分機能(sub-function)の系列によって達成される(設計行為では機能分解と呼ばれる)とき、その部分機能の系列(の概念化)を方法(method)と呼ぶ。一方、その機能分解の際に考慮された原理・理論や起こることが意図されている現象(phenomena)、構造、使われる部品などを、方式(way)と呼ぶ。機能の方式はその機能を実現する振る舞いや構造の一部分への参照である。つまり、設計行為において実現した

- Necessity:対象物の必要性
- FuncType:達成の様式

ここで、「振る舞い」が持つ二つの意味について述べておく。

- (1) 装置の入出力関係. すなわち, 装置が入力に対してどのような出力を出すかということ.
- (2) 装置が入力を出力に変換するためにした何か(どのように変換したかということ).

筆者らは, 装置の振る舞いは, それを合成することによってシステムのシミュレーションをする事ができるべきものであると言う考えに基づいて前者の立場を取っている. この立場表明は暗黙的であることがあり, 議論を混乱させる原因の一つとなっている. 熱交換器を例に取る. 熱交換器の振る舞いはコンテキストによらず常に一定であり, 「高温側から低温側への熱の移動」である. 一方, O-Focus として「温度」, P-Focus として「高温側流体側の入出力ポート」に注目すればその機能は高温流体を『冷却する』となるが, 同じ O-Focus で P-Focus として「低温流体側」に注目すれば低温流体を『暖める』となる.

図2に機能語彙の階層を示す. 図3に計算機表現を示す. 外見は機能語彙(概念)の単なる is-a 階層に見えるが, 実際は各概念の意味は FBRL モデルで定義されており, シミュレーション可能な振る舞いレベルで Grounding されている. また, 語彙選択も FT を中心とした FBRL モデルの概念で定式化されているので, コンピュータ理解可能となっている. 機能のオントロジーの核となるものである.

4.3 機能分解と方式

本節では「方式」と「方法」を機能分解を規定する情報として定義する. 一般に, ある機能は部分機能(sub-function)の系列によって達成され, トップダウンな設計は基本的には全体機能からそれを実現する部分機能を求めること(機能分解)と部分機能からそれを実現する構造を求めることによって行われる. 図4に示すように, 部分機能の系列(の概念化)を『方法』, 機能分解の際に考慮された背景知識の概念化を『方式』と定義する. 例えば, 「加熱する」ためには, 「熱を外部で発生」させて「その熱を伝える」という方法を取ったとき, それは『外部熱源方式』であると言える.

方式は, 機能分解の際に考慮されるさまざまな情報によって規定される. 例えば, 部分機能の振る舞いを規定する原理・理論(theory)や起こることが意図されている現象(phenomena), 構造, 使われる部品などである. これらは, その機能を実現する振舞いや構造の一部への参照であることが多い. つまり, 設計行為において実現したい機能を分解して行く際に, 機能を実現する振舞いと構造の一部が徐々に決定されている. あるひとつの機能分解に対して方式の概念化は一通りであるとは限らず, また実際の設計行為において方式のどの部分が先に決定されるかには高い自由度がある.

一般に, ある機能を実現する方法(方式)は複数ある. 方式はそのインデックスとして機能すると思われる. ある程度高い抽象度で機能とその方式を整理しておけば, 設計を支援するシステムにおいて, 異なるドメインや異なるライフサイクルに対して有効な知識を記述することができると思われる. 図5は加熱方式分解の一部である.

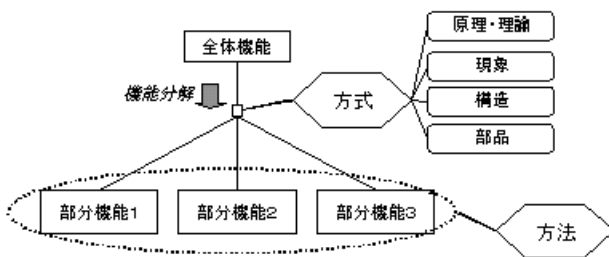


図4 方式と方法

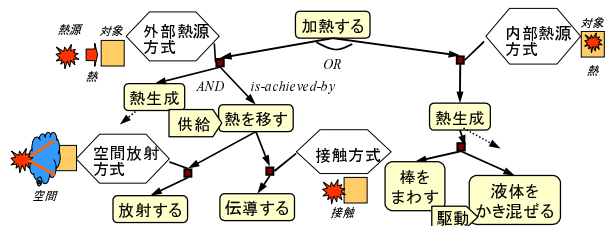


図5 加熱方式の機能分解の例

4.4 メタ機能

同じ機能を発揮する部品でも, その部品がシステムに組み込まれた理由は等しくはない. 図6は気化器を含む化学プラントと石油精製プラントの例である. 例にある熱交換器の普通の意味での機能は「入力流体を気化して出力する」機能を発揮している事は同じである. しかし, その「気化」の下流の装置に対する役割は異なっている. 前者は, 反応槽が高温に保たれているので, 液体のまま流体が入力されると突然沸騰(突沸と呼ばれる)して危険な状態に陥る事を「防止」しているが, 後者は, 蒸留塔による石油精製が連続的に行えるように, すなわち連続蒸留を「可能」にしているのである. この, 「防止」や「可能」という機能はこれまで論じてきた機能とは異なり, 流体等の具体的なオブジェクトに対する機能ではなく, 他の「機能」に対する貢献を概念化したものである.

Keuneke らは機能を達成の方法や発揮されるための初期条件, 持続する時間などの観点から,

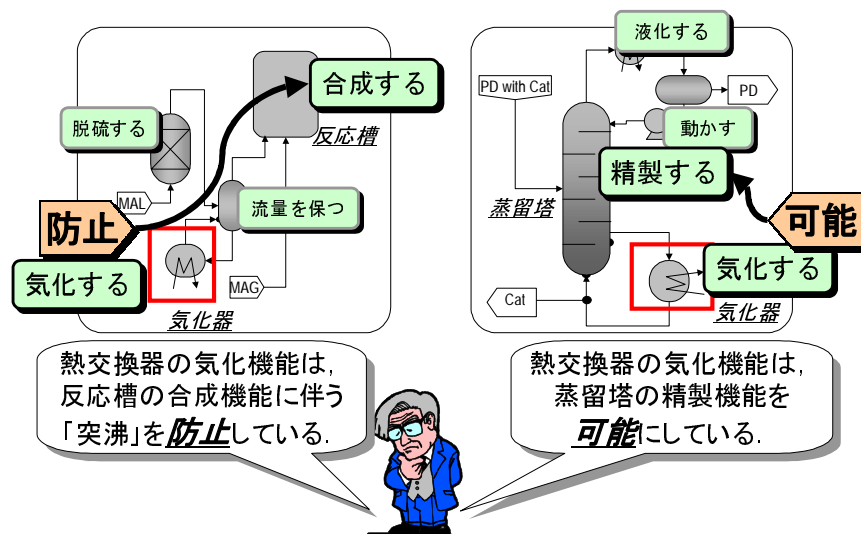


図6 メタ機能の必要性

- 達成(ToMake)
- 維持(ToMaintain)
- 防止(ToPrevent)
- 制御(ToControl)

の4つに分類し、対象の個々の部品モデルに記述することにより、対象システムがどのように目標状態を達成するかという知識を表現することを提案している[Keuneke 91]。しかし本来、「防止」という概念は、ある機能が他の機能がなんらかの異常状態に陥ることを抑制する役割を果たしているという関連性が分かって初めて認識されるものである。対象の部品モデルを再利用することを考えた場合、Keuneke らのように、他の機能との関連性を考慮しなければ認識されない概念を対象の個々の部品モデルに機能として記述することは、部品モデルの暗黙性を増し再利用性を低くするとともに、対象システムの不適切な理解につながる可能性がある。

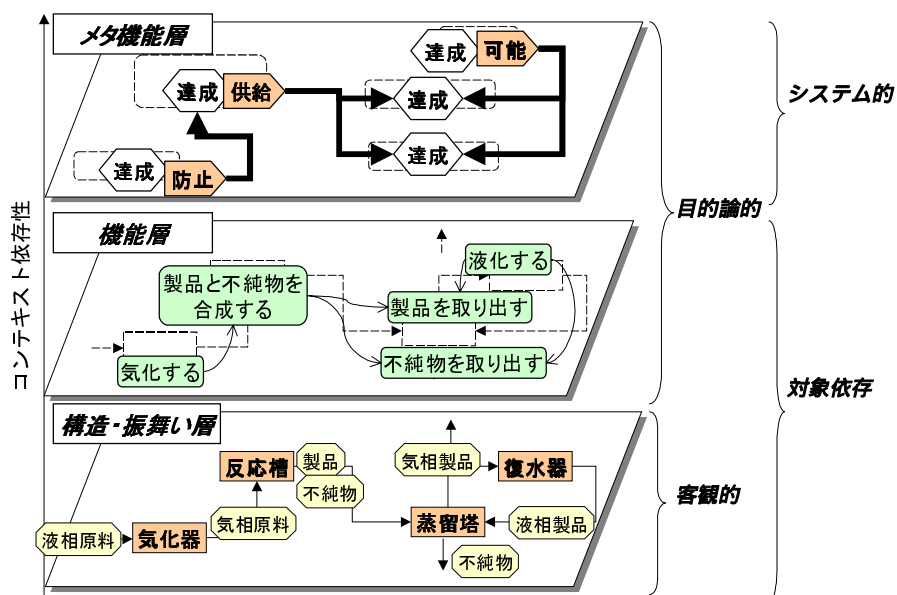


図7 機能の階層構造

そこで筆者らは「防止」「可能」といったある機能が他の機能に対して果たす意味のある役割を「メタ機能」として概念化し、個々の部品の果たす機能の概念とは分離して取り扱う方針をとる。メタ機能は、システムとして

全体の機能を構成するための機能の存在意義を明確に表現する概念である。対象システムにおける種々のメタ機能を分類し、それを同定する枠組みを開発することは対象を理解するタスクに貢献する。

メタ機能の詳細に入る前に、相互に関連の深い基本概念である、構造、振る舞い、機能、メタ機能の関係を化学プラントを例にとりて図示して説明する(図7参照)。「構造」は装置の配置、及び装置の接続関係であり、振る舞いは構造に沿った各装置の入出力間の因果関係で捉えることができる。そしてそれらの解釈はいかなるコンテキストにも影響されない客観的な存在である。一方、機能は振る舞いを目的の下で解釈したものであり、上の例では、製品を「取り出す」、不純物を「除去する」のように同じ分離動作が異なった機能であると解釈されている。また、メタ機能は、「気化機能は合成機能で不都合が生じることを『防止』する」などの機能が他の機能に対して果たしている役割を概念化している。そして、機能とメタ機能は共に目的論的であることが構造・振る舞い概念との大きな相違点である。しかし、別の観点から見れば、構造、振る舞い、そして機能は対象とする現象に直接関与するという意味で対象依存であるが、メタ機能は対象世界の存在物には言及せずに、系がシステムとして意味のあるものとして振る舞うために必要な機能間の相互依存関係を概念化したものである。以下に代表的なメタ機能の定義について述べる。

(1)供給

ある機能にとって働き掛けの対象となる入力対象物が存在していることは必須であり本質的な条件である。このようにある機能 F にとって働き掛けの対象となる入力対象物のことを「原料対象物」と呼ぶ。機能 Fa が、機能 Fo に原料対象物を存在させる役割を果たしているとき、機能 Fa は機能 Fo に対して「供給」というメタ機能を発揮しているという。例えば、ポンプの「水を動かす機能」がボイラーの「水を気化する」機能に対して果たす役割や、燃焼炉の「熱エネルギーを生成する」機能がボイラーの「加熱する」機能に対して果たす役割は「供給」であるという。

(2)駆動

機能にはその実現のためにその内部プロセスを駆動するエネルギー(駆動エネルギーと呼ぶ)の存在が不可欠なものがある。このような機能 Fo に対して機能 Fa が駆動エネルギーを存在させる役割を果たしているとき、機能 Fa は機能 Fo に対して「駆動」というメタ機能を果たしているという。例えば発電プラントでは、ボイラの「エネルギーを生成する」機能は「シャフトを回す」機能を「駆動」しているという。

(3)可能

一般に、機能を発揮するために必須の条件がある。それらの存在は機能の発現を可能にすることから必須の条件をもたらす機能は「可能」メタ機能があるように思われる。上述の二つのメタ機能はいずれも Fo にとって必須のものであり、「可能」メタ機能の範疇に入る。しかし、既に述べたようにそれらは更に詳細な概念として「供給」「駆動」概念として認定される。可能メタ機能を直接定義することは困難であるので、本論文では Fo にとって必須の条件を整える機能の内、供給と駆動以外のメタ機能を「可能」メタ機能と定義する。

人間が「可能」と捉える典型的な例である、蒸留システムに組み込まれている復水器の「液化」機能およびリボイラの「気化」機能が注目する属性である「相」が蒸留塔の「分離・精製」機能の内部プロセスに対して果たす役割について考える。まず、蒸留塔の内部プロセスについて説明する。蒸留塔内は上昇する蒸気と下降する液とが接触する構造をもつ。蒸気は液と接触すると一部凝縮するが、その際に高沸成分(沸点の高い成分)がより多く凝縮し、残りの蒸気は軽沸成分(沸点の低い成分)に富むようになる。またその際に放出される蒸発潜熱により液が加熱され、液の一部が蒸発する。この時、軽沸成分のほうがより多く蒸発し、上昇する蒸気はますます軽沸成分に富むようになり、下降する液は高沸成分に富むようになる。つまり塔頂から復水器によって液化された液相の対象物、塔底からリボイラによって気化された気相の対象物が入力されてはじめて、このような内部プロセスが起動して精製機能が発揮される。このように、いわば機能 Fo を実現するプロセスを起動するため必須の役割をもつ属性に対し、それを望ましい値に変化させている機能 Fa で、「駆動」でも「供給」でもない機能が「可能」というメタ機能を果たしていると認識される。

全てのメタ機能を図8の右上に示しておく。図8はここまで論じてきた「機能」に関する議論をまとめたものである。まず通常の「機能」、すなわち具体的なものやその属性に影響を及ぼす機能には操作対象(エネルギー、オブジェクト、情報)に応じて3種類のものがあり、そのいずれにも抽象度に関する is-a 階層が存在する(図中左下)。また同じ機能に対してその実現方式を考慮した一種の part-of 階層(is-achieved-by)(図中右下)が存在する。それらの上に単独機能の抽象化概念である「機能 type」とメタ機能の「決定木階層」がある。これら4種類の機能階層が「機能オントロジー」を構成している。

5. 機能オントロジーに基づく再設計支援システム

本節では機能オントロジーを利用した再設計支援システムについて述べる。このシステムは何らかの不具合を持つ既存の設計物の改良設計を行うものであり、設計情報と各部品の振る舞いに関する情報を入力として機能レベルの修正を施して改良設計案を提案する。ここで中心的な役割を果たすのが、設計物の機能理解サブシステムと再設計案生成サブシステムであるが、紙面の都合でオントロジーに直接関係の深い前者のみについて概要を述べる。

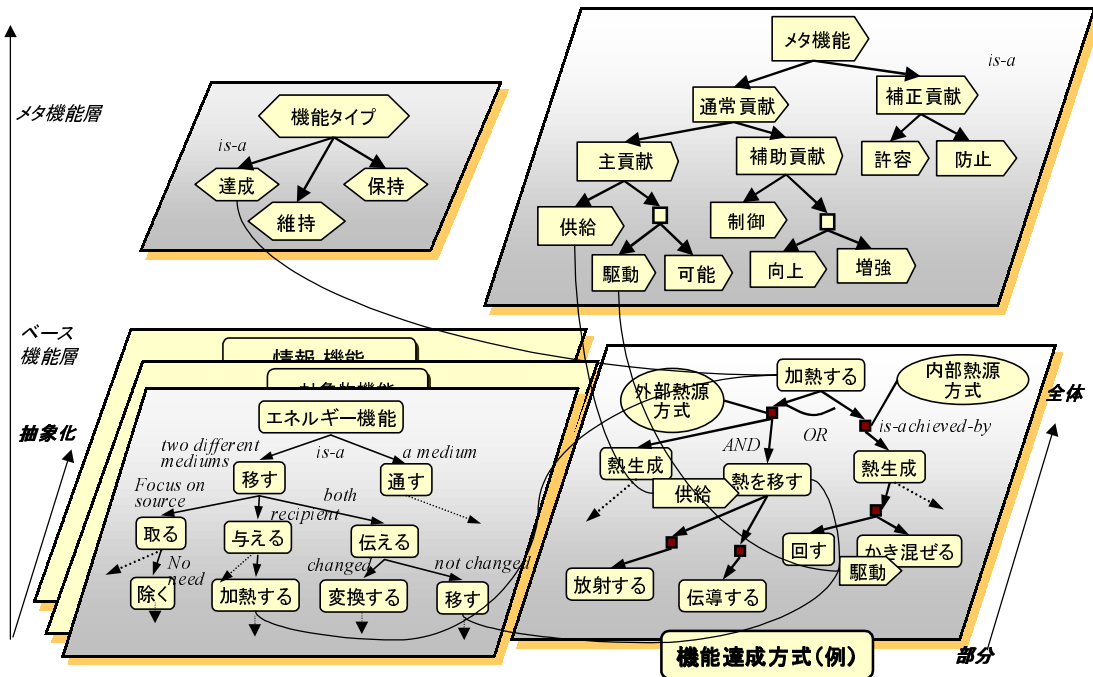


図8 機能オントロジーのまとめ

5.1 機能理解

機能理解の最初のステップは、振る舞いから機能への写像であり、それを支えるのがFBRLモデルである。3つのFT (O-focuss, P-Focuss, Necessity)は振る舞いを解釈の際に必要な軸を与えるものである。ここで重要なことはそれらの値は十分少ない数の離散値であるので、構造と振る舞い記述が与えられれば random に値を生成して可能な機能モデルを全て生成することができることである(通常10～数10のオーダーで収まる)。かつ、生成された FBRL 機能モデルは機能語彙に変換されるが、そこで対応する機能語彙がない場合にはそのようなモデルは現実には人間が理解する機能解釈ではないということを意味するので棄却される(ここでは機能語彙が完備であることを仮定しているが、これは十分現実性のある仮定である)。ここまでで、各装置についてあり得る機能語彙が複数生成されたものが得られる。

次の過程は同一の階層レベルにおける機能同士の依存関係の同定である。ここでメタ機能が重要な役割を演じる。因果レベルで把握された機能間の依存関係を概念化して、メタ機能として同定することによって機能グループの同定を正当化することができる。既に触れたが、複数の装置が機能レベルでグループを組むと言うことはある意味で、そのグループを「全体」として見る「意味づけ」が存在することを示唆するが、メタ機能の「システムの統合性」はそれを保証する。このグループ認定は次の階層化処理においても用いられる。なお、ここまででの処理で装置の機能解釈の多くは曖昧さは解消される。

最終段階である階層関係同定過程はそれらから意味のある機能を選択すると同時に機能の階層構造を構築することである。ここでの問題は典型的な階層化パターンの整理・蓄積と階層化に当たって考慮すべき階層構築の基準である。前者として、既存のシステムを解析して機能語彙を用いて記述された多くの機能分解パターンを収集している。後者については人がシステムを認識する際の階層構造認定基準と整合性がなければならない。そこで、我々はいくつかのシステムを解析することによって3種類の階層化ヒューリスティクスを準備している。

- (1) 基本前提 (階層構造は上位機能と下位機能からなる...)
- (2) 選考性基準
- (3) グループ構成基準

以上の数種類の機能知識と3段階の処理に従って与えられた設計例の機能理解を行うことができるシステムの設計が修了しており、一部実現もなされている。

5.2 再設計案生成

改良設計案生成の中心課題は、不具合原因同定、不具合の除去(原因の除去だけでなく原因からの因果連鎖の遮断などを含む多様な問題解決戦略とそのや主に機能レベルで行われるが、そのための知識の整備が更に重要となる。紙面の都合で詳細は省略する。

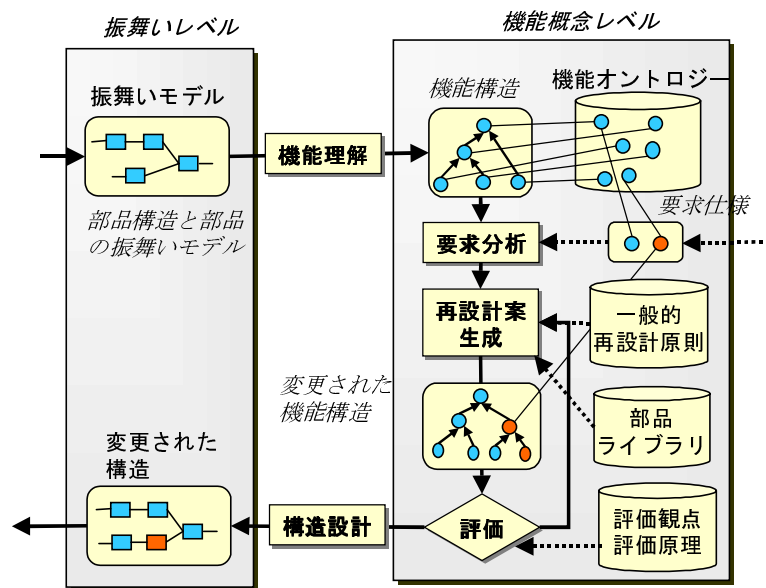


図9 再設計システムのブロック図

6. むすび

本論文では内容指向研究の立場から設計における機能のオントロジーについて述べた。ルールベースから脱却した知識ベースシステムがオントロジー工学で武装して進化しつつあり、コンピュータによる「知識処理」は21世紀おいてますます重要となることは明らかである。今、「設計」という最も創造的な活動における知識を解明し、その工学的なモデルを構築することは将来の「設計と知識処理の融合」に貢献する。本研究がその完全なる融合への一歩となれば幸いである。

＜参考文献＞

- [Chandra 96] Chandrasekaran, B. and Josephson, J.R.: Representing Function as Effect: Assigning Functions to Objects in Context and Out. AAAI-96 Workshop on Modeling and Reasoning with Function, 1996.
- [Iwasaki 92] Iwasaki, Y. and Chandrasekaran, B.: Design Verification Through Function- and Behavior-oriented representations - bridging the gap between function and behavior -. Proc. of AI in Design '92, pp.597-616, 1992
- [Keuneke 91] Keuneke, A.M., A device representation: the significance of functional knowledge, IEEE Expert, 24, pp.22-25, 1991.
- [Lind 94] Lind, M.: Modeling Goals and Functions of Complex Industrial Plants, Applied Artificial Intelligence, 8, pp.259-283, 1994
- [Umeda 90] Umeda, Y., et al.: Function, Behavior, and Structure, AI in Engineering, pp.177-193, 1990.
- [Gruber, 93] Gruber, T.: A translation approach to portable ontology specifications, Knowledge Acquisition, 5(2), pp.199-220, 1993,
- [古崎 99] 古崎晃司 他, オントロジー構築利用環境の開発－「関係」及びロール概念に関する基礎的考察, 人工知能学会研究会資料, SIG-KBS-9803-3, pp.13-18, 1999
- [溝口 96] 溝口理一郎, 形式と内容 - 内容指向人工知能研究の勧め -, 人工知能学会誌, Vol.11, No.1, pp.50-59, 1996.
- [溝口 97] 溝口理一郎 他, オントロジー工学序説, 人工知能学会誌, Vol.12, No.4, pp.559-569, 1997.
- [溝口 98] 溝口理一郎, オントロジー工学の試み, 1998 年度人工知能学会全国大会, AI-L13, 1998.
- [Mizoguchi 93] R. Mizoguchi: Knowledge acquisition and ontology, Proc. of KB&KS'93, Tokyo, pp.121-128, 1993.
- [笹島 96] 笹島他, 機能と振舞いのオントロジーに基づく機能モデル表現言語 FBRL の開発. 人工知能学会誌 Vol.11, No.3, pp.420-431(1996)
- [武田 94] 武田英明, 富山哲男, 吉川弘之, 実験的手法に基づく設計知識とその利用に関する分析, 精密工学会誌, Vol. 60, No. 3, pp.422-426, 1994
- [Tomiya 94] Tomiyama, T., From general design theory to knowledge-intensive engineering, Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, Vol. 8, No.4, pp.319-333, 1994.
- [Kitamura 99] Y. Kitamura and R. Mizoguchi, An Ontology of Functional Concepts of Artifacts, AI Technical Report 99-01, I.S.I.R., Osaka University, March, 1999.
- [Kitamura 99] Y. Kitamura and R. Mizoguchi, An Ontological Analysis of Faults, AI Technical Report 99-02, I.S.I.R., Osaka University, March, 1999.