

特集論文

オントロジーに基づく機能的知識の体系的記述とその機能構造設計支援における利用

Systematic Description of Functional Knowledge based on Functional Ontologies and Its Use for Supporting Design of Functional Structures

來村 徳信
Yoshinobu Kitamura
大阪大学 産業科学研究所
The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
kita@ei.sanken.osaka-u.ac.jp, <http://www.ei.sanken.osaka-u.ac.jp/~kita/>

笠井 俊信^{†1}
Toshinobu Kasai
(同 上)
kasai@ei.sanken.osaka-u.ac.jp

吉川 真理子
Mariko Yoshikawa
(同 上)
riko@ei.sanken.osaka-u.ac.jp

高橋 賢^{†2}
Masaru Takahashi
(同 上)
takahashi@ei.sanken.osaka-u.ac.jp

古崎 晃司
Kouji Kozaki
(同 上)
kozaki@ei.sanken.osaka-u.ac.jp

溝口 理一郎
Riichiro Mizoguchi
(同 上)
miz@ei.sanken.osaka-u.ac.jp, <http://www.ei.sanken.osaka-u.ac.jp/~miz/>

keywords: functional modeling and reasoning, design knowledge, knowledge sharing, ontology

Summary

In conceptual design, a designer decomposes a required function into sub-functions, so-called functional decomposition, using a kind of functional knowledge representing achievement relations among functions. Aiming at systematization of such functional knowledge, we proposed ontologies that guide conceptualization of artifacts from the functional point of view. This paper discusses its systematic description based on the functional ontologies. Firstly, we propose a new concept named “way of achievement” as a key concept for its systematization. Categorization of typical representations of the knowledge and organization as is-a hierarchies are also discussed. Such concept, categorization, and functional ontologies make the functional knowledge consistent and applicable to other domains. Next, the implementation of the functional ontologies and their utility on description of the knowledge are shown. Lastly, we discuss development of a knowledge-based system to help human designers redesign an existing artifact. The ontology of functional concepts and the systematic description of functional knowledge enable the supporting system to show designers a wide range of alternative ways and then to facilitate innovative redesign.

1. はじめに

工学的設計における概念設計段階においては機能概念が大きな役割を果たす [Pahl 88, Chandrasekaran 93, 梅田 97]. 例えば, トップダウンな概念設計では, 与えられた要求機能をそれを達成できる部分機能に分解することがしばしば行われる (機能分解と呼ばれる) [Pahl 88, 梅田 97]. その結果として構成される機能の全体 - 部分階層は, 設計物がどのように要求機能を達成するかということの基本的方針を表す. ひとつの機能を達成する方法にはさまざまなものがあるので, 設計者は多くの選択肢

からその目的にあわせて適切なものを選択している. そのような行為は機能を達成する方法に関する知識を用いていると考えられる. このような機能の間の一般的関係を規定する知識をここでは機能的知識と呼ぶ.

しかしながら, このような機能的知識は一般に暗黙的で明示化されていないことが多い. さらに, 一般性と一貫性を持って記述することは容易ではない. 実際の知識記述はアドホックになりがちで, 製品の領域や学問領域に依存していたり, 一貫性がないものが多い. 例えば, ある学会の出版している専門書における接合の方法の分類は, 1段の分類において分類の観点が異なっているため一貫性がなく, 部分機能の方法の分類を同じ分類木に混同してしまっている. さらに, 多くの分類が互

^{†1} 現在, 岡山大学 教育学部

^{†2} 現在, 大阪大学大学院 工学研究科

いに関連性を明示することなくなされている。

筆者らは、このような機能的知識を体系化する枠組みを目指して、拡張デバイスオントロジーと機能概念オントロジーを提案している [來村 02]。これらのオントロジーの主要な効果は機能的知識を記述する際に現れ、記述に用いられる概念とそれが満たすべき規約を提供することで、対象の捉え方と知識の内容を制約する役割を果たす。その結果、記述された知識の一貫性と再利用性が向上する効果が期待できる。このようなオントロジーの利用方法はオントロジー全般に一般的なもので、メタモデル的役割と呼ばれる [溝口 99a]。筆者らはそのようなメタモデル的役割に注目し、オントロジーの構築とそれに基づく知識やモデルの記述を支援するオントロジー構築・利用環境「法造」の開発を進めている [古崎 01]。

本稿では機能オントロジーに基づいて実際にどのような機能達成の方法に関する知識を記述できるかを述べることを通じて、機能オントロジーの利用とその効果について議論することを目的とする。

まず、記述対象となる機能達成の方法に関する知識について詳細な議論を行う。別稿 [來村 02] で機能達成階層について述べたが、それをさらに詳細に検討し、機能達成に関する知識をとらえる際の中核概念として「方式」概念を提案する。次に、機能達成知識の組織化について検討し、方式概念に基づいた is-a 階層とその他の木構造を分類する。

次に、このような理論的考察と別稿 [來村 02] で述べた機能オントロジーの法造上での実装について議論し、知識の記述に役立つことを示す。法造は機能オントロジーの実装に特化していない一般的なツールであるが、機能オントロジーを法造上で定義することで、機能的知識を記述する環境として用いることができる^{*1}。

最後に、記述された方式知識を用いて可能になる機能構造設計支援について述べる。ここでは、設計者が概念設計段階において要求機能を達成する方式を探索することを、さまざまな方式知識を提示することで支援することが可能であることを示す。知識を利用する設計支援システムにおいてはオントロジーの効果は知識記述に貢献することを通じた間接的なものである。つまり、オントロジーに基づくことで記述される知識が一貫性と再利用性を持つことによって、異なる領域の幅広い方式知識を利用することが可能になる。

2. 機能モデルの枠組み [來村 02]

拡張デバイスオントロジーに基づく工学的設計物モデルの枠組み [來村 02] においては、モデルは大きく構造・振る舞いレベルと機能レベルに分かれる。「構造」とは装

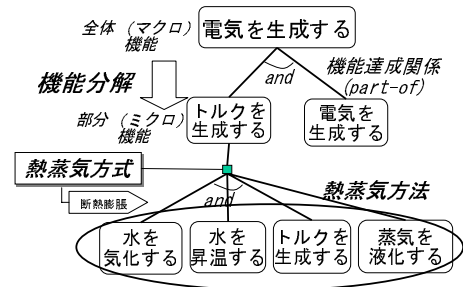


図 1 機能達成階層の例 (発電プラント)

置 (部品) と対象物の存在とこれらの間の接続関係 (接続トポロジー) をさす。構造はさらに記述のグレインサイズによってマクロ - ミクロ (全体 - 部分) の階層を構成する。「振る舞い」とは部品に入出力される対象物の変化を指す。

一方、「機能」は振る舞いを目的論的に解釈した結果であり、「(ベース)機能」は装置の対象物に対する作用を目的論的に解釈した結果である。さらに、それぞれのベース機能は他のベース機能に対する依存 (貢献) 関係を表すメタ機能を果たしている。

装置のベース機能は複数集まって、全体としてより大きなグレインサイズの機能を達成していると認識される。これを機能達成関係という。この関係によって、最下層が最小グレインサイズの装置の機能であり、システム全体の機能を頂点とするような機能達成階層 (一般に、木構造) が構成される。つまり、機能レベルの対象のモデルは機能達成階層とそれらの各 (グレインサイズ) 階層における相互の関係を表すメタ機能の集合から構成される。これを対象の機能構造と呼ぶ。

3. 機能達成階層における方式概念

ある設計物の機能達成階層は概念設計における機能分解 [Pahl 88] の結果を表しており、機能分解 (展開) 木とも呼ばれる。機能分解とは実現したい機能をそれを達成できる部分機能の列に展開することをいう。例えば図 1 は発電プラントの機能達成階層の上位部分を示しているが、これを要求機能である発電機能を与えられて、それをよりグレインサイズの小さい「(シャフトの)回転トルクを生成する」と「(回転トルクから)発電する」という部分機能に分解 (展開) した結果であるとみなす。一般にこのようなトップダウンな概念設計では、機能を直接実現することができる部品に結びつけることができるまで、この機能展開を繰り返す。

しかしながら、機能分解は機能レベルで閉じているわけではなく、設計プロセスの研究において設計者が機能分解を行っている時には構造や振る舞いが参照されることが指摘されている [武田 94]。また、単純な機能分解 (達成) 関係はどのような部分機能列によって全体が達成

*1 逆に言うと、特化したインタフェースなどを持たないため必ずしも (特にオントロジーになじみがない人にとって) 使い勝手がよいとは言えない。オントロジーが知識記述にもたらす基本的効果を示すことが主目的であることをご理解いただきたい。

されるかを表しているが、なぜそのような達成が可能になるのかを表していない。

我々は、「機能達成方式」概念の導入によってそれらを表現することを目指す。まず、ある機能が部分機能の系列によって達成される（機能達成関係がある）とき、その部分機能の系列（の概念化）をその機能の「機能達成方法」と呼ぶ。一方、「機能達成方式」とはある機能達成方法がそのマクロ機能を実現できる根拠となるような物理原理や理論、起こることが意図されている現象などを概念化したものを指す*2。図1においては2段目の機能分解は、例えば、熱（断熱）膨張現象に基づく熱蒸気方式として概念化できる。

方式で言う原理は、方法に基づく理論的な裏付けであり自然現象や構造などを表す。ある機能を達成するためある方式を採用したときに現れる性質の多くは用いられる原理の性質に起因している。例えば、熱蒸気方式を採用したときに「圧力の差が大きい」という性質は、その機能達成原理である断熱膨張によって説明できる。

つまり、方式概念とその定義を構成する達成原理モデルは、設計時に機能分解に伴って振る舞いや構造の一部が徐々に決定されていくという段階的設計プロセスを表現することができる。また、ある機能達成方法を選択した際の不具合を早い段階で検出することができる。

4. 一般的機能達成方式知識の体系的記述

一般に、ある機能を達成する方法にはさまざまなものがある。概念設計における機能分解を行っている設計者は、要求機能を達成できる方式の中から、設計物の要求仕様やなんらかの価値基準に合わせて、適切な方式を選択している。このときには機能を達成する方式に関する一般的な知識を用いていると考えられる。本節では、機能概念オントロジーと「方式・方法概念」によって可能になる機能達成方式知識の体系的記述について述べる。

4.1 機能達成方式知識の記述

ある対象における機能達成関係を一般化して、一般的に成り立つ知識として記述することができる。このような機能達成関係の知識は、まずその方法に関する記述として、実現したい機能とそれを達成できる部分機能の列が記述される。部分機能間は基本的には AND の関係で、さらに構造的・時間的な制約関係が存在する。

機能概念オントロジーは（機能達成）方式知識の記述に用いられる概念を提供する役割を果たす。まず、達成すべき機能と部分機能は機能概念オントロジーのベース機能概念を用いて記述される。このことにより統一された概念集合に基づいて知識を記述することができ、相互

運用性が向上する。さらに、部分機能間の制約として、構造や時間的なものに加えて、部分機能間に存在しなければならない協調関係を機能レベルで表現するメタ機能を用いることを可能にする。

機能達成関係に関する知識は、このような達成方法の記述に加えて、前節で述べた方式に関する記述を含む。つまり、方法に基づく理論的な裏付けである原理と、原理を使うことによって生じる性質、原理を使うために必要な制約などが記述される。方法と方式の両方を含む記述を、以下では方式を含んでいることに注目して、機能達成方式知識と呼ぶ。

4.2 方式知識の組織化とその分類

ある機能を達成する方法にはさまざまなものがあり、それぞれ異なった性質を持っている。方法を適切に記述したり選択したりするためには、このような多数の方式知識を適切に組織化する必要がある。しかしながら、第1章で述べたように、機能達成知識を組織化することは容易なことではない。前節で述べた方式概念が表す達成原理は機能達成の本質的属性を表すと考えられることから、機能達成知識を適切に組織化する鍵となる。方式概念に基づくことで、達成知識を図2と図3に示す4種類に分類することができる。

§1 方式 is-a 階層

ある機能を達成する方式群をその原理の一般 - 特殊関係に基づいて抽象階層化したものである。原理が方式の本質的属性を決定することから、視点に依存しない本質的分類である is-a 階層とみなすことができる。また、方式を適用する設計対象の領域に対する依存性が低く、ある機能を実現するためにとりえるさまざまな方式を分類している。

機能達成方式知識の例として、「(物理的)力を(物体上に)存在させる(加える)」機能の達成方式知識の is-a 階層とそれらの部分機能を図2に示す。図中では長方形が方式概念を表し、角丸長方形がその方式を達成するための部分機能を表す。「力を存在させる」ための方式には、例えば「摩擦力方式」があり、力を存在させたい(加えたい)対象物 A に対して作用物を利用した摩擦力を加えるという原理の元に、部分機能として「A と作用物を接触させる」などの図中に示す部分機能を達成することで、「力を存在させる」ことができる。一方、衝撃力方式では「作用物を A に衝突させる」ことなどで同じ機能を発揮する。さらに、この方式を衝突が間欠的か継続的かによって、瞬間衝突方式と継続衝突方式に特殊化することができる。前者はさらに「対象物落下方式」などに特殊化できる。

§2 方式特性木

方式を属性の値(特性)に応じて分類していわゆる決定木の形に構造化したものである。つまり、木構造の葉ノードがひとつの方式を表し、中間ノードが属性値(に

*2 方法 (method) と方式 (way) というそれぞれの概念のラベルは呼び分けるための便宜上のものである。主張したいことは2つの概念を区別でき、それが有益であるということである。

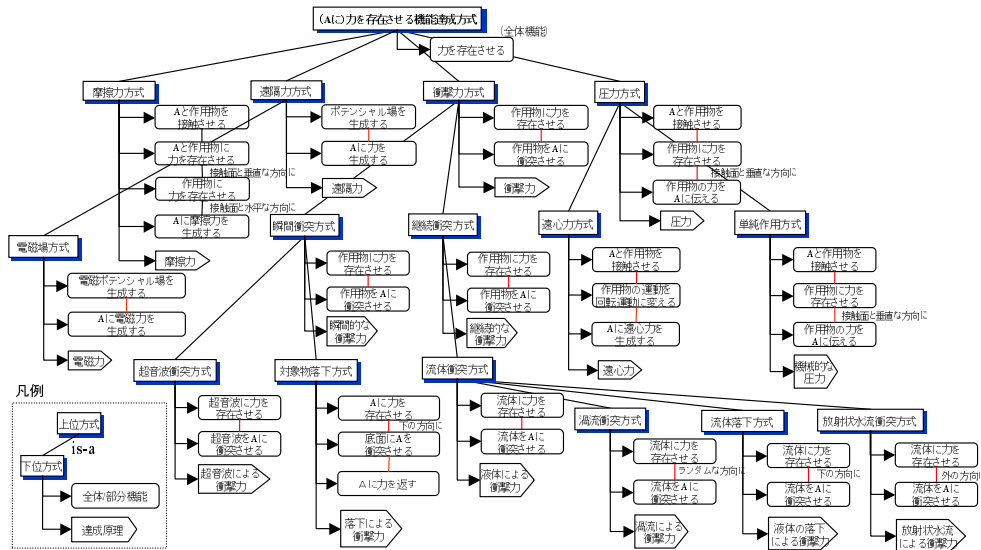


図 2 「(物理的)力を存在させる(加える)」機能の達成方式知識の is-a 階層

に対する限定)を表す。例えば、図 3(a) は、図 2 と同じ「力を存在させる(加える)」機能の方式を、力を加える対象物への影響の度合いに従って、分類したものである。このような分類は現在の設計コンテキストで重要な属性に依存して、さまざまなものが存在する。

この方式特性木は同じように方式を分類しているため is-a 階層と混同されやすい。is-a 階層との違いは、方式の分類に用いられる基準が方式にとって本質的であるかどうかである。一般に、オントロジーにおける is-a 階層の分類はその本質的な属性に基づいていなければならない[溝口 99b]。機能達成関係を規定する方式概念にとって達成の原理は本質的であるので、原理に基づく分類は is-a 階層であると考えられる。他の特性による分類は視点に依存して変動し、また中間ノードが適切な方式概念に対応しないと考えられる。実際、多くの方法の分類はこの特性木であることが多い。また、一貫性を欠く分類の原因も視点依存性にあることが多い。このような方式特性木は視点独立な is-a 階層で記述された知識から、視点に応じて動的に生成すべきであると考えられる。

§ 3 対象固有方式木 (機能達成階層)

ある対象で用いられている方式を記述したもので、2 節で述べた機能達成階層そのものである。図 3(b) が示すある洗濯機の対象固有方式木(部分)のように、一般的な機能分解木に、機能分解の際の背景情報を表す方式の明示的記述が加わったものである。

なお、一般に、ある人工物に注目したときに、その人工物(製品)がどのように機能を達成しているかということに関する製品機能の達成階層と、その人工物をどのようにして作ったかということを表す生産機能の機能達成階層を作ることができる。後者はその人工物を生産する装置の機能階層を表しており、これらの 2 つの機能階層は一般に全く異なるが、現れる機能概念の体系は同一のものを用いることができる。しかしながら「接合する」

といった静的な製品機能の場合には、その達成原理(例えば、化学結合)によって、それを生産する際の生産機能はかなり決定されるために達成方式が製品と生産で共通になり、混乱を生じやすい。

§ 4 汎用機能分解木

この木は従来からある機能分解木と同型であり、ある機能を達成するための方法を、方式概念を付随させながら一般的に列挙したものである。一つの機能に対してそれを達成する複数の方法(方式)が OR で現れ、その部分機能がさらに展開される。図 3(c) は、ある対象物に「力を存在させる(加える)」という機能の汎用機能分解木の一部を表している。

この構造化は根にあたる機能と葉にあたる機能を結び一つの枝に現れる方式の集合を概念化する見方もできる。このような概念は基本となる方式概念(一段の機能分解を表す)を複合したものである。一般的に見られる達成方式の多く(例えば、アーク溶接方式や図中に示すパルセータ方式)はこの複合方式概念であり、適切に体系化するためには単独の方式概念ではなく、複数の方式概念の組み合わせとして記述する必要がある。

4.3 方式知識と機能概念

一般に方式知識を記述する際には多くの混乱が生じている。その原因のひとつに装置がなにを(what)達成するのかということの概念化と、どのように達成するのか(how)ということの概念化の区別が難しいということがある。例えば「溶接する」と「構造締結する」は一見なにを達成するのかが違うように思われるが、本質的には対象物の位置関係を制約する構造を作ると同じ効果を持ち*3、それを達成する原理(前者は溶融、後者は塑性

*3 それぞれの場合における対象物の変化は異なるが、この機能的観点からはそれらの違いは無視できる(注目されない)。また、ここでは「接合する」を生産装置の機能として捉えている。

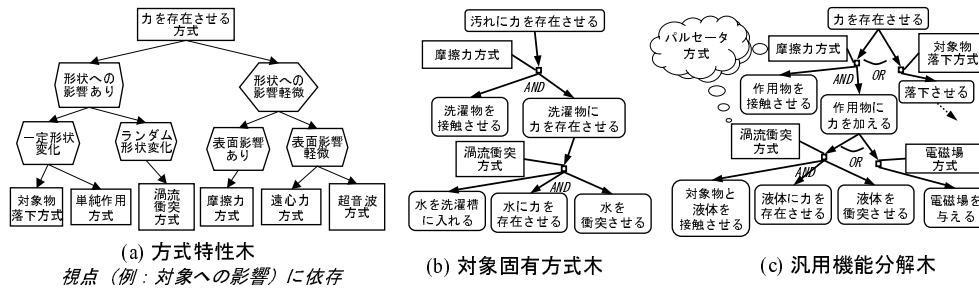


図 3 機能達成方式の is-a 階層以外の構造化の例

加工) が本質的に異なることができる。このように機能の定義を入出力関係で捉え、達成の原理を方式として概念化する本枠組みに基づくことで、両者を異なる機能概念ではなく、同じ「接合する」という機能を達成する異なる方式概念である、と整理することができる。

すなわち、機能概念の定義を明確にして機能にまつわる what と how を分離することによって、方式という概念を「切り出し」、独立した概念として扱うことが可能になっている。したがって、方式概念の is-a 階層 (図 2) は、機能概念の is-a 階層 (別稿 [來村 02], 図 6) と本質的に異なったものである。さらに、前者は達成すべき機能ごとに階層を構成するのに比べて、後者は機能の対象に応じたごく少数 (我々の現在の整理では、物体、エネルギー、力・運動、情報の 4 つ) の階層である。

実はこの二つの概念の混同には、動作に関わる概念では is-a と part-of 関係の区別が一般的に難しいという深い問題が横たわっている。機能の is-a 関係と達成関係 (part-of 関係の一種) の区別は機能が 1 対 1 の場合は難しい。実際、機能概念の定義は本質的にそれによって達成する状態 (変化) に依存してなされるため、機能の is-a 階層における任意の下位の機能は上位の機能を達成すると解釈することができる。したがって、機能の達成階層を記述する際に、is-a 関係を混入することが可能である。これは達成階層の意味論に適合してはいるが、方式知識の整理という目的を考えると、混入させるべきではない。つまり、1 対 1 の関係において本質的效果が他方に含まれる場合は、is-a 関係として扱うべきで、達成関係として扱うべきではないと考えられる。

5. 機能オントロジーの法造上での実装

別稿 [來村 02] で述べた機能オントロジーとここまで述べてきた方式概念は、筆者らが開発中であるオントロジー構築・利用環境「法造」のオントロジーエディタ [古崎 01] 上で実装されている。本節では、法造上で機能オントロジーがどのように定義されているかを述べる。

「法造」のオントロジーエディタは、オントロジーの基礎的考察 [溝口 99b] に基づいて開発が進められている、オントロジーの構築とそれに基づいたインスタンスモデルの記述ができる計算機環境である。基本的にはフレー

ム型の構造をサポートしており、オントロジーにおける概念 (クラス) フレームはその部分 (part-of) または属性 (attribute-of) を表すスロットを持つ (フレームを表すノードと角折れ線で結ばれた枠で図示される)。インスタンスモデルにおいては、スロットには部分概念または属性のインスタンスが入る。それらに関する制約として、クラス (クラス制約と呼び、スロット枠の右横に図示される)、数 (スロット枠の左)、公理が記述される。また、それらがそのフレームにおいて果たす役割をロール概念と呼び、スロット枠の上に表示する。特定のロールを担った部分概念や属性のインスタンスを表す概念はロールホルダー概念と呼ばれ、スロット枠の中に表示される。また、概念は全体概念 (Wholeness Concept) と関係概念 (Relation Concept) に大別される。理論とシステムの詳細については別稿 [溝口 99b, 古崎 01] を参照して頂きたい。

5.1 拡張デバイスオントロジーの厳密な定義

別稿 [來村 02] で述べた装置や対象物の概念を法造で記述すると図 4 のようになる。まず、装置 (Device) は振る舞い関係 (Behavioral-Relation, 図中右の関係概念画面内) において、振る舞い (Behavior) を行う主体 (Agent) の役割を果たす物理的実体物 (Physical-Entity, 図中左の全体概念画面内) のロールホルダー概念として定義される*4。この関係において作用を受ける役割を果たす物理的実体物は対象物 (Object) と呼ばれ、装置の入出力時点における状態 (IO-State) を持つ。装置はさらに他の装置と接続関係 (Connection) と全体 - 部分関係 (Assembly-Relation) を持つ*5。

振る舞いは IO-State 間の遷移と定義され、対象物 (とその属性) が満たすべき制約条件を表す振る舞いモデル (Behavioral-Model) によって制約される。さらに、振る舞いは目的論的解釈関係 (Teleological-interpretation) によって、機能 (Function) と結びつけられる。この関係は解釈情報 (FT-Set) によって制約される。

*4 物体の is-a 階層にも基本概念としての「装置」概念が存在するが、ここではそれとは別のロールホルダー概念としての装置概念を定義している。
*5 このときのロールホルダー概念が部品 (Component) であり接続口 (Port) を部分として持つが、本稿では部品と装置を区別せずに装置と呼ぶ。

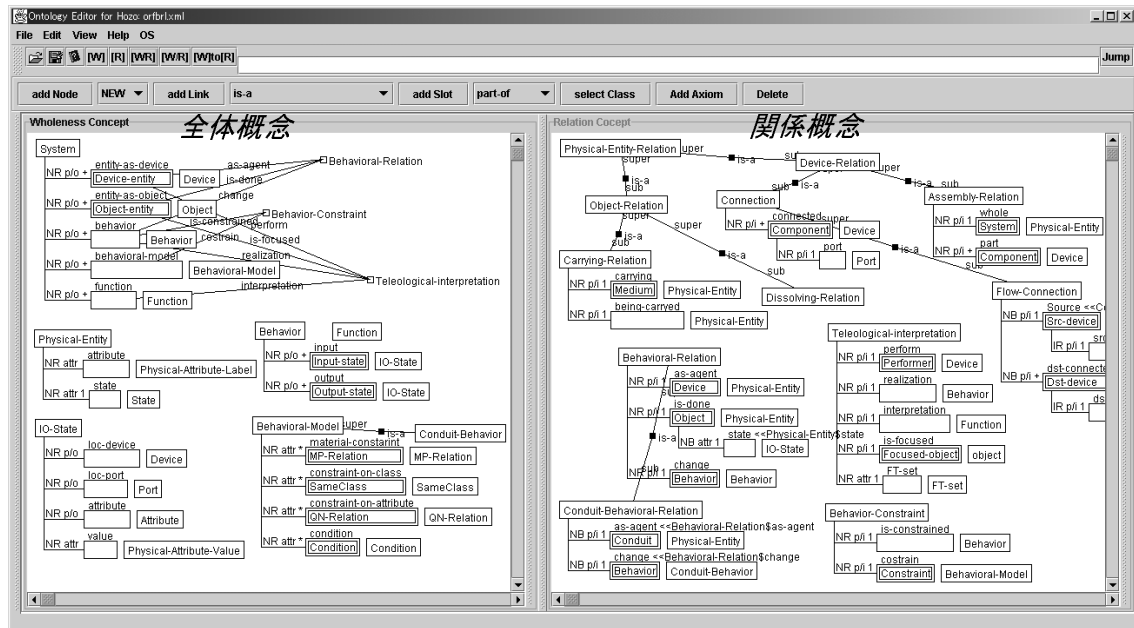


図 4 拡張デバイスオントロジーの厳密な定義 (部分: 法造の表示画面)

導管 (Conduit) は装置を特殊化したものであり、「通す」という振る舞いのみを行っているものと定義される。また、媒体 (Medium) 概念は媒体関係 (Carrying-Relation) において他のものを運ぶ役割を果たす物理的実体物のロールホルダー概念として定義されている。

このように定義することで、別稿 [来村 02] で述べた機構系における導管と媒体の縮退を正確に表現することが出来る。つまり、シャフト (物理的実体物) を導管と見なした場合、同時に運動の媒体としての役割も果たしている。このことをシャフトのひとつのインスタンスを部品スロットと媒体スロットの 2 つに入れることによって表現することで、同一のインスタンスがそれぞれの役割に応じて異なる部分概念 (ポートや入出力状態) を持つことが表現できる。

以上のような機能オントロジーの定義は、オントロジー的に正確であるが、モデルや知識を記述する際には煩雑な作業を記述者に要求することになる。また、モデルを記述する際にはロールの割り当てが終了しており、モデル利用時にロールが変化することはあり得ないため、現在の実装ではモデルを記述し利用するという目的に沿って、装置や対象物を基本概念として扱うこととしている。また、機能概念を定義し方式概念をそれらの間の関係として定義するために、目的論的解釈関係と機能そのものを同一視して、全体概念として定義している。さらに、単純化のために、後述するように対象物の入出力状態を対象物として扱っている。以下では、そのような定義について述べる。

5.2 FBRL モデルスキーマ

本節では、実際に機能的対象モデルと方式知識の記述規約として用いられているオントロジーについて述べる。

これは、別稿 [来村 02] で述べた拡張デバイスオントロジーの概念の一部を定義したものであるが、前項で述べたようにモデル記述用に簡単化を行っている。また、従来提案してきた機能・振る舞い表現言語 FBRL (Function and Behavior Representation Language) [笹島 96] を拡張してオントロジーとして実装したものであり、拡張デバイスオントロジーに従って記述される機能的対象モデルと機能的知識に規約を与える役割を果たす。ここでは、モデルに規約を与えることに注目して、FBRL モデルスキーマと呼ぶ。

図 5 上部に定義されたスキーマの一部を示す。装置 (Device) と導管 (Conduit) は果たしている機能が異なる構造的実体物 (Structural-Entity) の下位概念であると定義されている。物理的構造物は構造的な全体-部分関係 (Sub-Component) と同じグレインサイズの要素と間の接続関係 (Port と Connection (図右部の関係概念画面) によって表現される) を持つ。以下では、導管との区別が必要ない限り、構造的実体物のことを装置と呼ぶ。

装置はさらに動作モードを表す振る舞いモデル (Behavior) をひとつ以上持つ。振る舞いは動作モードの成立条件 (Condition) とそのときの対象物 (Object)、またそれら (とその属性) の間に成り立つ制約 (同一性を表す MP-Relation など) で記述される。対象物は物理属性とそれらの間の関係式を持ち、装置のいずれかの Port に存在する。つまり、ここでは Object クラスの各インスタンスは対象物の入力または出力時点における状態を表現する。

媒体 (Medium) 概念は、媒体関係概念 (Carrying-Relation) において、前述の場合とは異なり対象物のロールホルダー概念として定義されている。したがって、導管と媒体を兼ねるシャフトの場合、「装置 (導管) としてのインスタ

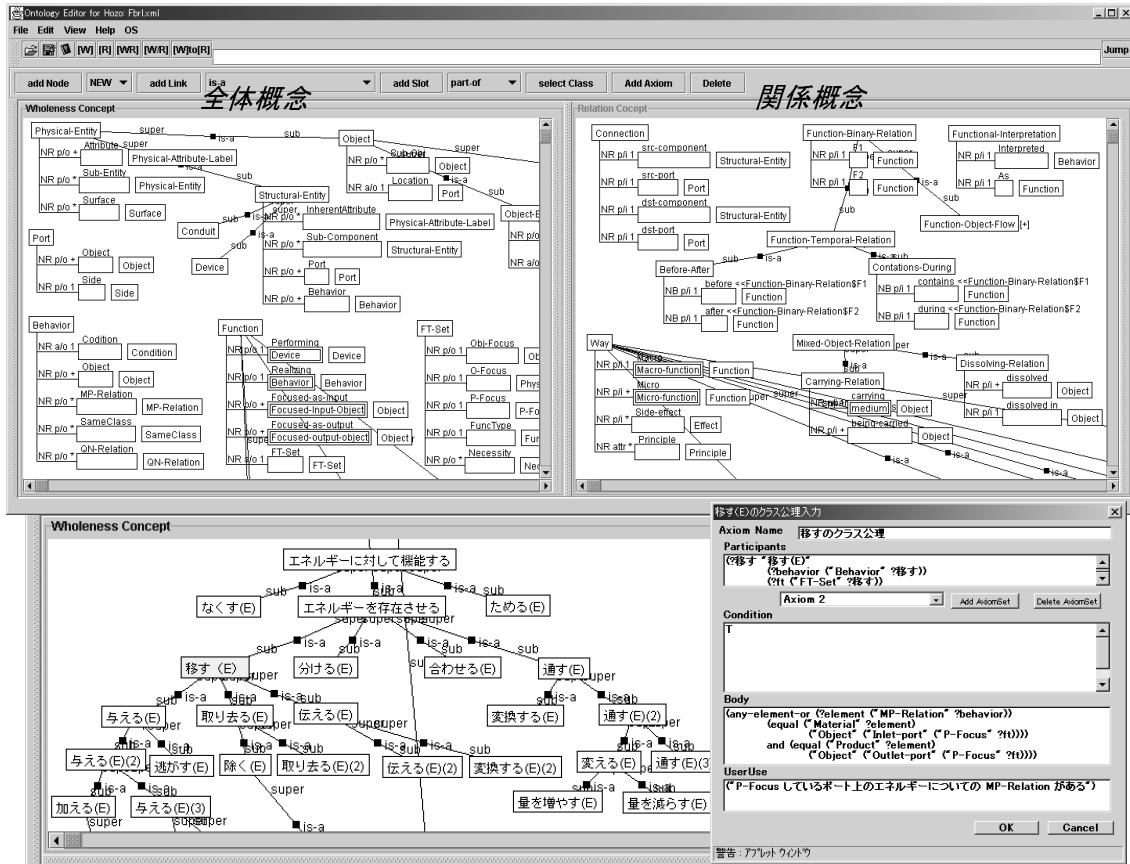


図 5 FBRL モデルスキーマ (上部) と機能概念 (下部) (部分)

ンスとは別に対象物 (媒体) としてのインスタンスの 2 つが存在する」と記述することになる。

一方、1 つの機能 (Function) はそれを果たす装置、それを実現する振る舞い、機能によって注目される対象物 (Focused-object) への参照と、それらの解釈の仕方を表す FT-Set によって表現される。FT-Set は複数の FT (Functional Topping) の集合であり、FT には O-Focus (注目する属性)、P-Focus (注目するポート)、Necessity (必要性) [笹島 96] と Obj-Focus (注目する対象物) がある。

前節までで述べてきた方式概念は、機能間の part-of 関係を特殊化した機能達成関係を原理の観点から捉えたものであるので、方式 (Way) という関係概念として定義されている (図 5 上部の右画面)。ひとつの方式概念は 1 つの全体機能 (MacroFunction) と 1 つ以上の部分機能 (MicroFunction) を参加概念とし、原理 (Principle) と副作用 (Side-effect) を持つ。具体的な方式知識はこの方式概念の下位概念として定義される。6 章で述べる。

5.3 機能概念オントロジー

図 5 下部は定義された機能概念の一部を表している。機能概念は Function クラスの下位概念として、Behavior と FT-Set が満たしているべき制約を特殊化していくことで、定義されている。例えば、「エネルギーに対して機能する」という機能概念は、FT-Set の Obj-Focus が注

目する対象物の種類を表すことから、「Obj-Focus がエネルギーである」という制約で表現される。

その下位概念である「移す」は「注目するエネルギーが異なる媒体間で移動している」という振る舞いへの制約で表現される。これは、「P-Focus は 1 つの入口ポートと 1 つの出口ポートである」、「P-Focus しているポート上のエネルギーについての MP-Relation がある」、「注目しているエネルギーの媒体に MP-Relation がない」の 3 つの制約で表現できる。図 5 右下の公理ウィンドウは 2 番目の制約を表している。

このように機能概念は振る舞いや解釈情報への制約として定義されている。これらの制約条件を用いることで、振る舞いと解釈情報のインスタンスの組に対して、機能概念を対応づけることができる。一方で、このような定義が参照する振る舞いや構造は、機能の効果を表現する上で必要な一部のみであり、機能の実現に関する自由度が確保されている。

6. 機能オントロジーに基づく方式知識の記述

6.1 方式知識の記述

個々の方式知識は、Way クラスの下位概念として、制約を特殊化することで定義される。例えば、図 6 は「力を存在させる (加える)」機能の「摩擦力方式」の定義の一部を示している。達成すべき Macro 機能のクラス制約が機

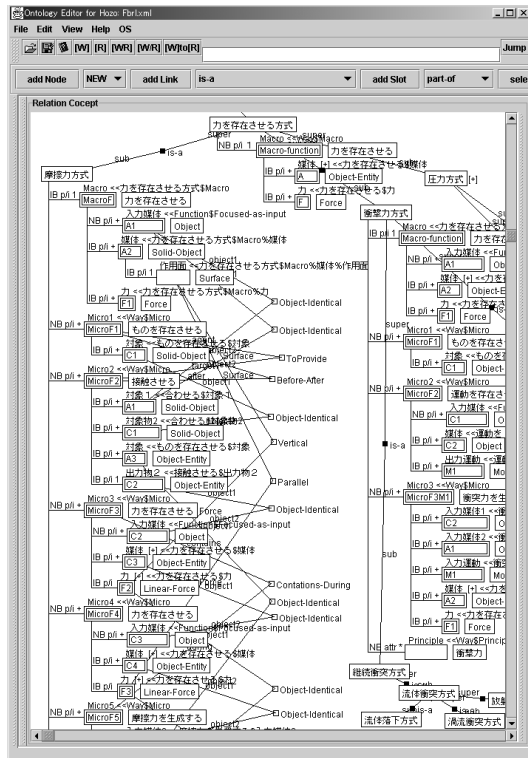


図 6 方式知識の記述例

能概念クラスの「力を存在させる」であり、部分 (Micro) 機能もそれぞれ特殊化されていることで、それらの機能概念のインスタンス間にその方式のインスタンスが存在できる (つまりその方式で達成できる) ことを表している。さらに、これらの部分機能の対象物や発揮時間区間に関する制約などが記述されている。例えば、力を存在させるもの (つまり、力の媒体) が固体 (Solid-Object) でなければならないことや、「(作用物としての)ものを存在させる」機能が「接触させる」機能に対象物を供給している (ToProvide メタ機能 [來村 02]) こと、さらには摩擦力を発生させるためには垂直抗力がある状態で行なければならないため「(作用面に対して鉛直方向の)力を存在させる」の発揮時間区間は「摩擦力を生成する」の時間区間を含んでなければならない (Contains-During^{*6} 関係が存在する) ことなどが記述されている。

6.2 対象モデルの記述

前節で定義したオントロジーを用いて、具体的な対象の機能的モデルを記述することができる。5.3 節で定義された機能概念のインスタンスを作成し、それらの間に特定の方式関係 (前節) を張ることで、対象の機能達成階層 (対象固有方式木) を記述することができる。図 7 にパルセータ型と呼ばれる家庭用洗濯機の例を示す (紙面の都合上、機能のスポットは洗濯機全体の機能を除き表示を省略している)。これは従来多く使われているもの

で、パルセータが回転し、それによって生成される渦流により洗濯物が絡み合っその摩擦力で汚れを落とししているものである。図の機能達成階層では、主機能「分離する」に対して部分機能「結合力をなくす」と「離す」があり、前者を達成するために両方与力方式と化合方式を同時に用いており、後者のために両方運動方式を用いている。さらに、「(洗濯物に)力を存在させる (加える)」「(汚れに)力を存在させる (加える)」はともに渦流衝突方式と摩擦力方式で同時に達成している。ここで、両方与力方式には両者の力は別方向に働いていないといけないという制約があるが、渦流衝突方式の属性として「力の方向はランダムである」という記述があることによって制約は満たされている。

6.3 方式知識ベースの構築とオントロジーの効果

我々は、現在までに 26 の機能に関して 104 の方式知識を記述した。まず、家庭用洗濯機、家庭用簡易印刷機、半導体生産プロセスにおける半導体インゴット切断装置 (ワイヤソー方式のもの、内周刃方式のもの) ならびに半導体エッチング装置を対象として、それぞれの対象固有方式木を記述した。次に、方式木に現れる方式からそれらを一般化した一般的な方式知識を抽出し、その達成原理に基づいて図 2 のような is-a 階層として構造化した。

このような機能達成方式知識は様々な対象に適用できる一般的な知識である。実際、今回記述対象とした 5 つの対象において、図 2 の「力を存在させる (加える)」機能の方式は共通に現れる。例えば、図 7 に示す洗濯機の機能達成階層に現れる方式のうち渦流衝突方式はその上位概念である流体衝突方式が半導体インゴット切断装置で切りくずを運び去るために用いられている。また、切りくずと砥粒を分離するために、遠心力方式が用いられている。このように、一般化することで異なる対象領域においても同じ機能達成方式知識を再利用することができる。

このような方式知識の一般性は機能オントロジーによってもたらされている。まず、オントロジーが提供する統一された抽象的な機能概念を用いて方式知識が記述されている。つまり、部分機能が満たさなければならない制約として抽象的な機能概念を記述することで、機能分解行為を行なったときに、抽象的な機能をより具体的な機能に詳細化することができる。例えば、図 6 に示した方式知識では多くの部分機能は力を「存在させる」のように出力としてなにが必要であるかを意味している抽象的な機能であり、実際、図 5 下図にエネルギーの場合のものを示すように is-a 階層の上位概念である。これらは、インスタンス化されたときに、他の機能や方式によって決まる具体的なコンテキストに基づいて、他の媒体から「移す」や他の形態から「変換する」などに詳細化することができる。このようにすることで、抽象的なものから具体的なものへという設計の一般的流れに沿うことができ

*6 Allen の時間区間表現 [Allen 84] に基づいている。

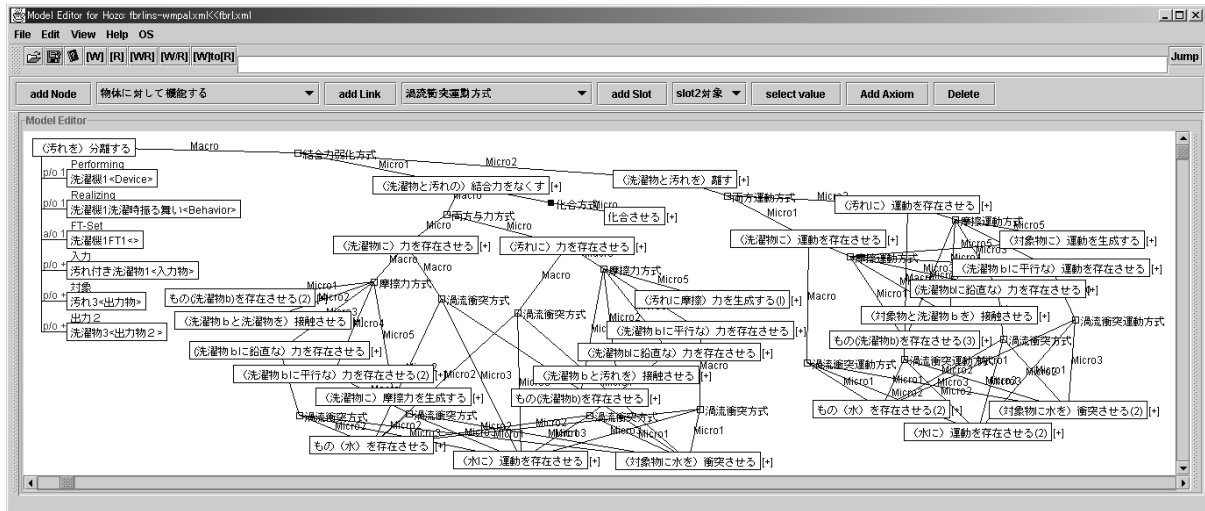


図 7 パルセータ型洗濯機の機能達成階層

るとともに、知識の一般性を向上させることができる。さらに、本稿で述べた方式知識の定義は、機能の対象物への制約が限定的であり、具体的なものへの依存性が低いという特徴を持つ。つまり、方式の定義としてその方式で発揮するために必要な条件のみを記述することで、設計行為における自由度を確保しながら、機能発揮に必要な構造的または振る舞いの条件を保証している。また、前節で述べたように機能概念自体も振る舞いレベルの対象物の変化を明確に制約しているため、部分機能も構造と振る舞いを制約する。しかしながらこれらの制約は、機能達成原理の観点から必要なものにとどまり、機能発揮に対して十分条件とはなっていない。

また、FBRL スキーマが拡張デバイスオントロジー [來村 02] に基づいてモデルを規約しているため、記述される対象モデルや機能的知識はデバイスオントロジーに基づくことになる。同じ対象の捉え方に基づくことは知識共有の必要条件である。

7. 方式知識の利用：機能構造設計における達成方式の探索支援

本節ではここまで述べてきた達成方式知識を用いてどのような設計支援が可能であるかを述べる。なお、本節の目標はあくまで体系化された設計知識がどのように使われ、どのような効用を持つかということの可能性を示すことにあり、設計支援システムとして完成されたものを提示することではない。

7.1 設計支援において期待される効用

機能達成方式知識は、設計における基本的方針を決定する概念設計段階において用いられる。要求機能だけが与えられる新規設計にも用いることができるが、ここでは既存の人工物が与えられてそれを与えられた要求を満たすように改良する改良設計を対象とする。改良設計に

もさまざまなレベルが考えられるが、数値的パラメータの修正を行うパラメトリック設計や形状に関する形状設計などの詳細設計レベルではなく、概念設計までやり直して機能構造を変更することで抜本的に改良することを支援することを目指す。したがって、出発点となる人工物が与えられるという意味で改良設計と呼んではいるが、場合によってはもはや改良ではなく新規設計と呼んだ方が適切な場合も含むことになる。

機能を達成する方式にはさまざまなものがあるため、それを達成する部分機能を違うものに変更することで、不具合などを解消できる可能性がある。抜本的改良設計を目指した場合は、一見した実現可能性よりも、できるかぎり多くの選択肢を一度は検討してみることが重要であると考えられる。特に、多くの発明は他分野では既知の技術を当該分野に適用したものであることも指摘されている [Sushkov 95] ことから、他分野で用いられているような方式も検討することで革新的改良設計を行える可能性がある。

方式知識はさまざまな領域の方式を一般化しているため、他の領域の方式を別の領域の対象に適用することが可能である。したがって、体系的に整理された方式知識を用いれば、人間の設計者が多くの方式を探索することが可能になると考えられる。

7.2 方式探索支援システム

本システムの目標は、人間の設計者が機能構造を設計する際に様々な方式を探索することを支援することにある。システムの処理と知識・データの流れを図 8 に示す。システムは機能達成方式知識を内部に格納し、設計対象の機能モデル (対象固有方式木) を与えられ、以下のような機能を持つ。

- 対象において与えられた属性を持つ方式を検索することによって、不具合の直接的な原因となっている可能性のある機能達成方式を提示する。

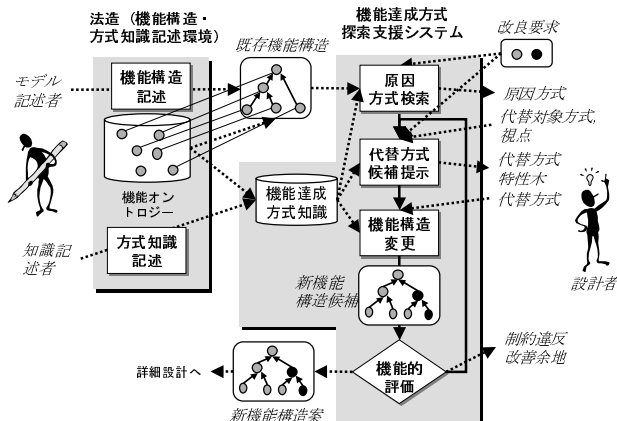


図 8 方式探索システムの流れ

- ある達成方式を代替できる方式群を提示する．その際に特定の視点から方式を分類することができる．
- 選択された方式で，対象の機能構造を変更する．
- 達成方式を代替したことにより生じる原理的レベルでの不整合や改善の余地を達成方式の制約を検査することなどで発見し，提示する．

システムの出力は新しい機能構造とそれに付加された振る舞いや構造への制約条件である．制約条件は機能概念や方式知識の記述から機能達成に原理的に必要なものが付加される．しかしながら，このシステムは機能レベルの設計を支援するものであり，改良案の実現可能性（物理的整合性）などの検証は原理レベルの不整合の検出にとどまり，部分的である．機能の物理的実体への結びつけやその形状の決定，それに伴う物理的整合性の検証などは，本システムに含まれず，詳細設計レベルの他のシステムの役割である．

なお，システムは現在プロトタイプが動作している．Java 上で動作する Prolog である MINERVA で実装されており，「法造」上でオントロジーに基づいて記述された方式知識（6・1 節，図 6）と対象モデル（6・2 節，図 7）を読み込んで動作している．

7.3 方式探索の例

本節では方式探索の過程を仮想的ななぞり設計シナリオに基づくシステム出力（図 9）を用いて示す．まず，入力として図 7 に示したパルセーター型洗濯機の機能構造が与えられたとし，設計者が「洗濯物の表面が傷む」ことを改良しようとしているとする．

まず，システムは対象の機能構造に現れる方式の中から，入力された表面物理変化に関連する対象物の物理的变化に関する副作用記述を持つものを探す．ここでは，原理的に洗濯物同士が擦れあうことで表面が傷むことが記述されている摩擦力方式などが検出され，設計者に提示される（図 9(a) の上部）．

次に，設計者が摩擦力方式の代替を指示すると，シス

テムはこの方式の代替候補を提示する．ここでは対象への影響の一種である表面への影響を考慮しているので，関連する属性として形状への影響などで方式が分類されたものが表示される（図 9(a) の下部）．この中から，表面への影響と形状への影響の両方が軽微な遠心力方式が選択されたとする．システムは達成方式を代替した機能モデルを生成して，提示する（図 9(b) の上部）

次に，新たな機能モデルの両方運動方式において運動の方向が異ならなければならないという制約が満たされていないことを検出し，設計者に提示する（図 9(b) の下部）．ここで，反作用方式を用いて力の向きを変えることで，最終的に図 9(c) に示す機能モデルが出力される．この機能モデルは実際に市販されている「遠心力洗濯機」と呼ばれるものと原理的には同一であり，方式知識の改良設計での適用可能性が示せたと言える．

遠心力方式以外にも，図 2 における対象物落下方式や，液体落下方式等も同様に候補となる可能性もあり，「ドラム型」と呼ばれる洗濯機のように，洗濯物を水の上に落としたり，洗濯物の上に水を落下させたりしてその衝撃で汚れを分離するという原理で改良案を構成する事も出来る．

この方式の探索に用いている方式知識は前述したように領域に依存しない汎用なものであり，異なる領域における方式を活用できる可能性がある．現在，企業の協力を得て，半導体生産装置についても検討を行っている．

8. 関連研究

設計に関する研究において多くの機能分解に関する知識が記述されている（例えば，[Bradshaw 91, 梅田 97] など）が，我々の提案は「方式」という概念と機能概念オントロジーに基づいていることが特徴である．機能分解は機能レベル単独で行われるものではないが [武田 94]，方式概念は機能達成の背後にある物理原理や現象を明示化しているため，振る舞いレベルと機能レベルとのスムーズなやりとりを可能にする．つまり，ある機能分解の方式の有用性（適用可能性）を方式として明示化されている振る舞いに関する制約を用いてチェックすることができる．機能分解の特徴を概念化することは論文 [Malmqvist 97] でも行われているが，それに基づいた組織化（is-a 階層化）は行われていない．

また，我々の方式知識は機能概念オントロジーに基づいて統一された機能概念を用いて記述されている．そのため，知識の再利用性が向上する．従来研究においては，きわめて少数の一般的機能 [Pahl 88, Lind 94] しか定義されておらず，アドホックな機能概念定義が行われていた．

方式という概念を用いることで機能達成のやり方を変更する方式代替による改良設計にも柔軟性が生まれている．特に，方式概念の表す原理に基づいて，方式同士を is-a 関係で階層化することによって，代替の際に従来使

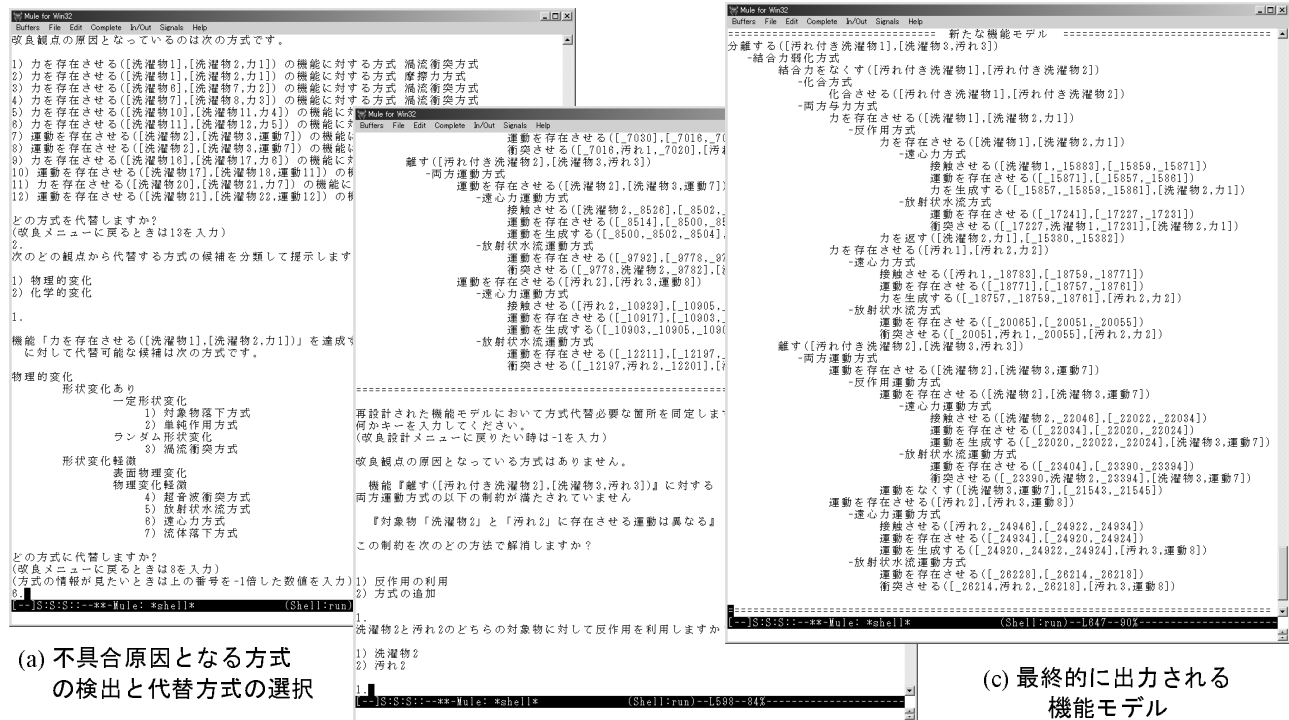


図 9 方式探索支援システムの画面例

われていた方式を一般化することで、より多くの方式を検討することが可能になる。[Sushkov 95]で指摘されているように、多くの発明は他分野では既知であった技術の応用であり、方式の一般化を通じて、革新的な改良を行える可能性がある。TechOptimizer[IMC 99]はTRIZ理論に基づくソフトウェアであり、一般的な発明原理を含んでいる。しかし、発明原理は抽象度が非常に高く、対象を適切にモデル化しそれに発明原理を適用することは設計者にまかされている。また、本研究で行っているような設計者の視点への適応を行うことができない。

本稿で示した機能オントロジーの効果は、モデルと知識を規約するメタモデルの役割である。訓練タスクオントロジーに基づいて変電所運転員の訓練教材の作成を支援するSmartTrainer[金 99]は同じ種類の効果を異なる対象分野と利用目的で専用インターフェースを用いて示している。また、Borstらは工学領域のオントロジーを構築し、それらに基づいてモデルのライブラリを構築している[Borst 97]。本研究では、工学設計で重要な役割を果たす機能的知識を体系化することを目指して、整理の鍵となる概念を抽出し、その規約に基づいた知識記述が可能であることを示した。

9. ま と め

機能オントロジーに基づいた機能的な設計知識の記述とその利用について述べた。機能達成に関する知識に注目し、方式と方法という概念に基づくことで、適切な記述と組織化が可能であることを示した。また、オントロ

ジーの実装について議論し、計算機的に定義された機能概念に基づいて抽象度の高い方式知識を記述可能であることを示した。最後に、一般性の高い方式知識に基づくことで、機能を達成する方法を見なおすような改良設計を支援することが可能であることを示した。

別稿で議論したように対象のモデル化に際しては対象の要素の果たす役割(ロール)を認定することが重要であり、果たす役割の認識の違いによって異なるモデル化が可能である。5・2節以下で示した実装ではこのロール認定が終了したあとのモデル記述を扱っている。5・1節で示した拡張デバイスオントロジーの厳密な定義に基づいたロール認定の支援について現在検討を行っている。

現在、研究協力を行っている企業と機能達成方式知識を中心として体系化の枠組みの検証を行っている。実際、方式知識の記述の枠組みを数種類の生産設備の記述に適用した結果、それらの設備(装置)の機能構造の理解が深まると同時にその共有が進むことが判明した。その結果、現場の技術者が率先して記述方式を採用する方向で検討が進んでいる。更に、達成方式の探索支援機能を利用して、既存装置を改良する特許案生成支援に利用する案も企業側から提案があり、それも含めた機能的知識の統合的管理・運用システムのトータルプランの作成を行っている。

これまでの研究において、機能を系統的に扱うための理論的な道具立てと基盤となる枠組み、そして基礎的なソフトウェア環境は整ったと認識している。今後はこの活動を推進して得られた成果を実証し、実社会における

知識の取り扱い」に貢献したいと考えている。

謝 辞

本研究の一部は日本学術振興会未来開拓研究「人工知能による協調的シンセシスの方法論」(JSPS-RFTF97P00701)として行われ、プロジェクトメンバーの大阪大学 荒井栄司教授、小野里雅彦助教授、京都大学 川上浩司助教授との議論において多くの有益なコメントを頂いた。記して感謝します。また、半導体生産装置における方式知識の記述にご協力頂いた住友電気工業(株)生産技術部の布瀬雅義部長をはじめとする皆様に感謝します。また、大阪大学大学院 上田俊夫氏(現在、沖電気工業(株))、東出光喜氏(現在、三菱重工(株))、佐野年伸氏(現在、オンキヨー(株))、高橋知伸氏の貢献に感謝します。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Allen 84] Allen, J.F.: Towards a general theory of action and time. *Artificial Intelligence*, 23, 123-154 (1984).
- [Borst 97] Borst, P., Akkermans, H., and Top, J.: Engineering Ontologies, *International Journal of Human-Computer Studies*, 46(2/3), 365-406 (1997).
- [Bradshaw 91] Bradshaw, J. A., and Young, R. M.: Evaluating Design using Knowledge of Purpose and Knowledge of Structure. *IEEE Expert*, 6(2), 33-40 (1991).
- [Chandrasekaran 93] Chandrasekaran, B., Goel, A. K., and Iwasaki, Y.: Functional Representation as Design Rationale, *COMPUTER*, 48-56 (1993).
- [IMC 99] Invention Machine Corp., TechOptimizer, <http://www.invention-machine.com/products/techoptimizer.cfm> (1999).
- [来村 02] 来村徳信, 溝口理一郎: オントロジー工学に基づく機能的知識体系化の枠組み, *人工知能学会誌*, 17(1), pp.61-72, 2002.
- [金 99] 金, 林, 池田, 溝口他: 訓練システム SmartTrainer 構築用オーサリングツール, *教育情報学会会誌秋号*, 16(3), 139-148 (1999).
- [古崎 01] 古崎 晃司, 他: オントロジー構築・利用環境「法造」を用いたオントロジーに基づくモデル構築, 第 15 回人工知能学会全国大会, 3F1-01 (2001).
- [Lind 94] Lind, M.: Modeling Goals and Functions of Complex Industrial Plants. *Applied artificial intelligence*, 8, 259-283 (1994).
- [Malmqvist 97] Malmqvist, J.: Improved Function-means Trees by Inclusion of Design History Information, *J. of Engineering Design*, 8(2), 107-117 (1997).
- [溝口 99a] 溝口理一郎: オントロジー研究の基礎と応用, *人工知能学会誌*, 14(6), pp.45-56 (1999).
- [溝口 99b] 溝口理一郎, 池田満, 来村徳信: オントロジー工学基礎論 意味リンク, クラス, 関係, ロールのオントロジー的意味論, *人工知能学会誌*, 14(6), 87-100 (1999).
- [Pahl 88] Pahl, G. and Beitz, W.: *Engineering Design - a systematic approach*, The Design Council (1988).
- [笹島 96] 笹島宗彦, 来村徳信, 池田満, 溝口理一郎: 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*, 11(3), 420-431 (1996).
- [佐野 00] 佐野年伸, 他: 機能依存関係 "メタ機能" に基づく機能構造の導出に関する考察, 第 18 回設計シンポジウム, 21-28 (2000).
- [Sushkov 95] Sushkov, V.V., Mars, N.J.I., and Wognum, P.M.: Introduction to TIPS: a theory for creative design, *Artificial Intelligence in Engineering*, 9 (1995).
- [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*, 60(3), 422-426

(1994).

- [富山 90] 富山哲男, 吉川弘之: 機能論構築を目指して - 設計の立場から -, *精密機械学会誌*, 56(6), 964-968 (1990).
- [梅田 97] 梅田靖, 富山哲男, 吉川弘之: 機能設計支援のための FBS モデリングの提案, *精密工学会誌*, 63(6), 795-800 (1997).

〔担当委員: 瀧 寛和〕

2001 年 8 月 6 日 受理

著 者 紹 介



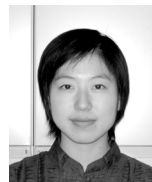
来村 徳信(正会員)

1991 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。1993 年同大学院基礎工学研究科前期課程修了。同年,同大学産業技術研究所技官。1994 年同助手。現在に至る。博士(工学)。物理的システムに関するオントロジー工学的考察と,それに基づいたモデル化と推論に関する研究に従事。1996 年人工知能学会創立 10 周年記念論文賞受賞。情報処理学会会員



笠井 俊信(正会員)

1995 年東京学芸大学教育学部教育情報科学科卒業。1997 年電気通信大学大学院情報システム学研究科修士課程修了。2000 年同大学院博士課程修了。博士(工学)。日本学術振興会研究員を経て 2001 年 4 月より岡山大学教育学部助手,現在に至る。人工知能,特に知的学習支援システムの研究に従事。近年では,オントロジーに基づいた知識の体系的記述に興味を持つ。電子情報通信学会,情報処理学会,教育システム情報学会,各会員。



吉川 真理子

2001 年大阪大学基礎工学部システム科学科卒業。現在同大学院基礎工学研究科システム人間系専攻博士前期課程在学中。人工物の果たす機能概念の定義に取り組む。知識の伝達と変化に興味を持つ。



高橋 賢

2001 年大阪大学工学部電子情報エネルギー工学科卒業。現在同大学院工学研究科電子情報エネルギー工学専攻博士前期課程在学中。人工物の機能的モデリングと有線 CDMA バスの設計に興味を持つ。



古崎 晃司(学生会員)

1997 年大阪大学工学部電子工学科卒業。現在同大学院工学研究科博士後期課程在学中。オントロジー工学の基礎理論,オントロジー構築環境に興味を持つ。情報処理学会会員。



溝口 理一郎(正会員)

1977 年同大学院基礎工学研究科博士課程修了。1978 年大阪大学産業科学研究所助手,1987 年同研究所助教授,1990 年同教授。現在に至る。工学博士。音声の認識・理解,エキスパートシステム,知的 CAI システム,オントロジー工学の研究に従事。1985 年 Pattern Recognition Society 論文賞,1988 年電子情報通信学会論文賞,1996 年人工知能学会創立 10 周年記念論文賞,1999 年 ICCE99 Best paper Award 受賞。電子情報通信学会,情報処理学会,教育システム情報学会,日本認知科学会,Intl. AI in Education(IAIED) Soc., AAAI, IEEE, APC of AACE 各会員。現在,IAIED Soc. 会長,及び APC of AACE の次期会長。