

オントロジー工学に基づく機能的知識体系化の枠組み

A Framework for Systematization of Functional Knowledge based on Ontological Engineering

○ 來村徳信 溝口理一郎 (大阪大学)
Yoshinobu KITAMURA and Riichiro MIZOGUCHI
Osaka University, 8-1, Mihogaoka, Ibaraki, Osaka

It has been recognized that functional knowledge used in conceptual design is scattered around technology and target domains. One of its reasons is that different frameworks (viewpoints) for conceptualization are used when authors describe knowledge in different domains. The other one is there are several functional concepts without clear definitions. Aiming at systematization of functional knowledge for synthesis, we discuss ontologies that guides conceptualization of artifacts from the functional point of view. We propose a device-centered ontology and a functional concept ontology. The former provides a device-centered viewpoint for capturing a target domain in order to make models or knowledge consistent. The latter provides concepts representing functions of devices which are used as a common vocabulary in functional knowledge. Some systems based on these ontologies are also mentioned.

Keywords: Functional modeling and reasoning, design knowledge, knowledge sharing, ontology

1. はじめに

設計とは与えられた機能レベルの要求仕様を具体的なものの属性に変換する創造的行為であり, 高度な専門知識に支えられている. 近年の情報技術の発達により設計図などで客観的に明示化されやすい構造や形状などの情報へのアクセスは容易になったが, 概念設計段階に役立つ概念的な設計知識は設計者個人が暗黙的にかかえこんでいるのが現状である. 特に, 対象が果たす役割と目的を表す機能に関する知識は, 概念設計段階において大きな役割を果たすことが認識されている^(1,2)にも関わらず, 明示化されていることが少ない. 属人的知識を組織全体で共有することの重要性は知識マネジメント(KM)で指摘されているとおりであり, このような機能的な設計知識を共有することによる技術革新への期待は大きい.

しかしながら, 暗黙的かつ属人性の強い概念的設計知識を他の設計者が利用できるように一般的にかつ一貫性を持って記述することは容易ではない. 機能的モデルや知識についてはこれまでに多くの研究^(2,3,4,5,6,7)が行われているが, 主に機能を計算機上で表現する形式言語に中心がおかれ, どのような概念を用いてどのように記述すべきかは十分には明らかになっていない. そのため従来の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, ある学会が出版している専門書では従来溶接や機械的締結といった手法ごとにまとめられていた技術を「接合」という一般的な機能の達成方式として体系化を試みているが, 記述された知識構造に一貫性がなく, それに用いられる機能概念の意味はラベルに込められており明確ではない. そのため, 計算機が解釈・加工することができず十分な知識管理ができない.

一貫性の欠如の一般的理由のひとつとして対象世界の捉え方が領域によって異なってしまうがちなことを挙げることができる. 例えば, 発電プラントの過熱器の機能「蒸気を温める」と機械(機構)システムのカム機能「バネを縮める」は, 前者は過熱器に入出力される蒸気の状態の変化を表しているのに対して, 後者はカムの入出力物とは見えないバネの状態変化を表している. つまり, プラント系と機構系におけるこれらの機能概念の背後にある対象の捉え方が異なっているため, これらの概念を用いて記述された知識は計算機が相互に運用することができず, また同じモデルの中に混在すると一貫性が失われてしまう.

このような問題を解決するためには, 設計知識を領域を横断して共有できるような記述を可能にする基盤となる「枠組み」が必要不可欠である. 特に, 機能的知識の体系的記述と再利用には,

対象を捉える際の視点を提供する概念と, 人工物の機能を表現する一般的な機能概念の整備が必要である. しかしながら, 従来の機能表現研究で提案されている一般的な機能概念^(1,5)は少なく, その分類や体系は構築されていない. 一方, 価値工学分野では機能語彙の統一が試みられている⁽⁸⁾が, 計算機理解可能な定義がなく概念の意味は必ずしも明確ではない.

そこで, 本研究では近年注目されているオントロジー工学⁽⁹⁾に基づいて, 対象とする機能的な設計知識を規定する「基本概念とその体系」(オントロジー)の構築を目指している. 知識の背後にある基本概念の明示化は, 対象の捉え方を規定し記述のための機能概念を提供することを通して, 知識の体系化のための共通基盤となり, 他の種類の知識との協調や知識の再利用に貢献する. 筆者らは機能的知識を支えるオントロジーを構築し, それらに基づいて設計対象物の機能モデルや機能的知識を記述している. さらに, それらを用いて設計者間での知識共有や設計を支援する計算機エージェントを開発してきた. これらは領域に固有な知識を用いて単独で問題解決を行う従来のエキスパートシステムとは異なり, 共有可能な知識を多くの人間の利用に供する知識管理型の知識ベースシステムを目指している.

本稿では, まず機能的知識を支えるオントロジーの階層を概観してから(2 節), 対象を捉える際の視点を提供するデバイスオントロジー(3 節)と装置の機能を表す概念を提供する機能概念オントロジー(4 節)について述べる. 紙面の都合上オントロジーに基づいた知識の記述と利用については概要を紹介するにとどめるが, その利用の形態と設計知識管理への貢献について 5 節で議論する.

2. 機能オントロジーと設計知識の体系化

2.1. 考察の対象

本稿での考察の対象とする設計知識は設計対象となる人工物(問題解決のドメイン)の機能的側面に関する知識である. これはまず, 設計プロセス(問題解決タスク)に関する設計戦略などの知識とは明確に区別される. 次に, 機構系などでは重要である形状などは主な考察対象ではなく, 3.5 節で述べるように伝達機能に与える影響に絞って考察が行われる. これは, 本研究が汎用性の高い設計知識の体系化を目指しており, 多様な設計知識の中でも機能に関する知識は抽象度が高く領域からの独立性が高いと思われるからである.

2.2. 機能的知識・オントロジーの階層

図 1 は目標とする機能的知識の階層とその関係を表している. 図の下にあるほど基礎的な知識であり, より上にある知識で用いられる概念を定義し, 規約を提供するオントロジーとしての役割を果たす.

トップレベルオントロジーは、最も基礎的な規約として、記述対象となる(物理)世界を規定する概念を定義する。つまり、「もの」や「状態」、「時間」といった対象世界における存在を記述するための概念を定義する。また、因果性や空間的關係、時間的關係といった物理世界における基礎的な概念や関係が因果オントロジー(10, 第1部6節)、物理世界オントロジー(10, 第1部3節)として定式化される。これらはより上位の機能的な概念を物理世界に Grounding させる重要な役割を果たす。

デバイスオントロジーは物理世界を「装置」という概念を中心として捉えたときの概念を定義する。「装置」、「振る舞い」、「機能」、「機能達成方式」などの概念はこのオントロジーで規定される。これらと物理プロセスオントロジーについては次節と 4.1 節で詳しく議論する。これらの 5 つのオントロジーは基盤となる概念を与える基盤概念層を形成する。

機能概念オントロジーは、デバイスオントロジーで定義された「機能」のインスタンスとなる具体的な概念を定義する。定義は機能を果たす装置、技術領域、達成方法への依存性が低いため、一般的であり幅広い対象に適用可能である。同じレベルの知識として物理原理・法則に関する一般的知識や部品のライブラリなどがあると考えられる。このレベルは知識記述に用いられる概念や基本要素を提供する一般概念層と呼ぶ。

機能達成方式知識は機能を達成する様々な方法を体系づけたものである。機能概念オントロジーにおける機能概念の定義が単独で「機能がなにを(what)達成するか」を表しているのに比べて、機能達成方式知識は「機能がどのように(how)達成されるか」を表し、機能概念間の達成関係を記述したものである。本研究では一般的な機能達成(分解)関係⁽¹⁾に加えて、その達成原理などを方式として概念化し、is-a 階層として構造化した。この is-a 階層は機能達成の原理に基づいて構造化されており、一般的でかつ本質的な分類を構成していると考えられる。一方、一般に設計の教科書などに見られる達成方式の分類の多くは本質的ではない属性に基づいたもの(方式特性木と呼ぶ)や基本的方式を組み合わせて OR で構成したもの(汎用機能分解木)である。これらの構造はそのときの視点や注目する機能によって異なる。このような知識は機能達成方式知識から、与えられた視点に沿って動的に構成されるべきである。このレベルは視点依存知識層と呼べる。機能達成方式知識とともに 5.3 節で詳しく述べる。

いずれかの達成方式を選択し具体化することで、対象固有の機能モデルが記述される。これらに現れる概念や関係は上述のオントロジーのいずれかで明確に定義される。

次節では基盤概念層のデバイスオントロジーについて議論する。デバイスオントロジーの役割は機能概念の定義を行うために必要な概念を定義することである。つまり、我々が日常的に用いている機能的な概念の背後に暗黙になっている対象の捉え方を明示する。

3. デバイスオントロジー

3.1. デバイスオントロジーとは

人工物のモデル化に関してデバイス中心の見方とプロセス中心の見方との 2 つの見方が存在する。デバイスオントロジー(例えば、定性推論分野における概念化⁽¹¹⁾)は前者を、物理プロセスオントロジー⁽¹²⁾は後者の見方を規定する[†]。デバイス中心の見方は対象を、入力を処理して利用者が要求するものに変換して出力するデバイスの合成としてみなす考え方である。プロセス中心の見方がある場所(デバイス内部)で生起している現象に注目するものであって、デバイスそのものにはほとんど注意を払わない。両

[†]「プロセス」という言葉には過程、系列、手順、処理などの意味もあるが、ここでいう「物理プロセス」はそれらとは異なり、自然現象もしくは自然法則を表している。

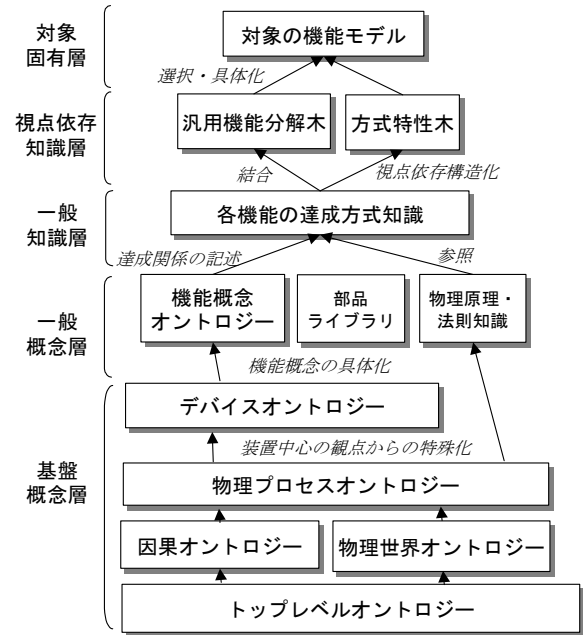


図1. 機能的知識・オントロジーの階層

者の大きな相違点は、デバイスオントロジーでは所望の出力を得るために中心的な役割を果たす動作主となるべき「何か(Agent と呼ぶ)」とそれに処理される「何か(Object と呼ぶ)」が存在するが、プロセスオントロジーでは物体に関してその二つの区別はなく、物体は全て等しく participant として位置付けられる。言うまでもなく、そのような agent ロールはデバイスオントロジーではデバイスが果たすことになる。プロセスオントロジーは主にデバイスの中で起こっている現象に興味があるので、デバイスオントロジーより基礎的な考察を行っていると考えてよい。人類が人工物を作り始めるまでは世界には自然現象だけがあつた。全てのデバイスは何らかの意味でその自然現象に制約を加え制御することによって事前に設定された目的を達する機能を達成するように工夫されている。通常、一つのデバイスでは複数の自然現象(物理・化学プロセス)が利用されており、デバイスの枠をはずすと物理プロセスが残ることになる。したがって、デバイスオントロジーは自然現象を表す物理プロセスオントロジーを装置の観点から特殊化したものであると言える。

デバイスオントロジーは対象世界における要素の果たしている「役割」を規定している。オントロジー工学ではこのような役割を「ロール」という概念で捉える⁽¹³⁾。ロールとは要素がコンテキストの中で果たしている役割を言う。例えば、人間は家族というコンテキスト(全体システム)の中で父親、母親、子供といったロールを担っている。ロールを明確にすることで、コンテキストに依存しない概念(基本概念と呼ばれる)と、コンテキストにおけるロールを担った実体間の関係を明確にすることが出来る。デバイスオントロジーは、まさしく人工物におけるロールの割り当てに関するひとつの系であり、実体要素の認識が終わった後にシステム全体におけるそれぞれの役割を明らかにすることができる。

3.2. デバイスオントロジーの有用性

デバイスオントロジーはプロセスオントロジーよりグレインサイズが大きく基礎的要素が少ないに関わらず人工物の工学的モデリングには盛んに使われてきた。その主な理由として以下のものをあげることができる。

- 人工物自身はデバイスの一種であるのでデバイスオントロジーの考えは自然で理解が容易である
- 全ての人工物は部品の組み合わせで構成されており、デバイスオントロジーが持つ入れ子構造によるモデリングは適切である。

- そもそも機能と言う概念は Agent ロールを果たすデバイスに帰すべきものである。機能に着目する限りデバイスオントロジーは自然である。機能は所詮人間の解釈を中心とした概念レベルのもので、実体としての装置には直接には何の関係も持たないし、実体は全て振る舞いとそれを支える構造のみから作られる。従って、機能レベルの推論(考察)が実体設計に意味を持つためには、機能概念を振る舞い、もしくは構造、と密接な関係をつけ得ることが必須となる。デバイスオントロジーは、機能の定義において必須である「機能を発揮する動作主(agent)」というロール(役割)を構造としての装置に関係づけることができる。
- デバイス中心の見方は各デバイスの中、すなわち細かい実現の詳細、を無視した高い抽象レベルでの推論を可能にするため、思考の節約、効率化に大きく貢献する。この性質が大規模な工学システムの構築にはデバイス中心の見方が必須と言われる理由である。

3.3. デバイスオントロジーの限界と拡張

デバイスオントロジーのよりラフな考えとしての、コンポーネントと接続概念はシステム工学から生まれ、広くプラント領域を始め電気工学などにも流布しており、また設計工学においてもドイツ流設計方法論⁽¹⁾などで広く採用されている。しかしながら、どのようなものをシステムにおける要素(装置や対象物)とみなすべきか(厳密には前述したように、存在する構成要素に対してどのような役割を割り当てればよいか)ということに関する指針がなく、その考え方の根底にある仮定も曖昧なままである。その結果、モデリングがアドホックになるとともに、デバイスオントロジーと他のオントロジーとの違いや、デバイスオントロジーが適用可能な領域の限界、また機能概念の定義の背後にある対象の捉え方の違いなどが明らかになっていない。

定性推論分野における装置を中心としたオントロジー⁽¹¹⁾はシステム理論に導管概念を導入し、装置との認知的な違いを扱うことを可能にした。しかし、対象物や導管の認定などに曖昧さが残っている。一方、富山らはドイツ流設計方法論における機能定義の限界を指摘しており⁽²⁾、機構素に対する適用が困難であるという指摘もある⁽¹⁴⁾。

したがって、「対象の捉え方」を規定するデバイスオントロジーをさらに詳細化することで知識記述の共通基盤を構築し、その限界と他のオントロジーとの違いを明確にする必要がある。次節では、従来の定性推論分野におけるもの⁽¹¹⁾の装置や導管の概念を精密化するとともに、媒体の概念を追加し、導管と媒体の縮退や仮想的な導管を許すように拡張する。これによって、機構系の一部をカバーすることが可能になり、領域間の違いを明示化することができる。

勿論、デバイスオントロジーは万能ではない。特に機構系については多くの特殊性が指摘されている^(2,14)ため、本稿で提案するデバイスオントロジーの限界についてここで述べておきたい。まず、デバイスオントロジーでは各装置の記述は事前に与えられており、設計行為において新しい装置は与えられた既知の装置の新しい組み合わせによってのみ生じる。したがって、機械工学の分野で重要である新しい形状の生成といった革新的な部品の創造には貢献しない。その場合にはプロセスオントロジーが必要となる。

しかしながら、既存部品(形状)のモデルの存在を前提としてもその組み合わせ方に独創性があれば、特に機能構造レベルにおいては革新的な設計になりえる。実際、(特に機構系以外の分野では)従来の発明行為のほとんどが既知の技術の組み合わせである⁽¹⁵⁾。我々は機構系だけではなくシンセシス全般を支える機能的知識記述の枠組み構築を目指して、領域の個別性のある程度捨象して、一般性と汎用性を追及している。

次に、機構学における主要な関心のひとつは機構要素の形状や構造を与えられたときにそれらから生成される運動(振る舞い)

を推論することにあるように思われる。しかしながら、前述したようにデバイスオントロジーにおいては各部分要素の形状は通常記述されず振る舞い(運動)記述が与えられるもので、むしろそれらが組み合わせられたときの因果連鎖が推論の対象である。さらに、各部装置のモデルは正常な定常動作を表しており、非定常状態(動作し始めるときや、例えば歯車が回転しないときなどの非正常状態)は別の(故障)モデルとして記述することが多い。したがって異なるレベルを扱っているように思われる。

また、機構系においては運動に伴って構造が動的に変化し、装置や装置間の接続が生成・消滅するように見える場合があり、事前に装置をモデリングするデバイスオントロジーでは困難が生じるように思われる。しかしながらこれらの変化は設計段階で予期されているものであり、事前に装置やありえる接続を記述し、動作モードによって活性化させることで表現可能である。予期しない接続は故障モデルで扱われる。

さらに、「支える」機能のように静的な機能が存在する。この静的というのは位置の時間的変化がないという意味で、3.4.3 節で述べる(また、図 2 にも示す)B0 的な意味である。B1 的には、次節で述べるように力を対象物に取って、「支える」機能を発揮している部品は「(鉛直方向に)力を受け取って、同じ大きさの力を逆向きに返す」という振る舞いをしていてと記述可能である。また、運動をガイドするような機能についても運動を対象物として「運動方向を選択する」ようなデバイスとして記述可能である。このように静的な振る舞いや機能もデバイスオントロジーを用いても記述可能であると思われるが、現在検証を進めている段階であり、以下の考察では動的な振る舞いのみを対象とする。

また、化学プラントにおける化学反応自体のモデル化を行う場合にもデバイスオントロジーは適切ではない。

我々はデバイスオントロジーですべての領域のすべての振る舞いや機能が記述可能である(もしくは、すべきである)と主張しているわけではない。むしろ、目標は従来のデバイスオントロジーが暗黙的に仮定していたことを明示化することで、各対象領域間の違いを明確化して、その限界を見極めることにある。実際、機構系に関しては一部の機能概念は異なるオントロジーに基づいていることを以下で示す。

3.4. 拡張デバイスオントロジーの定義

本節では従来の装置を中心としたオントロジー⁽¹¹⁾を拡張した拡張デバイスオントロジーにおける概念を定義する。なお、振る舞いと機能の区別などは 4 節で述べる。また、前節で述べたように時間とともに変化する動的な振る舞いに注目して、機構系における運動と力の動的な変化のみを扱う。

3.4.1. 装置と対象物

まず対象世界に存在するものを大きく「装置」と「対象物」に分類する。装置は入出力ポートを持ち、ポートを介して他の装置(正確には導管。次節参照)と接続される。また、装置はよりグレインサイズの小さな複数の装置から構成され、全体一部分関係による階層関係を持つ。

一方、対象物は装置の入力ポートから出口ポートへ通りぬけており、また複数の装置の間を「流れる」と認識できるものである。逆にいうと、入口ポートにあるものと出口ポートにあるものが「同一物」(の異なる状態)である、と認識できる必要がある。対象物には、例えば、流体などの物質や、熱などのエネルギー、運動、力、情報などがある。対象物は属性とその値を持ち、ある時間点における属性値の集合を状態と呼ぶ。

装置は対象物に対して「働きかける(作用する)」という役割を果たす。対象物は逆に装置内を流れている間に働きかけを受けて、状態(属性の値)が変化する。

対象物の状態の変化は属性の入出力ポートにおける値の差に集中され、装置の内部の位相的構造や振る舞いの詳細はそのグレインサイズでは観察することができない(ブラックボックスモデ

ル)．記述のグレインサイズを小さくする(全体－部分関係)ことで振る舞いの詳細が記述できるが、これは装置の内部の状態や動作を知ることは異なる。

3.4.2. 導管と媒体

理想化するとある属性の値をそのまま異なるポートへと伝達する「伝える」という機能のみを果たしていると認識される装置を導管と呼び、装置から除外する。例えばパイプは物質の流量をそのまま伝えている。実際には他の変化(例えば、圧力損失)も起こしているが、無視しても動作の理解に問題がないものを言う。なお、記述された導管のモデルの構成は装置と同じであり、両者の相違は認知的な違いである。また、導管は物質的に存在するとは限らない。機構系における機構素レベルのモデリング(次節参照)の場合は接続部分という仮想的な導管を想定する。

また、対象物の中で、他の対象物を保持しておりその対象物が流れることを可能にする役割を果たしていると認識されるものを「媒体」と呼ぶ。例えば、水蒸気は熱エネルギーを保持する媒体としての役割を果たすことができる。

しかし、エネルギーによっては導管が媒体の役割を担う場合がある。例えば、シャフトは導管であるが、運動エネルギーの媒体として役割を果たす。また、媒体は自分が流れることによって対象物の流動を可能にしてもよい(熱流体の場合)が、媒体間の伝達によって流動させてもよい(シャフトの場合)。

3.4.3. 振る舞い

振る舞いという概念には少なくとも以下の 4 つのものが考えられる(図 2 に違いを示す)。まず、B0 的振る舞いとは、対象物の特定位置における異なる時間点における属性値の変化を表す。例えば、水の特定位置における温度の上昇などである。これは実際の物理現象を固定された観測点で観測することによって得られる変化と同じであり、物理現象の数値シミュレーションはそれを推論(計算)することを目指している。

B1 的振る舞いとは、対象物が時間とともに移動していることに注目し、その同一とみなせる分子などが装置に入力された時点における値と出力される時点における値の変化を表す。例えば水蒸気加熱器の「温める」機能はある蒸気分子が装置を通り抜ける間におこる温度の上昇を意味する。値の変化を議論する際にはなにを同一とみなすのが重要であるが、B0 は位置、B1 は対象物という異なる同一性基準に基づいている。

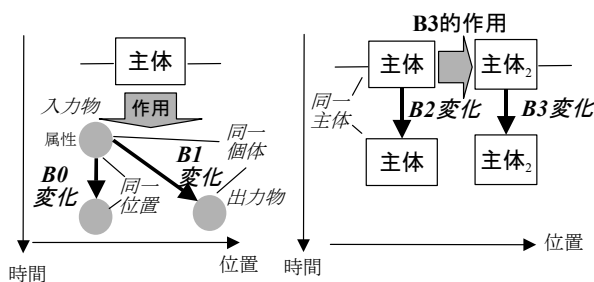


図 2 振る舞いの定義

B2 的振る舞いとは入出力の時点ではなく装置の内部での対象物の変化や、装置自体の動作を表す。例えば、「シャフトがねじれる」は「シャフトが回転力を伝える」(B1 的振る舞い)の内部動作を表現している。これは装置が実際に何(動作)をしているのか?という素朴な疑問に根ざした振る舞い概念である。この概念は、デバイスの記述のグレインサイズを小さくした場合とは異なって、デバイスの中をデバイスオントロジーに従っていない方法で覗き見ており、デバイスオントロジーに従っていないと言える。

さらに、B3 的振る舞いは同じレベルの主体への作用を表す。これは、B0, B1 が働きかけている対象物が時間とともに装置の入力側から出力側に移動しているのに比べて、そのような捉え方ができないものに対して作用していることを表す。

これらの振る舞いは2つの異なる時空間点における対象物の属性値の差を概念化したものであることは共通しているが、状態の同一性の判断基準が異なるため、時空間点の取り方が異なっている。なお、まったく異なる振る舞い概念として、ある望ましい挙動を表す「機能」に対してそれを実現する相対的に小さいグレインサイズの挙動の記述を「振る舞い」と呼ぶこともある⁽⁴⁾。この定義では機能と振る舞いという概念は 4.1 節で述べる挙動に関するマイクロマクロ階層を表している。

拡張デバイスオントロジーにおける振る舞いとは B1 的振る舞いを指す。B1 は B2 に比べてブラックボックスモデルに基づいているためモデルの組み立て性がよく、また B0 に比べて装置の対象物への作用をよく表している。対象物の B1 的变化を装置の観点から概念化したものが、デバイスオントロジーにおける装置の振る舞い概念である。

3.5. デバイスオントロジーに基づく機構系のモデル

拡張デバイスオントロジーに基づく機構系の運動と力を対象物とみなせる。つまり、機構系における装置は運動または力の属性(大きさや方向)を変化させるものとして概念化される。

機構系における装置には機構レベルと機構素レベルの2つのレベルがある。機構系において通常部品として認識される歯車やシャフトなどを機構素と呼ぶ。それを複数個組み合わせた物を機構と呼ぶ。機構の区分は導管によってなされ、機構レベルにおける導管はシャフトやワイヤーなどである。例えば、あるギア機構(図 3a)は全体として「回転運動の角速度とトルクを変化させる」という機能を果たしている。運動や力は導管を媒体として入出力され、この例では回転運動はギアにつながっているシャフトによって入出力され、接続されているベルト機構などに伝えられる。さらに、両者を合わせてマクロな機構として全体一部分階層化される。

機構素レベルでは機構素に入出力される運動や力は、特別な導管とみなされる接続部分(面、線、または点)を通じて、他の機構素に伝達される。接続部分という概念は機構学における対偶素⁽¹⁶⁾に対応するが、その役割を導管として概念化する。例として、上述のギア機構の部分であるギアの1つを考える(図 3b。ギアの中央部でシャフトと結合され、外周部で異なるギアと接触している)。このとき、中央部では回転数とトルクを伝える接続面が存在し、外周部では主に円周方向の力と歯速度(単位時間あたりに通

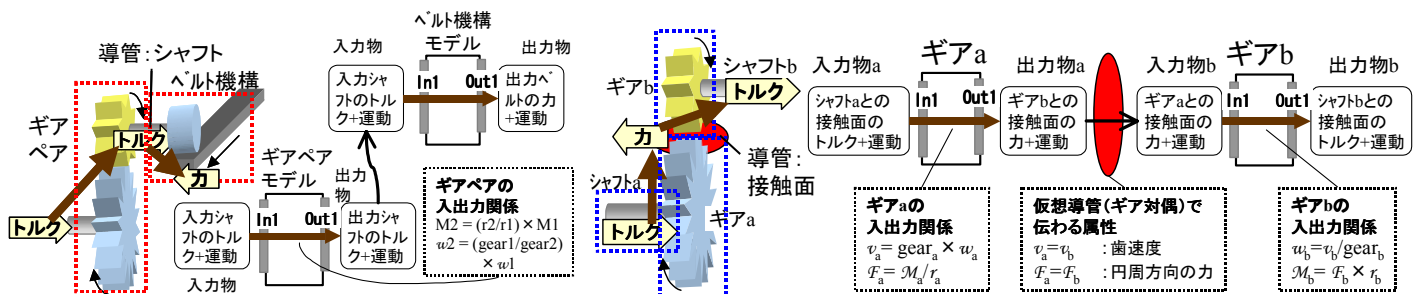


図 3a. ギア機構の機構レベルモデル

図 3b. ギア機構の機構素レベルモデル

表 1: プラント系と機構系における諸概念の例

	プラント系： エネルギー	プラント系： 物質	機構系： 機構レベル	機構系： 機構素レベル
装置	ボイラ、タービンなど	ボイラ、蒸留塔など	機構 歯車ペアなど	機構素 歯車、シャフトなど
導管	パイプ	パイプ、ベルトコンベア	シャフト、ワイヤ	接続部分（面、線、点）
対象物	熱エネルギーなど	流体や部材など	力+運動	力+運動
媒体	流体（水、蒸気など）	流体、治具、or なし	シャフト、ワイヤ	接続部分
機能	生成する、与える、奪う、冷やすなど	分ける、蒸留する、分離する、加工するなど	回転数を変える、運動の種類を変えるなど	速度を変える、力や運動を伝えるなど

過する歯の数)を伝える接続部分(ギア対偶と呼ぶ)が存在するとみなす(ここでは歯と歯の接触面の対偶は捨象して、摩擦車と同レベルのマクロ的視点でモデル化している)。すなわち、ギアは「中央部で入力された回転数とトルクを外周部における歯速度と円周方向の力に変換する」装置であると概念化される。

機構系においては導管には様々な種類があり、伝える力や運動の種類も異なっている。これはプラント系における導管がパイプのみで流体のほぼ全属性をそのまま伝達するとみなせることと比べて、大きく違う点である。機構レベルではシャフトは全ての形態の力と運動を伝達するが、ワイヤは一般に引っ張り力のみを伝達し、他の圧縮力などを伝達できない。機構素レベルでは平面接触や線点接触(ころがり接触)、ギア機構の接触部分など接触する部分の形状と特性によってさまざまな特性を持って運動や力を伝達する。他に多くの種類の導管が考えられるが、機構学における対偶の分類⁽¹⁶⁾などの知見に基づいて同様に記述が可能である。

3.6. 異なる対象領域に対する共通性

拡張デバイスオントロジーにおける諸概念の各領域における例を表 1 に示すように、異なる領域の対象を共通のオントロジーで捉えることが可能になっている。例えば、プラント系における過熱器(熱交換器)は媒体である蒸気についた対象物である熱エネルギーが装置を通り抜ける間に増加するというモデル化が可能である。このモデルと図 3 に示した機構系のモデルは、装置を通り抜けている対象物に対して装置が働きかける、という共通の視点から捉えることができる。

さらに、表 1 は領域間の以下のような相違点を明確にしている。機構系では、(1)導管が媒体を兼ねる(縮退している)、(2)媒体自体は装置の入口側から出口側へ流動せずに媒体間の伝達によって対象物を流している、(3)機構素レベルでは導管・媒体が物質的には存在しない、(4)運動・力が対象物である、(5)導管の種類が多い。これらの相違点は対象物である運動や力が媒体(シャフト)間で容易に伝達可能であるという特性から生じるものであると考えられる。このように拡張デバイスオントロジーは異なる領域を共通の土台に載せることで、領域間の違いを明確にすることができる。表 1 に示した結果は、これまでに、発電プラントや化学プラントなどのプラント系、生産工程、機構系を対象にして検討してきた成果に基づくものである。

3.7. 装置間作用オントロジー

デバイスオントロジーは物理システムを捉える際の視点のひとつである。一方、(入出力物ではなく)接続されている装置への作用を概念化する際のオントロジーをここでは装置間作用オントロジーと呼ぶ。例えば、前述した「カムがバネを縮める」や図 3b の機構で「ギア a がギア b を回す」といった機能概念である。デバイスオントロジーでは作用の対象は装置に入出力されると認識できなければならないが、この例ではそう認識することには無理があるため、この見方はデバイスオントロジーではなく図 2 に示す B3 的振る舞いに基づく別のオントロジーに基づいている。さらに、前者の例はバネの外部への作用というよりバネそのものの状態である、つまり、B2 的であり、デバイスの内部状態を参照するという意味でもデバイスオントロジーに則っていない。

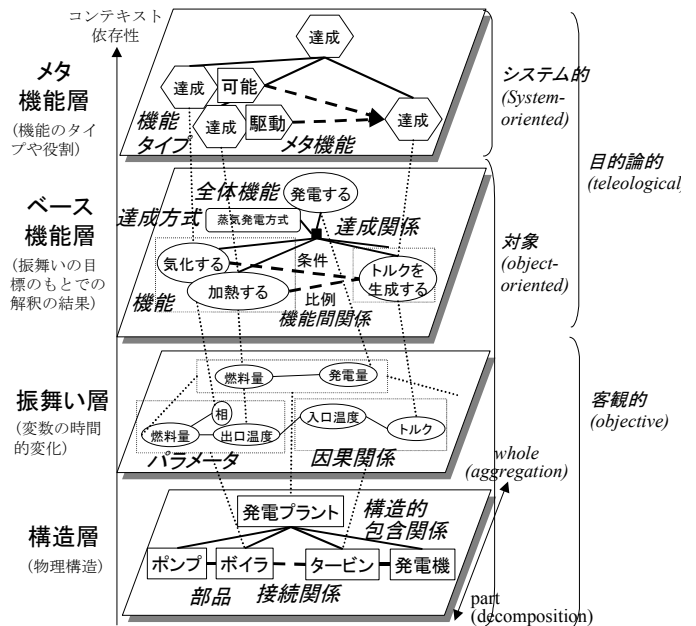


図 4 対象モデルの階層(発電プラントにおける例)

4. 機能オントロジー

知識の体系化の基本は知識を捉える際の視点の決定が最も重要であるが、それは拡張デバイスオントロジーの採用によって明確にされた。次に重要な問題は知識を特徴付ける基本カテゴリーの抽出とそれらの一貫した方針による組織化である。本節ではデバイスオントロジーの一部である機能にかかわる重要なカテゴリーとして、ベース機能、メタ機能、(機能達成)方式、(達成)方法などを抽出する。また、実際の装置の機能を表す概念を提供する機能概念オントロジーについて述べる。

4.1. 対象モデルに関わる概念

本枠組みでは、対象物モデルは図 4 に示すように構造層、振る舞い層、機能層、メタ機能層の 4 つの層から構成される。この図の縦軸は「構造、振る舞い、機能」の軸であり対象物のコンテキスト依存性であって、図 1 のような抽象階層ではない。

対象の「構造」とは部品と対象物の存在とこれら間の接続関係(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・ミクロの階層を構成する(図 4 の奥行き方向)。「振る舞い」とは前述の B1 的振る舞いを指す。装置の振る舞いを目標のものと解釈したものを「(ベース)機能」と定義する⁽⁶⁾。ある機能が部分機能の系列によって達成されるとき、その部分機能の系列(の概念化)を「方法」と呼ぶ。一方、その機能達成方法が基づいている原理・理論や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、言い換えると、ある「方法」がその機能を達成する根拠を与えるものを「方式」と呼ぶ。機能の達成方式はその機能を実現する振る舞いや構造の本質的な部分への参照であると言える。つまり、設計過程の研究からも指摘されているように⁽¹⁷⁾、設計行為

において機能分解を行っていく際に、機能を実現する振る舞いと構造の一部が徐々に決定されているが、「方式」概念を導入した機能分解モデルはそのような逐次的な構造決定の過程をモデル化することができる。

なお、各層におけるマクロ-ミクロ階層は一致するとは限らない。特に、構造層における装置-サブシステム-システムの物理的な part-of 階層とベース機能層の機能-部分機能の達成関係階層は異なることがある^(2,3)。これはマクロ機能の全体性を規定する基準には様々なものがあるからである⁽¹⁸⁾。

メタ機能層では対象物の変化ではなくベース機能のゴールの種類(機能タイプ)や他のベース機能への役割(メタ機能)を表現する。後者はベース機能間の因果関係を目的論的に解釈した結果であり、システムが機能するためにベース機能同士が行っている協調のタイプを表し、ベース機能間の相互依存関係を表す。

4.2. 機能モデル表現言語 FBRL

FBRL (Function and Behavior Representation Language)⁽⁶⁾はベース機能を記述するための言語であり、振る舞いの記述に Functional Toppings (FTs)と呼ばれる解釈情報を付加することで表現する。FT には注目する対象物 (Obj-Focus), 対象物の属性 (O-Focus), 注目するポート (P-Focus), 対象物の必要性 (Necessity)がある。FBRL によって「機能」という概念レベルのものを振る舞いと構造という「物のレベル」に Grounding することができ、計算機が機能を実行することが可能になる。

4.3. 機能概念オントロジー

機能概念オントロジーは 4.1 節で述べた 3 種類の機能概念を定義する。図 5 はその is-a 階層の一部である。ベース機能には着目する側面に応じて物体機能、エネルギー機能、情報機能、機構系(力と運動に関する)機能の 4 種類に分類されている(この分類は人間の可読性を増すためであり、実際の定義はかなりの部分で共有している)。図 5 にエネルギー機能に関するベース機能概念の is-a 階層の一部を示す。これらは前述の Functional Toppings を参照することで定義されている。例えば「(エネルギーを)取る」という機能は、エネルギーの移動(振る舞いに関する制約)とエネルギー供給側への注目(P-Focus への制約)で定義されており、「除く」はさらにそのエネルギーが不要である(Necessity への制約)と定義されている。このような定義は、振る舞いに明確に対応づけられており、また装置や対象物、実現の方法からの独立性が高いという特徴がある。また、3 節で述べた共通オントロジーであるデバイスオントロジーに従うことで、機構系における力や運動に対する機能も同様に定義されている。機能概念オントロジーは、オントロジー構築・利用環境「法造」⁽¹⁹⁾上で実装されている。各機能概念の意味を公理として記述することで、機能モデル表現クラスに基づいて記述されたインスタンスモデルに対して、公理検証システムが適切な機能概念をマッピングすることができる。また、モデルの整合性をチェックすることもできる。

次に、機能タイプは機能によって達成されるゴールの種類を表現する⁽³⁾。我々は機能タイプを達成、保持、維持の 3 つに再定義した⁽⁶⁾。さらに、ベース機能が他のベース機能に対して果たす役割をメタ機能として概念化し、8 つの種類を同定した⁽¹⁸⁾。以下ではそのいくつかを説明する。まず、供給 (ToProvide), 駆動 (ToDrive), 可能 (ToEnable)はいずれも機能間に必須な因果関係が存在していて、順に、機能が働きかける対象となる入力物を生成する、機能の内部プロセスを駆動する(機能発揮に伴って意図的に消費される)エネルギーを生成する、機能の発揮条件を整える(供給、駆動の場合を除く)ことを表す。例えば、火力発電プラントにおいては、『ボイラーの「熱エネルギーを生成する」機能はタービンの「トルクを生成する」機能を「駆動」している』と言える。

防止 (ToPrevent), 許容 (ToAllow)は好ましくない状態に関するメタ機能であり、順に、他の機能の故障などの深刻な状態を起らないようにする、機能の副作用を補償する、ことを表す。例えば、

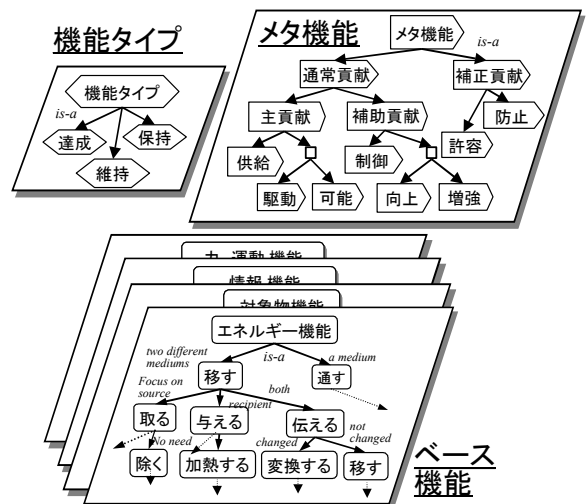


図 5: 機能概念オントロジー (部分)

発電プラントでは、『過熱器の「過熱する」機能は乾き度の低い蒸気によっておこるタービンの「トルクを生成する」機能の故障を「防止」している』と言える。Keuneke は「ToPrevent」を機能タイプのひとつであるとしているが⁽³⁾、どの部品のどの機能の故障を防ぐことに貢献しているかが暗黙的である。

このように、ベース機能が部品が対象物に対して果たす役割を表現する概念であるのに対し、メタ機能はある機能が他の機能に対して果たす役割を概念化したものであり、それぞれ対象とするものが異なる。なお、機能概念オントロジーは理論的に完備性を主張できるようなものではない。メタ機能については、機能間の動作タイミングをとる(同期させる)といったものがあることが分かっており、検討を進めている。

5. オントロジーの役割と効果

5.1. 拡張デバイスオントロジーの役割と効果

拡張デバイスオントロジーは記述対象を「対象物を入出力する装置」という概念で捉える際の視点を与える。このオントロジーに沿えば、機構系においても正しく装置という概念で対象を捉えることができる。明確な視点が提供されないと、一貫性のないモデルが記述されがちである。例えば、「カムがバネを縮める」と「ギア機構が回転数を変える」は異なった視点(前者が装置間作用オントロジー、後者が拡張デバイスオントロジー)に基づくモデルであり、ひとつのモデルに混在すると一貫性がなくなる。

視点はモデル化において対象の認識を導く役割を果たす。例えば、拡張デバイスオントロジーにおける「導管」概念は、機構レベルのモデリングにおいて、シャフトやワイヤーを導管と認識することで、機構素の集合体である「機構」がどこまで一つなのかをモデル記述者に示唆する役割を果たしている。そのような機構の認識によってモデルの組み立て性がよくなる。装置間作用オントロジーによる認識には導管概念がないため、作用のモデルは相対的で、モデル化の単位が曖昧である。

また、プラント系などの他の領域と共通の概念体系を用いることができる。機能語彙の抽象度(一般性)が高い概念は共通である。運動は方向という特別な特性をもっているためそれに依存する部分は共通ではないが、それを除くと共通の枠組みで捉えることができる。モデルを再利用するためには記述に基づく視点が共通であることは前提条件のひとつである。

機構系における 2 つのオントロジーを明示化したことで、機構系における機能概念を、それが基礎をおく「視点」に基づいて少なくとも 2 つに分類することができる。明示的分類によって概念の混在を防ぐことができると同時に、人間が用いる概念に基づく視点を変換することが可能になると考えられる。

5.2. 機能概念オントロジーの利用

機能概念オントロジーは機能に関する記述をする際に用いられる概念とそれらの間の規約を提供する。その利用と効果には以下のようなものが考えられる。

- **機能モデルの記述**: 振る舞い記述に FT を付加することによって機能モデルを記述することができる。さらにオントロジーの機能概念に自動的にマップされる。ひとつの機能モデルは観点または抽象度が異なる複数の機能概念にマップされ、必要に応じて使い分けができる。また、メタ機能を用いて部品の機能間の依存関係を明示化することができる。
 - **機能的知識の記述**: 同様に一般的になりたつ機能的知識の記述が容易になる。特に、知識に現れる機能概念を統一することで、意味が明確化し再利用性が向上するとともに、抽象度の異なる知識の記述に役立つ。機能の達成方法を規定する達成方式知識の記述とその利用について次節で述べる。
 - **説明文の生成**: 説明文を構成する語彙として用いると、様々な抽象レベルや観点におけるよく定義された共通性のある語彙を用いた説明文を生成することができる⁽⁶⁾。
 - **推論空間の規定**: 設計や故障診断などの問題解決において機能レベルにおける推論を可能にする。例えば、設計要求の多くは機能的語彙を用いて記述されるが、同じ空間において機能分解などの推論が可能になる。現在、改良設計システムの実装を進めている⁽²⁰⁾。
 - **機能構造の自動同定**: 機能空間を規定し、構造と振る舞いモデルから自動的に機能構造(設計意図)を同定することを可能にする⁽¹⁸⁾。5.4 節で述べる。
- 以上の利用と効果については、筆者らの研究グループにおいてシステムを構築し、実証を行っている。さらに以下のような利用も考えられる。
- **設計意図の記述**: 機能表現は設計意図の一部を表す⁽⁴⁾。特にメタ機能は、なぜ部品が存在し、システムが正常に動作するためにどのような役割を担っているかを説明する。このような記述は設計解の共有や再利用、設計上のネゴシエーションを促進する^(10,第2部3章)。
 - **設計事例などへの機能的インデックスの付加**: 設計事例や部品ライブラリに対して関連する機能概念でインデックスをつけることができる。

5.3. 機能達成方式知識の記述と利用

機能概念オントロジーを用いて記述される機能的知識の代表的なものとして、機能達成方式知識がある。オントロジーに定義されている達成方式概念は、従来暗黙にになっていた機能達成の背景となっている原理や法則を捉えることに役立つ。そのような原理、原則に基づくと方式を本質的性質で分類した is-a 階層として整理できる⁽²¹⁾。このような知識を視点にあわせて再構成し、方式特性木を動的に構成することが可能である。

このような知識を設計者に提示することで設計者支援を行う機能達成方式サーバを設計・開発した⁽²¹⁾。図 6 に示すように、システムは方式の is-a 階層知識のライブラリ(方式ライブラリと呼ぶ)を保持し、設計者が考慮している機能を達成する方法の候補を設計者の視点に合わせて多数提示することで、設計者が機能分解を行うことを支援する。例えば、設計者の接合に関する方式選択を助けるために、密閉性や分解性といった異なる視点にあわせた方式特性木を動的に構造化して提示することができる。

つまり、このシステムは知識の属人性という知識管理(KM)上の問題を、根本的な知識を蓄積してそれを各自の観点に応じて変形することで設計チーム(組織)における知識の共有を実現している。方式知識ライブラリは機能概念オントロジーによって明確に

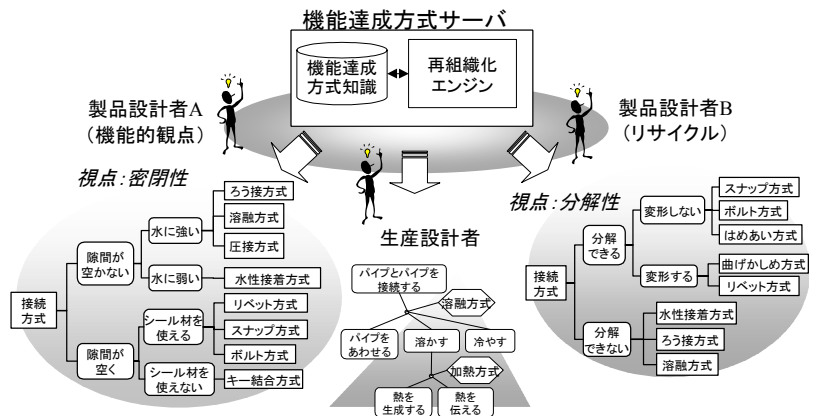


図 6: 機能達成方式サーバの利用イメージ

定義された機能概念に基づいた高い抽象度を持つため、領域独立性が高く、異なる領域において再利用性がある。

さらに、方式知識を用いて改良設計案を自動生成することができる。つまり、機能構造改良設計システムにおいて、既存物の機能達成方式をよりよい方式で代替することによって、機能構造が変化するような抜本的な改良設計案を生成することが可能になる⁽²⁰⁾。方式知識の is-a 階層、機能概念の is-a 階層における抽象度を操作することで、より柔軟な設計を行うことができる。

5.4. 機能理解

機能理解タスクとは対象の構造・振る舞いモデルから機能構造を同定する問題である。一般的には機能の空間の大きさが原因となって困難であるが、機能概念オントロジーによって推論空間を制限することで自動的な導出が行えるシステムを開発した⁽¹⁸⁾。

機能理解は(1)振る舞いー機能マッピング、(2)メタ機能同定、(3)機能達成階層生成の 3 ステップからなる。FBRL の機能解釈の軸を与える FT の値は十分少ない有限個であるので、まず各振る舞いに対してありえる機能解釈を網羅的に生成する。次に、各機能解釈に対して機能概念オントロジーの機能概念をマップする。このとき機能概念オントロジーの網羅性を仮定すると、定義に対応しない解釈を棄却することができる。

次に、これらの機能解釈の間のメタ機能を同定し(ステップ 2)、メタ機能を一つも持たないベース機能の候補は存在意義がないとみなして棄却することができる。さらに、メタ機能は装置の機能の間の統合性を規定する。つまり、どの装置の間の機能的な結びつきが強く、全体としてひとつのマクロな機能として認識されるかを与える。これは装置の間の物理的構造とは関連が薄いので、4.1 節で議論したような物理構造とは異なる機能達成階層を導出することが可能になる。また、ある種の機能の集合において中心的役割を果たす機能(メイン機能)を判断することが可能になる。通常、機能達成階層の生成(ステップ 3)は事前に記述された機能達成方式知識や統合パターン知識を用いて行われるが、メタ機能のこのような性質を利用することで、ある種の機能達成階層をそのような知識を用いずに最下層のベース機能集合から生成することができることを確認した。なお、メタ機能はマクロ機能の全体性を与える基準のひとつであり、システムは他の基準を多くのヒューリスティクスとして用意しており、ユーザがそれらを選択することで多様な機能構造を導出することができる。

6. 関連研究・検討

従来の機能表現研究は個別の部品やシステムの機能構造の表現形式に重点がおかれ、振る舞いに対する機能概念の記述は ad hoc になりがちである。つまり、機能概念に統一性がなく、同じと見なせる機能を果たしていても異なるラベル(シンボル)や意味の定義がなされている。一方、価値工学(Value Engineering, VE)の分野では、機能を表す動詞の統一的定義⁽⁸⁾などが試みられて

いるが、人間向けの記述にとどまり計算機理解可能な定義はされておらず、構造と振舞いに ground する必要がある。また、設計工学分野ではいくつかの一般的機能概念^(1,5)などが提案されており、機能を一般化することの重要性も認識されているが、非常に抽象度が高い少数の概念集合にとどまっているとともに、エネルギーの変換などの入出力関係だけで定義され人間の解釈が扱われていないため、設計者の意図を明確に表現できないと考えられる。

本研究で示した機能概念オントロジーの特徴は、(1)目的論的解釈の計算機理解可能な定義、(2)定義の機能実現方法からの高い独立性、(3)3つのカテゴリと2つ(is-a, part-of)の階層による組織化、にまとめることができる。まず、解釈を規定する情報を FT として表現することで人間の解釈を含んだ機能概念を、計算機解釈可能なように定義している。可能な機能解釈を振る舞い記述から自動的に生成できることがそれを示している。次に、一般にひとつの機能に対して複数存在する機能の実現方法を、振る舞いと構造に依存した部分とそれらに依存しない部分機能の系列として表現できる部分に分離し、前者の一部への参照のみを概念定義に含み、後者は別に機能間の(達成)関係として表現する(概念の定義と参照の分離)。この2軸の分離はいくつかの研究^(2,5)と共通するが、機能概念の定義が実現の方法の違いに依存しない構造や振る舞いなどしか含まないことが特徴である。一方、機能を振る舞いのマクロ化として定義する FR⁽⁴⁾では機能の定義が実現と一体化する。このように機能概念の定義をその実現から分離することによって、汎用な機能概念を用いて一般性のある機能分解知識(方式知識)を記述することができる。最後に、メタ機能という新たなカテゴリを追加し、多くの機能概念を is-a 階層として組織化している。さらに、ベース機能については part-of 階層に対応する達成関係階層を別に記述した。

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、^(7,22)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⁽¹⁷⁾、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⁽²³⁾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。

4.1 節で議論したように機能達成階層と物理的な全体一部分階層は異なる。しかし、従来の多くの機能導出システム(例えば⁽²⁴⁾など)は物理的構造に基づいて機能達成階層を導出している。本研究では、機能概念オントロジーが提供するメタ機能が規定する機能間(しいては装置間)の結合性に基づくことで、物理的構造とは異なる機能達成階層を導出することが出来る。

7. まとめ

機能的な設計知識の記述と管理を支えることを目指した機能オントロジーの構成とその利用について述べた。設計対象物を捉える際の視点を提供する拡張デバイスオントロジーや機能概念オントロジーを導入することによって、異なる領域における一貫したモデル記述や一般性の高い機能的知識の記述が可能になることと同時に、分野間の知識の相違を明確にできることを示した。

これらの結果は、筆者らが主張してきた「内容指向 AI」研究の一つの成果として位置づけられる。計算機利用技術の進展は知識の高度利用を要求する。そしてそれに応えるには知識そのものに関する深い理解が不可欠であり、知識を捉える視点、記述の枠組み、基盤概念の明確化等々が重要となる。その意味で、オント

ロジー工学に基づく知識の体系化は今後その重要性が増すものと思われる。

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、5.3 節で述べた機能達成方式サーバの開発は IMS 国際共同研究プログラム GNOSIS プロジェクトの一環として行われた。議論して頂いたプロジェクトメンバーの諸氏に感謝します。また、岡山大学 笠井俊信助手、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、三菱重工業(株))、佐野年伸氏(現在、オンキヨー(株))、高橋賢氏、吉川真理子氏、高橋知伸氏の貢献に感謝します。

参考文献

- (1) Pahl, G. and Beitz, W.: Engineering Design - a systematic approach, The Design Council, 1988
- (2) 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.
- (3) Keuneke, A. M.: A Device Representation: the Significance of Functional Knowledge, IEEE Expert, 24, 22-25, 1991
- (4) Chandrasekaran, B., Goel, A. K., and Iwasaki, Y.: Functional Representation as Design Rationale, COMPUTER, 48-56, 1993
- (5) Lind, M.: Modeling Goals and Functions of Complex Industrial Plants. Applied artificial intelligence, 8, 259-283, 1994
- (6) 笹島彦彦, 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
- (7) 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
- (8) 日本 VE 協会: 機能用語の選定とその分類体系, VE 用語研究会報告書, 1981
- (9) 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
- (10) 溝口理一郎, 他, 「人工知能による協調的シンセシスの方法論」プロジェクト, シンセシスの科学公開シンポジウム講演予稿集, 2001
- (11) de Kleer, J. and Brown, J. S.: A Qualitative Physics Based on Confluences, Artificial Intelligence, 24, 7-83, 1984.
- (12) Forbus, K. D.: Qualitative Process Theory, Artificial Intelligence, 24, 85-168, 1984.
- (13) 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
- (14) Mortensen, N. H.: Function Concepts for Machine Parts - Contribution to a Part Design Theory, Proc. of ICED 99, 2, 841-846, 1999.
- (15) 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
- (16) 小川潔, 加藤功: 機構学, 森北出版, 1983
- (17) 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.
- (18) 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
- (19) 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
- (20) 笠井 俊信, 他: 機能達成方式知識に基づく改良設計支援システム, 第 15 回人工知能学会全国大会, 2B2-07, 2001
- (21) 上田俊夫, 来村徳信, 溝口理一郎: 体系化された機能知識に基づく機能達成方式再構成システムの概念設計, 第 59 回情報処理学会全国大会, 2, 71-72, 1999.
- (22) Bradshaw, J. A., and Young, R. M.: Evaluating Design using Knowledge of Purpose and Knowledge of Structure. IEEE Expert, 6(2), 33-40, 1991.
- (23) Malmqvist, J.: Improved Function-means Trees by Inclusion of Design History Information, J. of Engineering Design, 8(2), 107-117, 1997.
- (24) de Kleer, J.: How Circuits Work, Artificial Intelligence, 24, 205-280, 1984