

機能的設計知識記述・共有の枠組みとその実用展開

A Framework for Sharing Functional Design Knowledge and its Deployment

來村 徳信^{*1}
Yoshinobu Kitamura

小路 悠介^{*1}
Yusuke Koji

高橋 知伸^{*1}
Tomonobu Takahashi

吉川 真理子^{*1}
Mariko Yoshikawa

柏瀬 雅一^{*2}
Masakazu Kashiwase

布瀬 雅義^{*2#}
Masayoshi Fuse

溝口 理一郎^{*1}
Riichiro Mizoguchi

^{*1} 大阪大学産業科学研究所
I.S.I.R., Osaka University

^{*2} 住友電気工業株式会社生産技術部
Plant and Production Systems Eng. Div., Sumitomo Electric Industries, Ltd.

Although importance of knowledge sharing among designers has been widely recognized, the knowledge about functionality in the conceptual design phase is often scattered across technical domains and it lacks consistency. Aiming at capturing such functional knowledge consistently applicable to other domains, this article overviews a framework for its systematic description based on the ontologies of functionality. A successful deployment of our framework in a production company is also discussed.

1. はじめに

人工物に関する知識のうち、構造や仕様などの客観的情報は明示化が容易で共有も進んでいるが、部品がなんのために存在するのか、なぜそのような構造になっているのかなどの設計者の意図(設計意図)は実務においては属人性が強く明示化が困難な状況である。人工物を目的論的な立場から捉えた機能表現モデル(Functional Representation)は設計意図の一部を表し、概念設計や故障診断などに大きな役割を果たす[Chandrasekaran 93]。これまでに多くの研究が設計工学分野やモデルベース推論分野で行われてきたが、記述に十分な規範がないために、記述がアドホックで、製品の領域や学問領域に依存し、一貫性がなくなりがちである。

そこで本研究では、オントロジー工学に基づいて機能的な設計知識を規定する記述枠組みの構築を目指している。本枠組みの一部は住友電気工業(株)生産技術部における通常業務において実用されている[溝口 02, 布瀬 03]。本稿では現在の記述枠組みを概説し、その実用における効果を紹介する。

2. 機能的設計知識共有へのアプローチ

機能的設計知識の共有が困難である主な理由を以下のようにとまとめることができる。

(1)対象依存性:多くの機能的知識は具体的な対象物やその領域に依存した用語を用いて記述されるため、異分野間での知識共有は困難であるばかりでなく、同じ領域においてさえ、異なった対象に適用可能かどうかの判断が困難となる。

(2)タスク依存性:機能的知識は実務においては特定のタスクに依存した表現方式に則って記述される。例えば、製品要求分析には品質機能展開(QFD)、故障診断にはFTA、FMEAなどが用いられる。機能に関する記述は両者に含まれるにもかかわらず、相互運用性がないため、何度も記述する必要が生じる。

(3)対象を捉える視点への依存性:機能の認識にはまずその主体と作用対象をグレインサイズの階層に沿って同定する必要

があるが、一貫性をもって行うことが難しい。例えば、ワイヤーを用いた切断装置(ワイヤソー)におけるワイヤーは、切断する主体とも、ワイヤーを動かすローラの作用対象物であるようにも認識できる。これは、オントロジー工学においてものが果たす役割を表す「ロール」概念の一種であり、対象世界のモノに対するロール割り当てを明確化する問題であると言える。

(4)機能の達成方式への依存:機能記述には「なにを」「どのように」達成するかが重要であるが、両者を分離することが容易ではない。例えば、「溶接する」は一見機能であるようであるが、対象物を溶かすという「どのように」にあたる部分を含む概念である。これは一般に概念の is-a と part-of の概念化の識別が難しいことと同一の問題である。

このような依存性を緩和するためには、依存性を明確にとらえたモデル記述を可能にする規約(記述ルール)が必要である。その鍵は対象を捉える際の概念であり、すなわちオントロジーである。本研究では対象を以下のようなオントロジーを構築することで、質の高いモデル・知識を記述しやすくすることを目指す。

- (a)対象を捉える際の基盤概念:拡張デバイスオントロジー
- (b)装置の機能を表示する概念:機能概念オントロジー
- (c)「どのように」と「なにを」を分離する概念:「方式」概念
- (d)タスク依存性を分離する概念:「不具合」概念

これまでに筆者らは(a)~(c)に関す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一般的な機能的知識を記述するとともに、設計者間での知識共有や機能構造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。(d)については現在考察中であり、別稿[小路 03]で述べる。

3. 機能的知識記述の枠組み

本枠組みにおいては機能を「客観的な物理量の時間変化を表す「振る舞い」をゴールの元で目的論的に解釈した結果」と定義する[來村 02a]。また、機能を表す動詞を機能概念と呼ぶ。

図1は本枠組みにおける11種類の機能に関する知識の記述の流れを表している。まず、なんらかの文書(図1(A), (B))などに基づいて、特定の人工物の機能的側面からのモデルとして、(対象固有)機能達成方式木(図1(F)。機能分解木または機能

連絡先:來村徳信, 大阪大学産業科学研究所, 〒567-0047
大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1, Tel:06-6879-8416, Fax:06-
6879-2123, E-mail: kita@ei.sanken.osaka-u.ac.jp

#:現在, 住友電装株式会社生産技術部

展開木とも呼ばれる)が記述される。基本的にある機能がどのような部分機能の系列によって達成されているか(機能達成関係と呼ぶ)を表す機能分解[Pahl 88]の枠組みに沿っているが、本枠組みでは「機能達成方式」という概念を導入している[来村 02b]。「機能達成方式」とは機能達成関係が成り立つ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。図中では、機能とその部分機能を結ぶ網がけされた四角で表す。方式は精密性や機能達成効率といったさまざまな特性を持ち、その全体機能の達成の具合を表す。

すべての機能は機能概念オントロジー(図1(J))で定義されている一般的機能概念クラスのインスタンスである。機能概念オントロジーは、装置の機能を表すベース機能(現在、約 220)、ゴールの種類を表す機能タイプ(3 種)、機能間の役割を表すメタ機能(8 種)に分類される[来村 02a]。ベース機能は物質やエネルギーなどの対象物の種類ごとに、一般-特殊階層(is-a 階層)を構成する。従来は非常に抽象度の高い少数の機能概念[Pahl 88]や価値解析のための計算機可読ではない語彙が提案されていた。本オントロジーでは、設計者の意図を表す解釈情報を分解し、対象物への注目や必要性を表す Functional topping (FT) を同定し、それを用いて対象物への依存性が低く、かつ、計算機処理可能な定義を可能にしている。それによって、対象の振る舞いモデル(c)が与えられた場合には、機能構造を半自動的に推定することができる[Kitamura 02]。また、拡張デバイスオントロジー(図 1(K))[来村 02a]に則ることによって視点を一貫させる。これについては次節で詳しく述べる。

部分機能にはその全体機能の達成に本質的に必要な機能(本質機能)とそうではない付加的な補助機能がある。補助機能は効率や品質を向上させたり、起こりえる不具合を防ぐために存在している。後者のタイプの補助機能の設計意図を表現するためには、起こりえる不具合を記述する枠組みが必要である。これについては別稿[小路 03]で検討している。

また、機能達成方式木の一部のみを記述した簡易表現として、装置の全体機能の記述(D)または装置で用いられている方式の記述(E)が考えられる。これらについては 6.2 節で述べる。

次に、汎用機能達成方式木(または汎用機能分解木、図1 (G))は同じ機能を達成する類似の機能分解木を統合したものであり、1段の機能分解ごとに異なる機能達成方式が OR で現れる。これは方式のとりえる選択肢を示す。

最後に、機能達成方式木に現れる個々の方式が方式知識に一般化される。さらに、同じ機能を達成する方式群が原理に基づいて is-a 階層として構造化される(図 1(L))。この構造化は原理に基づいているという点で、方式特性木(図 1(H))とは区別される。方式特性木は方式が持つさまざまな特性によって方式群を分類したもので分類の視点に依存しており、計算機システムによって視点に沿って再構成される[来村 02b]。

以上の流れは方式知識がなかった場合のものであるが、該当する方式知識が事前であれば対象の機能達成方式木(F)などの方式はその一般的クラスのインスタンスとして記述できる。

本枠組みではこれらの機能に関する知識が明確に区別されている。機能達成方式木(F)は機能間の達成関係(part-of 関係の一種)を表し、機能概念オントロジー(J)は機能間の一般-特殊関係(is-a 関係)を表している。また、これは「なにを達成するのか」の抽象化を表しているのに比べて、方式 is-a 階層(L)は「どのように達成するか」の原理の抽象化を表している。しかしながら、実際には両者は混同しがちである。次節で詳しく述べる。

これらのオントロジーとモデルはオントロジー構築利用環境「法造」[古崎 02]で記述され、方式探索支援システム[来村 02b]や発想支援システム[垂見 03]で利用されている。

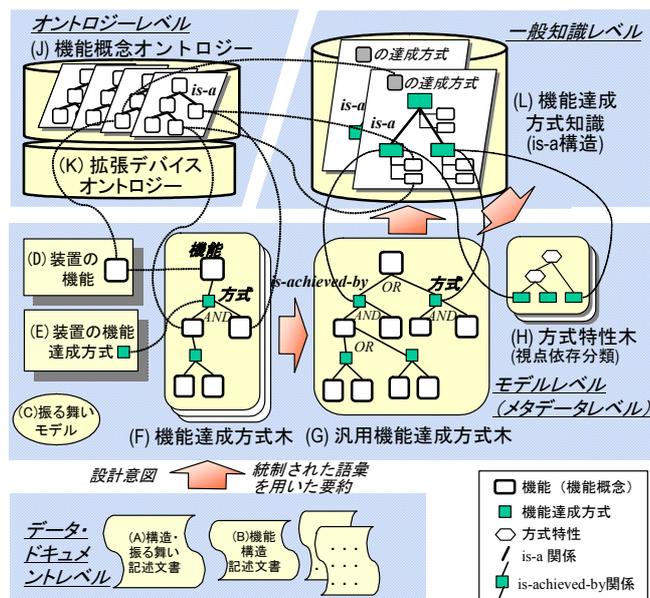


図 1. 機能的モデル・知識記述の枠組み

4. 機能モデルの記述と支援

本枠組みでは機能モデルの記述を以下のような漸近的なものととらえ、各ステップにおける支援を検討している。

- (1) 自由な語彙を用いた初期モデルの記述
- (2) 機能概念オントロジーの概念を用いた記述へのマッピング
- (3) 記述ガイドラインへの適合チェック
- (4) より適切な機能概念への調整(アライメント)

ステップ(1)では既存ドキュメントなどからの自然言語処理を用いた抽出支援などによって、オントロジーを考慮せずに自由な形式での初期モデルを作ることを指す。次に、ステップ(2)の支援には一般的なシソーラスの利用や、対象物の変化に基づく機能概念の定義の検索などが考えられる。ステップ(3)については、前節で述べた拡張デバイスオントロジーに基づいて表1に示すような記述ガイドラインを策定した。大きく機能そのもの(F と表記)、部分機能間の関係に関するもの(S)、機能間の達成関係に関するもの(A)の3種類に分類される。表 1 のうち F1,F3,S2,S3 などは記述テンプレートの使用によって強制することができる。また F2,S1, A1 などは機能概念オントロジーの定義を用いることで計算機的に検証することが可能であると思われる、現在検討を進めているところである。ステップ(4)については、機能概念の混同しやすいペアについての知識を用意することで支援を目指している。例えば、2 つのものを張り合わせている場合には、2 つのものが 1 つのものになったとみなす場合には「合わせる」と捉えられるが、距離に注目した場合には「接触させる」と捉えられる。このようなとらえ方の違いは振る舞いの記述そのものが変わるものであり、FT による目的論的解釈の違いとして捉えることが出来ない。それゆえ機能概念オントロジーの is-a 階層では比較的遠い関係にあるが、類似関係として整理し、記述者に提示することでより適切なものへの変換を支援する。

図 2 は生産装置の機能達成方式木の記述例を示している。図 2(a) が実際にあった初期モデルであり、図 2(b) が洗練された汎用機能達成方式木である。まず、「溶接する」という機能は、ガイドライン F1,F2 に従って「一体化する」という機能と、「溶融」方式に分けられるべきである。こうすることで、同じ一体化を達成するボルトナット方式を OR で追加し、汎用木を構成することが出来る。次に、部分機能の1つ目である「合わせる」は、ここで

は距離を 0 にすれば機能達成が可能であるため、ガイドライン A2 と上述した類似関係知識を用いて、「接触させる」に変更(アラインメント)できる。次に、図 2(a)において部分機能である「アークを作る」は全体機能に対する貢献が直接的ではない(A2 を満たさない)。暗黙的となっている「液化する」とそれを達成する「昇温する」を挿入することによって、達成関係が明確になる。さらに、「放置する」も「固化する」と「降温する」が挿入されるべきである。このように暗黙的になっていた部分機能を補うことで、他の方式(昇温するための抵抗方式など)を考慮することが可能になる。別稿[垂見 03]ではナノテク材料合成プロセスにおける洗練の例を示している。

領域における教科書などで見られる「アーク溶接方式」といった方式は、汎用機能分解木における方式選択の結果としての方式の組み合わせを指していることが多い。図 2 に示すようにアーク溶接方式は、溶融方式、熱エネルギー方式、アーク放電方式の組み合わせである(厳密には溶接助材方式も含まれる)。

教科書に見られる多くの達成方式の分類もこのような複合方式を分解せずに分類しようとしているものが多い。例えば、半導体材料生産工程における切断方式の分類では、ワイヤソー方式やウォータージェット方式といった装置で用いられているものに基づく分類が行われている。実際には、ワイヤソー方式は、切りしろ部分を除去する「部分除去方式」、そのための結合力の低減を物理的力で行う「物理力方式」、物理力を生成する「線形摩擦力方式」の組み合わせとして組織化されるべきである。それによって、力をかけるための方式知識を、他の領域、例えば家庭用洗濯機と共用することが可能になる。

5. 機能モデル記述・利用とその実用における効果

本枠組みを利用して記述した機能モデルや機能的知識の利用方法は以下の 3 つに分けて考えることが出来る。

- (1) 設計意図の理解
- (2) 設計上の選択肢の明示化と網羅的拡張
- (3) 不具合(故障)原因の探索

本節ではこれらの利用形態とともに、住友電気工業(株)における実用における実証例についても触れたい。

まず、機能達成方式木は対象装置を機能の側面からみたモデルを表し、構造や振る舞いのモデルでは表せない、設計意図を明示化する。特に、補助機能の場合には効果が大きい。この効果は一般的な機能分解木[Pahl 88]などと同じであるが、本枠組みにおいては方式概念や機能概念オントロジーによって、一定の質をもったものの記述が容易になり、相互運用性が向上する。この点における住友電工における実践の中での評価はきわめて高く、なじみやすいにも関わらず、従来暗黙的であった知識を明示化し、共有する助けになるというものである[布瀬 03]。技術者が自身のために機能モデルを記述する強い動機となっており、成功の一因といえる。また、生産工程に携わる設計者、運用技術者、保全者などの異業種の技術者が機能達成方式木を共同構築するという実験を行ったところ相互理解が促進されるという効果が確認された[溝口 02]。ここでは機能達成方式木が「適切なレベルでの中間言語」として機能していると考えられ、新しい応用としてきわめて有望であると考えている。

次に利用方法(2)として、汎用機能達成方式木はある製品の設計において取り得る選択肢を明示するために用いられる。つ

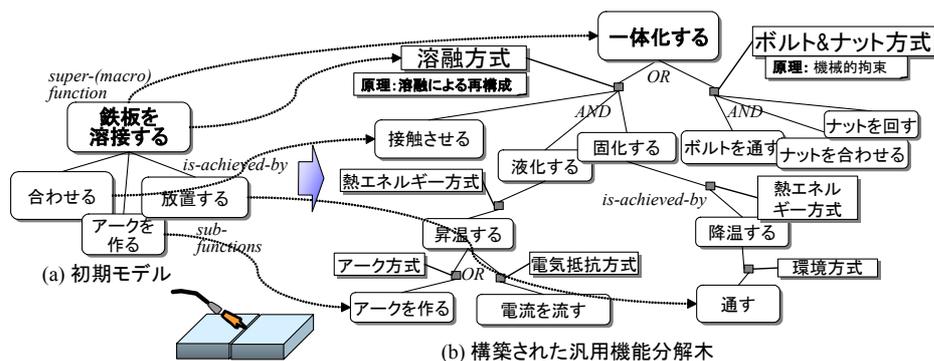


図2. 機能達成方式木の記述の例

F. 機能について

- F1. 機能は「なにを」を表し「どのように」(方式)を含まない
 - ・装置をブラックボックスとみなす
- F2. 機能は対象世界における対象物の変化を表す
 - ・条件でも、目標状態でもない。
 - ・工程外における行為(設計、製造、段取り)を記述しない
- F3. 機能の主体は対象世界における装置である
 - ・人も一つの装置と見なすが、設計者・製造者は含まない
 - ・機能の分解に沿って装置のサイズが小さくなる
 - ・装置はロールであり静的構造物として存在する必要はない。
- F4. 目的語を含む複合動詞や副詞表現は分解する
 - ・副詞表現は方式の属性として記述する

S: 部分機能間について

- S1. 部分機能間に流れる対象物とその状態が特定できる。
- S2. 時間が経過する
- S3. 部分機能間で暗黙にロールが入れ替わらない

A: 機能達成関係について:

- A1. 全体-部分関係(aggregation)である
 - ・全体機能と部分機能系列全体の入出力は一致する
 - ・時間関係でも因果関係でもない。時間的には同時である。
 - ・単なる一般-特殊ではない。それらは機能間の is-a, もしくは方式の is-a として表現されるべきである。
- A2. 部分機能の全体機能への貢献は直接的で明確なものである
- A3. 方式は一つの原理を表す
 - ・複数の原理を持つものは分解する
 - ・他の方式との違いを明確に表現する
 - ・用いる道具などではなく原理を概念化する
 - ・直接的に上の全体機能へのみ依存する
- A4. 本質機能と補助機能を区別する

表1. 機能達成方式木記述ガイドライン (一部)

まり、現行方式の採用理由とともに検討された他の方式とその不採用理由を明示化できる。これはいわゆるデザインレビュー時に、高い一覧性を持つ資料として機能する。住友電工生産技術部では実際のデザインレビューの場において標準的記法として採用されている。従来は表形式の比較表を用いて複数の設計案を検討していたが、装置全体に対しての案になるため機能分解の各段における方式の選択についての検討を網羅的に行うのが困難であり、平均すると 3 回程度のやり直しが生じていた。機能達成方式木の段階的記述、また方式の明示化による方式間の相違の明示化によって、出席者の疑問や検討に耐えうる資料の作成が容易になった結果、やり直しが大幅に減少しほとんどなくなるほどになった。また、対象装置と異なる分野のレビュー参加者にとっても理解が容易になったという意見も得られた。

汎用機能達成方式木のもうひとつの使い方は、ある製品群や領域における特許を一覧し、差異を明確にすることである。住友電工では、従来は技術者と弁理士の間での発明の新規性に

関する知識共有が難しく多大な労力と時間(従来 3~4 週間)がかかっていたが、本枠組みの汎用機能達成方式木を用いて説明したところ、申請書作成の期間が通常の 1/3 の 1 週間になった。また、従来特許との差分を詳細に検討することによって、特許明細書の請求項が4項から7項に広範囲化した例もあった。

また、一般的な方式知識ベースを用いて、選択肢を拡張することができる[来村 02b]。これは一種の発想支援システムと見なせる[垂見 03]。例としては、ワイヤソーの張力制御装置について繊維業界において知られていた「磁性流体方式」を適用することが有望であるという見込みを得た。また、住友電工においては外観検査画像処理の開発において、ベテラン技術者の蓄積した方式知識を参照することで、通常 2 週間程度かかる開発が新人技術者が方式選択することにより 3 日間でスムーズに行えた。

利用方法の(3)として、不良、不具合(故障)の原因の探求にも役立つ。各機能で発生しうる不具合を記述し、それを防止・許容するような機能が用意されているかを調べることで、不具合の原因を系統立てて調べることができる。住友電工では半導体ウェハ研磨装置のプロダクトに閾値以上の小さな異物が残る不具合の原因追及をある技術者が長年利用してきた仮説系統図を用いて4, 5ヶ月取り組んだが、改善できなかった。同一の技術者が本手法を学んだ後、同装置の機能構造モデルを作成し、それに基づいて原因究明に取り組んだところ 2,3 週間で解決した。他の実践例も[布瀬 03]で報告されている。

また、同じ機能達成方式木が異なるタスクに適用可能であることが確認されている。半導体インゴット切断装置の切断面角度調整装置についてデザインレビューを行い、実用に供したところ予測しない不具合が発生した。通常であれば不具合診断には仮説系統図を新たに作成しつつ診断を行うわけであるが、この装置の場合、デザインレビューで用いた機能構造モデルを再利用して診断にあたり、実際不具合原因の究明に成功した。また特許申請の説明資料にもほぼそのままのものが使っている。

このように本枠組みの実用は順調に進んでいるが、一つの問題は、当初は PowerPoint などによる記述であったこともあり、厳密な観点から評価すると、初心者が記述した機能モデルが枠組みが持つ制約を完全には満たしていない場合が多々あることである。現在では機能モデルをデータベースに格納し検索するソフトウェア SOFAST^(R)を開発し、それを用いて記述・共有を行っており、さらに前節で述べたような記述に計算機的制約を加える枠組みを付加することを検討している。なお、SOFAST^(R)については住友電工社内における利用にとどまらず、使用する他社によるユーザーズグループが組織されている。

6. 検討

6.1 対象領域と限界

本枠組みの拡張デバイスオントロジーは「装置」とそれらの間を流れる「対象物」が認知できる、プラント、工業製品、生産工程などに広く適用可能である。現在までに発電プラント、化学プラント、衣類洗濯機、簡易印刷機、半導体生産装置、検査装置などに適用されている。また、現在、ナノテクノロジー材料合成プロセスにも適用を行っている[垂見 03]。現在の機能概念オントロジーは物質、エネルギー、力、運動を対象とした機能を扱っており、現在、電気と情報に関する機能を検討中である。なお、複雑な形状に関する機能の表現はできない[来村 02a]。

6.2 セマンティックウェブへの展開

図1のモデルレベルにおける機能達成方式木(図 1(F))などは構造や振る舞いに関するドキュメント(図 1(A))に対して設計

意図を表すメタデータの一種と見なすことができる。つまり、ドキュメントで述べられている部品、構造トポロジー、振る舞いなどに対する機能的側面からの注釈であるとみなせる。拡張デバイスオントロジー(J)と機能概念オントロジー(K)はメタデータスキーマとしての役割を果たし、規定されるタグと規約に沿ってメタデータを記述することができる。また一般的な方式知識(L)もメタデータに対してクラスを定義する役割を果たす。例えば、設計図(図 1(A)に該当する)に対してその装置の設計意図を表すメタデータとして、装置全体の機能を表す機能概念(図 1(D))や用いられている方式(図 1(E))を内容記述子[Euzenat 02]としてつけたり、もしくは機能達成方式木(図 1(F))そのものを論理的構造に関する内容表現メタデータ[Euzenat 02]として記述することができる。機能と方式を識別していることによって、より適切な検索などが可能になると考えられる。一方、対象の機能構造を説明するような設計文書(図 1(B))に対しては、その要約を与えるメタデータであると言える。実装としては法造[古崎 02]の Export 機能を用いて、オントロジーの DAML+OIL スキーマに沿った機能達成方式木の RDF 形式によるメタデータを出力できる。

7. おわりに

オントロジーに基づく機能的設計知識の記述枠組みとその実用を報告した。現段階ではオントロジーの計算機的定義は機能モデルの記述時または自動導出時に制約として働いているが、現在、記述された知識をタスクや視点に応じて動的に再構成する枠組みを目指して研究を進めている。

参考文献

- [Chandrasekaran 93] Chandrasekaran, B.; Goel, A. K.; and Iwasaki, Y. Functional representation as design rationale. *COMPUTER*, 48-56 (1993)
- [Euzenat 02] Euzenat, J., Eight Questions about Semantic Web Annotations, *IEEE Intelligent Systems*, 55-62, March, 2002.
- [布瀬 03] 布瀬雅義, 柏瀬雅一, 篠木秀次: 生産技術の体系化と生産・設備設計, *人工知能学会誌*, 18(2), 114-118, 2003.
- [来村 02a] 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, *人工知能学会論文誌*, 17(1), 61-72 (2002)
- [来村 02b] 来村 徳信, 他: 機能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における利用, *人工知能学会論文誌*, 17(1), 73-84 (2002)
- [Kitamura 02] Kitamura, Y., et al.: A Functional Concept Ontology and Its Application to Automatic Identification of Functional Structures, *Advanced Engineering Informatics*, 16(2), 145-163, (2002)
- [小路 03] 小路悠介, 他: 機能モデルにおける補助機能の分類とその設計意図の明示について, 第 17 回人工知能学会全国大会, 1E1-05, 2003.
- [古崎 02] 古崎晃司, 他: 「ロール」および「関係」に関する基礎的考察に基づくオントロジー記述環境の開発, *人工知能学会論文誌*, 17(3), 196-208, 2002.
- [溝口 02] 溝口 理一郎, 他: オントロジー工学の成功事例 ~ 機能オントロジーに基づく生産技術知識の共有・再利用~, *人工知能学会研究会資料, SIG-KBS-A202-07*, 2002.
- [Pahl 88] Pahl, G., and Beitz, W.: *Engineering Design - a systematic approach.* : The Design Council (1988).
- [垂見 03] 垂見晋也, 他: ナノテクノロジー材料合成プロセスに関する機能的知識の体系的記述の試み, 第 17 回人工知能学会全国大会, 1G2-04, 2003.