

技術知識管理のための機能に関するオントロジーと セマンティックアノテーション

Towards Ontologies of Functionality and Semantic Annotation for Technical Knowledge Management

來村 徳信
Yoshinobu Kitamura

鷲尾 尚哉
Naoya Washio

小路 悠介
Yusuke Koji

溝口 理一郎
Riichiro Mizoguchi

大阪大学産業科学研究所
The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

This article shows ontological definition of “function” of engineering artifact in the device-centered modeling on the basis of “role” concept. By extending such device-centered definition, we try to distinguish several definitions of functions in a broader sense. As an application of these ontologies, metadata annotation for technical documents is also discussed. The distinguishable definitions of function can help us clarify differences between our ontology and other schemata.

1. はじめに

人工物について知識を記述する際に「機能」概念は欠かすことができない。設計とは機能を構造へマッピングする問題であり、人工物の機能的側面のモデルは設計の根拠（設計意図 (Design rationale)）の一部を表している。このような知識は設計レビューや問題解決、改良設計などにおいて本質的な役割を果たす。そのため機能表現について多くの研究が設計工学、機能表現、価値工学といった分野で行われてきたが [1]-[6][10][12]、統一された定義や十分確立された記述法はないといえる。その結果設計などの現場では、機能の表現は記述者による恣意的なものになってしまいがちである。例えば、扇風機の機能は同じ使い方に関わらず、(1)「空気を動かす」、(2)「人間を冷やす」、(3)「人間を快適にする」などと捉えられる。これは、扇風機が作用する対象となる物をなにとみるか、扇風機のモデル化の範囲をどこに設定するかによって異なっているとみなせる。また、CPU ファンの場合には「熱暴走を防ぐ」と表現されることがある。これは正常に機能しているときには発現していない現象を参照している。さらに、溶接機械の機能は「溶接する」と考えられがちであるが、この概念は対象物同士を「一体化する」という「機能」と、それらの一部を溶け合わせる（溶融させる）という機能達成の「方式」の両方を意味している [6]。

このような記述の恣意性は機能の同一性の判断を困難にし、検索などによる知識活用の妨げとなるとともに、異なる装置や分野における再利用を阻害する。筆者らはこれまで装置の観点から見た機能に関するオントロジーを構築することで、機能を特定の観点から捉え、恣意性を排除することを目指してきた [6]。

本稿では、まず、筆者らが行ってきた、装置を中心とした「機能」概念の直感的な定義に対して、オントロジー工学で理論が確立されつつある「ロール概念」[8][11]に基づいた詳細な定義を行う。次に、その定義を拡張することで、装置を中心とした機能とは異なる、より広い意味でのさまざまな「機能」概念の違いを説明するための一般的な機能の分類体系を目指す。さらに、機能に関するオントロジーをセマンティックウェブ環境における技術文書に対するメタデータのスキーマと見なして、メタデータを記述する枠組みについて述べる。機能に関する一般的な分類体系に基づいて、関連するさまざまな記述様式（スキーマ）の相互運用を目指す。

2. 装置を中心とした機能のロール的定義

本節では装置概念を中心としたオントロジーにおける「機能」概念を「ロール」概念を用いて定義する。ここでは「特定のコンテキストで entity が担うもので、他の概念を参照せずには定義できないもの」をロール概念と呼び、ロールを担った状態の entity をロールホルダーと呼ぶ [11]。図 1 に法造-OE による定義を示す。まず、振舞い (Behavior) は、装置 (Device) が主体 (agent) としての役割を果たして、対象物 (Operand) と呼ばれる物理的存在物を変化させるときの (図 1(a))、装置の入出力における状態 (IO-State) の時間的変化として定義される (図 1(b))。対象物の変化 (振舞い) を装置の入出力という観点から捉え、装置の振る舞いであると認識する。装置は互いに接続され (図 1(c))、集積されてシステムを構成するが (図 1(d))、振舞いはそのような接続・集積の状況 (コンテキスト) とは独立に、客観的に捉えられる。

振る舞いは「機能コンテキスト」のもとで対象物に対して「ベース機能」としてのロールを果たす。図 1 ではベース機能 (Base-Function) は、機能コンテキスト (Function-Context, 図 1(e)) の部分要素間に成り立つ「機能発揮関係」 (Function-Performing, 図 1(f)) において振る舞いがベース機能ロールを果たしているときのロールホルダーであると定義されている。このとき装置は機能実行主体 (Function performer) としての役割を果たしている。例えば、熱交換機は除熱機能の機能実行主体ロールを果たし「クーラー」というロールホルダーとして認識される。ロールを中心とした観点から見た図 1 中央のロール概念階層では同じベース機能ロールの定義が「機能コンテキストのもとで振る舞いによって果たされるもの」 (図 1(g)) であることが示されており、次節で議論するように「目的指向ロール」の下位概念である。

機能コンテキスト (図 1(e)) は、システムに組み込まれている部品の機能の場合には (System-Function-Context, 図 1(h))、組み込まれているシステムの機能 (ゴール機能と呼ぶ。厳密には機能達成関係 (“way of function achievement”, 図 1(i)) から定義される) や周囲の装置の持つ機能から決定される。このコンテキストへの依存関係は解釈論的には「機能は振る舞いのある目的のもとで目的論的に解釈したもの」 [6] であると言え、その解釈のための情報を表現したものが、Functional Toppings (FTs) [6] の値である。この FT の値は機能コンテキストによって決定され、コンテキスト依存性を部品ローカルに押し込めたものである。なお、装置がシステム全体であるときの機能コンテキスト (User-Function-Context) は設計者または利用者の意図 (価値/有用性基準) に基づいて決定される。

このように装置の機能を振る舞いと関連づけて人間の認識の結果と見なすことは、多くの機能表現研究と共通するとらえ方である[1][2][5][12]。また、装置の機能を振る舞いのルール(ホルダー)として捉えることは、ルールに関する理論[8][11]にも合致している。まず、装置の機能(と振る舞い)は対象物を参照するという意味で **founded** (他の概念を参照せずに定義できない[8])である。次に、機能は **anti-rigid** [8](アイデンティティにとって本質的ではない)で **dynamic** [8] (時間的に変化する、同時に複数によって担いうる)である。例えばいすを踏み台としても使ったときも椅子としてのアイデンティティは失われない。熱交換器の振る舞いは常に「熱の移動による温度の変化」であるが、機能はコンテキストによって「熱を除く」または「加熱する」である。

システム内の装置はベース機能の他に、機能コンテキストのもとで、メタ機能[6](必須ではない)と部分達成機能(必須)を果たす。前者は接続されている他の装置の機能へのルールであり、後者は含まれるシステムの機能の部分達成するルールである(次節で述べる)。システム内装置の機能はこれら3種類の機能の集積(ロールアグリゲーションと呼ばれる[11])である。

3. より広い意味での機能の分類

本節では前節で述べた装置を中心とした「機能」概念を、より広い意味での機能の定義の中に位置づけることを目指す。図2はその一部を示しており、広い意味での機能とそれに関連する概念を分類した概念階層(図の左側)*1と、その分類を記述するための「機能性質記述子」の概念階層(右側)である。なお、この記述の目的は、「機能」概念に対して普遍的なオントロジー的定義を与えるのではなく、その意味の違いを明確化する(類別する)ことである。

2節で述べた機能の定義において機能ルールは振る舞い(対象物の変化)によって担われていた。ここではそれを一般化し、人工物に付随するなんらかの要素(時間的変化に加えて特性や形状など)が担うと見なす。それらの存在(とそのモデル)は客観的なものであるとし、どのような要素に注目して機能を解釈するか(「解釈コンテキスト」と呼ぶ)によって異なる機能が得られると見なす。図2では解釈コンテキストの要素として、機能の「主体」(記号 A で表す)、「対象物」(記号 O で表す)とその機能主体との「位置関係(L)」、働きかけと変化を表す「作用」(P)、「時間」(T)の5つを(機能分類の識別のために)捉える。これらの概念要素の下位概念を階層化したものが、機能を分類するための機能性質記述子の階層である。例えば、機能の「対象物」は装置を流れる「フロー物」(記号 OO で表す)、他と接続されている「装置」(OD)、装置を使うユーザ(OH)に分類される*2。他の記述子については以下の分類の際に述べる。

さらに、2節の「機能コンテキスト」を一般化し「目的指向コンテキスト」として捉える。これは要素が達成を指向する目的を指

示するものであり、これに「解釈コンテキスト」を合わせた「目的指向解釈コンテキスト」(ロール解釈コンテキスト)のもとで、人工物(の要素)が果たすロールが「目的指向ロール」である。

まず、目的指向コンテキストが「機能コンテキスト(GF)」であるとき、「広義の機能」であると言う。2節で述べたように機能コンテキストはユーザによって意図されている(GFU)、またはその達成に貢献する(GFS)ことを表す。一方、意図されていないものを「意図外事象(現象)」と呼び、それを(擬似的な)達成目的とする意図外コンテキスト(GU)を考えて、その達成構造を構成できる。これは4節で述べる意図外事象のモデル化に用いられる。

次に、「広義の機能」は「作用機能」と「疑似機能」に分類される。「作用機能」はなんらかの状態変化を解釈したもの(解釈コンテキストの作用(P)が作用(PP)クラスに限定化)と定義される(疑似機能は本節の終わりで述べる)。「作用機能」はさらに「デバイス機能」と「環境機能」に分類される。前者はシステム内の変化(LS クラス)を概念化する*3。一方、「環境機能」は人工物またはモデル化されたシステムの外(LE)における変化を含意しているものを言う。これには特に製品のユーザの行動やユーザにおける変化が含まれ、ユーザ機能コンテキスト(GFU)を伴う。例えば、扇風機の機能として「空気を動かす」はシステム機能であり、「人間を冷やす」は環境機能である。「環境機能」はさらに、物理的变化を意味する「物理環境機能」と時計の計時機能のように人間の心理的状态(OHC)を変化させる「解釈環境機能」に分けることができる。Environment function [1] や purpose concept [2] などはこの「環境機能」に類似している。Hubka らの purpose function と technical function [4] の区別は「デバイス機能」の機能コンテキストの分類(前者が GFU, 後者が GFS)に対応する。

「デバイス機能」には、まず、対象物の属性値を変化させる(PPS)「状態作用機能」がある。そのうち、フロー物(OO)への装置(AD)の作用を入出力間における変化(LSI-TFR)で概念化したものが「デバイス対象物機能」であり、これが前節の「ベース機能」に対応する。「デバイス間作用機能」は「シャフトがカムを回す」といった他の装置への作用(OD)を表す[6]。一方、「プロセス作用機能」は対象物の変化プロセスをメタ的に変化させる(P3 (PPP を略記))もので、機能(AF)がシステム機能コンテキスト(GFS)のもとで他の機能へ果たす役割である「機能間作用機能(メタ機能)」がある。これは、接続されている他の装置の機能(F₂)への役割である「因果的メタ機能」([6]における「メタ機能」)

- *1 記述子には独立性があるため、この機能の分類階層は説明のためであり、唯一の分類(is-a)階層であることを主張するものではない。
- *2 記述子の記号は特殊化ごとに1文字を付加していくことで、分類階層上の位置を示すことを意図している。例えば OD の O は対象物の分類であることを、D は装置であることで特殊化されたことを表す。
- *3 図2ではクラスラベルの [] 内に機能性質記述子の記号を示すことで定義を示し、スロットを用いた詳細な定義の表示は省略している。

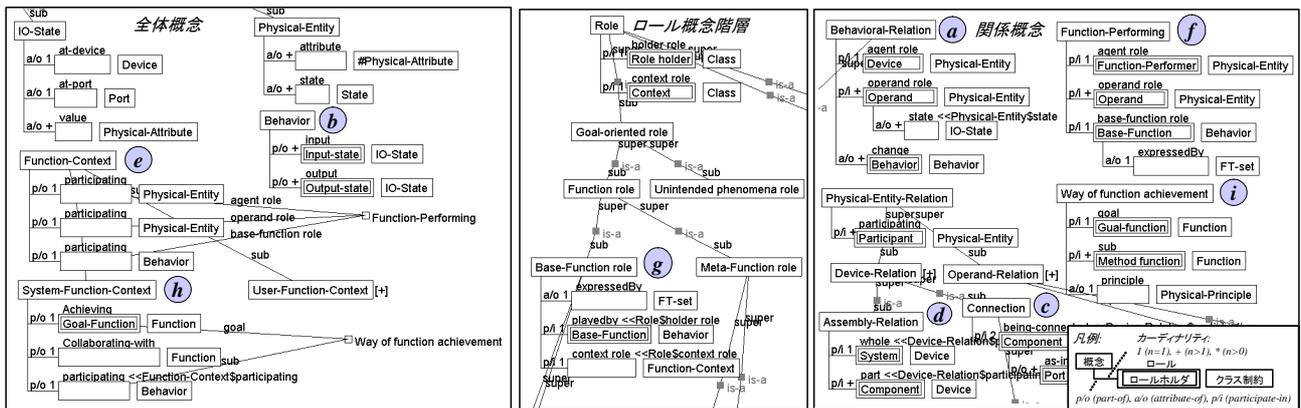


図1. 装置を中心としたモデリングにおける「ベース機能」のロール的定義(部分)

と、機能達成関係における上位機能の部分になっている(P3AP)ことを表す「部分達成機能」に分類される。前者の一部は「可能メタ機能」と捉えられる。これはベース機能 F_1 の出力が F_2 の達成に必要な条件のうち主要(材料やエネルギー)ではないが鍵となる条件を充足するような貢献(P3ACNE)を言う[6]^{*4}。例えば、トランジスタの増幅機能に対して、バイアス電圧を与えるベース機能は可能メタ機能を果たす。

一方、「特性可能機能」は主体や対象物のもつ属性(形状などを含む)が特定の値(範囲)であることを概念化した「特性」が果たす(AP)機能である。例えば「導線の高導電性特性が「電気を通す」という機能を可能にする」と言える。これは「可能メタ機能」と同様に通電機能の鍵となる必要条件ではあるが別の主要な機能(電圧をかける)が必要であることを表している。しかし、特性の保持(AP)自体には作用が伴わず、また、装置内の関係である(LSC)点が異なる。一般に人工物は機能発揮のために特定の構造や属性値を持つように設計・製造されており、このことは当然ではあるが、「鍵」であることから概念化されると思われる。対象物の特性(APO)の場合には例えば、「石油の可燃性特性がボイラーの気化機能を可能にする」と言える。特に、可能になるプロセスが人間の行う行為の場合には、「用いられるもの(しばしば道具と呼ばれる)の特性によって人間の行為が可能になる」と捉えられる(環境機能の一種として同様に定義される「ユーザ行為可能機能」として捉えられる)。松尾らは空間の持つ機能の一部を「空間の性質が人間の行為を可能にする」と捉えており[9]、これはユーザ行為可能機能に位置づけられる。

「作用(P)」や「時間(T)」の下位概念の一部は機能分類階層に独立(直交)して、修飾的に付加することができる。「状態達成(PPSA)」以下の分類は状態の達成の仕方を表しており、「機能タイプ」[5][6]としてベース機能に対して付加される。一方、「状態禁止(PPSP)」や「プロセス禁止(P3P)」は状態変化やプロセスが生じないことが目的であることを表す(「防止機能」と呼ぶ)。例えば、文鎮の機能を「(横向きの力に)反作用を与える」と表現することは「デバイス対象物機能」+PPSAC であるが、「紙が飛ぶことを防ぐ」と捉えることは「デバイス間作用機能」+P3P である。

同じ機能であっても、機能の作用時間 T_1 の違い(T)によって、その意味が変わる。例えば、「温度を上昇させる」は、(1)システ

*4 単に必要な条件のひとつを満たすとき、他の条件の充足を見越して、「可能にしている」と言うことも一般にはあるように思われるが、ここでは厳密な定義を与えている。

ム機能時にある地点の温度を上昇させる(TFA)、(2)部品機能時に入出力間で一定の温度差を達成する(TFR)、(3)改良設計時に温度がより高くなるように改良する(TD)などがある。

最後に、「疑似機能」は作用に直接的には基づかないものを言う。まず「特性機能」は主体がある特性を持つこと自体を機能と呼ぶものである。これは特に材料分野で見られ、「高導電性機能を持つ」などと用いられる。これは、その特性が前述の「特性可能機能」(「電気を通す」機能を可能にする)を持つことに暗黙的に基づいて、機能として捉えられている。「方式機能」はその達成方式を含意するものを指す。例えば、「溶接する」「吸着する」「洗浄する」「圧着する」などはいずれも「方式機能」である[6]。また、「能力機能」は「行為」をする能力(capability)を持つことを表す。例えば、「人間は歩行機能を持つ」は他への作用ではない「歩行」という行為を実施する能力を持つことを表している。

4. 機能に関するセマンティックアノテーション

これまで述べてきた機能に関するオントロジーをメタデータスキーマとして利用して、人工物に関する Web リソースに対して機能に関するメタデータ(「機能メタデータ」)を付加することができる(この枠組みを *Funnotation* と呼ぶ。図 3)。記述者のコンテキスト(設計、診断などのタスクや技術領域など)を反映しがちなドキュメントに対してメタデータを付加することで、横断的に扱うことを目指す。そのために異なるスキーマ(オントロジー)における概念の対応関係をオントロジーマッピング知識として記述しておき、それに基づいてメタデータを変換する。現在、その一例として機能メタデータから FMEA シートへの変換を実現している。

本メタデータスキーマ(*Funnotation Schema* と呼ぶ)は F-Core, B-Unintended, F-Vocab, F-Ways の 4 つのレイヤーに分かれた OWL クラス/プロパティから構成される。F-Core は機能を捉える際の基盤概念のレイヤーであり 2 節で述べたものを簡略化した entity (物理的存在物), function (機能), way (機能達成方式)などのクラスが定義される。また、プロパティとして、function が entity によって果たされることを示す agent (function は entity が値域であるような agent プロパティを持つ)や機能間の分解関係を表す part_function などが定義される。F-Vocab レイヤーは、機能概念オントロジー[6]に基づいて、Function クラスのサブクラスとして、「伝える」や「分離する」などの一般的な機能を表す動詞概念(機能概念と呼ぶ)を定義する。また、F-Ways レイヤーは Way クラスのサブクラスとして、「摩擦方式」といった一般的

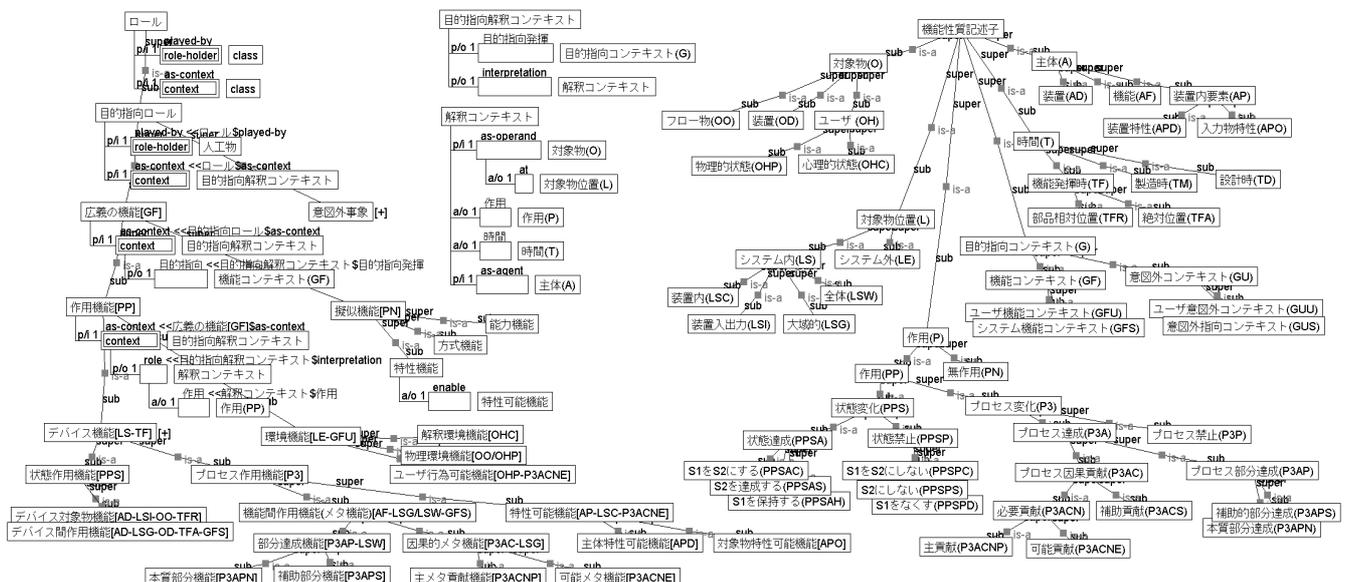


図 2. 広い意味での機能の分類(左)と機能性質記述子(右)

な機能達成方式を定義する。各方式は、機能達成の原理と、それを用いて達成できる機能(目標機能と呼ばれる)、その方式を構成する機能(部分機能と呼ばれる)で定義される。

これらのクラスを用いて、機能メタデータを RDF で記述することができる。機能に関するメタデータとして(1)装置全体・サブシステム・部品の機能、(2)用いられている方式、(3)機能達成関係を表す機能構造モデル、(4)複数のあり得る機能構造を表す汎用機能分解木などがある。例として、ワイヤソーの説明文に対する機能メタデータを図 4 に示す。まず、ワイヤソーが装置(funnotation:device)のインスタンスであり、「分割する」という機能クラス(split_entity)のインスタンスである機能を果していることが、has_function プロパティを用いて表現されている。このようなメタデータを用いて装置に関するドキュメントを機能を表す語彙とその is-a 階層を用いて、検索することができる。ここで、方式と区別されていることが重要な役割を果たす。しばしば見られる方式を含んだ機能概念(3 節でいう「方式機能」)を機能と方式に分離することにより、より適切な検索ができる。図 4 の例では、ワイヤソーの機能は“cut”(切断する)というせん断を含意しかねない表現をさせて、“split”(分割する)という同一のものが同質の複数の部分に分かれるという意味の機能で表現されている。さらに、その方式は F-Ways で定義される frictional_way (摩擦力方式)のインスタンスであり、それが split_entity のインスタンスと selected_way プロパティで結びつけられている。これでこのワイヤソーでは摩擦力方式で分割を達成していることが表される。

さらに、摩擦力方式による部分機能を記述しさらに分解することで、完全な機能構造を記述することもでき、例えば“abrasive grains”(切削液)の機能として、文中で表現されている「高い摩擦係数を維持する」という機能の他に、「ワイヤを冷却する」などの機能を持っていることを明示化できる。多くの設計ドキュメントは設計の結果だけを記述していることが多く、このような付加的な機能の設計意図は暗黙的になっていることが多い。また、特許文書などのその新規点が明示化されている場合においては、機能的側面からの要約文を与える。

切削液のワイヤ冷却機能は「ワイヤの断線を防ぐ」という機能をも果たしている。これは 3 節で述べた「意図外事象」を禁止する(P3P)機能である。この意図外事象を表現するためのスキーマが、B-Unintended (Unintended behavior layer) である。3 節で述べた機能と同じ基本作用モデルで捉えることで、同じ記述枠組みで扱うことができる。このスキーマを用いて不具合事象を機能分解木に付加したとき(拡張機能モデル)、例えば、FMEA オントロジーと B-Unintended の概念を対応づけておくことで、FMEA シートを生成することができる[7]。

このようにレイヤー化することで、アナテータは必要なオントロジカルコミットメントのレベルを選択することができる。また、F-Vocab は我々の機能概念オントロジー[6]に基づいているが、代替として Pahl & Beitz の Generally-Valid Functions [10] や NIST の Functional basis [3] を用いることが考えられる。このような対応付けに 3 節で述べた分類体系を用いることができる。例えば Functional basis の語彙の一部には 3 節における「方式機能」や「機能メタ機能」、「防止機能」が区別されずに混在している。F-Vocab とのマッピングを行う際には単に語彙のマッピングではなく、このような「機能」概念の詳細な区別が必要である。

5. まとめ

「機能」概念のロール概念に基づいた装置を中心とした意味定義を拡張することで、いくつかの機能の意味の違いを明確化できることを示した。またその利用として、セマンティックウェブ環境におけるメタデータスキーマに関する枠組みを議論した。今後、機能表現研究や設計実務に現れるさまざまな機能概念の意味の違いを明確化し、相互運用性の実現を目指したい。

謝辞: 日頃からロール概念について共に議論している溝口研究室 古崎晃司助手、砂川英一氏の貢献に感謝の意を表したい。

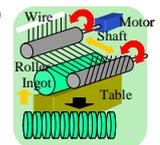
参考文献

- [1] Chandrasekaran B, Josephson JR. Function in Device Representation, Engineering with Computers 2000;16(3/4):162-177.
- [2] Chittaro L, Kumar AN. Reasoning about Function and its Applications to Engineering, Artificial Intelligence in Engineering 1998;12:331-336.
- [3] Hirtz J, et al. A Functional Basis for Engineering Design: Reconciling and Evolving Previous Efforts. Research in Engineering Design 2002;13:65-82.
- [4] Hubka V, Eder WE. Functions Revisited. Proc. of ICED 01 2001.
- [5] Keuncke AM. A Device Representation: the Significance of Functional Knowledge. IEEE Expert 1991;24:22-25.
- [6] 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の枠組み, 人工知能学会論文誌, 17(3) 196-208, 2002
- [7] 小路悠介, 来村徳信, 溝口理一郎: オントロジーに基づく統合機能モデルとその知識変換, ~FMEA シートへの変換~, 第 18 回人工知能学会全国大会, 1H2-03, 2004.
- [8] Masolo, et al.: Social Roles and their Descriptions, in Proc. of KR2004, 267-277, 2004
- [9] 松尾豊, 他: 空間の意味表現と空間機能検索, 人工知能学会研究会資料, SIG-SWO-A303-01, 2004.
- [10] Pahl G, Beitz W. Engineering design - a systematic approach. The Design Council; 1988.
- [11] 砂川英一, 古崎晃司, 来村徳信, 溝口理一郎: オントロジーにおけるコンテキストに依存する概念の取り扱い, 第 19 回人工知能学会全国大会, 2D1-04, 2005.
- [12] Umeda Y, Tomiyama T. Functional Reasoning in Design, IEEE Exert 1997:March/April:42-8

ドキュメント

(<http://www.fine-yasunaga.co.jp/english/home/wiresaw/index.htm>)

What is Wire Saw?.....A wire (a piano wire of $\phi 0.08$ to 0.16mm) is wound around several hundred times along the groove of guide roller. Free abrasive grains (a mixture of grains and cutting oils) are applied to the wire while it keeps running. The abrasive grains rolled on the wire work to enable cutting of a processing object into several hundred slices at one time. It is mostly used to cut electronic materials.



機能メタデータ

```
<funnotation:device rdf:about="http://ex.org/ex1.html#wire-saw">
<funnotation:has_function>
<funnotation:split_entity rdf:about="http://ex.org/ex1.html#cut">
<funnotation:selected_way
  rdf:about="http://ex.org/ex1.html#grains">
</funnotation:selected_way>
</funnotation:split_entity>
</funnotation:split_entity>
</funnotation:has_function>
</funnotation:device>
```

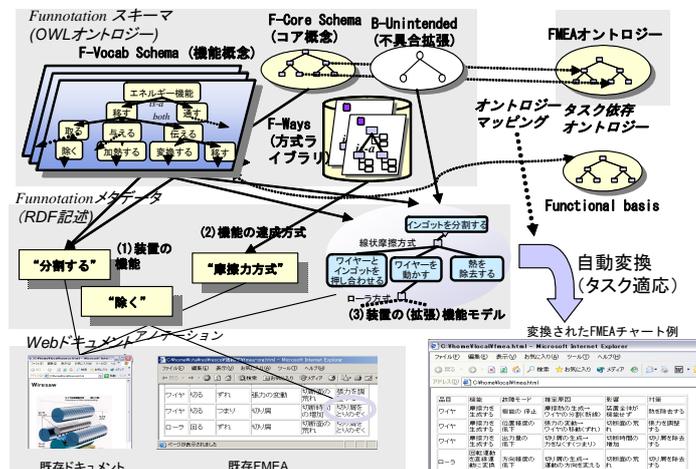


図 3. Funnotation フレームワークと例

図 4. Funnotation メタデータの例