

生物の機能実現方法に基づく発想支援のための オントロジー構築とガイドラインの提案

Development of Biomimetics Ontology and Its Description Guidelines for Idea Creation Support Based on Function Realization Methods of Natural Organisms

鳥村 匠^{*1} 來村 徳信^{*1} 古崎 晃司^{*1} 溝口 理一郎^{*2} 駒谷 和範^{*1}
Sho Torimura Yoshinobu Kitamura Kouji Kozaki Riichiro Mizoguchi Kazunori Komatani

^{*1} 大阪大学産業科学研究所

The Institute of Scientific and Industrial Research (ISIR), Osaka University

^{*2} 北陸先端科学技術大学院大学

Japan Advanced Institute of Science and Technology

For supporting engineers in creating ideas, the authors have been developing a biomimetics ontology. In this research, function realization methods of natural organisms have been extensively described in the biomimetics ontology. In addition, we have established guidelines for describing the function realization methods in the ontology. These guidelines show issues to be considered and steps of description. Their usefulness for describing them in a uniform way is also demonstrated using an example.

1. はじめに

近年、「自然に学ぶものづくり」が注目を集めており、生物規範工学[下村 10]は、生物の持つ様々な特徴に学び、工学的に優れた機能を持った製品を開発することを目標としている。生物学者の持つ知識を工学者に提供し、社会的／工学的なニーズと生物学的な知識を組み合わせることを目指して、バイオミメティクス・データベースの開発が進められている[下村 10]。

その核として、生物規範工学オントロジー[古崎 14]の構築が進められている。それを入力として、オントロジー探索ツール[廣田 09]を用いてマップをインタラクティブに生成し、工学者が俯瞰的に生物学的知識を含むオントロジーを探索する。それにより、工学者の発想が刺激され、優れた機能を持つ製品の開発が期待される。そのためには、より多彩な生物の持つ機能に関する情報がマップに表示される事が求められる。

本研究では、生物規範工学オントロジーの中でも、生物がどのように機能を実現しているかに関する知識(機能実現方法)について重点的に拡充を行う。より多くの機能実現方法に基づいてマップを生成し、工学者の発想支援をより豊かに行うことが目標である。より多様な機能実現方法がマップ上で提示されることによって、工学者が視覚的に機能実現方法を比較すること、組み合わせることが可能になると考えられる。例えば、生物 A と生物 B が同じ機能を異なる方法で実現していることが分かれば、より低コストで模倣できる生物の実現方法を選択できる。また、生物 C は生物 A と同じ機能を持っていないが、生物 A が機能を実現している方法の一部を実現していることが分かれば、生物 A と生物 C の機能実現方法を組み合わせて模倣し、より効率的な機能実現方法の開発が可能になると期待できる。

この目標のために、2つの研究項目に取り組む。まず第1に、オントロジー内の生物の機能実現方法に関する記述を拡充する。第2にその記述における様式や場合分けの仕方などをガイドラインとしてまとめる。

研究開始時にはオントロジー内の記述様式に統一性がなく、記述や情報の読み取りが難しかった。ガイドラインによって、記述が容易になり、記述様式も統一されると期待される。このうち、本研究では記述様式の統一が可能かどうかの確認を行う。

2. オントロジーの拡充

オントロジーの拡充はネイチャーテック研究会¹を主な情報源として、情報を構造化して記述した。本章では、実際の拡充の要点について述べる。

2.1 機能実現方法の基礎的表現

機能実現方法をオントロジーに記述する際、最も基礎となる要素が、機能分解知識である。機能分解知識とは、「ある機能をそれを達成させる部分機能の列に分解(機能分解)」した結果として得られる、機能間の達成関係に関する知識である。

例えば、図1はオントロジー内のカタツムリの「防汚」機能の機能分解知識例を示している。「カタツムリは自分の体が汚れるのを防ぐ(防汚)機能を、水の膜をまとう(親水)機能を部分機能として実現して、達成している」ことを表している。この場合は、部分機能が1つだけであるが、防汚機能と親水機能の間の「関連機能」リンクによって、機能分解関係が表現されている。

機能分解知識について詳細に記述することで、マップ上で表示される機能実現方法は多様化する。生物それぞれが持つ機能が詳細に記述され、それにともない特定の機能から模倣できる生物の多様性も増える。また、1章でも述べたように、ある機能について、複数の生物の機能実現方法を組み合わせた新しい機能実現方法の発想も期待できる。

2.2 記述の要点

本節では、機能実現方法の記述の要点として、機能主体の「部位性」の考慮、機能の「発現理由」である構造や行動の記述、その発現理由の生物固有性の考慮、の3点について述べる。



図1 カタツムリの防汚機能の機能分解知識

連絡先: 鳥村匠, 大阪大学産業科学研究所,
〒567-0047 大阪府茨木市美穂が丘 8-1, 06-6879-8416,
torimura@ei.sanken.osaka-u.ac.jp

¹ <http://nature-sr.com/index.php>

まず、機能の主体の「部位性」を考慮して書き分ける必要がある。すなわち、機能を発揮している主体が、生物全体なのか、一部の部位のみであるのかによって機能の記述を変える。つまり、基本的には生物全体の機能として記述するが、記述すべきでない場合に部位の機能として記述する。部位の機能として定義すべき場合は、大きく次の3つの場合に分けられる。第1の場合は、生物の内部でのみ機能が達成されている場合である。例えば、人間の心臓の「血液を送り出す」機能は「人間」の持つ機能ではなく、心臓のみが持つ機能とした方が自然である。第2の場合は、全体から部位を切り離して機能が発揮される場合である。例えば、植物の種子のみが飛行する場合は、その植物が飛行機能を持っているとはいえないため、種子(部位)の持つ機能として定義する。第3の場合は、部位ごとに違う実現方法を用いて機能を達成している場合である。例えば、魚が胸びれと尾ひれでそれぞれ別々の「低抵抗(流体抵抗が低い)」機能実現方法を持っているとする。その場合、それぞれの部位ごとに機能実現方法が提示される方が望ましいので、各部位が持つ機能として定義する。オントロジー内では、全体の機能として扱える場合は、図2のハチドリのように生物の「特徴的機能」として定義する。一方、部位のみが発揮している機能である場合、図2のアルソミトラ(上述の2番目の場合の例である)のように、部位について記述し、その部位の「関連機能」として記述する。

次に、機能の発現理由の記述について述べる。機能を実現できる理由は、部分機能、構造、行動のどれかであると考えられる。そのうち、部分機能は前節で述べた機能分解知識として記述される。その他の機能が発揮される理由となる構造や行動は「発現理由」として記述される。発現理由は、図3のサメの低抵抗機能とサメ肌構造の関係のように、機能の「根拠となる構造(または、行動)」として記述される。

最後に、発現理由の一般性、特有性を考慮して書き分ける。上述の発現理由と機能の関係が、その生物に特有な関係なのか、一般的な関係といえるのかを考える。これは、マップにおけるユーザへの表示を適切にするためである。つまり、一般的な関係の場合のみがマップに表示されるように書き分ける。例えば、ザトウクジラの胸びれとアルソミトラの種子はどちらも揚力



図2 部位性による機能の書き分けの例

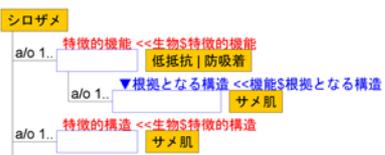


図3 発現理由の記述例



図4 発現理由が一般的な場合の記述例

発揮する。その2つの機能実現方法のうち、「突起」と「揚力」の関係はザトウクジラに特有で、「翼」と「揚力」の関係は一般的であるといえる。図3のような発現理由の記述は「少なくともこの生物ではこの理由で発現する」ことを表している。したがって、一般的な関係の場合は、図3の記述に加えて、図4の揚力機能のノードのように、発現理由である構造(行動)を、機能の一般的な発現理由として記述する。ここで記述された構造(行動)は、マップにおいて、その構造(行動)を特徴として記述されている生物が全て表示される。生物固有である場合には図3の記述だけで十分である。

3. ガイドラインの提案

3.1 ガイドラインの概要

本章で提案するガイドラインは、実際の拡充を通して得た知見をもとに、生物の機能実現方法をオントロジーに記述する際の要点について、一般的な形としてまとめたものである。具体的には、記述要素ごとの場合分けとそれぞれの記述方法、要素を記述する順序などについてまとめている。ガイドラインは、主に注目して記述する要素によって「機能」「生物」「生態環境」の3パターンを考案した。これらは実際に拡充する際に、注目されると考えられる要素である。次節ではそのうち「機能を中心に拡充するガイドライン」について述べる。

現在のガイドラインは、情報学者が法造を使ったオントロジーに記述をする際に、統一的な記述の指針となることが目標である。そのため、ガイドラインに基づいて、実際にオントロジーを統一的に記述できるのかを検討する。それを通して、ガイドラインとして使用が可能であることを確認する。

3.2 機能を中心に拡充するガイドライン

機能を中心に拡充するガイドラインにおけるステップは図5の通りである。各ステップの要点を述べる。

(1) 機能ノードの追加

ある程度対象物や動作を一般化した形で、追加する機能 F を決める。オントロジー上でその機能 F を「機能」概念ノードの下位概念ノードとして定義する。「機能」ノードの直接的な下位概念にならないように、適切な上位機能概念 F_u がまだ記述されて

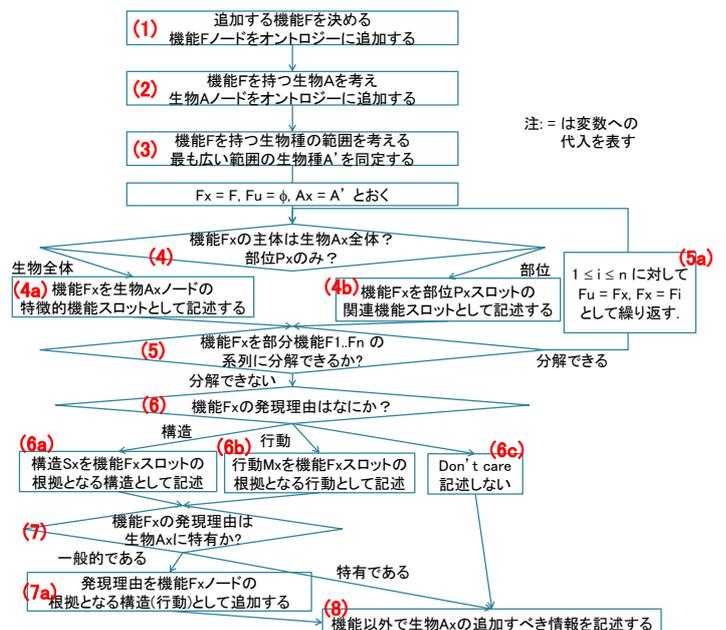


図5 機能を中心としたガイドライン

なければ、その機能概念 F_u も機能ノードとして定義する。

(2) 生物ノードの追加

機能 F を実現している具体的な生物 A を考える。生物学的に分類して、適切な上位概念 A_u の下位概念となるノードとして定義する。

(3) 機能 F を付加すべき生物種の同定

生物 A の上位概念 A_u (上位種) も機能 F を実現していないかを考察する。機能 F を実現している最も上位の生物概念 A' に対して、「生物 A' が機能 F を達成している」という情報を記述する。

ここで、後述する機能分解の場合との一般性のために、 $F_x = F$, $F_u = \phi$, $A_x = A'$ とおく。ここで「 $=$ 」は変数への代入を表し、等価関係を表すものではない。また、 ϕ は存在しないことを表す。 F_x は現在考慮している機能を表し、 F_u はその F_x の上位機能を表す。 A_x は現在考慮している生物である。

(4) 機能の発現主体の同定

生物 A_x の機能 F_x を発現している主体が、生物全体であるか、特定の部位のみであるかを判断する。2.2 節で述べたように、可能であれば大きな部分(全体)の機能として、3 つの場合には部位の機能として定義する。後者の場合はその部位を P_x とする。考察の結果によって、(4a)と(4b)に分岐する。

(4a) 生物 A_x が全体として機能 F_x を発現している場合

まず、 F_u が ϕ の場合、生物 A_x ノードの「特徴的機能」スロットのクラス制約として機能 F_x クラスを記述する。これは「生物 A_x は特徴的機能として機能 F_x を発揮しうる」ことを表す。次に、 F_u が ϕ ではなく特定の機能クラス F_y である場合には、後に図 6 で示すように、 F_x の上位となる機能である特徴的機能 F_y の「関連機能スロット」のクラス制約として機能 F_x クラスを記述する。

(4b) 生物 A_x の部位 P_x のみが機能 F_x を発現している場合

まず、 $F_u = \phi$ の場合、まず、生物 A_x ノードの「部位」スロットのクラス制約として部位クラス P_x を記述し、次に、その部位 P_x スロットの「特徴的機能スロット」のクラス制約として機能 F_x を記述する。このように、部位 P_x スロットを介在させることで、機能 F_x が、生物 A_x 全体ではなく、部位 P_x のみの「特徴的機能」であることが表現できる。次に、 $F_u = F_y$ の場合は、 F_x と F_y の機能の主体は同じ部位であるかを考える。一般的に(5)の機能分解をするごとに、機能の主体はより小さな部位に詳細化されると考えられる。また(4a)と同様に、後で図 6 で示すように、特徴的機能 F_y の「関連機能スロット」のクラス制約として機能 F_x クラスを記述する。

(5) 部分機能への分解

現在考えている機能 F_x を実現するような、より粒度の小さい部分機能の系列 F_1, \dots, F_n を考えることができるかどうかを考察する。これは 2.1 節で詳細に述べた「機能分解」行為に相当する。分解できる場合、図 5 の(5a)のステップに進み、 $1 \leq i \leq n$ に対して、 $F_u = F_x$, $F_x = F_i$ として、ステップ(4)と(5)を繰り返す。その結果、例えば、図 6 のような記述ができる。図 6 の左側は「生物 A は全体の特徴的機能として機能 F を発揮する。機能 F は、部分



図 6 機能分解知識の記述様式(例)

機能 F_1 と部分機能 F_2 によって実現されている。その部分機能 F_2 は機能 F_{2_1} によって実現されており、それは機能 $F_{2_1_1}$ と機能 $F_{2_1_2}$ によって実現されている」ということを例として示している。図 6 の右側は、「機能 F は部分機能 F_1 と部分機能 F_2 によって実現される」、「機能 F_{2_1} は部分機能 $F_{2_1_1}$ と $F_{2_1_2}$ によって実現される」ということをそれぞれ表している。

このような機能分解行為の再帰的実行は、考慮している機能 F_x を実現している理由が部分機能ではなく、構造や行動などの「発現理由」として記述できるようになった時点で止めて、(6)のステップに進む。

(6) 機能の発現理由

機能 F_x について、その機能が発現している理由を考察する。これは 2.2 節で述べた行為に相当する。生物 A_x のスロットとして機能分解された部分機能である機能 F_x の発現理由によって以下の 3 つの場合に分岐する。

(6a) 構造 S_x によって機能 F_x を発現している場合

(6b) 行動 M_x によって機能 F_x を発現している場合

(6a)(6b)のように、生物 A_x やその部位 P_x の持つ構造 S_x (行動 M_x) によって機能 F_x が発現されている場合、「機能 F_x 」スロットの「根拠となる構造(行動)」スロットのクラス制約として、その構造 S_x (行動 M_x) を記述する。

(6c) わからない場合

生物 A_x の場合の機能 F_x の発現理由について、生物学的に判明していない場合などは、Don't care とする。

(7) 発現理由の一般性

2.2 節の最後で考察したように、(6)で考察した発現理由 (S_x または M_x) と機能 F_x との達成関係が一般的といえるのかどうかを考察する。考察の結果によって、(7a)と(7b)に分岐する。

(7a) 一般的な関係の場合

発現理由 (S_x または M_x) と機能 F_x の関係が一般的で、同じ構造(行動)を特徴として持つ生物が同じ機能を発揮すると考えられる場合は、図 7 のように「機能 F_x 」ノードの「根拠となる構造(行動)」スロットのクラス制約として発現理由 S_x (または M_x) を記述する。

(7b) 固有的な関係の場合

発現理由機能 F_x と発現理由の関係が生物 A_x だけが持つ特有な関係である場合は、機能 F_x ノードには発現理由についての情報は記述しない。

(8) 生物 A_x に追加すべき情報を追加

生物 A_x に関する情報のうち、マップに表示する必要があると思われる情報を「生物 A_x 」のノードにスロットとして追加する。ここまでで追加した以外の、生物 A_x の特徴的であるといえる「部位」「行動」「生態環境」などの情報を追加する。

3.3 記述様式の統一

本研究開始前にも、筆頭著者以外の記述者らによって、生物規範工学オントロジーに機能実現方法は記述されていた。しかし、記述者、記述した日などによって記述様式が異なっていた。これを、筆頭著者が 3.2 節で述べたガイドラインに基づいて機能実現方法を統一的に書き直せるのかを確認した。記述様式の統一を行う上で、記述してある内容は減少させず、ガイドラインに沿って記述した時に見込まれる形に統一した。

例として「サメ肌」と「防吸着」機能の関係を用いて統一による変化を図 8 に示す。図 8 の左側は研究開始時に既にオントロ



図 7 発現理由 S_x が機能 F_x と一般的な関係の場合の記述

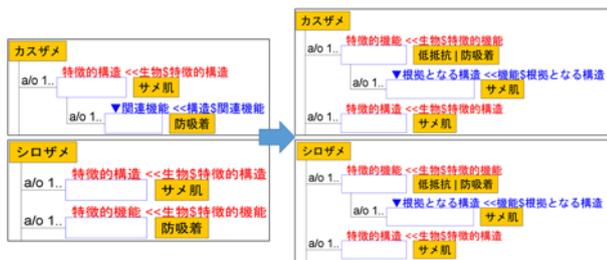


図8 記述様式の変化

一上に記述されていた、シロザメとカスザメに関する記述を示している。これらの「防吸着(藻などが付着するのを防ぐ)」機能と、その機能の発現理由であるサメ肌の間には関係は同じであるにも関わらず、記述の方法が違っていた。シロザメの場合は「サメ肌」と「防吸着」が並列に情報として与えられているだけで、その2つ間の関係は「どちらもシロザメの特徴である」だけであった。カスザメの場合は、防吸着はサメ肌の関連機能として関係を与えられていた。調べると、この「防吸着」機能はサメ肌が発現理由となっていると考えられるので、ガイドラインの規約や情報の順序に基づいて、右側のように記述を統一した。

記述様式の統一を通して、現在の生物規範工学オントロジーに記述されている情報源に記述されていた機能実現方法の事例について、現在のガイドラインによって書き方を揃えることができおり、例外的な手順や特別な記述項目が必要な例は出現していない。

今後の展望として、生物学者に情報を提供してもらう際に、必要な要素を指定したり、情報を構造化して提供してもらうための指針として発展させる予定である。

4. 結果と効果

本研究によるオントロジー拡充、またガイドラインによる記述様式の統一の結果、マップに表示される機能実現方法が増加した。例えば、「防汚」機能の機能実現方法に関するマップが以下のように変化した。図9が研究開始時のマップで、図10が2015年3月24日現在のマップである。研究開始時のマップでは、50の機能実現方法が表示され、現在のマップでは108の機能実現方法が表示されている。これらのマップでは、同じ生物が別のリンクを辿って複数回出てきている場合は重複して数えた。

図10のマップには、防汚の部分機能、実際の生物の機能実現方法などが主に追加されている。例えば、黒太線で囲った部分のように「ミミズは、表面に微弱な電位をまとい、地中の水を集めて体の表面にまとうことで、地中でも泥に汚れず生活している」というような情報が新たに表示されるようになった。また、ダニは「防汚」機能を直接達成していないが、吸湿性物質を使うことで、空気中の水蒸気から水を集める「集水」機能を達成している。これらを組み合わせると、例えば、「ダニのように集水を行い、ミミズのように集水した水をまとめて防汚機能を実現する」という新たな機能実現方法が発想できるようになった。

このように、マップに表示される内容が、より多様になり、工学者の発想支援が行いやすくなったといえる。例えば、ユーザがまだ知らなかった生物の機能実現方法を知ることによって、その生物を模倣した新技術の発想が期待できる。また、同じ機能を達成する複数の生物の機能実現方法を比較することで、より効率的な機能の実現が行えると期待できる。あるいは、複数の生物の機能実現方法を組み合わせると、新技術の開発も期待できる。今後、これらの効果を実際に、生物学者、工学者などに使用してもらうことで、確認する必要がある。

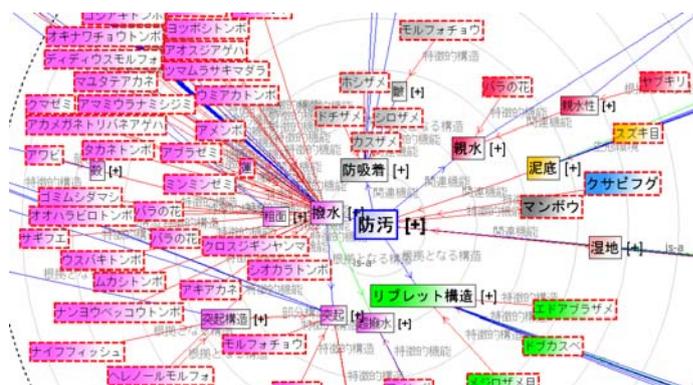


図9 研究開始時の「防汚」マップの一部

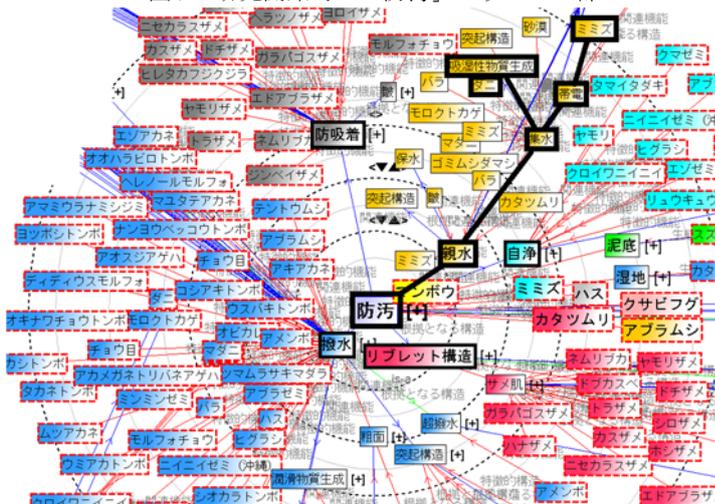


図10 現在の「防汚」マップの一部

5. まとめ

本研究では生物規範工学において、工学者の発想支援の充実を目指して、生物の機能実現方法について、生物規範工学オントロジーに記述し、その際のガイドラインについてまとめた。また、まとめたガイドラインによって、機能実現方法について、記述様式を統一できることが確認できた。

今後は、ガイドラインによって統一された記述様式を活用し、オントロジーでの記述様式に基づいて情報のマップへの表示を設定することで、情報を絞り込み、より見やすいマップを生成可能にして、さらなる発想支援を目指す。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 24120002 の助成を受けたものです。

参考文献

[廣田 09] 廣田健, 古崎晃司, 齋藤修, 溝口理一郎: ドメイン知識俯瞰のためのオントロジー探索ツールの開発, 第23回人工知能学会全国大会, 2I3-2, 2009.
 [古崎 14] 古崎晃司, 多田恭平, 來村徳信, 溝口理一郎: オントロジーと Linked Data に基づくバイオメテック・データベースの構築, 第28回人工知能学会全国大会, 2F1-4, 2014.
 [下村 10] 下村政嗣: 生物の多様性に学ぶ新時代 バイオメテック材料技術の新潮流, 科学技術動向, Vol.110, pp9-28, 2010.