

特集 「スマートファクトリーとAI」

スマート製造のエコシステム形成のためのオントロジー

Ontology for Enabling Smart Manufacturing Ecosystems

西岡 靖之

Yasuyuki Nishioka

法政大学デザイン工学部

Faculty of Design and Engineering, Hosei University
nishioka@hosei.ac.jp, <https://hosei.ac.jp/>

Keywords: smart manufacturing, ontology, reference architecture, cyber-physical system, knowledge representation.

1. はじめに

スマートファクトリーということばから、多くの人はIoTやAIによって自動化され、無人化された工場をイメージするかもしれない。身近な“スマート”の代表であるスマートフォンやスマートなデバイスは、デジタル技術および通信技術により、コネクテッドであり、ソフトウェアデファインド、すなわちこれまでハードウェアで実現されていた機能の多くがソフトウェアに置き換えられ、さらに便利になっているのが特徴である。こうした流れの中で考えると、スマートファクトリーは、“工場のスマホ化”となる。

一方で、スマートシティなど、社会のインフラに関する取組の中でも“スマート”というキーワードが注目されている。ただし、そこでの議論は、デジタル技術やソフトウェア技術にとどまらない。人々が暮らす都市やコミュニティをスマートにするためには、ダイバーシティへの対応や、複数のステークホルダー間の利害調整なども加味したプラットフォームのデザインや分散型のシステムアーキテクチャの議論が重要となる [EIP-SCC 17, SIP 20]。

都市やコミュニティは、そこに暮らす人々がいるので、それらを丸ごとスマホ化できると考える人はいないだろう。同様に、ファクトリー、すなわち工場にも人がいて、日々さまざまな業務を行っている。製造業を取り巻く環境のダイバーシティや複数のステークホルダーの存在などを考えると、やはり工場のスマホ化は難しいと言わざるを得ない。

IEC/ISO では、スマート製造を、製品やサービスを生産し提供するために、設備やプロセスの統合的で知的な利用により、サイバーとフィジカルと人とが統合された世界で、バリューチェーンの他のドメインとも連携して製造のパフォーマンスを高めるものと定義している [IEC 22]。本稿では、この定義に従い、スマートファク

トリーを、バリューチェーンを構成する事業者の単位とし、オントロジーを基底とした知の生成と活用のメカニズムについて議論する。

まず次章では、本稿での議論のベースとなるスマート製造のリファレンスアーキテクチャを紹介する。3章では、これまでの研究の流れを踏まえたうえで本稿でのオントロジーの定義を示す。続く4章では、つながる工場を実現するために開発されたIVIオントロジーを示し、5章では、オントロジーを用いた知識表現として利用されている手法を紹介する。6章では、それを組織を超えた知識共有と生成のエコシステムとする方法を示し、最後に7章で、本稿を総括するとともに、人工知能研究におけるオントロジーの新たな役割について考察する。

2. リファレンスアーキテクチャ

第四次産業革命による製造業のデジタル化とインターネット化がグローバルな流れとなりはじめた2015年に、インダストリアル・バリューチェーン・イニシアティブ (IVI) が設立された。ドイツが提案したRAMI 4.0や国際団体であるIICが提唱するIIRAと並び、デジタル時代の日本的なもののづくりをグローバルに認知させる目的でIVIによって提案されたリファレンスアーキテクチャがIVRAである [IVI 18]。

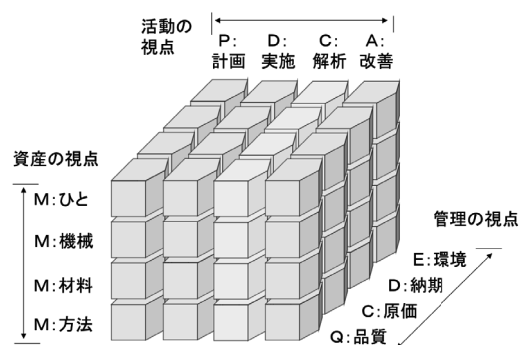


図1 スマートなものづくり単位 (SMU)

これまでの世界に冠たる日本的なもののづくりは、図1に示すように、管理の視点においてQ（品質）、C（コスト）、D（納期）、E（環境）、資産の視点として4M（ひと、機械、材料、方法）、そして活動の視点でP（計画）、D（実行）、C（検証）、A（改善）といった指標によって整理することができる。IVRAでは、これらの視点を三つの軸からなるキュービックスとして捉え、スマートなもののづくり単位（SMU）として定義した。このモデルは、国際標準として採録され普及した [IEC 21, IEEE 19]。

一般に、現状の多くのSMUは、強い現場力に裏付けられる形で、その内部は日本的なもののづくりの概念で強化される。一方で、SMU間の連携は、例えばカンバンなどの情報伝達システムを利用する以外は、システマ的ではないケースが多い。図2のように、リファレンスモデルでは、物理的なモノなどの移動をフィジカルコンテナ、ネットワークを介したデータの移動をサイバーコンテナ、そしてお金の流れは別途ファイナンスコンテナによってSMU間をつなぎ、それらを統合したスマートな移送単位（PLU）が定義されている。サイバーコンテナによるSMUの連携がここでの大きなテーマとなる。

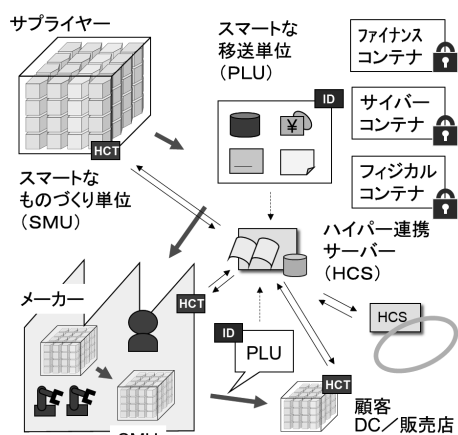


図2 スマートな移送単位（PLU）

3. オントロジーの定義

深層学習に代表される昨今の人工知能の利活用の多くは、人間の知能をコンピュータ上の仕組みに置き換えることを目指したアプローチといえる。これに対して、オントロジーの研究では、人間とコンピュータとが理解を共有することに重きを置いている [Gruber 93, 溝口 05]。オントロジーは、さまざまな問題を内包する物理的な現実世界に対する人間の解釈と、計算可能な形で表現された情報世界とを橋渡しするものであるという立場である。

形式的に表現された世界において複数人の間で共有された合意内容としての共通語彙や、それらの語彙が表す概念は、ドメインオントロジーと呼ばれる。ものづくりにおけるオントロジーとして、PSLX オントロジー

があり、その構成要素として、#Operation, #Lot, #Task, #Function, #Itemなどが示されている [西岡 12]。これらは、国際標準としても採録されている [IEC 07]。

ドメインオントロジーは、特定の問題領域における共通な概念を定義することで、異なるシステム間の相互運用性を確保すると期待されている。しかし、その後のIVIによる100件を超える実証実験の中で、ドメインオントロジーは、認識上の概念は共通であっても、ひとたび形式的に記述すると、相互の関係構造のどこかに若干の差異が生まれ、大半のケースにおいて、結果的に共通化には至らなかった [IVI 21]。

そこで、IVIでは、これまでドメインオントロジーと呼んでいたものを、共通辞書における共通語彙として再定義し、さらに共通辞書は、便宜的に複数定義できる方式とした。一方で、オントロジーとしては、ドメインに依存せず、組織的な問題解決において必然的に存在するといつてよい概念にしほり、次章に示すオントロジー構成要素を定義した。

本稿では、存在論的オントロジーについて、図3に示すように、意味のある行為を存在の拠り所としている。すなわち、主体としての人間が、何らかの意図をもって対象世界の構造を変更させるとき、人間はその行為の意味を、行為の結果を手掛かりとして、関係する情報に対応付ける。したがって、オントロジーは、形式的に表現されたさまざまな情報の意味を、過去の体験の記憶に基づいて規定するうえでの想起の共通パターンであり、これが記号による形式化の土台となる。

なお、オントロジー構成要素は、便宜的に記号化しているが、それらは知識の内容ではなく、表現する知識に関する経験的な適用パターンとして位置付けている。次章で示すように、オントロジー構成要素は、それ自身は概念であると同時に、知識表現のための型として機能する。

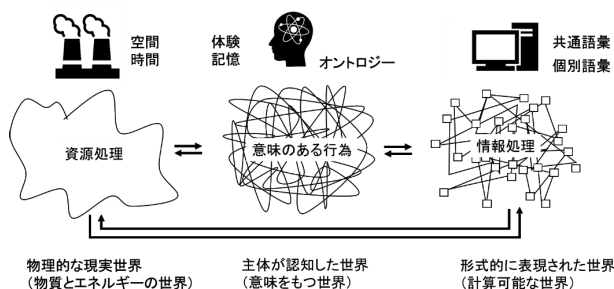


図3 オントロジーの位置付け

4. IVI オントロジー

著者らが提唱するIVI オントロジーには、12の独立したオントロジー構成要素と8の補助的なオントロジー構成要素がある。このうち12の独立したオントロジー構成要素は、さらに対象問題をフィジカルな側面から捉

えたもの、対象問題をサイバーな側面から捉えたもの、そして問題解決を行う主体の側から捉えたものに分けられる。以下に、それぞれについて解説する。

4.1 フィジカル空間のオントロジー構成要素

ものづくりの現場では、実際にモノが存在し、そのモノが加工され形や質が実時間で変化する。2章でも示したように、これまで生産工学や管理工学では、工場の品質や生産性を高めるためにさまざまな情報モデルが提案されてきた。

それらのモデルを総合する形で、オントロジーとしてのものづくりの現場を普遍的な視点で捉えたと、そこには物理的なモノが存在し、何らかの役割を担う者が存在し、そのモノに何らかの操作を行う活動が想起される。

一方で、事務所では、情報を対象として、何らかの役割を担う者が存在し、それを提供したり利用したりする活動が想起される。情報をより広い概念で捉え、口頭での指示や合図なども含めると、ものづくりの現場でもさまざまな情報処理が行われているといえる。

こうして、フィジカルな空間における意味のある行為に着目すると、表1に示す四つのオントロジー構成要素が想起できる。これらの概念はIVIの設立当初より、現状やあるべき姿を表現するための道具として使われ続けている。

表1 フィジカル空間に存在するオントロジー構成要素

構成要素	説明
役 者	それぞれの現場で、何らかの意図をもって仕事を行う人をその役割名として記述したもの。
活 動	それぞれの現場で役者が行う仕事を、モノあるいは情報の操作という視点で切り出したもの。
モ ノ	それぞれの現場に存在するモノで、特定の場所において物理的な質量をもち空間を占有するもの。
情 報	それぞれの現場で役者が活動するうえで、何らかの意思決定に関与する内容を記述したもの。

4.2 サイバー空間のオントロジー構成要素

サイバー空間とは、コンピュータやデジタルネットワーク上で展開された世界を指す。サイバー空間はハードウェアとソフトウェアの両方の側面をもつが、そのソフトウェアとして実装された部分について、特に近年はポータブルでスケーラブルである点が特徴的である。

フィジカル空間と同様に、サイバー空間におけるオントロジーは、情報技術や情報工学におけるモデルを総合するうえで有効となる。特にデジタルの側面を強調した場合は、サイバー空間は表2に示すオントロジー構成要素によって想起される。あらかじめ定義されたプログラムは、ここではプロセスに対応するが、プロセスを変更するプロセスなど、高次のロジックなども表現可能である。

表2 サイバー空間に存在するオントロジー構成要素

構成要素	説明
ロジック	サイバー空間上で、何らかの意図をもってデータやイベントを操作し、一つのサービスとして認識できる単位。
プロセス	サイバー空間上で、ロジックが行う処理内容を示すもの。データの入出力や論理演算などを含む。
データ	サイバー空間上で、ロジックを働かせるために必要な内容として、ロジックの入力または出力となる。
イベント	サイバー空間上で、特定の状態が変化したことを示すもので、ロジックの起動やモード変更などを促す。

4.3 問題解決のためのオントロジー構成要素

問題解決のためのオントロジーは、問題の対象となるフィジカル空間またはサイバー空間に存在する概念ではなく、それらを問題として捉え解決する行為を行う人間の側に存在する概念で構成される。表3に示すように、問題解決に関するオントロジーは、事実、課題、取組、そして目標という4種類のオントロジー構成要素が請け負う。

表3 問題解決に関するオントロジー構成要素

構成要素	説明
事 実	観測された状態や出来事で、客観的に判断され記述されたもの。過去形または現在形で「〇〇が〇〇した」、「〇〇が〇〇である」というテキストで表記される。
課 題	組織の構成員が知っている内容をもとに対象についての問題認識を記述されたものであり、「〇〇が〇〇である」、「〇〇が〇〇でない」というテキストとなる。
取組	組織として課題を解決するために行う内容が記述されたもの。組織の構成員で共有された内容として「〇〇を〇〇する」というテキストで表記される。
目 標	課題が解決された状態、あるいは取組の達成内容として、組織として到達すべきゴールを示すもの。「〇〇が〇〇である」、「〇〇を〇〇する」というテキストとなる。

ここでフォーカスする概念は、複数の人間が組織として行う知的活動を示すものであるが、おそらく個人であっても同様だろう。ただし、個人の場合はあえて言語化する必要はないが、組織の場合は関係者間での相互の意思疎通が必要であるため、これらのオントロジー構成要素に対応するテキストが、現実に行われるさまざまな問題解決の中で相互に関係付けられる。

フィジカル空間のオントロジー構成要素である役者および情報を対象とした活動は、狭義の問題解決といえる場合もある。しかし、フィジカル空間の内部で定義された役者とその活動からなる情報処理では、問題として認知された構造を現実から切り取る行為や、表現されたモデルをもとにフィジカル空間における概念構造を変更する行為は含まれない。

4.4 補助的なオントロジー構成要素

IVI オントロジーとしては、他のオントロジー構成要素の存在を前提として定義された補助的なオントロジー構成要素がある。まず、オントロジー構成要素の集約、つまりその概念に対応する実体が複数集まった単位で形成される概念として、組織、状態、エリア、コンポーネントがある。組織は役者の集約、状態はモノや情報をもつ属性の集約、エリアはモノや情報をもつ位置の集約、そしてコンポーネントはロジックやデータの集約となる。

また、補助的なオントロジー構成要素として、他のオントロジー構成要素の内容を詳細化するものとして従属する概念もある。項目はモノや情報に従属し、“手順”は活動やプロセスに従属する。モノ項目、情報項目、活動手順、プロセス手順と記す場合もある。また、“指標”や“ステージ”は、事実、課題、取組、そして目標に従属する特殊な属性として位置付けられる。

5. チャートによる知識表現

5.1 オントロジーの利用形態

オントロジー構成要素は、それ自身では具体的な内容をもたない。問題に関わる当事者が、何らかのテキストを、対象となる概念を表す内容として記述した時点で、それらの知識要素が、対応するオントロジー構成要素にガイドされ、相手に意味を伝達することが可能となる。さらに、そこで記述された知識要素が、複数のオントロジー構成要素間で関係付けられたときに、さらに複雑で高度な意味を表現可能となる。

例えば、図4では、サイバー空間とフィジカル空間のそれぞれで、オントロジー構成要素に対応する内容が、どのように構造的に関係付けられているかを示す。このような知識表現のもとでは、それぞれの知識要素には、ラベルあるいは説明文が記され、複数の要素が方向をもつリンクによって関係付けられる。各知識要素をつなぐこれらの関係要素もまたカテゴリーをもち、一対一の場

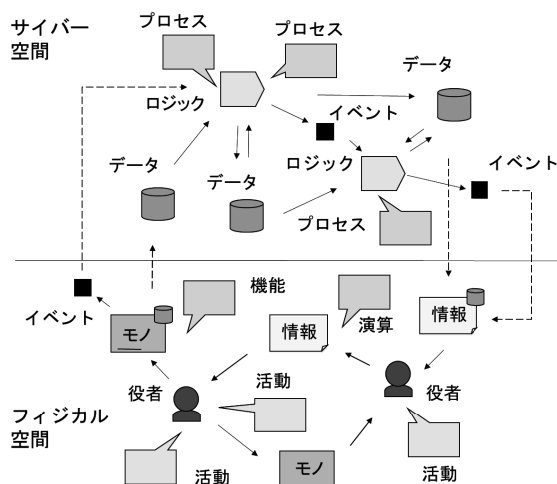


図4 オントロジー構成要素に対応した知識表現例

合と一対多の場合がある。

IVI オントロジーは、このようにオントロジー構成要素に対応する知識要素を図形ノードとするチャートによって個別に表現される。IVI では、こうして表現できるチャートの構成パターンを整理し、表4に示す16種類のチャートとして記述方法と活用方法をまとめた。

表4 オントロジーを利用した16種類のチャート

チャート名	説明
■問題発見と共有の道具	
困りごとチャート	もやもやした現実の中から、何が問題なのかを明らかにする
なぜなぜチャート	からみ合った問題に対して、解決するための糸口を見つける
いつどこチャート	解決のための取組を示し、実現させるための手段を掘り下げる
目標計画チャート	最終的な目標に至る過程を示し、状況に応じて段階的に取り組む
■業務分析と提案の道具	
組織連携チャート	複数の組織間で交換される相互の取引や利害関係を明らかにする
やりとりチャート	それぞれの現場で役者間のやりとりや活動内容を関係者と共有する
待ち合せチャート	複数の役者が係わる現場の活動の流れとデータの関係を整理する
状態遷移チャート	変化する現場をいくつかの状態に分け、それらの遷移によって示す
■システムの設計の道具	
見える化チャート	伝えたい内容に関する情報の構造について、あるべき姿を議論する
モノコトチャート	モノで構成される物理的な対象について、その機能と構造を整理する
割り振りチャート	役者が行う活動を、コンピュータや機械で代替できるかを議論する
データ構成チャート	モノや情報の内容と関係付けて、データの内容や構造を議論する
■システムの実装の道具	
レイアウトチャート	データを介して複数の拠点が業務を連携させる仕組みを議論する
コンポーネントチャート	デジタル化して処理する内容を、コンポーネントとして切り分ける
ロジックチャート	デジタル技術を用いた処理が、どのように行われるかを議論する
プロセスチャート	ロジックの内容を詳細に示し、実際のモノや情報と対応付ける

図5に各チャートにおけるオントロジー構成要素の配置のイメージを示す。それぞれのチャートでは、対象とするオントロジー構成要素やそれらの関係付けの方法が規定されている。例えば、図4の知識表現例では、サイバー空間の部分がロジックチャート、フィジカル空間の部分がやりとりチャートに対応する。

ソフトウェア工学では、UMLに代表される各種の図

法が存在する。また生産工学や品質管理でも類似した図法が広く普及している。ここで示すチャートは、それらを代替することを意図したものではない。ここで示すチャートの存在価値は、そうした分野の異なるチャートを、オントロジー構成要素を介してつなぎ、関係付けることにある。

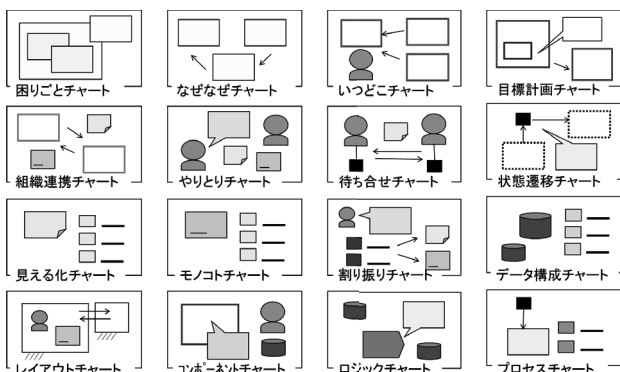


図5 知識表現のための16種類のチャート

5.2 オントロジーと問題解決

知識獲得あるいは知識表現は、それ自身は目的ではなく手段である。サイバー空間およびフィジカル空間における対象問題の表現は、組織における問題解決のプロセスの中で利用され、構成員である個人が考える問題と他の構成員の間のギャップを埋めると同時に、テキストで表現された新たな共通認識の領域を広げる。

オントロジー構成要素にガイドされたこのような組織的な問題解決の仕組みを、スマートシンキングと呼ぶ[西岡 21]。製造業に限らず、さまざまな組織が問題解決を行うためのプロセスとして、個人の知能ではなく、組織の知能として言語化されたテキストおよびその関係構造を共有し、フィジカル空間とサイバー空間が一体となった仕組みに自らの組織を変態させる。

スマートシンキングでは、図6に示すように、問題発見、問題共有、課題設定、そして課題解決に至るステップのなかで、サイバーな世界とフィジカルな世界のそれぞれで定義されたオントロジー構成要素にガイドされ展開される。IVIでは、200社以上の参加企業に、この手法を提案し、すでに100以上の適応事例をもつ[IVI 21]。

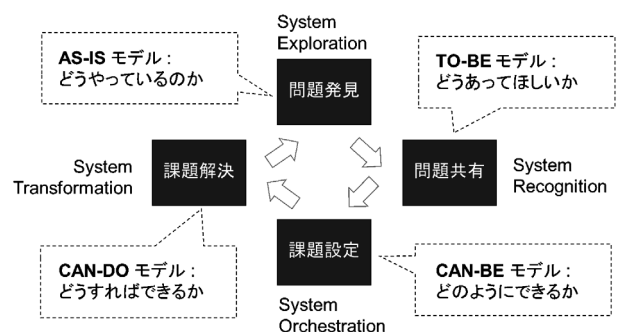


図6 スマートシンキングによる組織的問題解決

6. 組織連携のエコシステム

6.1 IVI モデラーによる知識共有

IVIでは、ワーキンググループ(WG)の活動の中で、IVIオントロジーをベースとした図7に示すツールを利用している。このツールは、5章で示したチャートごとに定義された16種類の構成パターンに対応して、オントロジー構成要素にテキストを割り当て配置する編集ツールである。

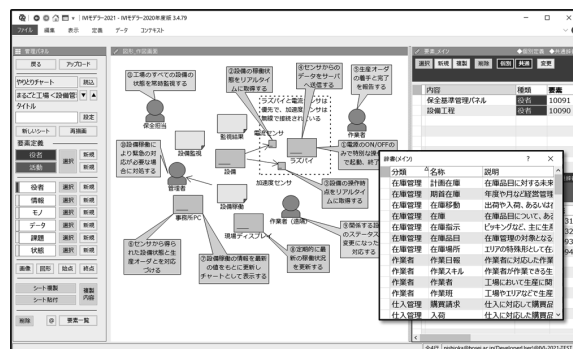


図7 IVI モデラーによる知識表現および共通語彙の利用

ここで定義されたチャートを構成する知識要素は、チャート間で共有される。例えば、やりとりチャートの中で登場した役者は、コンポーネントチャートで再登場する。また、それぞれの知識要素を記述する際に、ユーザは、あらかじめ登録された共通の語彙または文章から選択することも可能となっている。

すなわち、知識として対象世界がそれぞれのチャートとして個別に記述される過程において、オントロジー構成要素によって分類された共通語彙が介在し、それが個別の事案に対応した新たな知識として定義される。

例えば、2021年度の16の業務シナリオWGによって表記された知識要素の数は、事実が387、課題が671、モノが292、情報が365、役者が372、活動が231、データが399、ロジックが157、プロセスが265であった。

6.2 個別辞書と共通辞書

オントロジーにおける共通語彙は、問題解決を行う組織の内部、例えば特定の企業や事業部内での共通言語を定義する場合と、企業や業種を超えた語彙の共通化が図られる場合がある。IVIでは、前者を個別辞書として、後者を共通辞書として位置付けている。

一般に、共通で利用する語彙や手順を定める場合、あらかじめ対象となる世界に存在する概念を調査し、それらを総合する形で原案を作成し関係者から承認を得る。しかし、多くの場合、そうやって確定した内容を超える概念が後になって明らかになり、やがて当初の共通語彙は共通ではなくなる。

そこでIVIでは、共通辞書は複数定義可能とし、その

利用者の自由意思により選択され、あるいは淘汰される仕組みとした。具体的には、個別辞書は常に特定の共通辞書を参照するものとし、多くの個別辞書から参照された共通辞書がその内容を洗練させ進化する。

特に、企業や事業者を超えた業務連携や情報連携を、サイバー空間上で行うためには、システム間の相互運用性の確立が鍵となる。IVIが2022年度からサービスを開始する企業間オープン連携フレームワーク（CIOF：Connected Industries Open Framework）では、図8に示すスキームによって、現在この課題に取り組んでいる。IT事業者は、自社のサービスを普及させるために、オントロジーにガイドされ、複数の異なる企業間共通辞書に対応した推奨パターンを準備することになる。

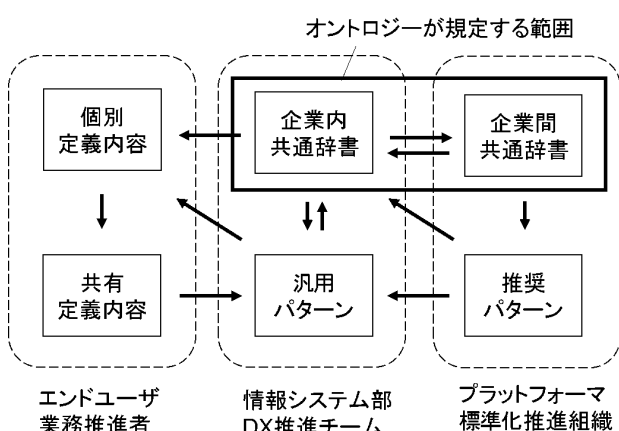


図8 オントロジーを介したエコシステムの構成

7. おわりに

本稿では、ものづくりの現場における知的活動と人工知能との接点として、研究分野としてのオントロジーにフォーカスし、その効果的な活用方法としてIVIの取組を紹介した。深層学習にフォーカスしたアプローチの多くは人間が行う仕事の代替を目指しているのに対して、オントロジーのアプローチは、人間とコンピュータの対話、あるいはコンピュータを介した複数の人間の間での対話に軸足がある。

ただし、近い将来、こうして収集したオントロジーベースの記述内容は、深層学習によって処理され、共通辞書の抽出や更新が自動で行われるようになるだろう。これまではどちらかというと、画像処理や音声処理などのセンサデータを起点とした適用事例が多かった深層学習の研究領域が、オントロジーのガイドにより知識処理の領域にその対象範囲を広げると予想している。

これまではコンピュータには不可能であると思われて

きた課題の設定、取組の展開、目標の管理なども、オントロジーにガイドされた知識表現を収集する仕組みが整えば、自律的かつ主体的に人工知能が行う（ように思える）ときが来るかもしれない。そのような世界が近い将来訪れないことを願いつつ、現在のものづくりの現場がさらに知的で創造的な世界となるために本稿が少しでも参考になれば幸いである。

◇ 参考文献 ◇

- [EIP-SCC 17] EIP-SCC: Reference Architecture & Design Principles, ESPRESSO Project, Deliverables 4.2, 2017, <https://espresso.espresso-project.eu/> (cited 2022-03-13)
- [Gruber 93] Gruber, T. R.: A translation approach to portable ontology specifications, *Knowledge Acquisition*, Vol. 5, Issue 2, pp. 199-220 (June 1993)
- [IEC 07] IEC/ISO 62264-Part 3:2007, Annex G Mapping PSLX ontology to manufacturing operations management (2007)
- [IEC 21] IEC TR 63319:2021, Mapping for IVRA Next, A meta-modelling analysis approach to smart manufacturing reference models, pp. 57-60 (2021)
- [IEC 22] IEC TR 63283-1:2022, Smart Manufacturing Part 1: Terms and definitions (2022)
- [IEEE 19] IEEE 2413:2019, Example architecture of industrial value chain initiative - reference architecture (IVI-RA), *IEEE Standard for an Architectural Framework for the Internet of Things (IoT)*, pp. 236-243 (2019)
- [IVI 18] IVI：つながるものづくりの実現戦略 IVRA-Next, インダストリアル・バリューチェーン・イニシアティブ, https://docs.iv-i.org/doc_180301_IVRA-Next-jp.pdf (cited 2022-03-13)
- [IVI 21] IVI：IVI業務シナリオ集 つながる！ものづくりのための15のユースケース, インダストリアル・バリューチェーン・イニシアティブ (2021)
- [溝口 05] 溝口理一郎：オントロジー工学, オーム社 (2005)
- [西岡 12] 西岡靖之：ものづくり情報連携におけるオントロジーの応用, 人工知能学会編集, 10章 オントロジーの普及と応用, pp. 189-206, オーム社 (2012)
- [西岡 21] 西岡靖之：スマートシンキングで進める工場変革, 日刊工業新聞社 (2021)
- [SIP 20] SIP 戦略的イノベーション創造プログラム, スマートシティリファレンスアーキテクチャホワイトペーパー, 内閣府, <https://www8.cao.go.jp/cstp/> (cited 2022-03-13)

2022年3月18日 受理

著者紹介



西岡 靖之 (正会員)

1985年早稲田大学理工学部機械工学科卒業。1996年東京大学大学院工学系研究科先端学際工学専攻博士課程修了、博士(工学)。同年、東京理科大学理工学部助手、2013年マサチューセッツ工科大学客員研究員、2007年法政大学デザイン工学部教授、現在に至る。日本機械学会フェロー、(一社)インダストリアル・バリューチェーン・イニシアティブ (IVI) 代表理事。