

# Cyber Physical Production Systems の動向

堀雅和<sup>†1</sup> 今村誠<sup>†2</sup>

**概要:** 本稿では、インダストリ 4.0 の中核技術である Cyber Physical Production Systems(CPPS)のサーベイ結果について報告する。CPPS の具体像を伝える目的で、CPPS のシステムモデル、CPPS が満たすべき要件、構成要素に関する研究動向、標準化動向を説明する。また CPPS 周辺のソフトウェア工学研究の動向を概観し、CPPS が備えるべき要件の内とくにオートメーションにフォーカスし、マルチエージェント技術とオントロジ技術の動向について紹介する。

**キーワード:** サイバー・フィジカル・プロダクション・システム、インダストリ 4.0、マルチエージェント、オントロジ、オートメーション、ソフトウェア工学

## Survey of Cyber Physical Production Systems

MASAKAZU HORI<sup>†1</sup> MAKOTO IMAMURA<sup>†2</sup>

**Abstract:** In this paper, we report the survey results concerning the Cyber Physical Production Systems (CPPS) which is the central part of Industry 4.0 technologies. In order to show the concrete image of CPPS, we explain the system model, requirements, future directions of the components consisting of CPPS, and standardization situation for CPPS. We also overview the software engineering research, and we introduce the current situations of multi-agent technology and ontology technology focusing on the industrial automation.

**Keywords:** Cyber Physical Production Systems, Industry 4.0, multi-agent, ontology, automation, software engineering

### 1. はじめに

2011 年にドイツが、ハノーバー・メッセでインダストリ 4.0 という概念[1]を初めて提唱した。生産者からユーザに視点を移し、バリュー・チェーンの起点をユーザへの価値起点としている。すなわちユーザニーズにカスタマイズされた製品及びサービスを提供することを目標としており、以下の 3 つの考えが含まれている[2]。

- (1) 製造工程における無駄を最低限にとどめ、個別ユーザの要望と製造自体の質的な向上がかなえられる設計及び製造プロセスを作り上げる必要がある。
- (2) 製品の製造工程に変更が必要となった場合、直ちに自動的に調整できる必要がある。(自律制御機能の実現)
- (3) ゼロ故障、ゼロ事故、ゼロ汚染を実現する必要がある。

インダストリ 4.0 が推進されることで、製造現場で発生する欠陥商品の予防、加工ミスの防止、設備利用効率と信頼性の向上等の目に見える課題解決に加え、目に見えない課題も解決することを目指している。設備の性能低下、設備の健康状態の悪化、パーツの磨耗、運用リスクの上昇等である。こういった目に見えない要因を予兆し、可視化することが期待されている。

本稿では、上記のような考えのもと推進されているインダストリ 4.0 の中核を成す技術である、Cyber Physical

Production Systems に関するサーベイ結果について報告する。

本稿の構成は以下のとおりである。まず初めに第 2 章では、CPPS の概要について述べる。CPPS のシステムモデル、CPPS が満たすべき要件、構成要素に関する研究動向、CPPS 周辺技術に関する標準化動向について説明する。次に第 3 章では、まず初めにオートメーションにおけるソフトウェア工学的な課題について述べる。とくに CPPS の特徴の一つである柔軟なオートメーションを実現する目的で研究が進められているソフトウェア工学関連の技術としてマルチエージェント技術とオントロジ技術を取り上げ、現在の状況について紹介する。これらを踏まえ最後にソフトウェア工学の研究動向を概観する。

### 2. Cyber Physical Production Systems の概要

#### 2.1 Cyber Physical Production Systems とは？

Cyber Physical System (以下、CPS) は、2006 年に米国立科学財団が提唱した概念である。CPS は、実際のモノやコトの活動を、サイバー空間の情報をもとにデータ分析やモデリング技術を駆使し、両方を一体として管理する。今回のサーベイ対象である Cyber Physical Production System (以下、CPPS) は、CPS の製造システムへの応用であり、イン

<sup>†1</sup> (株)インテック  
INTEC Inc.

<sup>†2</sup> 東海大学  
Tokai University

ダストリ 4.0 という概念を実現するための中核を成す技術である。

CPPS は現在も進化中であり、提供する機能範囲やシステムの構成法は、今後もさまざまな提案があると思われる。とくにインダストリ 4.0 が目指す工場の自動化実現に必須の自律性や柔軟性を備えた分散システムの実現は、解決すべき共通の課題になると考える。

## 2.2 システムモデル

ユーザニーズの変化に対応できる自動化工場を実現するためには、製造現場の生産システムの柔軟性や適応性を向上することが重要となる。そのための具体的なイメージは、制約無くさまざまな生産設備を CPPS に組み込むことができるということである。

今までの産業オートメーションのアーキテクチャ（図 1 の左側参照）は、複数の階層構造で構成されていたが、CPPS が対象とする新しい産業オートメーションのアーキテクチャは、大きく 2 つの層で構成される（図 1 の右側参照）。下層は、通常リアルタイム処理の要求が厳しいフィールドデバイス（センサ、アクチュエータ、PLC（Programmable Logic Controller）等）で構成されている。一方上位層は、SCADA（Supervisory Control And Data Acquisition）/ DCS（Distributed Control System）、MES（Manufacturing Execution System）、ERP（Enterprise Resources Planning）といったシステムが提供する機能がサービスとして提供される。これらのサービスは従来のような階層構造を取らず、フラットに分散した構成となる。上位層のサービスは、下位層で収集されたデータを活用するとともに、必要に応じて下位層に対して制御指示をする。

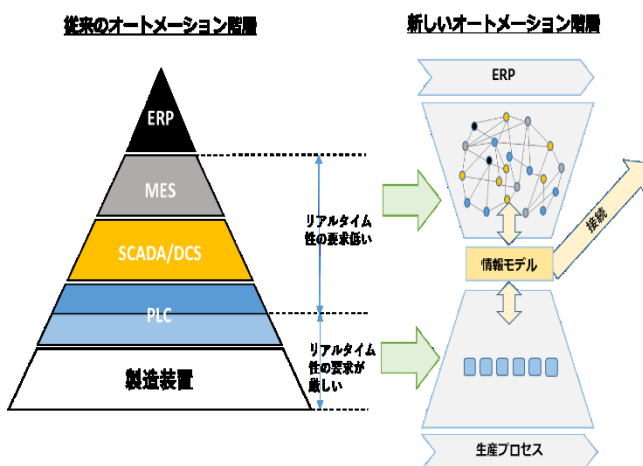


図 1 従来のオートメーション階層[3]  
Figure 1 Traditional Automation Architecture.

図 1 の左側に記載されている従来のオートメーション階層を構成するそれぞれの要素の役割を表 1 に示す。

表 1 CPPS の構成要素  
Table 1 Components of CPPS.

| 名称          | 役割                                                                                             |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 製造装置        | 各工程を構成する自動機械。                                                                                  |
| PLC         | 工場等の自動機械の制御に使用される装置。                                                                           |
| SCADA / DCS | SCADA は、生産工程やインフラ・設備に関するシステム監視とプロセス制御するシステム。DCS は、システムを構成する機器ごとに制御装置があり、ネットワークを介して相互に監視するシステム。 |
| MES         | 工場の製造実行状況を監視・管理するシステム。                                                                         |
| ERP         | 経営資源の有効活用という観点から業務横断的に管理するシステム。                                                                |

次に CPS の構成を図 2 に示す。センサ、アクチュエータ、設備といったデバイスを扱うソフトウェアが組込システムである。それらが処理するデータをより知的に処理する知的組込システム、更に知的組込システムが連携して動作するのが知的協調的組込システムである。分散した環境で自律的に動作するソフトウェア実体がシステムのシステムに対応する。このような分散した実体で提供する機能を集約したソフトウェアの実体が CPS である。

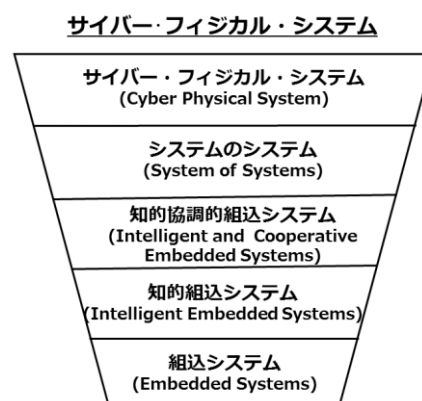


図 2 サイバー・フィジカル・システム[4]  
Figure 2 Cyber Physical System.

## 2.3 CPPS に対する要件

本節では CPPS が満たすべき要件を複数の異なる視点から述べる。

最初の視点は、CPPS を「スマート機械」、「スマート製品」、「拡張された操作」という 3 つの主要な構成要素で捉え、特性を定義するものである[5]。

### 1. スマート機械

スマート機械は、CPPS を構成する製造に関わる資源（HMI、機械、ロボット、コンベヤ、製造ファシリティ、仮想オブジェクト）のことである。

スマート機械の特徴は、自体の状態、位置、履歴、タ

ーゲット製品、代替フローに関する情報を保持し、活用できることにある。

## 2. スマート製品

スマート製品は、生産システムで製造される製品に対応する。

スマート製品の特徴は、自体の状態、履歴、保守プラン、容量、可能な構成やセットアップ範囲等に関する情報を保持しており、活用できることにある。

## 3. 拡張された操作

高度にモジュラ化された先進的な生産システム環境で働いている人達を技術的にサポートすることを指している。

上記スマート機械及びスマート製品の特徴をキーワードで示すと、以下のようになる[6]。

- 自律的 (autonomous)
- 自己制御 (self-controlling)
- 自己構成 (self-configuring)
- 知識に基づいている (knowledge-based)
- センサが装備されている (sensor-equipped)

CPPS と利用者とのインタラクションの構造を図 3 に示す[6]。CPPS を構成する要素は、それぞれお互いが独立して自律的に動作する。人間からのリアルタイム入力や情報交換に関するアクションをトリガできるような能力も保有している。

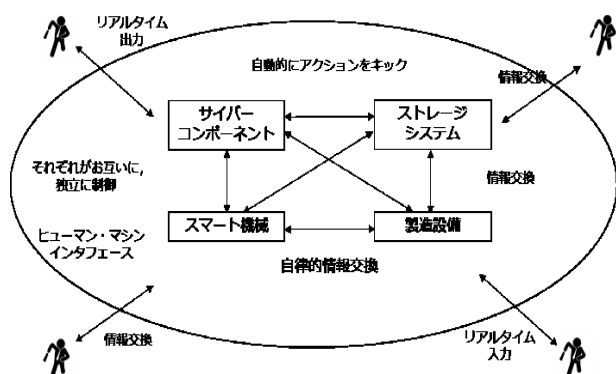


図 3 CPPS におけるソーシャルインタラクション

Figure 3 Social Interaction in CPPS

次は、水平統合／垂直統合という視点について説明する。

CPPS では、バリュー・チェーン・ネットワークに基づく水平統合とネットワーク化されたスマート生産に基づく垂直統合が、スマート工場とスマート生産を実現するために構築できる必要がある。CPPS における水平統合及び垂直統合は、以下のようなことを指している。

## ● 水平統合

水平統合は、製造プロセスおよびビジネス計画プロ

セスの異なる工程で使用されるさまざまなシステムの統合を指している。会社内または製造ネットワークの複数の異なる会社間での資材、エネルギー、情報の交換を含んでいる。

## ● 垂直統合

垂直統合は、システム階層の異なるレベルにあるさまざまなスマートシステムの統合を指している。例えば、異なる生産オブジェクト、生産管理、製造&実行、企業リソース管理におけるヒューマン-マシンインタフェース、アクチュエータ、センサ、コントローラを統合することを指している。

## 2.4 構成要素に関する研究動向

本節では、第 2.2 節の表 1 で説明した CPPS の構成要素に関する最近の研究動向について概観する。

### (1) PLC

インダストリ 4.0 コンポーネントとしての条件を満たす PLC は、現時点ではまだほとんど存在していない。しかし今後、PLC をインダストリ 4.0 コンポーネントとして組み込む取り組みが増えると予想される。以下に文献[7]が提案する PLC をインダストリ 4.0 コンポーネントとして使用するためのコンセプトを簡単に紹介する。本提案は、インダストリ 4.0 のリファレンスアーキテクチャモデルである RAMI4.0[8]の定義に基づく方法を示すものである。

RAMI4.0によると、インダストリ 4.0 コンポーネントは、以下の 3 つの要素から構成されている。

- フィジカルオブジェクト（デバイスが対応）または IT システム内に存在するオブジェクト（仮想オブジェクト）

RAMI4.0 では、IP 接続が前提とされているが、それ以外の条件は示されていない。そのため、デバイスゲートウェイと呼ばれる、PLC に統合可能で Web インタフェースを持つソフトウェアモジュールが導入される。

## ● 管理シェル

管理シェルは、以下のような機能を提供する。

- ・システム環境に存在するオブジェクトが保有する情報の管理
- ・管理は、システム環境内で一貫している
- ・一つのリソースマネージャを持っている

## ● リソースマネージャ

- ・オンラインモードでデバイスとのデータ交換を実施
- ・内部的な情報の管理

PLC をインダストリ 4.0 のコンポーネントとするモデルを図 4 に示す。管理シェルからの処理依頼は、Web 環境に存在する仮想デバイスを介して、PLC 上に搭載されている

デバイスゲートウェイに送られる。仮想デバイスとデバイスゲートウェイ間の通信には、HTTP や websocket プロトコルを用いる。

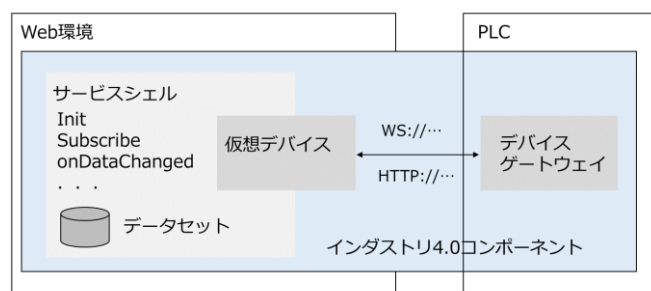


図 4 PLC のインダストリ 4.0 コンポーネント化  
Figure 4 Model of a PLC as a Industry 4.0 component

## (2) SCADA/DCS

SCADA と DCS システムは、集中システムから分散処理に変化してきたが、更には広域で分散して処理してシステムになろうとしている。このような状況で SCADA/DCS システムが提供する機能は、それぞれの関係はフラットな構造であるサービスとして分散環境で提供されるようになる。

ヒューマン-マシンインタフェースも特定のコンピュータが提供するのではなく、いつでも、どこからでも、どのデバイスに対しても提供されるようになる。

SCADA と DCS システムの今後として、以下のような方向で進化するという提案が示されている[9]。

- モニタリング
- 管理&視覚化
- セキュリティ
- スケーラビリティ
- リアルタイム処理
- モバイル支援
- シミュレーション
- 相互運用性

以上のような方向性が示されているのは、CPPS の稼働環境が、以下のような特徴を持つことに起因している。

- システムは、異なるハードウェアやソフトウェアから構成されている。
- 大量のデバイスから収集されたデータを処理・活用する必要がある。

## (3) MES

CPPS の普及により工場の製造装置は、ソフトウェアによってより強化された機械になっていくと考えられている。具体的にはそれぞれの機械が、自身の状態、容量、異なる構成オプション等をわかっており、処理に関わるさまざまな決定を自律的にできるようになるということを指している。このように工場内の環境が変わることで MES は将来、

以下のような方向に進化していくと考えられている[10]。

- 分散化  
論理的な分散ができるようになることで、サービス利用者であるスマート製品とサービス提供者であるスマート設備を動的に結び付けることができる。
- 垂直統合  
MES のモジュール化を進め、論理的な分散処理ができるようになることで、すべての機能やサービスがスマート製品やスマート機械によって利用されるようになる。
- ネットワーク接続性  
工場内のネットワーク接続性を確保するという段階は終わっており、いかに簡単にネットワーク接続できるかが重要になっている。
- クラウド処理と先進的な分析  
先進的なデータ分析は、製造プロセスの性能、製品の品質、サプライの最適化等を完全理解するために必要になってくる。目的に応じて、オフライン分析とリアルタイム分析が使い分ける。

## 2.5 標準化動向

本節では、CPPS に関連する標準化の動向について簡単に説明する (表 2 参照)。

CPPS は、システムの柔軟性を向上するために、オープンなシステムを実現することが指向されている。そのため技術開発に加え、標準化の推進にも力点が置かれている。

標準化の主な状況は、以下のとおりである。現在の製造システム環境を構成する装置の中でも PLC は、非常に重要な位置を占めている。そのため、PLC に関連する標準が複数定義されており、実際の環境にも普及しているような状況と言える。

表 2 CPPS に関連する標準

Table 2 Standards related to CPPS.

| 名称                 | 内容                                                            |
|--------------------|---------------------------------------------------------------|
| MTConnect          | XML ベースのオープンな通信プロトコルで、機械稼働状況に関する情報収集が可能である。                   |
| IEC 61131-3        | PLC の標準。PLC 用の 5 種類のプログラミング言語を定義している。                         |
| IEC 61499          | IEC 61131 をベースとした分散制御システムの共通モデルの仕様を定義している。                    |
| PLCopenXML         | IEC 61131-3 の使用を通して PLC を相互操作可能にするためのモデルを定義している。              |
| OPC UA (IEC 62541) | ヘテロなプラットフォームを統合するためのミドルウェアの仕組みを提供している。                        |
| ISA 88             | バッチプロセス制御の国際標準である。                                            |
| ISA 95 / IEC 62264 | 製造オペレーションマネジメントのリファレンスモデルである。                                 |
| AutomationML       | ヘテロなツールの相互接続を可能とすることを目的とした XML ベースのプラント情報交換用データフォーマットを定義している。 |

工場内の情報交換用データフォーマットを規定した AutomationML については, AutomationML に基づき OPC-UA のデータモデルを検討する研究[11], CPPS から発生するデータを AutomationML 形式で交換し, さまざまなツールで活用する研究[12], オフライン&リアルタイムシミュレーションや異常検知するための共有モデルとして AutomationML を活用する研究[13]等, その他さまざまな研究が進められている。

### 3. CPPS へのソフトウェア工学技術の応用の動向

本章では, CPPS の特徴のうちでもとくにオートメーションに視点を絞って, ソフトウェア工学技術の応用の動向を紹介する。

#### 3.1 オートメーションにおけるソフトウェア工学的課題

オートメーションとは, ハードウェアとソフトウェアで構成されたシステムの自動制御のことを指している。

まず初めに本節では, オートメーションを実現するソフトウェアが解決すべきソフトウェア工学的課題[14]について紹介する。

- (a) 複数のステークホルダによる利用  
複数の異なるステークホルダが関わるため, それぞれの役割に応じた方法やプロセスを検討する必要がある。  
ステークホルダとしては, コンピュータ科学者, コンピュータエンジニア, ライブラリアン, カスタマエンジニア, 職人 ((匠) といった人達がいる。
- (b) システム稼働時の変更可能性の実現  
システムのオペレーションや保守をしている時に, システムが扱うさまざまな変数の値をモニタリングすることができ, 必要であればプログラムの一部を安全に交換できる必要がある。
- (c) 基本的なオートメーション機能の提供  
計測やオープンループ制御, クローズループ制御に関するさまざまなオートメーション基本機能を提供する必要がある。自動プロセス制御では更に, モニタリング, アーカイブ, アラーム, 操作, 保存といった機能も提供する必要がある。
- (d) プラットフォーム化の困難性  
バラエティに富んだマイクロコントローラやリアルタイム OS が存在するが, 今までのところ, オートメーションの現場で特定のプラットフォームというものは存在していない。デバイスに組み込まれる機能や要求事項がそれぞれ異なるためである。
- (e) 安全・安心なオペレーションのサポート  
機械は人間のように融通を効かせて処理が終了する

のを待ってくれないので, リアルタイムで処理できることが要求される。また自動化されたシステムの故障は甚大な損害を与えるので, より一層厳しく安全性が確保できる必要がある。

- (f) ライフサイクル管理  
スマート製品のライフサイクルを管理するには, ソフトウェアとハードウェアの寿命が異なるという前提で管理する必要がある。また要求事項の違いが製品のタイプを規定しており, それぞれのタイプに対応してバージョン管理することになる。また, 製品のインスタンスにあたる実際に生産されたそれぞれの個体は, シリアル番号で管理する。個体の管理には, バージョンの管理に加え, 構成する部品の互換性等も管理する必要がある。

#### 3.2 オートメーションを支援するソフトウェア工学技術

本節では, 2 つの技術の現状を概観する。

一つ目は, ソフトウェアモジュール間の動的な通信により柔軟性を向上することができるマルチエージェント技術である。

二つ目は, コーディネーション方法に関する知識を定義し, 活用することで自動化レベルを向上することができるオントロジ技術についてである。

##### (1) マルチエージェント技術

マルチエージェント技術は, CPPS の分散したアーキテクチャを自然にモデル化できるとともに, エージェント同士がネゴシエーションし, 動的に処理するエージェントを選択できる柔軟性を提供する。そのため, オートメーション環境をマルチエージェントで実現しようという研究が多く報告されている。

本節ではとくに文献[4]を取り上げ, マルチエージェント技術に基づくヘテロな生産システムを連携するというコンセプト実現を目的とした CPPS アーキテクチャを紹介する。

図 5 にエージェントに基づく CPPS アーキテクチャの概要, 表 3 には CPPS アーキテクチャを構成する 6 つのエージェントそれぞれの役割を簡単に示す。

これらのエージェントは, エージェント通信言語 (Agent Communication Language) を用いて相互に通信を行う。ケーススタディの一つである「製品購入者からのオーダーを受けて生産するプロセス」の概要は, 以下のとおりである。

Web インタフェース等で製品購入者からのオーダーを受けたカスタマエージェントは, 生産に関わる知識を持っているコーディネーションエージェントにオーダーを転送する。オーダーを受けたコーディネーションエージェントは, CPPS クラウドが提供する機能を用いて, それぞれのエージェントに対して必要事項を確認し, 最適なプラントエージェントに処理依頼する。

- ディレクトリファシリテータエージェントに対しては、どのプラントエージェントが必要な能力を持っているか？
- メッセージ転送システムエージェントに対しては、どのプロトコルとメッセージで処理依頼すべきか？

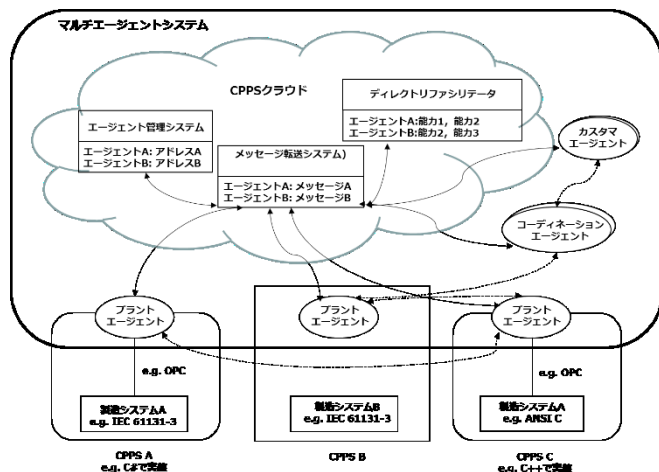


図 5 エージェントに基づく CPPS アーキテクチャ

Figure 5 Architecture of an agent-based CPPS.

表 3 各エージェントの役割

Table 3 Role of each agent.

| 名称              | 内容                                                                               |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| エージェント管理システム    | CPPS 内のエージェントの名称と対応する IP アドレスを管理する。                                              |
| メッセージ転送システム     | 可能なプロトコルとメッセージのリストを管理する。                                                         |
| ディレクトリファシリテータ   | エージェントの能力(capability)を管理する。                                                      |
| プラントエージェント      | 生産システムのオートメーションソフトウェア自体 or 生産プラントをカプセル化し CPPS へのインタフェースを提供するために追加されたハードウェアが対応する。 |
| カスタムエージェント      | オンラインショップ等の製品の購入者をモデル化したソフトウェアの実体に対応する。ユーザからの要求を受け、コーディネーションエージェントに処理を依頼する。      |
| コーディネーションエージェント | カスタムエージェントからのオーダーを受け、保有する知識を用いてオーダーを生産工程に分解し、対応するプラントエージェントに依頼する。                |

本モデルのメリットは、実際の処理を開始する直前に依頼するエージェントに関する情報を確認して実行するため、システム稼働後の実行内容の変更が容易であるというレベルの柔軟性を確保できる点にある。

## (2) オントロジ技術

製造現場でのシステムの自動化レベルを上げるために、技術仕様やノウハウに関する知識をオントロジとして定義

し、システムに適用するという試みが多く進められている。

CPPS が提唱される以前の研究成果の一つに、製造現場を構成する主要な要素として「プロセス」、「プロダクト」、「設備」の3つを取り上げ、これらをベースにしたオントロジが報告されている[15]。生産プロセスに対する要求事項を製品知識から引き出すことを目的とした議論が展開されており、以下のような応用が提案されている。

- マルチエージェントシステムへの適用  
生産計画&スケジューリングのために、エージェント間通信をするための共有される語彙としてオントロジを利用している。
- 設計支援システムへの適用  
製造システムの設計ツールを利用するユーザの設計プロセスを支援する目的で、オントロジを利用している。
- サービス指向システムへの適用  
Web サービスの実行プロセスの知識をオントロジとして定義する。そのような知識を活用することで、サービスが動的に発見され、選択され、構成され、呼び出される。

2010 年代になって登場した CPPS を対象とすることにより、CPPS の特性の一つである柔軟性をいかに確保するかということの主眼に置いた研究が報告されている[16]。ミラノ工科大学が開発した製造システムオントロジでは、プロセスとロジスティクスの視点から以下の3つのドメインを定義している。

- 実世界ドメイン  
実世界を構成する要素の定義（ワーカ、製造設備、資材処理、搬送設備、倉庫、その他のデバイス）
- 技術ドメイン  
システムの機能ビューの定義（変換プロセス（製造、組み立て）、製品のルーティング等）
- 制御ドメイン  
抽象的なレベルでの生産での操作手順の定義（計画、スケジューリング、制御）プロセスをガイドする目的で、オントロジを利用している。

また、視覚化の観点からは、以下の5つのクラスを定義している。

- 製品クラス  
生産される製品のモデル
- コンポーネントクラス  
製造システムの字世界ドメインのモデル
- ルーティング操作クラス  
製造システムの技術ドメインのモデル
- オペレータクラス  
ワーカ / オペレータの活動のモデル
- サブシステムクラス  
入れ子構造で別のクラスのオブジェクトをグルーピング

ングできるサービスクラス

上記以外にも生産環境を対象としたオントロジの研究事例として例えば、以下のような報告がある。

- ローカル知識とドメイン知識を定義し、これらの知識を互いに変換可能にすることで、異なる組織に属するエンジニアが、慣れたツールを用いて意味的な不整合なく情報共有可能とする仕組みに関する研究[17]
- スコープの定義から始まるオントロジ構築の各プロセスにおいて、異なる複数の関係者が Semantic Wiki を用いて①提案、②議論、③投票の3つのステップから成る協調的な対話を行い、オントロジを構築する方法論とツールに関する研究[18]

### 3.3 ソフトウェア工学の主な研究動向

本節では、文献[19]の議論の章の内容に私見を加え、オートメーションにおけるソフトウェア工学の適用状況について述べる。

オートメーションに関するソフトウェア工学研究は、ソフトウェアの構造やアーキテクチャ、設計手法等の設計に関するテーマが大半である。そのようなテーマの中でも多くの研究者が注目しているのは、システムの柔軟性や自動化のレベルを向上するためのメカニズムを実現することである。具体的には例えば、ユーザーズの変化に柔軟に対応する目的に、サービス指向アーキテクチャの活用成果が多数報告されている。しかし、オートメーションシステム実現で重要なコスト低減や性能向上に関する評価にふれている研究は少ない。オートメーションシステムを高機能化することで発生する性能とのトレードオフをいかに解決していくかということが今後の課題の一つと考える。

セマンティック Web 技術の再活用も注目すべき動きの一つと考える。サービス指向を採用することにより、動的なサービス連携が容易となる。次のステップは、自動的に適切なサービスを見つけ、連携できるようにすることにある。そのためには、生産環境、プロセス、製品等の知識を定義し、活用するセマンティック Web 技術の適用が有効である。今までに、オートメーションで活用するためのオントロジを定義する試みが進められている。今後は、実際の生産環境の課題解決を目指した CPPS 及び CPPS で必要となるオントロジを設計し、運用することで生産現場特有の知見を蓄積していくことが重要と考える。その際に、性能に加え、安全性の確保も考慮することが重要である。

生産システムの特徴の一つは、PLC が非常に重要な位置にあるということである。IEC 61131-3 や IEC 61499 といった標準の後押しもあり、以前に比べると生産システムに PLC を組み込むためのソフトウェア開発にかかるコストは低下する傾向にある。PLC を更に高度利用するためには、CPPS の上位層を構成するサービス群とよりシームレスに連携できるようにする必要がある。そのためには、性能面

も考慮した、より高度な PLC プログラミング環境の研究が必要となる。

## 4. まとめ

本稿では、インダストリ 4.0 の中核技術である CPPS のサーベイ結果について紹介した。具体的には、CPPS のシステムモデル、CPPS が満たすべき要件、構成要素に関する研究動向、標準化動向について説明した後、CPPS に関わるソフトウェア工学の研究動向について紹介した。更には、CPPS がターゲットとしている柔軟性の実現に向けた技術として、CPPS 関連の研究成果報告が多いと思われるエージェント技術とオントロジ技術の動向を紹介した。

今後は、生産現場の具体的な課題と解決に関する研究が進み、CPPS のアーキテクチャに関する情報も、より具体化・詳細化されるものと考ええる。

## 参考文献

- [1] Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0", Final report of the Industrie 4.0 Working Group.
- [2] ジェイ・リー：インダストリアル・ビッグデータ, 2016.
- [3] Laszlo Monostori: Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges, Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems, pp.9-13, 2014.
- [4] Birgit Vogel-Heuser, Christian Diedrich, Dorothea Pantforder, Peter Gohner: Coupling heterogeneous production systems by a multi-agent based cyber-physical production system, 2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), pp. 713-719, 2014.
- [5] Stephan Weyer, Mathias Schmitt, Moritz Ohmer, Dominic Gorecky: Towards Industry 4.0 - Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production system, IFAC-PapersOnLine 48-3, pp. 579-584, 2015.
- [6] Qiong Liu, Junming Chen, Yuanqian Liao, Egon Mueller, David Jentsch, Frank Boerner, Mingliang She: An Application of Horizontal and Vertical Integration in Cyber-Physical Production Systems, 2015 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery, p.110-113.
- [7] Reinhard Langmann, Leandro F. Rojas-Pena: A PLC as an Industry 4.0 component, 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), pp.10-15, 2016.
- [8] Hankel, M.: The Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0) - ZVEI, April 2015.
- [9] Stamatis Karnouskos and Armando Walter Colombo: Architecting the next generation of service-based SCADA/DCS system of systems, IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2011.
- [10] Francisco Almada-Lobo: The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES), Journal of Innovation Management Almada-Lobo, Vol. 3, No. 4, pp.16-21, 2015.
- [11] Robert Hensen, Miriam Schleipen: Interoperability between OPC-UA and AutomationML, 8th International Conference on Digital Enterprise Technology - DET 2014 -, pp. 297-3014, 2014.
- [12] Marta Sabou, Fajar Ekaputra, Olga Kovalenko, Stefan Biffl: Supporting the Engineering of Cyber-Physical Production Systems

- with the AutomationML Analyzer, 1st International Workshop on Cyber-Physical Production Systems (CPPS), pp.1-8, 2016.
- [13] Olaf Graeser, Barath Kumar, Oliver Niggemann, Natalia Moriz, and Alexander Maier: AutomationML as a Shared Model for Offline- and Realtime-Simulation of Production Plants and for Anomaly Detection, J.-L. Ferrier et al. (Eds.): Informatics in Control, Automation and Robotics, LNEE 174, pp.195-209, 2013.
- [14] Birgit Vogel-Heuser, Christian Diedrich, Alexander Fay, Sabine Jeschke, Stefan Kowalewski, Martin Wollschlaeger, Peter Gohner: Challenges for Software Engineering in Automation, Journal of Software Engineering and Applications, 2014, 7, 440-451.
- [15] Jose L. Martinez Lastra, Ivan M. Delamer: Ontologies for Production Automation, Chapter Advances in Web Semantics I, Volume 4891 of the series Lecture Notes in Computer Science, pp 276-289, 2009.
- [16] Marco Garetti, Luca Fumagalli, Elisa Negri: ROLE OF ONTOLOGIES FOR CPS IMPLEMENTATION IN MANUFACTURING, Management and Production Engineering Review, Volume 6, Number 4, pp. 26-32, 2015.
- [17] Thomas Moser and Stefan Biffl: Semantic Integration of Software and Systems Engineering Environments, IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS, PART C: APPLICATIONS AND REVIEWS, VOL. 42, NO. 1, JANUARY 2012, pp.38-50, 2012.
- [18] Valeria Ludovici, Fabrizio Smith, Francesco Taglino: Collaborative Ontology Building in Virtual Innovation Factories, International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS), pp.443-450, 2013.
- [19] Valeriy Vyatkin: Software Engineering in Industrial Automation: State-of-the-Art Review, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS, VOL. 9, NO. 3, pp.1234-1249, AUGUST 2013.