

PTU フォーラム 2020 基調講演
「第 4 次産業革命に対応するための PTU ラーニングファクトリー構想」
 PTU Forum 2020 Keynote Speech
 “The Concept of PTU Learning Factory for the 4th Industrial Revolution”

高橋 宏治（職業能力開発総合大学校）
 Koji Takahashi (Polytechnic University of Japan)

1. はじめに

国が設置したものづくりに関するセンターオブエクセレンスである職業能力開発総合大学校(PTU)では、2020年11月27日にPTUフォーラム2020基調講演「第4次産業革命に対応するためのPTUラーニングファクトリー構想」を開催した。

講演は1時間20分にわたり、現在進行中の第4次産業革命に対応した教育・訓練を実現するために、PTUが規模は小さくてもスマートファクトリーの全体像を習得できるラーニングファクトリーの構築に取り組むに至った背景の説明に続き、以下の内容で構成されていた。

- ①ラーニングファクトリーの趣旨とその動向
 - ②なぜ第4次産業革命の教育・訓練にラーニングファクトリーが必要か
 - ③第4次産業革命の教育・訓練の要件を満たすためのPTUにおけるラーニングファクトリーの構想
- 本稿では、講演の概要を紹介する。

2. ラーニングファクトリー構築の背景

現在、第4次産業革命^[1]によるものづくりのスマート化が進行中であり、臨機応変な自律的全体最適化を目指している。これは、多様な技術領域のシステム統合により、個々の要素の和ではできない創発的拮抗りを活用し実現するものである。そのため、第4次産業革命に対応する人材育成においては、生産システム全体を俯瞰的に捉えたスマート化（フィジカルシステム×サイバーシステム×データ活用）の教育訓練が不可欠である。PTUでは、規模は小さくてもスマートファクトリーの全体像を習得できるラーニングファクトリーの構築を開始した。

3. ラーニングファクトリーとは

生産システムに関わる課題解決においては、生産の一連の工程を把握した上で、部分が全体に与える影響も考

慮することが重要である。また、理論的な側面と実践的な側面の両面から解決を図る必要もある。そのためには、規模は小さくても実際の工場と同様な構成の設備を用いて、生産システム全体としていろいろと試行・実験・体験できることが効果的である。そこで、この分野における研究・開発や教育・人材育成のための設備として、欧米で利用されているのがラーニングファクトリーである。

米国では1994年に、ペンシルベニア州立大学により初めて設立された。ドイツでは1980年代後半に、ドイツ版ラーニングファクトリー「Lern fabrik」において、コンピュータ統合製造に関連する認定プログラムが行なわれた^[2]。ラーニングファクトリーでは、目的に応じた講義や訓練・研究活動が行なわれ、一連の工程を俯瞰することができる。理論的教育と実践教育を結びつけ、学生の向学心向上にも寄与する^[3]。

このように、ラーニングファクトリーは第4次産業革命よりも前からあるが、第4次産業革命が提唱されると、対応した新しいものが次々と導入されている。そのため、2011年にラーニングファクトリーに関する国際協会として International Association of Learning Factories^[4]が発足し、毎年国際会議を開催し70件程度/年の発表がなされている。その幹事大学は20校で、ドイツ7校、その他欧州6校、USA、カナダ、南アフリカ、マレーシア、シンガポール、中国が各1校である。

第4次産業革命に対応したラーニングファクトリーにはいろいろとあるが、例を以下に示す。

- ① ドイツ Karlsruhe Institute of Technology
 図1に示すように、移動可能な協働ロボットや配置や構成が随時組替可能なモジュールで構成されている。2018年の実績として、50日以上教育訓練を実施し、200人以上の産業関係者及び250人以上の学生がトレーニングを受けている^[5]。
- ② タイ Sumipol Institute of Manufacturing Technology
 日系企業を中心に提供された設備モジュールで構成され、タイで2つ目のラーニングファクトリーとして2019年に開校した。製造業エンジニア、教育機関の講師、製造業関連企業への就職希望学生を対象とする^[6]。



図1 カールスルーエ工業大学のラーニングファクトリー (出典:K.I.T)

4. 第4次産業革命とラーニングファクトリー

第4次産業革命は、Final report of Industrie4.0 Working Groupによれば、スマート工場の実現により、状況に応じたものづくりの全体最適化を自律的に臨機応変に行うことが要点であるとされている。従来の自動化との関係は、図2に示すように捉えることができる。この実現においては、状況の把握のためにIoT、自律最適化のためにAI、臨機応変な生産実行のためにロボットが用いられることになる。これが、図3に示すサイバーフィジカル生産システムである。第4次産業革命のものづくり教育においては、この概念を理解させることが不可欠である。すなわち、IoT、AI、ロボットが連携して、フィジカル世界とサイバー空間がつながった一連の流れで達成されるという理解が重要である。それを効果的に行えるのは、ラーニングファクトリーということである。

残念ながら、日本においては、第4次産業革命のシステムを要素技術に分解して捉える傾向がある^[7]。これは、第3次産業革命での体験を引きずっていることが原因ではないかと考えられる。図4に示すように、第3次産業革命では、個別の要素技術が電子・情報・通信技術によりプログラマブル化・フレキシブル化し^[8]、それぞれを習得すれば目的を達成できた。

しかし、第4次産業革命は第3次産業革命で高度に自動化された要素をシステム・オブ・システムズ^[9]化することで自律化・全体最適化する「システム化革命」である。これを、要素技術に分解してしまえば、それは第3次産業革命の内容になってしまう。

システム・オブ・システムズは、構成システム単独では実現できない目的を、複数の構成システムを相互に複雑に作用させ、個々の構成システムの振る舞いからは予測できないような創発的な振る舞いを生じさせて実現するシステムである。これこそが、第4次産業革命のスマート化の本質である。図5に示すように、全体システムの構造があって初めて第4次産業革命の本質が捉えられるものであり、それができるのがラーニングファクトリーである。バラしてしまえば、肝心な部分が失われてしまう。

第1～3次産業革命により、工場は高度に自動化（効率的な生産の達成）
自動化：設定された目標に適合するように、予め定められた規範に従って実行する

システムの大規模・複雑化・・・全ての状況を想定しきれない
 システムが置かれる状況・・・制御不能な要因により変動
自動化では対応できない

未知の状況への対応

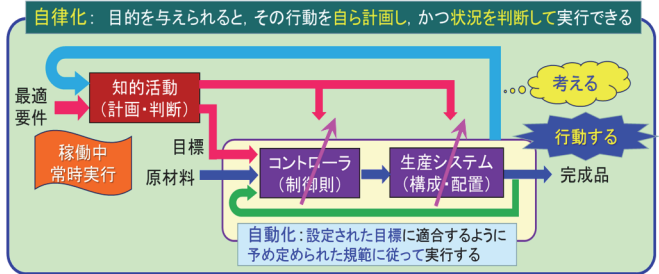


図2 自動化から自律化へ



図3 サイバーフィジカル生産システム

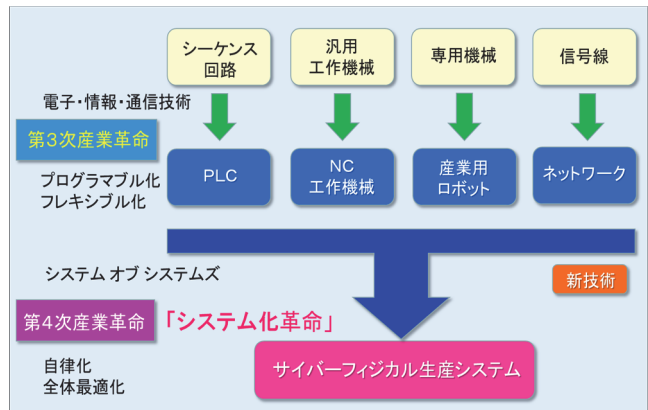


図4 第3次産業革命から第4次産業革命へ

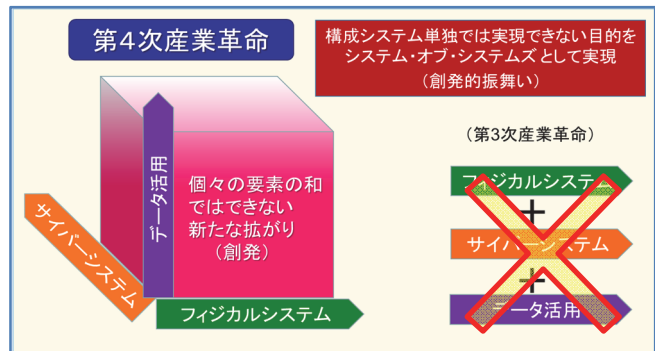


図5 第4次産業革命と創発

5. PTUラーニングファクトリーの構造

PTUにおいて、第4次産業革命におけるものづくりシステムの教育・訓練のために構築を開始したラーニングファクトリーは、サイバーフィジカル生産システムの基本形であるフィジカルシステムとサイバーシステムの連鎖に加えて、人の知を活かす上位層^[10]を設置するものである。これは、AIが万能ではないこと、および、サイバーシステムに知識を与える役割も必要であることによる。図6に全体構造の構想を示す。

このラーニングファクトリーのフィジカルシステムは、ダイナミックセル生産方式を想定したリコンフィギュラブル生産システムとして、配置を固定しない自律ロボット作業モジュール、移動可能な協働ロボット、自律移動可能な搬送ロボット、随時組替え可能な作業モジュールにより構成される。変種変量生産に対応可能な、図7に示すような構成やレイアウトが動的可変な生産システムである^[11]。それぞれのモジュールにおいては、構成や配置の頻繁な変更に対応できるように、国際標準規格によりメーカー等を問わずにつながる Plug and Produce、設置してすぐに使える Easy Setup、誰でもが使いこなせる Easy to Use の要件を満たすものとする。そのため、コントローラのプログラミングには国際標準 IEC61131-3 を、システム要素間の通信接続は国際標準 OPC-UA を用いるものとする。ロボットにはビジョンシステムを融合し、

自己位置や環境の自律認識および対象ワーク位置のティーチングレス化や種別認識を行っている。第4次産業革命の特徴である「モジュール化」「インテリジェント化」「自律化」の基本を習得できる。

サイバーシステムは、クラウドコンピューティングを利用するものとし、フィジカルシステムとの接続には、エッジコンピューティングおよび次世代製造実行システム(MES)を介するものとする。フィジカルシステム、エッジコンピューティング、クラウドコンピューティング間の通信も国際規格 OPC-UA を用いるものとし、第4次産業革命の特徴である「つながる」を習得できる。

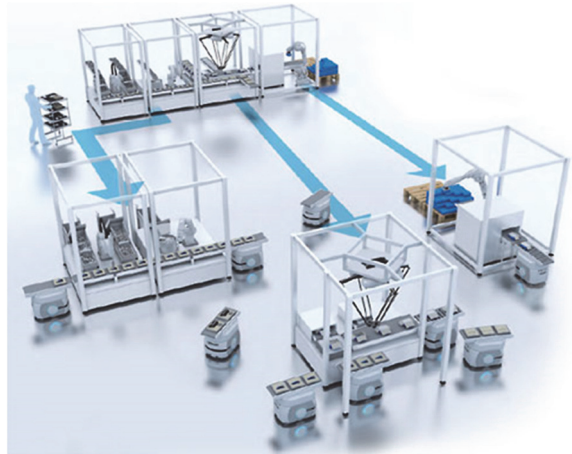


図7 組替可能な生産システム (出典: OMRON)

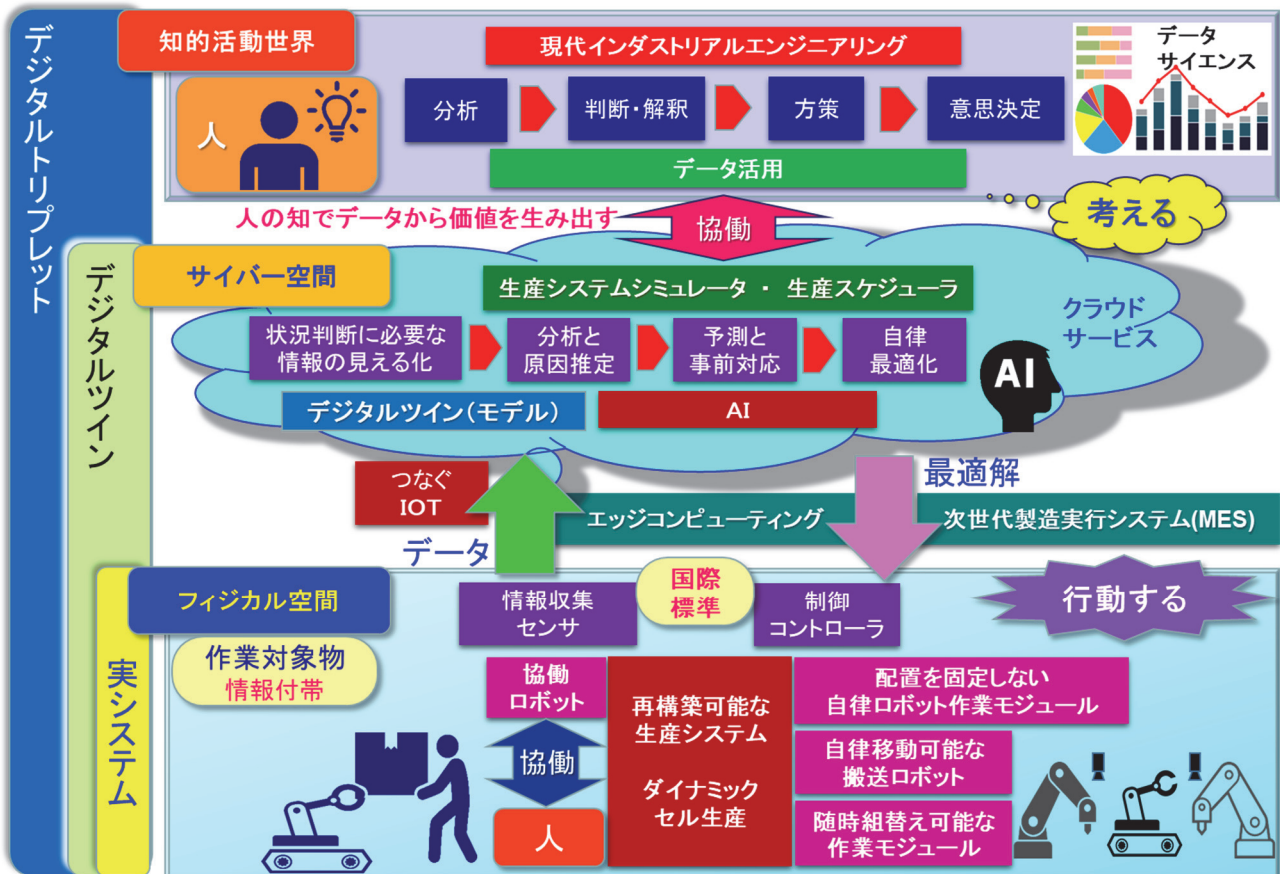


図6 第4次産業革命に対応するPTUラーニングファクトリーの全体構造の構想

6. PTUラーニングファクトリーを用いた教育・訓練内容構成案

PTUラーニングファクトリーを用いたサイバーフィジカル生産システムの教育・訓練内容の案としては、

- ① 第4次産業革命におけるものづくりの全体像
- ② サイバーフィジカル生産システムの構成システム
- ③ 構成システム間の連携
- ④ サイバーフィジカル生産システムの効果

の4つの段階を設けるものとする。表1に構成を示す。

第1段階は、まず第4次産業革命の本質的な概念を理解するという趣旨の講義である。第4次産業革命の捉え方については個人差があるとともに誤解もよくあるため、それを解きほぐすものである。

第2段階は、サイバーフィジカル生産システムを構成する各構成システムについて、講義および実習を行うものである。サイバーフィジカル生産システムの3本柱である「データ活用」「サイバーシステム」「フィジカルシステム」の3つに分け、さらにそれぞれの構成内容について修得する。ただし、要素技術までは分解しない。

第3段階は、第2段階で修得した構成システム間の連携について、講義と実習を行うものである。ただし、いきなり全体の連携を行うのではなく、まずは、データ活用とサイバーシステム間の相互連携、フィジカルシステムからサイバーシステムへの上向き連携、サイバーシステムからフィジカルシステムへの下向き連携に分けて修得する。その後、データ活用・サイバーシステム・フィジカルシステムの3者連携について習得する。

第4段階は、サイバーフィジカル生産システムにおけるデータ活用・サイバーシステム・フィジカルシステムの3者連携の効果について、例題により体験するとともに課題解決実習により習得する。テーマとしては、

- ① システムの置かれた状況変化に臨機応変に対応して生産効率を最適化する
- ② システムの一部に故障が発生した時、ワークの流れを変更する・モジュールの分担を変更するなどして生産を止めない
- ③ 機器や装置の動作状況の変化をとらえて故障の発生を予知し、故障が発生する前に保全する

これらにより、第4次産業革命の全体像を習得する。

表1 PTUラーニングファクトリーを用いた教育・訓練内容構成案

100 第4次産業革命に対応する「スマートなものづくり」システム		
101 第4次産業革命における「ものづくり」が目指すこと (L) 状況に応じた臨機応変な自律的全体最適化	102 第1~3次産業革命と何が異なるか (L) 自動化から自律化へ、システム統合、データ活用	103 第4次産業革命を達成する要件 (L) サイバーフィジカル生産システム、国際標準、つながる
200 構成システム		
210 生産性向上のためのデータ活用	220 サイバーシステム	230 フィジカルシステム
211 生産性にかかわるデータとその解析	221 パブリッククラウドサービスによるクラウドコンピューティングの利用法	231 ビジョンセンサとロボットマニピュレータによるフレキシブルなロボット作業セル
212 稼働状況変動に対応する動的効率化	222 IoT機器とクラウドサービスによるデータの送受信およびデータ取得・蓄積	232 自律移動ロボットによる無軌道搬送システム
213 予知保全による止まらない工場化	223 クラウドコンピューティングによるビッグデータの活用	233 ビルドインカメラを有する可搬型協働ロボットによるEASY TO USE
214 生産システムの自律的全体最適化	224 クラウドコンピューティングによる人工知能(AI)・機械学習サービスの利用	234 レイアウトフリー生産システムによるダイナミックセル生産
300 システム連携		
310 生産システムシミュレータによる策定連携	320 エッジコンピューティングによるデータ連携	330 製造実行システムによるアクション連携
340 ワークのタグ情報による全体連携		
RFID		
400 サイバーフィジカル生産システムの効果		
410 状況に応じた最適運用	420 故障時の対応	430 予知保全
411 例題のデモンストレーション	421 例題のデモンストレーション	431 例題のデモンストレーション
412 課題解決実習	422 課題解決実習	432 課題解決実習

7. チームによるスモールスタート

第4次産業革命のサイバーフィジカル生産システムは、図6で示したように多岐にわたるシステムであり、その構築を一気に進めることは大仕事となる。しかし、システム・オブ・システムズであり、有用なものとして個々独立に運用可能なシステムの複合体である。よって、構成システムごとに立ち上げて、それを「つなげて」積み上げていくことで拡張や臨機応変な組み換え可能である。PTU ラーニングファクトリーも、一気に全体を目指すのではなく、最初は小規模に展開し順次規模を拡大させていくスモールスタートとしている。

また、サイバーフィジカル生産システムは、

- ・システム制御工学：要素を組み合わせることで全体システムとして優れた働きをさせる
- ・インダストリアルエンジニアリング：対象とする仕事の価値創造の効率的効率化
- ・データ工学：IoT, クラウドコンピューティング, ビッグデータ
- ・スマートロボット作業システム：ビジョンセンサ×産業用ロボット, 協働ロボット
- ・メカトロニクス：スマートオートメーション

など複数の専門性を統合したものである。スモールスタートで構築するにしても、1人で全てに対応することは難しい。とくにラーニングファクトリーの場合は、表1に示したような教育・訓練までを展開する必要もあり、複数人によるチームで行っている。ただし、単に複数分野の専門家の寄せ集めということではなく、チームの各メンバーは自分の専門性とデータ活用・デジタル統合力の両方を有し、システム全体像を把握したうえで他者との連携を見据えて自分の専門分野を担当することが重要である。

8. 基礎研修の試行

PTU ラーニングファクトリーはスモールスタートして日が浅く小さな部分が形になっている段階であるが、この基調講演に合わせて第4次産業革命のサイバーフィジカル生産システムに関する基礎研修を、ポリテクカレッジの教員を対象として試行した。その概要を以下に示す。

テーマ：第4次産業革命におけるものづくり

～全体の俯瞰と専門性の統合～

日時：2020年11月26～27日（12時間）

内容：

- ① 第4次産業革命におけるものづくりシステムの全体像（講義）
- ② インテリジェントロボットによるスマート生産の実現（講義）
- ③ 第4次産業革命におけるデータ活用と生産性の向上（講義）

- ④ サイバーシステムによる人の知とデータ活用の実現（講義）
- ⑤ 第4次産業革命に対応するPTU ラーニングファクトリーの構想（講義）
- ⑥ 第4次産業革命時代のものづくり3Mの見える化と生産性向上（講義・演習）
- ⑦ サイバーフィジカル生産システム入門演習(1) クラウドサービス（解説・デモンストレーション見学）
- ⑧ サイバーフィジカル生産システム入門演習(2) スマートロボット作業（解説・デモンストレーション見学）

参加人員：32名

内訳：生産技術科 5

生産機械システム技術科 3

生産電気システム技術科 2

生産電子情報システム技術科 5

電気エネルギー制御科 4

電子情報技術科 9

建築科 2

物流情報科 1

港湾技術科 1

終了後のアンケート結果

・満足度：100%

・活用度：71%

※活用が難しい理由：

複合的で他科との連携や分担、カリキュラムなどの調整を要するなど

9. まとめ

第4次産業革命に対応した人材育成のため、PTUで構築を開始したラーニングファクトリーの構想に関して、PTU フォーラム基調講演の概要を紹介した。

規模は小さくても次のような特徴をもつ教育・訓練用模擬工場を目指している。

- ・システムの全体像を俯瞰的・系統的に捉えることができる
- ・構成要素のつながりを可視化・構造化できる
- ・複数の専門性（システム制御工学、インダストリアルエンジニアリング、データサイエンス、メカトロニクス、ロボティクス、ICT（情報通信技術）など）を統合できる
- ・個々の要素の和ではできない新たな拡がりの創発など第4次産業革命の本質を理解できる

現在、システム・オブ・システムズの性質を活かして、構成システムごとに作り、それを組み合わせることで全体システムに拡張しているところである。教育・訓練も、システム構築の進捗に応じて科目の作成を進め試行も行っている。一通りの完成までには時間を要するが、

段階的に確立していく予定である。

なお、この講演は録画され、収録した講演論文集 DVD が無料配布されている（数量限定）。詳細については、こちらを参照されたい。

ウトが動的可変な生産システムの事象駆動型制御の試作実験装置、平成30年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集、pp.1012-1015 (2018)

Keywords: Learning Factory, 4th Industrial Revolution

(原稿受理 2020/12/28)

謝辞

本稿で紹介した PTU ラーニングファクトリーの構築および基礎研修の試行は、PTU に 2020 年 4 月に設置された新成長分野系ラーニング・ファクトリーユニットの教員チームによるものです。ここに謝意を表します。

〈附記〉 PTU ラーニング・ファクトリーユニット 教員構成

- ・高橋 宏治 教授 [システム制御工学]
- ・和田 雅宏 教授 [インダストリアルエンジニアリング]
- ・市川 修 教授 [メカトロニクス]
- ・佐藤 崇志 准教授 [スマートロボット作業システム]
- ・遠藤 雅樹 准教授 [データ工学]

※全員兼務

高橋 宏治, 工学博士

職業能力開発総合大学校, 能力開発院, 〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1

Koji Takahashi, Dr. Eng. Faculty of Human Resources Development, Polytechnic University of Japan, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, Tokyo 187-0035.

Email: k-takahashi@uitech.ac.jp

参考文献

- [1] National Academy of Science and Engineering : Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0 = Final report of the Industrie 4.0 Working Group (2013)
- [2] 文部科学省科学技術・学術政策研究所：企業と大学等の連携による人材養成—Society5.0 の具現化に資する人材輩出に向けて—, STI Horizon 2018, Vol.4, No.2 (2018)
- [3] 経済産業省：平成 29 年度 製造基盤技術実態等調査報告書 (2017)
- [4] International Association of Learning Factories : <https://ialf-online.net/>
- [5] Lernfabrik Karlsruhe : <https://globallearningfactory.com/>
- [6] Sumipol Institute of Manufacturing Technology : <https://simtec.or.th/en/en-home/>
- [7] 経済産業省ものづくり政策審議室: Connected Industries 実現に向けた横断的課題への対応システム思考、全体最適化の必要性, 2018 年度版ものづくり白書, 第 1 部第 1 章第 3 節 (2018)
- [8] 高橋宏治：産業革命の 4 段階における離散事象システム制御の関わり, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2019 講演論文集, pp.634-637 (2019)
- [9] Maier : Architecting principles for systems-of-systems, The Journal of The International Council on Systems Engineering, (1998)
- [10] 梅田 靖：次世代生産システムに向けた「デジタル・トリプレット」の提案, 日本機械学会生産システム部門講演会講演論文集 2019, p. 613 (2019)
- [11] 高橋宏治・黒部翼, 古井英則, 佐藤崇志：構成やレイア