



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

IoT環境における実仮想融合型生産スケジューリング

Real-virtual Fusion Production Scheduling in IoT Environment

藤井信忠
Nobutada Fujii

神戸大学
大学院システム情報学研究科
准教授

1 はじめに

情報通信技術の発展によりすべてのモノがインターネットに接続される時代が訪れつつある。いわゆるIoT (Internet of Things) の実現であり、その用語自体は1999年ごろから使用され始めたようである¹⁾。ものづくりの分野においては、ドイツを中心とするIndustrie 4.0²⁾、アメリカのGEを中心とするIndustrial Internet³⁾が提唱され、ものづくりのプロセスだけでなく、モノを中心としたより広範囲での価値創出のプロセスとしてのIoTの活用が模索されつつある。すべての生産設備がインターネットに接続され、リアルタイムに大量のデータ取得が可能となるだけでなく、企業活動が消費者とSNS等を介してシームレスに接続されることで新しい価値を創出しようとする動きである。日本においてもつながる工場・生産システム⁴⁾として議論が活発化している。また、生産現場におけるIoTを実現するための機器のインターフェースの標準化の動きも活発である。

これらの動向においては、IoTを実現する設備・インターフェースを実現することも重要であるが、人的資源を含んだすべての生産設備がインターネットを介して接続された結果としてどのような価値を創出できるか、という視点がより重要であると考えられる。著者らもユビキタス時代のものづくりシステムの在り方として、実仮想融合型生産スケジューリング⁵⁾、超分散シ

ミュレーション手法⁶⁾などの研究を通じて検討を進めてきた。またこれらの研究は、これまで提案・検証してきた自律分散型生産システム⁷⁾構築のプラットフォームを提供するものとしても位置づけることが可能である。本稿では、実仮想融合型生産スケジューリングのこれまでの取り組みについて紹介する。

2 実仮想融合型生産スケジューリング

2.1 実仮想融合型生産システム

実仮想融合型生産システムとは、生産現場である実システムと生産現場をモデル化した仮想システムを融合し、需要変動や自然環境の変化などの生産システム外部の環境変動、設備故障・メンテナンスや人的要因など生産システム内部における不確定要素の双方に対する適応性の実現を目指すシステムである(図1)。実仮想融合型生産システムにおいては、実システムをもとに仮想システムを予めモデル化しておくのではなく、必要となるタイミングで必要な範囲でモデル化し仮想システムを動的に生成するというものである。そうすることにより、特にシステムの運用段階における仮想システムと実システムとの乖離、仮想システムの陳腐化を防止するとともに、変動への適応性を備えることが可能となる。

実仮想融合型生産システムの概念を基に、生産スケジューリングを対象に構築を試みたのが実仮想融合型生産スケジューリングである⁸⁾。実仮想融合型生産スケジューリングを実現する際に重要なポイントは以下の2つである。ポイント1(仮想システムの動的生成): 仮想システムをどのタイミング・範囲で生成するか。ポイント2(仮想システムにおける意思決定手法): 仮想システムにおいてどのように意思決定を行って生産スケジュールを作成・修正するか。以下にこれらを説明する。

2.2 仮想システムの動的生成

仮想システムの動的生成については、以下の2つのポイン

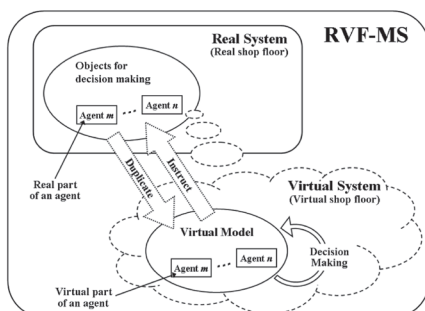


図1 実仮想融合型生産システム概念

トを決定する必要がある。1) 仮想システム生成のタイミング、2) 仮想システム生成の範囲。計画段階においては、システム全体の最適性を追究するため、システム全要素を用いて仮想システムを生成し初期スケジュールを立案する。それに対し、運用段階の変動発生時に行われる再スケジューリングについては、再帰的伝播法⁹⁾をもとにした情報伝播法を提案し、仮想システム生成のタイミングを決定している。

まず、特急仕事、遅延や設備故障などの変動が発生した場合に、各設備で遅延分スケジュールを右シフトしその影響を見積るとともに、その情報を後工程を担当する設備にも伝播させてその影響が将来どのように広がるかを予測する(図2(a))。予測した結果、納期遅れなどが無ければそのまま生産を継続する。一方、納期遅れなどが予想された場合、仮想システムを動的に生成しスケジュールの修正を試みる(図2(b))。

再スケジューリングを行うための仮想システムを生成する際に、設備全てでスケジュール修正を行うと再計画に掛かる計算コストが大きくなりすぎる。そこで、仮想システムへと参入し再計画に関与する設備・仕事を限定する部分要素限定法¹⁰⁾を提案している。情報伝播の影響を受ける設備だけが意思決定の参加者になることを設備限定(Equipment Limitation)と定義し(図2(c))、さらに、意思決定参加者だけでなく再スケジューリング対象作業に対しても限定を行い、時間的決定である時間限定(Time Limitation)と空間的決定である移動作業限定(Shift-Process Limitation)の限定基準を用いる。それらを組み合わせることで様々な限定法が考えられるが、どの

ような限定法を用いるのが最も適切かは問題に依存する。

2.3 仮想システムにおける意思決定

前節のように生成された仮想システムにおいて、スケジュール作成・修正を行う。計画段階では時間をかけて最適性を追究し、最適化手法の適用が考えられる。一方、運用段階においては、変動に対する即応性が要求されるため、解の精度と求解時間のバランスを考慮できる最適化手法とシミュレーションによる意思決定手法を用いている。以下ではオークションに基づいた最適化手法を紹介する。

実仮想融合型生産スケジューリングにおける意思決定手法として、マルチエージェントシステムと親和性の高い社会的交渉ベースの組合せオークション(CA, Combinatorial Auction)¹¹⁾を用いている。組合せオークションは、人間のやりとりを模倣する社会的交渉手法の1つであり、複数の財を一度に競売にかけられる。入札者は個々の財に対して入札するだけでなく任意の財の組合せで入札することも可能であるため、個々の財の価値の総和よりも価値が増加する補完性や、その逆に価値が減少する代替性といった依存関係のある財の扱いが可能となる。さらに、コーディネータは財を配分する時に、入札者を個々に考慮していくのではなく複数の入札者の組合せも同時に考えられるため、一度のオークションで財を効率的に配分することが可能であり、精度の高い資源配分が求められる。入札者が実行可能なすべての組合せに対して入札したとすると(全入札)、コーディネータが解く配分問題の解は最適解となるが求解に時間がかかる。入札者が入札を限定したとすると(部分入札)、コーディネータが解いた結果は必ずしも最適解とはならないが求解時間は短縮できることとなる。計画段階では、オーダーエージェントをコーディネータ、各設備を入札者として組合せオークションを行う。一方、運用段階では、情報伝播の発起者となる設備をコーディネータとして、コーディネータ自身とその他の設備を入札者として組合せオークションを用いることで、限られた時間内でできるだけ最適性を追求したスケジュール修正を目指している¹²⁾。

2.4 モデルプラントの活用

実仮想融合型生産スケジューリング手法の有効性確認のために、設備の物理模型から構成したモデルプラント¹³⁾を用いて実仮想融合実験を試みてきている。モデルプラントは実工場と同様にセンサ・アクチュエータを備えている。実工場の代わりにモデルプラントを実生産システムとみなし、実仮想融合実験を行うことで実空間に発生した不確定要素に対応することを目指している。モデルプラントの構成は以下の通りである(図3)。

- ・加工ミーリングマシン4台(Milling Machine 1~4): 材料を加工
- ・移動コンベア1台(Conveyor): 加工物を搬送

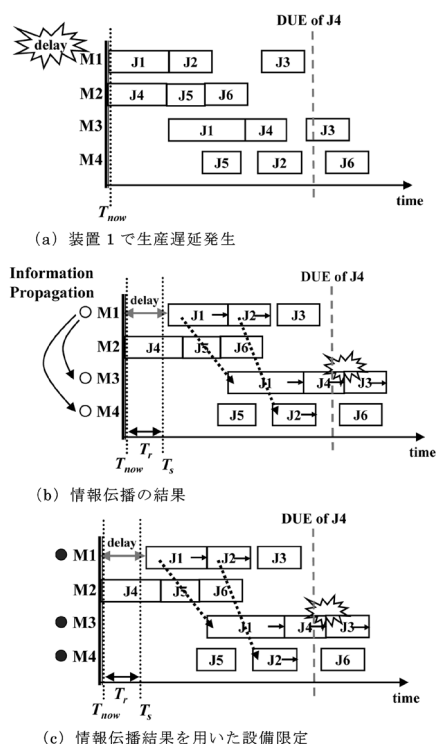
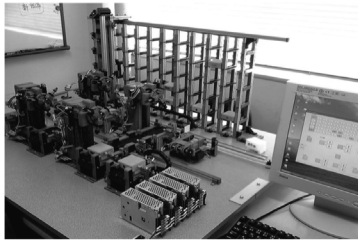
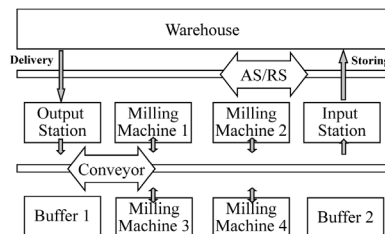


図2 設備間の情報伝播とその結果を用いた設備限定



(a) 実機写真



(b) システム構成

図3 モデルプラントとその構成

- ・バッファコンベア2台 (Buffer1、2)：加工物の外部との入出力に用いる。
- ・自動倉庫1台 (AS/RS、Automated Storage / Retrieval System)：格納位置50箇所、入出庫ステーションを保有

これまでコンベヤへの製品移動失敗などの小規模な停止（いわゆるチョコ停）が累積していった結果納期遅れが予測された場合の再スケジューリング、任意の設備に故障を発生させた場合の再スケジューリングについて実仮想融合型生産スケジューリング手法の有効性を確認してきている。

3 おわりに

本稿では、生産環境におけるIoT環境の活用手法として実仮想融合型生産スケジューリングについてこれまでの取り組みの一例を紹介し、動的な仮想システムの生成と（再）スケジューリング手法について述べた。

実仮想融合型生産システムの概念は、生産システムのレジリエンスを実現する手法の1つとしても位置づけられると考えている。生産システムのレジリエンスをロバストネスとアジリティの上位概念と位置づける先行研究¹⁴⁾の考えに則り、計画段階で変動を考慮したプロアクティブ計画（ロバストネスに相当）を実行するとともに、変動が発生した場合には運用段階において仮想システムを動的に生成してリアクティブに再計画（アジリティに相当）することが可能となる。これらの考え方にもとづき本会の震災復興アクションプラン「『ゆらぎ』への耐性を実現するための人・システム共創型リスクマネジメント」研究会において検討を進めた。また、変動への適応性だけでなく、日常における製造業の高付加価値化を実現する

ために、製造業のサービス化を実現することが重要であると認識しており検討を進めてきている¹⁵⁾。IoT環境における実仮想融合型生産システムの概念は、これらのレジリエンス、サービス化を実現するための情報基盤、システム構築技術として有効であると考えており、今後も検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) K.Ashton：RFID Journal, 22 (2009), June.
- 2) National Academy of Science and Engineering (acatech), Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0, Final report of the Industrie 4.0 Working Group, http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Material_fuer_Sonderseiten/Industrie_4.0/Final_report__Industrie_4.0_accessible.pdf, (2013)
- 3) P.C.Evans and M.Annunziata：Industrial Internet：Pushing the Boundaries of Minds and Machines, http://www.ge.com/jp/docs/1377481198526_Industrial_Internet_Japan_WhitePaper_0517_2s.pdf, (2012)
- 4) 日本機械学会生産システム部門「つながる工場」分科会, 日本的な「つながる工場」実現へ向けた製造プロセスイノベーションの提言, 日本機械学会 生産システム部門, <http://www.jsme.or.jp/msd/>, (2014)
- 5) 藤井信忠, 貝原俊也：経営システム, 22 (2012) 1, 14.
- 6) S.Fujii, N.Fujii, K.Iwamura, E.Morinaga, A.Tsumaya, T.Inoue and T.Mariyama：Proc.of the ASME/ISCIE 2012 International Symposium on Flexible Automation (ISFA2012), (2012), CD-ROM.
- 7) 藤井信忠, 鳩野逸生, ヤリワリオ, 上田完次：精密工学会誌, 69 (2003) 6, 820.
- 8) 錢毅, 藤井信忠, 貝原俊也, 藤井進, 梅田豊裕：計測自動制御学会論文集, 47 (2011) 11, 549.
- 9) 樋野励, 森脇俊道：日本機械学会論文集C編, 66 (2000) 647, 2449.
- 10) 錢毅, 藤井信忠, 貝原俊也, 藤井進, 梅田豊裕：計測自動制御学会論文集, 48 (2012) 11, 698.
- 11) 貝原俊也, 藤井進, 三浦克仁：日本機械学会論文集C編, 75 (2009) 752, 1143.
- 12) 錢毅, 藤井信忠, 貝原俊也, 藤井進, 梅田豊裕：日本機械学会論文集 (C編), 78 (2012) 792, 3033.
- 13) <http://www.fischertechnik.com/>
- 14) M.Heinicke：Procedia CIRP, 19 (2014), 105.
- 15) 藤井信忠：日本機械学会誌, 114 (2011) 1113, 624.

(2015年6月8日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

東京工業大学 大学院総合理工学研究科 知能システム科学専攻 教授

寺野 隆雄

神 戸大学の藤井先生とは、もう何年前になるかは忘れてしまったが、計測・制御・システム工学部会の研究会でお会いしたのが最初である。私自身は、システム関係のさまざまな学会と関係しているのだが、最初にお会いしたのがここ鉄鋼協会というのは珍しい。しかし、それ以来、藤井先生とは、計測自動制御学会、人工知能学会などさまざまな場所でご一緒させていただいている。どこでもご一緒できること自体、藤井先生が新進気鋭の研究者であることの証左でもある。

システム関係の研究者はいろいろな場所に出没する。でも、鉄鋼協会ではシステム関連の研究者は通常影が薄い。システムに関する研究開発が鉄鋼協会の中であまり目立たないのはある意味でやむを得ないことである。その大きな理由は、システムのもつ目に見えにくい性質に由来する。実際、システムの紹介記事では、その本質よりも目に見えるコンピュータディスプレイか対象設備の写真しか使われないことが多い。

システムは機能要素を組み合わせて全体としてひとつまたは複数の機能を実現するものとして定義される。ネジをひとつとっても、高炉をとっても、また、製鉄所全体をとってもそれはシステムなのである。システムは自覚していないと目に触れることは少ない。しかも、システムは研究開発に手間がかかるわりには、完成したとた

んにいろいろ手当てが必要となる。

しかしながら、鉄鋼業の中でシステム技術が果たしてきた役割は、産業面でも理論研究面でも非常に大きい。オペレーションズリサーチの最適化技術や、人工知能のエキスパートシステム技術が実用に供されたのは鉄鋼業が最初であった。そして、これらの実用化されたシステムが、理論研究を主導する状況が長く続いた。

さて、そこで藤井先生が解説されているIoTとシミュレーション、スケジューリングのテーマにふれよう。これは古くて新しい問題である。根本的な解決策はなかなかなく、また、新しい手法は次々と提案される。

今、ふたたび人工知能がブームになり、新たな産業の動きとしてIoTの議論が活発になってきている。さらに、鉄鋼業では、人を含み、人を育てる、また、人とともに育つシステムが要請されている。システムは、機能と環境との境界を定めることによってデザインが容易になる。しかし、人をシステム要素に取り込んだ瞬間にこれは難しくなる。さらに、経営環境の変化も激しい。これは、システムを考える上で、実用上も理論上にも新たなブレーク・スルーを要求する。

藤井先生のように若くパワフルな研究者・開発者が鉄鋼業といわず、世界の産業を牽引していただければと願う。

(株) 神戸製鋼所 技術開発本部 生産システム研究所 研究首席

檜崎 博司

藤 井先生とは鉄鋼協会の会合などでお会いする機会も多いのですが、その都度「ものづくりイノベーション」について熱く語られる姿に大層感心いたしております。

鉄鋼業では、顧客の様々な要求に応じて多種多様な品種をキメ細かく作り分けることが要求されています。しかも、高付加価値化、品種改善など、作り分けのパターンは増大傾向にあり、生産管理システムも大規模複雑化する傾向にあります。

一般に、「システム」は、明確に定義された手続きを正確、高速に反復し業務を効率化したり、業務や現象のモデルにもとづいて「最適解」を求めたりすることが主な役割です。

それらは「規定演技」ともいうべきシステムの役割ですが、それに加え、最近では、計算能力と膨大なデータを武器に、人間の知的能力を補完するような、いわば「知的パワースーツ」、あるいは人間の知的パートナーとしてのソフトなシステム技術が進歩、発展しつつあります。複雑で非定常な業務が増えつつあるなか、世代交代や人材の早期育成という背景もあり、いわば「人間に寄り添って共に考える」あるいは「人間の問題解決過程を支援す

る」といった新しいシステム技術が望まれています。

藤井先生は、自律分散、エージェント、サービス工学などをご専門とされておられ、まさに、そのような新しい世代のシステム技術のパイオニアであると期待しています。「実仮想融合型生産スケジューリング」では、設備故障のような想定外事象発生時、従来なら「動作前提不満足」として処理中断するところ、対象の状態にあわせて、システムが自己組織的に適応し動作を継続するという、いわばレジリエントな生産スケジューリング技術につながるものであり、大層興味深く拝見させていただきました。

システム技術分野では、研究から実用化の過程で、実問題の規模や複雑さに対して、計算時間が許容レベルを超過したり、解の精度劣化、あるいは保守・運用困難になったりするといった「スケーラビリティ」の問題が生じることがあります。また、運用においては、ユーザである人間に対して、システムの処理に対する説明性や人間が自分の意図を反映した介入をしやすいような協調インタフェースが求められる場合も多いと思います。そのような運用上の課題をも視野にのべた研究を展開されることを期待いたします。