

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 4日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2011

課題番号：20560111

研究課題名（和文） ユビキタス環境下におけるサステイナブル生産システムの構成と運用に関する研究

研究課題名（英文） Construction and Operation of Sustainable Manufacturing Systems under Ubiquitous Environment

研究代表者

藤井 進 (FUJII SUSUMU)

上智大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：00031112

研究成果の概要（和文）：高度な通信、情報処理機能を有し、情報ネットワークに接続された設備機器よりなる生産システムの効率的な運用法として、個別機器間の交渉により自律的にスケジューリングを行うオークション法を提案し、実装可能性も含めて検討し、有効性を明らかにした。また、これらの運用法を組み込んだ実仮想融合型生産システムの構成についても研究した。さらに、環境負荷の削減に注目した物流計画立案について定式化し、解法を提案するなど、サプライチェーンの効率化に関する知見を得た。

研究成果の概要（英文）：Devices in recent manufacturing systems are mostly equipped with advanced communication and information processing capability and can easily communicate through the information network. In this study, auction based methods, one-way and two-way auctions and combinatorial auction, are proposed and evaluated as autonomous planning and scheduling method for the effective operation in such manufacturing systems. Embedding such autonomous functions, a concept of real-virtual manufacturing system is also proposed and basic studies to realize and utilize such system are performed. From the global supply chain viewpoint, an international transportation planning problem is formulated as a multi-objective optimization problem taking the environmental issue into consideration, and some solving methods are proposed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，生産工学・加工学

キーワード：生産システム，情報化社会，自律性，持続可能性，オークション，ジョブショップ，サプライチェーン，環境負荷

1. 研究開始当初の背景

研究を開始する時点においては、情報通信技術の発展に伴い、社会的にユビキタスと呼ばれる情報環境が醸成されつつあり、製造業においてはこのような環境の充実が進められていた。このため進んだ情報環境を活用し

た効率的な生産の仕組みの創出が強く望まれていた。一方、マーケットは次々と新しい製品を要求し、いわゆる変種変量生産体制の整備も重要な課題となっていた。その要求に対して、従来のように新しい生産システムで対応するだけではなく、現有のシステムを柔

軟に活用しながら対応する持続可能性の維持、すなわちサステナビリティ、が要請され、そのような生産システムの構築、運用技術の開発が急務となっていた。また、生産に関わる部品供給についてはサプライチェーンの効率的なマネジメントの重要性は広く認識されており、その対象はグローバルなものとなっていた。このため企業間の部品・製品の輸送は国内外を結んだものとなり、納期・コストだけでなく環境問題にも配慮した輸送計画の立案が必要となっていた。

2. 研究の目的

このようなユビキタス時代におけるサステナブル生産システムに対する要請にこたえることを目的として、本研究では、情報通信環境の整備された環境下における効率的な運用法として自律的運用法に着目し、以下の視点から検討・評価する。

(1) 生産システムにおける自律的運用法の提案

(2) 自律的システム運用法の適用と有効性の評価

(3) 自律的生産システムのサステナビリティの検討

さらに、広域化するサプライチェーンマネジメントの観点から

(4) サプライチェーンにおける環境負荷を考慮した物流計画

に関する検討を行う。

3. 研究の方法

上記の研究について研究分担者の間で全体的な方向性について検討する。その結果に沿って、必要に応じて各研究者の協力による共同研究を進めると共に、独自の視点から研究目的の実現に有用と考えられる研究を進める。

4. 研究成果

研究目的に上げた4つの視点から研究を進めた結果、下記のような成果を得た。

(1) 自律的システム運用法の提案

ダイナミックに処理すべきワークの到着する生産システムにおける運用法として、様々な方法が提案されている。特に、ディスパッチング・ルールによりワークを処理装置

(以下、機械)に割り当てる方法が、多様な環境における柔軟性に富む方法として広く実用されている。ディスパッチング・システムがワークと機械の情報を集中的に収集管理し、必要に応じてワークの割当を指示するような集中型システム構成が一般的である。しかし、ユビキタス環境下にあるシステムにおいては、各機械がそれぞれに高度の情報処理可能なPCなどを制御装置として装備している。またワークもそれ自体にRFIDを装

着していることも多く、高度な情報処理可能な保管・運搬装置などの制御装置を活用することにより、ワーク側も高度な情報機能を有するようになってきている。

本研究では、このような環境下における生産システムの自律的運用法としてオークション法を提案した。すなわち、従来のように一台のシステムが集中的に情報処理を行うのではなく、各機器がある種の交渉(入札活動)をネットワークを介して実行するオークションによる方法を提案し、その有効性について検討した。

① 単純オークション法(一方向オークション)

ワーク到着時の機械選定オークション

(a) 空き機械が無いか、すでに空き機械で処理可能な処理待ちワークがある場合には処理待ち列に加わる。

(b) 空き機械がある場合、ワークがオークション主催者となり、各機械がオークションの参加者となる。(図1参照)

(b-1) 主催者は機械群に必要な加工処理情報と適用ルール(以下、競り基準)を提示する。

(b-2) 受信した個別の機械はその状態(空き稼働中か、処理の可能性(機能的だけでなく、必要な工具を保有しているか)を考慮して、提示された競り基準に応じた入札のための競り値(処理必要時間、加工精度、納期、納期余裕など)を設定し、主催者に返信する。

(b-3) 主催者であるワークは受信した競り値情報と競り基準に基づいて加工機械を決定する。もし、複数の機械が同値を提示し、競合する場合には、それらの機械に対して競り基準を変更して再度オークションを実施する。最終的に一台に絞り込まれるまで実施するが、絞り込めない場合にはランダムに決定する。

競り基準としては、処理時間、納期、納期余裕、加工精度など従来から提案されているディスパッチング・ルールが考えられる。提示する順序は生産システムの稼働状況に応じて変更する。これによって、生産環境や、個別ワークの特性(特急、納期の切迫度、品質要求など)に応じて提示順序を変更することが可能となり、柔軟な運用が可能となる。多数の競り基準に重み付けをする方法も提案されているが、状況に応じた適切な重みの設定は難しく、単純に競り基準を順次提示する方法の方が有用であると考えられる。

機械が空いた時のオークションは主催者がワークから機械に変わり、ワークが参加者となっただけで基本的にはワークが到着したときと同様である。

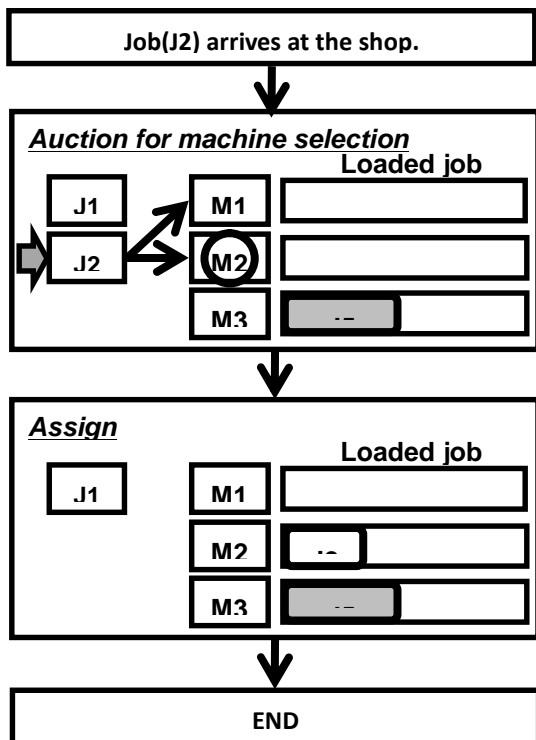


図1 機械選定オークションの手順

② 双方向オークション法

単純オークション法は生産システムの混雑状況に応じてオークションの主催者が偏る傾向がある。すなわち比較的暇なときにはワーク到着時に空き機械があり、ワークが主催者となる事が多く、ワークに有利な機械が選ばれることが多くなる。一方混雑時には機械が空いた時にワークが複数個処理待ち状態にあることが多く、機械が主催者となり、機械に有利なワークが選ばれることが多くなる。例えば処理時間の短いワークを選びたい機械が多い場合には処理時間の長いワークは長時間待たされることが多くなり、納期遅れになる可能性が高くなるなどの問題がある。この問題を解消するために双方向オークションと呼ばれる方法を提案する。

双方向オークションでは主オークションと副オークションを考える。主オークションとして単純オークションを最初に行う。例えばワーク主催のオークションである機械が選ばれたとする。ここで選ばれた機械が主催者となり、再度単純オークションを実施する。その結果、最初のワークが選ばれればそれでオークションは終了する。しかし、最初のワーク以外のワークが選ばれると、そのワークをその機械に仮割り付けし、再度最初のワークが主催者となりオークションを実施する。この処理を繰り返す、最終的に組合せが決まらない場合には、最初の組合せを採用することとする。これによって、両者にと

って満足のできる組合せが得られる可能性が高くなる。

③ 組合せオークション法

上記の2つのオークション法は生産システムの稼働中にジョブを割り当てるためのオークション法である。一方、組合せオークションは計画段階において、主催者により提示されたジョブ群とその加工に用いられる工具群、作業群などの財に対して、機械は加工しようとするジョブ群、必要な工具群、作業群などを選定し、その組合せに対する選好度を示す効用と併せて入札する。各機械は多数の組合せの入札が可能である。主催者は機械群から提示された入札群の中から全体として最も効用が高くなる各機械の入札の組合せを選ぶ。全ジョブを限られた工具数、作業群数の制約を守りつつ割り当てなければならない。各機械が何種類の入札を準備するかにより、探索効率は変化する。少なすぎると実行可能な組合せが存在しなくなり、多すぎると探索に時間がかかる。適切な入札群を生成する入札決定問題と、最適な組合せを決定する勝者決定問題の2段階の決定問題を解くことが必要となる。

セル生産を対象として問題を定式化し、その解法について検討した。個別の入札におけるジョブの順序付けは分岐限界法により決定する。入札群の生成に際しては、できるだけ多様性に富むものが得られるような探索法が必要である。勝者決定問題は基本的には0-1整数計画問題として定式化される。大規模となるため求解のためには定式化に工夫が必要である。作業者は全員同一の能力を有する場合だけでなく、能力に違いがある場合についても検討した。

(2) 自律的システム運用法の適用と有効性

生産システムにオークション法を適用の可能性とその有効性について検討するために、現実に運用されているシステムを対象とするシミュレーションモデルを作成した。その結果は下記の通りである。

① 複数のNC工作機械より構成されるジョブショップ

ジョブの処理可能機械は選択的であるジョブショップを考える。このシステムに対して(1)で示した単純オークションを適用すると、予想された通り混雑状況に応じてオークションの主催者に偏りが生じ、混雑時には大幅な納期遅れが生じた。双方向オークションを適用し、適切な競争基準の適用順序を設定することにより、納期遅れは少なくなり、その有効性を示すことができた。

さらに、実システムへの実装を前提とした通信、処理機能の検討を行い、5台の機械と2台の倉庫よりなるモデルを7台のPCに

個別に実装し、さらにそれらを固定時間増分法によりシミュレーションするための時間管理用PCを追加し、合計8台のPC群によるジョブショップシステムを構築した。(図2参照) これにより、提案した方法の実システム上での実現可能性を示すことができた。研究段階の方法論としては十分な評価を受けているが、さらにNC工作機械などの制御装置に対応するオークション機能を実装することにより、その有効性を実システムの運用において実証することが課題である。

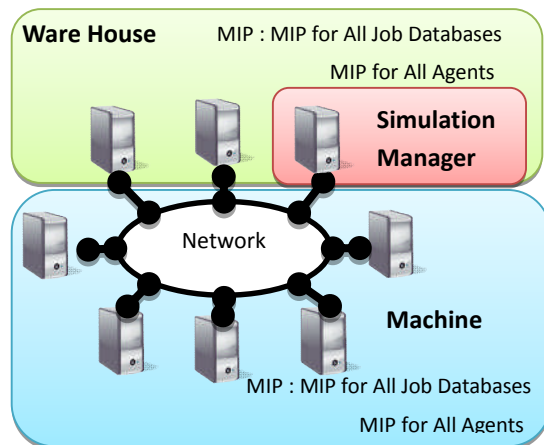


図2 双方向オークションを実装するジョブショップモデルシステム

② 往復軌道台車を有する FMS

無人運転の可能な生産システムとして往復型の軌道台車を有するFMSが現在も使用されている。このシステムの有効活用のためにオークション法の適用を考えた。1台のパレットに1個のワークを取り付けて加工する中大型ワークを対象とするシステム(図3参照)と、複数のワークをパレット上のジグに取り付ける小物加工用FMSを対象としてオークション法の適用を検討した。

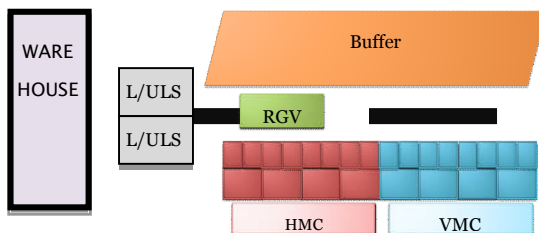


図3 中大型ワーク加工用 FMS モデル

これらのFMSでは、オークションの主催者は軌道台車(RGV)である。搬送を要求するワークはパレットプール(Buffer)、機械前のバッファ、ワークのローディング・アンローディングステーション(L/ULS)に分散して存在する。その搬送先もワークの処理状況、混雑状況により変化する。ワークは倉庫(Ware House)に外部から到着する。様々な

状況下でシミュレーションを繰り返し、有効なFMS運用のために重要な留意事項や、オークションの適用法について下記のような知見を得た。

- (a) 状況に応じてどこに存在するワーク群の中から搬送ワークを選ぶかを決定するワーク所在場所の探索順序の決定。
- (b) 夜間の無人運転期間の有効利用のために、有人期間終了前にはパレットプールに多くの未処理ワークを保管する方策をとること。
- (c) 有人期間開始時にはパレットプール内の処理済みワークをシステム外に搬出することを優先するため処理時間の長いワークを投入することにより、機械の稼働率の維持を図りながら処理済みワークの搬出効率を向上させる方策をとること。
- (d) 到着ワーク群からシステムに投入するワークの選定のための競り基準を時間帯により適宜変更すること。小物FMSにおいては何個のワークを取り付けるかも課題となる。

これらの設定はFMSの稼働状況により変動することから、運用法を固定するのではなく実システムと並行してシミュレーションにより適切な設定を探求し、運用法を生産環境に柔軟に適應させることが重要である。

(3) 実仮想融合型生産システムの提案

生産システムの効率的運用のためには、生産環境に応じた運用法の適用が重要である。このためには実システムに対応するシミュレーションモデルを整備し、運用に関わる様々なパラメータの適應性について常時評価し、必要に応じて修正するなどの作業を行うことが望まれる。また、機械の故障時には再スケジューリングの必要性の予測や、修正活動の妥当性などを評価・判定することも重要である。しかし、実システムの構成は絶えず変化しており、シミュレーションモデルをその変化に追従させるためには手間と時間が必要となる。実仮想融合型生産システムとして、各機械・設備の制御装置などにシミュレーション機能を追加し、それらがネットワークで繋がることによりシミュレーションモデルを構成し、実システムと仮想システムが乖離することなく共存するシステムを構想する。これにより、生産計画、スケジュールなどの計画時点では全体システムに対応する仮想システムによる事前評価を行い、機械故障などのトラブル時にはその影響の生じる範囲を同定し、その関連する部分仮想システムによる再スケジューリングなどの修正活動の評価を行うようにすることが可能となる。このような実仮想融合型生産システムの構成法について実システムとしてモデ

ルプラントを用いて検討した。図4の右端のMachine-iなどはモデルプラントの実機に対応しており、中央部のControl Softwareまでが実システムに対応する。Control Softwareから左側は仮想システムとなる。また、フレキシブルジョブショップシステムの実仮想融合型システムを構築し、組合せオークション法の実装についても検討した。

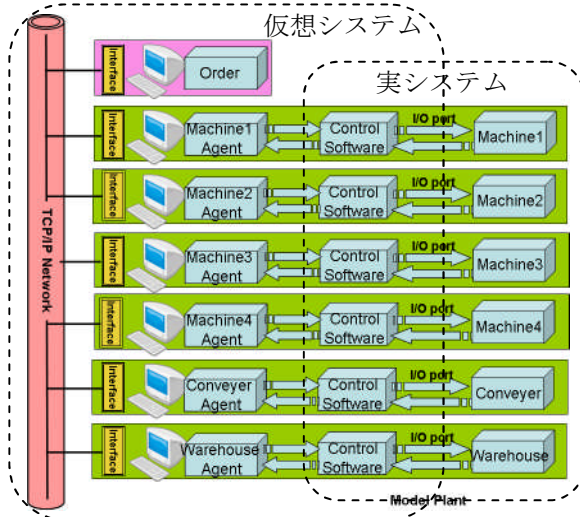


図4 モデルプラントを用いた実仮想融合型生産システムの構成

(2) - ①で述べた双方向オークション法のジョブショップモデルへの実装の試みも実仮想融合型生産システムの構築と考えることができる。これらはダイナミックに変化する生産システムの運用効率を維持しながら全体的持続可能性を確保するための基礎的成果であり、実システムへの実装を前提とする研究が今後の課題である。

(4) サプライチェーンにおける環境負荷を考慮した物流計画

京都議定書の発行以降、温室効果ガス、特にCO₂の削減が重要視されるようになってきている。物流面でもCO₂排出量の少ない輸送キャリアへの切り替えなどのモーダルシフトが進められている。しかし、サプライチェーンの観点からは、輸送リードタイム、納期遅延、在庫コストなどを考慮に入れた適切な輸送キャリアの選択が重要である。従って、環境負荷を考慮した物流計画の立案は、CO₂排出量を削減すると同時に、輸送リードタイムや納期遅延、在庫コストなどの最小化も行う多目的最適化問題として捉えることができる。ここではその定式化を行うとともに、解法について検討した。

グローバル化の進むサプライチェーンとして、海外生産拠点から国内3カ所の需要拠点への国際輸送を想定したモデル（図5参

照）について検討する。国際輸送は空路と海路であり、直接需要拠点に輸送しない場合には国内横持ち輸送が必要となる。横持ち輸送はトラックあるいは鉄道によるものとし、オーダー毎の発送日、輸送ルート、輸送手段などを決定する。



図5 国際輸送の拠点モデル

オーダー数の少ない小規模問題に対しては、目的関数に重み付けを行い一目的の混合整数計画問題として定式化し、市販数理計画ソルバーの適用を試みた。オーダー数30くらいまでであれば時空間ネットワークの考え方に基づく定式化で求解が可能である。ただし、より大規模な問題に対しては最適解を求めることはできなくなるため、本来の多目的最適化を対象として遺伝的アルゴリズムを利用した近似的最適化アルゴリズムを構築した。

様々なデータセットを用いた数値実験の結果より、輸送リードタイムとCO₂排出量間には明確なトレードオフの関係が存在することがわかった。このことより、環境負荷を考慮した物流計画を行う、すなわちCO₂排出量の削減を目指す場合には、輸送リードタイムがある程度は長くなってしまふことを想定される。従って、たとえば、顧客と納期決定を行う際には、余裕のある納期設定を行うことが必要となる。また、この輸送リードタイムは輸送コストとの間でも顕著なトレードオフ関係を示すことも明らかとなった。このことより、輸送コストを下げるためには、輸送リードタイムの許容範囲を長めに設定することが有効であるといえる。

本研究では、海外生産拠点を1か所、国内の需要拠点を3か所として研究を進めたが、今後は拠点数を増やし、工場の生産能力制約や物流センターでの処理能力なども同時に考慮したグローバルサプライチェーンモデルに発展させることが必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 12 件)

- ① 銭毅, 藤井信忠, 貝原俊也, 藤井進, 梅田豊裕, 社会的交渉手法を用いた実仮想融合型生産スケジューリングー組合せオークション手法の適用ー, 計測自動制御学会論文誌, 査読有, 47-11, 2011, 549-556.
- ② 角元謙太, 伊呂原隆, CO2 排出を考慮した国際輸送計画問題の最適化及びそのパラメータ解析, 日本経営工学会論文誌, 査読有, 61-2, 2010, 46-53,
- ③ 銭毅, 藤井信忠, 貝原俊也, 藤井進, 梅田豊裕, 実仮想融合型生産システムにおける仮想システムの動的生成, システム制御情報学会論文誌, 査読有, 24-2, 2010, 31-38.
- ④ 貝原俊也, 藤井進, 三浦克仁, 生産スケジューリング問題に対する組合せオークションを用いた最適化手法に関する一提案, 日本機械学会論文誌(C 編), 査読有, 75-752, 2009, 1143-1150.

[学会発表] (計 63 件) (内国際会議 25 件)

- ① Toshiya Kaihara, Nobutada Fujii, Susumu Fujii, Tatsuya Omori, Masashi Kurahashi, A Proposal of Optimised Scheduling Method with Combinatorial Auction, for Cell Production System, 21st International Conference on Production Research, Stuttgart, Germany, July 31-August 4, 2011.
- ② Takashi Irohara, Yudong Xue, Multi-Objective Optimization for transportation problem incorporating CO2 emission levels, Institute for the Operations Research and Management Science, Austin, TX, USA, November 6-11, 2010.
- ③ Susumu Fujii, Tomomitsu Motohashi, Takashi Irohara, Yuichiro Miyamoto, A Basic Study on the Installation of Distributed Autonomous Production Scheduling System in Ubiquitous Environment, Advances in Production Management Systems 2009, Bordeaux, France, September 21-23, 2009.
- ④ Susumu Fujii, Yusuke Nonogaki, Takashi Irohara, Yuichiro Miyamoto, Tatsuo Inoue, A Study on Autonomous Distributed Operation of FMS for Small Parts Production, 20th

International Conference on Production Research, Shanghai, China, August 2-6, 2009.

- ⑤ Susumu Fujii, Tomomitsu Motohashi, Takashi Irohara, Yuichiro Miyamoto, Satoko Moriguchi, A Study on Job Shop Scheduling Based on Two-Way Auction in Ubiquitous Environment, Advances in Production Management Systems 2008, Espoo, Finland, September 14-17, 2008.
- ⑥ Yusuke Nonogaki, Susumu Fujii, Takashi Irohara, Satoko Moriguchi, Yuichiro Miyamoto, A Study on an Auction-Based Operation for FMS with a Single Automated Vehicle, 2008 International Symposium on Flexible Automation, Atlanta, GA. U.S.A., June 23-26, 2008.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤井 進 (FUJII SUSUMU)
上智大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 00031112

(2) 研究分担者

伊呂原 隆 (IROHARA TAKASHI)
上智大学・理工学部・教授
研究者番号: 60308202
宮本 裕一郎 (MIYAMOTO YUICHIRO)
上智大学・理工学部・准教授
研究者番号: 20323850
荒木 勉 (ARAKI TSUTOMU)
上智大学・経済学部・教授
研究者番号: 20159495

(3) 連携研究者

森口 聡子 (MORIGUCHI SATOKO)
産業技術大学院大学・助教
研究者番号: 60407351
(平成 20 年のみ)