

令和元年6月14日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01240

研究課題名(和文)スマート・ファクトリーを向けた生産ネットワークシステムの最適施策に関する研究

研究課題名(英文)A Study of Optimal Control for Smart Production System

研究代表者

孫 晶(Sun, Jing)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20581010

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、スマート・ファクトリーに向けて、生産ネットワークにおける最適切替と最適配置の意思決定を自指して、生産ネットワークにおける最適施策決定問題をそれぞれ明確化し、モデルの制約条件を整理した。で得られた結果を踏まえ、直列と並列多期間制約サイクルモデルにおいて最適切替のための納期・品質・コストの評価基準の算出方法を提案した。多品種小量や作業員生産能力の相違の生産環境を対象に、作業員の生産能力が3種類存在する工程状況における目標作業時間が一定と可変のそれぞれの場合に対して、期待リスクを効率的に算出するアルゴリズムを提案し、6シナリオの局所最適配置の定理を導くことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義や社会的意義としては、生産システムに関連する異分野にわたる固有な問題を統一化した多期間制約サイクルモデルにおいて、最適施策の統一的な算出方法の提案と、最適施策決定方法の一般化がある。このことにより、ネットワーク型多期間制約サイクルモデルとして表現される納期制約問題、加工時間切り替え問題、移動式組立ライン設計問題、生産座席予約問題、スケジューリングの納期問題、最適保全問題、品質検査問題やサプライチェーン問題などに対しても、有益な知見を提供できると考える。

研究成果の概要(英文)：This research aims to derive optimal switching point and optimal assignment for production network system. Due to the customer needs of reducing cost, delivery date shorting and provide quality, prompt change in the production plan became more important. In this research, first, we discussed a switching model considered the risks of production, due date and quality for a production series line. Then, we presented a switching model for parallel production process, where the risk depends on the previous situation and occurs repeatedly throughout multiple periods. We also proposed optimal assignment model with three special workers in a reset limited-cycle problem with multiple periods and discussed the conditions for the optimal assignment. Finally, we showed the policies of optimal switching and optimal assignment by numerical experiments.

研究分野：社会・安全システム

キーワード：経営工学 生産マネジメント スマート・ファクトリー 多期間制約モデル 最適配置問題 最適切替問題

様式 C - 19, F - 19 - 1, Z - 19, CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

インダストリー4.0やIoTの目指すスマート工場を実現するには、さまざまな分野での技術革新が求められる。そこで、製造の自動化とネットワークの融合技術を用い、工場内の各種生産設備の情報やセンサーデータをクラウドで解析し、リアルタイムで最適な生産管理/品質管理を行うことが注目されている。このような展開において、製造業を中核とするサプライチェーンにおける各種の経営意思決定の迅速化が可能になる一方、それらの求解のための最適化手法と数理モデルの開発も急務になっている。

一方、近年のマニファクチャー業界において、グローバル競争により、サプライチェーン(Supply Chain: SC)全体の効率化と最適化を追求するためには、コスト削減と納期短縮は常に重要な課題である。そこで、顧客のニーズが多変化する市場状況の中、特に、品質の不備、地域環境の変化や自然災害などより、サプライチェーン内での生産拠点や作業工程の切替、生産方式の変更、および品質問題に対する対処などの経営対策を速やかに立案することが重要な課題になっている。

本研究では、サプライヤーにみられる企業や工場の生産ネットワークの最適切替と最適配置の意思決定のための納期・品質・コストの制約数理問題について検討を行う。

2. 研究の目的

本研究では、スマート・ファクトリーに向けて、SCでの納期・品質・コスト制約を考慮した生産ネットワークシステムの数理モデルを提案し、生産ラインの切替や作業員の再配置を行うための意思決定を多目的最適化問題として扱い、求解のためのアルゴリズムを開発することを目的とする。

3. 研究の方法

- (1) 最適切替法則の検討について、1) 生産ネットワークにおける最適施策決定問題をそれぞれ明確化し、モデルの制約条件を分類し、最適切替の問題整理を行う。2) 1)で得られた結果を踏まえ、性能向上の施策下での直列と並列多期間制約サイクルモデルにおいて納期・品質・コストの評価基準の算出方法の検討を行う。3) 2)の結果を用いた最適切替モデルの定式化例を提案し、さらに、数値考察により、最適切替法則について考察を行う。
- (2) 最適配置法則の検討について、1) 最適配置法則を理論的に導き出すため、リセット多期間制約サイクルモデルにおいて、作業者が初心者、熟練者及び一般者のような作業速度が異なる3グループに分けられる場合の最適配置法則の算出方法を提案する。2) 1)の結果を踏まえ、3グループの人数が少ない場合における最適配置問題を考え、ある条件下で最適になる最適配置法則を解析的に導出し、さらに、最適配置法則の条件以外の最適配置法則を見つけるために、数値実験を行う。
- (3) (1)と(2)の結果を利用し与えられた施策の下での最適な施策決定方法の検討や、そして直並列と並直列多期間制約サイクルモデル問題からサプライチェーンマネジメントや信頼性工学の固有問題へのフィードバックを行う。

4. 研究成果

まず、最適な切替問題について、以下の研究成果を得ることができた。

- (1) これまでの研究成果である「直列型納期制約生産システム」を踏まえ、生産ラインやサプライチェーンにおける納期とコストの制約に加えて品質の制約も考慮したモデルの定式化

例を提案し、数値考察により最適な切替の方策を検討した。

- (2) (1)の結果を利用し、施策であると考えられる並列型でのラインの最適切替モデルを提案し、作業員生産能力の相違と変動による生産ラインの最適な切替政策を示した。
- (3) 上記の検討で得られた結果を踏まえ、性能向上の施策下での直列と並列多期間制約サイクルモデルにおいて納期・品質・コストの評価基準の算出方法の検討を行った。(1)と(2)の結果を用いた最適切替モデルの定式化例を提案し、さらに、数値考察により、最適切替法則について考察を行った。

次に、作業員の最適配置問題について、以下の研究成果を得ることができた。

- (1) 作業員の生産能力が3種類ある目標作業時間が一定の場合

まず、直列型生産ラインに対して、多期間制約モデルの下で、各工程に各作業員をどのように配置すれば最も効率的、経済的かという問題（最適配置問題）について、問題の再整理を行った。そして、システムの最小期待リスクをもたらす作業員の最適配置法則の研究を行い、期待リスクを効率的に算出するアルゴリズムを提案した。その後、上記の成果を踏まえて、加工時間が異なる作業員が3種類（3グループ）存在する場合を考え、3グループの人数が1人、2人及び $n-3$ 人（ n は全作業員数である）の場合における最適配置となる条件を解析的に導出し、ある範囲内の配置の中で、最も期待コストが最少である最適配置法則（以下、局所最適配置と呼ぶ）を定理として提案した（表1）。本定理は、作業員の加工時間分布に依存せず、広い範囲で成立する。しかし、局所最適配置が判明したとしても、真の最適配置は不明のために、数値実験により最適配置を求め、その法則について考察した。

- (2) 作業員の生産能力が3種類ある目標作業時間が可変の場合

(1)での研究成果を拡張し、確率順序（Stochastic Order）の概念を適用することにより、各工程の目標作業時間が確率分布に従う場合、最も期待コストが最小である局所最適配置法則に関する定理を提案した。本定理も、作業員の加工時間分布に依存せず、広い範囲で成立する。そして、数値実験により最適配置の法則に関する考察も行った。

表1 提案した定理が適用できる組み合わせ

番号	初心者	一般者	熟練者	遅れる確率の大小関係
	1人(A)	$n-3$ 人(B)	2人(C)	$Q_A > Q_B > Q_C$
	1人(A)	2人(C)	$n-3$ 人(B)	$Q_A > Q_C > Q_B$
	2人(C)	1人(A)	$n-3$ 人(B)	$Q_C > Q_A > Q_B$
	2人(C)	$n-3$ 人(B)	1人(A)	$Q_C > Q_B > Q_A$
	2人(C)	1人(A)	$n-3$ 人(B)	$Q_C > Q_A > Q_B$
	1人(A)	2人(C)	$n-3$ 人(B)	$Q_A > Q_C > Q_B$

さらに、上記で得られた最適切替と最適配置のモデリング手法を利用し、サプライチェーンマネジメントや信頼性工学等の固有問題に対して新見地からの解法の検討を行った。

上記の研究成果を、国内学会において10件また国際会議において16件の研究発表（合計26

件)を行い, 13本の雑誌論文としてまとめた。さらに, 横幹 2018では「スマート・ファクトリーに向けた生産ネットワークシステムの最適施策」の特別セッションをオーガナイズして研究成果を発表した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 13 件)

1. 孫晶, 山本久志, 松井正之, スマート・ファクトリーに向けた生産システムの最適切替に関する研究, アグリバイオ, 招待論文, Vol.2 (13), 58-63, 2018.
2. Jing Sun, Ru Chai and Koichi Nakade, A study of stochastic optimization problem for humanitarian supply chain management, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, Vol.12, No.3, JAMDSM0066, DOI: 10.1299/jamdsm.2018jamdsm0066, 2018.
3. Jing Sun, Yuna Mori and Koichi Nakade, A study of total optimization model for supply balance in electric power market network, Asian J. Management Science and Applications, 査読有, Vol. 3, No. 4, pp. 340-352, DOI: 10.1504/AJMSA.2018.098925, 2018.
4. Taishin Nakamura, Hisashi Yamamoto, and Xiao Xiao, Fast Calculation Methods for Reliability of Connected-(r,s)-out-of-(m,n): F Lattice System in Special Cases, International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences, 査読有, Vol.3, No.2, pp. 113- 122, DOI: 10.33889/IJMEMS.2018. 3. 2-009, 2018.
5. Taishin Nakamura, Hisashi Yamamoto, and Tomoaki Akiba, Fast Algorithm for Optimal Arrangement in Connected-(m-1,n-1)-out-of-(m, n): F Lattice System, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, Vol.E101-A, No.12, pp. 2446-2453, DOI: 10.1587/transfun. E101. A. 2446, 2018.
6. 榎本大地, 肖霄, 高橋奈津美, 山本久志, 信頼度最大ネットワーク構成を用いた効率的ネットワーク設計, 電子情報通信学会論文誌 A, 査読有, Vol. J101-A, No.7, pp. 178-188, https://search.ieice.org/bin/pdf_link.php?category=A&lang=J&year=2018&fname=j101-a_7_178&abst=, 2018.
7. Jing Sun, Hisashi Yamamoto, Masayuki Matsui, A Study of Switching Model Considering the Risks of Production, Quality and Due Date for Limited - Cycle with Multiple Periods, Journal of Contemporary Management. 査読有, Vol. 7 (2), pp. 71-79, 2017.
8. Chihiro Hayashi, Hisashi Yamamoto, Masaaki Ohba and Mitsuyoshi Horikawa, A Study on the Seat Setting of the Production Seat Booking System - For Make-To-Stock Manufacturing Process -, Journal of Japan Industrial Management Association, Japan Industrial Management Association, 査読有, Vol. 68, No. 2E, pp. 139-148, DOI: 10.11221/jima.68.139, 2017.
9. Daichi Tada, Hisashi Yamamoto and Takashi Shinzato, Random matrix approach for primal-dual portfolio optimization problems, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol. 86, 124804, DOI: 10.7566/JPSJ.86.124804, 2017.
10. Xianda Kong, Hisashi Yamamoto, Peiya Song, Jing Sun and Masayuki Matsui, Special workers' assignment optimization under the limited-cycled model with multiple periods, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, Vol.10, No.3, JAMDSM0049, (ア) DOI: 10. 1299/ jamdsm. 2016jamdsm0049, 2016.
11. Xianda Kong, Hisashi Yamamoto, Jing Sun, Masayuki Matsui, Optimal Worker Allocation Considering Operation Skill on Different Task in Limited-Cycle Multiple Periods, Innovation and Supply Chain Management, 査読有, Vol.10, No. 2, pp. 61-67, 2016.
12. 孫晶, 高木ひとみ, 伊藤一馬, 越島一郎, 橋本芳宏, 制御系ネットワークのセキュリティ対策立案のアプローチ, 横幹, 査読有, Vol.10, No.2, pp. 107 ~ 115, DOI: 10.11487/trafst.10.2_107, 2016.
13. 孫晶, 高木ひとみ, 越島一郎, 橋本芳宏, ICS セキュリティ対策の立案手法, 日本設備管理学会誌, 査読有, Vol.28, No.3, pp. 119-125, 2016.

〔学会発表〕(国際会議論文 16 件, 国内学会発表論文 10 件, 計 26 件)

1. 趙曉雯, 山本久志, 孫晶, 目標作業時間が可変の場合における最適配置に関する研究—目標作業時間が連続分布に従う場合—, 日本設備管理学会春季大会, 2019.
2. 孫晶, 松原太地, 中出康一, 電力自由化を考慮した電力マーケティングの多期間需給確率モデル, 日本経営工学会春季大会, 2019.
3. Xiaowen Zhao, Hisashi Yamamoto, Jing Sun, Ryusuke Oooka, Xiao Xiao, Optimal Assignment with Three Special Workers in a Reset Limited-Cycle Problem with Multiple Periods, Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Management, CD-ROM, 2018 (審査有).
4. Jing Sun, Mashaki Koike and Koichi Nakade, A Stochastic Programming Model for Total Optimization of Electricity Market Considering Renewable Energy, Proceedings of the Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference, CD-ROM, 2018 (審査有).
5. Xiaowen Zhao, Hisashi Yamamoto and Jing Sun, Optimal Assignment of Three Special Workers in Reset Limited-cycle Multiple Periods with Variable Target Processing Time, Proceedings of the Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference, CD-ROM, 2018 (審査有).
6. Kazuo Kihara, Hisashi Yamamoto, Research of computer system quality transition process based on quality sense values by system engineers, Proceedings of Proceedings of the Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference, CD-ROM, 2018 (審査有).
7. Xuan Sun, Hisashi Yamamoto, Koji Shingyochi, Optimization Design of Network System Using Simulated Annealing, Proceedings of Proceedings of the Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference, CD-ROM, 2018 (審査有).
8. Natsumi Takahashi, Tomoaki Akiba, Hisashi Yamamoto, Shao-Chin Sung, Xiao Xiao, Search Reduction by Standard Tree for Optimal Paths in Multi-Objective Network, Proceedings of 2018 Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling, and 2018 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering, CD-ROM, 2018 (審査有).
9. 孫晶, 山本久志, 松井正之, 生産ネットワークシステムにおける最適切替に関する研究, 第9回横幹連合コンファレンス, 2018.
10. 孫晶, 小池匡輝, 中出康一, 再生可能エネルギーを考慮した電力市場の長期的な需給確率モデル, 日本経営工学会春季大会, 2018.
11. 趙曉雯, 山本久志, 孫晶, 肖霄, 大岡龍佑, 3 グループの作業者が存在するリセット多期間制約サイクルモデルにおける最適配置法則に関する研究 - 熟練者を注目した最適配置法則の考察 -, 日本経営工学会春季大会, 2018.
12. 張金鈺, 山本久志, 孫晶, 作業者の各工程に対する処理能力の差異に注目した最適配置に関する研究 - リセット多期間制約サイクルモデルの場合 - 日本経営工学会秋季大会, 2018.
13. 趙曉雯, 山本久志, 孫晶, 生産ネットワークシステムにおける最適配置に関する研究 納期が変化の場合 - 日本経営工学会秋季大会, 2018.
14. 趙曉雯, 山本久志, 孫晶, 生産ネットワークシステムにおける最適配置に関する研究 - 作業者の生産能力が3種類ある場合 -, 第9回横幹連合コンファレンス, 2018.
15. Jing Sun, Yuna Mori and Koichi Nakad, A Total Optimization Model for Supply Balance of Electric Power Market Network, Asian Conference of Management Science & Applications, CD-ROM, 2017 (審査有).
16. Ru Chai, Koichi Nakade, Jing Sun, A Two-Stage Stochastic Model for Stock and Delivery Planning in Disaster management, International Symposium Scheduling, CD-ROM, 2017 (審査有).
17. Natsumi. Takahashi, Tomoaki. Akiba, Hisashi. Yamamoto, Xiao. Xiao, Efficiency of Reducing Search Space by Standard Paths in Mull-Objective Network, The 10th International Conference on Mathematical Methods in Reliability, USB, 2017 (審査有).
18. Chihiro Hayashi, Hisashi Yamamoto, Masaaki Ohba, Yukio Maruyama, Yoshiki Nakamura, A Study on the Seat Setting of the Production Seat Booking System for the Make-To-Stock Manufacturing Process In case of the Fixed Lot Size Production, The 18th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference, CD-ROM, 2017 (審査有).

19. 大岡龍佑, 孫晶, 肖霄, 山本久志, 3 グループが存在するリセット多期間制約サイクルモデルにおける最適配置法則に関する研究 - 2 グループの人数が少ない場合 -, 日本経営工学会春季大会, 2017.
20. 趙 曉雯, 大岡龍佑, 孫晶, 肖霄, 山本久志, 3 グループの作業者が存在するリセット多期間制約サイクルモデルにおける最適配置法則に関する研究 - 2 グループの人数が少ない場合 (第二報) -, 日本経営工学会秋季大会, 2017.
21. Jing Sun, Hisashi Yamamoto and Masayuki Matsui, A Switching Problem for Smart Factory Considered Production, Due Date and Quality, CIE46 Proceedings, USB, 2016 (審査有).
22. Jing Sun, Hisashi Yamamoto and Masayuki Matsui, An Optimal Switching Model Considered the Risks of Production, Quality and Due Data for Limited-Cycle with Multiple Periods, Proceedings of the Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference, USB, 2016 (審査有).
23. Jing Sun, Hitomi Takagi, Kazuma Ito, Hiroki Moritani, Takashi Hamaguchi, Ichiro Koshijima, Yoshihiro Hashimoto, Design Approach of ICS Security Systems, The 7th International Symposium on Design , Operation and Control of Chemical Processes, USB, 2016 (審査有).
24. Jing Sun, Masahiro Arakawa, Ichiro Koshijima, Yoshihiro Hashimoto, Design of Educational Program for Management of Market, Procurement, and Production —Case Study of Educational Program for Supply and Demand Management in University—, Proceedings of the Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference, CD-ROM, 2016 (審査有).
25. Daichi Enomoto, Xiao Xiao, Natsumi Takahashi, Hisashi Yamamoto, Experimental Simulation Study of Optimization Algorithm for Network System Design, the proceeding of 6th International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering, CD-ROM, 2016 (審査有).
26. Natsumi. Takahashi, Tomoaki. Akiba, Hisashi. Yamamoto, Xiao. Xiao and Koji. Shingyochi, Proposal for Obtaining Method of Pareto Solutions in A Multi-objective Network, the proceeding of 7th Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling, CD-ROM, 2016 (審査有).

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：山本 久志

ローマ字氏名：YAMAMOTO HISASHI

所属研究機関名：首都大学東京

部局名：システムデザイン研究科

職名：教授

研究者番号 (8 桁) : 60231677

科研費による研究は,研究者の自覚と責任において実施するものです.そのため,研究の実施や研究成果の公表等については,国の要請等に基づくものではなく,その研究成果に関する見解や責任は,研究者個人に帰属されます.