

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350442

研究課題名(和文) ベイジアンネットを応用した作業者スキル適応型動的ロバスト混成生産システムの開発

研究課題名(英文) Dynamic Robust Mixed Production Planning using Bayesian Network for Worker Skill Management

研究代表者

片岡 隆之 (KATAOKA, Takayuki)

近畿大学・工学部・准教授

研究者番号：40411649

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：近年、経営工学分野である科学的・工学的アプローチや管理技術ノウハウが再注目されている。しかしながら、国内産業を支える製造分野における熟練技術者による管理技術ノウハウに関するモデリング研究は、具体的事例が散見される程度でしかない。そこで本研究では、近年、確率推論の一つとして注目を浴びているベイジアンネット推論技術を応用することにより、作業現場におけるジェロントロジー(高齢化問題)を含む多様な作業者層に対し、不確実な需要変動に対するロバスト性を評価しつつ、ライン/セル混成の機動的な対応が可能な作業者スキル適応型動的ロバスト混成生産モデルを提案した。

研究成果の概要(英文)：Recently, not only the skill management but also the management of technology knowhow are focused on the manufacturing industry. However, the modelling researches regarding the management of technology have not been found out enough yet. This paper aims to propose a new mixed integer programming model to solve simultaneously 2-type cell production systems; line and cell by a reconfigurable labour-intensive manufacturing. Almost all manufacturing sites have the traditional assembly lines separately where one or several operators carry out parts/all of the operations in a cell. On the other hand, some advanced manufacturing sites have adopted both of them in order to absorb variability of demand and operators under the environment of limited multi-skilled operators. Therefore, this paper tackled to propose an operator assignment model in reconfigurable labour-intensive manufacturing cells.

研究分野：複合新領域

キーワード：経営工学

### 1. 研究開始当初の背景

近年、経営工学分野である科学的・工学的アプローチや管理技術ノウハウが再注目されている。特に、工学的視点から見ると、知識工学や画像工学分野において、膨大なデータから熟練者の暗黙知を計量的手法で解析する危機管理モデリングや、熟練技能者の動作スキルを画像処理技術によって分析・抽出する方法等、3D画像を駆使した“技能系”での伝承システムに関する論文が数多く発表されているものの、生産工学分野における“管理技術”においては、不確実性推論によるオペレーターの意図推論手法や生産スケジュールの評価手法等に関する論文が散見される程度でしかなく、人間系スキルの管理技術研究は喫緊の課題であるといえる。

以上を踏まえ、研究代表者は平成17年度より、管理技術支援ツールの開発と管理技術伝承を目的とした操作履歴によるスキル抽出の研究を開始した。その研究課題は以下の4つに大別される。

- (1) 個別事例に対応した管理技術支援ツールの開発
- (2) 熟練技術者の操作履歴に基づくスキルの抽出とモデリング
- (3) 操作者適応型生産システムの管理方式の解明
- (4) 作業員スキル適応型動的ロバスト混成生産システムの応用

研究代表者は、まず研究課題(1)として、平成18年度に(社)日本経営工学会経営工学実践賞を受賞したマツダ(株)と広島大学との共同研究の中で、対話型レイアウト決定支援ツールに基づくサポートにより、教育期間の大幅な短縮を実現させる一方、現場レベルでの日程計画操作に熟練管理技術が不可欠と再確認した。

そこで研究課題(2)について、平成18年度からの2年間に科学研究費補助金の助成を受け、活動基準原価計算(ABC)手法を応用したスキル対応型人材派遣要員計画スケジュールを開発した。これは、派遣人材のスキルを考慮した要員計画を検討しつつ、同時にABC手法に基づく付加価値活動コストも抽出可能な支援ツールであり、操作者を支援するため、各指標から要員計画策定状態に合わせ、次にどの操作をしたら良いか(例: 負荷が偏っている)を表示するステータスバー機能を作成し、その有効性を得た。

さらに研究課題(3)として、平成23年度からの3年間に科学研究費補助金の助成を受け、推論技術として近年の各学会誌で注目を浴びているベイジアンネットワーク技術を適用し、生産システムにおける日程計画スキルの習熟度を定量的に評価する手法の研究に取り組み、学会誌/国際学会において高い評価を得た。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、さらに1.の研究課題(4)の解決に向けた次の課題に取り組むことにした。

#### (1) ライン/セル混成計画のためのモデル構築とシミュレーション

まず、本研究対象である混成生産システムを定義するため、ライン/セル混成計画のためのモデル選定を検討する。具体的には、先行研究の中から、ラインとセルの両方を考慮可能な数理モデルや、スキルを考慮した作業員の割当モデルを探索し、そこから新たなライン/セル混成モデルの定義を試みる。さらに本研究では、多期間に渡って作業員スキル変動も考慮可能な動的ライン/セル混成生産システムのロバスト性を評価するモデルの構築を試みる。

#### (2) ベイジアンネットワーク技術と生産システムのロバスト要因分析

本研究対象であるライン/セル混成計画を検討する前に、ライン生産方式における不確実環境下でのロバスト性について、ベイズ推定を用いた新たな評価手法を検討する。例えば既に、現状の生産計画に対し、モンテカルロシミュレーションとベイズ推定による確率分布を適用することにより、変動し易い要素作業を見つけ、それらを包括的に分析する方法を提案している。本研究ではさらに、(1)で検討された数理モデルに基づき、各種基本パラメータ(例: 作業員数、総作業時間、実行時間、作業係数など)や機会制約理論(CCT)に基づく危険率などを要素とするベイジアンネットワーク分析の検討を試みる。

### 3. 研究の方法

本研究では、管理技術として汎用性の高い以下の2つ( )の日程計画法を対象とし、以下のステップ(S1~S4)で、作業員スキルに適応した動的ロバスト管理方式による生産システムを開発する。

多段の合流・分岐工程あるいは複合工程をなす仕事群の日程計画を行うライン/セル混成手法

多段の連続工程をなす仕事群の日程計画を行う動的ロバスト管理手法

S1: ライン/セル混成計画のためのモデル選定( )

S2: ライン/セル混成計画のためのモデル構築( )

S3: ベイジアンネットワーク技術と生産システムのロバスト要因分析( )

S4: ライン/セル混成管理方式への展開( )

### 4. 研究成果

3.におけるステップ(S1~S4)ごとの成果を以下に示す。

S1: ライン/セル混成計画のためのモデル選定( )

本研究対象であるライン/セル混成計画のためのモデル選定を検討した．具体的には，Kakuらによる「ラインセル転換問題」と，Süerらによる「スキル基準作業員割当問題(3段階層法)」を融合した，新たな「多期間ライン/セル混成問題」を定義した(図1)．Kakuらのモデルは，ライン生産を完全セル生産，あるいはセル生産+短縮ライン生産に転換するための数理モデルであり，また Süerらのモデルは，作業員の標準スキルに対し，学習/忘却率を考慮しながら多期間に渡って3段階の最適化問題を階層的に解く数理モデルである．本研究では，多期間に渡って作業員スキル変動も考慮可能な動的ライン/セル混成生産システムのロバスト性評価を目的とした．

Organizations	Objects	Approaches	Cell Types	Factors
Manufacturing Cells	Machine-intensive cells (western CM)	Reconfigurable Manufacturing System(RMS)	Machining Cell	More rapid modifications Less cellular movements (i.e. lower cost)
	The large volume production of a narrow variety of products	Cell Formation Problems(CFP)	Assembly Cell (i) Divided cells (Conveyor/Beltless)	The total number of cellular movements (i.e. lower cost)
	Labour-intensive cells	Operator Assignment Problems(OAP) Line-Cell Conversion Problems(LCCP)	(a)Paced assembly (ii) Rotating cells (iii) One-man cells (Sern)	Operator assignment Skill levels up Cross-training Movement of operators

図1. ライン/セル混成モデルの体系図

S2: ライン/セル混成計画のためのモデル構築( )

本研究対象であるライン/セル混成計画のためのモデルを新たに構築した．具体的には，Süerらによる「スキル基準作業員割当問題(2段階層法)」を統合した，発展型「多期間ライン/セル混成問題」を定義した．Süerらのモデルは，多段階の混合整数計画問題を解くアプローチを適用しているため，以下の2つの弱点を持っていた：(1)セルにおける要員構成の選択肢が限定される，(2)製品ごとのセル配置人数を変更できない．本研究では，新たな決定変数を導入することにより，これらの弱点を克服できる「統合型混合整数計画問題」を提案し，数値実験により従来法と比較することで，より良い解を導くことを明らかにした(図2)．その結果は，本分野で著名な国際学会に採択・発表された．

Original	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
2-phase	35	36	37	34	35	38	33	33	36	37	33	35	37	33	36	36
Global	35	36	37	34	35	38	33	33	36	37	33	35	37	33	36	36
5%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
2-phase	34	35	36	33	33	37	32	31	34	36	32	34	36	32	34	35
Global	34	35	36	33	33	37	32	31	34	36	32	34	36	32	34	35
10%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
2-phase	33	33	33	31	32	35	31	30	33	34	31	33	34	31	33	33
Global	33	33	33	31	32	35	31	30	33	34	31	33	34	31	33	33
15%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
2-phase	31	32	33	30	31	33	30	30	31	33	30	31	33	30	31	32
Global	31	32	33	30	31	33	30	30	31	33	30	31	33	30	31	32
20%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
2-phase	30	31	31	30	30	32	30	30	30	31	30	30	31	30	30	31
Global	30	31	31	30	30	32	30	30	30	31	30	30	31	30	30	31

図2. 2段階層法と提案モデルの結果比較

S3: ペイジアンネットワーク技術と生産システムのロバスト要因分析( )

本研究対象であるライン/セル混成計画を検討する前に，ライン生産方式における不確実環境下でのロバスト性について，ペイジアンネットワークを用いて分析するため，困難作業・変動係数・作業係数をパラメータ，労働者数・総作業時間・実行時間を解とすることで，どのパラメータがどの解にどれほどの影響を与えるかについて，数理計画法に基づくシミュレーション実験を行った(図3)．

その結果，(1)困難作業パラメータは全ての解に影響を与えない，(2)作業係数パラメータは全ての解に大きな影響を与える，ことが判明した．これにより，一部作業の習熟度を高めることにより，作業係数を正規に近づける必要があることが分かった．

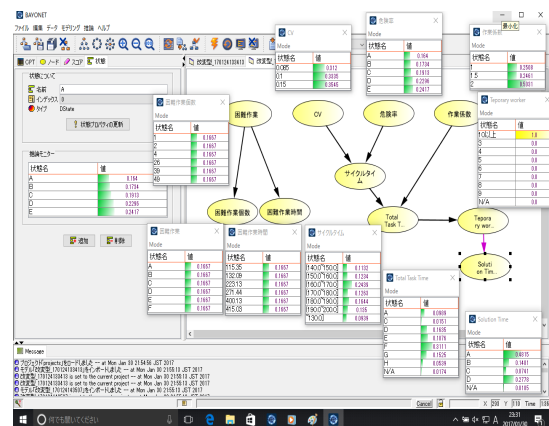


図3. ペイジアンネットワーク分析結果例

S4: ライン/セル混成管理方式への展開( )

Süerらは，Beltlessライン生産方式の労働集約型セル(Cellular Manufacturing，以下CM)におけるオペレーター数を最小化するためのモデルを提案し，その有効性を示している．また Kakuらは，労働集約型のライン生産をセル生産(Cell Production System，以下CPS)へと転換するモデルを提案し，その有効性を示している．さらに先進的企业では，それらを融合した柔軟性の高いライン設計を試みている．そこで本研究では，CMとCPSを同時に再編成可能な労働集約型セルにおける混合整数計画モデルに対し，アプローチ手法やパラメータ設定を変更することにより，包括的な有用性について考察した．

まず，利用可能時間( $h$ )の単調変動に対する提案モデルの有効性を検証するため，[1500, 2500]の範囲で100刻みの需要量を設定し，シミュレーション実験を実施した．実験の結果，CPSの割合が増えるほど，オペレーター総数が少なくなった(表1)．これにより，一般的な傾向として，再編成可能なモデルは，より単調変動において柔軟な設計法と考えられる．また，CM:2+CPS:2の構成では， $h=2000$ および $h=2100$ の間に大きなギャップが存在する．これはCMとCPSで編成案の構成上限まできていることを意味してい

る。

次に、需要のばらつきに対する提案モデルの有効性を検証するため、[2500, 3500, 4500]の各平均と[50, 350, 700, 1050]の各標準偏差を持つ正規分布を設定し、シミュレーション実験を実施した。なお利用可能時間(h)は1800に固定する。実験の結果、CPSの割合が増えるほど、オペレーター総数が少なくなった(表2)。これにより、一般的な傾向として、再編成可能なモデルは、需要のばらつきにおいても柔軟な設計法と考えられる。また、CM:4の構成とCM:2+CPS:2の構成を比較すると、標準偏差が小さい場合、CPS1とCPS2の総数がCM2より少なくなっていることから、CPSによって、需要とオペレーターのばらつきを吸収している可能性が推測される。

これらの結果は、国際学会に採択・発表された。今後は、スマート工場を想定したロボットセルにおける大規模問題や自動再編成案を決定可能なモデルの構築を進める必要がある。

表1. 利用可能時間(h)の変動実験結果

Traditional	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500
CM1	19	19	18	19	18	18	18	19	19	19	19
CM2	19	18	16	18	15	15	13	19	18	16	15
CM3	18	15	15	10	12	10	10				
CM4											
Operators	56	52	49	47	45	43	41	38	37	35	34
Av.Op.time	1489	1572	1696	1738	1859	1925	2061	2187	2209	2378	2436
CM1	19	19	19	19	19	19	19	19	18	18	19
CM2	18	18	19	18	18	18	18	10	15	16	10
CM3	18	15									
CPS1			10	8	6	4	2	9	3		5
Operators	55	52	48	45	43	41	39	37	36	35	33
Av.Op.time	1489	1572	1678	1771	1842	1917	2011	2196	2212	2378	2491
CM1	18	19	18	19	19	19	19	18	18	18	18
CM2	15	18	15	18	18						
CPS1	10	10	10	8	6			10	10	10	10
CPS2	10	3	4					8	6	5	4
Operators	53	50	47	45	43	41	38	36	34	33	32
Av.Op.time	1487	1569	1687	1771	1842	1917	2031	2146	2292	2334	2364
CM1	19	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
CPS1	実行	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
CPS2	不可能	10	10	10	10	10	10	8	6	5	4
CPS3	10	8	5	3	1						
Operators	0	49	46	43	41	39	38	36	34	33	32
Av.Op.time	1579	1666	1793	1860	1896	2031	2146	2292	2334	2364	
CPS1				10	10	10	10	10	10	10	10
CPS2				10	10	10	10	10	10	10	10
CPS3				10	10	10	10	10	10	10	10
CPS4				10	8	6	5	3	2	1	
Operators	0	0	0	0	40	38	36	35	33	32	31
Av.Op.time					1886	1983	2094	2123	2263	2231	1988

表2. 需要のばらつきに対する実験結果

	2500				3500				4500			
Traditional	50	350	700	1050	50	350	700	1050	50	350	700	1050
CM1	18	18	18	19	18	18	19	19	19	18	19	18
CM2	16	16	16	16	18	18	18	18	18	18	18	18
CM3					10	10	10	10	12	15	12	15
CM4					10	10	10	10	10	10	11	10
Operators	33	34	34	35	46	46	47	47	59	61	60	61
Av.Op.time	1774	1769	1779	1754	1772	1800	1739	1758	1794	1737	1787	1764
CM1	18	18	18	18	19	19	19	19	19	19	19	19
CM2	15	16	16	15	18	18	18	18	19	18	18	18
CM3					18	15	15	15	18	15	15	15
CPS1				1	7	8	8	8	2	7	6	7
Operators	33	34	34	34	44	45	45	45	58	59	58	59
Av.Op.time	1774	1769	1779	1693	1798	1755	1775	1794	1702	1748	1785	1777
CM1	18	18	18	18	19	19	19	19	19	19	19	19
CM2					18	18	18	18	18	18	18	19
CPS1	10	10	10	10	7	8	8	8	10	10	10	10
CPS2	4	4	5		9	10	10	10	9	10	10	10
Operators	31	32	32	33	44	45	45	45	56	57	57	58
Av.Op.time	1781	1733	1784	1701	1798	1755	1775	1794	1782	1789	1779	1791
CM1	18	18	18	18	18	18	18	18				
CPS1	10	10	10	10	10	10	10	10	実行不可能			
CPS2	10	4	4	5	10	10	10	10	実行不可能			
CPS3	10				5	5	6	6	実行不可能			
Operators	30	32	32	33	43	43	44	44	0	0	0	0
Av.Op.time	1783	1733	1784	1701	1735	1775	1727	1750	実行不可能			
CPS1	10	10	10	10					実行不可能			
CPS2	10	10	10	10					実行不可能			
CPS3	10	10	10	10					実行不可能			
CPS4	1	1	2						実行不可能			
Operators	30	31	31	32	0	0	0	0	0	0	0	0
Av.Op.time	1783	1539	1638	1582	実行不可能			実行不可能				

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9件)

Takayuki Kataoka, Katsumi Morikawa, and Katsuhiko Takahashi, "A Multi-Objective Optimization Model to Minimize Temporary Workers Considering the Difficulty of Tasks and the Variety of Cycle Time", Asia-Pacific Journal of Industrial Management, In printing, (2017),(査読有).

Takayuki Kataoka, Katsumi Morikawa, and Katsuhiko Takahashi, "Line-Cell Conversion Model Considering Continuous Mixed Flow System and Set-up Time in Each Product", Official Journal of The Japan Society of Logistics Systems, Vol.16, No1, In printing, (2017),(査読有).

片岡 隆之, 森川克己, 高橋勝彦, "製品寿命を考慮した倉庫容量制約付き多品目発注計画の一解法(再録)", 近畿大学次世代基盤技術研究所報告, Vol.7, pp.107-115, (2016),(査読無).

Takayuki Kataoka, Katsumi Morikawa, and Katsuhiko Takahashi, "An operator assignment model in reconfigurable labour-intensive manufacturing cells", Proc. of the Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference 2016, December 7-10, 2016, Taipei, Taiwan, pp.62-69, (2016),(査読有).

Takayuki Kataoka, Katsumi Morikawa, and Katsuhiko Takahashi, "A multi-objective optimization model to minimize temporary workers considering the difficult of tasks", Proc. of the International Conference on Industrial Management, September 21-23, 2016, Hiroshima, Japan, pp.366-373, (2016),(査読有).

Takayuki Kataoka, Stefan Minner, "A mixed integer programming model to minimize the number of operators in labour-intensive manufacturing cells", Proc. of 19th International Working Seminar on Production Economics, February 22-26, 2016, Innsbruck, Austria, pp.233-243,(2016),(査読有).

Takayuki Kataoka, Katsumi Morikawa, and Katsuhiko Takahashi, "Advanced

Management Issues for Productivity Improvement of the Logistics Industry", Official Journal of The Japan Society of Logistics Systems, Vol.15, No1, pp.147-154, (2016),(査読有).

Takayuki Kataoka, Katsumi Morikawa, and Katsuhiko Takahashi, "A comprehensive analysis to achieve sustainable production planning in uncertain environments", International Journal of Japan Association for Management Systems, Vol.7, No.1, pp.25-30, (2015),(査読有).

Takayuki Kataoka, Katsumi Morikawa, and Katsuhiko Takahashi, "Heuristics method for multi-product dynamic demand lot-sizing with limited product life and warehouse capacity", Official Journal of The Japan Society of Logistics Systems, Vol.14, No1, pp5-13, (2014),(査読有).

〔学会発表〕(計6件)

橋爪琢馬, 片岡隆之, 再編成可能な労働集約型セルにおけるオペレーター総数最小化モデル, 日本経営工学会中国四国支部, 第43回学生論文発表会予稿集, pp.23-24, 2017年3月4日, 県立広島大学(広島県広島市)

片岡隆之, 高山智行, 谷崎隆士, おもてなし経営企業選のビジネス事例に基づく地域・業種別定量分析, 日本経営システム学会第57回全国研究発表大会予稿集, 2016年10月16日, pp.232-235, 札幌大学(北海道札幌市)

片岡隆之, 森川克己, 高橋勝彦, 固定作業と作業スキルを考慮した臨時要員数最小化問題, 日本ロジスティクスシステム学会平成28年度第19回全国大会予稿集, pp.73-76, 2016年6月5日, 県立広島大学(広島県広島市)

片岡隆之, ドイツの現地大学における実学教育と自動車分野研究事例紹介, 日本ロジスティクスシステム学会中国四国支部2015年度第3回研究会, 発表資料pp.1-15, 2015年12月19日, 県立広島大学(広島県広島市)

片岡隆之, ドイツにおける現地大学の実学教育システム及び産学連携の実態と研究事例, 日本経営工学会中国四国支部平成27年度第1回勉強会資料, pp.1-5, 2015年11月13日, マツダ株式会社(広島県安芸郡)

片岡隆之, 森川克己, 高橋勝彦, 品種別寿命を考慮した倉庫容量制約付き多品目発注計画, 日本ロジスティクスシステム学会平成26年度第17回全国大会予稿集, pp.11-14, 2014年5月10日, 早稲田大学(東京都新宿区)

〔その他〕

研究成果データベース

<http://researchmap.jp/read0088569>

大学ホームページ

<http://www.kindai.ac.jp/meikan/451-kataoka-takayuki.html>

研究室ホームページ

<https://www9.atwiki.jp/kataoka/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

片岡 隆之 (KATAOKA, Takayuki)

近畿大学・工学部・准教授

研究者番号: 40411649

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

高橋 勝彦 (TAKAHASHI, Katsuhiko)

広島大学・工学研究院・教授

研究者番号: 00187999

森川 克己 (MORIKAWA, Katsumi)

広島大学・工学研究院・准教授

研究者番号: 10200396