

令和 2 年 4 月 23 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01279

研究課題名(和文)人間とロボットの共創作業を考慮したベイズ学習機能付動的ラインセル混成生産システム

研究課題名(英文) A dynamic mixed integer programming model to solve line and cell production systems by reconfigurable manufacturing cells with both robots and workers

研究代表者

片岡 隆之 (KATAOKA, Takayuki)

近畿大学・工学部・教授

研究者番号：40411649

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：経営工学分野の管理技術系アプローチが再注目される中、ロボット工学分野では、3D画像と人工知能(AI)を駆使した“技能系”自律学習型ロボットに関する研究が中心となっており、“管理技術系”での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ある。本研究では、近未来の作業現場で主流となる人間とロボットの共創作業(協働生産ライン問題)を含む複雑な作業編成に対し、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人間とロボットの共創作業を考慮したベイズ学習機能付動的ラインセル混成生産システムを確立し、近未来中小企業の管理技術力維持向上を目指す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人が並ぶ生産ラインに入り込める自律型小型ロボットの登場により、従来の生産ラインがパラダイムシフトを迎える中、生産方式の視点から人間とロボットの共創作業に内在する共創パラメータを設定/分類することは、論文として事例が見当たらず、極めて独創的である。また、それに起因するラインセル混成生産方式を標準モデル化し、ロバスト性を向上させるアプローチは、学術的な特色を持つといえる。さらに自律型ロボットを想定した生産システムは、ロボット価格の低下に合わせ、そのニーズが指数関数的に増加すると予想される。財務体質の弱い中小企業へ本システムを導入することで、製造現場の管理技術力維持向上への貢献が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Recently, the management of technology know-how is focused on the manufacturing industry again. However, the modelling researches regarding the management of technology have not been found out enough yet. More and more complex operations including cooperative production problems with both robots and workers will be needed in the future. With evaluating robustness of uncertain demand, a new dynamic mixed integer programming model to solve simultaneously 2-type cell production systems (e.g. line and cell) by reconfigurable manufacturing cells with both robots and workers is proposed in this research. Finally, the management of technology for SMEs will be tackled in the future.

研究分野：複合領域

キーワード：経営工学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ものづくりにおける技能技術伝承と人材育成の必要性は、“ものづくり経営”の視点から、今後益々高まるものと提言されており、組織論的な論文が多数発表されている。一方、“工学的”視点から見ると、ロボット工学分野において、3D 画像と人工知能(AI)を駆使した“技能系”での自律学習型ロボット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“管理技術系”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ある。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) 操作者適応型生産システムの管理方式の解明
- (3) 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
- (4) 人とロボットの共創作業を考慮したベイズ学習機能付動的ラインセル混成生産システムの開発

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論文の中で、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)として、平成 23 年度からの 3 年間に科学研究費の助成を受け、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。

さらに研究課題(3)として、平成 26 年度からの 3 年間に科学研究費の助成を受け、ベイジアンネットワーク構築支援ソフトによる条件付確率の変動対応に向けた可変型ライン/セル混成計画の検知・調整方式のための混合整数計画モデルを確立するとともに、その応用モデルが、国際学会において表彰された。

2. 研究の目的

そこで本研究では、さらに 1. の研究課題(2),(3)を発展させた研究課題(4)の解決に取り組む。人間とロボットの共創作業に内在する共創パラメータの確立とその抽出法

装置産業的な大型機械ロボットに加え、近年では人が並ぶ生産ラインに入り込める自律可動型小型ロボットが登場し、生産ラインは変種変量生産に向けて大きく変貌しつつある。本研究では、ベイズ学習機能による条件付確率変動に向けた人間とロボットの共創作業に内在する各パラメータの設定/分類及びその抽出法を明らかにする。

ベイズ学習を応用可能な可変型動的ラインセル混成生産管理方式の確立

で抽出された各共創パラメータを対話型生産システムにビルトインすることにより、ベイズ学習が応用可能なライン/セル混成計画のための新たな検知・調整方式を確立するとともに、そのモデル化を試みる。

3. 研究の方法

本研究では、以下の 2 つ()のアプローチをコアとし、以下のステップ(S1~S4)により研究を遂行する。

人間とロボットの共創作業に内在する共創パラメータの確立とその抽出法

ベイズ学習を応用可能な可変型動的ラインセル混成生産管理方式の確立

S1: 各種管理方式における共創パラメータの設定/分類()

S2: 共創パラメータの対話型生産システムへのビルトインとベイズ学習モデルの確立()

S3: ラインセル混成計画のための新たな検知・調整方式の確立とモデル化()

S4: ロボットを含む動的なラインセル混成管理方式の確立()

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: 各種管理方式における共創パラメータの設定/分類()

本研究が想定する小型ロボットは、人間が並ぶ生産ラインに入り込み、人間との多期間に渡る共創作業を通じて学習し習熟するほか、人間と人間との作業とは異なるパラメータが人間とロボットの共創作業時に発生することが過去のヒアリング調査から判明している。そこで、国内の経営工学分野の諸学会において、各種管理方式における人間とロボットが共創するフィールドを調査研究することにより、数理モデル化に必要な共創パラメータの設定/分類及びその抽出法の選定を試みた。サービスロボット導入に関する考察として、RPA における SOS と SDS の分類方法が、共創作業の学習分類に大きな参考となるほか、特に従来モデルは人間が決めたアルゴリズム(知識)で入力を加工し出力する一方、機械学習は学習データから入力に近いデータを選び統計的に判断したものを出力しており、特徴量(説明変数)の分類に注力が必要と判明した。そこで

被験者とロボットを協働作業させる前(平常時)と被験者とロボットを協働作業させた後(実験後)に、質問紙法 POMS による感情の測定を行い、人間側がロボットとの協働作業中に感じるストレス及び感情の変化について測定した。その結果を T 得点として算出し、その T 得点に t 検定を実施することにより、統計的にそれぞれの有意性を確認した。その 6 つの気分尺度を有意確率 5% の両側検定で検証した結果、「抑うつ-落込み」と「疲労」は強い有意性、「緊張」と「怒り」は弱い有意性、「混乱」は有意傾向がそれぞれあり、「活気」については有意傾向がなかった(0.1%以上)。ただし、統計学的に有意差は認められなかったが、ロボットとの協働作業時には「混乱」の得点が減少し、「活気」の得点が向上していた。

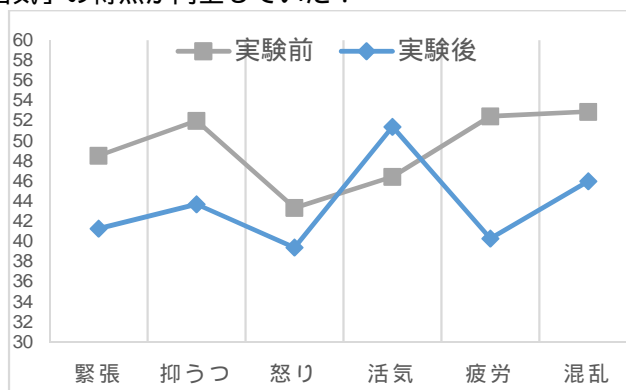


図 1. POMS による気分尺度測定の結果

S2: 共創パラメータの対話型生産システムへのビルトインとベイズ学習モデルの確立()

パラメータ設定/分類に向けた実験的ベイズ学習モデルによる検証では、正解率(目的変数の推論結果と検証データを照合し正解したデータの割合)、適合率(推論により対象状態と予測されたデータのうち検証データと一致したデータの割合)、再現率(検証データで対象状態であるデータのうち推定値と一致したデータの割合)、F-Measure(適合率と再現率の調和平均)の 4 指標を利用した。その結果、モデルデータにおける代替推定法では、正解率 96.3%と良い結果を得られたが、ホールドアウト検証法では、正解率 67.21%まで低下した。ホールドアウト検証法は、学習に使用したデータとは別のデータを使用して検証することから、実験モデルでは未知(学習に使用していない)データに対する予測精度が良くないことが分かった。そこで、本研究では、k-分割交差検証法を適用することとした。その結果、モデルデータにおいては、代替推定法やホールドアウト検証法ではなく、k-分割交差検証法が良い値を示した。この手法を用いることで、見かけ上、元データの k-1 倍のデータ数で学習したことになり、少ないデータ数であってもより良い精度のモデルを構築することができる。

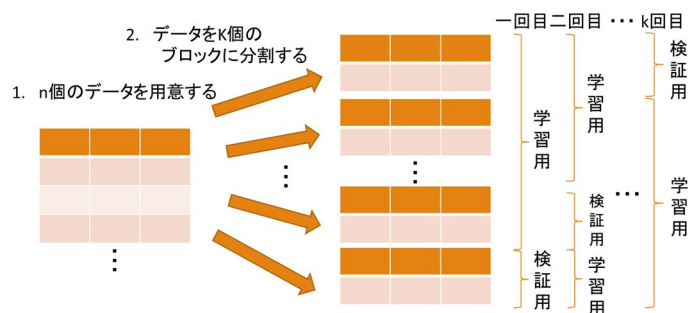


図 2. k-分割交差検証法の適用イメージ

S3: ラインセル混成計画のための新たな検知・調整方式の確立とモデル化()

ラインセル混成計画モデルの多期間シミュレーションにおける利用可能時間変動(1500~2500) × 需要変動(±2~20%) × 可変セル(6 パターン)の違いについて、目的別に分けて考察した。さらに、収集したデータを基に確率的考察を行うことにより、可変セルの有効性を検証するとともに、新たな検知・調整方式について検討した。検証の結果、この可変セルモデルは、従来モデルと比較して合計利用時間が増える代わりに、合計オペレーター数を減らすことができる可能性を示した。逆に、可変セルモデルと CPS を取り入れたモデルとを比較すると、合計オペレーター数が増える代わりに合計利用時間が減る可能性を示した。また、特に[-2%~-20%]と[+2%~+20%]の需要の場合、Time/Op 値も小さいことから、一人当たりに対する負荷が減少することも判明した。さらに S1 の結果に基づき、ロボットが導入されることによる作業効率上昇値を新たな共創パラメータとして設定し、生産効率を最大化するための制約式に導入した。併せて、ロボットの総導入台数も新たなパラメータとして設定することにより、ベイズ学習も応用可能なラインセル混成計画のための新たな検知・調整方式を含む数理モデルを構築することができた。

表 1. 多期間検証による時間減少率

	[- 2% ~ -20%]	[+/- 2%~20%]	[+ 2% ~ +20%]
CM4(Traditional)	-	-	-
CM3+CPS1	-979.97	-59.16	5.11
CM2+CPS2	-151.48	0.06	5.11
CM1+CPS3	200.80	326.98	588.13
CPS4	611.62	54.46	N/A
可変セル	128.77	-31.00	171.67

S4: ロボットを含む動的なラインセル混成管理方式の確立()

S3 にて構築された数理モデルをさらに発展させたロボットを含む動的なラインセル混成管理方式を確立した。具体的には、セル生産方式における U 字型セルを I 字型セルに変換することで、自律型小型ロボットの導入を可能にするとともに、ライン生産方式との親和性を高めることにより、需要量に応じたロボットを含むラインセル混成管理を容易にした。実験では S3 の数理モデルを適用し、標準処理時間・需要データ・利用可能時間等は Suer らの実データを援用した。多期間（52 週間）に渡る実験の結果、各工程内への導入台数制限を実施した場合、総導入台数を増加させても、ある一定の台数を超えるとオペレーター総数の減少にほぼ影響を与えなくなった。一方、各工程内への導入台数制限を撤廃した場合、オペレーター総数の減少に大きな影響を与えると同時に、作業効率上昇値によって大きな差がみられた。

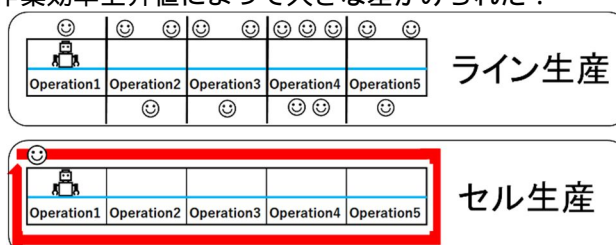


図 3. ロボットを含む動的なラインセル混成管理方式

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Takayuki Kataoka	4. 巻 1
2. 論文標題 A comprehensive analysis of a mixed integer programming model to minimize the number of operators in labour-intensive manufacturing cells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of 10th Annual European Decision Sciences Conference(EDSI2019)	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kataoka Takayuki, Morikawa Katsumi, Takahashi Katsuhiko	4. 巻 39
2. 論文標題 Strategic Human Resource Management Simulation Considering Work Elements, Skills, Learning and Forgetting	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Procedia Manufacturing	6. 最初と最後の頁 1633 ~ 1640
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.278	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Takayuki Kataoka	4. 巻 43C
2. 論文標題 A multi-period mixed integer programming model on reconfigurable manufacturing cells	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 17th Global Conference on Sustainable Manufacturing	6. 最初と最後の頁 231-238
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） In Printing (Procedia Manufacturing)	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 片岡隆之, 森川克己, 高橋勝彦	4. 巻 17
2. 論文標題 ベイジアンネットワークを用いた機会制約付きライン設計最適化条件の感度分析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本ロジスティクスシステム学会誌	6. 最初と最後の頁 169-176
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takayuki Kataoka, Katsumi Morikawa and Katsuhiko Takahashi	4. 巻 1
2. 論文標題 An Integrated mixed integer programming model without phases to minimize the number of operators in labour-intensive manufacturing cells	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 13th International Conference on Industrial Management	6. 最初と最後の頁 65-71
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takayuki Kataoka, Katsumi Morikawa and Katsuhiko Takahashi	4. 巻 1
2. 論文標題 A multi-period operator assignment model in reconfigurable manufacturing cells	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. Of the 19th Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takayuki Kataoka, Katsumi Morikawa, Katsuhiko Takahashi	4. 巻 7
2. 論文標題 A Multi-Objective Optimization Model to Minimize Temporary Workers Considering the Difficulty of Tasks and the Variety of Cycle Time	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Asia-Pacific Journal of Industrial Management	6. 最初と最後の頁 20-29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 片岡隆之, 森川克己, 高橋勝彦	4. 巻 16
2. 論文標題 常時混流方式と品種別段取時間を考慮したラインセル転換モデル	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本ロジスティクスシステム学会誌	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takayuki Kataoka, Katsumi Morikawa, Katsuhiko Takahashi	4. 巻 1
2. 論文標題 A Multi-Period Worker Assignment Model Considering Work Elements, Skills, Learning and Forgetting	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. of the 24th International Conference on Production Research	6. 最初と最後の頁 204-210
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takayuki Kataoka, Katsumi Morikawa, Katsuhiko Takahashi	4. 巻 1
2. 論文標題 An operator assignment model in reconfigurable labour-intensive manufacturing cells	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. of the 18th Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference	6. 最初と最後の頁 A1_1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 鶴岡賢紀, 片岡隆之
2. 発表標題 RNNを用いた自動車販売予測モデルの提案と事例研究
3. 学会等名 日本経営システム学会第63回全国研究発表大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 四茂野友就, 片岡隆之
2. 発表標題 RNNを用いたデータ前処理による販売予測精度向上に関する研究
3. 学会等名 日本経営工学会中国四国支部第46回学生論文発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鶴岡賢紀, 片岡隆之
2. 発表標題 GRUを用いた自動車販売予測の精度検証
3. 学会等名 日本オペレーションズリサーチ学会中国・四国地区SSOR
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鶴岡賢紀, 片岡隆之
2. 発表標題 Gated Recurrent Unitによる複数種データを用いた自動車販売台数の予測
3. 学会等名 近畿大学大学院サイエンスネットワーク2018第8回院生サミット
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 片岡隆之
2. 発表標題 ARIMAモデル等を用いた販売計画の精度検証
3. 学会等名 日本経営工学会中国四国支部平成30年度第1回勉強会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 片岡隆之, 森川克己, 高橋勝彦
2. 発表標題 ベイジアンネットワークを用いたライン設計最適化条件の感度分析
3. 学会等名 日本ロジスティクスシステム学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 橋爪琢馬, 片岡隆之
2. 発表標題 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の研究
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会中国・四国地区SSOR
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 日本ロジスティクスシステム学会、唐澤 豊（分担執筆）	4. 発行年 2018年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 1252
3. 書名 SCMハンドブック	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究成果データベース https://researchmap.jp/read0088569</p> <p>近大コメンテーターガイド https://www.kindai.ac.jp/meikan/index.html</p> <p>研究室ホームページ https://w.atwiki.jp/kataoka/</p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	高橋 勝彦 (TAKAHASHI Katsuhiko) (00187999)	広島大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (15401)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	森川 克己 (MORIKAWA Katsumi) (10200396)	広島大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授 (15401)	