

作業の自動化難易度と自動化率を考慮した
人とロボットのハイブリッド組立ラインの設計法に関する研究

宮内 孝

電気通信大学大学院
情報理工学研究科 情報学専攻
博士（工学）学位申請論文
2021年12月

作業の自動化難易度と自動化率を考慮した
人とロボットのハイブリッド組立ラインの設計法に関する研究

論文審査委員会

- 主査 山田 哲男 教授
委員 内海 彰 教授
委員 横川 慎二 教授
委員 水戸 和幸 准教授
委員 杉 正夫 准教授

著作権所有者

宮内 孝

2021 年

Design Methods on Hybrid Assembly Line with Humans and Robots Considering Automation Difficulty Level and Rate

Takashi Miyauchi

Abstract

The labor force in the manufacturing industry has declined with an aging society, and automation using robots is expected for assembly lines from a labor-saving perspective. In order to design and realize the assembly line, both workers and robots should be simultaneously configured based on the contents of tasks, rather than automating all task costly. However, there are many tasks on an assembly line; while some such tasks can become easily automated using robots, others are hard to automate due to different automation difficulty levels.

This study proposes design methods on hybrid assembly lines with humans and robots considering automation difficulty level and rate.

Firstly, automation difficulty levels and a procedure of assembly line design are developed with a case study of electronic equipment manufacturing. Next, a two-stage design method for a hybrid assembly line with humans and robots is formulated. In the first stage, all tasks are selected as either human or robot task based on the automation difficulty level and rate using 0-1 integer programming. In the second stage, a line balancing problem is solved by 0-1 integer programming to minimize the number of stations. Finally, the proposed methods are adopted to an actual electrical product manufacturing line, numerical experiments are conducted with a commercial solver, and alternative design candidates are obtained. By using the obtained line design alternatives, it enables production line engineers to improve the hybrid assembly line design with humans and robots.

概要

製造業の経営環境として、製品の品質をめぐる競争の激化や技術革新のスピードが加速する一方で、就業者数の減少が進み、人材確保に一層の厳しさが高まり、ロボットの導入による自動化と省人化が、今まで以上に期待されている。工業製品は、多様な部品を用いて組み立てられており、このような組立作業は、作業員、ロボットおよび製造装置を配置し、必要な作業を順次通過していく組立ラインによって行われる。実際に組立ラインを実現するには、費用対効果の観点で成立することが求められるため、すべての作業を自動化するのではなく、作業の内容によって、人あるいはロボットを組み合わせて配置する必要がある。従来は、設備導入コストが既知のデータとして、事前に与えられていることを前提としたライン設計法が提案されている。しかし、組立ラインでは、設備費や運用・保守費の具体的なコストデータを得ることができるのは、設備の詳細設計フェーズの事後になってしまうケースがあった。

本研究では、作業の自動化難易度が作業ごとに異なることとラインの自動化率に着目して、人とロボットを同時に配置するハイブリッド組立ラインの設計法を提案する。

1章では、作業員、ロボットおよび製造装置を用いた組立ラインの設計法について、課題を整理する。具体的には、製造業の就労人口の減少、苦渋作業からの解放、および多様化する製品要求などの社会的要請に対して、作業員、ロボットおよび製造装置を用いた製造ラインのシステムインテグレーションに関する課題を取り上げる。そして、作業員、ロボットおよび製造装置を用いた製造ラインの設計法については、手順化や体系化が十分に行われていない現状があることを指摘した。

2章では、組立ラインの構成と、人手作業やロボットによる自動化の状況、および従来のライン設計手法について整理する。ここで、組立ライン設計の1つとして、生産ラインの各作業ステーションに割り付ける作業量を均等化するラインバランシング手順を説明する。さらに、ラインバランシングを0-1整数計画法で定式化し、線形計画ソルバーを用いて数値実験を行う手順を説明する。

3章では、人とロボットを配置するハイブリッド組立ラインを作業の自動化難易度にもとづいて設計する手順について、事例を通じて説明する。提案する設計手順でははじめに、人手作業を作業の自動化難易度にもとづいて分析し、次に、難易度ごとに作業を集約した工程変更案を作成する。最後に、作成した工程変更案をもとに、人とロボットのハイブリッド組立ラインを設計する。さ

らに、提案手順を電子機器製造のライン設計に適用した結果、作業の自動化難易度の低い作業の自動化を優先したライン設計案を作成できることが示された。また、提案手順を現場の従来手法と比較した結果、適用事例においては、人員の削減と設備導入コストの抑制の両方の点で優れていることがわかった。

4章では、ハイブリッド組立ラインの設計法について述べる。3章において、作業の自動化難易度を考慮したハイブリッド組立ラインの設計手順を提案したが、その定式化は行われていなかった。そのため、設計者によって設計結果が異なることや、関係者で客観的に設計結果を評価することができないという課題があった。4章では、作業の自動化難易度を考慮したハイブリッド組立ラインの設計問題を0-1整数計画法として定式化する方法を提案する。この設計法は2段階で構成され、第1段階では、作業の自動化難易度と、自動化率あるいは総作業時間などの2目的問題として、人手あるいはロボットの作業タイプ選択を行う。次に、第2段階では、第1段階の選択結果を用いて、サイクルタイム制約のもとステーション数を最小化するラインバランシングに対して、0-1整数計画法で解を求める。最後に、この2段階設計法を、3章と同じ製造ラインの一部に適用した結果、作業の自動化難易度と他の目的関数の間のトレードオフ関係を明確にし、自動化推進の方針決定に活用可能であることを示した。

5章では、4章で定式化した2段階設計法を、より作業数の多い実際の組立ラインに適用した結果を説明する。具体的には、提案した2段階設計法を電子機器の製造ラインに適用し、線形計画ソルバーにより解を得た。第1段階では、4章で得られた結果と同様に、作業の自動化難易度の制約を緩和すると、ロボット作業に選択される作業数の増加が確認された。第2段階では、第1段階の作業タイプ選択の結果をもとにラインバランシングを行い、複数のライン設計案が得られることを示した。また、これらの結果を、ライン設計の技術者が活用することで、さらに設計案を改善できる可能性のあることがわかった。

最後に6章では、提案した本設計法の成果をまとめるとともに、今後の課題と展望について述べる。

目次

1. 序論.....	1
1.1 背景.....	1
1.2 ロボットと製造装置への社会的要請.....	2
1.3 インダストリー4.0の到達に向けた製造業の状況と施策.....	6
1.4 社会的要請に応えるためのロボットや製造装置の施策.....	8
1.4.1 ロボットや製造装置の知能化と高度化に向けた技術的な課題.....	9
1.4.2 製造ラインのシステムインテグレーション機能の強化に関する課題.....	9
1.4.3 社会的要請に対応するためのロボットや製造装置を用いた施策の整理.....	10
1.5 人手あるいはロボットの作業タイプ選択に関する課題.....	11
1.5.1 人手あるいはロボットの作業タイプ選択に関する事例.....	11
1.5.2 人手あるいはロボットの作業タイプ選択における課題.....	15
1.6 組立ライン設計の先行研究とその課題.....	15
1.6.1 組立ライン設計の先行研究.....	15
1.6.2 組立ライン設計における自動化推進とラインバランスの課題.....	19
1.7 本研究の目的.....	20
1.8 本研究の構成.....	21
2. 組立ラインの自動化とラインバランス.....	23
2.1 組立ラインと作業の先行順位.....	23
2.1.1 組立作業と組立ライン.....	23
2.1.2 作業の先行順位.....	25
2.2 組立作業の自動化.....	26
2.2.1 人手による組立作業.....	26
2.2.2 ロボットによる組立作業の自動化.....	27

2.2.3	人手あるいはロボットの作業タイプ選択	27
2.3	ラインバランシングによる組立ラインの設計	29
2.3.1	ラインバランシング	29
2.3.2	0-1 整数計画法によるラインバランシングの解法	30
2.3.3	ヒューリスティックス解法によるラインバランシング	34
3.	人とロボットのハイブリッド組立ライン設計の手順化	36
3.1	作業の自動化難易度を考慮した人とロボットのハイブリッド組立ラインの設計手順 ..	36
3.1.1	ライン設計手順の概要	36
3.1.2	ステップ 1: 作業内容の調査	38
3.1.3	ステップ 2: 作業内容の分析	42
3.1.4	ステップ 3: 作業の自動化難易度を揃えた作業順序の変更	43
3.1.5	ステップ 4: 人とロボットのハイブリッド組立ラインの提案	47
3.2	適用事例: 既存ラインの調査・分析	48
3.2.1	適用対象の製造ライン	48
3.2.2	ステップ 1: 作業内容の調査例	49
3.2.3	ステップ 2: 作業内容の分析例	51
3.3	適用事例: 作業順序の変更とライン設計案の提案	57
3.3.1	ステップ 3: 作業の自動化難易度を揃えた作業順序の変更例	57
3.3.2	ステップ 4: 人とロボットのハイブリッド組立ラインの提案例	60
3.4	適用事例: 提案した設計手順の結果のまとめ	63
3.5	人とロボットのハイブリッド組立ライン設計の手順化に関するまとめ	66
4.	ハイブリッド組立ラインの 2 段階設計	68
4.1	ハイブリッド組立ラインの設計法の必要性	68
4.2	0-1 整数計画法を用いたハイブリッド組立ラインの設計法	69
4.2.1	ハイブリッド組立ラインの設計法の概要	69

4.2.2	仮定と記号	72
4.2.3	準備段階:ライン設計条件の設定	74
4.2.4	第1段階:人手あるいはロボットの作業タイプの選択	75
4.2.5	第2段階:作業タイプ選択を反映したラインバランシング	79
4.2.6	評価段階:ライン設計結果の評価とレビュー	82
4.2.7	総自動化難易度と総作業時間の2目的による作業タイプ選択	83
4.3	対象ラインの例:電子機器製造ライン	84
4.3.1	対象ラインの概要	84
4.3.2	対象ラインの仮定	84
4.3.3	作業の先行関係, 作業の自動化難易度と作業時間	85
4.4	小規模事例への適用と評価	86
4.4.1	準備段階:ライン設計条件の設定結果	86
4.4.2	第1段階:人手あるいはロボットの作業タイプの選択結果	87
4.4.3	第2段階:作業タイプの選択結果を反映したラインバランシング結果	90
4.4.4	評価段階:ライン設計結果の評価とレビューの結果	94
4.5	小規模事例における他の設計例との比較	97
4.6	ハイブリッド組立ラインの2段階設計に関するまとめ	99
5.2	2段階設計法の電子機器製造ラインへの適用と評価	100
5.1	対象ラインと数値実験環境	100
5.2	第1段階における作業タイプ選択の結果	100
5.3	第2段階におけるラインバランシングの結果	104
5.3.1	総ステーション数およびラインバランスの評価	104
5.3.2	ライン全体の自動化率と総自動化難易度の評価	109
5.3.3	作業の自動化難易度を考慮した設計手順による作業ステーション配置の評価	109
5.3.4	第2段階におけるラインバランシングの結果のまとめ	110
5.4	ライン設計案に対するデザインレビューの例	110

5.5 総自動化難易度と総作業時間を目的関数にした場合	112
5.6 2 段階設計法の電子機器製造ラインへの適用と評価のまとめ	116
6. 結論	118
6.1 本研究の成果	118
6.2 今後の課題と活用展開	119
謝辞	123
参考文献	124
関連論文	134
著者略歴	135

目次

図 1-1	ロボットによる自動化の例.....	1
図 1-2	ものづくり人材の不足に対する施策	3
図 1-3	社会的な課題に対応するためのロボットや製造装置を用いた施策 の整理	5
図 1-4	インダストリー4.0 到達のための階層フレームワーク	7
図 1-5	製造業における設備活用に向けた加工点や作業の分類事例.....	14
図 1-6	事例：液晶ディスプレイ組立工程の自動検査装置.....	20
図 1-7	本論文の構成.....	22
図 2-1	組立ラインの作業と部品の流れ	24
図 2-2	白物家電の組立作業の例	24
図 2-3	ねじ締め作業における先行順位関係の例	25
図 2-4	先行順位図の例（黒田（1984）をもとに再作成）	25
図 2-5	作業の自動化難易度と人とロボットの作業時間を追記した先行順 位図の例.....	28
図 2-6	ラインバランシングの分類と本研究の対象.....	30
図 2-7	0-1 整数計画問題の例	32
図 3-1	人とロボットのハイブリッド組立ライン設計の手順	37
図 3-2	自動化分析シートのフォーマット	43
図 3-3	自動化に向けた作業順序の入れ替えの例	45
図 3-4	自動化ラインの設計案の例.....	47
図 3-5	適用対象の製造ラインの概略	49
図 3-6	自動化分析シートの記入例.....	52

図 3-7	作業内容と作業の自動化難易度の分析結果.....	54
図 3-8	工程別の作業の自動化難易度比率の分析結果.....	56
図 3-9	組立前半工程において作業の自動化難易度を揃えた作業順序の変更例.....	59
図 3-10	自動化ラインの設計案の例.....	60
図 4-1	作業の自動化難易度と自動化率を考慮した人とロボットのハイブリッド組立ラインの設計法.....	70
図 4-2	第 1 段階における作業タイプの選択結果を記入した先行順位図の例 (図 2-5 の再掲).....	78
図 4-3	作業ステーション配置図の例.....	82
図 4-4	対象ラインにおける作業の先行関係と作業の自動化難易度.....	85
図 4-5	小規模事例における作業の自動化難易度と作業時間を記入した先行順位図.....	87
図 4-6	小規模事例における「(a) ロボット最回避」の作業タイプ選択結果を記入した先行順位図.....	91
図 4-7	小規模事例におけるライン設計結果のピッチダイヤグラム.....	93
図 4-8	小規模事例における「(b) ロボット回避」と「(c) ロボット優先」の作業ステーション配置図.....	94
図 5-1	総自動化難易度の制約条件 ϵ_{TD} と必要ステーション数の関係..	103
図 5-2	総自動化難易度 TD とライン全体の自動化率 TA の関係.....	104
図 5-3	電子機器製造ラインの事例における「シナリオ $\epsilon_{TD} = 2$ 」と「シナリオ $\epsilon_{TD} = 6$ 」のピッチダイヤグラム.....	107
図 5-4	電子機器製造ラインの事例における「シナリオ $\epsilon_{TD} = 2$ 」と「シナリオ $\epsilon_{TD} = 6$ 」の作業ステーション配置図.....	108

- 図 5-5 電子機器製造ラインの事例における TD と TT を 2 目的関数とした
場合のピッチダイヤグラム ($\epsilon_{TD}=2-14$)..... 115
- 図 5-6 電子機器製造ラインの事例における TD と TT を 2 目的関数とした
場合の作業ステーション配置を記載した先行順位図 ($\epsilon_{TD}=2-14$)... 115

表目次

表 1-1	ロボットや製造設備を用いた組立ライン設計に関する先行研究	17
表 2-1	0-1IP の適用例	33
表 3-1	作業の自動化難易度の設定に関する検討の例	41
表 3-2	作業の自動化難易度表の例.....	50
表 3-3	本研究で提案した設計手順と従来法の結果比較	62
表 4-1	自動化率のタイプと説明 (Fujimoto (1992)をもとに再作成)	71
表 4-2	小規模事例における第 1 段階の人手あるいはロボットの作業タイプ 選択の結果	89
表 4-3	小規模事例における第 2 段階の作業ステーション配置とライン評 価の結果.....	92
表 5-1	電子機器製造ラインの事例における第 1 段階の人手あるいはロボ ットの作業タイプ選択の結果	102
表 5-2	電子機器製造ラインの事例における第 2 段階の作業ステーション 配置の結果	106
表 5-3	電子機器製造ラインの事例における TD と TT を 2 目的関数とした 場合の結果	113

1. 序論

1.1 背景

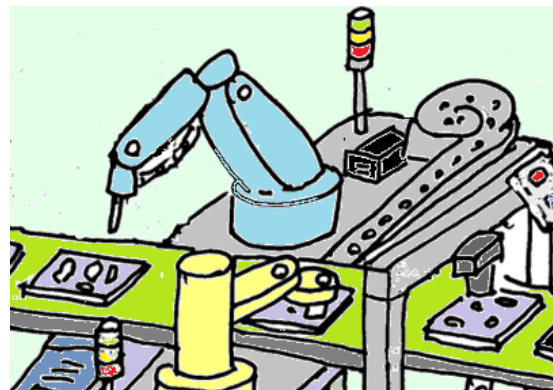
近年、製造業においては、製品の品質をめぐる競争の激化や技術革新が加速する一方で、高齢化による就業者数の減少が進み、今まで以上に人材確保が厳しくなっている。このような人手不足を対策するために、自動機やロボットの導入による自動化と省人化が、今まで以上に期待されている（経済産業省, 2019a）。ここで、自動化とは、人手によらず、機械やコンピューターで行うようにすることである(松村, 2006) (図 1-1)。

製造ラインの自動化を進めることは、省人によるコスト低減だけでなく、生産量と品質の安定化、作業者の苦渋作業の軽減や安全確保、製造業の IoT 化などにおいても重要性が増加している（経済産業省近畿経済産業局, 2016; 原口・上村, 2019）。さらに、2020年の新型コロナウイルス感染症の世界的な感染拡大のような局面においては、在宅勤務の普及や人と人の接触防止の観点からも、製造ラインにおける自動化が求められている（日経 BP 社, 2020）。これは、新型コロナウイルス感染症は、咳、くしゃみ、会話などの時に排出される飛沫や感染者との直接的な接触を介して感染することから、閉鎖した空間で多くの人と会話するなどの環境は、感染を拡大させるリスクがあるとされているからである（厚生労働省, 2021）。

工業製品の多くは部品を用いて組み立てられる。そして、組立作業は、作業員、ロボットおよび製造装置を配置し、必要な作業を順次通過していく組立ラインによって行われる（Nof, Wilhelm and Warnecke, 1997）。このような、複数の部品を組み付けて製品を製造する組立ラインを見ると、人手作業が依然として多く、自動化が進んでいないのが現状である（原田・万, 2019）。この原因の1つとして、



(a) 人を中心としたライン



(b) ロボットによる自動化

図 1-1 ロボットによる自動化の例

自動化には大きな設備導入コストが必要であることから、投資回収の可否が問題になることが挙げられる (泉, 2002; 村山, 2018)。自動化を推進する主な理由は、作業者の削減による生産コストの低減であるため、自動化による人件費の低減が設備導入コストを上回ることが期待できない場合には、経営的な観点から自動化計画が進まないからである。自動化には多くのメリットが期待できるが、実際の製造現場で実現するには、費用対効果の観点で成立することが求められる。さらに近年、AI (Artificial Intelligence ; 人工知能) 技術の進歩などで知能化ロボットの開発が進み、様々な作業の自動化が実現しているが、すべての作業をロボットが代替するには至っていない (原田・万, 2019; Liu, 2019; 宮内ら, 2019)。これらの状況から、すべての作業を自動化するのではなく、作業の内容によって、人あるいはロボットの配置を検討する必要がある。

このような、人とロボットの両方を配置した組立ラインをハイブリッド組立ライン (宮内・山田, 2018b; 宮内・山田, 2020b; Botti, Mora and Regattieri, 2017) と呼び、その設計法への要求が高まっている。

1.2 ロボットと製造装置への社会的要請

経済産業省 (2020) の「2020年版ものづくり白書 (PDF版)」によると、国内の製造業の就業者数は、2002年の1,202万人から、2019年には1,063万人と、20年間で11.6%減少しており、全産業に占める製造業の就業者数の割合も減少傾向である。

次に、経済産業省 (2020) の情報をもとに、ものづくり人材の不足に対する施策を、ヒト (採用に関する施策)、コト (労働環境に関する施策) とモノ (機械化・ICTに関する施策) に分類した結果を図 1-2 に示す。図 1-2 において、多くの企業が、ヒト (採用に関する施策) とコト (労働環境に関する施策) を選択する一方で、「機械化、自動化、設備の拡充を図る(44.7%)」や「ICTなどデジタル技術を活用する(23.8%)」などの、モノ (機械化、ICTに関する施策) を挙げている。ものづくり人材の不足に対して、直接的な解決策となるヒト (採用に関する施策) とコト (労働環境に関する施策) を多くの企業が挙げることは、当然の結果である。しかし、国内の製造業の就業者数が減少していることを考慮すると、ヒト (採用に関する施策) やコト (労働環境に関する施策) のような人材に関することだけでは、本質的な解決は難しいと考えられる。したがって、不足した人材を代替するモノ、すなわち機械化・ICTに関する施策による解決が重要になる。

ヒト：採用に関する施策

全22項目中
大企業の20%以上が **6** 項目を選択

① 新卒採用の強化	70.6 %
② 中途採用の強化	52.1 %
③ 定年後再雇用者など高齢者の活用	43.6 %
④ 派遣、個人請負など外部人材の活用	36.5 %
⑤ 外国人の採用の拡大	26.6 %
⑥ 女性の採用の拡大	25.5 %

コト：労働環境に関する施策

全22項目中
大企業の20%以上が **6** 項目を選択

① 働きやすい職場環境の整備	53.5 %
② 人材育成・能力開発の強化	50.4 %
③ 賃金や労働条件の引き上げ	28.7 %
④ 社内人材の配置転換	28.7 %
⑤ 非正社員の正社員への登用	25.5 %
⑥ 福利厚生の実施	22.3 %

モノ：機械化・ICTに関する施策

全22項目中
大企業の20%以上が **2** 項目を選択

① 機械化・自動化、設備の拡充を図る	44.7%
② ICTなどデジタル技術を活用する	23.8%

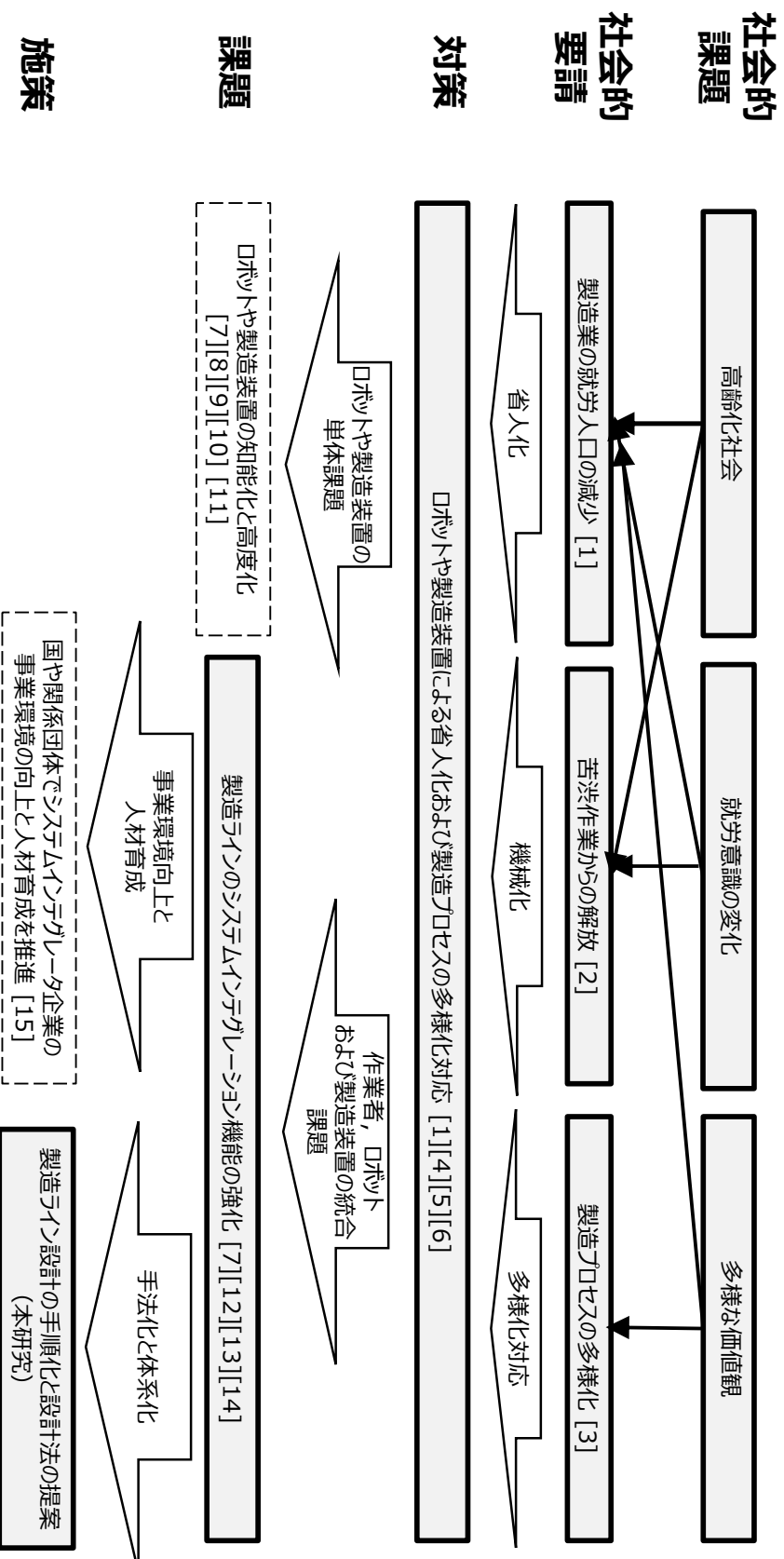
図 1-2 ものづくり人材の不足に対する施策
(経済産業省 (2020) をもとに再作成)

一方で、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2010) の予測では、2035年には、製造分野のロボット市場は2015年の2.7倍に相当する2.7兆円に拡大すると予想されている。この結果から、製造業の就業者数の減少にともない、産業用ロボットによる自動化や製造装置の拡充に対する社会的な要求が大きいことがわかった。

さらに、製造業における人手不足の課題や苦渋労働からの解放、一段と多様化する製品要求への対応などの課題は、持続可能でよりよい世界を目指す国際目標をまとめたSDGs (Sustainable Development Goals ; 国連の持続可能な開発目標) においても挙げられている (外務省, 2020)。また、2020年には、世界的に新型コロナウイルス感染症が完全拡大し、この感染を防止するために、人と人の接触防止が求められた。そのため製造業においては、産業用ロボットによる自動化や製造装置の拡充に対する要求が高まった (日経 BP, 2020)。

以上のように、製造業の就労人口の減少、苦渋作業からの解放、および多様化する製品要求などの社会的要請に対して、ロボットと製造装置による省人化および製造プロセスの多様化の対応が求められている。本章では、社会的要請に対する対策、課題と施策の考察を行う。

社会的な課題に対応するためのロボットや製造装置を用いた施策を整理するための全体の流れを図1-3に示す (宮内・山田, 2020c)。社会的な課題である高齢化社会、就労意識の変化と多様な価値観への対応を起点として、製造業の就労人口の減少、重量物の取り扱いや単調作業などの苦渋作業からの解放や製造プロセスの多様化への対応が求められている。これらに応えるための1つの対策として、ロボットや製造装置による省人化および製造プロセスの多様化への対応があり、その実現には、製造ラインのシステムインテグレーション機能の強化と高度化が必要となる。製造ラインのシステムインテグレーション機能の強化は、すでに国や関係団体でシステムインテグレーター企業の事業環境の向上と人材育成が進められている。しかし、ヒトに関する施策のみに依存しないように、作業者と製造装置を用いた製造ラインの設計の手法化と体系化によって、製造ライン設計の属人性を低減することも必要である。そこで、本研究では、製造ライン設計の手順化と設計法を提案する。



※図中の番号は下記の参考文献を示す。
 [1] 経済産業省, 2020, [2] 外務省, 2020, [3] 清水, 2017 [4] 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2010, [5] 日経BP社, 2020, [6] Qin, Liu and Grosvenor, 2016, [7] 原田・方, 2019, [8] Liu, 2019, [9] 宮内ら, 2019, [10] Chen et. al., 2017, [11] 榊原, 2017, [12] FA・ロボットシステムインテグレーション協会, 2019, [13] 経済産業省・学情・パーソナル総合研究所, 2017, [14] 経済産業省・三菱UFJリサーチ&コンサルティング, 2019b, [15] FA・ロボットシステムインテグレーション協会, 2018

図 1-3 社会的な課題に対応するためのロボットや製造装置を用いた施策の整理 (宮内・山田 (2020c) をもとに再作成)

1.3 節では、ロボットと製造装置への社会的要請に対する課題を考察するために、インダストリー4.0の到達に向けた製造業の状況と施策を分析した例を調べる。次に1.4 節では、1.3 節の結果を参考に、社会的要請に応えるためのロボットや製造装置の課題を分類して、具体的に考察を行う。

製造ラインのシステムインテグレーションにおいて、費用対効果や作業を自動化する技術的な難しさ、対象製品の製造数量、品種の多様性や作業における作業者の負荷などを考えた場合、すべての作業を自動化するのではなく、作業の内容によって、作業員、ロボットあるいは製造装置の設置を検討する必要がある(泉, 2002; 宮内・深津・原野, 2018a)。また、製造装置は、産業用ロボット、汎用設備、さらに特定の工程に用いられる専用設備などがあり、それらを適切に選択することも求められる。

そのため、1.5 節では、人手あるいはロボットの作業タイプ選択に関する課題について整理し、1.6 節では、組立ライン設計の先行研究とその課題について考察する。

1.3 インダストリー4.0 の到達に向けた製造業の状況と施策

ここでは、1.2 節で説明したロボットと製造装置への社会的要請とその課題を考察するために、インダストリー4.0の到達に向けた製造業の状況と施策の例を分析する。

インダストリー4.0とは、ドイツ連邦政府が2011年に公表した国家戦略である(総務省, 2018)。インダストリー4.0が必要とされる理由は、個の量産(マスカスタマイゼーション: 一個流し生産)を、これまでの大量生産と同等のコストと能率で実現することが求められているためである。そして、単なる高能率化や低コスト化だけではなく、これを通して新たなビジネスモデルや市場を一変させるような製品・サービスの創出を産み出すことも期待されている。この2つの目標に向けて、産業分野を対象としたIoTを駆使した、つながる機械、つながる工場、考える工場、つながる製品などのキーワードが掲げられている。これらのキーワードに向けた具体的な取り組みが、すべてのものづくりプロセスの見える化、最適化と自律化を達成するスマートファクトリーである(清水, 2017)。スマートファクトリーでは、センサーやアクチュエーター、機械、ロボット、コンベヤーなどの製造リソースが接続され、自動的に情報が交換される。これにより、機械の予知保全に必要な知能を持つとともに、製品設計、生産計画、生産エンジニアリング、製造およびサービスなどのプロセスが緊密に接続し、相互に連

携することで、全体として制御される (Qin, Liu and Grosvenor, 2016)。

Qin, Liu and Grosvenor (2016) は、このようなインダストリー4.0の達成に必要なものと、現在の製造システムのギャップを整理した。例えば、自動組立システムにおいては、現状では、製品設計と生産量がある程度固定されているものに限定されており、標準化や柔軟性、リアルタイム性、カスタマイゼーション、予知保全などの観点で、インダストリー4.0の達成には至っていないことを指摘している。ここで、標準化は上位システムとの接続を容易にするための規格や標準への適合度を示す。さらに、柔軟性は製品や生産数の変化に対する対応性、リアルタイム性はそれを短時間に変更可能であること、カスタマイゼーションは、顧客個人の要望に適合することを示す。また、予知保全は、機械や設備のトラブルの予兆を未然に検出して保全を行うことである。

次に、Qin, Liu and Grosvenor (2016) は、インダストリー4.0を達成するための階層フレームワークを、智能化レベルと自動化の範囲を組み合わせ示した (図1-4)。

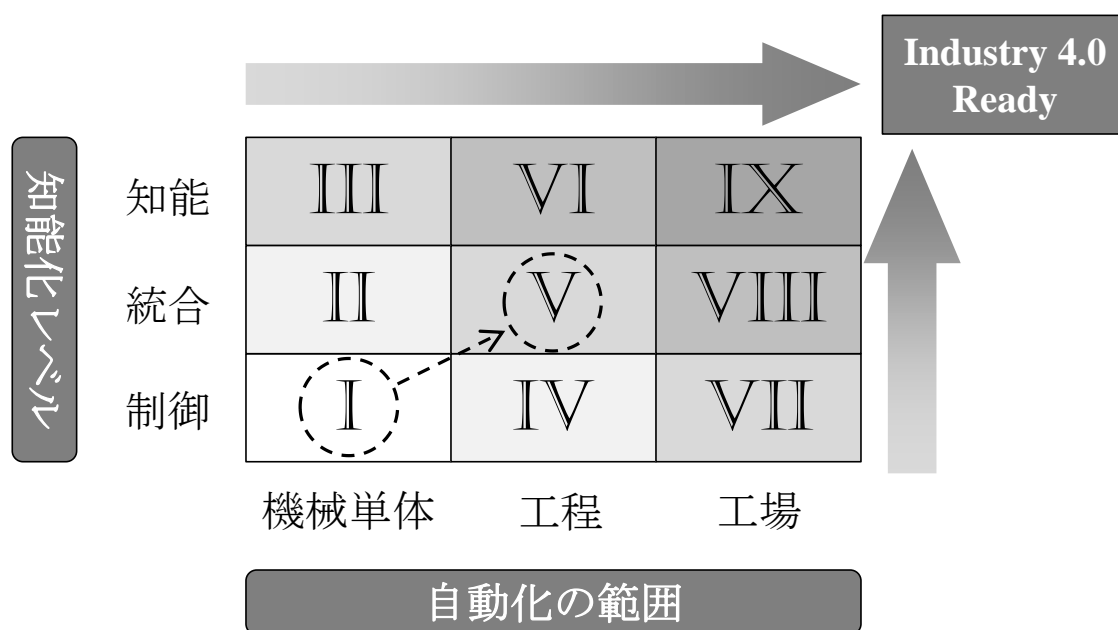


図 1-4 インダストリー4.0 到達のための階層フレームワーク (Qin, Liu and Grosvenor, (2016) をもとに再作成)

ここでは、知能化レベルを制御、統合と知能の3段階、自動化の範囲を機械単体、工程と工場の3段階に分けることで、全体を9つのカテゴリに区分された。そして、知能化レベルと自動化の範囲を段階的に上げていくことで、インダストリー4.0を達成することができるとした (Qin, Liu and Grosvenor, 2016)。知能化レベルにおいて、制御段階は従来のNC (Numerical Control) 工作機械などの数値制御やPLC (Programable Logic Controller)によるシーケンス制御の段階であり、統合段階ではこれらをIoT技術で接続する。さらに、知能段階では、統合レベルで得られたデータや情報を用いて、データマイニングやビッグデータ解析などの技術により、計画策定や意思決定を行う。自動化の範囲における機械単体は、ハードウェア単位の製造装置やロボットを意味し、複数の機械により工程が構成され、さらに、工程が集まり製品を製造する工場が構成される。

例えば、知能化レベルが制御段階で、自動化の範囲が機械単体である場合は、9カテゴリの最も低いカテゴリIの段階となる。カテゴリIからカテゴリVに進むには、自動化の範囲を拡大するために、機械単体から工程全体の自動化を進めるとともに、知能化レベルを上げるために知能や情報の統合が必要となると考えられる。

以上の結果から、インダストリー4.0が目指すスマートファクトリーの実現には、ロボットや製造装置を知能化することと、それらを組み合わせて製造ラインや工場全体の自動化を進める2つのアプローチが必要なことがわかった。これらの結果を参考に、1.4節では、社会的要請に応えるためのロボットや製造装置の施策を、ロボットや製造装置の単体の課題と作業員、ロボットおよび製造装置の統合の課題に分類して検討を進める。

1.4 社会的要請に応えるためのロボットや製造装置の施策

1.2節で説明したロボットと製造装置への社会的要請への対応方法を考察するために、1.3節では、インダストリー4.0の到達に向けた製造業の状況と施策を分析した。その結果、ロボットや製造装置の知能化と、それらを組み合わせて製造ラインや工場全体の自動化を進める2つのアプローチが必要なことがわかった。そこで、本研究において、製造業におけるロボットおよび製造装置の課題を、2つに分類して考察を進める。

課題の1つ目は、ロボットや製造装置の知能化や高度化に向けた技術的な課題である。課題の2つ目は、作業員、ロボットおよび製造装置を用いた製造ラインのシステムインテグレーションに関する課題である (図 1-3)。本節ではこれらの2つの課題について、現在の状況を分析し、施策を整理する。

1.4.1 ロボットや製造装置の知能化と高度化に向けた技術的な課題

ロボットや製造装置の知能化と高度化に向けた技術的な課題としては、ロボットや製造装置が、従来よりも複雑で多様な作業への対応を必要とされていることが挙げられる。例えば、現在の産業用ロボットは、教示再生方式で動作を生成している。教示再生方式とは、人間がティーチボックスなどを用いて、ロボットが行うべき作業を逐次順を追って教示し、これを再生することによって所期の作業を実現する方式である（日本機械学会, 2018）。しかし、この教示再生方式は、連続して同じ動作を繰り返す場合には有効であるが、多品種少量生産や製造プロセスの複雑化に伴い、動作が頻繁に変更される場合は、適用が難しくなる（原田・万, 2019）。そのため、従来のような定型的な繰り返し作業に加え、周囲環境や作業内容に応じて柔軟に判断し、自律的に動作するロボットや製造装置が必要になってきている。

以上のような自律的に動作するロボットや製造装置への要求に対して、最近では、センサー情報による状況認識、動作計画の生成、動作実行のサイクルに AI（Artificial Intelligence；人工知能）技術を搭載した知能化ロボットの開発が行われている（原田・万, 2019; Liu, 2019; 宮内ら, 2019）。AI には、人間の知能を対象とする学問分野で、知能を機械で実現する工学的立場と、人間の知能のメカニズムを科学的に解明する立場がある（日本機械学会, 2018）。本研究では、前者の工学的立場で AI という用語を使用することとする。さらに、ロボットや製造装置を CPS（Cyber Physical Systems）の端末として複数の機器やシステムと接続することで、工場やサプライチェーンのレベルでの生産性を向上する研究もおこなわれている（Chen et. al., 2017; 榊原, 2017）。ここで、CPS は、センサーとネットワークを通じて実空間の様々な情報をサイバー空間に収集・蓄積し、解析・判断により実世界へフィードバックするシステムのことである（奥村, 2017）。

1.4.2 製造ラインのシステムインテグレーション機能の強化に関する課題

1.4.1 節で説明したように、製造ラインの要求に応えるためにロボットや製造装置を知能化する技術開発が行われている。さらに、それらを CPS の端末として活用する技術開発も行われている。一方で、製造ラインを構築するためには、作業員、ロボットおよび製造装置などの構成要素を選定し、現場に導入する作業が必要となる（原田・万, 2019）。製造ラインに対する要求項目の整理から、製造装置の導入、保守体制の確立までの一連の活動は、製造ラインのシステムインテグレーションと呼ばれ、その重要性が認められている（FA・ロボットシステムインテグレータ協会, 2019）。

経済産業省・学情・パーソル総合研究所 (2017) によると、このような製造ラインのシステムインテグレーションを行うエンジニアは、「やや不足」が 52%、「非常に不足」が 39%という結果である。この調査は、製造ラインの工程設計を業務として行うシステムインテグレーター企業 144 社に対する調査結果であるが、社会的にシステムインテグレーションを行う人材が不足していることがわかる。システムインテグレーションを行う人材が不足している理由としては、人材の採用と育成の体制が整っていないことが挙げられる。

さらに、経済産業省・三菱UFJリサーチ&コンサルティング (2019b) によると、製造ラインの設計力が低下した理由として、「ベテラン技術者の減少」を 79.4%、「属人的な設計プロセス」を 25.0%の企業が挙げている。これらの結果から、製造ラインのシステムインテグレーションを行う技術者が社会的に不足しており、ベテランの経験が必要な属人的な業務であることが考えられる。

これらの課題に対して、製造ラインのシステムインテグレーター企業の事業環境の向上および技術力の向上などを目的に、2018年に、FA・ロボットシステムインテグレーター協会が設立されるなどの対策が進められている (FA・ロボットシステムインテグレーター協会, 2018)。

1.4.3 社会的要請に対応するためのロボットや製造装置を用いた施策の整理

以上の分析結果により得られた、社会的な要請に対応するためのロボットや製造装置を用いた施策を整理した (図 1-3)。社会的な課題である高齢化社会、就労意識の変化と多様な価値観への対応を起点として、製造業の就労人口の減少が進んでいる (経済産業省, 2020)。さらに、高齢化社会と就労意識の変化は、苦渋作業からの解放を求められる (外務省, 2020)。また、多様な価値観による製品への多様な要望は製造プロセスの多様化をもたらしていると考えられる (清水, 2017)。そして、製造業の就労人口の減少の対策として省人化が求められ、苦渋作業からの解放には機械化、製造プロセスの多様化の対策としてはロボットや製造装置の多様化対応が必要とされる (経済産業省, 2020; 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2010; 日経 BP 社, 2020)。本研究では、Qin, Liu and Grosvenor (2016)によるインダストリー4.0の実施に向けた2つのアプローチを参考に、ロボットや製造装置による省人化および製造プロセスの多様化対応を行うための課題を大きく2つに分けて考えた。

1つ目は、ロボットや製造装置の単体課題であり、2つ目は、作業員、ロボットおよび製造装置の統合課題である。ロボットや製造装置の単体課題としては、ロボットや製造装置の知能化と高度化が挙げられ多くの研究が行われている (原田・万, 2019; Liu, 2019; 宮内ら, 2019; Chen et. al., 2017; 榊原, 2017)。一方で、

作業者、ロボットおよび製造装置の統合課題については、製造ラインのシステムインテグレーション機能の強化が課題となる (原田・万, 2019; FA・ロボットシステムインテグレータ協会, 2019; 経済産業省・学情・パーソル総合研究所, 2017; 経済産業省・三菱UFJリサーチ&コンサルティング, 2019b)。製造ラインのインテグレーション機能の強化に対する施策として、事業環境の向上と人材育成およびインテグレーション業務の手順化と体系化が求められる。前者は、2018年に、FA・ロボットシステムインテグレータ協会が設立されるなどの対策が進められている (FA・ロボットシステムインテグレータ協会, 2018)。後者のインテグレーション業務の手順化と体系化に貢献する、製造ライン設計の手順化と設計法の提案が本研究のテーマである。

1.5 人手あるいはロボットの作業タイプ選択に関する課題

1.4節で整理したように、社会的要請に対応するためのロボットや製造装置を用いた施策を実現するためには、製造ライン設計の手順化と体系化が求められる。製造ラインを構築する際に、費用対効果や作業を自動化する技術的な難しさ、対象製品の製造数量、品種の多様性や作業における作業者の負荷などを考えた場合、すべての作業を自動化するのではなく、作業の内容によって、作業者、ロボットあるいは製造装置の設置を検討する必要がある (泉, 2002)。また、製造装置は、産業用ロボット、汎用設備、さらに特定の工程に用いられる専用設備などがあり、それらを適切に選択することも求められる。そのため、1.5節では、製造ライン設計において作業者、ロボットおよび製造装置の選択に関する3つの事例を調べ、人手あるいはロボットの作業タイプ選択に関する課題を整理する。

1.5.1 人手あるいはロボットの作業タイプ選択に関する事例

製造ラインの設計にあたっては、作業や加工点を実現するための作業者、ロボットおよび製造装置などの構成要素を選択する必要がある。本節では、作業者、ロボットおよび製造装置の選択に関する3つの事例から課題を抽出する。

(1) 事例1：日本機械学会 生産システム部門の技術ロードマップ

日本機械学会 生産システム部門の技術ロードマップWG(2016)では、生産システムの構成を表現する要素として、「自動⇄人」と「汎用機⇄専用機」をキーパラメータとして挙げた。ここで汎用機は多数の機能を持ち様々な処理ができる装置であり、専用機は単一の機能を持つ装置を示す。

このロードマップでは、「自動⇄人」は、自動化の程度を意味するパラメータとしている。現在では、生産に関わる多くの作業が技術的には自動化が可能になっている。しかし、実際には製品ライフサイクルと設備コストの観点から、自動化システムと手作業がコスト評価において最適となるようにバランスがとられていると指摘している。もう1つの「汎用機⇄専用機」は、機械の多機能化と品質の関係を意味するパラメータとしている。汎用機は多くの作業に対応するが、品質や動作の信頼性については専用機が勝る。一方で、最高の品質をより上げるよりも、低コストで迅速に、要求される品質に応じて作り上げることが望まれるケースもあり、専用機あるいは汎用機を適切に選択する技術が重要になると指摘している。

(2) 事例2：経済産業省 産業用ロボット導入ガイドライン

経済産業省 産業用ロボット導入ガイドライン (経済産業省中部経済産業局・名古屋工業大学 産学官連携センター, 2017) は、産業用ロボットの活用ノウハウを必要とする中小企業向けのガイドラインである。この中で、製造装置やロボットの導入に際して作業量と作業の複雑さをパラメータとして、「人手」、「ロボット」と「専用機」に分け、それらの位置づけを整理した。

ここで、「人手」は、複雑な作業が可能であり、作業変更柔軟に対応できるが、ランニングコストがかかり、過酷作業を行うことは厳しいとしている。次に、「ロボット」は、「専用機」に比べるとパワーやスピード、精度に劣る場合もあるが、多くの「専用機」より低価格で導入可能であり、作業変更への対応も一定程度可能としている。さらに、「専用機」は、用途に特化させることで、パワー、スピード、精度など高い性能を追求できるメリットがある。しかし、一般に高額であり、必要な設置スペースが大きく、作業変更への対応が難しいとしている。したがって、産業用ロボットは、「人手」と「専用機」の中間的な位置付けとされている。

(3) 事例3：製造業における分類事例（東芝グループの場合）

製造業においては、事業構造や対象製品およびサービスにより、作業員、ロボットおよび製造装置などの構成要素を選択する方法は異なる。ここでは、対象製品やサービスのバリエーションが多い総合電機メーカーの東芝グループを例に挙げる (宮内・深津・原野, 2018a)。

東芝グループでは、様々な製品を生産していることから、製造現場が求める作業やプロセスも多種にわたる。これらを整理するために、自動化機器や設備導入を進めるための考え方をまとめている (宮内・深津・原野, 2018a)。人手作業難易度と加工点および作業内容の汎用度を定義し、それら2つのパラメータで、図

1-5 のように加工点や作業を 4 種類に分類し、4 象限マップで表現した。各象限は下記のとおりである。

第 1 象限 人手作業が難しく、加工点の個別性が高い領域で、加工点技術と専用の製造装置を開発、保有することで、競合他社との差異化を実現する。

第 2 象限 人手作業が難しく、加工点の汎用性が高い領域であり、対象加工点を処理する汎用設備や専用設備が市販されている。市販設備を購入し、いかに使いこなすかが重要となる。

第 3 象限 人手作業が易しく、加工点の汎用性が高い領域で、人手作業に置き換えて自動化設備の導入を進める領域であるが、設備投資額の低減が要求される。産業用ロボットや汎用ユニットの組み合わせなどで低コストに自動化することが求められる。

第 4 象限 人手作業が易しく、加工点の個別性が高い領域である。個別性が高いために開発費が大きくなり、自動化が進みにくい領域である。製品設計の変更で第 3 象限へのシフトを狙うか、人手作業のアシスト治具などにより、製造の合理化を進める。

この例では、人手作業難易度と加工点および作業内容の汎用度の 2 つのパラメータにより、現実的な製造ラインを考慮した分類方法になっていることがわかった。しかし、その手順化や設計法については説明されていなかった。

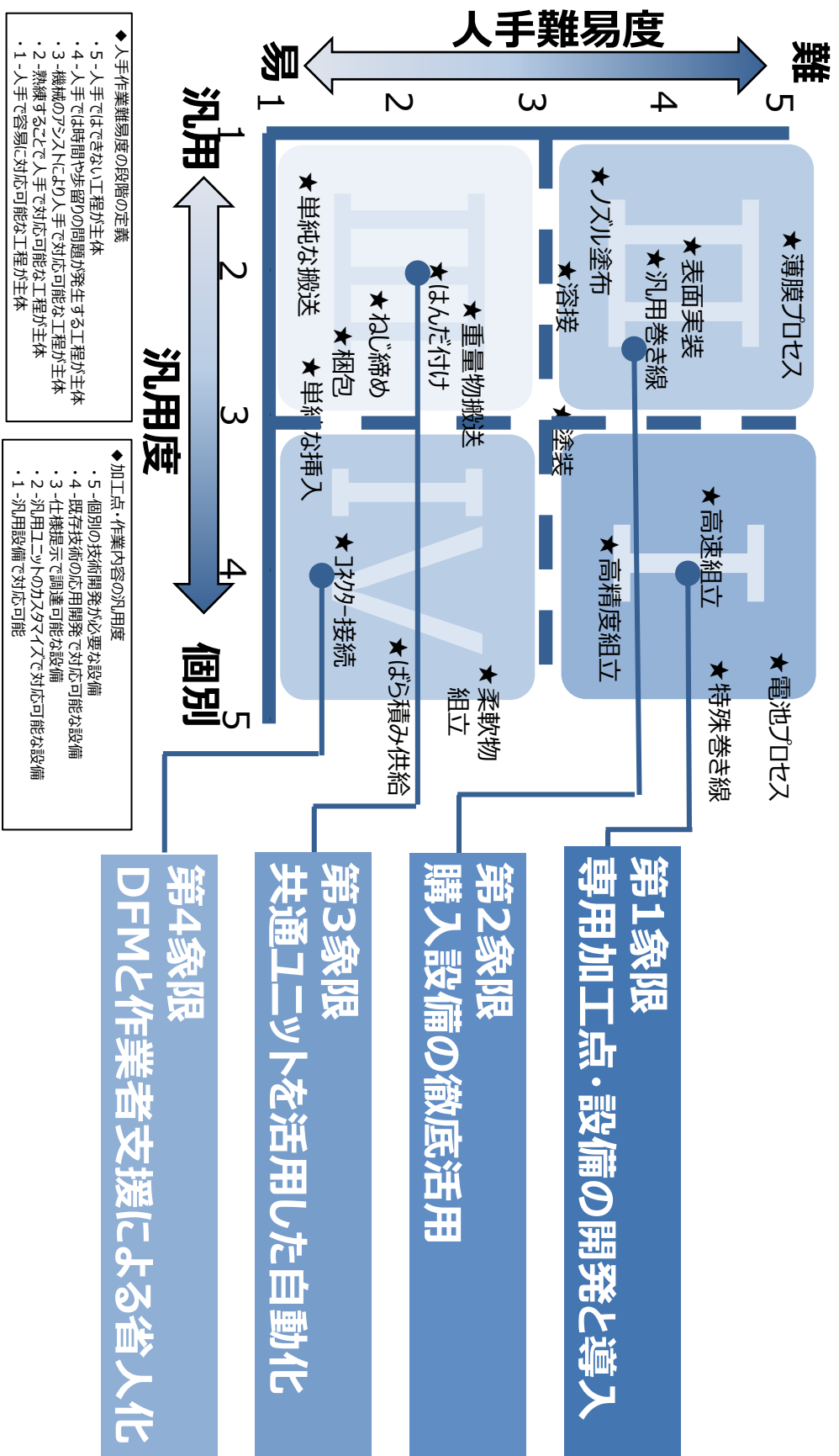


図 1-5 製造業における設備活用に向けた加工点や作業の分類事例
(宮内・深津・原野 (2018a) をもとに再作成)

1.5.2 人手あるいはロボットの作業タイプ選択における課題

前述の 1.5.1 節(1)~(3)で、工程の特性に応じた作業員、ロボットおよび製造装置の選択方法の事例を調べた。その結果は以下のものである。

調べた 3 例のすべてにおいて、製造ラインの設計にあたり、各作業を作業員で対応するか、あるいは製造装置やロボットにより自動化するかの選択が必要であることが示されていた。さらに、すべての例において、コストに関する評価が必要であることも記されていた。一方で、作業員と製造装置を選択するためのパラメータは、それぞれの例で異なっていた。また、すべての例において、作業員、ロボットおよび製造装置の選択方法の方向性は示されていたが、手順化には至っていないことがわかった。例えば、東芝グループの事例では、人手作業難易度と加工点および作業内容の汎用度の 2 つの軸により、現実的な製造ラインを考慮した自動化・機械化の方向性があったが、具体的な設計手順は示されていなかった。

以上の結果から、製造ラインを構築する際の人手あるいはロボットの作業タイプ選択方法の手順化や設計法が求められていることがわかった。

1.6 組立ライン設計の先行研究とその課題

1.5 節では、工程の特性に応じた作業員、ロボットおよび製造装置の選択方法の事例を調べた。その結果、実際の製造ライン設計における作業員、ロボットおよび製造装置の選択に関する評価尺度が統一されていないことがわかった。1.6 節では、組立ラインを中心に、ライン設計に関する先行研究を調べ、課題を抽出する。

1.6.1 組立ライン設計の先行研究

(1) 組立ラインの自動化推進に関する先行研究

表 1-1 に、ロボットや製造設備を用いた組立ライン設計に関する先行研究を示す。

表 1-1 においては、先行研究ごとに、組立ラインの各作業におけるロボットあるいは製造装置と人の選択に関する内容の有無を、作業方法の選択肢という欄に記述した。さらに、各先行研究の主な内容と定式化の有無、研究目的として、定式化のある研究はその目的関数、定式化なしの研究はライン設計の際に目的とした内容を記入した。

泉 (2002) は、自動化構想を推進する際の基本的な考え方を整理した。しかし、

具体的なライン設計の手順や設計法については説明していなかった。村山(2018)は、主体作業、搬送、検査、保守などの自動化状況から、設備や製造ラインの自動化レベルを定義した。この指標は、設備や製造ラインの単位での自動化状況の把握に活用できるが、手作業の製造ラインを自動化する際の作業分析に活用することは目的としていなかった。

また、小林ら(2017)は、組立作業をモジュール分割し、工程設計を進める方法を提案した。この中で組立作業には、ロボットで実施可能な作業と実施不可能な作業があることから、ロボットに対しては実施可能な作業のみを割り当てるロボット制約を考慮している。昆・荊木(2010)は、組立作業の自動化に必要な自動組立技術と自動化に適した製品設計の考え方について事例を用いて説明した上で、自動組立ラインの設計手順について概略的に述べている。しかし、これらの研究においては、手作業の組立ラインを自動化に向けて分析し、ライン設計を行う具体的な手順や設計法については触れられていなかった。

表 1-1 ロボットや製造設備を用いた組立ライン設計に関する先行研究

文献	作業方法の選択肢		内容		目的						数値実験の対象	
	ロボット あるいは 製造設備	人	組立 ライン 設計	自動化推 進	ラインバ ランシ ング	経済性		生産ライン		自動化		
						定式化	コスト 最小化	利益 最大化	サイクル タイム 最小化	総ステー ション 数 最小化		総自動 化 難易度 最小化
泉 (2002)	✓	✓	✓	✓		✓ ^(*)2)	✓ ^(*)2)					なし
村山 (2018)	✓	✓	✓	✓		✓ ^(*)2)	✓ ^(*)2)					自動車部品製造
小林ら (2017)	✓	✓	✓	✓								ノートパソコン組立
星ら (2010)	✓	✓	✓	✓		✓ ^(*)2)						プリンター用消耗資材
Pinto et al. (1983)	✓	✓	✓	✓		✓ ^(*)3)						自動車部品の組立
浜田ら (1990)	✓	✓	✓	✓			✓ ^(*)3)					定義された例題
Ruvimovitz et al. (1993)	✓	✓	✓	✓								ホタテガイの養殖作業
Levitin et al. (2004)	✓	✓	✓	✓					✓ ^(*)3)			ランダムに生成した例題
Gao et al. (2009)	✓	✓	✓	✓					✓ ^(*)3)			ベンチマーク問題
Yoosefelahi et al. (2012)	✓	✓	✓	✓					✓ ^(*)3)			ベンチマーク問題
Niakantan et al. (2017)	✓	✓	✓	✓					✓ ^(*)3)			ベンチマーク問題
Çil et al. (2017)	✓	✓	✓	✓					✓ ^(*)3)			ベンチマーク問題
Lopes et al. (2017)	✓	✓	✓	✓					✓ ^(*)3)			自動車の搭接
宮内ら (2020)	✓	✓	✓	✓					✓ ^(*)2)		✓ ^(*)2)	電子機器組立
T. Miyachi et al. (2020)	✓	✓	✓	✓					✓ ^(*)3)		✓ ^(*)3)	電子機器組立
宮内ら (2021)	✓	✓	✓	✓					✓ ^(*)3)		✓ ^(*)3)	電子機器組立

*1: ラインバランスの記述や定式化の記載はないが、提案システム内でラインバランスの実施の可能性があった項目

*2: 定式化は行っていないが、ライン設計の目的として記載されていた項目

*3: 定式化を行い、その目的関数として設定されていた項目

本研究の範囲

(2) ラインバランシングを用いた組立ライン設計に関する先行研究

これまでに、組立ラインの設計をラインバランシング問題として解決する手法が多く提案されている。ラインバランシングとは、製造ラインの各作業ステーションに割り付ける作業量を均等化する手法である (2.3.1節参照)。ここでは、ロボットや製造設備を用いた組立ライン設計にラインバランシングを適用した先行研究を調べる (表 1-1)。

Pinto, Dannenbring and Khumawala (1983)は、設備導入コストと人件費の両方を含む総費用を、ラインバランシングを用いて、最小化する手法を提案した。宮崎・太田(1990) は、Pinto, Dannenbring and Khumawala (1983) の手法を導入設備の選択判断に展開し、浜田ら (1997) は、設備の稼働率の季節変動を考慮して設備投資の有効性を検討する手法を示している。Rubinovitz, Bukchin and Lenz (1993) は、サイクルタイムを最小化するように、利用可能な複数のロボットの種類から選択し、作業ステーションに割り当てる問題を、ロボット組立ラインバランシング (Robotic Assembly Line Balancing; RALB) 問題として、はじめて定式化した。Levitin, Rubinson and Shnits (2004) は、RALB問題に、GA(Genetic Algorithm; GA)を適用した解法を提案し、Gao et. al. (2009) は、GAを改善し、計算時間を短縮することで、大規模問題にも適用できる方法を示した。さらに、Yoosefelahi et. al. (2012) は、ロボットの購入および導入コストを考慮したRALB問題を取り扱っている。Nilakantan et. al. (2017) は、サイクルタイムとラインコストを目的関数としたRALB問題に、DE (Differential Evolution; DE) を適用し、Çil, Mete and Ağpak (2017) は、複数品種を対象としたRALB問題を取り扱った。そして、Lopes et. al. (2017) は、ロボットを用いたスポット溶接の製造ラインのラインバランシング問題を扱い、実際の自動車工場での事例に適用した。

以上のように、ロボットや製造設備を用いた組立ラインの設計にあたって、コスト、サイクルタイムや総ステーション数の最小化を目的としたラインバランシング問題として扱う多くの研究が行われている。しかし、組立ラインの設計時に、人手あるいはロボットや製造設備を選択して導入することを目的とした先行研究は、Pinto, Dannenbring and Khumawala (1983) など少なかった。また、ロボットや製造設備の導入にあたり、コストの最小化や利益の最大化を目的としている先行研究においては、ロボットや製造設備のコスト情報が既知であることが前提となっていた。このような、ロボットや製造設備のコスト情報が既知あることを前提としている課題については、1.6.2節で考察する。

1.6.2 組立ライン設計における自動化推進とラインバランシングの課題

この節では、1.6.1節(1)と(2)で調べた組立ライン設計における先行研究の課題について述べる。

1.6.1節(1)では、組立ラインの自動化推進に関する先行研究を調べた。その結果、自動化にあたっての考え方や、現状ラインの自動レベルを示す指標などが示されていたが、個々の作業内容を自動化に向けて整理する手法については、説明されていなかった。

次に、1.6.1節(2)では、ロボットや製造設備を用いた組立ラインの設計をラインバランシング問題として扱う研究を調べた。今回調べた先行研究のうち、コスト最小化や利益の最大化を目的としている研究では、ロボットや製造設備のコスト情報をライン設計の初期段階で取得することが必要となっていた。しかし、実際の設計現場では、ロボットや製造設備のコスト情報をライン設計の初期段階で取得することが困難であるケースもある。Hazira, Delormeh and Dolgui (2015) は、コストと利益を考慮したRALB問題に関するレビュー論文をまとめた。その中で、多くのコストを扱ったRALB問題の研究では、コストに関するデータがライン設計の初期段階で得られることを前提としているが、実際には、これらのデータを得られるとは限らないと指摘している (Hazira, Delormeh and Dolgui, 2015)。

この原因として、多様な作業が複合される組立工程では、作業内容によっては市販の汎用設備で自動化することができずに、自動化設備を個別開発することが必要となることが考えられる (宮内・深津・原野, 2018a)。一例として、自動化設備を個別開発する際の手順を説明する。はじめに、人手による作業内容を調査し、それにもとづいて要求事項を整理する。次に、機構学、制御工学、画像認識技術などの要素技術に分解してそれぞれの技術開発を行う。そして、これらの技術を組み合わせて、自動化設備としてシステム化し、最後に、多数サンプルでの検証作業を行ったのちに、製造現場に導入される (村山, 2018)。しかし、液晶ディスプレイの検査工程の自動化に1年以上費やしたケースなど、技術開発を伴う場合には、概算費用の算出すら難しいケースも存在した (図 1-6) (宮内・鈴木・妹尾, 2010)。

以上により、ライン設計の初期段階で、ロボットや製造設備のコスト情報を得ることができないケースもあることが示された。したがって、ライン設計の初期段階にロボットや製造設備のコスト情報を得ることができない場合に、人とロボットや製造設備を適切に選択して、組立ラインを設計する方法が必要であることがわかった。

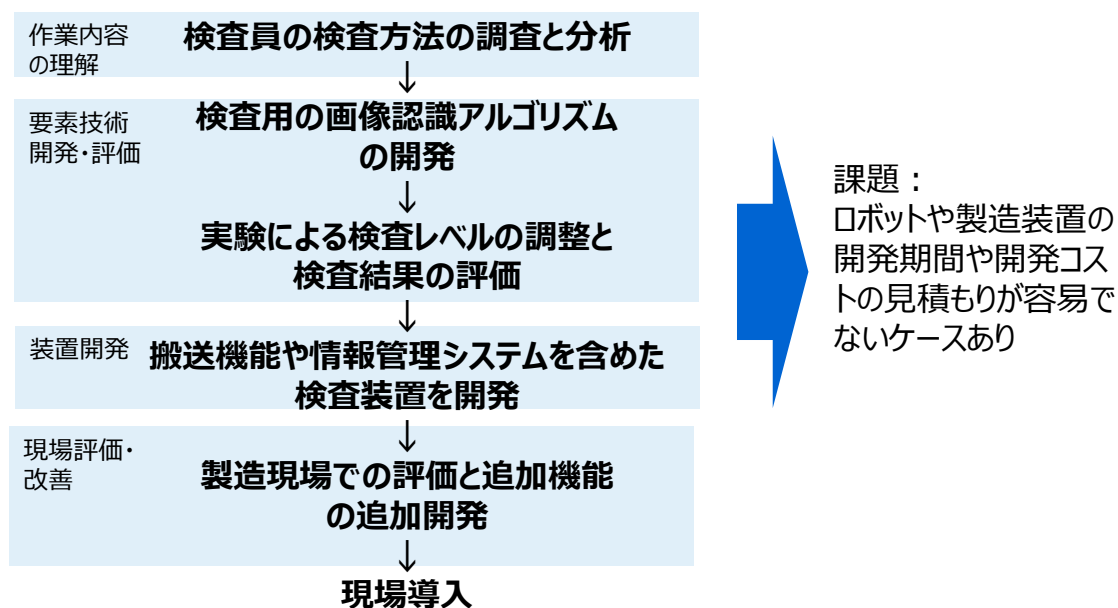


図 1-6 事例：液晶ディスプレイ組立工程の自動検査装置
(宮内・鈴木・妹尾 (2010) より作成)

1.7 本研究の目的

図 1-3 で示したように、製造業の就労人口の減少、苦渋作業からの解放、および多様化する製品要求などの社会的要請に対して、ロボットと製造装置による省人化および製造プロセスの多様化の対応が求められている (1.2 節)。これに対応するためには、ロボットや製造装置の知能化と、それらを組み合わせて製造ラインや工場全体の自動化を進める 2 つのアプローチが必要である (1.3 節と 1.4 節)。後者の製造ラインや工場全体の自動化を進めるアプローチについて調べた結果、作業員、ロボットおよび製造装置の作業選択についての方向性は示されていたが、手順化はされていないことがわかった (1.5 節)。さらに、組立ラインを中心に、人とロボットを配置するライン設計法に関する先行研究を調べた結果、設備導入コストが既知のデータとして与えられていることを前提としていることがわかった。しかし、組立ラインでは、設備費や運用・保守費の具体的なコストデータを得ることができるのは、設備の詳細設計フェーズの事後になってしまうケースが多く、そのような場合の設計法は提案されていないことが課題であることが示された (1.6 節)。

以上の結果を受けて、本研究では、設備費や運用・保守費の具体的なコストデータを得られていない状態で、作業の自動化難易度が作業ごとに異なることに着目して、人とロボットを同時に配置するハイブリッド組立ラインの設計法を提案することを目的とする。

1.8 本研究の構成

本論文は、図 1-7 に示すように 6 章で構成されている。1 章では、就業人口の減少、苦渋作業からの解放と製造プロセスの多様化などの社会的な要請に対する 1 つの施策として、組立ラインの設計法に関する課題について説明した。

2 章では、組立ラインの構成と、人手作業やロボットによる自動化の状況および従来のライン設計手法について整理する。3 章では、人とロボットを配置するハイブリッド組立ラインを作業の自動化難易度にもとづいて設計する手順について説明する。4 章では、ハイブリッド組立ラインの設計法について述べる。作業の自動化難易度を考慮したハイブリッド組立ラインの設計問題を 0-1 整数計画法として定式化し、事例に対して数値実験を行い、その結果について考察する。5 章では、4 章で定式化した 2 段階設計法を、より作業数の多い、実際の電子機器製造ラインに適用した結果を説明する。

6 章では提案した設計法の成果をまとめるとともに、今後の課題と展望について述べる。

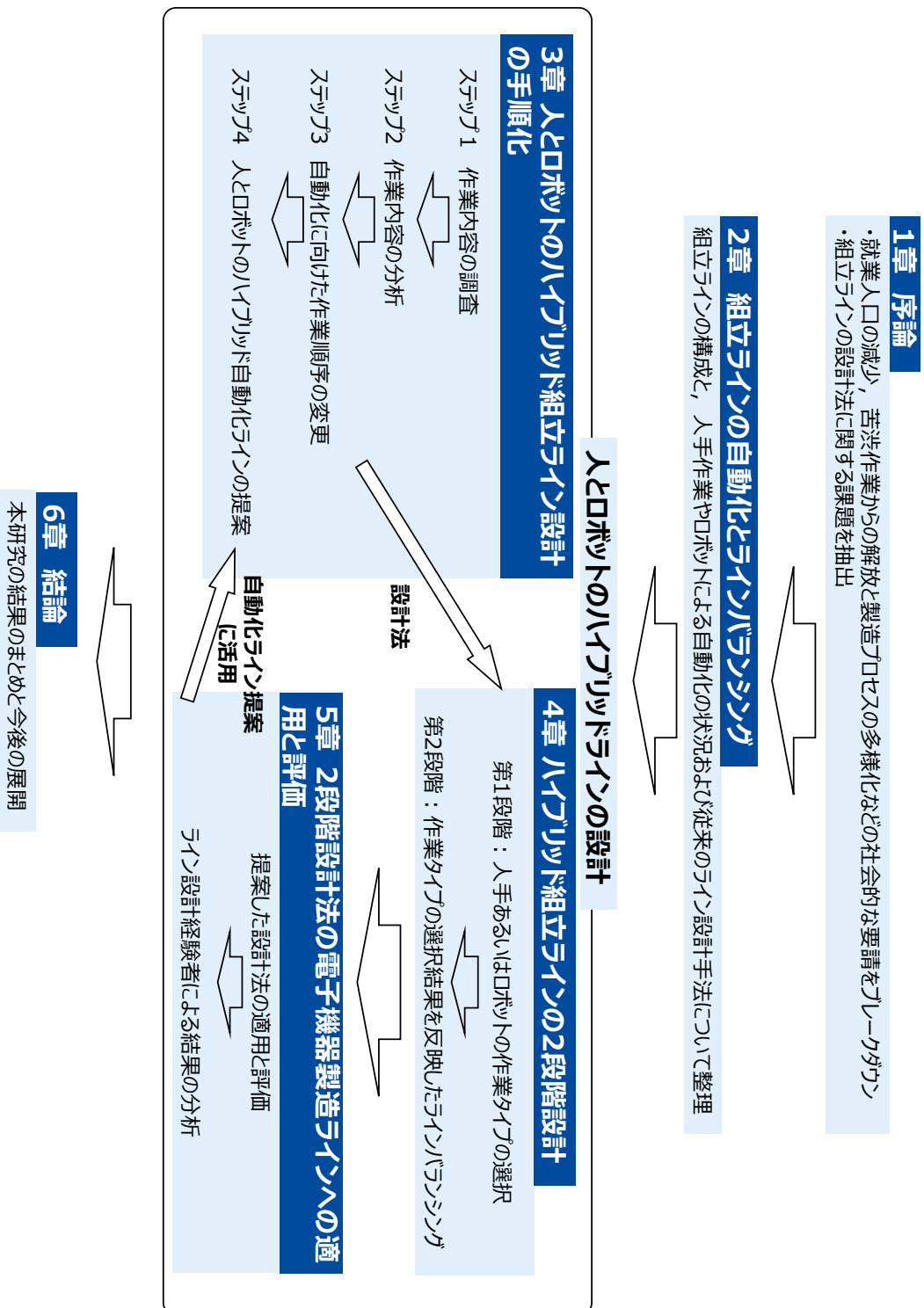


図 1-7 本論文の構成

2. 組立ラインの自動化とラインバランシング

2章では、組立ラインの自動化とラインバランシングについて、用語の説明を含めて説明する。2.1節で組立ラインと作業の先行順位について述べ、2.2節では、人手を中心とした組立ラインとロボットによる組立ラインの自動化について説明する。最後に、2.3節で、ラインバランシングによる組立ラインの設計について、0-1整数計画法とヒューリスティックス解法の2つの方法を示す。

2.1 組立ラインと作業の先行順位

2.1節では、本研究の対象である組立作業の定義と、組立作業を実現するための組立ラインについて説明する。さらに、組立作業の重要な制約である作業の先行順位について述べる。

2.1.1 組立作業と組立ライン

工業製品は、複数の部品や別に組立てられたサブアセンブリで構成されている。そのため、これらの部品やサブアセンブリと潤滑剤や接着剤などの材料を用いて、製品として組み立てる作業が必要である。Nof, Wilhelm and Warnecke (1997)は、組立 (Assembly) を、「多様な部品やサブアセンブリを組み合わせて、幾何学的に設計された完成品を形成するために、個別工程、バッチ工程、または連続工程のいずれかで行われるすべての工程の集合体」と定義している。

組立作業を実施するためには、作業員、機械および製造設備を配置し、必要な作業を順次通過していく組立ラインが用いられる (Nof, Wilhelm and Warnecke, 1997)。1913年にHenry FordとCharles Sorensonが、フライホイールの組立作業に、はじめて組立ラインを導入したとされる。それまでは、各作業員がそれぞれの作業台で、1製品あたり20分かかっていた作業を、組立ラインを導入し改善することで、最終的に5分に短縮することができた (Nof, Wilhelm and Warnecke, 1997)。

組立ラインの作業と部品の流れを、図 2-1に示す (人見, 1991)。組立ラインの先頭に、他の部品が組み付けられる部品を連続して供給し、各作業ステーションに搬送して部品の組付けを順次行い、すべての作業を完了すると、完成品として生産ラインから出力される (大場・藤川, 2009)。

組立ラインの各作業ステーションにおける作業は、部品の組み付け作業が主であるが、それ以外にネジ締めや接着剤塗布などの組み付けプロセスに必要な作業、部品の搬送作業、および検査作業などの付随作業も行われる (昆・荊木, 2010; 谷口, 1971; 佐藤, 1990)。製品に求められる機能や部品コストの要求などが

ら、部品数や組み付け方法が決定されるため、電子機器や家電などでは、多くの作業が必要となる場合もある。白物家電の例では、図 2-2に示すように全作業数が208あり、その他を含めて14種類の作業が行われたケースが報告されている(中山・翁・大成, 2017)。

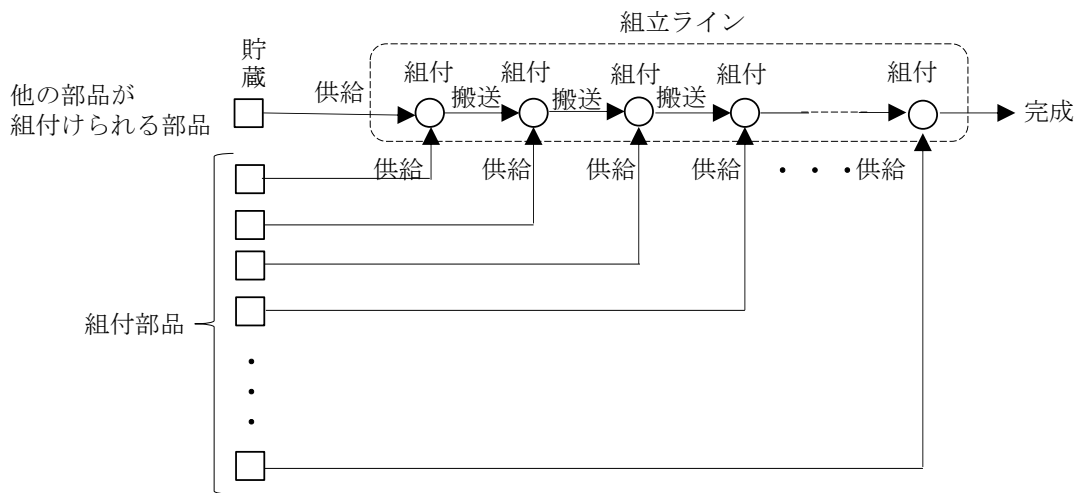


図 2-1 組立ラインの作業と部品の流れ
(人見 (1991) をもとに再作成)

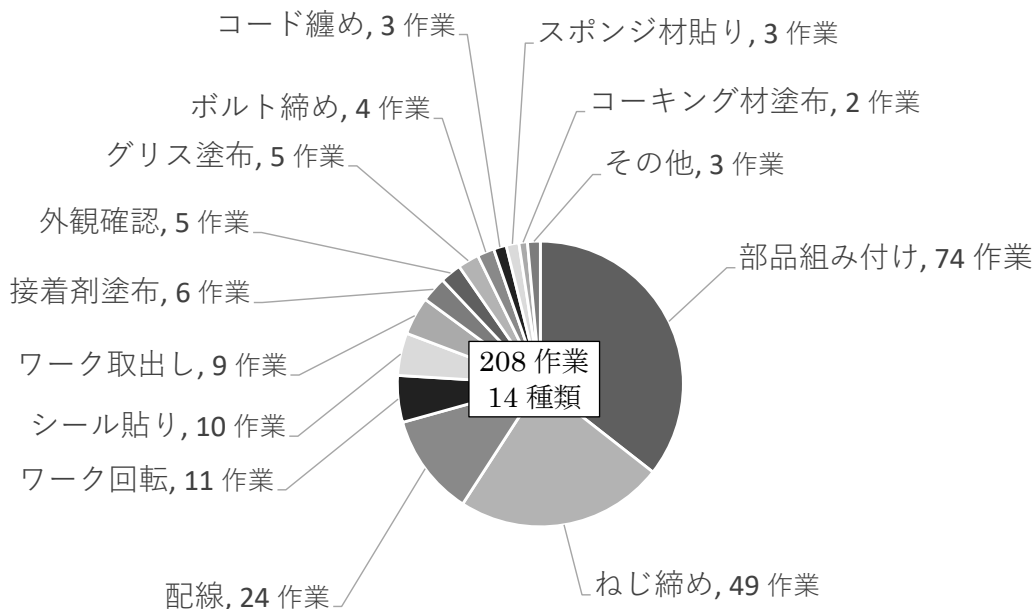


図 2-2 白物家電の組立作業の例
(中山・翁・大成 (2017) をもとに再作成)

2.1.2 作業の先行順位

組立ラインを構成する際には、1つの製品を完成させるのに必要なすべての作業を分割して、各作業ステーションに割り付ける。このとき、各作業の間には先行順位関係という作業手順の制約が生じる。例えば、図 2-3 のように、ねじを穴に入れてからねじを締めることはできるが、ねじを締めてからねじを穴に入れることはできない (大場・藤川, 2009)。このような、作業の実施順序に課せられた技術的制約を表現したものが先行順位図であり、その例を図 2-4 に示す。図中の小さな円は作業を表し、円の内側の数字は作業番号、外側の数字は作業を実施するために要する時間を示している。また、円を結ぶ矢印は、作業の先行関係を示している (黒田, 1984)。

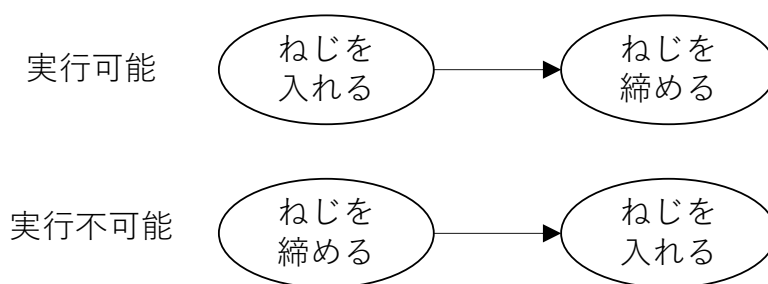


図 2-3 ねじ締め作業における先行順位関係の例
(大場・藤川 (2009) をもとに再作成)

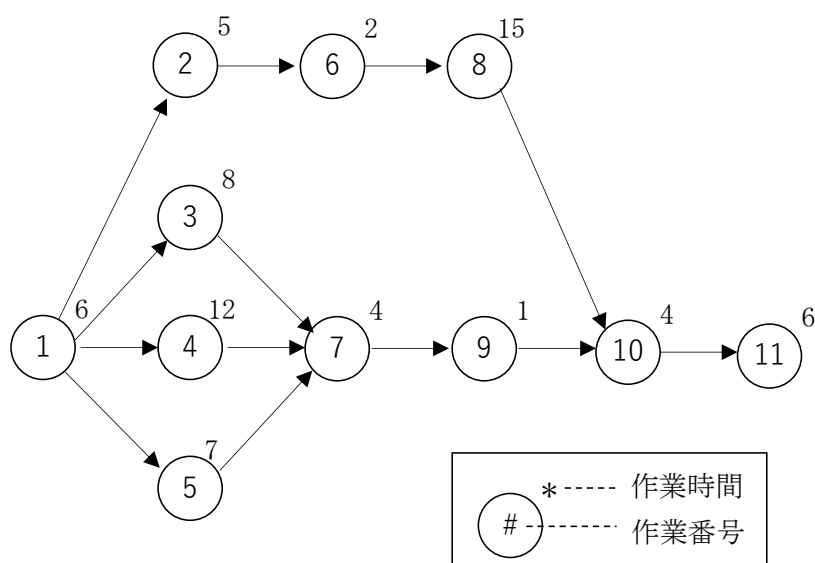


図 2-4 先行順位図の例 (黒田 (1984) をもとに再作成)

2.2 組立作業の自動化

本研究で取り扱うハイブリッド組立ラインは、人とロボットを配置するものである。1913年にHenry FordとCharles Sorensonが初めて導入した組立ラインは、人手により構成されており、はじめての自動機である自動挿入装置が導入されたのは、1958年であるとされる (Nof, Wilhelm and Warnecke, 1997)。このように、組立ラインは、人手による構成から始まり、その後、作業の自動化が行われてきた。

2.2節では、この順に従い、はじめに人手作業について説明し、次にロボットによる自動化の状況について説明する。

2.2.1 人手による組立作業

本研究で取り扱うハイブリッド組立ラインは、人とロボットを配置するものである。2.2.1節では、前者の人による作業について説明する。

組立ラインを、人手を中心に構成する場合には、はじめに、各作業の人手による作業時間を動作研究などにより設定する (大場・藤川, 2009)。そして、それらを総計して総作業時間を算出し、生産目標台数と稼働時間からサイクルタイムを設定する (高田・杉山, 2012)。次に、総作業時間とサイクルタイムから必要な最小の総ステーション数を算出し、作業を割り付ける。サイクルタイムとは、生産ラインに資材を投入する時間間隔のことであり、通常は完成した製品が出力される時間間隔に等しい。必要な需要量を満たす生産量を確保するにはためには、このサイクルタイムの管理が重要である (大場・藤川, 2009)。ここで、製品によっては、2.1.2節で説明したように部品の組み付け順序の制約があることから、2.3節で説明するラインバランシングなどの手法を用いて、サイクルタイムや組み付け順序の制約を満たしながら遊休時間の少ない組立ラインを設計する (黒田, 1984)。

人手作業においても、作業者は、様々な治具や簡易的な装置を用いて、各作業を実施する。例えば、部品搬送に自動コンベアを用いることで、人手による搬送作業を省くことができる (不二越搬送システム研究グループ, 1990)。さらに、ねじ締め作業においては、ねじ自動供給機や電動ドライバー、接着剤の塗布には、定量を正確に吐出するディスペンサーなどを用いて、人手作業を支援することで、作業時間の短縮と品質の確保を図ることができる (ハイオス, 2019; 岩下エンジニアリング, 2021)。また、これらの装置、治具や部品などの導入に際しては、作業が効率的に行えるように、IE (Industrial Engineering; IE) の観点でレイアウト設計が行われる (高田・杉山, 2012)。IEは、1911年のF. W. Taylorの科学的管理法

から始まったといわれ、製造現場を中心とした企業経営の合理化、改善、生産性向上を目指す管理技法である（日本機械学会, 2005a）。

さらに、人手中心の組立ラインを構成し、実作業が開始したのちも、作業者が実施しにくい作業や製品品質にかかわる作業は、製品設計にフィードバックを行い、設計面からの見直しをするとともに、治具化、自動化などにより、作業品質の向上を検討する必要がある（高田・杉山, 2012）。

2.2.2 ロボットによる組立作業の自動化

本研究で取り扱うハイブリッド組立ラインは、人とロボットを配置するものである。2.2.2 節では、後者のロボットの定義と本研究での位置づけを説明する。

G. G. Devol により、産業用ロボットに関する特許が 1954 年に出願され、1959 年に世界で初めて実用的な産業用ロボットが完成したとされる（長谷川, 1980）。日本においては、1967 年に豊田織機が米国 AMF 社から納入したのが産業用ロボットの輸入第 1 号である（長谷川, 1980）。その後、国内外のメーカーが次々と参入し、2020 年には全世界で 272 万台の産業用ロボットが稼働している（International Federation of Robotics, 2021）。さらに、新エネルギー・産業技術総合開発機構（2010）の予測では、2035 年には、製造分野のロボット市場は 2015 年の 2.7 倍に相当する 2.7 兆円に拡大すると予想されており、今後も展開が進むと考えられる。

新エネルギー・産業技術総合開発機構（2014）が発行した NEDO ロボット白書 2014 によると、ロボットという用語の範囲は広く、完全に一般性をもった定義というものは存在しない。ロボット政策研究会（2006）は、ロボットを「市場で必要とされる機能を発揮するために要素技術を統合したもの」という視点で、「センサー、知能・制御系、駆動系の 3 つの要素技術を有する、知能化した機械システム」と定義している。

本論文内では、ロボット政策研究会（2006）の考え方を採用することとし、ロボットを組立ラインの自動化を目的としたシステムとしてとらえる。具体的には、カメラなどの各種センサーと、産業用ロボットや直動アクチュエーターなどの駆動系および、モノを持つためのハンドや加工点を備えたエンドエフェクターを統合して、人間の作業を代替できるシステムを示すこととする。

2.2.3 人手あるいはロボットの作業タイプ選択

経済産業省 産業用ロボット導入ガイドライン（経済産業省中部経済産業局・名古屋工業大学 産学官連携センター, 2017）では、製造装置やロボットの導入に

際して作業量と作業の複雑さによって「人手」、「ロボット」と「専用機」の選択を行うことを提案している。また、東芝グループの事例では、人手で可能な作業は、加工点の汎用性により、人手で行うかロボットなどによる自動化を行うかの判断が必要とされている (宮内・深津・原野, 2018a)。

さらに、同じ作業を人手で行った場合とロボットで行った場合の作業時間は異なることがある。これは、人は複雑な作業を習熟によって短時間に行うことが可能である一方で、ロボットは単純な作業を繰り返し高速に一定の作業時間で行うことが容易であり、特性が異なるためである (原田, 2018)。

これらの状況から、人とロボットの両方を配置する組立ラインの設計においては、各作業における自動化を進める難易度と人とロボットの作業時間を考慮して、人手あるいはロボットの作業タイプ選択を行う必要がある。

図 2-5は、このような必要性から、作業の自動化難易度と人とロボットの作業時間を追記した先行順位図の例である (宮内・山田・杉, 2021a) (詳細は4.2節)。例えば、作業番号2の作業は、作業の自動化難易度がA, 人手の作業時間は3 [sec]でロボットによる作業時間は2 [sec]である。ここで、作業の自動化難易度とは、ロボットを用いて人手作業を自動化する際の、技術的な難しさとシステムの開発工数の大きさから設定される指標であり、3.2節で詳しく説明する。

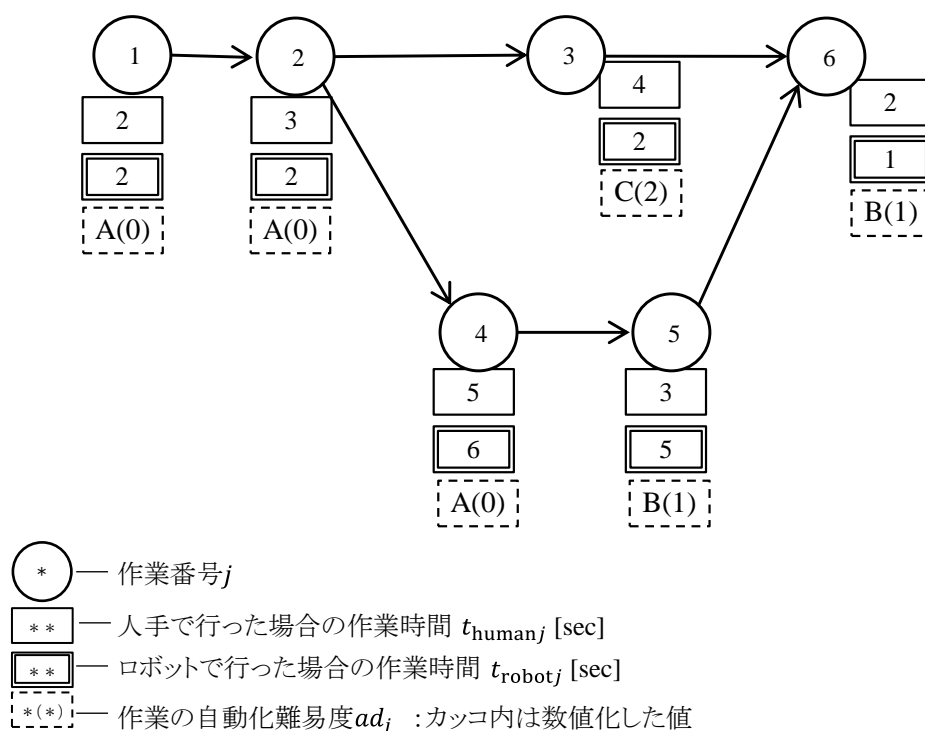


図 2-5 作業の自動化難易度と人とロボットの作業時間を追記した先行順位図の例
(宮内・山田・杉 (2021a) をもとに作成)

2.3 ラインバランシングによる組立ラインの設計

2.3.1 ラインバランシング

ラインバランシングとは、生産ラインの各作業ステーションに割り付ける作業量を均等化する方法である (大場・藤川, 2009)。黒田 (1984) は、ラインバランシングを、「組立ラインの総遊び時間が最小になるように、サイクルタイムの制約、作業要素間の先行関係、その他の付加的な制約を満たしながら、すべての作業要素を作業ステーションに配分する問題」と定義した。

図 2-6に、ラインバランシングの分類と本研究で対象としている人とロボットを配置するライン設計の位置づけを示す。Chutima (2020) のレビュー論文によると、ラインバランシングの分類法の1つは、SALB (Simple Assembly Line Balancing) と GALB (General Assembly Line Balancing) である。SALBは、ラインのレイアウトが直線であり、単一製品が組み立てられること、すべての作業はどの作業ステーションでも実行可能であること、すべての作業ステーションがどの作業も実行可能であること、すべての入力パラメータが得られることを満たすラインバランシング問題を指す。一方で、分岐を含むライン構成、複数製品の対応や作業ステーションの対応可能な作業に制約がある場合など、SALBで設定していない仮定を用いたものを、GALBとするとされる。

さらに、SALBは、目的関数にもとづいて、タイプIとタイプIIという2つのグループに分類される。タイプIは、サイクルタイムを固定して総ステーション数を最小化するものであり、タイプIIは、総ステーション数を固定してサイクルタイムを最小化するものである (Hazira, Delorrieh and Dolgui, 2015)。ここで、サイクルタイムを固定して総ステーション数を最小化するSALBをSALB-Iと呼び、総ステーション数を固定してサイクルタイムを最小化するものをSALB-IIと呼ぶ。Rubinovitz, Bukchin and Lenz (1993) は、SALBを拡張して、作業ステーションにロボットを配置するラインバランシング問題を、RALB (Robotic Assembly Line Balancing) と呼び、SALBと同様に目的関数により、RALB-IとRALB-IIに分類した。さらにRALBを発展させて、品種切り替えや複数の品種を同一ラインで生産する多品種生産を対象とした方法も提案されている (Çil, Mete and Ağpak, 2017)。なお、図 2-6には、本研究で対象としている人とロボットの両方を配置するラインバランシングを追記した。

本研究では、4章のハイブリッド組立ラインの2段階設計と5章の2段階設計法の電子機器製造ラインへの適用と評価において、総ステーション数最小化を目的としたRALB-Iにおける人とロボットの両方を配置するラインバランシングを取り上げている。

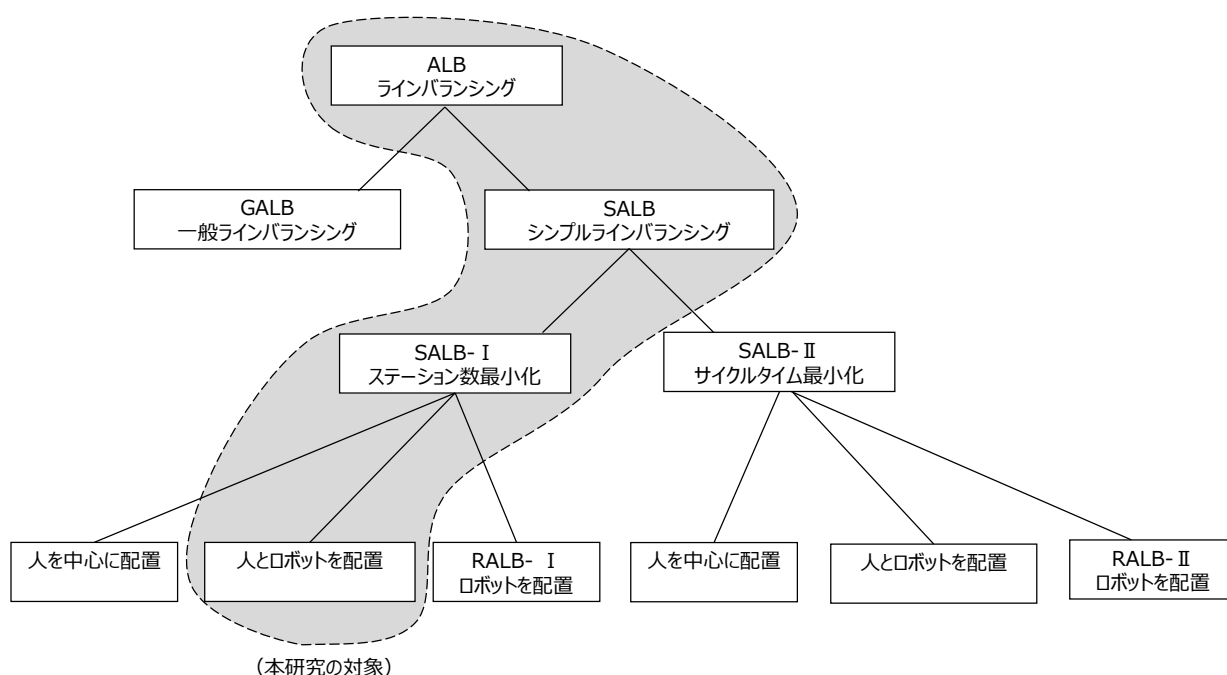


図 2-6 ラインバランシングの分類と本研究の対象

(Chutima (2020), Hazira, Delorneh and Dolgui (2015), Rubinovitz, Bukchin and Lenz (1993), Miyauchi and Yamada (2020), 宮内・山田・杉 (2021a) をもとに作成)

2.3.2 0-1 整数計画法によるラインバランシングの解法

ラインバランシングは主に、数理計画により解を求める方法とヒューリスティック解法による方法がある (Nof, Wilhelm and Warnecke, 1997)。数理計画により解を求める方法では、最適解であることが保証されるが、大規模な問題では、計算時間が長くなることが課題となる (Nof, Wilhelm and Warnecke, 1997)。一方で、ヒューリスティック解法では、最適解とは限らないが比較的良好な解を、短い時間で得ることができる (Nof, Wilhelm and Warnecke, 1997)。2.3.2節では数理計画として0-1整数計画法、2.3.3節ではヒューリスティック解法による Jackson の列挙法、Kilbridge と Wester の方法と位置的重み付け法について説明する。

(1) 0-1 整数計画法

最適化問題は、与えられた制約条件の下で、目的関数の値を最小あるいは最大にする解を1つ求める問題である。一方で、線形計画問題は、目的関数が線形で制約条件が線形等式や線形不等式で記述される最適化問題である (梅谷, 2014)。多くの現実の問題では、決定変数は実際には整数値でなければ意味をなさないことがあるとされる。例えば、人、機械、車両は、5人や5台などと整数値で割り当てる必要があることが多い。このような、すべての変数が離散的な整数値のみ

を取る線形計画問題は、整数計画問題と呼ばれる。

さらに、整数と指定された決定変数を0あるいは1に限定する場合には、0-1整数計画問題と呼ばれる (Hillier and Lieberman, 2004; 宮代・松井, 2006)。実際の組み合わせ問題の多くは、YesかNoの0あるいは1の2値変数の問題に変換することができる。そのため、一般的な整数計画問題を0-1整数計画問題に変換して扱うことで、問題が簡易になることがある。そして、この0-1整数計画問題を解くのが、0-1整数計画法 (0-1 Integer Programming; 0-1IP) である。図 2-7に、0-1IPの例を示す(Hillier and Lieberman, 2004)。この例は、新工場と新倉庫を建設するための必要資本や建設都市に関する制約がある中で、現在正味価値の合計値を最大化するように工場と倉庫を建設する都市を選択する問題である。工場および倉庫をそれぞれの都市に設立するかどうかをYES (1) あるいはNo (0) の質問にすることで、0-1IPとして定式化をおこなっている。

多くの線形計画ソルバーは、一般的な整数計画問題と、0-1整数計画問題の両方を解くためのアルゴリズムが搭載されている。しかし、2値変数は一般的な整数変数よりも扱いやすいため、0-1整数計画問題を解くためのアルゴリズムは、一般的な整数計画問題を解くためのアルゴリズムよりも、一般的に大きな問題を解くことができるとされる。0-1IPには、このような利点があるために、投資分析、拠点選択、生産・流通ネットワーク設計など、多くの問題解決に適用されている (表 2-1) (Hillier and Lieberman, 2004)。

2.3.1節で示したSALB- I も、総ステーション数の最小化を目的とし、2.1.2節の先行順位を制約条件とした0-1IPとして定式化することができる (Nof, Wilhelm and Warnecke, 1997)。

例題

新工場をロサンゼルスかサンフランシスコのどちらか、あるいは両方に建設するときに、下記の目的と制約で建設計画を決定したい。

目的： 正味現在価値NPVの合計値を最大化すること。

制約：

- ① 利用可能な総資本は1,000万ドルとする。
- ② 最大で1つの倉庫を新設する。
- ③ 倉庫は新工場が建設される都市にのみに建設できる。

データ

決定番号	Yes/No質問	決定変数	NPV 現在正味価値	必要資本
1	ロサンゼルスに工場を建てますか？	x_1	\$ 9M	\$ 6M
2	サンフランシスコに工場を建てますか？	x_2	\$ 5M	\$ 3M
3	ロサンゼルスに倉庫を建てますか？	x_3	\$ 6M	\$ 5M
4	サンフランシスコに倉庫を建てますか？	x_4	\$ 4M	\$ 2M

※Mは百万を示す。

定式化

目的関数 $Maximize \quad Z = 9x_1 + 5x_2 + 6x_3 + 4x_4$ ----- 目的

制約条件 $6x_1 + 3x_2 + 5x_3 + 2x_4 \leq 10$ ----- 制約①

$x_3 + x_4 \leq 1$ ----- 制約②

$-x_1 + x_3 \leq 0$ } ----- 制約③

$-x_2 + x_4 \leq 0$ }

x_j is binary, for $j=1,2,3,4$. -----YesかNoの制約

図 2-7 0-1 整数計画問題の例
(Hillier and Lieberman (2004) をもとに再作成)

表 2-1 0-1IP の適用例
(Hillier and Lieberman (2004) より作成)

分類	組織名称	適用先
投資分析	Turkish Petroleum Refineries Corp. (1990)	製油所の能力向上と省エネのための数千万ドルの設備投資分析
	South African National Defense Force (1997)	予算制約を満足しながら、国防軍のトータルな効果を最大化するための特定の機能選択
	U.S. Air Force Space Command (2003)	宇宙司令部において長期投資の最適化
	Grantham, Mayo, Van Otterloo and Company (1999)	80億ドル以上の定量的な資産管理
拠点選択	AT&T (1990)	数10社の顧客の用地選定支援
生産・流通ネットワーク設計	Ault Foods Limited (1994)	生産センターや配送センターの設計
	Digital Equipment Corp. (1995)	グローバルなサプライチェーン全体の再構築
出荷搬送	Sears, Roebuck and Company (1999)	車両ルーティング&スケジューリングシステム (年間4,200万ドル以上の節約)
相互活動	China (1995)	エネルギー需要を満たすための2,400億ドルの新規投資判断
資産売却	Homart Development Company (1987)	資産売却の意思決定 (4,000万ドルの利益)
航空業務	Delta Air Lines (1994)	総利益を最大化するためのフリート割り当て問題
	American Airlines (1989,1991)	乗務員のスケジューリング問題 (年間2,000万ドル以上のコスト削減)

(2) 多目的最適化問題と ε 制約法

実際の問題では複数の要求があるため、最適化問題として定式化すると、目的関数が複数個存在する多目的最適化問題として表現されるケースがある。多目的最適化問題の解法として、線形加重和法や ε 制約法があるが、本研究では、パレート最適解を得ることができる ε 制約法を用いる(吉村, 2007)。ここで、パレート最適解とは、複数の目的関数のうち、ある1つの目的関数の改善のためには、他の目的関数の値が悪化せざるを得ないような解のことである。 ε 制約法は複数の目的関数のうちの1つの目的関数を除いて他を制約関数として取り扱い、それらの制約関数の上限あるいは下限を ε とする方法である(吉村, 2007)。そして、 ε の大きさを逐次変更しながら、目的関数の最小化あるいは最大化を行い、パレート最適解を求めていく。目的関数が f_1 と f_2 の2目的の場合に、 ε 制約法により f_1 を制約条件に含めた場合の定式化は「 $f_2 \rightarrow$ 最小化, $f_1 \leq \varepsilon$, 他の制約条件」のように示される(吉村, 2007)。

(3) 線形計画ソルバー

0-1IPとして定式化したラインバランシング問題は、NP困難な問題として分類される(Chutima, 2020)。NP困難な問題とは、コンピューターの計算が多項式時間内に収まらない問題である(人見, 1991)。そのため、問題の規模が大きくなると急激に計算量が増大するとされる(梅谷, 2014)。このようなNP困難な問題を解くために、効率的なアルゴリズムが開発され、線形計画ソルバーなどで提供されている(宮代・松井, 2006)。

線形計画ソルバーには、ILOG® CPLEX® (IBM, 2017a) やGurobi Optimizer (オクトーバースカイ, 2021) などの商用のものと、GLPK (Makhorin, 2010), SCIP (ZIB, 2021) などの非商用のものに分けられる(宮代, 2012)。一般的には、商用ソルバーのほうが高速だが、商用ソルバーの中にもかなりの計算時間の差があるとされる(梅谷, 2014)。

本研究において、4.4節の小規模事例では、非商用のGLPKを用い、5章の電子機器製造ラインの事例では、CPLEXを用いた。電子機器製造ラインの事例は、小規模問題に比べて問題の規模が作業数の比率で約4倍と大きく、利用した数値実験環境において、GLPKでは解が得られないケースがあったためである。

2.3.3 ヒューリスティックス解法によるラインバランシング

2.3.2節では、0-1 IPによりラインバランシングの解を求める方法について述べた。本節では、ヒューリスティックス解法による方法を説明する。

ヒューリスティックス解法は、できるだけ最適解に近い、いわば‘近似最適解’

を系統的に得るアプローチの1つであり、人間の思考過程を模擬した手続きにより、問題解決過程の試行錯誤を減少することができる（人見, 1991）。こうしたヒューリスティックス解法では、最適解の保証はないが、比較的短い時間で有用な解を求めることができる（Nof, Wilhelm and Warnecke, 1997）。ヒューリスティックス解法の代表的な例として、Jacksonの列挙法、KilbridgeとWesterの方法、位置的重み付け法の3つを挙げる（大場・藤川, 2009）。

(1) Jacksonの列挙法

Jacksonの列挙法では、はじめに第1作業ステーションに割り当て可能な作業のすべての組み合わせを列挙し、次に、第2作業ステーションに割り当て可能な作業のすべての組み合わせを列挙する。これを作業ステーションごとに繰り返す方法である。後続の作業ステーションでは、作業の組み合わせ数が急激に増大するため、重複する連鎖を削除するなどの対応が必要となる（大場・藤川, 2009）。

(2) KilbridgeとWesterの方法

KilbridgeとWesterの方法では、はじめに先行順位において平行する作業ごとに、列の区分を行う。前方の列に属する作業から、各作業ステーションに割り付けを行って、作業時間の合計をサイクルタイムに近づけることを試みる。また、同じ列内に属する作業の割り付け順序は自由に入れ替えることができ、先行順位関係のもとで作業によっては、後続の列へ移動することができる（大場・藤川, 2009）。

(3) 位置的重み付け法

位置的重み付け法では、各作業の作業時間と、これに後続するすべての作業の時間から重み付けの数値を求め、その大きさによって作業ステーションに割り付ける。ここで求められる重みは、先行順位における作業の位置を表す性質を持っているため位置的重みと呼ばれている。位置的重みの大きい作業から、先行順位を満たしかつサイクルタイムを超えないように、作業ステーションに割り付けを行っていく方法である（大場・藤川, 2009）。

本章では、組立ラインの自動化とラインバランシングについて説明した。次の3章では人とロボットを配置したハイブリッド組立ラインの設計手順を説明し、4章と5章では、ラインバランシングを用いたハイブリッド組立ラインの設計法について述べる。

3. 人とロボットのハイブリッド組立ライン設計の手順化

本章では、ロボットなどの設備導入コストの情報が事前に得られていない段階で、作業の自動化難易度を考慮して人とロボットを配置するハイブリッド組立ラインの設計案を作成する手順を、事例を通じて提案する（宮内・山田,2018b; 宮内・山田,2020b）。はじめに、作業の自動化難易度という指標を定義して活用する設計手順を提案し、次に、電子機器製造のライン設計に適用した事例を説明する。最後に、作業の自動化難易度を考慮した人とロボットのハイブリッド組立ライン設計の手順化をまとめる。

3.1 作業の自動化難易度を考慮した人とロボットのハイブリッド組立ラインの設計手順

本節では、人手作業を中心に構成された組立ラインをもとに、人とロボットの両方を配置したハイブリッド組立ラインとして設計する手順を説明する。

3.1.1 ライン設計手順の概要

本章で提案する人とロボットのハイブリッドラインの設計手順を、図 3-1 に示す。このライン設計の目的は、ロボットなどの設備導入コストの情報が得られていない段階で、作業の自動化難易度の低い作業の自動化を優先したライン設計案を作成し、次の作業である投資計算に必要な情報を提供することとする。本研究において、作業の自動化難易度を考慮する理由の1つは、費用対効果の高い製造ラインを構成するためである。これは、作業の自動化難易度の高い作業をロボットに割り当てると、人手で作業するよりも製造コストが高くなることがあるためである。

提案手順は、4ステップで構成される。ステップ1では、作業の自動化難易度の設定や人手作業のビデオ撮影を行い、既存ラインの人手作業内容を調査し、分析のための準備をする。ステップ2では、実際の作業分析を行う。その結果を用いてステップ3では、作業の自動化難易度を揃えた作業順序の変更案を作成し、関係者により実現性や妥当性をレビューする。ここでの、関係者とは、生産技術者と設備技術者だけでなく、製造現場の作業員や調達担

3 人とロボットのハイブリッド組立ライン設計の手順化

当者など広く組立ラインの導入と運用に関係するメンバーである。ステップ4では、作業順序の変更案にもとづきハイブリッド組立ラインを設計し、本研究で提案した設計手順の有効性を評価する。

各ステップで行う作業の詳細は、3.2節と3.3節で実際の電子機器製造ラインの事例を用いて説明する。

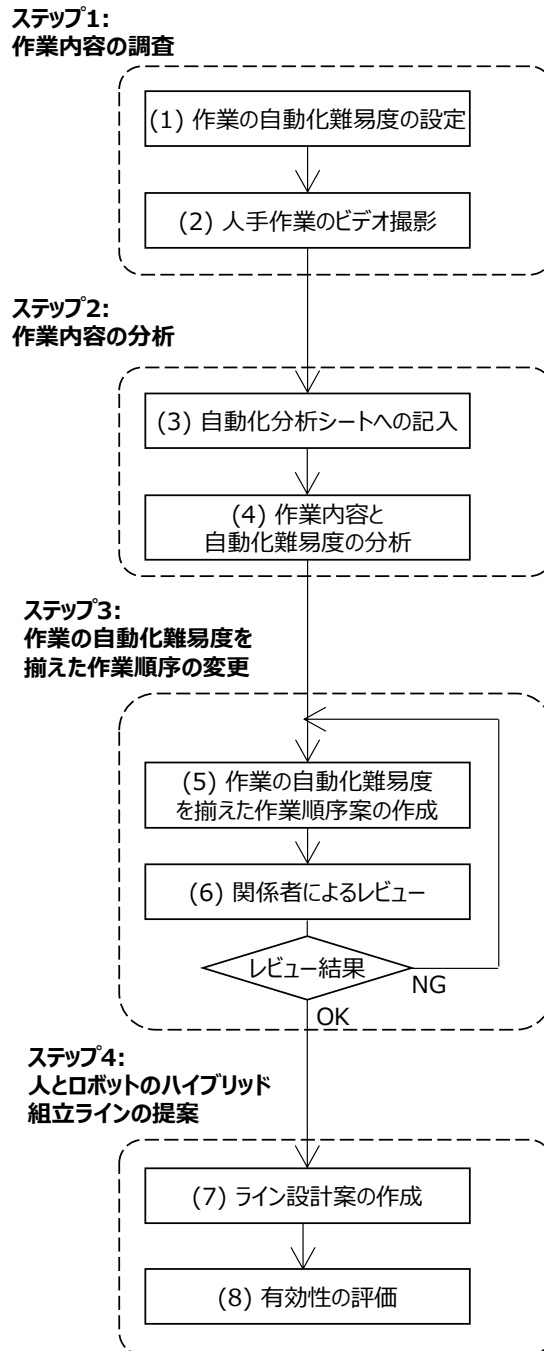


図 3-1 人とロボットのハイブリッド組立ライン設計の手順

3.1.2 ステップ 1: 作業内容の調査

自動化に向けた検討作業は、現状の人手中心の製造ラインの各作業を調査し、分析することから始まる。これは、手作業を自動化する際の技術的な難易度や投資回収性を把握するために、作業内容の情報収集が必要なためである。

ここでは、部品を見る、取るなどのレベルでの詳細な情報が必要である。こうした詳細情報を現場で集める作業は、複数人から構成されるライン設計メンバーが分担して行うことが多いと考えられる。しかし、もし経験値の異なるメンバーが集まった場合、調査結果にばらつきの生じる可能性がある。そのため、何らかの共通の指標にもとづいて調査と分析を進める必要がある。このような必要性に対応するために、本研究では作業の自動化難易度を指標化し、それにもとづいて人手作業を調査・分析する方法を提案する。

このステップ1では、作業の自動化難易度の設定と、既存ラインのビデオ撮影をすることで、作業内容の分析を進めるための調査を行う。

(1) 作業の自動化難易度の設定

ここでは、自動化に向けて人手作業を調査し、分析するための指標として、作業の自動化難易度のレベル設定を行い、作業の自動化難易度表にまとめる（事例は表 3-2を参照）。

従来、人手作業の難易度や分析は、IE（Industrial Engineering; 2.2.1節参照）における動作時間研究などによって行われてきた（人見, 1991）。しかし、IEにおける人手作業の分析結果と、作業を自動化する難しさは、必ずしも一致しない。

その理由は、人間とロボットには、作業を行うための機能にいくつかの違いがあるからである。人間の手や指は十分な関節の軸数を持ち、作業を行う際には、手の感覚情報や視覚情報を適切に利用することができる。それに対して、ロボットは、人間に比べて関節の軸数は少なく、得られる感覚情報や視覚情報も限定されている（原田・万, 2019）。さらに、それらの情報をどのように利用するかの方法を適切に設定する必要がある（原田・万, 2019）。

そのため本研究では、ロボットを用いて自動化を進める際の難易度を、適用する要素技術を実用化するために必要とされる技術的な難しさと、それらを用いたシステム開発工数の2つに分類して検討する。表 3-1は、作業の自動

化難易度の設定に関する検討の例である。

例えば、作業の自動化難易度を上げる要因として、機構学的には動作部分の自由度の増加によるロボットの関節数やアクチュエーターの増加 (牧野・謝・鄭, 1988; 日本機械学会, 2005a), 制御工学的には、状態変数の増加や外部環境の非線形性の対応が必要になると制御システムが複雑になることなどが挙げられる (日本機械学会, 2005b; 後藤・杉山, 1983; 村上, 2015)。位置決めや外観検査に用いる画像処理を考えると、認識対象物の形状の複雑さの増加や、検査の際の合否基準が物理量で定式化できていない場合には作業の自動化難易度が高くなる (精密工学会 画像応用専門委員会, 2000; 日本機械学会, 2005a)。

さらに、実際の現場を考えると、これらの要素技術を用いて自動化システムを開発するためには、機械設計、電気回路設計、ソフトウェア開発が必要となる (日本機械学会, 2005a; 経済産業省・日本ロボット工業会, 2018)。機械や電気回路の設計においてはカスタム設計の比率の増加、ソフトウェア開発においては開発モジュールやアルゴリズムの新規性の増加により、作業の自動化難易度が高くなる (経済産業省・日本ロボット工業会, 2018; 西村, 2019; 高田, 2001)。

したがって、作業の自動化難易度のレベル設定は、システム的な知見のある設備技術者と、各要素技術の専門家 (ロボット技術者, 制御技術者や画像処理技術者など) の意見を統合して行う。また、産業用ロボットの開発者は、ロボットの活用方法や対応可能な範囲を熟知している。そのため、産業用ロボットの開発者の視点も、作業の自動化難易度を検討する上で有用である。

なお、本研究で定義した作業の自動化難易度のような定性的な内容を数値化して用いる例として、トラブルの事前解析の手法であるFMEA (Failure Modes and Effects Analysis) がある (日本信頼性学会, 2014)。FMEAで用いられるRPN (Risk Priority Number) は、リスク評価ランク表で決定される影響度、発生頻度、検出難易度の積で設定される (日本信頼性学会, 2014)。これらの設定には、定性的な項目を数値化する作業が必要で、現場ではFMEAのチームメンバー間の合意を得ることが困難な場合もあるとされる。そのような場合には、チームメンバーでの投票や決定権者の設定、該当分野の専門家の意見、話し合いの継続などの手法が採られている (マクダーモット・ミカラク・ボウリガード, 2010)。以上のようなFMEAにおける体系化や実際の取

り組み事例は、自動化難易度のレベル設定を検討する上で参考にできると考えられる。

また、表 3-1の技術的難しさについては各要素技術の高度化、システム開発工数については汎用ユニットの新規開発やシステム開発手法の高度化で変化していくことが予想される。そのため、これらを組み合わせて設定される作業の自動化難易度のレベルは、今後の技術開発により変化していくことが考えられる。したがって、作業の自動化難易度の設定は、状況に応じて更新が必要である。

表 3-1 作業の自動化難易度の設定に関する検討の例

困難さのタイプ	技術名称	検討事項	作業の自動化難易度の設定 (例)		
			A (易)	B (中)	C (難)
技術的な難しさ	機構学 ^{[1][2]}	必要な関節の軸数	1 or 2	3 or 4	5 以上
			制御工学 ^{[3][4][5]}	制御の複雑さ	制御の複雑さ
	画像処理 ^{[2][6]}	形状の複雑さ	画像処理不要	長さなどの物理量の測定	官能的な判断
システム開発工数 ^{[2][7]}	機械設計 ^{[7][8]}	電気回路設計 ^[7]	汎用ユニットあり	一部カスタム設計	フルカスタム設計
			電気回路設計 ^[7]	電気回路設計の工数	一部カスタム設計
	ソフトウェア開発 ^[9]	ソフトウェア設計の工数	実績のあるソフトウェアモジュールあり	アルゴリズム実証済み	新規アルゴリズム開発

※表中の番号は下記の参考文献を示す。

- [1] 牧野・謝・鄭, 1988, [2] 日本機械学会, 2005a, [3] 日本機械学会, 2005b, [4] 後藤・杉山, 1983, [5] 村上, 2015, [6] 精密工学会 画像応用専門委員会, 2000, [7] 経済産業省・日本ロボット工業会, 2108, [8] 西村, 2019, [9] 高田, 2001

(2) 人手作業のビデオ撮影

人手作業を作業の自動化難易度別に分類するために、製造現場における作業の内容と時間を調査する必要がある。しかし、製造現場の作業者の動きは速く、現場でリアルタイムにすべての作業内容を記録することは困難である。そのため、作業している状態をビデオ撮影し、これをもとに分析する方法を採る。

なお、ビデオ撮影の際には、組付けなどのメイン作業だけでなく、部品の取り出しなどの付帯作業を含めて、製造ラインの作業をすべて記録するように注意する。これは、自動化を検討している一連の作業の中に、1つでも作業の自動化難易度の高い作業が含まれていると、自動化の実現が難しくなる可能性があることから、作業を網羅的に調査・分析する必要があるためである。

3.1.3 ステップ 2: 作業内容の分析

(3) 自動化分析シートへの記入

撮影したビデオを用いて、作業内容の記録を複数人で効率的に進めるために、定型的なフォーマット (図 3-2) を用いる。

記入する項目は、工程名、作業名、作業内容、作業種別、作業難易度と作業時間などである。作業種別にもとづいて、「ステップ1:(1) 作業の自動化難易度の設定」で定義した作業の自動化難易度を記入する。実際に分析作業を進めると、最初に設定した作業の自動化難易度表に記載のない作業や、設定した難易度レベルに疑問を感じる場合がある。その場合には、備考欄を活用し、一通りの作業内容の記入が完了した後に、分担したメンバーと再度検討を行い、必要に応じてレベルの見直しを行う。

(4) 作業内容と作業の自動化難易度の分析

次の「ステップ 3:(5) 作業の自動化難易度を揃えた作業順序案の作成」に進むためには、「ステップ 2:(3) 自動化分析シートへの記入」で記入した自動化分析シートから、対象の製造ラインにおける作業の自動化難易度の全体傾向や、作業の自動化難易度のばらつきの状態を把握する必要がある。

作業の自動化難易度という今回提案する指標をベースに、製造ライン全体、工程や作業者ごとの作業内容をグラフ化して、傾向を把握する。具体的には、

自動化分析シート

工場		ビデオ撮影日：				
製品		分析者：				
工程		分析日：				

ビデオ 番号	作業	内容	作業 種別	難易 度	作業 時間	備考

図 3-2 自動化分析シートのフォーマット

出現回数が多く自動化難易度が低い作業や、自動化難易度の低い作業の比率が高い工程を抽出することで、自動化する工程を検討する。例えば、作業の自動化難易度を3段階に分けて、易しい順にA, B, Cとした場合に、自動化難易度がAの作業が多い工程の自動化を優先して検討することが考えられる。3.2節の適用事例では、製造ライン全体の作業内容と作業の自動化難易度の傾向を図3-7で、工程別の作業の自動化難易度比率を図3-8でグラフ化し、優先して自動化する工程の検討を進めている。

3.1.4 ステップ3: 作業の自動化難易度を揃えた作業順序の変更

自動化ラインの設計においては、投資が回収できない可能性やロボットが安定稼動しないリスクを回避する観点から、作業の自動化難易度の低い作業を中心に自動化を進めることが好ましい。しかし、実際には、作業の自動化難易度の低い作業と高い作業が隣接しているケースが多いと考えられる。この理由の1つは、人手を前提に設計された組立ラインでは、ロボットにより自動化するための難しさを考慮せずに、組立手順を決定しているからである。

両者が隣接した状態で作業の自動化難易度の低い作業のみを自動化した場合、各作業者のすべての作業を自動化できずに人手作業が残ってしまうこ

とによって、期待する省人効果が得られず、自動化による投資回収ができなくなる可能性が高い。そのため、このステップでは作業の自動化難易度を揃えた作業順序に変更し、その結果を用いて関係者によるレビューを実施する。

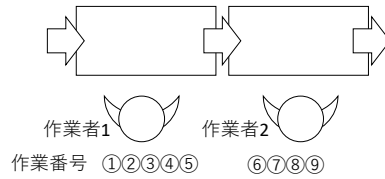
(5) 作業の自動化難易度を揃えた作業順序案の作成

はじめに、自動化ラインの設計における作業順序の変更の必要性を説明する。

図 3-3は、自動化に向けた作業順序の入れ替えの例である。簡単なモデルケースとして、図 3-3 (a)のように2人の作業者がライン上に並び、①～⑨の作業を番号順に行っている場合を考える。さらに、作業の自動化難易度を設定すると、図 3-3 (b)のように、作業番号④、⑤、⑨は作業の自動化難易度がCであり、そのほかの①～③と⑥～⑧の作業の自動化難易度がAとなったと仮定する。このとき、作業の自動化難易度Cの作業は、技術的・投資的に自動化が困難と判断したため、作業の自動化難易度Aの①～③と⑥～⑧の作業を自動化することが考えられる。しかしこの場合の作業者数は、④・⑤の作業を行う作業者1と⑨の作業を行う作業者2の2人が必要となるため、省人化につながらない結果となってしまふ。この理由は、図 3-3 (c)に示すように、2人の作業者の間にロボットの作業⑥～⑧があるため、同じ作業者がそれらを同時に担当することができないからである。

次に、作業順序を入れ替えて、作業の自動化難易度 A の作業を揃えた結果を図 3-3 (d)に示す。実際には、製品構造の観点から作業順序の入れ替えには制約があるが、ここでは理想的なケースとして、制約を考慮しないで順序を入れ替えた。図 3-3 (d)の結果を用いて設計した自動化ラインレイアウトが、図 3-3 (e)である。作業の自動化難易度の高い作業を 1 人の作業者が担当することで、作業者人数が 1 名となった。そのため、自動化前より 1 人の減少となるので、省人効果が期待できる。このように、人とロボットのハイブリッド組立ラインの設計では、作業順序を変更してロボット作業と人手作業のそれぞれに揃えることが効果的であるとわかった。

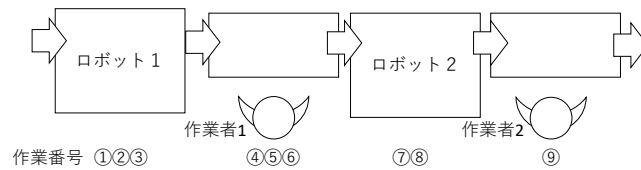
3 人とロボットのハイブリッド組立ライン設計の手順化



(a) 自動化検討前のラインレイアウト

工程	作業番号	内容	自動化難易度
作業 者 1	①	ベースAを前工程から受け取る	A
	②	部品Bをトレイから取る	A
	③	部品BをベースAに組み付ける	A
	④	部品Bに付属のケーブルをベースAの溝部に入れる	C
	⑤	ケーブルをベースAのコネクタに挿入	C
作業 者 2	⑥	トレイから部品Cを取る	A
	⑦	部品CをベースAに組み付ける	A
	⑧	部品B、Cをねじ締め	A
	⑨	外観、キズを検査する	C

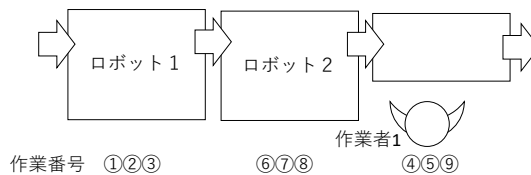
(b) 自動化検討前の作業内容と順序



(c) 順序入替えなしの自動化レイアウト

工程	作業番号	内容	自動化難易度	
作業 者 1	①	ベースAを前工程から受け取る	A	
	②	部品Bをトレイから取る	A	
	③	部品BをベースAに組み付ける	A	
	⑥	トレイから部品Cを取る	A	
	⑦	部品CをベースAに組み付ける	A	
	⑧	部品B、Cをねじ締め	A	
	作業 者 2	④	部品Bに付属のケーブルをベースAの溝部に入れる	C
		⑤	ケーブルをベースAのコネクタに挿入	C
⑨		外観、キズを検査する	C	

(d) 自動化難易度を揃えた作業順序



(e) 作業順序を考慮した場合の自動化ラインレイアウト

図 3-3 自動化に向けた作業順序の入れ替えの例

このような人員削減の効果以外にも、人→人あるいはロボット→ロボットと同じ作業タイプの作業ステーションが並ぶことは、メリットがあると考えられる。例えば、人→ロボットあるいはロボット→人と作業タイプが替わる場合には、人とロボットが干渉しないような柵やセンサーなどによる安全装置の設置が必要になるが（福田，2021），人→人あるいはロボット→ロボットの場合には，そのような安全装置は不要である。さらに，人→人と並ぶことで，作業時間の変動やポカミスなどの発生時に人がお互いに協力して対策・改善する，いわゆる助け合いができる（日本能率協会・門田，1978）。また，ロボット→ロボットと並ぶ場合には，電力や圧縮空気などのユーティリティを供給する際の配線や配管の長さを短くできる（藤川，2005）などのメリットも考えられる。

このステップでは，作業順序の変更に加えて，製品設計の変更による作業の自動化難易度の低減やメインラインとは別の作業ステーションで作業するサブ工程化を実施する。このように，作業の自動化難易度を指標化することで，視認性と客観性が高まる。

(6) 関係者によるレビュー

「ステップ3: (5) 作業の自動化難易度を揃えた作業順序案の作成」までの分析と提案は，主に生産技術者と設備技術者が中心となって進めることが多い。しかし，製造ラインを実際に運用するのは製造現場の作業者であり，ロボットなどの設備や製品の部品購入は調達担当者が関わる。また，このような活動を進めるには，自動化に向けた製品設計の変更が必要になる場合も多い。そのため，作業順序の変更案を作成した段階で，このような関係者が参画して，作成した変更案についてレビューを行う。この際に，「ステップ1: (1) 作業の自動化難易度の設定」で提案した作業の自動化難易度を用いることで，自動化方針を具体的かつ定量的にレビューを行うことができる。

なお，レビューの結果，実現性に問題や改善が必要な点がある場合は，「ステップ3: (5) 作業の自動化難易度を揃えた作業順序案の作成」に戻り，再度作業順序を変更する。

3.1.5 ステップ 4: 人とロボットのハイブリッド組立ラインの提案

ステップ 3 までで得られた結果にもとづいて、自動化可能性の高い工程について、ロボットを用いたライン設計案を作成して、本研究で提案した設計手順の有効性を評価する。この段階では、製造設備の詳細設計までは行わず、加工点やアクチュエーターなどの主要要素の構成と概略レイアウトの設計までを行う。

(7) ライン設計案の作成

ライン設計案は設備開発スキルを持っている設備技術者が作成し、これを生産技術者や製造担当者を中心として必要に応じて、製品設計者、調達担当者と生産システム管理者などが参画して作成を進めることが多い。具体的には、「ステップ 3: (5) 作業の自動化難易度を揃えた作業順序の変更」の結果である作業順序の変更案をもとに、ロボット、加工点、搬送機器などに作業を割り付けて概略のライン設計案を作成する（図 3-4）。

次に、この図を用いて全体構成やリスク内容を確認し、必要に応じて修正して完成度を上げる。このようなライン設計案の図を作成して作業を進める理由は、多くの関係者が製造ラインの全体像を共有できるためと、ロボットなどの設備ごとの具体化作業を分担して進めることを容易にするためである。

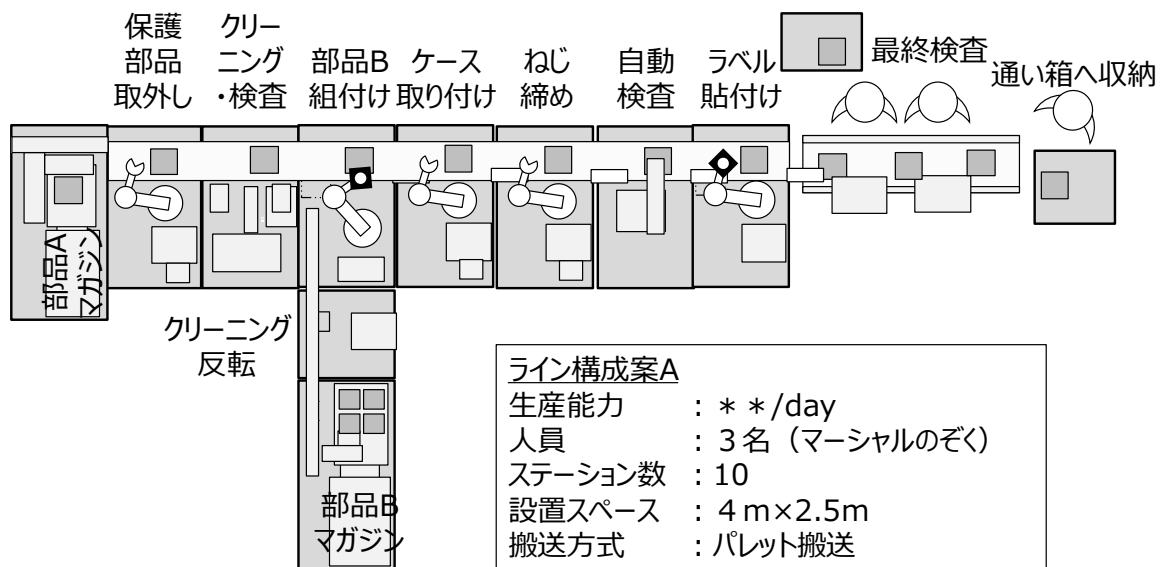


図 3-4 自動化ラインの設計案の例

(8) ラインの評価

最後に、本研究で提案した設計手順の有効性について、作業人数やロボット台数などの視点から考察し、本研究で提案した設計手順と従来法の比較結果をまとめる。

以上のステップ 1~4 の手順を進めることで、ロボットなどの設備導入コストの情報が事前に得られていない段階で、作業の自動化難易度の低い作業の自動化を優先した現実的なライン設計案の作成が可能になる。作成したライン設計案は、次の段階である投資費用の算出で活用される。投資費用の算出結果によっては、必要に応じてライン設計案の見直しを行う。

3.2 適用事例: 既存ラインの調査・分析

3.1節で提案した設計手順を、電子機器製造ラインに適用した事例を、本節と3.3節で説明する。本節では、図 3-1の4つのステップのうち、「ステップ1: 作業内容の調査」と「ステップ2: 作業内容の分析」までの例を示す。

3.2.1 適用対象の製造ライン

本節から、提案した設計手順を電子機器製造ラインに適用した事例を挙げる。対象の製造ラインの概略を図 3-5 に示す。このラインでは、上流のラインで表面実装済みの回路基板に、各種機能部品を組み付ける作業を行い、その後、検査と梱包を行っている。現状では、これらの作業は人手を中心に行っているが、省人化のために自動化の検討フェーズにある。

この製造ラインは、組み付け部品の一部として事前にデータをセットする準備作業、部品を組み付ける組立工程、機能および外観を検査する検査工程と、出荷梱包を行う梱包工程で構成されている。なお、製品構造から組立工程は、前半と後半に分かれている。現状は一連の作業を、十数人の作業で行っている。

3.1 節で提案した設計手順にしたがって、人とロボットの両方を配置したライン設計を行う事例を本節と 3.3 節で説明する。

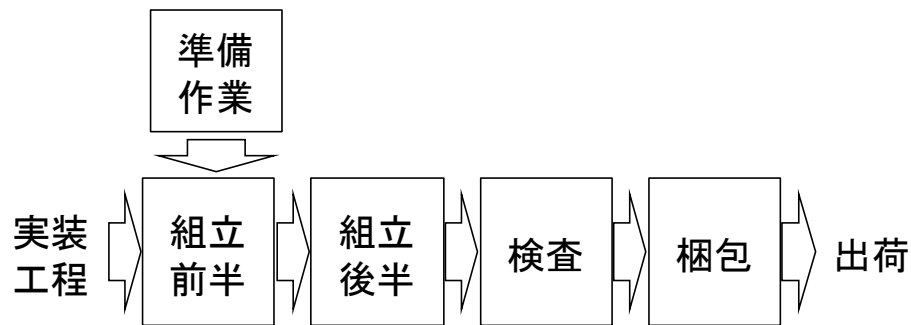


図 3-5 適用対象の製造ラインの概略

3.2.2 ステップ 1: 作業内容の調査例

(1) 作業の自動化難易度の設定例

表 3-2に、作業の自動化難易度表の例を示す。今回の事例では、はじめに、自動化システムを構成する要素技術について、システム的な観点から概略的な知識を保有している設備技術者が、各作業の自動化難易度の初期案を作成した。次に、各要素技術の専門家（ロボット技術者、制御技術者や画像処理技術者など）の意見を反映し、生産技術者と設備技術者が中心となって、最終的に決定された。各作業の自動化難易度は、技術的なレベルが易しい順に A, B, Cの3つのグループに分けた。さらに、3.2.3節(3)で説明する自動化分析シート（図 3-6）への記入作業を簡易化するために、各作業種別に難易度と作業番号を与え、A1などのような記号を付加した。

作業の自動化難易度 A には、「A1 単純な搬送」、「A2 単純な組付け」、「A7 ねじ締め」や「A8 はんだづけ」などを含めた。作業の自動化難易度 A の加工点は、比較的容易に具現化できる技術が確立しているものや、加工点ユニットとして購入して導入できるものである。

次の作業の自動化難易度 B では、搬送や組付け作業のうち、部品を把持（つかむ、吸着などにより物体を拘束すること）するためには形状が複雑で、チャック部分に個別開発が必要などの理由によって、作業の自動化難易度 A よりも難しい作業をカテゴリ化した。例えば、直線的な動きで対応できない複雑な作業である「B1 複雑形状部品の搬送」や「B2 複雑形状部品の組付け」などは、この作業の自動化難易度 B とした。

最後に作業の自動化難易度 C は、現状では基礎開発から進める必要があり、最も難易度の高い作業とした。具体的には、「C1 ばら積み部品の搬送」

3 人とロボットのハイブリッド組立ライン設計の手順化

や「C2 コネクタ接続」などの作業を挙げた。これらの作業の自動化には、センシング、アームの移動計画、高精度位置決めや把持など、複数の高度技術を複合する必要がある。また、製品表面のムラや色味の検査のように、人の感性が含まれる「C5 官能型検査」の作業も含めた。これらの作業の自動化技術は各種提案されているが、現実の自動化ラインの構築では、すぐに適用することは難しいと考え、このグループとした。

なお、本事例では、作業の自動化難易度を技術的なレベルが易しい順に A, B, C の3つのグループに分けた。しかし、さらに詳細に作業の自動化難易度を設定することが可能であれば、全体を4つ以上のグループに分けることもできる。例えば、作業の自動化難易度 C よりもさらに難易度が高いものが顕れた場合に、作業の自動化難易度 D を追加するなどの改善も必要に応じて考えられる。

表 3-2 作業の自動化難易度表の例

作業の 自動化難易度	記号	作業種別	説明
A	A1	単純な搬送	整列された単純形状部品の搬送
	A2	単純な組付け	直線的な動きによる単純形状の組付け
	A3	貼合せ・貼付け	平面へのシールやテープの貼付け
	A4	A式梱包	フラップ折り、テープ貼り
	A5	塗布	液体や粉体の塗布
	A6	混合・攪拌	液体、粉体材料の混合や攪拌
	A7	ねじ締め	ねじ締めによる結合
	A8	はんだづけ	基板、部材のはんだづけ
	A9	計測型検査	部品有無、長さ測定など
	A10	その他	上記以外の即自動化が可能な加工点
B	B1	複雑形状部品の搬送	整列された複雑形状部品の搬送
	B2	複雑形状部品の組付け	複雑形状部品の組付け
	B3	ろうづけ・溶接	ろうづけや溶接
	B4	凹凸面への貼付け	凹凸面へのシールやテープの貼付け
	B5	狭小箇所ねじ締め	狭小箇所へのねじ締めによる結合
	B6	多自由度の組付けや加工	2次元以上の動きを伴う組付け・加工作業
	B7	その他	上記以外の個別開発が必要な加工点
C	C1	ばら積み部品の搬送	ばら積み供給された部品のピックアップや搬送
	C2	コネクタ接続	盤間、基板実装のコネクタ接続
	C3	配線引回し	ケーブルやハーネスの引回し
	C4	柔軟物の多自由度組付け	薄板、ワイヤ、配管などの柔軟物組付け
	C5	官能型検査	ムラ、色味、音などの検査
	C6	その他	上記以外の基礎開発が必要な加工点

(2) 人手作業のビデオ撮影例

現在の人手による対象ラインについて、ビデオ撮影を実施した。ビデオ撮影は、対象の製造ラインおよび製品を熟知している工場の生産技術者が担当し、準備作業、組立工程、検査工程と梱包工程のすべてを撮影した。撮影方法としては、作業者ごとに複数サイクルを撮影し、ライン全体で約1時間50分の撮影時間となった。

また、撮影対象とする作業については、組付けなどの主作業だけでなく、部品の取り出しや、各種シートへの記入などの付随作業も含めて、製造ラインの作業をすべて記録するように注意した。これは、自動化を検討する際には、主作業だけでなく付随作業も合わせて漏れなく行う必要があるからである。

3.2.3 ステップ 2: 作業内容の分析例

(3) 自動化分析シートへの記入例

作業者ごとに撮影したビデオをチームで分担し、作業内容の抽出と作業時間の測定を行い、自動化分析シートのフォーマット（図 3-2）に記入した。図 3-6 は記入例である。例えば、作業者がベース部品を前工程から受け取る作業に7秒かかっていた場合、作業欄に「部品搬送」、内容欄に「ベース部品を前工程から受け取る」、作業時間欄に「7」と記入した。なお、各チームは、生産技術者と設備技術者3人で編成し、2チームを構成した。

さらに、「ステップ 1:(1) 作業の自動化難易度の設定例」で決定した作業の自動化難易度表（表 3-2）にもとづいて、作業種別、作業の自動化難易度と作業時間を記入した。例えば、「ベース部品を前工程から受け取る」であれば単純な搬送作業なので、作業の自動化難易度表を参照して、単純な搬送を表す記号「A1」を作業種別欄に記入するとともに、難易度欄に「A」、作業時間欄に「7」と記入した。

ここで、表 3-2 の作業の自動化難易度表で事前に設定していない作業がいくつか出現したため、一通り記入後、他の作業とレベルを合わせて作業の自動化難易度を設定した。例えば、袋詰めされて供給される部品を袋から出す作業は、作業の自動化難易度表に当初はなかったが、多自由度の動きが要求されることから、「B6 多自由度の組付けや加工」に相当すると調査者間で

判断し、作業の自動化難易度 B に分類した。

このシートの作成に要した時間は、今回の対象ラインでは、約半日間である。具体的には2チーム並行で約半日間の作業を行った後に、1つのシートにまとめた。

自動化分析シート

工場	AA工場	ビデオ撮影日：201*-**-*-**
製品	電子部品AA	分析者：*****
工程	組立て検査	分析日：201*-**-*-**

ビデオ番号	作業	内容	作業種別	難易度	作業時間
T001	部品搬送	ベースAを前工程から受け取る	A1	A	7
	部品取り出し	部品Bをトレイから取る	A1	A	5
	組み付け	部品BをベースAに組み付ける	A2	A	12
	引回し	部品Bに付属のケーブルをベースAの溝部に入れる	C3	C	10
	挿入	ケーブルをベースAのコネクタに挿入	C2	C	5
T002	部品取り出し	トレイから部品Cを取る	A1	A	7
	組み付け	部品CをベースAに組み付ける	A2	A	8
	ねじ締め	部品B、Cをねじ締め	A7	A	12
	検査	外観、キズを検査する	C5	C	10

図 3-6 自動化分析シートの記入例

(4) 作業内容と作業の自動化難易度の分析例

「ステップ 3: (5) 作業の自動化難易度を揃えた作業順序案の作成」以降で自動化の方針を策定するために、「ステップ 2: (3) 自動化分析シートへの記入例」で得られた結果を分析した。本事例では、はじめに、製造ライン全体の作業内容と作業の自動化難易度の傾向を把握し、次に工程別の作業の自動化難易度比率を分析した。

1) 作業内容の分析結果

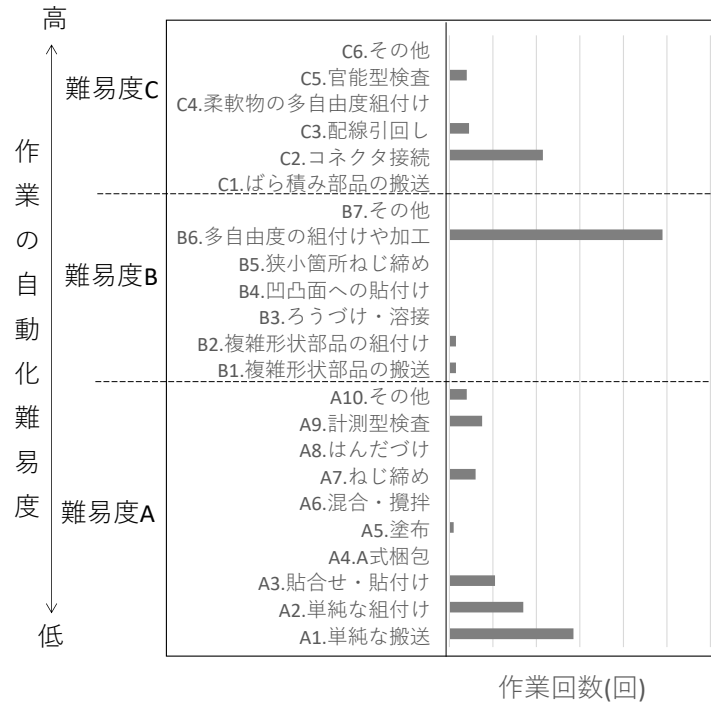
図 3-7 は、作業内容と作業の自動化難易度の分析結果である。(a) 作業回数は、縦軸に表 3-2 の作業の自動化難易度表で示した作業種別、横軸に作業種別ごとの作業回数の和を表したものである。一方の(b) 作業時間は、縦軸に作業種別、横軸に作業種別ごとの作業時間の和を示した。なお、横軸の回数、時間のスケールはどちらも省略してある。

図 3-7 (a)を作業回数順で見ると、「B6 多自由度の組付けや加工」が全体の31%となり最も多いことがわかった。これは、この製造ラインが実装基板に部品を取り付けることが主な作業であることに起因していた。ここで、「A2 単純な組付け」の11%に比べて「B6 多自由度の組付けや加工」が31%と多いのは、対象製品の部品取り付け動作が、直線的な動きで処理できる作業ではなく、曲線的な自由度2以上の動きが必要な作業が多いためであることがわかった。

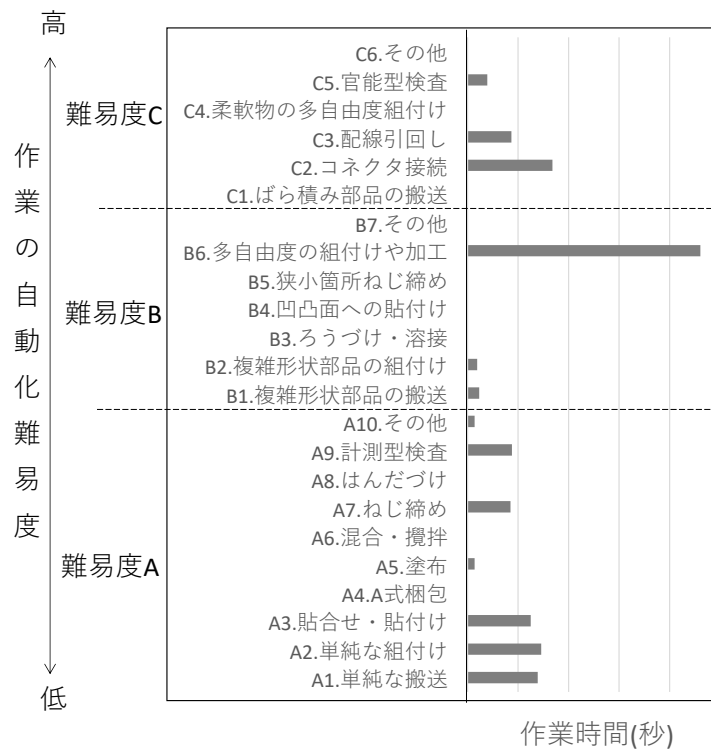
また、3.2.3節(3)での例で取り上げたように、袋詰めされて供給される部品を袋から取り出す作業と、梱包時に製品を袋に入れる作業が、この製造ラインには全体の約4%あった。この作業は、組付けや加工ではないが、多自由度の動きが要求されることから、「B6 多自由度の組付けや加工」に分類することを調査者間で申し合わせたことも、回数が多くなっている理由である。

全体の 18%と 2 番目に多い「A1 単純な搬送」は、組付け部品の搬送と使用する治具の搬送が主な内訳であった。部品の組付けには、必ず搬送作業が伴うことから上位となった。全体の 14%で 3 番目となった「C2 コネクタ接続」は、部品の多くが電氣的接点を持つ電子機器製品特有の傾向といえる。コネクタ接続作業は、人手であれば比較的容易な作業であるが、自動化は困難である。そのため極力、自動化は避け人手作業とすることが望ましい。

3 人とロボットのハイブリッド組立ライン設計の手順化



(a) 作業回数



(b) 作業時間

図 3-7 作業内容と作業の自動化難易度の分析

さらに、「A2 単純な組付け」が11%、「A3 貼合せ・貼付け」が7%と、固形部品やシート部品の単純な取り付け作業が続くことがわかった。

図 3-7 (b) 作業時間の分析でも、以上の傾向はほぼ同じであり、作業回数が多ければ作業時間が長い傾向が見られた。そのため、本ケースでは、特定の作業種別に多くの時間を費やしていないことがわかった。

以上より、作業の自動化難易度の高い「B6 多自由度の組付けや加工」、「C2 コネクタ接続」については自動化の優先順位を低くし、比較的作業の自動化難易度の低い「A1 単純な搬送」、「A2 単純な組付け」と「A3 貼合せ・貼付け」を優先して自動化を進めることとした。

2) 工程別の作業の自動化難易度比率の分析結果

図 3-8 は、工程別の作業の自動化難易度比率の分析結果である。(a) 作業回数では、準備、組立前半、組立後半、検査と梱包の工程別に、作業の自動化難易度の比率を回数ベースで集計したものであり、縦軸が難易度の比率、横軸が工程を示している。

(b) 作業時間は、(a) 作業回数と同様に、工程別の作業の自動化難易度の比率を作業時間で集計したものである。1) 作業内容の分析結果における作業回数と時間の考察と同様に、特定の作業種別に多くの時間を費やしていることはないことから、(a) 作業回数と(b) 作業時間の比率は類似の傾向を示していると考えられた。そのため、回数ベースの(a) 作業回数で考察した。

作業の自動化難易度Aの作業比率に着目すると、準備作業と組立前半では、80%程度が作業の自動化難易度Aの作業である一方で、組立後半では50%強であり、検査では約30%、梱包では約40%とより低い比率となっていた。準備作業は、購入部品に専用設備で電氣的な処理をする工程で、人手作業は部品を袋から出すことと、専用設備への取り付け・取り外しであることから、作業の自動化難易度が低い結果となることがわかった。また、組立工程の前半と後半で比率が異なったのは、組立工程の前半が部品を取り付ける作業が中心である一方で、組立後半は、取り付けた部品の「C2 コネクタ接続」や「C3 配線引回し」などの作業の自動化難易度の高い作業が多かったためだと考えられた。

さらに、検査工程には計測器を用いる作業が多く、検査のためのコネクタ

接続作業が複数あることが作業の自動化難易度 B, C の比率を約 70%と高めていた。また、梱包工程に作業の自動化難易度 B の作業が約 60%含まれていた。これは、梱包工程では箱詰め作業のほかに、各種シールの貼付、同梱部品のセット、梱包材のセットや最終外観検査なども併せて行っており、「B6 多自由度の組付けや加工」や「C4 官能型検査」などが含まれているためだと考えられた。

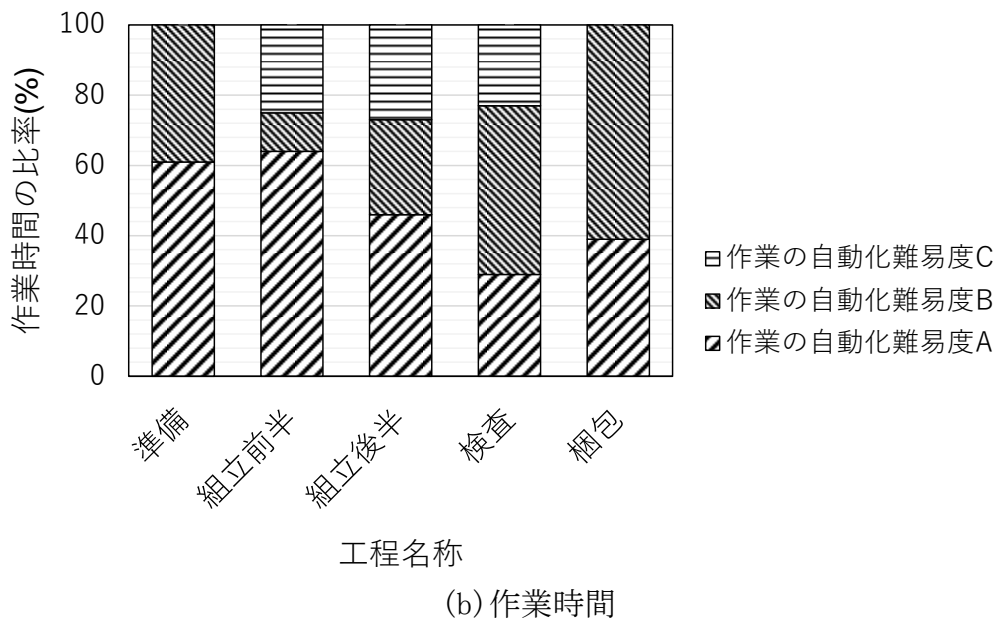
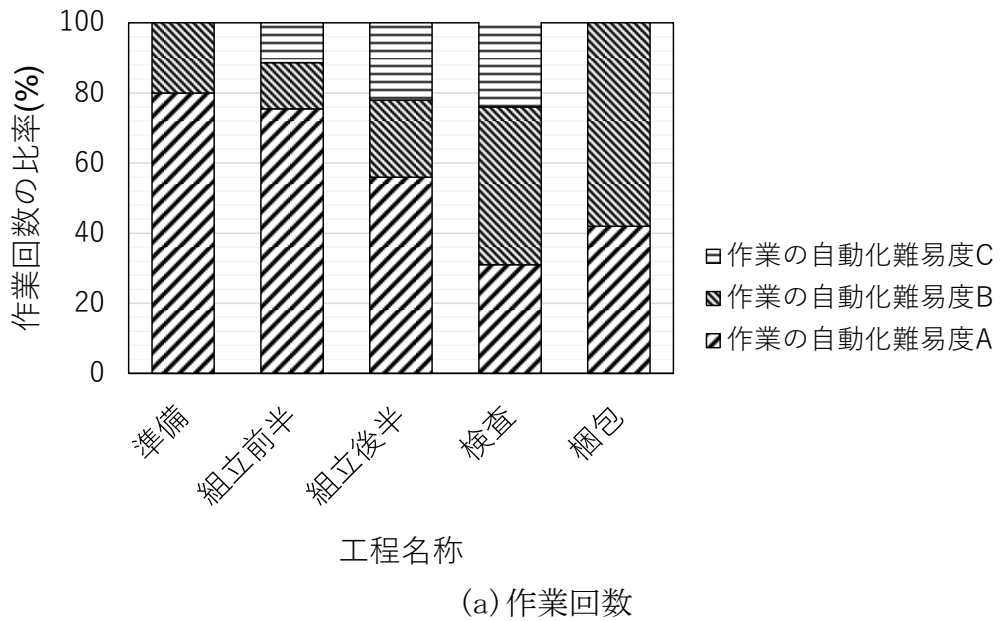


図 3-8 工程別の作業の自動化難易度比率の分析結果

3.3 適用事例: 作業順序の変更とライン設計案の提案

3.3 節では、3.2 節に続き、電子機器製造ラインに適用した事例を説明する。3.2 節で実施した既存ラインの分析結果を用いて、図 3-1 の 4 つのステップのうち、「ステップ 3: 作業の自動化難易度を揃えた作業順序の変更」と「ステップ 4: 人とロボットのハイブリッド組立ラインの提案」までの例を示す。最後に、提案した設計手順の有効性を考察する。

3.3.1 ステップ 3: 作業の自動化難易度を揃えた作業順序の変更例

(5) 作業の自動化難易度を揃えた作業順序案の作成例

3.1.4 節で説明したように、作業の自動化難易度の低い作業と高い作業が隣接した状態で作業の自動化難易度の低い作業のみを自動化した場合、期待する省人効果が得られない可能性がある。そこで、作業の自動化難易度の低い作業と高い作業をそれぞれ揃えるために、作業順序の変更が効果的である。そのため、作業の自動化難易度が高い作業と低い作業をそれぞれ揃えるとともに、サブ工程化や、設計変更による作業の自動化難易度の低減を含めて検討を行った。

「ステップ 2: (4) 作業内容と作業の自動化難易度の分析例」の分析結果から、準備作業や組立前半の工程は、作業の自動化難易度 A の作業が約 80% と多いことがわかった。したがって、これらの作業を優先して自動化の検討を進めることが効果的だと考えられる。一方で、準備作業や組立前半の工程においても、作業の自動化難易度 A だけでなく自動化難易度 B, C の作業も混在した。そのため、3.1.4 節(5)で説明したように、作業の自動化難易度の低い作業と高い作業をそれぞれ揃えること、作業の自動化難易度の高い作業をなくすことやサブ工程化する必要のあることがわかった。ここでは、作業の自動化難易度 A, B, C が混在している組立前半を検討した内容について取り上げる。

図 3-9 に、組立前半工程において作業の自動化難易度を揃えた作業順序の変更例を示す。図 3-9 の左表は、自動化分析シートをベースに作成した作業順序の変更前のもので、作業内容、作業種別、作業の自動化難易度と作業時間を記入した。右表は、左表をもとに、自動化に向けた作業順序の変更案を示している。ここでの変更としては、作業の自動化難易度 B, C の作業を最

終ステーションに揃えるとともに、作業内容や製品設計の見直しによる作業削減や、投入部品を袋から出す作業などをサブ工程化することも合わせて行った。なお、右表には、検討方針の欄を設け、自動化あるいは人手作業の方針を記載した。

作業順序の変更後の図 3-9 右表では、作業の自動化難易度 C の作業 6 個と作業の自動化難易度 B の作業 2 個が揃えられており、そのほかの作業の自動化難易度 A の作業はある 1 つの作業を除いて、それらの前の作業と揃えられた。これにより、作業の自動化難易度の低い作業と高い作業に、それぞれ揃えることができた。なお、作業の自動化難易度 B と C を揃えた後続作業に、作業の自動化難易度 A の作業が 1 つあるが、これは、製品構造の制約から最後の作業順序で実施せざるを得なかったためである。

これらの検討を通じて、作業の自動化難易度を指標として進めることで、効果的かつ視覚的な作業順序の変更が可能であることを示した。

本事例では、作業順序の変更作業を、生産技術者と設備技術者の話し合いにより進めたが、この変更作業を手法として整理するには至らなかった。作業順序の変更作業の手順化や、作成した作業順序案の良否を客観的に判定する方法の明確化は、今後の検討課題と考えられる。

(6) 関係者によるレビュー例

組立前半工程について、作業の自動化難易度を揃えた作業順序の変更例（図 3-9）を用いて、生産技術者と設備技術者が中心にレビューを行い、最終案を作成した。さらに、製品の構造に関する検討は製品設計者、部品の納入形態の検討については調達担当者が参画した。その結果、レビュー段階でも、作業の自動化難易度を指標として、関係者と効果的な議論が可能であることを確認できた。

3 人とロボットのハイブリッド組立ライン設計の手順化

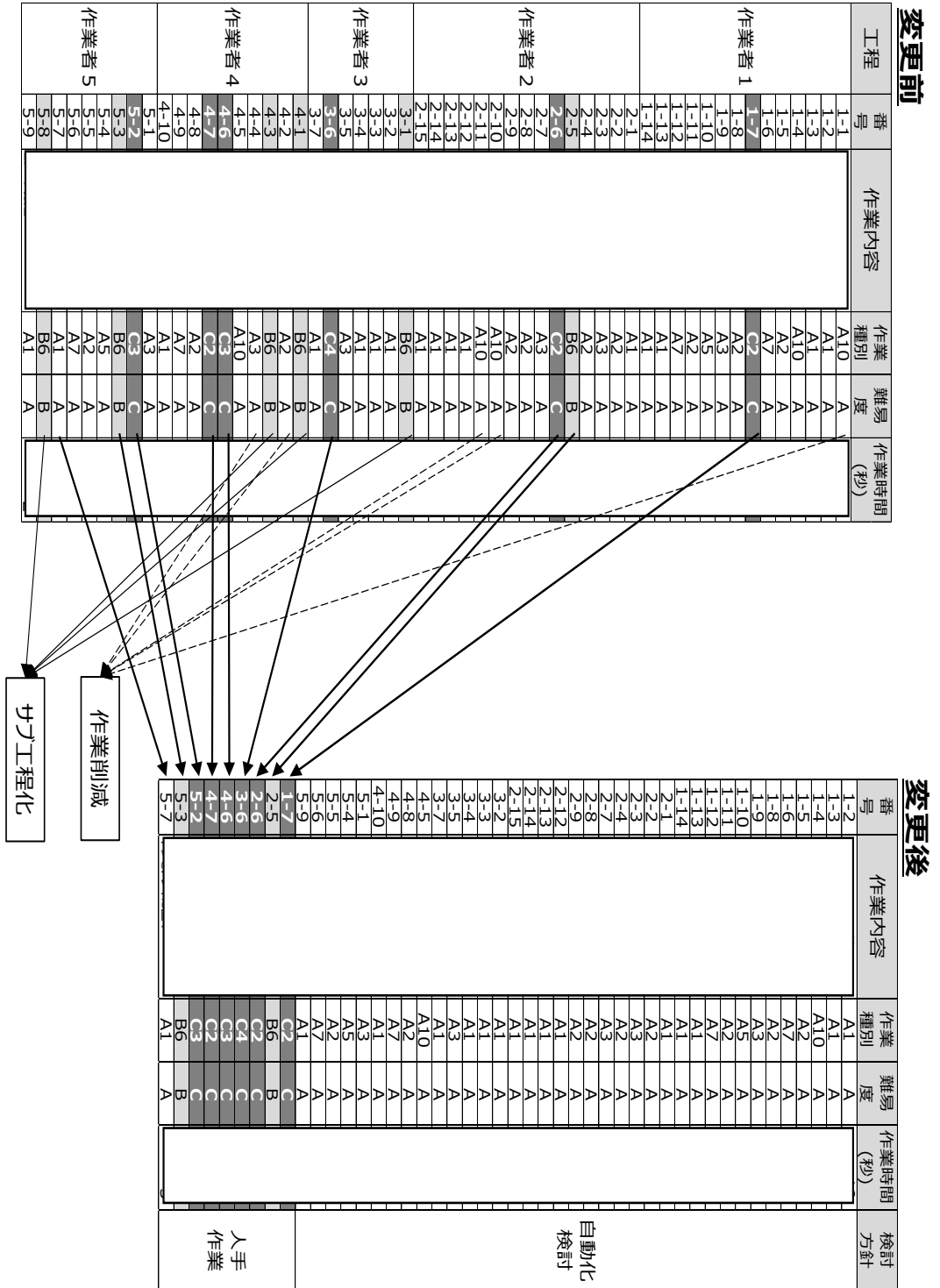


図 3-9 組立前半工程において作業の自動化難易度を揃えた作業順序の変更例

3.3.2 ステップ 4: 人とロボットのハイブリッド組立ラインの提案例

(7) ライン設計案の作成例

図 3-10 に、「ステップ 3: (6) 関係者によるレビュー例」を経て作成した、組立前半工程の自動化ライン設計案の例を示す。ここでは、部品マガジンから供給されるベース部品に前加工設備で処理を行い、コンベア上で順次組付け作業を行う構成となった。この理由は、「ステップ 3: (5) 作業の自動化難易度を揃えた作業順序案の作成例」の結果を反映して、作業の自動化難易度の低い作業（貼り付け、塗布、部品セット、部品取付け、ねじ締め、検査接点、バーコード読取）を前半に集め、作業の自動化難易度の高い作業（コネクタ接続、配線引回し、保護シートはがし）は人手作業として最終ステーションに集めたためである。その結果、作業の自動化難易度の低い作業は 4 台のロボットで自動化し、作業の自動化難易度の高い作業を 1 名の人手に対応するような人とロボットのハイブリッド組立ラインの設計案が提案できた。

なお、本研究の事例では、ライン設計案の作成手続きは、ライン設計経験のある設備技術者が実施した。その際に、作業者およびロボットに各作業を割り当てた後に、生産計画によって決められたサイクルタイム制約を満足し

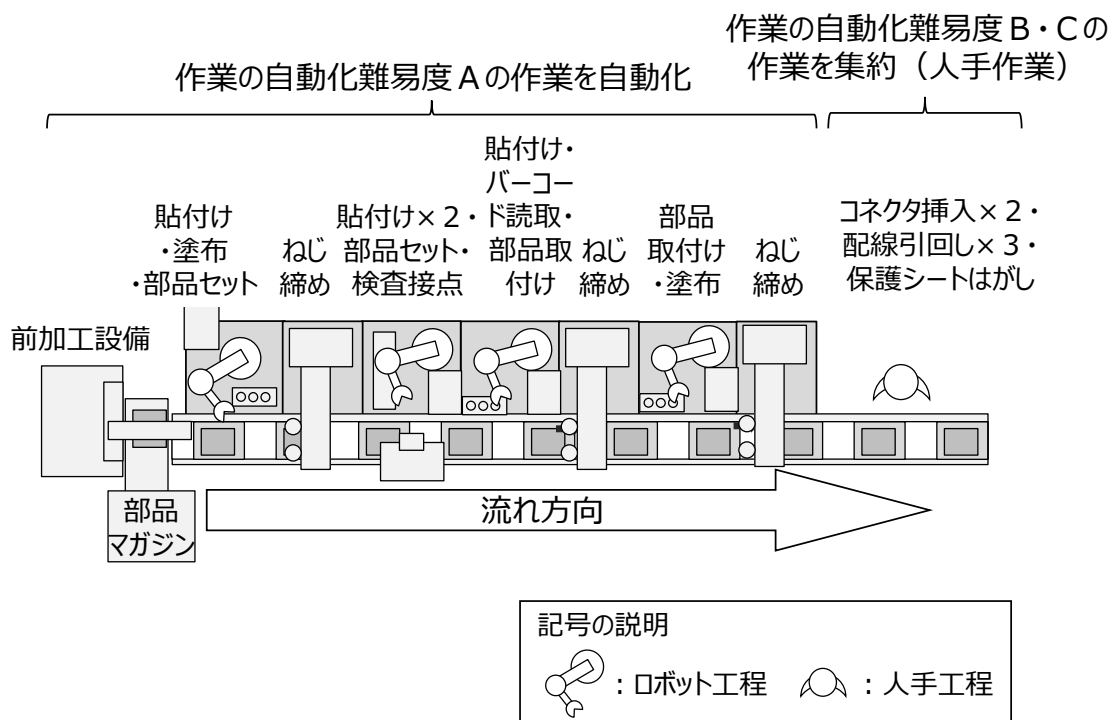


図 3-10 自動化ラインの設計案の例

ていることを確認する計画であった。一方、ラインバランシングについての分析は行わなかった。その理由は、作業の先行関係やロボットによる作業時間など、ラインバランシングに必要な情報が整理されていなかったためである。そのため、作業の先行順位やサイクルタイムの制約については、ライン設計を進める過程での確認や作業改善などの対応を行うこととした。ラインバランシングを用いた作業順序や作業ステーションの配置については、4章および5章で述べる。

最後に、作成した自動化ラインの設計案をもとに、ロボットの要求仕様と製作仕様を策定し、投資費用と運用費用を試算した。さらに、回収年数とライフサイクルコストの関係を明確にし、投資判断に必要な情報としてまとめた。

(8) ラインの評価例

本研究で提案した設計手順の有効性について、作業人数やロボット台数などの視点から考察し、提案した設計手順と従来法の比較結果をまとめる。なお、今回の対象ラインの実際の検討作業の中では、提案した設計手順を適用しない検討は実施していないため、提案した設計手順を行わなかった場合に、人手選択と自動化選択の2つのケースを想定して結果を比較した。

自動化検討方法の1つとして、製造ラインを作業単位で調査・検討し、比較的自動化が容易と考えられる作業を担当している作業者に着目して自動化を推進する方法がある。今回の事例では、作業順序の変更前の図 3-9 の左表で示したように、全5人の作業者のうち、作業者1~3は作業の自動化難易度がB,Cの作業が2項目以下であり、作業者4,5は3項目以上であった。そこで、従来法であれば、作業者1~3に着目して自動化検討を進めたと仮定する。

作業者1~3の作業の自動化に際しては、作業の自動化難易度B,Cの作業(図 3-9 左の人手作業の番号1-7, 2-5, 2-6, 3-1, 3-6)を人手に割り付けるケース(従来法1:人手選択)と、作業の自動化難易度の高いB,Cの作業も含めて自動化するケース(従来法2:自動化選択)を想定した。なお、作業削減やサブ工程化は、どの場合でも同様に実施すると仮定した。

表 3-3 に、提案手順と従来法の結果比較を示す。それぞれの場合の作業人数、現状ラインを1とした場合の労働生産性の比率と、対象工程の55作

表 3-3 本研究で提案した設計手順と従来法の結果比較

		ライン設計結果			現状ライン (人を中心)	
		本研究で提案 した設計手順	従来法1 (人手選択)	従来法2 (自動化選択)		
作業人数(人)		1	2~3	2	5	
労働生産性(現状ラインを1)		5.0	1.7~2.5	2.5	1.0	
ロボット台数(台)		4	2~3	4	0	
割付け 作業数	人手	9(20%)	18(39%)	13(28%)	55(100%)	
	自動 化	難易度A	37(80%)	28(61%)	28(61%)	0(0%)
		難易度B	0(0%)	0(0%)	2(4%)	0(0%)
		難易度C	0(0%)	0(0%)	3(7%)	0(0%)
	工程削減		5	5	5	0
	サブ工程化		4	4	4	0

※括弧内は、人手と自動化の割付け作業比率を示す。

業の割付け作業数が示されている。

従来法1の人手選択では、必要人数が2~3人、労働生産性は現状ラインの1.7~2.5倍と幅のある結果となった。これは、作業員1~3の作業の自動化難易度B、Cの作業を人手作業に割り付けてあり、サイクルタイムの制約から作業員4、5の2人で対応できない可能性があるためである。一方で、自動化対象作業はすべて難易度Aにできるので、作業の自動化難易度の高い作業の自動化による開発投資やロボットなどの設備導入時に安定稼働しない可能性は抑えられる。なお、この構成でのライン設計は現実には実施していないが、2~3人分の作業の自動化難易度Aの作業を自動化するためには2~3台のロボットが必要と試算した。これは、「ステップ4:(7)ライン設計案の作成例」において、作業の自動化難易度Aの4人相当の作業を4台のロボットで自動化する提案となっていることから、推定したものである。

従来法2の自動化選択では、作業員4、5へ作業の自動化難易度の高い作業を割り付けず、作業員1~3の作業をすべて自動化することを考えた。この場合では、作業人数は3人削減し、2人となった。労働生産性は現状ラインの2.5倍となるが、作業の自動化難易度B、Cの作業(5作業、11%)の自動化が必要となってしまうことがわかった。そのため、ロボットなどの設備導入に向けては技術開発が必要となるため、導入コストが増加する可能性

や稼働開始時の安定稼働へのリスク増大が懸念される。リスクを増大させる具体的な例としては、ケーブルの引回し作業やコネクタ接続のような作業の自動化が挙げられる。このように作業の自動化難易度 B, C が 11%含まれている 3 人分の作業を 3 台のロボットで自動化することは困難と考え、4 台のロボットが必要と試算した。

本研究で提案した設計手順では、作業の自動化難易度の高い作業は人手で行うため、自動化による設備導入コストの増加や安定稼働へのリスク増加はない。さらに、作業の自動化難易度が A と低い作業は、先行順位制約のために作業順序を変更できなかった 1 つの作業を除いて、自動化対象としているので、作業員人数を 4 人削減して 1 人となり、労働生産性は従来ラインの 5 倍となった。これらの結果から、提案した設計手順では、作業人員の削減と設備導入コストの抑制の両方の点で優れていることを確認できた。

実際のライン設計の場合を考えると、設計当初は従来法 1 あるいは従来法 2 にもとづく提案をした後に、デザインレビュー、ロボットなどの設備の仕様策定や発注確認などの段階で再検討が行われてから、最終的に本研究で提案した設計手順による結果に帰着する可能性がある。このような場合において、提案した設計手順を導入することで、人手とロボットの割付け作業を、視覚的かつ定量的に関係者と共有して進めることができることも効果の 1 つである。したがって、後戻りの少ない人とロボットのハイブリッド組立ラインを設計する方法としても、提案した設計手順の有効性が示された。

3.4 適用事例: 提案した設計手順の結果のまとめ

本章では、作業の自動化難易度を考慮した人とロボットのハイブリッド組立ラインの設計手順を提案した。はじめに、人手作業を作業の自動化難易度にもとづいて分析し、作業の自動化難易度ごとに作業を揃えた作業順序の変更案を作成した。最後に、作成した作業順序の変更案をもとに自動化ライン設計案を作成した。提案した設計手順を電子機器製造ラインに適用した結果を以下にまとめる。

<製造ライン全体の作業内容の分析>

- 作業の自動化難易度を指標に作業内容を分類することで、製造ライン

全体の作業内容と作業の自動化難易度の傾向について、把握できることを確認した。

- 製造ライン全体の作業内容を実際に分析した結果、作業の自動化難易度の異なる作業が混在していることがわかった。
- 作業の自動化難易度の異なる作業が混在しているという分析結果は、製品構造に起因するものであることを考察することができた。

<工程別の作業の自動化難易度比率の分析>

- 工程別の作業の自動化難易度比率を集計することで、各工程の作業の自動化難易度の傾向を把握し、自動化を進める優先順位の検討に活用できることを示した。
- 工程別の作業の自動化難易度の比率を分析した結果、作業の自動化難易度 A の作業比率に着目すると、準備作業と組立前半では、80%程度が作業の自動化難易度 A の作業である一方で、組立後半では 50%強であり、検査では約 30%、梱包では約 40%とより低い比率となることがわかった。
- 工程別の作業の自動化難易度比率の分析結果から、準備作業と組立前半の工程を優先して自動化の検討を進められることがわかった。

<自動化に向けた作業順序の変更>

- 作業の自動化難易度を記載した自動化分析シートを用いることで、作業順序と作業の自動化難易度の情報を関係者と共有して進め、自動化に向けた作業順序の変更案を作成できることを確認した。
- 本事例では、組立前半の工程においては、自動化分析シートの結果から作業の自動化難易度 A, B, C の作業が隣接していることがわかった。
- 作業の自動化難易度の低い作業と高い作業が隣接した状態で作業の自動化難易度の低い作業のみを自動化した場合、各作業者に十分な作業を割り付けることができず、遊休時間が長くなることから、期待する省人効果が得られない可能性がある。そこで、作業の自動化難易度の低い作業と作業の自動化難易度の高い作業にそれぞれを揃えることで、省

人効果が期待できることがわかった。

- 作業の自動化難易度を用いることで、効果的かつ視覚的に作業順序の変更が可能であることを示すことができた。しかし、作業順序の変更作業の手順化や、作成した作業順序の変更案の良否を客観的に判定する方法を手法として整理するには至らなかった。

<ライン設計案作成の手順化>

- 作業の自動化難易度を揃えた作業順序の案をベースに、人とロボットの共存するライン設計案を作成することができた。
- 本事例では、作業の自動化難易度の低い作業を前半に揃えて4台のロボットで自動化し、作業の自動化難易度の高い作業はラインの最後に1名の人手で対応するとした、人とロボットのハイブリッド組立ラインを提案した。
- 作業の自動化難易度を揃えた作業順序の変更を行った後にライン設計案を作成するプロセスについては、設備技術者が経験的に進めていた。提案した設計手順をさらに展開するには、各作業を人手あるいはロボットに選択し、作業ステーションに配置するプロセスの手順化が必要であることがわかった。

<ラインの評価>

- 提案した設計手順の有効性を評価するために、提案した設計手順を行わなかった場合を想定して、結果を比較した。その結果、提案した設計手順では、人員の削減と設備導入コストの抑制の両方の点で優れていることを確認した。
- 提案した設計手順は、人手とロボットの割付け作業を、視覚的かつ定量的に関係者と共有して進めることができ、後戻りの少ない設計手順であることを確認した。

3.5 人とロボットのハイブリッド組立ライン設計の手順化に関するまとめ

3章では、人手作業中心の組立ラインの自動化検討にあたり、作業の自動化難易度という指標を定義した。そして、作業の自動化難易度を活用することで、ロボット導入コストの詳細情報が得られていない段階で、作業の自動化難易度の低い作業の自動化を優先したライン設計案を作成する手順を具体的に提案した。さらに、提案した設計手順を電子機器製造のライン設計に適用し、作業の自動化難易度を用いることで、効果的かつ視覚的に作業順序の変更や関係者と情報を共有しながらライン設計を進めることができることを確認した。また、提案した設計手順を用いなかった場合との比較により、提案した設計手順では、人員の削減と設備導入コストの抑制の両方の点で優れていることを確認した。

今後の課題としては、次の2点が挙げられる。1つ目は、今回示した各ステップ内の作業手順の明確化と手法化に関するものが挙げられる。現状では、作業の自動化難易度の設定、作業順序の変更案およびライン設計案の作成などの作業は、経験のある技術者が草案を作成し、関係者のレビューによって練り上げる形で進めている。しかし、これらの作業をさらに合理的かつ効果的に行う手法の提案と実用化が必要だと考えられる。作業の自動化難易度の設定については、機構学、制御工学、画像処理や電子設計などの技術的な難易度と、実際にロボットシステムを具現化するための開発工数を複合して設定する手法を明確にする必要がある。具体的には、トラブルの事前解析のために利用される代表的な手法の1つである FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) における RPN (Risk Priority Number) の設定手法と現場での活用方法を参考にすることが考えられる (日本信頼性学会, 2014; マクダーモット・ミカラク・ボウリガード, 2010)。

さらに、ライン設計案の作成作業の手順化については、ラインバランシング手法の適用が挙げられる (2.3.1 節参照)。また、本事例では、自動化分析シートの作成にあたり、撮影したビデオで、技術者が各作業の内容と時間を表計算ソフトウェアに記入した。この分析に要する人手作業の工数と時間削減の観点からは、支援ソフトウェアツールの活用が考えられる (マイクロリンク, 2018)。

もう1つは、製造ラインの自動化の本来の目的である経営的な観点での検

討である。本章で提案した設計手順を実施した後に、設備投資の回収性を確認してから、経営的判断のもとで設備導入に向けた活動が始まる。実際の活動では、投資判断とこれまで説明してきた設計手順を複数回繰り返した後に、実現に向かうことが多い。今回は、技術的な自動化推進手順を示したが、経営的な観点を含めた全体的な推進プロセスの明確化と体系化が期待される。

次章では、3章の設計手順では、設計者が経験的に行っていた作業順序の変更と、人手あるいはロボットの作業タイプ選択のプロセスを、数理計画によるラインバランシング手法を適用することで定式化を行う。

4. ハイブリッド組立ラインの 2 段階設計

4 章では、3 章で設計者が経験的に行っていたライン設計案の作成作業を、ラインバランシング手法を適用することで定式化し、小規模事例への適用によりその効果を確認する (宮内・山田・杉, 2020a; Miyauchi and Yamada, 2020; 宮内・山田・杉, 2021a)。

はじめに、4.1 節で、作業の自動化難易度とライン全体の自動化率を考慮したハイブリッド組立ラインの設計法の必要性を示す。次に、4.2 節で、0-1 整数計画法 (0-1 Integer Programming; 0-1IP; 2.3.2 節参照)を用いたハイブリッド組立ラインの設計法の提案を行う。4.3 節で、適用対象となる電子機器製造ラインについて説明し、4.4 節ではその一部を対象に実施した数値実験について述べる。4.5 節では、他の設計例との比較を行い、4.6 節では、提案したハイブリッド組立ラインの設計法に関するまとめを示す。

4.1 ハイブリッド組立ラインの設計法の必要性

2.1節と2.2節で説明したように、組立作業は、作業員、ロボットおよび製造装置を配置し、必要な作業を順次通過していく組立ラインによって行われる。実際に組立ラインを実現するには、費用対効果の観点で成立することが求められるため、すべての作業を自動化するのではなく、作業の内容によって、人あるいはロボットを組み合わせて配置する必要がある。このような、人とロボットの両方を配置したハイブリッド組立ラインとその設計法への要求が高まっている (1.4節参照)。

組立ラインの設計をラインバランシング問題として解決する手法が、現在までに多く提案されている (1.6節参照)。Hazira, Delorme and Dolgui (2015) は、組立ラインおよびトランスファーラインのラインバランシング問題を、コストや収益性などの複数の視点で解決するレビュー論文をまとめている。Pinto, Dannenbring and Khumawala (1983) は、設備導入コストと人件費の両方を含む総費用を最小化する手法を提案した。さらに、Yoosefelahi et. al (2012) は、複数のロボットで組立ラインを構成する際に、ロボットの購入および導入コストを考慮したロボット組立ラインバランシング (Robotic Assembly Line Balancing; RALB) 問題を取り扱っている。

これらの研究では、人件費や設備導入コストを考慮したライン設計法を提案しているが、設備導入コストが既知のデータとして与えられていることが前提となっていた。しかし、組立工程では、設備費や運用・保守費の具体的なコストデータを得ることができるのは、設備の詳細設計フェーズの事後になってしまう場合がある (Hazira, Delorneh and Dolgui, 2015) (1.6.2節参照)。特に、多様な作業が複合される組立工程では、作業内容によっては市販の汎用設備で自動化することができずに、自動化設備を個別開発することが必要となると思われる (宮内・深津・原野, 2018a)。

これに対して、3章では、作業の自動化難易度を考慮したハイブリッド組立ラインの設計手順を提案した (宮内・山田, 2018b; 宮内・山田, 2020b)。しかし、設計手順の定式化は行われていなかったため、設計者によって設計結果が異なることや、関係者で客観的に設計結果を評価できないという課題があった。

一方で、実際の製造現場では、省人によるコスト低減だけでなく、生産量と品質の安定化、作業者の苦渋作業の軽減や安全確保、製造業のIoT化などの観点から、より多くの作業を自動化することも期待されている (外務省, 2020; 清水, 2017)。そのため、実際に組立ラインを設計する際には、自動化が難しい作業の自動化を避けることと、より多くの作業を自動化することの両方が求められている (泉, 2002; 村山, 2018; 宮内・山田, 2018b; 宮内・山田, 2020b)。

4章では、これらの要求に着目し、作業の自動化難易度と自動化の達成度を示すライン全体の自動化率を考慮したハイブリッド組立ラインの設計法を提案する。

4.2 0-1 整数計画法を用いたハイブリッド組立ラインの設計法

4.2.1 ハイブリッド組立ラインの設計法の概要

本章では、3章で設計者が経験的に行っていた作業順序の変更や人あるいはロボットへの作業配置の手順を、ラインバランス手法を適用することで定式化する。図 4-1に、本研究で扱う作業の自動化難易度と自動化率を考慮した人とロボットのハイブリッド組立ラインの設計法を示す。はじめに、準備段階でライン設計条件を設定し、次にハイブリッド組立ラインを2段階

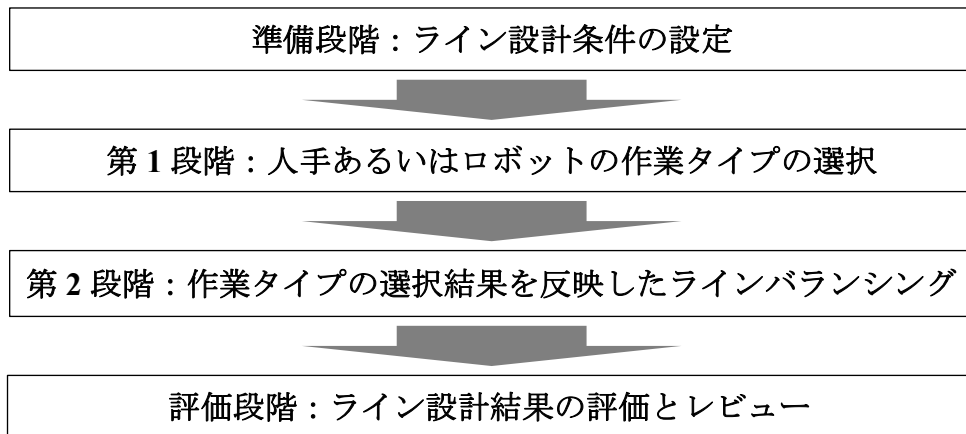


図 4-1 作業の自動化難易度と自動化率を考慮した人とロボットのハイブリッド組立ラインの設計法

で設計する。さらに、評価段階で、ライン設計結果の評価とレビューを行う。なお、組立ラインに対する2段階設計法は、Yamada and Matsui (2001)が提案しており、Igarashi, Yamada and Inoue (2013)で分解ラインへの適用も行われている。

本研究の2段階設計の第1段階では、0-1IPを用いて、総自動化難易度とライン全体の自動化率を考慮した人手あるいはロボットの作業タイプ選択を行う。ここで、総自動化難易度は、各作業の自動化難易度の和であり、ライン全体の自動化率は自動化の達成度を示している。

作業の自動化難易度とは、ロボットを用いて人手作業を自動化する際の、技術的な難しさとシステムの開発工数の大きさから設定される指標である(3.1.2節参照)。ここで、技術的な難しさが高い場合には、ロボット導入における安定稼働へのリスクが高くなる。また、システム開発工数が大きい場合には、ロボットの導入費用が大きくなる関係がある。そのため、総自動化難易度を抑えることは、ロボットの導入リスクと費用を抑える方向に寄与する。

自動化率の定義は、会社や工程ごとに異なり、統一されていないようである。Fujimoto (1992) は、装置ベース、作業員ベース、材料ベース、作業ステップベースの4つのカテゴリーに自動化率の定義を分類した(表 4-1)。本研究では、作業の自動化難易度を、組立ラインを構成する各作業に対して設定している(3.1.2節参照)。したがって、ライン全体の自動化率についても、この作業の自動化難易度の設定単位と揃えるために、表 4-1の「4) 作業ステップベース」の「自動化された作業ステップ」にもとづく定義を用いることとする。具体的には、組立ラインの全作業数に対する自動化された作業数の比

率をライン全体の自動化率とする。なお、表 4-1のその他の自動化率を用いることも、本研究で提案する設計法を応用することで可能であると考えられる。本研究で用いる自動化率は、人の作業をどの程度まで、ロボットに置き換えたかを示す指標であるため、自動化率が高ければ作業者の人数が削減され、労務費の削減につながる。

表 4-1 自動化率のタイプと説明 (Fujimoto (1992)をもとに再作成)

自動化率のタイプ	説明
(1) 装置ベース	自動化された装置数あるいは装置の時間の割合
(2) 作業者ベース	自動化によって削減された人あるいは人手作業の時間の割合
(3) 材料ベース	自動化機器で加工された材料の割合 (自動で溶接された箇所や自動で組立てられた部品の割合など)
(4) 作業ステップベース	自動化された作業ステップまたは作業ステーションの割合

このように、総自動化難易度とライン全体の自動化率を考慮することにより、ロボットの導入による費用とリスクの低減と、労務費削減の2つの観点から意思決定を行うことができる。

第2段階では、第1段階の作業タイプの選択結果を反映したラインバランシングを行う (2.3.1節参照)。ラインバランシングには主に、与えられたサイクルタイムのもとで総ステーション数を最小化する問題と、与えられた総ステーション数のもとでサイクルタイムを最小化する問題の2つがある (Hazira, Delormeh and Dolgui, 2015)。総ステーション数が増大すると、ロボットの導入コストや人とロボットの運用コストが増加するため、本提案法では前者の総ステーション数の最小化を行う。

4.2.2節では、人手とロボットの作業タイプ選択とラインバランシングの設計問題を、0-1IPとして定式化するための仮定と記号を説明する。そして、4.2.3~4.2.6節では、図 4-1に示すハイブリッドラインの設計法の各ステップについて、順番に説明する。最後に、4.2.7節で第1段階の目的関数を総自動化難易度と総作業時間に変更した場合の定式化について説明する。

4.2.2 仮定と記号

(1) 仮定

本研究では、人手あるいはロボットの作業タイプ選択とラインバランスングを0-1IPとして定式化する。定式化のために必要な仮定を以下に示す。

- すべての作業は人手作業あるいはロボット作業のいずれかに選択される。
- すべての作業ステーションは、ロボットステーションあるいは人手ステーションのどちらかに設定される。
- すべての人手作業は人手ステーションに割り当てられ、すべてのロボット作業はロボットステーションに割り当てられる。
- どの作業も複数の作業ステーションに割り当てられることはない。
- 作業*j*と*i*の間に先行関係がある場合、作業*i*は、作業*j*を実行する作業ステーションよりも前の作業ステーションに割り当ててはならない。
- すべての作業ステーションにおいて、その作業時間の合計は、所定のサイクルタイムを超えない。

(2) 記号

本研究では、0-1IPを用いてハイブリッド組立ラインの設計を行う。0-1IPとして定式化する際に必要な作業集合、パラメータ、決定変数と評価指標の記号を、以下に示す。

I 作業集合

- J : 作業の集合
 J_{robot} : 作業タイプがロボットの作業の集合
 J_{human} : 作業タイプが人手の作業の集合
 P_j : 作業*j*の直前先行作業の集合

II パラメータ

- i : 作業*j*の直前先行作業番号
 j : 作業番号 ($j=1,2,3,\dots, |J|$)

<<第1段階：人手あるいはロボットの作業タイプの選択>>

- ad_j : 作業 j の自動化難易度
 TD_{\max} : 総自動化難易度の最大値
 ε_{TD} : 総自動化難易度の制約条件
 TT_{robot} : ロボット作業の総作業時間
 TT_{human} : 人手作業の総作業時間
 K_0 : 人手とロボットのステーション配置を考慮しない必要ステーション数
 K_{0r} : 必要なロボットステーション数
 K_{0h} : 必要な人手ステーション数
 K_{0L} : 必要ステーション数の和 ($= K_{0r} + K_{0h}$)

<<第2段階：作業タイプの選択結果を反映したラインバランシング>>

- k : 作業ステーション番号 ($k = 1, 2, 3, \dots, K$)
 CT : サイクルタイム
 $t_{\text{robot } j}$: ロボットで行った場合の作業 j の作業時間
 $t_{\text{human } j}$: 人手で行った場合の作業 j の作業時間
 st_k : 作業ステーション k にロボットを配置する場合は1, そうでない場合は0の変数
 t_{\max} : 作業ステーションの作業時間の最大値
 t_k : 作業ステーション k の作業時間

III 決定変数

<<第1段階：人手あるいはロボットの作業タイプの選択>>

- x_j : 作業 j の作業タイプをロボット作業として選択した場合は1, そうでない場合は0をとる0-1変数

<<第2段階：作業タイプの選択結果を反映したラインバランシング>>

- y_{kj} : 作業 j を作業ステーション k に配置した場合は1, そうでない場合は0をとる0-1変数

IV 評価指標

<<第1段階：人手あるいはロボットの作業タイプの選択>>

TA : ライン全体の自動化率 $\left(= \sum_{j=1}^{|J|} \frac{x_j}{|J|} \right)$

TD : 総自動化難易度 $\left(= \sum_{j=1}^{|J|} (ad_j \times x_j) \right)$

TT : 総作業時間 $\left(= \sum_{j=1}^{|J|} \{ t_{robot\ j} x_j + t_{human\ j} (1 - x_j) \} \right)$

<<第2段階：作業タイプの選択結果を反映したラインバランシング>>

K : 総ステーション数

BL : バランスロス

SI : 平滑度指数

AD : ライン全体の自動化率 TA と総自動化難易度 TD の増加率の比

4.2.3 準備段階:ライン設計条件の設定

準備段階では、本研究におけるハイブリッド組立ラインの2段階設計に必要なライン設計条件を設定する。設定する条件は、作業の先行順位、サイクルタイム、各作業の自動化難易度、人手およびロボットの各作業の作業時間である。

(1) 作業の先行順位とサイクルタイムの設定

2.1.2節で説明したように、製品の組み立てを行う際には、各作業の実施順位に製品構造にもとづく制約がある。この制約を整理して、各作業の先行関係を先行順位図にまとめる。さらに、需要量と生産計画量の要求から、製造ラインのサイクルタイム CT を設定する。ここでのサイクルタイムとは、製品が算出される時間間隔のことである(大場・藤川, 2009)。

(2) 作業の自動化難易度の設定

本研究では、ロボットを用いて自動化を進める際の難易度を、適用する要素技術を実用化するために必要とされる技術的な難しさと、それらを用いたシステム開発工数の2つに分類して設定している (3.1.2節参照)。本章で提案する設計法においても、作業 j の自動化難易度 ad_j は、要素技術とシステム開発の観点から、設備技術者、生産技術者、各要素技術の専門家（ロボット技術者、制御技術者や画像処理技術者など）によって与えるものとする。例えば、各作業内容をロボットで自動化するための ad_j の設定は、表 3-2より用いることができる。

なお、作業の自動化難易度のような、定性的な内容を数値化して用いる例として、トラブルの事前解析のために利用される代表的な手法の1つであるFMEA (Failure Modes and Effects Analysis) の体系化手法と現場活用のしくみを参考にすることができると考えられる (日本信頼性学会, 2014; マクダーモット・ミカラク・ボウリガード, 2010)。

(3) 人手およびロボットの作業時間の設定

本研究では、既に稼働している人手中心の組立ラインをもとに、人とロボットのハイブリッド組立ラインを設計する問題を対象としている。そのため、人手で行った場合の作業 j の作業時間 $t_{human\ j}$ は、習熟した作業者の作業時間を実測して設定することが可能である。一方で、ロボットで行った場合の作業 j の作業時間 $t_{robot\ j}$ は、この段階では正確な情報が得られない。そこで、 $t_{human\ j}$ をベースに、作業の単純さや他の製造ラインでの類似作業を自動化した際の実績を考慮して、設定する。

このように本研究では、同じ作業を人手で行った場合とロボットで行った場合の作業時間を異なるものと仮定している。これは、人とロボットでは、特性が異なるためである。具体的には、人は複雑な作業を習熟によって短時間に行うことが可能であるが、ロボットを用いた自動化では、単純な作業を繰り返し高速に一定の作業時間で行うことが容易であることが挙げられる (原田, 2018)。

4.2.4 第1段階:人手あるいはロボットの作業タイプの選択

第1段階では、人手あるいはロボットの作業タイプの選択を行う。さらに、

作業タイプの選択結果を先行順位図に記入する。

(1) 総自動化難易度とライン全体の自動化率を目的とした 0-1IP による作業タイプの選択

第1段階では、はじめに、0-1IPによる人手あるいはロボットの作業タイプ選択を行う。実際に組立ラインを設計する際には、より多くの作業を自動化することと、自動化が難しい作業の自動化を避けるような両方が求められる。組立ラインの設計にあたり、これらの要求を明確にするために、目的関数として、総自動化難易度 TD の最小化(式(1))とライン全体の自動化率 TA の最大化(式(2))の2目的をおく。

$$TD = \sum_{j=1}^{|J|} ad_j x_j \rightarrow Min \quad (1)$$

$$TA = \sum_{j=1}^{|J|} \frac{x_j}{|J|} \rightarrow Max \quad (2)$$

式(1),(2)で示した2目的問題を解くため、0-1IPを用いて、作業 j の作業タイプ x_j を選択する。本研究では、 ε 制約法により、式(1)の目的関数を式(3)のように制約式とおき、総自動化難易度の制約条件 ε_{TD} を $\{0,1,2,\dots,TD_{max}\}$ と変更させることによりパレート最適解を算出する(吉村, 2007)(2.3.2節参照)。

$$TD \leq \varepsilon_{TD} \quad (3)$$

$$TD_{max} = \sum_{j=1}^{|J|} ad_j \quad (4)$$

$$x_j = \{0,1\} \quad j \in J \quad (5)$$

ここで、 $\varepsilon_{TD} = 0$ のときに、作業の自動化難易度の高い作業の自動化を避

けるシナリオを意味し, $\varepsilon_{TD} = TD_{\max}$ は, 作業の自動化難易度の高い作業の自動化も促進するシナリオを意味する。なお, TD の最大値 TD_{\max} は, 式(4)で与える。式(5)は, すべての作業がロボットあるいは人手の作業に選択されることを示す。

第1段階で選択される作業タイプの結果により, 作業タイプがロボットである作業の集合を J_{robot} とし, 作業タイプが人手である作業の集合を J_{human} と設定する。 J , J_{robot} と J_{human} の関係を式(6)のように表す。

$$J = \{J_{\text{robot}} \cup J_{\text{human}}\} \quad (6)$$

$$\text{where } J_{\text{robot}} \cap J_{\text{human}} = \Phi$$

(2) 総作業時間と必要ステーション数の算出

ロボット作業の総作業時間 TT_{robot} と人手作業の総作業時間 TT_{human} を, 式(7)と(8)で, それぞれ与える。さらに, 総作業時間 TT は, TT_{robot} と TT_{human} の和として, 式(9)で与える。

$$TT_{\text{robot}} = \sum_{j=1}^{|J|} t_{\text{robot } j} x_j \quad (7)$$

$$TT_{\text{human}} = \sum_{j=1}^{|J|} t_{\text{human } j} (1 - x_j) \quad (8)$$

$$TT = TT_{\text{robot}} + TT_{\text{human}} \quad (9)$$

次に, 必要なロボットステーション数 K_{0r} は, 式(10)で計算される。なお, 式(10)で, $[A]$ は A に等しいか, 小さくない最小の整数値を示す。同様に, 必要な人手ステーション数 K_{0h} は, 式(11)で与えられる。以上により, 必要ステーション数の和 K_{0L} は, K_{0r} と K_{0h} により式(12)で与えられる。さらに, 従来のラインバランシング問題と比較するために, 人手とロボットのステーション配置

を考慮しない必要ステーション数 K_0 を、サイクルタイム CT と TT を用いて式(13)で与える (Nof, Wilhelm and Warnecke, 1997)。

$$K_{0r} = \left\lceil \frac{TT_{\text{robot}}}{CT} \right\rceil \quad (10)$$

$$K_{0h} = \left\lceil \frac{TT_{\text{human}}}{CT} \right\rceil \quad (11)$$

$$K_{0L} = K_{0r} + K_{0h} \quad (12)$$

$$K_0 = \left\lceil \frac{TT}{CT} \right\rceil \quad (13)$$

(3) 作業タイプ選択結果の先行順位図への記入

ここでは、第2段階で0-1IPによるラインバランシングを行うために、第1段階における作業タイプの選択結果を先行順位図に記入する。記入例を図 4-2 に示す。図 4-2において、各作業でロボット作業を選択した場合には、作業番号 j ($\#j$)の円を二重線にするとともに、選択されなかった作業タイプの作

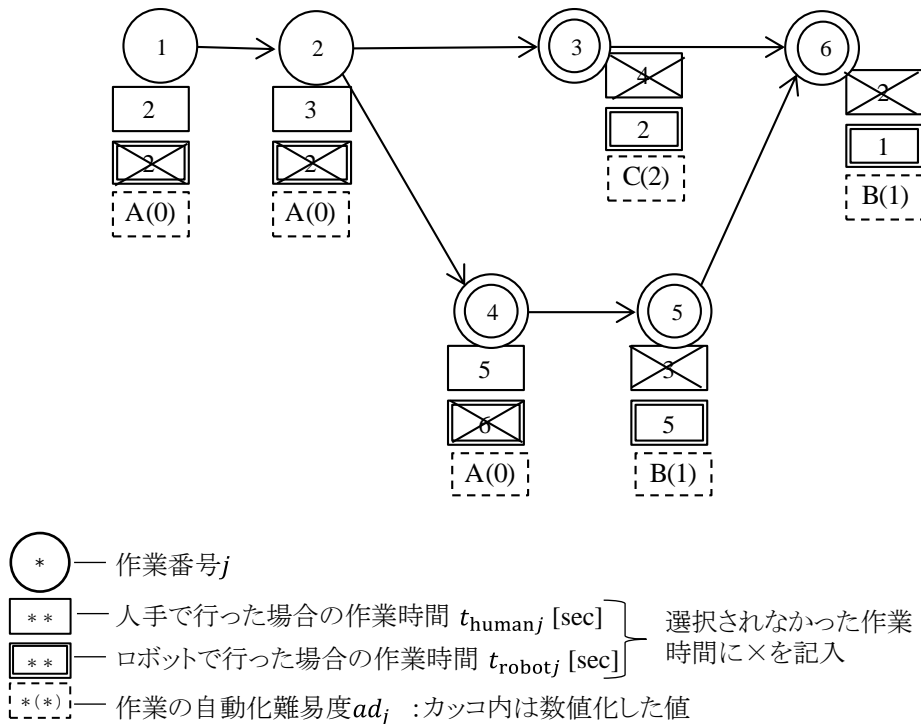


図 4-2 第1段階における作業タイプの選択結果を記入した先行順位図の例

業時間を記載した四角の部分に×印を付している。例えば、#3の作業では、ロボット作業が選択されたため、人手の作業時間を示す一重線の四角の中の数字(4)に×を付すとともに、作業番号の円を二重線にしている。

このように、作業タイプの選択結果を記入した先行順位図を作成することで、各作業の先行順位、作業時間、自動化難易度および作業タイプ選択結果を同時に確認することができる。

4.2.5 第2段階:作業タイプ選択を反映したラインバランシング

第2段階では、第1段階の人手あるいはロボットの作業タイプ選択結果を反映した0-1IPによるラインバランシングを行い、各作業を作業ステーションに配置する。さらに、ラインバランシングの結果をもとに、ピッチダイアグラム (大場・藤川, 2009) と作業ステーション配置図を作成する。

(1) 作業タイプの選択結果を反映した 0-1IP によるラインバランシング

第1段階で作成した作業タイプ選択結果を記入した先行順位図にもとづいて、0-1IPによる総ステーション数最小化のラインバランシングを行う。

はじめに、Nof, Wilhelm and Warnecke (1997)をもとに、与えられたサイクルタイム制約の下で、総ステーション数の最小化を目的とするために、式(14)を設定する。

$$K = \sum_{k=K_{OL}+1}^K ky_{k,|J_{robot} \cup J_{human}|} \rightarrow Min \quad (14)$$

s.t.

$$\sum_{k=1}^K y_{kj} = 1 \quad j \in \{J_{robot} \cup J_{human}\} \quad (15)$$

$$\sum_{k=1}^K ky_{ki} - \sum_{k=1}^K ky_{kj} \leq 0 \quad (16)$$

$$i \in P_j, \quad j \in \{J_{robot} \cup J_{human}\}$$

$$\sum_{j \in J_{\text{robot}}} t_{\text{robot } j} y_{kj} \leq CT \quad k = 1, \dots, K \quad (17)$$

$$\sum_{j \in J_{\text{human}}} t_{\text{human } j} y_{kj} \leq CT \quad k = 1, \dots, K \quad (18)$$

$$\sum_{j \in J_{\text{robot}}} y_{kj} \leq st_k \times |J_{\text{robot}}| \quad k = 1, \dots, K \quad (19)$$

$$\sum_{j \in J_{\text{human}}} y_{kj} \leq (1 - st_k) \times |J_{\text{human}}| \quad k = 1, \dots, K \quad (20)$$

$$y_{kj} = \{0, 1\} \quad k = 1, \dots, K, \quad j \in \{J_{\text{robot}} \cup J_{\text{human}}\} \quad (21)$$

$$st_k = \{0, 1\} \quad k = 1, \dots, K \quad (22)$$

制約条件(15)～(18)は, Nof, Wilhelm and Warnecke (1997) をもとに設定する。式(15)は, すべての作業 j が, いずれかの作業ステーション k に配置されることを示している。式(16)は, 作業 j と作業 i の先行関係の制約を表し, 式(17)はロボットステーションの作業時間の和がサイクルタイム CT を超えない制約を表す。同様に, 式(18)は人手ステーションの作業時間の和が CT を超えない制約を表す。

式(19)は, ロボットステーションには, ロボットタイプの作業のみを配置する制約であり, Yoosefelahi et. al (2012) の提案した制約式をもとに与えている。式(20)は, 式(19)と同様に, 人手ステーションには, 人手タイプの作業のみを配置する制約を表す。

式(21)は, 各作業ステーションに配置する作業が第1段階で選択したロボットあるいは人手作業の集合の要素である制約である。式(22)は, すべての作業ステーションがロボットあるいは人手の作業ステーションであることを

示す制約である。ここで、各作業ステーションには、人あるいはロボットのどちらかを配置すると仮定している。これは、1つの作業ステーションに人とロボットの両方を配置することを安全上の観点から避けるためである。

(2) ピッチダイヤグラムと作業ステーション配置図の作成

次に、ピッチダイヤグラムと作業ステーション配置図を作成する。ピッチダイヤグラムとは、横軸に作業ステーション番号を、縦軸に各作業ステーションにおける作業時間を取り、作業ステーションごとに、配置された作業の作業時間を積み上げて棒グラフで図示するものである(大場・藤川, 2009)。これにより、各作業ステーションの作業時間の把握と、作業ステーション間の作業負荷の比較を行うことができる。さらに、第2段階において各作業を作業ステーションに配置した結果を、4.2.4節(3)で作成した先行順位図に追記し、作業ステーション配置図を作成する。図 4-3は作業ステーション配置図の例である。この図により、ライン全体の作業ステーション数、人手とロボットの各作業ステーション数および、各作業ステーションと作業の先行順位の関係を理解することができる。

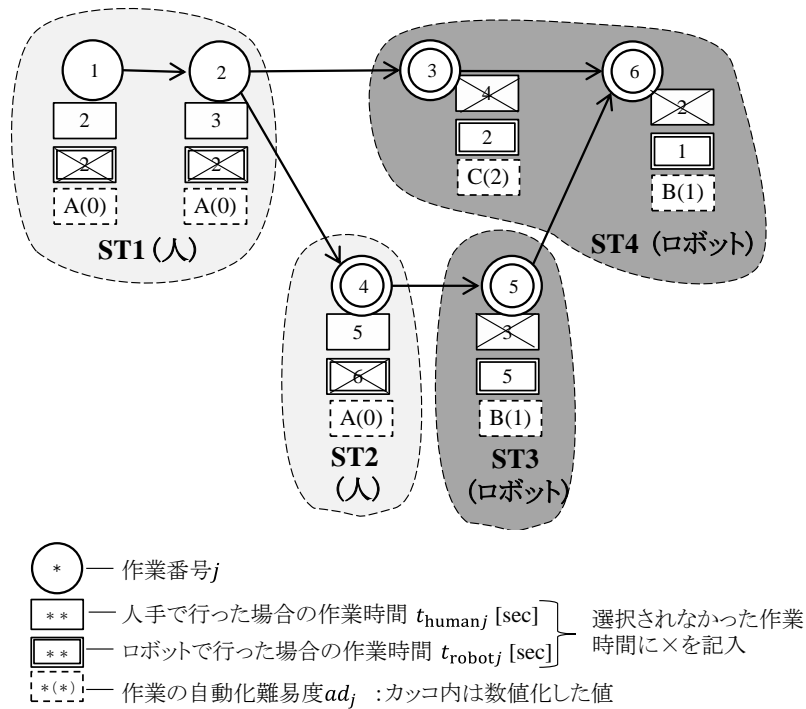


図 4-3 作業ステーション配置図の例

4.2.6 評価段階:ライン設計結果の評価とレビュー

(1) バランスロスと平滑化指数を用いたライン設計結果の評価

本研究では、ライン設計の結果を評価するために、バランスロス BL と平滑度指数 SI を用いる (大場・藤川, 2009)。 BL は、総ステーション数 K とサイクルタイム CT に対してどの程度の遊休時間を含むかを示し、式(23)で与えられる。 SI は、作業時間の作業ステーション間のバラツキを示し、式(24)で与えられる。例えば、 CT に対する遊休時間が少ない場合には、 BL の値が小さくなり、作業時間の作業ステーション間のバラツキが小さい場合には、 SI の値が小さくなる。したがって、時間の有効利用の観点からは、どちらの指標も値がより低い方が、よりバランスのとれたラインと評価される。

$$BL = \frac{K \times CT - TT}{K \times CT} \quad (23)$$

$$SI = \sqrt{\sum_{k=1}^K (t_{\max} - t_k)^2} \quad (24)$$

(2) ライン設計案の選択

提案した2段階設計法では、4.2.4節(1)で説明したように、 ε_{TD} を変化させることにより複数のシナリオが得られる。この設計法の第1段階では、総自動化難易度 TD の最小化とライン全体の自動化率 TA の最大化を目的としたことから、 TA と TD の増加率の比 AD を式(25)により定義し、 AD の値が高い順にシナリオの選択順位を決定する。

$$AD = \frac{TA}{\left(\frac{|J| + TD}{|J|}\right)} = TA \times \left(\frac{|J|}{|J| + TD}\right) \quad (25)$$

一方で、第2段階の目的関数である総ステーション数 K の値が小さいシナリオも選択候補となる。従って、 AD の値が大きいシナリオと K の値が小さいシナリオを中心に検討を進める。

(3) ライン設計結果のレビュー

4.2.5節(2)で作成したピッチダイヤグラムと作業ステーション配置図、総ステーション数 K 、4.2.6節で説明した BL 、 SI と AD を用いて、ライン設計結果をレビューする。ここで、自動化検討前の人手による組立ラインの構成（ベースライン）と、 ε_{TD} の値を変更することにより得られる複数のシナリオによるライン設計結果を比較することで、レビューを行うことができる。

4.2.7 総自動化難易度と総作業時間の2目的による作業タイプ選択

4.2.4節では、総自動化難易度 TD とライン全体の自動化率 TA の2つの目的関数により、人手あるいはロボットの作業タイプの選択を行っている。本研究で提案する2段階法では、第1段階における目的関数を変えて、比較することができる。その一例として、総自動化難易度 TD と総作業時間 TT の2目的関数を用いる (Miyachi and Yamada, 2020)。 TT を最小化する理由は、総作業時間を短縮することで、第2段階におけるラインバラシングのサイクルタイム制約が緩和されることにつながり、作業の作業ステーションへの割り当ての選択肢が広がると考えたからである。 TD は、式(1)で示され、 TT は4.2.4節の式(9)を用いて式(26)により、目的関数として与える。

$$\begin{aligned}
TT &= TT_{\text{robot}} + TT_{\text{human}} \\
&= \sum_{j=1}^{|J|} t_{\text{robot } j} x_j + \sum_{j=1}^{|J|} t_{\text{human } j} (1 - x_j) \\
&= \sum_{j=1}^{|J|} \{t_{\text{robot } j} x_j + t_{\text{human } j} (1 - x_j)\} \rightarrow \text{Min} \tag{26}
\end{aligned}$$

4.3 対象ラインの例: 電子機器製造ライン

4.2 節で提案した2段階設計法の有効性を評価するために、3章で取り扱った電子機器製造ラインの一部に適用する。4.3 節では、対象ラインの概要と提案した設計法に適用するための仮定や条件を説明する。

4.3.1 対象ラインの概要

3.2.1 節で説明したように、対象の製造ラインでは、組立作業を人手中心に行っているが、このラインを運用している工場のスタッフは、ロボットを使用することで人手作業の自動化を検討している。しかし、この製造ラインのすべての作業を自動化することは、ロボットの導入コストとランニングコストの回収リスクや新規自動化部分の安定稼働に関するリスクがある。そのため、これらのリスクの増大を抑えた合理的な自動化を求めている。

4.3.2 対象ラインの仮定

ここで、4.2 節で提案した2段階設計法を適用するために、以下のような仮定をおいた。

<生産要求に関する仮定>

- 対象となるラインはすでに手動で稼働しており、工場のスタッフは、ロボットを使って自動化することを計画している。
- 製品モデルの種類は1つとする。
- サイクルタイムは、需要量の要求にもとづいて与えられる。

<作業に関する仮定>

- 各作業の自動化難易度は、事前に与えられるものとする。
- ロボットと人手による各作業の作業時間は一定であり、既知とする。さらに、ロボットと人手で、同じ作業の作業時間は同じとは限らない。
- 作業の優先順位の関係は、製品設計の要求から既知であり、先行順位図として提示されている。

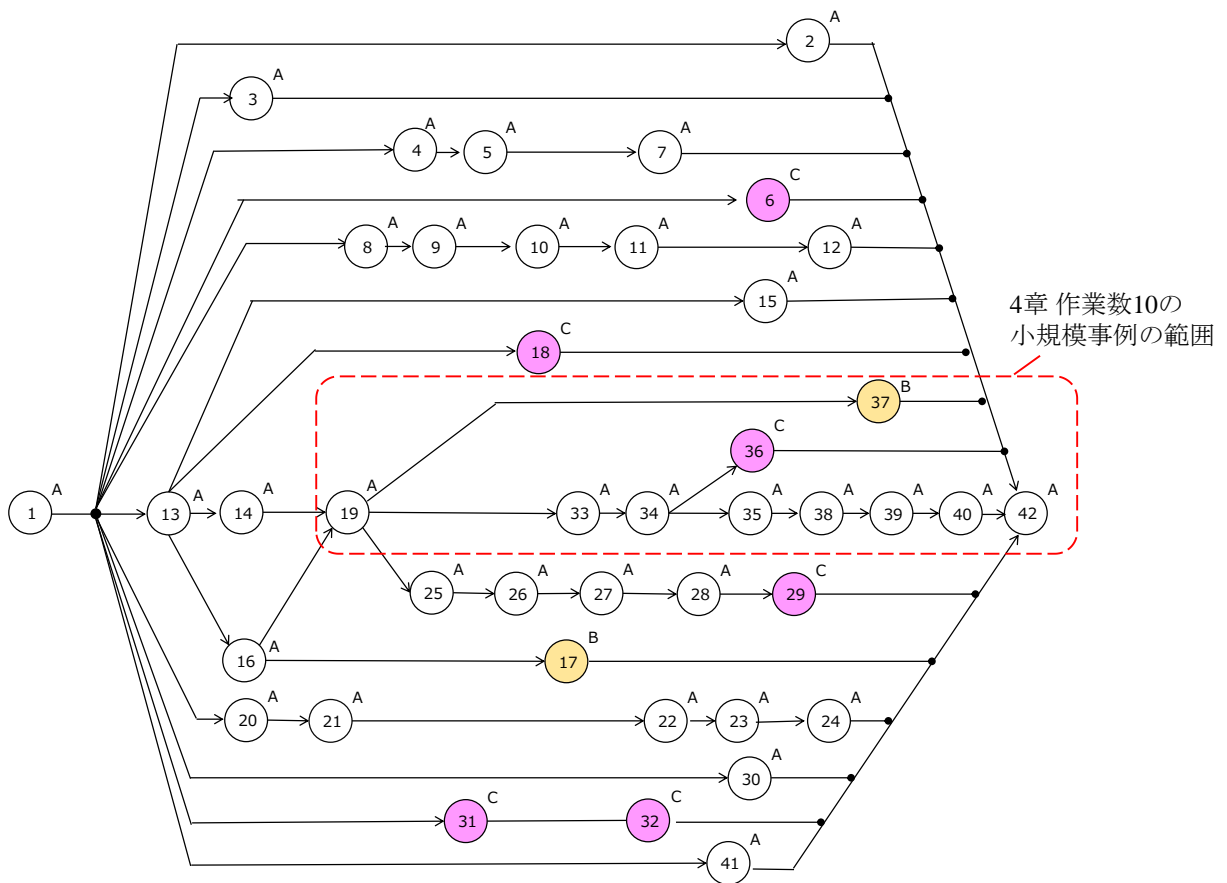


図 4-4 対象ラインにおける作業の先行関係と作業の自動化難易度

4.3.3 作業の先行関係, 作業の自動化難易度と作業時間

3.2節の図 3-5に示す組立前半工程の55作業から、削減した作業、サブ工程化した作業および、従来のライン編成における作業者間の搬送作業の13作業を除いた42作業を対象とする。図 4-4に、対象ラインにおける作業の先行関係と作業の自動化難易度を示す。ここで、各作業の自動化難易度は、3.2節の表 3-2にもとづいて設定した。図 4-4で、作業#6, #18, #29, #31, #32および#36

は、作業の自動化難易度が最も高いレベルを示すCとなっている。#17と#37の作業は、2番目に高い難易度を意味するレベルBであり、その他のタスクは、ロボットによる自動化が比較的容易なレベルAとなった。

ここで、人手で行った場合の作業 j の作業時間 $t_{human\ j}$ は、3.1.2節で、実際の作業をビデオ撮影して測定した結果を用いた。一方で、ロボットで行った場合の作業 j の作業時間 $t_{robot\ j}$ は、正確な情報が得られないため、 $t_{human\ j}$ をベースに、作業の自動化難易度 ad_j や他の製造ラインでの類似作業を自動化した際の実績を考慮して設定した。なお、図 4-4では、対象企業の要望により、これらの各作業の作業時間の表記を省略している。

本節では、図 4-4のうち、点線で囲った10作業に限定して、数値実験を行うことで、4.2節で提案した2段階設計法の有効性を確認する。なお、図 4-4の全体を対象とする実験は5章で行う。

4.4 小規模事例への適用と評価

本節では、図 4-4のうち、点線で囲った10作業に限定して、数値実験を行うことで、4.2節で提案した2段階設計法の有効性を確認する。なお、数値実験には、Windows 10 Educationを搭載したIntel®Core™i5-5300 CPU @ 2.30GHzのPCと、線形計画ソルバーであるGLPKソフトウェア (Makhorin, 2010) を使用した。

4.4.1 準備段階:ライン設計条件の設定結果

(1) 作業の先行順位とサイクルタイムの設定

図 4-5 に、作業数 10 の小規模事例における先行順位図を示す。ここで、図 4-5 は図 4-4 の点線内の作業を転記したものである。なお、転記にあたり、作業番号は、1~10 に振りなおし、サイクルタイムを 30 秒と仮定して、実験を実施した。

(2) 作業の自動化難易度の設定

事例適用にあたり、表 3-2の作業の自動化難易度表を用いて、各作業の自動化難易度を、技術的なレベルが易しい順にA, B, Cの3つのグループに分けた。ここで、 ad_j の値は、A, B, Cのそれぞれに対して、0, 1, 2を代入した。

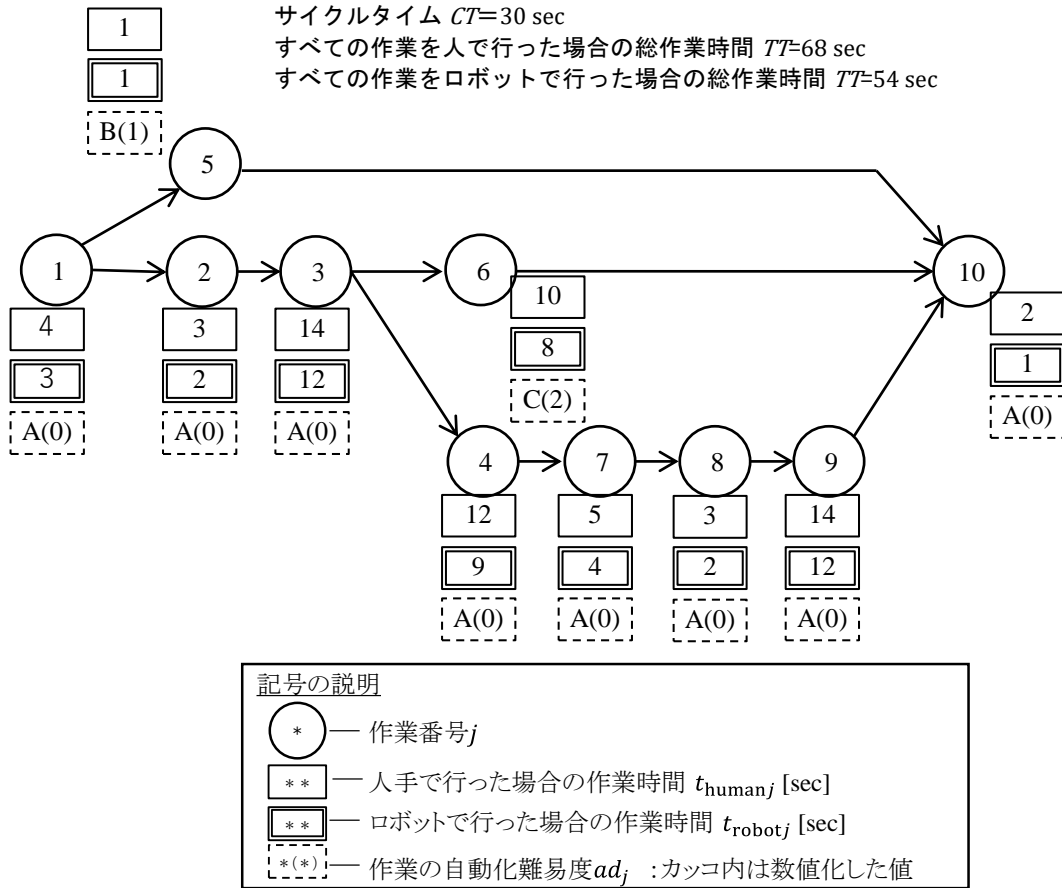


図 4-5 小規模事例における作業の自動化難易度と作業時間を記入した先行順位図

(3) 人手およびロボットの作業時間の設定

図 4-5に、作業 j の自動化難易度 ad_j と人手およびロボットで行った場合の作業 j の作業時間 t_{humanj} , t_{robotj} を記入した先行順位図を示す。ここで4.3.3節で説明したように、 t_{humanj} は、3.1.2節で、実際の作業をビデオ撮影して測定した結果を用いた。一方で、 t_{robotj} は、この段階では正確な情報が得られないため、 t_{humanj} をベースに、 ad_j や他の製造ラインでの類似作業を自動化した際の実績を考慮して設定した。

4.4.2 第1段階:人手あるいはロボットの作業タイプの選択結果

(1) 総自動化難易度とライン全体の自動化率を考慮した0-1IPによる作業タイプの選択

第1段階では、4.2.4節で説明した式(1)~(6)を用いて、人手あるいはロボッ

トの作業タイプの選択を0-1IPにより行った。

総自動化難易度の制約条件 ε_{TD} の値による制約シナリオを比較するために、「(a) ロボット最回避」, 「(b) ロボット回避」, 「(c) ロボット優先」と「(d) ロボット最優先」の4つのシナリオを設ける。ここで、「(a) ロボット最回避」は、 $\varepsilon_{TD} = 0$ と制約が最も厳しく、「(d) ロボット最優先」は $\varepsilon_{TD} = 3 (= TD_{\max})$ として、最も緩い制約のシナリオとした。

表 4-2に、小規模事例における第1段階の人手あるいはロボットの作業タイプ選択の結果を示す。ここで、ライン設計結果の比較のために、組立ラインの自動化検討前で、すべての作業を人手で行う場合を「ベースライン」、ライン設計経験のある技術者の手計算による結果を「ライン設計経験者による設計例」とする。さらに、総自動化難易度 TD の最小化と総作業時間 TT の最小化を目的関数とした結果を併記した(4.2.7節参照)。なお、本事例において、「(b) ロボット回避」と「(c) ロボット優先」は、同じライン設計結果となった。

表 4-2に示すように、ライン全体の自動化率 TA が「ベースライン」の0%に対して、本研究の提案法の結果であるシナリオ(a)~(d)では、80~100%と高い結果になった。その理由は、「ベースライン」が作業の自動化難易度を考慮せずにすべての作業を人手で行うライン設計であるのに対して、本研究の提案法では、ライン全体の自動化率 TA を目的関数として、作業 j の自動化難易度 ad_j を考慮して人手あるいはロボットの作業タイプ選択をしているためであると考えられる。例えば、作業 $j=1\sim 4$ および $7\sim 10$ の作業は、作業 j の自動化難易度 ad_j が、最も低い0であるため、本研究の提案法の結果であるシナリオ(a)~(d)ではすべてロボット作業に選択している。

以上の結果により、本研究の提案法の目的の1つである、より多くの作業を自動化することが実験により確認できた。また、シナリオ(a)~(d)を比較すると、 TA を高めることと、作業 j の自動化難易度 ad_j の高い作業(今回は#5と6の作業)を自動化することがトレードオフの関係になっていることがわかった。

表 4-2 小規模事例における第1段階の人手あるいはロボットの作業タイム選択の結果

作業の自動化難易度 (A~C)	作業番号										総作業時間 TT [sec]	総自動化難易度 TD [sec]	ライン全体の 自動化率 TA
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
(a) ロボット最回避 ($\epsilon_{TD}=0$)	A	A	A	A	B	C	A	A	A	A	56	0	80%
(b) ロボット回避 ($\epsilon_{TD}=1$)	R	R	R	R	R	H	R	R	R	R	56	1	90%
(c) ロボット優先 ($\epsilon_{TD}=2$)	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	56	1	90%
(d) ロボット最優先 ($\epsilon_{TD}=3$)	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	54	3	100%
ベースライン(すべて人手を選択)	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	68	0	0%
ライン設計経験者による設計例	R	R	R	R	R	R	R	H	H	H	60	0	50%
比較対象	(a) ロボット最回避 ($\epsilon_{TD}=0$)	R	R	R	R	H	R	R	R	R	56	0	80%
	(b) ロボット回避 ($\epsilon_{TD}=1$)	R	R	R	R	H	R	R	R	R	56	0	80%
	(c) ロボット優先 ($\epsilon_{TD}=2$)	R	R	R	R	H	R	R	R	R	56	2	90%
	(d) ロボット最優先 ($\epsilon_{TD}=3$)	R	R	R	R	H	R	R	R	R	56	2	90%

R : ロボット作業, H : 人手作業

(2) 作業タイプ選択による先行順位図の作成

4.4.3 節で第2段階の0-1IPによるラインバランシングを行うために、表4-2で得られた作業タイプ選択の結果を反映した先行順位図を作成した。

図4-6に、小規模事例における「(a) ロボット最回避」の作業タイプ選択結果を記入した先行順位図を示す。図4-6には、「(a) ロボット最回避」を示したが、これ以外のシナリオ(b)~(d)の結果を記入した先行順位図も同様に作成し、第2段階の作業タイプの選択結果を反映したラインバランシングに進んだ。

4.4.3 第2段階:作業タイプの選択結果を反映したラインバランシング結果

第2段階では、第1段階の人手あるいはロボットの作業タイプ選択の結果を用いて、0-1IPによるラインバランシングを行った。次に、ピッチダイヤグラムと作業ステーション配置図を作成した。

(1) 作業タイプの選択結果を反映した0-1IPによるラインバランシング

表4-3に、小規模事例における第2段階の作業ステーション配置とライン評価の結果を示す。なお、 BL の計算は、大場・藤川(2009)にもとづいた式(23)を用いて、 $CT=30$ [sec]の固定値として計算した。

(2) ピッチダイヤグラムと作業ステーション配置図の作成

小規模事例における(a)~(d)のシナリオのピッチダイヤグラムを図4-7に、「(b) ロボット回避」と「(c) ロボット優先」の作業ステーション配置図を図4-8に示す。

表4-2、表4-3、図4-7と図4-8を用いて、4.4.4節でライン設計結果の評価とレビューを行う。

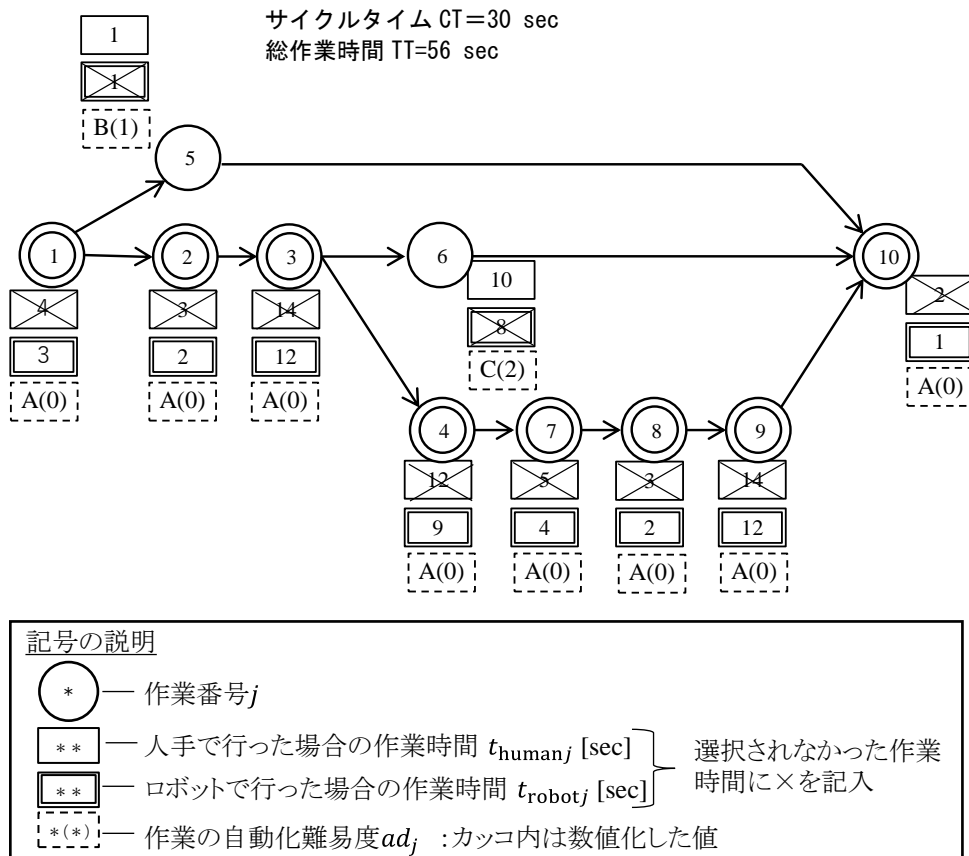
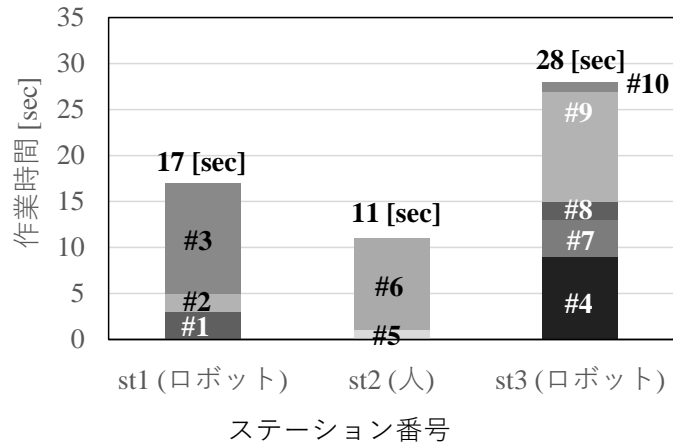


図 4-6 小規模事例における「(a) ロボット最回避」の作業タイプ選択結果を記入した先行順位図

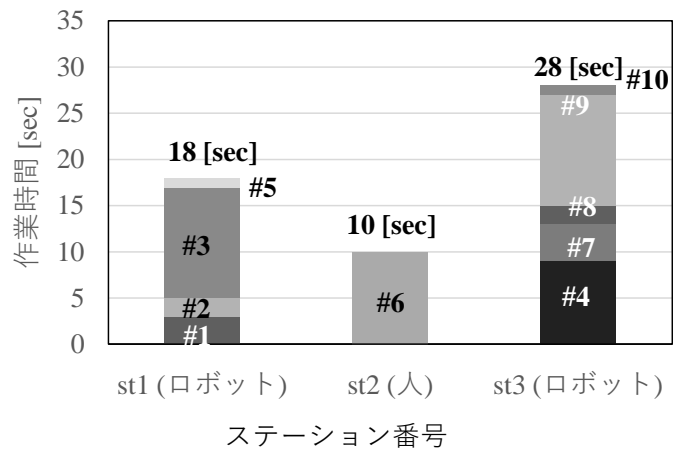
表 4-3 小規模事例における第2段階の作業ステーション配置とライン評価の結果

	ステーション配置			ライン評価							ADの値による選択順位
	人手ステーション数	ロボットステーション数	総ステーション数 K	ライン全体の自動化率 TA	総自動化難易度 TD	バランスロス BL	平滑度指数 SI	TA と TD の増加率の比 AD			
本研究	(a) ロボット最回避 ($\epsilon_{TD} = 0$)	1	2	3	80%	0	0.38	20.25	0.80	第2位	
	(b) ロボット回避 ($\epsilon_{TD} = 1$)	1	2	3	90%	1	0.38	20.59	0.82	第1位	
	(c) ロボット優先 ($\epsilon_{TD} = 2$)	1	2	3	90%	1	0.38	20.59	0.82	第1位	
	(d) ロボット最優先 ($\epsilon_{TD} = 3$)	0	2	2	100%	3	0.10	2.00	0.77	第3位	
ベースライン(すべて人手を選択)											
ライン設計経験者による設計例											
比較対象	(a) ロボット最回避 ($\epsilon_{TD} = 0$)	1	2	3	80%	0	0.38	20.25	0.80		
	(b) ロボット回避 ($\epsilon_{TD} = 1$)	1	2	3	80%	0	0.38	20.25	0.80		
	(c) ロボット優先 ($\epsilon_{TD} = 2$)	1	2	3	90%	2	0.40	29.83	0.75		
	(d) ロボット最優先 ($\epsilon_{TD} = 3$)	1	2	3	90%	2	0.40	29.83	0.75		
TDとTTを目的関数に設定											

4 ハイブリッド組立ラインの2段階設計

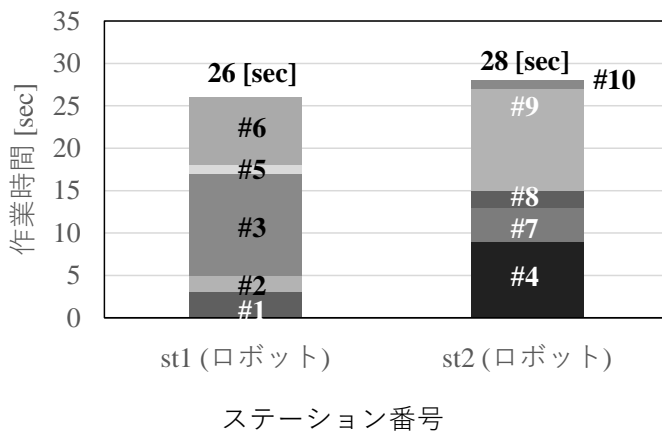


(a) ロボット最回避 ($\epsilon_{TD} = 0$)



(b) ロボット回避 ($\epsilon_{TD} = 1$)

(c) ロボット優先 ($\epsilon_{TD} = 2$)



(d) ロボット最優先 ($\epsilon_{TD} = 3$)

図 4-7 小規模事例におけるライン設計結果のピッチダイヤグラム

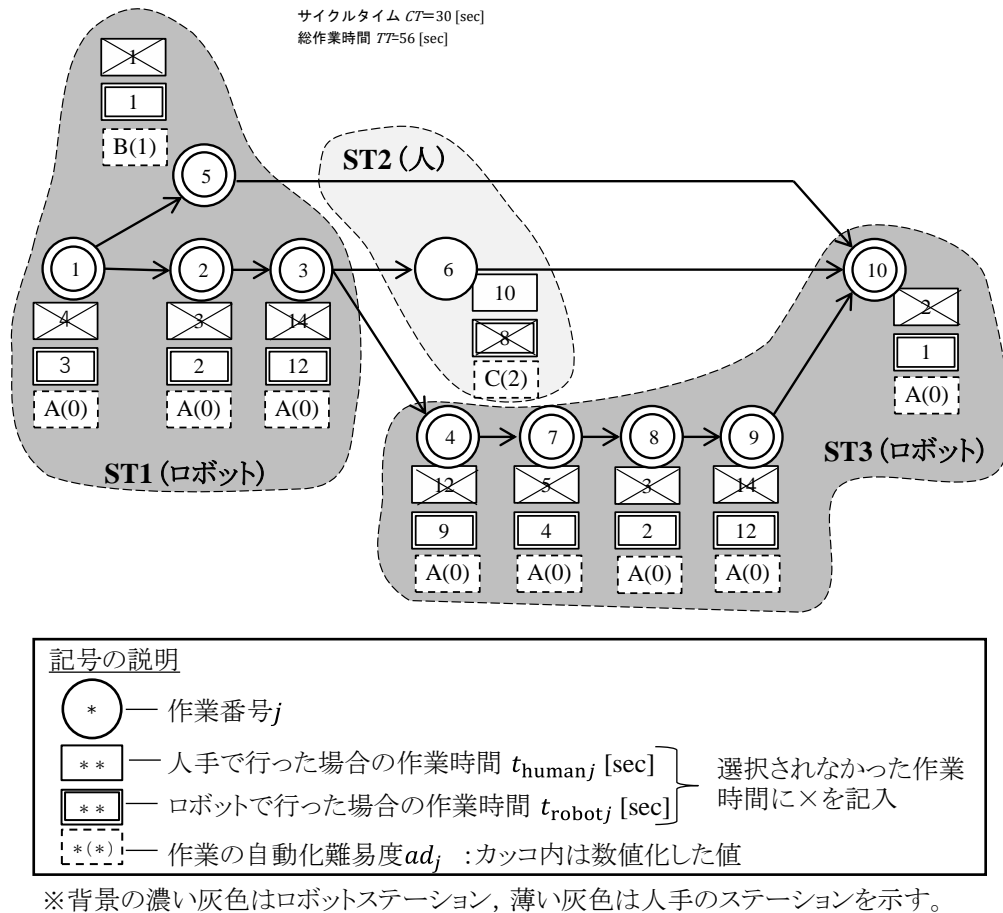


図 4-8 小規模事例における「(b) ロボット回避」と「(c) ロボット優先」の作業ステーション配置図

4.4.4 評価段階:ライン設計結果の評価とレビューの結果

(1) バランスロスと平滑化指数を用いたライン設計結果の評価

4.4.3節で得られた結果に対して、バランスロス BL と平滑化指数 SI およびライン全体の自動化率 TA と総自動化難易度 TD を用いて、各シナリオを「ベースライン」と比較することで評価した。

表 4-2において、「(a) ロボット最回避」のシナリオでは、「ベースライン」と比べて、自動化難易度が高い作業の自動化を回避しながら、 TA を向上することができた。一方で、表 4-3「(a) ロボット最回避」の結果では、 $BL = 0.38$, $SI = 20.25$ となり、ベースラインの $BL = 0.24$, $SI = 2.83$ に比べて大きな値となった。このことから、 CT に対する遊休時間と、作業時間の作業ステーション間のバラツキの両方の観点で、ラインバランスが悪化したことがわかつ

た。また、「(b) ロボット回避」や「(c) ロボット優先」においても、同じ傾向であった。「(d) ロボット最優先」では、 ad_j の高い作業の自動化を含めて、すべての作業を自動化することで、 TA は最大値の100%となった。この結果では、 $BL=0.10$, $SI=2.00$ と両方の値が抑えられ、ラインバランスも高い結果となったことがわかった。

以上の結果から、 ε_{TD} を緩和すると、 ad_j の高い作業を自動化することで TA が高くなることがわかった。さらに、 ε_{TD} を緩和したシナリオでは、 CT に対する遊休時間が短く、作業ステーション間の作業時間のバラツキも小さい、ラインバランスの良い結果となることもわかった。

(2) ライン設計案の選択

式(25)のライン全体の自動化率 TA と総自動化難易度 TD の増加率の比 AD を用いて、その値の高いものから、選択順位を設定した結果を表 4-3に示す。ここで、「(b) ロボット回避」と「(c) ロボット優先」で $AD=0.82$ と最も高い値となり、選択順位が第1位となった。次に、「(a) ロボット最回避」は $AD=0.80$ で第2位となり、「(d) ロボット最優先」は $AD=0.77$ で、第3位となった。

一方で、総ステーション数 K を比較すると、「(d) ロボット最優先」で $K=2$ と最も少なく、その他のシナリオでは、 $K=3$ という結果であった。したがって、本事例では、 AD が最大になるシナリオと K が最小になるシナリオは一致していないことがわかった。4.4.4節(3)では、これらのシナリオをベースにライン設計結果をレビューする。

(3) ライン設計結果のレビュー

ここでは、4.4.3節で作成したピッチダイヤグラム(図 4-7)と作業ステーション配置図(図 4-8)を用いて、ライン設計結果をレビューした。

4.4.4節(2)で説明したように、 AD による選択順位が第1位の「(b) ロボット回避」と「(c) ロボット優先」では、 BL , SI の値が「ベースライン」よりも大きくなり、ラインバランスが悪い結果となった。図 4-7(b)(c)のピッチダイヤグラムを見ると、作業時間が、人手作業 $ST2$ の10 [sec]に対して、ロボット作業 $ST3$ の28 [sec]と2.8倍の差となった。図 4-8を見ると、人手ステーションに配置されているのは、 ad_j が高い#6の作業のみであることがわかる。このことから、第1段階で、#6の作業のみが人手作業として選択された

ことが、ラインバランスを悪化させた原因と考えられる。これらの傾向は、「(a) ロボット最回避」でも同じであった。

一方で、 K が最小となった「(d) ロボット最優先」は、第1段階で、すべての作業をロボットの作業として選択していた。そのため、図 4-7 (d)に示すように、2つのロボットステーション間でバランスがとられ、作業時間の大きな差は発生していない。これは、すべての作業を人手として選択した「ベースライン」でも同じだった。このため、「(d) ロボット最優先」および「ベースライン」では、ラインバランスが良好になったと考えられる。

本事例では、自動化難易度が B, C と高い作業の数が2作業のみとなった。そのため、この2作業を人手ステーションに配置した場合の作業時間の合計は 11 [sec]となり、サイクルタイム $CT=30$ [sec] に対して短く、19 [sec]と長い遊休時間が発生していた。この長い遊休時間の発生が、シナリオ(a)~(c)のようにロボットと人手が混在する場合において、ラインバランスが悪化した理由と考えられる。

一方で、ラインの中に多くの自動化難易度の高い作業がある事例では、人手の作業ステーションへの配置パターンが増加し、ラインバランスの良い設計案が得られる可能性があると考えられる。例えば、5章で説明する電子機器製造ラインへの適用事例では、全体の42作業のうち、作業の自動化難易度が高い B あるいは C の作業が8作業あり、それらすべてを人手で行った場合の作業時間の合計は 82 [sec]であった。この値は、5章の事例におけるサイクルタイム $CT=60$ [sec]よりも長いことから、人手ステーションの総作業時間が CT を超えない範囲で CT に近い値となるシナリオを選ぶことで、遊休時間が短くラインバランスの良い設計案を得ることができた。

さらに、ライン全体の自動化率よりもラインバランスを優先する設計案についての検討が必要な場合があると思われる。4.5 節で説明するライン設計経験者による設計例では、表 4-3 に示すようにライン全体の自動化率 TA は 50%だが、総ステーション数 $K=2$ (ロボットステーション数 1, 人手ステーション数 1) で、 $BL=0$, $SI=0$ とラインバランスの良い設計案となっている。今後は、このようなライン全体の自動化率よりも、総自動化難易度とラインバランスを優先する設計法の開発も求められる。

以上の分析により、人手とロボットの作業ステーションが混在し、作業ス

テーション間の作業時間の差が大きい場合には、 CT に対する遊休時間と、作業時間の作業ステーション間のバラツキの両方の観点で、ラインバランスの悪化するケースがあることがわかった。

4.5 小規模事例における他の設計例との比較

本節では、第1段階で総自動化難易度 TD と総作業時間 TT の2つの目的関数を用いた場合 (4.2.7節参照)、およびライン設計経験者による設計例と提案した設計法の結果を比較する。ライン設計経験者による設計例では、詳細な要求は提示せずに、無理な自動化は避けながらも、できるだけ自動化を進める方針のみを提示した。この設計結果を「ライン設計経験者による設計例」とした (表 4-2, 表 4-3)。その結果を下記に示す。

<事例適用の結果による比較>

- ライン全体の自動化率

表 4-2において、本研究の提案法によるライン全体の自動化率 TA は、総自動化難易度 TD と総作業時間 TT を目的関数とした設計法の各シナリオおよびライン設計経験者による設計例に比べて高い結果になった。これは、本研究の提案法では、ライン全体の自動化率 TA の最大化を目的関数として設定したことが理由と考えられる。

- ラインバランス

表 4-3の結果では、本研究で提案した設計法において AD による選択順位が第1位のシナリオ (b) と (c) では、 $BL=0.38$, $SI=20.59$ となった。一方で、ライン設計経験者による設計例では、 $BL=0$ と $SI=0$ となり、 CT に対する遊休時間と作業時間の作業ステーション間のバラツキの両方の観点で、ラインバランスが良い結果になった。このように、ラインバランスが良い結果となった理由は、ライン設計経験者は、人手とロボットの作業ステーション間の作業時間に大きな差が出ないように意識したためだと考えられる。

本研究で提案した設計法の今後の課題として、第2段階の結果をライン設計者が分析して、その一部を変更して再度ラインバランスを行う方法や、2段階に分けずに総自動化難易度、ライン全体の自動化率と

総ステーション数の3目的のライン設計問題を同時に解くことなどが考えられる（宮内・山田, 2021b）。

<設計プロセスの観点による比較>

● ライン設計案の数

本研究で提案した設計法と TD と TT を目的関数とした設計法では、総自動化難易度の制約条件 ε_{TD} を変えた複数シナリオで比較検討が可能である。しかし、ライン設計経験者による設計例では、検討する設計案の数が限定されることから、多くのシナリオでの比較検討は困難と思われた。

● 作業数の多い場合や属人性の排除

本研究で提案した設計法と TD と TT を目的関数とした設計法では、定式化により線形計画ソルバーを用いて自動計算が可能であるため、今回の事例よりも作業数の多い場合にも適用可能と思われる。一方で、ライン設計経験者の経験にもとづく机上設計では、属人性を排除することはできないと考えられる。

対象製品・工程のライン設計の経験が豊富な設計者であれば、本研究で提案した設計法を用いないでも、総自動化難易度、ライン全体の自動化率やラインバランスなどの複数目的を考慮して設計を進めることが可能であると考えられる。しかし、ライン設計の経験が浅い設計者や、ライン設計の経験は豊富だが、対象製品での経験が少ない設計者の場合には、本研究で提案した設計法で得られる複数シナリオを用いて設計検討を進めることは有用であると考えられる。さらに、複数の関係者による設計レビューなどの場において、客観的に設計プロセスや結果を評価するためには、ライン設計者のレベルに関わらず、本研究で提案した設計法の活用が期待できる。

本節では、第1段階で総自動化難易度 TD と総作業時間 TT の2つの目的関数を用いた場合、およびライン設計経験者による設計例と比較を行った。その結果、本研究の提案法は、ライン全体の自動化率 TA の観点では優れていることがわかった。さらに、本提案法では解を得られないラインバランスを優先した設計案など、検討する価値のあるライン設計案が存在することもわかった。また、定式化した設計法のメリットについても整理することができた。

4.6 ハイブリッド組立ラインの2段階設計に関するまとめ

本章では、作業の自動化難易度とライン全体の自動化率を考慮したハイブリッド組立ラインの設計法を提案した。はじめに、ハイブリッド組立ラインの2段階設計法を0-1IPとして定式化した。次に、提案法の効果を検証するために、事例を用意し、線形計画ソルバーであるGLPKソフトウェアを使用して数値実験を行った。さらに、目的関数を変更した場合や、ライン設計経験者による設計例との比較も行った。

これらの結果から、総自動化難易度とライン全体の自動化率がトレードオフ関係にあることと、ロボットと人手が混在するシナリオでは、ロボットあるいは人手のみのラインに比べてラインバランスが悪化するケースのあることがわかった。

今後の課題としては、ロボットと人手の作業ステーションが混在する場合に、ラインバランスを悪化させない定式化と設計法の検討が挙げられる。例えば、2段階に分けずに総自動化難易度、ライン全体の自動化率と総ステーション数の3目的のライン設計問題を同時に解く(宮内・山田, 2021b)ことや、バランスロスまたは平滑度指数を目的関数とすることが考えられる。

今回のような10作業程度の問題では、人手によるライン設計も容易であるが、本研究で対象とした電子機器製造ラインは全体で50程度の作業がある。このように、作業数が増加した場合には、本研究で提案した2段階設計法がより有効になると考えられる。そのため、5章では、今回よりも作業数の多い問題例へ適用し、実用化に向けた課題抽出を行う。

5. 2 段階設計法の電子機器製造ラインへの適用と評価

4章で提案した2段階設計法の製造現場における効果を評価するために、実際の電子機器製造ラインの事例に適用する。5.1節で、対象ラインと数値実験環境を説明する。5.2節と5.3節は、2段階設計法の適用結果であり、5.4節は、得られた設計案に対するデザインレビューの例である。さらに、5.5節では、第1段階の目的関数を変えた場合との比較を述べる。5.6節は2段階設計法の電子機器製造ラインへの適用と評価についてのまとめである。

5.1 対象ラインと数値実験環境

本章では、4.3節の図 4-4に示した作業数42の電子機器製造ラインを対象として、提案した2段階設計法の数値実験を行う。また、需要にもとづく生産計画から、サイクルタイム CT を60 [sec]とする。4.3.3節と同様に、作業の自動化難易度は表 3-2の作業の自動化難易度表を用いて設定した。さらに、人手で行った場合の作業 j の作業時間 $t_{human\ j}$ は、実際の作業をビデオ撮影して測定した結果を用い、 $t_{robot\ j}$ は、 $t_{human\ j}$ をベースに、 ad_j や他の製造ラインでの類似作業を自動化した際の実績を考慮して設定した。

本章で取り扱う問題は4.4節で取り扱った10作業の問題に比べて、計算量が多くなることが予想された。そのため、数値実験には、商用ソルバーであるILOG® CPLEX® (IBM, 2017a) を用いる。第1段階と第2段階の各問題は、はじめに、モデリング言語であるGNU MathProg (Makhorin, 2016) を用いてプログラミングし、次に、GLPK (Makhorin, 2010) を用いてCPLEX LP ファイル形式 (IBM, 2017b) に変換する。最後に、ILOG CPLEX を用いて、変換したプログラムの解を得る。また、数値実験には、Windows 10 Home を搭載した Intel®Core™i3-9100 CPU @ 3.60GHz の PC を用いた。

5.2 第1段階における作業タイプ選択の結果

表 5-1 に、第1段階において、総自動化難易度の制約条件 ε_{TD} を0, 1, 2, ..., 14 (= TD_{max}) に変更させた場合の、人手あるいはロボットの作業タイプ選択の結果を示す。ロボットの優先度が最も低い $\varepsilon_{TD}=0$ の場合には、作業の自動化難易度の高い8作業が人手作業として選択された。一方で、ロボットの優先度が最も高い $\varepsilon_{TD} = 14$ (= TD_{max}) の場合には、人手として選択される作業はなかった。

さらに、表 5-1 には、ライン全体の自動化率 TA 、総自動化難易度 TD 、総作業時間 TT と必要ステーション数を記載した。

(1) 総自動化難易度の制約条件と必要ステーション数の関係

ここでは、総自動化難易度の制約条件 ε_{TD} と必要ステーション数の関係について考察する。表 5-1 に示すように、 $\varepsilon_{TD}=0$ の場合、人手作業の総作業時間 TT_{human} が 82 [sec]に対して、サイクルタイム $CT=60$ [sec]であるため、式(11)を用いて必要な人手ステーション数 K_{0h} は 2 と算出された。次に、 ε_{TD} を 0 から増加させると、 TT_{human} は減少し、 $\varepsilon_{TD}=6$ で TT_{human} は CT と同じ 60 [sec]となり、 K_{0h} は 1 となった。一方で、必要なロボットステーション数 K_{0r} は、 ε_{TD} が 0 から増加するとともに増加した。具体的には、 ε_{TD} が 0~6 のときに K_{0r} は 3 であり、 ε_{TD} が 7~12 のときに K_{0r} は 4、 $\varepsilon_{TD}=13\sim14$ のときに K_{0r} は 5 となった。

以上の ε_{TD} の値を変えた場合の K_{0r} と K_{0h} の値を、式(12)を用いて求められる必要ステーション数の和 $K_{0L} (= K_{0r} + K_{0h})$ とともに図 5-1 に示す。ここで、 ε_{TD} の値を 0 から増加させると $\varepsilon_{TD}=5$ までは、 K_{0L} の値は 5 になり、 $\varepsilon_{TD}=6$ の場合に K_{0L} の値は 4、 $\varepsilon_{TD}=7$ 以降は、 K_{0L} の値は 5 になるが、 $\varepsilon_{TD}=13$ の場合にのみ K_{0L} の値は 6 となった。このように、第 1 段階の結果により K_{0r} と K_{0h} の値が変化し、それらの値の組み合わせで K_{0L} の値も増減することがわかった。さらに、表 5-1 に示すように、人手とロボットの作業ステーション配置を考慮しない必要ステーション数 K_0 は 4 あるいは 5 であり、すべてのシナリオで、 K_{0L} は K_0 と同等かそれ以上となることがわかった。

本実験の結果から、 K_{0L} の値は、第 1 段階における人手あるいはロボットの作業タイプ選択の結果によって変化することがわかった。さらに、 K_{0L} は K_0 と同等かそれ以上となったことから、人手あるいはロボットの作業タイプ選択が、必要ステーション数を増加させたこともわかった。

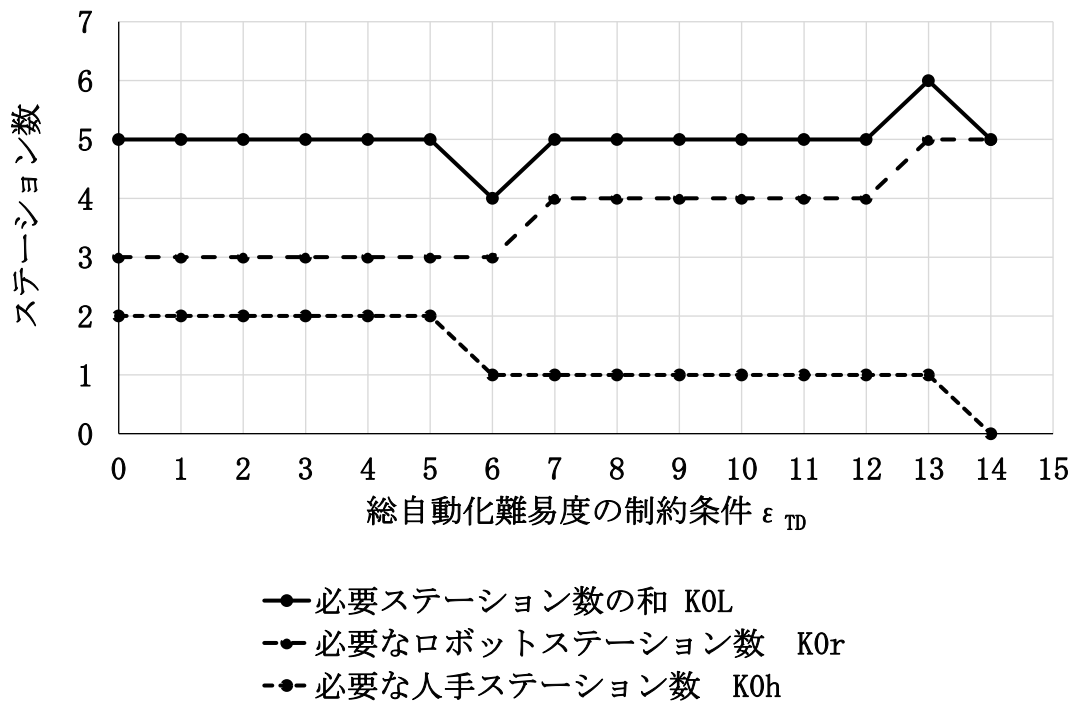


図 5-1 総自動化難易度の制約条件 ε_{TD} と必要ステーション数の関係

(2) 総自動化難易度とライン全体の自動化率の関係

図 5-2 に、 ε_{TD} を変化させて得られる総自動化難易度 TD とライン全体の自動化率 TA の関係を示す。 ε_{TD} が増加すると、 TD と TA の両方が増加することから、 TD を抑制することと TA を増加させることはトレードオフの関係にあることがわかる。ただし、局所的には、 ε_{TD} を増加させても、 TA が変化しない場合もあった。例えば、 ε_{TD} が 2 から 3 に増加した場合、 TA は 85.7% と変わらなかった。今回の結果では、4→5, 6→7, 8→9, 10→11 と ε_{TD} を増やした場合にも同様の結果となった。このような結果になった理由は、 ε_{TD} の値を 1 増やしても、作業の自動化難易度が $adj = 1$ の人手作業が存在しないため、ロボット作業に新たに選択することができないためだと考えられる。具体的には、作業の自動化難易度が B ($adj = 1$) である #17 と #37 が、すべてロボット作業に選択されている場合には、 ε_{TD} を 1 増やしても、 TA は増加しない結果となった。

以上のように、 K_{OL} は、人手あるいはロボットの作業タイプ選択の結果に影響を受けることと、 TD と TA は全体としては、トレードオフの関係にあることがわかった。

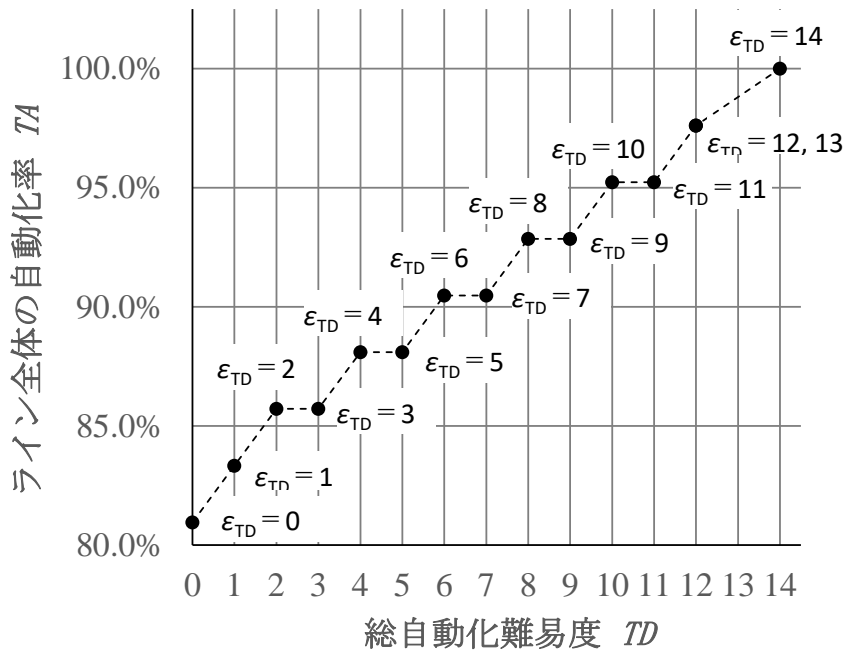


図 5-2 総自動化難易度 TD とライン全体の自動化率 TA の関係

5.3 第2段階におけるラインバランシングの結果

第2段階では、第1段階の人手あるいはロボットの作業タイプ選択の結果を用いて、総ステーション数の最小化を目的関数として、ラインバランシングを行った。第2段階の作業ステーション配置の結果を表5-2に示す。

さらに、 TA と TD の増加率の比 AD による選択順位が第1位の $\varepsilon_{TD}=2$ のシナリオと総ステーション数 K の値が最小の $\varepsilon_{TD}=6$ のシナリオについてのピッチダイヤグラムを図5-3に、作業ステーション配置図を図5-4に示す。本節では、これらを用いて、第2段階におけるラインバランシングの結果を考察する。

5.3.1 総ステーション数およびラインバランスの評価

表5-2に示すように、すべてのシナリオにおいて、総ステーション数 K は、第1段階で算出した必要ステーション数の和 K_{0L} と同じとなった。したがって、この事例では、先行順位の制約を満たすために、作業ステーションを追加する必要はなかったことがわかった。

表5-2において、 K の値が最小となった $\varepsilon_{TD}=6$ のシナリオで、バランスロス BL と平滑度指数 SI の値が、すべてのシナリオの中で最小の値($BL=0.02$, $SI=2.45$)

となった。一方で、 AD の値が最大となった $\varepsilon_{TD}=2$ の場合は、 $BL=0.23$ 、 $SI=31.70$ と、 $\varepsilon_{TD}=6$ のシナリオよりも大きい値となった。一般に、 BL が小さいほど CT に対する遊休時間が少なく、 SI が小さいほど作業ステーション間の作業時間の変動が少ないことを意味する。したがって、シナリオ $\varepsilon_{TD}=6$ では、遊休時間と作業ステーション間の作業時間の変動がともに小さいことから K の値が4と最小になったと考えられる。一方で、シナリオ $\varepsilon_{TD}=2$ では、 CT に対する遊休時間が長く、作業ステーション間の作業時間の変動が大きくなったことで、 K の値が5になり、シナリオ $\varepsilon_{TD}=6$ よりも大きな値となったと考えられる。

このことは、図 5-3 に示したシナリオ $\varepsilon_{TD}=2$ と $\varepsilon_{TD}=6$ のピッチダイアグラムによって、具体的に確認することができる。 AD の値が最大となったシナリオ $\varepsilon_{TD}=2$ では、図 5-3 (a)に示すように、作業ステーション2の作業時間は28 [sec]、作業ステーション4と5の作業時間はそれぞれ45 [sec]と46 [sec]であった。そのため、遊休時間は作業ステーション2で32 [sec]、作業ステーション4と5でそれぞれ15 [sec]と14 [sec]となった。一方で、 K の値が最小になったシナリオ $\varepsilon_{TD}=6$ では、図 5-3 (b)に示すように、人手作業は1つの人手ステーション3に配置され、ロボット作業は3つのロボットステーション1, 2, 4に配置されている。ここで、1~4の各作業ステーションにおける作業時間は、59 [sec]、58 [sec]、60 [sec]、59 [sec]となった。

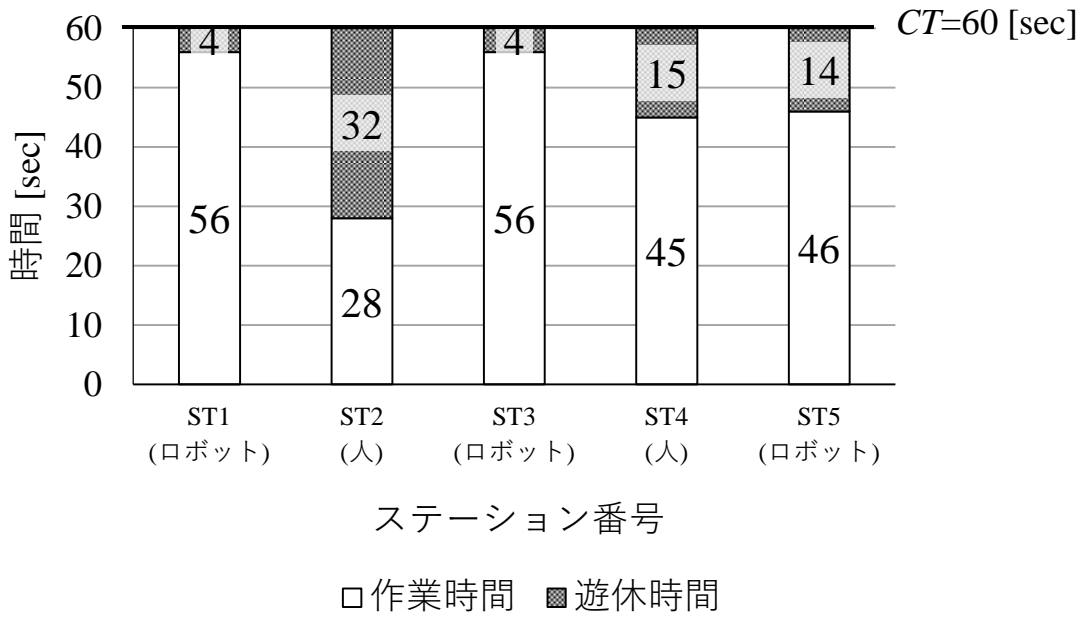
そのため、各作業ステーションにおける遊休時間はそれぞれ、1 [sec]、2 [sec]、0 [sec]、1 [sec]となり、サイクルタイム $CT=60$ [sec]に比べて非常に短い結果となった。以上のように、シナリオ $\varepsilon_{TD}=2$ はシナリオ $\varepsilon_{TD}=6$ に比べて遊休時間が長く、作業ステーション間の作業時間のバラツキが大きいために、シナリオ $\varepsilon_{TD}=6$ に比べて総ステーション数 K の値が大きくなったことがわかった。

表 5-2 電子機器製造ラインの事例における第2段階の作業ステーション配置の結果

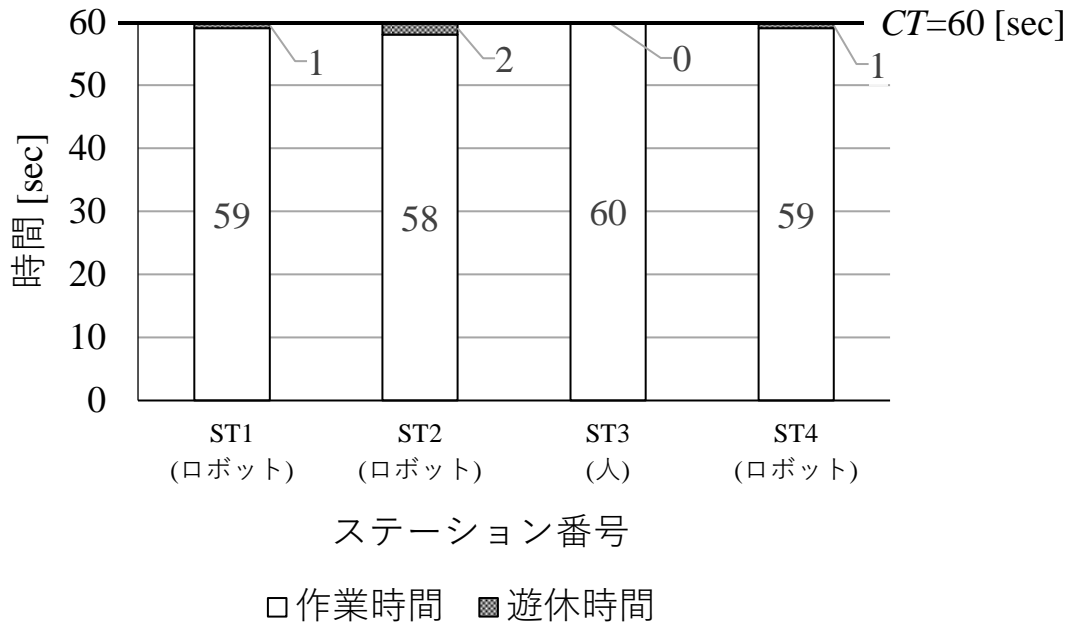
シナリオ	第1段階の結果						第2段階の結果													
	ライン全体の自動化率 TA	総自動化難易度 TD	総作業時間			必要ステーション数			作業ステーション			バランスロス BL	平滑度指数 SI	TA と TD の増加率の比 AD	AD の値による選択順位					
			人手作業の総作業時間 TT_{human} [sec]	ロボット作業の総作業時間 TT_{robot} [sec]	総作業時間 TT [sec]	必要人手ステーション数 K_{oh}	必要ロボットステーション数 K_{or}	必要ステーション数の和 K_{ol}	配置	人手ステーション数	ロボットステーション数					総ステーション数 K				
ロボット回避: $\epsilon_{TD} = 0$	81.0%	0	82	149	231	2	3	5	R	H	H	R	R	2	3	5	0.23	37.54	0.810	第3位
$\epsilon_{TD} = 1$	83.3%	1	74	157	231	2	3	5	R	H	H	R	R	2	3	5	0.23	39.31	0.814	第2位
$\epsilon_{TD} = 2$	85.7%	2	73	158	231	2	3	5	R	H	H	R	R	2	3	5	0.23	31.70	0.818	第1位
$\epsilon_{TD} = 3$	85.7%	3	71	163	234	2	3	5	R	H	H	R	R	2	3	5	0.22	34.34	0.800	第5位
$\epsilon_{TD} = 4$	88.1%	4	70	164	234	2	3	5	R	H	H	R	R	2	3	5	0.22	37.15	0.804	第4位
$\epsilon_{TD} = 5$	88.1%	5	61	175	236	2	3	5	R	H	H	R	R	2	3	5	0.21	47.31	0.787	第7位
$\epsilon_{TD} = 6$	90.5%	6	60	176	236	1	3	4	R	R	H	R	R	1	3	4	0.02	2.45	0.792	第6位
$\epsilon_{TD} = 7$	90.5%	7	51	190	241	1	4	5	R	R	H	R	R	1	4	5	0.20	46.08	0.776	第9位
$\epsilon_{TD} = 8$	92.9%	8	50	191	241	1	4	5	R	R	H	R	R	1	4	5	0.20	46.21	0.780	第8位
$\epsilon_{TD} = 9$	92.9%	9	46	200	246	1	4	5	R	R	H	R	R	1	4	5	0.18	27.33	0.765	第11位
$\epsilon_{TD} = 10$	95.2%	10	45	201	246	1	4	5	R	R	H	R	R	1	4	5	0.18	29.65	0.769	第10位
$\epsilon_{TD} = 11$	95.2%	11	36	208	244	1	4	5	R	R	H	R	R	1	4	5	0.19	30.76	0.755	第14位
$\epsilon_{TD} = 12$	97.6%	12	35	209	244	1	4	5	R	R	H	R	R	1	4	5	0.19	38.34	0.759	第12位
$\epsilon_{TD} = 13$	97.6%	12	3	253	256	1	5	6	R	R	R	R	R	1	5	6	0.29	62.24	0.759	第12位
ロボット最優先: $\epsilon_{TD} = 14$	100.0%	14	0	259	259	0	5	5	R	R	R	R	R	0	5	5	0.14	27.11	0.750	第15位

R:ロボットステーション, H:人手ステーション

ライン設計者によって自動化難易度を考慮した設計手順の配置案(3章参照)



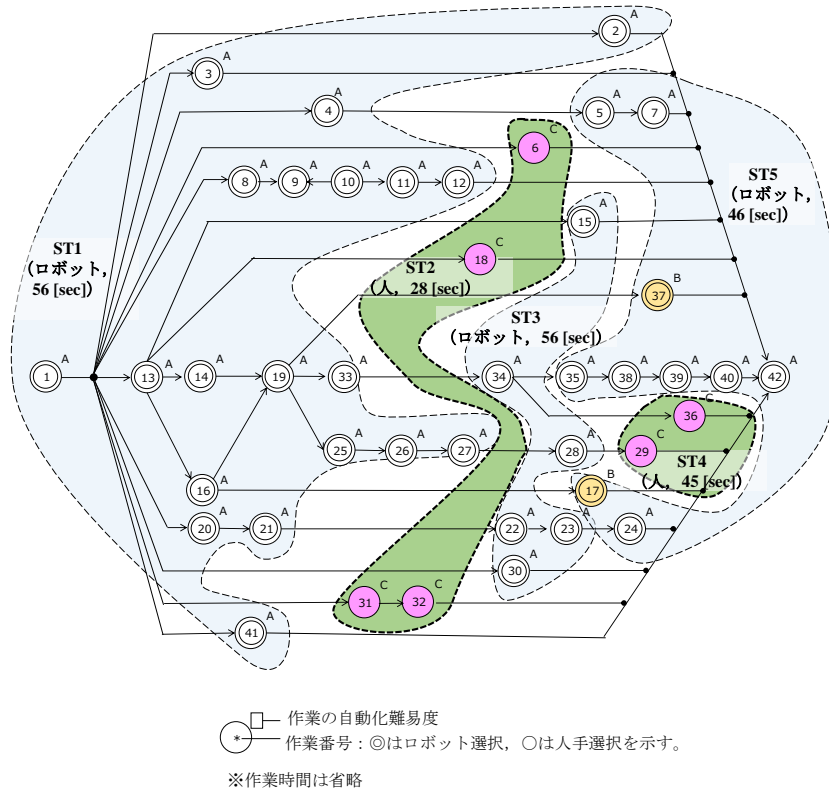
(a) シナリオ $\epsilon_{TD} = 2$
 (TA と TD の増加率の比 AD の値が最大のシナリオ)



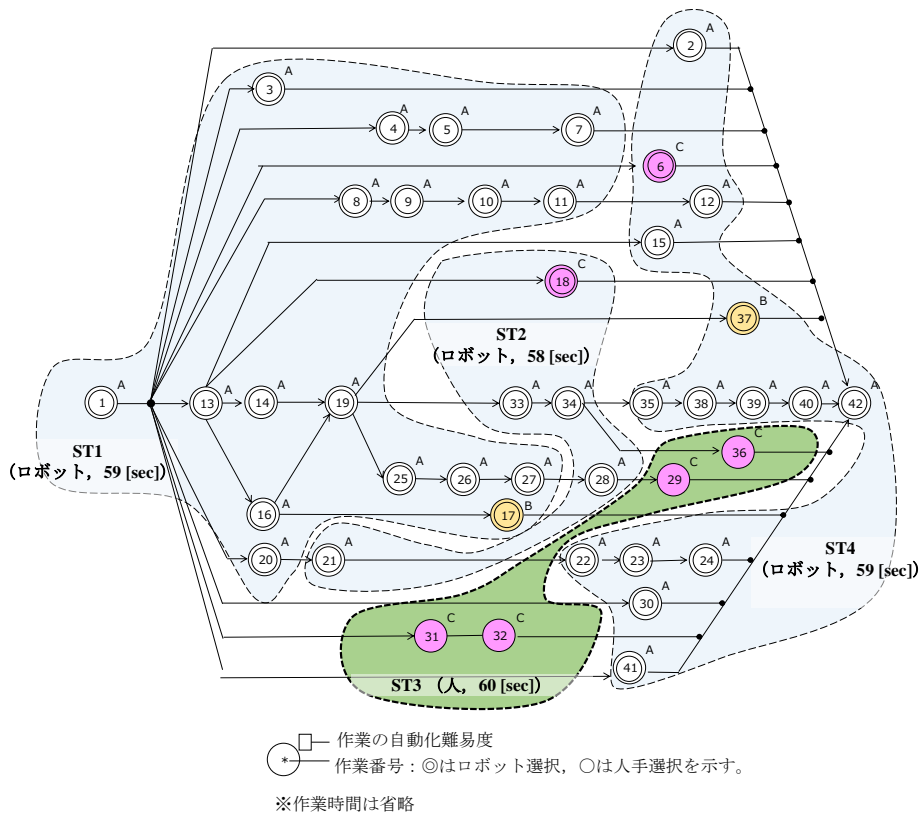
(b) シナリオ $\epsilon_{TD} = 6$
 (総ステーション数 K が最小のシナリオ)

図 5-3 電子機器製造ラインの事例における「シナリオ $\epsilon_{TD} = 2$ 」と「シナリオ $\epsilon_{TD} = 6$ 」のピッチダイヤグラム

5 2段階設計法の電子機器製造ラインへの適用と評価



(a) シナリオ $\varepsilon_{TD} = 2$ (TA と TD の増加率の比 AD の値が最大のシナリオ)



(b) シナリオ $\varepsilon_{TD} = 6$ (総ステーション数 K が最小のシナリオ)

図 5-4 電子機器製造ラインの事例における「シナリオ $\varepsilon_{TD} = 2$ 」と「シナリオ $\varepsilon_{TD} = 6$ 」の作業ステーション配置図

5.3.2 ライン全体の自動化率と総自動化難易度の評価

図 5-4 の作業ステーション配置図において、 AD の値が最大となった(a)シナリオ $\varepsilon_{TD}=2$ では、作業の自動化難易度が C ($adj = 2$) と高い 6 作業をすべて人手ステーションに配置し、そのほかの作業はロボットステーションに配置している。そのため、ロボットステーションに配置されている作業は、作業の自動化難易度が B ($adj = 1$) の 2 作業 (#17 と #37) 以外はすべて、作業の自動化難易度が A ($adj = 0$) となった。このように、人手ステーションへの配置は、作業の自動化難易度の高い作業に限定することで、総自動化難易度 TD の増加を抑制しながらライン全体の自動化率 TA を高くすることができ、 AD の値が最も大きな結果となったと考えられる。一方で、 K の値が最小になった(b)シナリオ $\varepsilon_{TD}=6$ では、作業の自動化難易度が B の 2 作業に加え、作業の自動化難易度が C の 2 作業 (#6 と #18) もロボットステーションに配置していることから、 AD の値が低くなったと考えられる。

5.3.3 作業の自動化難易度を考慮した設計手順による作業ステーション配置の評価

表 5-2 の最下部に、3 章で提案した作業の自動化難易度を考慮した設計手順による、作業ステーション配置の結果を示す。このケースでは、サイクルタイム $CT=60$ [sec] に対して、人手作業の総作業時間が $TT_{human}=83$ [sec] となっていることから、必要な人手ステーション数が $K_{Oh}=2$ となっている。しかし、ラインの設計案では、人手ステーションは 1 つしか配置されていないために、生産量制約のサイクルタイム CT 以下で割り当てられたすべての作業をこの作業ステーションでは、完了できないと考えられる。ライン設計の現場では、ライン構築を進める過程で、この部分の人手作業を改善し作業時間を短縮する計画だったと思われるが、理論上は実行不可能なライン設計案になっていたことがわかった。さらに、3 章の設計手順では、先行順位関係を図 2-5 の作業の自動化難易度と人とロボットの作業時間を追記した先行順位図のように整理しておらず、ライン設計を進める中で、その成立を逐次確認しながら進めていた。

これに対して、4 章で定式化したラインバランシングを用いた設計法では、ラインの制約条件を定式化したことから、先行順位関係やサイクルタイムなどの制約を満たす設計案のみを立案できる。

以上のことから、4 章で定式化したラインバランシングを用いた設計法は、ライン設計条件を明確にし、それを満たす設計案のみを得られる効果のあることがわかった。

一方で、3 章で提案した設計手順では、人とロボットのステーション切り換

えの回数を少なくすることをライン設計者が考慮していたが、4章で提案した設計法では、この切り換えの回数を少なくすることを定式化していない。人手とロボットの作業ステーション切り換えの回数を抑制することは、ラインバランスを取りやすくするだけでなく、人どうしなら助け合いといった協力が可能となることや、人とロボットの間の安全柵の設置数を減らすことができるなどのメリットがある。この対策として、第2段階の結果で人手とロボットの作業ステーション切り換えが多数発生している場合には、ライン設計者が分析して、この切り換え回数が少なくなるように作業ステーション配置を見直すことが考えられる。さらに、人手とロボットの作業ステーション切り換え回数を目的関数の1つとして追加する解法の開発も、今後の研究課題として期待される。

5.3.4 第2段階におけるラインバラシングの結果のまとめ

今回用いた事例では、先行順位の制約を満たすために、総ステーション数 K を増やす必要はなかったことがわかった。さらに、総ステーション数 K が少ないシナリオと、 AD の値による選択順位が高いシナリオが同じシナリオにならないケースのあることがわかった。これは、 TD の増加を抑制しながら TA を増加する第1段階の2目的関数と、 K を最小化する第2段階の目的関数の間にトレードオフ関係が発生していることが理由だと考えられる。このように、両者がトレードオフ関係にある場合には、提案した設計法で得られたシナリオをもとにデザインレビューを行い、実現への課題と施策を具体的に検討することが求められる。得られたシナリオに対するデザインレビューの例を、5.4節で説明する。

5.4 ライン設計案に対するデザインレビューの例

提案した設計法により得られた結果を実際のライン設計に役立てるためには、デザインレビューによる設計案の練り上げが効果的である。本研究では、実際にライン設計を経験した熟練技術者が、本事例の結果からライン設計を進めるために考慮すべき項目を抽出した。本節では、その結果を示して、考察を行う。

- 総ステーション数 K が4と最小となった $\varepsilon_{TD}=6$ のシナリオでは、図5-4(b)に示すように作業の自動化難易度がC ($ad_j = 2$)の2作業(#6と#18)をロボット作業としている。これら2作業をロボット作業とすることが、人手ステーション数を1とし、総ステーション数 K の少ないラインバランスの良い設計案にしていることがわかる。したがって、これらの作業を自動化する技術開発の検討を、早い段階で行うことが必要である。

さらに、これらの自動化技術の開発が困難な場合には、製品設計の変更により自動化難易度の低い作業に代替することも考えられる。最終的に、これらの作業の自動化や自動化難易度の低い作業への代替が困難と判断した場合には、 AD が最大となった $\varepsilon_{TD}=2$ のシナリオのように、総自動化難易度を抑えたシナリオの採用を検討できる。

- 総ステーション数 K が最小となった $\varepsilon_{TD}=6$ のシナリオでは、図 5-3 (b)に示すように各作業ステーションの遊休時間が短いことから、実運用中に作業時間のバラツキや増加によって、サイクルタイムを超えてしまうことが懸念される。この対策として、各作業の作業時間の短縮や作業ステーション間のバッファの設置を検討する必要がある。 AD が最大となったシナリオ $\varepsilon_{TD}=2$ においても、図 5-3 (a)に示すように作業ステーション1と3については遊休時間が短いため、同様の検討が必要である。
- AD が最大となった $\varepsilon_{TD}=2$ のシナリオにおいて、作業ステーション1~5の順番は、図 5-4(a)のように、ロボット、人手、ロボット、人手、ロボットとなっている。しかし、安全柵の設置コストの削減や、ロボットシステムを統合して管理する観点からは、ロボットステーションを並べたほうが好ましい。具体的には、#42を人手作業として選択し直すことで、作業ステーション2(人手)と作業ステーション4(人手)を作業ステーション4と5に置き換えることができる。このような変更により、作業ステーション1~5の順番を、ロボット、ロボット、ロボット、人手、人手とすることが可能である。総ステーション数 K が最小となった $\varepsilon_{TD}=6$ のシナリオにおいても、同様の検討が可能であると考えられる。
- ロボットによる自動化では、作業内容に応じたロボットハンドやエンドエフェクター(先端の加工点)を適用する必要がある。投資コストを抑えるためには、同じ種類のロボットハンドやエンドエフェクターを適用する作業は、同じ作業ステーションに割り当てることで、ロボットハンドやエンドエフェクターの総数を抑えることが有効である。作業の先行順位制約を満たしながら、ロボットステーション間で作業の入れ替えを検討する必要がある。

以上の検討項目は、提案した設計法によるライン設計の結果に対して、さらに経験豊富な技術者がそのライン設計を改善することで、より良いライン設計とすることが可能であることを示している。また、これらのレビュー内容は、本研究で提案した設計法に追加することも期待される。

5.5 総自動化難易度と総作業時間を目的関数にした場合

5.2 節では、4.2.4 節で説明したように第 1 段階で総自動化難易度 TD とライン全体の自動化率 TA を 2 目的関数として求解した。これに対して、本節では、4.2.7 節で説明した総自動化難易度 TD と総作業時間 TT を 2 目的とする場合を検討する。 TD と TT を目的関数とする理由は、第 1 段階で、 TT を最小にすることで、第 2 段階におけるラインバランシングの作業配置の選択肢を増やし、総ステーション数 K を抑制することが期待されるためである。

表 5-3 に TD と TT の 2 目的関数を用いた場合の結果を示す。この例では、 $\varepsilon_{TD}=0$ および $\varepsilon_{TD}=1$ の場合には同じ結果となり、 TT は 220 [sec]となった。また、 ε_{TD} の値が 2~14 の場合にも同じ結果になり、 TT は 218 [sec]となった。この結果から、 ε_{TD} の値を増加して、総自動化難易度の制約を緩和すると、わずかではあるが TT が減少することが確認できた。

表 5-2 から、 TD と TA の 2 目的関数の場合では、 $TT=231\sim 259$ [sec]であることから、 TT を目的関数とすることで、 TT を低減できたことが確認できる。しかし、ライン全体の自動化率 TA に替えて TT を目的関数としたことから、 TA の値は 54.8%~57.1%となり、 TD と TA の 2 目的関数の場合よりも低い結果となった。さらに、 TT と TD の 2 目的関数を用いた結果では、 $K=7$ 、 $BL=0.48$ 、 $SI=87.01\sim 90.76$ となった。一方で、 TD と TA の 2 目的関数の場合には、 $K=4\sim 6$ 、 $BL=0.02\sim 0.29$ 、 $SI=2.45\sim 62.24$ であった。

これらのことから、 K 、 BL 、 SI のそれぞれの値は、 TD と TT の 2 目的関数を用いた場合の方が、 TD と TA の 2 目的関数を用いた場合よりも大きくなったとことがわかった。その理由は、 TD と TT の 2 目的関数を用いた場合には、遊休時間と作業ステーション間の作業時間の変動が増加しラインバランスが悪化した結果、 K の値が大きくなったためであると考えられる。

表 5-3 電子機器製造ラインの事例における TD と TT を 2 目的関数とした場合の結果

シナリオ	第1段階の結果						第2段階の結果															
	ライン全体の自動化率 TA	総自動化難易度 TD	総作業時間		必要ステーション数			作業ステーション配置							人手ステーション数	ロボットステーション数	総ステーション数 K	バランスロス BL	平滑度指数 SI	TA と TD の増加率の比 AD	第1位 第2位 AD の値による選択順位	
ロボット回避; $\epsilon_{TD} = 0$	54.8%	0	97	123	220	2	3	5	ST1	R	H	R	R	R	R	R	3	4	7	0.48		87.01
$\epsilon_{TD} = 1$	54.8%	0	97	123	220	2	3	5	R	H	R	R	R	R	R	R	3	4	7	0.48	87.01	0.000
$\epsilon_{TD} = 2$	57.1%	2	105	113	218	2	2	4	R	H	R	R	R	R	R	R	3	4	7	0.48	90.76	0.571
$\epsilon_{TD} = 3$	57.1%	2	105	113	218	2	2	4	R	H	R	R	R	R	R	R	3	4	7	0.48	90.76	0.571
$\epsilon_{TD} = 4$	57.1%	2	105	113	218	2	2	4	R	H	R	R	R	R	R	R	3	4	7	0.48	90.76	0.571
$\epsilon_{TD} = 5$	57.1%	2	105	113	218	2	2	4	R	H	R	R	R	R	R	R	3	4	7	0.48	90.76	0.571
$\epsilon_{TD} = 6$	57.1%	2	105	113	218	2	2	4	R	H	R	R	R	R	R	R	3	4	7	0.48	90.76	0.571
$\epsilon_{TD} = 7$	57.1%	2	105	113	218	2	2	4	R	H	R	R	R	R	R	R	3	4	7	0.48	90.76	0.571
$\epsilon_{TD} = 8$	57.1%	2	105	113	218	2	2	4	R	H	R	R	R	R	R	R	3	4	7	0.48	90.76	0.571
$\epsilon_{TD} = 9$	57.1%	2	105	113	218	2	2	4	R	H	R	R	R	R	R	R	3	4	7	0.48	90.76	0.571
$\epsilon_{TD} = 10$	57.1%	2	105	113	218	2	2	4	R	H	R	R	R	R	R	R	3	4	7	0.48	90.76	0.571
$\epsilon_{TD} = 11$	57.1%	2	105	113	218	2	2	4	R	H	R	R	R	R	R	R	3	4	7	0.48	90.76	0.571
$\epsilon_{TD} = 12$	57.1%	2	105	113	218	2	2	4	R	H	R	R	R	R	R	R	3	4	7	0.48	90.76	0.571
$\epsilon_{TD} = 13$	57.1%	2	105	113	218	2	2	4	R	H	R	R	R	R	R	R	3	4	7	0.48	90.76	0.571
ロボット最優先; $\epsilon_{TD} = 14$	57.1%	2	105	113	218	2	2	4	R	H	R	R	R	R	R	R	3	4	7	0.48	90.76	0.571

R: ロボットステーション, H: 人手ステーション

図 5-5 に、 TD と TT の2目的関数を用いた場合のシナリオ $\varepsilon_{TD}=2\sim 14$ のピッチダイアグラムを示す。図 5-5 において、人手とロボットの異なるタイプの作業ステーションが交互に配置されていることがわかる。このことが、サイクルタイム CT に対して、作業ステーション1と5の遊休時間が長くなっている理由と考えられる。

図 5-6 に、 TD と TT の2目的関数を用いた場合の、作業ステーション配置と作業の先行関係を示す。 $\#1\rightarrow\#13\rightarrow\#14\rightarrow\#19\rightarrow\#25\rightarrow\#26\rightarrow\#27\rightarrow\#28\rightarrow\#29\rightarrow\#42$ の作業のパスでは、人手あるいはロボットの作業タイプ選択が6回切り替わっていることがわかった。例えば、 $\#1$ がロボットステーションに割り当てられ、 $\#13$ が人手ステーションに割り当てられていた。この理由は、第1段階で $\#1$ がロボット作業として選択され、 $\#13$ が人手作業として選択されているためである。このように、作業パス上でロボットから人手へ、あるいは人手からロボットへと作業タイプが切り替わる場合には、作業ステーションも人手からロボット、あるいはロボットから人手と異なるタイプを配置する必要がある。そのため、総ステーション数 K は、少なくとも、作業パス上での作業タイプの切り替え回数に1を加えた値となる。例えば、本事例では図 5-6 に示すように、 $\#1\rightarrow\#13\rightarrow\#14\rightarrow\#19\rightarrow\#25\rightarrow\#26\rightarrow\#27\rightarrow\#28\rightarrow\#29\rightarrow\#42$ の作業パス上では、作業タイプの切り替え回数が6となるので、 K は7以上になると考えられる。

本節では、 TD と TT の2目的関数を用いた場合と、 TD と TA の2目的関数を用いた場合の結果を比較した。 TD と TT の2目的関数を用いた場合には、すべてのシナリオで K が7となり、 TD と TA の2目的関数を用いた場合の $K=4\sim 6$ に比べて大きな値となった。 TD と TT の2目的関数を検討した理由は、 TT を最小にすることで、ラインバランシングにおける作業配置の選択肢を増やし、総ステーション数 K を抑制することであった。しかし、本研究の実験結果では、 TD と TA の2目的関数を用いた結果よりも、 K の値が大きくなった。これは、 TD と TT の2目的関数を用いた結果では、作業パスにおける作業タイプが人手からロボット、ロボットから人手へと頻繁に変更になったためであると考えられる。

このように、 TD と TT の2目的関数を用いた結果では、 TD と TA の2目的関数の結果に対して、作業タイプの切り替えが多くなった。これは、 TD と TT の2目的関数を用いた場合では、ラインの総自動化率 TA が54.8%~57.1%と人手とロボットが混在する構成となっていることから、2つの作業タイプが隣り合って割り当てられる可能性が高いためだと考えられる。

第2段階において、総ステーション数 K の増大を抑えるためには、作業パスにおける人手とロボットの作業タイプの変更回数を少なくする必要がある。作業パスにおける人手とロボットの作業タイプの変更回数が少なくなるように、人手あるいはロボットの作業タイプ選択を行うことは、今後の研究課題と考える。

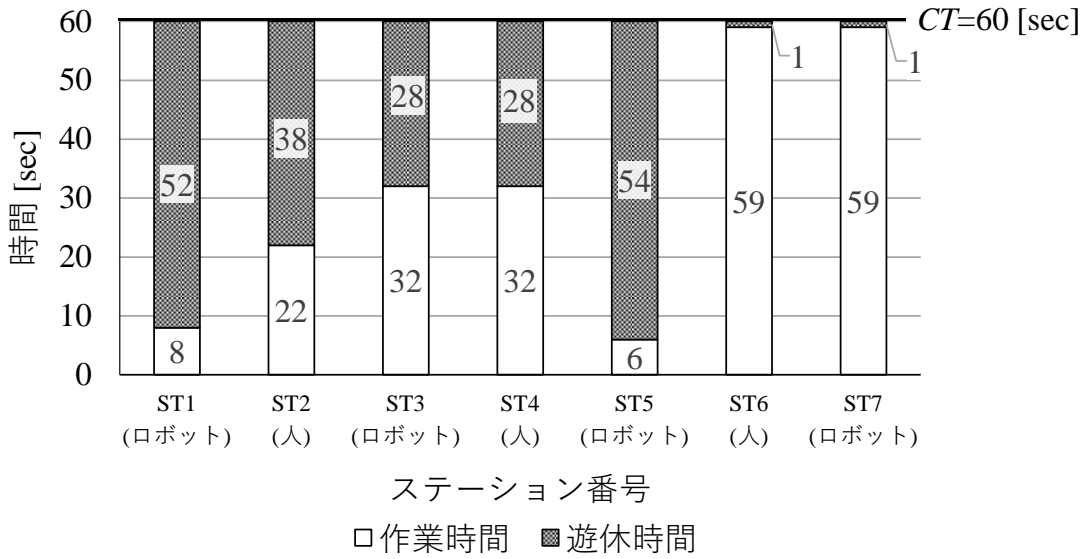


図 5-5 電子機器製造ラインの事例における TD と TT を 2 目的関数とした場合のピッチダイヤグラム ($\epsilon_{TD}=2-14$)

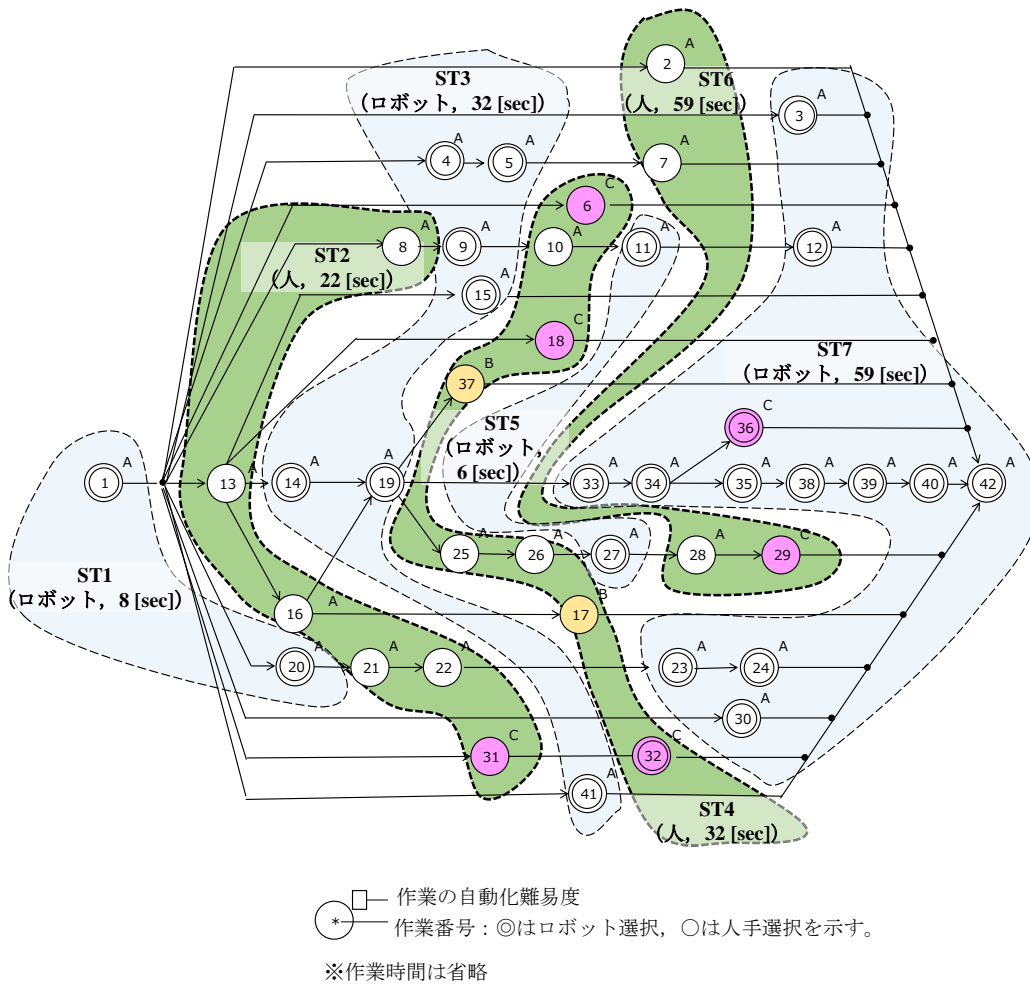


図 5-6 電子機器製造ラインの事例における TD と TT を 2 目的関数とした場合の作業ステーション配置を記載した先行順位図 ($\epsilon_{TD}=2-14$)

5.6 2 段階設計法の電子機器製造ラインへの適用と評価のまとめ

本節では、2 段階設計法の電子機器製造ラインへの適用と評価のまとめを行う。

本研究で扱ったラインバランシングは組合せ問題であるため、問題の規模が大きくなると、急激に解の数が増大する性質があるとされる (黒田, 1984)。例えば、 m 個の作業を n 個の作業ステーションに配置する問題を解く場合、作業の先行順位や人手あるいはロボットの作業タイプ選択を考慮しない配置の組合せは、近似的に $m! / \{(m/n)!\}^n$ 通りある (黒田, 1984)。このように、組立ラインの作業数が増えて問題の規模が大きくなると、従来の設計者が経験的に行うライン設計法では困難になることが予想され、本研究で提案した 0-1IP による定式化と線形計画ソルバーを活用した設計法のメリットが高くなると考えられる。本章では、4 章で提案し 10 作業の事例に適用した人とロボットのハイブリッド組立ラインの設計法を、42 作業の実際の電子機器製造ラインを対象に適用し、その有効性を確認した。

具体的には、作業数 42 の電子機器製造ラインに対して、商用の線形計画ソルバーを用いて数値実験を行った。第 1 段階では、総自動化難易度の制約を緩和すると、選択されるロボット作業の数が増えることがわかった。第 2 段階では、総自動化難易度の増加を抑えつつライン全体の自動化率を高めるシナリオと、遊休時間が短く作業ステーション間の作業時間の変動が小さいシナリオを見出すことができた。また、第 1 段階の作業タイプ選択の結果が、第 2 段階のラインバランシングに影響し、遊休時間の長い非効率なライン設計結果になるケースがあることを示した。さらに、提案した設計法で得られた複数のライン設計案をもとに熟練技術者が再検討することで、より現場に即したライン設計を進めることができることがわかった。また、これらの検討結果は、自動化難易度が現状では高い作業を自動化するための技術開発や、自動化難易度の低い作業に代替するための製品設計の変更箇所抽出に活用できることがわかった。

今後の研究では、第 2 段階で遊休時間が長くならないように、第 1 段階で人手あるいはロボットの作業タイプ選択を行う方法を開発する必要がある。また、経営的な観点からは、設備コストだけでなく、運用・保守コストも含めた設計法の検討が必要となる。

最後に、現状の手法で線形計画ソルバーが扱える問題サイズの上限について考察する。5.3 節の第 2 段階のラインバランシングについては、4.4 節の小規模問題で用いた非商用の線形計画ソルバー GLPK (Makhorin, 2010) を用いた環境では 100 時間以上の計算でも解が得られないシナリオがあった。しかし、ILOG CPLEX (2017a) ではすべてのシナリオで、1 [sec] 以内で解を得ることができた。

IBM (2021) によると、開発者のサブスクリプション環境では変数と制約式の数の制限はないとのことである。また、宮代・松井 (2006) には、ILOG CPLEX を用いて制約式 1 万、変数 8 万を超える例題を解いた例が示されている。本研究で提案した設計法の 42 作業での実験では、第 2 段階の CPLEX LP ファイル形式での制約式の数は 819、変数の数は 344 であり、宮代・松井 (2006) の例に比べるとかなり小さい規模だといえるので、より大きな事例にも適用できると考えられる。

6. 結論

本研究では、組立ラインにおける作業の自動化難易度が作業ごとに異なることに着目して、人とロボットを同時に配置するハイブリッド組立ラインの設計法を提案した。さらに、実際の電子機器製造ラインに適用して、その有効性を確認した。6章では、本研究全体をまとめ、さらに本研究の今後の展開について述べる。

6.1 本研究の成果

本研究において、3章で人とロボットを同時に配置するハイブリッド組立ラインの設計手順を明確にした。特に、作業の自動化難易度という指標を導入することで、ロボットや製造設備のコスト情報が得られない段階で、人とロボットを配置する方法を提供することができた。しかし、3章の研究では設計手順の定式化は行われていなかったため、設計者によって設計結果が異なる問題や、関係者で客観的に設計結果を評価することができないという課題があった。

この課題を解決するために、4章と5章では、総自動化難易度とライン全体の自動化率の2つを目的関数としたハイブリッド組立ラインの2段階設計法を提案した。さらに、実際の電子機器製造ラインに適用することで、01-IPを用いた定式化が商用ソルバーで解を得られることを確認した。以下に、本研究による成果を挙げる。

<人とロボットのハイブリッド組立ライン設計の手順化>

- これまで経験のある技術者が属人的に行ってきたライン設計作業を、作業の自動化難易度という指標を定義し、活用することで、作業の自動化難易度の低い作業の自動化を優先したライン設計案を作成する手順を具体的に提案できた。
- 作業の自動化難易度によって、効果的かつ視覚的に、製造ライン全体や工程別の作業の自動化難易度状況を把握し、分析することができることがわかった。さらに、このことは、関係者との効率的な情報共有にも有効であることがわかった。

<ハイブリッドラインの2段階設計法>

- 総自動化難易度とライン全体の自動化率を考慮したハイブリッド組立ラインの2段階設計法を0-1IPとして定式化した。さらに、線形計画ソルバーを用いて解を得られることを確認した。

- 事例への適用により、総自動化難易度とライン全体の自動化率がトレードオフ関係にあることを確認した。この結果は、自動化率を上げることは、投資回収や安定稼働のリスクが高くなるという現場の感覚と一致している。このトレードオフ関係を数値的に示すことができたことにより、提案した設計法を実際の設計現場でも活用することが可能であると考えられる。
- 事例への適用により、総自動化難易度の増加を抑えつつライン全体の自動化率を高めるシナリオと、遊休時間が短く作業ステーション間の作業時間の変動が小さいシナリオを見出すことができた。
- 第1段階の人手あるいはロボットの作業タイプ選択の結果が、第2段階のラインバランスに影響し、サイクルタイムに対する遊休時間の長い非効率なライン設計結果になるケースがあることがわかった。これを解決するためには、第2段階で遊休時間が長くないように、第1段階で人手あるいはロボットの作業タイプ選択を行う方法を開発する必要がある。
- 提案した設計法で得られたライン設計案を熟練技術者が活用することで、より現場に即したライン設計を進めることができる可能性を示した。さらに、それらのライン設計案を再検討することで、新たな自動化技術の開発提案や製品設計の変更箇所を抽出し、具体的に進めることが可能になることがわかった。

6.2 今後の課題と活用展開

本節では、本研究を進める中で抽出した今後の研究課題と、本研究の活用展開について述べる。

(1) 今後の研究課題

本研究を通じて得られた今後の研究課題については、以下の通りである。

- 作業の自動化難易度の設定については、機構学、制御工学、画像処理などの技術的な難易度と、実際にロボットシステムを具現化するための開発工数を複合して設定する手法を明確にする必要がある。本研究では、自動化難易度のレベルについて、経験のある技術者が草案を作成し、関係者のレビューによって練り上げる形で設定した。しかし、より属人性を排除した設計法とするためには、FMEA(日本信頼性学会,2014; マクダーモット・ミカラク・ボウリガード,2010)における、定性的な内容の数値化

と現場の運用方法を参考にして、作業の自動化難易度の設定手順の体系化と実際の現場での適用法の改善が必要と考える。

- 作業の自動化難易度と投資コストや稼働コストとの関係が明確でないため、本研究で提案した設計作業の後に、それらのコストを試算して、投資回収が可能であることを確認する必要がある。この段階で、投資回収のリスクが大きい場合には、ライン設計を再度行う後戻りが必要になるケースも予想される。現状ではライン設計の初期段階では、組立ラインを構成するロボットや製造設備のコスト情報を得ることが難しいことが理由であるが、この段階で概略のコスト情報を試算して、作業の自動化難易度と紐づけするなどの方法に関する研究が期待される。
- 第1段階の作業タイプ選択の結果が、第2段階のラインバランスに影響し、バランスの悪いライン設計案になることを避ける設計法の開発が求められる。例えば、第2段階の結果を、ライン設計者が分析して、ロボットに選択された作業を人手に再選択してラインバランスを行うことが考えられる。さらに、解法を2段階に分けずに、総自動化難易度、ライン全体の自動化率と総ステーション数の3目的のライン設計問題として同時に解くことも考えられる (宮内・山田, 2021b)。
- 人手ステーションとロボットステーションの切り換えが、多数発生することを避けるライン設計法の開発が求められる。その理由は、人手ステーションとロボットステーションの切り換えが発生する場合には、その間に安全確保のための柵やセンサーの設置が必要 (福田, 2021) になるためである。さらに、人と人の間にロボットが設置される配置では、人がお互いに協力して対策・改善する助け合いが期待できないことも懸念される (日本能率協会・門田, 1978)。例えば、第2段階の結果で人手ステーションとロボットステーションの切り換えが多数発生している場合には、ライン設計者が分析して、人手ステーションとロボットステーションの切り換え回数が少なくなるように作業ステーションの配置を見直すことや、人手ステーションとロボットステーションの切り換え回数を目的関数の1つとして追加するなどの方法が考えられる。
- 本研究では、対象製品を1種類に限定して設計の手順化と設計法の提案を行ったが、実際の現場では、多品種化が求められる。本研究の成果をベースに、Çil, Mete and Ağpak (2017) などの多品種に対応した先行研究を参考にすることで、多品種製造のラインに対応することが可能だと考える。
- 本研究では、作業者とロボットの能力や作業時間の長さは、それぞれ一

定であることを仮定している。しかし、実際には、作業者には熟練者と初心者がおり、様々な性能のロボットを選ぶことができる。一方で、熟練作業者の人材確保の困難さや労務費の増加などの観点での検討も必要である。作業者の習熟度やロボットの性能などのバリエーションを付加することで、さらに現実的な課題を解くことができるようになると思われる。

(2) 本研究成果の活用展開

本研究では、人とロボットを同時に配置するハイブリッド組立ラインの設計手順と 0-1IP として 2 段階設計法を提案した。本研究の今後の展開については、以下のとおりである。

- 作業の自動化難易度の情報を活用することで、より自動化に向けた製品設計が行われることが期待できる。製品設計者は、必ずしも生産技術や、自動化技術の知識を十分に有しているとは限らないため、自動化を考慮していない製品構造を含む設計が行われる場合がある (清野・西田・藤武, 2007)。作業の自動化難易度の情報を、具体的に製品設計者と共有することで、製品設計段階で、作業の自動化難易度の高い作業を削減できる可能性がある。
- 作業の自動化難易度の情報は、ロボットや製造設備による自動化に必要な要素技術開発のニーズ抽出に役立てることができる。作業の自動化難易度の高い作業に対して、組立ラインの構築時に加工点技術を開発することは、安定的に稼働するための開発リスクやコストの観点で難しいと考えられる。作業の自動化難易度が高い一方で、多くの製品や製造現場で共通的に自動化が求められる作業は、自動化に必要な要素技術開発を事前に行い汎用的なユニットとして実用化することが有効と考えられる。
- 本研究で提案した作業の自動化難易度を考慮したラインバランス問題の定式化と解法は、作業者の習熟度、ロボットごとの能力の差の考慮、複数製品への対応などのより複雑なモデルにも、制約条件の追加や変更で対応できると考えられる。
- 近年、AI (Artificial Intelligence ; 人工知能) 技術の進歩などで智能化ロボットの開発が進み、様々な作業の自動化が実現しているが、すべての作業をロボットが代替するには至っていない (原田・万, 2019; Liu, 2019; 宮内ら, 2019)。そのため、多くの現場で、人とロボットが協力して作業することが求められている。例えば、物流倉庫におけるピッキング作業では、すべての商品のピッキングをロボットで対応することは難しいことから、対象商

品に応じた人とロボットの作業分担が必要とされている(Azadeh, de Koster and Roy, 2017)。本研究の成果は、組立ラインに限らず、そのような人とロボットが協力して働く現場への適用が期待される。

謝辞

本研究を進めるにあたり、非常に多くの方々にご指導、ご鞭撻、ご協力いただきましたことを、深く感謝いたします。大学院前期課程を修了後、長い期間アカデミックな世界と直接は縁のない企業内の開発業務に携わっていた私が、本研究に取り組み博士論文としてまとめることができました。これは、指導教員の山田先生および山田研究室の皆様が、私を山田研究室の仲間として受け入れていただいたおかげです。研究過程で多くの実りあるコメントや励ましをくださった山田哲男教授に深く感謝します。さらに、現在およびこれまでの山田研究室の皆様感謝します。

本論文の審査委員を引き受けてくださった内海彰教授、横川慎二教授、水戸和幸准教授、杉正夫准教授には心より感謝いたします。非常に有用なご指摘やアドバイスをいただきました。杉先生が山田先生を紹介くださったことが、本研究の端緒であり、この点においても感謝しています。

30年以上も前の話になりますが、私は、何のために勉強をするのかも碌に考えない学生でした。そんな私に、制御工学を通じて工学的な考え方や技術開発の進め方の基礎を教えてくださいました東北大学名誉教授 猪岡光先生と福島大学名誉教授 石原正先生をはじめ、猪岡研究室の皆様には大変感謝しています。杜の都で過ごした貴重な経験が、長い技術者生活の支えとなり、本研究への取り組みに繋がったと感謝しています。

本研究で扱っている製造現場の課題や状況などの知見は、株式会社 東芝生産技術センターにおける製造設備開発を通じて得たものです。長い間、製造設備をはじめとするメカトロニクス機器やロボットの開発にかかわることができたのは、東芝グループにモノづくりの現場があり、生産技術を開発し実用化する場があったためです。東芝生産技術センターおよび東芝グループの工場をはじめとした関連の皆様感謝します。また、生産技術センター 所長 清野武寿博士におかれましては、業務の傍ら博士後期課程に入学することを快諾くださいました。時には応援の言葉もいただき、深く感謝します。

大学生の息子 雄介と高校生と中学生の娘 薫と菜摘は、まだまだ手がかかる中、社会人でありながら大学院博士後期課程への入学を応援してくれた妻 泰子に心より感謝します。また、コロナ禍で多くの時間を一緒に過ごす中で、子供たちからも数々の助けをもらいました。ありがとう。

近年のロボットの進化は目覚ましいものがありますが、工場や倉庫のすべての作業をロボットに任せる日は、まだまだ先になると思います。人類は当面の間、ロボットと一緒にお互いに得意な部分を活かして仕事を分担していくことでしよう。本研究で得られた成果が、その一助になれば幸いです。

関連した多くの皆様への感謝を胸に、ロボットを有効に活用することで、人々の幸せが増えていくように、微力ながら努力していきたいと思っております。

参考文献

<和文>

IBM Corporation (2021). IBM ILOG CPLEX Optimization Studio, <https://www.ibm.com/jp-ja/products/ilog-cplex-optimization-studio> [2021年8月14日閲覧].

泉英明 (2002). 生産システム開発における自動化構想のポイント, 日本生産管理学会論文誌, Vol.9, No.1, pp. 49-54

岩下エンジニアリング (2021). 株式会社. ホームページ (ディスペンサー), <http://www.iwashita-eng.co.jp/jp/product/01dispenser.html> [2021年5月4日閲覧]

梅谷俊治 (2014). 組合せ最適化入門:線形計画から整数計画まで, 自然言語処理, Vol. 21, No. 5, pp. 1059-1090

FA・ロボットシステムインテグレータ協会 (2018). FA・ロボットシステムインテグレータ協会ホームページ, <http://www.farobotsier.com/> [2020年9月27日閲覧]

FA・ロボットシステムインテグレータ協会 (2019). ロボットシステムインテグレータの役割とその育成, https://www.rsj.or.jp/content/files/event/openforum/2019/RSJ2019W_OF6_S1er1.pdf [2020年9月27日閲覧]

大場充晶, 藤川裕晃 (編著) (2009). 「生産マネジメント概論 技術編」, 文眞堂, pp. 25-36, pp. 188-201

オクトーバースカイ (2021). Gurobi Optimizer ホームページ, <https://www.octobersky.jp/products/gurobi> [2021年6月20日閲覧]

奥村洋 (2017). CPS 研究の世界的潮流と日本の現状, 研究 技術 計画, Vol.32, No.3, pp. 251-265

外務省 (2020). JAPAN SDGs Action Platform, <https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/about/index.html>. [2020年10月17日閲覧]

黒田充 (1984). 「ラインバランスングとその応用 ―組立ラインのコンピュータ管理―」, 日刊工業新聞社, pp. 29-44

経済産業省, 株式会社 学情, 株式会社 パーソル総合研究所 (2017). ロボットシステムインテグレータ業界の人材確保に関する調査報告書 (PDF 版), https://www.kanto.meti.go.jp/seisaku/jinzai/data/robot_sier_houkokusyo.pdf, p.26 [2020年9月21日閲覧]

経済産業省, 日本ロボット工業会 (2018). ロボットシステムインテグレータのスキル読本 第一版 (pdf 版), http://www.robo-navi.com/document/SIer_SkillStandard_Book.pdf, pp. 30-31, pp. 66-75 [2020年1月2日閲覧]

経済産業省 (2019a). 2019年版ものづくり白書 (PDF 版), <https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2019/index.html>, pp. 38-39, pp. 122-124 [2020年3月1日閲覧]

経済産業省, 三菱UFJリサーチ&コンサルティング 株式会社 (2019b). 令和元年度製造基盤技術実態等調査 我が国ものづくり産業の課題と対応の方向性に関する調査報告書 (PDF 版), https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2019FY/000283.pdf, p. 71 [2020年9月21日閲覧]

経済産業省 (2020). 2020年版ものづくり白書 (PDF 版), https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2020/honbun_pdf/pdf/all.pdf, pp. 127-146 [2020年9月21日閲覧]

経済産業省近畿経済産業局 (2016). 中小製造業のためのロボット導入促進ガイドブック (PDF 版), https://www.kansai.meti.go.jp/3jisedai/29_guidebook/guidebook.pdf, pp. 4-8, p. 23 [2020年4月25日閲覧]

経済産業省中部経済産業局, 名古屋工業大学 産学官連携センター (2017). 産業用ロボット導入ガイドライン, https://www.chubu.meti.go.jp/b21jisedai/report/robot_introduction_guideline/guideline.pdf (PDF 版), pp. 1-2 [2020年9月21日閲覧]

厚生労働省 (2021). 新型コロナウイルスに関する Q&A (一般の方向け), https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryuu/dengue_fever_qa_00001.html

#Q2-3 [2021年6月12日閲覧]

小林左千夫, 村上亮, 島田大地, 小林弘樹 (2017). モジュール表現した組立作業を利用した組立工程設計支援技術の開発, 日本機械学会生産システム部門研究発表講演会 2017 講演論文集, さいたま, pp. 53-54

昆誠, 荊木正史 (2010). 情報機器ユニットの自動組立技術, KONICA MINOLTA TECHNOLOGY REPORT, Vol. 7, pp. 51-54

後藤達生, 杉山謙吾 (1983). ロボットの産業応用, 日本ロボット学会誌, Vol. 1, No. 1, pp. 31-37

榊原伸介 (2017). ロボット技術, IoT および AI の活用による製造業の競争力強化, 精密工学会誌, Vol. 83, No. 1, pp. 30-35

佐藤邦彦 (1990). 「溶接・接合工学概論」, 理工学社, pp. 1-7

清水伸二 (2017). IOT, インダストリ 4.0 時代に精密工学は何をすべきか, 精密工学会誌, Vol. 83, No. 1, pp. 7-12

新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2010). 将来市場予測の概要 (PDF版), <https://www.nedo.go.jp/content/100080673.pdf>, pp. 1-3 [2020年9月21日閲覧]

新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2014). NEDO ロボット白書 2014 (PDF版), <https://www.nedo.go.jp/content/100567345.pdf>, pp. 1-1~1-4 [2021年5月4日閲覧]

清野武寿, 西田直人, 藤武浩二 (2007). DFM(Design For Manufacturability)を加速する生産技術マネジメント, 研究・技術計画学会第22回年次学術大会講演要旨集, 武蔵野, pp. 625-628

精密工学会 画像応用技術専門委員会 (2000). 「画像処理応用システム 基礎から応用まで」, 東京電機大学出版部, pp. 182-190

総務省 (2018). 平成30年版 情報通信白書 (PDF版), <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h30/pdf/n3500000.pdf>, p. 143 [2020年10月25日閲覧]

高田淳, 杉山尚美 (2012). 生産エンジニアリングツールを活用したライン設計, 東芝レビュー, Vol. 67, No. 2, pp. 23-26

高田広章 (2001). 組込みシステム開発技術の現状と展望, 情報処理学会論文誌, Vol. 42, No. 4, pp. 930-938

谷口紀男 (1971). 自動組立と結合技術, 精密機械, Vol. 37, No. 5, pp. 307-316

中山景央, 翁嘉華, 大成尚 (2017). 人手組立ラインの工程作業における時間延長の分析 —白物家電の海外組立ラインを例として—, 日本経営工学会論文誌, Vol. 68, No. 3, pp. 201-211

西村仁 (2019). 「機械設計の知識がやさしくわかる本」, 日本能率協会マネジメントセンター, pp. 22-24, pp. 209-218

日経 BP 社 (2020). 製造業, 新型コロナとたたかう, 日経ものづくり, 2020年6月号, pp. 39-67

日本機械学会 (2005a). 「機械工学便覧 デザイン編 β7 生産システム工学」, 丸善株式会社, pp. 32-36, pp. 46-47, p. 70, pp. 96-98, pp. 109-110

日本機械学会 (2005b). 「機械工学便覧 基礎編 α1 機械工学総覧」, 丸善株式会社, pp. 78-83

日本機械学会 (2018). 機械工学辞典, <https://www.jsme.or.jp/jsme-medwiki/> [2021年6月12日閲覧]

日本機械学会 生産システム部門 技術ロードマップ WG (2016). 生産システム部門 技術ロードマップ (PDF版), <https://www.jsme.or.jp/uploads/sites/6/files/seisansys1.pdf>, pp. 1-6 [2020年9月21日閲覧]

日本信頼性学会 (2014). 「新版 信頼性ハンドブック」, 株式会社 日科技連出版社, pp. 229-243

日本能率協会, 門田安弘 (1978). 「新版 トヨタの現場管理」, 日本能率協会マ

ネジメントセンター, pp. 217-223

株式会社 ハイオス (2019). 電動ドライバー総合カタログ 2019, https://static.hios.com/catalog/book_erelectric_screwdriver_19c_jp_all/book/#target/page_no=1 [2021年5月4日閲覧]

長谷川健介 (1980). 小特集：産業用ロボット, 電気学会雑誌, Vol. 100, No. 6, pp. 481-485

浜田武士, 山下成治, 見上隆克, 橋本忍 (1997). ホタテガイ養殖業の分散・耳吊り作業における作業者と機械設備の最適配分法, 日本水産学会誌, Vol. 63, No.2, pp. 171-177

原口林太郎, 上村幸市 (2019). IoT時代の産業用ロボットと活用事例, 日本ロボット学会誌, Vol. 37, No. 8, pp. 690-693

原田研介 (2018). 産業用ロボットによる組み立て作業の自動化に関する研究動向, 精密工学会誌, Vol. 84, No. 4, pp. 299-302

原田研介, 万偉偉 (2019). 産業用ロボットの次世代技術について, 日本ロボット学会誌, Vol.37, No.10, pp.915-918

人見勝人 (1991). 「入門編 生産システム工学」, 共立出版, pp. 25-27, pp. 73-101, p. 207

福田隆文 (2021). 制御と安全の基礎—機能安全の理解のきっかけとして, 機械設計, Vol.65, No.10, pp. 8-14

藤川裕晃 (2005). 「多層階工場レイアウト入門」, 工業調査会, pp. 81-90

不二越搬送システム研究グループ (1990). 「知りたい搬送—搬送は FA の決め手」, ジャパンマシニスト社, pp. 32-40

株式会社 マイクロリンク (2018). TPS カメラ, <https://www.microlink.co.jp/tps/> [2019年12月17日閲覧]

牧野洋, 謝存禧, 鄭時雄 (1988). 「ロボット機構学」, 日刊工業新聞社, pp. 1-8

マクダーモット, R.E., ミカラク, R.,J, ボウリガード, M.,R. (2010). 「FMEAの基礎 第2版」(原田陽史訳), 日本規格協会, pp. 71-74

松村明 (2006). 「大辞林 第三版」, 三省堂, pp. 1125

宮内孝, 鈴木智夫, 妹尾勝己 (2010). 液晶ディスプレイの実装検査技術, 東芝レビュー, Vol. 65, No. 10, pp. 36-39

宮内孝, 深津健太, 原野朋美 (2018a). 製造工程の特性に応じた自動化機器・製造設備の適用による合理化, 東芝レビュー, Vol. 73, No. 1, pp. 11-15

宮内孝, 山田哲男 (2018b). 作業の自動化難易度を考慮したハイブリッド組立ラインの設計事例, 平成30年度日本設備管理学会秋季研究発表大会論文集, 北九州, pp. 47-52

宮内孝, 近藤浩一, 山本健彦, 山本宏 (2019). CPSの実現に向かうロボット技術の高度化と実用化, 東芝レビュー, Vol. 74, No. 4, pp. 2-7

宮内孝, 山田哲男, 杉正夫 (2020a). 作業の自動化難易度と自動化率を考慮したハイブリッド組立ラインの設計問題, 2020年度日本設備管理学会春季研究発表大会論文集, 調布, pp. 44-49

宮内孝, 山田哲男 (2020b). 作業の自動化難易度を考慮した人とロボットのハイブリッド組立ライン設計に関する事例研究, 日本設備管理学会誌, Vol. 32, No.2, pp. 7-21

宮内孝, 山田哲男 (2020c). 工程の特性に応じた作業者と製造装置の選択方法に関する課題, 2020年度日本設備管理学会秋季研究発表大会論文集, オンライン, pp. 59-64

宮内孝, 山田哲男, 杉正夫 (2021a). 作業の自動化難易度と自動化率を考慮した人とロボットのハイブリッド組立ラインの設計法, 日本設備管理学会誌, Vol. 33, No.2, pp. 1-11

宮内孝, 山田哲男 (2021b). 自動化難易度、自動化率とステーション数の3目的を持つ人とロボットのハイブリッド組立ライン設計問題, 日本経営工学会 2021年秋季大会予稿集, オンライン, pp. 128-131

宮崎茂次, 太田宏 (1990). フレキシブル組立ラインにおける設備投資案を含むラインバランス問題, システム制御情報学会論文誌, Vol. 3, No. 6, pp. 167-175

宮代隆平, 松井知己 (2006). ここまで解ける整数計画, システム/制御/情報, Vol. 50, No. 9, pp. 363-368

宮代隆平 (2012). 整数計画ソルバー入門, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 57, No.4, pp. 183-189

村上弘記 (2015). 自動化システムの最近の動向と今後の展開, 計測と制御, Vol. 54, No.12, pp.889-894

村山省己 (2018). 「グローバル自動化ラインの基礎知識 加工・組立ライン編」, 日刊工業新聞社, pp. 69-110, pp. 227-252

吉村允孝 (2007). 「モノづくりにおけるシステム設計最適化」, 養賢堂, pp. 102-137

ロボット政策研究会 (2006). ロボット政策研究会 報告書, p.7, <https://www.jara.jp/various/report/img/robot-houkokusho-set.pdf> [2021年5月4日閲覧]

<英文>

Azadeh, K., de Koster, M. B. M. and Roy, D. (2017). Robotized and Automated Warehouse Systems: Review and Recent Developments, <https://doi.org/10.2139/ssrn.2977779> [accessed on May 10, 2021]

Botti, L., Mora, C. and Regattieri, A. (2017). Integrating Ergonomics and Lean Manufacturing Principles in a Hybrid Assembly Line, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 111, pp. 481-491

Chen, B., Wan, J., Shu, L., Li, P., Mukherjee, M., and Yin, B. (2017). Smart Factory of

Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges, *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 6505-6519

Chutima, P. (2020). Research Trends and Outlooks in Assembly Line Balancing Problems, *Engineering Journal*, Vol. 24, Issue 5, pp. 93-134

Çil, Z. A., Mete, S., and Ağpak, K. (2017). Analysis of the Type II Robotic Mixed-model Assembly Line Balancing Problem, *Engineering Optimization*, Vol. 49, No. 6, pp. 990-1009

Fujimoto, T. (1992). What Do You Mean by Automation Ratio, Discussion Paper for Berlin Work Shop on Assembly Automation, Berlin, Germany, <http://www.cirje.e.u-tokyo.ac.jp/research/dp/92/f16/dp.pdf> [accessed on April 17, 2021]

Gao, J., Sun L., Wang, L., and Gen, M. (2009). An Efficient Approach for Type II Robotic Assembly Line Balancing Problems, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 56, pp. 1065-1080

Hazira, O., Delorme, X., and Dolgui, A. (2015). A Review of Cost and Profit Oriented Line Design and Balancing Problems and Solution Approaches, *Annual Reviews in Control*, Vol. 40, pp. 14-24

Hillier, S., and Lieberman, G. J. (2004). *Introduction to Operations Research 8th Edition*, McGraw Hill Higher Education, pp. 478-546.

IBM Corporation (2017a). IBM ILOG CPLEX Optimization Studio CPLEX User's Manual, Ver. 12, Release 8, https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/SSSA5P_12.8.0/ilog.odms.studio.help/pdf/usrcplex.pdf?origURL=SSSA5P_12.8.0/ilog.odms.studio.help/Optimization_Studio/topics/PLUGINS_ROOT/ilog.odms.studio.help/pdf/usrcplex.pdf [accessed on Feb 13, 2021].

IBM Corporation (2017b). LP File Format: Algebraic Representation, https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/SSSA5P_12.8.0/ilog.odms.cplex.help/CPLEX/FileFormats/topics/LP.html [accessed on Feb 14, 2021].

Igarashi, K., Yamada, T., and Inoue M. (2013). Disassembly System Design with

Environmental and Economic Parts Selection Using the Recyclability Evaluation Method, *Journal of Japan Industrial Management Association*, Vol. 64, No. 2E, pp. 293-302.

International Federation of Robotics (2021). Executive Summary World Robotics 2020 Industrial Robots, https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_2020_Industrial_Robots_1.pdf [accessed on Jun 19, 2021].

Levitin, G., Rubinowitz, J., and Shnits, B. (2004). A Genetic Algorithm for Robotic Assembly Line Balancing, *European Journal of Operational Research*. Vol. 168, Issue 3, pp. 811-825

Liu, X. J. (2019). Research Toward IoT and Robotics in Intelligent Manufacturing: A Survey, *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, Vol. 7, No. 3, pp. 128-132

Lopes, T. C., Sikoraa, C. G. S., Molina, R. G., Schibelbainc, D., Rodrigues, L. C. A., and Magatão, L. (2017). Balancing a Robotic Spot Welding Manufacturing Line: An Industrial Case Study, *European Journal of Operational Research*, Vol. 263, pp. 1033-1048

Makhorin, A. (2010). GLPK (GNU Linear Programming Kit) Reference Manual, Ver. 4.45, <https://kam.mff.cuni.cz/~elias/glpk.pdf> [accessed on Feb 14, 2021].

Makhorin, A. (2016). Modeling Language GNU MathProg Language Reference for GLPK, Ver. 4.58, <https://gusek.sourceforge.net/gmpl.pdf> [accessed on Feb 14, 2021].

Miyauchi, T. and Yamada, T. (2020) Design Problem of Hybrid Assembly Line with Humans and Robots Considering Automation Difficulty Level, 9th International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI AAI 2020), Online, pp. 739-744

Nilakantan, J. M., Nielsen, I., Ponnambalam, S. G., and Venkataramanaiah, S. (2017), Differential Evolution Algorithm for Solving RALB Problem Using Cost- and Time-based Models, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 89, pp. 311-332

Nof, S. Y., Wilhelm, W. E., and Warnecke, H. (1997). *Industrial Assembly*, Chapman &

Hall, pp. 1-10, pp. 200-258

Pinto, P. A., Dannenbring D. G., and Khumawala, B. M. (1983). Assembly Line Balancing with Processing Alternatives: An Application, *Management Science*, Vol. 29, No. 7, pp. 817-830

Qin, J., Liu, Y., and Grosvenor, R. (2016). A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond, *Procedia CIRP*, Vol. 52, pp. 173-178

Rubinovitz, J., Bukchin, J., and Lenz, E. (1993). RALB - A Heuristic Algorithm for Design and Balancing of Robotic Assembly Lines, *Annals of the CIRP*, Vol. 42, No. 1, pp. 497-500

Yamada, T. and Matsui, M. (2001). 2-Stage Design Method for Assembly Line Systems with Stoppers, *Journal of Japan Industrial Management Association*, Vol. 51, No. 6, pp.594-602.

Yoosefelahi, A., Aminnayeri, M., Mosadegh, H., and Ardakani, H. D. (2012). Type II Robotic Assembly Line Balancing Problem: An Evolution Strategies Algorithm for a Multi-Objective Model, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 31, pp. 139– 151

ZIB (Zuse Institute Berlin) (2021). SCIP homepage, <https://www.scipopt.org/index.php#welcome> [accessed on Jun 20, 2021].

関連論文

- (1) 宮内孝, 山田哲男 (2020). 作業の自動化難易度を考慮した人とロボットのハイブリッド組立ライン設計に関する事例研究, 日本設備管理学会誌, Vol. 32, No.2, pp. 7-21, 査読有, 3 章に関連
- (2) 宮内孝, 山田哲男, 杉正夫 (2021). 作業の自動化難易度と自動化率を考慮した人とロボットのハイブリッド組立ラインの設計法, 日本設備管理学会誌, Vol. 33, No. 2, pp. 1-11, 査読有, 4 章に関連
- (3) T. Miyauchi and T. Yamada (2020). Design Problem of Hybrid Assembly Line with Humans and Robots Considering Automation Difficulty Level, 9th International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI AAI 2020), Online, pp. 739-744, 査読有, 4 章に関連

著者略歴

申請者： 宮内 孝

生年月日： 1964年12月21日

学歴・職歴：

1988年3月：東北大学 工学部 機械工学科 卒業

1988年4月：東北大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 博士前期課程 入学

1990年3月：東北大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 博士前期課程 修了

1990年4月：株式会社 東芝入社 生産技術関連の研究開発に従事

2019年10月：電気通信大学大学院 情報理工学研究科 情報学専攻

博士後期課程入学 現在に至る

その他

所属学会：日本機械学会，日本設備管理学会，日本ロボット学会，日本経営工学会，日本オペレーションズ・リサーチ学会