

論文 / 著書情報
Article / Book Information

| | |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 題目(和文) | 工作機械のマスカスタマイゼーションを実現する再構成可能な生産システムに関する研究 |
| Title(English) | |
| 著者(和文) | 井上真一 |
| Author(English) | Shinichi Inoue |
| 出典(和文) | 学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12682号, 授与年月日:2024年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:進士 忠彦,初澤 毅,吉田 和弘,田中 智久,赤坂 大樹,吉岡 勇人 |
| Citation(English) | Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12682号, Conferred date:2024/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,, |
| 学位種別(和文) | 博士論文 |
| Type(English) | Doctoral Thesis |

工作機械のマスカスタマイゼーションを実現する
再構成可能な生産システムに関する研究

東京工業大学 工学院博士後期課程
機械系機械コース
井上 真一

目次

第一章 緒論

| | | |
|---------|-------------------------|----|
| 1. 1 | 本研究の背景 | 5 |
| 1. 1. 1 | 工作機械産業の存在意義 | 5 |
| 1. 1. 2 | 多品種少量生産の長期トレンド | 5 |
| 1. 1. 3 | 日本の製造業を取り巻く環境 | 8 |
| 1. 1. 4 | マスカスタマイゼーションに対応する生産システム | 9 |
| 1. 2 | 再構成可能な生産システムの研究動向 | 10 |
| 1. 2. 1 | 多品種少量生産方式 | 11 |
| 1. 2. 2 | 再構成可能な製造システム | 15 |
| 1. 2. 3 | 再構成可能な生産システムの研究動向 まとめ | 23 |
| 1. 3 | 本研究の目的と適用範囲 | 23 |
| 1. 4 | 本論文の構成 | 24 |

第二章 工作機械の再構成可能な生産システムのコンセプト提案

| | | |
|---------|------------------------------------|----|
| 2. 1 | 多品種少量生産と自動化の両 | 25 |
| 2. 2 | Mobile Robot の適用 | 30 |
| 2. 2. 1 | AGV 一体型ロボット Automomus Mobile Robot | 30 |
| 2. 2. 2 | 自律再構成する生産セル | 30 |
| 2. 3 | 再構成可能な生産システムのコンセプト提案 | 32 |
| 2. 3. 1 | 自律再構成する工作機械の組立生産システムの提案 | 32 |
| 2. 3. 2 | 最適化デジタルツインシステムの提案 | 34 |
| 2. 3. 3 | 自律再構成する加工システムの提案 | 35 |
| 2. 4 | 工作機械の再構成可能な生産システムのコンセプト提案 まとめ | 42 |

第三章 工作機械の再構成可能な生産システムの実装

| | | |
|---------|-------------------------|----|
| 3. 1 | Mobile Robot の要件分析 | 43 |
| 3. 1. 1 | Mobile Robot の要件定義 | 43 |
| 3. 1. 2 | Mobile Robot のメカニカルデザイン | 45 |
| 3. 1. 3 | Mobile Robot に搭載されるセンサ | 48 |
| 3. 1. 4 | Mobile Robot の自律制御 | 48 |
| 3. 1. 5 | Mobile Robot のコミュニケーション | 50 |
| 3. 2 | Mobile Robot の実装と評価 | 51 |
| 3. 2. 1 | 小型 Mobile Robot の実装 | 51 |
| 3. 2. 2 | 大型 AGV の構成 | 52 |
| 3. 2. 3 | 大型 Mobile Robot の実装 | 53 |

| | | |
|---------|---------------------------|-----|
| 3. 2. 4 | Mobile Robot の自律制御の実装 | 5 4 |
| 3. 2. 5 | Mobile Robot の精密位置決め制御の実装 | 5 6 |
| 3. 2. 6 | 階層的タスクプログラミングの実装 | 6 3 |
| 3. 2. 7 | コミュニケーションネットワークの実装 | 6 6 |
| 3. 2. 8 | 実装された Mobile Robot の実験評価 | 6 7 |
| 3. 2. 9 | Mobile Robot の実装と評価 まとめ | 6 8 |
| 3. 3 | 変容性を備えた自律再構成する生産システムの実装 | 6 9 |
| 3. 3. 1 | 工作機械な再構成可能な組立ラインの構築 | 7 0 |
| 3. 3. 2 | 工作機械組立の仮想ワークセルと工程シーケンス | 7 4 |
| 3. 4 | ロボットによる自動精密組立の実装 | 7 8 |
| 3. 4. 1 | ロボットによる自動精密組立の実装方針 | 7 8 |
| 3. 4. 2 | クレーンレスによる重量ユニットの自動組立 | 7 9 |
| 3. 4. 3 | ボールねじテンション自動設定 | 8 0 |
| 3. 4. 4 | サーボモータ用形状拘束ロボットハンド | 8 2 |
| 3. 4. 5 | ボールねじユニット組立セル | 8 3 |
| 3. 4. 6 | 工作機械の精密組立自動化 まとめ | 8 5 |
| 3. 5 | 工作機械の再構成可能な生産システムの実装 まとめ | 8 5 |

第四章 フレキシブル生産システムのスケジューリング

| | | |
|---------|----------------------------------|-------|
| 4. 1 | フレキシブル生産システムにおける問題空間 | 8 7 |
| 4. 2 | 量子アニーリングを用いた組合せ最適化問題とスケジューリング | 8 9 |
| 4. 2. 1 | ジョブショップスケジューリングとツールスイッチング | 8 9 |
| 4. 2. 2 | ツールスイッチング制約を伴う柔軟なジョブショップスケジューリング | 9 0 |
| 4. 2. 3 | 量子アニーリングを用いた組合せ最適化問題とスケジューリング問題 | 9 2 |
| 4. 3 | 量子アニーリングを用いた組合せ最適化ソルバー | 9 2 |
| 4. 3. 1 | 量子アニーリング | 9 2 |
| 4. 3. 2 | 量子アニーリングを用いた Leap ハイブリッドソルバー | 9 3 |
| 4. 4 | 量子アニーリングを適用する FMS 加工セルの数理モデル化 | 9 4 |
| 4. 4. 1 | 量子アニーリングを適用する SSP の数理モデル化 | 9 4 |
| 4. 4. 2 | 数理モデルの QUBO 行列フォーマットへの変換 | 9 6 |
| 4. 4. 3 | 量子アニーリングを適用する FJSST の数理モデル化 | 9 9 |
| 4. 4. 4 | 実用的なデータセットの準備 | 1 0 3 |
| 4. 4. 5 | インスタンスの説明 | 1 0 3 |
| 4. 5 | 量子アニーリングによる加工セルの組合せ最適化スケジュール | 1 0 5 |
| 4. 5. 1 | 実験計画 | 1 0 5 |

| | | |
|---------|------------------------------|-----|
| 4. 5. 2 | CBC を用いた Python MIP | 105 |
| 4. 5. 3 | ディスパッチングルール | 106 |
| 4. 5. 4 | ソルバーの設定 | 108 |
| 4. 5. 5 | 実験結果 | 108 |
| 4. 6 | 量子アニーリングを適用する組立セルの数理モデル化 | 112 |
| 4. 6. 1 | 量子アニーリングを適用する工作機械組立セルの数理化 | 112 |
| 4. 6. 2 | 数理モデルの QUBO 行列フォーマットへの変換 | 113 |
| 4. 7 | 量子アニーリングによる組立セルの組合せ最適化スケジュール | 116 |
| 4. 8 | フレキシブル生産システムのスケジューリングまとめ | 121 |
| 第五章 結論 | | |
| 5. 1 | 本研究で得られた成果 | 123 |
| 5. 2 | 今後の課題 | 127 |
| 参考文献 | | 128 |
| 謝辞 | | 133 |

第一章 緒論

1. 1 本研究の背景

1. 1. 1 工作機械産業の存在意義

マザーマシンとしてもものづくりを支える工作機械は、製造産業の基盤である。資源を輸入して加工することにより価値を付加した製品の輸出をおこなう国家にとって、工作機械の強固な供給能力は、高い生産性を支える産業の基盤であり、豊かさの源泉である。過去の歴史を顧みても工作機械産業が発展した国では製造業が活性化し豊であった。一方、工作機械産業が衰退した国では製造業が衰退し、次第に豊かさが失われていった。

工作機械は英語で Machine Tools と呼ばれ、Tools の部位が本質を示している。工作機械は「道具としての機械」なのである。道具は人が使うものであり、人に寄り添わなければならない。人にはそれぞれの考えがあり、100人のユーザがいればそこに100通りの使い方が存在する。工作機械のユーザはそれぞれの特徴を活かして差別化を行い、お互いに棲み分けることで過度な競争を回避して持続可能性を引き上げている。その多様性により、産業に厚みと深みが生まれる。故に工作機械産業の役割とは、道具として優れた機械を提供することであり、個々の異なるユーザの要望に如何に応えるかが存在意義であるといえる。

工作機械は異なる顧客の要望に適応するために多様な仕様に適合するようになった。工作機械はマスカスタマイゼーションを必要とする最たる製品であるといえる。多様な仕様の工作機械を効率的に生産することは、ものづくり産業の多様性を支える最も重要な能力のひとつであると考えられる。

1. 1. 2 多品種少量生産の長期トレンド

本項において製造業における部品加工市場のトレンドがどのようなになっているかについて述べる。先ず、図 1. 1 に自動化のソリューションの推移を示す。横軸には加工品のバラエティを、縦軸には加工品の生産量を示している。牧野フライス製作所における事例では、日本の工作機械産業の黎明期にはスタンドアローンのマシニングセンタ (MC) を製造していたが、高度経済成長に伴い加工品の生産量が増大するのに対応してマシニングセル、フレキシブルマニファクチャリングシステム (FMS)、フレキシブルトランスファライン (FTL)、に対応するように進化してきた。過去の自動化のソリューションは加工部品の生産量、つまりマスプロダクションに対応したものであり、比較的自動化が行い易い状況であったと言える。

一方で現在の部品加工市場のトレンドは、対象の加工品のバラエティは多様でありながら、その部品を高い効率で迅速に生産すること、つまりマスカスタマイゼーションに適応することが求められている[1]。部品種類が多いにも関わらず、大量生産に匹敵する効率で生産することを求められる点が過去の要求と大きく異なり、自動化の難易度が高い。

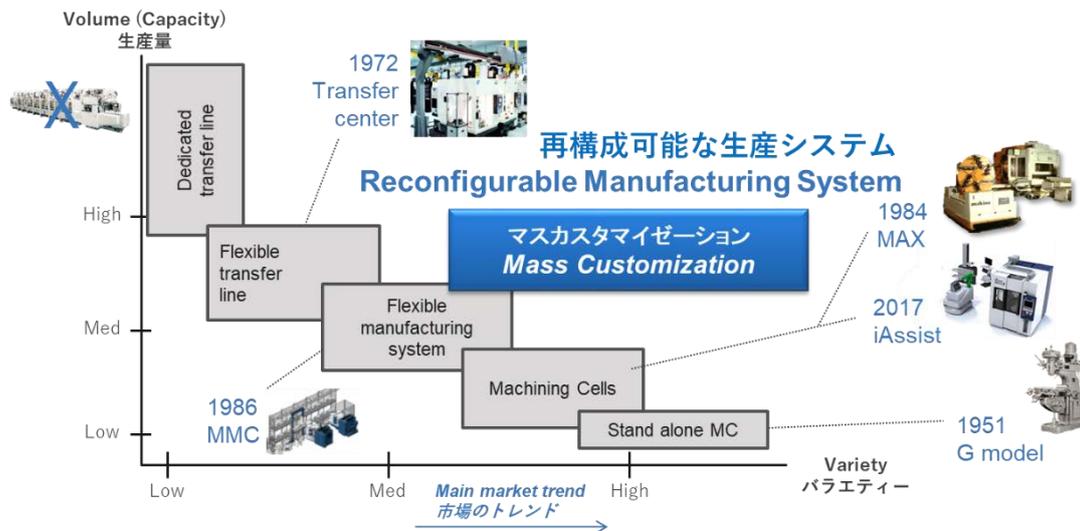


図 1. 1 今後求められる自動化ソリューションの姿[1]

次に、現在に至る生産システムの変化について観察してみる。図 1. 2 に 1900 年代の自動車の生産システムと現代の生産システムを挙げる。1900 年代の自動車の生産システムで初めてベルトコンベアによるライン生産方式が採用された。従来 12 時間かかっていた工程が 1 時間半にまで短縮され、生産ラインとしては 3 分毎に 1 台が製造され出荷されていた。1925 年頃迄には一日に約一万台が生産されるマスプロダクションに進化した。

一方、2017 年の自動車の生産システムではロボットが多数配置され近代的に進化したように見えるが、基本的に自動車の生産システムはマスプロダクションであり本質的な変化は無い。自動車の仕様は多様であるように見えるが、実際には塗装色や内装等の限定的カスタマイズへの対応であり、自動車そのものの形態やサイズが大きく異なることはない。



https://gazoo.com/article/car_history/150911_1.html



<https://www.technologyreview.jp/s/84161/tesla-says-its-factory-is-safer-but-it-left-injuries-off-the-books/>

1900 年代の自動車生産システム

2017 年の自動車生産システム

図 1. 2 1900 年代と 2017 年の自動車の生産システム

これに対して工作機械の製造は事情が異なる。個々の顧客の要望に対応して機械の形や大きさが全く異なるようなカスタマイズに対応しなければならない。図 1. 3 は工作機械の標準仕様と大容量工具マガジン仕様、さらにパレットマガジンと大容量工具マガジンが組み合わされた仕様の形態の差異を示したものである。同じ基本の機械でありながらその形態、大きさが全く異なることが分かる。自動車と異なり、工作機械の生産システムがベルトコンベアに乗せてマスプロダクションを行う生産ラインで画一的仕様製品の生産を進められない理由がここにある。多様で形態や大きさまでが大きく変化する工作機械の生産では、流れ作業によって生産することが難しい。機械をある場所に固定して熟練労働者が機械を渡り歩いて生産を行うセル生産方式に頼らざるを得ない。組立作業の複雑さやリードタイムも標準仕様とオプション仕様とは大きく異なる。このように工作機械のマスカスタマイゼーションを実現する生産システムは自動化が難しく、どうしても人に頼った生産システムとなる。一方で労働人口が急速に減少している我が国では、若い労働者の獲得、熟練作業員への育成がより困難になっており、本生産システムが限界を迎えつつある。

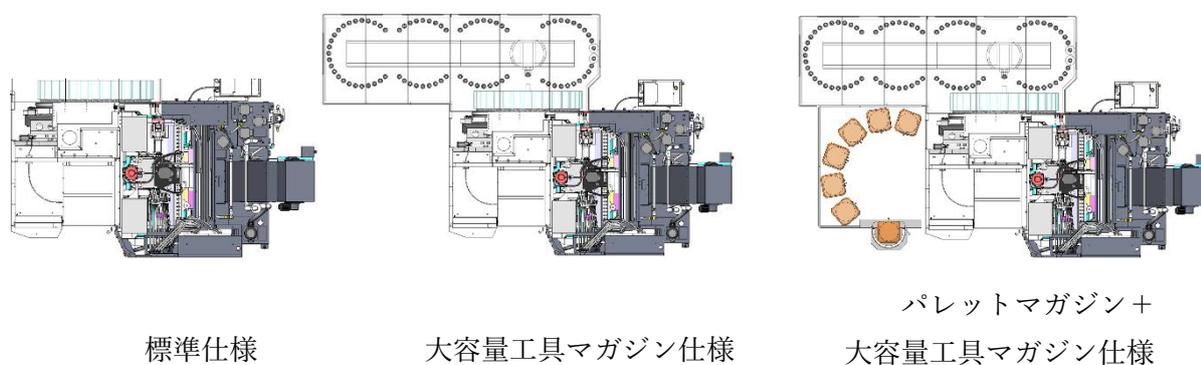


図 1. 3 工作機械の同一機種に対する仕様と機械形態の変化

さらに追い討ちをかけるのが、多品種少量生産の長期トレンドである。図 1. 4 に生産システムの長期トレンドを示す[2]。横軸には製品のバリエティ、縦軸には製品 1 モデルあたりの生産量を示す。1850 年頃にはクラフトマンシップにより製品を一品一品丹精込めて生産していたクラフトプロダクションの状況から、1950 年頃まで製品 1 モデルあたりの生産量が急激に上昇し、売り手の観点から市場が形成され、マスプロダクションへ突き進むことになった。しかし、1990 年頃になると市場は買い手によって支配されるようになりビジネスモデルそのものが変化した。生産システムはマスカスタマイゼーションに対応することを求められるようになる。世界中のサプライチェーンがグローバルにリンクする 2000 年頃のグローバリゼーションを超えて、2020 年頃になると経済圏が分断し、それぞれの地域で顧客の要求内容が異なるリージョナリゼーションが顕著になった。さらに近未来では個人が個別要求を追求するようになると予測されている[3]。これらの推移はまるで U 字曲線のように 1850 年代のクラフトプロダクションと似た製品 1 モデルの生産量になってくるインディビジュアルプロダクションへと突き進む長期トレンドとなっている[4]。1850 年代と異なるのはその生産効率とコストである。生産量が圧倒的に少ないにもかかわらず、効率やコストはマスプロダクションに匹敵するものが求められる[5]。このパラダイム変

化には現在の生産システムでは対応が困難である。ここで求められるのは個人の個々に異なる要望に対応可能な生産システムということになる。

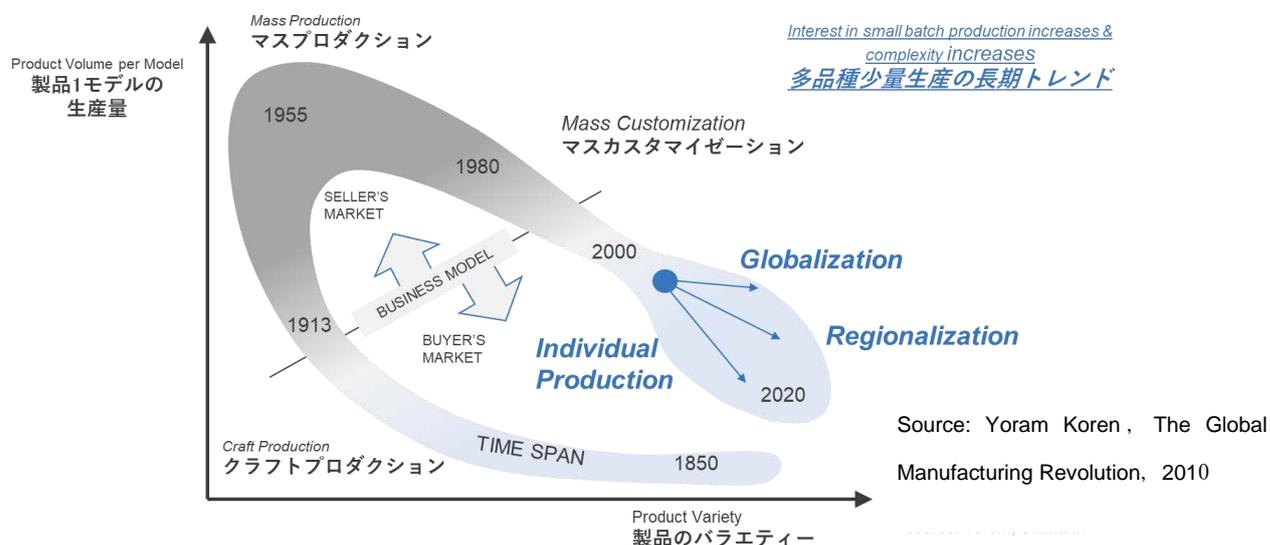


図 1. 4 多品種少量生産の長期トレンド[2]

1. 1. 3 日本の製造業を取り巻く環境

現在、日本の製造業を取り巻く環境は劇的に変化している。それらの環境要因、すなわち政治的、経済的、社会的、技術的要因[6]を表 1. 1 に示す。政治的には、持続可能な社会を実現するために、各国ではさまざまな環境規制や産業刺激策について議論されている。その結果、各国や地域で普及する商品が変化し、自由貿易に基づく一つの大きな世界経済圏ではなく、分断した各経済圏での活動となり、内容が多様化してきている。世界市場向けの大量生産ではなく、各経済圏に合わせた生産で工場を分散させる傾向が強まっている。社会文化的に、消費者のニーズがより多様になり、断片化され、より速く変化するにつれて、製造業を選択する労働者はますます少なくなっている。工場は、より少ない人数でより多くの変更を管理する必要がある。この需要を満たすために、製造会社はデジタル技術および自動化技術を採用する必要性に迫られている。

日本の製造業を取り巻く環境は、変動が激しく、不確実性が高く、複雑で、予測が困難な状況となっている。表に示す環境要因を勘案すると日本のものづくりの国際競争力を強化するためには、環境の変化に機敏に適応していくことが求められる。付加価値の高い製品を創出し、世界へ発信していくことで、力強く経済を成長させていくことが望まれる。今後の長期トレンドであるマスカスタマイゼーションに対応可能な超フレキシブルな生産システムを確立することが必要不可欠であることを認識できる。セル間インターフェイスは、標準化され、システム間で互換性、共有性を確保する。具体的には、再構成可能な超フレキシブルな生産システムを構築することが重要である。

日本の製造業を取り巻く政治的、経済的環境、そして市場のトレンドについて述べてきた。資源を輸入し、付加価値を創出して輸出を行うことで経済を構築している我が国において、ものづ

くりを簡単に諦めるわけにはいかない。これらの外部環境の変化は、製造業に対して市場のメガトレンドに対応するか、それとも現状に留まるかの選択を迫っており、我が国の製造業をどの方向へ導くのか、責任ある解答と決断が求められている。

表 1. 1 日本における製造業を取り巻く環境[6]

Manufacturing industry in Japan

| Political factors | Social factors | Economic factors | Technical factors |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> •Strengthening of environment regulation •Industrial development in emerging countries •Fluctuation of foreign exchange rate •Increase in trade deficit | <ul style="list-style-type: none"> •Man shortage •Aging society with a declining birthrate •Decrease in mature engineers •Diversification of industrial demands | <ul style="list-style-type: none"> •Increase in production cost •Fall in global market competitiveness •Fluctuation in world economy •Change of industrial structure | <ul style="list-style-type: none"> •Progress of IT and AI •Intensification of industrial robot •Increased complication of industrial demands •Product innovation and process innovation |

1. 1. 4 マスカスタマイゼーションに対応する生産システム

1990年代後半よりカスタム製品を大量生産に近いコストで提供するパラダイムとしてマスカスタマイゼーションが広く受け入れられた。一般消費者向け製品は、消費者の嗜好や要求の多様化を受けてその品種数を増加させてきた。多様な製品の製造を支えるにはマスカスタマイゼーションに適応した生産システムが必要になる。そこには工作機械が生産システムの中心に存在する。工作機械は異なる製品の製造に適応するために異なる仕様に適合するようになった。工作機械はマスカスタマイゼーションを必要とする最たる製品であるといえる。多様な仕様の工作機械を効率的に生産することは、ものづくり産業の多様性を支える最も重要な能力のひとつである。

このメガトレンドに対応するために、今後の工作機械と生産システムが「再構成可能」でなければならないと考える[7]-[11]。「再構成可能性」が必要な要因は、製造業の周辺環境に様々な変化が起きているからである。いくつかの変化は、ゆっくりと進むが、製造業に大きな変革を迫るものである。例えば、労働人口の減少、地球温暖化、技術革新、そして製品の短命化などである。いくつかの変化は、突然訪れ、そして今の製造業に素早い反応を迫る。現在、世界が経験しているような未知の感染症の蔓延、国際紛争などがそれにあたる。これらの環境変化は製造業を構成する様々な要素に影響を与える。いずれにせよ、これらの変化に適応していかなければならない。

予測困難といわれる外部環境の変化の中で、市場の要求が変化する速度も増している。製造会社は、再構成可能な生産システム、すなわち製品ライフサイクルの短期化、製品種別の増加、生産量の変動などの市場要求に対応するため、迅速に構成を変えられる生産システムを実現することが望まれる。また同時に、特に先進国において労働力が減少するなかで、飛躍的生产性向上の実現が求められている。市場からの要求の多様化によりパターンが増えたオペレーションの自動化は、従来の単一あるいは少数のパターンの自動化とは難易度が大きく異なるため、従来の生産システムの考え方では、これらの課題を解決するのが難しかった。マスカスタマイゼーションを実現する要件として、「再構成可能性」と「自動化」の両立が必要であると考えられる。

個々の顧客の要望に応えるために、また異なる製品の製造に適応するために、工作機械の仕様は多様なものになる。しかしながら、工作機械の生産には様々な困難が付きまとう。仕様の多様性に起因する自動化の難しさ、機械加工や組立の要求精度の高さ、需要変動の大きさ、部品調達の不確実性の高さ等である。多様な仕様に基づく工作機械の生産において、熟練労働者がワークセル間を移動しながら多様な組立作業をおこなう現在の生産システムは限界を迎えつつある。多様な組立作業が多数のワークセルに分散する現状の生産システムでは、効果的な自動化が困難である。ワークセル毎の生産設備を分散配置しても稼働率を上げられない。

工作機械を中長期にわたって効率的に生産する生産システムが求められている。工作機械は究極の多品種少量型の製品である。その効率的な生産は、まさしくマスカスタマイゼーションと呼べるだろう。中長期において工作機械の生産量は大きく変動する。また工作機械に求められる要件は大きく変化する可能性が高い。効率的な生産を維持するには、生産システムは再構成可能であって、生産量や売上構成比の変動や製品自体の変化に追従できることが望ましい[6]。今後求められる自動化ソリューションの姿は、市場のトレンドに適応し、各々の顧客要望に迅速かつ効率的に対応できるマスカスタマイゼーションに適応可能な生産システムが必要である。そして、その生産システム実現のためには設計の根幹にまで立ち返って考えることが望ましい。この原則が”Reconfigurability by Design“である。

1. 2 再構成可能な生産システムの関連動向

1. 2. 1 多品種少量生産方式

工作機械の多品種生産と自動化を両立する生産システムを検討するにあたり

- セル生産方式
- 再構成可能な製造システム

を中心に研究開発動向の調査を行った。

図1. 5に生産方式の種類を挙げる。先ず、フローショップ生産方式とは自動車の生産ラインに採用されている生産方式で、対象の製品が流れる。生産資源である人、治工具、生産装置は固定されており利用順が対象製品に対して全て同じ生産方式である。このため比較的自動化を図り易い利点がある。その一方で多様な仕様を製造する多品種少量の製品においてはそれぞれの工程で所要時間が異なってしまうため工程負荷の平準化が実現しにくく、結果的に生産ラインにおけるボトルネックで山積みを生じ、高能率なスループットを得にくい問題がある。また工作機械のように製品の重量やサイズが大きな製品の生産システムには適合していない。

次に示すのがジョブショップ生産方式である。対象製品はフロアに固定されており人、治工具等の生産資源を必要に応じて移動させる。その生産資源の利用順が製品毎に異なる生産方式であり、柔軟であるが故に人に頼るところが大であり、自動化が困難である。

三つめのセル生産方式は、ジョブショップ生産方式とフローショップ生産方式を掛け合わせ柔軟性と効率性の両立を目指した生産方式である。製品をワークセルに固定し、熟練労働者や治具などの必要なリソースをワークセル間で移動/共用する。

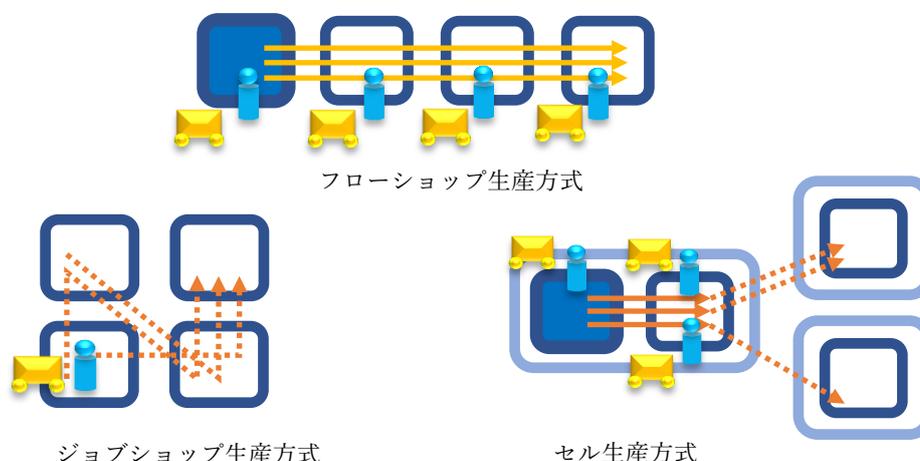


図1. 5 生産方式の種類

(1)セル生産方式

セル生産は 1990 年代半ば、コンベア生産方式に代わるものとして注目を集め普及が進んだ。従来のベルトコンベアによるフローショップ生産方式は、バブル経済崩壊後、少品種大量生産には適合しなくなった。そこで導入されたのが「セル生産方式」である[13]。コンベアを直線に繋いだフローショップ生産方式と異なり、セル生産方式では U 字型や屋台方式がとられることが多く、人数も一人か少人数で構成される。

セル生産方式の長所は柔軟に工程の変化に迅速に対応しやすいところであり、多品種少量生産に適応が可能であり需要の変化にも強い点である。フローショップ生産方式の様にラインバランスを取る必要がなく、一個流しであるために仕掛品の山積み問題が解決された。

一方でセル生産方式の短所は、柔軟であるが故に人の能力に依存するところが大きく、多様な熟練作業が必要とする

。熟練工の育成には多大なる時間を要すること、病欠や退職に大きく生産システムが影響を受ける難点がある。そして、何より自動化を図ることが難しいことが大きな問題である。

(2) グループテクノロジー(Group Technology; GT)

部品の形状や加工工程の類似性に基づいて類似部品を定義し、部品をグループ化する方法。グループ化された部品群を部品ファミリと呼ぶ。グループテクノロジー (以下 GT) は類似部品を同時に取扱うことで、効率的に設計や生産に効率性ができるという生産原理に基づいている[14]。

現場では品種の切り替えロスを減らすために、まとめ生産を行いがちである。そうすると仕掛在庫の山が造られてしまう。在庫を抑えようとする、頻繁なジクや工具の交換を伴い生産性が

低下する。そこで、GT を用いて類似形状や類似特徴を有する部品の加工や組立には、同じ方法の加工経路パターンや同じ工具セットや加工条件、同じ組立方法等の共通した法則性に立つことができる。多品種少量生産でありながら、まるで大量生産のように見かけのロット数を引き上げる効果が見込めるのが GT である。工場における加工セルや組立セルの設備の配置をグループに対応してまとめることで生産性を高めることを期待できる。

GT によりエンジニアリングや工程設計、製造にかかる時間の短縮が見込めるものの、一方で柔軟性が低下する課題がある。製造のボトルネックになるような部品の加工や製品の組立が大幅に増加する場合、あるグループにまとめた設備が非稼働になるためである。

(3) 仮想ワークセル生産方式

仮想ワークセル生産方式とは、ワークセルを仮想的に構成してリソースを物理的に移動せずに、あるいはリソースの物理的な移動を隠蔽しながら多種多様なワークセルを要する生産を実現する生産方式である。仮想ワークセルの概念は、工程の複雑性やリソースの物理的移動を隠蔽しながら多様なワークセルを仮想的に構成する[15]。図1. 6に仮想ワークセル生産方式の事例を挙げる。それぞれの仮想ワークセルはサブ工程に必要なリソース（スペース、AGV、作業員、ロボット、治工具など）を構成しているが、そのリソースを物理的にどう確保するかは隠蔽される。例えば以下の構成は区別されないものとする。

- ①物理的に異なる1つのスペースにベッドを据え付けて各リソースを工程毎に集める。
- ②ベッドをAGV上に据え付けて各リソースがあるところにベッドを移動する。
- ③上述の2つのアプローチのハイブリッド

図に示されている工作機械の組立仮想ワークセルは各ユニット組立に適した設備と配置を示している。Z軸ユニットの仮想ワークセルでは、ボールねじとリニアガイド等のユニットを運搬するAGVと大型多関節ロボットを搭載したMobile Robotとワークピースであるベッドを搬送する大型AGVで構成されており、ベッドに対するMobile Robotはロボットアームのストローク範囲で作業が可能なように配置は横型マシニングセンタのZ軸に最も近接した場所に位置決めされている。搬送AGVは同じくロボットアームのストローク範囲内であり、かつベッドに干渉しない位置に配置されている。次に作業員によるZ軸のボールねじのリニアガイドに対する平行度やリニアガイドの真直度等の確認調整を行うZ軸調整仮想ワークセルでは、作業員を支援するため検査機器を搬送用AGVがZ軸周りで作業を行う作業員の側面に位置決めする配置がとられている。X軸組立仮想ワークセルにおいても同様で、X軸組立の際にはMobile RobotがX軸にもっとも近接した場所に配置され、その作業を搬送用AGVが支援する配置となっている。コラム組付け仮想ワークセルでは、約1,000kgfのコラムユニットを持ち上げてX軸上に搭載するため、大型多関節ロボット2機の協調動作が可能な配置となっている。ベッドを搬送する大型AGVはロボットアームのストローク範囲内にX軸が入るように配置されている。

このように仮想ワークセルでは、必要な生産リソースの選定と配置や作業工程等の定義はされているものの、その具体的な場所や Mobile Robot の個体、Mobile Robot が移動するのか否か、ベッドを搭載した AGV が移動するのか否かについては定義されていない。古典的なセル生産方式や GT の問題点であった、需要の変動が激しい生産システムにおける配置の変容による生産効率の最適化を、仮想ワークセルでは生産リソースのモバイル化を伴うことで対応が可能となっている。さらに仮想ワークセルでは各セルに固定した生産リソースは要求していないため、生産リソースを最適に割り当てることで設備の稼働率を引き上げることが期待できる。

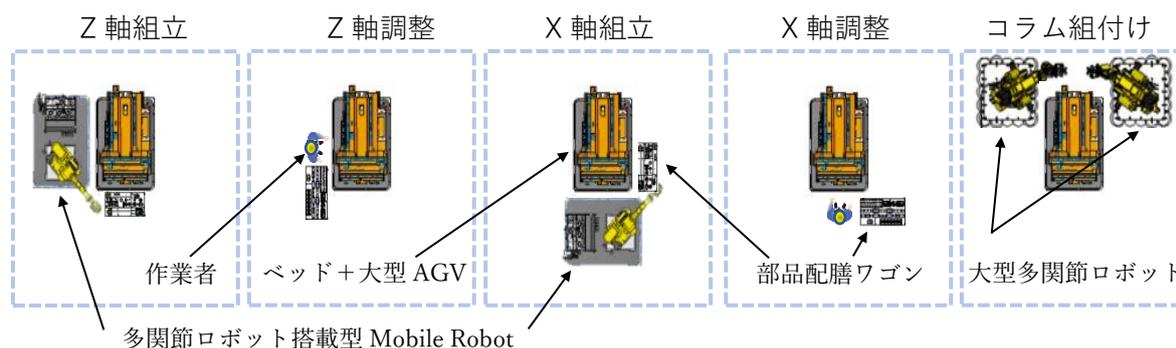


図 1. 6 工作機械の組立仮想ワークセルの事例

以上、セル生産方式の種類と研究内容について調査を行った。セル生産方式の類似型として、付加価値の高いものと低いもの、少量品向けのものと量産品向けのものなど、特性の違うものが含まれる。坂爪らによってセル生産方式のパラドクスを解決しようとするセル生産方式の類型が提案されている[16]。

一般にセル生産方式は、工程に合わせてリソースを配置して製品を効率的に動かすため量産に向くフローショップ生産方式と、機能毎にリソースを配置して製品を柔軟に動かせるため多品種生産に向くジョブショップ生産方式の良い部分を組合せた生産方式と考えられている。GT の考え方を活かして繰り返し現れる工程と必要とされるリソースを仮想ワークセルにまとめ、この仮想ワークセルを組合せて生産システムを構築するのがハイブリッドセル生産方式である。仮想ワークセルの内部ではフローショップ生産方式のように効率化を進めると同時に、複数の異なるワークセル間で製品を動かしてジョブショップ生産方式のように多品種生産を実現できる。

(4) 工作機械とセル生産方式

現在、工作機械の組立はセル生産方式が採用されている。特徴として以下の内容が挙げられる。ワークセル間の移動コストが高く、組立中の製品はひとつのワークセル（最終組立ワークセルと呼ぶ）内に据え付けられ、生産装置や治工具、作業者が最終組立ワークセル間を移動する。特殊仕様対応や変種変量生産のため最終組立ワークセルの生産効率が上がりにくい。多様な作業が求められるため段取り替えや工程の再学習などの再構成が頻繁に必要となるためである。また、生産量に合わせた個数の最終組立ワークセルが必要になる。

最終組立ワークセルに基づくセル生産方式にも以下のようなメリットがある。工作機械がひとつの最終組立ワークセルと紐づくためシンプルに管理できる。工程自体の違いやトラブルなどによって、最終組立の完了時間が多少前後しても他のワークセルへの影響が出にくく問題を局在化できる。最終組立ワークセルを増やすことで比較的簡単に生産量が増やせるなどである。

しかし、情報技術の進歩や社会情勢の変化などにより、上記のメリットは相対的に価値を下げている。情報技術を上手く使えば工程の進捗や工場全体のリソース利用状況は監視できるようになったが、就業者数が減っていて労働生産性のさらなる向上が必要不可欠の製造業において、最終組立ワークセルと関連するリソースを単純に増やす施策は有効ではない。多様な作業を含むため効率化しにくい最終組立ワークセルを分割して、工作機械の組立に真のセル生産方式を採用する必要がある。

ここで仮定として、工作機械を運べる低床大型 AGV であれば、ワークセル間移動コストを下げる可以考虑。最終組立ワークセルをより小さく、効率化しやすいワークセル（部分組立ワークセルと呼ぶ）に分割することが可能で、また、部分組立ワークセル内の工程標準化を進め、作業の効率化、究極的にはロボットを用いた自動化を推進できる。仮定として、部分組立ワークセルにポータブルな生産装置や Mobile Robot を用いることができれば、特殊仕様対応や変種変量に合わせるため生産セルの再構成が実現可能となると考える。

工程管理を行うために仮想ワークセルの導入を検討する。再構成により可能な構成を含めると部分組立ワークセルの種類は多岐に渡る。これを現場の監督者や作業者が処理することになると増大したワークセルの種類に関する管理負担を押し付けることになる。そこで仮想ワークセルにより現場の監督者や作業者は「仮想的に静的ワークセル」を示すことで従来と同じように情報を得て作業することが可能となる。

次に仮想ワークセル内における自動化の推進を考える。図 1. 7 に工作機械のベッドを可搬する低床 AGV と重量ユニットの可搬をする 2 台の協働ロボットの配置による仮想ワークセルを示す。図に示す仮想ワークセルは、大重量ユニットの組立に関わるセルである。古典的な生産セルでは各生産セルに大型多関節ロボット 2 機が物理的に据え付けられた複数の生産セルが必要であった。各生産セルでは作業者とロボットが作業を分担しているが、ロボットが動作している間、作業者は安全柵の外に出なければならぬ。この間、作業者は担当の生産セル内での作業を行うことができない。作業者が生産セル内で組立作業中にロボットは動作出来ない。作業者と設備の稼働率が上がらず、生産性が低い。仮想ワークセルの概念を適用することで、少ない数の生産リソースと物理的スペースを有効に活用して複数のワークセルを定義し、実行することが可能

である。生産リソースについては個体を限定しておらず、セルの具体的な場所も規定していないことで、必要ときに適用可能な生産リソースを活用して、目的の作業が実施できれば良いとしている。従って、仮想ワークセルの数に制限はなく、多くの作業を物理的なリソースの制限を受けずに構築することが可能となる。

工作機械の生産セルにおいては、作業者と自動化設備が共存する環境で自動化設備の稼働率を向上させなければならない。人と自動化設備の協働により生産セルの稼働率を引き上げるようにする場合、重量ユニットの組立の自動化を可能としなければならない。産業用ロボットは危険区域に人が存在しなければ自動運転が可能だが、多数のワークセルに必要な十分な自動化設備を据え付けても稼働率が上がらないという課題がある。そこで、前述の協働型 Mobile Robot を仮想ワークセル内に設置することで、安全柵が無くてもロボットと人が同じ環境で働けるようにする。限られたリソースを用いて設備の稼働率を上げながら自動化を可能とする。仮想ワークセルの中では Mobile Robot の移動は隠蔽されるため、物理的な制限を受けず仮想ワークセルの配置が可能となる。必要な時に必要なリソースの配置を可能にすることで設備稼働率を向上させることができる。

以上のようにハードウェアとソフトウェアだけでなく、作業内容もモジュール化しておくことが後に述べる再構成する生産システムの構築に重要である。仮想ワークセルは物理的なリソースを最小限に留めた状態で、作業内容をモジュール化することが可能な方法で、生産システムの最適化を図る手法として有効である。

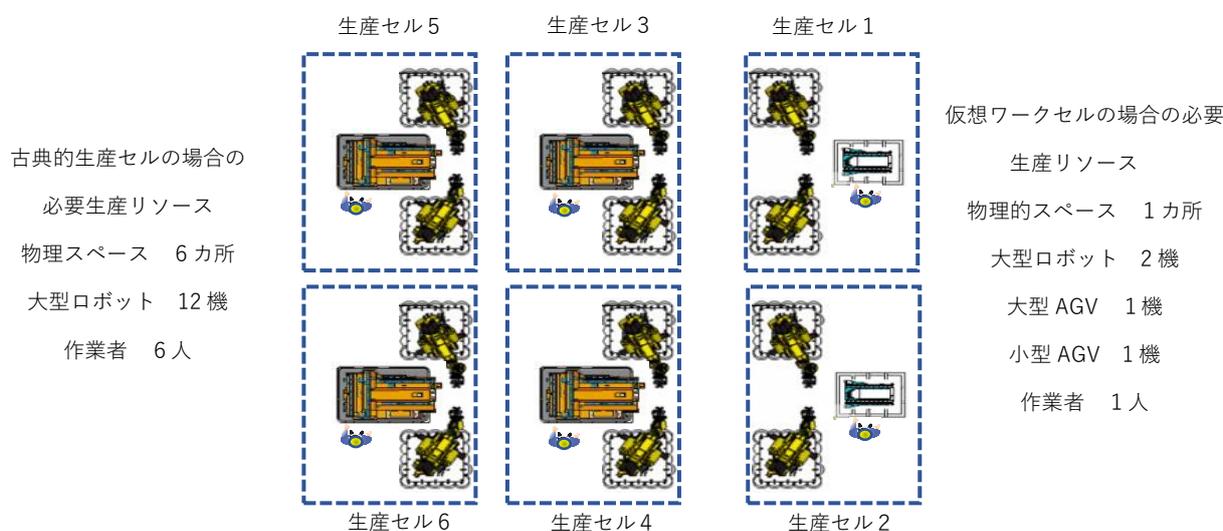


図1. 7 古典的生産セルと仮想ワークセルの必要物理的リソース数の比較

1. 2. 2 再構成可能な製造システム

工作機械のマスカスタマイゼーション生産システムにおいて、多様な仕様の変化や生産量の変動に対応するため、生産セルの再構成は重要な要件であると考えられる。前述のセル生産方式の研究では、多品種生産には対応しているが、工作機械のように高度な作業が物理的に分散する製品製造の自動化が進んでいない。工作機械の組立工程のようにワークフローが激しく変化する生産シ

システムで自動化を推進し、その自動化設備の稼働効率を引き上げ、生産システム全体からのスループットを引き上げる取組は容易ではない。しかも、製造対象の仕様が次々に変化すると難易度がさらに引きあがる。仕様の変化に対応するとラインバランスが崩れ、ボトルネックが発生し、移動するからである。前章で述べたように工作機械産業は顧客毎の異なる要望に応えることを使命としており、工作機械は多品種少量生産の最たる製品である。工作機械のマスカスタマイゼーションは、この多品種少量生産でありながら、マスプロダクションに匹敵する生産性とコストを実現させることを目標としている。そのため多品種少量生産でありながら、自動化の適用を行い、工程の中で変化するボトルネックを追跡し、そのボトルネックをリアルタイムで改善し、生産システムからのスループットを引き上げる取組が必要である。そのためには、生産セルの「再構成」が必須であると考えられる。

過去に行われてきた再構成可能な生産システムの研究について調査を行い、これらの課題に対する過去の研究による解決方法を調査する。その上で、先人の知恵を出来る限り取り入れ、解決できていない課題に対しては本研究を持って解決方法を提案する。

現在、産業界における生産システムで、再構成可能な生産システムを実現し、実用化している例は報告されていない。したがって、外部環境の変化にさらされているにも関わらず、産業界での実装と展開が進んでいない理由を考察する。再構成可能な製造システムが学術界で研究提案されたのは1990年代である。既に30年以上の歳月が過ぎてなお再構成可能な生産システムの構築は進んでいない。本節では、工作機械のマスカスタマイゼーションに焦点を当てながら、過去の研究を再学習し、そこにある課題を抽出し、問題解決の方法を検討する。そして、この課題を乗り越える対応策を次章で提案するために、再構成可能な生産システムの調査を行う。

(1) 自走式 Cubic を用いた生産システム

再構成可能な製造システムの研究として、東京工業大学の伊東誼教授を中心に推進された研究、「未来生産環境用自走形 Cubic セルの中核要素技術と設計方法論」がある[17]-[20]。機械加工を主な対象として超フレキシブルな生産を実現する生産設備を研究していた。この研究では、次世代生産環境に適合したフレキシブル生産体制を合理的に実現するためには、生産システムの基本構成およびそれらの構成要素に対して、基本的に以下の特性を具備させることが重要としている。

- ① 様々な加工要求に対する融通性
- ② 様々な加工要求に対する多様性
- ③ 様々な加工要求に対する即応性
- ④ システム構成の拡張性
- ⑤ システムの自己増殖性
- ⑥ システムの陳腐化対応性
- ⑦ システムのコンパクト性

超フレキシブル生産システムが具備すべき基本特性と共に、このシステムの基本構成要素となる「自走形 Cubic セル」は基本的に以下の機能を備えている必要があるとしている。

- ① 自律型セル移動機能
- ② 知能型セル制御機能
- ③ セル連結機能
- ④ セル内部状態認識機能
- ⑤ セル外部状態認識機能
- ⑥ セル機能の統合化機能

これらの基本特性を同時に満足することができるシステムを構築するためには、ソフトウェア面およびハードウェア面の両面において基本構成要素であるモジュールの自由な結合や分離が系統的に取り扱える「モジュラー構成システム」の概念が有効になると述べている。

これらの観点から自走式 Cubic を用いた生産システムの研究では、次世代生産システムを目的に合った形で構築するためには、単なる在来型生産形態の改良やその延長線上でシステムおよびその要素の構造や機能を検討するだけでなく、新たなシステム形態および新たなシステム概念に基づく生産システムの構築が必要不可欠になるとした。在来のシステムの概念にとらわれず、新たな概念に基づくシステム概念の提示、並びにそれらに関する具多的なシステム設計方法の確立が不可欠であるとした。

さらに、そのような生産システムの設計、稼働、並びに評価を行うためには、ハードウェア面とソフトウェア面についての要素技術の確立が強く求められるとした。様々な製品仕様を有する生産要求に対して、最適な生産システムを構築する方法論とその設計方法を明確にするだけでなく、構築された生産システムを実際に制御、稼働するための新たな技術を確立することが重要であるとしている。これらの概念は加工システムに重点が置かれており、工作機械の組立を含む製造分野には適用が困難であった。

(2) 再構成可能な製造システム

ミシガン大学の Yoram Koren 教授を中心に米国の産学が推進市場要求の変化に対して迅速かつ高いコスト対効果の製造システムを研究、「再構成可能な製造システムに関する研究」が行われた[21][22]。

製造技術のレビューから、再構成可能な製造システムを紹介しており、新しい市場の状況に応じて生産能力と機能を迅速に調整するためにデザインされた製造業の新しいパラダイムとした。再構成可能な製造システムの定義が解説され、利用可能な製造技術、それらの主要な推進要因と実現要因、およびそれらの影響、成果、制限の概要が示された。製造業に影響を与える市場、技術、科学の問題の主要な発展の観点から製造業の歴史的レビューが提供された。製造業の新しい要件について説明し、再構成可能な製造システムの特性と将来の製造におけるそれらの重要な役割を示した。

世界規模での激しい競争とプロセス技術の急速な変化を特徴とする製造環境の変化は、それ自体が容易にアップグレード可能であり、新しい技術と新しい機能を容易に統合できる生産システムを作成する必要があるとした。これらの条件には以下を可能にする応答性の高い新しい製造アプローチが必要であるとしている。

- ① 非常に迅速に着手される新製品モデルの発売、および市場の需要に合わせた製造システムの容量の迅速な調整
- ② 新しい機能とプロセス技術の既存のシステムへの迅速な統合
- ③ ニッチマーケティングのためのさまざまな量の製品への容易な適応

これらのアプローチは迅速にデザインされ、新しいモデルの生産に迅速に変換でき、容量を迅速に調整でき、技術を統合し、予測できない量であっても、より多くの種類の製品を生産できる必要があるとした。

再構成可能な製造システムが FMS と異なる点は、その容量と機能が固定されていないことである。再構成可能な製造システムは再構成可能なハードウェアとソフトウェアを用いて設計されているため、その容量や機能は時間の経過とともに変更でき、他の製造システムとは異なり、固定されたハードウェアとソフトウェアは無い。オープンアーキテクチャ制御（再構成可能ソフトウェア）、およびモジュラーマシン（再構成可能ハードウェア）が、再構成可能な製造システムの主要な実現技術であるとした。実際、再構成可能な製造システムには以下の重要な特性が必要であることを示した。

- ① モジュール性 (Modularity)
- ② 統合性 (Integrability)
- ③ 変換性 (Convertibility)
- ④ 診断可能性 (Diagnosability)
- ⑤ カスタマイズ性 (Customization)

モジュール性は最も重要であるが、その他にも統合性、変換性、診断可能性およびカスタマイズ性の特性も重要であるとしている。マスカスタマイゼーションを実現する再構成可能な生産システムについて Napoleone らが多くの文献を調査し、これらの5つの要素を再抽出して単体機レベル、生産セルレベル、工場レベルと適用スコープに関連づけて整理している[23]。

では、再構成可能な製造システムは、アジャイル製造とどのように関連しているかを以下に述べる。機敏性は、急速に変化し、絶えず分断化する、高品質で高性能な顧客が構成する商品やサービスの世界市場から利益を得ることができるビジネス上の課題への包括的な対応であると定義されている。したがって、機敏性は変化と不確実性に支配されたビジネス環境によってもたらされる課題にどのように対応するかを教えている。対象的に再構成可能性は、企業全体（製品の設計、組織、管理、マーケティング、運営等を含む）を扱うのではなく、グローバル競争にさら

されているニッチ市場の製造分野で、新しい市場機会についての生産システムの応答性のみを扱うとした。迅速なシステム設計と再構成可能な製造システムの立ち上げ手法、および市場の需要に応じて容量と機能を段階的に追加する能力は、機敏性の一つの側面であるとした。

概念は機敏性を重要としたが、実際には製造システムの寿命のなかで数回の再構成ができる設計にとどまり、工作機械への適用の可能性は限定的であった。再構成の頻度は数年～数か月に1度を想定。工作機械に求められる数時間～数日に1度のプロダクトミックスの変化には対応できない。また、主な議論は機械加工プロセスを中心に行われ、マテリアルフローが複雑な組立プロセスへの貢献は大きくなかった。

(3) 通商産業省 筑波実験プラント Flexible Manufacturing System Complex with Laser

再構成可能な生産システムの一例として経産省が作った筑波実験プラント“Flexible Manufacturing System Complex with Laser”の実装事例を調査する。この実験プラントには様々な工作機械メーカーが関わっていた。4頭構成のヘッド交換形MCが設置されており、コラムに対して主軸頭を交換できる横型MCであった。搭載されているのは、低速域から高速域まで使用可能なころがり軸受と空気軸受を使用回転数に応じて使い分けることのできる「高速ハイブリッド軸受スピンドル」である。この主軸頭は牧野フライス製作所が開発した。主軸を交換することで、ひとつの機械でより多様な加工が実現できた。

図1. 8は筑波実験プラントの概要である。チャック（ワーク）の搬送ラインに加えて、工具の搬送ライン、そして主軸などのユニット搬送ラインが組み込まれていた。多様な加工を長時間に渡って無人で実現できた。図1. 9の写真は交換式の主軸頭である。主軸頭が機械本体と連結すると電力系や油圧系も自動的に連結するようになっていた。当時においても高度なインターフェイスが実現されていたことが分かる。図1. 10の写真は無接触給電装置である。無接触給電装置によりAGVも長時間無人で運転することができた。

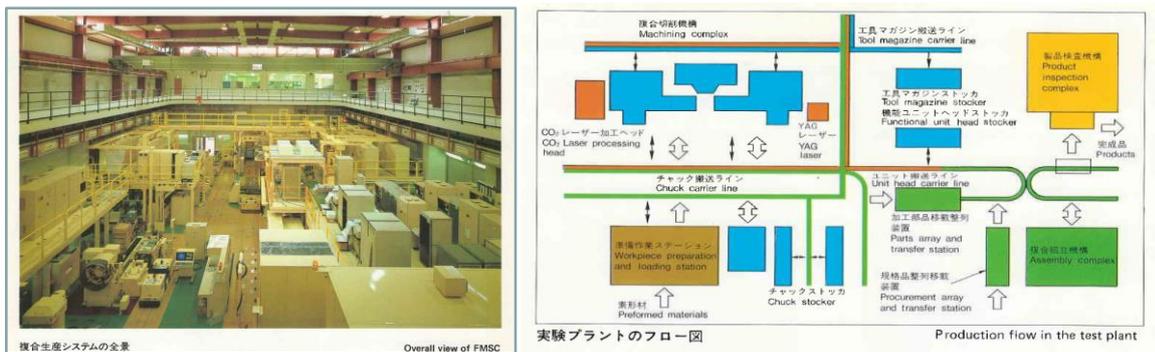


図1. 8 Tsukuba Experiment Plant (Operated from 1983 to 1984)



図1. 9 主軸頭ユニットと搬送AGV

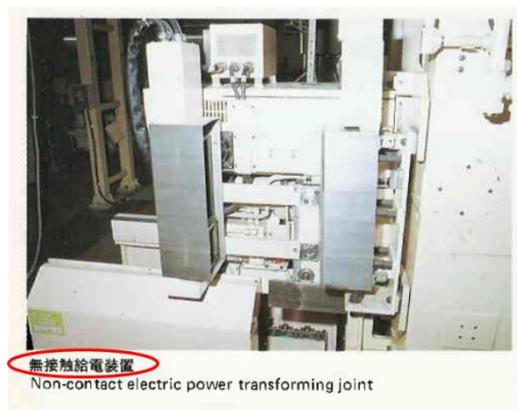


図1. 10 モジュール間 無接触給電装置

(4) 牧野フライス製作所 MAX 工場

別の事例を調査する。1983年に牧野フライス製作所で稼働していた MAX 工場である。図 1. 1 1 の写真から、既に 1983 年に AGV を用いたワーク搬送や工具搬送が実現されていた。要求に合わせて機械を使い分け、また必要に応じて工具を搬送、交換することで無人による多品種少量生産を実現していた。当時としては高い計算能力を有したミニコン VAX/VMS を用いて、工程の負荷とその加工に必要な工具本数の 2 要素を分析して、その時点での最適な工具群を判定するリアルタイム処理を行っていた。



図 1. 1 1 牧野フライス製作所 厚木 MAX 工場 (1983 年)

ここで述べた 2 つの事例のように 40 年以上前に、既に高度に柔軟な工場が実現されていた。しかし、これらが「再構成可能な生産システム」として現代に引き継がれ、残っていない事実がある。先人達の証言からその要因は複数考えられるが、一言でまとめるならば、「リエンジニアリングに必要な労力が依然として大きかった」というのが理由である。フレキシブルな機械によって可能になった多様な構成を管理するために、エンジニアやオペレータが多大な労力を払う必要があったのである。

第一に、オペレータは限定的なフレキシビリティを補完する必要があった。フレキシブルな機械と言っても、機械がサポートするのは限定的な範囲におけるフレキシビリティで、比較的大きな部分の変更には依然として人の介入が必要であった。

第二に、工場状態の把握や運用に依然として多くの人の介入が必要であった。フレキシブルな機械が製造工程の選択肢を大きく増やしても、人がそれを使いきれなかったのである。別の言い方をすれば、過去のシステムはフレキシブルではあったが、十分に管理可能ではなかったということになる。

これらの分析からひとつの指針が見えてくる。「再構成可能性 (Reconfigurability)」を実現するためには、「柔軟性 (Flexibility)」だけでなく、それによって生じた複雑性を管理できること「管理可能性 (Manageability)」が必要なことである。「再構成可能性 (Reconfigurability)」, すなわち「柔軟性 (Flexibility)」と「管理可能性 (Manageability)」を備えた製造システムを作るためには、設計の根幹を考えていく必要がある。これが“Reconfigurability by Design”という概念である。様々な変化に備えなければいけないこれからの製造システムにとって「再構成

(Reconfiguration)」はもはや「必然」である。「再構成可能性 (Reconfigurability)」に関する問題は設計の時点から考えている必要がある。そして再構成はプロセスの一部であり、製造システムがそれをサポートしていなければならない。柔軟かつ管理可能な機械、そして複雑な再構成プロセスを管理するデジタル技術が重要となる。

最近の技術動向として Mobile Robot を用いることが挙げられる[24]。図1. 12に示すような Mobile Robot の適用により従来の自動化が対象にできなかった、より多様な作業を自動化できるようになっている。さらに重要なのは、機械へ物品の柔軟な搬送が可能になったことが挙げられる。これまではロボットを使った生産システムでも搬送できるものは限定的なものであったが、 Mobile Robot はこれまで人が対応しなければいけなかった物品の搬送にも広く対応できるようになっている。

ここから言えることは、ハードウェアが進化することで柔軟性を増し、作業範囲が拡大し、複雑性が増すということである。この複雑性への対応に注力しなければ、結局プロトタイプは出来ても、それが現場で継続運用されることはない。複雑性への対応を人に依存しすぎた自動化は、結局人に大きな負担を強いて人に嫌われ、現場から姿を消してしまうため、広く製造現場で展開されることはない。

過去の失敗から学ぶとすれば、自動化の取組には自律化を伴わなければならない。出来るだけユーザにとって使いやすい自動化設備でなければならない。自動化設備に自律的な機能を備えるためには、センサ、ソフトウェアによる自己認識、自己判断、自己スケジューリング、自己制御の技術開発が欠かせない。ユーザ側で使いやすくなるという事は、自動化設備のサプライヤーはより高度なソフトウェアを開発しなければならないことを示す。

加えて、運用が極端に難しくなることへの対応が必要である。つまり、管理可能性の確保である。生産システムの柔軟性が増すと扱うべき変数が増える。その複雑な処理を出来る限り限定的に抑え、生産システムの運用が現場で可能な状況を創り出すことが望まれる。



図1. 12 組立用協働型 Mobile Robot

1. 2. 3 再構成可能な生産システムの研究動向 まとめ

過去の多品種少量生産システムの分析から分かったことは、「再構成可能性 (Reconfigurability)」を実現するためには、「柔軟性」だけでなく、それによって生じた複雑性を管理できること、「管理可能性 (Manageability)」が必要であることである。再構成可能性、すなわち柔軟性と管理可能性を備えた製造システムを作るためには、設計の根幹を考えていく必要がある。これが“Reconfigurability by Design”という概念である。様々な変化に備えなければならないこれからの製造システムにとって再構成はもはや「必然」である。再構成可能性に関する課題は設計時点から考えておく必要がある。そして再構成はプロセスの一部であり、生産システムがそれをサポートしなければならない。柔軟かつ管理可能な機械、そして複雑な再構成プロセスを管理するデジタル技術が重要となる。

工作機械のマスカスタマイゼーションに対応する生産システムの実現という観点から評価すると、セル生産システムの研究は多品種生産には対応してきているが、工作機械のように高度な作業が物理的に分散する製品の自動化が進んでいないことが分かった。再構成可能な製造システムの研究は、目標とする再構成頻度があまり高くないこと、組立プロセスのようなマテリアルフローが複雑なプロセスへの対応が十分でないことから工作機械にはそのまま適用できないことが明らかになった。工作機械のマスカスタマイゼーションを実現するためには、上記の研究領域を改めて探索するとともにマザーマシンとしての高度な要求仕様を満たすエンジニアリングを同時に確立しなければならない。

1. 3 本研究の目的と適用範囲

貧困に終始符を打ち、地球を保護して、全ての人が平和と豊かさを享受できるようにすることを目指す SDGs (Sustainable Development Goals) と呼ばれる開発目標が 2015 年国連で採択された。世界中の企業や教育機関が 2030 年までに達成すべき大きなミッションとなっており、今や国内でも多くの企業の経営方針に反映されている。これまで解決が困難であった社会問題に取り組むことが責任ある者や企業の課題になっている。製造業において、これまで解決が困難であるとされてきた多品種少量生産における高生産性の実現、つまりマスカスタマイゼーションの実現こそ持続可能な社会の実現のために必要な取組と考える。そして、製造業の基盤産業である工作機械のマスカスタマイゼーションを実現する再構成可能な生産システムの提案と実証を通して、製造業のマスカスタマイゼーションへの対応へ一石を投じることが本研究の動機である。

本研究の目的は、工作機械のマスカスタマイゼーションに対応するため、「多品種生産」と「自動化」の両立と再構成が可能な生産システムを提案し、その有効性を示すことである。具体的には、生産ラインに投入される対象製品の絶えず変化する仕様と数量に対し、少数のワークセルを再構成しながらマスプロダクションに劣らぬ生産性で組立を行う生産システムを提案し、実際の工作機械組立ラインのなかで多様な組立作業が効果的な自動化を伴って実現できることを実証することである。生産システムが柔軟性を備えると変数が増え、その管理が困難になる。この問題を解決する方法を合わせて提案し、その有効性を確認することである。

本研究の適用範囲は、工作機械製造の加工セル単体と組立セル単体のスコープに限定している。機械加工セル単体については、Mobile Robot を用いた再構成可能な加工セルにおいてツールスイッチング問題を解いて自動化を図る範囲までを取り扱う。工作機械の組立セル単体については、Mobile Robot を用いた再構成可能な組立セルを構築し、機械一台についての組立プロセスを最適化し、自動化する範囲までを取り扱う。

図1. 13に本研究の適用範囲を示す。横軸が問題空間の広さを表し、縦軸が適用スコープの広さを表している。図に示すように生産システムの適用スコープの範囲は生産セル単体から、複数の生産セル、そして工場全体、さらには工場群にまで及ぶ。扱う問題空間は取り扱う機械設備の台数でや、プロセスシーケンスのフレキシブルさや、ジョブ数であったりする。適用スコープと取り扱う問題空間を拡大すれば、その分だけ最適化の恩恵が増すが、一方で複雑さの増大による生産システムの硬直化による損失コストや、計算コストの増大が発生する。適用範囲の拡大による利点と複雑さ増大の難点の双方のバランスを取りながら現在取り扱える範囲を決めておく必要がある。本研究では、工作機械の機械加工セル単体と組立セル単体の適用スコープの広さと限定し、変数10,000個までを問題空間の広さと制限する。変数10,000個とはジョブ数10、機械3台+Mobile Robot 2台の設備と20本の工具に関するツールスイッチング機能を有する加工セルや、組立工程に制限がある機械一台に関する組立のセルに値する。

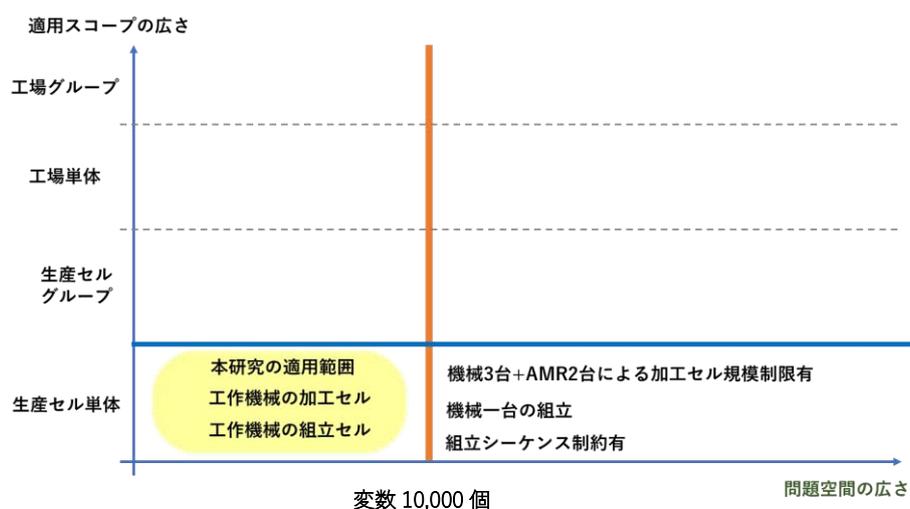


図1. 13 本研究の適用範囲

1. 4 本論文の構成

本論文は全五章で構成される。図1. 14に本論文のフレームワークを示す。図のように本研究の背景と目的を第一章の緒論で述べた。続いて本研究で取り扱う範囲を明確に定義する。さらに、多品種少量の生産システムについて過去の研究動向について調査を行う。特にセル生産方式と再構成可能な生産システムに関する関連動向の調査と分析を行うことで、工作機械の生産システムの現状を把握し、マスカスタマイゼーションを実現するための仮説を整理する。過去の研究結果や現在の多品種少量生産方式を調べることで、問題の本質に迫る。

第二章では、工作機械のマスカスタマイゼーションを実現するために、Mobile Robot の適用による再構成可能な生産システムについて提案を行う。工作機械の組立プロセスでその仕様の多様性によって発生するボトルネック、またそのボトルネックが仕様毎に移動してしまう問題を Mobile Robot の適用した生産システムによって解決する方法を提案する。

第三章では、Mobile Robot の要件定義を行い、Mobile Robot の実装について述べる。また、工作機械の組立には精密組立作業やクレーンによる重量物可搬作業が含まれており、従来これらは人によらなければ実行困難とされてきた。工作機械の組立工程の自動化について Mobile Robot を用いて解決する方法を提案し、実装した内容を述べる。

第四章では、再構成可能な生産システムにおけるスケジューリングについての解決方法を提案する。柔軟性の増した生産システムではその変数の多さから管理可能性が損なわれる。この管理可能性にいての問題解決策について述べる。ハードウェアによって生産システムが柔軟性を獲得したのちに生じる大きな課題がソフトウェアである。これまで再構成可能な生産システムの提案は多数行われてきたが、産業界で実現されなかった要因に、ソフトウェアによる生産システムの管理が複雑になりすぎて、現場が対応できなくなったことが挙げられる。近年では新たなコンピューティングパワーの発展が著しい。その中でも量子アニーリングマシンを用いることで、組合せ最適化問題を解き、柔軟な再構成可能な生産システムのスケジュールを求め、運用する方法について述べる。

最後に第五章で本論文の結論、および今後の課題を述べる。

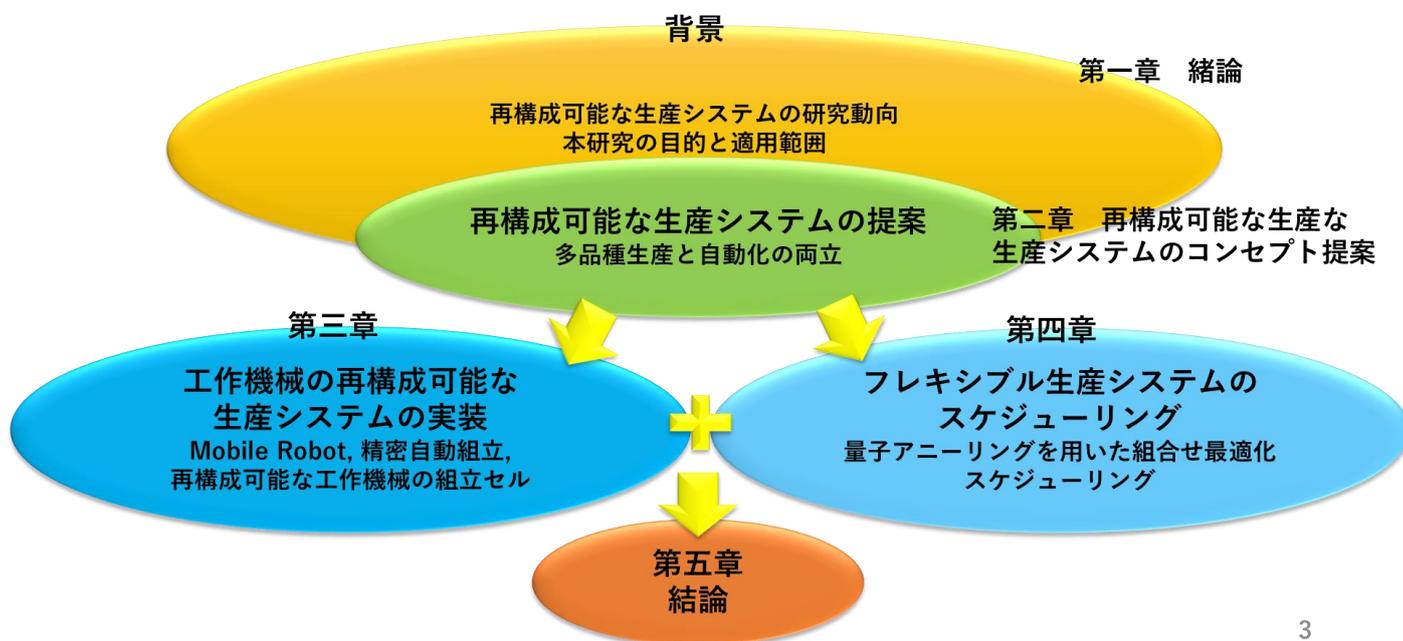


図 1. 14 本論文の構成

第二章 工作機械の再構成可能な生産システムのコンセプト提案

2. 1 多品種少量生産と自動化の両立

工作機械の最終組立におけるマスカスタマイゼーションと自動化の両立は重要な課題である。一般に工作機械の最終組立は、1人または少数の作業者を1つのセルに割り当て、全ての工程をその中で行うセル生産方式を採用している。必要な部品やサブ組立ユニット、そして作業者を揃えれば、後はセル毎に組立の実施を独立に管理できる。この方式により、多種多様な工作機械の最終組立が部分問題に分割でき、また多様な工程への効率的な対応[25]や高度なすり合わせによる高精度組立という熟練作業者の長所を最大限に活かすことができる。しかし、世界的な熟練作業者の減少が進めば、このような作業者に頼った生産システムは持続できない。より少ない人員で、無理なく、多種多様な高品質の工作機械を生産できる柔軟な自動組立システムが望まれる。

マスカスタマイゼーション組立システムの自動化に関して、既に多くの研究や試みが行われている[26][27]。複雑なタスクや条件に応じて変化するタスクに関しては、人が最も効率的で唯一のソリューションであるという指摘もある[28]。工作機械の組立工程の多くは複雑かつ仕様に依って大きく変化するため、その組立システムには一定の熟練作業者が必須である。したがって効率的なマスカスタマイゼーション組立システムでは、単純な繰り返し工程にロボットを、複雑または多様に変化する工程に人を活かす工程設計(Configuration Identification)が求められる。人による付加価値の高い作業をできる限り後ろの工程に遅らせ、共通化により自動化できる工程を出来るかぎり増やす Delayed Differentiation などの設計指針が研究されている[29]。Salonitis によるモジュラー設計が製品の多様性に対応した組立の自動化を可能とするという研究もある[30]。Paralikas らは機械設計のモジュラー性がアセンブリシステムに及ぼす影響を報告している[31]。

これらの研究から学べることは、工作機械のマスカスタマイゼーションの実現には、「多品種少量生産」に対応しながら「自動化」を如何に果たすかについてである。本研究では工作機械の「多品種生産」と「自動化」を両立させるために、新しい生産システムのコンセプトを提案する。多数のワークセルを物理的に分散させる代わりに、少数の Automatic Guided Vehicle (以下 AGV) および少数の Autonomous Mobile Robot (以下 Mobile Robot) を用いて少数の物理的設備から多数の仮想ワークセルを構成する。AGV と従来の自動化設備を組合せて多数の仮想ワークセルを構成し、自動化設備の稼働率を上げて効果的な自動化を実現する。Mobile Robot と仮想ワークセルを組合せて、構成の異なる多数の仮想ワークセルにより多品種生産を実現する。

例として図 2. 1 に横型マシニングセンタの組立ワークフロー図を示す。現在はセル生産方式によって組立作業が行われており、機械ベッドは固定ステーションに据え付けられていて、作業者がステーションを移動しながら作業を進める。図の横軸に示すように、作業にはオペレーション 1 (OP1) からオペレーション 4 (OP 4) までである。作業者は効率的な組立作業を行うために専門作業チームに特化しており、4つのオペレーションに対して4チームが存在している。

製造する工作機械が標準仕様の場合、これらの組立作業時間が均一になるように標準作業工程が設計されており、各組立作業チームは作業が終わると滞ることなく次の作業に移動し効果的な

組立を行えるように工程分散されており，作業負荷バランスがとられている．この組立生産システムからのスループットは作業負荷バランスが均一になることによって最大化されている．



図 2. 1 工作機械標準仕様における生産システムの工程負荷とスループット

ところが，図 2. 2 に示すように，同じ機種であっても異なる仕様の製品が同じ組立生産システムに入ってくると状況が変わってくる．図の例の場合，テーブルが 5 軸仕様となり，工具自動マガジンが大容量仕様になり，さらにパレットマガジン仕様となるとする．この状況では OP3 の負荷が大きくなり，その工程時間が他の工程時間を大幅に上回ることになる．これにより，OP3 以外の作業工程を実行するチームの作業が滞り，組立生産ラインからのスループットが大きく引き下がってしまう．この状況をボトルネックといい，生産システムのスループットはボトルネックの発生によって大きく影響を受けることになる．この状況で無理に作業を進めると仕掛品の山積みが発生する．工作機械のように仕様が製品毎に異なり，しかも仕様が多様である製品の場合，ボトルネックが生産システムの中で常に移動してしまい，生産システムの負荷バランスを均一に保つことは容易ではない．現実には，さらなる不確定要素が積み重なる．必要なモジュールユニットがジャストインタイムで納入されなかったり，部品が欠品したり，必要部品の所在が不明になったり，物流が滞ったり，作業者が急に休暇を取る等が起きたりする．こうなると現場のスケジューリングは混迷を極める．結果的には不測の事態に対応できるよう十分な余裕をみたスケジュールを組まざる得なくなり，これにより生産性が大きく低下して，生産ラインのスループットは常に低い状態に留まることを余儀なくされる．

このようなボトルネックの変動による生産性低下を解消するためには，ボトルネックとなるプロセスにおける生産能力を他のプロセスにおける余剰な生産能力によって補うことが有効である．図 2. 3 では，OP1 および OP4 の生産能力を OP2 および OP3 に移すことで，生産性を平準化することを示している．ボトルネックを補強し，保有する生産リソースを最適に再配置することで，生産システム全体のスループットを最大化することが望まれる．

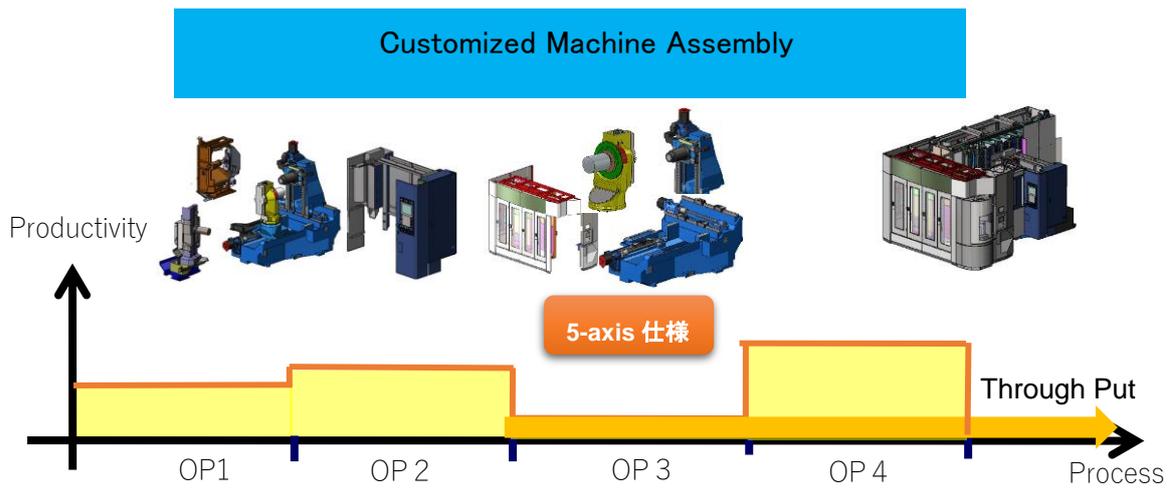


図2.2 多様な仕様における工作機械生産システムのボトルネック

工作機械の生産セルにはボトルネックが発生しやすい。セル生産方式において各セルは非同期に生産活動を行えるのが理想だが、実際には共用リソースを通じて他のセルとの同期を必要とする。希少な技能を有する熟練技術者、セル間で共用するジグや工具などである。特に組立セルにおいて、重量物を運ぶクレーンは一般に必須のリソースである。クレーンは構造上の制約のため工場内への多数の設置は難しいため、多くのセルの間で競合が起きることも少なくない。



図2.3 工作機械の組立生産システムの再構成によるボトルネックの平準化

前述のように工作機械の生産システムには、多様な仕様によるボトルネックの発生に加え、様々なスループット最大化の阻害要因が存在する。その一つの要因が人であり、作業員の人数、熟練度、勤務時間に依存することが大きい。人の能力に頼ったセル生産方式での生産性の向上には限界があるため工作機械の製造において自動化が望まれる。しかし、工作機械の生産セルの自

動化率を上げるのには、工作機械特有の困難さが伴う。その他にも工作機械の組立セルには例外処理が発生しやすい。数万点にもおよぶ部品が一点欠品しても作業が滞る。組立工程において必要なユニットや部品の物流が乱れ滞れば組立作業は止まってしまう。サプライヤーから納められた部品が精度を満たしていないことがあれば、部品が使用できないため組立が滞る。作業者の急用により休暇が取られて作業が滞ることもある。これらの不測の事態に対応するため、現場の管理者は経験によりスケジュールを再構成しようとするが、状況に対応したスケジューリングは極めて複雑であるため迅速に再設定することができない。作業者がどのセルで作業を行えば良いかについて適切な指示が出せず、組立生産システムそのものが停滞し、スループットの低下をまねいてしまう。

工作機械の多様な製品仕様を満たすマスカスタマイゼーションを実現するためには、マスコプロダクションと同等の生産性を持っていなければならない。このため、自動化の適用は不可避であると共に、自動化によって人熟練度に依存したセル生産の状態を回避しなければならない。このために仕様の変化に対応してセル生産の形態が迅速に「変容」し、人に依存する部位が少なく、自律的に再構成する生産セルであることが望ましい。このため、工作機械の再構成可能な生産システムでは自動化を推進するリソースが「変容性」を備えている必要がある。また、生産システムが柔軟になることによる管理可能性が損なわれる問題を同時に解決してなければならない。工作機械の生産システムに特有な例外処理についても迅速に対応が可能でなければならない。管理可能性の実現も自動化の重要な要素である。

工作機械生産のマスカスタマイゼーションの実現には、再構成可能性を備えた生産システムにより迅速に変容することで「多品種少量生産」へ適応し、管理可能性が高く、ユーザの利用負担を抑える自律的な「自動化」により、生産性を引き上げることが必要である。つまり、「多品種少量生産」と「自動化」の両立を図ることが望まれる。

2. 2 Mobile Robot の適用

「多品種少量生産」と「自動化」を両立させた再構成可能な生産システムでは、その自動化リソースが「変容」できなければならないことを述べた。工作機械のセル生産システムを自動化し、多様な仕様に適応するためには、Mobile Robot の適用が有効である。以下に、Mobile Robot の生産システムの適用について述べる。

2. 2. 1 AGV 一体型ロボット Automomus Mobile Robot

現在の生産現場では、様々な産業用多軸ロボットを用いた自動化が行われている。しかし、その多くは同一品を大量に生産するマスマスプロダクション生産における適用であり、マスカスタマイゼーションを指向した生産では柔軟に対応出来る人手に頼っているのが現状である。その大きな要因として、ロボットが固定された単一の仕事しか出来ないことが挙げられる。そこで、ロボットと AGV とを組合せた移動可能な AGV 一体型ロボット Automous Mobile Robot(以下 Mobile Robot)に複数の仕事を実行させる解決法が考えられる。組立生産ラインでは、ロボットを自走可能とすることで、生産リソースであるロボットを生産工程のボトルネックに移動することができる。セルの形態を変容させることで、工程負荷を均一化することが可能になる。また、人に頼っていたセル生産作業を Mobile Robot の適用で自動化することにより、人に起因する例外処理を限定的なものし、生産システムを安定化させることが可能になる。

またロボットについては各 FA メーカーが開発が進められている協働型多関節ロボットを適用することが有効である。協働ロボットは接触を検知するなど、安全柵などで人とロボットの作業領域を分けたり、作業領域を制限したりすることなく、柔軟に作業場所を変えることが出来る。また、加工システムにおいては、1台の工作機械で異なる部品種類で、かつ生産ロット数の異なる加工を担う際、人手による段取りとロボット段取りを生産状況に応じて同一空間上で使い分けることが可能となる。

従来の AGV では、磁気マーカや色テープなど走行ルートを固定しての運用であったが、自律走行が可能な AGV を採用することで、工程変更に対応することが可能となる。AGV の駆動方式においては、全方向に移動が可能であることが重要で、人手の作業を前提とした狭い工場空間への適用や、工作機械へスムーズに、かつ間近にアプローチ出来なければならない。

2. 2. 2 自律再構成する生産セル

再構成可能な生産システムではリソースが「変容性」を備える必要がある。リソースとして Mobile Robot が「自律的な変容性」の実現に有効であることを提案する。工作機械の組立工場に代表されるマスマスカスタマイゼーションに対応する生産は、その仕様の多様さのため自動化の適用が困難なため、マニュアルオペレーションによるセル生産方式で組立作業が運営されており、高い生産性の実現が難しい。

第一の理由として、工作機械の製造には“copying principle”という原理原則を乗り越えることが不可能と理解されており、唯一の解決方法として、人により「摺り合わせ」を行うことで本原理を乗り越えることが出来るとされている。ここで“copying principle”とは、マザーマシンで加工

した部品を組合せることで作られる機械の子供は、マザーマシンの精度を超えることができないという原理をいう。

第二に工作機械は「機械としての道具」という使命を有しており、使う人の使い方に寄り添う優れた道具としての役割を期待される。このため、仕様が多岐に渡り、ユーザ毎のカスタマイズが要求される。従来のマスマプロダクションを実現させる固定化され、繰り返し同じ作業を繰り返す自動生産システムの適用は工作機械の生産システムには適合しない。仮に、マスマプロダクション型の自動化システムを適用した場合、仕様毎に製造工程を変化させなければならず、膨大なコストとリードタイムがかかる。自動化が成立したと仮定しても、工程の負荷が変動し、常にボトルネックが移動してしまい、生産ラインからのスループットが低迷する。常にボトルネックが移動してしまう生産ラインでは、工程負荷をバランスさせ、スループットを最大化させることは困難である。

第三に常に仕様が変わる生産システムでは、各設備のプログラミング、ロボットのティーチングが製造を運営する生産技術者の負荷を増大させ、実際には自動化が進まないという問題がある。

本節では、これらの工作機械製造における問題を解決するために、以下の特徴を有する生産システムの提案を行う。

- ① 人とロボットが協働して生産プロセスを進める協働型生産システム
- ② ダイナミックに移動するボトルネックを追跡して、生産リソースを最適に再配置することで工程間の負荷をバランスさせるフレキシブルな生産システム
- ③ 複雑なプログラミング、ティーチングを必要としない生産システム

これらの提案内容を以降に述べる。

人とロボットが共存して作業を行うには、ロボットは協働型ロボットでなければならない。全作業の自動化は困難であるため、自動生産ラインでは人と機械が相互に作業を協力しながら実行することで、全体のスループットを引き上げる仕組みづくりを行うことが望ましい。

さらに、生産工程の中に人が入った状態で工場全体のスループットを引き上げるには、人による「摺り合わせ作業」を第一シフトに集中させなければならない。さらには人が工場を離れ帰宅した後も自動化により生産システムが稼動する必要がある。人に関する制約条件を考慮した生産スケジューリングが求められる。

また、人が生産工程内に入って作業することを考慮すると、一定のスループットを安定的に実現するため、工程全体が連続的流れを有しており、その流れの速度がスループットとなるように運営されることが望ましい。工程全体で連続的流れを創り出すには、全ての設備が共通したクロックにより管理されており、これらの設備が同期して作業できることが必要である。

2. 3 再構成可能な生産システムのコンセプト提案

2. 3. 1 自律再構成する工作機械の組立生産システムの提案

工作機械のマスカスタマイゼーションを実現するための生産システムとは、「多品種少量生産」と「自動化」を両立させることであることについて前節で述べた。多品種少量に対応した生産システムとは、対象製品の仕様が変化することに適応して「変容」できることである。つまり、要求される種々の対象製品の仕様の変化に対して生産セルが自由に構成リソースを有機的に組合せて、柔軟に対応できる再構成可能な生産システムである。その再構成した生産セルは対象製品の生産に対して最適化されていなければならない。生産システムには多様な仕様の製品が次々と投入されるため、再構成の頻度は高く、迅速に変容できなければならない。仕様の変化に対応可能だけでなく、工作機械生産のもう一つの特徴として必要な生産数量の変化にも迅速に対応できなければならない。増産のときには生産セルが自己増殖するように拡張できなければならないし、減産の時には生産リソースを他の用途への転用出来なければならない。これらの機能を有する再構成可能な生産セルの構築のため、Mobile Robot の適用する。生産リソースに Mobile Robot を用いることで多品種少量生産のための「変容性」と生産セルの「自動化」を同時に推進可能と考える。Mobile Robot により、人に依存していた工作機械の生産システムの自動化を図る。

図 2. 4 に工作機械の組立生産セルにおける Mobile Robot を適用した生産ラインのコンセプトを示す。図の中央に示すように機械ベッドは大型 AGV に搭載され連続的フローラインを構成している。組立対象である機械ベッドの両側面で行う組立作業を行う生産リソースは Mobile Robot により構成されており、機械ベッドの流れと同期している。標準仕様の機械を組上げることが考慮して各工程 (OP1~OP4) はラインバランスがとられている。必要な部品、サブユニットは小型 AGV によってジャストインタイムで組立ステーションに搬送、供給される。

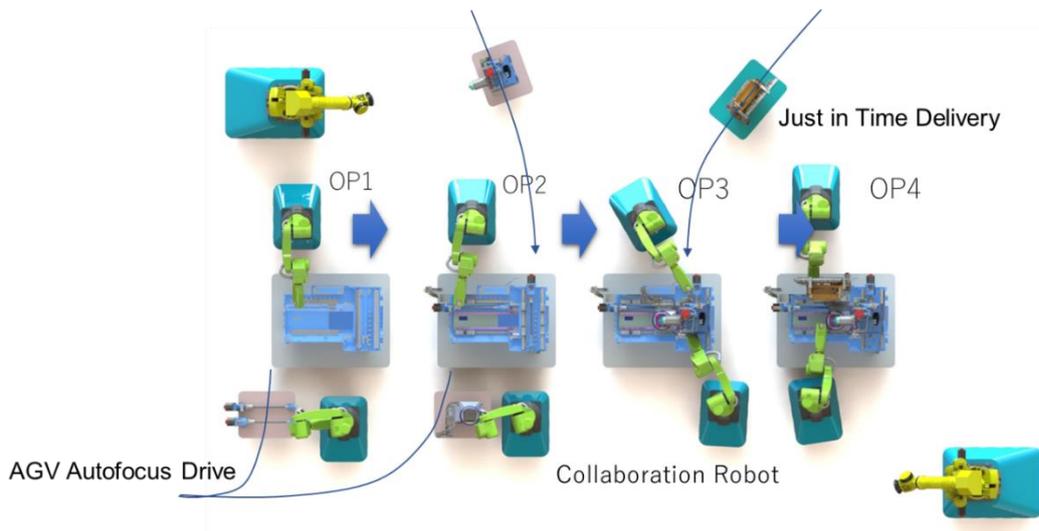


図 2. 4 Mobile Robot を用いた工作機械の組立ライン

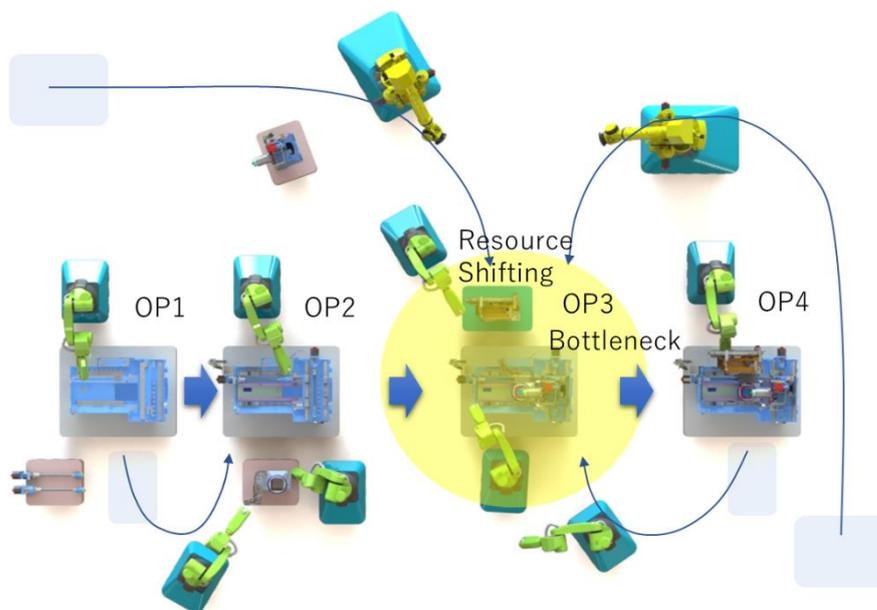


図 2. 5 Mobile Robot のボトルネックへの移動によるラインバランスの均一化

多様な仕様によるオーダーが生産ラインに入力されると、生産ラインの一部の工程における負荷が増し、ボトルネックが発生する。生産ラインのラインバランスをとるために余剰で待機しているリソース、あるいは比較的余裕のある別工程からリソースを移動させ、並行作業可能な仕事を新たに加わった生産リソースに移動、実行させる。この際、Mobile Robot であれば柔軟に、かつ迅速に移動が可能である。同じ Mobile Robot で異なる工程ステーションの異なる作業に即座に切り替えてボトルネックの解消にあたる。

図 2. 5 では多様な仕様のオーダー入力により OP3 の工程負荷が増加し、ボトルネックが発生している状態を示している。図において、先ず余剰で待機させていた Mobile Robot 2 機が OP3 の応援にはいる。次に比較的に工程負荷に余裕のある OP4 から一台 Mobile Robot を移動させて OP3 のボトルネック解消にあたる。始めから OP3 の組立を実行していた Mobile Robot は並行作業可能な内容を OP3 の応援に入った他の Mobile Robot と作業を分けることで OP3 の工程負荷を低減し、生産ライン全体のラインバランスをとる。

本生産ラインの特徴は、Mobile Robot を用いて各生産セルへ生産リソースの補充や削減を行い、全体のラインバランスの最適化を果たしているところである。生産リソースは自らの生産ラインだけでなく、工場全体の生産リソースから全体最適化が図られることが望ましい。ボトルネックを常に追跡して、保有する生産リソースを最適配置してラインバランスをとることで、ライン全体のスループットを最大化させている。結果としてマスマイクプロダクションに劣らぬ高い生産性を実現する生産ラインが構築されている。

これらの全体最適化のスケジューリングが管理可能な状態でリアルタイムに実行されている様子が図に描かれている。

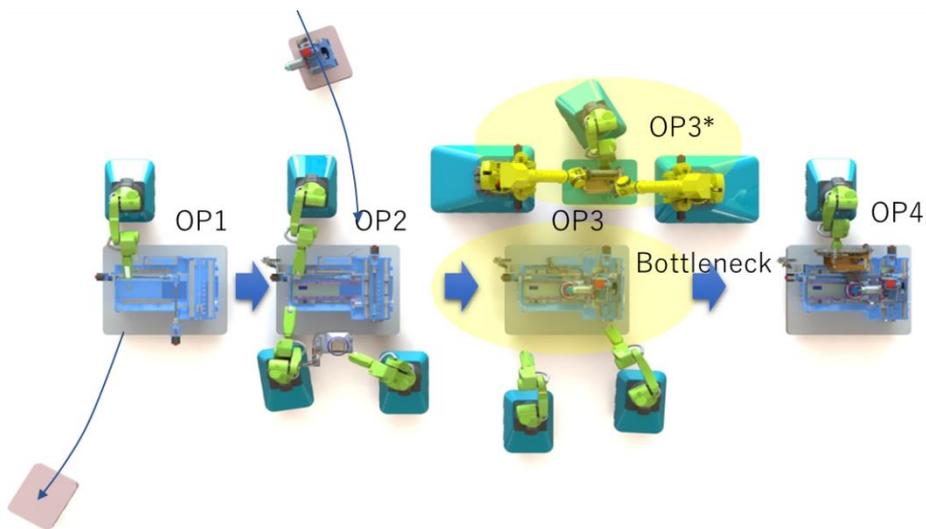


図2. 6 Mobile Robot を用いた並行作業によるボトルネックの解消

図2. 6 に生産リソースの追加だけでは対応できないほど負荷が高い場合の解決方法を示す。図に示すように OP3 の工程を分割して OP3* を創出して並行作業を行う。分割された工程に別のリソースを割り当ててラインバランスをとる。このように変化し移動するボトルネックに対し、工程負荷をモニタリングしながらリソースの最適配置を行い、ラインバランスをとり生産ライン全体のスループットを引き上げる。生産リソースが固定された従来の生産ラインでは、「制約条件の理論」[33]にあるように、ボトルネックに集中して前工程で仕掛品の山積みを造らないように集中する。ボトルネックにおける工程負荷以上には決して生産ラインのスループットを引き上げることはできない。リアルタイムで変化し、移動するボトルネックを追跡して、Mobile Robot を用いてダイナミックにリソースをボトルネックへ移動させ並行作業を実行させることでラインバランスをとりスループットを引き上げることができる。

2. 3. 2 最適化デジタルツインシステムの提案

プロセスの最適化は生産ラインのデジタルツインを用いてシミュレーションを行い、スループットの最大化を理論上で確認する。図2. 7 に仮想空間で組合せ最適化問題を解き、その中で最も優れた工程とリソースの配置の計画を物理空間に適用するデジタルツインシステムの概要を示す。図に示す通り、仮想空間の工場と物理空間の工場のスループットの状態を出来る限り一致させるため、実際の工場で得られたスループットデータをフィードバックし、デジタルツインの数理モデルのパラメータを修正することでシミュレーションの確度を向上させる。

本提案の生産システムでは、膨大な組合せ最適化問題を解いてデジタルツインのシミュレーションをリアルタイムに処理することが求められる。このため高い計算能力を有する計算機の利用が重要となる。組合せ最適化問題は通常 NP 困難問題とよばれており、変数の増加にともないその階乗で爆発的に組合せ数が増大するため、通常の計算機でリアルタイムに解くことは困難である。ダイナミックセル生産方式で実際に運用ができず高い効果が得られなかった理由は、単純に

ハードウェアの機敏性の問題だけでなく、シミュレーションするための計算が何日も必要な状況に陥ることがあったと考えられる。リアルタイムで変化するボトルネックや例外処理に対して管理可能な状態へと持ち込む事ができず、結果的に機敏性を持ってリソースの再配置ができなかったことに要因があると考えられる。Mobile Robot の適用により組立ラインにおける自動化レベルの引き上げが同時に可能となると、次に超柔軟な生産システムの全体最適化スケジューリングを求めなければならない。自律再構成する生産システムのスケジューリングは組合せ最適化問題を解くことにより可能になると考える。

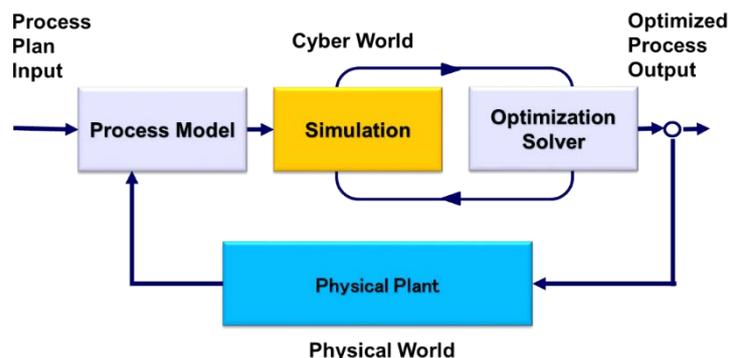


図 2. 7 組合せ最適化ソルバーとシミュレーション機能によるデジタルツインシステム

2. 3. 3 自律再構成する加工システムの提案

ここまで工作機械の自律再構成する組立システムについて述べてきたが、本項では自律再構成する加工システムについて提案を行う。図 2. 8 に自律再構成する加工システムのコンセプトを示す。在来の加工システムの処理工程は固定されていたのに対して、新たに提案する自律再構成する加工システムは図に示される正六角形状の構造を有する自律形の自走式ロボットセル群から構成される。当該加工システムは、モジュラー構成によるシステム形態であることから、変化する要求仕様に基づいて自由にシステムレイアウト全体を再構成可能である。



図 2. 8 自律自走式ロボットセル群で構成される再構成可能な加工システム

提案する自律再構成する加工システムの基本的な要件は、以下に集約される。

- ① 加工セル全体が、自律自走ロボットセル群から構成される。
- ② 各モジュールは基本的に自律自走機能を有する AGV とそれに搭載された加工ロボットから構成され、それらのシステムは図 2.9 に示す階層化されたモジュラー構成によるものとする。加工工程変更に従って、システムを自由に再構成可能とする。
- ③ 需要要求に基づいてモジュール群を追加、削除、交換して、システムを再構成可能である。
- ④ 故障診断の結果に基づき、故障したセルをユニット交換による修復が可能である。

図に示される再構成可能な加工システムは大きく System level, Cell level, Unit level, Element level の 4 つの階層から構成される。System level では大きくハードウェアシステムとソフトウェアシステムに分類されている。ソフトウェアシステム部については後述するとして、ハードウェアシステムについてみていく。ハードウェアシステムの Cell level では Machining cell, Assembly cell, Inspection cell, Transportation cell に分類されている。いずれも Mobile robotics cell により自走が可能なセルで構成されている。工作機械の Assembly cell については、Mobile robot を用いたセルの構成を前述しているので、ここでは加工に関する Machining cell をユニットレベルで分解する。分解すると、Spindle head unit, Laser unit, Table unit, Tool changer unit 等で構成される。ここで Spindle head unit をさらに Element level にまで分解すると、Spindle, Housing, Motor, Bearing 等の要素にたどり着く。このようにシステム全体が 4 つの level に階層化され、Mobile robotics cell 個々のユニットはモジュラーによって構成されている。

図は、自律再構成する加工セルそのものがモジュラリティ構造に基づき構成されていることを示している。この構造こそが“Reconfigurability by Design”であり、モジュラーデザインに基づく再構成可能性な生産システム仕組みである。本概念によって、再構成が実現可能となることが示されている。

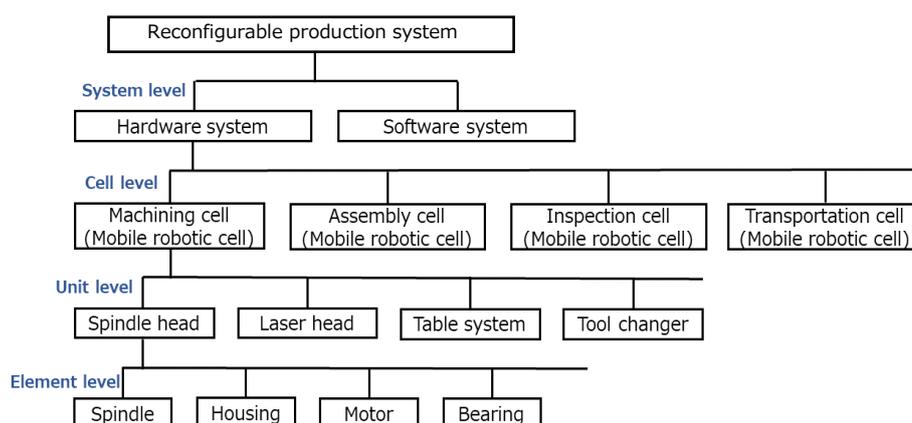


図 2.9 再構成可能な加工セルの階層的モジュラー構造

モジュラーデザイン構造に基づいて、システムを構成する modular robotics cell 群を組合せてシステム全体を構築するには、図2. 10 に示す4つの基本原則、すなわち

- ① 分割の原則
- ② 統一の原則
- ③ 結合の原則
- ④ 適応の原則

を満足する必要がある。図2. 9 の階層方式モジュラー構成の各レベルのモジュールは、図2. 10 の基本原則を満足するようにデザインされる。

「分割の原則」に基づくためには、配置構造、加工能力、寸法の分析を行い、モジュラー構成のために適切な配置構造を考える。そして、柔軟性はあるが過度の性能を持たないモジュールの適切な寸法とし、合理的な形状と寸法に関するモジュールの標準化をおこなう。

「統合の原則」に沿うには、「分割の原則」と同じく、合理的なモジュールの形状と寸法の標準化である。「結合の原則」の充足には、モジュールの接続方法とその剛性の検討、モジュールの組立精度や、モジュールの信頼性について考慮しなければならない。

「適応の原則」にしたがうためには、設計仕様に適合する構成方法や複合荷重条件下での最適構造のサイズを十分に配慮しなければならない。

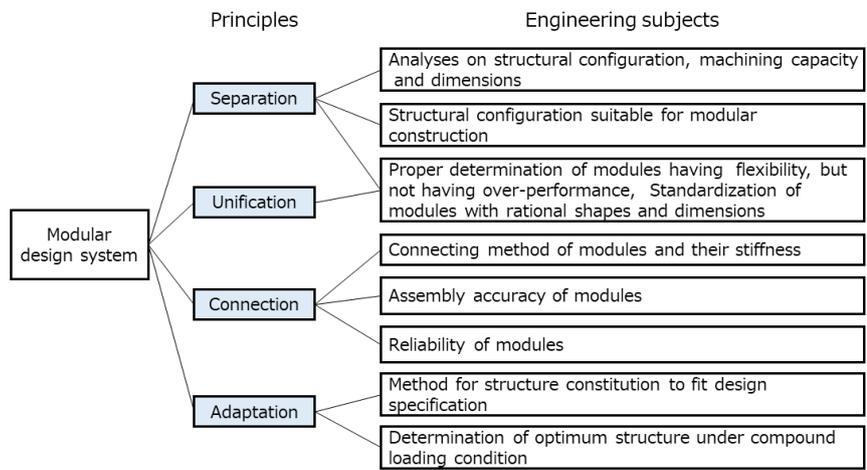


図2. 10 再構成可能な生産システムのモジュラーデザイン基本構造を実現する4つの原則

自律再構成する生産システムの中核構成要素である自律走行式ロボットセルの必要な機能を特定し集約したものを図2. 11 に示す。

- ① ロボットセル同士の連結・分離機能
ハードウェアとソフトウェアの両面の連結・分離機能を有する。

- ② ロボットセルの自走機能
処理要求に従って必要なセルが、必要な時に、必要な場所に移動する機能を有する。
- ③ ロボットセルの運動・協調制御
ロボットセルは単独運転が可能であるだけでなく、処理要求によっては別のロボットセルと協調制御が可能である。
- ④ ロボットセルの情報通信機能
処理要求に従い、必要なロボットセル群が所要の再構成可能生産システム（以下 RMS）を構成し、必要な処理を各セルがそれぞれ分担して行える。
- ⑤ ロボットセルの自己診断機能
ロボットセルはセンサ、サーボ等の情報より自身の予知故障診断が可能で、故障する前にセルの交換を上位システムに伝達できる。
- ⑥ ロボットセルの自動修復機能
RMS を構成するロボットセルが、故障した際には、当該セルを RMS から離脱させ、新たなセルと交換する。

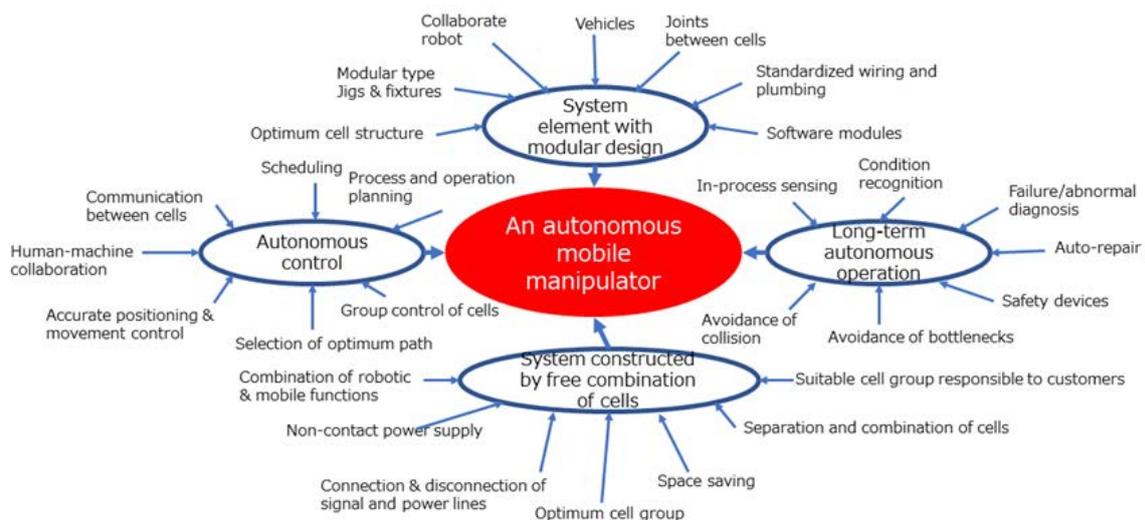


図2. 11 自律自走式ロボットセルの機能

以上の観点から、自律再構成する加工セルの要件である自律自走式モバイルロボットそのものが、モジュラーデザインされていることが望ましい。図2. 12に再構成可能な加工セルに対応する自律自走式モバイルロボットセル（autonomous mobile robotic cell）と、そのセルで構成される再構成可能な加工セルの構造を提案する。図に示す通り、加工セルはスピンドルヘッドモジュール、テーブルモジュール、ATCモジュールから構成されており、各モジュールは正六角形の自律可能な mobile robotic cell の構造を有している。各モジュールは結合と分離のための機械的インターフェイスと電気的インターフェイスを有している。図のスピンドルヘッドモジュールはXYZの直動軸移動を平行キネマティックによって実現されており、平行キネマティック

のドライブにはリニアモータが採用されている。本パラレルキネマティックは XYZ の直動軸並行移動のみを実現しており、パラレルリンク付け根の接合部の構成により本来の 6 自由度は 3 自由度に制限されている。その一方で主軸ヘッドには A 軸と呼ばれるチルト軸を設けてあり、合計 4 自由度となっている。パラレルリンク機構の自由度を制限している理由は、ボールジョイントによる結合を避け、優れた位置決め精度と剛性の両立を図るためである。さらにワークのハンドリング、ATC マガジンモジュールからの工具の受け渡しのため、スピンドルヘッドモジュールの下に 180 度回転ストロークを有する C 軸を備えている。図に示したテーブルモジュールは、B 軸と呼ばれるテーブル回転軸を一軸有しており、420 度の回転ストロークが可能である。双方のモジュールの組合せで全 6 軸構成となっている。これらのモジュールは備え付けられた機械的カップリング、電気的カップリングによりそれぞれが連結して、有機的にラインを構成することが可能である。

図 2. 13 は、上述のモジュールセルが複数結合してラインを構成した様子を示している。対象部品の数量が増加した場合は、工程分散によって加工を実行する加工ラインを構成する。ワークピースがセルの外から提供されると、スピンドルユニットが ATC マガジンからワークピース把持のためのロボットハンドを受け取り、スピンドル先端にそのハンドを装着して、正面から 90 度回転してワークピースをセルの外部から受け取る。次に 90 度戻してワークピースをテーブルモジュール B 軸上のジクにワークを設置する。この後、ハンドを ATC マガジンに戻し、ATC マガジンから工具を受け取り、加工を開始する。

次工程にワークピースを送り出す際は、ATC マガジンからワーク把持用のロボットハンドをスピンドルが受け取り、スピンドル先端に装着して、テーブル上のジクからワークピースをピックアップし、C 軸を 60 度回転させ、隣のモジュールに受け渡す。

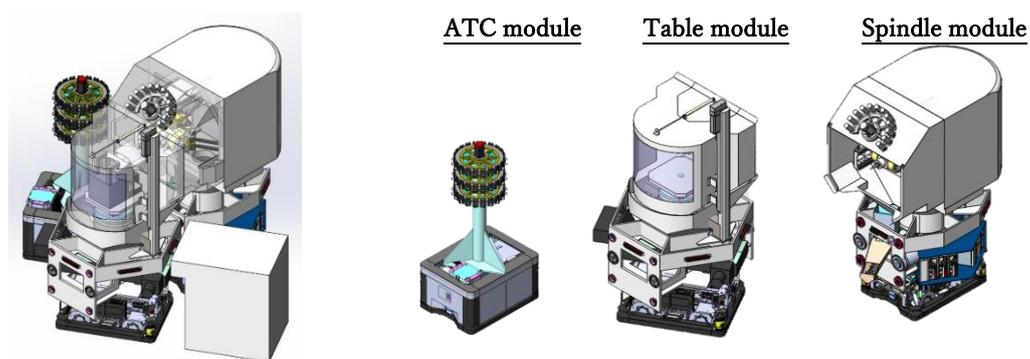


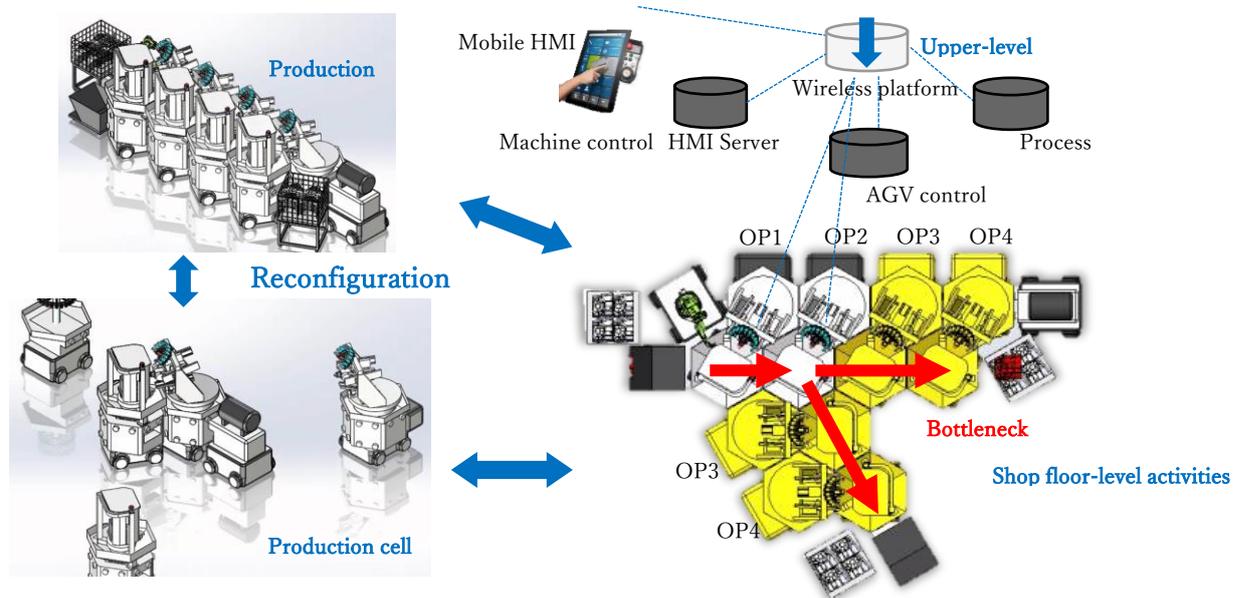
図 2. 12 再構成可能な自律自走式モバイルロボットセルによる加工セル

本再構成可能な加工セルでは加工数量の増減や加工対象の変化による工程負荷の変動に対してもラインバランスに配慮しながら、スループットを引き上げることが可能である。図 2. 13 に示すように加工対象の数量が増加すれば、加工セルから加工ラインへの「変容」ができる。加工対象が変化してある工程の負荷が大きくなりボトルネックが発生すると、モジュールユニットを追加することでボトルネックを解消し、加工ラインからのスループットを最大化させる。図の例

では、OP3 と OP4 にボトルネックが発生したとして、OP3 に分岐を設け、OP3～4 のモジュールユニットを2倍に増やすことでラインバランスをとっている。

加工ラインの OP3 にボトルネックが発生した場合は、OP3 にスピンドルヘッドモジュールを追加してツインスピンドルに変容が可能である。この際にはテーブルモジュールの前側と後ろ側の両面からスピンドルヘッドモジュールを連結させて、一つの加工対象を2つのスピンドルで同時に加工することが可能になる。

また、ボトルネックの解消だけでなく、あるモジュールに故障が生じた場合は、迅速にスペアモジュールとの交換が可能であり、加工システムのダウンタイムを最小化する。これらにより生産システムからのスループットを最大化させる。



機械レイアウトは多様な部品やオーダーのタイプ、プロセスの要求に適応可能

図 2. 13 AGV を搭載した自律再構成する加工システム

従来の生産実行システムは生産要求に基づき既定のタスク群からなる工程を組み、それぞれのタスクに対して既定の制御プログラムを呼び出す。一方、マスカスタマイゼーションに対応するためには、カスタマイゼーションによる初品の要素を含む製品製造情報を分析して、工程案やそれぞれのタスクに対応する制御プログラムを動的に生成する必要がある。自律再構成する生産システムはこれまで述べた仕組みにより超フレキシビリティを実現している。

図 2. 14 に、自律再構成する生産システムに必要なソフトウェア構造を示す。上流からは製品製造情報(Product Manufacturing Information)を含む生産指示を受ける。PMIに含まれる情報を分析して工程案を導出する。下流からはロボットセルから構成される生産セルの情報を受け取る。自律再構成する生産システムでは生産セルの状態がリアルタイムに変容する。これにより工場の

スペースの状態や現在利用可能なセルの数と種類の状態等は常に変動している。これらの情報は常に観察可能であり、情報を上位システムへ提供可能である。

ここで、上位のシステムとは、前項で述べた生産セルのデジタルツインシステムである。デジタルツインシステムへ提供される情報は個々のロボットセルに特有の機能、性能、消耗品の状態、ロボットセルの連結状態などである。このデジタルツインに基づき、ロボットセルのレイアウト案が導出される。上流と下流からそれぞれ得られた複数の工程案とレイアウト案を考慮して実行可能なスケジューリングを行う。

最適なレイアウトプランニングとスケジューリングを求めるために、モジュラーシステムによってできる限り生産システムが簡潔な構造となっていることが前提となる。最適なレイアウトプランはそれらのモジュールの組合せの中から選択する。システムの規模が大きくなればそれだけ複雑性が增大する。その複雑性を管理可能な状態に持ち込むために、ハードウェアはモジュール化が追求されており、かつそれぞれのモジュールは標準化されている。システム全体の生産性の調整は標準モジュールの組合せによって創出される。スケジューリングについての詳細は第四章にて記述するが、スケジューリングについても仮想ワークセル単位のジョブモジュールの組合せを最適化することになる。スケジューリングの複雑性を管理可能な状態とするためには、そのジョブのモジュール化が必要になる。

以上から再構成可能な生産システムを管理可能な状態へとデザインするためには、システム全体のモジュール化と標準化が重要になる。先人による過去の偉大な取組から多くを学び取り、そこに現代の技術を適用して課題の解決にあたり、未来に繋げることを指向しているのが再構成可能な生産システムの本質である。

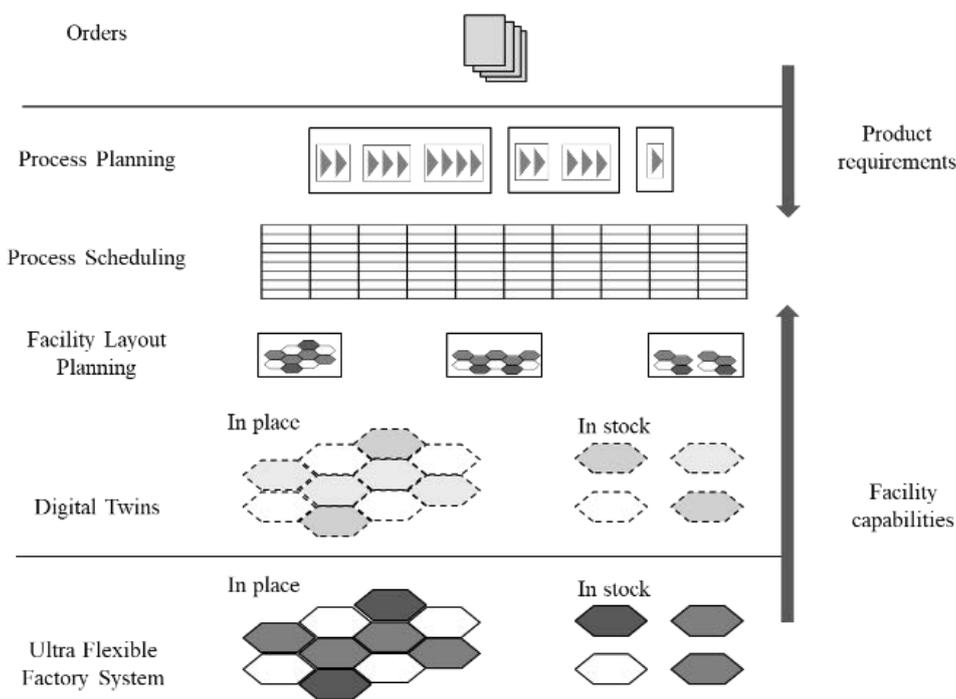


図 2. 14 自律再構成する加工セルの統合ソフトウェアの構成

2. 4 工作機械の再構成可能な生産システムのコンセプト提案 まとめ

本章では工作機械の再構成可能な生産システムの提案を行った。先ず初めに、多様な仕様の対象製品を生産する工作機械の組立セルにおけるボトルネックの発生とダイナミックな移動と変化について述べた。この課題について、Mobile Robot を適用して「変容」する組立セルを実現し、ボトルネックの状態を緩和する解決方法を提案した。この組立セルは結果として再構成可能な生産システムとなっており、自動化を伴いながら、多様に変化する対象製品に組立セルをダイナミックに最適化することで生産システムにおけるスループットを最大化させる方法となることを提案した。ここで課題となっていたのが迅速に「変容」できることであった。過去の研究内容でも、再構成可能な製造システムの提案がされていたが現在に至るまで産業界で実用が進まなかった要因として管理可能性の追求が不足していたことを挙げた。ハードウェアの柔軟性が進化するとソフトウェアの複雑性が増す。これまでの研究内容ではその複雑性を人の創造力に依存するところが大きかった。これに対し本章では“Reconfigurability by Design”という概念を導入し、再構成可能な生産システムの設計段階から管理可能性を追求し、ソフトウェアの複雑性、運用の複雑性が爆発しないようにハードウェアとソフトウェアの双方のモジュラー性と標準化を強化することを提案した。

本章の前半では再構成可能な生産システムの組立セルを提案した。後半では、再構成可能な加工セルの要件について整理して、本要件を満たす加工セルの提案を行った。自律自走式モバイルロボットセル群を用いて、再構成可能な加工セルを構成し、多様な対象製品の変化と生産数量の変化に対応する。迅速に生産システムを「変容」することで最適化を行うシステムの提案を行った。さらに、デジタル技術の重要性を述べ、デジタルツインシステムを提案した。システムに必要なのはユーザが簡便に利用できる自律性である。人の能力に大きく依存した難しいシステムは、人から敬遠されいづれ工場から姿を消した過去の反省に基づき、人に依存しすぎないシステムを構築するために、システムが自律性を有していることが重要であることを述べた。自律性の要素は、状態認識、シミュレーション、組合せ最適化処理等がある。組合せ最適化ソルバーで最適と算出されたスケジュールを、まずデジタルツインのデジタル空間でシミュレーションし、その結果が良さそうであれば、物理空間に適用することを提案した。デジタル空間のシミュレーションと物理空間の実績の差はデジタル空間モデルにフィードバックされ数理モデルにおける変数の調整を行うことを提案した。

第三章では、これらの提案内容について物理的に実装を行い、パイロットラインを構築してその有効性を確認していく。

第三章 工作機械の再構成可能な生産システムの実装

3. 1 Mobile Robot の要件分析

製造会社は製品ライフサイクルの短期化、製品種別の増加、生産量の変動などの市場要求に対応するため、迅速に構成を変えられる「変容性」を有する生産システムを実現しなければならない。前章においてマスカスタマイゼーションを実現するスマートファクトリのための Autonomous Mobile Robot を提案してきた。本章では、Mobile Robot を適用した自律再構成する生産システムのデザインとプロトタイプラインの構築について述べる。

「変容性」を備えた自律再構成する生産システムで、要求を満たす Mobile Robot の要件を整理し、その搬送機構コンセプトを提案してプロトタイプを実装する。その Mobile Robot のコンセプトは、工作機械の RMS 実現に重要な要素であると考えられる。さらに、Mobile Robot のプロトタイプを実際の生産現場に近い環境で評価を行い、その有効性を示す。この Mobile Robot を適用して「変容性」を備えた自律再構成する工作機械の組立生産ラインのパイロットを実装しその有効性を示す。

3. 1. 1 Mobile Robot の要件定義

本節ではスマートファクトリを実現するシステム要素として自律 Mobile Robot を提案している。Mobile Robot の必要要件を以下のように分析し、整理した。図 3. 1 は再構成可能な生産システムを支援する Mobile Robot の要件を挙げたものである。

第一階層の主要要素として AGV 機能、ロボット機能、モーションコントロール、コミュニケーションの大きく 4 つ要素に分類した。Mobile Robot を実現化する無軌道自律制御台車（以下 AGV）部分の要件が第 2 階層に挙げられている。まず、AGV は生産セル内で人と協働作業を行うことになるので安全であることが求められるため、協働型であることが望ましい。次の再構成可能な主要要件はモジュラリティである [30][31][32]。AGV は Mobile Robot の台車部位を構成する。各種の用途における Mobile Robot を構成するためのプラットフォームとなるため、これらの用途への変容を容易に実現するためにモジュラリティを備えていることが望まれる。さらに狭い通路を縫って走行できる機能、他の設備機器と連携した作業ができる機能、センサ機能、場所を選ばず移動できるようバッテリー搭載している機能、また上部に搭載される協働型多関節ロボットへの電力供給を行うプラットフォームとして電動化機能等が挙げられる。

AGV メカニズムとして、狭い通路でも小回りを利かせながら、設備機器の間近まで接近するため Mobile Robot の台車には全方向移動可能な駆動装置が搭載されていることが望ましい。そのひとつの方法がメカナムホイールである。凸凹がある床面でもメカナムホール四輪の接地を確保するためにホイールはアクティブサスペンションで支持されることが望まれる。設備機器の多くは水平出しが行われているため、Mobile Robot もアクティブサスペンションを用いて水平を出せることが望ましい。また搬送用 AGV として用いる際には、パレットや荷台を持ち上げられるシフタ機能が必要となる。

動作をマイクロプログラム化して階層管理することで、できるだけ上位の指令だけでユーザが簡単に Mobile Robot を利用できることが望ましい。

最後にコミュニケーション機能について述べる。Mobile Robot は上位システムからの SLAM 点群マップによる情報伝達や、Mobile Robot 間の協調動作のためのコミュニケーション、数十台から百台規模におよぶ台数の Mobile Robot に対し、遅延のない情報伝達能力と広い工場内で途切れることがない無線ネットワークが必要となる。以上の要件から、ローカル 5G コミュニケーションが必須となる。さらに、自車の絶対位置についての把握が必須であり、ローカル GPS による自車位置認識が可能であることが挙げられる。このため GPS 用の UWB Wireless コミュニケーション機能が搭載されていることが望ましい。また、Mobile Robot は生産ラインで人と協働しなければならないため、Man Machine Interface が重要である。音やメロディによる人に対する接近通告、LED ライトを用いた状態表示、タッチスクリーンによる HMI、自然言語によるボイスコントロール等の人とのコミュニケーション能力が搭載されていることが望ましい。

図 3.2 にこれらの再構成可能な生産システムを支援する Mobile Robot に必要な要件を整理し、まとめた。制御部分とコミュニケーション部分については統合し、自律機能として整理を行った。本研究ではこれらの要件分析に基づき、Mobile Robot を実装し、評価を行ったので次に述べる。

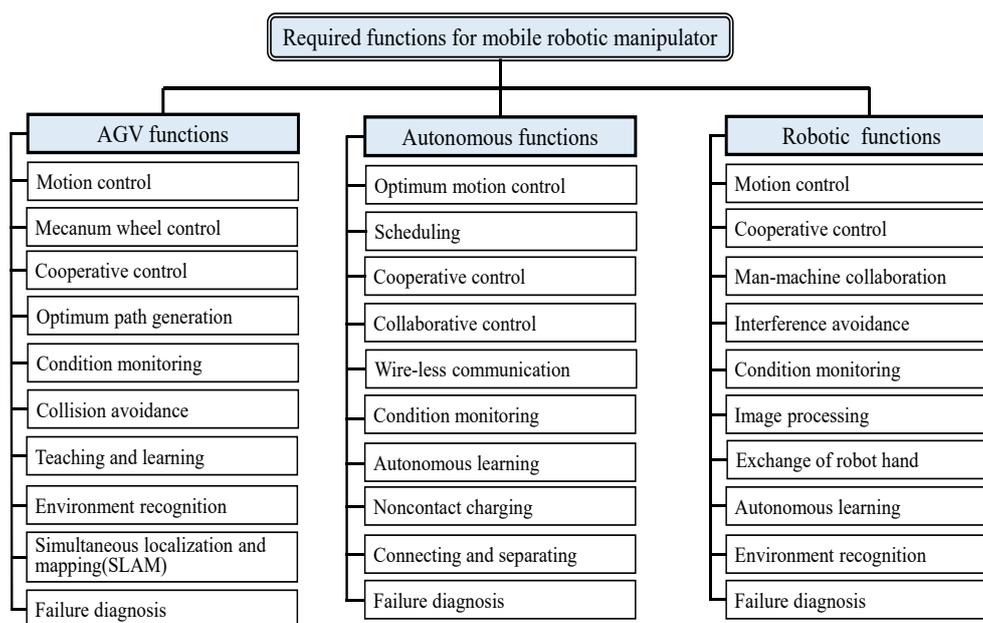


図 3. 2 再構成可能な生産システム用 Mobile Robot の要件まとめ

3. 1. 2 Mobile Robot のメカニカルデザイン

図 3. 3 に Mobile Robot を実現化する AGV のメカニズムを提案する。AGV 部と多関節ロボット部の双方が協働型となっている。狭い通路でも小回りを利かせながら、設備機器へ接近するため Mobile Robot の台車はメカナムホイールを搭載する。干渉を回避しながら目的地までの自律走行を可能とするため、対角隅に 2 機の LiDAR センサを搭載している。動力源はリチウムイオンバッテリーから共有される電力となっており、自動充電インターフェイスを備える。コミュニケ

ーションは設備間ではプライベート 5 G を用い、人との Mobile Robot の間では LED によるライティングパターンとメロディ音を用いる。

図 3. 4 にメカナムホイールを示す。メカナムホイールを搭載することで全方向への移動が可能となり、ステアリング方式と比較して、狭い場所での機動性や位置決め性能に優れる。床面の凹凸や傾斜に対応して全輪を設置させ機体の安定化を図ったり、水準を出したりするため、図に示す全輪独立制御されるアクティブサスペンションの搭載が望ましい。

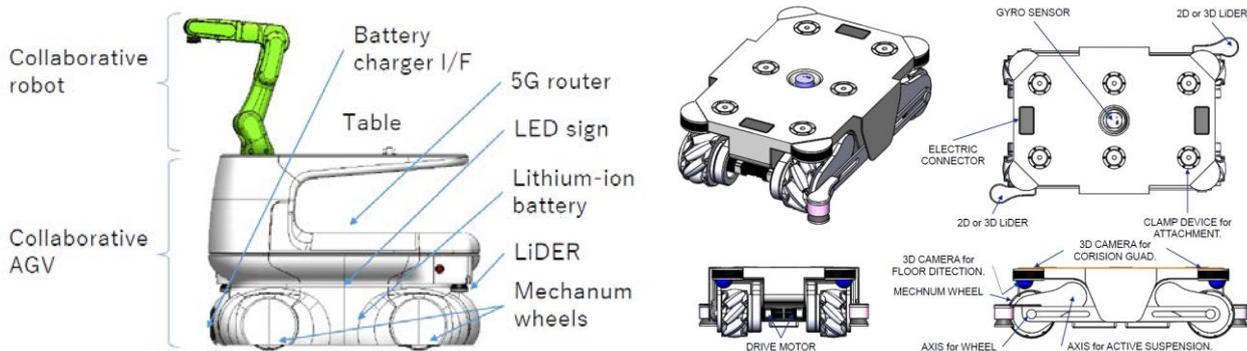
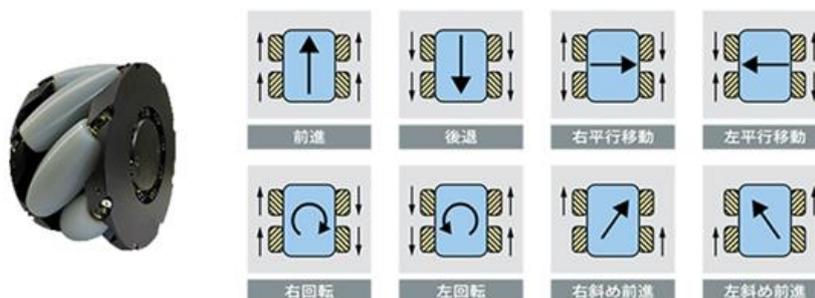


図 3. 3 Mobile Robot のメカナムホイールとアクティブサスペンション



Source: <https://www.makino.co.jp/ja-jp/machine-technology/automation/mobile-robot>

図 3. 4 メカナムホイールによる全方向走行

次にプラットフォームである AGV を用いた Mobile Robot のバリエーションを図 3. 5 に提案する。Mobile Robot はロジスティクス用の物品運搬ロボットと複雑な作業を行う組立ロボットに大別される。運搬ロボットは AGV にリフターを搭載した仕様、コンベアを搭載した仕様、さらには押し引きフックが搭載された仕様がモジュラー構造により構成される、組立作業用ロボットは AGV 台車とアーム型ロボットの組合せからなる仕様と、繊細な作業を行うための AGV に人型双腕ロボットを搭載した仕様に分類される。

AGV 上にアーム型ロボットや双腕ロボットを搭載した Mobile Robot では電力を AGV に搭載されたリチウムイオンバッテリーから供給される。油空圧はポンプやコンプレッサーを AGV 上に搭載しなければならず筐体が大型化してしまうため、アーム先端に搭載されるハンドへの動力供

給は全て電力にて行う。外部コンプレッサーを用いる場合、ホースでフロアに固定された接続口に結合しなければならないため、Mobile Robot の要件を満たすことができない。ハンドへの電力供給は極力ロボット筐体の内部にケーブルを通して行われ、干渉回避の問題解決を容易にする。

AGV 上のテーブルには搬送物を搭載することも可能である。また、ロボットアーム先端に搭載する複数のハンドを搭載するラックを装着することも可能である。これにより目的場所でハンドを交換しながら複雑な複数の作業を継続して実行することが可能である。

また、近年では振り込みリーチの大きな協働型多関節ロボットがロボットメーカーから供給されており、これらのロボットを適用することにより Mobile Robot の作業範囲の拡大が可能である。

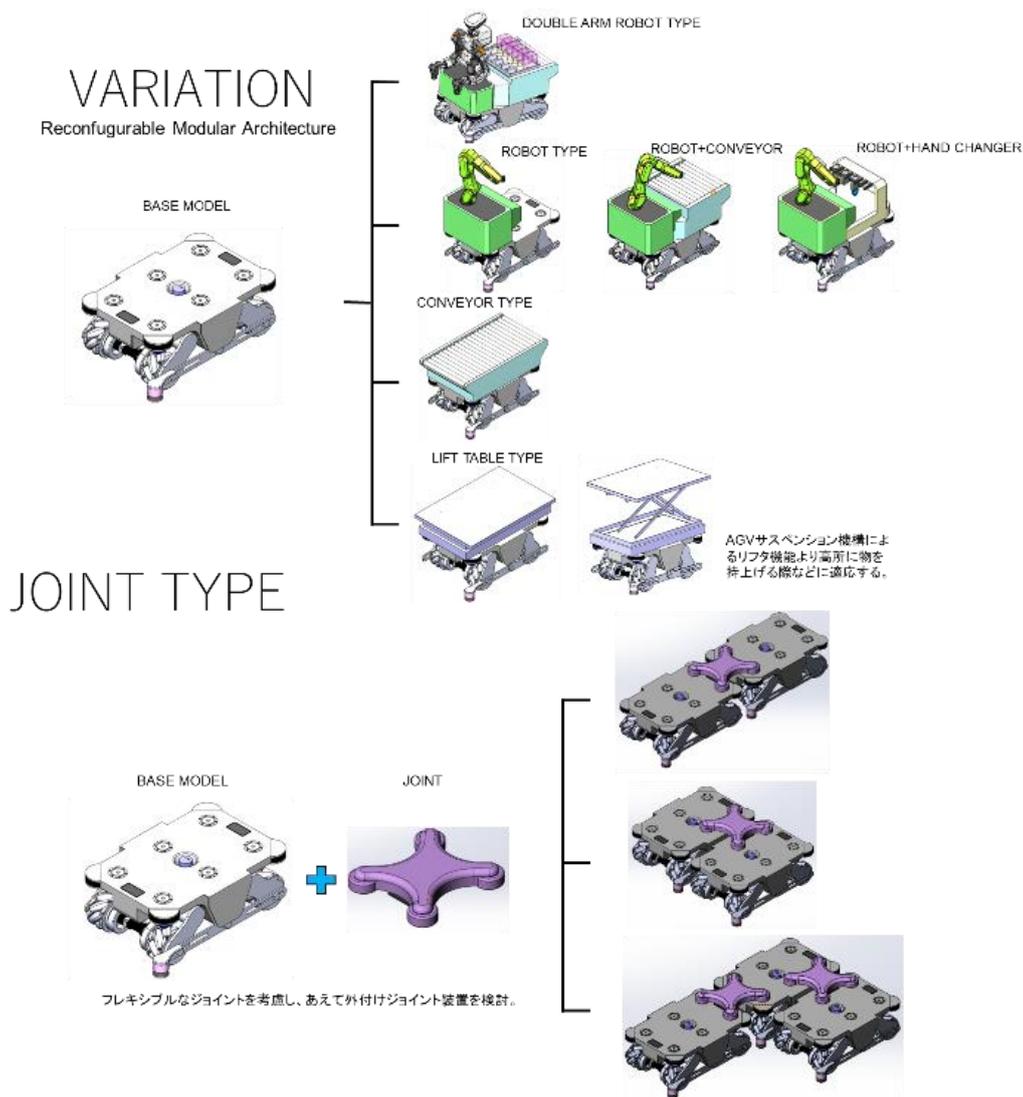


図 3. 5 モジュラーデザインによる Mobile Robot のバリエーション展開

3. 1. 3 Mobile Robot に搭載されるセンサ

工場内を自律的に移動し目的位置に到達させるため AGV には LiDAR センサが両対角に 2 個搭載されている。LiDAR センサが AGV のアクティブサスペンションの動作に影響されないよう、センサ位置が一定となるようにリンク機構上に設置する。

床面の状態は 3D カメラによって進行方向の路面状況を検出し、積極的にアクティブサスペンションを制御するのに用いられる。3D カメラは AGV の 4 隅に搭載される。進行方向に大きな凹凸が存在する場合はルート修正がなされ、凹凸を回避する。

AGV にはレベリングセンサが搭載され、水平レベルの調整を行うことができる。工場内の設備機器の多くは水平レベルがとられており、Mobile Robot 側も水平がとれると相対座標系の構築が 2.5 次元となり容易化される。AVG はアクティブサスペンションを用い、水平レベルセンサの情報に基づきレベルを修正する。AGV にはジャイロセンサが搭載されており、AGV の方向ベクトルが検出できる。ターゲットの設備機器に対し位置決め方向を制御し、マスター AGV と速度、方向ベクトル、位置決め方向を同期させながら作業を実行するために用いられる。AGV のホイール 4 輪は全て個別にサーボモータが搭載されており、サーボモータの回転速度から速度がセンシングできる。また、サーボモータの加減速時におけるトルク値から積載重量の検出が可能とする。

3. 1. 4 Mobile Robot の自律制御

AGV の自動ルート生成は LiDAR センサの情報を基に SLAM を参照しつつおこなうが、経路計画は自律型ロボットが持つべき重要な機能の一つである。安全で衝突の無いルートを構築するにはマップの表現方法に大きく依存すると報告されている [34]。本節では経路計画法に制御対象のダイナミクスに制限が少なく、リアルタイム性が優れた RRT 法を採用する。図 3.6 に LiDAR によって生成された SLAM と RRT 法によって自動経路生成の様子を示す。AGV は、臨機応変な搬送でこそ真価が発揮される。ベルトコンベアやレールで固定された自動搬送システム等、ある程度タスクが固定された搬送手段に対する AGV の利点は、その柔軟さである。そこに至る十分な道幅さえあれば、たとえ新しく与えられたタスクで一回限りのタスクであっても、AGV なら対応できる。また、個々の現場でハードウェアを専有する必要が無いため、工場全体で十分な数の AGV を用意しておけば、必要となったタイミングでタスクを適応的に割り当てることが可能である。

これには様々な状況に対応した自律的制御ソフトウェアが必要である。毎回決められた経路だけを通るだけではなく、目の前に障害物があれば避けなければならないし、優先度の高いタスクが割り込めば現在の作業を中断して向かわなければならない。こういったフレキシブルな搬送のためには経路計画問題を動的に解くソルバーと、高性能なスケジューラが必要となる。

動的な経路計画のためには様々なことを考慮する必要がある。計画した軌跡と現在位置にずれがあれば経路を修正しなければならないし、人や他の AGV のような動的な障害物にも対応しなければならない。また、AGV の多くは数学的には非ホロノミックと呼ばれる拘束を有する系を成しており、単純な 2 次元空間の経路探索アルゴリズムでは上手く解くことができない。例えば、2 輪が独立して動作し差動により旋回する車体でも、ステアリング機構を採用している車体でも、

進行方向に対して真横に移動することはできない。これはつまり、経路探索の際に車体の向きを考慮する必要があるということを示している。これに加え、最大速度、加速度、加減速度、旋回半径など機種ごとの特性を考慮しなければ車体の滑らかな動作を実現することはできない。

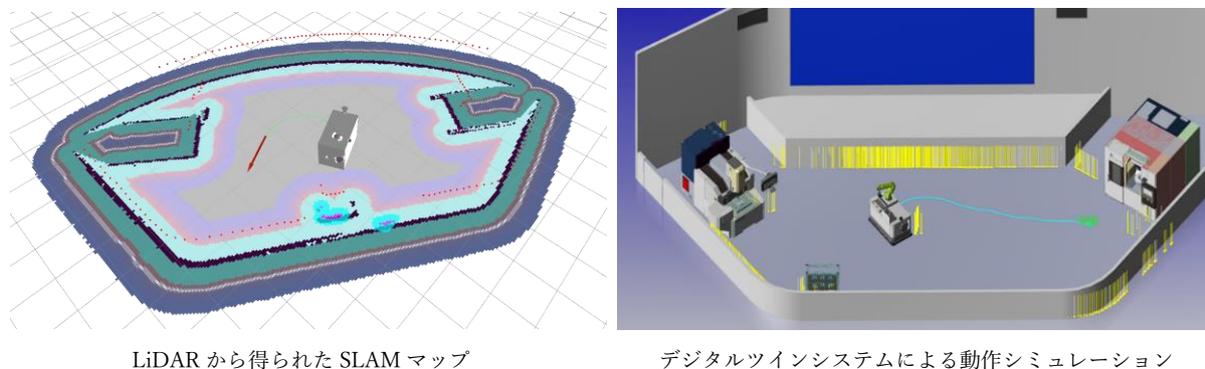


図 3. 6 SLAM と RRT を用いた Mobile Robot の自動経路生成

経路を正しく計画するためには、AGV の現在位置を把握する必要がある。それには様々な方法があるが、例えば車輪のエンコーダと LiDAR を組み合わせる方法がある。車輪のエンコーダから自己位置を推定するだけでは誤差が蓄積してしまうが、LiDAR からのスキャンデータを、予め作成した静的マップと照らしあわせることで誤差の蓄積を防ぐことができる。また、静的マップに含まれる静的な障害物だけでなく動的な障害物についても考慮するため、静的マップと LiDAR からのデータを組合せてコストマップを作成する。コストマップは各点を通るコストを画像データで表現したもので、静的な障害物と動的な障害物の両方を含んでいる。

自己位置推定の結果とコストマップから経路を探索し、結果として得られた経路に従って軌跡追従制御を行うことでモータドライバへの指令へと変換する。本生産システムにおける Mobile Robot は、その動作を人によるティーチングを必要とせず、仮想空間において自律的に計画して、最適な動作を物理空間に適用する仕組みが必要である。

Mobile Robot の移動に関しては、あらかじめ工場内のマップを与えて、マップ情報を基に移動経路を自律的に生成させる。実際の工場では人が作業しており、他の Mobile Robot も稼働しているため、人の安全を確保し、Mobile Robot 同士の衝突を回避する仕組みが必要である。本生産システムでは Mobile Robot がレーザスキャンを行いながら、ダイナミックに変化する工場環境で衝突を回避しながら最適経路を探索する LiDAR 経路探索技術を採用している。

これらのルート探索による自律的移動制御の他に、群制御により複数 AGV の同期制御を行う。例としてマスター AGV に対しスレーブ AGV が指定位置に位置決めを行い、速度、進行方向ベクトル、位置決め方向を同期させることができる。マスター AGV が移動中であっても、スレーブ AGV が同期することにより相対座標系では静止している状況と同等となり、容易に目的作業の実行が可能である。マスター AGV に同期させる群制御により、物品の受け渡しや組立作業の実行が容易となる。

工場内における AGV の位置情報はインドア GPS (UWB) によって自車の絶対位置を検出できる。工場内の壁面上部にはインドア GPS のアンテナが一定間隔で設置されており、AGV 上に搭載された UWB 発信機からの信号を受信し、三角測量によりおおよそ±50 mmの精度で AGV の絶対位置を検出することが可能である。ロボットの作業や物品の受け渡しには位置決め検出精度が不足なため、後述の精密位置決め機能を開発し解決した（目標位置決め精度±5 mm）。

3. 1. 5 Mobile Robot のコミュニケーション

前節の調査から新しいレベルの再構成可能な生産システムの構築に、5つの重要な要素があることを述べた。そのひとつに診断可能性 (Diagnosability) がある。Lucke らの研究 [37]では、"a factory that context-aware assist people and machines"が重要であるとした。本定義における context とは people and machines 以外の生産に必要なものだと考えられる。特に本節では、モノの位置と状態について注目する。これまでも工作機械のワーク素材、ジク、工具等の把握はされていたが、固定されていた。再構成可能な生産システムではモノの位置が時間によって移動してしまうため、工場内におけるモノの位置と状態を把握することが重要になる。そして人の介入を最小限にしながら変容していくには、再構成によって利用されるモノの位置と状態が把握され、必要に応じて人は機械に情報提供や指示を出すことが必要になる。それらのコミュニケーションを支援するインフラが重要になる。

Host Computer-Mobile Robot 間、設備機器-Mobile Robot 間、Mobile Robot-Mobile Robot 間のコミュニケーションはプライベート 5G ネットワークを用いて行う。5G のメリットとして、10GB/s の高速通信、信頼性 99.999%、100 台を超える複数のデバイスへのデータ転送遅延が 1msec 未満である等の新生産システム要件を満たす無線ネットワークであることが挙げられる。

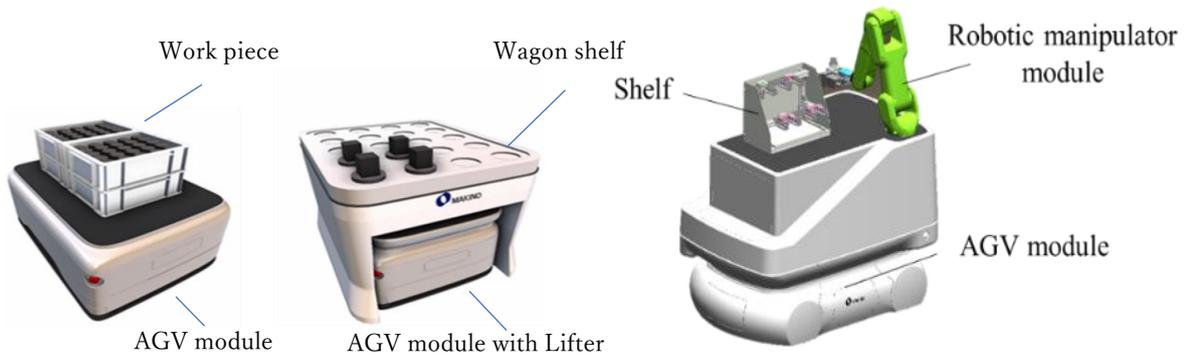
さらに、人と Mobile Robot 間のコミュニケーションには自然言語を理解する Voice Recognition 機能を搭載することで、より人と親密な関係を構築する。人は自然言語により上位の抽象的概念による指令を与えることで、Mobile Robot 群と設備機器等が連携し自律的に生産工程を運営する。

3. 2 Mobile Robot の実装と評価

前述してきた再構成可能な生産システムの要件を満たす Mobile Robot を実装する。この協調型の Mobile Robot は既存の工場の人と同じ環境内を無軌道で動き、搭載するセンサとロボットの働きにより、フレキシブルな生産リソースを実現する。

3. 2. 1 小型 Mobile Robot の実装

前節の要件定義とメカニカルデザインの検討結果に従い「ロボット搭載型」、「ワーク搭載型」、「リフター付き型」の3種類の Mobile Robot を実装した。図3. 7に実装された小型 Mobile Robot を示す。ワーク搭載用 Mobile Robot 表3. 1の仕様に示されているように、機体上面に500kgfの重量ワークを搭載して目的地まで搬送する。リフター搭載 Mobile Robot は固定棚からシフタの上下動によりパレットを引き取り、次の固定棚へパレットを移動させる用途に用いられる。マニピュレータロボット搭載 Mobile Robot はワークピースや工具の交換、組立作業などの複数のタスクを行う人と共存しながら実行する協働型ロボットであり、ロボットアームの先端では表3. 2に示すように14kgfの重量物を可搬することができる。



ワーク搭載用 Mobile Robot リフター付き搬送用 Mobile Robot マニピュレータロボット搭載 Mobile Robot
(搬送用 Mobile Robot 機械仕様 表3. 1 参照) (Manipulator Robot 機械仕様 表3. 2 参照)

図3. 7 実装された Mobile Robot の3つの形態

表3. 1 搬送用 Mobile Robot の機械仕様

| Table 1. Specifications of AGV module | |
|---------------------------------------|------------------------------|
| Max. load weight | 500 kg |
| Driving mode | Autonomous |
| Positioning accuracy | ±30mm |
| Size | L1220 mm × W880 mm × H550 mm |
| Total mass | 475 kg |

表3. 2 Manipulator Robot の機械仕様

| Table 2. Specifications of robotic manipulator module | |
|-------------------------------------------------------|--------------|
| Max. load capacity at wrist | 14 kg |
| Max. reach | 911 mm |
| The number of controlled axes | 6 |
| Repeatability | ±0.01 mm |
| Mass | 55 kg |
| Robot footprint | 296 × 235 mm |

これらの実装された Mobile Robot は現在商品化されており、日本国内の複数ユーザで搬送用途として、また工作機械と工具測定装置やCMM等の他生産設備を連携させる用途で活躍している。図3. 8に商品化された Mobile Robot を示す。図に示すようにロボットのデザインもモジュー

ル化されており，AGV プラットフォーム上に各仕様バリエーションが構築されている． Mobile Robot の商品化もマスカスタマイゼーションへのアプローチとなっている．



ワーク搭載用 Mobile Robot リフター付き搬送用 Mobile Robot マニピレータロボット搭載 Mobile Robot

図 3. 8 商品化された Mobile Robot

3. 2. 2 大型 AGV の構成

工作機械の組立用 RMS を構築するためには，5,000kgf の重量を搭載しても機械の組立てが可能な高剛性な大型 AGV の実現が望まれる．図 3. 8 に実装された大重量の工作機械を搬送する大型 AGV の構成を示す．大きさは 1,900 mm×2,500 mm の車体サイズとなっており，組立現場で作業員との協働作業を容易とするため，台車の高さを 420 mm に抑えた低床設計が施されている．大型メカナムホイールと 4 輪独立大トルクサーボシステムと減速機により，重量搭載時にも機敏な動作を実現した．ステアリングに寄らない方向転換，回転，クランク運転が可能となった．また，長時間運転を可能とする大容量バッテリーを搭載しており，多関節ロボットへの電力供給を可能としている．LiDAR センサ 4 機による SLAM-MAP を自動生成し，RRT 法を用いて障害物を回避する自動経路探索機能を搭載した．また，後述の精密位置決め機能も合わせて搭載した．

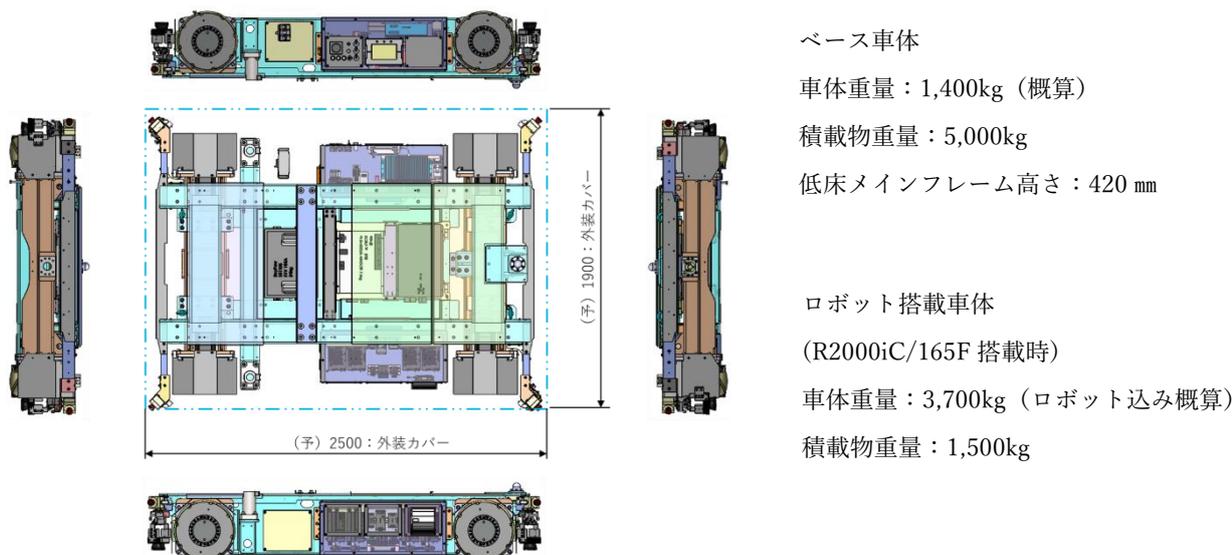
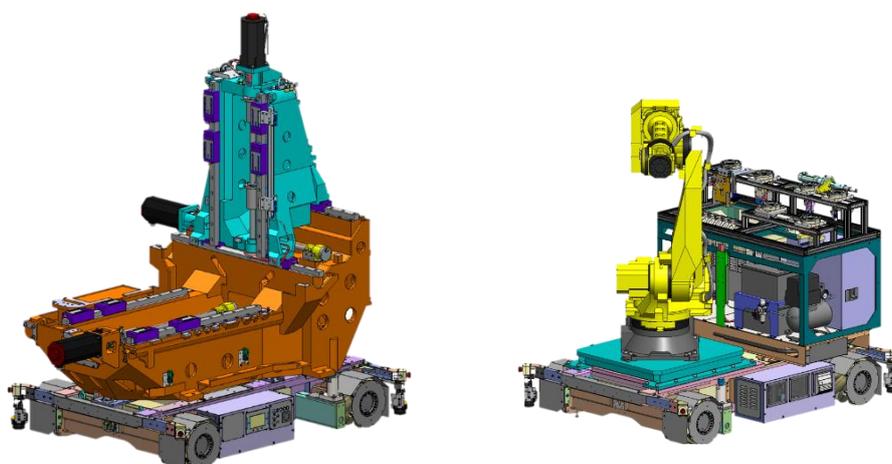


図 3. 8 大重量の工作機械を搬送する大型 AGV

3. 2. 3 大型 Mobile Robot の実装

図3. 9に大型 AGV をプラットフォームに重量ワークの搭載型 Mobile Robot と多関節ロボットを搭載した組立ロボット用の大型 Mobile Robot の構成を示す。多関節ロボットを搭載した仕様では、大型 AGV 上にロボットコントローラと、ロボットハンドの棚を設置しており、複雑な作業であってもロボットハンドを自ら交換しながら作業が進められるように設計された。大型 Mobile Robot においても多関節ロボットには協働型ロボットが採用され、人と同じ場所で協働作業を実行可能とした。図3. 10には大型 Mobile Robot を実際に実装して組立 RMS に適用した事例の写真を示す。搬送用の大型 AGV には 400 mm 角パレットを有する横型マシニングセンタのベッドを搭載して組立ステーションを搬送することを可能にした。大型多関節ロボットを搭載した Mobile Robot はロボットアームの先端で 35kgf の部品を把持できる協働型 Mobile Robot とした。



重量の工作機械を搬送用大型 AGV 大型協働多関節ロボットを搭載した大型 Mobile Robot

図 3. 9 大型 AGV と大型 Mobile Robot の構成



搬送用大型 AGV の実装事例



大型協働多関節ロボットを搭載した大型 Mobile Robot の実装事例

図 3. 10 大型 Mobile Robot の実装事例

3. 2. 4 Mobile Robot の自律制御の実装

AGV の自動経路生成は LiDAR センサからの情報を基に SLAM を用いて干渉物を回避する経路を生成する。図 3. 11 に実装された SLAM と RRT 法による自動経路探索のアルゴリズムを示す。Mobile Robot が目的位置に移動したり、物を運んだりするためには、目的位置に対して自分がエリアマップ上のどこに居るかを正確に知る必要がある。そのための基本技術に SLAM があり、近年、技術開発が盛んな自動運転支援にも、SLAM は不可欠な技術になっている。SLAM を実現するために、LiDAR センサが多く使用される。LiDAR から得た現在の周辺の形状データをエリアマップの形状と比較することにより、現在の自己位置を推定できる。また、事前にエリアマップが与えられない状況ではロボット自身がエリアマップを生成する必要がある。エリアマップは LiDAR から得られる幾何学的な形状データを継ぎ足していくことにより生成していく。それまでに生成したエリアマップを用いて自己位置を推定し、それを基準として新たな形状データを追加してエリアマップの領域を拡げていく。

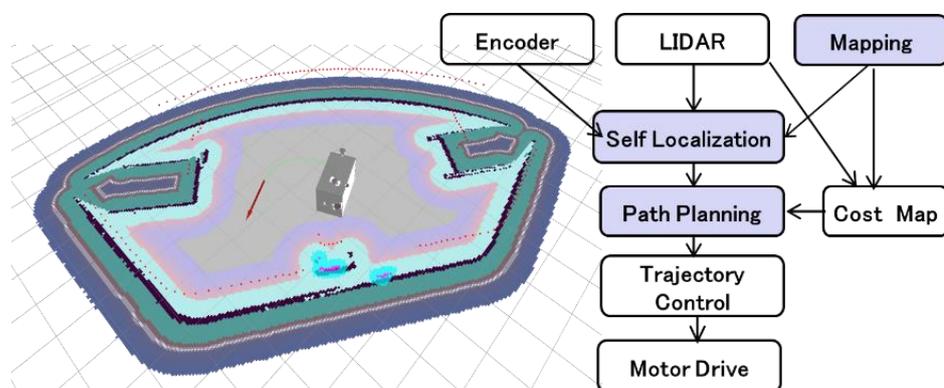
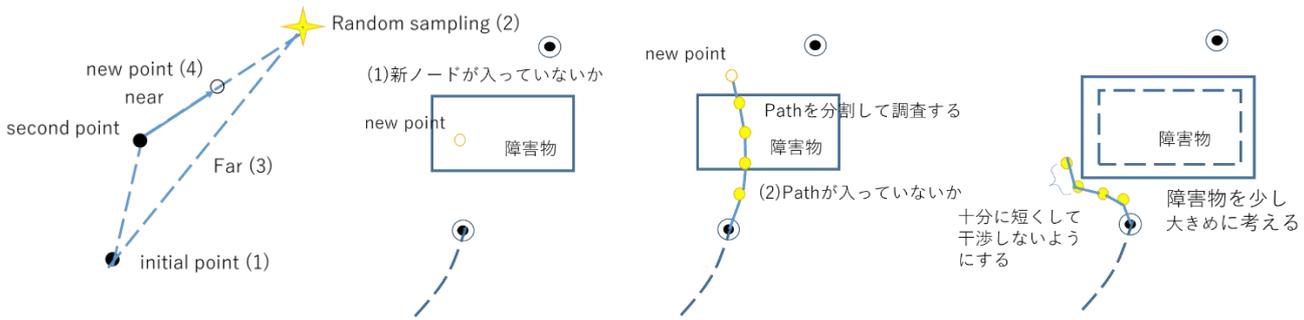


図 3. 11 Encoder, LiDAR, Digital Mapping の組合せによる自己位置認識

経路の探索方法は RRT 法により行う。RRT は経路計画法の一種であり、高速な利点があるので、Global Path に用いられる。ランダムに経路を探索していく方法で、さまざまな拡張手法が提案されており、ロボットのアームの軌道生成や、走行ロボットの軌道計画などにも使用されている。ただし、求めた経路は最適性を有していない。アルゴリズムは以下の通りである。

- ① 初期点を選ぶ
- ② ランダムに点のあるエリアから選ぶ、何回かに一度ゴールを選ぶ。
- ③ その選んだ点に最も近い点を選んで、事前に決めた量でその方向に伸ばす
- ④ 伸ばした点が障害物にあたるようであればその点は採用しない
- ⑤ 目的を達成（ゴール到着）するまで繰り返す



Source: <https://qiita.com/MENDY/items/176cc16c746dc6135ef4>

図 3. 12 RRT による経路探索と障害物回避[35]

RRT は、図 3. 12 のように空間(二次元の場合は x-y 空間) にランダムにサンプリングを実施し、そのサンプリング点に一番近いノードをある一定距離ずつ伸ばしていくことで、パスを探索するアルゴリズムである。ゴールを設定するために、ランダムサンプリングとして何回かに一度ゴールを選択すると、パスがゴールに向かって伸びることになる。

障害物との干渉回避においては、図 3. 12 に示すように new point が障害物の中に入っていないかを調査し、もし障害物の中に入っている場合はその点は採用しない。new point が障害物に入っていない場合でもパスが干渉する場合がありますので、パスを分割して干渉の有無を調査する。

SLAM と RRT によって Mobile Robot の自律的な経路探索と移動制御を実装しその有効性を確認した。図 3. 13 はその実装状態を示した様子であり、Mobile Robot に搭載された LiDAR センサから SLAM を用いて Mapping と自己位置認識をリアルタイムで行い、始点をツールプリセットに設定、マシニングセンタをゴールとして障害物をリアルタイムで干渉回避しながらゴールへたどり着いた状況を示す。

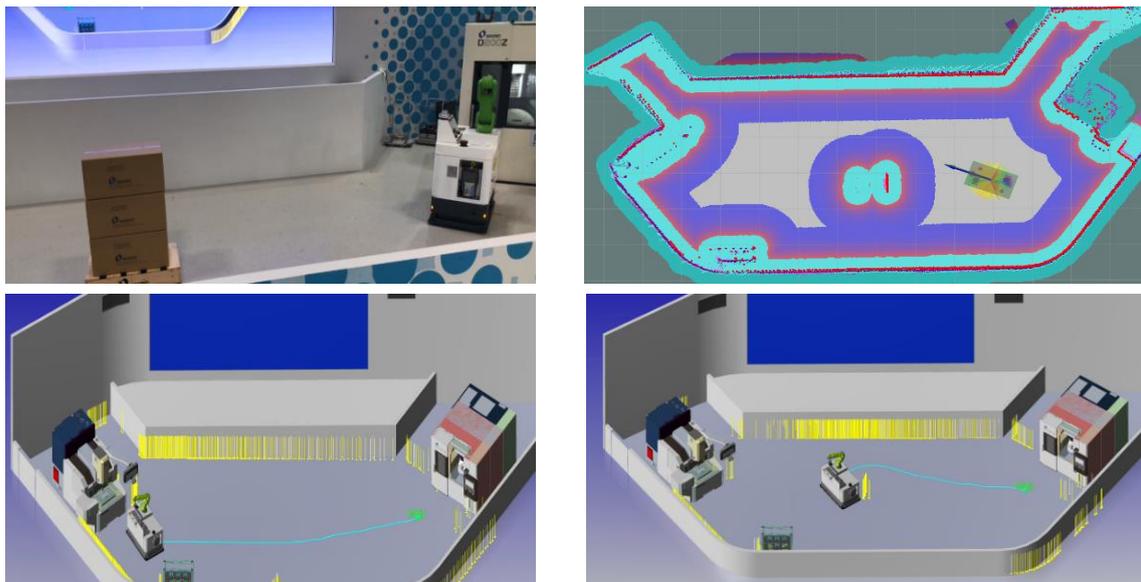


図 3. 13 SLAM と RRT による探索経路と Mobile Robot の移動制御の例

3. 2. 5 Mobile Robot の精密位置決め制御の実装

Mobile Robot の実装において問題となるのが AGV の位置決めである。市販されているいくつかの AGV の評価を行ったが位置決め精度が $\pm 50\text{mm}$ 程度であり、本研究が目標としている工作機械の精密組立や、加工システムへのワークピースや工具の搬入が困難であった。AGVの上には多関節ロボットが搭載されるが、この位置決め誤差のため位置決め後の工程でロボット動作が問題を頻繁に発生させた。設備装置との相対位置認識用のビジョンで座標系の確立に $\pm 50\text{mm}$ の位置決めの際にはばらつきがあるとロボットのアームのストロークが届かない状態に陥る。可動域ぎりぎりまでアームが伸びると関節部分で特異点問題が発生する。また、機械のツールセッティングステーションの棚を引出す等動作の結果、設備装置へのロボットや AGV の接触が多発する。再構成可能な生産システムを支援する Mobile Robot の要件としては AGV 単体で $\pm 5\text{mm}$ 程度の位置決め精度に収める必要がある。

位置決め精度が $\pm 50\text{mm}$ 程度となる要因は、位置推定精度とモータ制御精度の複合的要因が考えられる。まず、位置推定精度は SLAM マップの解像度 (25mm) に依存していると考えられる。しかし、解像度を細かくすると経路生成の処理速度に課題が発生するため、単純にマップのレゾリューションを細かくすれば良いとは言えない。次にモータ制御精度はメカナムホイール内の減速器におけるバックラッシュや位置決め時の減速による惰走、スリップ等が考えられる。

このように位置決め精度の誤差要因は根が深く、従来の Mobile Robot では $\pm 50\text{mm}$ の位置決め精度しか実現できないことが明らかになった。しかし、 $\pm 50\text{mm}$ ではロボットアームのストローク外となり、ワーク搬送の位置ずれを起こし工作機械の組立や加工システムで用いることができない問題が存在していた。SRAM のグリッドベースのマップは広い範囲の可動を可能とするため、グリッドのレゾリューションが粗い状態であった。このため位置決め時に位置決め誤差が大きくなってしまいう課題があった。

(1) 精密搬送システムの統合位置決め制御

モバイルマニピュレータの端点位置決めを高精度に行うためには AGV 部とロボットマニピュレータ部を独立に行うのではなく、一連のプロセスのなかで統合制御を行う必要がある。図 3.14 に提案する搬送システムにおける典型的なプロセスを示す。プロセスは大きく

- ① 事前処理
- ② 搬入搬出処理
- ③ 事後処理

の3つのサブプロセスから構成する。事前処理では、モバイルマニピュレータは操作対象の前に移動して搬入や搬出ができる状態を作る。例えば切削加工機であれば加工室や工具装着ステーションのドアを開ける処理などが含まれる。搬入搬出処理はモバイルマニピュレータの棚から生産装置にワークパレットや工具などのものを搬入する、あるいは逆に生産装置から棚に搬出すると

いう処理を行う。事後処理は、生産装置を元の、稼働できる状態に戻す処理である。加工室や工具交換ステーションのドアを閉じる処理などが含まれる。

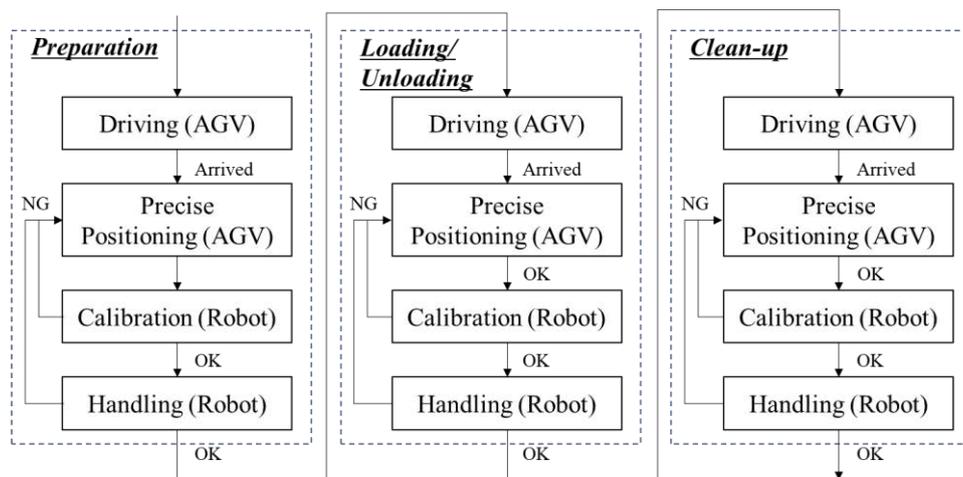


図 3. 14 提案する搬送システムの典型的なプロセス

各サブプロセスは基本的に共通のステップから構成されている。すなわち、

- ① AGV 部の走行
- ② AGV 部の高精度位置決め
- ③ ロボットマニピュレータ部のキャリブレーション
- ④ ロボット部の操作

であるサブプロセス毎にロボットマニピュレータ部が最適な動作をする地点は異なるため、一般には AGV 部の走行が必要になる。例えば、切削加工機のドアを開けるのに適した地点がワークパレットの搬入に適した地点だとは限らないのである。なお、AGV 部の走行に対応するステップはサブプロセスの導入/リンクを行う部分であり、端点位置決め精度、安定性、そして所用時間を改良するためには、その後の 3つのステップの統合制御が重要になる。特にロボットマニピュレータ部のキャリブレーション処理とハンドリング処理が要求する位置決め精度が実現できていない場合に、前工程の AGV 部の高精度位置決め精度の再実行が必要になるためである。それぞれのステップを詳述する。

(2) AGV モジュールの精密位置決め

3ステップの最初のステップが AGV 部の高精度位置決めステップである。本ステップは、後述するように、このステップで高い位置決め精度を実現することにより、後の 2ステップがより安定して実行できるようになるため、非常に重要なステップである。前述したように提案する Mobile Robot は LiDAR センサと SLAM を用いて位置決めマップ生成を行う。このマップデータとして、画像ベースと点群ベースのマップが広く採用されている。画像ベースのマップは移動

可能領域の表現が簡便であるため経路計画には適している。一方で、画像ベースのマップは、マップの解像度は格子の解像度に丸められるため自己位置推定精度並びに位置決め精度が格子の解像度に依存してしまうという問題がある。点群ベースの地図では解像度が丸められることがないため、自己位置推定精度並びに位置決め精度の向上が期待できる。一方、移動可能領域の表現は苦手であり、長距離移動のための経路計画には不適である。

そこで、本問題解決のためのアルゴリズムを図 3. 15 に示す。提案システムで採用する AGV では経路計画のための従来と同様の画像ベースのマップのほかに点群ベースのマップを持ち、目的地までの経路計画及び目的地付近までの移動を画像ベースによるマップで行い、目的地付近で地図及び経路計画手法を画像ベースから点群ベースへ連続的に切り替えることで自己位置推定精度並びに位置決め精度を向上させる。

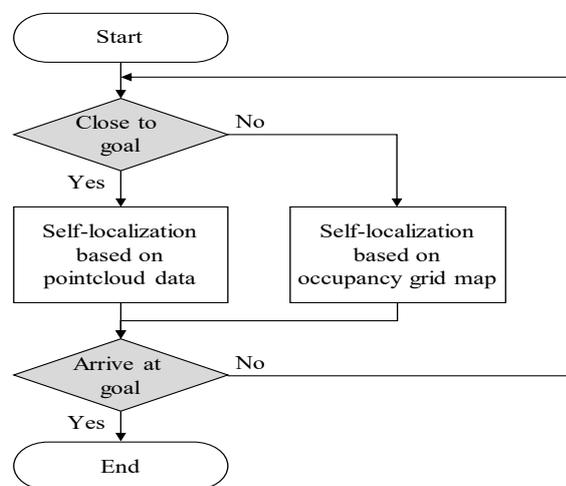


図 3. 15 提案する AGV 精密位置決めアルゴリズム

(3) ロボットマニピレータのビジョンベースの位置決めエラーの修正

AGV の高精度位置決めの後に必要なのがロボットマニピレータ部の位置誤差を補正するステップである。ロボットマニピレータ部は教示などにより作成されたプログラムを実行するが、プログラムを作成した際に前提とした位置と実際の AGV 部の停止位置には常に誤差が存在する。ロボットマニピレータ部が扱う対象が精密な取り扱いを必要とするもの、例えば精密加工用のパレットや工具などを扱うにはこの誤差は大き過ぎるため、ロボットのプログラムに補正が必要になる。

提案システムにおいて calibration ステップに要する時間は非常に安定している。ただし AGV 部の位置決め精度が十分でなく適切にタグの情報が得られない場合には、稼働を停止する代わりに、高精度位置決めステップに戻って再実行を行う。一般にはエンジニアリング上の不備があった場合や作業環境が大きく変更された場合以外には連続稼働することが望ましいため、決められた最大試行回数を超えるまでは calibration が成功するまで再試行を続ける。

(4) ロボットマニピレータのタスクの機構的考察

AGV 部の高精度位置決めとロボットマニピュレータ部の Self-Calibration を経て、端点位置決め精度が確認された状態でロボットマニピュレータ部のプログラムを改めて実行する。特筆すべきなのは、このとき端点の位置決めは一定の精度内に行われるものの、AGV 部が決める原点に合わせて各軸の座標が変わることである。原点が想定から大きく離れる場合には、端点が操作するモノに届かない、特異点を回避できず動作できなくなる、特定の軸が過負荷になり動作できなくなるなど問題発生が考えられる。

(5) モバイルマニピュレータの統合精密位置決め

これまで見てきたようにモバイルマニピュレータがより広いエリアで高精度の位置決めが実現するためには一連の搬送プロセスの各ステップのなかで統合制御を行う必要がある。具体的には後ステップに要求される位置決め精度に応じて、高精度位置決めステップのモードを切り替えることで搬送プロセス全体における安定度や所要時間を改善する。

(6) 工程分析

まず搬送プロセスを構成するメインサブプロセスにおける安定度や所要時間を分析する。前述のように、高精度位置決めステップ後のキャリブレーションステップとハンドリングステップは AGV 部の位置決め精度が十分でないときに失敗しうる。図 3. 16 に示すようにキャリブレーションステップで失敗する確率とハンドリングステップで失敗する確率をそれぞれ p , q とし、高精度位置決めステップ、キャリブレーションステップ、ハンドリングステップに要する時間をそれぞれ A , B , C とする。

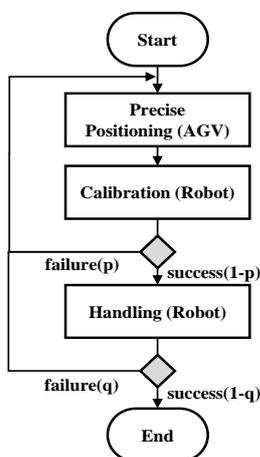


図 3. 16 サブプロセスのフローチャート

A , B , C をそれぞれステップ A , ステップ B , ステップ C の実行に必要な時間とし、 p と q をステップ B とステップ C で失敗してステップ A に戻る確率とする。サブプロセス全体を実行するために必要な時間 T は、次のように計算できる。

$$T = (A+B+C) + p(A+B) + p^2(A+B) + \dots$$

$$\begin{aligned}
& + (1-p)q (A+B+C) + {}_2C_1 p(1-p)q(A+B) + {}_3C_2 p^2(1-p)q (A+B)+\dots \\
& +(1-p)^2q^2(A+B+C)+{}_3C_1 p(1-p)^2q^2 (A+B) + {}_4C_2 p^2(1-p)^2q^2 (A+B)+\dots \\
& + \dots \qquad \qquad \qquad \dots \dots \dots \dots \dots \dots (3. 1)
\end{aligned}$$

上記を整理すると以下の式が得られる.

$$T = \frac{A + B}{(1 - p)(1 - q)} + \frac{C}{(1 - q)} \qquad \dots \dots \dots (3. 2)$$

上記の式から分かるようにサブプロセスはキャリブレーションステップおよびハンドリングステップの失敗確率 p , q に影響を受ける. 特に両方の項に影響を与え, また一般に所要時間が長いと考えられるハンドリングステップにかかる q の影響は大きいと考えられる.

さて, 前述したように精密位置決めステップには複数のモードが定義できる. 点群密度と走行速度の組合せをモードとして定義して使い分けることにより AGV 部の位置決め精度をコントロールできる. ここで選択したモードを m とすると搬送サブプロセスに要する時間の期待値は改めて以下のように表現できる.

$$T = \frac{A(m) + B}{(1 - p(m))(1 - q(m))} + \frac{C}{(1 - q(m))} \qquad \dots \dots \dots (3. 3)$$

高精度なモードを用いるほど A は大きくなる. 点群密度が高くなるため ICP アルゴリズムの計算に要する時間は増え, また走行速度が低くなって最終目的地点に達する時間が増えるためである. 一方で位置決め精度が高まるためキャリブレーションステップやハンドリングステップが失敗する確率 p , q は小さくなる. m と A , p , q の関係を理解した上で最適な m を選択すれば全体の所要時間を削減できる.

(7) 評価と分析

提案システムを用いて実際に協調制御の効果を評価した.

まず通常位置決めと高精度位置決めのそれぞれに関して位置決め精度と所要時間を測定した. 図 3. 17 に実験環境を示す. AGV を目標位置に移動し, 絶対座標の偏差から精度を評価した. システムを初期位置と目標位置の間で交互に 100 回移動し, 必要な測定時間と測位精度を記録した.

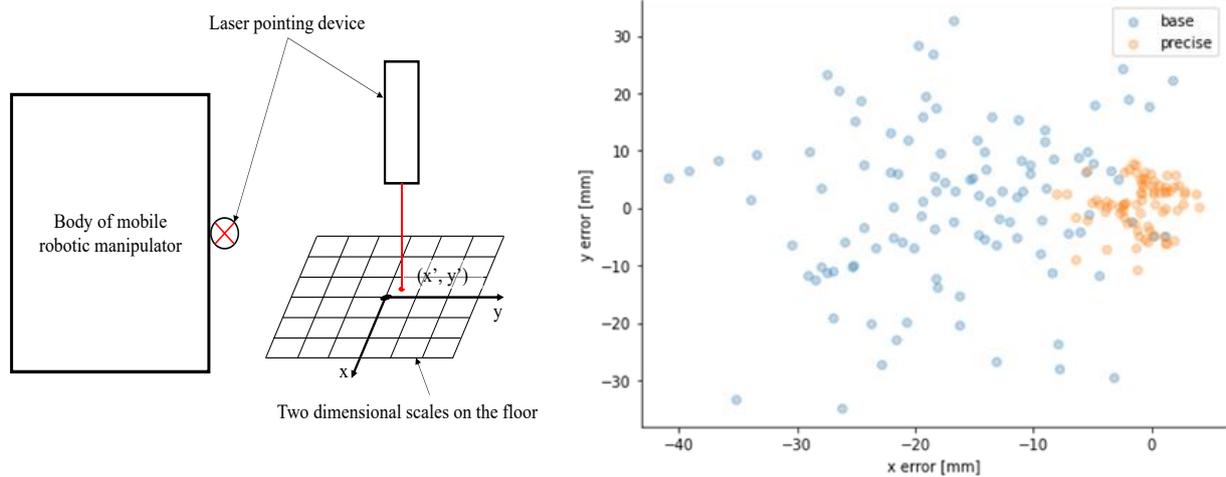


図 3. 17 通常モードと精密位置決めモード位置決め誤差比較

図 3. 17 に基本モードおよび高精度モードでそれぞれ位置決めした場合の誤差の分布を示す。基本モードでの位置決め(x, y)の誤差の平均と標準偏差はそれぞれ(-16.6, 0.6)と(9.4, 13.8)だった。x 方向の誤差平均が大きいのは基準を設定したときの自己位置推定の結果に大きな誤差があったと考えられる。対して高精度モードの位置決め(x, y) の誤差の平均と標準偏差はそれぞれ (-1.0, 0.6) , (2.6, 4.2) だった。LiDAR センサの精度から求められた表 3. 1 の位置決め精度仕様より大幅に高精度な位置決めを実現している。なお基本モードと高精度モードの位置決めに要する時間の平均はそれぞれ 12.2 s, 12.9 s である。今回の実験環境においては高精度位置決めモードを利用して位置決めに要する時間の差は 1 s 未満であった。各モードにおいて、x および y エラーから計算された距離誤差を図 3. 18 に示す。

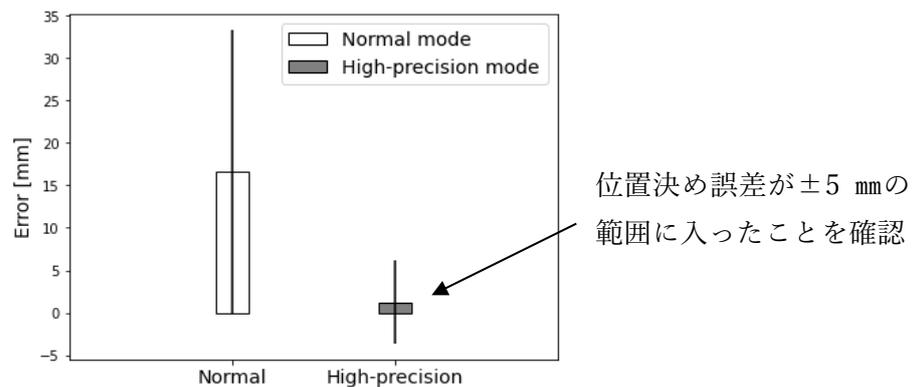


図 3. 18 通常モードと精密位置決めモードの位置決め誤差まとめ

次にビジョンによる位置誤差補正とロボットプログラムの実行を評価した。ビジョンによる位置誤差補正は既定のプログラムを実行して既定の位置にビジョンセンサを向け、撮影と分析を行うだけなので所要時間は一定である。撮影するマーカの位置に依存するがここでは所要時間を 1s とする。Mobile Robot のプログラム実行に必要な時間はプログラム次第で大きく変わりうる。こ

ここでは所要時間 30s, 内部でプログラムの補正を行うので所要時間の標準偏差は 1s とする. さらに通常モードと高精度モードによって前述したように位置決め誤差が変わり, ビジョンベースの位置誤差補正と Mobile Robot のプログラム実行の失敗確率が変動する. 実測とこれまでの経験に基づいて定めた, 各ステップの所要時間と失敗確率を表 3. 3 にまとめた.

表 3. 3 ロボットマニピレータの通常モードと精密位置決めモード
各ステップ所要時間と失敗確率の比較

| Step | | Normal mode | High-precision mode |
|------|---------------------|-------------|---------------------|
| A | <i>Mean</i> [s] | 12.2 | 12.9 |
| | <i>Std.</i> [s] | 1.3 | 1.1 |
| B | <i>Mean</i> [s] | 1.0 | 1.0 |
| | <i>Std.</i> [s] | 0.0 | 0.0 |
| | <i>Failure rate</i> | 0.2 | 0.0 |
| C | <i>Mean</i> [s] | 30. | 30. |
| | <i>Std.</i> [s] | 1.0 | 1.0 |
| | <i>Failure rate</i> | 0.1 | 0.01 |

3つのステップからなるサブプロセスのシミュレーションを実装し, 必要な時間を評価したシミュレーションのパラメータには表 3. 1 にまとめられた値を用いた. 標準モードと高精度モードを用いた場合のサブプロセス実行を 1,000,000 回ずつ試行し, 図 3. 19 に所要時間のヒストグラムとしてまとめた.

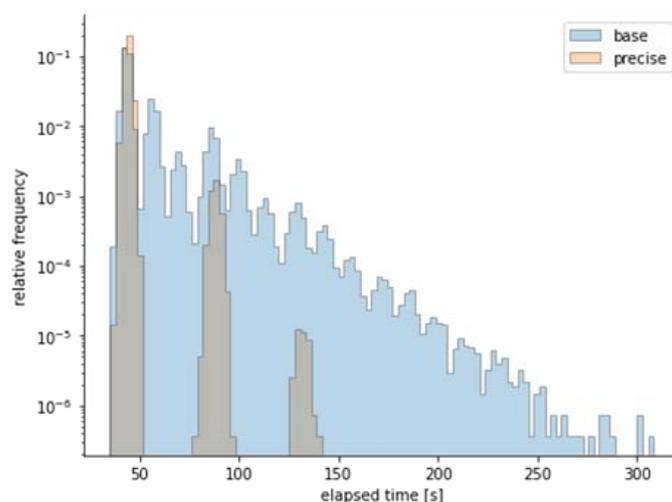


図 3. 19 通常モードと精密位置決めモードの所要時間シミュレーション

得られたヒストグラムには数式(3.1)で示した再帰的構造の特徴がよく表れている。途中のステップで失敗した際には、最初のステップに戻って再実行がかかるためである。高精度モードの場合は、ビジョンベースの位置誤差補正では失敗せず、ロボットのプログラム実行でしか失敗しないため単純な繰り返しパターンが発生している。一方、通常モードの場合は2つのステップで失敗しうるためより複雑な繰り返しパターンが発生している。シミュレーションから求めた基本モードと高精度モードのサブプロセス完了までの所要時間の期待値はそれぞれ51.7sと44.4sだった。数式(3.3)と表3.1のパラメータから計算した結果がそれぞれ48.2sと44.1sでほぼシミュレータの結果と一致した。AGV部とrobotic manipulator部を協調的に制御することで搬送プロセス全体を最適化し、搬送に要する時間の期待値を削減できることを示した。さらに、搬送に要する時間の標準偏差も大きく削減し、搬送プロセスの予測性を高めた。複雑な搬送プロセスを事前準備サブプロセス、搬入/搬出サブプロセス、事後整理サブプロセスに分割し、さらに各サブプロセスを移動ステップ、高精度位置決めステップ、ビジョン補正ステップ、マニピュレーションステップの各ステップに分割できることを示した。

これらのプログラムの組合せにより複雑な搬送プロセスを信頼性とメンテナンス性の高いシステムとして実装できることを示した。評価結果により、協働ロボットとAGVの両方の統合協調制御により、長距離移動でも高精度かつ迅速な応答が得られる位置能力が確認された。

3. 2. 6 階層的タスクプログラミングの実装

再構成可能な生産システムにおいてモジュール性 (Modularity) と統合性 (Integrability) は一般に不可分であり、モジュール化が行えることとそれらを統合したシステム化は同時に議論されなければならない。またモジュール性 (Modularity) にはハードウェア、ソフトウェアがある。

近年、モバイルロボティクスの進歩により少なくともハードウェア的なモジュール性 (Modularity) とその統合性 (Integrability) は大きく前進した。Kuka や Makino の開発したロボットアーム搭載型の Mobile Robot は、生産設備の間を移動し、生産に必要な様々なもの、例えばワークパレット、工具、電極などを搬送できる。これにより従来の FMS では不可能だったより柔軟な搬送能力を、より広域の、より多様な生産設備の間に提供できるようになり、より柔軟な工程設計が可能になった。

一方で、ソフトウェア的なモジュール性 (Modularity) および統合性 (Integrability) にはまだ多くの課題がある。

① 他の生産設備間の連結

多くの生産設備はそれぞれプロプライエタリなソフトウェアによって制御される。

これらを統合して1つの生産システムとして制御するためには多くの労力を要する。

② 統合されたプロセスプランニング

ハードウェア的なモジュール性 (Modularity) とその統合性 (Integrability) により可能になった新しい構成を活用するためには、それを考慮したプロセスプランニングが必要である。

利用可能な構成数が増えることによりプロセスプランニングにはこれまで以上に多くの労力を必要とする。

③ 各生産設備のタスクスケジューリング

プロセスを構成するタスクを実際の生産設備に割り当てるスケジューリングが必要である。より多くの潜在的に利用可能なプロセスのタスクを、数多くの生産設備の機能や性能を考慮して割り当てるには多くの労力が必要である。ソフトウェア的なモジュール性 (Modularity) や統合性 (Integrability) の課題により、Mobile Robot 導入後の生産システムにおいても十分に Reconfiguration Time, Reconfiguration Cost, Ramp-up Time が削減できていない。本項では3つ目のタスクプログラミングの課題に取り組む。

これまででも Mobile Robot の適用例は実在したが、工場現場で実用に耐えられなかった。その要因として、運用の複雑さがある。ロボットプログラミングの複雑さ、ロボットティーチング作業の膨大さによるところが大きい。本システムでは図 3. 20 に示すように、あらかじめ用意されたマイクロプログラムを階層的に組合せることで高度な作業プログラムとなるようにした。工場の生産技術者は上位の抽象的概念による指令を用いて比較的容易にシステムに運営指示を行う。

本節では、生産設備の制御ソフトウェア間のモジュール性を高め、より迅速な再構成を可能とする階層タスクプログラミングを提案する。階層タスクプログラミングでは、プロセスを構成する各タスクを2つの階層で表現する。上位タスクではスケジューリングに必要な機能や情報のみを管理する。例えば、実行可能に必要な生産設備のリストなど、実行した場合の実行時間の目安などである。下位タスクではタスクが実際の生産設備に割り当てられた後に必要な情報を管理する。例えば、プロプラエタリな制御ソフトウェア、実行時間を決定するためのシミュレーション機能などである。階層タスクプログラミングにより、全体として一貫したプロセスプランニングやスケジューリングを可能とし、個別の生産機械としてはその特徴を活かした制御の作り込みを可能にする。

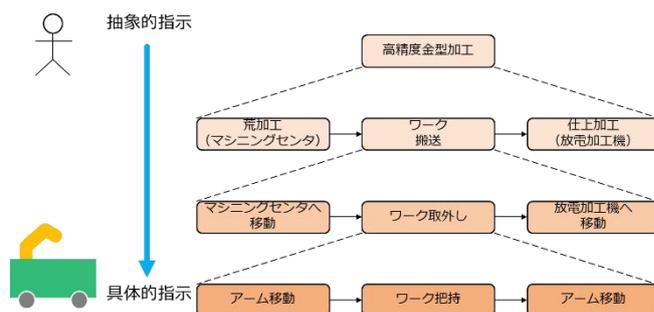


図 3. 20 階層的タスクプログラミング

本研究では開発した Mobile Robot を配備した生産システムに対して階層的タスクプログラミングを適用して、その評価を行った。生産システムの構成を図 3. 21 に示す。4つの生産設備、すなわち5軸マシニングセンタ、型彫り EDM 2台、3次元測定装置 CMM、パレットを保管する棚、そして Mobile Robot から構成される。パレットにはワークまたは電極が固定されている。

図 3. 21 は階層的タスクプログラミングの適用例で、2017 年の欧州国際機械展示会のデモブース様子を示している。従来は 1, 5 ヶ月の据付期間が必要であったデモのセットアップを 1 週間の期間で実現することで、運用の容易さ実現が有効であることを確認した。

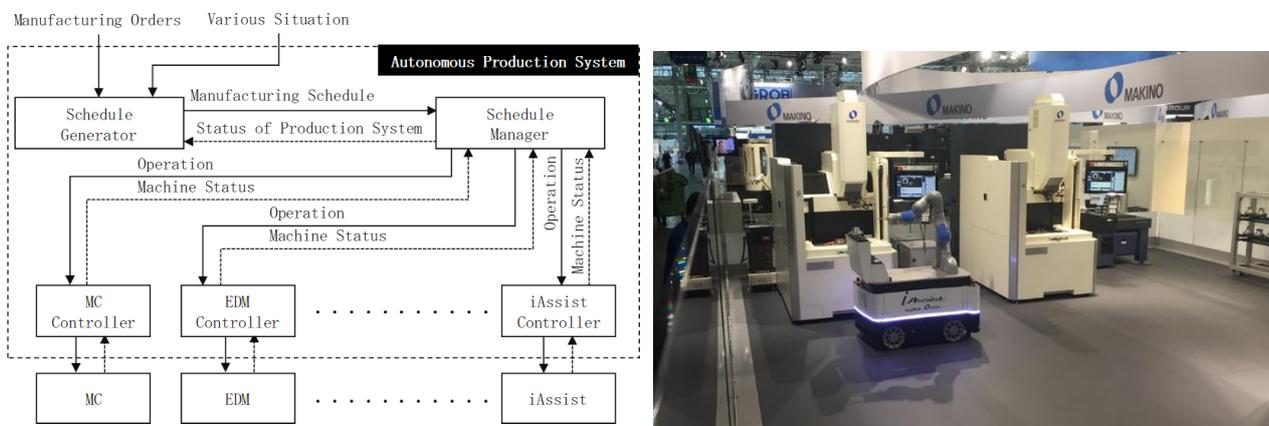


図 3. 21 階層的タスクプログラミングを適用した生産システムの事例

ソフトウェアのモジュール性 (Modularity) と統合性 (Integrability) に向けた課題に総合的に取り組む必要があることを述べたが、生産設備のプログラミングをどう効果的に行うかは非常に重要な課題である。一般に生産設備に対しては、ベンダや設備タイプに依存するプロプライエタリなソフトウェアを用いたプログラミングが求められている。工作機械に対しては CAM とポストを用いたある程度汎用的な仕組みが構築されているが、機械のポテンシャルを引き出すには至っていない。今後は、機械のポテンシャルを引き出す、例えば 5 軸マシニングセンタの軸構成を考慮した NC プログラムを生成する仕組みなどが求められる。

また、ロボットのプログラミングには依然として多くのティーチング作業が求められている。結果として、Reconfigurable Time and Cost を引き上げてしまっている。ティーチングを出来る限り減らし、この労力を下げる研究開発が不可欠である。

さらにはプロセスプランニングへの取り組みも重要である。ハードウェアのモジュール性 (Modularity) と統合性 (Integrability) の向上により、1 つの加工を実現する潜在的なプロセスのパターンが膨大になる。これらのパターンをできるだけ多くカバーするプロセスプランニング必要である。また、プロセスプランニングとスケジューリングは再構成可能な生産設備において不可分な問題である。同様に診断可能性 (Diagnosability) にも取り組む必要がある。

生産設備や Mobile Robot には一定の冗長性を持たせるとともに、稼働上の例外的な状態を把握して生産システムから切り離すための仕組みが必要である。従来の固定型のロボットに加えて、より可動部が多く、また床や壁などの外部環境の影響を受ける Mobile Robot にはさらに踏み込んだ診断機能が必要になると考えられる。

3. 2. 7 コミュニケーションネットワークの実装

図 3. 22 に本研究で工場内に実装された情報ネットワークを示す。プライベート 5G とクラウドシステムの統合ネットワークになっており、図の写真にあるように工場の天井には 5G コミュニケーションのローカルアンテナが 17 か所設置され、情報伝達はすべてワイヤレス通信によって行われる。AGV, Mobile Robot への SLAM の点群マップに代表されるような大容量データの情報伝達はプライベート 5G を用いて行われる。5G コミュニケーションの上位はクラウドシステムとなっておりホストコンピューティングはクラウドシステムを用いて行われ、各 Mobile Robot, AGV に 5G コミュニケーションを用いて伝達される。Mobile Robot 間の情報の連絡、連携は全て 5G を用いて行われるため、大容量のデータであっても高速に伝達され、かつ各 Mobile Robot 間でのデータ遅延がほとんど発生しない。ワイヤレス通信では WiFi が用いられるのが一般的だが、WiFi では広範囲における通信がひとつのアンテナでは困難で、通信が移動途中で途切れてしまう問題があった。5G コミュニケーションでは一つのアンテナで工場中をカバーすることができるため、広範囲を移動する Mobile Robot でも途中で通信が途切れることがなく、安定した運用が可能となった。



生産工場の天井 17 か所に設置された 5G アンテナ

図 3. 22 実配備された工場内のプライベート 5G ネットワークとクラウドシステム

人と Mobile Robot 間のコミュニケーションには、自然言語を理解する Voice Recognition 機能が用いられ、より人と親密な関係を構築することが可能になると考える。人は自然言語を用いて上位の抽象的概念による指令を与え、そして Mobile Robot 群と設備機器等が連携して自律的に生産工程を運営する生産システムの実現が望まれる。

その他にも LED を用いた光サイン表示やメロディ音を用いた表現により工場内の人に状態の通知を行う。例として AGV がメロディを流して自車の接近を人に知らせ、夜間でも人に Mobile Robot の存在を知らせるため車体に LED 状態表示機能を搭載する。Mobile Robot はロボットアームに搭載されたカメラを用いて、機器類の定期メンテナンス内容の報告や、生産工程の進捗状況をカメラでとらえて映像を遠隔にいる管理者に報告することができる。

3. 2. 8 実装された Mobile Robot の実験評価

Mobile Robot の有効性について Minimum Value Product (以下 MVP) を用いて実験, 評価をおこなった。MVP の Mobile Robot に実装された仕様は以下の通りである。

- メカナムホイールの搭載
- LiDAR センサの搭載
- 協働型多関節ロボットの搭載 (組立作業用)
- リフトロボットの搭載 (棚運搬用)
- リチウムイオンバッテリーの搭載
- ロボットアーム上ビジョンセンサと力センサの搭載
- プライベート 5G コミュニケーション機能の搭載
- 階層的タスクプログラミング とマイクロプログラムの適用
- 高精度位置決め機能の搭載

Mobile Robot の MVP による実証実験により, 重要要件の機能を実装したことを確認した。Mobile Robot がスマートファクトリの必要要件の充足に有効性であることを確認した。

評価結果として実現可能となった事

- 位置決め精度: $\pm 5 \text{ mm}$
- 干渉回避した自律的経路探索と制御
- 狭い通路の走破
- 位置決め対象へのミリメートル単位の接近
- プライベート 5G コミュニケーション
- Mobile Robot 間の協調作業

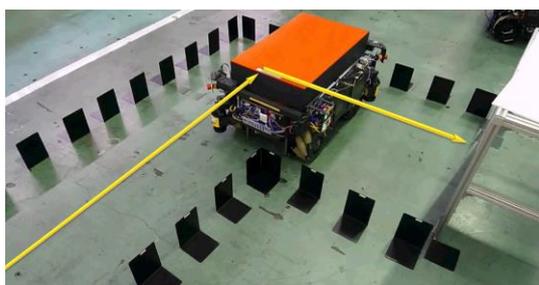


図 3. 23 直角コーナ走行

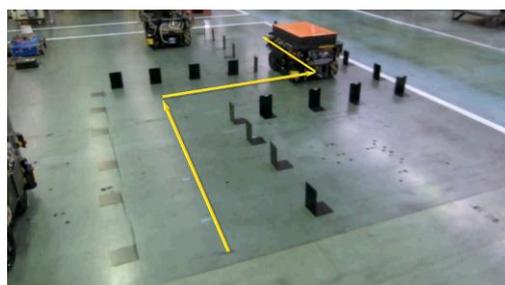


図 3. 24 クラック自動経路探索走行



図 3. 25 Lifter による荷物自動運搬



図 3. 26 FMS への自動工具供給

アクティブサスペンションの評価

メカナムホイールの全輪に独立したサーボ式アクティブサスペンションを搭載した。これらにより、AGV 車体の姿勢を自由に調整することが可能になった。これは傾いた床や、凹凸のある床に対して車体を水平に維持する際に有効である。

本機能を用いて機械姿勢と高さを協調調整することで、他の車体のインターフェイスと連結、分離できることを確認した。本要素機能は将来の自律再構成する加工セルを構築する Mobile robotics cell の台車として重要な役割を果たすであろう。



図 3. 27 アクティブサスペンションによる姿勢制御

3. 2. 9 Mobile Robot の実装と評価 まとめ

- 自律再構成する生産システムを実現する Mobile Robot の必要要件を分析して、Mobile Robot を具現化する機構を提案した。
- MVP による実証実験により、重要要件の機能が実装できていることを確認した。
- Mobile Robot が自律再構成する生産システムの必要要件の充足に有効であることを確認した。

3. 3 変容性を備えた自律再構成する生産システムの実装

マスカスタマイゼーションの重要な課題のひとつは、大量生産と同等なコストでカスタマイズされた製品を製造することである。カスタマイズされた製品には特定の要件があるが、必要なボリュームは大きくない。生産システムは、より小さなバッチサイズ、つまりより頻繁なバッチ切り替えを可能にしながら、効率を維持する必要がある。

本要件を満たすために必要なのは、「再構成」である。つまり、バッチ切り替え処理するだけでなく、生産機能と許容能力をさまざまな製品に適應させなければならない。再構成は生産システムにおいてもはや例外的な活動ではなく、通常の活動の一部である。製造業における環境要因、すなわち政治的、経済的、社会文化的、および技術的要因（PEST）の分析結果（図 3. 28 参照）は、効果的な再構成可能な生産システムの支援がますます重要になっていることを示している。

近年、Mobile Robot を使用する RMS の概念が研究された[49]。新しい RMS の概念を必要とする外的要因は、図 3. 28 に示すように要約できる。

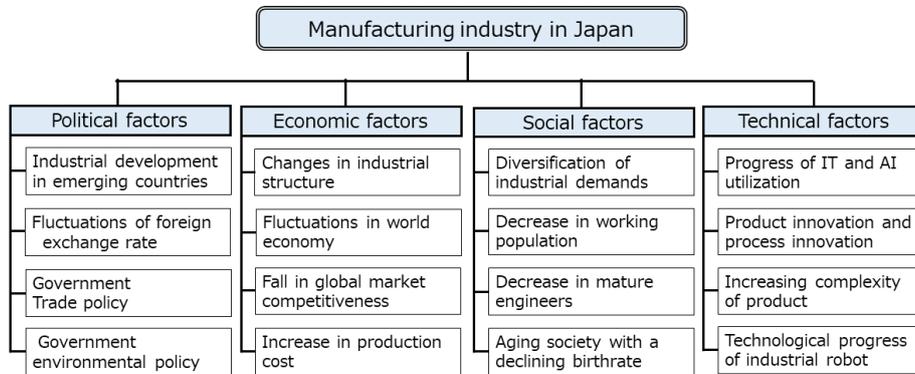


図3. 28 製造業のPEST分析

新しい RMS の概念は、外部要因の要求をサポートし、Mobile Robot が再構成を実行して、従来の自動化機能では不可能だった新しいレベルの柔軟性を実現できるようにする。再構成をめったに発生しない活動とは異なり、Mobile Robot は通常の活動として再構成を自動的に実行する。マシニングセンタの工具を交換して無人運転を拡張する Mobile Robot の実際の用途を図 3. 29 に示す。従来の自動化設備と比較した Mobile Robot の利点は次のとおりである。



図 3. 29 マシニングセンタの工具交換に実際に適用された Mobile Robot

- ① 自動化された生産ラインのレイアウトは柔軟である。固定レールを必要とする従来の移送システムでは、製造装置を一直線に並べるなどのレイアウト上の制約がある。その結果、このような従来の転送システムを導入するには、多くの場合、大幅なレイアウト変更が必要になる。一方、Mobile Robot にはそのような制約がない。現在のレイアウトを変更せずに使用できる。マシン間の搬送経路を柔軟に設定できる。固定レールを備えた従来のシステムでは、レールを備えた限られた領域でのみ搬送が可能である。一方、Mobile Robot を使用すると、基本的に任意の生産マシン間で搬送を実行できる。また、機械の増設、削減、交換などの製造工程の変更も容易に行える。たとえば、工具棚を提案された搬送システムで簡単に統合して、ツールの数と種類を拡張し、より多様な機械加工プロセスとより長時間の省人操作を実現できる。
- ② Mobile Robot の領域は、他の目的にも使用できる。Mobile Robot を備えた搬送システムは、従来の搬送システムが占める領域を占有しない。たとえば、Mobile Robot が近くにいない場合、オペレータはそのエリアで作業できる。また、搬送エリア内で複数の Mobile Robot を使用することもできる。
- ③ Mobile Robot は複数の目的に使用できる。タスクがある場所に自律的に移動できるため、より多目的になり、使用率が高くなる。言い換えれば、多くの場合、少ない投資でシステムの搬送を自動化することが可能である。

3. 3. 1 工作機械な再構成可能な組立ラインの構築

前章でボトルネックによる生産ラインのスループットの低下について述べてきたが、これは「制約条件の理論 (Theory of Constriction)」(以下 TOC) と訳される生産管理や経営改善全般の課題である[33]。TOC においては、「工場全体の生産能力は制約条件工程の能力以上にはならない」と考える。この場合の「制約条件工程」とは、工場で行われている工程の中で「生産効率の低下をもたらすボトルネックとなるもっとも処理能力が低い工程」のことを指しており、生産効率の低下をもたらす工程を中心に改善を行っていくのが TOC の基本的な考え方である。TOC とは製造工程におけるボトルネックを発見すること。そして、発見されたボトルネックに対して改善を加えることを指す。この改善に至るまでの方法論を指して、TOC と呼ぶ。

再構成可能な生産システムが必要な理由は、マスカスタマイゼーションを推進するとこのボトルネックが頻繁に発生、しかもリアルタイムで移動し変化するので、容易に改善できない点が問題である。しかし、制約条件にとらわれ続け、「工場全体の生産能力は制約条件工程の能力以上にはならない」では、我が国の製造業の発展が見込めない。

工作機械の組立生産ラインに視点を移すと、工作機械製造では製品毎の仕様が異なるため、激しいボトルネックの発生と変化をもたらす。特に工作機械製造の組立生産ラインは、その激しいワークフローのためボトルネックの抽出と解決が極めて困難である。言い換えれば、工作機械の組立ラインで、ボトルネックをリアルタイムに追跡し、その解決が可能であれば、他の製造業においても適応できる可能性が高まる。

本節では Mobile Robot の特徴を活かし、変容可能な生産システムを実装し、本課題の解決を図る。Mobile Robot による「変容性」を備えた工作機械の再構成可能な組立生産ライン鳥観図を図 3. 30 に示す。

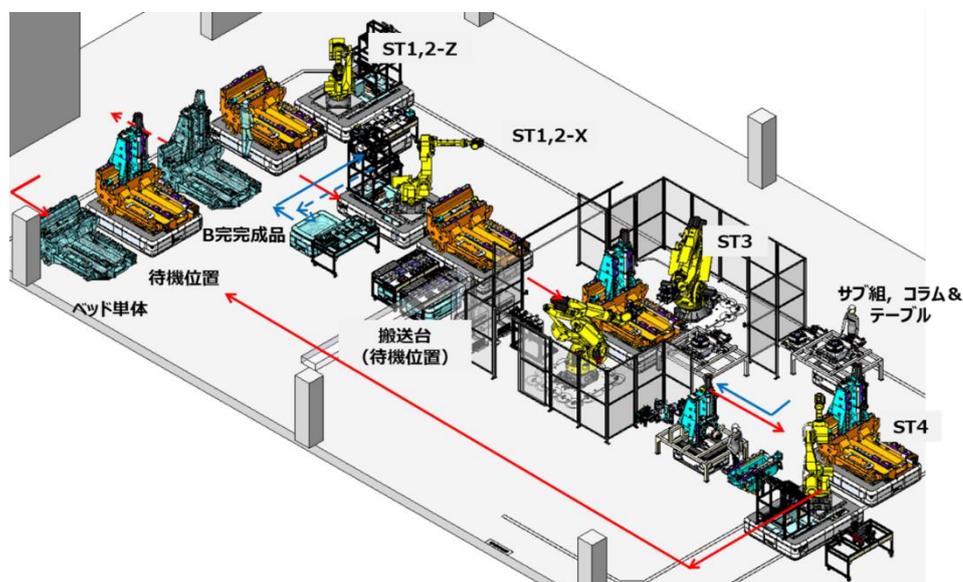


図 3. 30 変容性を備えた工作機械の再構成可能な組立生産ラインの鳥観図

図に示すように、本システムの特徴は組立セルがステーション 1（以下 ST1）からステーション 4（以下 ST4）までの 4 ステーションある。ST3 は大型ロボットが 2 台フロアに固定されており、生産ラインで唯一モバイルロボットの適用がなされていないステーションである。理由は、ST3 は 2 台の大型ロボットが協調動作を行いながら、コラムユニット、テーブルユニット等の重量が大きいユニットを可搬し、機械ベッド上へ搭載し、組立を行うためである。このため ST3 では柔軟性を欠いても重量物可搬という特別な機能に特化してセルを構成している。その意味で、ST3 がボトルネックにならないように管理しなければならない。

その他の設備として、機械ベッドを搭載してステーション間を移動する大型 AGV が 4 台、ジャストインタイムで組立セルに必要な部品やユニットを可搬する小型 AGV が 4 台存在する。さらに、大型 AGV プラットフォームに中型多関節ロボットが搭載された Mobile Robot が 4 機ある。最後に、Mobile Robot と協働で作業を行う作業員 A と B が本生産システムの中に存在する。ロボットによる自動化だけで組立作業は完了することはできず、調整、測定、検査等の人による作業が必要となっている。本組立ラインの特徴は ST3 を除いてフロアに設備が固定されることがなく、フラットでフリーな状態である。さらにクレーンレスを実現している。

本システムの工程フローについて図 3. 31 に示す。最初にトラックヤードで機械ベッドがトラックからクレーンで降ろされ、そのまま大型 AGV に搭載されて ST1, 2 に投入される。その後は全て ST3 の 2 台の大型多関節ロボットによる協調作業と Mobile Robot によって扱われる。自動化ラインであっても自動化ロボットや設備がフロアに固定されておらず、フロアがフラットであるため、仮に組立対象が変化しても工場は臨機応変に対応が可能である。この点も従来の自動

化組立ラインと比較して柔軟性が増しており、工場のマスカスタマイゼーションへの対応力が引き上げられている。

本組立生産ラインのプロセスは以下の通りである。まず、ST1 が組立ラインの始点となっており、トラックヤードで大型 AGV に搭載された機械ベッドは ST1 で作業者により 3 点支持のアンカーを調整され、AGV 上で機械レベルが設定される。ST1 では Z 軸ボールねじ、リニアガイドの取り付けが大型 Mobile Robot によって行われる。組立に必要な部品、サブアセンブリユニットは小型 AGV によって配膳台に乗せられてジャストインタイムで大型 Mobile Robot の横に届けられる。ボールねじの取り付け時には、ボールねじのプリテンションを大型 Mobile Robot によって設定される。ST2 では、別の大型 Mobile Robot によって X 軸のボールねじ、リニアガイドが組立られる。同様にボールねじのプリテンションが大型 Mobile Robot により設定される。ST3 では、2 台の大型多関節ロボットによる協調動作によって重量が大きなテーブルユニットとコラムユニットが組み立てられる。ST4 では、大型 Mobile Robot により XZ 軸の各サーボモータが取り付けられる。作業者による平行度、真直度、直角度、B 軸と各軸の平行と直角度を確認して合格であれば、工場から出荷されて、カバーや電装品などを取り付ける工場に送られる。

以上の内容を仮想ワークセルとしてあるかたまりの作業をまとめて組立シーケンスの定義をしたフローを図に示した。今回の組立セルの運用は、この組立シーケンスは固定してスケジュールを立てることとする。

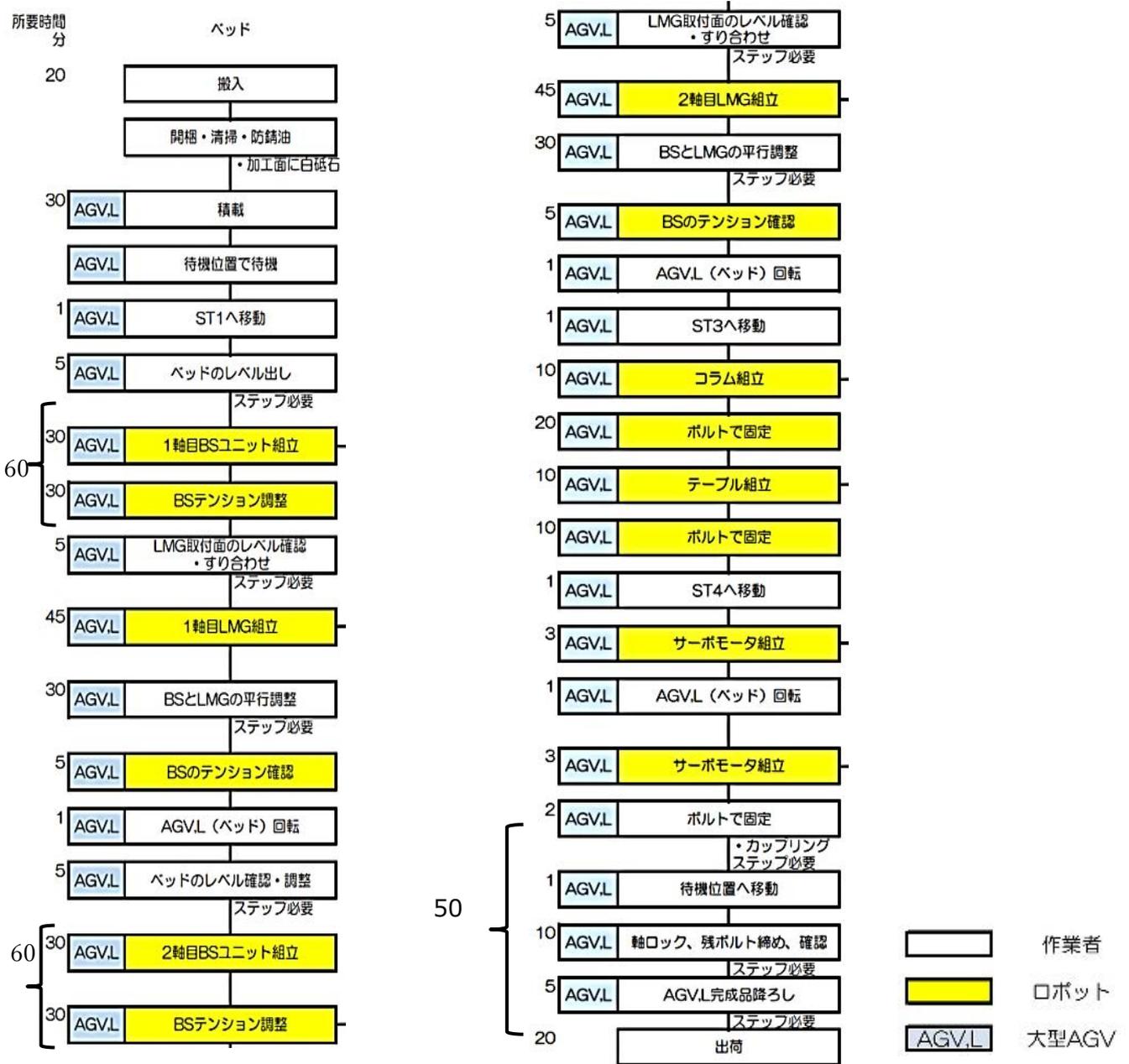


図 3. 31 横型マシニングセンタ自働組立実証ラインの仮想ワークセル工程の流れ

3. 3. 2 工作機械組立の仮想ワークセルと工程シーケンス

組立シーケンスの組合せ最適化を行うことで全体のメイクスパンを最小化するスケジュールを求めるが、組立作業は複雑な数多くの作業から構成されている。複雑性と柔軟性を管理し組合せ変数の簡素化を図ることが重要である。このため前述の仮想ワークセルを適用し、ある組立作業の塊を仮想ワークセルとして設け、さらにその仮想ワークセルの実行順序を固定することにより複雑性を限定的に管理する。

図 3. 32 に仮想ワークセルの事例を示す。仮想ワークセルの定義では、作業内容とシーケンス、ロボットの動作プログラム、組立対象の位置、Mobile Robot の配置、配膳台の内容と位置等が定義されている。例に挙げた三つのワークセルではモバイルロボットの位置とベッドの向きと相対距離、配膳される部品とその配置が異なる。これら作業の範囲では変数は固定化され単純なシーケンスプログラムとして動作している。複雑で大きな作業範囲におよぶ工程を管理可能な状態に保ち、組合せ最適化を適用するにはある程度柔軟性を制限してその制限の中での最適化を図る取組が必要である。

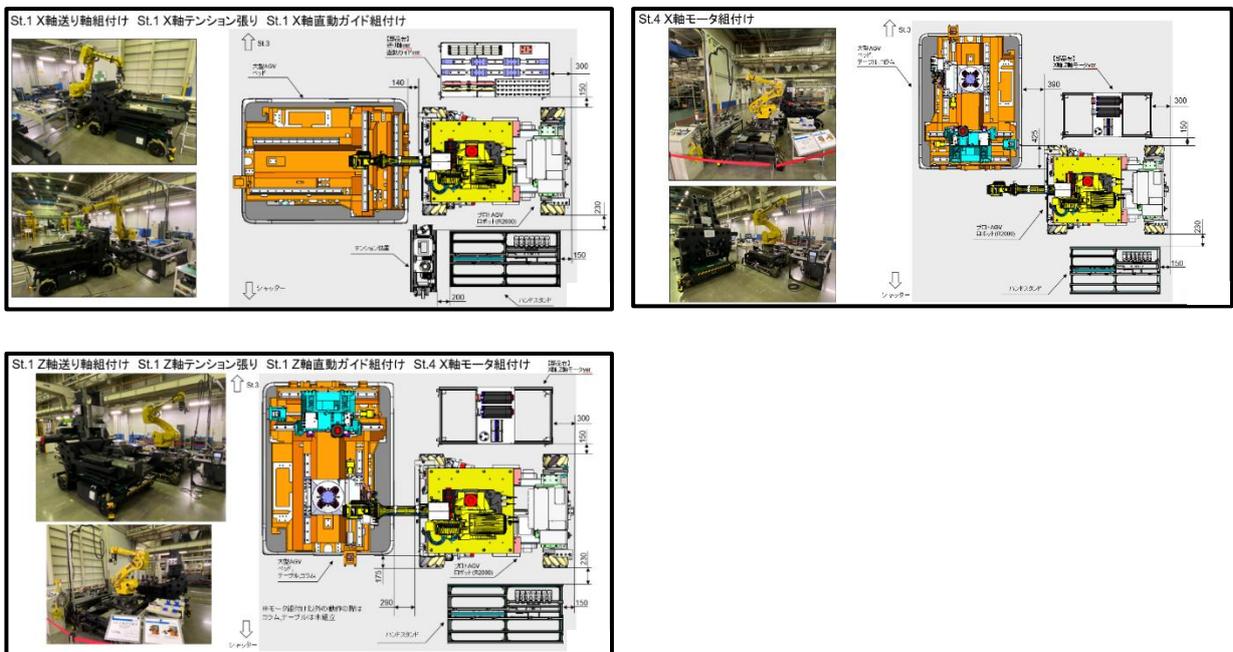


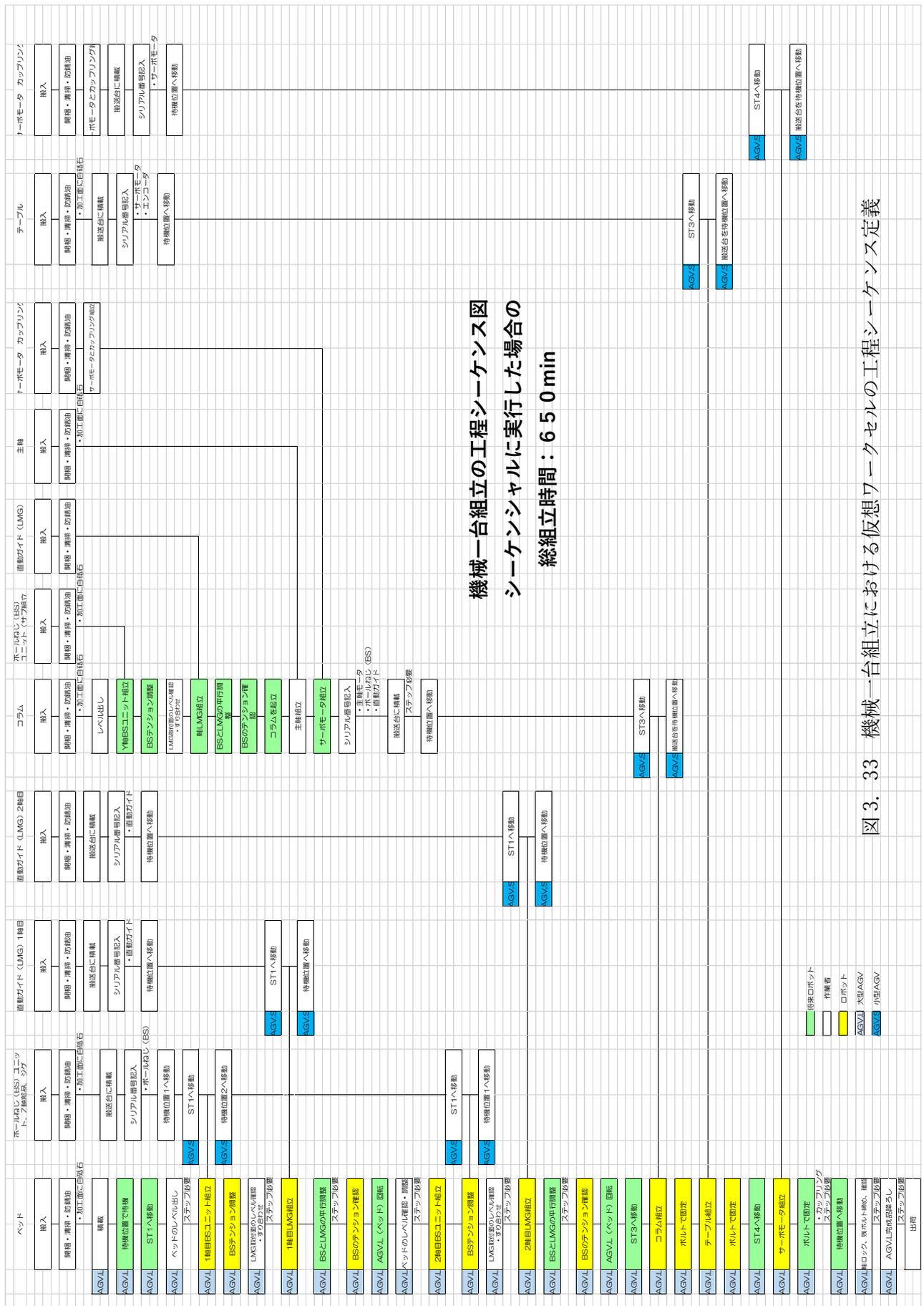
図 3. 32 仮想ワークセル定義の事例

仮想ワークセルを定義して、固定した組立工程シーケンスを採用しても未だシステム全体の複雑性と変数の数は膨大である。図 3. 33 に工作機械の基本要素である直動軸，コラム，テーブルをベッドに対して組み付ける作業を基本ユニット組立（以下主要ユニット組立）において、一台の工作機械の主要ユニット組立工程を図示した。主要ユニット組立のシーケンスは固定されているが、その周りにボールねじユニット，コラムユニット，テーブルユニット，主軸頭ユニット，サーボモータ等の組立と各ステーションに配膳する工程の組合せが存在している。これらの並行作業工程をどのように組合せるかによって組立セルのスループットが決まる。複数台の機械がラ

インに流れた際に、1台当たりの組立順序は固定されてはいるものの、それぞれの機械について、どの仮想ワークセルを、どの順序で、どこでステーションで、どの Mobile Robot を用いて、どの AGV を用いて配膳を実行するかをスケジューリングしなければならない。この組合せにより組立ライン全体のスループットを最大化する。本事例の場合、機械を一台のみ組立ラインに流し、全ての工程をシーケンシャルに実行すると 650 分の所要時間を要する。

これらの組立工程シーケンスの数理化を行うために、制約条件の計画を行う。図 3. 34 に仮想ワークセルのフローシーケンス図を示す。サブユニットの組立ステーション、ST1, ST2, ST3, ST4 となっていて、各ステーションにおける仮想ワークセルの内容が矩形ボックス内に定義されている。緑色のボックスが作業者による仮想ワークセルで、青色が Robot により実行される仮想ワークセルである。ボックスの外側に紫色の枠があるが、これは大型 AGV によって実行される内容を示す。例えば機械ベッドの移動という仮想ワークセルの外側に紫色の枠が設定されている場合は大型 AGV によって搬送されることを意味している。同様に黄色の枠は小型 AGV によって実行されることを示している。

 で示されている工程の接続は、次の工程に進むための条件として、接続部に示されている複数の出力が揃うまでは実行できないことを示している。



機械一台組立の工程シークエンス図
 シークエンスに実行した場合の
 総組立時間：6 5 0 min

図 3. 33 機械一台組立における仮想ワークセルの工程シークエンス定義

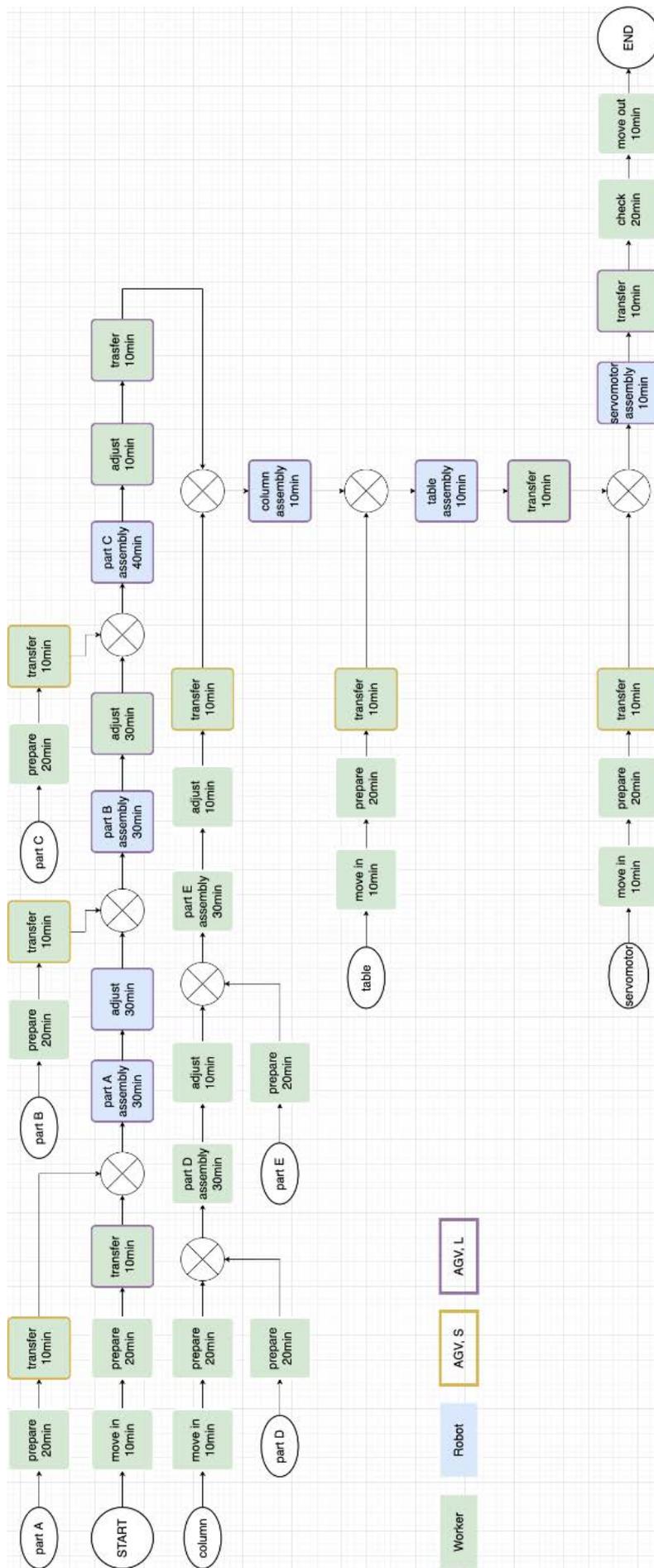


図 3. 34 機械→台組立の仮想ワークセルのフロー図

3. 4 ロボットによる自動精密組立

ここまでは、Mobile Robot による自動化を前提に再構成可能な生産システムの構築を検討してきたが、Mobile Robot による工作機械の組立自動化は次元の違う困難さを伴うことを第二章 2 節 2 項で述べた。特に以下の作業は人による匠の技と呼ばれてきた。

- ボールねじの心出し
- ボールねじの通りだし
- ボールねじのテンション調整
- リニアガイドの真直だし
- リニアガイドのヨーイング，ピッチング，ローリング調整
- リニアガイドとボールねじの平行調整
- モータ軸とボールねじカップリングのはめ合い
- コラムユニットの X 軸リニアガイドへの取り付け
- テーブルユニットの Z 軸リニアガイドへの取り付け

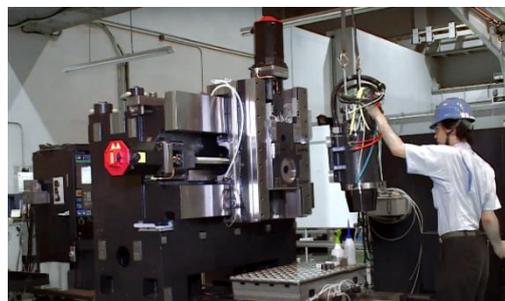


図 3. 35 擦り合わせによる工作機械の組立

一方で、「制約条件の理論」[34]を乗り越えマスカスタマイゼーションへ対応しなければ、我が国で製造業を発展させることができないのと同様、工作機械製造では「工作機械の組立自動化」を乗り越えなければ工作機械のマスカスタマイゼーションの解決には至らないと考える。そこで、本項では工作機械の組立自動化の取組について成果を述べる。

3. 4. 1 ロボットによる自動精密組立の実装方針

問題の解決のため、人によるすり合わせ作業を自動組立プロセスの後工程にまとめて、共通化する工程を自動化する方法が報告されている[29]。本研究では自動化可能なプロセスと人による作業が必要なプロセスを整理分類し、ワークピースを投入する前に事前処理することで自動化への対応を行う。自動化プロセスの方針を以下に設定する。

- リニアガイド，ボールねじの真直と平行は加工で創る
加工リファレンス面を利用しロボットによる自動組立可能とする。
- 事前準備工程で人手による調整作業を完了させておく
自動化システムにターゲットワークの投入する前にすり合わせを実施する。
加工時にダミーウエイト，ダミーボールねじを装着する。
すり合わせ作業時もダミーウエイトとダミーボールねじを装着して実際の組立時の弾性変形をエミュレーションして行う。コラムやベッドに対してはマスターリニアガイド，マスターボールねじを用いて 真直，平行，レベル出し，芯出しを行う。
- クレーンレスで組立を行う。
クレーンが組立ラインに入り込むと自動化が一気に阻害されるため，

組立セルにはクレーンを設置しない。

2台のロボットによる協調作業により重量物の組立可能とする。

- ロボットにはビジョンセンサと力センサを搭載する
ビジョンセンサと力センサにより、はめ合い作業を含む自動組立を可能とする。
- 形状拘束ハンドを利用
ロボット先端のハンドに形状拘束するハンドを採用して
複雑な形状の部品の自動組立を可能とする。
- ボールねじテンション張りは自動化する
ボールねじのテンション調整は危険な作業であるため、高い優先度で自動化を推進する。
レーザ測長と減速機を用いて自動組立可能とする。
- 自動化の対象は基本ユニット組立工程（主要ユニット）に限定する。
カバー取り付け、配管、配線作業、検査作業は難易度が高く未だ人手に頼る必要有。

3. 4. 2 クレーンレスによる重量ユニットの自動組立

工作機械の組立生産セルで重要な点は天井クレーンを使用せずに重量ユニットを可搬して、精密組立を可能にすることである。しかし、ロボット技術が十分に進化しておらず、協調動作可能なロボットの制御開発を行う必要があった。まず、大型の多関節ロボットを2台設けて、それぞれのロボットが協調動作を行わせたが、ロボットコントローラ間の通信遅延が著しく、MasterとReplicaの間で十ミリ近い同期誤差が発生する状況であった。このため、ロボットコントローラ間のネットワーク、コミュニケーション速度を引き上げ、信号伝達の低遅延を実現した。それでも2～3mm程度の追従誤差が発生する。このため、多関節ロボット先端のハンドに遅延を吸収するストローク機構を設けて、持ち上げの際にロボットが過負荷にならないようにした。

また、多関節ロボットを複数台で重量物を持ち上げる際に、重心を支える仕組みや、モーメント力の補正を行う仕組み、ロボット間で負担する重量が変化することに対応する仕組みが必要であった。これらの開発により重量ユニットの持ち上げと精密組立への適用が可能となった。

図3.36に示すように2台のロボットによる重量物の可搬が可能になり生産ラインの柔軟性と拡張性が増すことになった。ベッドは大型AGVで運搬するためトラックヤードでAGVに搭載し以降は、生産ラインでは一切機械全体を吊り上げる作業は発生しない。また、コラムやテーブルなどの搬送は小型AGVで台車を牽引しながら運搬する。

生産セルは作業員との協働作業を行うので、これらの大型多関節ロボットの可動範囲は柵で囲まれており安全のため、作業員が侵入できなくなっている。それでもAGVの出入り口には柵がないため、人感センサを設けて、作業員がロボットの可動範囲に入った場合、非常停止がかかる安全策が施された。図3.37に示すように柵の中に作業員が侵入している状態も検出できるように単純な光カーテンではなく、人の体温、動きを検出する人感センサでなければならない。

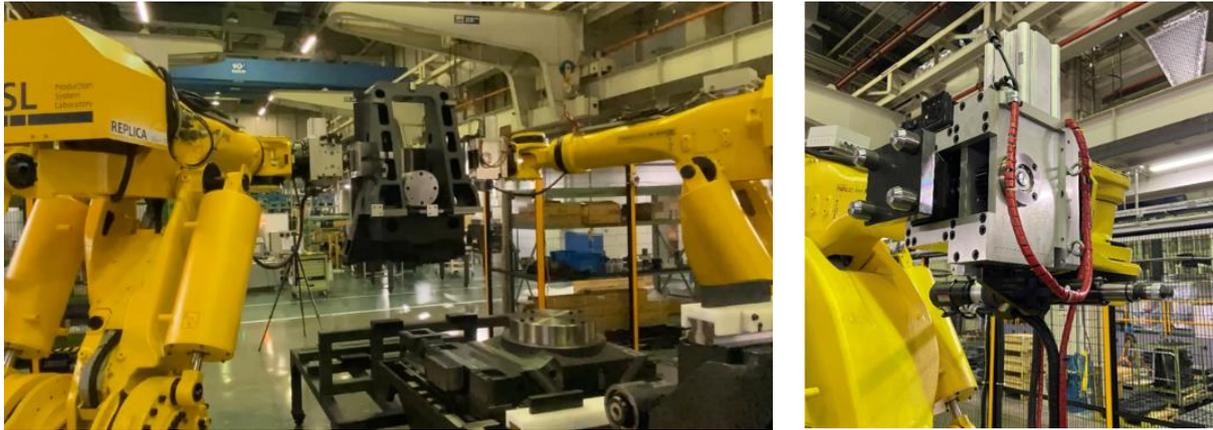


図3. 36 多関節ロボットの協調動作による重量ユニットの可搬とロボットハンド



図3. 37 安全対策のための対人検出

3. 4. 3 ボールねじテンション自動設定

次に自動化の取組として、ボールねじへのテンション付加作業について紹介する。工作機械のボールねじには、ボールねじの熱膨張によりサポートベアリングの予圧が抜けないようにあらかじめテンションが設けられている。この量が百数十マイクロンになっており、作業者がボールねじのテンションを張る際は、大きな六角レンチで梃を利用してロックナットを締め上げる作業を行っている。大きな六角レンチにレバレッジをきかせてロックナットを締め上げる作業は安全上人が行う作業として不適切であると考える。

そこで高い優先順位をもってボールねじの自動テンション調整に取り組んだ。しかしロボットによる大型レンチの操作は困難なため、図3. 38に示すロボットのビットで締め上げが可能となるように減速機付きのテンショナーを開発した。さらに、図に示すようにボールねじの引っ張り量をマイクロン単位で測定するため、レーザ変位計を組み込んだシステムを開発した。レーザ変位計はボールねじの両端に設けられており、その差分によりボールねじの伸び量を測定する。図3. 39に開発した減速機付きテンショナーとレーザ変位計について示す。図3. 40にはそのレーザ測長器によるテンション量検出ソフトウェアのアルゴリズムを示す。

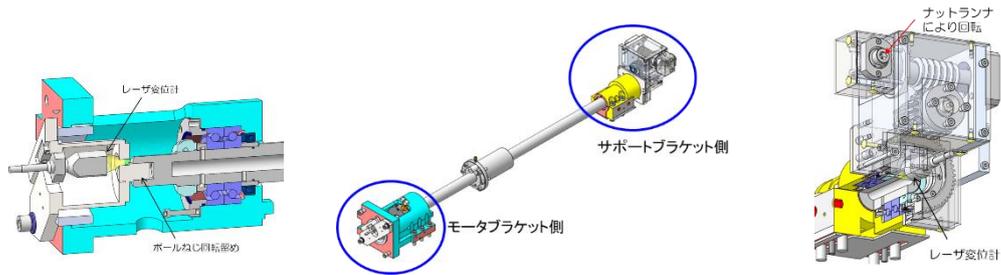


図 3. 38 ボールねじテンション調整の自動化

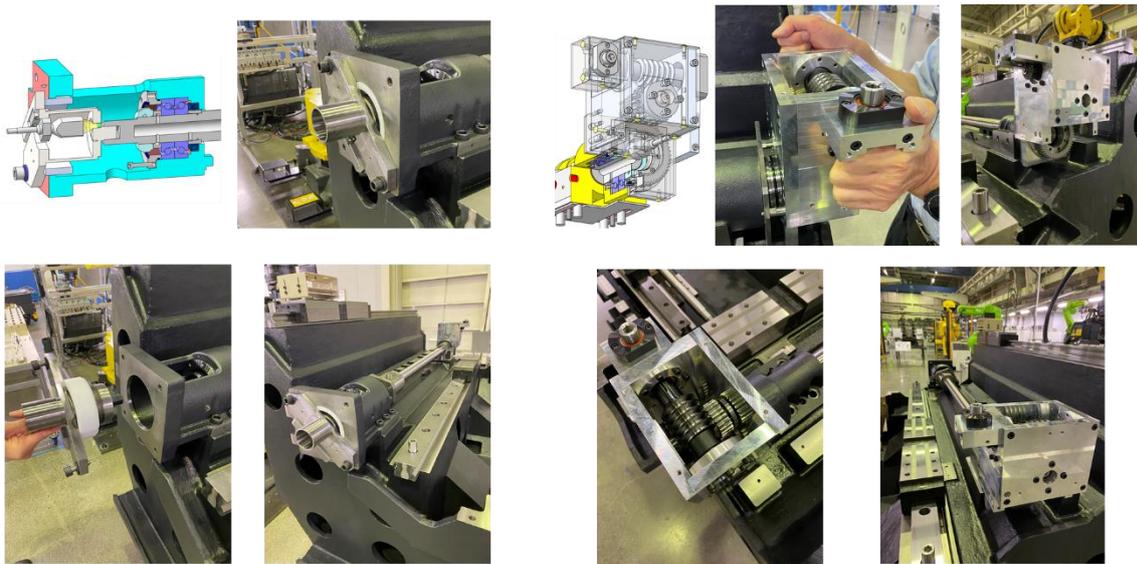


図 3. 39 ボールねじテンション調整機構の実装

従来、ボールねじのテンション張りは人による作業でなければ実行不可能と考えられていたが、自動化の適用が可能となった。他の自動化の適用が成功した例として、 $h6/H7$ や $h5/H6$ のはめ合いを有するベアリングのサポートブラケットやモータブラケットへの挿入、メカニカルシールの挿入、ロックナットの締め込み、調整シムの挿入と交換、コラムポケットの中のボルトの締め付け、リニアガイドの取り付け等が挙げられる。これらの作業の自動化で最も重要な技術となったのが、ロボットアームの先端に設けられたビジョンセンサ[38]と力センサであった。

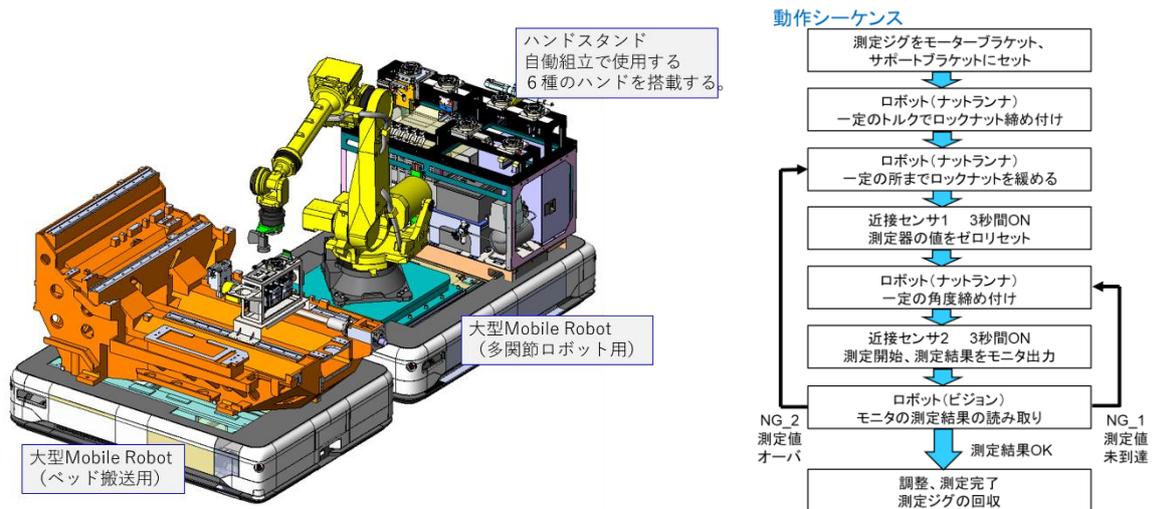


図 3. 40 Mobile Robot によるボールねじテンション調整とアルゴリズム

3. 4. 4 サーボモータ用形状拘束ロボットハンド

サーボモータのモータブラケットおよびカップリングに対する取り付けについて自動化を適用した。サーボモータは 50kgf の重量があるため、クレーンのインチングによってモータ軸をボールねじとの連結カップリングに h6/H7 のはめ合いを挿入していた。しかし、重量 50kgf のモータを h6/H7 のはめ合いでクレーンを用いて挿入することは作業者を伴っても困難であった。

サーボモータのように外周が八角形の複雑な形状をしている重量部品を、ロボットで把持するためには、形状拘束することが重要である。安全上、絶対に落下させてはならない。サーボモータ外周に対し形状拘束するロボットハンドの開発を実施した。エアシリンダを用いてゲートを開閉させモータの外周を挟み込むと同時に、モータフランジの穴に安全ピンを挿入して、モータを落下させない安全機構を設けた。このハンドと力センサの組合せによりモータを微妙に動作させることが可能になり、はめ合いを有するモータブラケットへの挿入が可能となった。図 3. 41 にサーボモータの形状に合わせて形状拘束するロボットハンドの実装例を示す。

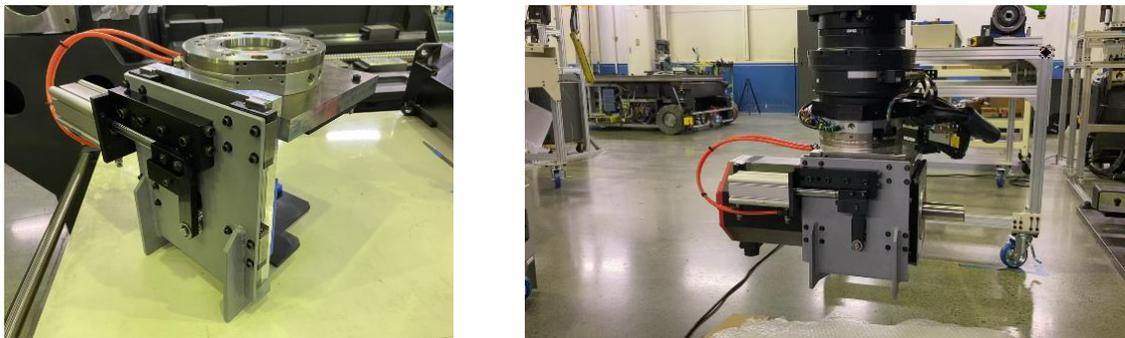


図 3. 41 形状拘束するロボットハンド

3. 4. 5 ボールねじユニット組立セル

これまで工作機械の主要ユニットの組立（主要ユニット）について述べてきたが、サブユニットの組立の自動化も重要なテーマである。図 3. 42 に示す事例は、ボールねじとベアリング、モータブラケット、サポートブラケットを一つのユニットに組み上げる自動化セルである。

ボールねじユニットには軸受とベアリングケースの他に、メカニカルシール、ロックナット等の機械的な主要部品が組み込まれている。しかも、工作機械の種類毎にベアリングが異なったり、モータブラケットがコラムやベッド側に存在していたり、XYZ 軸のボールねじの長さや直径がそれぞれ異なっていたりする。このようにボールねじユニットはサブユニットながら多品種少量の最たるユニットであると言える。

本組立セルでは、GT を適用してボールねじユニットを類似グループに分類し、厳密には微妙に異なる組立内容あっても類似グループとして組立メソッドを共有することで、多品種に対応している。具体的にはロボットハンドを共有し、モータブラケットの反転台、ベアリングの押し込みジク、軸受の把持ジク等の共有化をしている。また、組立対象サブユニットに対し、適切な部品を配膳する仕組みが同時に沿泣けられており、小型 AGV により必要な配膳パレットが組立セルに届けられるように生産セルが設計されている。配膳用 AGV の運営は適切な配膳パレットが組立要求に対してジャストインタイムでパレットプールから生産セルに搬入されるよう運用ソフトウェアにて管理されている。また、搬送用 AGV、組立生産セル、ホストコンピュータ間のデータコミュニケーションにはプライベート 5 G が適用されており、比較的広範囲の工場内をカバーしている。ユーザが容易にシステムを運営できるように簡易な HMI を用意した。MHI ソフトウェアを図 3. 43 に示す。この HMI には階層タスクプログラミングによってマイクロプログラムが埋め込まれており、作業者は上位の指令のみでシステムを容易に扱えるようになった。作業者の操作は「入庫」、「出庫」、「介入」の三つの指令だけを与えればよく、以降の処理はシステムが行う HIM になっていることを示している。

結果、年間 1,500 本のボールねじサブユニットを組立て主要ユニット組立工場へ出荷している。



図 3. 42 ボールねじサブユニット組立セルと搬送用 AGV

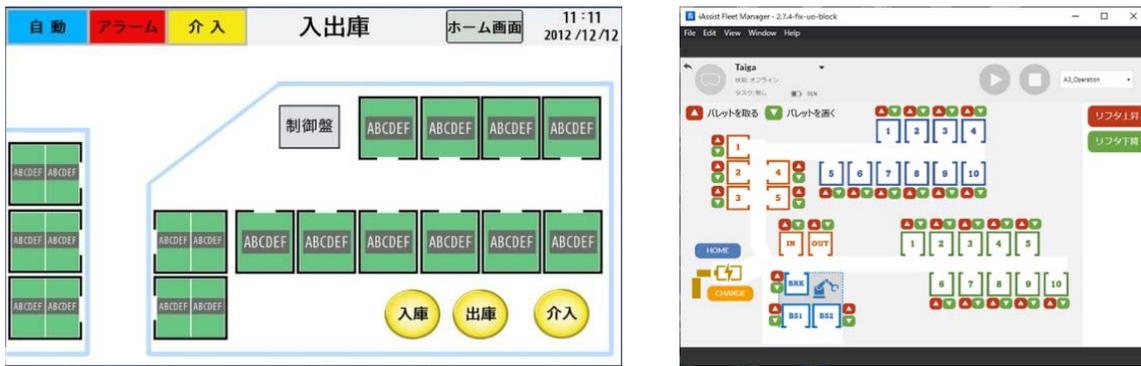


図 3. 43 パレット搬送用 AGV 運用ソフトウェア

図 3. 44 では Mobile Robot を用いた工作機械の組立生産ラインを示している。Mobile Robot を用いることで機能やキャパシティの変化に対応した生産ラインを実現できることを示している。Mobile Robot を導入することで生産システムはフレキシブルになる。工作機械のベッドが大型の AGV に乗って搬送されている。また小型の AGV がベッドに組付けられる部品をジャストインタイムで搬送している。組付けを行う多関節ロボットは AGV に搭載されており、移動可能である。このように Mobile Robot は単に仕事が流れて来るのを待っているだけでなく、ボトルネックになっている場所に移動して作業を行うことができる。Mobile Robot を用いて再構成可能な生産ラインを構築している。Mobile Robot を用いることで多様な仕様や生産量の変化に対応し、生産ラインからスループットを最大化する仕組みになっている。この内容は既に JIMTOF/IMEC2018 で発表していたものである。その時点では CG でしかなかった生産ラインが、現実のものとなった様子を示す。



図 3. 44 工作機械の再構成可能な組立生産システムの実証実験

3. 4. 6 工作機械の精密組立自動化 まとめ

以下に工作機械の精密組立の自動化可能となった内容を挙げる。

- 事前準備工程で人手による調整作業を完了させておくことで、自動化システムにターゲットワークの投入が可能となった。
- 2台の大型ロボットによる協調作業により重量物の組立可能となった。
- ビジョンセンサと力センサにより、はめ合いを含む自動組立を可能となった。
- リニアガイド、ボールねじの真直と平行は加工リファレンス面を利用し自動組立可能となった。
- 形状拘束するハンドを利用してはめ合いを含む複雑な形状の部品の自動組立が可能となった。
- ボールねじテンション張りをレーザ変位計と減速機を用いて自動組立可能となった。
- サブユニットであるボールねじユニット、ATC リングマガジンユニットの組立自動化が可能となった。
- 協働ロボットを使うことで、精度確認などの現状は人しかできない作業を実行する横でロボットによる組立作業を可能とした。
- Mobile Robot による自動化により、安全エリア確保、省スペース化、リスク/負荷分散が可能となった。

一方で、未だ自動化の実現が出来ていない組立内容を挙げる。

- カバー取り付け、配管、配線作業
- 精度確認作業、調整作業
- 検査作業

本取組で得た結果から、Mobile Robot の適用により自動化が推進できた。再構成可能な生産ラインが自動化を伴い現実のものとなってきている。

3. 5 工作機械の再構成可能な生産システムの実装 まとめ

本章では、工作機械の再構成可能な生産システムのハードウェア部分について実際に実装して動作を確認した。その効果の評価は第四章に述べる最適化スケジューリングとの組合せで評価されるが、その要素の評価として、前章で提案した再構成可能な生産システムのハードウェアの要件を満たしたと考える。

本章で構築したのは再構成する生産リソース Mobile Robot であり、必要要件であった自律自走式モバイルモジュールとしての役割を備えた。狭い場所でも自由に動き回れる機動力と、狭い通路を縫って走破できるメカナムホイールを装備し、目的地への移動制御は自律的に行われる。SLAM を用いて RRT 法によりリアルタイムに状況が変化する環境で障害物を回避しながら経路を探索し目的地に無軌道で移動できる機能を備えた。生産リソースとして重要要件である精密位置決め ($\pm 5 \text{ mm}$) を達成し、人との作業スペースを共有し協働を可能とする協働型 Mobile Robot

とした。工場内における Mobile Robot とのコミュニケーションはプライベート 5G を適用した。これらの Mobile Robot を用いて迅速に生産セルの形態を変化させることが可能となった。

次に自動化への対応を行った。従来困難と言われていた工作機械の主要ユニット自動組立において検査と確認作業を除き、自動化で実行可能な状態とした。クレーンレスにより工作機械の重量ユニットの組立を 2 台の大型多関節ロボットの協調作業と同期誤差に対応するロボットハンドで実現可能とした。その他にもボールねじユニットの組立、テンション張り、軸受とオイルシールの挿入、モータ軸のはめ合い組立等を自動化で組み立てられるようにした。

ユーザによる Mobile Robot のティーチング量を限定的なものとするため、上位の指令だけで操作を可能とする階層タスクプログラミング概念に基づくマイクロプログラムを搭載した。さらに、仮想ワークセルの概念を用いて、この後の章で述べるスケジューリンの管理可能性を高める生産セルレイアウトと工程を創出した。

これらの要素技術を駆使して実装した生産リソースを組合せて工作機械の主要ユニット組立の再構成可能な生産セルの構築を行った。2018 年までは CG の世界であった再構成可能な生産セルが物理的に姿を示した。

次の課題は最適化スケジューリングである。柔軟なハードウェアの運営はソフトウェアの構築と利用が複雑を極める。柔軟なハードウェアの適用は、その変数が増大することで、最適化のための工程順序の組合せ数、生産リソースの組合せ数が爆発する課題に向き合わなければならない。多品種少量生産の生産ラインでありながら高い生産性を実現可能とするため、第四章では再構成可能な生産システムのスケジューリングを、量子アニーリングマシンを用いて組合せ最適化問題を解くことで、求める取組みを行う。

第四章 フレキシブル生産システムのスケジューリング

4. 1 フレキシブル生産システムにおける問題空間

第三章では再構成可能な生産システムのハードウェアについて述べた。ハードウェアが柔軟になるという意味は、そのシステムの変数が増えソフトウェアの複雑性が增大することを意味する。生産システムを高能率で生産性の高い状態に運営しようとする、その運営スケジューリングの最適化に取り組む必要がある。工程順序の組合せや、生産リソースの組合せについてコスト最小やリードタイム最小となる最適なパターンについて検討しなければならない。しかし、システムの変数が増えると、その組合せパターン数が爆発的に増大し、数学的に NP 困難問題と呼ばれる実際には解けない問題となる。扱う問題空間を拡大すれば、その分だけ最適化の恩恵が増すが、一方で変数の数が増え組合せ数が爆発的に増大することによる計算コストの増大や生産システムの硬直化による損失コストの増大が発生する。柔軟性の高い生産システムでは、如何にシステムを管理可能な状態に持ち込むかが課題である。

本研究では、図 4. 1 に示すように解決すべき問題空間の拡大と、解決すべき問題空間を狭める双方向の取組推進の方針をたて、本課題解決にあたる。図 4. 1 に横軸を問題空間の広さ、縦軸に扱う領域の範囲として取組の方針を示した。横軸にはシステムの柔軟性の規模で変数の多さを表現し、縦軸には生産ライン単体から生産ライングループ、工場単体、工場グループと適用範囲の拡大を表現している。図中の橙色のラインが取り扱う問題空間を拡大する取組であり、緑色のラインが取り扱う問題空間を管理して狭める取組のラインである。そして水平方法の灰色点線が適用レベルの範囲を示すラインである。この三つのラインに囲まれた左側の範囲が取り扱える問題空間と適用スコープの大きさを示す。

具体的には、解決すべき問題空間の拡大のために、最新の計算資源の活用を検討する。本研究では、量子アニーリングマシンを用いたハイブリッドソルバーの利用を行う。これにより、従来解けないとされていた組合せ最適化問題を解ける状態に変える。その上で、機械加工セルの最適化の課題である工具のスイッチング問題や、組立セルでは Mobile Robot の移動時間や作業者の勤務時間の変数の取り扱いまで問題空間を拡大し、機械の複数台組立まで問題空間の範囲を広げる。

一方で、解決すべき問題空間を狭める取組みとして、ハードウェアのデザインをモジュラー化しハードウェアの柔軟性をある程度制限する。そして、このモジュラーを標準化し、同じモジュラーを共用することにより柔軟性の変数の自由度を抑え込む。また、作業内容についても、仮想ワークセルの概念を採用し、作業をあるまとまりでグループ化して、その中での工程順序や生産リソースの使用は固定化することで変数の増大を抑える。さらに本研究の適用するスコープの範囲は加工ライン単体と組立セル単体のスコープに限定する。

これらの三つの問題空間と適用スコープの取り扱い方針を以下にまとめる。本方針に従い再構成可能な生産システムのスケジューリング課題の解決にあたる。多様な仕様やダイナミックに変化するボトルネックに対して、各工程間で工程負荷を平準化させるスケジューリングが必要となる。本節では、先ず再構成可能な機械加工セルを実例にスケジューリング問題の解決方法を提案

し、次にダイナミックなワークフローを取り扱い組立セルのスケジューリング問題に取り組む。

① 適用範囲を広げる取り組み

- 機械加工の工具利用にまでスケジューリングを広げる取り組み
- 組立セルで Mobile Robot の移動時間を考慮に入れる
- 組立セルで複数台の組立を扱う

② 解決可能な範囲を広げる取り組み

- 組合せ最適化に GPU や量子アニーリングマシン等を利用する取組

③ 解決すべき範囲を狭める取り組み

- モジュール設計
スケジュール対象の粒度を部品からモジュールに大きくすることにより
組合せ数を減らす
- モジュール共通化
機種毎に必要なモジュールを共通化してやはり組合せ数を減らす
ジグやロボットのハンド数などの組合せ数を減らす
- 仮想ワークセルの適用
作業のグループを構成し、そのグループの中では柔軟性を固定化する

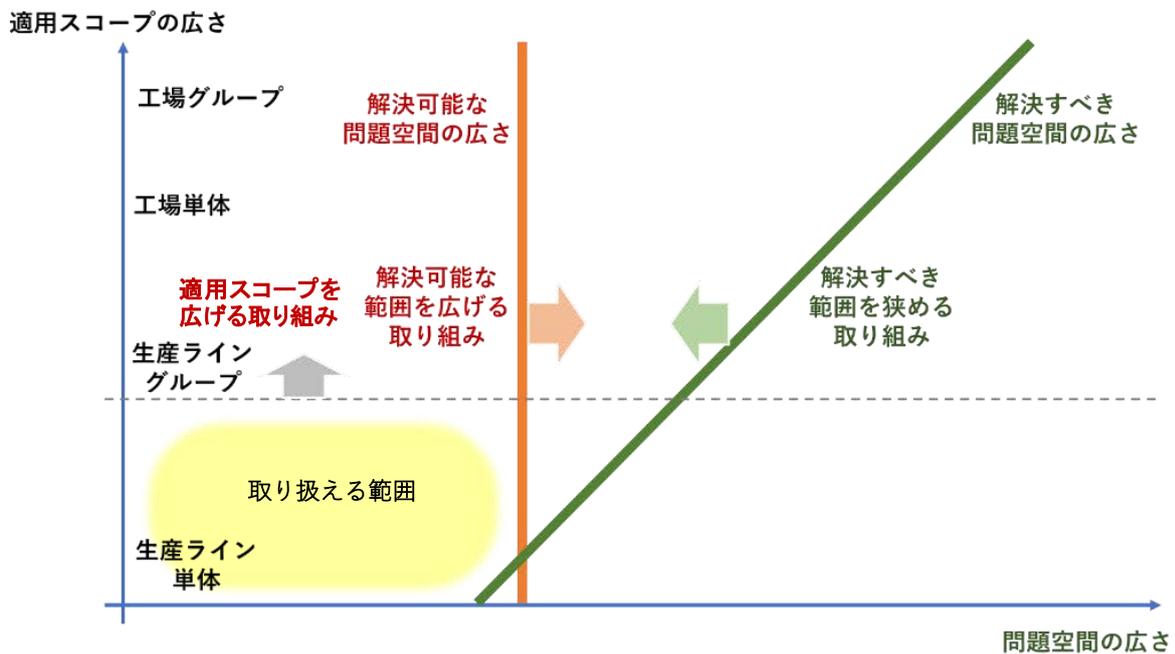


図 4. 1 最適化スケジューリングの取り扱い可能な問題空間と適用スコープの範囲

4. 2 量子アニーリングを用いた組合せ最適化問題とスケジューリング

4. 2. 1 ジョブショップスケジューリングとツールスイッチング

生産スケジュールの背景には、生産システムの制約をより包括的にモデル化することと、スケジュールをより迅速に提供することという二つの相反する課題の間のトレードオフがある。現実の生産システムは本質的に複雑であるため、制約が多すぎるとスケジューリングの計算時間が長くなり、しばしば許容できない時間がかかることがある。ただし、適切に対処すれば、このアプローチはより良いスケジュールを生み出す可能性がある。研究者はこの点に注力し、これらの制約をできるだけ正確にモデル化する方法を模索する傾向がある。一方で、近視眼的なディスパッチングルールや、より迅速な応答を目的とした単純化されたモデルを採用すると、結果として得られるスケジュールは実行可能ではあるものの、最適解とはほど遠い可能性があり、多くの場合、実行には人間による解釈が必要になる。一方、産業界の実務者はこの二番目の課題により関心があり、たとえ完璧ではないとしても、実行可能なスケジュールを迅速に作成することを目指している。このトレードオフは、生産スケジュールにおける学界と産業界との間のギャップとなっている[39]。機械加工工場でマスカスタマイゼーションを実現するには、このトレードオフを再検討する必要がある。

機械加工工場におけるマスカスタマイゼーションの重要な側面の一つは、特にマシニングセンタ（以下 MC）に関して頻繁な適応性が要求されることである。多品種生産の場合、MC にはジョブごとに適切な工具が装備されている必要がある。さらに、適切なツールを適切なタイミングで適切な場所に配置するという点で、より複雑になることを意味する。したがって、スケジューリングでは MC だけでなくツールスイッチングも考慮する必要がある。スケジューリング問題は Job Sequencing and Tool Switching Problem（以下 SSP）の拡張であり、それ自体は NP-hard Job Shop Scheduling Problem（以下 JSSP）であることが証明されている[40][41][42]。SSP は各ジョブに事前定義されたツールセットが必要な N 個のジョブによる JSSP である。作業に必要なツールはすべて、開始前に工具マガジンにロードする必要がある。したがって、問題はジョブの処理順序を見つけることと、同時にツールスイッチング回数を最小限に抑える工具の装着のスケジュールを見つけることで構成される。SSP は研究コミュニティによって長い間研究されており、多くのバリエーションがある。バリエーションは二つの次元に基づいて分類できる[43]。最初の次元は、SSP の観点である。さまざまな SSP のカテゴリを分類するには、複数のマシンのサポート、均一なセットアップ時間、同じ工具サイズ、既知のジョブとその順序、必要な工具の数が工具マガジンの容量より小さいこと、工具の摩耗に関する考慮事項などいくつかの異なる属性がある。二番目の次元は、SSP である。SSP の解決策を見つけるためにさまざまな方法が提案されている。SSP は、Uniform SSP と呼ばれる最も単純な形式であっても、NP 困難である。実際、正確な解決策を求める研究では、現実世界に比べてかなり単純な条件しか処理できない Uniform SSP に取り組んでいる。たとえば、Ghiani らは分岐限定アルゴリズムを Uniform SSP に適用した[44]。ただし、このアプローチはより複雑な条件には拡張されていない。一方、Uniform SSP の条件を拡張する研究は、基本的に古典的/メタヒューリスティック最適化手法を使用して近似解を調査するものであり、最適解ではなく十分に適切な解を見つける方法に焦点を当てている。

たとえば、Farughi らは、ツールの寿命と故障に関連する制限を考慮して、遺伝的メタヒューリスティックアルゴリズムを SSP に適用した[45]。実務的産業界では、ディスパッチングルールが一般的に採用されている。ただし、自由度が高い次元のシステムでは、最適解を探索する際に大きな改善の余地がある。

マスカスタマイゼーションによってもたらされるもう一つの課題は、多品種生産の自動化である。従来、人間のオペレータによって行われていたセットアップなどの補足的なタスクは、現在では自律移動ロボット(以 AMR) によって行われることが提案されている[46]。AMR には補足的なタスクを実行する機能があるが、欠落している制約を解釈したり補完したりすることはできない。MC の加工タスクだけでなく、AMR の補助タスクもスケジュールすることが不可欠になる。これは、すでに NP 困難 SSP よりもさらに複雑なモデリングアプローチが必要であることを示唆している。

本研究では、ツールスイッチング制約を伴う柔軟なジョブショップをスケジュールするための新しいモデルを提案する。新しく提案されたモデルは、実際の状況では Uniform SSP よりも現実的で複雑である。製造現場の FMS のインスタンスデータセットは、実際に使用される注文とツールで構成される。生産を中断することなくスケジュールを迅速に計算するために、量子アニーリングを組み合わせたハイブリッドソルバーを使用してツールスイッチングを考慮してメイクスパンとスケジュールを取得する。次に、これらの結果を Python MIP およびディスパッチングルールを用いて取得した結果と比較する。

4. 2. 2 ツールスイッチング制約を伴う柔軟なジョブショップスケジューリング

新しい問題、Flexible Job Shop Scheduling problem with Tool switching constraints(以下 FJSST)を紹介する。FJSST はツールスイッチングを重要な要素として組み込むことで、従来の Flexible Job Shop scheduling Problem(以下 FJSP)を拡張する。Uniform SSP の問題とは対照的に、この問題は次の三つの主な点で異なる。

- (1) タスク シーケンスの複雑さ:
各ジョブは特定の順序で複数のタスクで構成される場合がある。
- (2) マシンの多様性: タスクにはさまざまなマシンタイプが必要になる場合がある。
- (3) ツールの多重性: 各ツールカテゴリの複数のインスタンスを同時に保持できる。

FJSST は上記三つの違いにより、Uniform SSP と比較して実用的かつ複雑な自動加工システムを実現できる。ワークセットアップ用の AMR、ワークと工具の自動搬送を行うリニアパレットプールシステムなど、実用的な自動加工システムモデル (システムモデル) について紹介する。

図 4. 2 にリニアパレットプールシステムを用いた Flexible Manufacturing System(以下 FMS)の一例を示す。ワークと工具はワークセッティングステーション (以下 WSS) から AMR によってパレットにロードされ、MC で使用され、WSS からアンロードされる。パレット搬送車は必要になるまでパレットをパレットストッカーに一時保管し、AMR によるパレットのロード・アンロードや MC によるパレット使用とは非同期で必要に応じて MC や WSS にパレットを搬送することができる。ジョブはワーク搬入 (pre-setup)、加工 (manufacturing)、ワークの搬出 (post-setup)の三つのタスクに分けることができる。一番目と三番目のタスクを AMR 機種に割り当て、

二番目のタスクを MC の機に割り当てることにより，システムモデルを効果的に FJSST として表すことができる．図 4. 3 に本節で使用するシステム モデルの構成図を示す．

FJSST には，図 4. 3 に示したシステムモデルを超える表現力があることに注目されたい．たとえば，FJSST はワークピースや工具の洗浄などの追加タスクや，洗浄機のタイプを使用してモデルを表現できる．FJSST は現実世界の製造上の問題をより適切に表しているが，解決方法に大きな課題をもたらす．これについては後ほど説明する．

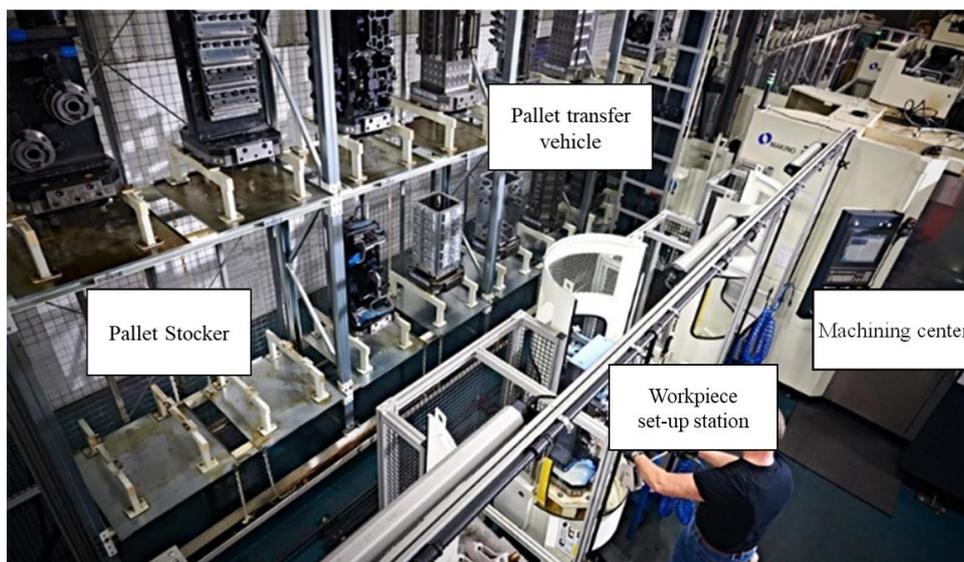


図 4. 2 リニアパレットプールシステムを用いた FMS の例

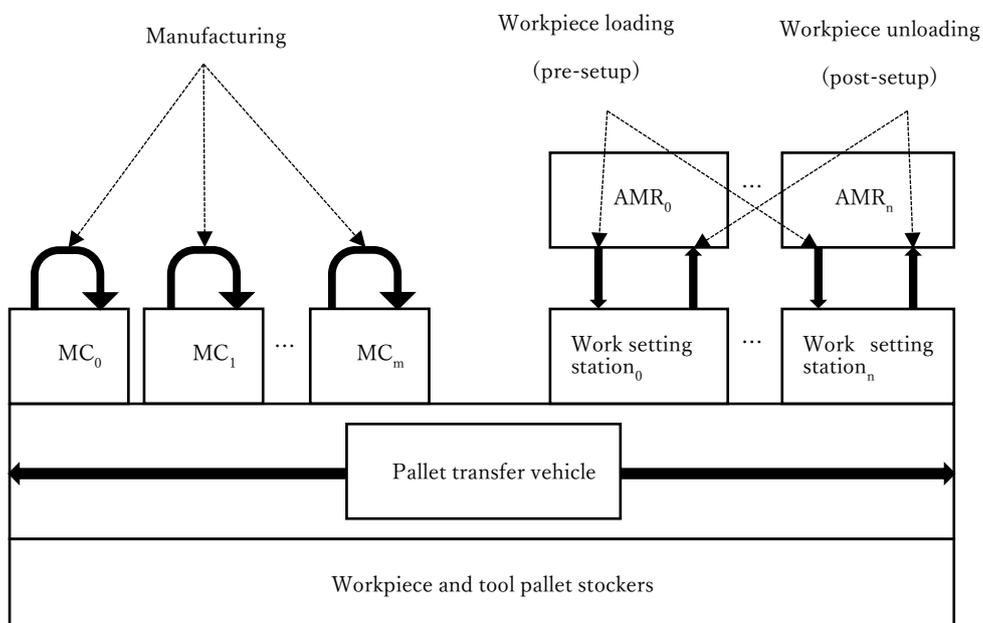


図 4. 3 システムモデルの構成図

4. 2. 3 量子アニーリングを用いた組合せ最適化問題とスケジューリング問題

量子アニーリングは、最適化問題を解くために量子力学を利用する計算技術である。このアプローチには、問題を数学的にハミルトニアンにエンコードすることが含まれる。次に、ハミルトニアンは量子コンピュータの量子ビットを使用して物理システムにマッピングされる。時間の経過とともに、システムは進化して、問題の最適な解決策を表す低エネルギー状態に到達する。ゆっくりと冷却して最小エネルギー状態に到達するシミュレーテッドアニーリングとは異なり、量子アニーリングでは量子トンネリングと量子もつれを使用して、複数の可能な解を並行して探索し、最適解への迅速な収束を実現化する。

D-Wave は量子アニーリングを実現化し、2011 年から商用化しているが、現実の問題に必要な接続性と精度は、最新の量子アニーリングマシンが現在提供するよりもはるかに高い性能が要求される。現実世界の問題を解決するために量子アニーリングが利用できる可能性は低いと言わざるを得ない。FJSST では、4 台の MC、20 個のツール、10 個のジョブ（各ジョブに 2 つのタスクがある）があっても、問題には 10,000 を超える変数が必要で、その中にはバイナリでないものも含まれる。これは既存のハードウェアの容量を超えている。さらに、実際の運用環境ではさらに規模が大きくなる。Denkena らの研究では、問題をより小さな部分に分割することで大規模な FJSP を解決する方法論に焦点を当てている [47]。ただし、FJSP に比べて FJSST の複雑さが増していることを考えると、これらの手法をモデルに直接適用できるかどうかは不明である。したがって、量子アニーリング機能を維持しながら大規模モデルを処理できる解決方法が必要である。

4. 3 量子アニーリングを用いた組合せ最適化ソルバー

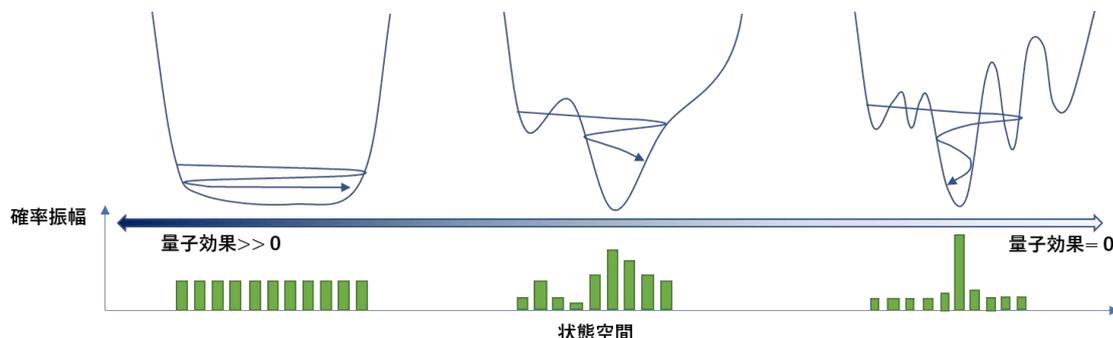
4. 3. 1 量子アニーリング

量子アニーリングマシンは、課題としている問題に対して最も適した解を見つける組合せ最適化問題を解くために利用できるコンピュータと言われている。組合せ最適化問題の例としては、セールスマンが営業先のすべての都市を訪問して出発点に戻ってくるときに移動距離が最小になるような経路を求める巡回セールスマン問題などが知られている。

量子アニーリングは 1998 年に東京工業大学の西森教授らにより提案された [48]。イジングモデルと呼ばれる 0 と 1 の値を取る多変数二次式の最小値を求める問題に変換することにより、組合せ最適化問題を解く。図 4. 4 に示すように、量子ゆらぎの性質を用いたトンネル効果による状態推移により、通常であれば初期値からスタートして付近にある局所 5 解に陥ることが、量子トンネル効果を利用した場合は大域的な最小解までジャンプして辿り着くことが可能である。

量子ビットは、QPU を構成する超伝導ループの最低エネルギー状態を表す。これらの状態には、循環電流と対応する磁場がある。古典的ビットと同様に、量子ビットは 0 または 1 の状態になる。しかし、量子ビットは量子オブジェクトであるため、0 状態と 1 状態が同時に重なることがある。量子アニーリングプロセスの終了時に、各量子ビットは重ね合わせ状態から（古典的な状態の）0 または 1 になる。このプロセスは、図 4. 4 のようなエネルギー図で視覚化できる。この図は時間とともに変化する。最初に、最小値が 1 つだけの谷が 1 つあるだけである。量子アニ

ーリングプロセスが実行され、障壁が上昇し、これによりエネルギー図が二重井戸型ポテンシャルに変わる。ここで、左の谷の低点は0状態に対応し、右の谷の低点は1状態に対応する。量子ビットは、焼きなましの終わりにこれらの谷の一つに行き着く。



Source: <https://amplify.fixstars.com/ja/techresources/annealing-method/>

図 4. 4 量子アニーリングプロセスの実行に伴うエネルギーの変化[49]

4. 3. 2 量子アニーリングを用いた Leap ハイブリッドソルバー

量子アニーリング機能を維持しながら大規模モデルを処理できる解決方法が必要であることを前述した。D-Wave Leap のハイブリッドソルバー（以下 LHS）によってサポートされる Constrained Quadratic Model（以下 CQM）ソルバーは、古典的なコンピューティング技術と量子アニーリング技術を組み合わせたクラウドベースの量子コンピューティングサービスである [50]。このアプローチは、古典的なコンピューティングおよび量子コンピューティングの両リソースを利用して大規模な問題を解決し、量子アニーリングの速度の利点を維持しながら、現在の量子コンピューティング技術のいくつかの制限も緩和するものである [51]。2022 年 4 月の時点で、LHS の CQM ソルバーは、バイナリ、整数、および実数型の 500,000 個の変数で制約を表現するリッチ言語をサポートしており、機器のメンテナンス、作業員、空港のスケジュール設定など、さまざまなジョブショップのスケジュール問題に適用されている [52]。ハミルトニアン生成方法と LHS のハイブリッドヒューリスティックの詳細な使用法はブラックボックスではあるが、産業規模のアプリケーション向けの独自のソリューションである。Schworm らによる最近の研究では、問題解決能力を実証するためにさまざまなモデルと手法を使用して、FJSP を解くため LHS ソルバーをテストした [53]。ただし、4. 2 節で説明したように、FJSST は FJSP よりも大幅に複雑であるため、その結果は単純に適用できない。本研究では、以下の実験を通じて LHS が FJSST モデルをどのように解決するかを実証し、現実世界の生産計画のための実用的なスケジューリングヒューリスティックとしてのその可能性を示す。

量子アニーリングは組合せ最適化問題を高速に解くことができるため、機械学習などの人工知能にも応用ができるとして注目を集めている。2011 年に D-Wave Systems 社から量子アニーリングを用いた 128 量子ビットの商用量子コンピュータ D-Wave One が発売された。2013 年には Google と NASA などが共同で、512 量子ビットの D-Wave Two を用いて研究を行う人工知能

研究所が立ち上げられた。2017年にはD-Waveの量子コンピュータは2,000量子ビットの規模にまで拡張されており、今後のさらなる技術開発が注目されている [54]。近年量子アニーリング技術の発展により、ある範囲の最適化問題が解けるようになってきている。本生産システムでは、量子アニーリングを用いて組合せ最適化によるスケジューリングを提案する。本研究で用いた量子アニーリングマシンはD-WaveのLeap's Hybrid Solver (以下LHS)であり、量子アニーリングマシンと従来コンピュータを組み合わせることで、量子ビットを10,000まで見かけ上増やすことを可能としたソルバーである [55]。以下にLHSの概要について述べる。

① LHS の特徴：

LHSのハイブリッドソルバーは、量子処理ユニット(QPU)によって直接解決される入力よりもはるかに大きい入力を受け入れることができる。これらは、QPUのユニークな機能を活用して適切な解をすばやく見つけるように設計されている。

② LHS の運用：入力

D-Waveの標準バイナリ二次モデル(BQM)形式で定式化された、二次形式非制限二値変数最適化(QUBO)またはイジングモデルを入力する。2022年のバージョンでは、入力変数の最大値は、 $n=10,000$ ノードを含む完全グラフに対応している。さらに、2022年4月の時点で、LHSのCQMソルバーは、バイナリ、整数、および実数型の500,000個の変数で制約を表現するリッチ言語をサポートしている。

③ LHS の運用：出力

ポートフォリオ内のすべてのソルバーが見つけた解のうち、指定された制限時間内で実行される最も低エネルギーの解を出力する。

④ LHS の仕組み：

ハイブリッドソルバーには、古典コンポーネントと量子コンポーネントの両方が含まれている。入力Qを受け取ると、ポートフォリオフロントエンドは、Qを使って作業する193つ以上のソルバーを選択し、CPUまたはGPUのコレクション上で並列実行する。その動作中に、各古典コンポーネントはいくつかの量子クエリをD-Wave 2000QのQPUで直接解くのに十分小さいQの部分的な表現に定式化して用いる。最終的に見つかった最良の解をユーザに転送する。

4. 4 量子アニーリングを適用するFMS加工セルの数理モデル化

4. 4. 1 量子アニーリングを適用するSSPの数理モデル化

本研究のSSPは、マシンのグループでスケジュールする必要がある一連のジョブ $J = \{J_1, J_2, \dots, J_N\}$ によって定義できる。各ジョブ J_i は、特定の順序で処理する必要がある三つの操作で構成される。

$$J_i = \{O_{i1}(\text{pre-setup}) \rightarrow O_{i2}(\text{manufacturing}) \rightarrow O_{i3}(\text{post-setup})\} \cdot \cdot \cdot \quad (4. 1)$$

表記を簡略化するために、すべてのジョブの操作を規定の順序で列挙する。

$$J_1 = \{O_1 \rightarrow O_2 \rightarrow O_3\}$$

$$\begin{aligned}
J_2 &= \{O_4 \rightarrow O_5 \rightarrow O_6\} && \dots (4.2) \\
&: \\
J_N &= \{O_{3N-2} \rightarrow O_{3N-1} \rightarrow O_{3N}\}
\end{aligned}$$

オペレーション O_i の処理時間は、 $i = 1, 2, \dots, 3N$ の正の整数である p_i で表される。特に、ジョブの事前段取りと事後段取りの処理時間は固定されている。各ジョブの製造(manufacturing)の処理時間は異なる。AMR は特別な装置を必要とせずすべての事前段取り (pre-setup) および事後段取り (post-setup) の操作を処理し、すべての製造 (manufacturing) は MC によって処理される。ここで、それぞれのジョブ (製造オブジェクト) には異なるツールセットが必要である。次の製造 (manufacturing) に必要なツールセットが MC のマガジンに用意されていなければならないとする。したがって、MC は製造前にツール切り替えと呼ばれる追加の事前操作を実行する必要がある。各ジョブに必要なツールセットは、それぞれのジョブ毎に提供される。各ジョブに必要なものが一つのツールセットだけであるという単純なケースを考える。各ジョブ j_i に必要なツールセット L_i とする。

$$L_i = \{l_{i1}, l_{i2}, \dots, l_{i\xi}\} \quad \dots (4.3)$$

通常、ツールの切り替えはマガジンから不要なツールをアンロードし、他の必要なツールをマガジンにロードすることを意味する。アンロードとロードの両方を含むこのようなツール切り替えを、完全なツール切り替えとして定義する。ただし、すべての製造オペレーションの前に完全なツール切り替えが必要なわけではない。たとえば、二つの製造オペレーション i_1 と i_2 があり、 i_1 が何れかの MC によって処理され、 i_2 が同じ MC によって処理され、加えて $L_{(i1)} \subset L_{(i2)}$ である場合、 i_1 で使用されるツールを保持し、オペレーション i_2 で追加の必要なツールをロードすることができる。不完全なツール切り替えのアンロードまたはロードのいずれかを含むツール切り替えを定義する。もし、二つのオペレーションの間に他の製造オペレーションが開始されていない場合、片方の製造オペレーションはもう一つの製造オペレーションの隣にある。二つの製造オペレーション i_1 とその隣接する i_2 について考えみると、以下の説明が推測できる。

- $L_{i_1} \cap L_{i_2} = \emptyset$ ならば、 i_1, i_2 は異なる MCs によって処理されるため、 i_1 と i_2 の間でツールスイッチングする必要はない。
- $L_{i_1} \cap L_{i_2} \neq \emptyset$ ならば、 i_1, i_2 は異なる MCs によって処理されるため、 i_1 と i_2 の間で完全なツールスイッチングが必要である。
- $L_{i_1} \subset L_{i_2}$ または $L_{i_1} \supset L_{i_2}$ ならば、 i_1, i_2 は両方とも同じ MC によって処理されるため、 i_1 と i_2 の間の不完全なツールスイッチングが必要である。

- $L_{i_1} = L_{i_2}$ ならば, i_1, i_2 は両方とも同じ MC によって処理されるため, i_1 と i_2 の間でツールスイッチングする必要はない.
- L_{i_1}, L_{i_2} のどちらも他方のサブセットではなく, i_1, i_2 の両方が同じ MC によって処理されるならば, i_1 と i_2 を完全なツールスイッチングが必要である.
- 製造オペレーションが一部の MC での最初のオペレーションであるならば, この MC の初期設定として不完全なツールスイッチングが必要である.

・・・ (4. 4)

モデルの単純化のため, 全てのツール切り替えは MC のみによって処理されるとする. 3 機の MC と 2 台の AMR があると想定する. 同じ種類のマシン間で能力に違いは無いものとする.

$$M_M = \{MMC_0, MMC_1, MMC_2\} \text{ for any operation } i \text{ such that } i \equiv 2 \pmod{3};$$

・・・ (4. 5)

$$\text{and } M_A = \{AMR_0, AMR_1\} \text{ for any operation } i \text{ such that } i \not\equiv 2 \pmod{3}.$$

すべてのマシンが停止することなく動作し続けることができ, さまざまなオペレーションに必要な運搬時間はかからないものとする. 目的は全てのオペレーションを有効な順序でスケジューリングして, 最後のアクティブなオペレーションの終了時間であるスケジュールの長さ (メイクスパン) を最小化することとする.

4. 4. 2 数理モデルの QUBO 行列フォーマットへの変換

量子アニーリングマシンで解ける二次非制約二値変数最適化 (QUBO : Quadratic Unconstrained Binary Optimization) 問題の行列フォーマットに数理モデルを変換する. 量子アニーリングは, 量子ゆらぎを使用するプロセスによって, 特定の目的関数のグローバル最小値を見つけるためのメタヒューリスティックである [48][56]. これは主に最適化問題, 特にイジングモデルで説明できる問題の解決に使用される. このイジングモデルは, 通常は略して QUBO と呼ばれる二次の制約無しバイナリ最適化問題に相当する.

加工セルの SSP 数理モデルを LHS に実装する前に, モデルの制約を QUBO 形式に変換する必要がある. この方法は, QUBO を拡張する [57][58][59]. t_{max} を, 可能なメイクスパンの上限, つまり SSP 内のジョブの絶対期限を示す入力パラメータとする. バイナリ変数のセットは, 各操作とそのさまざまな可能な個別の開始時間, および割り当てられたマシンに必要である.

機械 j を特定し, 開始時間 t を設定して, ジョブ i の実行“1”/非実行“0”を定義. 二値形式に変換する.

$$x_{i,j,t} = \begin{cases} 1: \text{operation } O_i \text{ is processed by machine } j \text{ starting from time } t \\ 0: \text{otherwise} \end{cases} \quad \dots (4. 6)$$

次に、得られた解が以下のすべての制約を満たすことを保証するために、一連のペナルティ関数が必要である。

制約条件 1 : ジョブ i はいずれかの機械 M_M , AMR M_A で一度だけ実行されるものとする
変数 $x_{i,j,t}$ の定義により、固定操作の場合、あるマシンで一度だけ処理できる。

$$\sum_{j \in M_A, t \leq t_{max}} x_{i,j,t} = 1 \text{ for each } i \not\equiv 2 \pmod{3}; \quad \sum_{j \in M_M, t \leq t_{max}} x_{i,j,t} = 1 \text{ for each } i \equiv 2 \pmod{3} \quad \dots (4.7)$$

Lucas のイジングモデルの定式化に従って QUBO 行列フォーマットに変換すると、二次制約は次のように定義できる [51] .

$$\sum_{i \not\equiv 2 \pmod{3}} \left(\sum_{j \in M_A, t \leq t_{max}} x_{i,j,t} - 1 \right)^2 \text{ and } \sum_{i \equiv 2 \pmod{3}} \left(\sum_{j \in M_M, t \leq t_{max}} x_{i,j,t} - 1 \right)^2 \quad \dots (4.8)$$

他の制約条件を設定する。QUBO 行列に残り三つの制約条件を代入する。

制約条件 2 : ジョブ i はどの機械 j で、どの時間 t においても実行可能でなければならない。ただし、現在実行中のジョブがある場合、そのジョブが完了しなければ次のジョブは実行できない。

任意の時点で任意のマシンによって処理されるオペレーションは最大でひとつとする。どのマシン j でも、現在のオペレーションが終了していない場合は、別のオペレーションの処理を開始できないものとする。つまり、の開始時刻を示す全ての変数 x_{i_1, j, t_1} および x_{i_2, j, t_2} 、つまり次のオペレーションの開始時間は現在のオペレーションの終了時間の後であり、同時に 1 に等しくすることはできない。

$$\sum_{(i_1, t_1, i_2, t_2) \in C_2^A} x_{i_1, j, t_1} x_{i_2, j, t_2} = 0, \text{ for each } j \in M_A \quad \dots (4.9)$$

$$\sum_{(i_1, t_1, i_2, t_2) \in C_2^M} x_{i_1, j, t_1} x_{i_2, j, t_2} = 0, \text{ for each } j \in M_M \quad \dots (4.10)$$

制約条件 3 : ジョブ i の順序に従う。“pre-setup”→“manufacturing”→“post-setup”

$$C_2^A := \{(i_1, t_1, i_2, t_2) \mid i_1 \neq i_2 \text{ and } i_1 \equiv i_2 \not\equiv 2 \pmod{3}, t_1 < t_2 < \min\{t_1 + p_{i_1}, t_{max}\}\} \quad \dots (4.11)$$

$$C_2^M := \{(i_1, t_1, i_2, t_2) \mid i_1 \neq i_2 \text{ and } i_1 \equiv i_2 \equiv 2 \pmod{3}, t_1 < t_2 < \min\{t_1 + p_{i_1}, t_{max}\}\}$$

ジョブ内の操作の順序に従う必要がある。

この制約の QUBO の定式化は、制約条件 2 に似ている。たとえば、ジョブ j_i の場合、事前段取りオペレーションが終了していない場合は、MC が製造オペレーションを開始できない。したがって、そのような種類の状況を示す全ての変数を同時に 1 に等しくすることはできない。

$$\sum_{(j_1, j_2, t_1, t_2) \in C_3^A} x_{i, j_1, t_1} x_{i+1, j, t_2} = 0, \text{ for each } i \equiv 1 \pmod{3} \quad \dots \dots (4.12)$$

$$\sum_{(j_1, j_2, t_1, t_2) \in C_3^M} x_{i, j_1, t_1} x_{i+1, j, t_2} = 0, \text{ for each } i \equiv 2 \pmod{3} \quad \dots \dots (4.13)$$

$$C_3^A := \{(j_1, j_2, t_1, t_2) \mid j_1 \in M_A \text{ and } j_2 \in M_M, t_1 < t_2 < \min\{t_1 + p_i, t_{max}\}\} \quad \dots \dots (4.14)$$

$$C_3^M := \{(j_1, j_2, t_1, t_2) \mid j_1 \in M_M \text{ and } j_2 \in M_A, t_1 < t_2 < \min\{t_1 + p_i, t_{max}\}\}$$

制約条件 4 : 機械 j ではジョブ i の必要な工具 L_i をジョブの開始前に工具マガジン内に格納していなければならない。

必要な工具は、製造前にマシンのマガジンに設定する必要がある。一部の MC が何らかのツール 1 を使用して製造操作を処理している場合、ツール 1 を必要とする他の操作は、現在の操作が終了するまでどのマシンでも開始できないものとする。

$$\sum_{(i_1, i_2, j_1, j_2, t_1, t_2) \in C_4} x_{i_1, j_1, t_1} x_{i_2, j_2, t_2} = 0 \quad \dots \dots (4.15)$$

t_h が不完全な工具切り替えの時間コストを示し、 t_f が完全な工具切り替えの時間コストを表す。

$$C_4^{d1} := \{(i_1, i_2, j_1, j_2, t_1, t_2) \mid i_1 \equiv i_2 \equiv 2 \pmod{3} \text{ and } i_1 \neq i_2 \text{ s.t. } L_{i_1} \cap L_{i_2} = \emptyset, j_1 \neq j_2 \in M_M, t_1 < t_2 < \min\{t_1 + p_{i_1}, t_{max}\}\}$$

$$C_4^{d2} := \{(i_1, i_2, j_1, j_2, t_1, t_2) \mid i_1 \equiv i_2 \equiv 2 \pmod{3} \text{ and } i_1 \neq i_2 \text{ s.t. } L_{i_1} \cap L_{i_2} \neq \emptyset, j_1 \neq j_2 \in M_M, t_1 < t_2 < \min\{t_1 + p_{i_1} + t_f, t_{max}\}\}$$

$$C_4^{s3} := \{(i_1, i_2, j_1, j_2, t_1, t_2) \mid i_1 \equiv i_2 \equiv 2 \pmod{3} \text{ and } i_1 \neq i_2 \text{ s.t. } L_{i_1} \subset L_{i_2}, j_1 = j_2 \in M_M, t_1 < t_2 < \min\{t_1 + p_{i_1} + t_h, t_{max}\}\}$$

$$C_4^{s4} := \{(i_1, i_2, j_1, j_2, t_1, t_2) \mid i_1 \equiv i_2 \equiv 2 \pmod{3} \text{ and } i_1 \neq i_2 \text{ s.t. } L_{i_1} = L_{i_2}, j_1 = j_2 \in M_M, t_1 < t_2 < \min\{t_1 + p_{i_1}, t_{max}\}\}$$

$$C_4^{s5} := \{(i_1, i_2, j_1, j_2, t_1, t_2) \mid i_1 \equiv i_2 \equiv 2 \pmod{3} \text{ and } i_1 \neq i_2 \text{ s.t. } (L_{i_1} \cup L_{i_2} \neq L_{i_1}) \wedge (L_{i_1} \cup L_{i_2} \neq L_{i_2}), j_1 = j_2 \in M_M, t_1 < t_2 < \min\{t_1 + p_{i_1} + t_f, t_{max}\}\} \quad \dots \dots (4.16)$$

$C_4^{s3} \cup C_4^{s4} \cup C_4^{s5}$ は C_M^2 より強い制約であることに注意する。最後に、すべてのペナルティ関数の QUBO 式を合計する。一緒に、目的関数（エネルギーハミルトニアン）を取得する。プログラミングにおいて、QUBO の定式化のパフォーマンスを向上させるために、Python ライブラリ PyQUBO を使用できることが Takahashi[60], Zaman[61]等により報告されている。

4. 4. 3 量子アニーリングを適用する FJSST の数理モデル化

本項では、FJSST におけるより複雑な問題を表現するため FJSST の数学的モデルを提案する。本数理モデルはより単純な問題を扱ったの研究成果[62][63][64][65]に基づき、より複雑な FJSST に適用するために考案されたものである。以前の研究では、より複雑な FJSST モデルと比較して、FJSP および SSP へのより単純な数理モデルを検討していた。たとえば、Özpeynirci らの数理モデルでは、タスクシーケンスの複雑さやマシンの多様性が考慮されていなかった[53]。同様に Beezão らの数理モデルは、タスクシーケンスの複雑さ、マシンの多様性、ツールの多重性という三つの側面すべてを考慮していなかった[62]。

新たな FJSST 数理モデルにおいて、ジョブのセットは $\mathbf{J} = \{J_1, J_2, \dots, J_N\}$ で表される。各ジョブ J_j は、完了する必要がある多数のタスク $\{t_1^j, t_2^j, \dots, t_{n_j}^j\}$ で構成される。各ジョブの少なくとも一つのタスクが manufacturing に関連している。 T をすべてのジョブにわたるすべてのタスクのセット、 T_{ma} をすべてのジョブにわたる manufacturing タスクのセットとする。マシンのタイプごとに同一のマシンが複数あり、各タイプは特定のタスク用に指定されている。 M をすべてのマシンの集合とし、 M_t をタスク t を処理できるマシンの集合とする。多様な製造には多くの工具が必要である。工具の必要性は、そのカテゴリ内の特定の工具に関係なく、manufacturing プロセス中に特定のカテゴリの工具が必要であることを示す。したがって、同じカテゴリに属するツールが複数存在する可能性がある。二つのツール l_1 と l_2 が同じカテゴリにある場合、 l_1 は l_2 のコピーであると言い、その逆も同様である。機械では manufacturing タスクを開始する前に、必要なすべてのツールをマガジンにロードする必要がある。これは、必要なすべてのツールが使用されることを意味する。タスク t に必要なツールのセットは L_t で示される。 L_t はツールのカテゴリではなく、ツールの個々のコピーを指す。特に指定のない限り、本研究ではツールのセットに言及するときはツールのカテゴリではなく、ツールの実際のコピーを指す。ストレージ内の各カテゴリのコピーの数は異なる場合があり、一部の manufacturing タスクでは同じカテゴリのツールの複数のコピーが必要になる。ただし、簡単にするために、すべてのカテゴリに同じ数のコピーがあり、各 manufacturing タスクに必要なコピーは一つのカテゴリから一つだけであると仮定する。マガジン内の他のツールはタスク t には使用できない。このような場合に備えて、次のフレーズを定義する。もし、ツール l が t を処理しているマシンのマガジン内に存在しているが、タスク t のために使用されていない場合、ツール l はタスク t 中に含まれる。もし、タスク t 中にツール l が含まれている場合は、二つの可能性がある。 $l \in L_t$ であるが、タスク中に l の別のコピーが代わりに使用される場合と、 $l \notin L_t$ である場合である。

すべてのタスクを一つのセットに入れることができるため、通常はインデックスによってタスクを区別するだけで済み、 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_{n_1+\dots+n_N}\}$ などのタスクに関連するすべての上付き文字を省略できる。次に、以下の変数を定義する。

- e_t : an integer representing the completion time of any task $t \in T$.
- e_f : an integer representing the completion time of all tasks and jobs.

- $x_{t_1 t_2 m} = \begin{cases} 1: & \text{machine } m \in M \text{ processes both tasks } t_1 \in T \text{ and } t_2 \in T, \\ & \text{with } t_2 \text{ being the successor of } t_1 \\ 0: & \text{otherwise} \end{cases}$
- $y_{tl} = \begin{cases} 1: & \text{if tool } l \in L \text{ is in the machine's magazine which it processes task } t \in T_{ma} \\ 0: & \text{otherwise} \end{cases}$
- $z_{tl} = \begin{cases} 1: & \text{if tool } l \in L \text{ is loaded into the machine's magazine} \\ & \text{just before it begins processing task } t \in T_{ma} \\ 0: & \text{otherwise} \end{cases}$
- $f_{tm} = \begin{cases} 1: & \text{if machine } m \in M_t \text{ processes task } t \in T \text{ as its first task} \\ 0: & \text{otherwise} \end{cases}$
- $w_{tm} = \begin{cases} 1: & \text{if machine } m \in M_t \text{ processes task } t \in T \text{ as its last task} \\ 0: & \text{otherwise} \end{cases}$
- $b_{tm} = \begin{cases} 1: & \text{if machine } m \in M_t \text{ processes task } t \in T \\ 0: & \text{otherwise} \end{cases}$
- $d_{t_1 t_2 l} = \begin{cases} 1: & \text{if task } t_1 \in T \text{ is completed before task } t_2 \in T, \text{ and tool } l \in L \text{ is in the magazine of the machine} \\ & \text{that processes } t_1 \text{ and also the magazine of the machine that processes } t_2 \\ 0: & \text{otherwise} \end{cases}$

次に、以下のパラメータが与えられる。

- \mathcal{M} : a sufficiently large constant.
- c_t : the processing time of task $t \in T$.
- c_s : the switching time for one tool.
- C : the magazine capacity of a machining center (MC).

モデルは次のとおりである。

Minimize e_f

subject to

$$\sum_m \sum_{\substack{t_1 \in T \\ \text{s.t. } t_1 \neq t_2}} x_{t_1 t_2 m} \leq 1, \text{ for } \forall t_2 \in T \quad \dots (4.17)$$

$$\sum_m \sum_{\substack{t_2 \in T \\ \text{s.t. } t_2 \neq t_1}} x_{t_1 t_2 m} \leq 1, \text{ for } \forall t_1 \in T \quad \dots (4.18)$$

$$2x_{t_1 t_2 m} - b_{t_1 m} - b_{t_2 m} \leq 0, \text{ for } \forall t_1, t_2 \in T \text{ s.t. } t_1 \neq t_2, \text{ and } \forall m \in M \quad \dots (4.19)$$

$$\sum_{\substack{(t_1, t_2) \in T \times T \\ \text{s.t. } t_1 \neq t_2}} x_{t_1 t_2 m} + 1 - \sum_{t \in T} b_{tm} = 0, \text{ for } \forall m \in M \quad \cdot \cdot \cdot (4.20)$$

$$\sum_{t_2 \in T} x_{t_1 t_2 m} - \sum_{t_2 \in T} x_{t_2 t_1 m} \leq f_{t_1 m}, \text{ for } \forall t_1 \in T, \text{ and } \forall m \in M \quad \cdot \cdot \cdot (4.21)$$

$$\sum_{t_2 \in T} x_{t_2 t_1 m} - \sum_{t_2 \in T} x_{t_1 t_2 m} \leq w_{t_1 m}, \text{ for } \forall t_1 \in T, \text{ and } \forall m \in M \quad \cdot \cdot \cdot (4.22)$$

$$\sum_{t \in T} f_{tm} \leq 1, \text{ for } \forall m \in M \quad \cdot \cdot \cdot (4.23)$$

$$\sum_{t \in T} w_{tm} \leq 1, \text{ for } \forall m \in M \quad \cdot \cdot \cdot (4.24)$$

$$\sum_{m \in M} f_{tm} \leq 1, \text{ for } \forall t \in T \quad \cdot \cdot \cdot (4.25)$$

$$\sum_{m \in M} w_{tm} \leq 1, \text{ for } \forall t \in T \quad \cdot \cdot \cdot (4.26)$$

$$x_{t_1 t_2 m} + y_{t_2 l} - y_{t_1 l} - z_{t_2 l} \leq 1, \text{ for } \forall t_1, t_2 \in T \text{ s.t. } t_1 \neq t_2, \forall m \in M, \text{ and } \forall l \in L \quad \cdot \cdot (4.27)$$

$$x_{t_1 t_3 m} + d_{t_1 t_2 l} + d_{t_2 t_3 l} - z_{t_3 l} \leq 2, \text{ for } \forall t_1, t_2, t_3 \in T_{ma} \text{ s.t. } t_1 \neq t_2 \neq t_3, \forall l \in L, \text{ and } \forall m \in M \quad (4.28)$$

$$e_{t_2} - e_{t_1} + \mathcal{M}(1 - x_{t_1 t_2 m}) - c_{t_2} - c_s \sum_l z_{t_2 l} \geq 0, \text{ for } \forall t_1, t_2 \in T_{ma} \text{ s.t. } t_1 \neq t_2, \forall m \in M, \text{ and } \forall l \in L \quad \cdot \cdot \cdot (4.29)$$

$$e_{t_2} - e_{t_1} + \mathcal{M}(1 - x_{t_1 t_2 m}) - c_{t_2} \geq 0, \text{ for } \forall t_1, t_2 \notin T_{ma} \text{ s.t. } t_1 \neq t_2, \text{ and } \forall m \in M \quad \cdot \cdot (4.30)$$

$$e_t - c_t - c_s \sum_{l \in L} z_{tl} \geq 0, \text{ for } \forall t \in T_{ma} \quad \cdot \cdot \cdot (4.31)$$

$$e_t - c_t \geq 0, \text{ for } \forall t \notin T_{ma} \quad \cdot \cdot \cdot (4.32)$$

$$e_{t_{i+1}^j} - e_{t_i^j} \geq c_{t_i^j}, \text{ where task } t_{i+1}^j \text{ is the successor of the task } t_i^j \text{ within job } J_j \in \mathbf{J} \quad \cdot \cdot \cdot (4.33)$$

$$\sum_{l \in L_t} y_{tl} \geq 1, \text{ for } \forall t \in T_{ma} \quad \cdot \cdot \cdot (4.34)$$

$$z_{tl} = 0, \text{ if for } \forall t \in T, l \notin L_t \quad \cdot \cdot \cdot (4.35)$$

$$x_{t_1 t_2 m} = 0, \text{ if for any } t_1, t_2 \in T \text{ that } m \notin M_{t_1} \cap M_{t_2} \quad \dots (4.36)$$

$$y_{tl} \geq z_{tl}, \text{ for } \forall t \in T, \text{ and } \forall l \in L \quad \dots (4.37)$$

$$\sum_{l \in L_t} y_{tl} \leq C, \text{ for } \forall t \in T_{ma} \quad \dots (4.38)$$

$$\sum_{m \in M} b_{tm} = 1, \text{ for } \forall t \in T \quad \dots (4.39)$$

$$f_{tm} \leq b_{tm}, \text{ for } \forall t \in T, \text{ and } \forall m \in M \quad \dots (4.40)$$

$$w_{tm} \leq b_{tm}, \text{ for } \forall t \in T, \text{ and } \forall m \in M \quad \dots (4.41)$$

$$e_{t_2} - e_{t_1} + \mathcal{M}(1 - d_{t_1 t_2 l}) \geq c_{t_2}, \text{ for } \forall t_1, t_2 \in T_{ma} \text{ s.t. } t_1 \neq t_2, \text{ and } \forall l \in L_{t_1} \cap L_{t_2} \quad (4.42)$$

$$y_{t_1 l} + y_{t_2 l} \geq 2(d_{t_1 t_2 l} + d_{t_2 t_1 l}), \text{ for } \forall t_1, t_2 \in T_{ma} \text{ s.t. } t_1 \neq t_2, \text{ and } \forall l \in L_{t_1} \cap L_{t_2} \quad (4.43)$$

$$y_{t_1 l} + y_{t_2 l} \leq 1 + d_{t_1 t_2 l} + d_{t_2 t_1 l}, \text{ for } \forall t_1, t_2 \in T_{ma} \text{ s.t. } t_1 \neq t_2, \text{ and } \forall l \in L_{t_1} \cap L_{t_2} \quad (4.44)$$

$$f_{tm} + y_{tl} \leq z_{tl} + 1, \text{ for } \forall t \in T, \forall m \in M, \text{ and } \forall l \in L_t \quad \dots (4.45)$$

$$e_f \geq e_t, \text{ for } \forall t \in T \quad \dots (4.46)$$

提示された制約は、FJSST に対処するための完全なルールセットを提供する。制約 (4.17) と (4.18) は、各タスクを一つの先行タスクと一つの後続タスクに制限する。 $x_{t_1 t_2 m}$ の意味と x と b の関係は、制約 (4.19), (4.20), および (4.36) によって保証される。制約 (4.21) と制約 (4.22) はそれぞれ、MC 上の最初と最後のタスクを定義する。制約 (4.23) と (4.24) は、各 MC が持つ最初のタスクと最後のタスクを最大一つずつに制限する。制約 (4.25) と (4.26) により、タスクが MC 上で最初または最後になるのは一回のみであることが保証される。制約 (4.27) および (4.28) は、ツールスイッチングがいつ行われるかを指定する。制約 (4.29) および (4.30) は、必要なツールスイッチングを含む関連するすべてのタスクが完了するまでタスクの開始を禁止する。制約 (4.31) および (4.32) は、完了時間の観点から任意のタスク t の変数 e_t を定義する。制約 (4.33) は、この問題インスタンスに対して事前定義されたタスク順序を強制する。制約 (4.34), (4.35), および (4.37) は、製造が開始される前に必要なすべてのツールがマガジン内で利用可能であることを保証する。制約 (4.38) は、MC のマガジン内のツールの数とその容量を超えないことを保証する。制約 (4.39) では、すべてのタスクを完了する必要がある。 f_{tm} , w_{tm} , b_{tm} 間の関係は制約 (4.40) と制約 (4.41) によって定義される。制約 (4.42), (4.43) および (4.44) は、複数のマシンがマガジンに同じ工具を同時に持つことを禁止する。制

約 (4.45) は、すべてのマシンの初期ツール設定を指定する。制約 (4.46) は、すべてのタスクの完了時間を定義する。

4.4.4 実用的なデータセットの準備

提案したスケジューリングシステムは、実際の FMS の運用環境を考慮し、パーツ、ツールカテゴリ、ジョブの三つのデータセットを図 4.2 に示す FMS のログから抽出した。「部品」データセットには一意の識別子 (部品 ID)、タスクタイプ (タスク番号)、処理時間 (タスク時間)、および加工される各部品に必要なリソースが含まれている。タスク番号はワークセッティングステーション (以下 WSS) での pre-setup タスクを 1、MC での manufacturing を 2、WSS における製品の post-setup タスクを 3 に分類した。「工具カテゴリ」データセットは、manufacturing タスクの部品 ID ごとに必要な工具カテゴリに焦点を当てており、主に部品 ID 列とツールカテゴリ列で構成した。通常、単一の部品 ID を製造するには、複数のツールカテゴリが必要である。最後に、「ジョブ」データセットは、ジョブ自体を識別するジョブ番号や加工対象を識別する部品番号などの製造オーダーの詳細に焦点を当てており、同じ部品を複数回オーダー可能とする。図 4.5 に、これらのデータ関係を示す。パレット搬送車の稼働時間は AMR や MC のタスクに比べて比較的短いため、タスクやマシンタイプとしては表現していない。工具交換では、工具はワークと同様にパレットに載せられて MC に移動され、主軸とパレットの間で直接交換される。また、各ツールには、評価目的で割り当てられたすべての製造作業を完了するのに十分な寿命があると想定する。

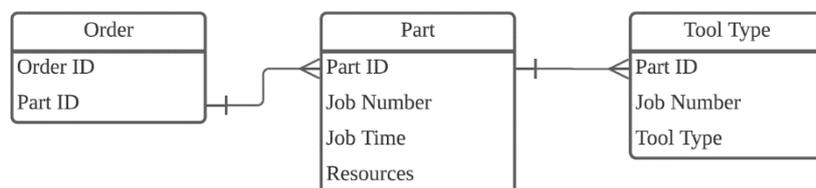


図 4.5 FMSデータセットの各データ要素の関係

4.4.5 インスタンスの説明

実験は 10 個のジョブから始まり、各ジョブには特定の順序で完了する必要がある三つのタスクが含まれている。

$$J_j = \{t_1^j(\text{pre-setup}) \rightarrow t_2^j(\text{manufacturing}) \rightarrow t_3^j(\text{post-setup})\} \quad \dots (4.47)$$

この製造システムは AMR と MC の二種類の機械で構成されている。具体的には、AMR が 2 台と MC が 3 機ある。4.4.1 項で概説されているように、pre-setup タスク、manufacturing タスク、post-setup タスクの間には三つの主な違いがある。

- AMR は pre-setup および post-setup のタスクを処理し、MC は manufacturing タスクを処理する。

- pre-setupおよびpost-setupのタスクの処理時間は固定されているが、manufacturingタスクの処理時間は変動する。
- pre-setupおよびpost-setupのタスクはツールなしで完了できるが、各manufacturingタスクには特定のツールセットが必要であり、タスクを開始する前に工具マガジンに装填する必要がある。

ツールには、それぞれ2部ずつ12のカテゴリがある。manufacturingタスクを完了するには、五つのツールカテゴリが必要であり、各カテゴリのコピーが一つ必要である。あるMCから別のMCへ、またはストレージからMCへツールを切り替える場合、切り替えにかかる時間は、その時点で切り替えられるツールの数に比例する。1分間に切り替えられるツールは1つだけであるとする。すべてのジョブには、それぞれ15分かかるpre-setupタスクとpost-setupタスクがあると仮定する。これらのジョブのmanufacturingタスクには、30分、45分、または60分のいずれかがかかる。各AMRがアイドル時間なしで20のセットアップタスクを処理する場合、pre-setupおよびpost-setupのタスクが合計20あるため、すべてのセットアップタスクは150分で完了できる。ただし、これはmanufacturingタスクの完了が条件となる。すべてが順調に進んだ場合、このデータセットの最適化の所要時間は150分となるが、モデルではそれが実現できない可能性がある。

本項で説明したインスタンスは、図4.2に示した実際のFMSから抽出されたが、実験の複雑さを軽減し、限られた時間内で十分な結果を保証するために、実際のFMSに含まれる情報の一部を簡略化した。同じジョブとタスク情報を持つインスタンスが五つあるが、各インスタンスには一意のツールのリストが必要とした。ツールリストはPythonを使用してランダムに生成される。次の二つの表に、実験で使用されるインスタンスを表す。表4.1はジョブ情報を定義しており、表4.2は工具情報を定義している。

表4.1 ジョブ情報

| Job ID | Pre-setup (min) | Manufacturing (min) | Post-setup (min) |
|--------|-----------------|---------------------|------------------|
| 1 | 15 | 45 | 15 |
| 2 | 15 | 30 | 15 |
| 3 | 15 | 30 | 15 |
| 4 | 15 | 60 | 15 |
| 5 | 15 | 45 | 15 |
| 6 | 15 | 45 | 15 |
| 7 | 15 | 45 | 15 |
| 8 | 15 | 45 | 15 |
| 9 | 15 | 60 | 15 |
| 10 | 15 | 30 | 15 |

表 4. 2 工具情報

| Job ID | Necessary Tool Categories for Manufacturing |
|--------|---------------------------------------------|
| 1 | t02, t07, t09, t11, t12 |
| 2 | t04, t05, t09, t11, t12 |
| 3 | t05, t06, t10, t11, t12 |
| 4 | t03, t04, t06, t07, t11 |
| 5 | t01, t05, t06, t10, t11 |
| 6 | t02, t07, t08, t10, t12 |
| 7 | t02, t05, t06, t07, t08 |
| 8 | t01, t07, t08, t11, t12 |
| 9 | t02, t03, t04, t06, t09 |
| 10 | t02, t09, t10, t11, t12 |

4. 5 量子アニーリングによる加工セルの組合せ最適化スケジュール

4. 5. 1 実験計画

本研究における実験の目的は、LHS を使用して FJSST 数理モデルを効率的に解決できることを実証することである。これらの実験で使用するインスタンスは、現実世界のデータセットに基づいている。動作をテストするために、さまざまな LHS 設定をテストする。さらに、LHS の実用性を確認するには、Python MIP とディスパッチングルールの二つのメソッドを含む比較用のベンチマークが必要である。Python MIP には従来の検索アルゴリズムを使用する。これらのアルゴリズムは理論的には最適な解決策を見つけることができるが、FJSST の複雑さにより、妥当な時間枠内で解決するのは現実的に困難である。LHS と比較すると LHS の速度の利点が明らかになると予想される。ディスパッチングルールは、実際の工場生産で一般的に使用されている。ディスパッチングルールと LHS を比較すると、LHS によってもたらされる実際的な問題解決の改善と品質上の利点が浮き彫りになると推察される。さらに、実験に用いるインスタンスと使用するソルバーの具体的な設定についても説明する。

4. 5. 2 CBC を用いた Python MIP

Python MIP は、混合整数プログラミング手法を使用して最適化問題を解決するのに役立つライブラリである [66]。線形計画法および二次計画法、混合整数線形計画法および二次計画法、制約計画法など、さまざまな種類の問題をサポートしている。このライブラリは商用およびオープンソースの CPLEX, Gurobi, CBC (Coin-or branch and cut) などのさまざまなソルバーと連結できる。

本研究では、無料で誰でもアクセスできる CBC ソルバーを使用した。ブランチ・アンド・カット、ブランチ・アンド・プライス、ブランチ・アンド・バウンドなどの高度なアルゴリズムを採用して、MIP 問題の解決空間を効果的にナビゲートしながら、実行不可能な解決策を迅速に検出

して削除する。ただし、十分な計算時間が与えられれば、CPLEX や Gurobi などの商用ソルバーのパフォーマンスが向上する可能性が高くなる。公平性と有意義な結果を確保するために、今後の実験ではより広範囲のソルバーを調査し、ソルバーごとにテストプログラムを最適化する。これにはさまざまな数値解析およびプログラミング手法が含まれることに注意することが重要だが、これは本研究の焦点ではない。さらに、CPLEX を使用したパフォーマンスの有意義な例がいくつかある[56]。本研究において、CPLEX ソルバーと特定の実験プログラムに多大な労力を費やしたが、提案したモデルと比較して単純なモデルを解くのに 700 ~ 3,600 秒を要した。これは市販のソルバーを使用したとしても、現在のモデルのようなより困難なモデルを解く場合、適切な時間内に望ましい結果が得られる保証がないことを示唆している。

4. 5. 3 ディスパッチングルール

ディスパッチングルールは、マシンまたは生産プロセスでタスクやジョブを処理する順序を決定するためのスケジューリングに使用されるガイドラインである。これらは、複数のタスクまたはジョブが同じリソースをめぐる競争し、効率的なリソース割り当てが必要な場合に適用される。これらのルールは、特定の基準に基づいてタスクに優先順位を付け、それに応じてリソースを割り当てる。ディスパッチングルールにはさまざまな種類があるが、基本的な原則はすべて同じである。本項ではスケジュールを決定するためのいくつかの主なルールについて説明する。

- 最短処理時間 (SPT):
このルールは、他の必要なリソースに関係なく、処理時間のみに基づいてタスクまたはジョブに優先順位を付け、最も短いタスクまたはジョブが最初に処理される。
- 平均作業負荷 (AW):
同じカテゴリのマシン間で可能な限りバランスのとれたワークロードを維持する。同じタイプのマシンは同一であるため、この規則は合理的であると思われる。平均的なワークロードを使用すると、これらのマシンを一貫して保守するのに役立つ。
- プレファースト (PreF):
AMR は、post-setupのタスクに進む前に、pre-setupのタスクをすべて完了する必要がある。プレフィックスの完了を気にせずに manufacturing タスクを開始できるようにするには、pre-setupタスクを最初に完了することが望ましい。これらのタスクは他のタスクに依存しないためである。
- ストレージ ツール ベター (STB):
機械が次の manufacturing タスクに工具を必要とする場合、別の機械から工具を取り出すのではなく、工具のストレージから利用可能な工具を選択することを優先することが最善である。必要なツールがストレージにない場合、マシンはツールを切り替える前に、そのツールを使用している別のマシンが現在のタスクを完了するまで待つ必要がある。ツールスイッチングに使用できるマシンが複数ある場合は、現在のタスクを最初に完了するマシンを優先する。

これは、通常は製造時間が最も短い最も簡単なジョブから開始し、より困難なジョブは後回しにするというシナリオを想定している。このアプローチは実際の製造現場では実用的である。コストが低いジョブは通常、納期が早いため、最初に処理することが望ましいからである。ディスパッチングルールを選択は、タスクやジョブの性質、生産設定などのさまざまな要因によって異なる。適切なルールを選択すると、効率と生産性が大幅に向上するが、複雑なため難しい場合もある。実際の工場の状況に近い四つのルール（SPT, AW, PreF, STB）を選択する。これらのルールは以下 DIS と呼び、今後の比較実験で使用する。ただし、問題の NP 困難な性質により、これらはすべてのインスタンスに最適であるわけではないことに注意する。DIS の詳細は次のとおりである。これは、次のセクションで説明する特定のインスタンスと強く関連している。同じレベルの順序付きリストは順序が存在することを示し、同じレベルの順序なしリストは特定の順序がない（同時に実行できる）ことを示している。

1. 製造タスクの処理時間が短い順にジョブを並べる。二つのジョブの製造処理時間が等しい場合は、ジョブ ID に基づいてアルファベット順に並べる。この順序付けされたリストは、To-Do リストと呼ばれる。
 - AMR の場合:
 - 1) 対応する事前セットアップ タスクを ToDo リストにリストされている順序で完了し、ID に基づいてアルファベット順に AMR に割り当てる。
 - 2) 同じ順序でセットアップ後のタスクを開始する。該当するタスクの前処理タスク（manufacturing タスク）がすでに終了している場合は、直ちに開始する。それ以外の場合は、処理タスクが完了するまで待ってから開始する。利用可能な AMR にタスクを割り当てる。
 - MC の場合:
 - 1) ToDo リストに記載されている順序で製造タスクを完了し、ID に基づいてアルファベット順に順番に MC にタスクを割り当てる。
 - 2) 製造作業を開始する前に、加工条件が満たされていることを確認する。
 - i. 前処理（Pre-setup）が完了しているか確認する。そうでない場合は、完了するまで待つ。
 - ii. 必要なすべての製造ツールが割り当てられた MC の工具マガジンに存在するかどうかを確認する。工具が不足している場合は、保管場所から優先して取り出す。ツールがストレージにない場合は、他の MC からツールスイッチングを行う。他の MC が処理中の場合は、最初に終了する MC を待ってからツールを切り替える。複数の MC が同時に終了した場合は、ID が小さい MC から切り替えを行う。
 - iii. 製造タスクの処理を開始する。

2. メイクスパンとは、最初のセットアップ前タスクの開始から、すべてのジョブのすべてのタスクが終了した後の最後のセットアップ後タスクまでの期間を示す。

4. 5. 4 ソルバーの設定

本実験では Python MIP 用に一つ、LHS 用に三つ、ディスパッチングルール用に一つを含む合計五つのソルバーを設定し、評価した。CBC ソルバーの実行時間は 7,200 秒に制限した。実行時間を増やすと結果が大幅に改善される可能性があるが、2 時間のスケジュールを得るために追加の 1 時間の実行時間を犠牲にしても意味が無い。ディスパッチングルールのパフォーマンスを評価するために DIS ルールを選択する。CQM を使用してモデルを構築し、三つの異なるソルバー設定を使用して、LHS についてより有意義な結果を取得する。まず、設定 CQM_600 と CQM_300 をそれぞれ定義し、可能なメイクスパンの上限をそれぞれ 600 と 300 に設定し、実行時間制限を 60 秒に設定する。次に、CQM_600 と CQM_300 からの最良のメイクスパンの結果を用いて後続の LHS 実行で可能なメイクスパンの上限を確立し、実行時間を 120 秒に延長した。この設定は CQM_Imp で示され、CQM ソルバー用に改良された設定である。

CBC アルゴリズムと DIS は決定論的であるため、特定のインスタンスに対してこれらを繰り返しても、得られる解は変わらない。ただし、量子アニーリングのランダム性が存在するため、LHS からの解は実行のたびに变化する。したがって、設定ごとに CQM ソルバーを二回実行し、返されたすべての実行可能なソリューションを収集する。

4. 5. 5 実験結果

図 4. 6 は、LHS CQM ソルバーのさまざまな設定から得られた結果を示している。CQM_Imp は、可能なメイクスパンの上限が小さく、実行時間が長いため、三つの設定の中で最適なソリューションを提供する可能性がある。ただし、ランダムな性質があるため、動作は均一ではない。具体的には、CQM_300 の場合、分布はより大きな値に偏っており、均一性が欠けている。CQM_300 の偏りは、その分布を CQM_Imp の分布と比較することで明らかのように、上限が厳しい実行時間の欠如によるものである。さらに、CQM ソルバーのパフォーマンスは、グラフに示すように、同じ設定でもインスタンスごとに異なる。入力がランダムに生成されるため、この変動は合理的であり、その結果、より単純なインスタンスまたはより困難なインスタンスが生成される可能性がある。たとえば、すべての manufacturing タスクに同じ五つのツールが必要な場合、一機の MC にタスクが割り当てられなくなる可能性があり、全体のメイクスパンが増加する。一方、同じインスタンスに異なる CQM 設定が適用された場合の分布に示されているように、解空間が最適値に近づくにつれて、解の難易度は増加する。CQM_Imp の分布は、CQM_600 と比較して、指定した上限に近くなる。これは、CQM_Imp の設定が CQM_600 よりも厳しいためである可能性がある。三番目の例のように、優れた解決策が返されることもあるが、それらはランダムな出来事によるものである。最適なソリューションに近づくにつれて、大幅な改善を達成することがますます困難になる。これは最適化問題の性質にも当てはまる。

次に、LHS CQM ソルバーの表現として CQM_Imp を選択した。図4. 7は、Python MIP, DIS, および CQM_Imp の結果を示している。計算に2時間かかったにも関わらず、Python MIP は各インスタンスを失った。CBC アルゴリズムには最適なソリューションを提供する可能性もあるが、検索にはかなりの時間がかかる。残念ながら、FJSST の規模と複雑さのため、この処理時間は現実の生産計画に適用するには実用的でない。DIS の良好なパフォーマンスは、日々の生産での経験が必要であることを示している。この方法はシンプルで理解しやすく、得られる結果は比較的満足のいくものである。CQM_Imp は、インスタンスごとに利点の程度が異なるにもかかわらず、妥当な実行時間で一貫して他のパフォーマンスを上回った。図4. 7は、CQM_Imp が Python MIP より平均 52.1%, DIS より 7.9% 優れていることを示している。DIS に対する LHS の利点は、問題空間が小さいときはパフォーマンスの差異が小さいかもしれないが、DIS はその時点で利用可能な情報のみに基づくオンライン スケジューリングアルゴリズムであるため、ジョブの数が増加するにつれてより差異が顕著になるはずである。さらに、DIS の優れたパフォーマンスは、上記の経験に基づいたルール設定とインスタンスとの親密な関係による可能性がある。たとえば、DIS の AW ルールを使用する代わりに、同じ（またはほぼ同じ）ツールを必要とする短い時間の manufacturing タスクを同じ MC に割り当てる方が効率的である場合がある。また、pre-setup と post-setup のタスクのコストがジョブ間で異なる場合、DIS の PreF ルールは適切な選択ではない可能性がある。インスタンスの変化に適応するにはディスパッチングルールを再設計する必要があるが、LHS はモデルに基づいてすべてのケースを同等に解決するため、そのような適応は必要ない。

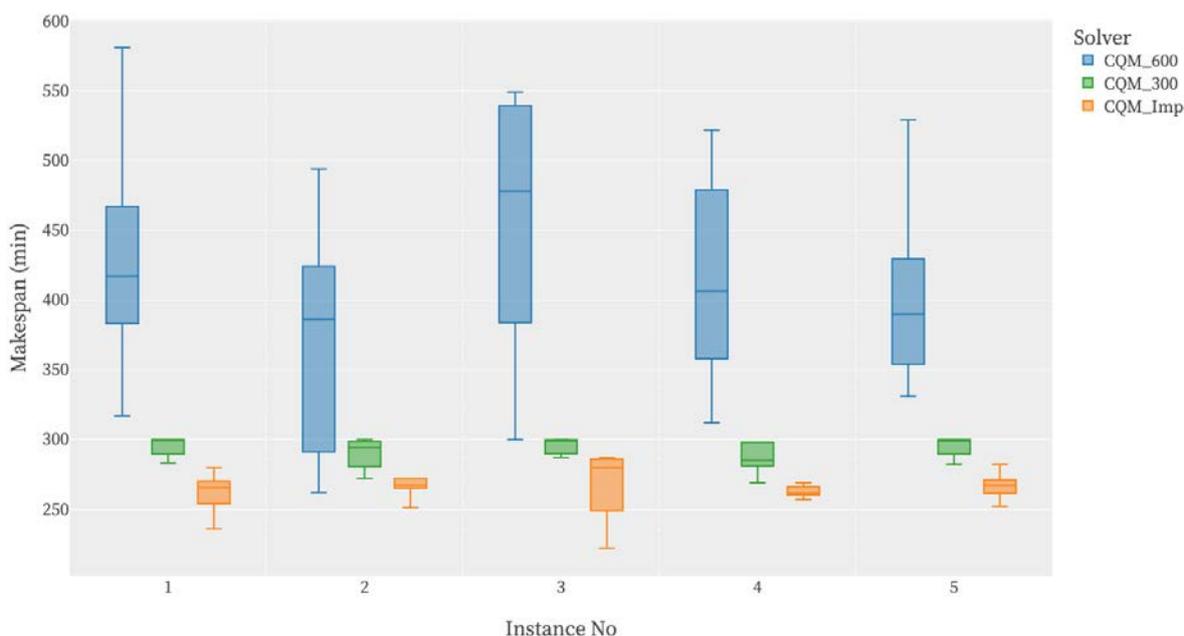


図4. 6 異なるCQMソルバー設定によるメイクスパン出力結果

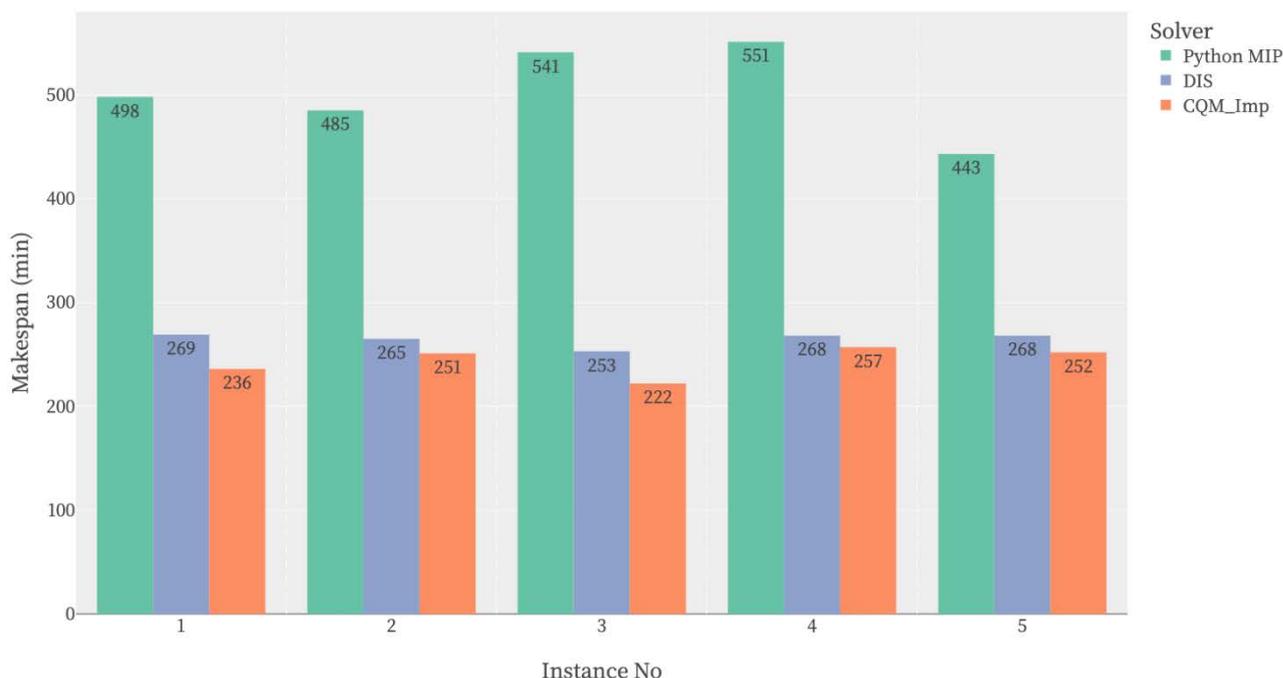


図4. 7 3つのソルバーによる最適解出力結果

最後に、図4. 8は三番目のインスタンスに対してCQM_Impによって生成されたスケジュールの例である。本図は二つの部位から構成される。最初の五行は各マシンの作業スケジュールを表示し、残りの行は作業スケジュール全体を通じて特定のMCのストレージまたはマガジン内の各ツールの特定の場所を示す。すべてのMCのブロック内のテキストは、各 manufacturing タスクに必要なツールを分類している。MCの各 manufacturing ブロックとすべてのツールの位置ブロックの前にある灰色のブロックは、ツールの切り替えにかかる時間を表す。ツール位置ブロックは各ツールが以前の位置から正確に移動したことを追跡するのではなく、必要なすべてのツールの切り替えが開始される時間と終了時間を考慮することにより、表現方法を簡素化する。このスケジュールガントチャート図には多くの情報が含まれている。まず、スケジュールは非常に正確で、分単位で正確である。この精度は実際の manufacturing プロセスを忠実に再現しており、実用性が非常に高い。次に、イメージ内のさまざまなマシンに割り当てられたタスク数を調べることで、現在のオーダーに対するFMS構造の妥当性を判断できる。たとえば、メイクスパンの最小化よりもエネルギー節約を優先すると、使用するAMRの数を減らすことができる。同様に、ツールの使用状況を観察することで、どのツールが過剰であるか不足しているかを特定できる。たとえば、工具 t08 の数量を2から1に減らしても、それを必要とする加工タスクが三つあるにもかかわらず、全体の完了時間は延長されない。逆に、工具 t12 または t09 の数量を増やすと、メイクスパンが大幅に短縮される可能性がある。LHSを備えたモデルを使用すると、これらすべてを迅速に解決して検証することができる。ワークフローのボトルネックを特定し、より効率的なFMSを設計するために、DISよりも優れた支援を提供している。

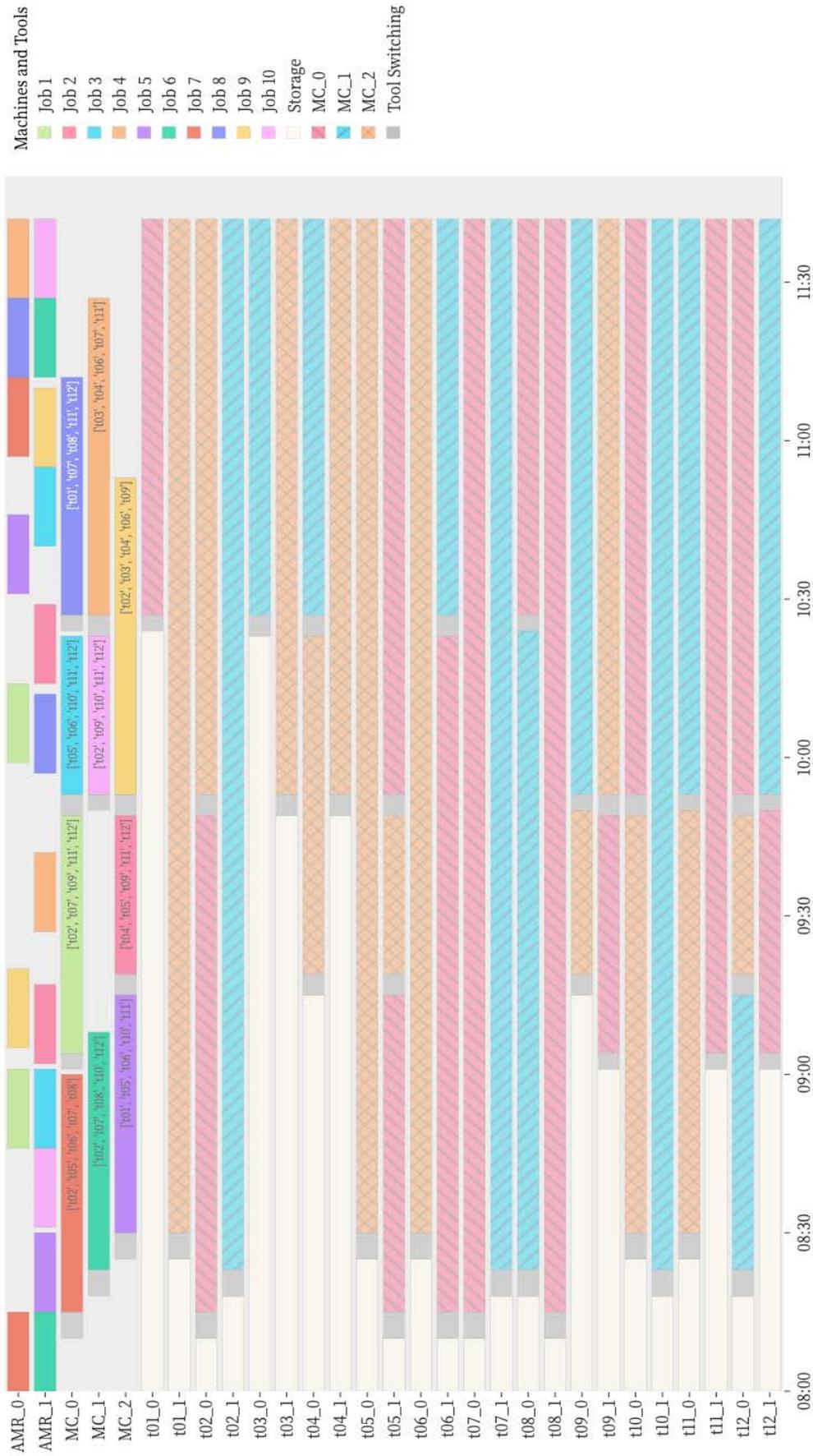


図4. 8 CQM_ImpによるFMS加工セルのスケジュール出力結果の例

4. 6 量子アニーリングを適用する組立セルの数理モデル化

4. 6. 1 量子アニーリングを適用する工作機械組立セルの数理化

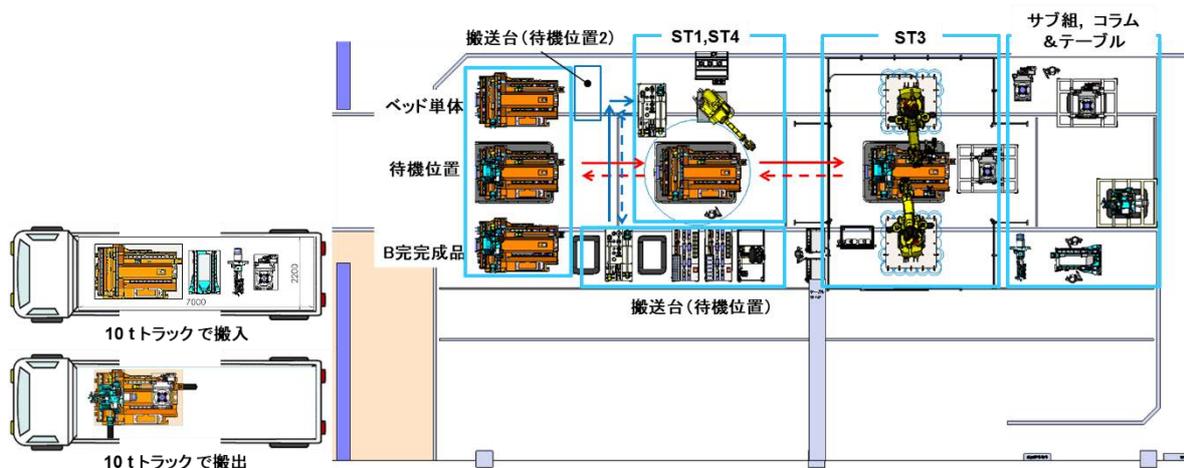


図 4. 9 再構成可能な工作機械の組立生産セル

図 4. 9 に前章で述べてきた工作機械の再構成可能な組立生産システムを示す。図のようにロボットによる自動化と人による作業のプロセスを仮想ワークセル化し、組合せて工程が構築出来るシステムを構築する。本研究では本システムをスケジューリング問題の対象として扱う。機械一台組立の課題を対象として、物理モデルを数理化する。今後、複数台の工作機械を組立てる場合、その仮想ワークセルを拡張することで組合せ最適化を実行可能とする。

まず、数理化作業の前に、上述の組立ラインの加工ワークセルに対応するジョブと作業内容であるタスクを設定する。一般化のため、仮想ワークセルであるジョブ A (job A) を準備する作業 (prepare) を“pre-A”と定義する。その他にもジョブ A を移動させる作業 (transfer) を“tran-A”，主軸頭ユニット (Main spindle) を運び入れる作業 (Move in) を“in-M”，主軸頭ユニット (Main spindle) を運び出し作業を“out-M”，コラムユニット (column) の運び入れ作業を“in-col”，テーブルユニット (table) の運び入れ作業を“in-ta”，ジョブ A の組立作業を“as-A”，ジョブ A における部品 A の調整作業を“ad-A”と定義することとする。

Meaning of abbreviated words in example process

pre-A: “prepare” task in job A

tran-A: “transfer” task in job A

tran-1: “transfer” task in job worker 1

in-M: “move in” task in job Main spindle

in-col: “move in” task in job column

in-ta: “move in” task in job table

as-A: “part A assembly” task in job A

ad-A: “adjust” task for part A in job A

out-M: “move out” task in job Main spindle

これらの仮想ワークセルに対応するジョブの定義と作業内容であるタスクを定義し、それらのタスクに対しコスト変数（処理時間）を設定する。表 4. 3 に作業者 worker と Mobile Robot の組立タスクに対するコスト変数（処理時間）の設定内容を示す。同じく表 4. 4 には大型 AGV、小型 AGV の搬送タスクに対するコスト変数（処理時間）を設定した。

4. 6. 2 数理モデルの QUBO 行列フォーマットへの変換

量子アニーリングマシンで解ける二次非制約二値変数最適化（QUBO）問題の行列フォーマットに数理モデルを変換する。

ジョブ i 、ジョブ j を特定し、開始時間 t を設定して、ジョブ i の実行“1”/非実行“0”を定義二値形式 $p_{i, j, o}$ に変換する。

$$p_{i, j, o} = \begin{cases} 1 : \text{if task } i \text{ and task } j \text{ are executed by operator } o \text{ and } i \text{ is before } j; \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases} \quad \dots (4. 48)$$

次に制約条件の設定を行う。

表 4. 3 作業者, MobileRobot の組立タスクと cost 変数の設定

| job | task | by | cost | task | by | cost | task | by | cost | task | by | cost | task | by | cost |
|---------|--------|----------|---------|----------|---------|----------|------|--------|-------|----------|--------|--------|------|-------|--------|
| 1 A | pre-A | worker 2 | tran-A | worker 1 | | | | | | | | | | | |
| 2 B | pre-B | worker 2 | tran-B | worker 1 | | | | | | | | | | | |
| 3 C | pre-C | worker 2 | tran-C | worker 1 | | | | | | | | | | | |
| 4 Main | in-W | worker 1 | pre-W | worker 2 | tran-1 | worker 1 | as-A | robot | 3 | ad-A | robot | 3 | as-B | robot | 3 |
| 5 | ad-C | worker 1 | tran-2 | worker 1 | as-col | robot | 1 | as-ta | robot | 1 | tran-3 | worker | 1 | check | worker |
| 6 Colu | in-col | worker 1 | pre-col | worker 2 | as-D | worker 3 | ad-D | worker | 1 | tran-col | worker | 1 | | out-W | worker |
| 7 Table | in-ta | worker 1 | pre-ta | worker 2 | tran-ta | worker 1 | | | | | | | | | |

表 4. 4 AGV の搬送タスクと cost 変数の設定

| job | task | by | cost | task | by | cost | task | by | cost | task | by | cost | task | by | cost |
|----------|----------|----|------|------|----|------|------|----|------|------|----|------|------|----|------|
| 1 A | tran-A | S | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 2 B | tran-B | S | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 3 C | tran-C | S | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 4 Main | tran-1 | L | 1 | as-A | L | 3 | ad-A | L | 3 | as-B | L | 3 | ad-B | L | 3 |
| 5 Column | tran-col | S | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 6 Table | tran-ta | S | 1 | | | | | | | | | | | | |

制約条件 1 : 同じジョブにおける全てのタスクは特定の順序で処理される。

一連のジョブ $J = \{J_1, J_2, \dots, J_N\}$ によって定義する。各ジョブ J_i は、特定の順序で処理する必要がある。例として組立ジョブである column の場合は、5つのタスク O_i で構成される。

タスクの実行順序は決められた順序で実行されるものとする。

$$J_i = \{O_{i1}(\text{in-col}) \rightarrow O_{i2}(\text{pre-col}) \rightarrow O_{i3}(\text{as-D}) \rightarrow O_{i4}(\text{ad-D}) \rightarrow O_{i5}(\text{tran-col})\} \cdot (4. 49)$$



制約条件 2 : $\rightarrow \otimes$ に関連する異なるジョブの結合が必要な特定タスクにおいて、特別な順序を満たさなければならない。

例として、A の移動タスクである“tran-A”の場合、A の組立タスク“as-A”の完了後でなければ実行してはならない。

Special order of tasks among different job, $\rightarrow \otimes$ related

“tran-A” is before “as-A”

“tran-B” is before “as-B”

“tran-C” is before “as-C”

“tran-col” is before “as-col”

“tran-ta” is before “as-ta”

制約条件 3 : いかなるタスク i, j および適応可能な作業員 o において、もしタスク j がタスク i の後に実行されなければならない場合、タスク i はタスク j の順序を越えて実行されてはならない。

follow process's order:

$$t_{i, o} + c_i \leq t_{j, o} \text{ for any tasks } i, j \text{ and feasible operator } o, \text{ if } i \text{ have precedence over } j \quad \dots (4. 50)$$

制約条件 4 : ひとりの作業員は同時刻で一つのタスクのみを実行できるものとする。

One operator can only execute one task at the same time:

$$t_{i, o} - t_{j, o} + (c_j - c_i)p_{i, j, o} + 2p_{i, j, o}(t_{j, o} - t_{i, o}) \geq c_j \quad \dots (4. 51)$$

制約条件 5 : 作業員には休憩時間が必要である。ただし、今回は休憩時間を 0 とする。

$$\text{workers need rest time: } t_{i, o} = 0 \text{ if } o \text{ is a worker and } i \in \text{rest time} \quad \dots (4. 52)$$

変数の定義は以下の通りとする。

$t_{i, o}$: 演算子 o によるタスク i の開始時刻を表す整数変数

c_i : タスク i の時間コストを表す値

目標ターゲット Objective は Makespan

Makespan: T

4. 7 量子アニーリングによる組立セルの組合せ最適化スケジュール

前項のように量子アニーリングマシンで処理可能な QUBO 行列配列に適合するように二次非制限二値変数最適化の問題として図 3. 3 4 に示す機械一台組立の仮想ワークセルを数理モデルに変換を行い、D-Wave 社の LHS にて計算を実行して、図 4. 1 0 の解が得られた。

シーケンシャルに実行した場合、650 分であったものが既存リソース (worker-1, worker-2, AGV-L-1, AGV-S-1, robot-1, AGV-L-2) を用いてタスクの組合せ最適化を行った結果、350 分までメイクスパンが短縮している。図 4. 1 1 に仮想ワークフローとスケジュールガントチャートの対応を示す。



図 4. 1 0 LHS(N=38)による工作機械組み立てラインのスケジューリング：350 分

以上のように機械一台組立において、既存リソースを用いて量子アニーリングマシンを用いて組合せ最適化問題を解き、メイクスパンが短縮することを確認した。得られた解が本当に最適解か否かは評価が難しいが、得られたスケジュールを見ると worker-1 に作業が集中しており、他の

worker-2, AGV-L, AGV-S, robot(ST3)の利用頻度はあまり高いとは言えない。本組立ラインの人に頼った作業になっている問題点が浮彫になっている。

人の作業に依存しすぎると、人のいなくなる時間帯にラインが停止してしまうので、人の作業を最初と最後の工程に集約し、できるだけ工程の途中に人を介在させない工夫が必要であることが見えてくる。今後の課題として、作業者による作業を出来る限り Mobile Robot へ移していただけるような自動化対応への数理モデル化が必要であることがわかる。さらに今回のスケジューリングには人の休憩時間や勤務時間の設定が考慮されていない。実際の運用には作業者に関係するタスクの設定が必要である。

その一方で、組合せ最適化問題を複雑なワークフローを持つ組立生産セルで適用可能であることが分かった。このスケジューリング計算が数分で完了することが重要で、現場で次々と生じる状況の変化に対して即座に回答が出せることには大きな意味がある。

今後の課題として、複数台の機械を組立てるスケジューリングの実現が必要である。手計算によるシーケンスシミュレーションによると、図 4.12 のようなスケジュールになると考えられる。量子アニーリングマシンを用いたスケジューリングとの比較を行い、その有効性を確かめたい。

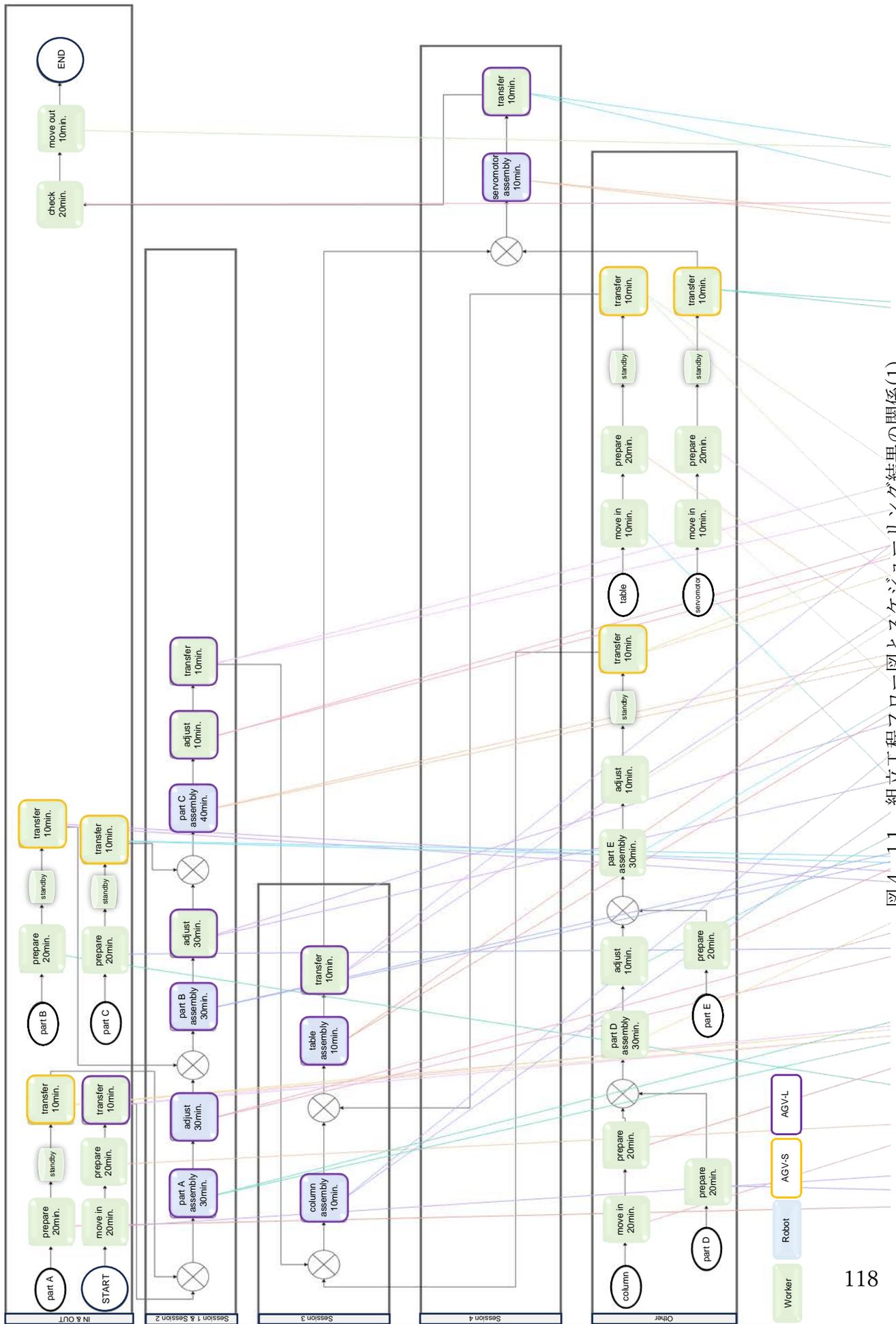


図 4. 11 組立工程フロー図とスケジューリング結果の関係(1)

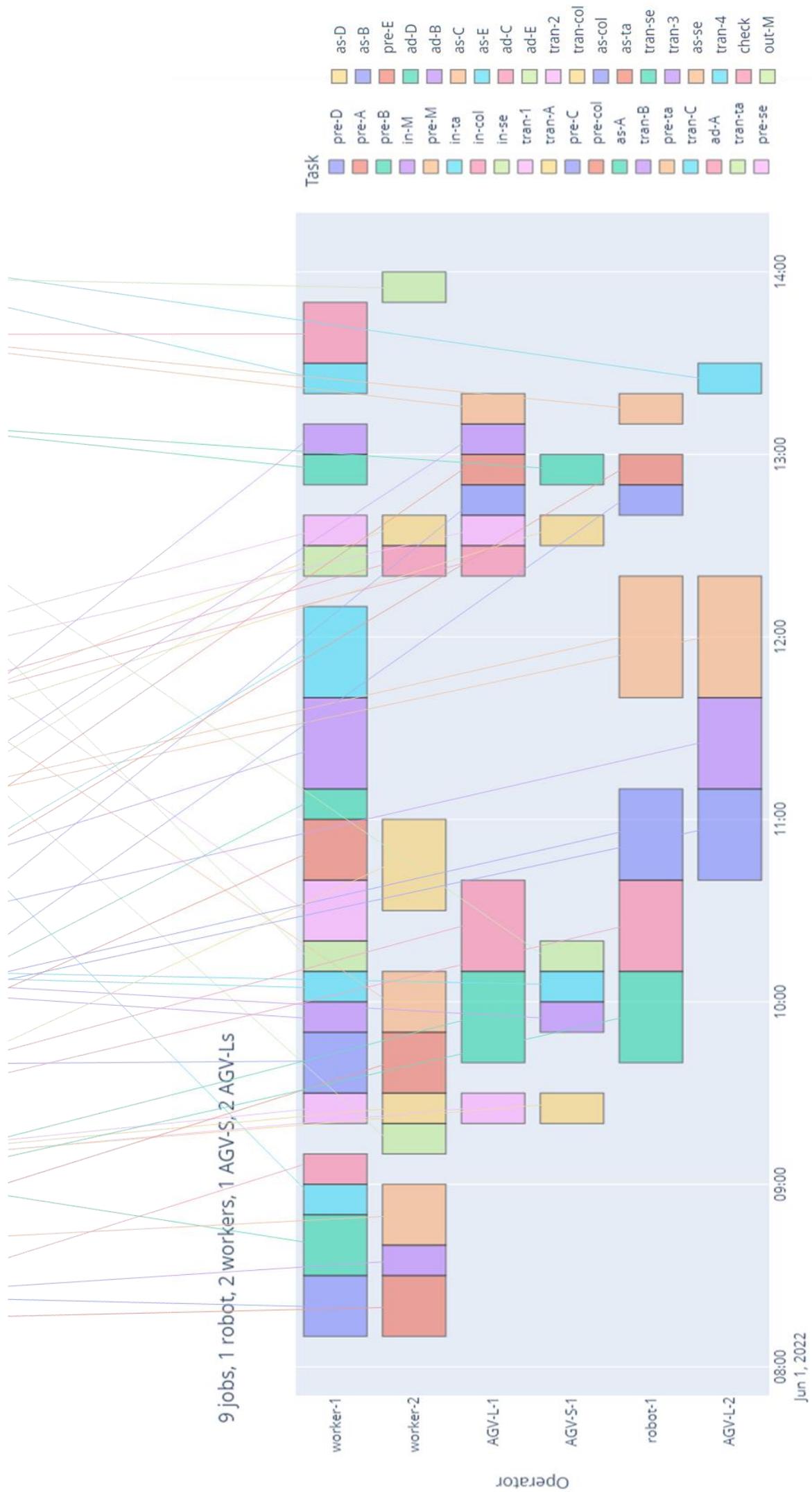


図 4. 1 1 組立工程フロー図とスケジューリング結果の関係(2)

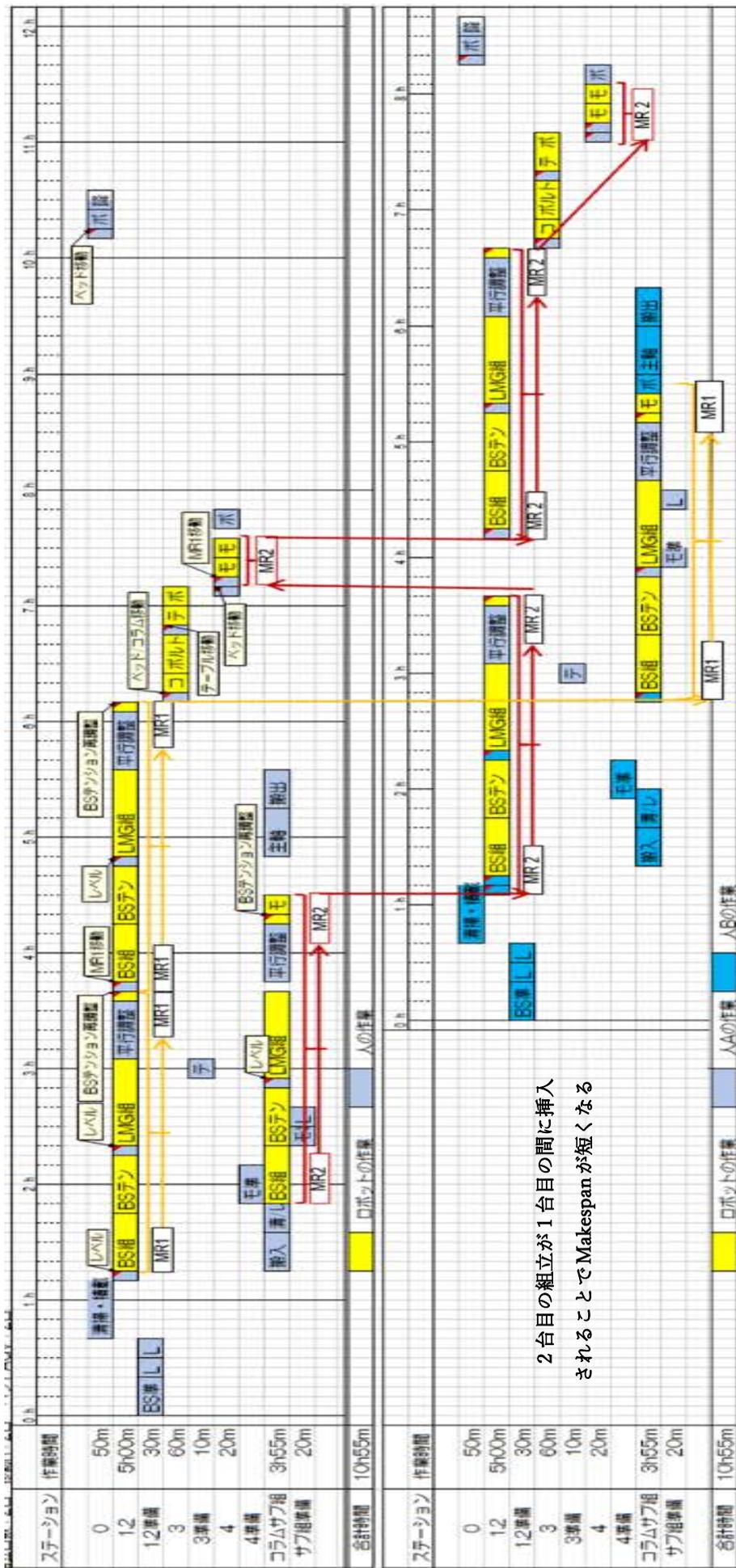


図 4. 12 複数台組立のスケジューリング (手作業での算出)

4. 8 フレキシブル生産システムのスケジューリング まとめ

本章では、量子アニーリングマシンを用いて工作機械の加工ラインの最適スケジューリング方法と、さらにワークフローが激しい組立セルの最適スケジューリング方法の両方を提案した。従来、本問題が NP 困難問題として扱われており、経済界に携わるものが手を出してはならない領域と言われてきたが、加工セルと組立セル（機械一台組立）における課題を数分で回答を出すことが可能となった。

FMS 加工ラインの最適スケジューリング方法では、AMR を備えた実際の FMS からワークロードを抽出することにより、ツール切り替え制約を伴うフレキシブルジョブショップスケジューリング問題 (FJSST) の新しい数理モデルを提案した。複数台の MC を考慮し、ワーク交換用の AMR を搭載したモデルである。また、複数の工具を切り替えて使用できるセンターツールマガジンを備えている。この作業には、より現実的な操作状況をシミュレートするツールスイッチングを伴う {"pre-setup" → "manufacturing" → "post-setup"} の三つの作業を含めた。

次に、提案されたモデルのパフォーマンスを Python MIP, LHS, ディスパッチングルールなどのさまざまなソルバーを使用して解き比較評価を行った。他の二つの方法と比較して LHS が短時間で最良の結果をもたらすことが分かった。LHS によって達成される最良のメイクスパン結果は、平均して Python MIP よりも 51.2% 小さくなった（最大の差は 58.9%, 最小値は 43.1%）。さらに、Python MIP の実行には 2 時間を要したが、LHS の実行にはわずか 2 分しかかかっていない。一方、LHS のメイクスパンはディスパッチングルールのメイクスパンよりも平均で 7.9% 短い（最大差は 12.2%, 最小差は 4.1%）。LHS の解は、実現可能性と品質の点で Python MIP およびディスパッチングルールによって生成された解よりも優れている。量子アニーリングを含むハイブリッドソルバーは、FMS における FJSST の解決に有望であると言える。

ただし、本実験は完全に公平ではない可能性がある。特に Python MIP には不利であった可能性がある。CBC はオープンソースで無料であるため、Python MIP の代表的なソルバーとして CBC を選択した。十分な計算時間を与えれば、CPLEX や Gurobi などの商用ソルバーのパフォーマンスが向上し、LHS との差が縮まる可能性がある。公平性と有意義な結果を確保するために、今後の実験ではより広範囲のソルバーを調査し、ソルバーごとにテストプログラムを最適化する必要がある。残念ながら、これらのソルバーを使用しても、より単純なケースを解決する場合において、満足のいく解決策を得るにはかなり時間がかかることを示す論文の実験結果がいくつか示されている。

一方で、数理モデルの一部にはまだ改善の余地がある。具体的には、数理モデルが現実世界に近いシナリオをサポートできるにもかかわらず、そのシナリオをよりよく反映するより複雑なインスタンスを実験に含めていない。たとえば、各ジョブには、さまざまな設定コストと必要なツールの数を割り当てる必要がある。さらに、異なるカテゴリ間ではツールの切り替え時間も異なるはずである。提案した数理モデルは追加設定を使用して変数を処理できるが、ソルバーにとってモデルが複雑となるため、このような変数は実験に含めていない。アップグレードされた変数は、一部のソルバーにとって難しすぎる場合があり、比較することが困難となるためである。モデル自体もいくつかの重要な領域で改善できる。MC は製造前にすべてのツールスイッチングを

完了すると想定している。ただし、実際には AMR がこれらのタスクを別のタイプのタスク間に処理する方が合理的である。さらに、私たちのモデルは研究分野と応用分野の両方で重要なテーマである工具の摩耗を考慮していない。

組立セルの最適スケジューリング方法では、仮想ワークセルの適用により、柔軟な生産システム故の複雑性を限定的とすることで複雑で、変数が多く、組合せ爆発する課題に対して量子アニーリングを適用可能な状態まで問題空間を制限する方法論について提案を行い、効果を確認した。本スケジューリング問題が数分で解けるようになった。

工場現場では時々刻々と状況の変化が生じており、計画を立ててもなかなか予定通りにいかないのが現実である。日々の生産では計画時に予想できなかった事態が数多く発生する。この事態にこれまでは素材や中間仕掛品の在庫を多く保有したり、中間仕掛品の山積みを許容したりすることで対応せざるを得なかった。これが数分、ほぼリアルタイムで対応策がとれるようになったことで、生産工場の在庫管理のコストを大きく削減できる可能性が見えきた。工場本来の目的は計画通りの生産を達成して儲け続けることにある。しかし、不測の事態に陥ることにより損失リスクをいつも抱えながら、工場運営していくことは製造業にとって辛い状況である。もちろん現在、問題空間が限定的であることは前述したが、今後の取組によって近い将来、問題空間は拡大することになるだろう。量子アニーリングによる本スケジューリング問題の解決によって、製造業の不測のマイナス事態についてのリスクを保全して、計画通りの生産をリカバリーすることが可能になる。さらにその先には、製造現場で働く人々や管理者に余裕を与え、人的な作業量で補っている現状を改善することができると思う。結果、持続可能性の高い製造業を創ることに期待が持てると思う。

本章では、量子アニーリングマシンを用いて工作機械の加工ラインの最適スケジューリング方法と、さらにワークフローが激しい組立セルの最適スケジューリング方法の両方を提案した。従来、本問題が NP 困難問題として扱われており、経済界に携わるものが手を出してはならない領域と言われてきたが、加工セルと組立セル（機械一台組立）における課題を数分で解を出すことが可能となった。

今後の研究課題は、取り扱える問題空間を拡大することである。今回は加工セル、組立セルの単体に限定した適用範囲であったが、機械の複数台数の組立の最適化、複数の生産セルの最適化、工場全体の最適化を果たすことで、工作機械製造業の課題、つまり多品種少量生産を高い生産性で実現可能な生産システムの実現、Future Factory System を実現し、マスカスタマイゼーションについての課題解決を目指す必要がある。

第五章 結論

5. 1 本研究で得られた成果

本論文では、工作機械の生産システムに再構成可能というコンセプトを適用して、「多品種生産」と「自動化」の両立を図るマスカスタマイゼーションを実現する生産システムについて提案した。具体的にマスカスタマイゼーションの最たる製品である工作機械の製造について、Mobile Robot を用い「自律的な変容性」を有した迅速に再構成可能な生産システムのパイロットシステムの実装をした。多品種少量生産における複雑な作業は仮想ワークセルの中に隠蔽し、システムの複雑化を抑制した。また、従来困難とされてきた工作機械の組立について精密自動組立技術を開発し可能にした。

再構成可能な生産システムではハードウェアの柔軟性が増すため、運用ソフトウェアの複雑性が増す問題があった。柔軟な生産システムの運営スケジューリングを量子アニーリングマシンの利用により組合せ最適化問題を解き、メイクスパンの最適化を行い、その効果を確認した。製造機種をある程度限定した環境において、本システムの有効性を示した。

第一章「緒論」では、工作機械は「道具としての機械」であり、その存在意義からして多様性を求められる製品であることを述べた。さらに、外部的な環境の変化として、マスカスタマイゼーションが求められる背景を述べた。1990年代以前、市場は売り手市場であり、マスプロダクションを突き進んできたが、1990年以降、市場は買い手市場と変化して、より多様な仕様の製品が求められるようになった。加えて地政学的に不安定、予測困難になり、市場が分断される状況が発生している。分断された市場では、それぞれの地域で異なる需要が発生する。そして、今後は、個人毎に異なる要求に適応することが求められるトレンドとなっていることを述べた。現代の市場の要求と過去のクラフトプロダクションとの差異は、マスプロダクションと同等のコストが求められることである。つまり、多様な仕様に応えながらも、マスプロダクションに匹敵するコストの実現が求められる点がマスカスタマイゼーションの本質であり、困難をもたらしている背景があることを述べた。これらの市場の変化、工作機械そのものの製品としての本質に適応するには、マスカスタマイゼーションに適応する新たな生産システムが必要であることを述べた。

「再構成可能な生産システムの関連動向」では、多品種少量生産を行う生産システムの調査を行った。主にセル生産方式と再構成可能な製造システムについて過去の研究を調査した。調査の結果より、セル生産方式では多品種少量生産には対応しているものの、作業者の熟練度や努力に大きく依存しており、その継続性とコストの観点からマスカスタマイゼーションに適合していると言えないことを指摘した。再構成可能な製造システムでは、多品種少量生産とコストを生産システムの再構成を用いて解決しようとしていたものの、過去の事例では具体性を欠き、その頻度と迅速さで、やはりマスカスタマイゼーションに適合しているとは言えなかった。また、過去のマスカスタマイゼーションの実現を目指した生産システムの試みは、柔軟性の実現と同時に複雑性が増大してしまい、その複雑性への対応を作業者が負担していることが明白になった。柔軟なシステムには管理可能性も同時に実現しなければならないことを明らかにした。本調査結果より、

「多品種少量生産」とコストを追求するために「自動化」の両立を達成する新たな生産システムが求められることを述べた。以上の背景から、本研究の目的を工作機械のマスカスタマイゼーションに対応するため、「多品種生産」と「自動化」の両立と再構成が可能な生産システムを提案し、その有効性を示すこととした。

第二章「工作機械の再構成可能な生産システムのコンセプト提案」では、工作機械のマスカスタマイゼーションを実現するため、以下の特徴を有する生産システムを提案した。

- ① より迅速な再構成を可能とし、生産工程のボトルネックに生産リソースを最適配置することによるスループット最大化を目的とした自律自走型 Mobile Robot の適用
- ② 工作機械の重量ユニットのクレーンレス組立を含む精密自動組立機能の適用
- ③ 管理可能性を実現するため、工程の複雑性を隠蔽し、組立シーケンスも機械一台当たりにおいては固定とした仮想ワークセルの適用
- ④ システムの運用最適化のため、組合せ最適化ソルバーとシミュレーションを組合せたデジタルツインシステムの適用
- ⑤ 組合せ最適化ソルバーに量子アニーリングマシンを適用したスケジューリング機能の適用

さらに、①～⑤の要素技術を用い、モジュラリティを追求した自律自走可能な Mobile robotics cell によって構成される工作機械を考案し、再構成可能な加工生産システムの提案を行った。

第三章「工作機械の再構成可能な生産システムの実装」では、「変容」を可能にした再構成可能な生産システムのプロトタイプラインを実装して、その実現性と効果を評価した。

第一に、Mobile Robot の要件分析を行い、その要件に沿って自律自走型 Mobile Robot をデザインし実装した。結果、Mobile Robot は、迅速に変容する再構成可能な生産システムを構築する上で最も重要な生産リソースとなった。メカニカルデザインではメカナムホールを搭載して、全方向移動を可能とした。結果、狭い通路、クランクした通路を走行し、狭いスペースでも位置決め対象設備に対し、迅速に±5 mm以内の距離まで接近した位置決めを可能とした。また、従来のAGV モジュールでは±50 mm程度の位置決め精度に留まっていたが、画像ベースの広範囲移動用のマップと位置決め用の点群マップを組合せ、位置決め時にはこれらのマップを切り替えることで、高精度位置決めを可能とした。基本モードでは位置決め誤差 (x, y) が (-16.6mm, 0.6mm) であったものが、高精度位置決めモードでは (-1.0mm, 0.6mm) に改善した。位置決め誤差の標準偏差はそれぞれ (9.4mm, 13.8mm) が (2.6mm, 4.2mm) に改善した。位置決め時間は基本モード 12.2s が高精度モード 12.9s となり、大きな差異はない。高精度位置決めは Mobile Robot を用いた搬送作業の事前処理、搬送搬出処理、事後処理において用いられる。位置決めが正確に実行されると、Robotic manipulator のビジョンセンサによるキャリブレーション処理のやり直しがなくなり、位置決め失敗による繰り返し修正動作が大きく削減した。結果、プロセス全体の完了

時間平均が、48.2s から 44.1s に改善した。AGV モジュールと Robotic manipulator 部を協調的に制御することで、搬送プログラム全体を最適化し、搬送に要する時間を削減し、さらに、搬送に要する時間の標準偏差を大きく削減し、搬送プロセスの予測性を高めた

第二に、Mobile Robot を適用して、従来困難とされてきた工作機械の精密組立を可能とする自動組立の要素技術を開発、実装し、その有効性を確認した。

- ① 事前準備工程で人手による調整作業を完了させておくことで、自動化システムにターゲットワークの投入を可能とした。
- ② 2台のロボットによる協調作業により重量物の組立可能とした。
- ③ ビジョンセンサと力センサにより、はめ合いを含む自動組立を可能とした。
- ④ リニアガイド、ボールねじの真直と平行は加工リファレンス面を利用し自動組立可能とした。
- ⑤ 形状拘束するハンドを利用して複雑な形状の部品の自動組立を可能とした。
- ⑥ ボールねじテンション張りをレーザ変位計と減速機を用いて自動組立可能とした。

協働ロボットを使うことで、精度確認などの現状は人にしかできない作業を実行する横で、ロボットによる組立作業を継続できることを確認した。Mobile Robot による自動化は、安全エリア確保、省スペース化、リスク/負荷分散などの観点で大きなメリットがあることを確認した。本取組で得た要素技術から、カバー取り付け、配管、配線作業、検査作業は未だ人手に頼る必要なもの、Mobile Robot を用いた再構成可能な生産ラインを実現可能とした。

第三に、これらの要素技術を統合して、工作機械の組立加工セルにおいて再構成可能な生産システムのプロトタイプラインを構築して、ある限定的な工作機械の組立生産においてその実現性と効果を確認した。

第四章「フレキシブル生産システムのスケジューリング」では、組合せ最適化問題をといてスケジューリングする方法を提案した。本章では量子アニーリングマシンを用いたハイブリッドソルバーLHSを適用して組合せ最適化問題を解くことを提案した。実際に、再構成可能な加工セルに量子アニーリングマシンを適用して組合せ最適化問題を解き、評価を行った。AMRを備えた実際のFMSからワークデータを抽出して用いたツールスイッチング制約を伴うフレキシブルジョブショップスケジューリング問題(FJSST)の新しい数理モデルを提案した。複数台の機械を考慮し、ワーク交換用のAMRを搭載したモデルである。また、複数の工具を切り替えて使用できるセンターツールマガジンを備えている。この作業には、より現実的な操作状況をシミュレートするツールスイッチングを伴う {re-setup" →"manufacturing" →"post-setup"} の三つの作業が含まれる。

次に、提案されたモデルのパフォーマンスをPython MIP、デイスパッチングルール、LHSなどのソルバーを使用して解くことで評価を行った。他の二つの方法と比較してLHSが短時間で最良の結果をもたらすことが分かった。LHSによって達成される最良のメイクスパンは、平均し

て Python MIP よりも 51.2% 低くなった（最大の差は 58.9%，最小値は 43.1%）。さらに，Python MIP の実行には 120 分を要したが，LHS の実行にはわずか 2 分しかかかっていない。一方，LHS のメイクスパンはディスパッチングルールのメイクスパンよりも平均 7.9% 短い（最大差は 12.2%，最小差は 4.1%）。LHS の解は，実現可能性と品質の点で Python MIP およびディスパッチングルールによって生成された解よりも優れているため，量子アニーリングを含むハイブリッドソルバーは，FMS での FJSST の解決に有望であると言える。

本章では，さらにワークフローが激しい工作機械の組立セルについて LHS の適用を実施，評価した(N=38)。シーケンシャルに実行した場合 650 分の組立メイクスパンが，LHS の組合せ最適化したメイクスパンは 350 分であった。ハードウェアがモジュール化を実現し，オペレーションも仮想ワークセルを用いることでモジュール化されたため，ソフトウェアはそれらのモジュールの組合せ最適化を図ることが可能となった。結果として，生産システムの最適化が図られ生産性が向上することになった。

本研究では工作機械のマスカスタマイゼーションの実現のため，迅速に変容可能な自律自走型 Mobile Robot を用いた再構成可能な生産システムと，柔軟性が増した生産システムを管理可能とする仮想ワークセルの適用と，量子アニーリングマシンを用いた組合せ最適化スケジューリングの組合せにより，市場の求める「多品種少量生産」とマスプロダクションに匹敵するコスト実現のための「自動化」の両立する生産システムを提案した。そして，横型マシニングセンタの主要ユニット組立という工作機械の限定された生産の範囲であるが，その実装を行い，有効性を確認した。本研究で実現した項目と残した課題を表 5. 1 に示すので，今後の再構成可能な生産システムの研究において参考にしていただきたい。

これまで困難とされてきた工作機械製造の数々の問題に対し，解決可能であることを明らかにした。工作機械産業はその存在意義から，各ユーザに道具として優れた機械を提供し続けなければならない宿命にある。「多品種少量生産」を遂行しなければならないがゆえに，非効率で，多くの在庫を抱え，人海戦術による物理的な作業量に依存する現状の工作機械製造業からの脱却が必要である。本研究を通して，工作機械製造業の明るい未来を次世代に受け継ぐため，「多品種少量生産」に「自動化」を組合せた，再構成する生産システムによってマスカスタマイゼーションについての課題を克服できる期待が得られたと考える。再構成可能な生産システムの実現が，工作機械の製造，ひいては高い付加価値を創造する我が国の「ものづくり」に貢献することを願う。

表5. 1 本研究で実現した項目と残した課題のまとめ

| 本研究で実現した項目 | 本研究で残した課題 |
|-----------------------------------------|---------------------------------|
| Mobile Robot メカナムホイール制御 | Mobile Robot メカナムホイールブレーキ |
| Mobile Robot SLAM&RTT自律経路生成 | Mobile Robot 路面3Dビジョン検出 |
| Mobile Robot 精密位置決め | Mobile Robot インドアGPS自己位置検出 |
| Mobile Robot 5Gコミュニケーション | Mobile Robot manipulator 自律経路生成 |
| Mobile Robot AGV module, Lifter module | Mobile Robot ジャイロセンサ姿勢制御 |
| Mobile Robot 大型AGV | Mobile Robot 機械レベル制御 |
| Mobile Robot robotic manipulator module | Mobile Robot 群制御 |
| Mobile Robot 協働ロボット, 協働AGV | Mobile Robot アクティブサスペンション |
| Mobile Robot 自動給電装置 | Mobile Robot 自律再構成する加工セル |
| 自動化 リニアガイド組立 | 自動化 ATCマガジンユニット組立 |
| 自動化 ボールねじサブユニット組立 | 自動化 ATCアームユニット組立 |
| 自動化 ボールねじ組立 | 自動化 ATCサーボギアボックス組立 |
| 自動化 ボールねじのテンション自動設定 | 自動化 APCユニット組立 |
| 自動化 テーブルのベッド搭載組立 | 自動化 リアパネルユニット組立 |
| 自動化 コラムのベッド搭載組立 | 自動化 操作盤組立 |
| 自動化 ベアリング・ベアリングケース挿入 | 自動化 強電盤組立 |
| 自動化 メカニカルシール挿入 | 自動化 強電盤組立 |
| 自動化 ロックナット締め付け | 自動化 工具自動チップ交換 |
| 自動化 はめ合い挿入 | 自動化 形状拘束治具 |
| 自動化 サーボモータ挿入 | 自動化 ボールねじ平行測定 |
| 自動化 形状拘束ハンド | 自動化 機械直角, 真直精度測定 |
| 自動化 工具交換 | 自動化 ピッチエラー測定 |
| 自動化 ワークピース交換 | 自動化 体積空間精度測定 |
| ソフトウェア 階層的タスクプログラミング | ソフトウェア 自動化機器プラットフォーム |
| ソフトウェア AGV運用ソフトウェア | ソフトウェア 生産セルコントローラ |
| ソフトウェア モバイルロボットリンク | ソフトウェア ツールクラスタ管理 |
| スケジューリング N50量子アニーリング | スケジューリング 機械複数台組立 |
| スケジューリング 仮想ワークセル | スケジューリング 自律再構成する加工セル |
| スケジューリング 加工セル単体 | スケジューリング 加工セル群 |
| スケジューリング ツールスイッチング | スケジューリング 組立セル群 |
| スケジューリング 組立セル機械単体 | スケジューリング Future Factory System |

5. 2 今後の課題

今後の課題は、本再構成可能な生産システムが、マスカスタマイゼーションが求められる工作機械の生産システムとして、その有効性を実世界で評価、実証することである。そして、その評価が有効であれば、さらに Future Factory System のプロトタイプに取組み、さらなる生産システムの発展に貢献することが今後の課題である。また、量子アニーリングマシンの利用を多くの生産技術者に活用してもらえよう理解を広めて、その運用技術を磨くことが重要と考える。多くの知恵を集め、取り扱うべき問題空間の拡大と、扱う問題空間を管理可能なように狭める取組を継続することで、そこから得られる利益を製造業と社会が得られるようにすることである。

最後に、本論文が工作機械製造業におけるマスカスタマイゼーションの課題解決の取組として、労働人口が急速に減少し続ける日本の製造業の生産性を引き上げるヒントとなれば幸いである。製造業の高い生産性はSDGsの「持続可能性の追求」と繋がっている。

参考文献

- [1] H. ElMaraghy, G. Schuh, W. ElMaraghy, F. Piller, P. Schonsleben, M. Tseng, A. Bernard, "Product variety management", *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 62, No. 2, pp. 629-652, 2013.
- [2] Koren Y., "The Global Manufacturing Revolution", *Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems*, John Wiley, pp. 399-412, 2010.
- [3] T. Takenaka, Y. Yamamoto, K. Fukuda, A. Kimura, and K. Ueda, "Enhancing Products and Services Using Smart Appliance Networks", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 65, No. 1, pp. 397-400, 2016.
- [4] D. Kokuryo, T. Kaihara, S. S. Kuik, S. Suginochi, and K. Hirai, "Value Co-Creative Manufacturing with IoT-Based Smart Factory for Mass Customization", *International Journal of Automation Technology*, Vol. 11, No. 3, pp. 509-518, 2017.
- [5] J. Deaboul, C. Da Cunha, A. Bernard, and F. Laroche, "Design for Mass Customization: Product Variety vs. Process Variety", *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 60, No. 1, pp. 169-174, 2011.
- [6] P. Kotler, "Marketing Management: Analysis, Planning, and Control", Prentice Hall, 1997.
- [7] R. G. Landers, B. -K. Min, and Y. Koren, "Reconfigurable Machine Tools", *CIRP – Manufacturing Technology*, Vol. 50, No. 1, pp. 269-274, 2001.
- [8] H. -P. Wiendahl, H. A. ElMaraghy, P. Nyhuis, M. F. Zah, H. -H. Wiendahl, N. Duffe, and M. Brieke, "Changeable Manufacturing-Classification, Design and Optimization", *CIRP Annals–Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 2, 783-809, 2007.
- [9] R. Katz, "Design Principles of Reconfigurable Machine", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 34, No. 5-6, pp. 430-439, 2007.
- [10] A. M. Farid and D. C. McFarlane, "A Design Structure Matrix Based for Reconfigurability Measurement of Distributed Manufacturing Systems", *International Journal of Intelligent Control and Systems*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-12, 2007.
- [11] Y. Koren, U. Heisel, F. Jovane, T. Moriwaki, G. Prischow, G. Ulsoy, and H. Van Brussel, "Reconfigurable Manufacturing Systems", *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 48, No. 2, pp. 527-540, 1999.
- [12] X. Li, A. E. Bayrak, B. I. Epureanu, and Y. Koren, "Real-time Teaming of Multiple Reconfigurable Manufacturing Systems", *CIRP Annals -Manufacturing Technology*, Vol. 67, No. 1, pp. 437-440, 2018.
- [13] 松田圭司, "生産現場でのインダストリ 4.0 推進のための 技術導入について スマートファクトリ実現のための IoT", *松山大学論文集 第 29 卷, 第 5 号* 抜刷, 2017 年 12 月発行

- [14] S. S. Heragu, "Group technology and cellular manufacturing", in *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 24, No. 2, pp. 203-215, 1994.
- [15] Hamed, M., Esmailian, G.R., Ismail, N., Ariffin, M.K.A., "Capability-based virtual cellular manufacturing systems formation in dual-resource constrained settings using Tabu Search", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 62, pp. 953-971, 2012
- [16] 橋爪裕, "セル生産方式を巡るパラドックス ~セル生産方式類型化の試み~", *日本経営学会誌* 第17号, pp. 61-74, 2006.
- [17] Ito, Y., "Amalgamation of Human Intelligence with Highly Automatized Systems-An Approach to Manufacturing Structure for the 21st Century in Japan", *Human Aspects in Computer Integrated Manufacturing*, Elsevier Science Publishers B.V., pp. 11-26, 1992.
- [18] Y. Ito and H. Shinno, "Structural Description and Similarity Evaluation of the Structural Configuration in Machine Tools", *International Journal of Machine Tool Design and Research*, Vol. 22, No. 2, pp. 97-110, 1982.
- [19] H. Shinno and Y. Ito, "Computer Aided Concept Design for Structural Configuration of Machine Tools: Variant Design Using Direct Graph", *Transactions of the ASME, Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, Vol. 109, No. 9, pp. 372-376, 1987.
- [20] Y. Ito, "Modular Design for Machine Tools", McGraw-Hill, 2008.
- [21] Koren, Y. , Heisel, U. , Jovane, F. , Moriwaki, T. , Pritschow, G. , Ulsoy, G. , Van Brussel, H. , "Reconfigurable Manufacturing Systems", in: Dashchenko, a. I. ed. , *Manufacturing Technologies for Machines of the Future*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 627-665, 2003.
- [22] Koren, Y. , Gu, X. , Guo, W. , "Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends", *Frontiers of Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 121-136, 2018.
- [23] A. Napoleonea, A. Prozza, and M. Macchia, "A Framework to Manage Reconfigurability in Manufacturing", *International Journal of Production Research*, Vol. 56, No. 11, pp. 3815-3837, 2018.
- [24] J. Franke and F. Luetteke, "Versatile Autonomous Transportation Vehicle for Highly Flexible Use in Industrial Applications", *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 61, No. 1, pp. 407-410, 2012.
- [25] Bley H, et al, "Appropriate Human Involvement in Assembly and Disassembly", *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 53(2), pp. 487-509, 2004.
- [26] Hu, S. J. , Ko, J. , Weyand, L. , ElMaraghy, H. A. , Lien, T. K. , Koren, Y. , Bley, H. , Chryssolouris, G. , Nasr, N. , Shpitalni, M. , "Assembly system design and operations for product variety", *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 60, No. 2, pp. 715-733, 2011.

- [27] Hu, S. J. , Zhu, X. , Wang, H. , Koren, Y. , “Product variety and manufacturing complexity in assembly systems and supply chains”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 57, No. 1, pp. 45–48, 2008.
- [28] Kruger J, et al, “Cooperation of Human and Machines in Assembly Lines”, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 58, No. 2, pp. 628–646, 2009.
- [29] Lee H, et al, “Modelling the Costs and Benefits of Delayed Product Differentiation”, *Management Science*, Vol. 43, No. 1, pp. 40–53, 1997
- [30] K. Salonitis, “Modular Design for Increasing Assembly Automation”, *CIRP Annals- Manufacturing Technology*, Vol. 63, No. 1, pp. 189-192, 2014.
- [31] J. Paralikas, A. Fysikopoulos, J. Pandremenos, and G. Chryssolouris, “Product Modularity and Assembly Systems: An Automotive Case Study”, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 60, No. 1, pp. 165-168, 2011.
- [32] Y. Doi, “On Application of Building Block System(BBS)”, *Toyoda Technical Review*, Vol. 4, No. 3, pp. 22-32, 1963.
- [33] Eliyahu M. Goldratt, *The Goal A Process of Ongoing Improvement*, North River Press, ISBN 0-88427-061-0, 1984.
- [34] E. G. Tsardoulis, A. Iliakopoulou, A. Kargakos, and L. Petrou, “A review of global path planning methods for occupancy grid maps regardless of obstacle density”, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 84, No. 1 pp. 829-858, 2016.
- [35] DUTUMSTUDI.JP/BLOG/ロボットの最適経路生成アルゴリズムを実装,
<https://qiita.com/MENDY/items/176cc16c746dc6135ef4>, 02-08-2022
- [36] R. G. Landers, B. -K. Min, and Y. Koren, “Reconfigurable Machine Tools”, *CIRP – Manufacturing Technology*, Vol. 50, No. 1, pp. 269-274, 2001.
- [37] Dominik Lucke, Carmen Constantinescu, Engelbert Westkämper, “Smart Factory - A Step towards the Next Generation of Manufacturing” DOI:10.1007/978-1-84800-267-8_23 January 2008
- [38] “FANUC Robot series R-30iB Plus/R-30iB Mate Plus/R-30iB Compact Plus CONTROLLER iRVision 3D Laser Vision OPERATOR'S MANUAL”
- [39] Aytug, H. , Lawley, M. A. , McKay, K. , Mohan, S. , Uzsoy, R. , "Executing production schedules in the face of uncertainties: A review and some future directions” , *European Journal of Operational Research*, No. 1, pp. 86-119, 2005.
- [40] Sotskov, Y. N. , ” Complexity of scheduling theory problems with fixed number of jobs”, *Dokl. Akad. Nauk BSSR*, Vol. 6, pp. 488–491 (in Russian). 1989
- [41] Sotskov, Y. N. , Shakhlevich, N. V. , ”NP-hardness of shop-scheduling problems with threejobs”, *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 59, No. 3 (1995), pp. 237-266.

- [42] Brucker, P. , Sotskov, Y. N. , Werner, F. , “Complexity of shop-scheduling problems with fixed number of jobs: a survey” , *Mathematical Methods of Operation Research*, Vol. 65, pp. 461–481, 2007.
- [43] Calmels, D. , “The job sequencing and tool switching problem: state-of-the-art literature review, classification, and trends” , *International Journal of Production Research*, Vol. 57, No. 15-16, pp. 5005-5025, 2019.
- [44] Ghiani, G. , Grieco, A. , Guerriero, E. [48] Farughi, H. , Dolatabadiazadeh, M. , Moradi, V. , Karbasi, V. , Mostafayi, S. , “Minimizing the number of tool switches in flexible manufacturing cells subject to tools reliability using genetic algorithm” , *Journal of Industrial and Systems Engineering*, Vol. 10, pp. 17-33, 2017.
- [45] Farughi, H. , Dolatabadiazadeh, M. , Moradi, V. , Karbasi, V. , Mostafayi, S. , “Minimizing the number of tool switches in flexible manufacturing cells subject to tools reliability using genetic algorithm” , *Journal of Industrial and Systems Engineering*, Vol. 10, pp. 17-33, 2017.
- [46] Inoue, S. , Urata, A. , Kodama, T. , Huwer, T. , Maruyama, Y. , Fujita, S. , Shinno, H. , Yoshioka, H. , “High-Precision Mobile Robotic Manipulator for Reconfigurable Manufacturing Systems” , *International Journal of Automation Technology*, Vol. 15, No. 5, pp. 651-660, 2021.
- [47] Denkena, B. , Schinkel, F. , Pirnay, J. , Wilmsmeier, S., “Quantum algorithms for process parallel flexible job shop scheduling” , *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 33, pp. 100–114, 2021.
- [48] Kadowaki, T. , Nishimori, H. , “Quantum annealing in the transverse Ising model” , *Physical Review*, E 58, pp. 5355–5363, 1998.
- [49] AMPLIFY/技術ソース/量子アニーリング方式,
<https://amplify.fixstars.com/ja/techresources/annealing-method/> , 09-05-2022.
- [50] D-Wave Ocean Software Documentation [WWW Document], n.d. URL <https://docs.ocean.dwavesys.com/en/stable/index.html> (accessed 5.9.2023).
- [51] Raymond, J. , Stevanovic, R. , Bernoudy, W. , Boothby, K. , McGeoch, C. C. , Berkley, A. J. , Farré, P. , Pasvolsky, J. , King, A. D. , “Hybrid Quantum Annealing for Larger-than-QPU Lattice-structured Problems” *ACM Transactions on Quantum Computing*, Vol. 4, pp. 1–30, 2023.
- [52] Hybrid Solvers for Quadratic Optimization [WWW Document] , n.d. URL <https://dwavequantum.com/resources/white-paper/hybrid-solvers-for-quadratic-optimization/> (accessed 10.11.2023)
- [53] Schworm, P. , Wu, X. , Glatt, M. , Aurich, J. C. , “Solving flexible job shop scheduling problems in manufacturing with Quantum Annealing” , *Production Engineering*, Vol. 17, pp. 105–115, 2023.
- [54] D-Wave User Manual 09-1076A-T Getting Started with the D-Wave System, 2020-05-13

- [55] D-Wave White Paper 14-1039A-B D-Wave Hybrid Solver Service: An Overview, 2020-05-13
- [56] De Falco, D. , Apolloni, B. , Cesa-Bianchi, N. , “A numerical implementation of quantum annealing”, *Stochastic Processes, Physics and Geometry - Proceedings of the Ascona/Locarno Conference*, pp. 97-111, 1988.
- [57] Lucas, A. , “Ising formulations of many NP problems”, *Frontiers in Physics*, Vol. 2, pp. 5, 2014
- [58] Kurowski, K. , Węglarz, J. , Subocz, M. , Różycki, R. , Waligóra, G. , “Hybrid Quantum Annealing Heuristic Method for Solving Job Shop Scheduling Problem“, *Proceedings of the International Conference of Computational Science*, pp. 502-515, 2020.
- [59] Venturelli, D. , Marchand, D. J. J. , Rojo, G. , “Quantum Annealing Implementation of JobShop Scheduling”, *arXiv:1506.08479v2 [quant-ph]*, pp. 1-15, 2016.
- [60] Tanahashi, K. , Takayanagi, S. , Motohashi, T. , Tanaka, S. , “Application of Ising Machines and a Software Development for Ising Machines”, *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol. 88, No. 6, pp. 61010, 2019.
- [61] Zaman, M. , Tanahashi, K. , Tanaka, S. , *PyQUBO: Python Library for QUBO Creation (2021)*, *IEEE Transactions on Computers*.
- [62] Beezão, A. C. , Cordeau, J. -F. , Laporte, G. , Yanasse, H. H. , “Scheduling identical parallel machines with tooling constraints” , *European Journal of Operational Research*, Vol. 257, pp. 834–844, 2017.
- [63] Özpeynirci, S. , Gökgür, B. , Hnich, B. , “Parallel machine scheduling with tool loading” , *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 40, pp. 5660–5671, 2016.
- [64] Tri Windras Mara, S. , Sutoyo, E. , Norcahyo, R. , Pratama Rifai, A. , “The job sequencing and tool switching problem with sequence-dependent set-up time” , *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, Vol. 35, pp. 53–61, 2023.
- [65] Van Hop, N. , Nagarur, N. N. , “The scheduling problem of PCBs for multiple non-identical parallel machines” , *European Journal of Operational Research*, Vol. 158, pp. 577–594, 2004.
- [66] Python MIP Documentation [WWW Document], n.d. URL <https://docs.python-mip.com/en/latest/index.html> (accessed 5.9.23).

謝辞

本論文の作成にあたり、終始適切な助言を賜り、また丁寧に指導して下さった東京大学生産技術研究所教授 吉岡勇人先生に深く感謝します。本研究の趣旨を理解し快く協力して頂いた東京工業大学助教 田島真吾先生にも心から感謝します。

そして、博士課程への進学および研究全体に多大なるご支援をいただきました東京工業大学名誉教授 新野秀憲先生に心より感謝申し上げます。

共同研究者である株式会社牧野フライス製作所 藤田祥博士には、研究のあるべき姿や進め方、論文の細部に至るまでご指導をいただきました、ここに深く感謝の意を表します。そして、投稿論文の共著者である同社旧 SIT 本部の秦同博士、猪狩真二博士、Mr. Tobias Huwer、児玉 匠さん、浦田昇尚博士に深く感謝いたします。特に秦同博士には量子アニーリング技術について初歩から加工セルの数理モデル化そして実験まで、多くのご指導をいただきました。本活動を通して、新しい技術を学ぶことができました。丁寧に指導くださった秦同博士に厚くお礼申し上げます。また、同社旧生産システム研究所で、生産システムの設計、開発、実験に取り組んでくださった丸山祐也さんと同研究所メンバーに心から感謝いたします。

本論文のテーマの範囲は「再構成可能な生産システム」というスコープが広きに渡る壮大な研究でした。決して個人で成し遂げられるわけがなく、チームとして多くの困難に共に取り組み、それを乗り越える喜びを共有してきました。まさにチームワークの成果であったと思います。同社の開発本部、旧 SIT 本部、旧生産システム研究所の関係者の皆さんに心から感謝いたします。関係者皆様と共に創り上げた本研究成果が、今後の工作機械産業の発展、ひいては日本の製造業に貢献できることを心より願っております。

本当にありがとうございました。

2024年1月29日

井上 真一