

# 三菱電機技報

9

2024  
Vol.98 No.9

先進デジタル技術(後編)

## No.9

特 集	先進デジタル技術(後編)	Advanced Digital Technology (The second part)
特集論文		
基板チェックツールによるEMC・信号伝送設計 の業務効率化と品質向上……………	1-01	Improving Operational Efficiency and Quality in EMC and Signal Transmission Design Using Printed Circuit Board Check Tools Akinobu Nakamura, Toshihiko Aoki, Kazuhiro Kobayashi, Yuuji Naomi, Hiroki Sakurai
モデルベース開発を活用した工作機械 の機構-制御設計プロセス革新……………	2-01	Mechanical & Control Design Process Innovation for Machine Tools with Model Base Development Shigeyuki Kanaya, Keita Tonoike, Tomoya Fujita, Seiji Uozumi, Takuya Kuni, Yohei Isoda
三菱電機グループの持続的なものづくりを支える AIソリューション群……………	3-01	AI Solutions Supporting Sustainable Manufacturing of Mitsubishi Electric Group Companies Motoaki Tamaya
ものづくり現場でのデジタルツインの取組み……………	4-01	Initiatives of Digital Twin in Manufacturing Sites Hidetaka Ochiai, Ryotaro Matsushita
パズルキューブ早解きと巻線機のコア技術……………	5-01	Core Technologies of Cube Solving Robot and Coil Winding Machine Takumi Nakae
製造設備向けローコード開発技術……………	6-01	Low-code Development Method for Manufacturing Facilities Takaaki Abe, Satoshi Noguchi
熟練技能継承に向けた技能評価AI技術……………	7-01	Skill Assessment AI Technology for Expert Skill Succession Yuichi Sasaki, Takafumi Koike, Yusuke Takahashi, Kentaro Mori, Naoyuki Tsushima

執筆者の所属は執筆時のものです。

三菱電機では、サステナビリティ経営を実現する4つのビジネスエリアとして、「インフラ」「インダストリー・モビリティ」「ライフ」「ビジネス・プラットフォーム」を設定しています。

三菱電機技報ではこの4つのビジネスエリアに分類し特集を紹介しています。

今回の特集では8月号に引き続き全エリアを支える基盤となる“先進デジタル技術(後編)”をご紹介します。

# 基板チェックツールによるEMC・信号伝送設計の業務効率化と品質向上

*Improving Operational Efficiency and Quality in EMC and Signal Transmission Design Using Printed Circuit Board Check Tools*

中村彰伸\*  
Akinobu Nakamura  
青木俊彦†  
Toshihiko Aoki  
小林和博‡  
Kazuhiro Kobayashi

直海佑司‡  
Yuuji Naomi  
櫻井浩希‡  
Hiroki Sakurai

\*三菱電機㈱ 設計システム技術センター  
†同社 鎌倉製作所  
‡三菱電機エンジニアリング㈱

## 要 旨

製品の高性能化・高機能化に伴い、プリント基板設計に起因するEMC(ElectroMagnetic Compatibility：電磁両立性)・信号伝送の設計手戻りは、従来製品と比較して増大傾向にある。プリント基板設計に起因する設計手戻り抑制のため、従来は目視でプリント基板の部品実装、配線を検証していた。今後、更なる製品の高性能化・高機能化によって目視での検証には膨大な時間を要することが懸念されている。三菱電機ではこの問題を解決するため、基板設計上の設計制約を自動的に検証する基板チェックツールを導入している。

今回、このツールを効率的に運用する手法を開発し、基板検証時間短縮と設計品質向上の見込みを得た。今後は、開発した手法を充実化し、EMC・信号伝送設計業務の効率化、基板設計品質の向上を図る。

## 1. ま え が き

三菱電機開発製品での近年の特長として、SDRAM(Synchronous Dynamic Random Access Memory)に代表されるメモリーの通信周波数の高速化や製品の小型化、高機能化に伴う高密度化がある。これによって、EMC及び信号伝送の設計手戻りは、従来製品と比較して増大傾向にある。プリント基板上の部品配置、配線はEMCや信号伝送路の品質を決定付ける重要な要素である。試作前の設計段階で、手戻りを発生させない設計にするため、SI(Signal Integrity)解析や電磁界解析といったシミュレーションを積極的に活用している。SI解析では、使用するIC(Integrated Circuit)とプリント基板配線の簡易モデルを使用したプリ解析と、実際のプリント基板配線モデルを使用するポスト解析を行う方法が主流である。また、電磁界解析では、2.5次元や三次元の電磁界解析を活用してEMCリスクを低減する設計手法の開発が進められている<sup>(1)</sup>。しかし、あらゆる信号伝送路やEMC問題に対して、SI解析や電磁界解析を適用して全てを検証することは技術的にも時間的にも困難である。そのため、プリント基板の設計制約を定めて、EMC・信号伝送の不具合が発生するリスクを低減する方法が取られている。

このようにプリント基板の設計制約を定めた上で、部品実装、基板配線といったプリント基板の設計作業を行い、最終的に設計制約を遵守した基板設計になっているかを検証する必要がある。この検証に関して、一般的にはチェックリストに基づいて目視で確認する手法が取られている。昨今、プリント基板の高速化・高密度化に伴い設計制約は厳しくなり、チェック項目が増大傾向である。このため、目視での検証に膨大な時間を要して、検証漏れや判断ミスなど人為的な理由による設計手戻りが発生しやすい。このままでは、検証要員の増員が必要になり、さらに、増員した人員の教育も不可欠になる。

三菱電機ではこのような状況に対して、基板設計の設計制約を遵守しているか自動的に検証する基板チェックツールの導入を進めている。以前から存在するツールではあったが、設定の煩雑さや検証精度といった問題があり十分活用できていなかった。これらの問題に対して、ツールを効率的に運用する手法を開発し、宇宙事業製品に適用した結果、基板設計の検証時間短縮と品質向上の見込みを得た。

## 2. 基板設計での設計制約

### 2.1 設 計 制 約

プリント基板上の部品配置と配線は、EMCや信号伝送路の品質を決定づける重要な要素である。基板設計の前工程である回路設計までが十分であっても、基板設計が不十分であればEMC及び信号伝送の設計不具合を引き起こす。これら

の不具合を抑制するために数十種類に及ぶ様々な基板設計制約を規定している。

この章では、設計制約の例を2例述べる。

図1は一般的にスリット跨(また)ぎと呼ばれる設計制約である。信号が同一のリファレンスグラウンド(以下“GND”という。)になっているかを確認する。図1のNG例のように分断するリファレンスGNDに配線する信号は各種のEMC問題を引き起こす要因になる。そのため、GNDパターンを分断する構成になっていないか確認する必要がある。

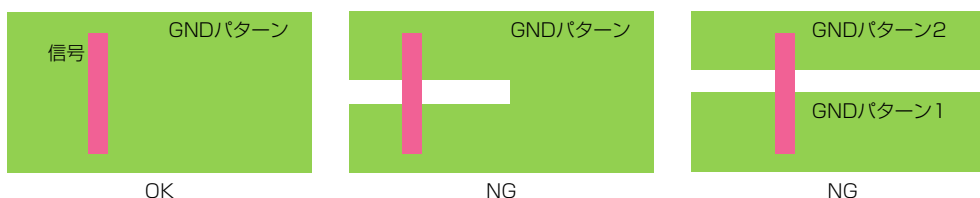


図1-スリット跨ぎ配線

図2はリターンビアと呼ばれる設計制約である。GNDに流れる信号のリターン電流を最短で発生源側に戻ることが品質確保のためには必要であり、GNDビアを信号ビアの近傍に設ける必要がある。複数の層にわたって信号を配線する場合、信号ビアの所定以内の距離にGNDビアを設けているか確認する。

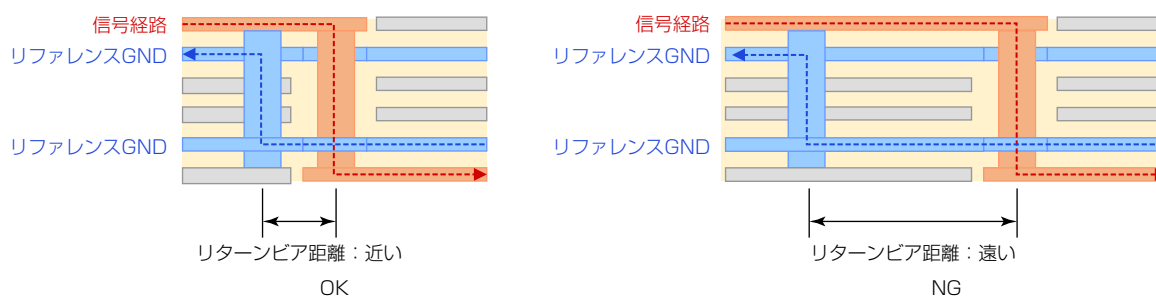


図2-リターンビア

## 2.2 設計制約検証での問題点

三菱電機製品でのプリント基板は、配線層当たりの信号が数十から数百本、ビアが信号の数倍あり、かつ、信号配線層が多い場合十数層になる。配線層ごとに各々の信号・ビアや実装部品が設計制約を遵守しているか確認する必要があるが、膨大な組合せがある信号・ビア、実装部品と設計制約に対して、一つ一つを目視で検証することは困難な作業である。また、今後、製品の高性能化・高機能化によってプリント基板の設計制約や検証対象になる信号やビアは更に増加し、効率的な開発が困難になる。

## 3. 基板チェックツール

### 3.1 基板チェックツールの概要

2.2節に述べた問題を解決する手段として基板チェックツールの活用がある。これによって基板の設計制約を自動的に検証できるようになる。例えば、2.1節に述べたスリット跨ぎやリターンビアを自動的に検証できる。

スリット跨ぎの場合、チェックする対象信号を指定して、信号とGNDパターンが常に層間で隣接している構成になっているかを判定する。隣接していない部分がある場合はNGになる。リターンビアの場合、図3のように、対象信号の信号ビアとGNDビアの距離のしきい値(検出範囲)を決めて検証する。しきい値以内にGNDビアがない場合はNGになる。

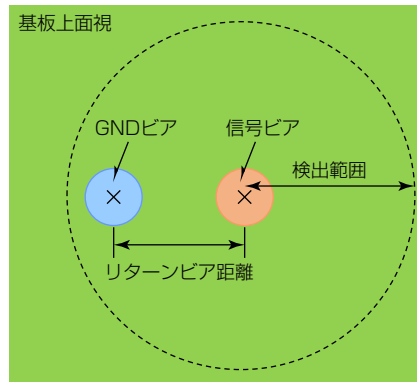


図3-リターンビアのチェック内容

### 3.2 基板チェックツールの効果

ツールは、所定の検出ルールに従い、実装部品、配線が制約を満足しているか機械的にチェックしている。そのため、設計制約を満足していない実装部品、配線を短時間で漏れなく抽出できる。例えば、3.1節に記載のリターンビアという設計制約に関して、プリント基板の配線・ビアが多い場合には、全てを目視でチェックすると数時間を要するが、ツールでは数分で検証できる。

### 3.3 基板チェックツール運用上の問題

3.2節に述べたように、ツールは検証時間の短縮と確実な検証が期待できる。三菱電機は多種多様のプリント基板を限られた期間内に開発している。限られた期間内に限られた人員で十分な検証をするには、ツールを効率的に運用する必要がある。

図4は、ツールを用いた検証フローである。まず、基板CAD(Computer Aided Design)で作成した基板データをツールに取り込んで、次に、信号を分類する。信号を分類した後、検証ルールを選択、パラメーターの設定、ルール実行後に結果を判断して修正すべき箇所を確認する。

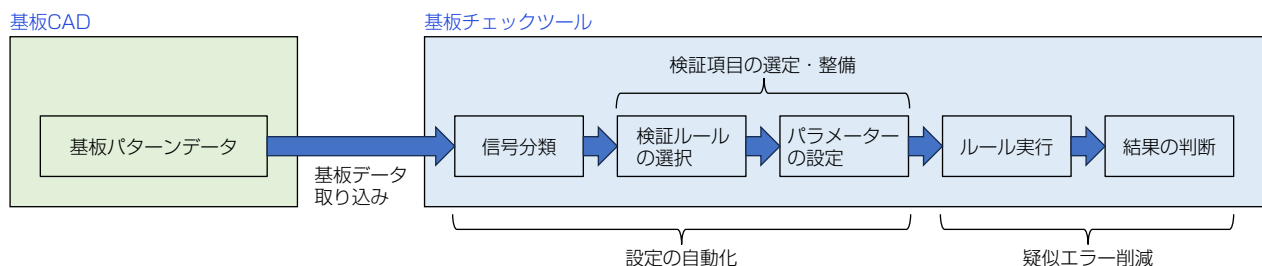


図4-基板チェックツールを用いた検証フロー

ツールの効率的な運用のため、この検証フロー上の重要な問題点は次の三点である。一つ目は検証ルールやパラメーターが適切に選択・設定されていないと発生するエラーが増大することである。二つ目はツールの設定に時間を要することである。信号種別ごとに検証ルールを選択してパラメーターを設定するが、信号の分類方法、使用する検証ルール、パラメーターは製品によって異なる。また、基板データが変わるたびに設定する必要がある。全ての信号に同じ検証ルール、パラメーターを使用する場合は不要になるが、検証時間、エラーの増大につながり効率的な運用の妨げになる。三つ目は結果に修正が必要なエラーと修正不要な疑似エラーが混在することである。疑似エラーの件数が多くなると結果の判断に時間を要することになり、本来修正が必要なエラーを見落とすことにつながる。

これら三つの主要な問題点に対して、“検証項目の選定・整備”“設定の自動化”“疑似エラー削減”に取り組んで、効率的な運用手法を開発した。

## 4. 基板チェックツール効率化のための手法開発

### 4.1 検証項目の選定・整備

ツールには得手不得手があり、あらゆる設計制約を効果的に検証できるわけではない。まずは製品で遵守すべき設計制約を明確にし、その上でツールで検証すべき設計制約を選定した。選定に当たっては、検証精度、時間といった評価項目を用いる。その後、検証ルールを決めて、使用するパラメーターを最適化した。パラメーターが厳しすぎるとエラーが膨大に発生し、発生したエラーの判断に時間を要する。そのため、原理原則や既存の製品の設計値等を参考にして適切なパラメーターを設定した。

### 4.2 設定の自動化

ツールを使うには、図4のとおり、信号の分類、検証ルールの選択、パラメーターの設定が必要になる。信号の分類をせず、全ての信号を対象として、同一ルール・パラメーターで検証すれば設定を省略できる。しかし、検証時間やエラー件数の増大といった問題を引き起こして、製品開発の中でツールの運用が困難であった。また、ツール上でのこれらの作業は時間を要していた。この段階での設定ミスを抑制するため自動化が必要になった。具体的には、回路・基板CADの情報と連携して、ツール上で自動的に信号を分類し、検証ルールの選択、パラメーターの設定を自動化した。

図5にツールへのデータ取り込みと分類を示す。信号名であるネット名とそれぞれのネットに付与している属性情報を活用して基板チェックツール上で自動的にグルーピングすることで、ツール上での信号分類の効率を飛躍的に向上させた。また、グルーピングした信号と検証ルールとパラメーターの関係は事前に適切に定めているため、検証段階での設定は不要である。このように、ネット名、属性の付与方法に規則を設けて、信号分類と検証ルール、パラメーターの関係を決めることで、ツールの設定作業を自動化し、作業時間短縮と設定ミス抑制を実現した。

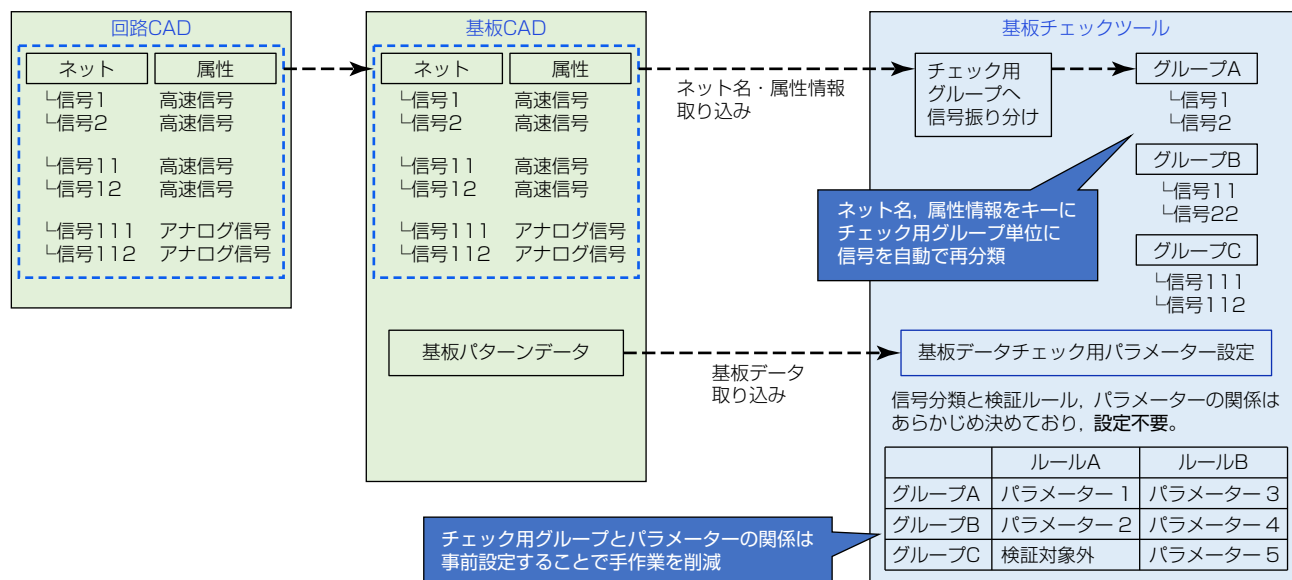


図5-基板チェックツールへのデータ取り込みと分類

### 4.3 疑似エラー削減

3.3節に述べたとおり、ツールで検証すると、修正すべきエラーとともに疑似エラーと呼ばれる修正する必要のないエラーも検出される。ツールでは検証内容ごとに適切なルールを選択して検証するが、適切なルールを選択したとしても修正すべきエラーだけを検出することは難しく、疑似エラーを含んだ結果になる。この対策として対象信号の絞り込み、パラメーターの最適化、検証ルール自体を改修した。例えば、動作周波数の速い高速信号は近傍に配線している信号に対し



て電磁干渉を起こしやすく、周囲の配線との間隔を十分広げる必要がある。周囲配線との距離を検証するルールでは高速信号だけを対象とする、又は、高速信号は周囲との間隔を広めにとって、それ以外の信号は通常の間隔にするなど信号の重要度によってパラメーターを分けて、不要なエラーを出さないようにした。また、ツールに標準搭載されているルールを使用して三菱電機的设计制約を検証すると、検証不要範囲まで検証され、疑似エラーの増大を引き起こしていた。このようなルールに対しては、三菱電機独自の検証ルールを作成することで疑似エラーを削減した。

#### 4.4 効果

図6は、開発した基板チェックツール活用手法による検証時間削減効果の概念図である。対象になるプリント基板によって効果は変動する。効率化前は、ツール活用によって目視による検証時間は削減できたものの、設定時間や疑似エラーを含む結果判断に時間を要しており、結果的に合計時間は同程度であった。効率化後は、設定時間や結果判断の時間が大幅に低減でき、目視だけで検証した場合より検証時間を削減できた。また、目視では検証漏れが発生するリスクを含んでいるが、ツールは機械的に検証するため、検証漏れを抑制する効果も得た。

今後、製品の高性能化・高機能化に伴い、検証対象になる信号・ビアの増大や検証制約の増加が必至になる。この手法を用いることで時間の削減と精度の確保を両立できる。

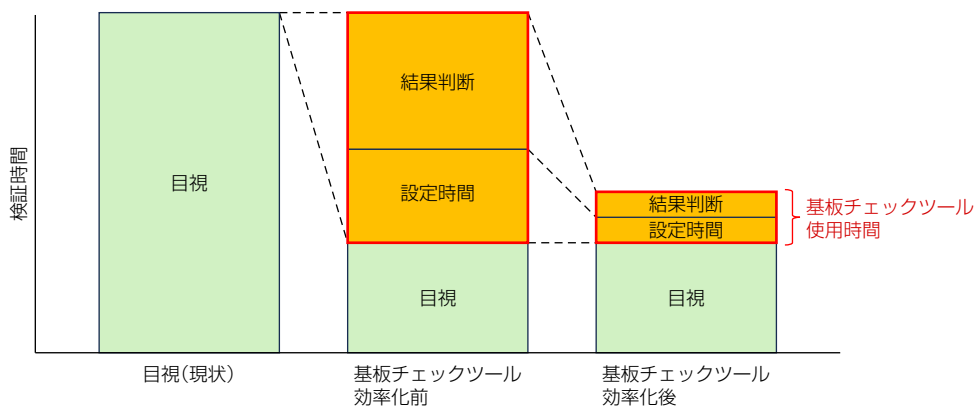


図6-基板チェックツール効果

## 5. むすび

三菱電機では、EMC及び信号伝送の設計手戻り抑制や、今後の製品の高性能化・高機能化に伴うEMC・信号伝送設計業務の増大に対応するため、基板チェックツールを効率的に運用する手法を開発した。今後は、開発した手法を三菱電機内で充実化し、EMC・信号伝送設計業務の効率化、基板設計品質の向上を図る。

また、回路・基板CADとツールのデータ連携を進めることで、設定の効率化、検証精度の向上を図る。さらに、目視で検証している項目を基板チェックツールで検証可能になるよう新規ルール作成やデータ連携を進める。

## 参考文献

- (1) 設計フロントローディングに向けた静電気ノイズ可視化技術の活用, 三菱電機技報, 98, No.1, 1-5-01 (2024)

# モデルベース開発を活用した工作機械の機構-制御設計プロセス革新

金谷茂之\*  
Shigeyuki Kanaya  
外池恵大\*  
Keita Tonoike  
藤田智哉†  
Tomoya Fujita

魚住誠二‡  
Seiji Uozumi  
國 拓也§  
Takuya Kuni  
磯田洋平||  
Yohei Isoda

*Mechanical & Control Design Process Innovation for Machine Tools with Model Base Development*

\*設計システム技術センター  
†先端技術総合研究所(博士(工学))  
‡同研究所  
§名古屋製作所  
||コミュニケーション・ネットワーク製作所

## 要 旨

工作機械などのメカトロニクス製品開発で、加工品質及び生産性(以下“加工性能”という。)の向上が求められている。加工性能の向上には、高速動作と精密な位置決めが両立が必要になる。従来の開発プロセスでは、代表的な性能である加工精度に対して、機械の変形や振動、摩擦が与える影響を予測することは難しく、試作・改良の繰り返して完成度を高める必要があり、開発が長期化していた。課題である開発期間を削減するため、弾性体機構と制御の連成解析モデルを構築した。工作機械を模擬した簡易検証装置の連成解析モデルを活用し、加工動作のシミュレーションと実験の結果を比較した。その結果、連成解析モデルが簡易検証装置の動作を再現可能なことを確認した。

## 1. ま え が き

モデルベース開発(MBD: Model Base Development)、モデルベースシステム開発(MBSE: Model Based Systems Engineering)とは、一般にシミュレーションモデルに限らず、文書や図面に記載がない抽象化した要求や機能を表現したツリーやブロック図を共通言語として、段階的に詳細化・具体化して事前評価を進める開発のことを指す。本稿でのMBDは特に、1D-CAEや3D-CAEを用いた事前評価を取り入れた開発と定義する。

一般的な開発プロセスでは、開発上流の企画段階で目標性能の検討や仕様分析が不十分な場合や、仕様から機能/要素への分解、紐(ひも)づけが曖昧な場合、開発下流の評価検証段階で手戻りが発生するといった課題がある。また、開発下流では、部位・技術分野別で詳細を設計するため部分最適になり全体最適化が難しいことや、製品システム全体の目標性能達成の目途出しが試作によってだけ確認可能といった課題がある。

各開発プロセスで求められるシミュレーションモデルは、開発上流ではシステム構想モデルとして1D-CAE、開発下流では製品性能確認モデルとして3D-CAEが用いられることが多い。MBDを成功させるには、各開発プロセスでボトルネックになっている工程を抽出して、その原因を分析し、適切なシミュレーションモデル化によってあるべき開発プロセスを構築する必要がある。本稿では、レーザー加工機に代表される工作機械を題材として、図1に示す従来の開発プロセスから、連成解析を活用したMBD開発プロセスを検討する。

## 2. 従来の工作機械開発プロセスと問題

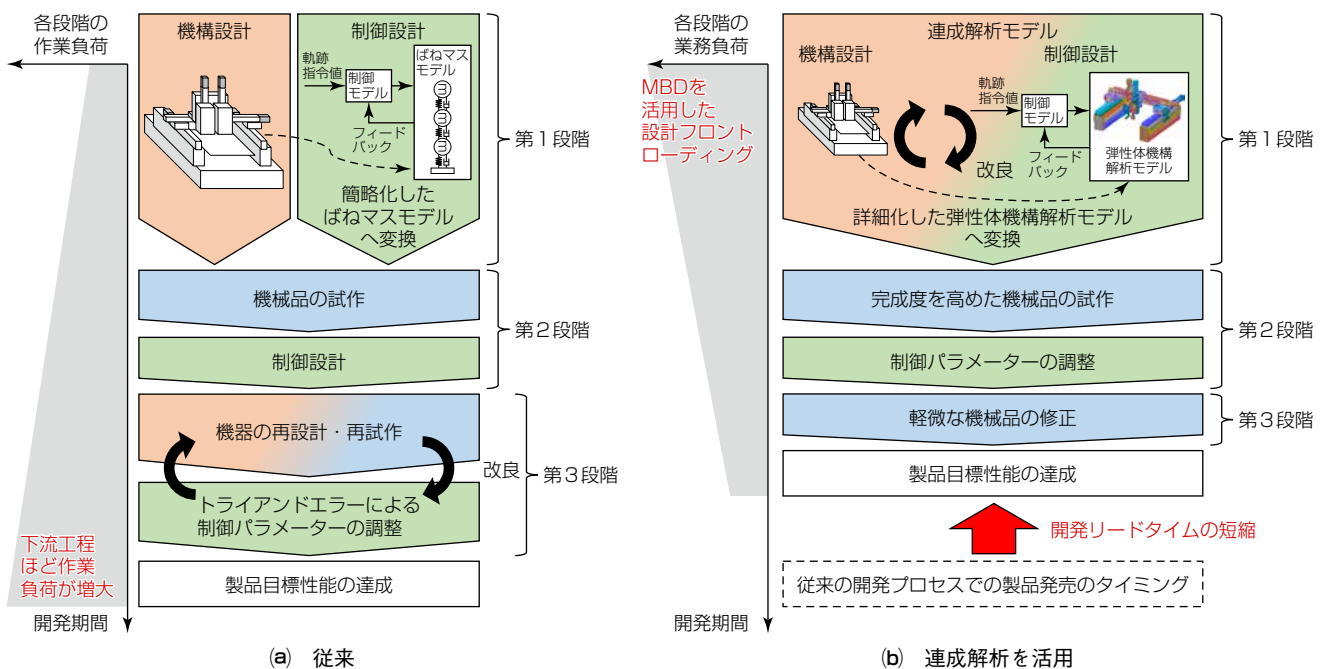
近年、レーザー加工機を始めとする工作機械で、ユーザー工場での品質と生産性を確保するために、加工性能の向上が求められている。例えば、工作機械に要求される代表的な性能として、高速化、高加減速化、省エネルギー化、低コスト化が挙げられる。生産性向上のために、高速化及び高加減速化すると、励振される振動成分の増大や摩擦影響の顕在化によって加工品質が低下する場合がある。また、省エネルギー化や低コスト化のために使用する材料を削減すると、固有振動数などの振動特性が悪化する場合がある。そのため精密な位置決めと高速動作等の加工性能向上と材料コストを適正に両立させる機器設計技術が必要である。

従来の工作機械の開発では、図1の従来の工作機械開発プロセスに示すように、試作機を複数回試作・改良しながら性能を作り込んでいた。従来の工作機械の開発プロセスは、大きく分けて3段階の開発フェーズになっている。開発上流の第1段階では、構造と制御の設計者が構造体を質点とばねに置き換えたばねマスモデルで情報を共有するが、連携度が低い開発プロセスになっていた。第2段階で機械を試作し制御と組み合わせで性能を検証し、第3段階で制御の調整と機械改良を繰り返すことで製品性能を作り込んでいた。そのため、実験による制御調整と機械改良に基づく目標性能達成には時間を要して、開発期間が長期化し、開発コストが増大してしまう。また、開発下流での構造の改良では、設計自由度に



制約があり、部分的な改良しかできず、大幅な性能改善の達成は困難であった。これらに示すとおり、工作機械の開発プロセスで、リードタイム短縮のためには、開発下流の試作による製品性能検証に代わるシミュレーションモデルを構築し、開発上流の設計段階で、構造と制御の設計結果を密に擦り合わせる事が可能になるモデルの構築や、開発プロセス協調化が課題であった。これまで、CAE(Computer Aided Engineering)ソフトウェアを用いて構築した3D機械構造と制御のモデルを連成したモデルベースシミュレーターは提案されている<sup>(1)</sup>が、解析時間及び精度については言及されていない。また、有限要素モデルを活用した低次元モデルと制御系を連成し、振動を抑制する手法は提案されている<sup>(2)</sup>が、姿勢変化などの機構動作に対しては言及されていない。

本稿では、図1の連成解析を活用した工作機械の開発プロセスの実現を目指して、“3D-CAEによる弾性体機構解析モデル”と“数値解析シミュレーターによる制御モデル”を連成した解析手法を構築し、その解析時間と工作機械の性能予測精度を述べる。



### 3. 工作機械の加工精度予測手法

#### 3.1 弾性体機構解析モデル概略

図2は今回対象とした小型工作機械の弾性体機構解析モデルである。表1にこの工作機械の仕様を示す。機構解析モデルは、機構解析ソフトウェアを用いて構築した。対象とした小型工作機械は、ボールねじ駆動のガントリー構造の小型実験機で、加工用の主軸の代わりに、XY平面内の工具-工作物相対変位を測定するための、グリッドエンコーダーを取り付けている。弾性体機構解析モデルは、設計時に作成した3D-CADモデルをベースに、密度などの物性値を付与することで、各部品の質量、慣性モーメント、重心を算出している。ボールねじ駆動部分のトルク伝達については、マルチボディーモデルで再現している。また、振動モードをより正確に模擬するため、一部の部品を弾性体化し構築している。図3は図2に示す弾性体機構解析モデル内の弾性体化した部品を示す図である。

#### 3.2 連成解析モデル概略

図4に今回構築した連成解析モデルの概略図を示す。図4に示すとおり、数値解析シミュレーターによる制御モデルと機構解析ソフトウェアによる弾性体機構解析モデルが時刻歴に情報をやり取りする。まず、連成解析モデルにヘッド軌跡

の指令値をインプットし、制御ロジックに基づくモータトルク情報を計算する。計算したトルク情報は数値解析シミュレータ内のインターフェースから機構解析ソフトウェアの弾性体機構解析モデルへ受け渡して、ヘッドやモーターの位置及び速度を制御モデルに返す。これらの処理が時刻歴にループすることで、実機でのフィードバック制御をモデルベースで再現する。制御モデルからはヘッド軌跡などの時刻歴情報を出力し、弾性体機構解析モデルからは弾性変形による変位や応力の解析結果を出力する。ヘッド軌跡からは加工速度などに対応した加工精度が、弾性変形などの結果からは疲労強度の検証などが可能になり、設計段階での工作機械の性能評価が可能になる。

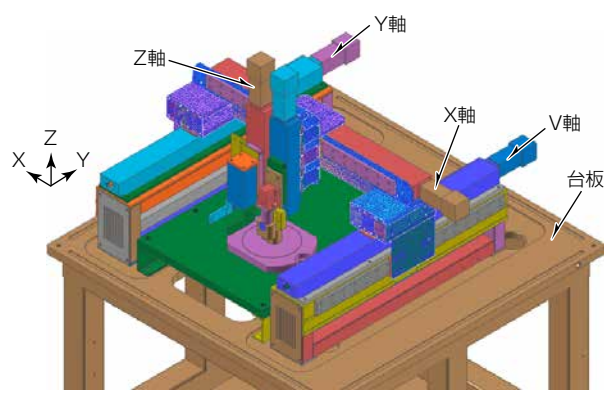


図2-弾性体機構解析モデルの概略図

表1-工作機械の仕様	
動作する質量(kg)	Y-V: 41, X: 13, Z: 1
駆動方式(pitch 6mm)	ボールねじ
動作範囲(mm)	X, Y: 300, Z: 100
最大速度(mm/min)	30,000
最大加速度(G)	1.5

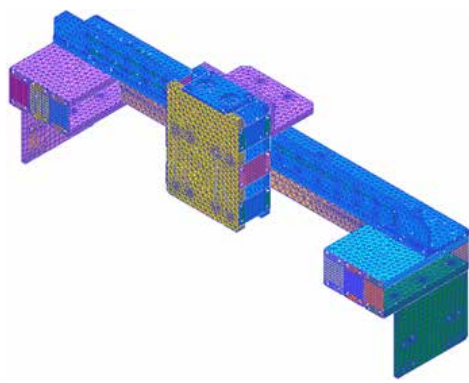


図3-機構解析モデル内の弾性体化領域

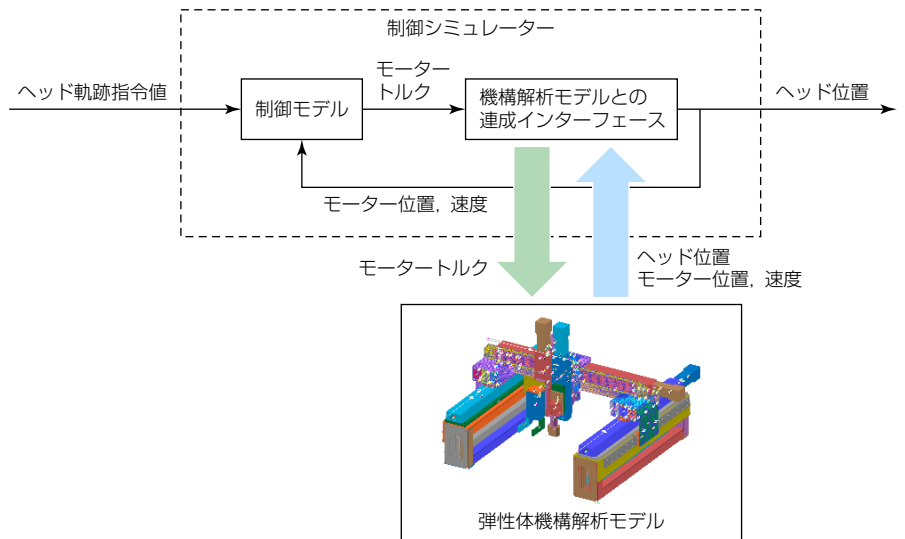


図4-連成解析モデルの概略図

#### 4. 連成解析での実機挙動の再現性確認

今回構築した連成解析モデルの再現性を確認する。再現性の確認では、図5に示す四角を描く角軌道の精度を比較する。角軌道の再現性確認では、軌道が直角に曲がった際のオーバーシュートと呼ばれる突起がポイントになる<sup>(3)</sup>。図6に連成解析モデルによる角軌道の解析結果を示す。突起のオーバーシュート、その後の振動の減衰挙動になっている残留振動を比較した結果、実験データと連成解析結果でよく一致することを確認した。これらのデータから、今回構築した弾性体機構解析モデルと制御モデルの連成解析手法は、今後のモデルベースでの加工性能予測に利用可能なことを確認した。

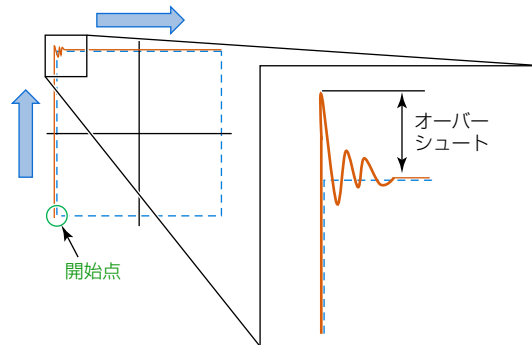


図5-四角を描く角軌道

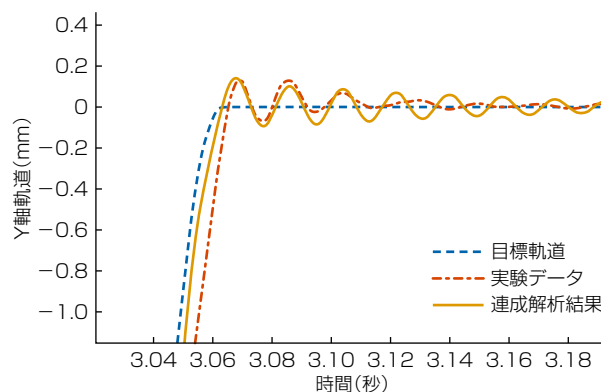


図6-連成解析結果と実験データの比較

#### 5. 検討する工作機械の開発プロセス

構築したコンパクトな連成解析モデルを用いたフロントローディング型の工作機械の開発プロセスでは、弾性体機構と制御の連成解析モデルを開発上流の第1段階に適用し、ヘッド軌跡などの加工性能を確認する。連成解析モデルから得られた結果情報から、機械と制御の設計パラメーターを相互に協調検討することで、従来は第3段階の試作による目標性能の作り込みを試作前の設計段階で可能にする。今回の新開発プロセス構築によって、従来プロセスの開発長期化の要因になっていた第3段階の試作の繰り返しによる性能作り込み回数を抑制し、開発期間の短縮と製品の高性能化が実現可能になる。

また、参考文献(1)によって提案されているとおり、連成解析モデルと最適化技術を組み合わせることで、制御パラメーターの最適化が可能になり、図7に示す制御パラメーター最適化によって、オーバーシュートを低減することが可能になる。これらを設計段階で適用する手法として、図8に示す連成解析モデルへ最適化モジュールを組み合わせることで、制御及び構造パラメーターの最適化が可能になる。これによって、設計者の構造と制御の設計結果を擦り合わせる検討時間を削減し、より創造性の高い業務時間を確保できる。

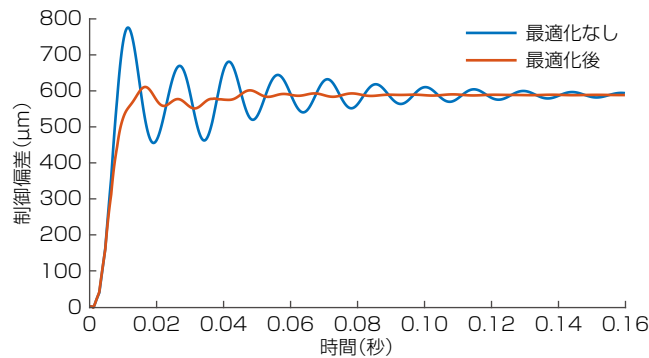


図7-制御パラメーター最適化によるオーバーシュートの抑制

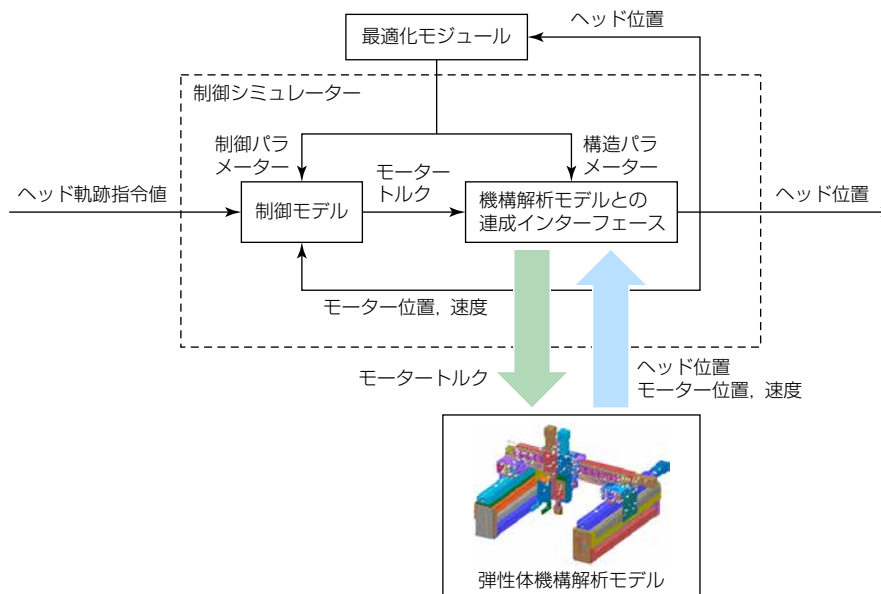


図8-最適化モジュールと組み合わせた連成解析モデル

## 6. む す び

今回検討した内容を次にまとめる。

- (1) 工作機械の開発期間短縮を目的に, “3D-CAEによる弾性体機構解析モデル”と“数値解析シミュレーターによる制御モデル”を連成した解析手法を構築し, 実験データと比較した。
- (2) 連成解析モデルで解析が実験の結果がよく一致することを確認し, モデルベースでの工作機械の性能予測が可能であることを示した。
- (3) 連成解析モデルを用い, 図1に示す設計上流段階での性能作り込みによる試作回数の低減と開発期間の短縮を実現する工作機械のモデルベース開発プロセスを考案した。
- (4) 構築した連成解析モデルと最適化技術を組み合わせて, 制御と構造のパラメーターを最適化することで, 設計結果を擦り合わせる検討時間を削減し, より創造性の高い業務時間を確保する。

## 参 考 文 献

- (1) 藤田智哉, ほか: Model-Based Designを用いた工作機械の設計・制御最適化手法の開発(第一報), 2022年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 542~543 (2022)
- (2) 小野仁章, ほか: スマート構造の複合領域最適化による振動・騒音の抑制, Dynamics and Design Conference 2005 CD-ROM論文集, No.05-15 (2005)
- (3) 松原 厚: 精密位置決め・送り系設計のための制御工学, 森北出版 (2008)

# 三菱電機グループの持続的なものづくりを支えるAIソリューション群

AI Solutions Supporting Sustainable Manufacturing of Mitsubishi Electric Group Companies

\*生産技術センター

## 要 旨

三菱電機グループでは、急激に変化する事業環境の中で持続的成長を確保するために、実務で利用可能なAIソリューション群の構築と社内展開を進めている。また、効率的に活用を推進するための標準プラットフォームや、それらを使いこなすためのAIとドメインの両方の知識を兼ね備えた生産技術者の育成を進めている。これによって、製造現場とDCM(Demand Chain Management)、ECM(Engineering Chain Management)、SCM(Supply Chain Management)領域のミドルオフィス業務での、熟練作業の代替、業務PDCA(Plan Do Check Action)サイクルの高速化、新たな設計解やプロセス改善点の抽出などの付加価値創出を目指している。将来的には、デジタルツインと生成AIとの組合せによる高度な判断の自動化(Autonomation)も構想している。

## 1. ま え が き

昨今、国内外で労働人口の減少や流動化、新型コロナウイルスなどの感染症、地震などの自然災害、そして政治・経済状況の急激な変化が起きており、これらに即応できる仕組みの構築が事業継続の上での重要な経営課題になっている。一方で、2010年代中ごろに産業応用が始まったディープラーニング技術や、2022年のChatGPTのリリースをきっかけに応用範囲が広がった生成AI技術など高度なAI技術がOSS(Open Source Software)やAPI(Application Programming Interface)を通じて容易に利用できるようになっている。

当社では、これらの状況を踏まえて、2017年以降、実用レベルでAIをものづくりに利用するための活用技術開発を進めてきた。また、これらの技術をグループ内に提供するためのプラットフォームの構築や運用ガイドラインの整備、業務の中で使いこなすことのできる人材の育成も進めている。今後、それらを標準ソリューション群として当社グループ内に順次展開していく計画である。本稿では、それらの取組みの最新状況と将来展望について述べる。

## 2. ものづくりAIソリューション群

製造業での業務は広範にわたることから、AIの活用を考える上で“ものづくり業務”とは何か、その範囲を定義しておくことが重要である。当社では、ものづくり業務を次のように定義している。工場などの製造現場で製造ラインなどを稼働させ、製品を製造するために行う業務(図1の①)、市場調査や販売保守などのDCM領域、開発・設計などのECM領域、調達や生産管理、物流などのSCM領域といったミドルオフィス業務(図1の②)である。

また、それら“ものづくり業務”で活用効果の大きいAIやその関連技術は次の三つに分類される。マシンラーニング、ディープラーニングなどの“データ駆動型AI”、数値最適化や統計モデルベース最適化などの“数理探索型AI”、生成AIを始めとする自然言語処理やデータ関連付けを行うオントロジーなどの“論理知識型AI”である(図2)。これらに対して、精度・速度・コストの面から現場で実用的に利用可能なレベルを目指して、AIのコア技術の性能向上、前後処理や学習データのクレンジングによる精度向上などの活用技術の進化、現場での実践と改善の取組みを進めている。以降、各応用領域で実用化又は検証中のソリューションについて概要を述べる。

### 2.1 製造現場向けソリューション

製造現場では、工場内に多数配置される設備の点検保守、プロセス品質向上のための不良要因分析や製造パラメーター調整、熟練者に限定されたスキルの代替、外観・音などの官能検査の代替、作業効率化のための作業手順分析や異常作業検知といった用途が見込まれる(図3)。



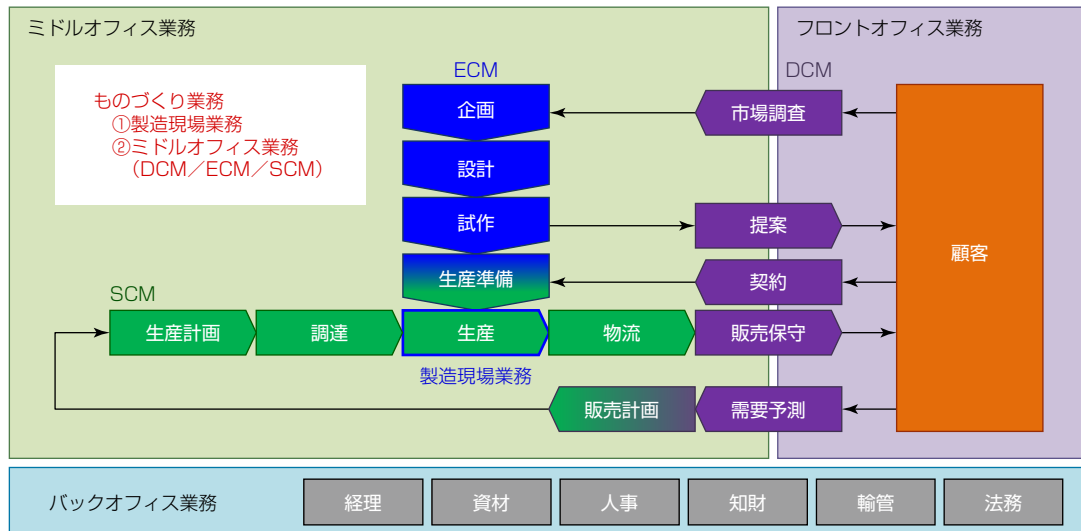


図1-ものづくり業務の範囲

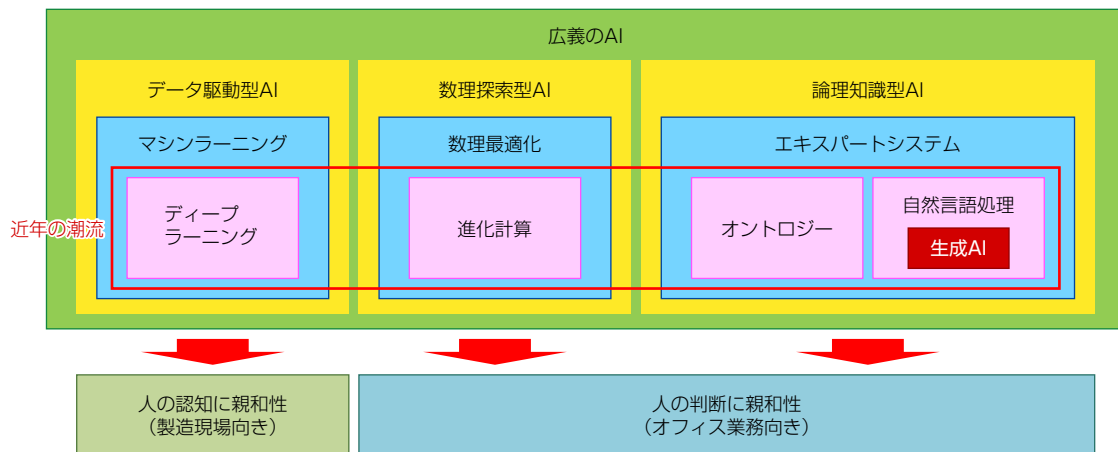


図2-ものづくりに活用可能なAI技術

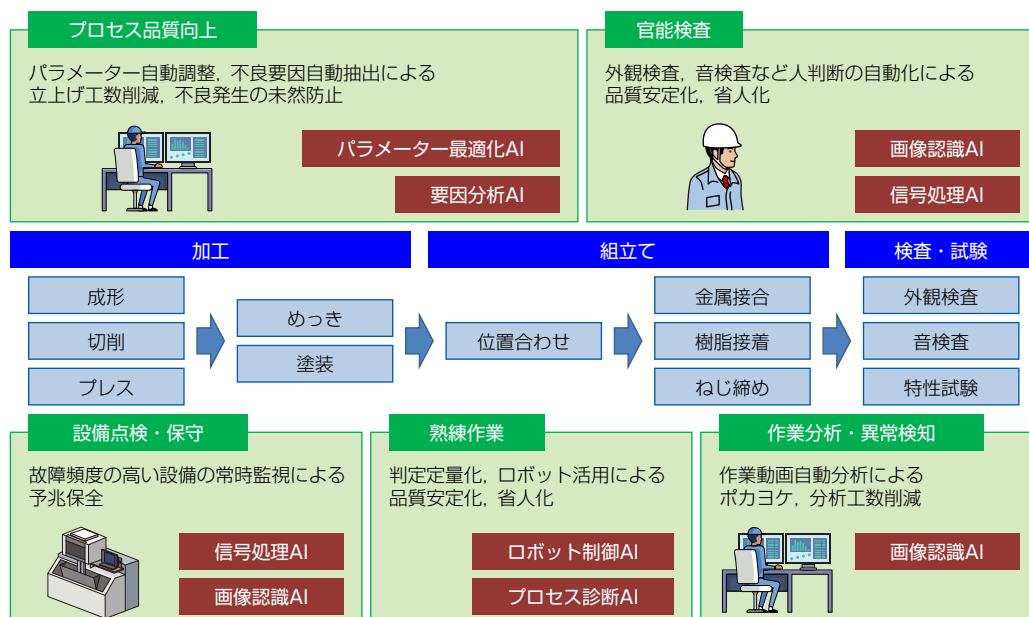


図3-製造現場向けソリューション

### (1) 設備異常検知AI

複数台の装置に対してセンサー出力や画像を定期的に巡回モニタリングしてデータを収集する。傾向をマシンラーニングやディープラーニングによって判定して異常時に保全担当者へ通知する。

### (2) 不良要因分析AI

複数工程から収集したプロセスデータについて、データ結合、欠損処理、特徴量抽出など前処理を実施する。マシンラーニング、ディープラーニングによって性能予測や性能の変動要因を抽出する。

### (3) 製造条件最適化AI

確率モデルベースの逐次最適化によって、過去の試行結果を考慮して最適試行条件を提示する。それによって熟練者と同等試行回数での製造条件を最適化する。

### (4) 外観検査AI

ディープラーニングを用いた画像分類、画像異常検知、位置認識とロジックでの画像処理を同一アプリケーション上で実行する。それによって見逃しや過検出が少なく画像判定できる<sup>(1)</sup>。

### (5) 音・信号検査AI

マイクや振動センサーなどの出力をサンプリングする。周囲ノイズ音の除去、時間変化を考慮した周波数分析、教師なし学習を用いたマシンラーニング、ディープラーニングによって異常を検知する。

### (6) 作業分析AI

当社独自技術である行動分析AIによって、カメラで取得した作業動画から、学習データ不要で製造現場での作業を分析する。作業ごとの時間ばらつきや工程抜けなどの異常を抽出する<sup>(2)</sup>。

## 2.2 DCM業務向けソリューション

ものづくりに関わるDCM領域では、製品企画や、需要予測、コンタクトセンターなど顧客情報や市場の分析に関連する用途が見込まれる。

### (1) アンケート分類AI

自然言語処理AIによって、コンタクトセンターに集められた顧客要望の分類ラベルの設定を支援する。全てのデータを設定したラベルに自動分類する。

### (2) 保守センターサポートAI

自然言語処理AIとディープラーニングによって、コンタクトセンターの過去の応答・対応履歴データベースから、顧客からヒアリングした状況に応じた過去の類似対応案件及び必要になる保守部品の候補を自動提案する。

### (3) 製品需要予測AI

データ分析AIによって、経済統計値データベースから先行指標を自動探索する。それらを基に製品需要を予測する。

### (4) 保守部品需要予測AI

データ分析AIによって、過去の保守部品の需要実績データベースから、新規の保守部品で類似需要傾向を示す指標を自動探索する。それらを基に需要を予測する。

## 2.3 ECM業務向けソリューション

設計や生産準備などのECM領域では、一連の設計プロセスで、文書の読解や照合、過去知見の活用、設計パラメーターの推定や最適化、図面類や文書類の自動生成や自動チェックなどの一連の業務をサポートする用途が見込まれる。

### (1) 技術文書分解・照合AI

自然言語処理AIによって、PDF(Portable Document Format)や紙で提供される技術文書をレイアウト分析して項目ごとに分解する。文書間での項目ごとの照合や差異分析を行う。

### (2) 技術文書検索・知識抽出AI

自然言語処理AIによって、社内に蓄積された技術文書やデータベースから関連情報を精度良く抽出する。

### (3) リスク抽出AI

自然言語処理AIによって、FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)やDRBFM(Design Review Based on Failure Mode)などの過去のリスク抽出データベースを基に、新規の工程や設計変更点に対するリスクを自動抽出する。

#### (4) 解析サロゲートモデルAI

ディープラーニングを用いたサロゲート(代理)モデルにCAEでの解析結果を学習させる。それによって長い解析時間を必要とする熱ひずみ解析、樹脂流動解析、流体解析などで高速に解の範囲を限定する。

#### (5) 設計条件最適化AI

CAEソフトウェアとの連携と確率モデルベースを逐次最適化する。それによって例えば樹脂成形部品でウェルドラインや反り量を最小にするゲート配置など最適設計条件を導出する。

### 2.4 SCM業務向けソリューション

SCM領域では、様々な計画の最適化をサポートする用途が見込まれる。近年では、高性能な数理最適化のエンジンが商用利用可能なOSSとして提供されており、これまで費用対効果の面で困難であった小規模な課題に対しても活用が可能になっている。

#### (1) PSI計画最適化AI

階層分析と数理最適化技術の組合せによって、オーダーごとの緊急度や重要度を考慮したPSI(Production Sales Inventory)計画を立案する。

#### (2) 生産計画最適化AI

生産スケジューラーと数理最適化技術の連携によって、段取り回数、日ごとの生産数量変動などを抑制しつつ納期遅延を最小にする生産計画を立案する。

#### (3) 生産レイアウト最適化AI

生産シミュレーターと数理最適化技術の連携によって、人や製品の移動距離や面積効率を最良にするレイアウトを立案する。

#### (4) 出荷・輸送計画最適化AI

数理最適化技術によって、配船や荷姿などの制約を考慮した出荷計画を立案する。

## 3. 社内展開のためのプラットフォーム構築と人材育成

当社では、商用サービスと内製ツールを使い分けながらソリューションごとのプラットフォームを構築し展開を図っている。高速動作が求められる製造現場向けソリューションについては、デスクトップアプリケーションとして内製ツールを提供し、処理スクリプトをアプリケーションと別に設定可能な構成にすることでアプリケーションの標準化を図っている。その他の業務アプリケーションは、マルチクラウドに対応したSaaS(Software as a Service)として提供することで、保守性の向上と高頻度のアップデートによる性能改善が可能な構成としている。

また、AI活用人材を、AI導入プロジェクトを牽引(けんいん)できる“牽引層”、OSSや商用サービスなどを活用してコードの実装や技術検証ができる“専門層”、AIに対してのリテラシーをもって取組みを支えることができる“裾野層”に区分し、ものづくりに関するドメインの知識を持つ生産技術者の中からダブルメジャー人材としての育成を進めている。また、先行して技術を習得したメンバーを中心に、各応用分野での部門横断のワーキンググループや勉強会を立ち上げて運営することで、組織の枠組みを超えた学び合いの文化と集合知の形成を図り、自律的に育成が進む体制を構築している。

## 4. 将来展望

2023年に生成AIのエンタープライズサービスの提供が開始されたことから、企業内の業務に生成AIを活用することが可能になってきた。当社でも2023年8月から生成AIサービスを全従業員向けに提供している。ものづくり領域でも、これまでに蓄積された技術資産からの知識抽出、ソフトウェア開発業務全般への応用、コンタクトセンターへの応用など、様々な分野でPoC(Proof of Concept)を進めている。

将来的には、インダストリアルIoT(Internet of Things)によって収集され、データ基盤上に一元管理された現実空間のデータ群と、製品・生産・設備シミュレーターなどで仮想空間上に生成されたデジタルツインのデータとを、生成AIを活用したAIエージェントが高度に分析・判断して設計条件、生産計画、製造条件などを最適化するプロセスを想定している(図4、図5)。

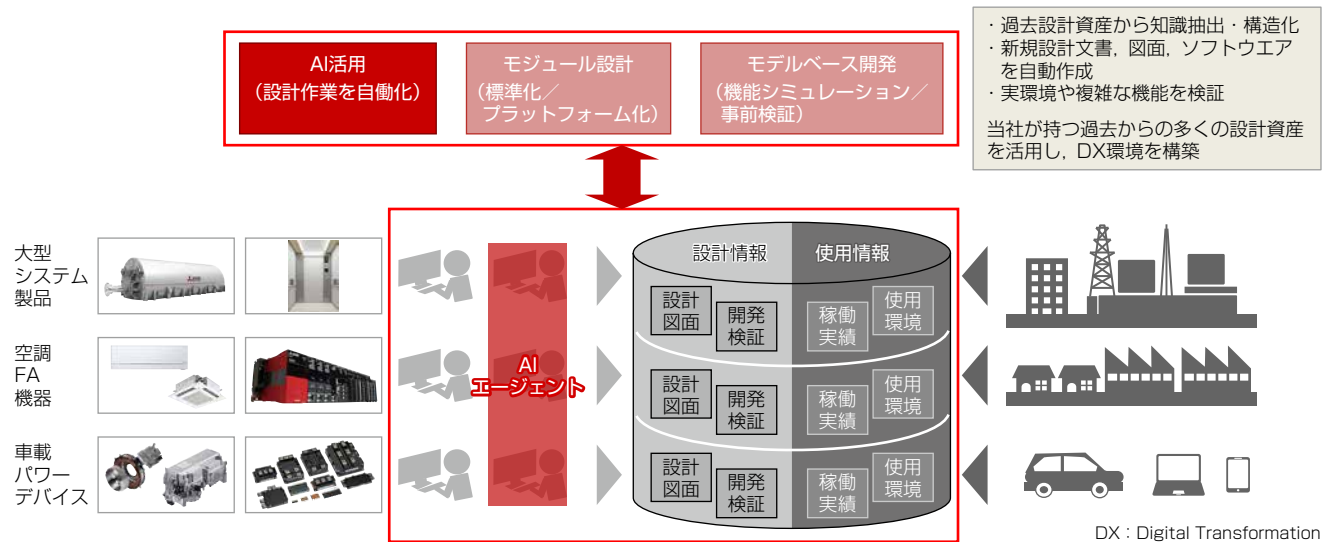


図4-ECM領域でのものづくりの将来像

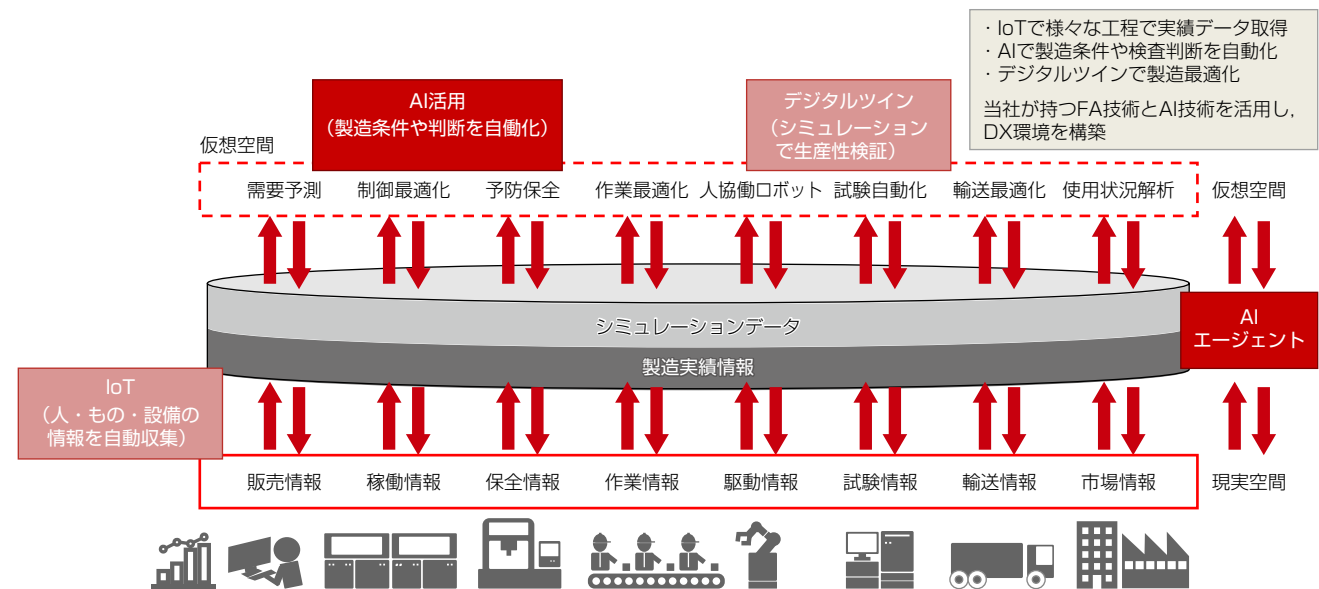


図5-SCM領域と製造現場でのものづくりの将来像

## 5. む す び

ものづくり領域で活用を目指して構築しているAIソリューション群とそれらを活用したものづくりの将来像について述べた。AIは発展途上の技術であり、現在でも非常に速い速度で技術が進展し続けている。これからも最新の技術を取り入れた実用性のあるソリューションを追求することで、時代に即したものづくり基盤の構築に寄与していく。

## 参 考 文 献

- (1) 松本浩輝, ほか: AI技術“Maisart”を活用した外観検査自動化への取組み, 三菱電機技報, 94, No.4, 256~259 (2020)
- (2) 岡 徹: 持続可能な社会を支える最新のFA技術, 三菱電機技報, 97, No.4, 2-01~2-07 (2023)

# ものづくり現場でのデジタルツインの取り組み

Initiatives of Digital Twin in Manufacturing Sites

\*生産技術センター

## 要 旨

多様化する社会ニーズやサプライチェーンの寸断など環境変化が激しさを増す中で、ものづくりの現場に対する要求の変化も激しく、その変化に追従できる生産ラインの構築が常に求められている。このような状況下で、世の中では現実空間で収集した様々なデータをまるで双子であるかのように仮想空間上で再現する技術、すなわちデジタルツインを活用し、環境変化に柔軟かつスピーディーに対応する設計アプローチが注目されている。

三菱電機では、ものづくり現場でのデジタルツインを活用した生産ライン設計プロセスの実現に向けて、現実空間である生産現場の実態をセンシング技術を活用してデジタルデータとして収集し、このデータを用いて3D仮想空間に現実を正確に再現する技術を開発した。この技術を生産現場で発生する問題要因の分析やラインシミュレーションによる改善の事前検証につなげていくことで、ものづくりの改善サイクルを高速で回し、生産ライン設計の最適化を実現した。

## 1. ま え が き

現代の製造業を取り巻く環境の変化は激しく、予測のできない自然災害や感染症等に加えて、地政学の面では国際情勢の不安定化に伴うサプライチェーン寸断リスクの発生や、脱炭素の実現に向けた世界的な気運の高まりなど、市場から求められる製品群も様変わりしている。

想定していた前提条件が目まぐるしく変わる中で、様々な変化を想定していたとしても安易な作りすぎは棚卸資産の増加につながる。一方、変化に追従できなければ機会損失になる。両者とも経営に大きなインパクトを与えるトレードオフの関係にある。

そのため、様々な変化に素早く対応できる柔軟な生産ラインの構築が求められている。生産ラインを設計する際には、要求を満足する能力を確保するため、生産工程ごとに能力値を設定する。しかし、単純に理論値だけで能力を設定すると、生産現場での外乱発生を要因とする乖離(かいり)が生じる。したがって、生産現場で発生する様々な外乱を想定した生産ラインの設計が求められている。

本稿では、現実空間である生産現場の実態をデジタルデータとして収集し、このデータを用いて3D仮想空間で再現・分析する手法、外乱を加味したシミュレーションによる改善前の事前検証や条件の最適化で改善サイクルを高速化する手法、及びそれらデジタルツイン技術を活用した生産ライン設計プロセスの事例について述べる(図1)。

## 2. デジタルツインを活用したライン設計の取り組み

### 2.1 従来のライン設計の課題

従来、生産ラインの設計では、目標とする出来高・LT(リードタイム)・CT(サイクルタイム)を満足するように組立て手順・作業性・仕掛量等を設計するために、蓄積された一部の実績データや数日間の現場観測で得られた限定的な情報を用いて設計することが一般的であった。その結果、生産ライン立ち上げ後に、観測時に得られなかった作業時間のばらつきや非サイクル作業などの外乱が発生し、要求仕様を満たせずに、追加改善が必要となり目標到達までの期間が伸長している。

生産ラインを構成する要素の中で、設備については既に稼働実績等のデジタルデータを蓄積する仕組みが導入され、改善に有効活用されているケースは多々ある。しかし、その他の重要な構成要素となる、生産ライン内の作業員(人)・部品や製品(モノ)の動きを捉えることが難しく、表1に示す、以前から現場観測で用いられている手法は、複数の観測対象の



詳細な動きを長期間にわたって把握することに適していない。そのため、デジタルツインの構築に向けて、人・モノの動きのデジタルデータ取得の効率化が課題になる。

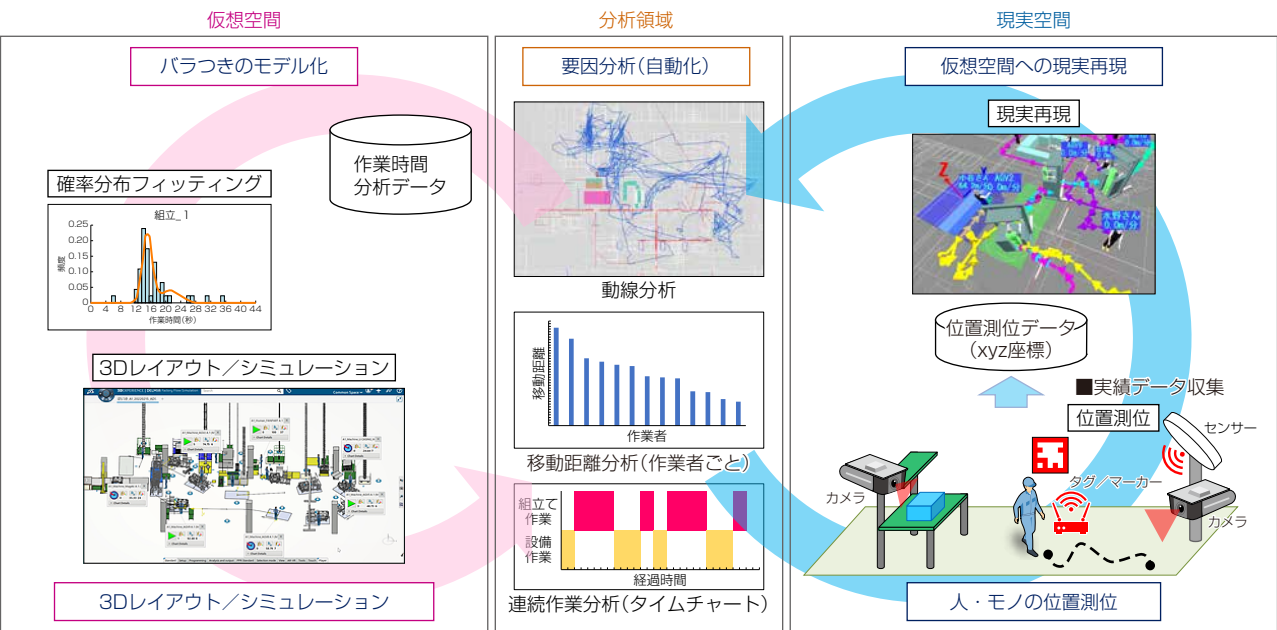


図1-デジタルツインによる生産ライン設計プロセス

表1-従来の現場観測手法

手法	対象	対象期間	対象範囲	周期	概要	問題
連続作業分析	作業者／設備	1日	一人	連続的	観測対象をストップウォッチ等を用いて連続的に観測して記録する方法	・広範囲／複数日の把握には負荷が大きく向いていない
ワークサンプリング	作業者／設備	1日	複数人	断続的	観測対象が行っている各作業を瞬間的に観測して、統計的に集計し、分類する方法	・観測回数によっては、正確性が不十分な場合がある ・作業手順等の把握はできない
設備ログ分析	設備	長期間	設備設置場所だけ	連続的	生産現場に設置した設備の稼働情報を記録したデータを利用して分析する方法	・設備と人の作業が連合した場合の作業状況までは把握できない
進捗管理システムログ分析	作業者	長期間	システム設置場所だけ	断続的	生産現場に設置した電子帳票等の操作時間を記録したデータを利用して分析する方法	・システムを離れた状況は把握できない ・入力が作業者任せになり、実態との乖離が生じやすい

2.2 デジタルツインによる生産ライン設計手順

デジタルツインによる生産ライン設計手順を図2に示す。

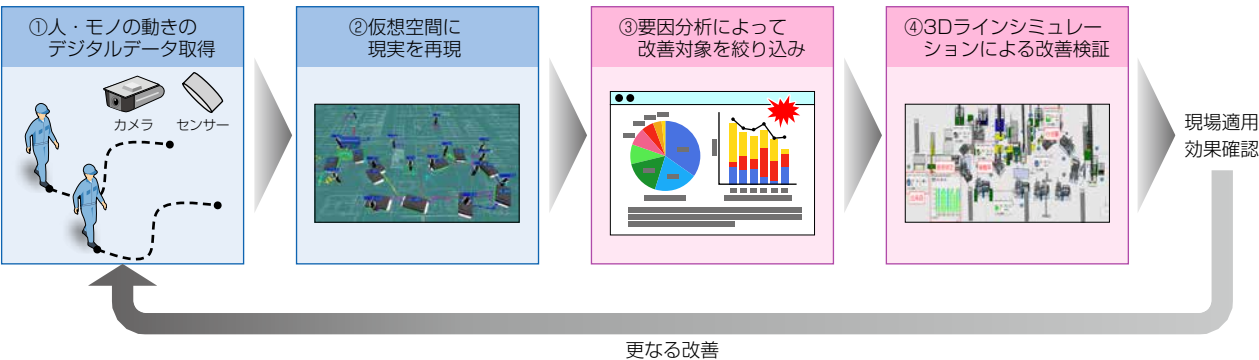


図2-デジタルツインによる生産ライン設計手順

2.3節に述べるセンシング技術の活用によって2.1節に述べた課題の解決を図った。①人・モノの動きをデジタルデータとして取得し、②データ①を基に仮想空間上の3Dモデルで現実の動きを再現し、様々な視点で現場を観察して、

③再現結果を分析し、外乱要因を定量化して改善対象を絞り込み、④複数の改善パターンについて改善効果を3Dラインシミュレーションで検証し、結果を生産現場に適用する。適用後も効果確認と更なる改善に向けてこの手順を繰り返す、デジタルツインのライン設計手順を構築した。

### 2.3 人・モノの動きの現実データ取得

人・モノの動きの現実データを取得する構成を図3に示す。

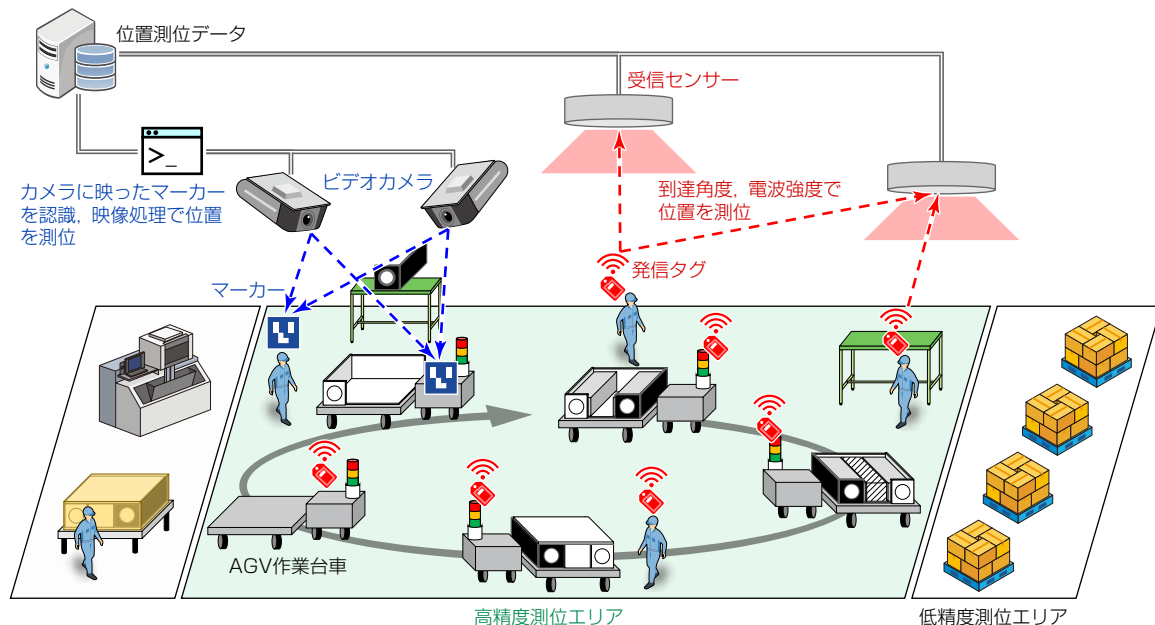


図3-位置測位システムによる現実データ取得

人・モノの実際の動きを捉えた現実データ取得には、位置測位の仕組みを導入した。位置測位には、センサーとタグを利用した位置測位システムとビデオカメラで撮影した動画による映像処理の2種の技術を活用した。共に観測対象に発信タグ又はマーカを装着するだけで、時系列の位置座標を出力するセンシング技術である。この技術は、①広範囲／複数日データの連続記録が可能、②秒単位のデータを取得し瞬間的動作も把握可能、③観測対象に負荷を与えない、という三つの点で従来の観測手法の問題を解消する有効な手段である。

これらセンシング技術の検証の場として用いた生産ラインは、図3で示す作業台での部品組立てや設備作業工程に加えて、製品の組付けや搬送にAGV(Automatic Guided Vehicle)を利用した台車生産ラインで、複数の作業員による組立て工程をつなぐ複雑なライン構成である。この生産ラインで位置データを取得するため、人とAGVに装着したタグやマーカの動きを高精度に取得したいエリアを区分けし、センサーとカメラの取付け位置をシミュレーションの評価結果に基づいて調整した。この技術の確立によって、生産性に影響することなく高精度エリアでは誤差500mm以内で、長期間の位置測位データを手間なく取得できる環境を構築した。

### 2.4 仮想空間への現実再現と要因分析

再現ソフトウェア(位置測位データを使用して、3D仮想空間に人・モノの動きを再現するシステム)を用いて、要因分析する手順を図4に示す。

①仮想空間に現実と同じ生産ラインのレイアウトを設定、②レイアウト上で分析したい対象範囲のゾーンを設定、③観測対象と対になる3Dモデルを紐(ひも)づける設定、①～③の設定をした後に取得した時系列の座標データをインプットすることで仮想空間に人・モノの動きを3Dで再現できる。仮想空間上で再現した動きは、観測対象の実際の動きと同様に、時系列の座標データを基に3D仮想空間で動作する。この3Dモデルを操作することで、現実では難しい俯瞰(ふかん)・角度を変えた多角的な確認が可能になる。それに加えて、任意の期間を対象にIE(Industrial Engineering)で用いられる連合作業分析と同等の結果や、動線範囲や距離の定量的な分析データを自動出力可能とし、要因分析から改善対象の絞り込みまでの工程の大幅な効率化を実現した。

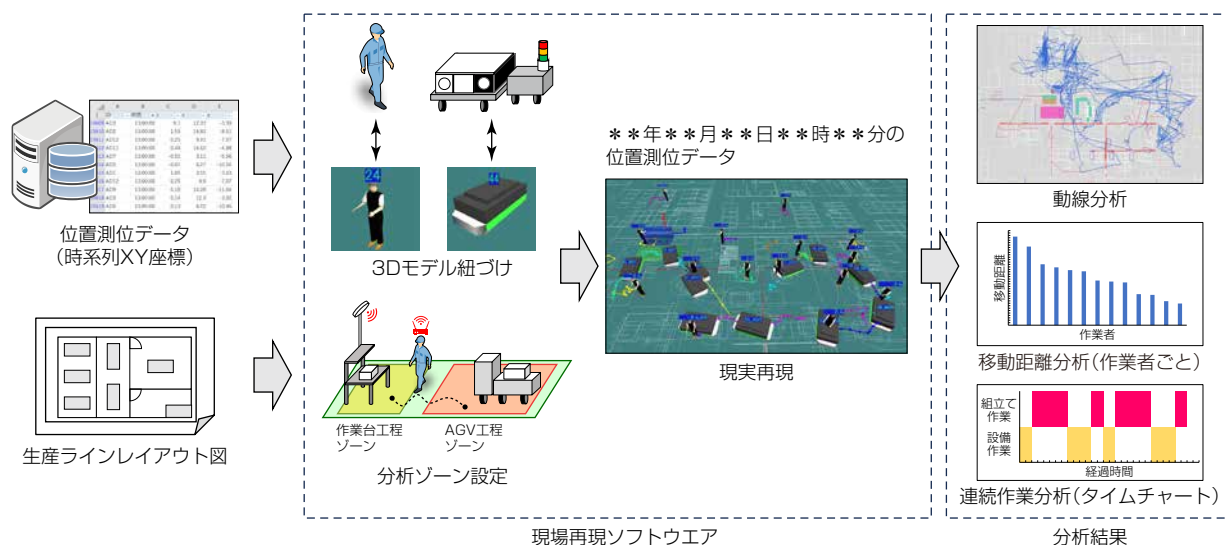


図4-仮想空間への現実再現及び分析

## 2.5 3Dラインシミュレーションによる改善検証

3Dラインシミュレーションで、外乱を加味して検証する構成を図5に示す。

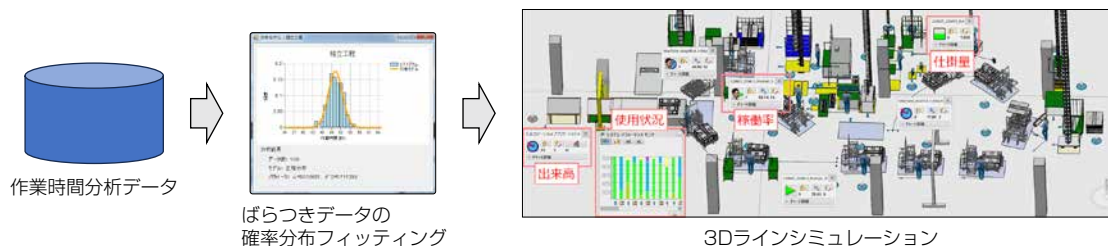


図5-ばらつきを加味した3Dラインシミュレーション

3Dラインシミュレーションは、仮想空間で描いたレイアウトに設備や作業者の3Dモデルを配置し、設定した各工程の作業条件や工程の流れによって、その効率性や問題点を分析する手法である。シミュレーションの検証精度は、生産現場をいかに精緻に捉えて条件を設定するかが重要である。これによって時間当たりの出来高・LTに加えて、ラインバランス・ボトルネックなど効率性の評価や空間的な制約や作業者の動きなどを現実に近い形で再現でき、より高精度の検証が可能になる。

今回の技術検証では、生産現場の外乱として作業時間のばらつきが多い工程を確認した。ライン設計時のシミュレーションでは、従来、各工程に設定する作業時間は、あらかじめ決められた標準時間を用いていたため、現実とシミュレーション結果に乖離が生じていた。そこで、取得した作業時間データから、実際の作業時間のばらつきを抽出し確率分布にフィッティングする機能を開発した。この機能を3Dラインシミュレーションに適用することで作業時間にばらつきを発生させ、現実と同等の結果を得ることを可能にし、より精度の高いシミュレーション環境の構築を実現した。

## 3. む す び

デジタルツインを活用した生産ライン設計プロセスの事例を述べた。現実空間のセンシングデータを利用して3D仮想空間に再現することで、問題要因の分析とラインシミュレーションによる事前検証の高速化への有効性を確認できた。

変化が激しい情勢の中で更なる柔軟なライン設計及び改善サイクル高速化の重要性が高まっていく。現在は位置データに加えて、人の関節動作も含めたより細かな動きのデータ取得と再現を進めている。今後は、当社FA製品との親和性を強化し、よりリアルタイム性を高めたデジタルツインの設計プロセス構築によって当社のものづくりのプラットフォームとして昇華させ、更なる競争力強化に貢献していく。



# パズルキューブ早解きと巻線機のコア技術

Core Technologies of Cube Solving Robot and Coil Winding Machine

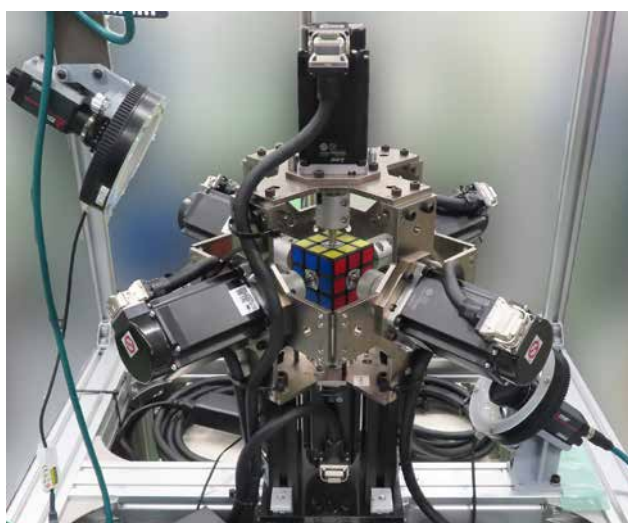
\*コンポーネント製造技術センター

## 要 旨

モーターは、三菱電機が製造供給するパワーエレクトロニクス製品のキーコンポーネントであり、その製造技術の要である巻線技術の進化に力を注いできた。今回、巻線機に必要な高速・高精度位置決め技術や当社独自の画像処理技術を取り入れて、パズルキューブを高速で解くロボットを開発した。開発に当たっては、当社製のFA機器を使って製作した。

## 1. ま え が き

社内向けモーター製造設備(巻線機)を開発するチームが製作したロボットが、パズルキューブを約0.3秒の速さで解くことに成功した。パズルキューブを早解きするロボット(図1(a))と巻線機(図1(b))、一見すると接点のない二つの装置に共通しているのが、本稿で述べる高速・高精度位置決め技術とAI画像処理技術である。特に高速・高精度位置決め技術は巻線機のコア技術の一つであり、より高性能なモーターを生産するために進化させてきた。また、AIを活用した画像処理技術は製造上の異常検知など様々な工程で有効な技術である。



(a) パズルキューブを早解きするロボット



(b) 巻線機

図1-パズルキューブを早解きするロボットと巻線機

## 2. キューブ早解きロボットに使われた設備技術

### 2.1 ロボットの動作と構成

ロボットでパズルキューブを解くためには、(1)ビジョンセンサ(カメラ)によって各マスが何色になっているかを認識する、(2)各軸を回転させる順序を計算する、(3)各軸を実際にアクチュエータで動作する、の順番が必要である。ロボットの構成を図2に示す。動作手順に従って各コンポーネントがどのような役割を担っているかを次に述べる。

- (1) それぞれがキューブの3面を捉えられるように、2台のビジョンセンサ(VS80)をキューブの角部に向けて配置している。スタートと同時に撮像を開始し、各マスの色情報を産業用パソコン(MI5000)へ送信する。パソコン上のAIプログラムが各マスを6色に分類し、死角にあるマスの色も推定して全54マスの状態を決定する。
- (2) 54マスの状態を基にパソコン上の解法探索プログラムでパズルの解法手順を導く。右面と左面のように同時に動かしても干渉しない組合せ、キューブのずれによる引っ掛かりが少ない回転方向など、各軸の動作を決定して2.2節に述べるカムデータの番号に変換し、iQ-Rシーケンサに送信する。
- (3) シーケンサが受信したカム番号をモーションユニット(RD78G)に逐次送信し、モーションユニットが6軸のサーボモーター(MELSERVO-J5)を同期制御する。各サーボモーターの出力軸に取り付けられた爪を各面中央のマスに嵌(は)めて回転させる。

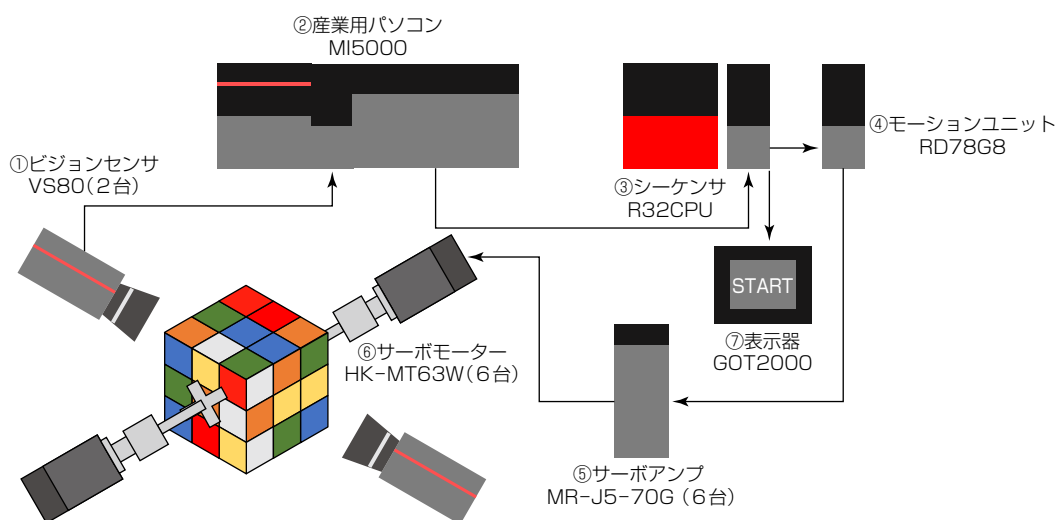


図2-当社製FA機器を搭載したロボットの構成

## 2.2 高速・高精度位置決め技術

動作時間を短縮するためにモーターの動作速度を大きくすると、オーバーシュートや振動を引き起こして、整定するまでの時間がかえって長くなることがある。また、整定するまでに角度がずれたキューブ(図3)を無理に回転させると破損につながるため、整定時間の短縮が動作速度向上での最重要な課題になる。

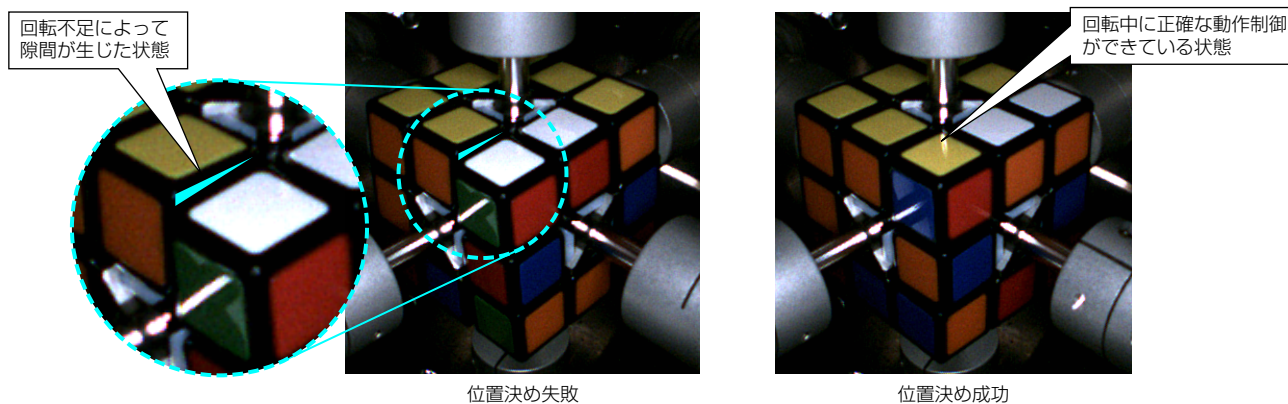


図3-パズルキューブの位置決め

整定時間が悪化する要因には、主に(1)機械系、(2)サーボシステムの制御、(3)ジャークの三つがある。

- (1) 機械系：超低慣性でパワーレートの大きいサーボモーターを、リジッドカップリングでキューブを掴(つか)む爪と直結させて剛性を高めるとともに、キューブの組み付け時の遊びを徹底的に低減した。



(2) サーボシステムの制御：今回採用したMR-J5サーボアンプのワンタッチ調整の機能を活用し、労せずに約0.5秒(相当)の動作時間を達成した。さらに、マシンアナライザ機能やデジタルオシロ機能などを使って手動によるゲイン調整を行い、最大トルク(定格トルクの3倍)で駆動しながら短時間で整定する動作を実現した。

(3) ジャーク：ジャーク(サーボモーターを回転させる際の加速度の変化量)が大きすぎると振動の原因になるため、速度・加速度をコントロールした運動曲線をモーションユニットに登録してカム制御を行い、ジャークを抑制した。

カムは90°正転, 90°逆転, 180°, 待ち, など数種類の動作に分割して事前に用意した。解法に従ってパソコンがカム番号を選択してシーケンサに送信し、モーションユニットに最初のカム番号を書き込んでサーボモーターを動かす。最初のカムの動作が終わる前にシーケンサが次のカム番号を書き込むことで、滑らかな動作を可能にした。

また、連続した回転動作を間髪入れずに行うためには同期制御も重要である。軸の動作完了を検出することなく次の軸を起動してもぶつかることがないため、スキャンタイムの影響を受けずに動作時間を縮めることができた。

### 2.3 AIによる高速色認識技術

パズルキューブを早解きするためには、短時間で各マスの色を認識して解法を探索する必要がある。今回は、認識精度を若干落とすとしても速度の速い方法を模索した。また標準的なパズルキューブに使われている6色(白, 青, 緑, 赤, オレンジ, 黄)の中で、オレンジは赤や黄に色味が近いので誤認識しやすいことも課題になった。

まず、k-PCA(Kernel-Principal Component Analysis)アルゴリズムを用いて色を分類するモデルを作成し、約5,000枚の画像から教師なし学習を行った。図4(a)に学習用画像のRGB(Red Green Blue)値の分布を三次元グラフで示す。各点は画像中のピクセルに対応するRGB値を示しており、同じ色のマスの中でも明るい領域から暗い領域に掛けて広がりを持った分布になる。赤いマスとオレンジのマスの分布が隣接しており、分類するための境界の決定が難しいことが分かる。図4(b)はk-PCAで二次元の特徴量空間に写像したRGB値の分布である。赤とオレンジの群に隙間ができ、計算量が多く低速な手法ながらも正しく見分けることが可能になった。

高速性が必要な実行時のAIは古典的な2層パーセプトロンとし、特徴量空間を用いずRGB値から直接に色分類を行うモデルとして計算量を削減した。さらにCPUのSIMD(Single Instruction Stream-Multiple Data Stream)演算を活用して実行時間を短縮した。まず、低速・高精度モデルから生成した学習データを用いた知識蒸留を行い、再び約5,000枚の画像を用いてファインチューニングを行った。ファインチューニング後の高速モデルによる分類結果を図4(c)に示す。隣接した赤とオレンジ色の群が塗り分けられており、分離するための境界を学習で獲得できたことが示されている。作成した高速モデルの誤認識率は0.1%程度であった。

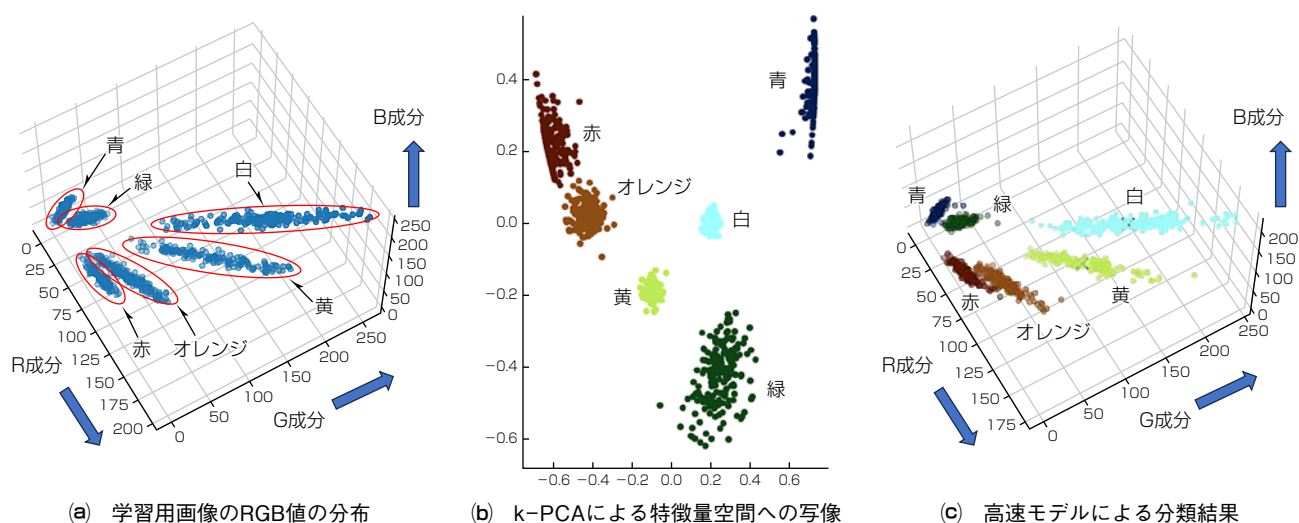


図4-画像のRGB値の分布

### 3. モーター製造用巻線機を支える設備技術

#### 3.1 巻線機の構成と動作

最も基本的なスピンドル巻線機を例に述べる。図5に巻線機の主要部を示す。材料となる電線を、ノズルを通してワークに導き、 $\theta$ 軸でワークを回転させることでコイル状に巻き取る。巻き取るときには電線の位置を少しずつ正確にずらす必要があるためX軸でノズルを動かす。 $\theta$ 軸、X軸ともサーボモーター駆動であり、同期制御できる。

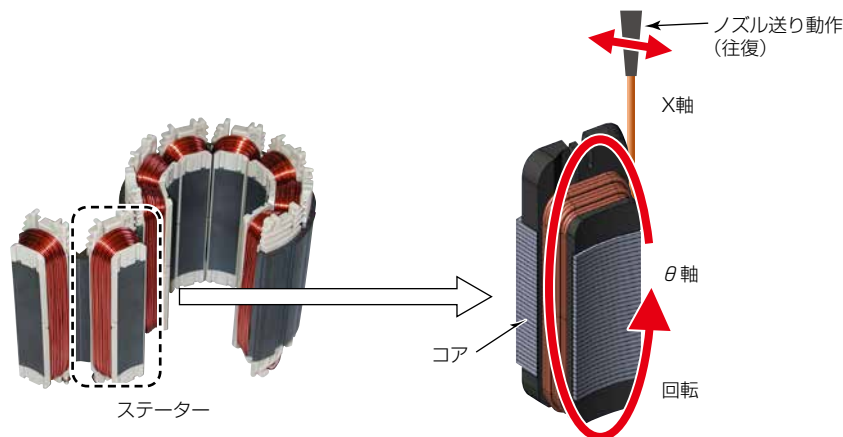


図5-巻線の主要部

#### 3.2 高速・高精度位置決め技術

モーターの性能向上を目指して、決められた空間により多くの電線を巻き取るためには図6のように隙間なく正確に電線を並べていく必要がある。モーターに用いられる四角いコイルを巻く際に最も電線の密度が高くなる巻線方法は、図7に示すように3辺で電線を平行に並べて、残る1辺でノズルを動かして電線の位置を1本隣にずらす巻線方法である。ワークの回転は非常に高速なためノズルも高速で動かして止める技術が必要になる。

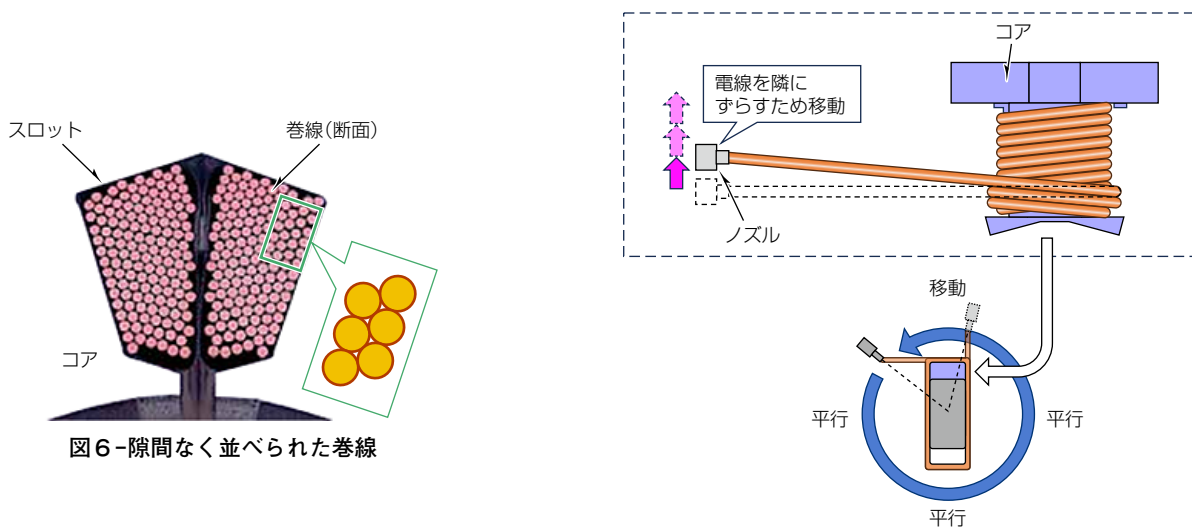


図6-隙間なく並べられた巻線

図7-巻線密度を高くする巻線方法

しかし、動作速度を単に大きくするだけではオーバーシュートや振動を起こして整定できなくなり、巻線機の場合にはコイルの寸法外れや線同士のこすれ等を引き起こす。この場合もキューブ早解きロボットと同様で、機械、制御、ジャークの三つが対策になる。

- (1) 機械系は低慣性で高剛性な設計と、ガタ・遊びの低減を徹底する。最高回転数の高いMELSERVO-J5の特性を生かして減速比を大きめにする、高剛性なカップリングを採用する、などで可能になる。
- (2) 制御系のチューニングについては、ワンタッチ調整で十分な結果が得られるようになった。デジタルオシロ機能を使い、サーボモーターの位置のグラフを取得することでノズルなどが正しく追従していることを確認できる。
- (3) モーションユニットのカム制御を活用することでジャークの少ない動作が実現できる。

また、ノズルを動かすタイミングがワークの回転角度に対して早まる、又は遅れると電線が予期せぬ場所に引っ掛かり、やはり品質不良を引き起こすおそれがある。モーションユニットの同期制御を使用して $\theta$ 軸とX軸の動きを同期させることで、キューブ早解きロボットと同様にシビアなタイミングでも正確に動作させることができる。

### 3.3 AI画像処理技術

巻線後のコイルの寸法などを、ビジョンセンサを使って検査することがある。今後、MELSOFT VIXIOを始めとしたAI外観検査技術を導入することで、これまで正常品との差異が識別困難であった異常の検知も期待できる。例えば図8に示すように、巻き乱れたコイルと正常品のコイルとの外径寸法の差はほとんどないが、AIによる画像処理を施すと、巻き乱れを認識できることが分かる。

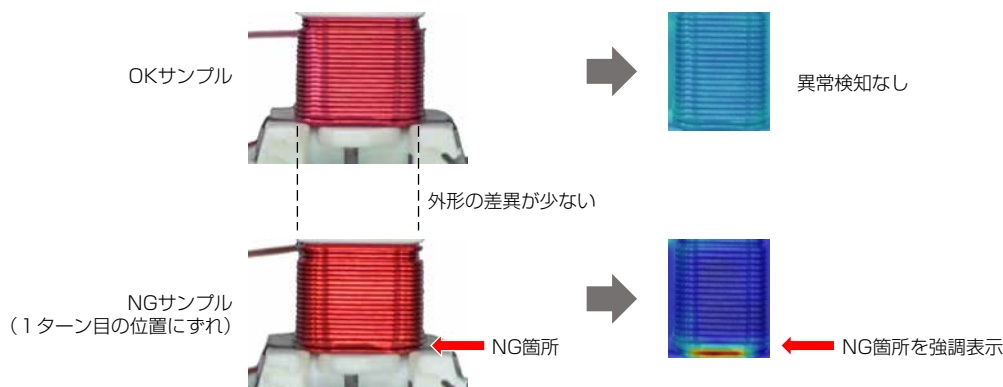


図8-AI画像処理技術による巻線NGの検知

## 4. む す び

パズルキューブの早解きロボットの開発を通じて当社がこれまでモーターの巻線技術で培った高速位置決め技術などの技術力に加えて、三菱電機FA製品を広く知ってもらおう機会とした。今後も、製造現場の生産性向上や省エネルギーにつながる製品、サービスの提供を通じて、顧客企業の価値向上と社会全体のカーボンニュートラルの実現に貢献していく。

# 製造設備向けローコード開発技術

Low-code Development Method for Manufacturing Facilities

\*情報技術総合研究所

## 要 旨

製造設備の制御プログラムに対するローコード開発技術は、サイクル動作の設計手法として広く用いられているフローチャートから、サイクル動作を実現するための制御プログラムを生成する特徴を持つ。従来と設計手法を変えることなく生成を可能にすることで、設計工数を増やさずに制御プログラムの実装工数の削減が可能になる。また、設備開発を効率化するツールとして近年注目されている3Dシミュレーターとローコード開発技術を組み合わせることで、将来的に設備開発の更なる効率化の実現が期待できる。今後、このローコード開発技術のプロトタイプを社内の設備開発に適用して有効性を確認し、製品化に向けた開発を進めていく。

## 1. ま え が き

近年、労働人口の減少などの社会問題によって、工場の自動化に対する需要がますます高まっている。しかし、工場を自動化する設備の開発工数は大きい。設備開発の効率化が求められている。設備開発の中でも、特に効率化が求められている作業の一つとして、設備を制御する制御プログラムの実装作業がある。制御プログラムの実装作業には、設備の設計を基に、似た処理を繰り返し記述することで実装する単純作業も多く含まれている。このような作業を効率化するために設備の設計から制御プログラムを生成する技術が求められている。

また、設備開発を効率化するツールとして近年、製造設備向けの3Dシミュレーターが注目されている。三菱電機も“MELSOFT Gemini”を販売している。3Dシミュレーターは設備をデジタル空間で表現することで、実機レスでの検証を可能にする。3Dシミュレーターを用いることで、従来は設備の組立て後に実施していた検証が設備組立て前に可能になり、設備開発のフロントローディングが可能になる。シミュレーションには先に述べた制御プログラムが必要である。しかし、現状の設備開発プロセスではそれを開発の早い段階で用意することが難しい。そのため、3Dシミュレーターを設備開発の最終段階でしか活用できないという問題がある。

そこで、本稿では、設備の設計から制御プログラムの生成を可能にするローコード開発技術を検討する。また、このローコード開発技術と3Dシミュレーターを組み合わせることで、設備開発の更なる効率化を実現する将来像を検討する。

## 2. 制御プログラムのローコード開発技術

### 2.1 生成対象とする制御プログラムとその設計手法

製造設備は、ある一連の動きを繰り返し実行するサイクル動作を基本として自動生産を行っている。そのため、制御プログラムでは、設備に搭載されている各メカの動作順序や動作条件をコーディングして、サイクル動作を実装する必要がある。このサイクル動作のプログラムは、設備の自動生産の動きを定めているため、設備の生産能力に直接影響する重要なプログラムである。また、このプログラムは似た処理を繰り返し記述することで実装することが多いため、実装の効率化が求められているプログラムでもある。サイクル動作のプログラムは、これまで設計内容と実装内容の対応関係が整理されておらず、設計からプログラムを生成するような効率的な手法が提供されていなかった。そこでこの対応関係を整理することで、設計内容を反映したサイクル動作のプログラムを生成するローコード開発技術を検討した。この節では、サイクル動作のプログラムの実装手法として広く用いられている手法と、その設計手法について述べる。

国内での設備の制御プログラムは、PLC(Programmable Logic Controller)用標準規格IEC61131-3で規定された言語のうち、ラダー言語を用いて実装されることが多い。図1にその一例を示す(図右半分の“制御プログラム”の箇所)。ラ



ダー言語では、回路ブロックと呼ばれるリレー回路形式の処理を記述し、複数の回路ブロックを組み合わせる制御プログラムを実装する。また、ラダー言語では、サイクル動作の実装手法として状態遷移型記法と呼ばれる記法が知られている<sup>(1)</sup>。これは、状態遷移部と出力部の二つで構成される記法である。状態遷移部では、センサー信号などの値を基に設備のサイクル動作の状態を順次進める回路ブロックを記述する。図1中の状態遷移部で示すように、センサー信号(X1)のONなどの条件(図1中の黄色枠)が成立すると状態変数(M0~M2)を順次ONしていき、最後の状態変数がONすると全ての状態変数をOFFする回路ブロックを記述する。これによって、状態遷移後に初期状態に戻り、また初期状態から状態遷移を繰り返すサイクル動作のプログラムになる。

出力部では状態遷移部の状態変数の値を基に各メカと対応付く制御変数のON/OFFを切り替える回路ブロックを記述する。図1で示すように、制御変数Y10のON条件である状態変数M0がONしたらY10をONし、Y10のOFF条件である状態変数M1がONしたらY10をOFFするような回路ブロックを記述する。このような状態遷移部と出力部から成る状態遷移型記法を用いて設備のサイクル動作は実装されている。

また、このサイクル動作の仕様は、図1(“サイクル動作の設計”の箇所)に示すようなフローチャートで設計されるケースが多い。このフローチャートは、STARTから順次処理を実行しENDに到達したらSTARTに戻ることで、一連の流れが繰り返されることを前提としている。図1に示すフローチャートは、空気圧シリンダーで動作するプッシャーのサイクル動作を表現した例である。先に述べたようにサイクル動作のプログラムは、条件の成立によって順次状態を進めて、その状態によって制御変数のON/OFFを切り替える。そのため、処理の順序関係や条件を設計できるフローチャートを活用してサイクル動作を設計することが多い。

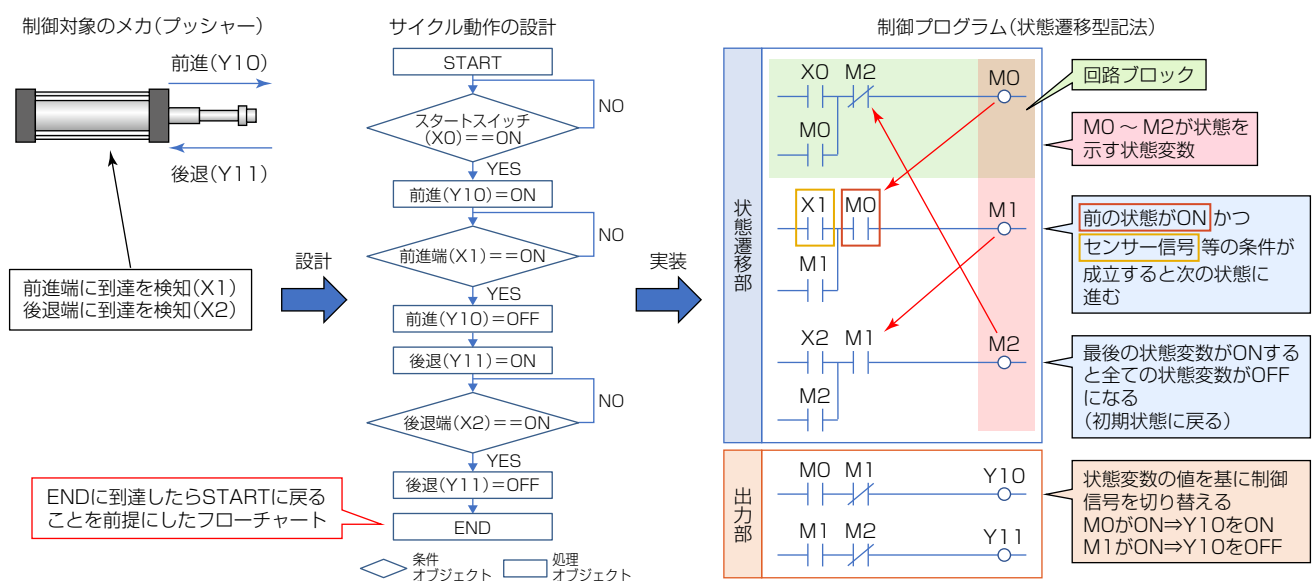


図1-サイクル動作の設計・実装例

## 2.2 ローコード開発技術の課題

制御プログラムのローコード開発を可能にするには、二つの課題がある。

第一に、図1で示した従来の設計手法であるフローチャートでサイクル動作を設計することが必要である。ローコード開発技術が、これまでと大きく異なる設計手法を必要とする場合、設計工数が増大し効率化につながらない可能性がある。従来と近い設計手法であればこのローコード開発技術を活用した開発へシームレスに移行することもできる。

第二に、従来実装していた制御プログラムと近い形式の制御プログラムを生成することも必要である。制御プログラムは実装者以外に保守員などもソースコードの閲覧や拡張をする。そのため、生成する制御プログラムの形式が変わると、これらの作業に支障が出て保守などの妨げになる可能性がある。

これらの課題を解決するために、従来の設計手法であるフローチャートから状態遷移型記法の制御プログラムを生成する技術を考案した。



## 2.3 制御プログラムの生成ステップ

ローコード開発技術では、フローチャートの設計内容と状態遷移型記法の回路ブロックをパターン化し、それらを対応付けることでフローチャートから状態遷移型記法の制御プログラムを生成する。この節では、この対応関係について述べた後、その対応関係を基に制御プログラムを生成する手法について述べる。なお、この節では説明を簡略化するために、フローチャートの設計内容のパターンと生成する回路ブロックのパターンを図1で示したものに限定することにする。実際の設備開発にこのローコード開発技術を適用する場合は、これらのパターンは複数ある。パターンの例としては、条件オブジェクトで進む先が分岐している場合や条件としてタイマーを用いる場合などが挙げられる。

まず、フローチャートの条件オブジェクトから状態遷移部の回路ブロックを生成する。2.1節で述べたように状態遷移部は、条件が成立すると次の状態へ移る特徴がある。そのため、条件が成立すると次のオブジェクトへ進むことを示す条件オブジェクトと状態遷移型記法の状態遷移部が対応付けられる。次に、フローチャートの処理オブジェクトから出力部の回路ブロックを生成する。出力部は状態遷移部の状態変数の値を基に制御変数のON/OFFを切り替える特徴がある。そのため、制御変数の値の書換えを示す処理オブジェクトの内容と状態遷移型記法の出力部が対応付けられる。制御変数の切替えは複数の処理オブジェクトに書かれるため、複数の処理オブジェクトと出力部の一つの回路ブロックが対応付けられる。

今回検討する手法では、これらの対応関係を基に次に示す三つのステップで生成する(図2)。

### (1) Step1: フローチャートの解析

フローチャートを解析し、フローチャートの各オブジェクトに対して、オブジェクトの種類やオブジェクト間の結線の情報から生成すべき回路ブロックのパターンを特定する。図2に示すようにオブジェクトの種類を基に、条件オブジェクトに対して状態遷移部の回路ブロック、処理オブジェクトに対しては出力部の回路ブロックのパターンであると特定する。状態遷移部の先頭の回路ブロックは全状態をリセットする処理を含み、先頭以外の回路ブロックと異なる。そのため、条件オブジェクトのうちフローチャートの先頭にあるものを結線の情報から特定し、図2左側に示すように“状態遷移部(先頭)”のパターンであると特定する。

### (2) Step2: 変数の割り振り

状態遷移部の一つの処理に対して一つの状態変数が必要であるため、各条件オブジェクトに対して状態変数一つ割り振る。図2の条件オブジェクトに対してM0から順に状態変数を割り振る。

### (3) Step3: 各オブジェクトと対応する回路ブロックを生成

Step1で特定したパターンに応じた回路ブロックの雛形(ひながた)に対して、フローチャート上の情報や割り振った状態変数の情報を基に、フローチャートの内容を反映した回路ブロックを生成する。条件オブジェクトに対しては、条件オブジェクトに記載されている条件や、オブジェクト間の結線の情報などから雛形に設定すべき変数を特定し、その変数を設定することで回路ブロックを生成する。処理オブジェクトに対しては、制御変数ごとに複数の処理オブジェクトについての結線の情報から必要な変数を特定し、その変数を設定することで回路ブロックを生成する。

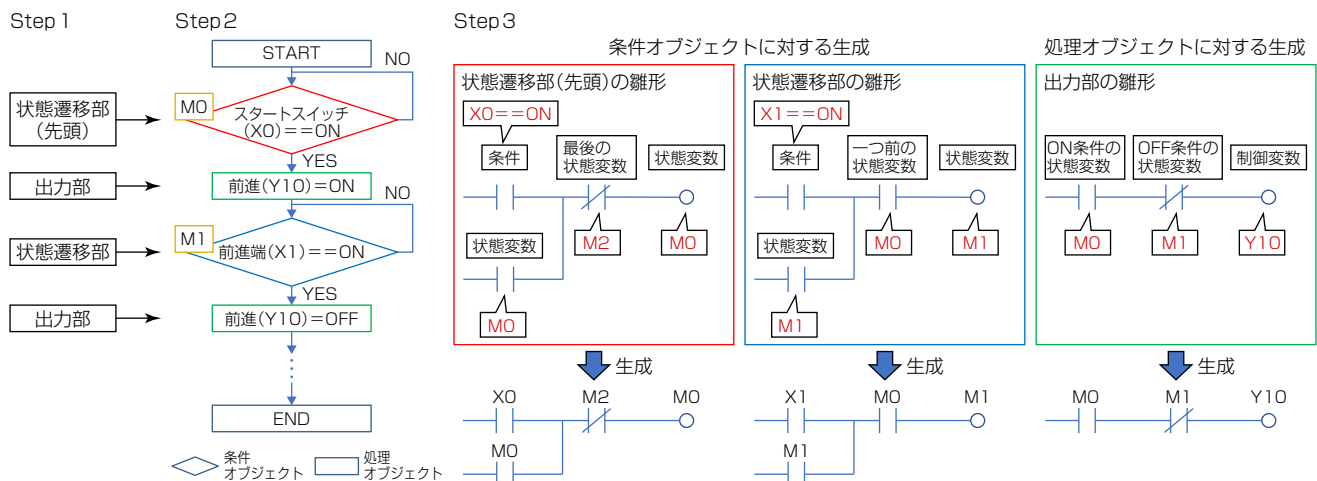


図2-制御プログラム生成の処理イメージ

このようにして、フローチャートの設計内容と対応する回路ブロックを生成し、生成した回路ブロックをフローチャートと対応付くように並べることで状態遷移型記法の制御プログラムを生成する。

### 3. 製造設備向け3Dシミュレーターを活用した設備開発

#### 3.1 製造設備向け3Dシミュレーター

3Dシミュレーターは、設備をデジタル空間で表現することで、実機レスでの検証を可能にするツールである。3Dシミュレーターには、その用途の一つに装置シミュレーション<sup>(2)</sup>がある。装置シミュレーションとは、設備の形状(3D-CAD)や設備に搭載されているプッシャーやコンベヤー等のメカの動きを3Dシミュレーター上で定義し、設備の動きをデジタル空間で再現するシミュレーションである。

装置シミュレーションを実施するには、まず、3D-CADのデータなどを3Dシミュレーターにインポートして設備の形状を設定し、続いて、設備に搭載されている各メカの動作方向や動作速度などを設定する。そして、3Dシミュレーター上のメカを制御するために、制御プログラムのシミュレーターと3Dシミュレーターを連携させて装置シミュレーションを実行する。

#### 3.2 3Dシミュレーターを活用した設備開発の課題

3Dシミュレーターの運用上の課題は、制御プログラムの用意に時間がかかるために開発の早い段階で3Dシミュレーターを活用できていないことである。この課題には二つの要因がある。一つ目は、現在の設備開発では、設備の仕様や機械図面を設計する機械設計と、制御プログラムを設計する制御設計で開発組織が分かれていることが多いためである。また、二つ目は、開発の流れとして機械設計での設計内容を基に制御設計をすることが多いためである。これらの要因から、プログラミング経験の少ない機械設計者は制御プログラムの実装が困難である。また、制御プログラムの実装が設備開発の最終段階であるために、3Dシミュレーターを開発の最終段階でしか活用できない問題が起きている。

#### 3.3 ローコード開発技術と3Dシミュレーターを用いた将来の設備開発

本稿で検討するローコード開発技術と3Dシミュレーターを組み合わせた設備開発の流れを図3に示す。ローコード開発技術を活用することで、制御プログラムの実装に関する知識が少ない機械設計者でも効率良く制御プログラムを実装できるようになる。機械設計の段階から3Dシミュレーターの活用が可能になれば、精度の高い設計を効率的に行えるようになる。

例えば、従来の機械設計では、設備の動作の一例を表現したタイミングチャートを作成して、タクトタイムの見積りや設計者間の認識共有を行っていた。それに対して、このローコード開発技術を活用して3Dシミュレーターを機械設計の段階から活用できると、精度の高いタクトタイムの検証が可能になり、また、設計者間の認識合わせも効率化できる(図3左側)。

制御設計でもローコード開発技術によって効率良く制御プログラムが実装できる。3Dシミュレーターによって実機レスで検証ができるため、サイクル動作の設計のブラッシュアップを制御設計者が効率良く実施可能になる(図3中央)。

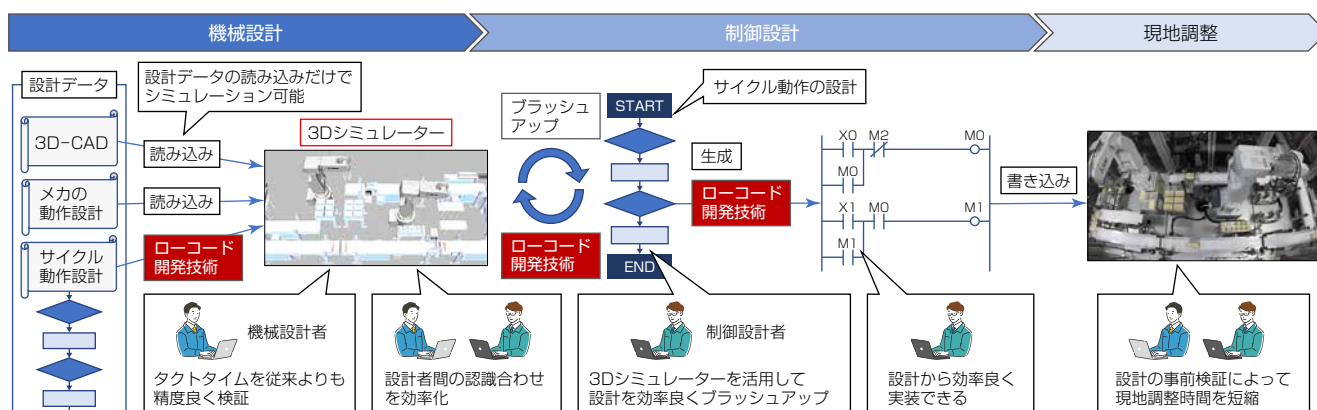


図3-ローコード開発技術と3Dシミュレーターを用いた将来の設備開発

## 4. む す び

フローチャートからサイクル動作の制御プログラムを生成するローコード開発技術を述べた。このローコード開発技術によってプログラム作成工数の削減ができるだけでなく、3Dシミュレーターを設備開発の早期に活用でき、設備開発全体の更なる効率化が可能になる。今後は、このローコード開発技術のプロトタイプを社内の設備開発に適用して有効性を確認し、この技術の製品化に向けた開発を進めていく。

## 参 考 文 献

- (1) 必携PLCを使ったシーケンスプログラム定石集装置を動かすラダー図作成のテクニック，熊谷英樹，日刊工業新聞社（2021）
- (2) 三菱電機：生産ライン・装置シミュレータならMELSOFT Gemini  
[https://www.mitsubishielectric.co.jp/fa/topics/2022/09\\_3dsim/index.html](https://www.mitsubishielectric.co.jp/fa/topics/2022/09_3dsim/index.html)

~~~~~

# 熟練技能継承に向けた 技能評価AI技術

*Skill Assessment AI Technology for Expert Skill Succession*

佐々木雄一\*  
Yuichi Sasaki  
小池崇文\*  
Takafumi Koike  
高橋佑典\*  
Yusuke Takahashi

森 健太郎\*  
Kentaro Mori  
対馬尚之\*  
Naoyuki Tsushima

\*情報技術総合研究所

## 要 旨

熟練者の優れた技能を非熟練者へ継承するため、金型磨き作業(鏡面磨き)を対象に、技能を評価するAI技術を開発した。熟練者と非熟練者の研磨作業時のカメラ映像から抽出した両者の指先の動きを比較し、熟練者の動きが非熟練者よりも評価値が高くなるように学習を行うAIモデルを構築した結果、熟練者と非熟練者の動きを96.3%の精度で識別できた。さらに、AIモデルが求めた評価値は、面積を広く、偏らずに研磨した際に高くなる傾向を示した。この結果は、熟練者が歪(ひず)みを抑制するために実践している“ぼかす”という研磨の技に該当していることが分かった。今後、非熟練者が“ぼかす”研磨を行えているかどうかを評価することで、歪みを抑制する研磨方法を体得できないか検証する。

## 1. ま え が き

製造業で、75%以上の企業が人材確保を必要としており、特に技能人材の確保が事業活動を存続する上で必要不可欠である<sup>(1)</sup>。技能人材を育成するため、熟練技能者を定年退職後に再雇用して指導員に充てている企業が60%にも上っている<sup>(2)</sup>。今後熟練技能者の更なる高齢化も進んで、早期の技能伝承が喫緊の課題であるが、熟練者が培ってきた技能は自身の経験に基づいて無意識的に最適化されているため、その技術を発見し非熟練者に継承することは困難である。これに対して、三菱電機は、京都大学、国立研究開発法人 産業技術総合研究所とともにNEDO(国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構)プロジェクト“熟練者暗黙知の顕在化・伝承を支援する人協調AI基盤技術開発”を通して、熟練技能の早期継承を目指して研究開発を進めている。

このプロジェクトで、当社は、NC(Numerical Control)加工で削った金属の表面を歪みのない鏡面に仕上げる鏡面磨きを題材にして、熟練者・非熟練者の研磨作業時のカメラ映像を基にその技能を評価するAI技術を開発した(図1)。

本稿では、開発した技能評価AI技術の方式説明、及びその評価、今後の展望について述べる。

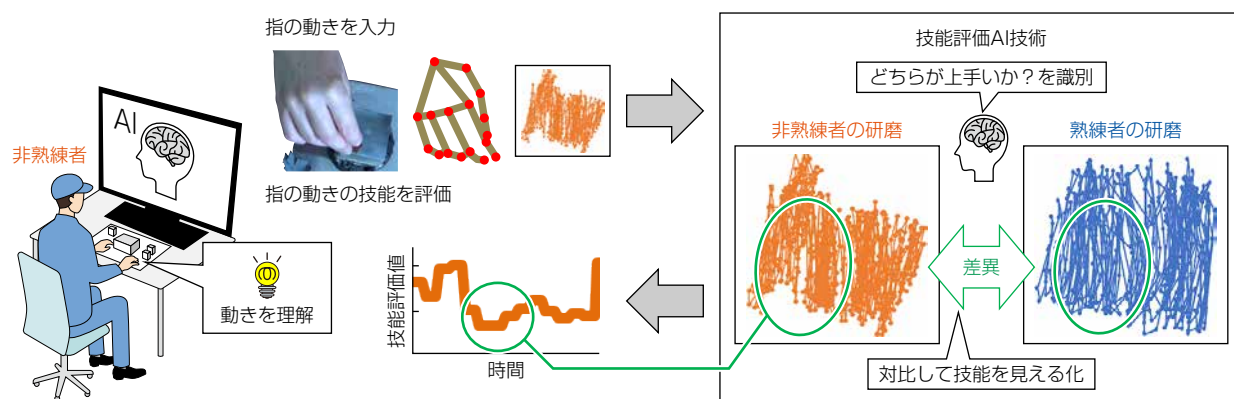


図1-技能評価AI技術を用いた技能者の早期育成

## 2. 技能評価AI技術

技能を評価するAI技術を述べるに当たって、まず、本稿で題材とする鏡面磨きの技能タスクについて述べる。そして、技能を評価するためのデータの抽出方式と評価方式について述べる。



## 2.1 鏡面磨き技能のタスク

鏡面磨きは、金型部品の表面に対して、砥石(といし)や紙やすりを当てて研磨して面全体を鏡面に整えていく作業である。鏡面磨きの技能が不十分であると、面が歪んでしまい成形品に歪みが発生する。このような歪みが発生する問題は、金属面に対してどの位置でどのような動きによって研磨したかによって決まることから、熟練者と非熟練者の間の研磨の軌跡の違いを評価することにした。また、AIモデルに対して十分な量の入力データを確保するため、熟練者と非熟練者が金型部品に対して繰り返し鏡面磨きを実施し、合計26時間の磨きの様子をカメラ撮影した。

## 2.2 研磨の軌跡を抽出

研磨の軌跡を抽出するため、技能者の上からカメラで研磨時の手の映像を撮影した。撮影した動画から研磨しているシーンを抜き出し、MediaPipe<sup>(3)</sup>によって手の骨格情報を抽出した。ここから研磨している手の人差し指の座標を抽出し、熟練者497個、非熟練者173個の軌跡データを得た。熟練者の軌跡データが多いのは、熟練者の方がより短い時間間隔で研磨を中断しており、この場合の軌跡を分けたためである。また、研磨を中断するたびに軌跡を分けた理由は、中断後に研磨を再開する位置は同じとは限らず、中断前後の軌跡を一連のものとした場合にノイズになる可能性が高いためである。

## 2.3 技能評価方式

今回開発した技能評価AIモデルは、入力した二つの動画像の技能的な優劣を評価する方式<sup>(4)</sup>をベースとして、TCN (Temporal Convolutional Network)によって固定長データ128フレーム(4.3秒)で評価するようにした。時系列データである研磨の軌跡を扱うためにはTCNやRNN(Recurrent Neural Network)を用いる必要があるが、熟練者は非熟練者よりも研磨する時間が短く、この傾向をモデルが捉えてしまわないようにRNNによる可変長データではなくTCNによる固定長データを採用した。このAIモデルは、熟練者と非熟練者の軌跡のペアをそれぞれ入力して、熟練者と非熟練者の評価が逆転してしまった場合この差を損失として与えることで、熟練者がより高く評価されるよう距離学習を行う。そして、推論時には習熟を支援したい作業者の研磨の軌跡を入力すると、これまで学習した軌跡データと対比して優劣を評価できる(図2)。

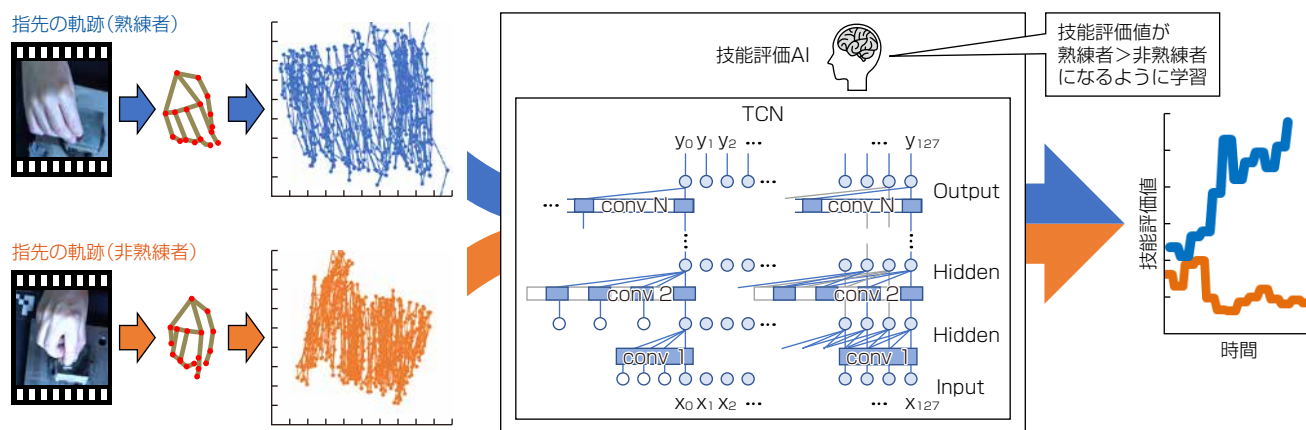


図2-技能評価AIモデル

## 3. 評価

面の歪み等に関する測定から熟練者の方が品質良く作業できていたため、取得した研磨の軌跡から訓練データとして39,873組の軌跡のペアを作成し、熟練者の評価値が常に非熟練者よりも高くなるように学習させた。その結果、全ての熟練者・非熟練者のペアに対して、熟練者の方が非熟練者よりも評価値が高い場合を正解、逆転した場合を不正解として精度を求めたところ、96.3%で判定できることを確認した。



次に、動きに関する技能を捉えることができているかを確認するため、何フレーム分の軌跡で良し悪(あ)しを評価しているのかを示す頻度グラフを作成した(図3)。図3(a)と(b)では熟練・非熟練の技能評価値に差は出ず、図3(c)の128フレームで差が出ていることから、AIモデルは特定の位置にだけ反応して技能を捉えているわけではなく、動きによって技能を捉えていることが分かった。

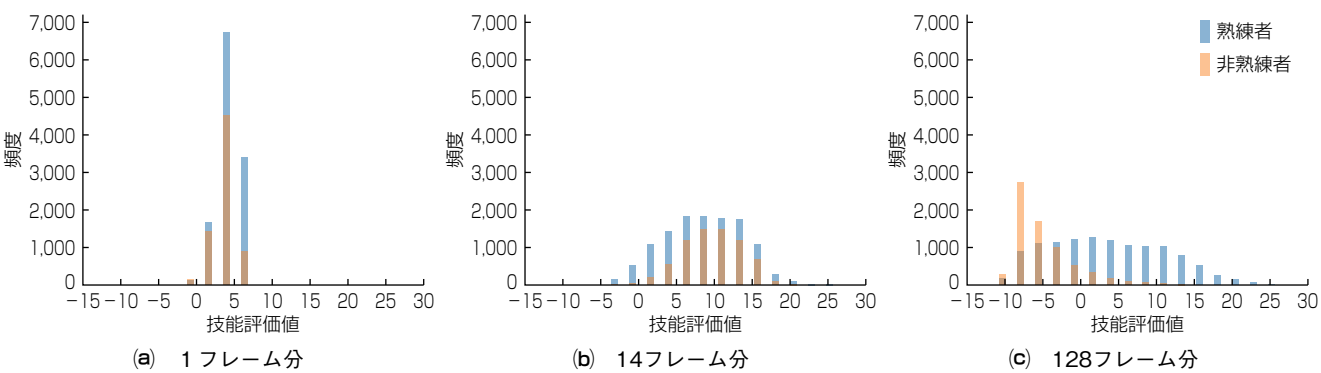


図3-軌跡のフレーム数に対する技能評価値の分布

さらに、どのような軌跡に対してAIモデルが反応しているのかを調べるために、人があらかじめ技能者の観察に基づいて作成した表1の特徴量と紐(ひも)づけて、AIモデルが算出した技能評価値との相関を調査した。図4に表1の特徴量を横軸に、AIモデルが求めた技能評価値を縦軸にして、熟練・非熟練の全ての研磨の軌跡に対しての分布をプロットし、各特徴と技能評価値の相関係数を示した。図4で、熟練者が研磨したデータは青色、非熟練者が研磨したデータはオレンジ色で示しており、表1のうち技能評価値と相関が高い三つの特徴に関する分布だけを示している。図4から面積が広いほど評価値が高い傾向があり、偏り度合いが高く局所的に集中して研磨している場合は評価値が低い傾向があることが分かった。また、ストローク長平均と面積の広さは相互相関しているため、ストローク長平均は面積の代わりになるような有効な特徴ではないことが分かった。

表1-人が作成した特徴量の名称と説明

| 特徴量名     | 説明                             |
|----------|--------------------------------|
| 平均X座標    | 右側／左側に偏って研磨する傾向があるかを分析         |
| 平均Y座標    | 手前側／奥側に偏って研磨する傾向があるかを分析        |
| 合計移動距離   | 研磨の軌跡の合計移動量が長い／短いかを分析          |
| 角度の平均    | 研磨の軌跡の移動方向が常に同じであるかを分析         |
| 角度の分散    | 研磨の軌跡の移動方向にばらつきがあるかを分析         |
| ストローク長平均 | 研磨の軌跡の往復のストローク長が長い／短いかを分析      |
| ストローク長分散 | 研磨の軌跡の往復のストローク長にばらつきがあるかを分析    |
| 面積       | 研磨の軌跡の面積が広いかを分析                |
| 速度平均     | 研磨の軌跡の速度が速いかを分析                |
| 加速度平均    | 研磨の軌跡の加速度が速いかを分析               |
| 偏り度合い    | 研磨の軌跡が他の箇所と比べて局所的に偏っているかどうかを分析 |

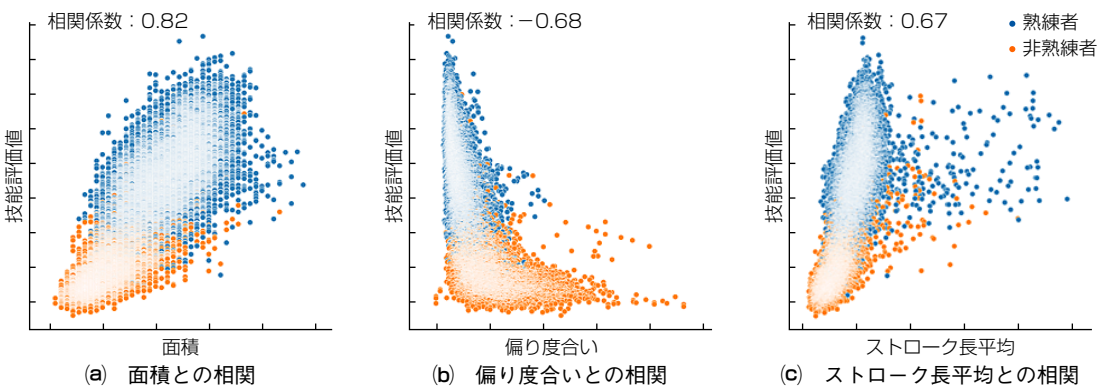


図4-人が作成した特徴量とAIモデルが求めた技能評価値の関係

AIモデルが算出した評価値でソートして、上位と下位に当たる軌跡を可視化した結果を図5に示す。図5で、全体の軌跡を灰色で示す。全体軌跡のうち128フレーム分の軌跡について色を付けて示しており、熟練者が研磨した軌跡は青色、非熟練者が研磨した軌跡はオレンジ色で示している。図5(a)(b)のように熟練者がより広い面積で研磨している軌跡は高い順位に評価され、図5(c)のように非熟練者が局所的に研磨している軌跡は低い順位に評価される傾向を確認した。また、熟練者であっても図5(d)のように、局所的に研磨している軌跡は順位が低いことを確認した。

熟練者に事前にヒアリングを行ったところ、“面を歪ませないためには、ほかすように研磨すると良い。ほかすとは、集中して研磨した分周辺や全体も合わせて研磨すること。”というコメントを得た。この発言は、集中して研磨し過ぎないことや、周辺や全体も合わせて研磨することで面積を広くすることを示しており、今回開発のAIモデルの挙動と一致することが分かった。

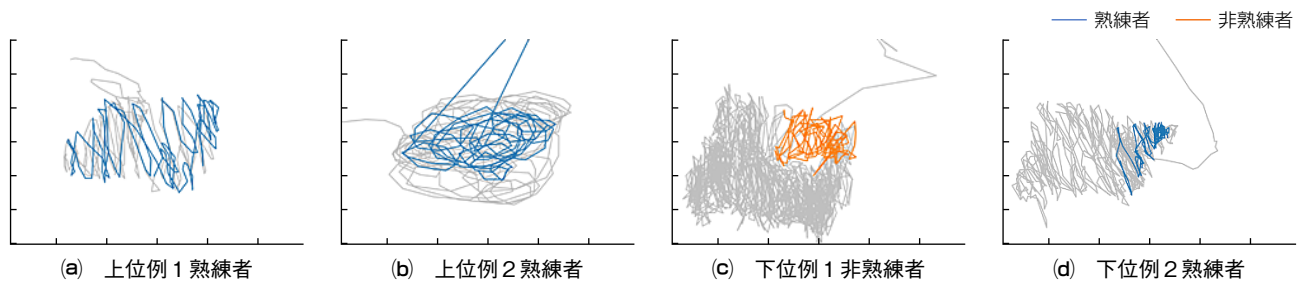


図5-技能評価値上位と下位の研磨の軌跡

## 4. む す び

面の歪みを抑制する上で重要な“ほかす”研磨方法の特徴を、熟練者・非熟練者の研磨の軌跡を比べてどちらの評価値が高いかを学習させたAIモデルによって捉えることができた。従来方式<sup>(4)</sup>は熟練者・非熟練者を見分ける特徴が多数含まれる動画像を比較するため、技能とは関係のない特徴も抽出されてしまう問題があったが、開発方式は指の動きという技能を捉えるための特徴に絞り込んで比較するため、先に述べた研磨方法に関する特徴が抽出できた。このようにAIモデルを活用すれば、非熟練者の研磨方法を評価でき、さらに、より評価の高い熟練者の事例を手本として提示し適宜参照することで技能継承を支援できる。

製造業の技能人材不足の深刻化に対して、今回開発した技能評価AI技術を取り入れることで、技能を捉え、継承を促して、技能人材の育成を加速していく一助になると考えている。今後は、早期の技能人材育成へ向けて、今回開発した技能評価AI技術を用いた技能継承支援システムを作成し、有効性を検証する予定である。

この成果は、NEDOの委託業務(JPNP20006)の結果得られたものである。

## 参 考 文 献

- (1) 経済産業省，厚生労働省，文部科学省：2019年版ものづくり白書（2019）
- (2) 経済産業省，厚生労働省，文部科学省：2022年版ものづくり白書（2022）
- (3) Lugaresi, C., et. al.: MediaPipe: A Framework for Perceiving and Processing Reality, Third Workshop on Computer Vision for AR/VR at IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (2019)
- (4) Doughty, H., et. al.: Who's better? who's best? Pairwise deep ranking for skill determination, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (2018)

三菱電機株式会社