

OMRON TECHNICS

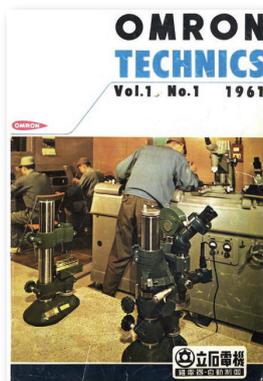
のご紹介

技術論文誌「OMRON TECHNICS」は研究開発成果を広く公開することで様々な社会的課題を解決し、

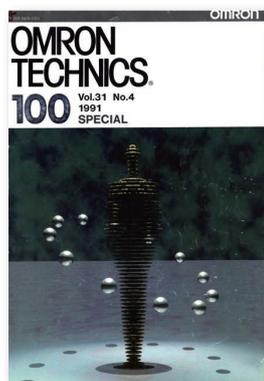
よりよい社会の実現に寄与することを目的に発行しております。

オムロングループのコア技術“Sensing & Control + Think”を活用した新たな価値を是非ご覧ください。

創刊よりこれまで通巻167号発行し、約1,810編以上の論文を公開しております。



1961年5月 創刊号



1991年 100号



2018年 161号



2019年 162号



2020年 163号



2021年 164号



2021年 165号



2022年 166号

オムロンテクニクス

検索

161号以降の論文は全て WEB 公開しております
(冊子の販売は行っておりませんのでご了承ください)



日本語



English

オムロンのコア技術

Sensing & Control +Think

オムロンは創業以来、時代に先駆けた価値を生み出すために、独自のコア技術を進化させてきました。

「Sensing & Control + Think」はオムロンが誇る全社共通のコア技術です。

「Sensing」とは現場の知見に基づき、人やモノの状態・情報から必要なデータを取得することです。「Control」とは、「Sensing」によって得られた情報をもとに、現場に適切なソリューションを提供することです。そして人工知能（AI）に代表される人の知恵や知見を機械に取り込むのが「+ Think」です。

オムロンでは「カーボンニュートラルの実現」「デジタル化社会の実現」「健康寿命の延伸」を解決すべき社会的課題と捉え、4つのドメイン「インダストリアルオートメーション」「ヘルスケアソリューション」「ソーシャルソリューション」「デバイス&モジュールソリューション」を注力する事業領域として、コア技術を進化させ製品やサービスの形で社会実装し社会に貢献できる価値創出をこれからも進めていきます。

Sensing & Control +Think



オムロンのコア技術「Sensing & Control +Think」	1 (1)
目次	2 (2)
巻頭言：オムロンにおけるデジタルデザイン	
オムロン株式会社 執行役員 技術・知財本部長 兼	
オムロン サイニックエックス株式会社 代表取締役社長 諏訪 正樹	4 (4)
寄稿文：天気予報と製品開発の接点：「データ同化」から「予測科学」へ	
理化学研究所 チームリーダー/主任研究員 三好 建正	6 (6)

特集：オムロンが創り描くデジタルデザイン

設備全体の仮想化を実現する物理シミュレーションを用いたカスタムメカニカル機構	
長谷川 直人, 岩村 慎太郎, 島川 はる奈, 白田 聖人	10 (10)
AI技術によるシート検査装置の欠陥分類性能向上	
栢山 博幸	19 (19)
制御プログラム解析とデータ解析の統合による製品不良の要因特定手法の提案	
川ノ上 真輔, 太田 雄也, 須田 啓司	24 (24)
リアルタイム処理可能な特徴量を用いた機械学習によるねじ締め底付き不良検知の事例	
坂元 佑気, 中村 芳行, 杉岡 真行	35 (35)
プリント配線板における部分放電開始電圧・部位予測と高周波域への拡張	
博田 知之, 佐藤 博	45 (45)
サーボドライブシステムにおける高周波漏れ電流による伝導ノイズの解析手法検討	
濱名 建太郎, 徳崎 裕幸, 上松 武	53 (53)

1. オムロンの成長領域でイノベーションを生み出す技術

1. ファクトリーオートメーション	
CT型X線自動検査装置の視野間連続移動による高速検査技術	
七呂 真	64 (64)
細径ファイバによる同軸変位センサの厚み計測高分解能化の実現	
早川 雅之, 木村 和哉, 藤原 直樹, 森野 久康	72 (72)
金属への深堀マーキングを実現するマルチパルスファイバレーザ技術の実証	
吉武 直毅, 横井 忠正	80 (80)
高い可読性を実現した2Dコードの高速レーザスキャニング技術	
芦原 克充	87 (87)
2. デバイス&モジュール	
電子部品におけるポリエステル系高分子の高次構造制御による寸法安定化について	
今泉 豊博, 大谷 修	96 (96)
深層学習を活用したポリエステル系樹脂の難燃助剤特性予測とその難燃性評価	
今泉 豊博, 大谷 修	101 (101)

2. オムロンのものづくりを支える技術

技術ナレッジのグローバル共有化の仕組み構築と活用	
赤松 康至	108 (108)

3. 新たな成長領域を生み出す技術

伝送線路からの不要な放射の抑制によるミリ波レーダの方位推定精度の向上	
小澤 尚志, 谷本 雄大, 齋藤 啓介	116 (116)

最近発表した主な論文	123 (123)
------------	-----------

OMRON's Core Technology "Sensing & Control +Think"	1 (1)
Table of Contents	2 (2)
Introduction; OMRON's Digital Design to Support the Creation of Social Needs SUWA Masaki, Executive Officer, Senior General Manager, Technology & Intellectual Property H.Q. and President and CEO, OMRON SINIC X Corporation	4 (4)
Contribution; Cross-point of Weather Forecast and Product Development: From "Data Assimilation" to "Prediction Science" MIYOSHI Takemasa, RIKEN Team Leader/Chief Scientist	6 (6)

Special issue: Digital Design Created and Drawn by OMRON

Custom Mechanics to Realize Virtualization of Whole Facility Using Physical Simulation HASEGAWA Naoto, IWAMURA Shintaro, SHIMAKAWA Haruna and SHIRATA Seito	10 (10)
The Improvement of Defect Classification of Web Inspection System by AI Technology HAZEYAMA Hiroyuki	19 (19)
A Proposal for a Causal Analysis Method for Product Defect by Integrating Control Program Analysis and Data Analysis KAWANOUE Shinsuke, OTA Yuya and SUDA Keishi	24 (24)
A Case Study of Real-time Screw Tightening Anomaly Detection by Machine Learning Using Real-time Processable Features SAKAMOTO Yuki, NAKAMURA Yoshiyuki and SUGIOKA Masayuki	35 (35)
Partial Discharge Voltage Prediction in Printed Wiring Boards and Their Expansion to High Frequency HAKATA Tomoyuki and SATO Hiroshi	45 (45)
Study of Analysis Method for Conducted Noise Caused by High Frequency Leakage Current for Servo Drive Systems HAMANA Kentaro, TOKUSAKI Hiroyuki and UEMATSU Takeshi	53 (53)

1. Innovative Technology in OMRON's Growth Area

1. Factory Automation

High-speed Inspection Technology by Continuous Movement between Fields of View of Automated CT-type X-ray Inspection System SHICHIRO Makoto	64 (64)
High Resolution Coaxial Displacement Sensor Using Small Diameter Fiber for Thickness Measurement HAYAKAWA Masayuki, KIMURA Kazuya, FUJIWARA Naoki and MORINO Hisayasu	72 (72)
Multi-pulse Fiber Laser Technology That Realizes Deep Marking on Metal YOSHITAKE Naoki and YOKOI Tadamasu	80 (80)
High-speed Laser Scanning Technology for 2D Code with High Readability ASHIHARA Yoshimitsu	87 (87)

2. Device & Module

Dimensional Stabilization by Controlling the Higher-order Structure of Polyester Polymers in Electronic Components IMAIZUMI Toyohiro and OTANI Osamu	96 (96)
Prediction of the Characteristics of Flame Retardant Coagent for Polyester using Deep Learning Technology and Evaluation of the Retardancy IMAIZUMI Toyohiro and OTANI Osamu	101 (101)

2. Technology Supporting OMRON's Manufacturing

Establishment and Utilization of Technological Knowledge Global Sharing System AKAMATSU Yasuyuki	108 (108)
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

3. Technology Developing a New Growth Area

Improving Direction Estimation Accuracy of Millimeter-wave Radar by Suppressing Unnecessary Radiation from Transmission Lines OZAWA Hisashi, TANIMOTO Yudai and SAITO Keisuke	116 (116)
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

New Publications	123 (123)
------------------------	-----------

オムロンにおけるデジタル OMRON's Digital Design to Support

「先行きが不透明なVUCAの時代の到来」、「VUCAの時代において企業の持続可能な成長を支えるDX」など、筆者の身の回りでも「VUCA」というキーワードをよく目にします。とはいいながらも、このVUCAの時代は彗星の如くある日突然到来したという性質のものではありません。例えば、オムロンの創業者である立石一真が提唱したSINIC理論¹⁾においては、情報化社会の到来を目前にした1970年代から、もちろん当時はVUCAという言葉は使われていないですがVUCA時代の到来について語られています。アジャイル開発やデザイン思考などもVUCAに対応するために生まれてきたといっても過言ではありません。

ではなぜ今、身の回りでこの古くて新しいVUCAの時代という言葉が頻繁に目にするようになったのでしょうか？その答えとして、筆者はVUCA、すなわちVolatility（不確実性）、Uncertainty（不確定性）、Complexity（複雑性）、Ambiguity（曖昧性）の4つの要素はこれまでも議論されてきたものの、その振れ幅やマグニチュードが事業やビジネスモデルに与える影響として無視できない規模に、それどころか影響の規模が指数関数的に大きくなってきていることが要因であると考えています。この意味において、本特集タイトルに登場する、「デジタルデザイン」はVUCAの振れ幅やマグニチュードがある閾値を超えた時代に備える重要なファクションの1つであるといえます。

本特集号においては、「デジタルデザイン」は、主にエンジニアリングチェーンにおけるDXを支えるテクノロジーとしての意味合いを持ちます。このデジタルデザインを支えるテクノロジーは、VUCAの時代において3つの役割が期待されます。

(1) 不確実性や不確定性に対応する役割

急速な市場環境の変化に、自社のエンジニアリングチェーンが迅速に追従していくためには、もはやフィードバックでは間に合わず、フィードフォワード的な対応が必要となります。キーとなるのは『予測』と『発見』です。入手できうる限りのデータを活用し、環境変化をいかに精度よく予測し、変化対応のボトルネックを発見することがデジタルデザインの果たす役割となります。この際、変化対応のボトルネックを発見する時の、最後の決定は人に委ねられます。デジタルデザインのテクノロジーには、人によるボトルネックの候補を『可視化』し発見の『判断支援』をするという重要な役割があります。また将来見通しの不確実性に対しては、デジタル化による『効率化（＝結果的にコスト低減につながる）』がキーとなります。

(2) 複雑性に対応する役割

複雑化する市場環境やビジネス環境において、複雑に絡み合う要素を如何に解きほぐし簡易化するかを考える必要があります。デジタルデザインは、複雑な業務プロセスを因数分解し簡素化する、あるいは業務プロセスの最適化や自動化を促進することに貢献します。ここでも簡素化に向けた『発見』と簡素化に向けたボトルネック改善の『判断支援』としてのデジタルデザインの役割があります。

デジタルデザイン

the Creation of Social Needs



(3) 曖昧性に対応する役割

曖昧性の本質は情報の不明確さや不透明さにあります。デジタルデザインには、データそのもの、あるいはデータ分析にもとづく知識の『可視化』によって情報の共有を促進し、意思決定のスピード向上につながる『判断支援』という役割があります。

以上で述べたように、デジタルデザインを支えるテクノロジーとして、VUCAの時代において期待される3つの役割を支えるキーファンクションには、予測・発見・効率化・可視化・判断支援の5つがあります。本特集号においては、このデジタルデザインの5つのキーファンクションの価値を、6つの具体的事例で紹介しています。この6事例を通じてオムロンの考えるデジタルデザインの近未来をご高覧いただけますと幸いです。

デジタルデザインには2つの意味合いがあります。1つ目は「デジタルによるデザイン」です。AIやデータ分析の諸々の技術、可視化技術、シミュレーションなど、5つのキーファンクションを具体的に実装するためのテクノロジーをフル活用してデザインするという意味合いです。2つ目は「デジタルのデザイン」です。事業やビジネスモデルの進化に向けて、「何をデジタル化しないといけないのか?」「DXの本質は何なのか?」について深く考察するという意味合いです。これらいずれの意味合いにおいても、人に任せきりでもなく、機械あるいはテクノロジーに任せきりでもなく、人と機械の協働・融和によるヒューマンセントリックな社会実装を意識することが大切です。

最後になりますが、後々この特集号を読み返したときに、この原稿を書いた時代模様を象徴するようなエピソードを盛り込んだ上で、巻頭言を締めくくります。

エピソード：この巻頭言のいくつかの部分は、「デジタルによるデザイン」という意味合いでのデジタルデザインの最新ツールである、「生成AI」を活用して文章を生成しました（もちろんAIの出力そのままではなく、筆者によって加筆修正はされています）。読者の皆様におかれましては、どの部分が該当するかおわかりになりますでしょうか？

1) 中間真一、SINIC理論、日本能率協会マネジメントセンター、2022、268p.

オムロン株式会社 執行役員 技術・知財本部長 兼
オムロン サイニックス株式会社 代表取締役社長

諏訪 正樹

天気予報と製品開発の接点： 「データ同化」から「予測科学」へ

理化学研究所 チームリーダー/主任研究員

三好 建正



本号はAIやCAE（Computer Aided Engineering）などに関するデジタルデザインの特集号で、AIを活用した設計技術や検査装置、故障予知などの論文が掲載されている。筆者は気象学者でその中でもコンピュータを使った数値天気予報の「データ同化」が専門だ。無関係のようだが実は共通する点もあり、気象学者の知見が製品開発や生産に役立てられると思うとワクワクする。

天気予報は科学に基づいており、センサや衛星、情報通信、スーパーコンピューティングなど幅広い技術の総合である。これらの技術の進展と共に予報の精度は着実に向上しており、最近の天気予報は以前と比べてよく当たるようになってきたと実感する。

様々な場所の気温や湿度、気圧、風、雲などを観測し、通信して集める。それを地図上にプロットすると、天気図が描ける。日々の天気図の蓄積から、低気圧や高気圧が西から東へ動くなど、気象学の重要な発見が成された。まだ無線通信のない時代から遠隔通信を活用してきたというから、ビッグデータ時代を先駆けてきたとも言えよう。実測データを人の頭脳で紐解いて法則性を見つけ出す科学、これを第1の科学という。データから共通点、法則を見つけ出すのは、帰納的推論である。

一方、流体力学や熱力学、放射による熱のやり取り、水の三態変化などの物理法則から、気象の微分方程式を導く。これは演繹的な理論の科学であり、第2の科学という。この方程式は大気をメッシュ状に区切った数値計算によって解くことができる。ある時刻のメッシュ状に区切ったすべての場所の気温や湿度、気圧、風、雲などを表す数値を与えれば、数値計算によって先の時刻の変化が予測できる。この計算は手計算では到底及ばない膨大なものとなり、高性能なコンピュータを使った計算が必須となる。人間の能力を超えた膨大な数値計算による科学、これが第3の科学、計算科学（Computational Science）である。近年、

新しいデータ科学が第4の科学として興隆した。これは、人間の能力を超えた膨大なデータ解析（ビッグデータ解析）をコンピュータによって行うことで新たな知を創造するもので、帰納的な第1の科学の発展形とも言える。

観測データに基づいて現在の推定値を与えれば、数値計算によって将来の予測ができる。ここで観測データと数値計算をつなぐのが、筆者が専門とする「データ同化」である。リアルなデータと仮想的な数値シミュレーションをつなぐ。その意味で、ピュアに計算科学ではないし、第1の科学でもない。帰納と演繹という異なるアプローチを融合するものと捉えられる。「データ同化」の取り扱い方次第で天気予報の精度を左右するから、気象学の一大分野として発展した。

さて、製品開発や生産である。製品をコンピュータ上でシミュレーションして、それを製品開発や生産に役立てることができる。実際に試作するよりもシミュレーションの方が一般にコストが低い。ここで問題になるのが、シミュレーションの信頼性である。それは天気予報でも同じだ。天気シミュレーションが現実と対応しなければ、天気予報は信頼できない。この観点で、天気予報で実測データとシミュレーションを融合する「データ同化」が、製品開発や生産にも通じる接点となる。

天気予報の要として発展してきた「データ同化」が、実測データとコンピュータ上のシミュレーションをつなぐことを焦点に、気象以外の様々な分野に広がっていく。「データ同化」を専門とする筆者が、第1・第4の科学（帰納）と第2・第3の科学（演繹）を融合した新しい第5の科学、「予測科学」の可能性を考え至ったきっかけである。

IoTの時代、あらゆるデータがネットワークを介してサイバー空間に乗ってくる。ビッグデータを解析し活用するAIも発展する。一方で、スーパーコンピュータの性能向上により、原理法則に基づいたプロセス駆動のシミュレー

ションもどんどんリアルになっていく。データとシミュレーションをつなぐことで、リアルな世界をコンピュータ上で忠実に再現し、精密な予測を行う。予測に基づき、望ましい未来に導くために有効なアクションを見極め、実行する。気象に関して、新しいムーンショット目標 8^{*1} が定められ、気象制御に向けた研究が始まった。現実世界とサイバー世界を行ったり来たりしながら、望ましい未来を導く。「予測科学」が目指す一つの方向性である。

一方、気象とは異分野である制御工学の分野でも、この「モデル予測制御」がホットトピックだと聞く。細分化した専門分野が、共通性を見出していく。人類は、気候変動

や災害、エネルギーや人口など、多様な要素が絡み合う複雑な問題を抱えている。これに立ち向かうための新しい科学として、融合的な第5の科学としての「予測科学」が求められている。天気予報の要となる「データ同化」が製品開発や生産に役立てられることは、「予測科学」創生への重要な一歩となるだろう。

* 1 内閣府が推進する制度で国立研究開発法人 科学技術振興機構 (JST) が実施するムーンショット型研究開発制度
<https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/>

特集

オムロンが創り描く デジタルデザイン



設備全体の仮想化を実現する物理シミュレーションを用いたカスタムメカニカル機構

長谷川 直人, 岩村 慎太郎, 島川 はる奈, 白田 聖人

近年は市場ニーズの変化が速く、製品ライフサイクルの短命化が進んでいる。このような市場動向に対応するため、より短い期間での生産設備の立ち上げが必要となる。これまでにオムロンは FA 統合開発環境 Sysmac Studio において仮想化技術を導入し、3D シミュレーションによる設備の事前検証を可能にした。

設備はロボットや周辺機器など、様々な要素で構成されるが、一つでも仮想環境上で再現不可の機器がある場合は設備全体を対象とした 3D シミュレーションができないため、事前検証することができない。3D シミュレーションは各機構の仮想化モデルの組み合わせにより実現するが、従来は汎用の機構に対してのみサポートしていた。従来技術でサポート外の機構がある場合、その機構の仮想化モデルを作成できず、3D シミュレーションに組み込むことが出来なかった。そこで、ユーザが任意に可動部品や結合点の動作を簡略に定義できるカスタムメカニカル機構の仮想化モデルを開発した。これにより、これまで検証できなかった機構を含む設備の事前検証が可能となり、生産設備の立ち上げ時間の削減を実現した。

Custom Mechanics to Realize Virtualization of Whole Facility Using Physical Simulation

HASEGAWA Naoto, IWAMURA Shintaro, SHIMAKAWA Haruna and SHIRATA Seito

In recent years, rapidly changing market needs has led to a trend of shorter product lifecycles. To keep up with such market trends, it is necessary to shorten launching time for production facilities. We introduced virtualization technology in our FA integrated development environment, Sysmac Studio, which enabled debugging without physical machines using a 3D simulation.

A production facility consists of various elements such as robots and peripheral devices, and if it contains even a single device that cannot be reproduced in the virtual environment, a 3D simulation of the whole facility is not possible. Although a 3D simulation is realized by the combination of virtualization models of each mechanism, our conventional virtualization technology only supported the general mechanisms and virtualization models were not available for the unsupported mechanisms. To solve this challenge, we have developed virtualization models for custom mechanics that allow users to easily define movements of movable parts and joint points. This enabled a 3D simulation of a facility containing the mechanisms that had not been supported and further contributed to reduction in launching time.

1. まえがき

近年は消費者の嗜好変化が激しく、製品のタイムリーな市場投入が必要である。そのため、生産設備の短期立ち上げが求められている。これまでにオムロンは FA 統合開発環境 Sysmac Studio において仮想化技術を導入し、3D シミュレーションによる設備の事前検証を可能にした¹⁾。

3D シミュレーションでは設備を構成する装置を仮想化する必要がある。Sysmac Studio では装置を仮想化するために 13 種類の汎用メカニカル機構の仮想化モデルを用意している。ユーザは仮想化したい装置に含まれる各機構に対して機構種別を選択し、可動部品の CAD データをインポートして決められた設定を行う。この機能により、XY テーブルや直交ロボットなど、FA 業界で使用されている多くの機構を含む装置の仮想化が可能となった。しかし、

Contact : HASEGAWA Naoto naoto.hasegawa@omron.com

定義済みの13種類の機構種別に当てはまらない、メーカー独自の動作機構や、クランプ機構のような物理的なジョイントを含む装置の仮想化は実現できない。そのため、これらのサポート外の機構を一つでも含む装置がある場合は、3Dシミュレーションによる設備の事前検証ができなかった。

この問題を解決するために、可動部品の動作や可動部品間の結合方法をユーザーが任意に設定できる、カスタムメカニカル機構の仮想化モデルを開発した。

本稿では、2章で従来の仮想化技術の効果とその技術に対する課題を述べる。3章ではカスタムメカニカル機構を実現するための技術の詳細を説明し、4章でカスタムメカニカル機構の有効性の検証結果について述べる。そして、5章にて本稿での総括及び今後の展望と課題を述べる。

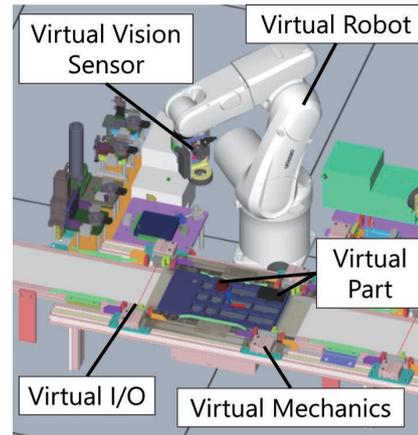


図2 仮想化した生産設備の例

2. 従来技術と課題

2.1 オムロンが提供する従来の仮想化技術とその効果

仮想化技術が普及する以前の生産設備の開発は、一般的に実機のみで行われていた。オムロンでは生産設備の立ち上げ工数の削減を目指し、FA統合開発環境であるSysmac Studioに生産設備の仮想化技術を導入した。生産設備全体の構成例を図1に示す。構成要素にはセンサ制御に使用するI/O、画像センサ(Vision Sensor)、周辺機器の制御に用いるサーボモータ(Servo Motor)、及びロボット(Robot)が含まれる。そして、それらの構成要素はワーク(Part)を作業対象として検出・搬送等を行う。これらの要素の仮想化を実現するため、5つの仮想モジュール「仮想I/O(Virtual I/O)」、「仮想画像センサ(Virtual Vision Sensor)」、「仮想周辺機器(Virtual Mechanics)」、「仮想ロボット(Virtual Robot)」、「仮想ワーク(Virtual Part)」を実現した。仮想化を実現した生産設備の例を図2に示す。

従来技術を活用すると実機のみの場合に比べ、立ち上げ工数を56%削減できることが分かった¹⁾。実機のみによる生産設備立ち上げの開発プロセスと仮想化技術を用いた時の開発プロセスの違いを図3に示す。

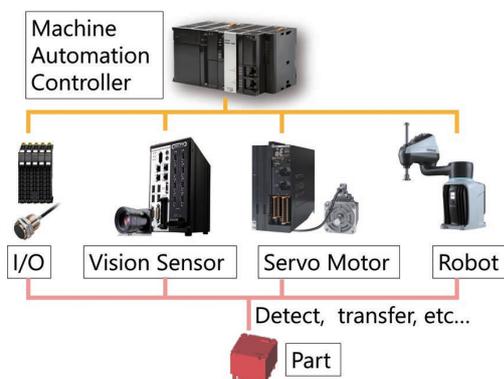


図1 生産設備の制御システム構成例

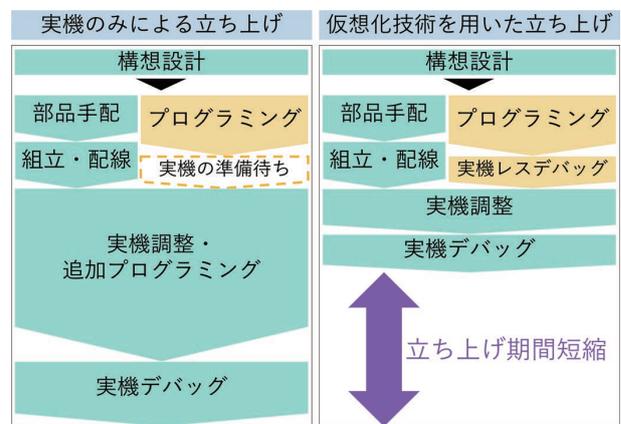


図3 生産設備の立ち上げの開発プロセスの違い

2.2 従来の仮想化技術の課題

生産設備を構成する要素のうち、特に周辺機器の種類は多岐に渡る。従来の仮想周辺機器の要素であるメカニカル機構でサポートする種別は「直動機構」、「回転機構」、「エアシリンダ」など汎用的な13種類であり、これらを作成可能な機構として定義していた。しかし、周辺機器はユーザーの生産設備に対応するようにカスタマイズして作られることがある。カスタマイズして作られた周辺機器は、汎用的な13種類でサポートできない機構を含むことがある。具体的には設定内容が製品メーカーによって異なる電動シリンダ及び電動チャック、物理現象のシミュレートが必要なクランプ機構などである。このような機構を含む周辺機器は、従来の仮想化技術では仮想環境上で再現できない。生産設備の中に一つでも再現不可の周辺機器があると、仮想環境上での3Dシミュレーションができなくなる。また再現不可の周辺機器は実機を使ってデバッグや調整をせざるを得なくなり、その分生産性が低下する。仮想環境で設備全体を対象とした3Dシミュレーションを行うには、これらの周辺機器を仮想環境上で再現する必要がある。

3. カスタムメカニカル機構の実現

2章で述べた従来の技術に対する課題を解決する手段として、ユーザが任意の機構の仮想化モデルを作成できる機能の実現に取り組んだ。ユーザがメーカーごとの設定項目、設定値を任意に変更、あるいは物理シミュレーションを含めた機構を独自に定義し、それを仮想化モデルとして実現することができれば、仮想環境での3Dシミュレーションが可能となり、上記課題を解決することができる。汎用的な13種類の機構をサポートするメカニカル機構に対し、上記の機能を持つ機構をカスタムメカニカル機構と定義した。

カスタムメカニカル機構を実現するにあたり、重要な要素となるのが、可動部品同士を結合するジョイントである。ジョイントの動作を実現するためには物理現象をシミュレートする物理シミュレーション技術を用いる必要がある。その実現にあたっての課題解決策を3.1節で述べる。3.2節では、カスタムメカニカル機構と既存の仮想モジュールとの同期を実現し、仮想環境上で設備全体を対象とした3Dシミュレーションを実現する技術について述べる。また、複雑なカスタムメカニカル機構を含むシステムをユーザが簡単に設定できるようにするための技術を3.3節で述べる。

3.1 可動部品同士を結合するジョイントの実現

可動部品間が物理現象に従った結合を含む機構を再現するためには、物理シミュレーションを用いて可動部品間を接続し、その間の動作の制約条件を設定する必要がある。Sysmac Studioにおける物理シミュレーションは、NVIDIAが提供している、リアルタイムの物理演算エンジンPhysXを用いて実現している。PhysXにはx, y, z軸とそれぞれの軸の回転を独立して制御できるD6ジョイントが定義されている²⁾。しかし、D6ジョイントは機構のジョイントのメカニズムを直接表現したものではないため、そのままのインタフェースでは簡略な設定を目指すカスタムメカニカル機構のジョイントとして使用できない。そこでユーザに対して直感的に理解しやすいカスタムメカニカル機構のジョイントとして使用できるようにするために、機構設計の定石集であるからくり設計のメカニズムの分類を参考にジョイントを定義した³⁾。この定義に基づいてD6ジョイントのインタフェースをカスタマイズして表1に示す独自のジョイント群を開発した。

表1 カスタムメカニカル機構のジョイント群

ジョイント	説明
固定ジョイント	2つの可動部品を固定する接続方法。
ヒンジジョイント	2つの可動部品をヒンジジョイントで接続する方法。
ボールジョイント	2つの可動部品をボールジョイントで接続する方法。
スライダージョイント	2つの可動部品を直線方向に接続する方法。
回転ジョイント	2つの可動部品を一つの軸を基準に回転し接続する方法。
親子ジョイント	2つの可動部品の親子関係による接続方法。

独自ジョイントの一例として、スライダージョイントの動作を図4に示す。本ジョイントはD6ジョイントのx軸以外のすべての並進・回転動作をロックすることで実現している。親子ジョイント以外のジョイントは、同様にD6ジョイントの一部動作方向をロックする方法により実現した。

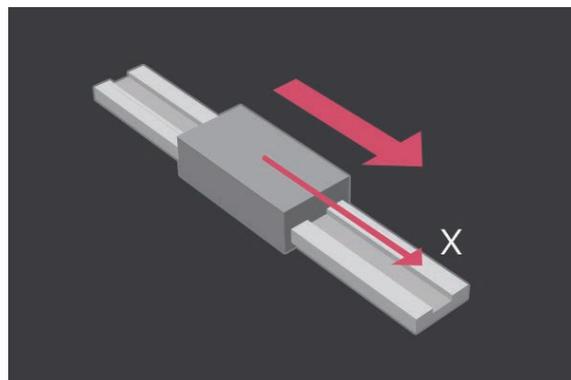


図4 スライダージョイント

PLC (Programmable Logic Controller) のモーション軸を用いた位置制御と、ジョイント機構を組み合わせた電動チャック機構などを再現するために親子ジョイントを実現した。この機構においては可動部品の一部がPLCのモーション制御で動作すると、その可動部品の動作に合わせてジョイントを持つ別の可動部品が追従するという部品間の座標更新に親子関係が存在する。単純にそれぞれの機構部品を動作させた場合、追従すべき部品の位置の更新が次の周期で行われるため、機構全体として見ると本来期待される位置に対して遅れが生じてしまう。これを解決するためPLCのモーション軸の指令値に合わせて可動部品の位置を更新し、その直後に更新された位置を用いてジョイントの物理シミュレーションを行い、その結果から機構全体の

3D ワールド座標を求めるという一連動作を機構ごとに独立させた。これによって親子ジョイントを持つ機構が他の機構などの動作から遅れることなくシミュレーションできるようになった。これらの技術で実現したカスタムメカニカル機構により、仮想化可能な装置の大幅な拡大を実現した。

3.2 設備全体を対象とした 3D シミュレーションを実現するための要素間同期の実現

Sysmac Studio のシステム全体構成図を図 5 に示す。

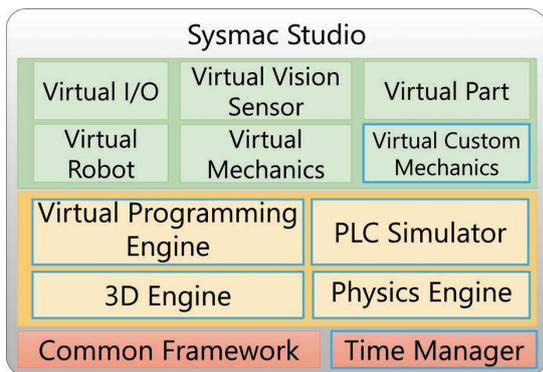


図 5 システム全体構成図
(緑: 仮想化対象、黄: 仮想化エンジン、橙: ソフト基盤)

仮想化した全てのモジュールを一つのソフトウェアで実現するための基盤となるのが、「Common Framework」である。各 Engine の実行タイミングを管理する仕組みが「Time Manager」であり、詳細については後述する。次に、生産設備の制御プログラムやシミュレーション用のプログラムを実行するのが、「仮想プログラミング環境 (Virtual Programming Engine)」である。実機 PLC の動作シミュレーションを行うのが「PLC Simulator」である。生産設備全体の 3D モデルの形状データを管理し、3D 表示機能やモデル同士の干渉チェックを実現するのが「3D Engine」である。そして、重力や物理シミュレーションの演算を行うのが「Physics Engine」である。3D Engine 上で、生産設備の要素であるロボット、周辺機器、I/O 機器、画像センサ及びワークを仮想化したモジュールがそれぞれ、「仮想ロボット (Virtual Robot)」、「仮想周辺機器 (Virtual Mechanics)」、「仮想 I/O (Virtual I/O)」、「仮想画像センサ (Virtual Vision Sensor)」、「仮想ワーク (Virtual Part)」である。今回、新たに「仮想カスタムメカニカル機構 (Virtual Custom Mechanics)」モジュールを追加した。なお、それに伴う I/F 追加などの変更を行った要素を青枠で示している。

図 5 で示されるカスタムメカニカル機構を含む仮想環境を実現するためにはシステムに含まれる全ての要素が同期して動作する必要がある。システムとして各機能が同期し

ていない場合、シミュレーション実行ごとに結果が変わる。そのため、コンベア上を流れるワークに対してカスタムメカニカル機構を用いてピックして別のコンベア上にブレースする場合など、正しくピックできないなどの問題が発生してしまう。また要素間の同期が高速に行われられない場合、3D 表示画面が滑らかに表示されないという問題が発生する。

これらの問題を解決するためにはカスタムメカニカル機構とシステムを構成する既存モジュール間的高速な同期が必要となる。図 5 のシステムからカスタムメカニカル機構を含むシステムを抽出し、各モジュールの実行単位であるプロセスの関係を表したものを図 6 に示す。各プロセス間で高速な通信を実現するために Windows OS が提供している EventObject を用いて、プロセス間同期を実現している。これによりプロセス間を約 0.02ms で通信することが可能であり、カスタムメカニカル機構を含む場合でも、3D 表示画面上で滑らかに動作の様子を確認することができるようになった。

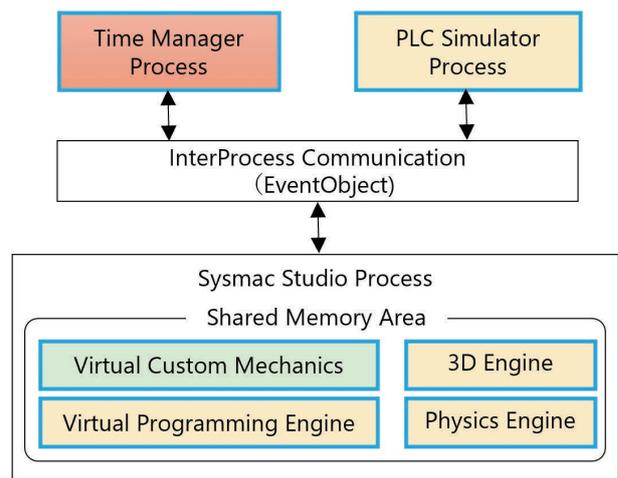


図 6 Sysmac Studio のプロセス構成

さらに、カスタムメカニカル機構のジョイントと、ワークの重力や、衝突の 3D シミュレーションをリアルタイム動作に近い形で行うためには Sysmac Studio プロセス内のメモリ空間における異なる要素間のデータ交換速度も課題となる。Sysmac Studio は C# を用いた仮想化用の汎用プログラム言語である Shape Script を用いて仮想空間上のワークを動作させている。Virtual Programming Engine にある Shape Script は PLC シミュレータの変数に対し、値の読み書きを行うため、Sysmac Studio プロセス内の他の要素に対し、高速通信する必要がある。Virtual Programming Engine と他の要素間は、OS が提供するメモリ空間の異なる要素間的高速通信の仕組みである .NetRemoting を活用して高速通信を実現している^{1,4)}。カスタムメカニカル機構においては Shape Script に機構を同期動作させるための専

用インターフェースを用意することで、これら通信の仕組みを利用し、リアルタイム動作に近い 3D シミュレーションを実現した。

今回、カスタムメカニカル機構を含む要素間の同期をシステム全体で管理するため、それぞれの要素のタイミングを管理する Time Manager¹⁾ の拡張を行った。システム全体のシミュレーション時間同期タイムチャートを図 7 に示す。

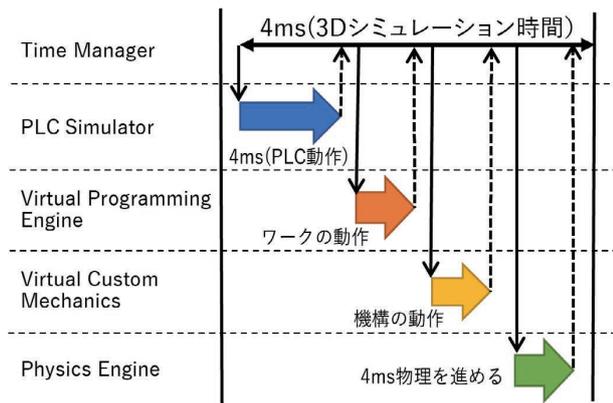


図 7 Time Manager を用いたシミュレーション時間同期タイムチャート

Virtual Custom Mechanics の「機構の動作」を Time Manager で管理することにより、カスタムメカニカル機構の動作と既存の仮想モジュールとの同期を実現した。

3.3 カスタムメカニカル機構を設定する上でのユーザビリティ課題の解決

本節ではカスタムメカニカル機構をユーザが簡単に設定するための課題とその解決手段について述べる。

3.3.1 ジョイントの位置を簡単に設定するためのスナップ機能の実現

先に述べている通り、カスタムメカニカル機構のジョイントの動作を実現するために、物理シミュレーションを用いる。物理シミュレーションを正確に行うためには、可動部品同士のジョイントの位置を正確に決める必要がある。ジョイントの位置は図 8 に示すようにマウス操作によって設定することが可能である。しかし、目標とする位置が画面上に表示されないことや、点の移動がユーザのマウス操作に依存するため、正確にジョイントの位置を設定することは困難である。

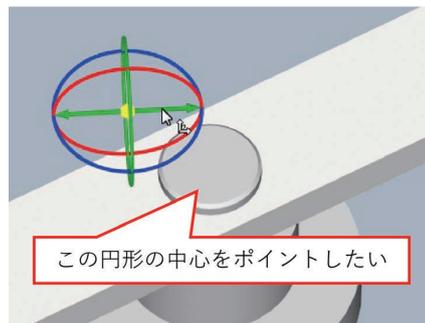
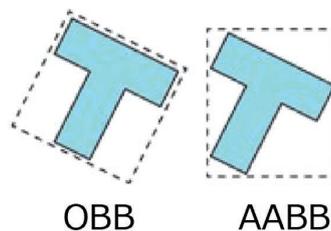


図 8 マウス操作によるジョイントの位置の設定

この問題を解決するため、スナップ機能を開発した。スナップ機能とは、特定の 3D オブジェクトを選択した後、マウスで別の 3D オブジェクト上にマウスカーソルを移動させると、マウスカーソル近くの辺の両端あるいは面の重心などの点を表示し、ユーザがその点をクリックすることで、対象をその点に移動させることができる機能である。スナップ機能における、移動先の候補点の表示を実現するためには、マウスカーソル上に最も近い面を検索する必要がある。しかし、このスナップ先の点の検索には大量の計算が必要であるため、ユーザのマウス操作に影響が出るなどの性能悪化につながる。そこで計算量を減らすために、3D オブジェクトを直方体で簡素化した。簡素化の方法には図 9 に示す OBB と AABB という手法があるが、今回は操作性に関わる箇所であるため、応答速度で有利な AABB を採用した。



OBB: Oriented Bounding Box
AABB: Axis-Aligned Bounding Box

図 9 OBB と AABB の比較

AABB を適用して簡素化する手法を用い、マウスカーソルが示す箇所にあるオブジェクトの内、最前にあるオブジェクトを特定する。最前にあるオブジェクトの特定は、カメラとマウスカーソルを結ぶ光線を作成し、光線と交差している 3D オブジェクトのうちカメラに一番近いオブジェクトを取得することで実現した。さらに、特定した 3D オブジェクトを構成している内部の形状データについてもそれぞれを直方体で囲い、検索することで最前の面を特定する。特定した面から辺の両端あるいは面の重心の情報を取得し、画面上にスナップ先の点として表示する。

性能改善の更なる手段として、計算処理をバックグラウ

ンド処理で行う工夫をした。計算はマウскарソルの存在している位置に対して常に実行されるが、マウскарソルが移動すると、新たに計算をし直す。バックグラウンドで処理が実行されるため、早く動かすとスナップ先の点は表示されないが、マウскарソルがスナップ先に近付き、ゆっくり動かされることで、スナップ先の点が表示されることになる。これはユーザのマウス操作方法に着目して設計を行った。具体的には目標座標付近に来るまでは早くマウスを動かし、目標位置付近ではゆっくり動かすという人間の操作方法に基づいて設計した。これらの技術により実現したスナップ機能を用いてジョイントの位置を設定する様子を図 10 に示す。ジョイントを選択してスナップモードに入った後にマウскарソルを目標位置付近に移動させると、水色の点が表示される。ここでクリックすると、ジョイントが水色の位置に移動する。

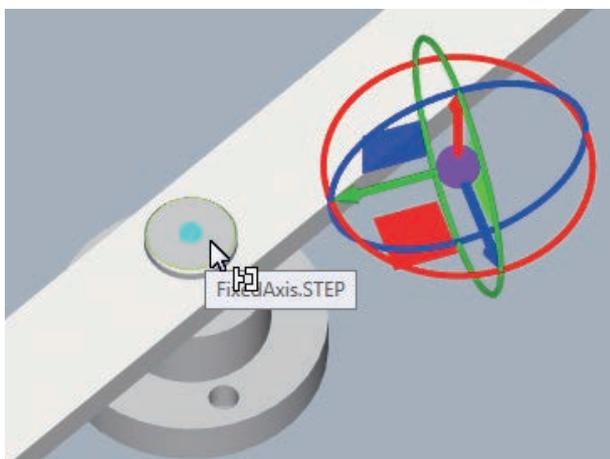


図 10 スナップ機能によるジョイントの位置の設定

このように、ユーザ操作を妨げることなく自然なスナップ機能を実現し、物理シミュレーションに必要なジョイント位置の正確な位置決めを実現した。

3.3.2 複数可動部品の動作定義を簡単にする動作設定機能の実現

カスタムメカニカル機構で実現したい重要な機構として電動チャックが挙げられる。電動チャックは複数の爪で物をつかむことを想定しているため複数の可動部品をセットにして動作させる必要がある。これを実現するために一般的な電動チャックには動作番号機能⁵⁾ という特徴的な機能が存在する。この機能はあらかじめ複数可動部品の速度や位置などの動作をグルーピングし、そのグループ設定を1つの番号として設定することができる。例えば SMC 社のステップモーターコントローラは電動チャックを制御できるが、複数の可動部品の動作指示をまとめたステップデータ指示により運転制御している。カスタムメカニカル機構で複数の可動部品をステップデータ指示により動作させるためには、Shape Script で可動部品毎に動作を定義することが必要である。しかし、一般にカスタムメカニカル機構のステップデータは十数個定義され、その十数個もあるステップデータの管理をスクリプトで行うことは非常に複雑であり、また動作番号を指定する PLC 変数との紐づけのために、制御プログラムの変更も必要であることが、ユーザにとって障壁となる。

そこで、電動チャックの動作番号機能と同等である、複数の可動部品の動作設定をグルーピングして管理できる機能を実現した。この機能により動作設定に基づいた速度および位置の計算と、動作番号を指定する PLC 変数との紐づけを内部的に自動で行う。また、直感的にこれらの動作設定を実施できるように、図 11 に示すような表形式ベースの UI を用意した。



図 11 カスタムメカニカル機構の動作設定画面

動作設定においては、カスタムメカニカル機構の各可動部品に対して、直動・回転・直動回転のいずれかの動作方向と、それぞれの動作方向に対応する動作を予め最大 64 個まで設定することができる。表 2 にそれぞれの動作方向に対して設定する内容を示す。

表 2 動作方向と動作設定

動作方向	動作設定内容
直動	直動速度 [mm/s] と目標位置 [mm] を設定する。可動部品は目標位置 [mm] に到達するまで指定の直動速度 [mm/s] で直動することを表す。
回転	回転速度 [degree/s] と目標角度 [degree] を設定する。可動部品は目標角度 [degree] に到達するまで指定の回転速度 [degree/s] で回転することを表す。
直動回転	直動速度 [mm/s] と目標位置 [mm] と回転速度 [degree/s] と目標角度 [degree] を設定する。可動部品は目標位置 [mm] に到達するまで指定の直動速度 [mm/s] で直動した後、目標角度 [degree] に到達するまで指定の回転速度 [degree/s] で回転することを表す。

各可動部品には動作開始 I/O 変数、位置決め完了 I/O 変数、動作番号指定変数、現在値取得変数の割り当て設定が存在する。表 3 に各変数についての説明を示す。動作開始 I/O 変数が ON (True) である間、各可動部品は動作番号指定変数で指定された動作番号の速度で、動作番号の目標位置へ向かって移動する。その後、目標位置にて停止し、位置決め完了 I/O 変数が ON になる。可動部品の現在値は常に現在値取得変数に出力される。それぞれの変数には、コントローラ変数もしくはロボットの I/O シグナルを割り当てることができる。3.2 節で説明した通り、これらの変数の取得、書込はシステム全体で同期して動作するように管理されている。

表 3 可動部品に割り当てる変数

変数	説明
動作開始 I/O 変数	ON である間、指定された動作番号の設定に従い、可動部品を動作させる変数。
位置決め完了 I/O 変数	可動部品が目標位置に到達した際に ON になる変数。
動作番号指定変数	最大 64 個まで設定される動作の内、どの設定で可動部品が動作するかの番号を指定する変数。
現在値取得変数	可動部品の現在位置が常に書き込まれる変数。

図 12 に可動部品である爪が 2 つと、各可動部品に対する動作設定が 2 つずつ存在する場合の電動チャックの動作例を示す。動作番号 0 によりチャックを閉じ、動作番号 1 によりチャックを開く動作を定義している。ユーザは動作設定画面で必要な項目を入力するだけで、これらの動作を定義できる。

(A) はチャックが閉じた初期状態を表す。(B) に示す通り、動作番号指定変数の値を 1 に設定し、動作開始 I/O 変数の値を True に変更すると、可動部品が動作番号 1 の動作設定に従って直動速度 10mm/s で目標位置 12mm に向かって動作する。動作番号 1 の目標位置に可動部品が到達すると、(C) の通り、動作開始 I/O 変数の値が false となり、位置決め完了 I/O 変数の値が True となる。これによりチャックが開いた状態となる。次に (D) の通り、動作番号指定変数の値を 0 に設定し、動作開始 I/O 変数の値を True に変更すると、可動部品が動作番号 0 の設定の通り、直動速度 10mm/s で目標位置 0mm に向かって動作する。動作番号 0 の目標位置に可動部品が到達すると、(E) の通り、位置決め完了の値が True となり、チャックが閉じた状態になる。

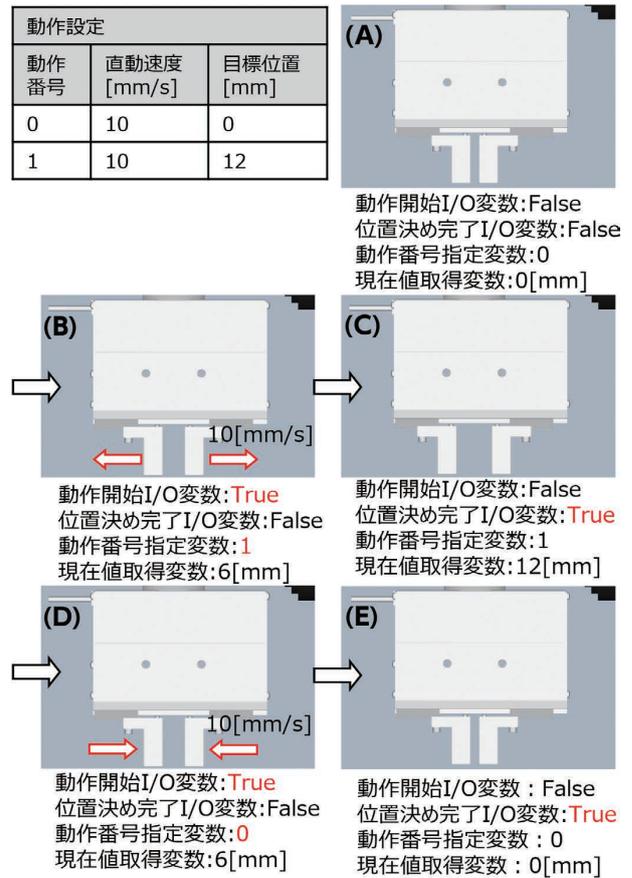


図 12 動作設定による動作例

本項で述べた通り、複数の可動部品の動作をグルーピングして動作させる動作設定機能を実現した。これにより複雑なカスタムメカニカル機構の動作定義をユーザーが簡単に設定できるようになった。

4. カスタムメカニカル機構の有効性の検証

カスタムメカニカル機構により実現される仮想化技術の有効性検証を目的に、本稿で記載した技術要素をすべて含む装置としてロボットとカスタムメカニカル機構によるドアスイッチ取り付けシステムの構築を行った。

ドアスイッチ取り付けシステムでは、垂直多関節ロボット Viper650 がドアスイッチのボディ、ヘッドを順に運搬することで、ドアスイッチのボディにヘッドを連結させる。運搬先では、ボディはヘッドの取り付けを可能にするために、クランプ機構により押さえ付けられ、定位置に固定される。システムの内、Viper650 のエンドエフェクタに取り付けられるロータリテーブルと電動チャック、ボディを押さえるクランプ機構がカスタムメカニカル機構により実現される。図 13 に検証に用いたシステム構成、表 4 にそれぞれの機構についての説明を示す。

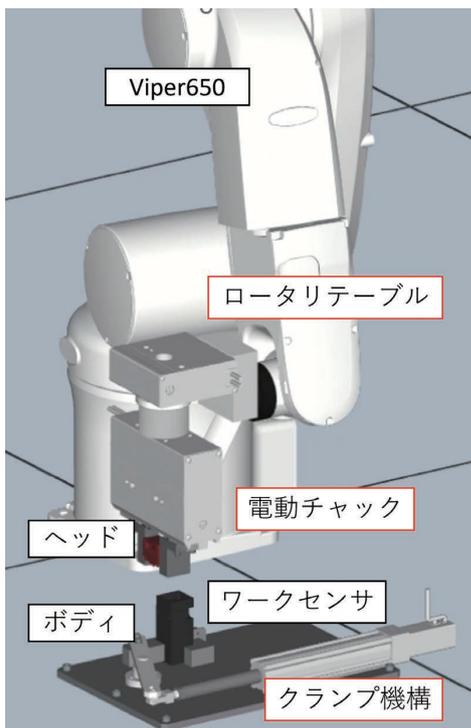


図 13 ドアスイッチ取り付けシステムの構成 (赤枠：カスタムメカニカル機構)

表 4 ドアスイッチ取り付けシステムの機構

項目	説明	
Viper650	PLC により制御される垂直多関節ロボット。	
ボディ (ドアスイッチ)	運搬されるワーク。上部にヘッドが取り付けられる。	
ヘッド (ドアスイッチ)	運搬されるワーク。ボディの上部に取り付けられる。	
ワークセンサ	ワークが固定位置に押さえつけられていることを検知するセンサ。	
カスタムメカニカル機構	ロータリテーブル	回転して手先の位置調整を行うカスタムメカニカル機構。
	電動チャック	ワークを把持するカスタムメカニカル機構。
	クランプ機構	ドアスイッチのヘッドを取り付けるために、ボディを押さえつけて固定するカスタムメカニカル機構。

検証はドアスイッチ取り付けシステムにおける、メカ設計から、実機制作、制御設計、全体検証を含む制御デバッグまでを行い、これらの各工程に要した工数を記録し、仮想化技術未使用時と使用時において工数を比較した。比較結果を図 14 に示す。

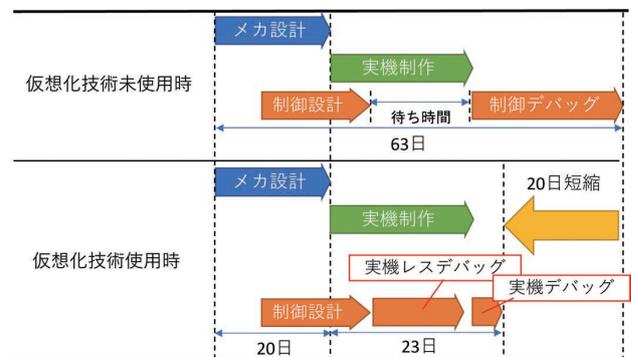


図 14 仮想化技術未使用時と使用時の工数比較結果

図 14 に示した通り、仮想化技術を使用しなかった場合、立ち上げには 63 日を要した。それに対し、仮想化技術を使用した場合は 43 日となり、仮想化技術を使用することで立ち上げ工数を約 32% 削減することができた。

仮想化技術を使用しない場合、メカ設計を行ってから実機制作が完了し、手元に実機が揃うまで制御デバッグを始められないため待ち時間が生じていた。それに対し、仮想化技術を使用した場合は、実機制作の完了を待たずして並行して制御デバッグを進めることができるため、システム全体の製作期間を短縮することができた。

また、制御デバッグにおけるティーチング工程では、実機を使用する場合、干渉による機器の破損を避けるためロボットを低速で動かす必要があり工数を要する。それに対し、仮想化技術を使用すると仮想環境上で仮想ロボットを高速に動かすことができるため、ティーチング時間を短縮できた。さらに、最終的な実機での調整はほぼ確認と微調整のみで済むため、実機での作業時間が削減され、結果として制御デバッグ全体の工数も削減できた。

また、仮想化技術を使用して作成・実機レスデバッグが行われたプログラムは、実機にそのまま使用することができるため、一般的な仮想化シミュレーションのように実機立ち上げを行う際の追加プログラミングは必要なく、実機での確認作業開始までの期間を短縮できる。

5. むすび

本稿では、従来技術でサポート外の機構を一つでも含む装置がある場合に 3D シミュレーションによる設備の事前検証ができないという問題を解決するため、物理シミュレーション技術を導入したカスタムメカニカル機構の実現手段や活用について述べた。

可動部品同士を結合する各種ジョイントや、設備全体を対象とした 3D シミュレーションのためのカスタムメカニカル機構動作と既存の仮想モジュールとの同期を実現した。また、ジョイント位置のスナップ機能や動作設定機能など、カスタムメカニカル機構を使用するためのユーザビリティ課題を解決した。

ドアスイッチシステムの製作に関して本技術を活用すると工数が 32% 削減されることが確認でき、本技術の有効性を検証することができた。これにより、生産設備の短期立ち上げが可能となり、製品のタイムリーな市場投入に寄与することができる。

今後は、仮想化技術をより進化させ、カスタムメカニカル機構で実現できていないギアやカムなど、別の固有のパラメータ設定が必要である機構も仮想化できるようにする。あるいは柔軟物の仮想化を行うために、Sysmac Studio で未導入である有限要素法の技術を用いるなど貪欲に技術を取り入れ、より幅広い設備を仮想化できるようにしていく。

参考文献

- 1) 島川はる奈, 岩村慎太郎. FA 統合開発環境における生産設備の仮想化技術. OMRON TECHNICS. 2021, Vol.53, No.1, p.8-16.
- 2) PhysX Joints. "NVIDIA PhysX SDK 3.4.0 Documentation". <https://docs.nvidia.com/gameworks/content/gameworkslibrary/physx/guide/Manual/Joints.html>, (参照 2023-01-13).
- 3) 熊谷英樹. 必携「からくり設計」メカニズム定石集一ゼロからはじめる簡易自動化一. 日刊工業新聞社, 2017.

- 4) Microsoft. "NET Remoting Framework の概要". [https://learn.microsoft.com/ja-jp/previous-versions/msdn/architecture-center/cc440094\(v=vs.71\)](https://learn.microsoft.com/ja-jp/previous-versions/msdn/architecture-center/cc440094(v=vs.71)), (参照 2023-01-13).
- 5) SMC. "コントローラ (ステップデータ入力タイプ) JXC51/61 Series". <https://ca01.smcworld.com/catalog/Electric/mpv/s100-136-JXC51-61/data/s100-136-JXC51-61.pdf>, (参照 2023-02-06).

執筆者紹介



長谷川 直人 HASEGAWA Naoto
 インダストリアルオートメーションビジネス
 カンパニー
 商品事業本部 コントローラ事業部
 ソフトウェア開発部
 専門：ソフトウェア工学



岩村 慎太郎 IWAMURA Shintaro
 インダストリアルオートメーションビジネス
 カンパニー
 商品事業本部 コントローラ事業部
 ソフトウェア開発部
 専門：ソフトウェア工学
 所属学会：日本ロボット学会



島川 はる奈 SHIMAKAWA Haruna
 インダストリアルオートメーションビジネス
 カンパニー
 商品事業本部 コントローラ事業部
 ソフトウェア開発部
 専門：ソフトウェア工学



白田 聖人 SHIRATA Seito
 インダストリアルオートメーションビジネス
 カンパニー
 商品事業本部 コントローラ事業部
 ソフトウェア開発部
 専門：ソフトウェア工学

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

AI 技術によるシート検査装置の欠陥分類性能向上

栢山 博幸

近年、製造現場における「労働人口の減少」、「熟練者の不足」といった社会的課題は深刻さを増しており、自動化ニーズは高まり続けている。シート製品の製造をしている高機能フィルム業界、製紙業界においても、検査員が目視作業をしている工程があり、作業にかかる工数や工程そのものを削減する取り組みが続けられている。

本稿ではシート検査装置において、AI技術（Deep Learning）を活用し、欠陥を精度良く分類する手法「Dual Class AI（商標登録中）」を提案する。シート検査装置に搭載されている分類手法の主流は、欠陥画像から特徴量（欠陥画素の幅/長さ/面積、欠陥画素の合計値/最大値/平均値、等）を測定し、それぞれの特徴量の値がどの範囲にあるかを使って分類を行う手法であった。しかしながら、従来手法である特徴量を使った分類では、発生パターンが多様な欠陥において高精度かつ安定した分類が困難であり、製造現場で検査員が目視による分類を行っている。このような特徴量による分類が困難な欠陥に対して、CNN（Convolutional Neural Network）による分類を適用させる処理フローとし、2種類の欠陥において提案手法の分類精度を検証した。その結果、目視による分類と同等レベルの性能が確認できたため、ここに紹介する。

The Improvement of Defect Classification of Web Inspection System by AI Technology

HAZEYAMA Hiroyuki

In recent years, labor force issues have become more serious such as “declining labor force” or “reduce of skilled workers” at manufacturing sites. And the factory automation necessity continues to increase as its countermeasure.

In this paper, I propose a technique for defect classification using AI technology, based on confirmation the performance improvement compared with the conventional method. The conventional method in sheet inspection system is measuring the feature values (width / length / area of defect pixels, total value / maximum value / average value of defect pixels, etc.) from the defect image, and classify the defect by using the range of each feature value. However high accuracy and stable classification by feature value is difficult for defects in various patterns, and only visual classification by human was effective.

I expect my proposed method to reduce visual classification by human, and I hope the method will help to solve labor force problem.

1. まえがき

近年、製造現場における「労働人口の減少」、「熟練者の不足」といった社会的課題は深刻さを増しており、自動化ニーズは高まり続けている。シート製品の製造をしている高機能フィルム業界、製紙業界においても、検査員が目視作業をしている工程があり、作業にかかる工数や工程そのものを削減する取り組みが続けられている。

我々オムロン株式会社 検査システム事業部では、カメ

ラを利用した検査装置を販売しており、基板実装後のはんだ接合部や部品を検査する基板外観検査装置（AOI）¹⁾ や、X線を利用した高速CT型X線基板検査装置¹⁾、二次電池やディスプレイに用いられる高機能フィルムや段ボール等の無地シートの表面欠陥を高速・高精度で検査するシート検査装置²⁾を取り扱っている。オムロン株式会社の検査装置ラインアップを図1に示す。

Contact : HAZEYAMA Hiroyuki hiroyuki.hazeyama@omron.com



基板外観検査装置 CT型X線基板検査装置



図1 オムロンの検査装置ラインアップ

この技術により、検査対象シートの正常領域（地合）と異常領域（欠陥）を検出し、更に検出した欠陥の特徴量を算出して分類することでシート製品の検査を行っている。特徴量とは、画像から欠陥の特徴を表す情報を抽出して数値化したものである。我々のシート検査装置で利用している特徴量の代表例を図3に示す。

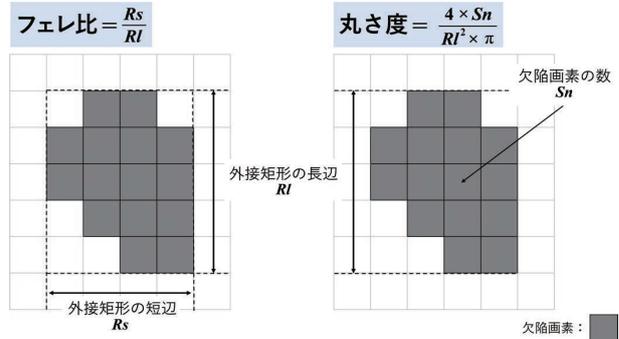


図3 特徴量の代表例

本稿ではシート製品の製造現場における前述の社会的課題の解決を目的とし、様々な画像解析の分野において成果を上げているAI技術（Deep Learning）を活用した分類手法を提案する。

2. 従来手法と課題

2.1 従来手法

我々のシート検査装置では、検出したい欠陥の特徴に応じて、可視光・近赤外など複数の光源から最適な波長を選択し、システムに実装する。そして、ラインカメラを用いて撮像を行い、独自のアルゴリズムを駆使することで高い検出力と高度な判別性能を実現する「マルチウェーブセンシング技術」を強みとしている。マルチウェーブセンシング技術の概要を図2に示す。

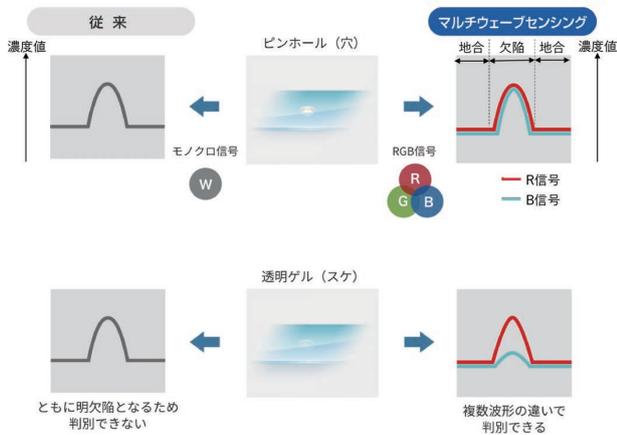


図2 マルチウェーブセンシング技術

検出した欠陥を特徴量によって分類し、欠陥ごとの発生数を集計する。欠陥ごとの発生数は、製品の出荷可否判断や出荷品の格付けに使用されるため、欠陥を精度良く分類することは極めて重要である。欠陥の分類に誤りがあれば、出荷不可の製品が市場に誤って出荷されたり、その逆で出荷可能な製品が誤って廃棄処分されたり、また高値で出荷されるはずだったA級品が安値のB級品で出荷されたり、と多大な不利益を被ることとなる。

2.2 従来手法における課題

従来手法である特徴量を使った分類は、数値化されたデータによる論理的な分類ロジックであり、分類の根拠が明確であることが長所として挙げられる。

特徴量による分類が有効な欠陥の例としては「穴欠陥」がある。「穴欠陥」とは、文字通りシートに穴が空いてしまった状態の欠陥で、透過光源を使って検出する。透過光源下では、穴の画素値がおよそ255（8bitカメラの場合）となるため、安定した分類が可能である。

一方、分類が困難な欠陥の例としては「虫欠陥」と「水滴欠陥」がある。

「虫欠陥」とは、シート製品の表面に虫が付着した状態の欠陥である。シート検査装置で撮像した「虫欠陥」の画像を図4に示す。

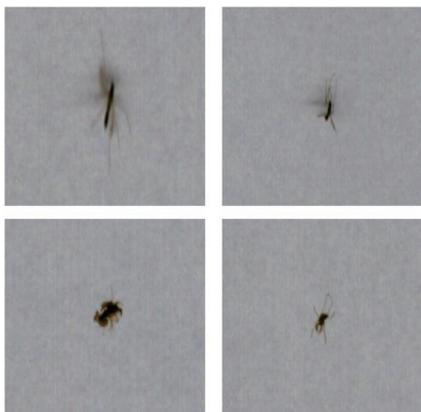


図 4 虫欠陥の画像

虫の種類によって、欠陥画素の形状や大きさが変わったり、シートに付着した時の虫の潰れ方によって欠陥画素の色合いが変化したり、発生パターンが多様であるのが「虫欠陥」の特徴である。

次に「水滴欠陥」とは、シート製造途中の乾燥工程内で結露した水滴が落下して発生する欠陥で、ユーザー使用時に外観不良・印刷不良の要因になる欠陥である。シート検査装置で撮像した「水滴欠陥」の画像を図 5 に示す。

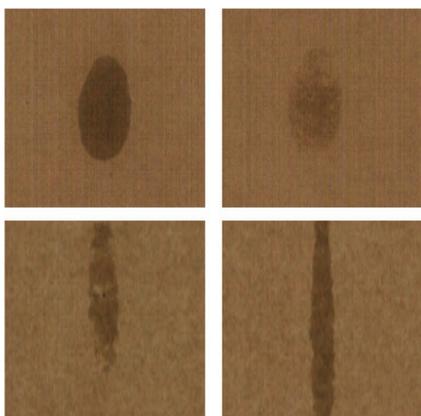


図 5 水滴欠陥の画像

水滴落下時の製造ライン速度によって欠陥画素の形状が変わったり、落ちた水滴の量によって欠陥画素の色合いが変化したり、「虫欠陥」と同じく発生パターンが多様であるのが特徴である。

発生パターンが多様な欠陥を分類するには、使用する特徴量の数が増えてしまうことが多く、分類ロジック（論理式）も複雑になりがちである。また時間をかけて分類ロジックを設定したとしても、新たな発生パターンが見つかった場合は設定した複雑な分類ロジックを慎重に修正しなければならない。

我々の顧客の製造現場においても、発生パターンが多様

な欠陥の分類は検査装置ではなく、検査員が目視作業で行っているケースが多く存在した。また製造中に目視検査をする時間的な余裕がない現場においては、製造完了した翌日に目視検査を実施しており、目視検査の結果によって製品の出荷可否や格付けが後から変わる場合があった。後から製品の出荷可否や格付けが変わると、製品の保管場所を移動したり、製品ラベルの修正をしたり、在庫システム上の個数を修正したり、合わせて4～5時間/日の作業が発生しているケースも存在した。

3. 提案する解決手段

前章に記載した特徴量による分類が困難な欠陥に対して、CNN (Convolutional Neural Network) による分類を適用する。CNN は 2012 年の画像認識競技会 ILSVRC (ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge) で AlexNet と呼ばれるモデルが 2 位以下に圧倒的な大差を付けて勝利したことから研究が盛んとなり、画像分類の手段として注目されるようになった³⁾。また外観検査を行っている製造ラインにおいて CNN が欠陥の検出に適した技術であるという事例⁴⁾があり、欠陥の分類においても CNN による解決が期待できると考えた。

本稿で提案する検査装置の処理フローを図 6 に示す。

CNN は教師あり学習であるため、教師画像の準備が製造現場の負担となってしまう。よって、現場導入には負担を最小化することが必要条件であった。その工夫として、先に「特徴量による分類」を行ってから「CNN による分類」の対象欠陥を絞ることとした。具体的には、特徴量で安定した分類が可能な欠陥の画像と、製造ラインで欠陥として扱われない欠陥画素の幅/長さ/面積が一定値以下の極小欠陥の画像を CNN の対象外とした。これにより、数千枚程度の少ない教師画像でも顧客の要求する高い分類性能を達成できるとの仮説を立てた。

また CNN の対象欠陥を絞ることによって、欠陥の分類基準のブラックボックス化を最小限にできる効果もことから、図 6 の処理フローが現場への様々な導入障壁をクリアする最適解の一つであると考えた。

4. 性能検証

4.1 検証方法

提案手法の性能を確かめるために、特徴量分類が困難であった「虫欠陥」と「水滴欠陥」の画像データを顧客の現場から抽出して検証を行った。分類性能の検証のため、検証対象の欠陥画像とそれ以外の欠陥画像をそれぞれ用意した。抽出した教師画像の枚数と、性能検証に使用した評価画像の枚数を表 1 に示す。

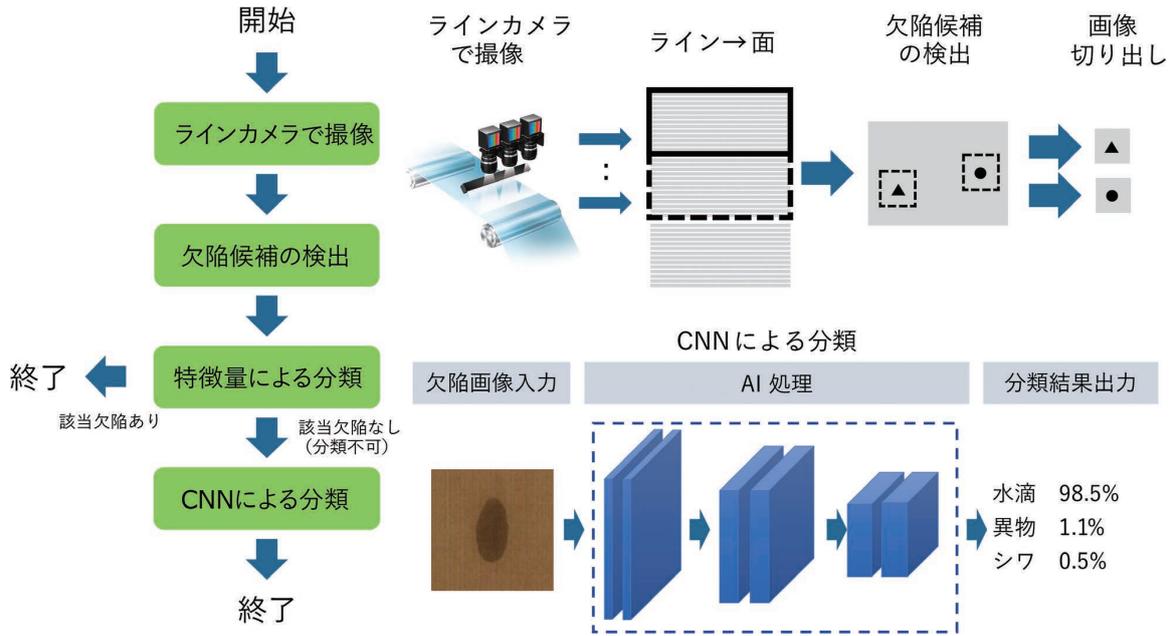


図6 シート検査装置の処理フロー（撮像～分類）

表1 検証に用いた画像データ

検証対象		教師画像数	評価画像数
虫	虫	282	32
	虫以外	2111	7357
水滴	水滴	1357	118
	水滴以外	6306	2100

表2 検証結果

検証対象	見逃し率	見過ぎ率
虫	0.00% (0/32)	0.10% (7/7357)
水滴	0.00% (0/118)	0.24% (5/2100)

なお本検証では、検出した欠陥候補を中心に 256pix×256pix のサイズで画像を切り出し、ResNet と呼ばれるモデルで CNN の学習を行った。また「虫欠陥」が発生するシート製品および製造工場と、「水滴欠陥」が発生するシート製品および製造工場が異なるため、CNN の学習は「虫欠陥」と「水滴欠陥」のそれぞれで行い、2種類の CNN を作成した。

4.2 検証結果

評価画像に対して行った検証結果を表2に示す。表中の見逃し率および見過ぎ率の算出式について、「虫欠陥」を例として説明する。見逃し率は、虫欠陥の評価画像を虫欠陥以外に誤分類した割合である。虫欠陥の評価画像32枚を分母に、虫欠陥以外に誤分類した数を分子にして算出を行った。見過ぎ率は、虫欠陥以外の評価画像を虫欠陥に誤分類した割合である。虫欠陥以外の評価画像7357枚を分母に、虫欠陥に誤分類した数を分子にして算出を行った。また表中の値は、小数第3位を四捨五入し、小数第2位までを記載している。

性能の比較対象となる従来手法での見逃し率および見過ぎ率については、顧客ごとに多少ばらつきはあるが、特徴量による分類が困難な欠陥を検査員が目視作業で分類しているケースを想定し、見逃し率を0%、見過ぎ率を1%以下と設定した。欠陥の市場流出を防止するため、欠陥の可能性がある場合は欠陥と判断するように検査員に指示して、見過ぎを一定割合許容しているのが一般的である。表2の検証結果より、用意した評価画像においては、提案手法の見逃し率および見過ぎ率が従来手法の見逃し率および見過ぎ率と同等レベルであることが確認できた。

また、ブラックボックスである AI 処理の妥当性確認を CNN の中間層からヒートマップ画像⁵⁾を生成して行った。「水滴欠陥」で生成したヒートマップ画像を図7に示す。

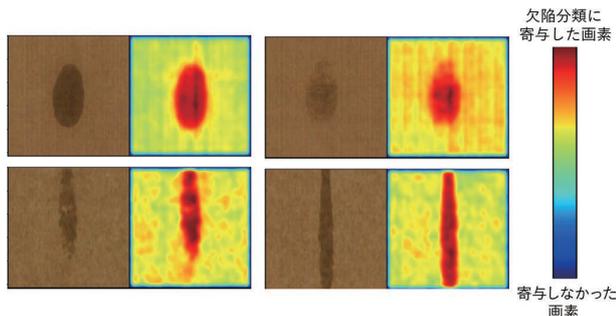


図7 水滴欠陥のヒートマップ画像

水滴の形状、色合いが異なる複数パターンで確認を行ったところ、欠陥画素が分類結果に大きく寄与していることを確認できた。また地合箇所についても、シートの状態で多少のばらつきはあるものの、欠陥画素と比較して低い寄与であることが合わせて確認できた。水滴の評価画像 118 枚でヒートマップ画像を生成して同様の確認を行ったが全ての画像で同様の結果が得られ、安定した分類が期待できる結果となった。

発生パターンが多様な欠陥において安定した分類ができると製造後の目視検査および製品の出荷可否や格付けが変わることもなくなるため、従来手法において現場で発生していた 4～5 時間/日の作業もなくなることが期待できる。

5. むすび

本稿では、特徴量を使った従来の分類手法では困難であった欠陥に対して AI 技術による分類手法の提案を行い、「虫欠陥」と「水滴欠陥」において目視による分類と同等レベルの性能が確認できた。

シート検査装置の欠陥分類性能が向上することで、製造現場における「労働人口の減少」、「熟練者の不足」といった社会的課題の解消や、出荷製品の品質確保が期待できる。またシート検査装置は製造工程の最終工程に位置づけられるため、正確な欠陥の発生情報は工程改善や予兆保全で利用する等の波及効果も期待できる。

今後の展望としては、検査データの可視化による品質情報提供サービスである「MONOSASHi」との連携を強め、分類性能向上だけで終わらず、欠陥の発生情報を含む検査装置から得られる全ての情報を DB で時系列に一元管理し、現場が必要とする情報に加工して見える化を行うことで製造現場の改善を推進する。実現イメージを図 8 に示す。

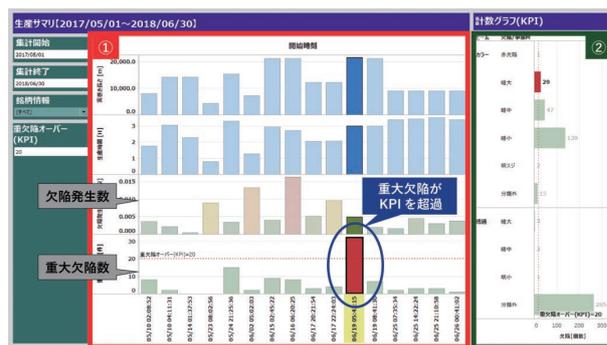


図8 MONOSASHi を使った 4M 変動監視事例

また性能面では可視光画像だけでは分類できない欠陥にも対応するため、近赤外など可視光以外の波長画像の入力拡張を行い、自社の強みであるマルチウェーブセンシング技術の更なる進化を検討している。

最後に、提案手法の検討に多大なご協力をいただいた技術本部の方々、性能検証の画像データのご提供および検証にご協力いただいた製造現場の方々に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) オムロン株式会社. “基板検査装置”. <https://www.fa.omron.co.jp/product/special/pcb-inspection-system/>, (参照 2022-03-10).
- 2) オムロン株式会社. “シート検査装置”. <https://www.fa.omron.co.jp/product/inspection-system/web-inspection-system/>, (参照 2022-03-10).
- 3) Krizhevsky, A.; Sutskever, I.; Hinton, G. E. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2012, Vol.25, p.1097–1105.
- 4) 半澤雄希, 池田泰之, 栗田真嗣, 長谷川友紀. AI 技術による外観検査の自動化. *OMRON TECHNICS*. 2019, Vol.51, No.1, p.21–25.
- 5) Chen, L.; Chen, J.; Hajimirsadeghi, H.; Mori, G. “Adapting Grad-CAM for Embedding Networks”. *IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, 2020, p.2783–2792.

執筆者紹介



栢山 博幸 HAZEYAMA Hiroyuki
 インダストリアルオートメーションビジネス
 カンパニー
 検査システム事業部 AWI 事業推進部
 専門：画像処理

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

制御プログラム解析とデータ解析の統合による製品不良の要因特定手法の提案

川ノ上 真輔, 太田 雄也, 須田 啓司

近年はIoTの普及に伴い、Factory Automation (FA) 領域の製造現場において、センシングデータや制御データを収集して、製品不良の要因を解析する事例が増加している。しかしながら、FA 製造現場で収集される制御データは、複数工程が同期制御されるため、ある制御データが別の制御データに連動して変化することになり、結果として独立性が低くなるという特徴がある。このため、従来手法では、多くの要因候補が選択されてしまい、真因にはたどり着けない場合がある。

本稿では、プログラムの依存関係を抽出するプログラムスライシング技術を適用し、複数工程処理と同期制御の情報を持つプログラマブルロジックコントローラ (PLC) の制御プログラムから知識情報を抽出してデータ解析に統合することで、制御データと制御プログラムから製品不良の要因を特定する手法を提案する。また、従来手法では要因特定出来なかった事象について、実験用包装機を用いて、提案手法が有効であることを確認した。

A Proposal for a Causal Analysis Method for Product Defect by Integrating Control Program Analysis and Data Analysis

KAWANOUE Shinsuke, OTA Yuya and SUDA Keishi

In recent years with the trend toward IoT, there has been an increase in cases of causal analysis for product defects in the Factory Automation (FA) field. However, a conventional method is not effective because the collected data has low independence by multiple processes and synchronous control.

To solve the issue, we focus on a PLC control program that has information of them. In this paper, we propose a method to integrate knowledge from the PLC control program by applying a program slicing technique into data analysis. In addition, we show the method is effective for cases that do not work by the conventional one with an automatic packaging machine.

1. まえがき

近年はIoT (Internet of Things) の普及に伴い、FA 領域の製造現場において、センシングデータや制御データを収集して、製品不良の要因を解析する事例が増加している^{1,2)}。しかしながら、品質管理分野で特性要因図³⁾を用いてドメイン知識情報を整理しているように、収集したデータの解析だけでは適切な要因を特定するのは難しい。

従来は、1つのアプローチとして、不良やトラブルが発生した場合に決定木の重要度による要因解析を行うという方法が効果的とされていた^{4,5)}。しかし、制御データから決定木の重要度を算出しただけでは、多くの要因候補が選

択されてしまい、真因にはたどり着けないケースが存在する。これは、データのみでは複数工程のデータが同期されており、確率論的独立性が低くなるためである。

FA 領域では、稼働率・性能・品質から算出される設備総合効率⁶⁾を向上させるために、主に物理的な組み立て・加工などを行うプロセスを自動化し、高生産能力と高品質な生産を高稼働率で運用する。よって、FA 制御技術は、高生産能力を目的とした複数工程の並列化と高品質を目的とした高精度な同期制御等の特徴とする。この結果、製造現場で収集される制御データは、複数工程が同期制御されるために独立性が低いという特徴がある。

本稿は、複数工程処理と同期制御の情報を持つ PLC の制御プログラムに着目し、制御プログラムから知識情報を

Contact : KAWANOUE Shinsuke shinsuke.kawanoue@omron.com

抽出して、データ解析に統合することを提案する。提案手法では、プログラムスライシング技術を適用し、PLC制御プログラムから生成された変数依存グラフと、制御データから生成された構造変化グラフを合成することによって、制御データの独立性を高めることで要因推定の精度を向上させる。また、提案手法により、従来手法では要因特定できなかつた事象について、実験用包装機を用いて実証する。

2. 従来手法とその課題

本章では、制御システムにおいて複数工程が同期するために制御データの確率的独立性が低い課題について、本稿の対象システムである包装機の振る舞いを用いて説明する。

2.1 対象システム

対象システムとなる実験用包装機について、図1に紹介する。

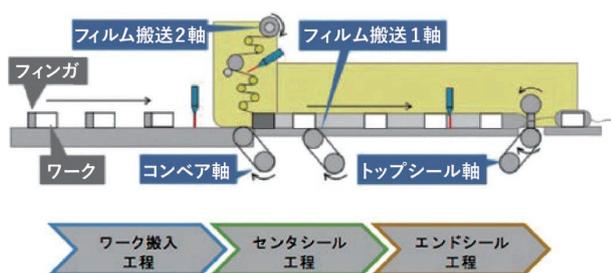


図1 包装機のシステム構成

本稿で取り扱う包装機は、樹脂製フィルムによって製品を包装する横型ピロー包装機である。PLCは4つのサーボモータの同期制御を行うことで包装を自動化している。本包装機では、フィンガによってワークを送り出すワーク搬入工程、センターシール工程、エンドシール工程の3工程を経ることでワークを枕状に包装する。4つのサーボモータは、ワーク搬入を担うコンベア軸と、センターシール工程を担うフィルム搬送1軸、フィルム搬送2軸、エンドシール工程を担うトップシール軸として制御され、それぞれのトルク・速度・位置信号は制御データとして収集される。なお、これらの制御データから製品不良の要因を解析することにより、センサ追加が不要になるメリットがある。

2.2 従来手法

従来の要因特定手法は以下のステップから構成される。

1. 制御データから特徴量を算出する。
2. すべての特徴量から決定木の重要度を算出する。

3. 重要度の高い特徴量に該当する状態を要因として特定する。

まず、制御データから特徴量を算出する概念を図2に示す。

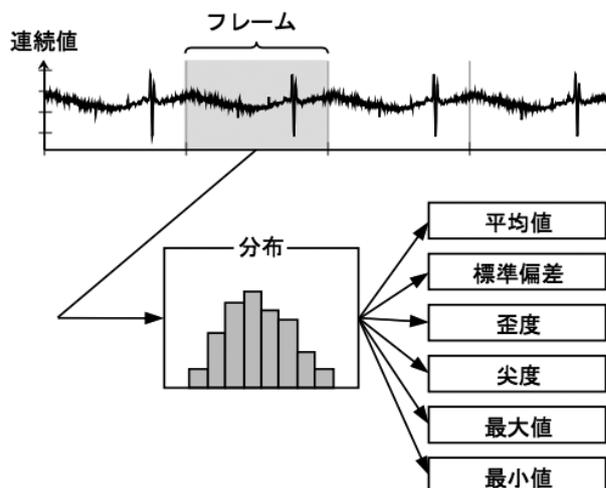


図2 特徴量算出の概念図

ここでは、収集した制御データをフレームと呼ぶ製造の周期単位で区切り、平均値や標準偏差などの複数の統計量の特徴量として算出する。前述の包装機の例では、ワークを包装する単位がフレームとなる。

次に、すべての特徴量の重要度を算出し、重要度の高い特徴量を選択する。この特徴量に該当する状態を要因として特定していた。決定木は、木構造を用いて分類や回帰を行う機械学習の手法の一つである。ここで使用する重要度は、各特徴量で正常と異常を判別したときの判別前後のGini係数の減少量であり、値が大きいほど正常・異常を判別する変数として適していることを表す。

2.3 従来手法の課題

従来手法で使用される特徴量データの散布図の一例を図3に示す。

この散布図は、4つのサーボモータの制御データから算出した特徴量であるトルク平均値について、正常に包装したものと、疑似異常としてコンベア軸に外乱を与えたものの関係性を表す。本包装機は複数工程が同期されているため、ワーク搬入工程のコンベア軸に与えられた外乱が、後工程の各サーボモータのトルクに反映されている。特にフィルム搬送軸1とトップシール軸はコンベア軸との相関係数がそれぞれ0.75、0.79と高い関係性を示している。これはPLCが高精度な同期制御を行っているために、制御データ間の独立性が低くなることを示している。

これらの特徴量について、決定木の重要度を算出し、要因特定を試みた結果を表1に示す。

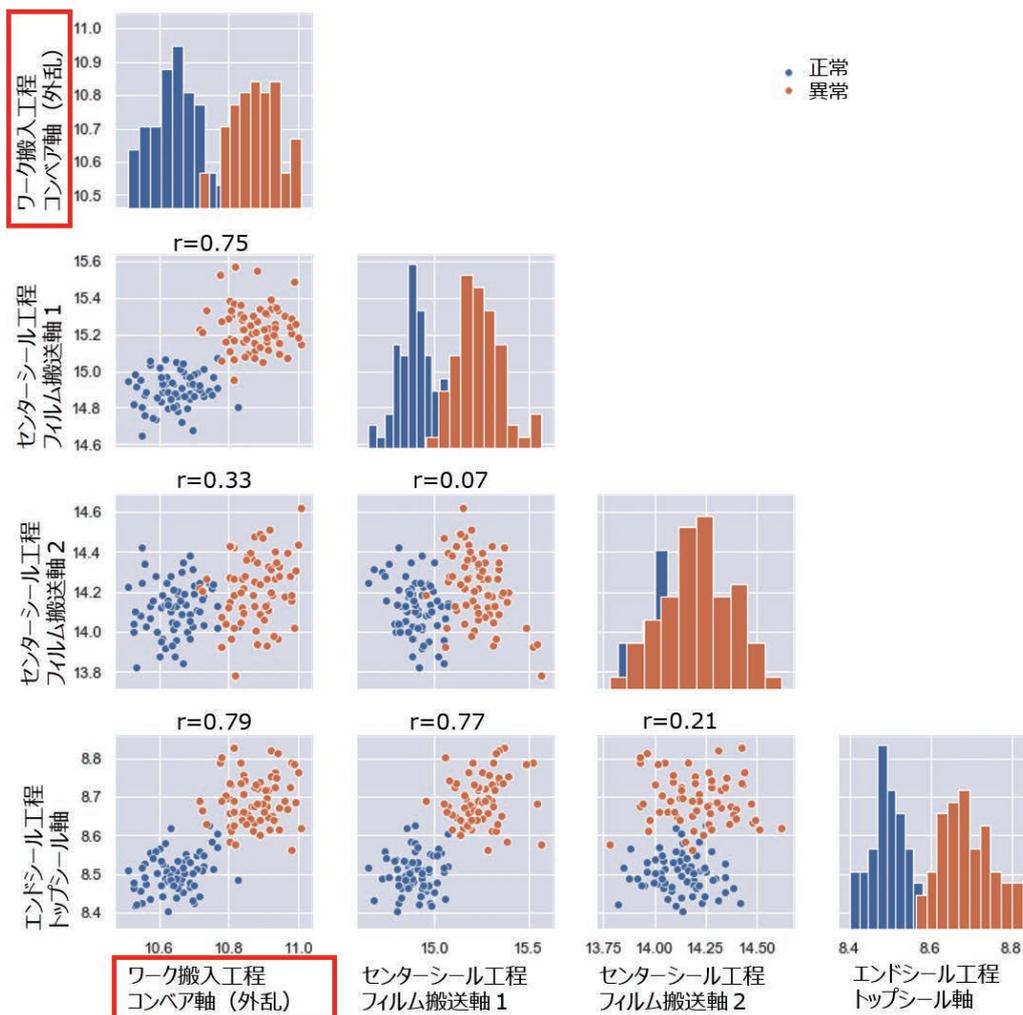


図3 包装机で得られる特徴量データの散布図 (特徴量: トルク平均値、r: 相関係数)

表1 従来手法である決定木重要度の結果

特徴量	重要度 (順位)
トップシール軸 トルク 最小値	0.129 (1)
トップシール軸 位置 最小値	0.126 (2)
トップシール軸 トルク 最大値	0.112 (3)
コンベア軸 トルク 平均	0.074 (7)

ここでは、決定木のアルゴリズムとして RandomForest を使用し、重要度の高い3つの特徴量と本来の要因を示す特徴量の重要度を記載している。この例では、コンベア軸の外乱はコンベア軸トルクに現れることが想定され、重要度は48種類の特徴量の中で7番目となっている。比較的高い値を示しているが、後工程のトップシール軸の特徴量の重要度の方が高くなっており、正しく要因を特定出来ない。これは独立性の低いデータを含む制御データ群から算出された決定木重要度は、要因特定に適さないことを示している。

3. 提案手法

3.1 提案手法の概要

本稿では、独立性の低いデータを分離するアプローチとして、PLC制御プログラムから工程と同期制御の情報を持つ制御フローを抽出し、制御データの関係性を制御フローに合成することでデータの独立性を高めて、上流工程の要因を特定する。提案手法は以下のステップから構成される。

1. 制御プログラム解析 (プログラムスライシング) により、制御フローを抽出し、変数依存関係を作成する。
2. 変数依存関係を元に、変数依存グラフを作成する。
3. 制御データの関係性を示す構造変化グラフを作成する。
4. 変数依存グラフと構造変化グラフを合成し、要因特定のためのグラフ (要因特定グラフ) を作成する。

以降、3.2節で変数依存関係を生成するためのプログラムスライシング技術、3.3節でPLC制御プログラムにおける変数依存グラフの生成方法、3.4節で構造変化グラフの生成方法、3.5節で要因特定グラフの生成方法を説明する。

3.2 プログラムスライシング

プログラムスライシングは、プログラムコードから変換された制御フローグラフに対して、制御依存解析とデータ依存解析を組み合わせることで、プログラム内の任意の文の変数に影響を与えるコードのみを抽出する技術⁷⁾である。

制御依存解析は、条件分岐などによって生じる「ある文の実行結果が、別の文が実行されるか否かを左右している」関係を抽出するもので、データ依存解析は、「ある文で定義されたデータがどの文で利用されているかを示す」関係図を得るための手法である。この2つの解析から、ある変数に注目した時、対応する頂点から依存関係を遡っていけば、その変数に関連する文のみを抽出し、影響する変数を特定することができる。

プログラムスライシングによる依存関係抽出には、着目する変数に影響を与える変数を抽出するための後ろ向きスライシングと、着目する変数が影響を与える変数を抽出するための前向きスライシングが存在する。

図4のサンプルプログラムから抽出した制御フローグラフにおいて、図5と図6に後ろ向きスライシングと前向きスライシングを適用した例を示す。

```

i := 0;
WHILE i < n DO;
  i := i + 1;
  sum := sum + 1;
  prod := i;
END_WHILE;

push1(sum);
push2(prod);
    
```

図4 サンプルプログラム

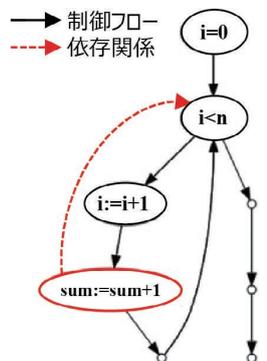


図5 後ろ向きスライシング

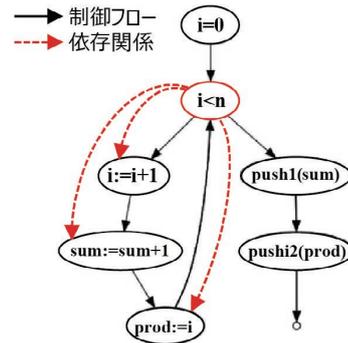


図6 前向きスライシング

後ろ向きスライシングの結果、sumに影響を与える変数はnとiであり、前向きスライシングの結果、nに影響を与える変数はi、sum、prodであることが分かる。変数の依存関係は、

$$Dep(var1, var2) \tag{1}$$

のように表され、var1がvar2に影響を与えるときは1、影響を与えないときは0となる。

3.3 変数依存グラフ

本節では、プログラムスライシングをPLC制御プログラムに適用し、それぞれの変数依存関係から変数依存グラフを生成する手法を説明する。

本稿で扱うPLC制御プログラムは、PLCのプログラミング言語の国際規格であるIEC 61131-3⁸⁾を対象とする。IEC 61131-3では、PROGRAM、内部状態の存在するFB(ファンクションブロック)、内部状態の存在しないFUN(ファンクション)の3種類の機能が定義されている。これらは工程や機能毎にプログラムを構造化し、プログラムの可読性向上や再利用を促進することを意図している。

図7に、PLC制御プログラム振る舞いの例を示す。また、図7のプログラムについて、デバイスに割り付けられた変数(デバイス変数)の関係を表す変数依存グラフの例を図8に示す。

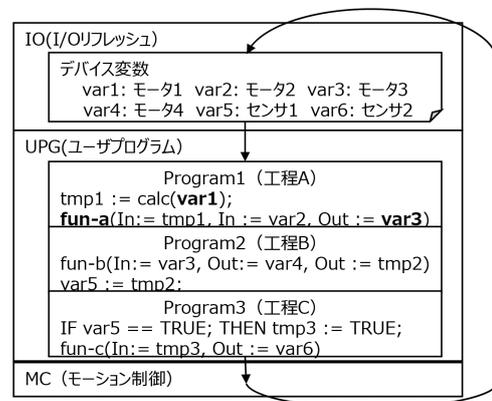


図7 PLC制御プログラム振る舞い

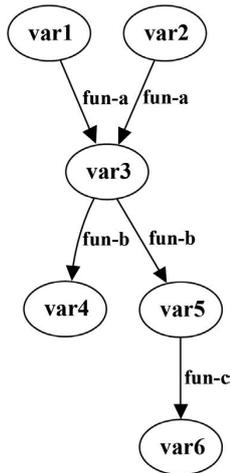


図8 変数依存グラフ

PLCは、I/Oリフレッシュ（データ入出力）、ユーザプログラム実行（UPG）、モーション制御（MC）の処理を厳密な時間間隔で実行することで、高精度な制御を実現している。センサやモータなどのアクチュエータはデバイス変数としてI/Oリフレッシュで更新される。ユーザプログラムは、それぞれの工程や機能に応じて、デバイス変数を入力としてプログラムを実行する。

提案手法では、外部環境の変化を表しているデバイス変数に着目して、前向きスライシングを行うことで、変数間の依存関係を構築する。この依存関係に、各工程で具体的な処理を行うFBとFUNへの入出力情報を追加することにより、変数依存グラフを生成する。図7のProgram1において、変数var1が中間変数であるtmp1を介してfun-aに入力され、fun-aがvar3を出力することが、図8の変数依存グラフにも表されている。なお、fun-aにおいて、Inは入力変数、Outは出力変数を示す仮引数である。

図8に示すデバイス変数を $X_N = \{var1, var2, \dots, var6\} = \{X_0, X_1, \dots, X_{N-1}\}$, $N=6$ として、変数依存グラフは、隣接行列を用いて式(2)で表される。

$$A_{dep}(X_N) = \begin{pmatrix} Dep(X_0, X_0) & \dots & Dep(X_0, X_{N-1}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Dep(X_{N-1}, X_0) & \dots & Dep(X_{N-1}, X_{N-1}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

隣接行列は各変数を頂点とした正方行列として表現される。 $Dep(X_i, X_j)$ は式(1)で示した変数間の依存関係となり、変数依存グラフは有向グラフとして表現される。

3.4 構造変化グラフ

変数依存グラフに合成することを目的とした制御データ関係性の表現は、単純な構造変化検知問題⁹⁾として、正常（良品）と異常（不良品）の相関行列の差で算出するアプローチが考えられる。一般的な相関行列で 사용되는ピアソンの積率相関係数は正規分布を仮定しているため、本稿では図2に示すような時系列の制御データ間の依存度表現に適した相互情報量を使用する。相互情報量は式(3)で表される。

$$I(X_i, X_j) = \sum_{x_i \in X_i} \sum_{x_j \in X_j} p(x_i, x_j) \log \frac{p(x_i, x_j)}{p(x_i)p(x_j)} \quad (3)$$

X_i, X_j は、製品1個を包装する区間で区切った制御データのペアである。相互情報量の算出方法としては、入力されたデータ空間をランダムなグリッドに区切り、相互情報量が最大となるグリッドを探索するMIC (Maximal Information Coefficient)¹⁰⁾を使用する。

すべての制御データ間で算出される相互情報量行列 $A_{mic}(X_N)$ は式(4)で表される。

$$A_{mic}(X_N) = \begin{pmatrix} I(X_0, X_0) & \dots & I(X_0, X_{N-1}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I(X_{N-1}, X_0) & \dots & I(X_{N-1}, X_{N-1}) \end{pmatrix} \quad (4)$$

表2と表3に正常データと異常データそれぞれの相互情報量行列の例を示す。

表2 正常データの相互情報量行列

	var1	var2	var3	var4	var5	var6
var1	1.00	0.86	0.00	0.00	0.00	0.00
var2	0.86	1.00	0.90	0.00	0.43	0.00
var3	0.00	0.90	1.00	0.00	0.92	0.00
var4	0.00	0.00	0.00	1.00	0.55	0.00
var5	0.00	0.43	0.92	0.55	1.00	0.75
var6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	1.00

表3 異常データの相互情報量行列

	var1	var2	var3	var4	var5	var6
var1	1.00	0.85	0.00	0.00	0.00	0.00
var2	0.85	1.00	0.80	0.00	0.31	0.00
var3	0.00	0.80	1.00	0.00	0.82	0.00
var4	0.00	0.00	0.00	1.00	0.66	0.00
var5	0.00	0.31	0.82	0.66	1.00	0.77
var6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.77	1.00

次に、正常データと異常データの相互情報量の差分は式(5)により算出される。

$$A_{mic_diff}(X_N) = |A_{mic_normal}(X_N) - A_{mic_anormal}(X_N)|$$

$$= \begin{pmatrix} 0.00 & 0.01 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.01 & 0.00 & 0.10 & 0.00 & 0.12 & 0.00 \\ 0.00 & 0.10 & 0.00 & 0.00 & 0.10 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.11 & 0.00 \\ 0.00 & 0.12 & 0.10 & 0.11 & 0.00 & 0.02 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.02 & 0.00 \end{pmatrix} \quad (5)$$

ここで、 $A_{mic_normal}(X_N)$ は正常データであり、 $A_{mic_anormal}(X_N)$ は異常データである。

最後に、構造変化グラフは式(6)から算出され、図9のように表される。

$$A_{diff}(X_N) = u(A_{mic_diff}(X_N) - A_{threshold}(X_N))$$

$$= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

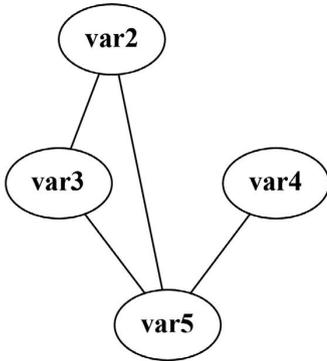


図9 構造変化グラフの例

差分のしきい値を $A_{threshold}(X_N) = 0.05$ として、ステップ関数 u で、しきい値を超える関係性のみを残すことにより、構造変化グラフが生成される。しきい値については、並べ替え検定で使用される5%水準と情報量の加法性から、相互情報量の差が0.05以上の場合に有意な差があるものとする¹¹⁾。なお、構造変化グラフは無向グラフであるため、対称行列として表現される。

3.5 要因特定グラフ

要因特定グラフは式(7)から算出され、図10のように表される。

$$A_{cause}(X_N) = A_{dep}(X_N) \circ A_{diff}(X_N)$$

$$= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

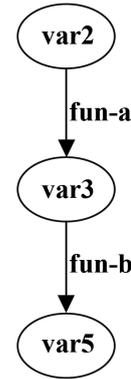


図10 要因特定グラフ

式(7)は行列成分毎の積であるアダマール積を用いている。

この例では、要因は var2 となり、fun-a を介して var3 に影響を与え、さらに var3 は fun-b を介して var5 に影響することを示している。構造変化グラフでは、var2 と var5 および var4 と var5 の関係性に变化が認められるが、変数依存グラフにおける関係は無いため、要因特定グラフとしては表現されないことになる。

4. 検証

本章では、2.1 節で示した実験用包装機を用いて、提案手法の有効性について検証した結果を述べる。

4.1 検証内容

包装機で発生する代表的な不良は包装不良であるが、その要因は様々である。本稿では提案手法の有効性を検証するために、従来手法では要因を特定できない2種類の包装不良について検証した。表4に、今回実験した包装不良の概要を示す。

表 4 包装不良事象の概要

不良事象	概要	要因 (該当する変数)
包装不良 1	フィンガが変形したことにより、ワークの位置がずれて包装不良が発生する。	ワーク位置ずれ (コンベア軸位置)
包装不良 2	フィルム搬送軸のローラが平行でないため、フィルムが蛇行して包装不良が発生する。	フィルム蛇行 (フィルム搬送軸 1 速度 フィルム搬送軸 2 速度)

包装不良 1 については、ワークを送り出すフィンガが変形したことによりワークの位置ずれによる包装不良が発生する。包装不良 2 については、フィルムが蛇行することにより包装不良が発生する事象となっており、それぞれで要因が異なっている。次に、要因特定に使用する収集データについて、表 5 に示す。

表 5 収集データの概要

対象 サーボモータ	対象変数	制御データ (単位)
フィルム搬送軸 1	FilmFeedMain	FilmFeedMain.Trq (%) FilmFeedMain.Vel (mm/s) FilmFeedMain.Pos (mm)
フィルム搬送軸 2	FilmFeedSub	FilmFeedSub.Trq (%) FilmFeedSub.Vel (mm/s) FilmFeedSub.Pos (mm)
コンベア軸	ProductFeed	ProductFeed.Trq (%) ProductFeed.Vel (mm/s) ProductFeed.Pos (mm)
トップシール軸	TopSeal	TopSeal.Trq (%) TopSeal.Vel (mm/s) TopSeal.Pos (mm)
仮想軸	VirtualMaster	無し

表 6 工程毎に整理した変数への影響

工程	FB	影響を与える変数	影響を受ける変数
ワーク搬入工程	FB_ProductFeeding	VirtualMaster (仮想軸)	ProductFeed (コンベア軸)
センターシール工程	FB_FilmFeed	VirtualMaster (仮想軸) ProductFeed (コンベア軸) FilmFeedMain (フィルム搬送軸 1) FilmFeedSub (フィルム搬送軸 2)	FilmFeedMain (フィルム搬送軸 1) FilmFeedSub (フィルム搬送軸 2)
エンドシール工程	FB_RotaryKnife	VirtualMaster (仮想軸) ProductFeed (コンベア軸)	TopSeal (トップシール軸)

この表では、包装機を構成するサーボモータに対して、制御プログラムの対象変数と収集される制御データに対応付けている。制御プログラムの対象変数には同期制御用の仮想軸を追加している。制御データは、PLCからの指令に追従してサーボモータを制御するサーボドライバのフィードバック値であるトルク (Trq)、速度 (Vel)、位置 (Pos) で構成される。なお、トルクは定格トルクを 100%としたときの比率で表される。各制御データの単位は異なるが、3.4 節で記した構造変化グラフを生成には MIC を使用しているため、正規化は不要となる。

4.2 検証結果

3.3 節に示した手法で生成された変数依存グラフを図 11 に示す。

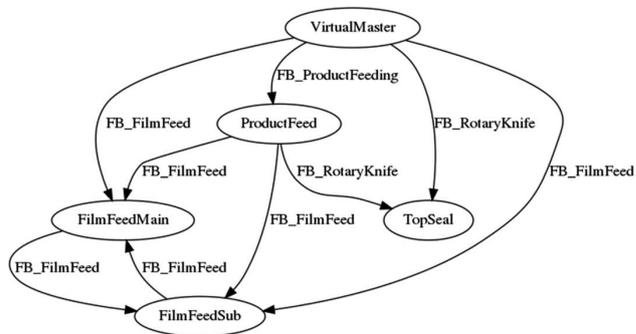


図 11 変数依存グラフ

表 6 は、変数依存グラフから各工程で実行される FB 別に影響する変数を対応付けしたものである。

センターシール工程においては、フィルム搬送軸 1 と 2 が互いに影響して関係性が巡回していることが分かる。

次に、良品状態の制御データについて、3.4 節によって算出された相互情報量行列を表 7 に示す。

FilmFeedMain、ProductFeed、TopSeal、FilmFeedSub の全ての位置 (Pos) が高い関係性 (0.95 以上) を示している。これは包装機がワーク搬送用 ProductFeed から位置を同期制御しているためである。この結果から、FilmFeedMain、ProductFeed、TopSeal、FilmFeedSub 全ての位置は、図 11

の変数依存グラフの上流である ProductFeed の位置に集約可能とする。

同様に、良品と包装不良 1 について、3.4 節に示された手法で算出された相互情報量行列の差分を表 8 に示す。

これらの結果から、しきい値を 0.32 として、構造変化グラフを生成したものを図 12 に示す。変数依存グラフと合成するために、トルクなどの要素はエッジ部に記載する表記としている。このグラフから、前述の通り位置情報を ProductFeed に集約して表示したものを図 13 に示す。

表 7 良品データから生成した相互情報量行列

		FilmFeedMain			ProductFeed			TopSeal			FilmFeedSub		
		Trq	Vel	Pos	Trq	Vel	Pos	Trq	Vel	Pos	Trq	Vel	Pos
FilmFeed Main	Trq	0.99	0.42	0.07	0.03	0.03	0.07	0.04	0.08	0.07	0.03	0.03	0.07
	Vel	0.42	0.99	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04
	Pos	0.07	0.04	0.99	0.07	0.03	0.96	0.61	0.90	0.96	0.10	0.05	0.96
Product Feed	Trq	0.03	0.03	0.07	1.00	0.41	0.08	0.05	0.05	0.07	0.03	0.03	0.07
	Vel	0.03	0.03	0.03	0.41	1.00	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03
	Pos	0.07	0.04	0.96	0.08	0.04	1.00	0.60	0.92	0.99	0.11	0.04	0.96
TopSeal	Trq	0.04	0.03	0.61	0.05	0.04	0.60	1.00	0.19	0.59	0.05	0.03	0.61
	Vel	0.08	0.04	0.90	0.05	0.03	0.92	0.19	0.99	0.97	0.11	0.05	0.90
	Pos	0.07	0.04	0.96	0.07	0.04	0.99	0.59	0.97	1.00	0.10	0.05	0.96
FilmFeed Sub	Trq	0.03	0.03	0.10	0.03	0.03	0.11	0.05	0.11	0.10	1.00	0.45	0.10
	Vel	0.03	0.03	0.05	0.03	0.03	0.04	0.03	0.05	0.05	0.45	0.99	0.05
	Pos	0.07	0.04	0.96	0.07	0.03	0.96	0.61	0.90	0.96	0.10	0.05	0.99

表 8 良品と包装不良 1 の相互情報量行列の差分

		FilmFeedMain			ProductFeed			TopSeal			FilmFeedSub		
		Trq	Vel	Pos	Trq	Vel	Pos	Trq	Vel	Pos	Trq	Vel	Pos
FilmFeed Main	Trq	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
	Vel	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Pos	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.37	0.12	0.00
Product Feed	Trq	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02
	Vel	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Pos	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.35	0.10	0.00
TopSeal	Trq	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.07	0.02	0.00
	Vel	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.20	0.07	0.01
	Pos	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.36	0.11	0.01
FilmFeed Sub	Trq	0.02	0.00	0.37	0.01	0.00	0.35	0.07	0.20	0.36	0.00	0.15	0.36
	Vel	0.00	0.00	0.12	0.01	0.00	0.10	0.02	0.07	0.11	0.15	0.00	0.11
	Pos	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.36	0.11	0.00

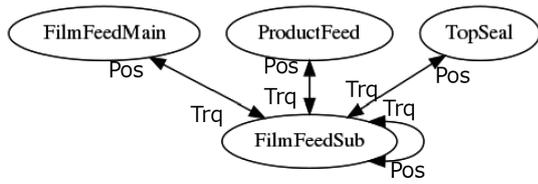


図 12 包装不良 1 の構造変化グラフ

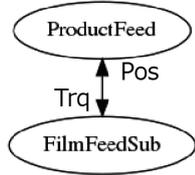


図 13 位置情報を集約した包装不良 1 の構造変化グラフ

最後に、3.5 節に示した手法で生成された要因特定グラフを図 14 に示す。

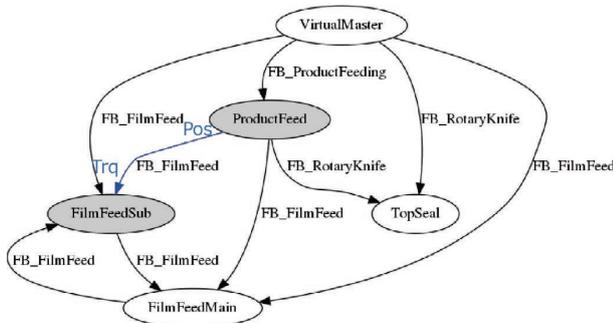


図 14 包装不良 1 の要因特定グラフ

この結果、ワーク搬送工程を賄う ProductFeed の位置情報が原因であるとし、要因であるコンベア軸位置と合致したことが分かる。

次に、同様の手法で生成された包装不良 2 に対する要因特定グラフを図 15 に示す。

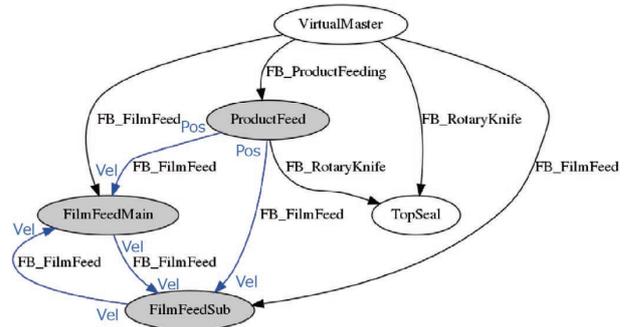


図 15 包装不良 2 の要因特定グラフ

要因候補として、ProductFeed の位置が FilmFeedMain/Sub の速度に影響を与えるものと、FilmFeedMain/Sub の速度の関係性の崩れの 2 要因が想定される。

この不良要因は、フィルムの蛇行であり、フィルム搬送軸 1 と 2 である FilmFeedMain/Sub の速度関係性の崩れは要因と合致している。提案手法の要因特定結果について、表 9 にまとめる。

これは、表 4 に示した不良内容と要因に、提案手法と従来手法による要因特定結果を追記したものである。

提案手法では、包装不良 1 については目論見通りの要因を特定し、包装不良 2 については要因候補を 2 つまで絞り込むことが出来た。従来手法では、2.3 節と同様に RandomForest の重要度により算出された上位 3 つの特徴量と、本来の要因に該当する特徴量の重要度を記載している。従来手法で特定された特徴量の重要度は、本来の要因の特徴量の重要度と比較して高い値となっており、要因特定としては適切ではないことが分かる。

表 9 提案手法の要因特定結果

不良内容	要因	提案手法による特定要因結果	従来手法による要因特定結果	重要度
包装不良 1	ワーク位置ずれ (コンベア軸位置)	コンベア軸位置	フィルム搬送軸 2 トルク (標準偏差)	0.154
			フィルム搬送軸 2 速度 (最大)	0.137
			トップシール軸トルク (最小)	0.081
			コンベア軸位置 (標準偏差)	0.007
包装不良 2	フィルム蛇行 (フィルム搬送軸 1 速度 フィルム搬送軸 2 速度)	コンベア軸位置 フィルム搬送軸 1、2 の速度の 関係崩れ	フィルム搬送軸 1 トルク (平均)	0.169
			トップシール軸トルク (最小)	0.123
			トップシール軸速度 (最小)	0.120
			フィルム搬送軸 1 速度 (平均)	0.016
			フィルム搬送軸 2 速度 (平均)	0.031

4.3 考察

本節では、変数依存グラフ、構造変化グラフを構成するための相互情報量行列、要因特定それぞれの妥当性について考察する。

変数依存グラフに関しては、目論見通り工程の情報を抽出して変数の関係性を表現することが出来た。良品のみの相互情報量行列については、サーボモータの位置同期制御が明確に表現されており、制御観点から納得性の高い結果が得られたと考える。

包装不良1については、ワーク搬入工程であるコンベア軸の位置情報を要因として、正しく特定することが出来た。包装不良2については、コンベア軸の位置情報とフィルム搬送軸1、2の速度関係性という要因特定候補を2種類まで絞り込むことが出来た。従来手法では後工程の要因が特定される傾向にあるが、提案手法では本来の要因を特定しており、要因特定としては有効であると考えられる。

なお、包装不良2について、1種類まで要因特定出来ずにコンベア軸の位置が選択された原因としては、データの関係性に着目しているため、エッジの片方のみに変化があると、もう片方も抽出されてしまうことが考えられる。今後はデータ関係性に特徴量重要度を加えるなどの改善を検討する必要がある。

また、本稿では、4つのサーボモータから構成される比較的小規模なシステムを対象としたが、製造ラインのスケールでは100程度のサーボモータから構成される大規模なシステムも対象として考えられる。提案手法では、大規模システムにおいても要因特定グラフの生成は可能ではあるものの、サーボモータ数が20程度を超える場合には要因特定グラフが複雑になり、解釈性に課題があるため、今後の検討事項とする。

5. むすび

本稿では、FA領域の製造現場で不良要因を特定する目的において、複数工程が同期する独立性が低いデータ課題に対して、プログラムスライシング技術を適用し、複数工程処理と同期制御の情報を持つPLC制御プログラムから知識情報を抽出してデータ解析に統合する手法を提案した。さらに、実験用包装機を対象とした有効性検証により、従来手法では特定できなかった要因についても有効性を示すことが出来た。さらに、提案手法はPLC制御プログラムからの知識情報を抽出するため、実プログラムを確認せずに実施可能となり、要因解析工数の削減にもつながる。

今後の展望としては、データの関係性の精度改善と大規模なシステムへの適用に加えて、対象とする制御プログラムを他社製PLCに適応させることや、設計資料などプログラム以外の情報から知識情報を抽出することにより、適用範囲を拡大させていきたい。

参考文献

- 1) 株式会社東芝. “要因解析技術 HMLasso”. 東芝 AI 技術カタログ. 2020-04-01. <https://www.global.toshiba/jp/technology/corporate/ai/catalog013.html>, (参照 2022-03-01).
- 2) 日本電気株式会社. “要因分析エンジンを用了工場・プラントでの品質管理”. NEC 技報. 2016-09. <https://jpn.nec.com/techrep/journal/g16/n01/160114.html>, (参照 2022-03-01).
- 3) 石川馨. 品質管理入門. 第3版, 日科技連出版社, 1989.
- 4) 鶴田浩輔, 峯本俊文, 広橋佑紀. マシンコントローラに搭載可能なAI技術の開発 (1). OMRON TECHNICS. 2018, Vol.50, No.1, p.6-11.
- 5) 宮本 幸太, 川ノ上 真輔. AI 搭載マシンオートメーションコントローラの開発 (3). OMRON TECHNICS. 2019, Vol.51, No.1, p.52-57.
- 6) Productivity Press Development Team. OEE for Operators: Overall Equipment Effectiveness. 1st ed., Productivity Press. 2018.
- 7) Binkley, D. W.; Gallagher, K. B. Program slicing. *Advances in Computers*. 1996, Vol.43, p.1-50.
- 8) オムロン株式会社. “PLC の国際標準プログラミング: IEC 61131-3 とは?”. Sysmac 統合プラットフォーム. <https://www.fa.omron.co.jp/product/special/sysmac/plcopen/feature1.html>, (参照 2022-03-01).
- 9) 井手剛, 杉山将. 異常検知と変化検知. 講談社, 2015, p.162.
- 10) Reshef, D. N. et al. Detecting Novel Associations in Large Data Sets. *Science*. 2011, Vol.334, No.6062, p.1518-1524.
- 11) 杉山将, 入江清, 友納正裕. 相互情報量を用いた機械学習とそのロボティクスへの応用. *日本ロボット学会誌*. 2015, Vol.33, No.2, p.86-91.

執筆者紹介



川ノ上 真輔 KAWANOUE Shinsuke
インダストリアルオートメーションビジネス
カンパニー
技術開発本部 第1技術部
専門：情報工学



太田 雄也 OTA Yuya
技術・知財本部
デジタルデザインセンタ
専門：情報工学



須田 啓司 SUDA Keishi
株式会社 NTT データ数理システム
数理工学部
専門：数理科学

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

リアルタイム処理可能な特徴量を用いた機械学習によるねじ締め底付き不良検知の事例

坂元 佑気, 中村 芳行, 杉岡 真行

近年、製造業における労働力不足が顕著となっており、人の作業を人工知能（以下、AI）に置き換えることが推進され、画像検査による異常検知などが利用されるようになってきた¹⁾。一方で、ねじ締めにおける軸力不足など外観上の違いが乏しく、画像検査の適用が困難な問題もある。そこで本稿では、作業者が手動でねじを締結物に締め付けるときの感触の違いを識別するように、自動ねじ締め機によるねじ締め動作中のACサーボシステムから収集されたデータにより、従来では検知困難だった「底付き」不良をリアルタイムに検知する手法を提案する。工場の生産ラインでは、ねじ締め不良発生時の無駄なねじ締め工程を無くしたいという需要があり、ねじ締めを行って次のねじ締めを行うまでにねじ締め不良を検知することが求められている。そのため、提案手法では、生産ラインでリアルタイムに不良検知が可能なオムロン製のAI搭載マシンオートメーションコントローラ²⁻⁵⁾（以下、AIコントローラ）を用いた。本提案手法が、特に異常検知が困難な0.04mm未満の底付き不良に対しても有効であることを実験結果により確認した。

A Case Study of Real-time Screw Tightening Anomaly Detection by Machine Learning Using Real-time Processable Features

SAKAMOTO Yuki, NAKAMURA Yoshiyuki and SUGIOKA Masayuki

The replacement of human work with AI has been promoted in recent years because the labor shortage in the manufacturing industry has become remarkable¹⁾. Especially anomaly detection by AI image inspection has come to be used. On the other hand, image inspection cannot detect abnormalities such as insufficient axial force in screw tightening due to the lack of difference in appearance. In this paper, we propose a method to detect screw tightening bottoming defects in real time as like workers feels the difference during tightening by using the data collected from the AC servo system during the operation. Anomalies should be detected in real time, at least until next work is started to reduce unnecessary process in factory. To achieve that, our proposed method uses Omron's AI machine automation controller²⁻⁵⁾. Experimental results show our proposed method is effective even for 0.04mm bottoming defects which are difficult to detect by conventional methods.

1. まえがき

近年、製造業における労働力不足が顕著となっており、Covid-19の流行によりさらに深刻化している。このため、人の作業をAI技術に置き換えることが世界的に推進されるようになった。AI技術の成功事例としては、画像認識が著名であり、製造業においては外観検査に活用されている¹⁾。

部品の取り付け漏れ、はんだ付け不良、傷、異物付着な

ど画像認識にて網羅できる不良は多いが、検知困難な不良もある。ねじ締めにおける軸力不足はその代表例である。軸力とは雄ねじの座面と締結物で被締結物を締め付ける力であり、これが規定値に達していなければねじ締め不良となる。ねじ締めの軸力不足は画像検査での正確な検知は難しく、また、ねじ締め後に非破壊で軸力を計測することも困難である。

熟練作業者によるねじ締めであれば、締結物に締め付けるときの「感触」の違いにより、締結物に正常に締め付けられたかどうかはある程度は識別可能であるが、人依存的

Contact : SAKAMOTO Yuki yuki.sakamoto.2@omron.com

品質ばらつきが生じてしまう。ねじ締め工程をロボットにより自動化し、「感触」の違いをセンシングできれば、労働力不足の解消だけでなく、人依存の品質ばらつきを抑えることが可能である。しかし、この異常の検知をどのようにAI技術に置き換えるかは課題である。従来手法として、ねじの回転を制御するトルクの値を用いるアイデアなどは提案されているが⁶⁻⁸⁾、検知できる不良モードが限定されており、いまだ技術は確立しているとは言えない。

本稿では、自動ねじ締め機によるねじ締め不良の検知を、外付けのセンサ等を用いずに、ねじ締め機を制御するプログラマブルロジックコントローラ（以下、PLC）自身により行う手法を提案する。AI技術のエンジン、オムロン社の商品であるAIコントローラ²⁻⁵⁾を用いた。提案手法が、特に異常検知が困難な底付き不良に対しても有効であることを実験結果により実証する。

2. ねじ締め機とねじ締め不良

2.1 ねじ締め機の構成

図1に本稿で想定する、一般的な自動ねじ締め機の構成を示す。主要な構成要素は以下である。

- ・ねじ締め制御ファンクションブロック（以下、ねじ締め制御FB）：ねじ締め制御を行うPLCプログラム
- ・ヒューマンマシンインタフェース（以下、HMI）：ねじ締め動作の設定を行うための表示機器
- ・PLC：ねじ締め制御FBによりねじ締め制御を行う制御装置
- ・ACサーボシステム：PLCからの指令に対して追従する、昇降軸（Z軸）と回転軸（R軸）を構成するサーボ機構
- ・メカ機構：ACサーボシステムを用いて、ねじ締め動作（回転動作）とねじ押し当て動作（下降動作）により、ねじ締め作業を自動化する機構

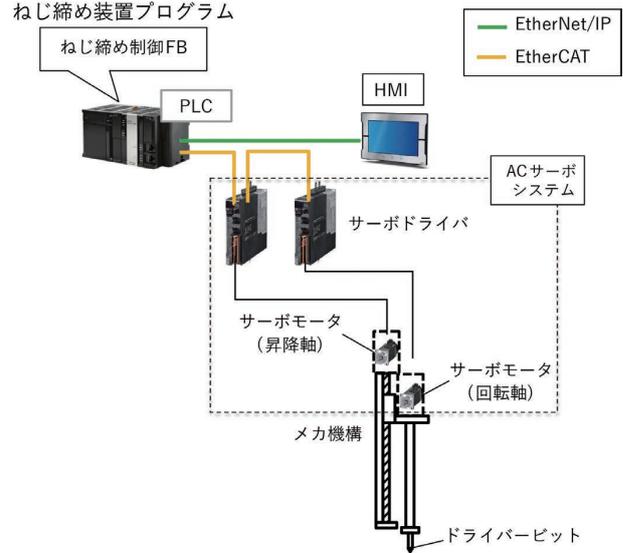


図1 ねじ締め機システム構成

2.2 ねじ締め制御

ねじ締め制御FBを使用したねじ締め制御について説明する。

ねじ締め制御FBは、図2に示すねじ締め制御ステップでねじ締め制御を行う。

- ・STEP 0（下降） Z軸をワーク上に位置決めする。
- ・STEP 1（仮着座） R軸を回転し仮締め目標トルクまで（雄ねじが着座するまで）ねじ締めする。
- ・STEP 2（本締め） R軸を本締め目標トルクまでねじ締めする。
- ・STEP 3（本締め保持） R軸を本締め目標トルクで保持する。
- ・STEP 4（解放） R軸のトルクを解放する。
- ・STEP 5（原点復帰） Z軸を原点復帰する。

2.3 ねじ締め不良

ねじ締め異常とは、ねじ締めが不完全であるため軸力が

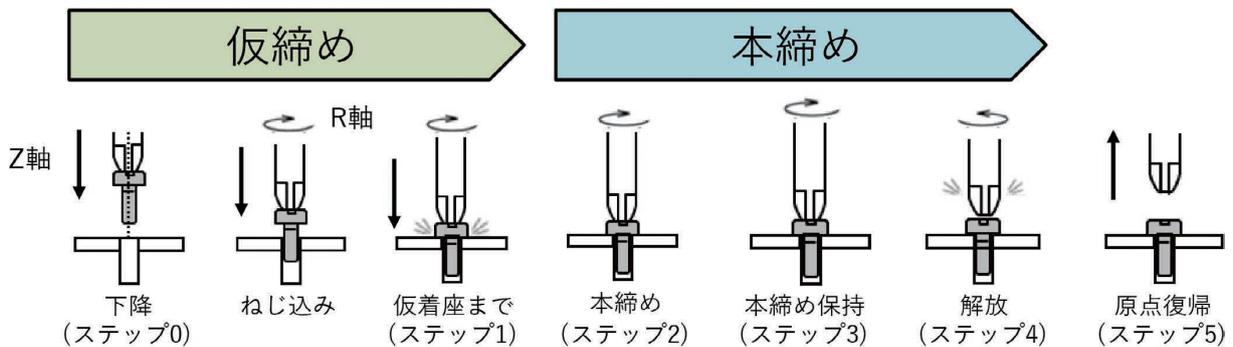


図2 ねじ締め制御ステップ

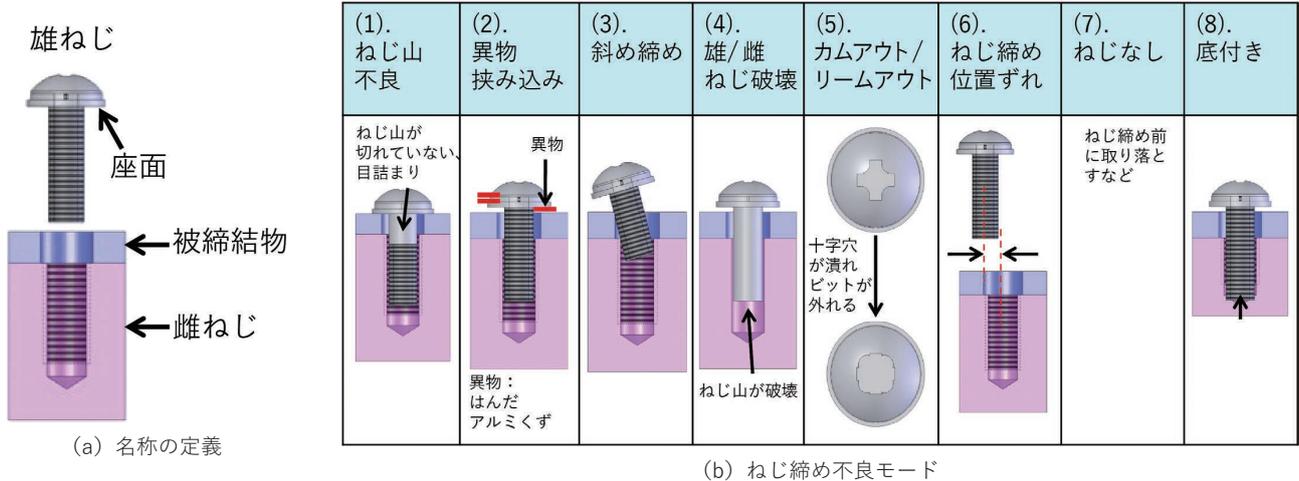


図3 ねじ締め不良モードの定義

出ていない状態である。

その要因は8種に大別できる。図3、表1に8種のねじ締め不良モードの定義と説明を示す。

表1 ねじ締め不良モードの説明

不良モード	説明	従来検知手法	
(1) ねじ山不良	ねじの山が切れていない、または、目詰まりした状態のねじを使用した不良である	R 軸回転負荷	
(2) 異物挟み込み	雄ねじの座面と被締結物の間に、はんだなどの異物を挟み込む不良である	R 軸回転負荷	
(3) 斜め締め	雄ねじが雌ねじに対して斜めに傾いた状態の不良である	R 軸位置	
(4) 雄/雌ねじ破壊	ねじの山が割れた状態のねじを使用した不良である	Z 軸位置	
(5) カムアウト/リームアウト	雄ねじの十字穴が潰れて、ドライバービットが雄ねじの十字穴から外れる不良である	Z 軸位置	
(6) ねじ締め位置ずれ	雄ねじの位置決めにずれが生じて、雄ねじと雌ねじの中心がずれた状態の不良である	Z 軸位置	
(7) ねじなし	供給ミスや吸着ミスなどにより雄ねじをドライバービットに保持しない状態の不良である	Z 軸速度	
(8) 底付き	雄ねじの先が雌ねじの底に接触する不良である	浮き大	Z 軸位置
		浮き小	×

2.4 ねじ締め不良検知の課題

2.3節に示したねじ締め不良モードのうち底付き以外は、表1に示す通り、サーボから収集したZ軸、R軸の位置および速度データに基づく一般的なしきい値判定により検知することができる⁶⁻⁸⁾。

しかし、不良モード底付きの中でもねじ締め後に微小な浮きが生じるものを検知する手法は確立されていない。そのような底付きは、ねじ締め時に異物等は無く、トルクに違いが生じず、微小な浮きは外観による正確な検知は困難なためである。本稿では、底付きの微小な浮きを検知する方法について提案する。

3. 提案手法

本稿では、微小な浮きが生じる底付きのような、従来のしきい値判定では困難な異常をリアルタイムに検知するため、AIコントローラを用いた機械学習による判定システムを提案する。AIコントローラはマイクロ秒オーダーでAI処理を実行可能である。また、ねじ締め機によるねじ締め動作中のACサーボシステムから収集したデータを用いて特徴量抽出を行うことにより、ねじ締めを行って次のねじ締めを行うまでにねじ締め不良を検知することができる。

3.1 システム構成

提案するシステムでは図1の構成に対して、図4に示す通り以下の要素を追加している。

- AIコントローラ：機械学習の外れ値検知アルゴリズムである Isolation Forest⁹⁾ によるリアルタイム異常検知機能を持つ PLC
- ねじ締め異常判別 Function Block (以下、ねじ締め異常判別 FB)：AI機械学習モデルに基づき、ACサーボシステムから収集したデータからねじ締め異常を判別する PLC プログラム

- ・ AI 機械学習モデル：過去に収集した学習データから Isolation Forest アルゴリズムにより構築された機械学習モデル。

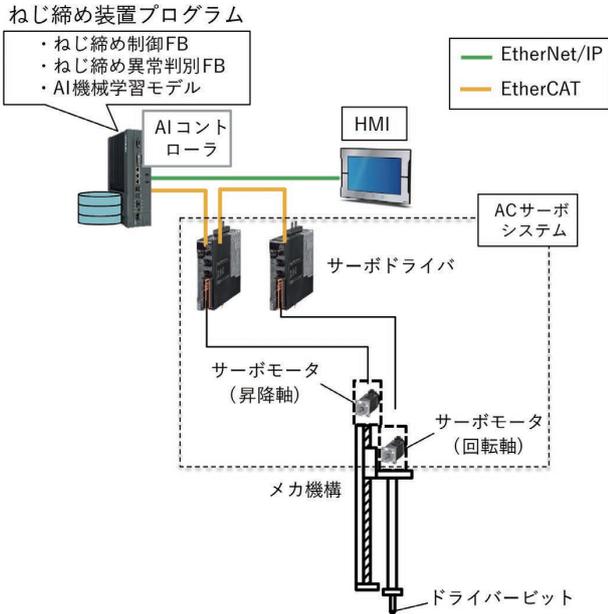


図 4 提案手法のシステム構成図

3.2 AI 機械学習モデルの構築

AI 機械学習モデルは、ねじ締めの正常/異常を判別するためのモデルであり、以下の手順でデータを収集して構築する。本稿での AI 機械学習モデルの構築に用いる Isolation Forest は教師無し学習である。

(1) 学習データ収集

ねじ締め機の AI コントローラで制御する R 軸と Z 軸のサーボから、それぞれねじ締め時の位置、速度、トルクを学習データとして収集する。なお、本稿の機械学習手法では学習モデルを構築する学習データには正常データのみを用いる。

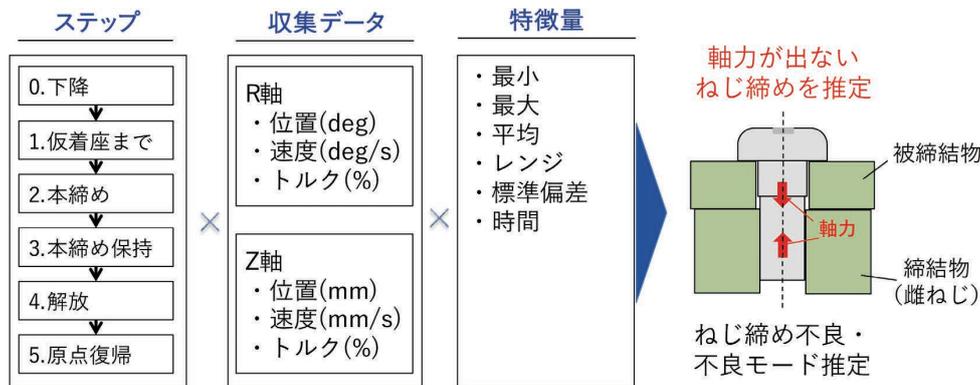


図 5 ねじ締めの特徴量算出

(2) 特徴量算出

収集したデータから各ステップの特徴量（最小、最大、平均、レンジ、標準偏差、時間）を算出する。なおここでレンジとは、 $|最大値 - 最小値|$ で定義される値である。図 5 に示す通り、特徴量の総数は、ステップ数 × データ項目数 × 特徴量種類数となる。

(3) 特徴量の選択

特徴量の総数は、ステップ数 × データ項目数 × 特徴量種類数であり膨大である。しかし、ターゲットとなる不良検知に有効なものは限られるのでその選択が必要である。本稿では、文献 (5) と同様の手法である、決定木⁹⁻¹⁰⁾ やロジスティック回帰⁹⁻¹⁰⁾ を用いて特徴量選択を行った。特徴量の選択はデータ分析手法に基づくものであるため、物理的に整合しない可能性がある。このため、選択された特徴量の妥当性については物理的観点からも考察する。

(4) AI 機械学習モデルの作成

選択された特徴量のデータを用いて、Isolation Forest のアルゴリズムで木構造を構築し、AI 機械学習モデルとする。

(5) 評価

新たに収集した正常と異常のデータに対して、構築した AI 機械学習モデルに基づき算出した異常度合いを示す AI スコアの妥当性を評価する。

4. 実験結果

4.1 実験に使用したねじ締め機

図 6 と表 2 に実験に使用したねじ締め機の構成と主要部品を示す。

4.2 実験に使用したワーク

雄ねじは、M4 の長さ 25mm のセムスねじを使用した。締結物の材質は ADC12、被締結物はガラスエポキシ基板

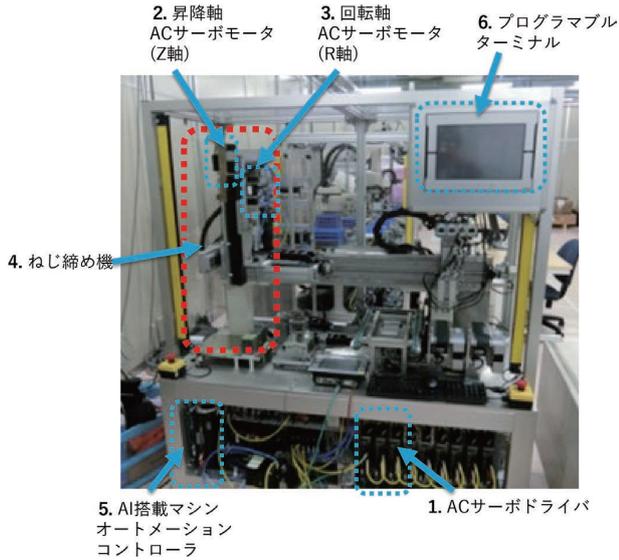


図6 ねじ締めの構成

であり、寸法は図7の通りである。なお、このワークは本技術開発時の共創先商品のねじ締め対象の中から代表的な組み合わせとして選定したものである。

4.3 学習データ収集

300個の正常データを収集した。データ数に関しては文献(9)を参考に Isolation Forest に適した数を設定した。本稿の機械学習手法では正常データのみで学習モデルを生成する。正常データ300個をランダムに3分割し、そのうちの200個を学習データとする。

4.4 参考用データ収集

後に機械学習モデルの妥当性を評価するための参考用データとしてねじ締めの軸力の測定データを収集する。軸力の測定には本稿の実験のようにロードセルを用いる方法や破壊検査などがあるが、いずれにしろ、製品の実製造環

表2 ねじ締め機主要部品

No.	品名	型式	数量	備考	
1	ACサーボシステム 1S シリーズ ACサーボドライバ (100V100W)	R88D-1SN01L-ECT	2	R/Z 軸	
2	ACサーボシステム 1S シリーズ ACサーボモータ (100W ブレーキなし)	R88M-1M10030S-S2	1	R 軸	
3	ACサーボシステム 1S シリーズ ACサーボモータ (100W ブレーキつき)	R88M-1M10030S-BS2	1	Z 軸	
4	ねじ締め機	減速機	AB042-003-S2-P2	1	R 軸
		単軸ロボット	KR30H06B-0220-0-10A0	1	Z 軸
5	AI搭載マシンオートメーションコントローラ NY シリーズ	NY512-Z300	1	コントローラ	
6	プログラマブルターミナル NA シリーズ 7インチ	NA5-7W001S	1	HMI	

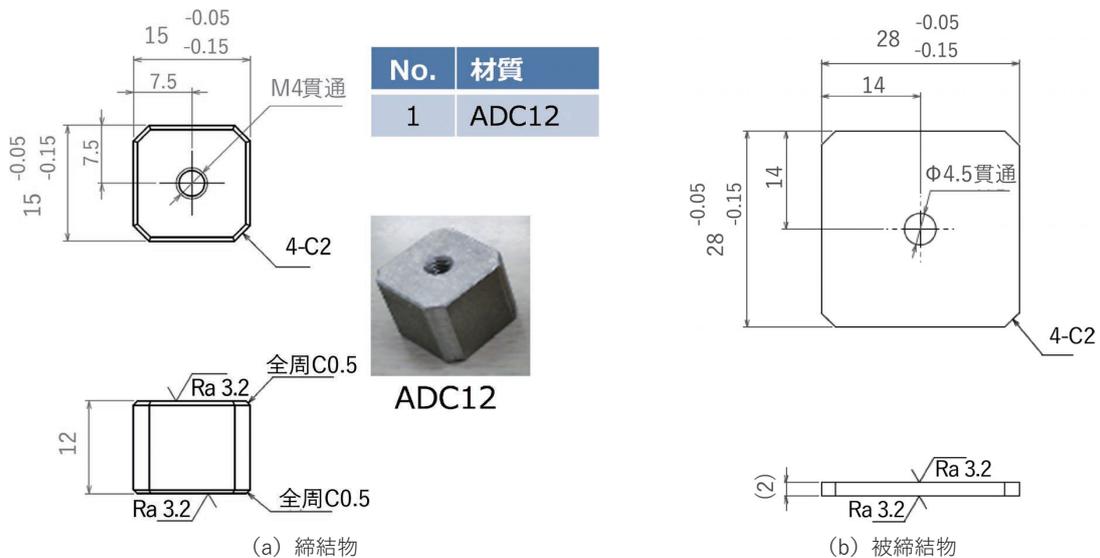


図7 ワークの図面

境ではデータ取得は不可能である。このため、参考用データは、実験用ワークを用いて事前に取得する。

参考用データ収集のため、被締結物と締結物の間にロードセルを挟み込み、軸力を測定した。測定した軸力データと学習モデルによる推定結果を比較する。

4.5 評価データ収集

評価データとして 100 個の底付き不良のデータを収集した。評価としては、4.3 で説明した正常データのうち、学習データに使用しなかった 100 個のデータも用いる。

図 8 に示す通り、不良モード「底付き」を再現するため、締結物の材質 (ADC12) と同じアルミ系の A5056 の止めねじを使用し、底付き実験用の締結物 2 種類 (底付き 0.2mm、底付き 0.5mm) を各 50 個ずつ作成した。また、底付き実験用の締結物は lot 1 (20 個) と lot 2 (30 個) の 2 種類を使用した。なお、これらの底付きの大きさは、従来手法では検出が困難な 0~0.2mm までの浮きの底付き不良を再現するために実験により決定した値である。

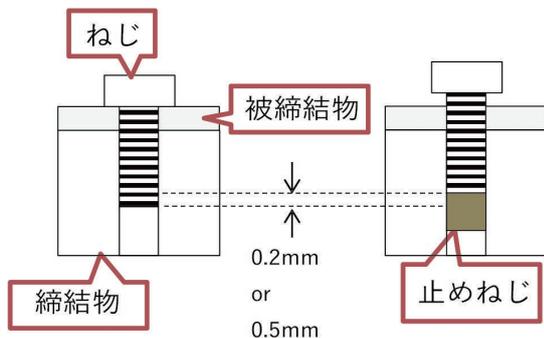


図 8 底付き実験用の締結物

4.6 特徴量算出、特徴量選択

取得された学習/評価データを用いて 3.2(2) の特徴量を算出し、3.2(3) に述べたデータ分析手法にて、特徴量選択を行った。その結果、「STEP 2 の Z 軸位置レンジ」および「STEP 4 の R 軸位置レンジ」の 2 つが選択された。図 9 に STEP 2 の Z 軸位置の最大値と STEP 4 の R 軸位置の最大値および STEP 2 の Z 軸位置レンジと STEP 4 の R 軸位置レンジについて、学習/評価データの分布を示す。データプロットエリア外には各分布の密度曲線を示す。

従来手法の R・Z 軸位置による異常検知では図 9 の左図に示す通り、正常と底付き 0.2mm の分布が重なっており判別することができない。また底付き 0.5mm ではロットの違いにより分布が異なっている。一方、右図に示した R・Z 軸位置レンジのデータは正常の分布のばらつきが小さく、また底付き 0.2mm の分布と異なっており、底付き 0.5mm の分布もロットの違いによる分布の異なりは見られない。これは絶対値である R・Z 軸位置は、雄ねじの長さや締結物の高さの違い、ロット間の個体差などによるばらつきの影響を受けるが、相対値である R・Z 軸位置レンジは影響を受けないためであると考えられる。

特徴量の選択はデータ分析手法にて行われているため、物理的な整合を確認する。

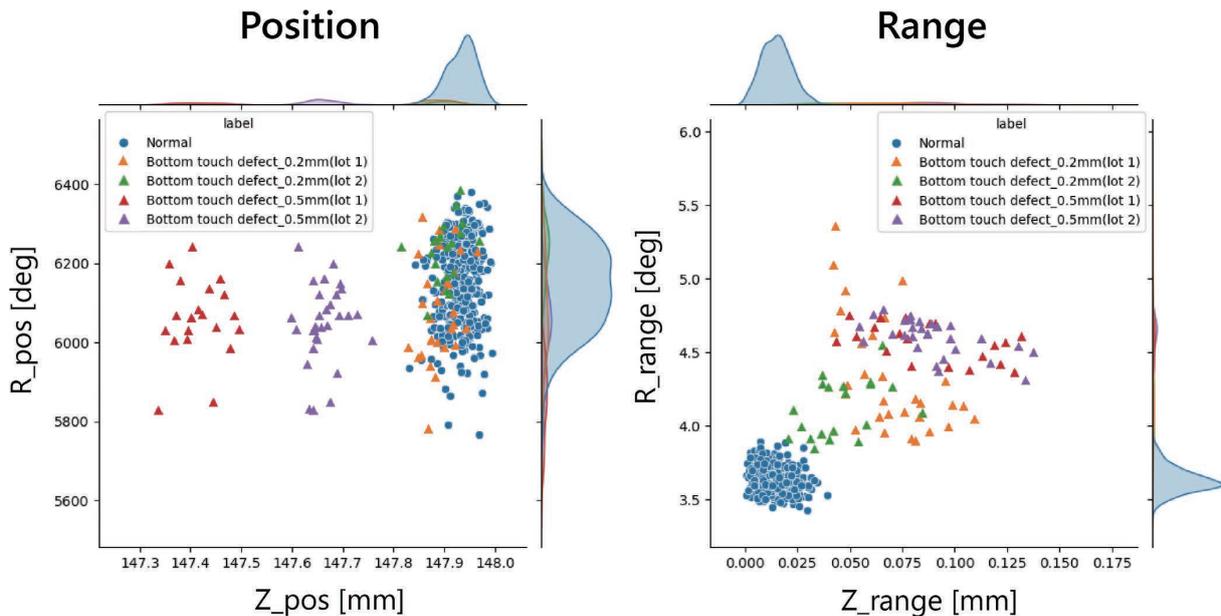


図 9 STEP2 の Z 軸位置・STEP4 の R 軸位置の最大値とレンジの分布

(1) 底付き不良発生時の Z 軸位置

ねじ締め正常時と 0.50mm 底付きが生じたときの時系列グラフを図 10 に示す。

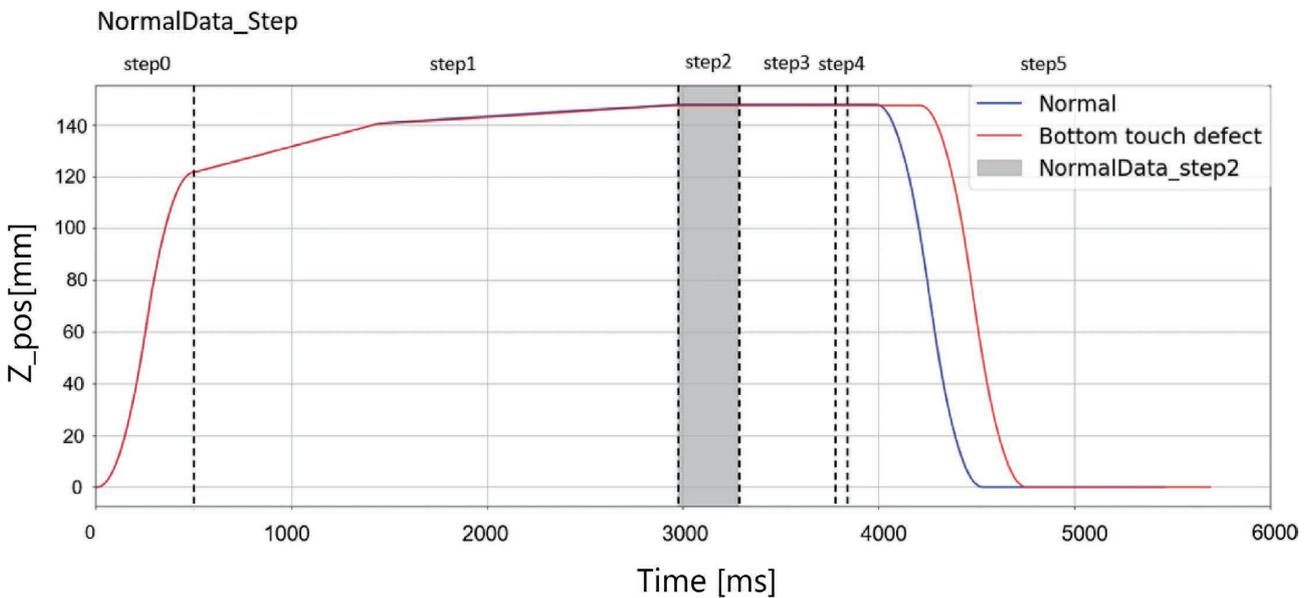
図 10(a)はねじ締めのステップ全体 (STEP0 ~ STEP5) の Z 軸位置の遷移を示す。青が正常、赤が底付きのそれぞれ一個ずつのデータである。今回の図 10(a)に示したねじ締め動作のケースでは STEP 5 の時間に差があるように見えるが、これはねじ締め中にねじ締め状態によって動作時間が変化するステップがあるためである。しかし、この時間の変化はねじ締め不良時に必ず発生するものではないため判別には適していない。図 10(b)は特徴量選択された

STEP 2 を拡大したものである。この 2 個のデータについては正常と底付きには Z 軸の位置に差があるように見えるが、図 9 に示した通り、全体の分布には差はない。

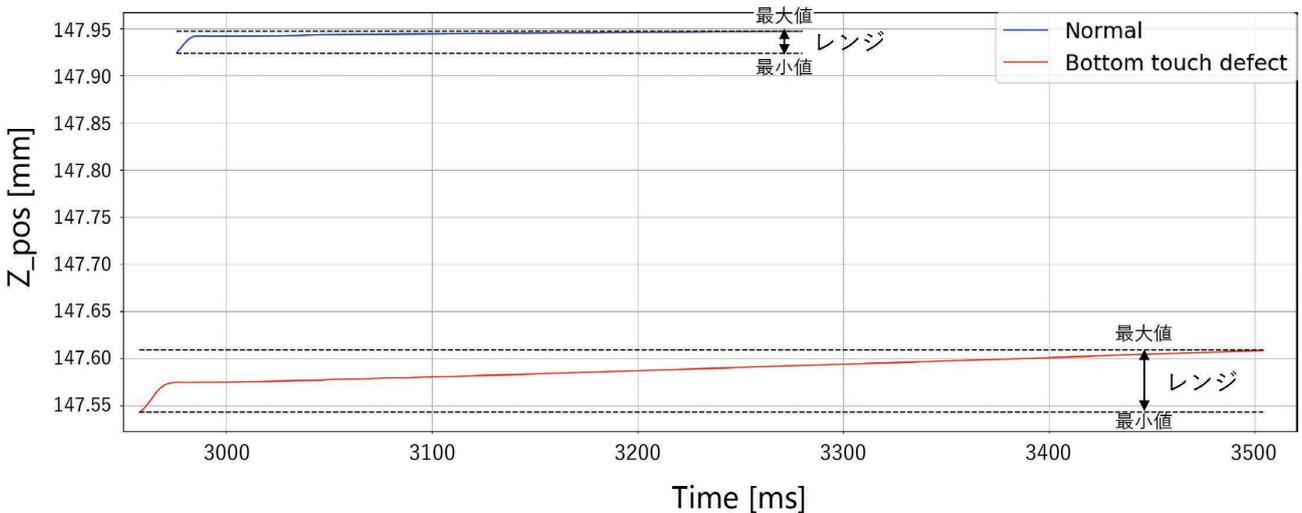
正常なねじ締めでは STEP 2 (本締め) でねじは着座しているため Z 軸位置はほとんど変化しないが、底付きでは STEP 2 のトルクアップ時に雄ねじの先または雌ねじの底が変形するため、正常なねじ締めより Z 軸位置の変化量 (レンジ) が大きくなっていると考えられる。

(2) 底付き不良発生時の R 軸位置

正常と底付きの R 軸位置の時系列グラフを図 11 に示す。

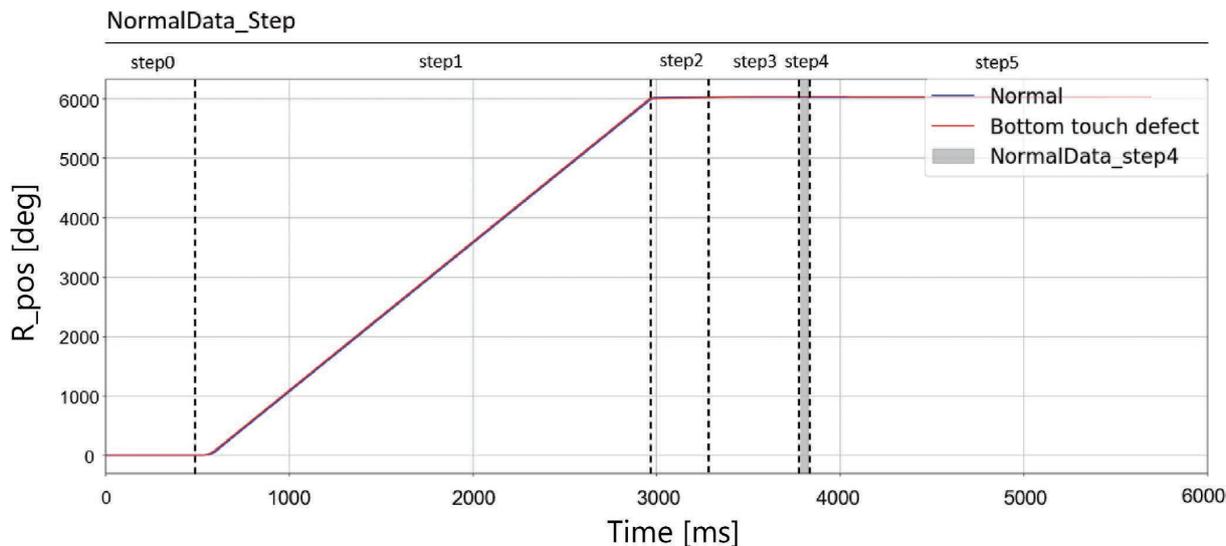


(a) ねじ締め動作の Z 軸位置の遷移

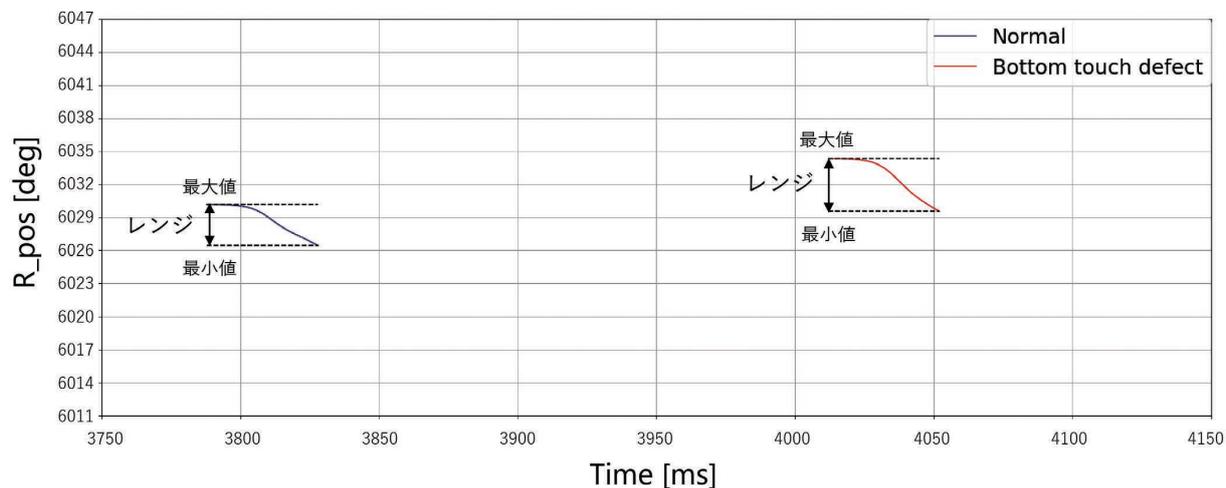


(b) STEP 2 の Z 軸位置

図 10 正常と底付き不良の Z 軸位置の違い



(a) ねじ締め中の R 軸位置の遷移



(b) STEP 4 の R 軸位置

図 11 正常と底付き不良の R 軸位置の違い

図 11(a)はねじ締めのステップ全体 (STEP0 ~ STEP5) の R 軸位置の遷移を示す。青が正常、赤が底付きのそれぞれ一個ずつのデータである。R 軸位置の遷移はほとんど差が無いことが分かる。図 11(b)は特徴量選択されたSTEP 4 を拡大したものである。この 2 個のデータについては、正常と底付き不良で、R 軸の絶対値に差があるように見えるが、図 9 に示した通り、全体の分布には差はない。STEP 4 で R 軸トルクを解放する前は、雄ねじの回転方向にドライバービットを通じて本締めトルクを加えている。その状態から R 軸トルクを解放すると雄ねじのねじれが元に戻ろうとする力が発生する。その際、底付き時は着座しておらず回転抵抗がないため正常時 (着座時) よりねじれが元に戻る (ねじが逆回転する) 量が大きくなるためと考えられる。上記考察の根拠として、STEP 4 で R 軸トルクを 0% に

した際、正常時はねじの頭部回転が無く、底付き時は頭部回転していることを確認した。

4.7 AI 機械学習モデルの構築

4.6. で選ばれた特徴量の学習データ (教師無し学習のため教師データは含まない) を AI コントローラに読み込ませて AI 機械学習モデルを構築した。AI コントローラは Isolation Forest のモデルを自動で構築できる。AI コントローラに組み込まれたねじ締め異常判別 FB は、ねじ締め機のコントローラで制御する R 軸と Z 軸のサーボから得られたデータから指定された特徴量を算出し、AI コントローラの機械学習機能が特徴量を AI 機械学習モデルに適用し AI スコアを算出する。

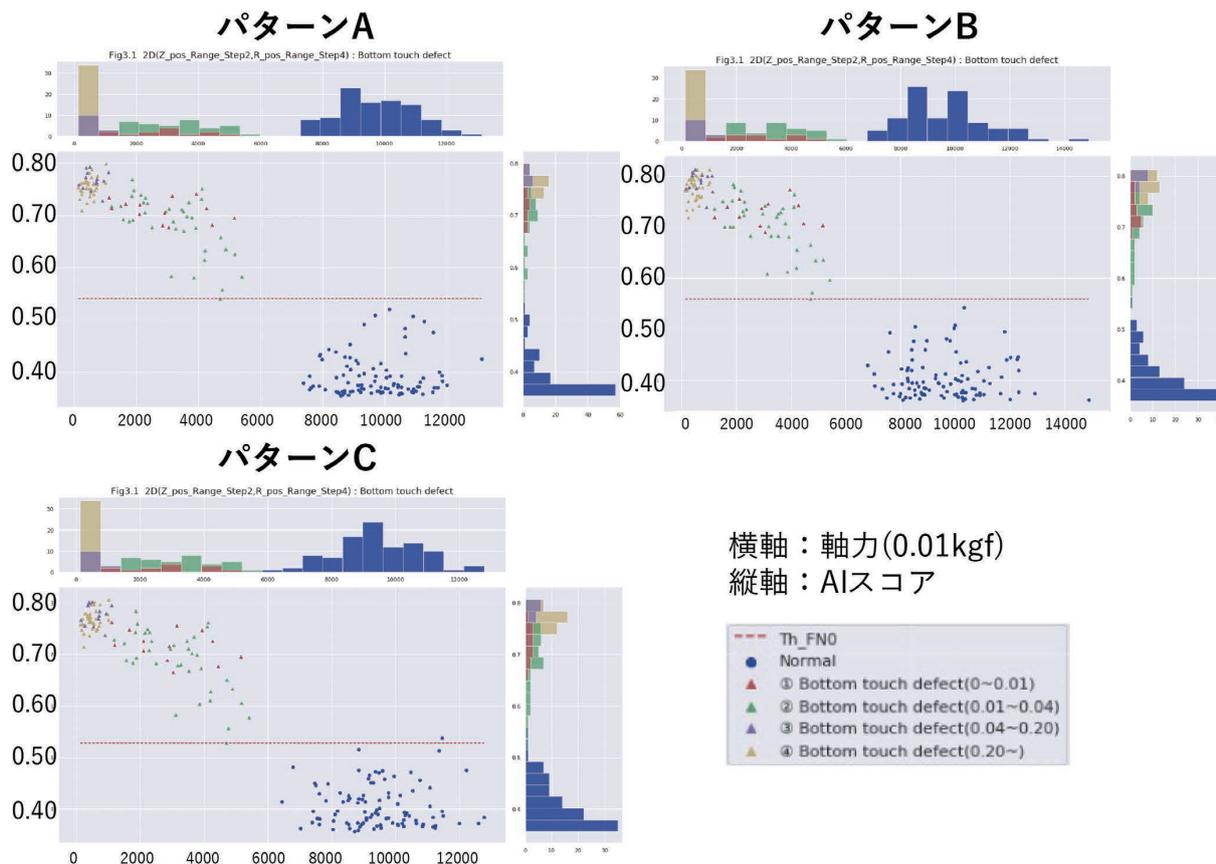


図 12 正常と底付き不良の AI スコア

4.8 評価

AIコントローラにて算出された Isolation forest の AI スコアと、4.4 で取得した参考用データである、ねじ締めの軸力を比較した。正常データ 300 個をランダムに 3 分割して、正常データ 200 個を学習データ、残りの正常データ 100 個、底付き不良のデータ 100 個を評価データとする検証を行った結果を図 12 に示す。

横軸は軸力である。縦軸は AI コントローラにより算出された AI スコアである。AI スコアは値が大きいほど正常データの分布から外れている値であることを示す。青は正常データであり、青以外の色は底付き不良のデータである。底付き実験用の締結物は 0.2mm、0.5mm の 2 種類を作成しているが、実際の底付きの程度にはばらつきがある。このため、ねじ締め後に雄ねじの座面と被締結物の間に生じた隙間量を測定し、①0.01mm 未満、②0.01mm 以上 0.04mm 未満、③0.04mm 以上 0.2mm 未満、④0.2mm 以上に分類して結果を表示している。正常データは軸力が高く、底付き不良のデータは軸力が低くなっていることが分かる。

また、正常データは AI スコアが低く、底付き不良のデータは AI スコアが高くなっており、AI スコアと軸力に相関があることが分かる。隙間量が 0.04mm 以上になると

正常/異常の AI スコアは明確に分離されているが、隙間量が小さいデータは軸力の値とばらつきが大きく、AI スコアは小さい傾向にある。底付き不良データの中には、正常データに近い軸力となるものもある。このため、正常/異常の AI スコアの分布が近づき誤判別が生じる可能性がある。誤判別には、異常を正常と判別する見逃しと、正常を異常と判別する見過ぎがあるが、これらはしきい値の設定によりどちらにもなりえるものである。

本実験では、見逃しをゼロにする基準でしきい値を設定し、見過ぎ率により妥当性を評価する。上記結果に対して見逃し率がゼロになるように設定したしきい値を図 12 に赤の破線で示し、その場合の見過ぎ率を表 3 に示す。

表 3 底付き不良検知の見過ぎ率

検証	見過ぎ率
パターン A	0.00%
パターン B	0.00%
パターン C	1.00%

パターン A は AI スコア約 0.54、パターン B は AI スコア約 0.56 でしきい値を引くと見過ぎはなく、正常と異常

が完全に分離できているため、見過ぎ率は 0.00% である。パターン C では AI スコア約 0.53 でしきい値を引くと 1 点が見過ぎとなり、見過ぎ率は 1.00% である。

以上の評価結果から本稿で使用したデータセットに対して、従来手法では 4.6 で述べた通り、正常と底付きの分布が重なっており判別不可なのに対して、本手法では見過ぎ率を大きく抑えることができることが示された。

5. むすび

本稿では、現場でリアルタイムに AI 処理を行う AI コントローラにて自動ねじ締め機の異常検知を行う手法について述べた。微小な浮きが生じる底付き不良の実験を行い、実験結果から手法の有効性を評価した。従来手法では判別困難な 0.04mm 未満の隙間量の底付き不良についても、提案手法では、1% の見過ぎが生じるものの、判別が可能である。0.04mm 以上の隙間量であれば、誤判別 0% で判別ができることを示した。ねじ締めにおける軸力不足は外観上の違いが乏しく、画像検査の適用が困難である課題があったが、提案手法では、ねじ締め中の AC サーボデータを用いて、外観検査では見分けが付きにくい異常もリアルタイムに検知できる。本手法を自動ねじ締め機に搭載することにより、省人化と同時にねじ締めの品質向上が可能であると思われる。

本実験ではねじ締めの専用機を利用した。今後は、ロボット組み立てアプリケーションと融合させ、汎用的なロボットを用いたねじ締めの品質向上への応用も検討する。本技術は社内工場との共創により実現したものであるが、本稿で論じてきた底付きを加えた、表 1 に記載の 8 種のねじ締め不良モードを検知できるアプリケーションを開発済みであり、生産ラインへの導入が完了している。生産現場からは高い評価が得られ、従来の目視検査等による検査工程を、本技術に置き換えることとなった。

今後、さらなる顧客への展開のためには、メカ・ねじ締め制御・ねじ締め条件における正常と異常の分離性の確認や、ワークの寸法・形状・材料、設備の摩耗/劣化、ねじ締め姿勢などの異常検知に影響のある変動要因の確認が必要であり、社外顧客への展開を通して、これらの課題を解決していく予定である。

参考文献

- 1) 経済産業省. “AI 導入ガイドブック”. https://www.meti.go.jp/policy/it_policy/jinzai/AIutilization.html, (参照 2022-05-01).
- 2) オムロン株式会社. “【注目商品】AI 搭載マシンオートメーションコントローラ”. <https://www.fa.omron.co.jp/product/special/sysmac/featured-products/ai-controller.html>, (参照 2022-05-01).
- 3) 見置孝昌, 出来仁太郎. AI 搭載マシンオートメーションコントローラの開発 (1). OMRON TECHNICS. 2019, Vol.51,

No.1, p.39-44.

- 4) 太田政則, 西山佳秀. AI 搭載マシンオートメーションコントローラの開発 (2). OMRON TECHNICS. 2019, Vol.51, No.1, p.45-51.
- 5) 宮本幸太, 川ノ上真輔. AI 搭載マシンオートメーションコントローラの開発 (3). OMRON TECHNICS. 2019, Vol.51, No.1, p.52-57.
- 6) 日東精工株式会社. 自動ねじ締め装置. 特開 2012-223841.
- 7) 株式会社東芝. ねじ締め装置. 特開平 09-183027.
- 8) 株式会社デンソー. ねじ締め装置. 特開平 7-223132.
- 9) Liu, F. T.; Ting, K. M.; Zhou, Z.-H. Isolation-based anomaly detection. ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data (TKDD), 2012, Vol. 6, No.1, p.3.
- 10) 平井有三. 初めてのパターン認識. 森北出版, 2012.

執筆者紹介



坂元 佑気 SAKAMOTO Yuki

インダストリアルオートメーションビジネス
カンパニー

技術開発本部 第 1 技術部
専門: 情報工学、生体医工学

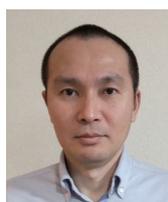


中村 芳行 NAKAMURA Yoshiyuki

インダストリアルオートメーションビジネス
カンパニー

技術開発本部 第 1 技術部
専門: 情報システム・データ工学

所属学会: 計測自動制御学会、日本ロボット学会、電子情報通信学会、情報処理学会、日本信頼性学会、エレクトロニクス実装学会
博士 (工学)



杉岡 真行 SUGIOKA Masayuki

インダストリアルオートメーションビジネス
カンパニー

技術開発本部 第 1 技術部
専門: 情報科学

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

プリント配線板における部分放電開始電圧・部位予測と高周波域への拡張

博田 知之, 佐藤 博

近年の電力変換機器の高周波化や高電力化に伴い、多層のプリント配線板における絶縁破壊リスクが増大している。リスクに対応するため、高周波域への対応も含めた部分放電発生部位および部分放電開始電圧の予測技術が望まれていた。

従来、エナメル線のツイストペアや球電極などの簡易形状には、電界 CAE 解析と理論から部分放電開始電圧を予測する検討がなされていた。しかし、プリント配線板、特に高周波領域を含む予測技術はなかった。

本稿では、多層のプリント配線板を想定し、絶縁層を挟んだ上下銅パターン間の部分放電現象、特に高周波領域 (MHz 帯含む) の予測技術の検討を行った。

電界 CAE 解析と放電理論による部分放電開始電圧と放電部位の明確化および実測評価により、高周波領域での部分放電開始電圧が、周波数依存の補正係数追加で導出可能であることを示した。その結果、30%の精度で 5MHz までの部分放電開始電圧を予測できるようになった。

Partial Discharge Voltage Prediction in Printed Wiring Boards and Their Expansion to High Frequency

HAKATA Tomoyuki and SATO Hiroshi

With the recent increase in frequency and power of power conversion equipment, the risk of dielectric breakdown in multilayer printed wiring boards is increasing. In order to respond to risks, a technology for predicting the partial discharge generation site and partial discharge start voltage, including support for the high frequency range, has been desired.

Conventionally, for simple shapes such as twisted pairs of enameled wires and sphere electrodes, the partial discharge start voltage has been predicted from electric field CAE analysis and theory. However, there was no predictive technology involving printed wiring boards, especially in the high-frequency region.

In this paper, assuming a multilayer printed wiring board, we investigated the prediction technique of partial discharge phenomena between the upper and lower copper traces with the insulating layer in between, especially in the high-frequency region (including the MHz band).

Clarification of the partial discharge start voltage and discharge site by electric field CAE analysis and discharge theory, and actual measurement evaluation showed that the partial discharge start voltage in the high-frequency region can be derived by adding a frequency-dependent correction factor. As a result, it became possible to predict the partial discharge start voltage up to 5 MHz with 30% accuracy.

1. まえがき

2050 年のカーボンニュートラル実現に向け、脱炭素社会への取り組みが進行しつつある。電力変換機器においては、高効率化が求められるとともに、再生可能エネルギー

導入に向けた分散化等を実現する小型化（高電力密度化）が強く求められている¹⁾。

一方、電力変換器のスイッチングに使用されるパワー半導体においては、従来のシリコン (Si) に比して高耐圧・高周波化可能なワイドギャップ半導体 (SiC や GaN など) が実用化され、スイッチングの高周波化 (数百 kHz ~ MHz

Contact : HAKATA Tomoyuki tomoyuki.hakata@omron.com

帯近傍) が可能な環境になってきている。また、プリント配線板は多層化が進んでおり、回路パターンも高密度化してきている^{2,3)}。スイッチングがより高周波化すれば、LC素子の小型化が可能となり、プリント配線板の多層化と相まって、電力変換器の一層の高電力密度化を図ることが可能となる。

ただし、高周波化やプリント配線板の多層化による電力変換器の高電力密度化は「サージの増大」「絶縁厚み低下」を生じさせ、その結果、部分放電が発生しやすくなっている。部分放電とは「도체間の絶縁を部分的にのみ橋絡する放電」である⁴⁾。部分放電のエネルギーは低く、わずかに絶縁層を劣化させる程度であるため、通常問題にならない。しかし、電力変換器が高周波化すると、部分放電による絶縁層劣化は加速されると考えられるため、絶縁破壊のリスクは高くなる。一方で、プリント配線板の多層化により、放電箇所の推定が難しくなるため、絶縁破壊のリスクがより高まっている。さらに、電圧印加の周波数により放電開始電圧は変動すると言われており⁵⁾ 高周波化により部分放電が生じやすくなるリスクも考えられる。

これらリスクへの対策を立案するにあたっては、高周波域の部分放電挙動も含めた部分放電発生部位および部分放電開始電圧の予測技術構築が有効である。

例えば、エナメル線では、ツイストペア形状を用いた電界CAE解析(2次元断面)による部分放電部位特定と放電理論(パッシュェンの法則)による部分放電開始電圧予測や実測結果が報告されている⁶⁾。しかし、プリント配線板のような3次元形状ではない上、印加電圧はインパルスや低周波を対象としたものであり、高周波電圧に対する評価ではない。

また、高周波電圧に対する放電評価としては、単純形状(球電極)における実測結果⁷⁾ やプリント基板の沿面放電の評価⁸⁾ などが報告されている。しかし、絶縁層(誘電体)を挟んだ上下導電パターン間における部分放電現象に関する報告、特にMHz領域に踏み込んだ検討はほとんどない。

そこで、我々は、多層のプリント配線板を想定し、絶縁層を挟んだ上下導電パターン間の高周波域を含む部分放電予測技術の検討を行った。本稿では、低周波域における3次元電界CAE解析による放電部位および部分放電開始電圧を推定した上で、部分放電開始電圧周波数依存性の実測評価を行い、高周波域における部分放電開始電圧の補正を可能としたので報告する。

2. 理論背景

2.1 プリント配線板における分圧と放電部分

部分放電とは、導體間の絶縁を部分的にのみ橋絡(キョウラク)する放電をいい、導體間を完全に橋絡する放電は含まない(JEC-0401-1990⁴⁾より)と定義されている。放

電は主に気体の絶縁破壊に伴う電子の移動であるため、部分放電現象は電極間(導體間)に含まれる気体部分で発生する。放電ではオゾン発生や発熱を伴うため、放電近傍の絶縁層などは劣化していくことになる⁹⁾。

多層のプリント配線板における部分放電の例を図1に示す。多層のプリント配線板では、銅パターン横にある空気部分のキャパシタンスと絶縁層のキャパシタンスが直列に配置されるため、分圧により空気部分の電位差が大きくなる。また、放電は主に気体部分で発生するため、気体でかつ電位差が大きい空気部分で放電しやすいと想定できる。なお、部分放電開始電圧は、プリント配線板の放電開始時における高圧電源の電圧値とする。

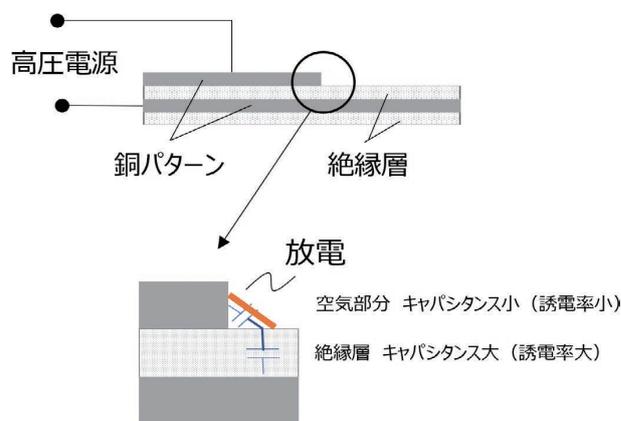


図1 プリント配線板(断面)の部分放電

2.2 放電発生条件(パッシュェンの法則)

放電は、以下のプロセスで持続放電に至る。一つは、電極間で加速された電子が気体原子に衝突し、原子を電離させ、新たな電子が供給される現象(α 作用)である。 α 作用により、指数的に電子が増加し、絶縁が破られ放電する。 α 作用は電子と原子の衝突が原因であるため、電子が十分な衝突エネルギーになるまで加速する適切な分子間距離や衝突確率(分子密度)に影響を受ける。また、2次電子を放出した原子はイオンとなり、イオンは電極に衝突し、電子を供給(γ 作用)し放電を継続させる。

放電発生条件はパッシュェンの法則に従う^{10,11)}(図2)。パッシュェンの法則は、放電開始電圧が気体圧力(p) \times 電圧がかかる電極間距離(d)の関数となることを示したものである。 pd は電極間に含まれる気体分子の密度に類するものと言え、前段の α 作用に関連する。気体種類により曲線は変化するが、図2では空気の場合を示した。図2より、最も放電しやすい条件があることがわかる。気体が空気の場合、常温(25°C)かつ1気圧(1013.25hPa)の場合、電極間距離約8 μ mが最も放電しやすい条件であり、328V付近が放電開始電圧となる。また、気体の状態方程式からわかるように、横軸の pd (気体分子の密度)は周囲温度の影響も受けるため注意を要する。

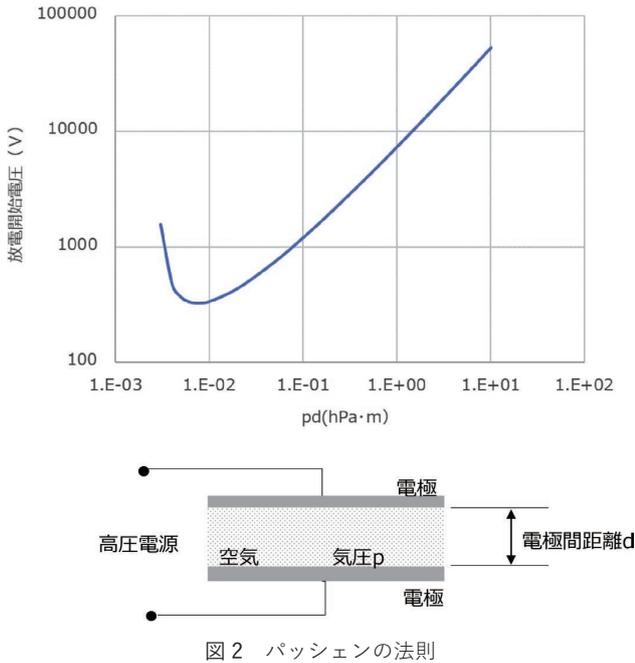


図2 パッシェンの法則

また、高周波域においては、質量の大きいイオン運動が放電開始電圧に影響し、パッシェンの法則を変化させることが知られている^{7,12)}。高周波域においては、放電開始電圧はpdに加え、印加電圧の周波数(f)×電極間距離(d)の関数になるとされている。例えば、球電極の実測評価では、周波数増加に伴い、部分放電開始電圧が低下し、1MHzではDCの8割程度に低下する。逆に、1MHz以上では、部分放電開始電圧は増加する傾向にある⁷⁾。これより、印加電圧の周波数により大きく放電開始電圧が変化することがわかる。

プリント配線板においては、高周波域における放電電圧変化が不明なため、実測に基づく実験理論式を求めるとした。

以上のように、プリント配線板における空気部分の電界分布を評価することができれば、印加電圧周波数を含めたパッシェンの法則の放電条件(放電開始電圧とpd)を用いて部分放電開始電圧を見積もることが可能になる。(なお、電界分布は、後述のように電界CAEで評価することが可能である。)さらに、プリント配線板における放電開始電圧の周波数特性を取得することにより、高周波領域まで部分放電開始電圧を予測することができるようになると考えた。

3. 電界 CAE 解析と放電理論による部分放電開始電圧と放電発生部位検討

3.1 CAE 検討モデル

図3のように多層のプリント配線板を模擬したCAE用検討モデルを作成した。一般的なプリント配線板を想定

し、L1およびL2層はCuであり、厚み18μmとした。絶縁層も、一般的なプリント配線板の絶縁層(FR4プリプレグ厚み)に基づき、絶縁層は0.076mm、0.1mm、0.15mm、0.3mmと4種類とした。また、使用した材料定数を表1に示す。FR4の比誘電率や誘電正接はMHz帯までほぼ変化しないため、一定の値を使用した。なお、プリント配線板のエッチング精度などを考慮し、L1層角部をC0.1とした。

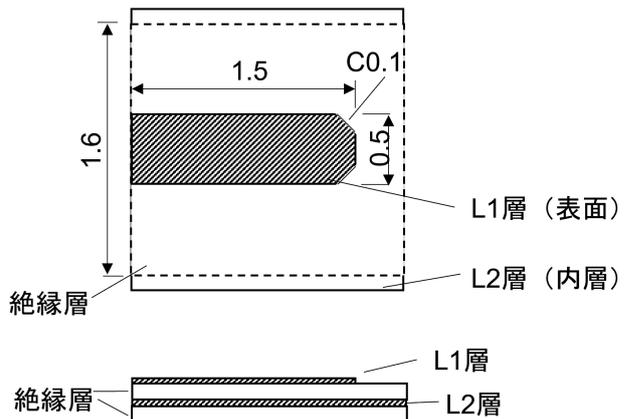


図3 CAE 用検討モデル

表1 CAE モデル用材料定数

層	材料	材料定数		
		導電率 (S/m)	比誘電率	誘電正接
L1/L2層	Cu	5.98E7	—	—
絶縁層	FR4	—	4.25	0.01

3.2 電界 CAE 解析条件

電界 CAE 解析には FEMTET (ムラタソフトウェア株式会社) を使用した。また、図4のように、L1、L2層間に交流電圧を印加する解析を行った。将来的にパワエレ機器で想定される高周波領域として5MHzと現状のAC60Hzおよびその中間ほどである300kHzの周波数を設定した。

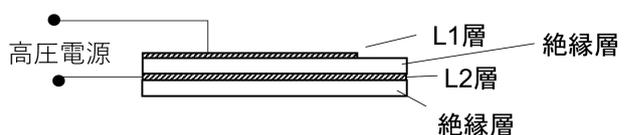


図4 電圧印加箇所

3.3 電界 CAE 解析における部分放電判定方法

印加電圧 AC1kV_{0-P} かつ周波数 60Hz における電界 CAE 解析結果 (電界コンター図 絶縁層表面) を図5に示す。図5より、L1層C面エッジ部において電界が集中していることがわかる。理論より部分放電はこの位置で発生する

ことが予想される。

前述のように、パッシェンの法則により最も放電しやすい条件は常温常圧 (25°Cかつ 1気圧 = 1013.25hPa) 下で電極間約 8 μ m かつ電位差 328V であった。今回のプリント配線板において放電するのは L1 層と絶縁層間にある空気層である。従って、電界 CAE 解析における部分放電開始電圧の導出は、次のようにした。ある印加電圧下における電界 CAE 結果から、L1 層と絶縁層間の空間距離 8 μ m かつ最も電位差の大きい場所 (図 5 の電界集中箇所) を見出し、電界集中箇所の電位差が 328V となるよう印加電圧を変化させる。その際の印加電圧を部分放電開始電圧とした。また、電力制御機器の規格から、高地 (海拔 3000m) かつ高温になる電子部品近傍の温度 (135°C) を想定した。この場合、簡易的に空気密度比で 25°C に換算すると気圧 518.60hPa と計算される。以上をパッシェンの法則で換算すると、空間距離 15.6 μ m かつ 328V が放電条件となる。

なお、この電界 CAE 解析では、パッシェンの法則における周波数特性影響は加味していない。周波数による電界分布変化のみを考慮している。

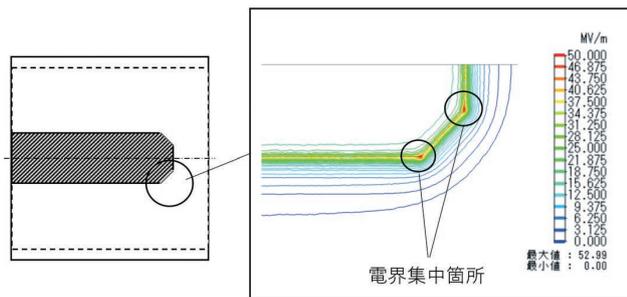


図 5 電界 CAE 解析結果 (コンター図)

3.4 解析結果

図 6 に電界 CAE 解析結果を示す。なお部分放電開始電圧は電圧ピーク値 (V_{0-P}) で記載した。結果より、縁層厚みの増加により部分放電電圧が高くなっていることがわかる。518.60hPa の条件においては、常温常圧 (1013.25hPa) 時に比して 30% 近く部分放電開始電圧が低下している。

これは、気圧が 1013.25hPa から 518.60hPa になると、放電開始電圧が最低値となる空間距離は、8 μ m から 15.6 μ m と長くなるためである。空間距離が長くなると、(同じ電界分布の場合) 電位差が大きくなるため放電しやすくなる。本結果より、高地・高温環境における電力変換機器の絶縁設計は注意を要することがわかる。

なお、今回検討した周波数域においては、電界分布はほとんど変化しなかった。そのため、本電界 CAE 解析では部分放電開始電圧に周波数依存性がなかった。

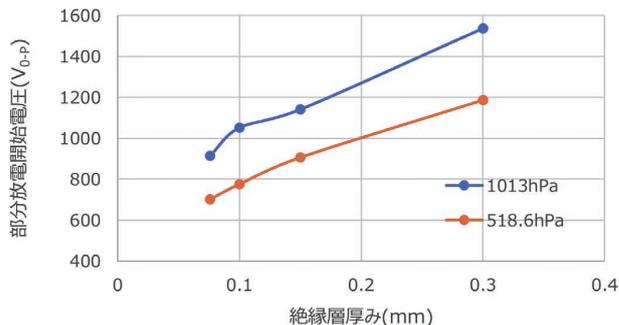


図 6 電界 CAE 解析結果

4. 部分放電開始電圧の周波数影響実験

4.1 実験サンプルと実験条件

プリント配線板における高周波領域までの部分放電開始電圧を実測することで周波数影響の検討を行った。図 7 および表 2 に示すように絶縁層の厚みを変化させた多層プリント配線板を準備した。寸法や材料特性は電界 CAE と合わせた。なお、絶縁層は FR4 であるが、誘電率が規定されているものを用いた。

また、高周波領域の部分放電挙動を測定するため、L1 層と L2 層間に 20kHz、300kHz、1MHz、2MHz、5MHz 交流電圧を印加し、実験を行った。

さらに、135°C かつ標高 3000m を気圧換算し、常温常圧と比較を行った。具体的には周囲温度 25°C 前後で気圧 518.60hPa もしくは 1013.25hPa に調整し実験を行った。

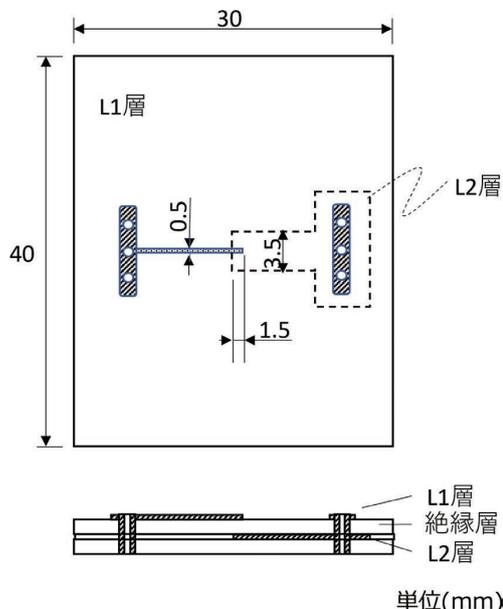


図 7 実験サンプル形状

表2 実験サンプル層構成および材料

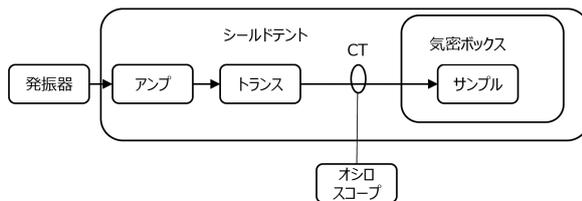
層	材料	厚み (mm)
L1/L2 層	Cu	0.035
絶縁層	FR4 (誘電率 4.2 ~ 4.4)	0.076 0.1 0.15 0.3

4.2 部分放電評価システム

図8のようなシステムを用い、シールドルーム内でサンプルに交流電圧を印加して部分放電の評価を行った（電波法対応のためシールドルーム、人体保護のためシールドテント使用）。アンプの周波数制限から 20kHz~500kHz と 1MHz~5MHz は異なる構成になっている。使用した装置を表3に示す。

また、部分放電の計測には、自作の高周波用 CT を使用し、放電で発生する高周波電流を取得した。さらに、気密ボックスを使用し、気圧調整をして実験を行った。

a) 20kHz~500kHzの装置構成



b) 1MHz~5MHzの装置構成

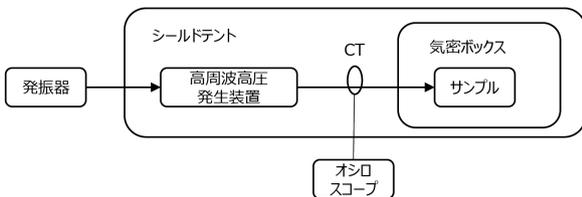


図8 部分放電評価システム

表3 評価装置

装置	メーカー・型式
発振器	(株)テクトロニクス AFG1022
高周波アンプ	(株)エヌエフ回路設計ブロック HSA4052
トランス	20kHz 用 300 ~ 500kHz 用 2種類 (自作)
オシロスコープ	(株)テクトロニクス MSO44-3-BW-500
高周波高圧発生装置	カスタム品

4.3 部分放電評価方法

部分放電発生有無の CT 電流波形を図9に示す。図9より部分放電が発生した際、ノイズのような波形が出ることがわかる。この波形が発生した際の印加電圧を部分放電開始電圧とした。

なお、本実験において、電圧印加時間は、部分放電発生を判断するのに十分な時間である 10 秒とした。10 秒の間に、部分放電発生がない場合は、印加電圧を 20V 上げ再測定し部分放電が発生するまで繰り返した。

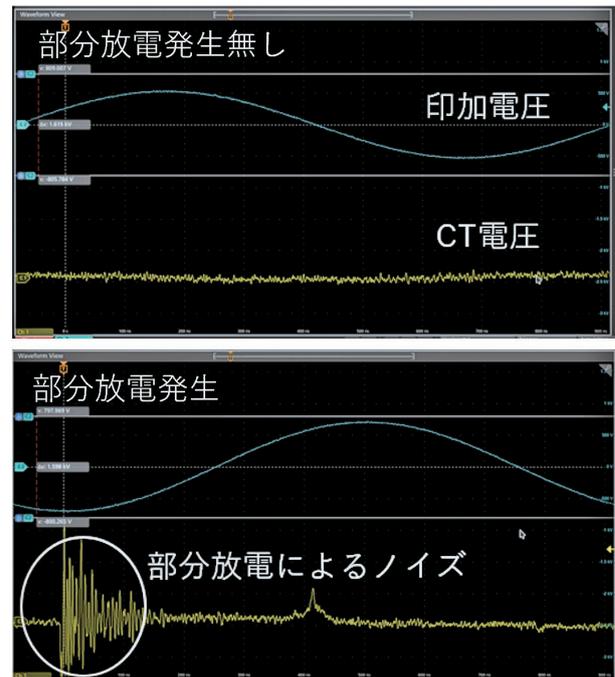


図9 部分放電波形

4.4 部分放電観察方法

部分放電による発する UV 光観察には、UV カメラ (ViewTer-500UV 3R 社) を使用した。

5. 部分放電開始電圧の周波数影響実験結果

5.1 部分放電開始電圧の気圧および周波数依存性

印加周波数と絶縁層厚みを変えた際の実験結果を図10および図11に示す。なお、図10と図11は気圧条件を変えたものである。

図10と図11の比較から、気圧が下がる（高所かつ高温）と、周波数に関わらず部分放電開始電圧が一律に20%程度低下していることがわかった。これは、パッシェンの法則において、放電開始電圧に対する気圧影響と周波数影響には交互作用が少ないためと推測する。

さらに、絶縁層厚みや気圧に関わらず、周波数の増加に伴い線形的に部分放電開始電圧が低下する傾向にある。

(低下割合は 100kHz 毎に 0.7%程度) これは、パッシェンの法則の周波数依存性と考えられるため、放電開始電圧の補正係数として採用する。

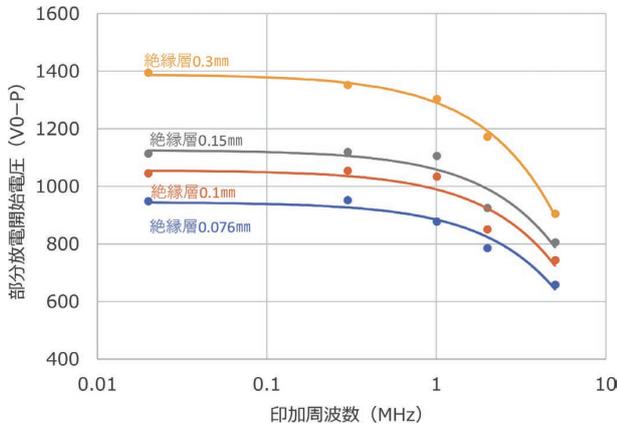


図 10 1013.25hPa (常温常圧) の部分放電開始電圧

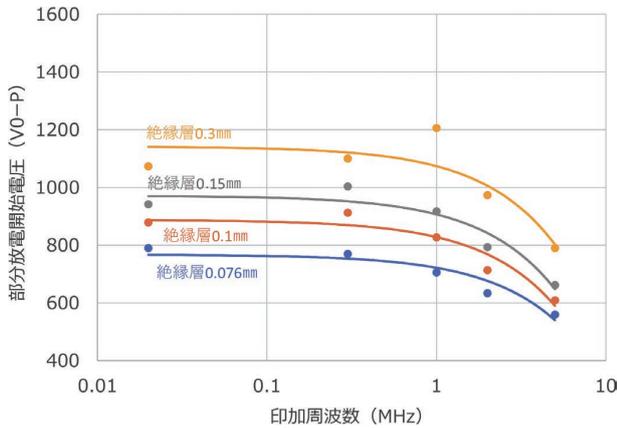


図 11 518.60hPa (高所高温) の部分放電開始電圧

5.2 部分放電発生位置

部分放電による発する UV 光の観察を行った。図 12 は実験サンプルの L1 層先端部分の部分放電を撮影したものである。図 12 より、電界 CAE による電界集中箇所 (図 5 参照) と同じ位置で部分放電が発生していることが観察できる。

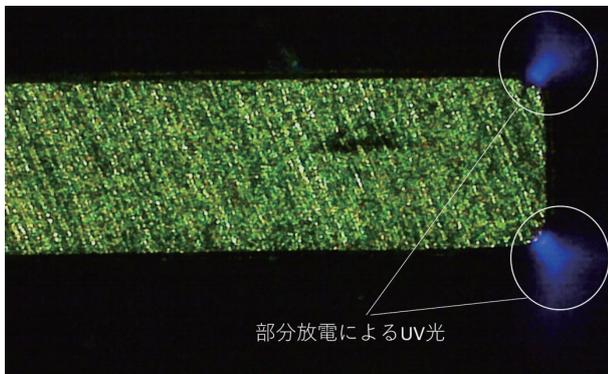


図 12 部分放電の UV 写真

5.3 MHz 帯の部分放電による絶縁破壊

絶縁層厚み 0.076mm 厚のサンプルに 1MHz で部分放電開始電圧を連続印加した。結果、おおよそ 100 秒程度で絶縁破壊した。その後、絶縁破壊後のプリント配線板表面を観察した。観察結果を図 13 に示す。図 13 より、部分放電が発生している場所において、FR4 部分に孔が空いていることがわかる。

1MHz のような高周波であると、部分放電のみで 100 秒以内で容易に絶縁破壊に至った。

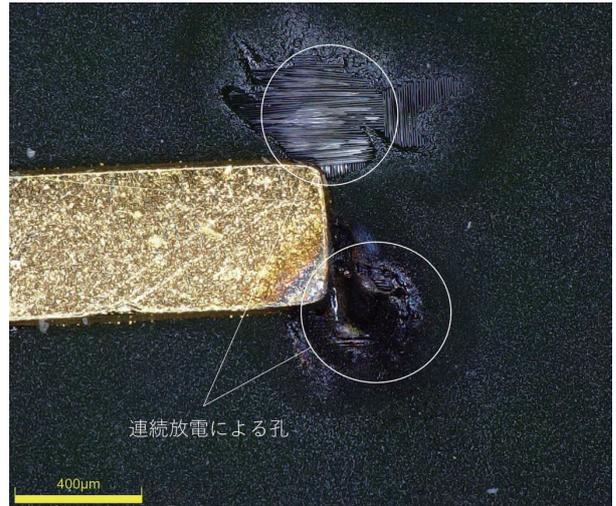


図 13 1MHz 連続放電による FR4 部分の孔

6. 電界 CAE 解析への周波数特性の反映

実験結果より、プリント配線板を考慮したパッシェンの法則においては、次のことが分かった。①気圧と周波数は独立である。②放電開始電圧は周波数の 1 次関数になる (100kHz ごとに 0.7%程度低下)。以上より、高周波領域までを含むパッシェンの法則は、周波数に依存した補正係数を加味することで算出できると推測した (5MHz まで)。そこで、電界 CAE 解析と周波数影響を加味したパッシェンの法則を元に部分放電開始電圧を推定した。絶縁層厚み 0.076µm の例を図 14 に示す。

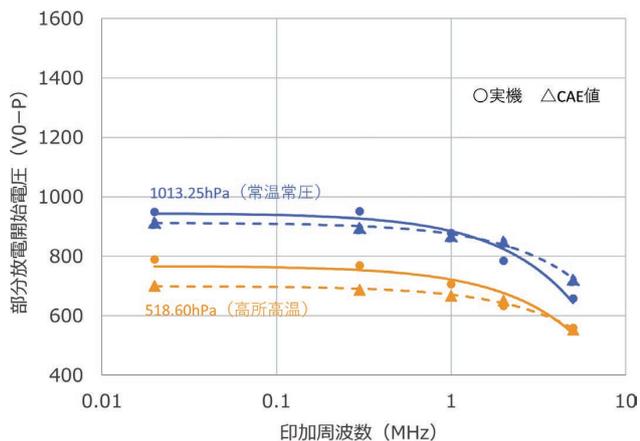


図 14 電界 CAE 解析と周波数補正による部分放電開始電圧

CAE による推定値と測定値の定性的傾向は一致している。誤差は他の絶縁層厚みも含め、最大 30%程度であり、部分放電開始電圧の予測は可能といえる。

低周波側における誤差原因の一つとして、実験サンプルの形状精度が挙げられる。プリント配線板の Cu パターン形状はエッチングにより作製するため、表面には微視的な凹凸がある。また、絶縁層厚みにもばらつきがある。そのため、電界分布が変化し推定値と測定値の違いに現れると推測する。

7. 考察

今回実験評価を行ったプリント配線板では、周波数増加に伴い部分放電開始電圧が線形的に減少した (5MHz まで)。前述した球電極では、1MHz 程度まで部分放電開始電圧が減少し、その後増加に転じていた。その違いについて考察する。

放電は前述したように原子の電離が関係する。高周波交流電圧が電極に印加されると、 α 作用で電離された質量の大きいイオンの一部が電界の変動に追従できず電極間にトラップされる。そのため、低周波と同電圧においても、電極間の電界を大きく歪ませ、局所的に電位差を大きくする。結果、高周波では、放電開始電圧が低下する。また、より高周波になると、多数のイオンが電極間にトラップされ、 γ 作用が低下し、放電開始電圧は上昇する^{7,12)}。

以上の現象は平等電界におけるイオンの運動のため、実際は電極間距離と電界の状態に大きな影響を受ける。

球電極における電極間の電界は平等電界であるため、理論に近い動きをしていると考えられる。対して、プリント配線板では、Cu パターンと絶縁層間が不平等電界であり、場所ごとにイオンの動きが異なると考えられる。そのため、球電極とプリント配線板では部分放電開始電圧の周波数依存性が異なるのではないかと推測する。

8. むすび

近年の電力変換機器の高周波化や高電力化に伴い、多層のプリント配線板における絶縁破壊リスクが増大している。リスクに対応するため、高周波域への対応も含めた部分放電発生部位および部分放電開始電圧の予測技術が必要であった。

従来、ツイストペアや球電極などの簡易形状には電界 CAE 解析と理論から部分放電開始電圧を予測する試みはあるが、プリント配線板、特に高周波領域を含む予測技術はなかった。

本稿では、多層のプリント配線板を想定し、絶縁層を挟んだ上下銅パターン間の部分放電現象、特に高周波領域 (MHz 帯含む) の予測技術の検討を行った。

検討の結果、電界 CAE 解析により部分放電開始電圧と放電部位を明確化するとともに、高周波領域までの補正係数を導出し、5MHz まで部分放電開始電圧を予測できるようにした。また、高周波では短時間で絶縁破壊を確認した。

本検討により、電力変換器の高電力密度化に伴う品質リスクを先行的に把握することが可能となった。

また、今後も沿面放電も含む、別のパターン形状との比較や予測精度向上を行っていく。

品質技術室では本結果を踏まえ、パワエレ製品の多層プリント配線板設計基準を策定中である。品質技術室は、このような、製品トレンドや技術トレンドに基づく先行的な品質リスク検討を行っており、今後も継続的に活動していく予定である。

参考文献

- 1) 経済産業省. “2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略”. 経済産業省 HP. 2021-09-03. https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/index.html. (参照 2023-01-20).
- 2) 高橋良和, 遠藤哲郎. 最新パワーデバイスとパワエレ集積化技術. エレクトロニクス実装学会誌. 2021, Vol.24, No.3, p.215-225.
- 3) 電子部品・実装技術委員会. 電子部品と実装技術における現状と今後の展望. エレクトロニクス実装学会誌. 2019, Vol.22, No.1, p.28-32.
- 4) 電気学会. JEC-0401. 1990.
- 5) 岡本幸雄. プロセスプラズマの基礎. 真空学会誌. 2016, Vol.59, No.7, p.161-170.
- 6) 武藤大介, 池田佳祐, 冨澤恵一, 福田秀雄, 小迫雅裕, 疋田政幸. 気泡入りエナメル皮膜を適用した巻線の部分放電特性. 古河電工時報. 2019, Vol.138, p.46-53.
- 7) 電気学会放電ハンドブック出版委員会編. 放電ハンドブック 上巻. 第 3 版, オーム社, 2003, 529p., ISBN4-88688-308-6.
- 8) 日本工業規格. JIS C 62477-1 附属書 F. 2017.
- 9) 井関昇. 高分子構造の耐コロナ性, 耐オゾン性. 高分子.

1961, Vol.10, No.8, p.693-697, 692.

- 10) 金田輝男. 気体エレクトロニクス. 初版, コロナ社, 2003, 226p., ISBN4-339-00745-5.
- 11) 山本修, 濱田昌司. 高電圧工学. 第1版, オーム社, 2013, 235p., ISBN978-4-274-21444-8.
- 12) 武田進. 気体放電の基礎. 第2版, 東明社, 1975, 185p.

執筆者紹介



博田 知之 HAKATA Tomoyuki

グローバル購買・品質・物流本部
品質技術室 工程品質技術部
専門：機械工学、磁気設計
技術士（金属部門）



佐藤 博 SATO Hiroshi

グローバル購買・品質・物流本部
品質技術室 製品品質技術部
専門：電子回路

AICOT® は、オムロン株式会社の登録商標です。
本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

サーボドライブシステムにおける高周波漏れ電流による伝導ノイズの解析手法検討

濱名 建太郎, 徳崎 裕幸, 上松 武

労働人口の減少、および脱炭素化に向けた生産現場の省エネルギー化が、社会的に大きな課題となっている。それに向けて、モータの回生電力を有効活用する方法が提案されており、サーボドライブのDC給電化が期待されている。一方で、現在主流のAC給電システムと比較し、サーボドライブDC給電システムは、サーボドライブが発生したノイズが他のサーボドライブに回り込みやすく、誤動作の問題が懸念される。特に、サーボドライブとモータ間のシールドケーブルからの高周波漏れ電流による伝導ノイズが問題となる。この伝導ノイズは、サーボドライブの開発期間長期化の要因となることから、開発上流工程で対策検証できる解析手法が必要である。

本論文では、サーボドライブの開発期間短縮を目的として、将来のDC給電システムへの展開を視野に入れた、AC給電システムにおけるシールドケーブルからの高周波漏れ電流が系統や他機器へ与える影響を評価可能な伝導ノイズ解析手法を検討した。本手法により、サーボドライブシステムに対して、シールドケーブルのケーブル長・軸数を変更したときの伝導ノイズの変化傾向を再現した。

Study of Analysis Method for Conducted Noise Caused by High Frequency Leakage Current for Servo Drive Systems

HAMANA Kentaro, TOKUSAKI Hiroyuki and UEMATSU Takeshi

The declining working population and the energy saving of production sites for decarbonization have become major social issues. Toward this end, methods to effectively utilize the regenerative power of motors have been proposed, and DC powering of servo drives is expected to achieve this. On the other hand, compared to the current mainstream AC-powered systems, DC-powered servo drive systems tend to cause noise generated by one servo drive to be circulated to other servo drives, which raises concerns about malfunctioning problems. In particular, conducted noise caused by high-frequency leakage current from the shielded cable between the servo drive and the motor is a problem. Since this conducted noise is a factor that prolongs the product development period of servo drives, an analysis method that can study solutions upstream of the development process is needed.

In this paper, we investigate a conducted noise analysis method that can evaluate the effects of high-frequency leakage current from shielded cables on the power system and other equipment in an AC power supply system, with a view to future DC power supply systems, in order to shorten the development period of servo drives. Using this method, the phenomenon of conducted noise was reproduced for a servo drive system when the cable length and number of axes of the shielded cable were changed.

1. まえがき

近年、労働人口の減少により、生産現場へのロボットの導入が求められている。一般的に、ロボットには数軸から数十軸の同期性と高速高精度制御を備えたサーボドライブ

と電動機（モータ）が採用される。一方で、脱炭素化に向けた社会的な要請から、生産現場の省エネルギー化が大きな課題となっている。産業用モータによる年間の電力消費量は、産業部門の消費電力量の約75%を占めると推計されており¹⁾、省エネルギー化に向けて、モータの回生電力を有効活用する方法が提案されている²⁾。

Contact : HAMANA Kentaro kentaro.hamana@omron.com

その具体的な方法の一つとして、現在は AC 給電が主流であるサーボドライブの DC 給電化が検討されている³⁾。図 1 にサーボドライブ AC 給電システムと DC 給電システムの構成を示す。

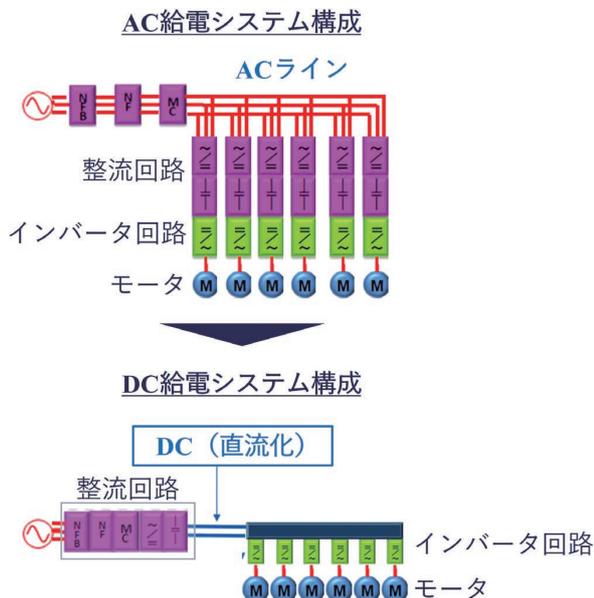


図 1 サーボドライブ AC 給電システムと DC 給電システム

AC 給電システムは、サーボドライブ 1 台に整流回路とインバータ回路が搭載され、サーボドライブ 1 台にモータ 1 台が接続される構成である。数軸～数十軸の多軸のサーボドライブとモータが、AC ラインに並列接続される。これに対し、DC 給電システムは、整流回路が集約された構成である。整流回路による AC/DC 変換後の DC バスに多軸のインバータ回路とモータが並列接続される。

DC 給電システムは、回生電力の有効活用に加え、小型化が可能で、軸数増加にも有利な構成であるといえる。一方で、インバータ回路が整流回路を介さず、DC バスに並列接続されるため、AC 給電システムよりもインバータ回路から発生した電磁ノイズが他のインバータ回路に回り込みやすく、誤動作の問題が懸念される。このノイズ対策は、商品開発期間長期化の要因となる課題であることから、開発上流で検証できる解析手法が必要である。具体的には、解析を活用して、ノイズフィルタ構成や共振対策を検討する。

サーボドライブの AC 給電システムと DC 給電システムの回路構成要素は共通であり、AC 給電システムに対して構築した解析手法は、DC 給電システムにも展開可能である。よって、本論文では、DC 給電システム検討の前段階として、AC 給電システムを検討対象とする。

モータの高速高精度な位置・速度・トルク制御のために、サーボドライブのインバータ回路にはパワー半導体素子を用いた PWM インバータが採用される。近年、パワー半導体素子に、炭化ケイ素 (SiC) や窒化ガリウム (GaN)

のような次世代パワー半導体の採用が進められており、PWM インバータのキャリア周波数の高周波化が進んでいる。この高周波化に伴い、サーボドライブとモータ間のケーブルおよびモータの浮遊容量を通して接地線 (GND) に流れる高周波漏れ電流の増加による電磁ノイズの問題が指摘されている⁴⁾。

これまで、PWM インバータのスイッチングによりモータ巻線の浮遊容量を通して接地線に流れる高周波漏れ電流について、定量的な理論検討が行われ、等価回路モデルが示されている⁴⁾。この高周波漏れ電流により生じる電磁ノイズ現象の 1 つに雑音端子電圧がある。PWM インバータが発生する雑音端子電圧をシミュレーションにより定量的に推定する手法が提案されている^{5,6)}。

この雑音端子電圧は、インバータのスイッチングに伴うコモンモード電圧の変動に起因して、モータの固定子巻線-GND 間の浮遊容量を流れる漏洩電流によるコモンモードノイズが主要因であることが示されている^{5,7)}。また、このコモンモードノイズの周波数帯域は数 MHz 以下であり、主に 1 MHz 帯まで支配的であることが示されている⁷⁾。

近年、低圧インバータにおいて、サーボドライブとモータ間のケーブルにシールドケーブルが採用されることが主流になってきている。シールドケーブルは、モータ動力線と外部シールド (GND) 間に大きな浮遊容量が生じることから、高周波漏れ電流が大きくなることが知られている。一般的に、生産現場のロボットにサーボドライブシステムが採用される場合、サーボドライブとモータの軸数およびケーブル長が増加する傾向がある。このため、シールドケーブルが多軸化・長尺化したときの高周波漏れ電流が系統や他の機器に与える影響を評価することが重要である。

低圧インバータへのシールドケーブル適用について、コモンモードノイズの観点から検討されている⁸⁾。一方で、シールドケーブルの高周波漏れ電流が系統に与える影響 (= 雑音端子電圧) や軸数・ケーブル長の増加によるノイズの増加傾向を評価できるモデルは示されていない。

本論文では、サーボドライブシステムの開発期間短縮を目的として、AC 給電システムの伝導ノイズ解析手法を検討する。特に、1.5MHz までの周波数帯域において、サーボドライブシステム共通の問題であるシールドケーブルからの高周波漏れ電流が、系統や他機器へ与える影響を評価可能な解析手法を示す。本手法により、既存のサーボドライブ AC 給電システムに対して、シールドケーブルのケーブル長・軸数を変更したときの雑音端子電圧の変化傾向を再現した。

2. 伝導ノイズ解析手法

2.1 サーボドライブ AC 給電システムの構成

図 2 に、サーボドライブ AC 給電システムの回路図を示す。

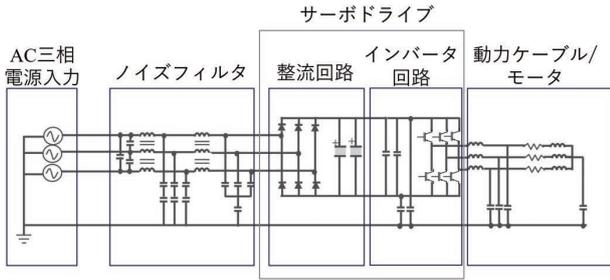


図2 サーボドライブ AC 給電システムの回路図

図2において、三相交流電源側（系統）への伝導ノイズの流出を防止するためのノイズフィルタがあり、その後段の整流回路により交流入力が直流に変換される。次に、直流をインバータ回路のスイッチングにより三相のPWM波形に変換し、動力ケーブルを通して、モータ（負荷）に供給する。

2.2 シミュレーションモデル

サーボドライブ AC 給電システムの伝導ノイズ解析モデルを図3に示す。なお、回路シミュレータはPSIM（Altair社）を用いる。

表1に、主要なシミュレーション条件を示す。

表1 主要シミュレーション条件

項目	パラメータ
電源入力	3 Φ AC 240 V/50 Hz
出力電力	200 W
ノイズフィルタ	FSB-30-254-HU（コーセル社）
整流回路	ダイオード整流
平滑回路	電解コンデンサ
キャリア周波数	8 kHz
動力ケーブル	シールドケーブル

このモデルをシミュレーションすることにより雑音端子電圧を評価する。これまで、インバータが発生する雑音端子電圧のモデルは、複数報告されている^{5,6)}。本報告におけるモデルの基本構成はそれらの文献を基本としており、ここでは概要のみ述べる。

雑音端子電圧は、LISN（疑似電源回路網）を交流電源とサーボドライブの間に接続し、LISNのハイパスフィルタを通して雑音端子測定用端子から出力されるノイズ電圧を測定する。本モデルでは、LISNを等価回路としてモデル化している。図4に、LISNの等価回路モデルを示す。

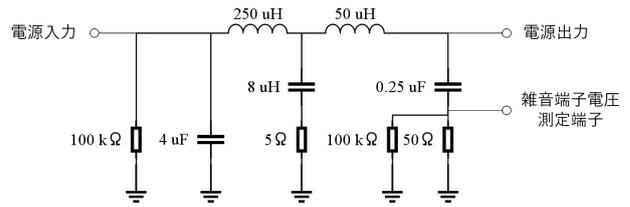


図4 LISN 等価回路モデル（1相）

雑音端子電圧は150 kHz～30 MHzの周波数帯で伝導ノイズを評価するため、受動部品および基板パタンの等価回路モデルはその帯域でのインピーダンス特性を再現する必要がある。図5に、受動部品の等価回路モデルを示す。

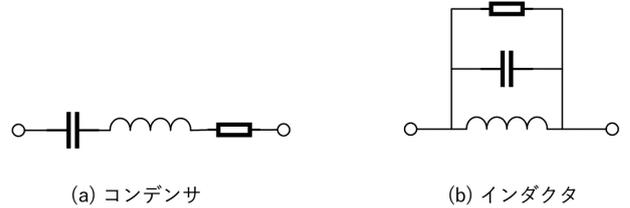


図5 受動部品の等価回路モデル

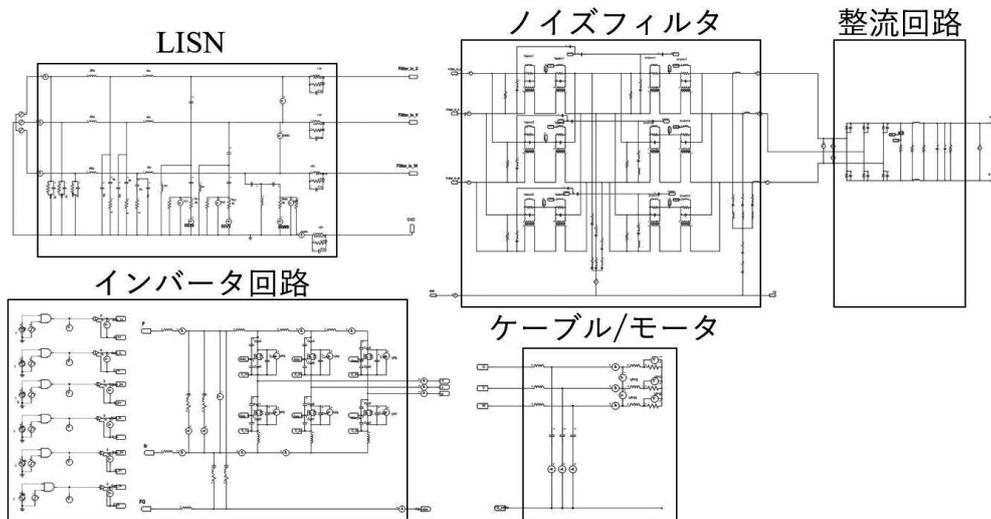


図3 伝導ノイズシミュレーションモデル

等価回路モデルの回路定数は、ネットワークアナライザで測定した受動部品のインピーダンス周波数特性から算出できる。また、基板パタンの等価回路モデルは、パタン長からの簡易計算または電磁界シミュレーションで算出できる。

3. シールドケーブルの高周波漏れ電流モデル化

3.1 モデル化の方針

サーボドライブのインバータ回路が発生する伝導ノイズの主要因は、インバータのパワー半導体素子と接続されたモータ巻線やケーブルなど機構部品と GND 間の浮遊容量を通して流れる高周波漏れ電流によるコモンモードノイズである。特に、ケーブルがシールドケーブルである場合、配線と GND に接地されたシールドの間に数 10 nH オーダの大きな浮遊容量が生じ、コモンモードノイズの主要な伝搬経路となる。これは、モータ巻線と GND 間の浮遊容量より 1 桁大きな値である。シールドケーブルの浮遊容量はケーブル長に比例するため、今後のサーボドライブとモータの軸数とケーブル長の増加に伴い、浮遊容量がより増加すると考えられる。以上より、シールドケーブルの長さや軸数の変更に対するコモンモードノイズの増減と周波数特性を再現することをモデル化の方針とする。

高周波漏れ電流によるコモンモードノイズは 1 MHz 帯までが支配的である⁷⁾。よって、本検討では 1.5 MHz までを評価対象とする。シールドケーブルは一般的に分布定数回路でモデル化される。ケーブルモデルを分布定数回路とするか、集中定数回路とするかは周波数とケーブル長の関係により決まり、その境界は明確ではないが、経験則よりケーブル長が 1/4 波長となる周波数が、集中定数と見なせる上限の周波数と言われている。一般的なサーボドライブシステムで用いられる最大ケーブル長は 50m であるので、本検討ではケーブル長の上限を 50m とする。これは、1.5 MHz の 1/4 波長に相当するので、本検討ではケーブルを集中定数回路でモデル化できると仮定する。ケーブルモデルを集中定数回路で表せれば、ノイズ解析の見通しが良くなり、特にノイズ伝導経路の解析において有用である。

3.2 スイッチング動作

シールドケーブルの配線とシールド間の浮遊容量を通して GND に流れる高周波漏れ電流は、インバータのスイッチングに伴うコモンモード電圧変動に起因する。したがって、コモンモード電圧変動が最大になるスイッチング動作の時、高周波漏れ電流は最大となる。伝導ノイズシミュレーションモデルにおいて、インバータのスイッチング波形はコモンモード電圧変動が最大となるスイッチング波形とした。

インバータのスイッチングに伴うコモンモード電圧は(1)式で表される。

$$v_{CM} = \frac{v_u + v_v + v_w}{3} \tag{1}$$

v_u, v_v, v_w : インバータの各相電圧
 v_{CM} : コモンモード電圧

コモンモード電圧 v_{CM} の振幅が最大となるのは、サーボロック動作のときであり、この動作時の雑音端子電圧で議論をすすめる。図 6 にインバータ回路を、図 7 にインバータのサーボロック動作を示す。

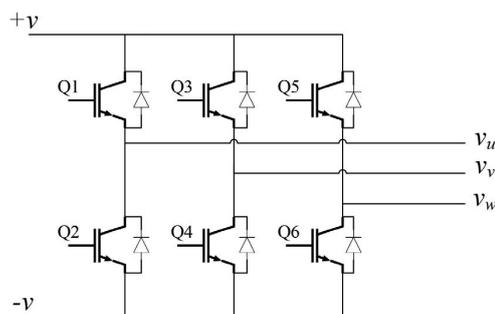
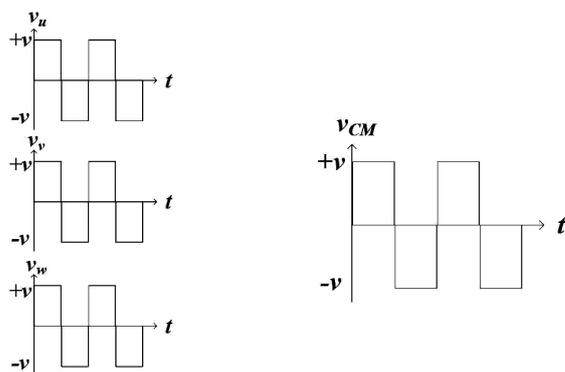


図 6 インバータ回路



(a) インバータの各相電圧 (b) コモンモード電圧

図 7 インバータのサーボロック動作

3.3 ケーブル長・軸数に対するノイズ増減の再現

これまで、同一の電源に並列接続された複数台のインバータを同時動作したときに発生する伝導ノイズに関する理論検討がなされている^{9,10)}。同一の電源にインバータが複数台並列接続される構成は、サーボドライブとモータが多軸化されたシステムと同等の構成であり、シールドケーブルの浮遊容量はインバータ並列台数(軸数)に比例して増加する構成である。一方で、いずれの報告においても、ノイズフィルタを含まないモデルでの理論検討がなされており、ノイズフィルタを含んだ場合の軸数に対する雑音端子電圧の理論式は示されていない。そこで、本論文では、まずノイズフィルタを含む場合における雑音端子電圧について理論式を導出し、ケーブル長および軸数と雑音端子電圧の関係式を明らかにする。

図 8 に、図 2 に示したサーボドライブ AC 給電システムのコモンモード等価回路を示す。

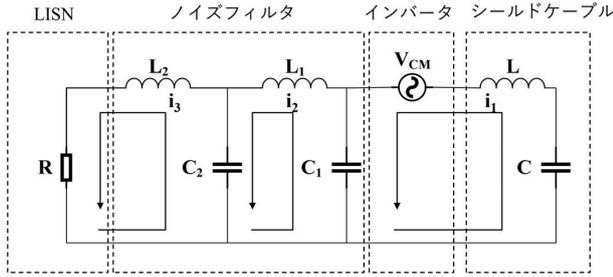


図8 コモンモード等価回路

図8は、文献⁹⁾に示されたコモンモード等価回路にノイズフィルタを追加したものである。実際のコモンモード等価回路は、配線や素子の寄生インピーダンスを模擬する必要があるが、理論解析の簡易化のため主要なコモンモード成分のみを考慮した。雑音端子電圧の低周波数帯域(150 kHz~300 kHz程度)においては、寄生インピーダンスの影響が小さいため、図8の等価回路が適用できると考えられる。一方で、より高周波帯域では、共振によるノイズ増幅が問題となるため、配線や素子の寄生インピーダンスを含めた解析が必要となる。

ここで、 v_{CM} はコモンモード電圧、 $i_1 \sim i_3$ は各部を流れるコモンモード電流を表す。ノイズフィルタは2段のLCフィルタとし、 L_1 と L_2 はコモンモードインダクタンス、 C_1 と C_2 はコンデンサ容量を表す。シールドケーブルについては、ここではケーブル長固定とし、配線のインダクタンスを L 、配線とシールド間の浮遊容量を C で表す。 R をLISNの雑音端子電圧測定用の抵抗とすると、雑音端子電圧 v は(2)式で表される。

$$v = Ri_3 \quad (2)$$

よって、 i_3 が求めれば雑音端子電圧の理論式が導出できる。図4のコモンモード等価回路の $i_1 \sim i_3$ についての閉路方程式は(3)式で表される。

$$\begin{bmatrix} j\omega_n L + \frac{1}{j\omega_n C} + \frac{1}{j\omega_n C_1} & -\frac{1}{j\omega_n C_1} & 0 \\ -\frac{1}{j\omega_n C_1} & j\omega_n L_1 + \frac{1}{j\omega_n C_1} + \frac{1}{j\omega_n C_2} & -\frac{1}{j\omega_n C_2} \\ 0 & -\frac{1}{j\omega_n C_2} & R + j\omega_n L_2 + \frac{1}{j\omega_n C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Cn} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

(3)式中の V_{Cn} は、コモンモード電圧 v_{CM} をフーリエ級数で表したときの、スイッチング周波数を基本周波数とする高調波成分の実効値である。ここで、 n は高調波の次数を表し、 ω_n は n 次高調波の角周波数を表す。(3)式において、ノイズフィルタの回路定数を $L_1 = L_2 = 7 \text{ mH}$ 、 $C_1 = 0.11 \mu\text{F}$ 、

$C_2 = 0.05 \mu\text{F}$ とすると、 $f = 150 \text{ kHz}$ のとき、 $\omega L_1 = \omega L_2 = 1050 \Omega$ に対し、 $1/j\omega C_1 = 9.6 \Omega$ 、 $1/j\omega C_2 = 21 \Omega$ となる。このとき、 $\omega L_1 \gg 1/j\omega C_1$ 、 $\omega L_2 \gg 1/j\omega C_2$ より、 $i_1 \gg i_2$ 、 $i_2 \gg i_3$ となるので、(3)式は(4)式で近似できる。

$$\begin{bmatrix} j\omega_n L + \frac{1}{j\omega_n C} + \frac{1}{j\omega_n C_1} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{j\omega_n C_1} & j\omega_n L_1 + \frac{1}{j\omega_n C_2} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{j\omega_n C_2} & R + j\omega_n L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Cn} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

(4)式を i_3 について解けば、(2)式より雑音端子電圧が求まる。 n 次高調波の雑音端子電圧 V_n は(5)式となる。

$$V_n = \frac{C}{(C_1 + C - \omega_n^2 L C C_1)} \frac{1}{(\omega_n^2 C_1 C_2 - 1)} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_n L_2}{R}\right)^2}} V_{Cn} \quad (5)$$

(5)式において、ケーブル長および軸数が影響するのは、右辺の第1項のみである。ここで、シールドケーブルのケーブル長を l 、軸数を N 、単位長さ当たりの浮遊容量を C_s 、単位長さ当たりの配線インダクタンスを L_s とする。ここで、並列接続されたすべての軸の動作条件、およびケーブル長が同一であると仮定すると、(5)式中の C は $NC_s l$ 、 L は $L_s l / N$ で置き換えられる⁹⁾。(5)式右辺第1項より、雑音端子電圧は(6)式で表される $V_n(l, N)$ に比例する。

$$V_n(l, N) = \frac{NC_s l}{C_1 + NC_s l - \omega_n^2 C_1 L_s C_s l^2} \quad (6)$$

(6)式から、1軸のサーボドライブシステムにおいてケーブル長が l_1 から l_2 に変化したときの、雑音端子電圧の変化量は(7)式で表される。

$$\frac{V_n(l_2, 1)}{V_n(l_1, 1)} = \frac{l_2 C_1 + C_s l_1 - \omega_n^2 C_1 L_s C_s l_1^2}{l_1 C_1 + C_s l_2 - \omega_n^2 C_1 L_s C_s l_2^2} \quad (7)$$

同様に(6)式から、サーボドライブシステムの軸数が1軸から N 軸に変化したときの、雑音端子電圧の変化量は(8)式で表される。

$$\frac{V_n(l, N)}{V_n(l, 1)} = N \frac{C_1 + C_s l - \omega_n^2 C_1 L_s C_s l^2}{C_1 + NC_s l - \omega_n^2 C_1 L_s C_s l^2} \quad (8)$$

(7)(8)式の右辺に着目すると、右辺分母の第2項にもシールドケーブルの長さ l と軸数 N のパラメータが含まれる。このことから、ノイズフィルタのコンデンサ容量 C_1 に対して、浮遊容量が無視できない程度に大きくなる場合、雑音端子電圧はケーブル長や軸数に比例しなくなることが分かる。

次に、伝導ノイズシミュレーションにおけるシールド

ケーブルのケーブル長と軸数に対する雑音端子電圧の変化について理論式と比較を行う。図9に、伝導ノイズシミュレーションにおけるシールドケーブルとモータモデルを示す。

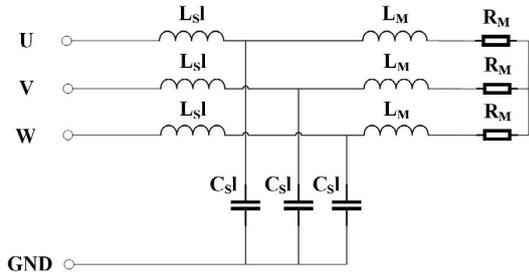


図9 シールドケーブルおよびモータモデル

図9において、 L_M と R_M はそれぞれモータの巻線インダクタンスと巻線抵抗を示している。本検討においては、シールドケーブルからの高周波漏れ電流に着目するため、モータと GND 間の浮遊容量は考慮していない。

図10、図11にそれぞれケーブル長および軸数を変化させたときの雑音端子電圧 (152 kHz) について、理論値と図3のモデルによるシミュレーション値の比較結果を示す。

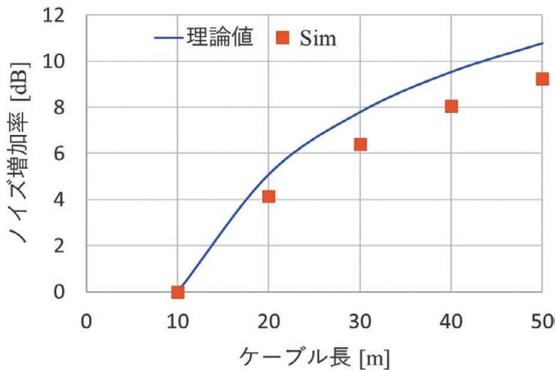


図10 ケーブル長に対する雑音端子電圧の変化

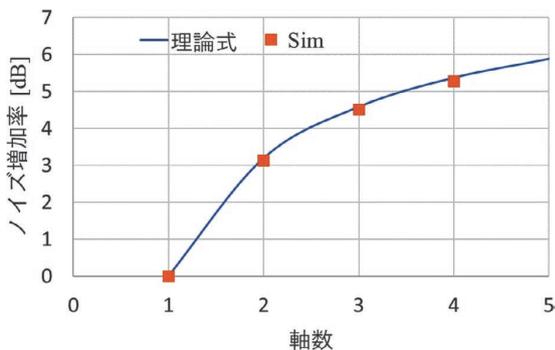


図11 軸数に対する雑音端子電圧の変化

ここで 152 kHz は、コモンモード電圧の 19 次高調波に対応し、雑音端子電圧で対象とする周波数帯における最小奇数次数である。図10は、1軸のサーボドライブシステム

において、ケーブル長 10 m を基準として、ケーブル長を変化させたときの雑音端子電圧増加率の理論値とシミュレーション値を示している。図11は、ケーブル長を 50 m 固定として、ノイズフィルタに接続するサーボドライブの軸数を 1 軸から変化させたときの雑音端子電圧増加率の理論値とシミュレーション値を示している。図10、図11から、ケーブル長および軸数に対する雑音端子電圧増加率は、理論値とシミュレーション値ともに比例しておらず、伝導ノイズシミュレーションはノイズ増減傾向を再現できているといえる。また、図11から、軸数に対する雑音端子電圧増加率は、理論値とシミュレーション値で良く一致していることがわかる。一方で、図10において、基準ケーブル長を 10 m としたときの、ケーブル長に対する雑音端子電圧の増加率は、理論値とシミュレーションで誤差が生じている。これは、理論式では主要なコモンモード成分のみを考慮したが、シミュレーションでは基板・素子の寄生成分も考慮しているためと考えられる。

この結果から、ケーブル長に対する雑音端子電圧の変化をより正確に予測するためには、素子や基板などの寄生インピーダンスを含めた解析が必要であることがわかる。

3.4 ケーブル長に対する周波数特性の再現

インバータの出力配線にシールドケーブルが適用された場合、ケーブルの寄生インピーダンスによりコモンモードの共振が生じることが報告されている⁷⁾。ケーブルの寄生インピーダンスによる共振は、特定の周波数(共振周波数)で高周波漏れ電流を増幅するため、高周波漏れ電流がシステムや他機器へ与える影響を評価する上で、その周波数特性を再現することが重要である。図12に、ケーブルの寄生インピーダンスによるコモンモード共振を解析するためのコモンモード等価回路を示す。

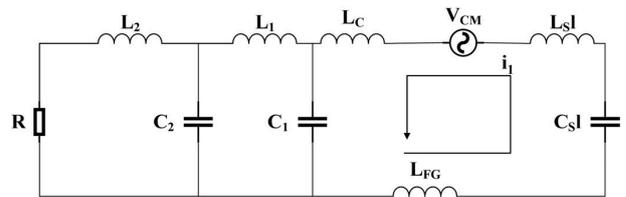


図12 共振解析に用いたコモンモード等価回路

図12は、図8のコモンモード等価回路に、 L_C と L_{FG} を追加したものである。図12において、 L_C は基板および配線のインダクタンス、 L_{FG} は GND のインダクタンスを表す。また、シールドケーブルの長さを l 、単位長さ当たりの浮遊容量を C_s 、単位長さ当たりの配線インダクタンスを L_s とする。ケーブルの寄生インピーダンスによるコモンモード共振は、図12中のコモンモード電流 i_1 のループにおける LC 直列共振である。よって、共振周波数 f_r の理論式は(9)式で近似される。

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{C_1 C_s l}{C_1 + C_s l}(L_s l + L_{FG} + L_c)}} \quad (9)$$

共振周波数とはノイズの周波数特性におけるピーク値のことである。(9)式において、 C_1 、 C_s 、 L_s 、 l は設計値であり既知のパラメータである。また、 L_c は基板および配線構造から簡易計算により算出可能である。よって、 L_{FG} が未知のパラメータとなる。 L_{FG} は、シールドケーブルのシールドと接地線のインダクタンスの和となる。ここで、接地線はノイズフィルタとサーボドライブ間の配線が支配的であり、インダクタンスは既知である。シールドの単位長さ当たりのインダクタンスは未知であるが、シールドケーブルの構造から単位長さ当たりの配線インダクタンスの1/2で近似した。(10)式に L_{FG} の近似式を示す。

$$L_{FG} = L_g + \frac{L_s l}{2} \quad (10)$$

L_g ：接地線の配線インダクタンス

図13に、図3の伝導ノイズシミュレーションにおいてケーブル長を変化させたときに雑音端子電圧に生じる共振周波数と、理論式の比較結果を示す。

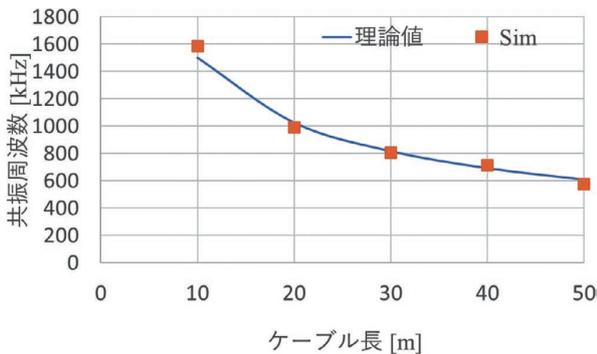


図13 ケーブル長に対する共振周波数の変化

図13から、シミュレーションの共振周波数は、理論値と良く一致していることがわかる。伝導ノイズシミュレーションにより共振周波数を評価できれば、ノイズのメカニズム分析に有効であり、対策検討の一助となる。

4. 解析手法の評価結果

4.1 ケーブル長に対するノイズ増減の評価結果

サーボドライブ AC 給電システムの雑音端子電圧の測定結果との比較により、伝導ノイズシミュレーションの妥当性評価を行った。表2に、評価対象のサーボドライブ AC 給電システムの主要パラメータを示す。

表2 評価対象の主要パラメータ

項目	パラメータ
電源入力	3 Φ AC 240 V/50 Hz
出力電力	100 W
ノイズフィルタ	FSB-30-254-HU (コーセル社)
整流回路	ダイオード整流
平滑回路	電解コンデンサ
キャリア周波数	16 kHz
動力ケーブル	シールドケーブル C: 460 pF/m L: 21 nH/m

表2において、シールドケーブルの単位長さ当たりの容量CとインダクタンスLは実験で使用したケーブルのメーカによる測定値である。図14に、1軸のサーボドライブ AC 給電システムのケーブル長を変化させたときの雑音端子電圧測定結果を示す。

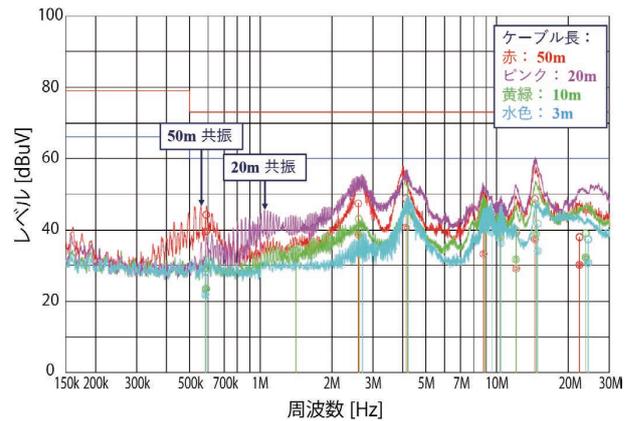


図14 雑音端子電圧測定結果 (1軸)

本検討では、シールドケーブルからの高周波漏れ電流の影響について評価するため、図14において、シールドケーブルの浮遊容量が支配的と考えられるケーブル長10、20、50 mについて評価した。図15に、ケーブル長10 mを基準としたケーブル長に対する雑音端子電圧 (176 kHz) について、測定値とシミュレーションの比較結果を示す。

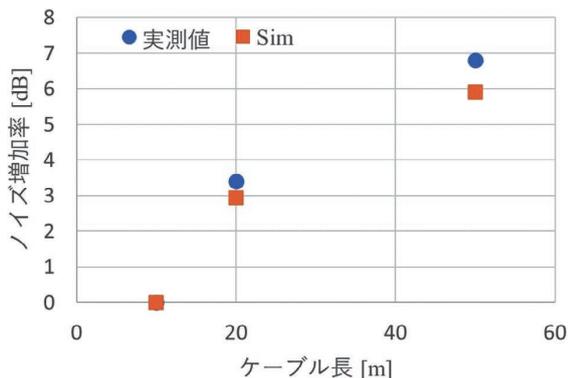


図 15 ケーブル長に対する雑音端子電圧の変化

図 15 から、ケーブル長に対する雑音端子電圧増加率は、測定値とシミュレーションで誤差は ≤ 1 dBであり、良く一致していることがわかる。この結果から、伝導ノイズシミュレーションは、ケーブル長によるノイズ増減を再現できているといえる。

4.2 ケーブル軸数に対するノイズ増減の評価結果

次に、ノイズフィルタに並列接続するサーボドライブシステムの軸数を変化させた場合の、測定値とシミュレーション値の比較を行った。図 16 に、1 軸および 3 軸のサーボドライブ AC 給電システムの雑音端子電圧測定結果を示す。

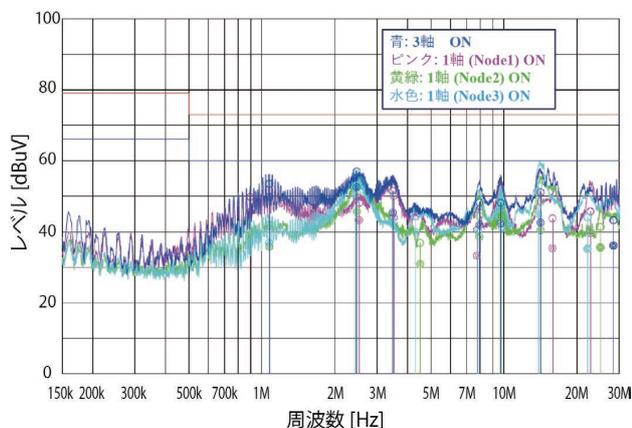


図 16 ケーブル長に対する雑音端子電圧の変化

図 16 は、ケーブル長を 20 m で固定し、3 軸のサーボドライブを 1 軸ずつ動作させたとき、および 3 軸同時に動作させたときの雑音端子電圧の測定値である。図 16 から、1 軸に対する 3 軸の雑音端子電圧 (176 kHz) の増加率は、7.3 dB である。これに対し、シミュレーション結果は 6.6 dB であり、測定値とシミュレーション値は一致しているといえる。この結果から、伝導ノイズシミュレーションは軸数によるノイズ増減を再現できているといえる。

4.3 ケーブル長に対する周波数特性の評価結果

図 17 に、ケーブル長を変化させたときに雑音端子電圧に生じる共振周波数について、図 14 の雑音端子電圧 (1 軸) における測定値とシミュレーションの比較結果を示す。

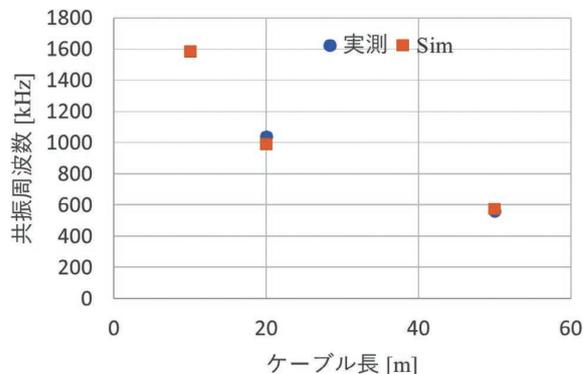


図 17 ケーブル長に対する共振周波数の変化

測定結果において、ケーブル長 10 m では明確な共振のピークが確認できなかったため、測定値はケーブル長 20 m と 50 m の結果のみを示している。図 17 から、シミュレーションの共振周波数は、測定値と良く一致していることがわかる。この結果から、伝導ノイズシミュレーションは、ケーブル長に対する雑音端子電圧の周波数特性を再現できているといえる。

5. むすび

本論文では、サーボドライブの開発期間短縮を目的として、シールドケーブルからの高周波漏れ電流が系統や他機器へ与える影響を評価可能な伝導ノイズ解析手法を検討した。基板・ノイズフィルタの寄生成分および GND のインピーダンスを正確にモデル化することで、伝導ノイズシミュレーションにより、シールドケーブルの長さや軸数に対するノイズの増減や周波数特性を再現できることを示した。結果として、既存のサーボドライブ AC 給電システムに対して、シールドケーブルのケーブル長・軸数を変化したときの雑音端子電圧の変化傾向を再現した。本技術により、開発上流工程でのノイズ対策と設計反映が可能となり、サーボドライブ商品の開発期間短縮に寄与できると考える。

今後は、本技術を多軸のサーボドライブ DC 給電システムに適用し、シールドケーブルからの高周波漏れ電流によるノイズ課題を事前抽出、検証することで、伝導ノイズ解析手法の効果を検証していく。

参考文献

- 1) 環境省. “産業部門（製造業）の指針（対策メニュー）”. 温室効果ガス排出削減等指針. <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/gel/ghg-guideline/industry/measures/view/86.html>, (2023.1.10).
- 2) Yoshikawa, H. “Energy Saving System Trend for Harbor Crane with Lithium Ion Battery”. The 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018-ECCA Asia). 2018, p.219–226.
- 3) 桐淵岳, 財津俊行, 土井昌志, 日下佳祐, 伊東淳一. サーボドライブ DC 給電システムのインピーダンス法による安定性解析. 電学論 D. 2020, Vol.140, No.3, p.184-193.
- 4) 小笠原悟, 藤田英明, 赤木泰文. 電圧形 PWM インバータが発生する高周波漏れ電流のモデリングと理論解析. 電学論 D. 1995, Vol.115, No.1, p.77-83.
- 5) 玉手道雄, 佐々木達未子, 鳥羽章夫. インバータにおける雑音端子電圧のシミュレーションによる定量推定法. 電学論 D. 2008, Vol.128, No.3, p.193-200.
- 6) 嶺岸瞳, 崎山一幸, 山田徹. インバータ電源回路のコモンモードノイズ解析手法の検討. 信学技報. 2012, Vol.112, No.100, EMCJ2012-23, p.14-16.
- 7) 埴岡翔太, 家澤雅宏, 小笠原悟司, 竹本真紹, 折川幸司. 2 モータ駆動システムのコモンモードノイズ抑制制御. 電学論 D. 2021, Vol.141, No.11, p.895-902.
- 8) 土田崇. インバータ出力配線へのシールドケーブルの適用に関する検討. 電学論 D. 2012, Vol.132, No.7, p.718-726.
- 9) 和田圭二, 石塚哲也, 清水敏久. AC モジュール方式系統連系インバータシステムの伝導ノイズとその抑制法. 電学論 D. 2005, Vol.125, No.10, p.911-918.
- 10) 玉手道雄, 鳥羽章夫, 松本康, 和田圭二, 清水敏久. 複数の電力変換装置から構成されるシステムにおける雑音端子電圧低減に適したキャリア位相制御法. 電学論 D. 2011, Vol.131, No.6, p.811-819.

執筆者紹介



濱名 建太郎 HAMANA Kentaro

技術・知財本部

デジタルデザインセンタ

専門：電気電子工学

所属学会：電子情報通信学会



徳崎 裕幸 TOKUSAKI Hiroyuki

技術・知財本部

アドバンステクノロジーセンタ

アドバンステクノロジー開発部

専門：電気工学



上松 武 UEMATSU Takeshi

技術・知財本部

アドバンステクノロジーセンタ

アドバンステクノロジー開発部

専門：電気工学、制御工学

所属学会：電気学会、電子情報通信学会

博士（工学）

PSIM は、米国 Altair Engineering, Inc. の米国およびその他の国における登録商標または商標です。
本文に掲載の名称は、各社が商標としている場合があります。

1

オムロンの成長領域で イノベーションを生み出す技術

— 1. ファクトリーオートメーション —



ation
ine

Temp Min	15.56 C	Date	XX-XX-XXXX	Customer	World
Temp Max	33.94 C	Time	XX:XX	Status	Worki
Temp Ambient	32.13 C	Job	WW25D76	Scale	MAX

CT 型 X 線自動検査装置の視野間連続移動による高速検査技術

七呂 真

高度化する自動車の電子基板に対し、目に見えない部品のはんだ接合部の検査を行うため、我々はこれまでCT方式の X 線自動検査装置を提供してきている。しかし、当社の従来技術である連続撮像制御を搭載した VT-X750-V1/V2 では、検査対象となる視野への撮像系ステージの移動時に、停止と移動を繰り返していたため、加速と制動を行う時間のロスがあった。この問題を解決するため、加速・制動を視野間移動中に行い、視野間移動と連続撮像の連結部で停止しないことで、時間ロスをなくす技術を開発した。その結果、検査の一連動作を一筆書きのように移動することができるようになり、CT 検査の高速化を実現した。本技術により、新商品の VT-X750-V3 では、従来比で 1.5 倍速の検査速度を実現し、顧客の基板進化に追従した高速検査を実現した。本稿では、高速化に大きく寄与したオムロンの X 線自動検査装置における最新技術について紹介する。

High-speed Inspection Technology by Continuous Movement between Fields of View of Automated CT-type X-ray Inspection System

SHICHIRO Makoto

In order to inspect the solder joints of invisible components on increasingly sophisticated automotive electronic circuit boards, we have been providing automated X-ray inspection systems using the CT method. However, our conventional technology, VT-X750-V1/V2 with continuous image capture control, repeatedly stopped and moved the image capture system stage when moving it to the field of view to be inspected, resulting in a loss of acceleration and braking time. To solve this problem, we developed a technology to eliminate this loss by performing acceleration and braking during the movement between fields of view and not stopping at the connection between the movement between fields of view and continuous image capture. As a result, the series of inspection movements can now be performed in a stroke-like motion, thus realizing faster CT inspections. With this technology, the new VT-X750-V3 achieves an inspection speed 1.5 times faster than the previous model, enabling high-speed inspection that keeps pace with the evolution of customer boards. This paper introduces the latest technology in OMRON's X-ray automated inspection systems that has greatly contributed to the higher speed.

1. まえがき

持続可能な社会に向けた SDGs の浸透により、世界中でゼロエミッションへの取り組みが強化されている。それに伴い、地球温暖化防止のための CO2 排出抑制活動が急務となり、EV（電気自動車）の普及が見込まれている。

このような社会の流れから、自動車業界における ECU（Electronic Control Unit）などの電子基板は、車内の空間快適性と機能拡充を両立するため、高密度実装となってい

く。実装技術ロードマップ¹⁾によれば、電子基板のチップ部品は、0603 のサイズからさらに小型の 0402 の搭載比率も増加していることがわかる。特に自動車業界におけるものづくり品質の要求水準は高く、事故のない安全・安心な社会実現にむけた品質検査が実施されている。例えば、欧米の車載部品工場においては、基板の抜き取り検査ではなく、基板全数を実施することが主流となっており、はんだ形状を計測して接合強度を検査することが求められる。

こうした世の中の流れを受けて、オムロンの X 線自動検査装置 AXI（Automated X-Ray Inspection system）は、外観

Contact : SHICHIRO Makoto makoto.shichiro@omron.com

では見えない部品下面のはんだ部が検査できる装置として SMT (Surface Mount Technology) 生産ラインへ普及してきた。本稿では、従来技術の課題であった視野間移動に関する検査時間のロスをなくし、更なる高速化を実現した VT-X750-V3 の技術をご紹介します (図 1)。



図 1 VT-X750-V3 外観

2. 高画質を実現する CT 方式を用いた AXI

2.1 不可視部のはんだの不良モード

近年のめざましい電子機器の小型、軽量、高性能化傾向の技術的背景には、構成部品の高集積化、基板のファインパターン、多層実装化があり、AOI (Automated Optical Inspection) などの外観検査では、はんだ接合部の検査が困難な状況が増している。例えば BGA (Ball Grid Array) の検査では、数十~数百 μm の微細なボイド (空洞)、不濡れなどのはんだ未熔融の不良モードがある (図 2)。これらの電気的な安全性・信頼性を確保するためには、BGA 内の 1000 点以上のはんだ接合部の検査を行う必要がある。

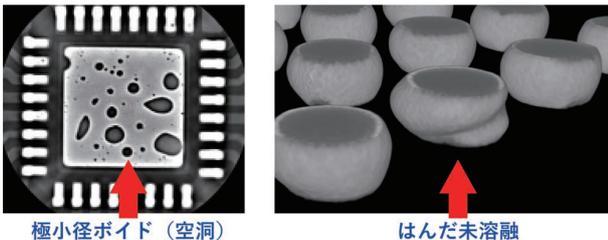


図 2 はんだの不良モード

2.2 X 線画像診断方式の比較

X 線を用いた画像診断は、透過方式と CT 方式に大別できる (図 3)。

透過方式は、医療業界におけるレントゲン方式の撮影と同様に、2次元 (以下 2D と表記) 画像を用いた方式である。特徴として、検査点において微細な画像は得にくく、裏面の部品も重なって裏映りしてしまう。しかし、検査速度が速く、データ量も小さいため、高速な検査が求められる基板検査装置においては、2D 方式を採用するメーカーが多い。

CT 方式は、X 線カメラなどを 360 度方向から撮影し複数の画像を取得して、3次元 (以下 3D と表記) データへ再構成する。特徴として、再構成した 3D 画像が鮮明になり、微細な立体的画像を得られ、かつ裏面の部品が裏映りすることはない。しかし、扱うデータ量が多くなる上、360 度方向から撮像するため、検査速度は透過方式に比べて時間がかかる。よって、故障品に対する詳細な分析を行う用途として、解析機装置メーカーが主に採用している方式である。

	透過型(2D)	CT方式(3D)
特徴	・透過画像 ・高速撮影 秒/sec	・全方向から断層撮影 ・撮影に時間がかかる 分/min
医療	簡易検査：レントゲン 	精密検査：CTスキャン
産業 (基板検査)	透過画像を使った2D検査 >各メーカーがラインナップ 	CT断層画像を使った3D検査 >分析機主体。
	空洞がボヤける 裏映りしてしまう	空洞くっきり 裏映りせず立体的

図 3 X 線画像診断手法の方式と特徴

2.3 オムロンの AXI

我々は、電子基板の品質を確保し、社会を安心安全なものにしていくために、高精度かつ高速な基板検査装置を提供することが命題であると捉えている。透過型の方式では、ボイドがボヤけたり、基板の裏面部品が裏映りしてしまうため、微細なボイドや、はんだ未熔融部の精密な検査が行えない。そのため、我々はこれまで CT 方式の AXI を提供してきた。2009 年、VT-X700 のリリース以降、2017 年に X700 比 2 倍の検査速度を実現した VT-X750-V1、2018 年には更なる高分解能化を実現した VT-X750-V2 をリリースし、BGA のボイド検査や挿入部品のスルーホール充填率検査などを中心に、多くの顧客の要求にこたえてきた²⁾。

ここで、当社の AXI の構成技術をご紹介します。当社の AXI には、多岐にわたる技術要素が組み合わせられており、AOI で積み上げた多くの知見をベースとして、高精度な検査を実現している。ここで重要となる技術要素は、高精細な画像を生成する撮像デバイス、高精度なジオメトリ設計と制御、ロバストな画像補正とアルゴリズムである。

2.4 高精細な画像を生成するデバイス (FPD と X 線源)

FPD (Flat Panel Detector) は、シンチレータという蛍光体を通して X 線を光に変え電気信号に変換し、デジタル画像を取得するためのカメラである。画素単位で輝度情報を読み込むため、鮮鋭性や感度の高い画像を得ることができる。

X 線源には、大きく開放管と密閉管という 2 種類があ

る。密閉管は開放管に比べ、フィラメントやターゲット寿命が長いので、長時間のインライン検査に適しており、ランニングコストも低減できる。当社のAXIでは、必要十分な線量で、軽量かつ焦点径が μm オーダーのマイクロフォーカス密閉管線源を採用している。

2.5 高精度なジオメトリ設計と制御

2.5.1 ジオメトリ構成

当社のAXIのジオメトリ設計は、回転テーブル式ではなく並行テーブル式を採用している。これは、対象物に対し、X線源やFPDの位置を、XY軸方向の直行動作によって相対的に位置を変えることでCT画像を取得する方式である。この方式を採用している理由は、回転テーブル式では3Dデータの視野が円形となり狭くなってしまい、画像の端でぼやけが発生しやすいことがある。また、回転速度の制限により撮像スピードの高速化に限界があるためである³⁾。旧機種種のVT-X700や他社製の方式は、ステージとカメラを回転させる方式だが、VT-X750シリーズからは、検査対象物に負担をかけないように、コンベアステージを回転させない上下振り方式としている(図4)。

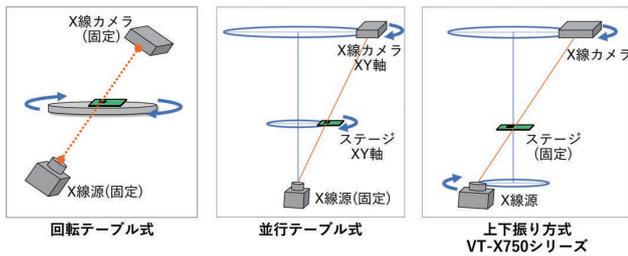


図4 CT撮像システムの方式

2.5.2 連続撮像技術

以下にVT-X750シリーズから搭載している「連続撮像」制御技術について述べる。大きく2つの特徴がある。

1点目は、旋回撮像時に、X線カメラとX線源のステージが止まらず動き続けるということである。各視野の撮像時間を短縮するため、非停止で連続的に旋回し、1視野分の全画像を取得する技術である(図5)。



図5 X700のSTOP&GO方式とX750の連続撮像

X線カメラとX線源のステージは等速で旋回する動作を繰り返すため、各軸のモータ動作をいかに同期させ、精度のよい旋回軌跡を描くことができるかが重要となる。この技術を支えているのは、オムロン製の製品、PLC (Programmable Logic Controller) のNJ、NXシリーズのコントローラと、サーボモータおよびドライバの1Sシリーズである。これらのデバイスによる多軸同期制御技術、そして、高剛性なハードウェアによって、高精度な連続撮像技術が実現できる。

2点目は、高速に撮像しデータ処理を行うシステム処理速度の高速化である。軸の動作と連動した撮像トリガシステムにて、メカが動作している中でも高速に画像を取得できるシステムを構築している。ここで、メカが移動中に撮像する場合、画像のブレが起きやすくなるがわかっている⁴⁾。これに対し、X750シリーズでは、特殊な再構成技術(3D画像を生成する処理)と高速な撮像露光制御でブレを低減している。主にGPU (Graphics Processing Unit) を活用することによって再構成やシステム全体の処理速度を確保している。

2.6 ロバストな補正処理とアルゴリズム

当社のAXIは、ハードウェアだけでなく、独自のソフトウェアアプリケーションにて、高精度なはんだ接合面の検査を可能としている。

例えば、検査の前段としてワークが装置内へ搬入された時に、基板が停止する位置にはばらつきが存在する。このばらつきを補正するために、可視光波長のLED照明と小型カメラを搭載している。当社のAXIは、可視光波長で取得した画像を用いて、ワークのコンベア上での搬送停止位置のばらつきや回転ずれを補正する。人間の目は、可視光波長の映像・画像に見慣れているため、検査プログラムを作成する際に、設定対象となっている部品の位置確認が行いやすくなる。

高精度に画像処理を行うには、再構成後の正しい断層位置を抽出する精度が要求される。そこで、当社のAXIには、当社製の変位センサとコントローラを搭載しており、ワークの反りやたわみ量を計測して、検査面の高さ位置を補正し高精度な画像を生成している(図6)。

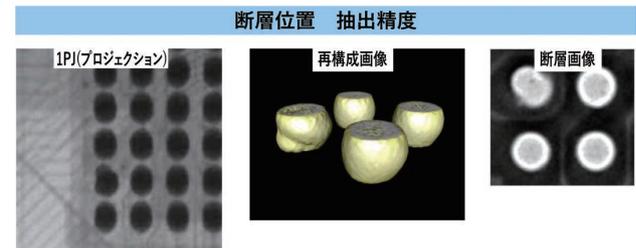


図6 断層位置抽出画像

3. 基板進化に追従するための課題

CT 方式の検査において、顧客の基板進化に追従しながらインライン検査を実現するためには、大きな課題が存在する。画質を確保した前提で更なる高速検査と低被曝検査の実現である。

3.1 更なる高速検査のための課題

CT 撮像方式は、高精度な画質が得られる一方、検査タクト（ワーク 1 枚を検査する時間のこと）が長くなる。先述したように CT 方式は、360 度回転しながら撮像することが必要となるためである。AXI は基板実装のラインの後工程の装置であるため、インラインでの検査タクトの要求を満たせない場合、ラインの生産効率が低下してしまう。その結果、これまでよりも短い検査タクトや、全数検査を求めるような、要求水準の高い顧客に導入いただけなくなる。AXI の検査速度は、顧客の基板の生産性に関わるため、昨今、高速化の要求がますます高まっている。要求の水準の例としては、約 200mm 角の M サイズ基板 1 枚当たり約 30 秒以下で検査することが求められるようになってきている。ここで、連続撮像における技術な問題として、視野間移動時に停止していたことによる、旋回撮像のための加速・減速時間のロスがあった。このロスに着目し解消することで、更なる高速化を実現することにした。

3.2 検査ワークへの被曝量の課題

もう 1 つの課題は、検査ワークへの被曝量の管理である。基板上に被曝耐性の弱い半導体素子、IC などの部品搭載が増えているため、検査ワークへの被曝量を適切に管理しながら、被曝量を低減することが求められている。

これまでの VT-X750-V1 および V2（以下 V1、V2 と表記）のシステムでは、基板全体の被曝量を事前に予測し、表示する仕組みを搭載していた。しかし、IC 部品個別に被曝する量を算出することができていなかったため、顧客は、基板全体の被曝量を IC への被曝量として試算せざるを得なかった。その結果、IC 部品の被曝量としては過剰な値となるため、顧客は照射 X 線量を下げ設定せざるを得ない状況があった。X 線量を下げ撮像すると画質も低下するため、最適な撮像条件で検査できない状態になってしまう。また、その逆もあり過剰に X 線量を長く当ててしまう部品も存在していたため、被曝量が増えてしまう場合もあった。

よって、顧客が部品単位での被曝量を適切に管理し、検査ワークへの被曝量を低減していくことが課題であった。

4. 更なる高速検査を実現する VT-X750-V3

我々は、3 章で述べたこれらの課題を解決する技術を開発した。まずは、従来技術である「連続撮像技術」と組み合わせ、更なる高速化を実現した「視野間連続移動」技術

について述べる。次に、「視野間連続移動」技術の制御を応用することで実現した、被曝量のヒートマップについて示す。

4.1 視野間連続移動

本稿では新たに開発した「視野間連続移動」技術の特徴を詳しく述べる。その前段として、

①視野 ②視野間を移動する

という言葉の意味合いについて述べる。

①視野 とは

検査点において、再構成立体画像を生成するための撮像領域のことである。制御観点からすると、装置の天面側方向から装置内を覗き込んだトップビュー視点での撮像デバイスが描く旋回軌跡の領域のことである。これを FOV (Field of View) とよぶ。

②視野間を移動する とは

検査点から検査点へ移動することである。制御観点からすると、FOV と同様、トップビューでの撮像デバイスの旋回円から旋回円への軌跡領域のことである。

それぞれイメージを図 7 に示す。

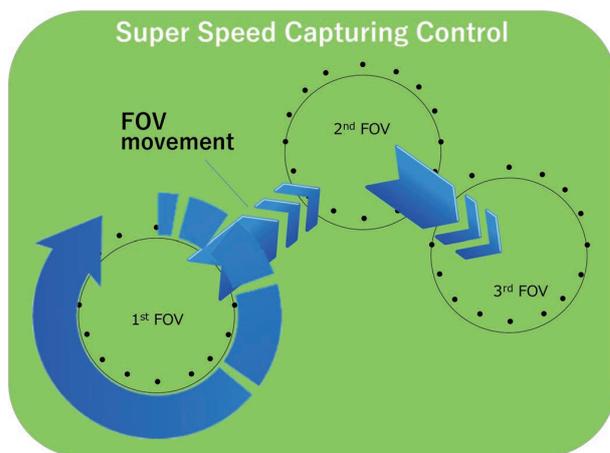


図 7 視野と視野間移動のイメージ

4.1.1 実現手段と特徴

「連続撮像」を行う際、高精度の画像を得るために旋回動作を等速で行う必要がある。V1 および V2 までの方式では、1FOV の旋回ごとに停止していたため、等速で旋回するための加速区画と制動するための制動区画が必要となっていた。この加速・制動に時間がかかるため、これらを視野間移動中に行うことを考え、「視野間連続移動」技術を開発した。本技術は、1FOV の旋回ごとにおける加速・制動時間をなくし、視野間移動と連続撮像の連結部も非停止で動作するための技術である（図 8）。

この技術は、オムロン独自の技術として開発したものであり^{*1}、オムロン製の PLC、多軸サーボモータ、制御ソフト

トウェアのシームレスな同期制御によって実現した。
この「視野間連続移動」技術は、次の4つの特徴をもつ。

1. 視野間移動において、停止区間がない
前述のとおり、最大の特徴となるのが、視野間の移動中に、次の旋回円での必要な加速を行い、視野間移動で停止区間がないことである。一連の検査を非停止で実現できる。
2. デバイスの許容加速度を超えないよう制御できる
視野間移動時の速度に関するパラメータを連続的に制御できる。かつ、次の視野の旋回開始始点において、加速度が0のままで旋回が開始できる。よって、撮像デバイスに対して、負荷をかけずに移動できるようになる。
3. 最短の時間で移動できる走行ルートを選択する
次の旋回円の始点への入射角度を 0° 以外の角度でも行えるようになる (図9、図10)。デバイスの許容加速度を超えないような軌跡かつ、速度系の制御パラメータを演算した結果から、最も短時間で移動できる走行軌跡を導き出す。これにより、次の旋回円に移動する時間が短縮できる。
4. 旋回速度をさらに上げることが可能になる
従来技術のまま、旋回速度を上げようとする、問題が生じる。それは、旋回制御は、高精度な画質を撮像するために等速で動作する必要があるということに起因する。助走距離、制動距離を設けていた理由がこれである。そのため、旋回速度を速めて等速で動作させるには、これらの助走距離、制動距離も大きくとる必要が出てくる。本技術によって、この問題も解決することが可能となる。本技術は、視野間移動時に加速・制動を兼ねて行うため、旋回速度を高速にしても、助走距離、制動距離が大きくなる (図11)。

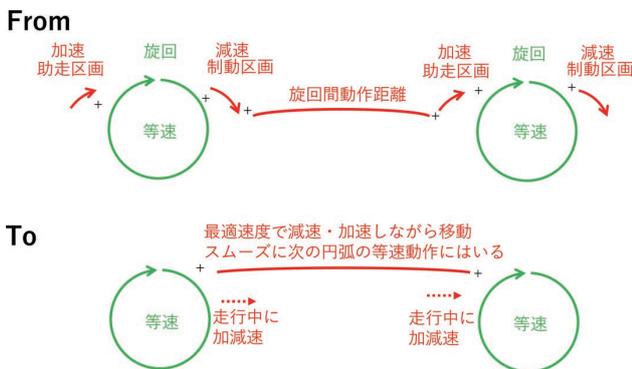


図8 視野間連続移動制御の特徴

撮像開始角度 0° の場合

- ① 1つ目の円旋回
- ② 旋回間移動
- ③ 2つ目の円旋回
- 旋回開始点

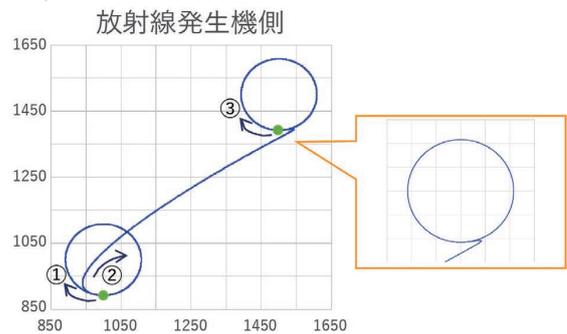
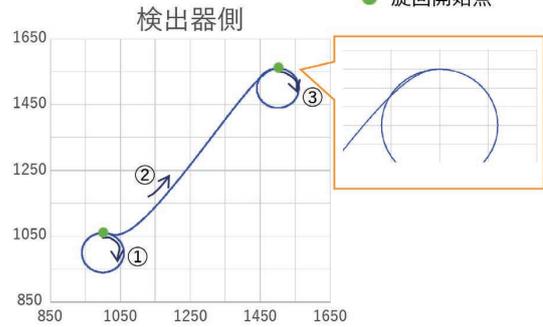


図9 従来の撮像開始点 0° の場合

撮像開始角度 N° の場合

- ① 1つ目の円旋回
- ② 旋回間移動
- ③ 2つ目の円旋回
- 旋回開始点

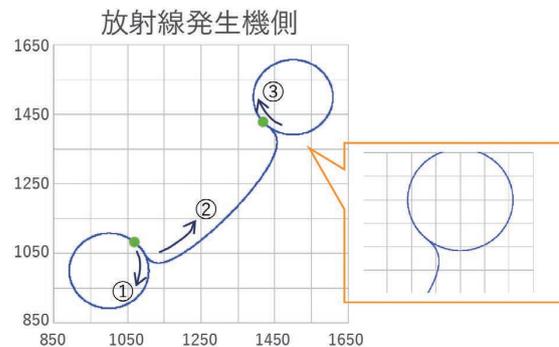
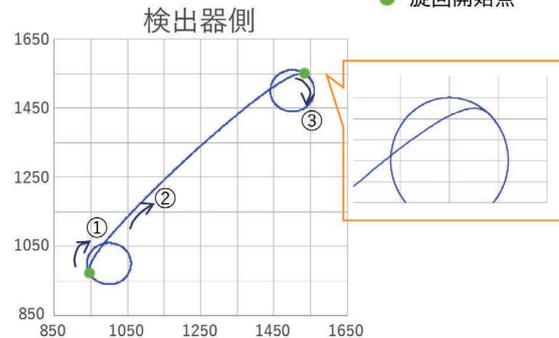


図10 本技術の撮像開始点 N° の場合

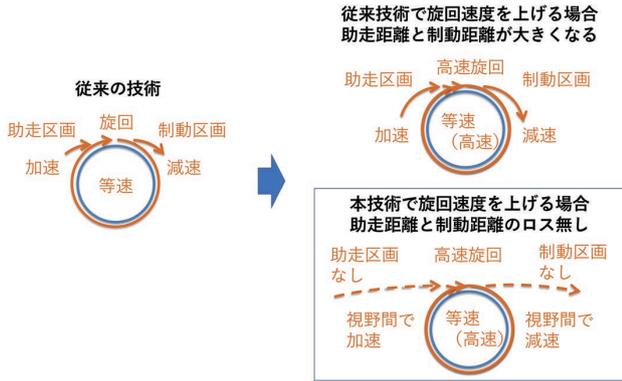


図 11 旋回速度を上げた場合のイメージ

4.1.2 視野間連続移動技術の効果

「視野間連続移動」技術によって、高速化できる効果として理論値と実測値の結果を以下に示す。

計測値としては、旋回時間の中に加速区画、制動区画が含まれていたため、旋回時間としての比較を行う。

確認方法として、PLCを用いたデータトレース方法を行った。そのため、1FOVの旋回中の旋回信号パルス幅(counts)を取得し比較を行った。条件は、加速区間と制動区間がどれだけ削減できているかを確認するため、3視野分の旋回と視野間移動を2回行った際の、2つ目の視野における旋回時間を比較した。従来技術の理論値としては、旋回時間のパルス幅が160(counts)となる見込みである。これが、本技術の理論値では、加速・制動時間がなくなると考え、1FOV 110(counts)となる見込みである。その結果、旋回時間で約30%の時間短縮が可能である見込みであった(図12)。

この実測結果について示す。実測の結果、まず、従来技術では、155(counts)、本技術では109(counts)となった(図13)(表1)。従来技術の理論値と実測値との差は、軸の静定時間である。静定時間は6(counts)分存在するため、結果として理論値どおりの実測結果を得ているといえる。従って、旋回時間は約30%の短縮がはかれており、加速・制動時間をなくすことができていることがわかる。

理論値

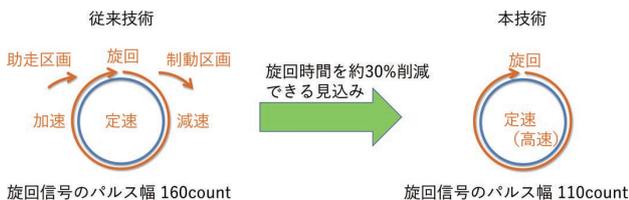


図 12 旋回時間の高速化効果 理論値

実測値

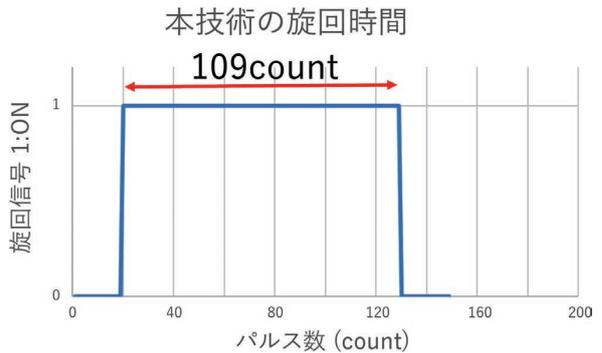
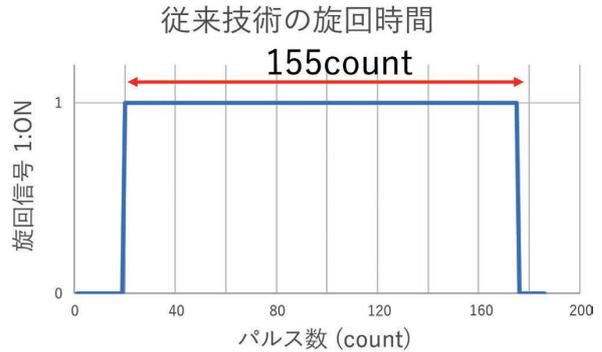


図 13 旋回時間の比較 実測値

表 1 理論値と実測値の比較

	FROM 従来技術 旋回信号のパルス幅 【count】	TO 本技術 旋回信号のパルス幅 【count】
理論値	160	110
実測値	155	109

4.2 検査時間の高速化効果

次に、「連続撮像」と「視野間連続移動」を組み合わせた実際の基板検査時間の短縮効果を示す。ある顧客基板において、8視野分を撮像する条件で、旋回時間と視野間移動時間の合計を比較した。データ収集は、V2とV3の各装置を使用し、それぞれの装置から出力されるログを集計して計算した。結果として、視野間移動時間は約40%、旋回時間は約30%短縮することができた(図14)^{※2}。以上から、本技術によって、検査速度の1.5倍化を実現することに大きく寄与した。

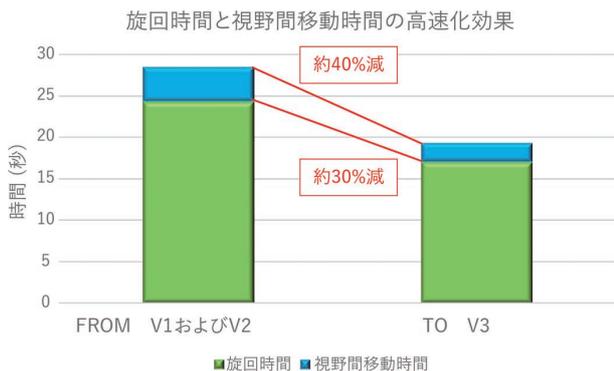


図 14 回転時間と視野間移動時間の高速化効果

4.3 低被曝 CT 検査の実現

さらに、「視野間連続移動」技術の効果を示す。本技術により、視野間移動中の軌跡演算のパラメータを応用することで、部品ごとの被曝量を予測し、ヒートマップ形式で表示することが可能となった^{*3} (図 15)。このヒートマップによって、顧客やフロントエンジニアが、部品に対する照射条件を最適化して検査プログラムを作成することができるようになった。高速化による低被曝効果とヒートマップでの照射条件最適化によって、本技術を適用したV3では、V1およびV2に対しさらに被曝量を約20%低減することができた。X700比では、40%⁵⁾低減することができている^{*2}。

以上により、我々の検査技術の進化によって高速化を実現するとともに、ワークへの被曝量も低減できていることがわかる (図 16)。

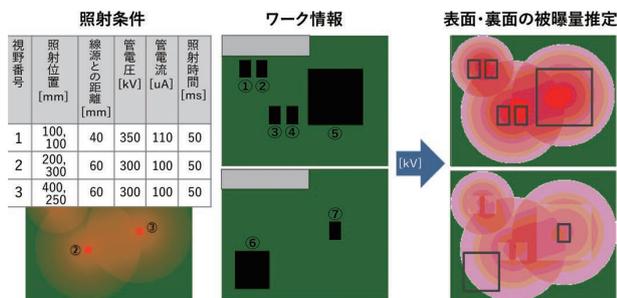


図 15 部品ごとの被曝量の可視化表示

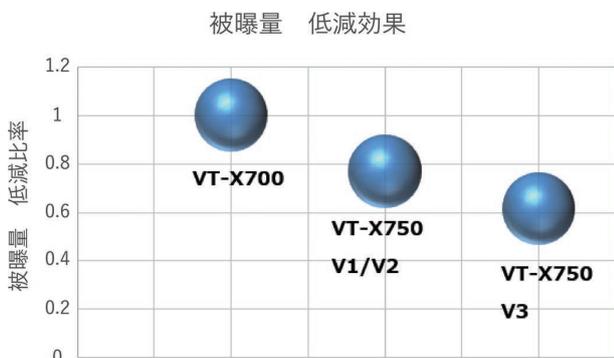


図 16 被曝量低減効果 (VT-X700 比)

5. むすび

従来の連続撮像技術における視野間移動時ロスの低減という課題を解決するため、「視野間連続移動」技術を開発した。本技術によって、CT方式でありながら、さらなる高速検査を実現させることができた。この技術を搭載したVT-X750-V3にて、より多くの電子基板、顧客の製品が検査できるようになる。本論文の作成にあたり、本技術のリリースに至るまで奮闘くださった当社の開発チームをはじめ、モーションコントロール事業部の開発チームの皆様改めて感謝を述べさせていただきたい。

今後の展望としては、顧客の基板や製品の進化へ追従し、更なる高速検査に取り組んでいく。当社の検査技術は、電気自動車の業界だけでなく、多くの電気設備の部品検査に応用できると考えている。例えば、再生可能エネルギーなどのエネルギーインフラ業界では、天候による再生可能エネルギーの発電量の変動を緩和するための蓄電器、高圧直流送電・超電導ケーブルなどの長距離伝送などの送電効率化設備が普及していく。また、第5世代移动通信システム(5G)をはじめとする情報通信インフラ業界では、大容量・低遅延・多接続な通信を実現するため、基地局や周波数の割り当てが整備され始めている。こうした設備に搭載される基板や部品として、分厚いヒートシンク付きが搭載されたデバイス、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)をはじめ、ワイドギャップ半導体であるSiC (シリコンカーバイド)、GaN (ガリウムナイトライド)を用いたFET等のパワーモジュール製品、5G基地局のような大型基板のはんだ不良を検出できるよう低被曝かつ高コントラストな画像を高速に撮像できる技術を探求していく。

フィジカル空間とサイバー空間を融合させた価値やサービスが次々と創出されていく新たな社会が到来しようとしている。我々はこれからも、電化していく社会にむけて、多くの電気部品の製品検査を行い、顧客の製品品質を向上することで、持続可能な社会、安全・安心な社会づくりへ貢献していく。

注釈

- ※1 特許権登録済
- ※2 社内比
- ※3 特許出願中

参考文献

- 1) Jisso 技術ロードマップ専門委員会. 2022年度版実装技術ロードマップ. 一般社団法人 電子情報技術産業協会, 2022, p.352, p.450-451.
- 2) 七呂真. 超高速CT型X線自動検査装置の開発. OMRON TECHNICS. 2019, Vol.51, No.1, p.91-97.

- 3) 杉田信治. 実装品質保証のカバレッジ拡大に向けた高速CT検査技術. 第52回ソルダーリング分科会資料. 一般社団法人 溶接学会, 2011, p.4.
- 4) 日本放射線技術学会 監修 市川勝弘, 村松禎久. 標準X線CT画像計測. オーム社, 2009, p.27-28.
- 5) 大西貴子. 高速・高分解能・低被曝を実現するインライン自動X線検査装置. 画像ラボ. 2018, Vol.29, No.1, p.67-72.

執筆者紹介



七呂 真 SHICHIRO Makoto
インダストリアルオートメーション
ビジネスカンパニー
検査システム事業部 開発部
専門：電気工学

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

細径ファイバによる同軸変位センサの厚み計測高分解能化の実現

早川 雅之, 木村 和哉, 藤原 直樹, 森野 久康

ディスプレイ用のガラスやフィルムなど、インラインでの透明体厚み検査において、設置時の調整が簡単で、搬送中のばたつきやシワによる傾斜に対しても安定して計測できるセンサが求められる。我々はこれまでに、変位センサの主流であった三角測距方式に代わる、白色共焦点方式によるファイバ同軸変位センサをリリースし、従来課題であった光沢面での傾斜に対して計測精度が劣化しないセンサを提供してきた。しかし、同軸変位センサで薄い透明体の厚み測定を実現するには、センサ内部にあるファイバのコア径を細くする必要があり、光量低下や分岐カプラでの波長依存性が課題であった。そこで、レーザー励起によるファイバ光源と可視域に対応したフィルタ型カプラを導入し、薄さ 15 μm の透明体の計測を実現した。この厚み分解能が向上した同軸変位センサによって、インライン透明体厚み検査における設置調整の手間や搬送中の安定計測が期待できる。

High Resolution Coaxial Displacement Sensor Using Small Diameter Fiber for Thickness Measurement

HAYAKAWA Masayuki, KIMURA Kazuya, FUJIWARA Naoki and MORINO Hisayasu

In in-line thickness inspection of glass and film for displays, there is a need for a sensor that is easy to adjust during installation and can stably measure even when tilted due to fluttering or wrinkling during transport. A fiber coaxial displacement sensor based on the chromatic confocal method has been released which replaces the triangulation distance measurement method that has been the mainstay of displacement sensors. The fiber coaxial displacement sensor is resistant to inclination on glossy surfaces, which has been a problem in the past. However, in order to measure the thickness as thin as a film with a coaxial displacement sensor, it was necessary to reduce the core diameter of the fiber inside the sensor, but this was problematic due to a decrease in light intensity and high wavelength dependence at the fiber coupler. Therefore, we utilized a laser-pumped light source and optical filter coupler for visible range to realize measurement of a transparent film as thin as 15 μm . This coaxial displacement sensor with improved thickness resolution is expected to reduce the time and effort required for installation and adjustment in in-line thickness inspection, and to ensure stable measurement during transport.

1. まえがき

生産ラインの自動化、製品品質の維持を目的に、部品の形状、厚み、高さや、搬送ステージなどの位置を高精度に測定できる変位センサが使われている。従来、変位センサは三角測距方式のレーザー変位センサが主流であったが、モノづくりの製造現場では、その方式に由来する設置調整の難しさ、測定対象物の材質の違いによる測定誤差の課題があった。それらの課題に対し、我々は白色共焦点方式によ

るファイバ同軸変位センサを、2012年に初めて商品リリース（型 ZW-CE シリーズ）し、その後2016年に高精度化したタイプ（型 ZW-5000、7000 シリーズ）を商品リリースした。白色共焦点方式とは、光学系のもつ軸上色収差を利用して、対象物にピントが合った光の波長から対象物までの距離を求める原理である。小型で簡単に設置でき、測定対象物の材質の違いに依存せず、光沢面も 25° 傾斜しても高精度な距離計測を可能にした¹⁾。

厚み検査には、ディスプレイ用のガラスや機能性フィルムなどの薄い透明体を対象とすることがある。例えば、

Contact : HAYAKAWA Masayuki masayuki.hayakawa@omron.com

ディスプレイ用のガラス基板は、約 1 mm のものから数 100 μm のものがあり、近年では 25 μm まで薄いものも登場している²⁾。数 100 μm もの薄い透明体の厚み測定には、三角測距方式とは異なる、光の干渉現象を利用した反射分光方式のセンサが使われてきた。しかし、数度以内の正確な設置調整が求められ、また搬送時のばたつきやシワによる傾斜で計測が不安定になる課題もあった。これは、計測精度を得るためにセンサの対物レンズの開口数が小さく設計され、測定対象物が傾斜すると受光しにくくなるためである。

一方、白色共焦点方式によるファイバ同軸変位センサは、原理上対物レンズの開口数が大きく設計され、傾斜に対して安定して計測できる。しかし、これまでリリースした商品では、25 μm の薄い透明体は表面、裏面ともにピンポイントが合うため、表裏を分離して計測することができなかった。表裏を分離するには、センサ内部にある光ファイバのコア径を細くすることが有効であるが、2つの課題が生じる。一つは受光量が減る課題と、もう一つは、ファイバを伝搬するモード数の減少により、センサ内部にある分岐カプラの透過率が波長に応じて変化する課題である。このような光量の減衰や波長依存性が生じると、十分な信号強度が得られず、計測値が不安定になる。そこで、我々は、レーザ励起による高輝度なファイバ光源と、可視域対応のフィルタ型カプラによる波長依存性の改善に取組み、厚さ 25 μm よりも薄い 15 μm の透明体の厚み計測を実現した。本稿でそれを報告する。

2. 白色共焦点変位センサ

2.1 白色共焦点計測原理

本原理は、測定対象物の高さ方向に異なる波長の光を集光し、測定対象物に集光した波長の光のみを分光器内の受光素子で受光することで測定対象物までの距離を測定する原理である¹⁾。

システム構成としては、図 1 に示すように白色光源、分岐カプラ、ファイバ、センサヘッド、分光器、処理部からなる。分光器は、回折格子を用いた一般的な分光方式がもちいられ、回折格子、受光素子からなる。

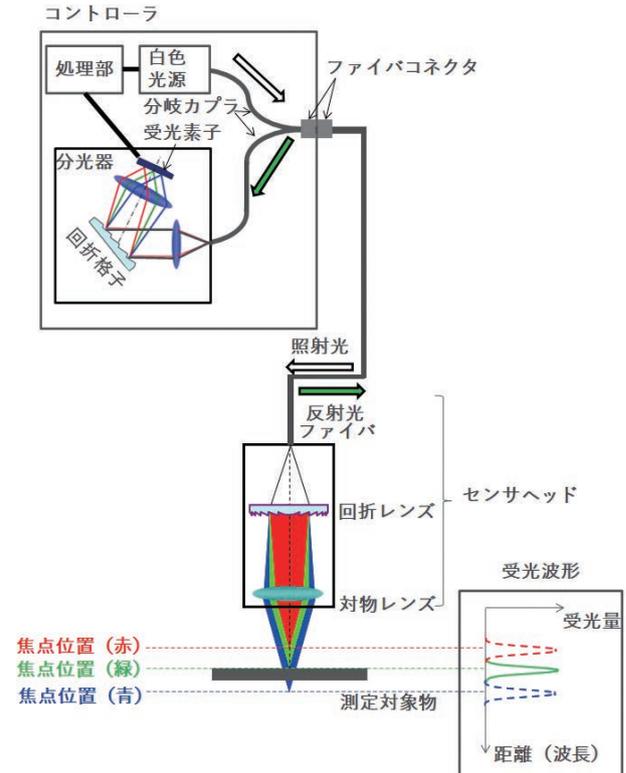


図 1 システム構成

白色光源から出射した光は、分岐カプラ、ファイバを経由し、センサヘッドへ入射する。入射した光は、波長によって焦点距離が異なる特性（軸上色収差）を持たせたセンサヘッド光学系によって、測定対象物の高さ方向に波長が分光される。センサヘッドは測定対象物からの反射光がファイバ上に焦点が合う共焦点光学系であるため、測定対象物上に集光された特定の波長の光のみがセンサヘッドに接続されているファイバへ結像し、分光器へ入光する。例えば、図 1 の例では測定対象物に緑色光が集光されているため、緑色光のみ分光器へ入光する。一方、赤、青色光は測定対象物に集光していないためファイバへ結像されず、分光器には入光しない。分光器に入光した光は、回折格子により、分光され、受光素子に結像する画素位置を求め、予め画素位置と距離を対応付けた補正データを用いることで、測定対象物までの距離を算出することができる。

センサヘッドの軸上色収差は、回折レンズを使って発生させる。回折レンズとは、光の回折現象を利用し、同心円状の微細なパターンによって、光を集光・発散させるレンズである。回折現象を利用するため、回折レンズの焦点距離は入射光の波長に反比例する特性がある。センサヘッドに回折レンズを組込むことで、波長によって焦点距離が異なる、軸上色収差をもった光学系が実現される。

白色光源には、長寿命で交換が不要な白色 LED を用いることが多い。白色 LED とは、青色 LED で蛍光体を励起し、その蛍光と励起光である青色を拡散させ、白色にみえ

る光源である。一般的には蛍光体材料に Ce 添加 YAG の粉末が使われ、黄色の蛍光を発する。白色 LED の分光スペクトルを図 2 に示す。

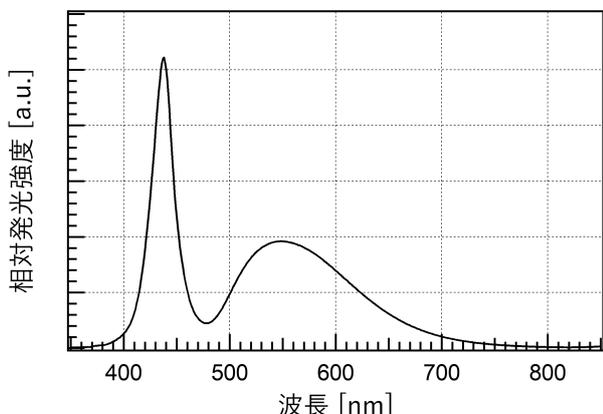


図 2 白色 LED の分光スペクトル

波長帯は、およそ 400~750 nm あたりの可視域となる。440 nm 付近の青色の急峻なピークと 550 nm 付近にピークをもつなだらかな単峰のスペクトルからなる。当社では、計測レンジ内での光量変化を抑えるため、500~650 nm を計測に利用している。

ファイバには、ガラス製の $\Phi 50 \mu\text{m}$ コア径のマルチモードファイバが使用される。短距離の光通信によく用いられるもので近赤外光に利用するものだが、可視域も透過する。

2.2 厚み分解能改善に向けた技術課題

白色共焦点変位センサで、ガラスなどの透明な材料を測定すると図 3 のように、表面と裏面からそれぞれ反射した受光波形が重なって受光される。なお、横軸は、受光波形の半値全幅を 1 として規格化してある。

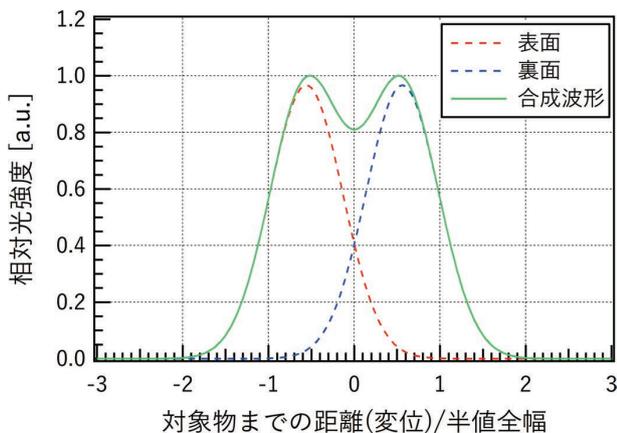


図 3 2つの受光波形の重なり

2つの界面を分離できる最小の厚みのことを厚み分解能と呼ぶことにする。分離の定義は様々あるが³⁾、我々は、二つの波形の重なりである合成波形の頂点で 19%以上凹んだ状態を指すものとする。ガウス関数で表現した場合、受光波形の半値全幅の 1.12 倍離れると、図 3 のように 19%凹みが生じる。透明体の厚み計測ではさらに材料の屈折率 n を乗じた値となる。ガラスやポリエチレンフィルムなど屈折率が $n \approx 1.5$ の場合、受光波形の半値全幅の約 1.7 倍が透明体厚み分解能となる。

白色共焦点変位センサは焦点の合った波長の光だけが受光される原理であるため、受光波形の半値全幅はセンサヘッドの被写界深度に相当し、その被写界深度はファイバのコア径と回折レンズの開口数 (NA)、対物レンズの開口数 (NA) と下記のような関係にある¹⁾。

$$\text{被写界深度} \propto \Phi_p \times \text{NA}_{\text{diff}} / (\text{NA}_{\text{obj}})^2 \quad (1)$$

図 4 に、被写界深度に関連する設計パラメータを示す。

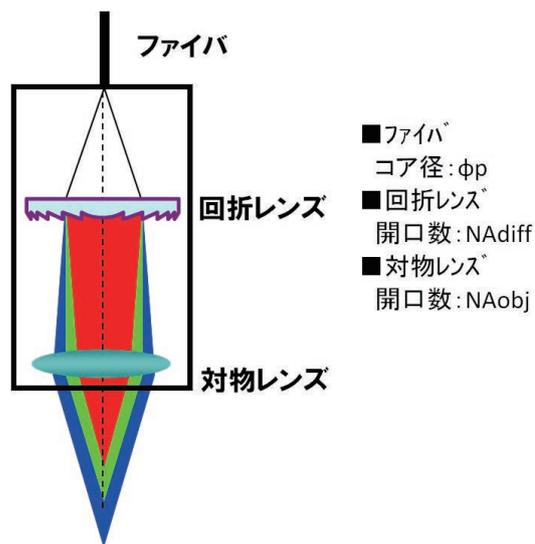


図 4 被写界深度に関する設計パラメータ

関係式からわかるように、厚み分解能の向上には、ファイバコア径を細くするか、回折レンズや対物レンズの開口数を変更する必要がある。開口数を変更する方法では、光学系の倍率と軸上色収差が変わるため、計測できる距離範囲が狭くなり、搬送時に生じる対象物のばたつきで計測が不安定になりやすい。測定できる距離範囲を狭くすることなく、厚み分解能を向上させるには、ファイバコア径を細くするのが有効である。従来用いられる $\Phi 50 \mu\text{m}$ コア径のマルチモードファイバに変わり、 $\Phi 10 \mu\text{m}$ コア径のファイバを使えば、5 倍の改善が見込まれる。

しかし、ファイバコア径を細くすると 2つの課題が生じる。一つは、受光量が減ることである。図 5 に白色 LED の光をファイバへ導く部分の構造を表している。

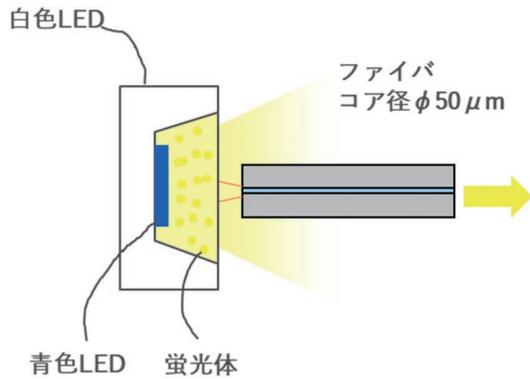


図5 白色LEDとファイバへの結合

白色LEDの発光部はおよそ1mm程度とファイバコア径に対して十分大きいので、レンズを用いず近接してファイバに光を導く。そのため、白色LEDの光がファイバに入光する光量は、ファイバのコア径に比例する。ファイバ径を1/5にすると、光量は $(1/5)^2=1/25$ に低下することになる。

もう一つの課題は、分岐カプラの透過スペクトルに波長依存性が現れることである。分岐カプラは、光通信で多用される、図6のような熔融延伸型のカプラが使われる。2本のファイバを熔融延伸しながらコアを近接させることで、コアから染み出した電磁界分布の拡がりが増え、光の結合現象が生じ、光のパワーが他方のファイバへ移動する。

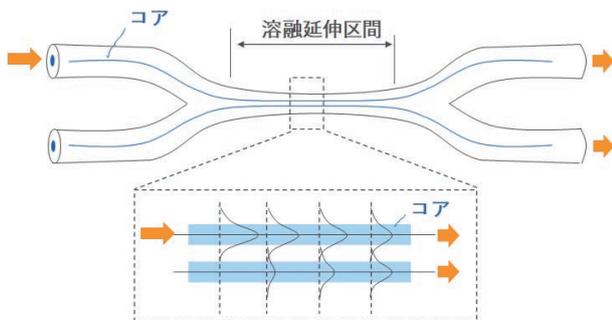


図6 熔融延伸型カプラと光分岐の様子

その分岐比は、電磁界分布を決める伝搬モードや波長などに影響を受ける⁴⁾。そのため、伝搬モードが一つしかないシングルモードファイバで作られたカプラの分岐比には波長依存性がある。一方でマルチモードファイバでは多くの伝搬モードを許容できるため、平均化が働き、波長依存性が小さい。しかし、 $\Phi 10\ \mu\text{m}$ コア径に可視光を伝搬させた場合は、マルチモードファイバほどモード数はなく、波長依存性が現れる。図7に、 $\Phi 10\ \mu\text{m}$ コア径のファイバで作製した熔融延伸型カプラに、白色LEDの光を分岐したときの2つの透過スペクトルを示す。

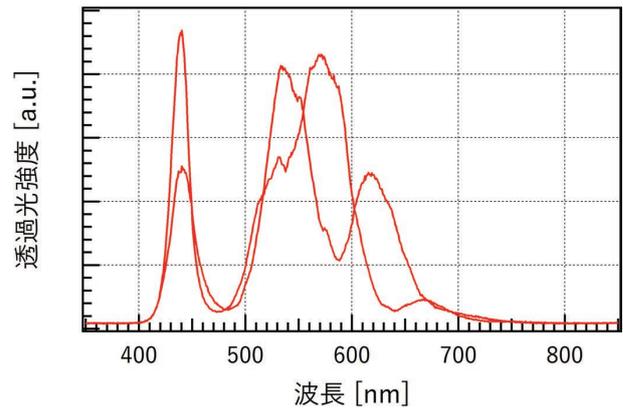


図7 熔融延伸型カプラの透過スペクトル

500~650nm 辺りで、白色LEDの分光スペクトルにはなかった形状が現れ、その形状も2つの出力ポート間で大きく異なる。

以上のような光源部での光量減衰や分岐カプラでの波長依存性が生じると、分光器の受光素子で十分な信号強度が得られなくなり、計測値が不安定になる問題を引き起こす。

3. 開発した技術

コア径を細くすることによって生じる、光量減衰や分岐カプラの波長依存性に対して、下記二つの技術に取り組んだ。

- ① レーザ励起によるファイバ光源で光源高輝度化
- ② 可視域に対応したフィルタ型カプラで波長依存解消

本稿にてそれらを説明する。

3.1 レーザ励起によるファイバ光源

青色LEDで励起する白色LEDに対し、LEDより輝度の高い青色半導体レーザー(LD)で蛍光体を励起する高輝度な白色光源が開示されている⁵⁾。蛍光体は、光を拡散させるためのフィルタとともに樹脂中などに分散させ成型してある。光をよく拡散させることで、励起光の青色と蛍光体からの蛍光色がムラなく混ざり、白色照明となる。しかし拡散する蛍光体は青色LDの集光点も蛍光する発光点もぼけてしまうため、ファイバに取り込むには効率が悪かった。

そこで、我々は単結晶の蛍光体を用いて、高輝度なファイバ光源を設計した。図8にその構成を示す。

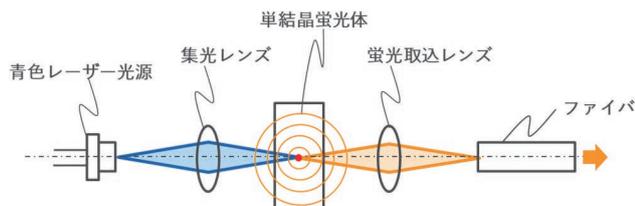


図8 レーザ励起によるファイバ光源の構成

青色 LD からの光を集光レンズにて、単結晶の蛍光体に集光する。単結晶の蛍光体は、シリコンウェハの製造にも利用されるチョクラルスキー法により育成した Ce 添加 YAG の単結晶インゴットからプレート状に切り出されたものを用いた。通常、蛍光体はこの後、粉碎され樹脂などに混ぜられ成型されるが、プレート状のまま利用することで、光を拡散しない透光性のある蛍光体となる。透光性のある単結晶蛍光体内では光が拡散しないため、青色励起光は蛍光体内部で焦点を結ぶことができる。単結晶内では、伝搬する青色励起光で照射された部分から、蛍光が発光する。蛍光は図9のようにウエストをもつ略筒状の形をなす。

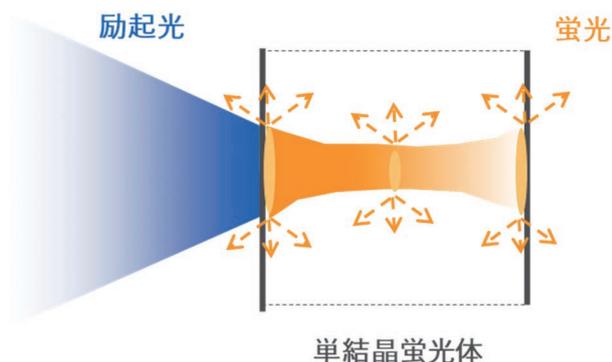


図9 単結晶内部での蛍光の様子

この略筒状の蛍光部からの蛍光を、蛍光取込レンズにてファイバに導く。

単結晶の蛍光体を用いることで、励起光も蛍光も拡散されず、微小な蛍光部を形成することができ、ファイバに効率よく取り込むことが可能になる。

3.2 可視光に対応したフィルタ型カプラ

光通信では、光ファイバの途中で特定の波長の光を選択的に取り出したり結合させたりする光フィルタ型カプラがある⁶⁾。2本と1本のファイバのそれぞれの先端に屈折率分布レンズを付け、両者の間に誘電体多層膜などによる光学フィルタを配置したカプラである。溶融延伸型カプラのような伝搬モードの影響を受けにくいいため、フィルタ次第で広い波長範囲に適用できる。しかし、光通信向けの近赤外光に対応したものしかなく、可視光に対応したものが

なかった。

そこで、我々は、フィルタ部分に、可視域用のハーフミラーを設けたフィルタ型カプラを本センサ向けに新たに導入した。図10にその構成を示す。

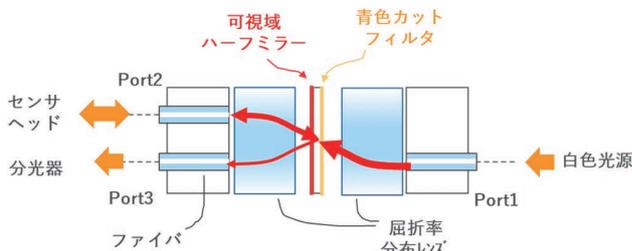


図10 可視光対応のフィルタ型カプラ

白色共焦点変位センサの光源から導かれる光は Port1 から入光し、屈折率分布レンズを経て、可視域対応のハーフミラーを透過し、2つ目のレンズで Port2 のファイバに導かれる。Port2 はセンサヘッドと繋がっており、センサヘッドから戻ってきた反射光は Port2 からレンズを経て可視域対応のハーフミラーを反射し、同じレンズにて、分光器と接続された Port3 のファイバに導かれる。また、可視域対応のハーフミラーを蒸着した反対側には、青色カットフィルタが蒸着されている。レーザー励起光源内の蛍光体が破損した場合に、青色レーザーがセンサヘッドから放出されるのを防ぐためである。

この可視域に対応したフィルタ型カプラにより、 $\Phi 10 \mu\text{m}$ コア径のファイバでも、波長依存性の少ないカプラの実現が可能になる。

4. 効果検証

開発した2つの技術の効果について4.1、4.2に示し、それらを用いたことによる厚み分解能の改善効果を4.3に、実際の薄い透明体を計測した結果を4.4に示す。

4.1 レーザ励起によるファイバ光源の高輝度化

レーザー励起によるファイバ光源と、従来の白色 LED とで、ファイバから出力される光の分光スペクトルを比較した。使用したファイバはともに $\Phi 50 \mu\text{m}$ コア径で、比較となる白色 LED は当社白色共焦点変位センサ ZW-CE に搭載されているものを使用した。また青色レーザーに注入する電流および白色 LED に注入する電流は、ともに製品仕様上の限界値で設定した。得られた分光スペクトルを図11に示す。

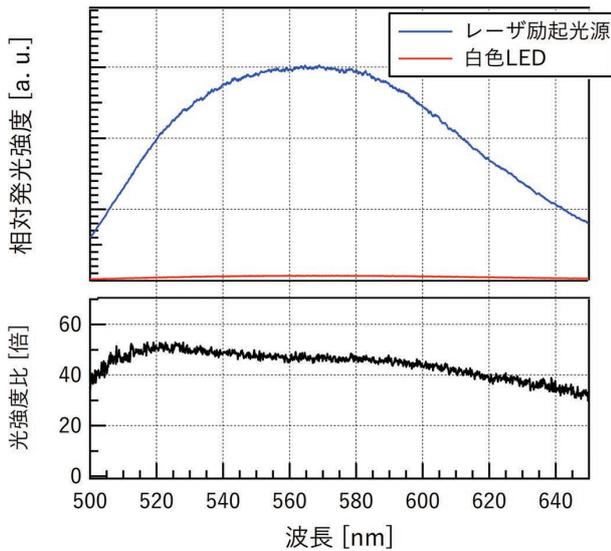


図 11 (上段) 分光スペクトル (下段) 光強度比

500~650 nm のどの波長においても 30 倍以上の光量が得られたことがわかる。

4.2 ファルタ型カプラによる波長依存性の低減

可視域対応のフィルタ型カプラと、Φ10 μm コア径で作製した溶融延伸型の分岐カプラに、それぞれ白色 LED の光を分岐させたときの、2つの透過スペクトルを図12に示す。

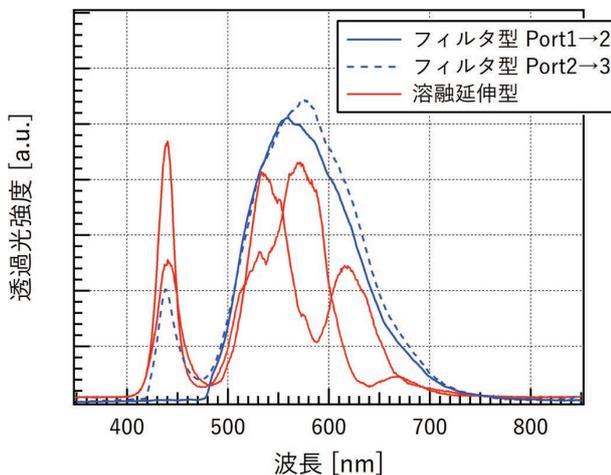


図 12 フィルタ型と溶融延伸型カプラの透過スペクトル

溶融延伸型に比べ、可視域に対応したフィルタ型カプラによって、500~650 nm の透過スペクトルは滑らかになり、また分岐した二つの透過スペクトル間での違いも低減されたことがわかる。

4.3 厚み分解能の改善

レーザー励起によるファイバ光源と可視域に対応したフィルタ型カプラを用いて、Φ10 μm コア径の白色共焦点変位センサを構築し、Φ50 μm コア径の当社白色共焦点変位センサ ZW-S5010 と受光波形を比較した。センサヘッドは、ともに同じ軸上色収差の光学系を使用した。ミラーを計測したときの受光波形を図 13 に示す。

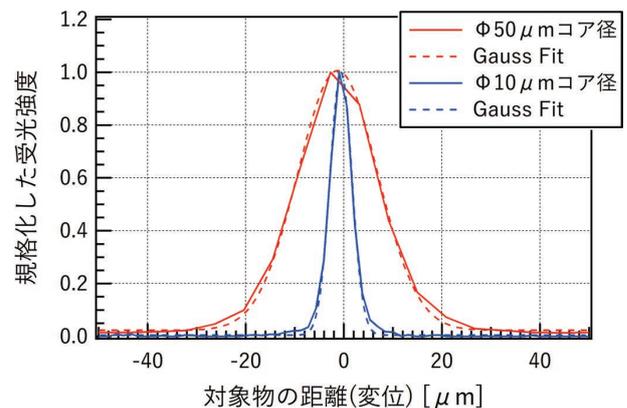


図 13 コア径違いの受光波形の比較

横軸は距離(変位)を表しており、センサヘッドの軸上色収差量と分光器の波長をもとに算出した。縦軸は、比較しやすいよう、それぞれの受光波形の最大値で規格化した。得られた受光波形に、ガウス関数で Fitting し、ミラーに対する半値全幅を求めた。さらに材質の違いによる影響を評価するため、ミラー以外に、ガラス表面、SUS 金属も計測した。結果を表 1 にまとめる。

表 1 コア径違いによる厚み分解能 実測評価

		改善前 (Φ50 μm)	改善後 (Φ10 μm)
半値全幅	ミラー	19.1 μm	5.2 μm
	ガラス表面	19.2 μm	5.2 μm
	SUS	19.0 μm	5.2 μm
透明体 (n=1.5) 厚み分解能		32.6 μm	8.8 μm

対象物の材質によらず、半値全幅が改善されたことがわかる。得られた半値全幅の最大値から、屈折率 n=1.5 の透明体における厚み分解能を求めた。Φ10 μm コア径によって、厚み分解能が 3.7 倍改善し、透明体厚みで 8.8 μm まで計測できる可能性がわかった。

4.4 薄い透明体の実測

構築した Φ10 μm コア径の白色共焦点変位センサと、Φ50 μm コア径の当社白色共焦点変位センサ ZW-S5010 に

て、薄い透明体の実測を行った。薄い透明体として、厚み 30 μm のガラスと、厚み 30 μm 、15 μm のポリエリレン (PE) フィルムを計測した。図 14 にその受光波形を示す。

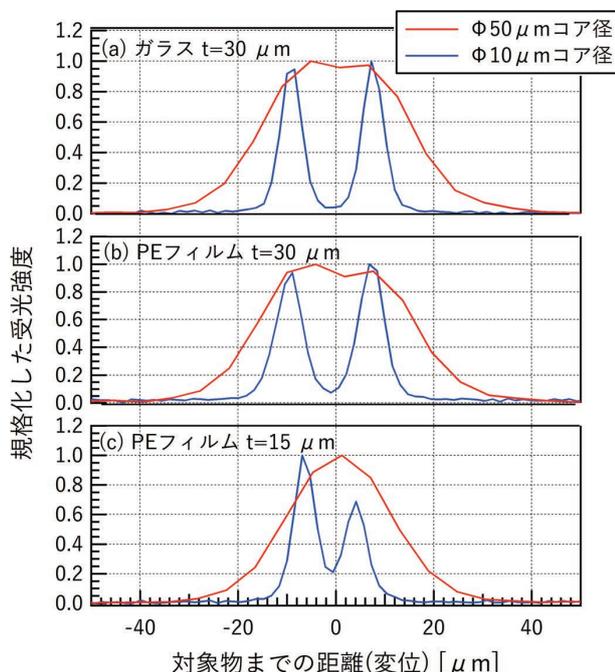


図 14 PE フィルム (t=15 μm) を計測した時の受光波形

図 14 (a), (b) から、 $\Phi 10 \mu\text{m}$ コア径によって、ガラス、PE フィルムどちらの材質においても、厚み分解能の改善が確認できた。さらに、図 14 (c) から、 $\Phi 10 \mu\text{m}$ コア径において、受光波形の頂点に 19% 以上の凹みが確認でき、15 μm の透明体厚み分解能が実測で確認できた。

また、厚み 15 μm の PE フィルムに対して、 $\Phi 10 \mu\text{m}$ コア径の白色共焦点変位センサのセンサヘッドを傾けて計測した。フィルムと正対したときの角度を $\theta=0^\circ$ として、5、10、15 $^\circ$ と傾けて計測した。計測した受光波形を、図 15 に示す。

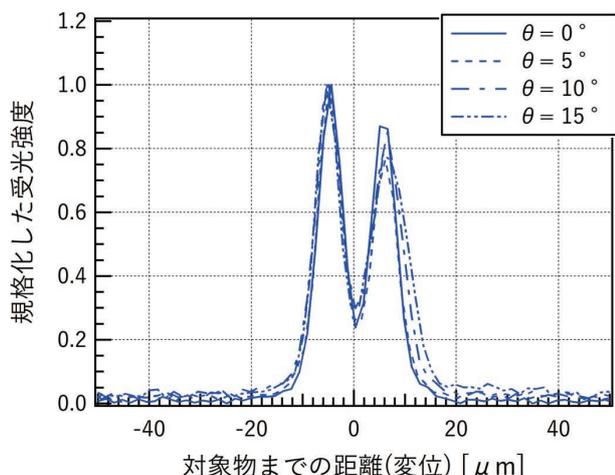


図 15 センサを傾けて計測した時の受光波形

15 $^\circ$ 傾けても、15 μm の透明体厚み分解能が維持できていることがわかる。

5. むすび

薄板ガラスやフィルムなどの透明素材の厚み計測の実現に向け、 $\Phi 10 \mu\text{m}$ コア径のファイバを用いて白色共焦点変位センサの厚み分解能の改善を行った。コア径を細くすることによる光量低下と分岐カプラでの波長依存性の課題に対して、それぞれレーザー励起によるファイバ光源と可視域対応のファルタ型カプラにて克服した。結果、透明体の厚み 15 μm が計測できるまでに、厚み分解能が向上した。

本技術を搭載した変位センサ ZW-8000 シリーズ (図 16) を 2018 年 4 月に商品リリースした⁷⁾。



図 16 ファイバ同軸変位センサ ZW (金色が ZW-8000)

本センサによって、ガラスやフィルムの厚み計測において、設置時調整の手間の緩和や、搬送時のばたつきやシワに対する安定計測が期待できる。またコア径を細くしたことにより、対象物上での焦点スポットが小さくなった。これまで以上に小さな部品の検査も可能になり、高度なものづくりにおける製品品質維持に広く貢献できると考える。

今後も、部品の軽薄短小化や検査点数の増加などの顧客ニーズに応えるため、本技術をもとに、高精度化、高速化、多点同時計測へと進めていきたい。

参考文献

- 1) 高嶋潤, 奥田貴啓, 森野久康, 早川雅之. 製造現場の変化に追従して進化する変位センサ技術. OMRON TECHNICS. 2019, Vol.51, No.1, p.10-15.
- 2) 日本電気ガラス. “フォルダブルディスプレイのカバーガラス用に世界最薄ガラスの開発に成功”. NewsRelease. 2020-7-21. https://www.neg.co.jp/uploads/news_20200721_jp.pdf, (参照 2022-05-26).
- 3) 波岡武. “分光装置 第 3 講 分光器に関する光学”. https://www.jstage.jst.go.jp/article/bunkou1951/19/3/19_3_127/_pdf/char/ja, (参照 2022-05-26).
- 4) 川上登. 光ファイバカプラ. New Glass. 1991 Vol.6, p.48-59. <https://www.newglass.jp/mag/TITL/maghtml/20-pdf/+20-p048.pdf>.

(参照 2022-05-26).

- 5) 日亜化学. 発光装置. 特開 2006-173324 号. 2006-6-29.
- 6) 金森弘雄. FTTHを支える光受動部品. SEIテクニカルレビュー. 2011, No.179, p.17-24. <https://sei.co.jp/technology/tr/bn179/pdf/sei10675.pdf>, (参照 2022-05-26).
- 7) オムロン株式会社. ZW-8000 / 7000 / 5000 シリーズ ファイバ同軸変位センサ / 特長 | オムロン制御機器. <https://www.fa.omron.co.jp/products/family/3500/feature.html>, (参照 2022-05-26).

執筆者紹介



早川 雅之 HAYAKAWA Masayuki

技術・知財本部
アドバンステクノロジーセンター
アドバンステクノロジー開発部
専門：機械工学・光学



木村 和哉 KIMURA Kazuya

技術・知財本部
アドバンステクノロジーセンター
アドバンステクノロジー開発部
専門：機械工学・光学



藤原 直樹 FUJIWARA Naoki

技術・知財本部
アドバンステクノロジーセンター
アドバンステクノロジー開発部
専門：機械工学・光学



森野 久康 MORINO Hisayasu

インダストリアルオートメーション
ビジネスカンパニー 商品事業本部
センサ事業部 第1開発部
専門：機械工学・光学

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

金属への深堀マーキングを実現するマルチパルスファイバレーザ技術の実証

吉武 直毅, 横井 忠正

近年、安心・安全への社会的関心が高まり、不具合品を市場に出さない品質向上に加え、不具合発生時に迅速な対象の特定を可能とするため、対象部品や製造を管理するトレーサビリティの重要性が増している。一方で、自動車業界を中心に金属対象物へのトレーサビリティを目的とした印字後の熱・研磨処理、塗装処理といった後工程を経ることで印字が読めなくなる課題が顕在化しており、レーザ印字には後工程を経ても消えないより深い印字加工を短タクトで実現する手段が求められている。そこで我々は、金属への深堀印字を行うために必要となるパルスエネルギー、レーザ平均出力を得るために、MOPA (Master Oscillator and Power Amplifier) 方式ファイバレーザにてマルチパルス化と入力信号制御技術の開発を行った。その結果、ビーム品質低下原因となる誘導ラマン散乱 (SRS) が発生しないピークパワー以下で高いレーザ平均出力 (50kHz にて 20W) を達成した。また、本技術を用いたレーザマーキング装置にて、高い印字品質を保ちつつ従来手法に対して約 25 倍の金属深堀印字結果が得られることを実現した。

Multi-pulse Fiber Laser Technology That Realizes Deep Marking on Metal

YOSHITAKE Naoki and YOKOI Tadamasa

Recently, social interest in safety and security has increased, and in addition to quality improvement that does not bring defective products to the market, traceability to manage target parts and manufacturing process is important to enable quick identification when defects occur. In addition, mainly in the automobile industry, problems such as unreadable marking due to post-processes such as heat/polishing and painting after marking on metal objects have become apparent. Laser marking requires a means to achieve a deeper marking process in a short time that does not disappear even after post-processing. Therefore, we aim to obtain the pulse energy and laser average output required for deeper marking on metal and use a MOPA (Master Oscillator and Power Amplifier) fiber laser with multi-pulse and input signal control technology. As a result, we achieved a high laser average output (20W at 50kHz) below the peak power where stimulated Raman scattering (SRS), which causes deterioration of beam quality, does not occur. In addition, it was confirmed that the laser marking system using this technology can obtain about 25 times deeper marking on a metal compared to the conventional method while maintaining high marking quality.

1. まえがき

近年、安心・安全への社会的関心が高まり、最終製品で発生した不具合に対応するリコールなどに対して製造メーカーの社会的責任がより一層問われるようになった。そのため、不具合品を市場に出さない品質向上に加え、不具合発生時に迅速に不具合対象を特定可能とするため、対象部品

や製造を管理するトレーサビリティの重要性が増している。特に自動車業界においては、2016年に品質マネジメントシステムに関する国際規格 (IATF16949) が制定され、重要部品には部品毎にダイレクトパーツマーキング (DPM) が行われている。また、電子部品においては、偽造防止や製品の歩留り向上を目的に部品にコード印字し管理することも行われている。

トレーサビリティでは、コード (QRコード、ダイレク

Contact : YOSHITAKE Naoki naoki.yoshitake@omron.com

トコード)を対象物に印字し管理する手法が主流であり、印字する手段には、刻印印字、インクジェット印字、レーザ印字などがある。その中でもレーザ印字は、時間が経っても消えないこと、インクや工具の摩耗などの消耗品にかかるランニングコストが不要であること、段取り替えが簡単で多品種少量生産や早い製品サイクルにも対応可能であることといった利点があり、工業用部品の印字には多く用いられている。

近年では自動車業界を中心に印字対象が増加し、金属対象物への印字後の熱・研磨処理、塗装処理といった後工程を経ることで印字が読めなくなるといった課題が顕在化しており、レーザ印字には、後工程を経ても消えないより深い印字加工を短タクトで実現する手段が求められている。

本報告では、短タクトにて印字品質を保ちつつ、金属深堀印字を実現するために、1パルス当りのエネルギーを高め且つ平均出力エネルギーを強化したファイバレーザ技術及び搭載したレーザマーキング装置による金属への深堀加工結果の紹介を行う。

2. 従来技術と課題

2.1 従来技術

従来、レーザマーキング装置は、光源として固体レーザが用いられていた。固体レーザは、希土類元素を添加した媒体に対して、ミラー等を使用し光を共振、増幅させレーザを出力する。一般的に、Qスイッチをオンオフすることでレーザを出力する方式が用いられる。固体レーザは、構造上、周囲環境の熱、機械的影響による光軸ズレなどに伴い、出力低下やビーム品質劣化、及びQスイッチやミラー等の耐久性に課題があり、ビーム品質が高く、印字対象に適したレーザ条件を設定できる自由度の高いレーザは困難である。また、構造上半導体レーザ(LD)の常時点灯が一般的に必要なため消費電力も大きいとされる。

それに対し、光ファイバを増幅媒体とするファイバレーザ光源が開発されている。この方式では光ファイバが小口径コアで真円のためビーム品質が高く、光ファイバが融着され光軸ズレがないため、煩雑なメンテナンスを伴わず長時間の安定したレーザ発振が可能である。これまでに、Qスイッチを用いた発振器方式¹⁾、種光用半導体レーザ(Seed LD)を直接変調しそれを増幅するMOPA(Master Oscillator and Power Amplifier)方式²⁻⁴⁾などが提案されている。MOPA方式は、パルス幅、形状および繰返し周波数に自由度があることが特徴である。構成を以下の図1に示す。

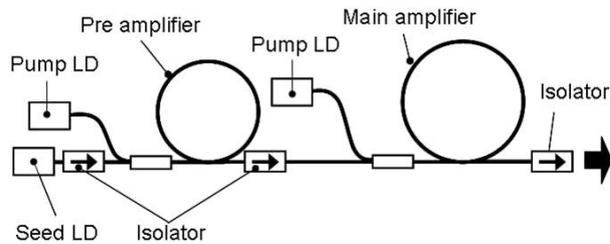


図1 ファイバレーザの構成

このファイバレーザは、種光用半導体レーザ(Seed LD)のレーザ信号光を多段の希土類添加ダブルクラッドファイバによって増幅することで所定の光を出力する構造である。具体的には増幅ファイバは、励起光で希土類元素がポンピングされた状態に信号光を入射することで誘導され光が増幅される。

レーザの仕様として、完全空冷方式の小型筐体から、最大平均出力20W、最大エネルギー1mJの特性が得られ、繰返し周波数は10kHz~1,000kHzまで可変できる。

また、出力するビーム品質はシングルモードに近い $M^2 \approx 1.2$ 、真円度1:1.2以下および非点収差が少ないビーム形状であり、レーザマーキング装置搭載時のスポット径は約 $\phi 50\mu\text{m}$ ($1/e^2$)が実現されている。図2に出射ビームプロファイルを示す。

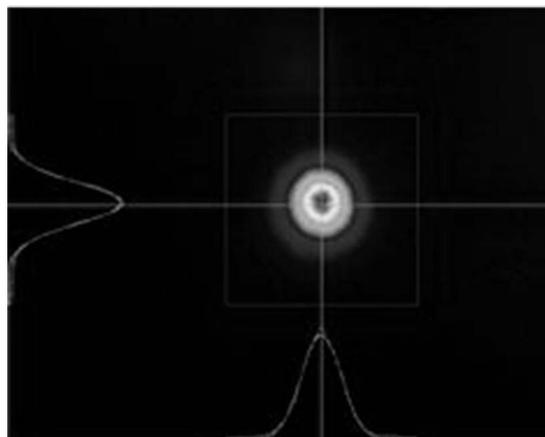


図2 出射ビームプロファイル

2.2 課題

金属に高品質に早く深く印字するためには、ビーム品質を維持しつつ、パルスエネルギーを上げる及びレーザ平均出力を上げる必要がある。なぜなら、1パルスあたりのパルスエネルギーが高くなることで、レーザを照射した金属表面に留まらず金属内部にまで熱が加わる。これにより、金属熔融現象を引き起こして深く印字することができる。また、レーザ平均出力を高くすることでレーザ照射箇所に連続して熱を加えられ、深堀速度を速めることができる。図3にパルスエネルギーとレーザ平均出力の説明を示す。パル

エネルギーは1パルスにおけるエネルギーであり、パルス強度とパルス幅の積分によって求められる。ここでピークパワーとは1パルスの最大光強度を指し、パルス幅はパルスの半値全幅 (FWHM) である。レーザ平均出力は一定時間におけるレーザ出力の平均値であり、パルスレーザでは、パルスエネルギーと繰り返し周波数の積算となる。

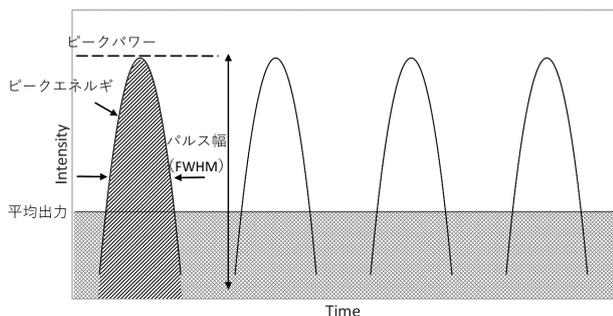


図3 パルスパワーのパルスエネルギー及び平均出力

固体レーザではパルスエネルギー及びレーザ平均出力を上げるためには励起光を増やすことが有効な手段となりうるが、熱レンズ効果等の影響により高ビーム品質を確保することが困難である。

ファイバレーザでは、パルスエネルギーを上げる場合には繰り返し周波数を下げることが有効である。これは、パルス間隔が長くなることで増幅ファイバの希土類元素が励起光でポンピングされる蓄積量が増加することに由来する。しかし、瞬間的なピークパワーも上がってしまうことで、非線形効果である誘導ラマン散乱 (SRS) に伴いピークシフトが起きビーム品質が低下してしまう。そのため、低繰り返し周波数の場合、SRS が発生しないピークパワーまで励起光量を下げることが必要であり、レーザ平均出力も下がってしまう。レーザ平均出力を上げる場合には、増幅ファイバを高出力に対応できる大口径コアを用いることが有効であるが、大口径コアの採用によってビーム径が拡大し、高次伝搬モードが発生するためビーム品質が低下してしまう。その結果、レーザマーカの印字焦点におけるスポット径が大きくなることで微細印字が難しくなり印字品質が低下してしまう。

よって、金属深堀印字には、非線形効果が発生しないように瞬間的なピークパワーを制御しつつ、パルスエネルギーもしくはレーザ平均出力を向上させる必要がある。

3. 本研究の内容

金属へ高い印字品質を保ち深堀印字を実現するため、高いビーム品質でパルス制御が可能であるファイバレーザ MOPA 方式において非線形効果の発生しないピークパワーにて高いパルスエネルギー及びレーザ平均出力を得るための2つの手段を検討した。

- ①マルチパルス時の励起光量を上げ、SRS が発生しないピークパワーでパルスエネルギー向上
- ②マルチパルス内の各パルスエネルギー制御による平均出力制御でレーザ平均出力向上

3.1 マルチパルス

2.2 課題に記したようにファイバレーザでは、繰り返し周波数を低くさせることによってピークパワーが増大し SRS が発生してしまう。そこでシングルパルスからマルチパルスにすることで増幅ファイバに蓄積される励起光量のエネルギーを消費させ、1本あたりのピークパワーを下げる。図4に同じレーザ平均出力でのピークパワーを得るために必要なシングルパルスとマルチパルスのピークパワーを示す。これにより、瞬間的なピークパワーを制御し、SRS を抑制することができる。

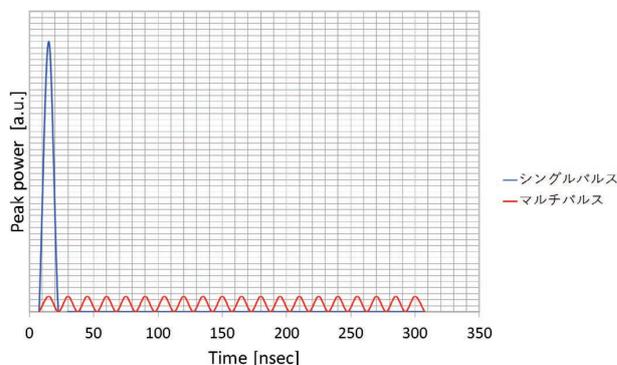


図4 シングルパルスとマルチパルスのピークパワー比較

3.2 SeedLD 最適制御

マルチパルス内でのエネルギー増幅制御を最適化することでパルスエネルギー、レーザ平均出力の最大化を実現する。図5に増幅ファイバのエネルギー準位図を示す。基底準位 E1 の原子 (原子分布密度 N1) を励起光によって励起準位 E2 にポンプアップさせ、励起準位 E2 にある原子 (原子分布密度 N2) を入射する信号光により誘導放出させることでレーザ光を増幅する。

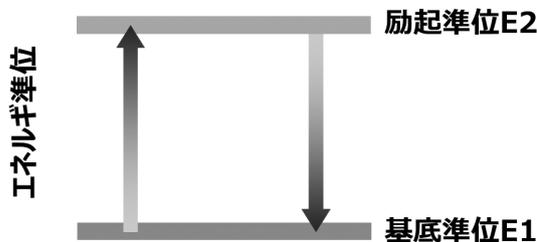


図5 エネルギー準位図

増幅ファイバによる増幅後の出力 P は、励起準位の原子分布密度 N2、信号光量 I 及び増幅ファイバ固有パラメータ F (放出断面エネルギー、結合効率他) を用いて $P = I + N2 \times$

F×Iで算出できる。パルスエネルギーは、主に励起光量と信号光量により制御できるが、nsecレベルのパルス列に対して励起光量の制御は困難であり、信号光量の制御が重要である。

図6に入射する信号光量を直線、曲線に増加させたマルチパルスのパターン例を示す。マルチパルスを構成するパルスを順に、n1, n2, n3...n*とする。図7に図6で示したマルチパルスパターンで算出した各パルス列入光時にパルスn1直前のN2にて正規化した励起準位の原子分布密度N2を示す。励起準位の原子分布密度はn1時が最も大きくなるため、n1の信号光量を小さく抑えて直線的に増加させることでパルス列内のピークパワーを抑えつつ、レーザ平均出力を大きくすることができる。また、パルス列後半のピークパワーを上げるためには、パルス列後半の原子分布密度の確保と十分な信号光量が必要となる。よって、入射する信号光量はパルス列前半を抑えて後半を大きく曲線的に増加させることで、増幅後出力はマルチパルスのパルス毎のピークパワーをSRS発生閾値以下としつつレーザ平均出力をより大きくすることができる。

図8に最大ピークパワーで正規化した増幅後出力のシミュレーション結果を示す。

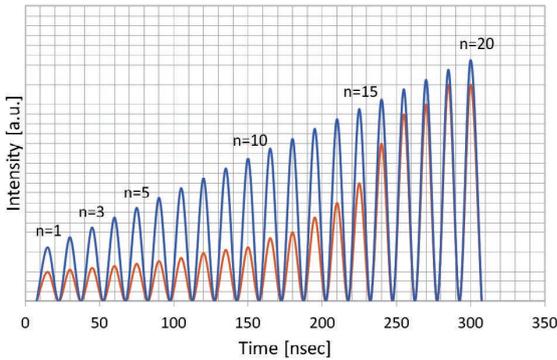


図6 入射するマルチパルスの信号パターン例

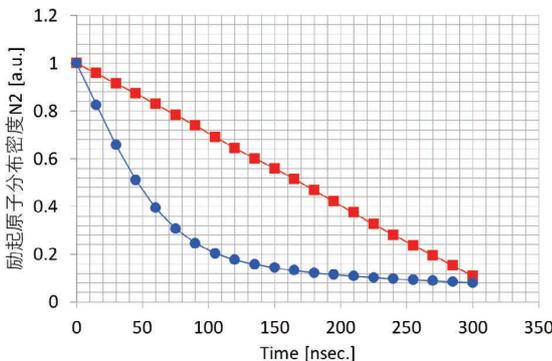


図7 各パルス列入光時の励起分布密度 N2

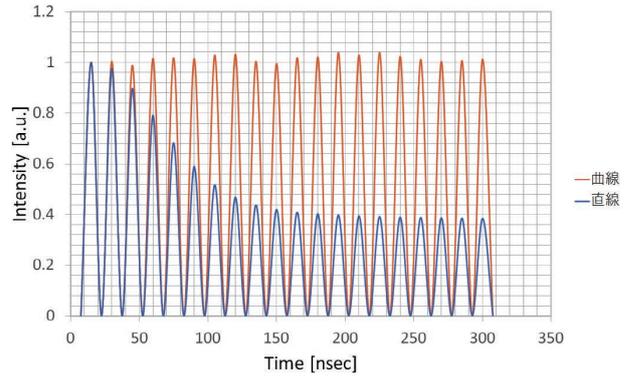


図8 増幅後出力のシミュレーション結果

4. 実験結果

4.1 マルチパルスの実験結果

シングルパルスとマルチパルスのそれぞれで励起光量を上昇させ、増幅出力及びSRS発生有無の確認を行った。

図9に繰返し周波数10kHzのシングルパルスにおいて、励起光量を増加させた時の出力光の波長特性を示す。レーザ信号光(1062nm)に対してSRS(1120nm)が発生することで、波長成分が広がっていることがわかる。

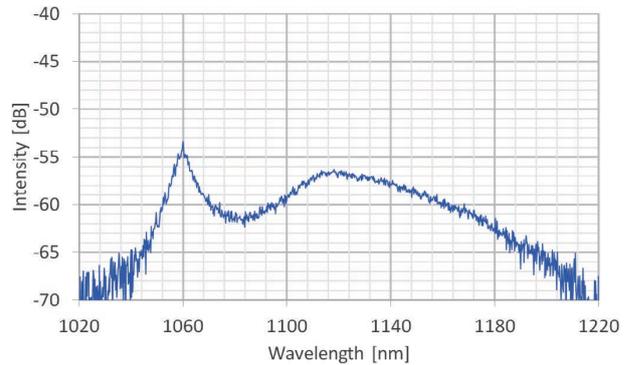


図9 シングルパルス波長特性

図10に繰返し周波数10kHzのマルチパルスにおいて、励起光量を上記シングルパルス励起光量まで増加した時の出力光の波長特性を示す。レーザ信号光1062nmをピークとする波長のみ観察され、SRSの発生は確認されなかった。

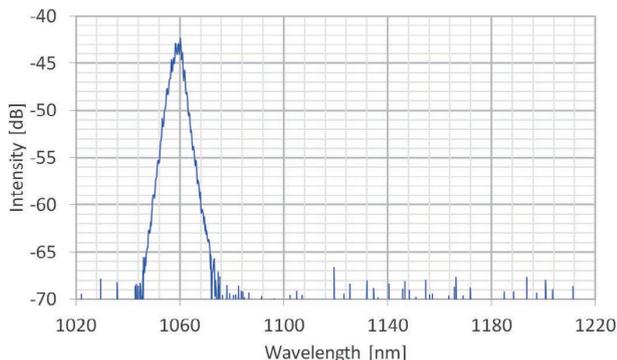


図 10 マルチパルス波長特性

4.2 SeedLD 最適制御の実験結果

次に、3.2 で示した通りマルチパルスにおける最大のレーザ平均出力を得られるようにマルチパルス波形の制御を行った。単発のパルス幅は $7.5 \pm 2.5\text{ns}$ である。

図 11 左図に、増幅ファイバへ導入するマルチパルス信号光量を $n1$ から n^* に従って直線上に増加させた SeedLD 波形パターン時を示す。この時、増幅ファイバの出力パターンは図 11 右図のように、 $n1$ のピークパワーが大きく、 $n2$ 以降は徐々に減っていくことがわかる。

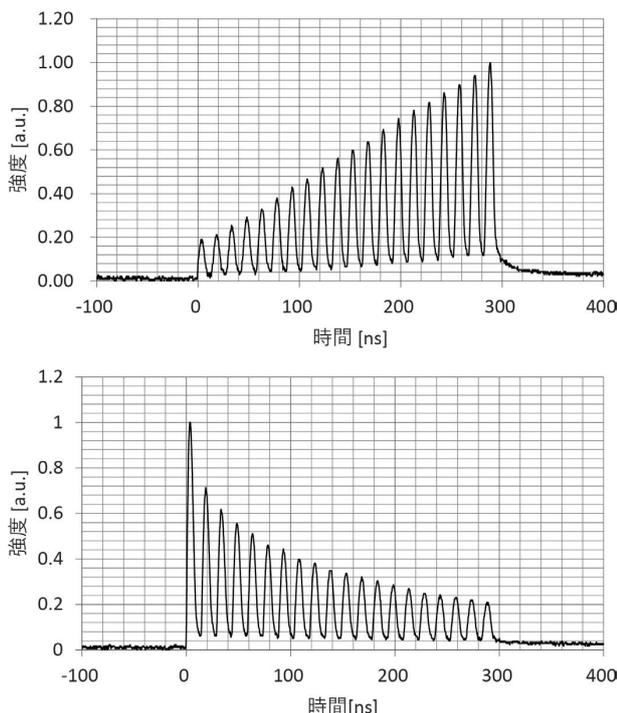


図 11 SeedLD 信号光 (上) と出力光エネルギー (下)

図 12 左図に、 $n1$ の信号光量をさらに抑え、且つ徐々に曲率上に信号光量を増加させていく SeedLD 波形パターンを示す。増幅ファイバの出力パターンは図 12 右図のようにマルチパルス前半のピークパワーを抑えつつ、後半も高くすることができることが確認できた。

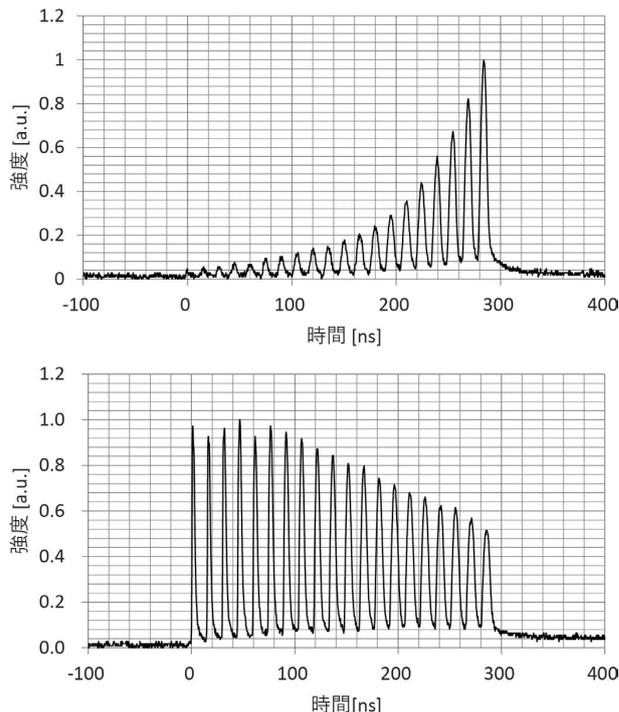


図 12 SeedLD 信号光 (上) と出力光エネルギー (下)

各繰返し周波数におけるシングルパルスとマルチパルスのピークパワー (シングルパルスの最大ピークパワーで正規化) を図 13 に、レーザ平均出力を図 14 に示す。なお、本ファイバレーザは構成する光学部品の限界値の関係上、レーザ平均出力上限は 20W である。繰返し周波数 10kHz ~ 100kHz においてマルチパルスで励起光量を上げることによりピークパワーを抑えつつ、レーザ平均出力を高くすることが出来た。なお、図 13 に示したマルチパルスではシングルパルスで SRS の発生しなかったピークパワーに対して十分低く余裕があるため、図 14 に示したレーザ平均出力は更なる向上が実現可能である。

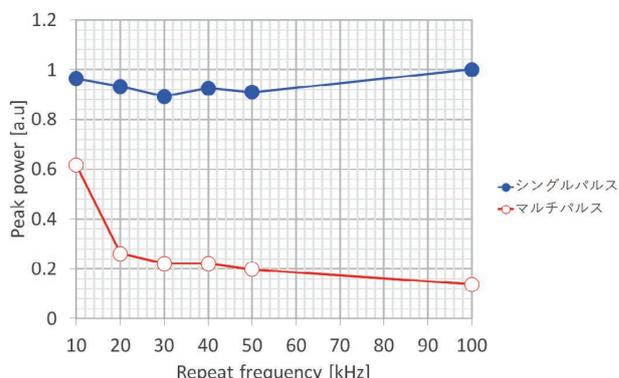


図 13 ピークパワー

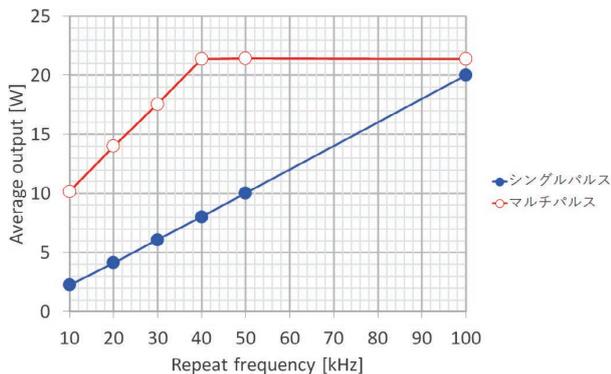


図 14 レーザ平均出力

4.3 搭載したレーザマーキング装置での加工結果（深堀）

本検討のファイバレーザを搭載したレーザマーキング装置にて、マルチパルスの深堀性能を自動車業界で取扱いが多い材料である SUS304、AL（アルミニウム）、ADC（アルミダイカスト）への加工にて検証した。レーザマーキング装置は、ガルバノミラー及び集光レンズにてマーキングエリア 160×160mm、ワーキングディスタンス 220±10mm の性能を持つ。図 15 にレーザマーキングの装置の外観を示す。



図 15 レーザマーキング装置

加工検証に使用する印字パターンは、印字深さ測定を光学測定器で測定可能とするため、光の回折影響を受けないアスペクト比 1 以下になるよう設計し、□ 2mm×1mm の塗りつぶし加工を行った。加工後の上面からの写真及び印字時のイメージと塗りつぶし印字の概念図を図 16 に示す。

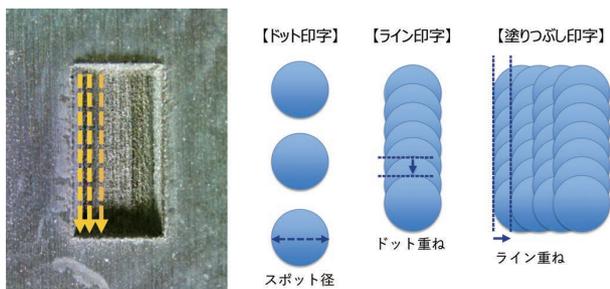


図 16 印字イメージ及び塗りつぶし概念

各材料（SUS304,AL,ADC）に対して繰返し周波数 50kHz におけるレーザ印字加工回数と印字深さの関係を図 17 に示す。シングルパルスでの加工結果に比べて、マルチパルスでの加工では、各材料ともに約 25 倍の深堀結果が得られた。これは、マルチパルス化によりピークエネルギーを高められることに加え、nsec レベルの連続的なレーザ照射で深さ方向へも熱が伝わることで深堀が可能になっていると考えられる。

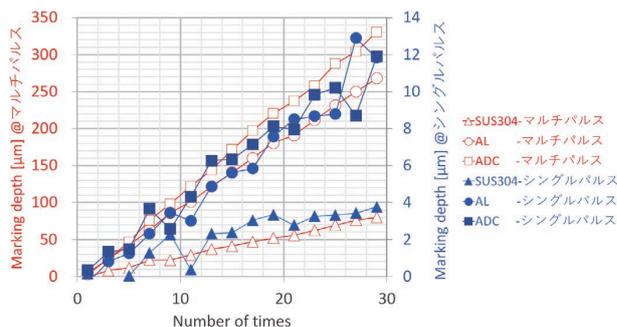


図 17 加工回数と加工深さの関係

図 18 に上記レーザマーキング装置で AL 基材へコード印字（データマトリクス、7.0mm 角、14×14 セル）した結果を示す。コード検証機 LVS-9585 にて ISO/IEC 29158 で定められた条件にて印字品質を確認した結果、最も品質グレードが高い総合グレード 4.0 であることを確認できた。

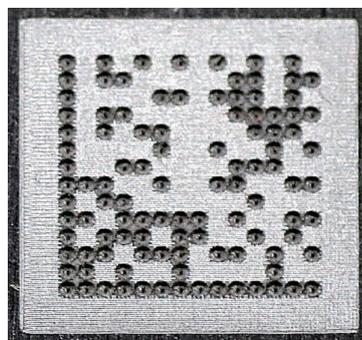


図 18 コード印字結果

5. むすび

金属に高品質な深い印字を短タクトで実現することが求められているレーザ印字において、レーザのビーム品質を維持しつつ、パルスエネルギー及びレーザ平均出力を上げる必要があるが、短パルスでの非線形効果によるビーム品質低下を引き起こす問題があった。

我々はファイバレーザ MOPA 方式において、低繰返し周波数におけるマルチパルス化と入力信号光制御により、誘導ラマン散乱（SRS）が発生しないピークパワー以下に抑え高レーザ平均出力化を行うことで、従来手法に対して約

25 倍の金属深堀印字結果を得た。

今後は、更なる高出力化、短パルス化を検討することで、金属への深堀タクトを向上する技術を検討する。

参考文献

- 1) Alvarez-Chavez, J. A.; Offerhaus, H. L.; Nilsson, J.; Turner, P. W.; Clarkson, W. A.; Richardson, D. J. High-energy, high-power ytterbium-doped Q-switched fiber laser. Opt. Lett. 2000, Vol.25, No.1, p.37.
- 2) Vu, K. T.; Malinowski, A.; Richardson, D. J.; Ghiringhelli, F.; Hickey, L. M. B.; Zervas, M. N. Adaptive pulse shape control in a diode-seeded nanosecond fiber MOPA system. Opt. Exp. 2006, Vol.14, No.23, p.10996.
- 3) Morasse, B.; Chatigny, S.; Gagnon, E.; Sandro, J. P.; Desrosiers, C. Enhanced pulseshaping capabilities and reduction of non-linear effects in all-fiber MOPA pulsed system. Photonics West. 2009, p.71951D.
- 4) 中野文彦. “ファイバレーザのフレキシブルパルス制御とそのマーキング加工等への応用”. レーザ学会学術講演会第 32 回 年次大会. 2012, 01pV5.

執筆者紹介



吉武 直毅 YOSHITAKE Naoki

インダストリアルオートメーションビジネス
カンパニー
商品事業本部 センサ事業部
第 2 開発部
専門：電気電子工学
所属学会：レーザ加工学会



横井 忠正 YOKOI Tadamasu

インダストリアルオートメーションビジネス
カンパニー
商品事業本部 センサ事業部
第 2 開発部
専門：電気電子工学
所属学会：レーザ学会

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

高い可読性を実現した 2D コードの 高速レーザスキャニング技術

芦原 克充

近年、安心・安全への社会的関心が高まっており、商品に不具合があった場合のリコール対応に備え、迅速なリコール対象の特定が求められている。対象の特定にあたっては、対象部品に、製造ライン番号や、製造年月日などのトレーサビリティ情報を記録した 2D コードを付与する方法がある。

2D コードを付与する方法の 1 つにレーザマーキングがある。レーザマーキングは、レーザを照射しながらスキャニングすることでワークに直接印字する方式であるため、シールのように剥がれたり、簡単に消えたりしない利点がある。レーザマーキングを行うにあたっては、レーザパワーや印字速度を設定する必要があるが、印字速度はサイクルタイムと印字の正確性がトレードオフの関係にあり、適切な設定値を見つけることが難しい。

印字の正確性が下がる要因は、スキャナに対する制御入力信号と、実際のスキャナの動きの間に遅延が発生することに起因する。本検討ではこの影響を受けないよう、制御入力に自動的に予備動作を付加することで、印字崩れが解消されることが確認できた。さらに、例えば 8mm 角の 2D コードの印字において、印字速度を 500mm/s から 1000mm/s へと従来の 2 倍の速度設定をした場合、印字時間は従来の 54% となり、大幅な高速印字ができることが確認された。

High-speed Laser Scanning Technology for 2D Code with High Readability

ASHIHARA Yoshimitsu

In preparation for responding to a recall when there is a defect in the product, it is required to quickly identify the recall target. In identifying the target, there is a method of assigning a 2D code that records traceability information such as the date of manufacture to the part. Laser marking is one of the ways to assign 2D codes. When performing laser marking, it is necessary to set the laser power and printing speed, but in the printing speed, there is a trade-off between takt time and printing accuracy, and it is difficult to find an appropriate set value.

In this study, in order to solve this problem, it was confirmed that printing collapse can be eliminated by automatically adding a preliminary operation to the control input. Furthermore, for example, when printing an 8 mm square 2D code, when the printing speed is set to twice that of the conventional one from 500 mm/s to 1000 mm/s, the printing time is 54% of the conventional one, and it was confirmed that significant high-speed printing can be performed.

1. まえがき

近年、安心・安全への社会的関心が高まり、最終製品で発生した不具合に対応するリコールなどに対して製造メーカーの社会的責任が益々問われている。そのため、不具合品を市場に出さない品質向上に加え、不具合発生時に迅速に対象を特定できるようにするため、部品や製造工程を管理

するトレーサビリティの重要性が増している。

例えば自動車業界においては、2016 年に国際規格 IATF 16949 が制定され、ロットのトレーサビリティが求められており、重要部品には直接 2D コードを印字するダイレクトパーツマーキング (DPM) が行われている。また、DPM の品質についても定義されており¹⁾、印字の正確さも重要であると言える。

また、電子部品においては、偽造防止や製品の歩留り向

Contact : ASHIHARA Yoshimitsu yoshimitsu.ashihara@omron.com

上を目的に部品を ID 化し管理することも行われている。

DPM によるトレーサビリティ手段としては、刻印、インクジェット印字、レーザー印字などがある。中でもレーザー印字は、時間が経っても消えないこと、インクや工具の摩耗などの消耗品にかかるランニングコストが不要であること、段取り替えが簡単で多品種少量生産や早い製品サイクルにも対応可能であることといった利点があり²⁾、工業用部品の印字に多く用いられている。

従来、複数の部品を組み合わせたモジュール単位を対象物として印字し管理するニーズが多かったが、近年ではモジュールを構成する個々の部品にまでトレーサビリティが求められる。

レーザーマーカによる 2D コード印字にはメリットも多いものの、大量に印字するにあたっては、印字サイクルタイムの長さが課題となる。短サイクルタイムでかつ高品質なレーザー印字を実現する手段が求められている。

本報告では、設定した印字速度に応じて、スキャナへの制御入力に予備動作を自動付加するアルゴリズムを開発したのでその紹介を行う。

2. 従来技術と課題

2.1 レーザ印字のしくみ

レーザーマーカは、グラフィックツール上で編集したマーキングデータをもとに、レーザー光を制御・走査することで印字・マーキングを行う。平面上に印字する 2D 式や、平面だけでなく立体形状にも印字できる 3D 式のレーザーマーカがある²⁾。

2D 式のレーザーマーカの仕組みを図 1 に示す。

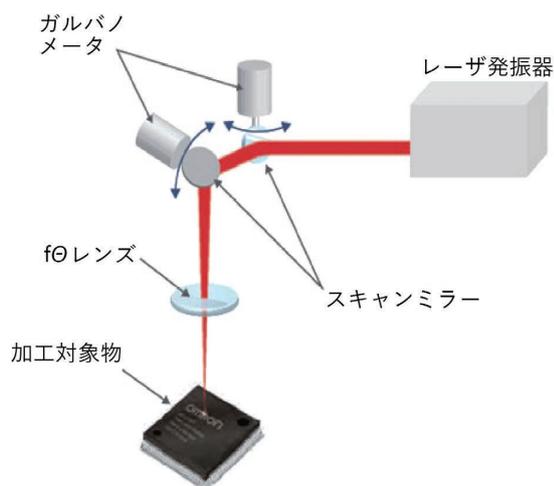


図 1 2D 式レーザーマーカの仕組み

レーザー発振器から出射されたレーザー光を、スキャンミラーに当て、X / Y 軸それぞれの方向にレーザー角度を変えするためのガルバノメータでスキャンミラーを動かし、印字

対象物上に印字位置にレーザーを向ける。ガルバノメータと、スキャンミラーは一体として動くため、以降これらを合わせてガルバノスキャナと記載する。

印字はレーザーを、加工閾値を超えるエネルギー密度に集光し、印字対象物に照射されることで実現される。2D 式レーザー印字の集光には、 $f\theta$ レンズが用いられる。このレンズはスキャンミラーの振り角と、印字位置が比例関係となる特性を持ち、スキャン制御を簡単にできるメリットがある。

2D コードをネジ、シャフト、ベアリングなどの立体物に印字する場合は、3D 式のレーザーマーカを使用する。3D 式のレーザーマーカの仕組みを図 2 に示す。

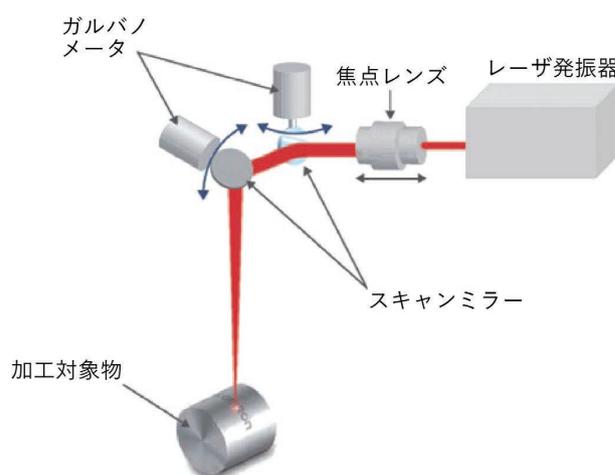


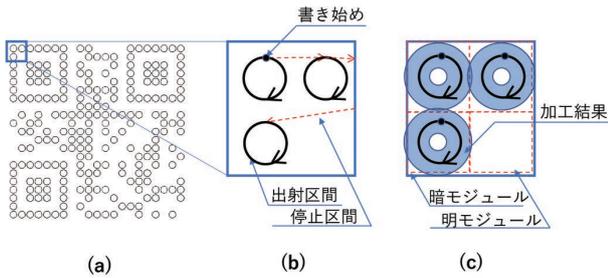
図 2 3D 式レーザーマーカの仕組み

レーザー発振器から出射された光は、焦点レンズでフォーカス位置を調整し、印字対象物に焦点が合うように制御する。2D 式と同様にガルバノメータを振ることで印字位置にレーザーを照射する。3D 式ではワークの形状や位置に応じて、フォーカス位置調整と、ガルバノメータの振り角を同時制御する。

2.2 2D コードの印字方法

レーザー印字のしくみで説明した通り、レーザーマーカは、微小に集光したレーザーを印字対象物に当てることで印字を実現している。

2D コードの印字を例に挙げより詳しい説明をする。2D コード全体の印字イメージを図 3 (a) に示す。この 2D コードは 21×21 のセルの構成で、各セルを丸形状で表現している。



明モジュール：暗モジュールに対して反射率が高いセル
暗モジュール：明モジュールに対して反射率が低いセル

図3 QRコードの印字（丸形状）

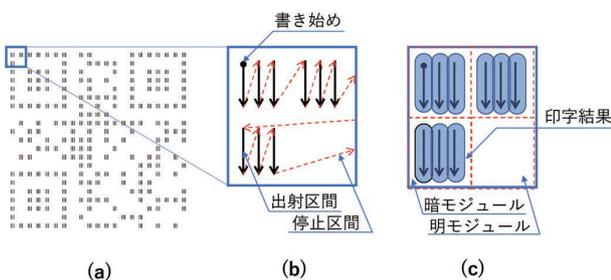
このコードの印字は、最初にガルバノスキャナでレーザを図3 (b) の“書き始め”に向け、その後レーザを出射しながら右回転で丸を書く。書き始め点まで戻った直後にレーザ出射を OFF にすることで1つのセルの印字が行える。

次に、赤点線で示すライン上を通るようにレーザをガルバノスキャナで移動させ、右のセルの書き始めに到達させた後、1セル目と同じようにレーザ出射を再開することで2セル目の印字を行う。このような繰り返しにより、印字することで、図3の (c) に示すような印字結果が得られる。

図3においては、レーザ印字したセルを暗モジュールとして表したが、印字前のワークの反射率が低い場合や、レーザの照射エネルギーの調整により、レーザ印字したセルを明モジュールとすることもできる。

また、セルを丸で表現するとそのサイズにより、セルの中心部が深く彫れるような印字が行える。このような印字をした場合は、表面が摩擦で割れたとしても中心部が残るため、消えにくい特徴がある印字となる。

図3ではセルを丸で表現したが、図4のように直線で表現することもできる。



明モジュール：暗モジュールに対して反射率が高いセル
暗モジュール：明モジュールに対して反射率が低いセル

図4 QRコードの印字（直線形状）

この印字では線の間隔によりセルの印字深さを概ね一定にすることができ、目視したときに凹凸感少ない印字と感じられ、美しいと評価されることもある。

このように、印字方法を変えることで、多種多様なニーズに合わせることもできるのもレーザマーカの特徴である。

2.3 文字印字におけるスキャンング遅延

文字印字を例に、スキャンング遅延について説明する。レーザマーカは、動作の仕組みとして説明の通り、ガルバノメータを回転させることで、印字点にレーザを当て印字するが、ガルバノメータの回転軸や先端に取り付けたミラー質量による慣性が生じる。このため、ミラーを高速に動かそうとしても、スキャンングに遅延が生じてしまい、指示通りの動きとならない。“L”の字を書いた場合を例に、スキャンング遅延について図5で説明する。

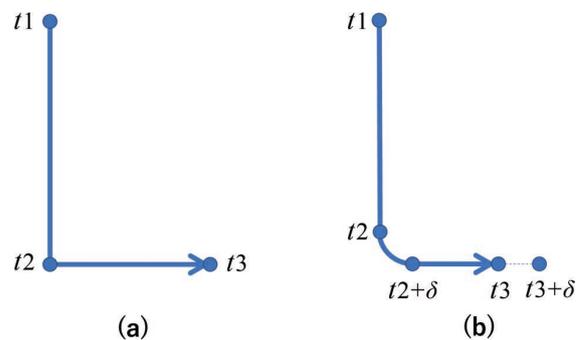


図5 印字課題

図5 (a) で、スキャナの慣性が無く理想的に動いた場合の説明をする。 $t1$ の時刻において、ガルバノスキャナは“L”の字の書き始めを指している。印字が開始され、 $t2$ の時刻では“L”の曲がり点に位置し、 $t3$ の時刻において、“L”の書き終わり点を指す。しかしながら、スキャナには慣性があるため、実際には図5 (b) のように動く。 $t1$ の時刻において、ガルバノスキャナは“L”の字の書き始めを指している。 $t2$ の時刻においては慣性による遅れにより、まだ“L”字のコーナー部まで到達していない。しかしながら、X方向（左右方向）のスキャナの動作開始時刻となるため、X方向にも動き始める。Y方向（上下方向）の移動が“L”の下辺側に到達する時刻は、慣性による遅れ時間を加えた $t2+\delta$ の時刻となる。印字結果としては、“L”のコーナー部が丸まって印字されてしまう。

その後、“L”の書き終わり点まで移動するが、理想的に動作した場合の書き終わり点に到達する時刻 $t3$ で印字が打ち切られる。結果として“L”の字は理想的な書き終わり点の手前で印字が終了することとなり、“L”のX方向は短く印字されてしまう。

このように、レーザマーカによる印字は、スキャンング遅延が原因となり、スキャンング方法によって印字崩れが顕在化する。この課題に対応するため、弊社製レーザマーカ MX-Z2000H-V1 シリーズにおいては、“助走”、“送り”

機能が搭載されている。

“助走”とは、レーザ出射開始点でのスキヤニング速度を、レーザ出射中と一致させるための予備スキヤニング動作で、レーザ停止した状態でレーザ出射開始点に向けてスキヤニングする動作を意味する。

“送り”とは、助走がレーザ出射前に行う動作であることに対して、レーザ停止後に行うスキヤニング動作である。

これらの機能を使用し、“L”の字を印字する様子を図6に示す。 t_0 で助走を開始し、 t_1 からレーザ照射を始める。 t_1 時点では助走の効果により遅延は生じない。続いて“L”の字のコーナー部までレーザを出しながらスキヤンし、レーザを停止しそのままの方向に送り距離分スキヤンする。レーザ停止のタイミングでスキヤニングを減速させないため、“L”字のコーナー部印字するタイミングでも遅延は生じない。同様の考え方でL字の横線部も印字する。助走・送りを付加した分、経路が長くなり印字時間がわずかながら長くなるが、印字中に加減速が生じないため印字の正確性が維持できる。

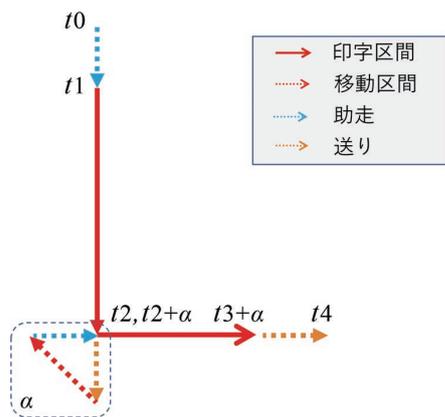


図6 助走・送り機能

2.4 課題

ここまでみてきたように、レーザマーカは書き方の工夫により印字の正確性を向上させることができる。一方、生産ラインにレーザマーカを組み込んで使用する場合は、他工程に合わせて動作させるための印字サイクルタイム要求があり、短サイクルタイム印字が最優先で求められる場合がある。特に2Dコードの印字においては、印字の正確性が重要であることから、サイクルタイムとの両立が求められる。

文字印字におけるスキヤニング遅延の解消に効果がある助走・送り機能の活用により、2Dコードにおいて印字の正確性を向上させたいが、この機能は印字線どうしの間隔が離れていることを前提としている。前提に合致する状況の場合は、2Dコードであっても文字印字と同様に、図7(a)のように無駄な動作無くスムーズな動きで印字できる。しかしながら、2Dコードではセルサイズが小さく、

線間隔が非常に狭い場合が多い。この状態で従来のアルゴリズムを適用すると、図7(b)のような印字経路となり、不要な往復運動が高頻度で生じてしまい、印字サイクルタイムが大きく伸びてしまう課題がある。

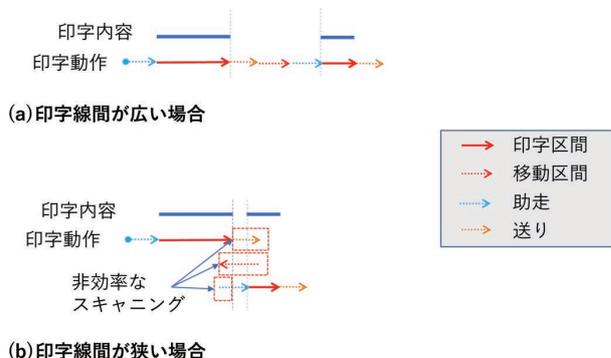


図7 助走・送り動作を付加時の印字動作（改良前）

3. 本研究の内容

2Dコードの可読性を下げること無く、印字サイクルタイムへの影響を最小限にとどめる印字方法を検討した。

3.1 印字経路

高速かつ正確に印字するためには、印字スキヤニングの折り返しで生じる加減速動作回数を減らす必要がある。2Dコードの場合は、スキヤニングを図4のように、セル単位に行うのでは無く、図8のように、2Dコードの1辺を1ストロークでスキヤニングする方法により実現できる。これにより、加減速が生じる場所が、2Dコードの端に限定され、高速かつ正確に印字するにあたってはこの印字経路が良い。

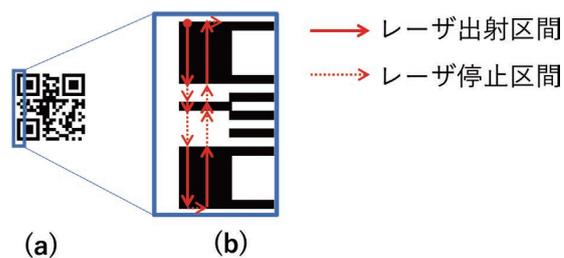


図8 1辺1ストロークのスキヤニングによる印字経路

3.2 助走・送り

従来の課題として図7(b)では印字間隔が非常に狭い状況では助走・送り機能が高速かつ正確に印字する効果が発揮されないことを示した。本検討では印字の折り返し点のみに助走・送りを追加するよう改善することで、図9に示すようなスムーズな動作が可能とし、レーザを出射している区間はスキヤニング速度が一定とすることで高速かつ正確な印字が実現できるようにした。

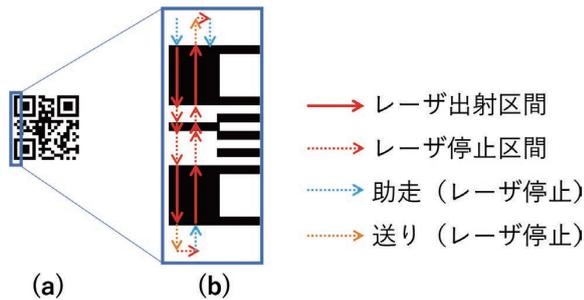


図9 助走・送り動作を付加時の印字動作

また、付加する助走・送りの距離は、ガルバノスキャナの慣性の影響が印字に現れなくなる範疇で最小とし、印字サイクルタイムが最小になるよう、自動計算されるようにした。

2D コードはその重要性から、読めれば良いというだけでなく、安定して読めることが求められており、品質指標が国際規格 ISO/IEC15415 で定義されている。また、レーザマーカのように、ワークに直接印字する 2D コード (DPM) の品質については、ISO/IEC TR20158 にて定義されている。この評価指標に則り高印字品質となることが求められている。この仕様書で定義されている 2D コード品質評価指標の 1 つとしてグリッド不均一性がある。これは、2D コード認識のアルゴリズムが算出した理想的なセル位置と、実際のセル位置の最大偏差を等級付けした評価値である。

助走・送りの設定値は自動計算されることで、適切な値が得られるようになり、グリッド不均一性の評価値 (可読性) を下げない効果が得られる。

助走・送り距離の最小値を見つけるため、ガルバノスキャナ動作信号と、位置信号との遅延時間を測定した。その結果を印字データに反映するため、距離換算する計算式を作成した。

3.3 助走・送り計算式

ガルバノスキャナの信号に対する実動作の遅延時間 τ は、そのスキャナ本体が持つ慣性や、ミラー重量、ドライバ回路のチューニング等により決定されるが、製品ばらつきはドライバ回路のチューニングによりほぼ一定の特性が得られるため、固定パラメータとして使用できる。特性評価のため、遅延時間 τ を測定した。また、ユーザー設定の印字速度に応じて 2D コードの印字折り返し点のみに自動的に助走・送りの距離を付加できるようにアルゴリズムを改良した。折り返し点の検出は、助走・送り機能を使わない状態で、スキャンング角度変化が一定値以上変化する箇所を特定することで検出した。また、遅延時間 τ から助走・送り距離への換算は式 1 を用いて換算し、スキャンング経路に付加した。

$$\text{助走・送り距離} = \text{印字速度} \times \tau \quad (1)$$

4. 実験結果

4.1 ガルバノスキャナの遅延時間測定

ガルバノスキャナの制御入力信号と、回転角センサ信号との遅延量を知るため、ガルバノスキャナを高速に正逆回転させた状態を、オシロスコープで測定した。測定系を図 10 に示す。

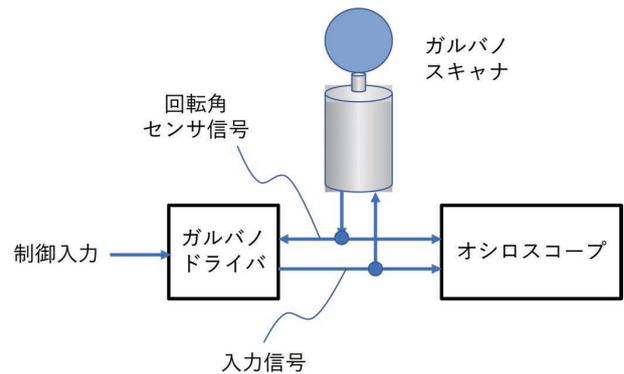


図 10 遅延量測定構成

測定結果は図 11 の通り制御入力信号と回転角センサ信号間には遅延時間 τ が発生しており、この影響で信号が指示した位置までスキャナが到達せずに折り返し動作に入っている様子が分かる。

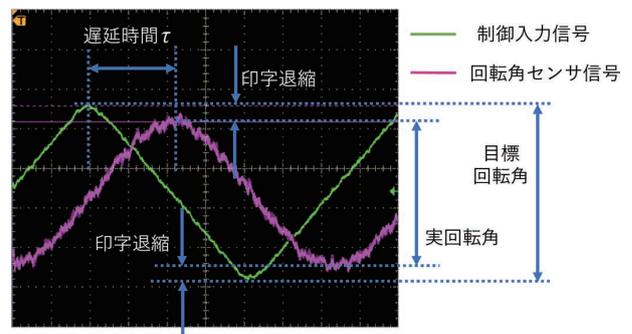


図 11 ガルバノスキャナ遅延

このような動作で Y 方向にスキャンして 2D コードを印字した場合、折り返し地点で 2D コードが退縮して印字されてしまう。

改善のため、3.3 章の式 1 に基づき、図 11 のグラフに、助走・送りを追加制御として加えた時の動作状況を図 12 で示す。

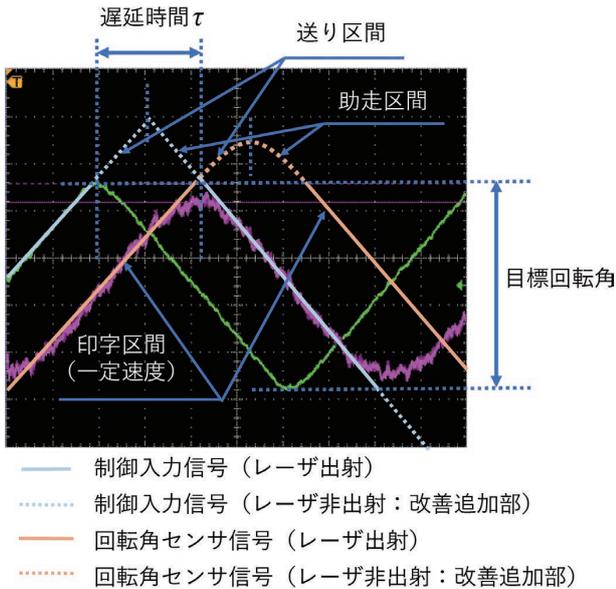
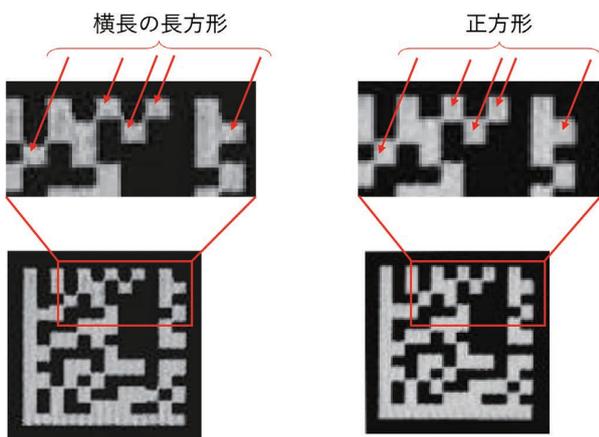


図 12 ガルバノスキャナ遅延 (追加制御)

測定結果より追加制御の助走・送りにより、レーザー出射のタイミングではグラフは直線となっており、一定速度で印字できることを示している。

助走・送り付加による退縮改善効果を図 13 に示す。効果が見やすい 2D コードの右上部に着目すると、助走・送りを付加しない場合は図 13 (a) のようになり、スキャナが反転する位置で印字の退縮が見られる。一方で、助走・送りを追加することにより図 13 (b) ではそれらが解消された様子が見られる。



(a) 送り・助走付加無し (b) 送り・助走付加有り
図 13 印字退縮の改善効果

図 13 の印字は、表 1 の条件で実施した。

表 1 印字正確性確認用の印字条件

条件項目	値
印字コードサイズ	8.0mm
印字セル数	12×12
印字セルサイズ	0.5mm
印字速度	3000mm/s

4.2 サイクルタイムの改善効果

2 倍の印字速度の設定した時の印字速度の改善効果を試算した。試算に用いた 2D コードは表 2 の通り。

表 2 サイクルタイム試算条件

条件項目	試算条件 1	試算条件 2
2D コード	小	大
印字コードサイズ	1.6mm	8mm
印字セル数	16×16	16×16
印字セルサイズ	0.1mm	0.5mm
1 セルあたりの印字スキャン本数	2 本	8 本
スキャナ遅延時間 τ	300us	

サイクルタイムの試算結果は、図 14 の通りになった。助走・送りを付加しても、付加無しのとときとグラフはほとんど重なっており、サイクルタイムにほとんど影響が無いことが分かる。

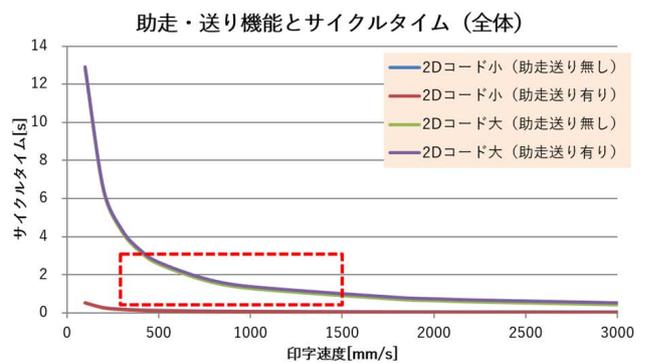


図 14 助走・送り機能によるサイクルタイム変化 (全体)

図 14 の赤枠部分を拡大すると図 15 の通りとなる。厳密には、助走・送りを付加することで、同一速度での印字を比較するとサイクルタイムは 1.3s から 1.4s にわずかに伸びているが、従来の制御では、印字速度を落とさないと退縮なく印字できない状況となってしまう 2D コードの可読性低下を招く。これを回避するため、例えば印字速度設定を 1000mm/s から 500mm/s に変更するなどの対処が必要となっていた。この場合、サイクルタイムは従来の制御によ

れば 2.6s となる。本検討結果の反映により、サイクルタイムは 1.4s となるので、印字時間は従来の 54% となり、大幅に短縮できたとと言える。

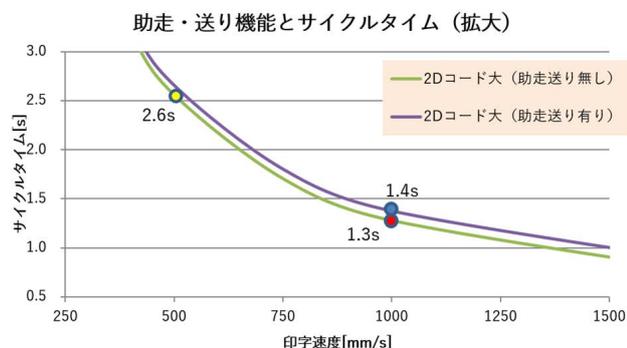


図 15 助走・送り機能によるサイクルタイム変化 (拡大)

5. むすび

レーザマーカで 2D コード印字するにあたり、時間内により多くの物に印字したい要望や、他工程と協調させるために決められた時間内に印字したいといった印字の短サイクルタイム化に対するニーズがあった。しかしながら、印字速度と、2D コードの可読性はトレードオフの関係にある。

2D コードの設定した印字速度に応じて、自動的に必要な場所に、必要最小限の助走・送り動作を付加するアルゴリズムを開発し、可読性に影響を及ぼす印字の退縮を発生させることなく、高速に印字が行えることが確認できた。

本検討のスキャニング技術により、印字の短サイクルタイム化が実現したが、レーザ出力の観点で次の律速要素となり、やみくもに印字速度を速くすることはできない。低いエネルギーで印字できるワーク（樹脂等）においては、従来の 2 倍程度の速度設定においても、レーザ出力を 2 倍にすることで、線の太さを変えずに印字できるため有効に機能するが、印字に強いレーザパワーが要求される材料（レーザの波長に対して高い反射率を持つ金属など）においては、高いスキャニング速度に応じたレーザ出力が出せず短サイクルタイム化が難しい。本検討内容と合わせて、レーザ出力を向上させることにも取り組むことで、多様なワークに対して本検討が効果を発揮する。より広範囲なトレーサビリティニーズに貢献できるよう、レーザマーカを進化させる。

参考文献

- 1) ISO/IEC TR 29158 Information technology – Automatic identification and data capture techniques – Direct Part Mark (DPM) Quality Guideline, 2011.
- 2) オムロン株式会社, なるほど納得! レーザマーカ技術解説書, 2019, p.4-5.

執筆者紹介



芦原 克充 ASHIHARA Yoshimitsu
 インダストリアルオートメーションビジネス
 カンパニー
 商品事業本部 センサ事業部
 第 2 開発部
 専門: 機械工学・光学

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

1

オムロンの成長領域で イノベーションを生み出す技術

— 2. デバイス&モジュール —



電子部品におけるポリエステル系高分子の高次構造制御による寸法安定化について

今泉 豊博, 大谷 修

リレーやスイッチなどの機構デバイスでは、機械的／電気的特性が優れることからポリエステル系高分子の成型品が使用されている。一方で、ポリエステル系高分子の成型品は、熱が加わることで寸法変化が生じるため、成型品寸法の熱的安定化が重要である。本稿では、成型品寸法を制御する因子として、高分子の結晶サイズ粗大化が効果的であることを見出した。ポリエステル内の高分子は、相転移を起こす温度以上で熱処理を行うことで、結晶サイズが粗大化し、成型品の形状変化を抑制することができる。寸法変化や結晶サイズの変化は線膨張量やX線回折により明らかにした。

Dimensional Stabilization by Controlling the Higher-order Structure of Polyester Polymers in Electronic Components

IMAIZUMI Toyohiro and OTANI Osamu

In mechanical devices such as relays and switches, polyester-based polymer molded products are used because of their excellent mechanical/electrical characteristics. On the other hand, it is important to control the dimensions of the molded product because the dimensions of the polyester-based polymer molded product change due to the application of heat. In this paper, we have found that coarsening of polymer crystal sizes is effective as a factor that controls the dimensions of molded products. By heat-treating the polymer in the polyester at a temperature higher than the temperature at which the phase transition occurs, the crystal size becomes coarse and the shape change of the molded product can be suppressed. Changes in dimensions and crystal size were clarified by the amount of linear expansion and X-ray diffraction.

1. まえがき

近年、機構デバイスなどの電子部品は超小型・超薄膜化が求められている。それに従い、射出成型品各部において精密な寸法精度が要求される。ガラスフィラー入りのポリエステル系高分子は優れた機械的および電気的特性を有し、かつ成形性や難燃性が良好なため、小型の電子部品の成型品として幅広く使用されている。弊社でも、リレーやスイッチなどの機構デバイスの部材に使用している¹⁾。

一方で、樹脂材料は熱変化による膨張・収縮が金属材料に対して大きいため、小型の機構デバイスの成型品は変形すると特性に影響を与える可能性がある²⁾。従来、この成型品の寸法安定性については、製造現場での成形条件の調整や、部品寸法に合わせた製品特性の調整などで品質を安

定させていた。

我々は、成型品の寸法安定性について、高分子物性と高分子構造学の観点からアプローチした。高分子の特性は、高分子中に含まれる分子構造とともに、高次構造とよばれる結晶サイズに依存するところが大きい。一般的には、結晶サイズが粗大化すると、熱的安定性が向上する³⁾。仮説として、高次構造である結晶サイズが増加すると、熱的特性が向上し、寸法安定性に寄与するとした。

本研究では、ポリエステル系高分子の結晶サイズを粗大化する手法として事前の熱処理を考案した。具体的には熱処理前後の線膨張量測定とX線回折から、高次構造がもたらす熱的性質の違いを明らかにした。結論として、事前に熱処理を行うことでポリエステル系高分子の結晶サイズを粗大化させ、寸法安定性を向上させることができることを見出したのでここで報告する。

Contact : IMAIZUMI Toyohiro toyohiro.imaizumi@omron.com

2. 検証内容

2.1 成型品の準備

ガラスフィラー入りのポリエステル系高分子を用いた成型品は、部品形状と材料物性の比較を行うため、図1に示す形状の部品寸法測定用の成型品と、図2に示す材料物性評価用に平板(60mm×60mm×0.75mm)から切削した試験片(3mm×20mm×0.75mm)の2種類を準備した。成型品および平板は射出成型機を用いて成形した。また、材料物性評価用の試験片は、熱の影響を極力抑えるため、上記に述べたサイズに常温で切削加工を行った。

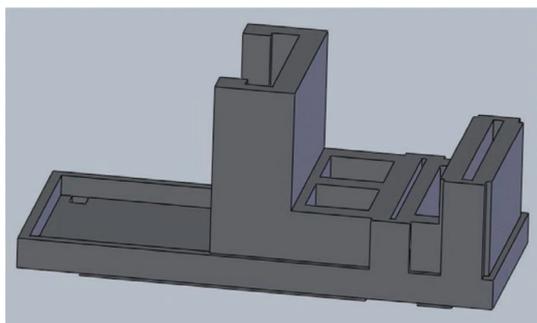


図1 成型品(部品寸法測定用)

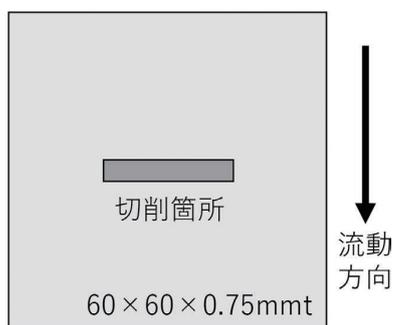


図2 材料物性評価用試験片

2.2 測定

成型品(部品寸法測定用)の測定で用いた試料は、表1に示す熱処理条件での前処理を行った後に、さらに加熱処理を加えた。処理した試料は常温に冷却し、図3に示す測定箇所の寸法を前処理後/加熱処理後で測定し、その変化量を算出した。

表1 成型品(部品寸法測定用)の熱処理条件

	前処理条件		加熱処理条件	
	温度	時間	温度	時間
成型品1	前処理なし	前処理なし	120°C	30 min
成型品2	140°C	30 min	120°C	30 min

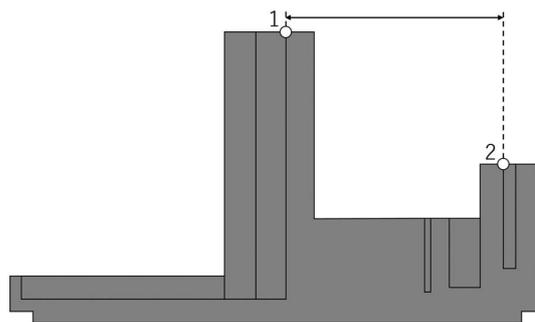


図3 成型品(部品寸法測定用)の寸法測定箇所を表わした断面図(点12間)

材料物性評価用として、熱処理条件が異なる試験片を準備した(表2)。材料物性評価は線膨張量測定(TMA)およびX線回折測定(XRD)を行った。

表2 材料物性評価用試験片の熱処理条件

	熱処理有無	熱処理条件	
		温度	時間
試験片A	なし	—	—
試験片B	あり	140°C	30min

線膨張測定(TMA)はSII製SS6100を用いた。測定条件は引張モードで25°Cから200°Cまで加熱をしながら寸法の変化を測定した。熱処理の影響を比較するため、同一試料を同じ条件で2回測定を行った。

X線回折はBRUKER AXS製DS DISCOVERを用いた。線源はCuKa=1.5418を用いて、 $2\theta=5\sim 60^\circ$ の回折角範囲で測定した。ポリエステル系高分子材料の結晶サイズについては、以下の式(1)より算出した⁴⁾。

$$\text{結晶子サイズ [nm]} = \frac{K\lambda}{\sqrt{\beta_e^2 - \beta_0^2} \cos\theta} \quad (1)$$

ここで、各係数は、 λ : X線波長(=0.154nm)、 β_e : 回折ピークの半値幅、 β_0 : 半値幅の補正值(=0.13°)、K: Scherrer定数(=0.9)である。

3. 結果と考察

3.1 結果

3.1.1 成型品(部品寸法測定用)の寸法測定結果

表1の試料に対し、加熱前後の寸法変化量の結果を図4に示す。図4から熱処理(前処理)を行っていない“成型品1”において寸法が減少した。これは成型品が変形(寸法変化)したことを示す。また、前処理を行った“成型品2”では寸法変化がほとんどないことが判る。この結果から、

前処理によって、寸法の変化を抑制できることが判った。以降、熱処理（前処理）による寸法変化の制御について記述する。

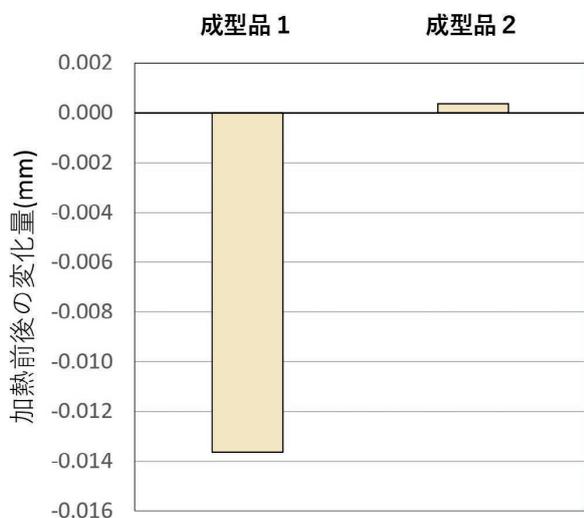


図4 成型品（部品寸法測定用）の加熱前後の寸法変化量

3.1.2 線膨張測定結果

前節の成型品（部品寸法測定用）で使用したポリエステル系高分子が熱処理によって起こす変化を試験片で確認する。表2に示す試験片Aに対し、25°Cから200°Cまで加熱しながら線膨張量の測定を行った後、室温に戻す。これを1プロセスとし、このプロセスを2回行った。その結果を図5に示す。

図5から、2回の加熱全てで温度の上昇に伴い、線膨張量が増加する傾向が確認された。また、65°Cから100°C付近で、1回目の加熱と2回目で線膨張量の傾向が異なり、1回目の加熱では、膨張量の傾きが小さくなった。

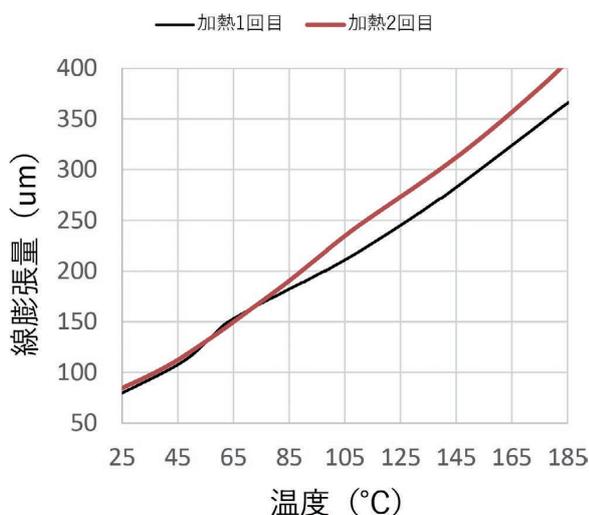


図5 試験片A（熱処理なし）の線膨張測定結果

次に熱処理による履歴が線膨張量に与える影響を確認するため、試験片Bに対して試験片Aと同様の評価を行った。その結果を図6に示す。図6に見られるように、熱処理温度である140°C付近まで線膨張量が全く同じ挙動を示すことが分かった。その後、線膨張量の傾向が異なった。

具体的な挙動変化を確認するため、図5（熱処理なし）と図6（熱処理あり）の1回目の線膨張量の傾きをプロットした結果を図7に示す。図7では、試験片A（熱処理なし）はポリエステル系高分子のガラス転移点を示す60°C付近（55°C）のピーク（相転移ピーク）が観測され、試験片Bはガラス転移点付近の相転移ピークが観測できなかった。

以上の傾向から、熱処理を行うことで、ガラス転移点での相転移を抑制できることが判った。これにより、成型品の寸法変化の挙動を材料物性として再現することができた。

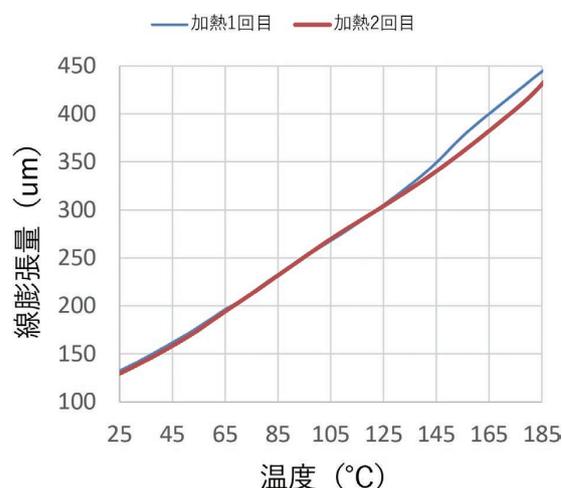


図6 試験片B（140°C熱処理）の線膨張測定結果

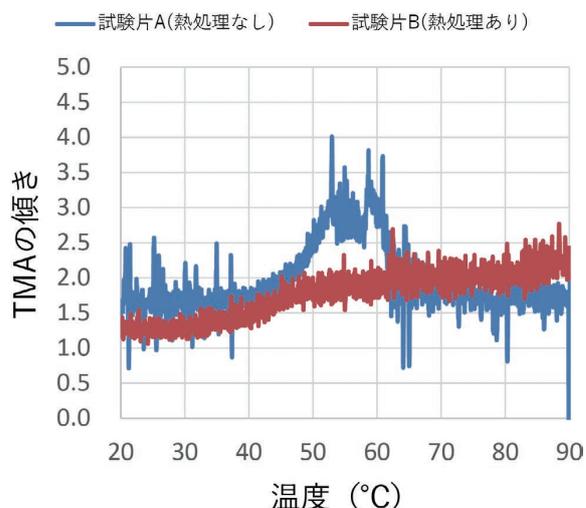


図7 試験片の線膨張の傾き

3.1.3 X線回折測定結果

前節におけるガラス転移点の相転移が抑制される要因を明確にするため、X線回折を実施した。図8に熱処理条件が異なる試料（表2に示す熱処理なし（試験片A）、熱処理あり140°C（試験片B））のX線回折パターンを示す。ポリエステル系高分子の α 結晶に由来するピークが $2\theta=15\sim 25^\circ$ 付近に確認された。なお、鋭角なピークはガラスフィラーや添加剤に由来するピークである。

今回、ポリエステルの特徴なピークである 17.3° 付近の(010)面をもとに議論していく⁴⁾。このピークは、熱処理を行うことで、このピークがシャープになり、半値幅⁵⁾が0.940から0.858に減少した。

さらにこの半値幅をもとに式1を用いて、結晶サイズを計算した。結晶サイズは熱処理前が8.5nm、熱処理後が9.6nmとなった。従って、熱処理によって10%程度結晶サイズが粗大化した。つまり、ポリエステル系高分子は熱処理によって結晶サイズが粗大化するため、成型品自体の寸法が変化することが示された。

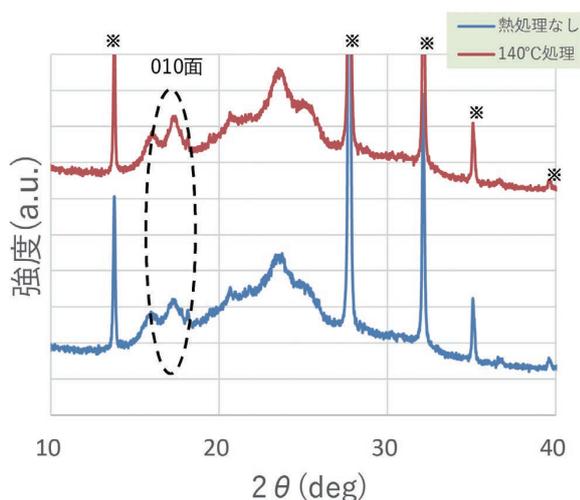


図8 試験片のX線回折測定結果

(注意：※はポリエステルに含まれるガラスフィラーや添加剤に由来するピーク)

3.2 考察

熱を加える際、熱処理（前処理）を行うことで、1回目と2回目の線膨張量が同じ傾向であるのに対し、熱処理（前処理）を行わないと線膨張量の傾向が変化した。これはX線回折の結晶サイズの粗大化で説明することができる。加熱によって結晶サイズが粗大化することで高分子間の自由体積が減少し、密度が高くなることで線膨張量の傾きが減少する。熱処理（前処理）の実施により、その後の加熱による結晶サイズの変化は生じないため、線膨張量の傾向が変化しない。一方、熱処理（前処理）がない状態で加熱すると結晶サイズが粗大化し、線膨張量の変化が生じた。この結果から、成型品の熱処理（前処理）有無による

寸法変化の違いが結晶サイズ粗大化による線膨張量の変化に起因すると特定することができた。高次構造レベルで解釈をすると、熱処理により、ポリエステル系高分子の結晶化サイズが粗大化し、ガラス転移点の影響を受けなくなる。そのため、寸法変化を伴わない可逆的な変化をする。

4. むすび

リレーやスイッチなどの機構デバイスで使用されるポリエステル系高分子の成型品は、熱が加わることで寸法変化が生じるため、成型品寸法の熱的安定化が重要である。本稿では、成型品（部品寸法測定用）部品の加熱による寸法変化の挙動から熱処理（前処理）による寸法安定化の可能性を見出し、その原因追及を行った。線膨張量測定やX線回折を用いてポリエステル系高分子の高次構造解析技術を用いて寸法変化と高次構造解析との関係を明確にした。具体的には熱処理前後の線膨張量測定とX線回折から、高次構造がもたらす熱的性質の違いを明らかにした。結論として、ポリエステル系高分子は高温にさらされることで結晶サイズが粗大化する。事前に熱処理を行うことでポリエステル系高分子の結晶サイズが粗大化することで、高温域での寸法変化が安定し、製品品質の向上が期待できる。今後は、他の結晶性樹脂に技術展開することで、他製品の品質向上に努める。

参考文献

- 1) 山尾忍. 熱可塑性樹脂の基礎. エレクトロニクス実装学会誌, 2004, Vol.7, No.2, p.186-193.
- 2) 早田和也, 横手康浩, 竹ヶ原郁夫. 異方性材料を用いた樹脂部品の熱変形予測技術. OMRON TECHNICS, 2020, Vol.52, No.1, p.92-98.
- 3) 松下裕秀. 高分子の構造と物性. 初版, 講談社, 2013, 560p, 978-4-06-154380-5.
- 4) プラスチック成形加工学会. プラスチック成形品の高次構造解析入門. 初版, 日刊工業新聞社, 2006, 192p., 978-4-52-605604-8.
- 5) コニカミノルタジャパン株式会社. “測定波長間隔・半値幅”. 仕様表から読み取れる大切なこと. -3. 2011. <https://www.konicaminolta.jp/instruments/knowledge/color/section4/05-3.html>, 2022, (参照 2022-02-25).

執筆者紹介



今泉 豊博 IMAIZUMI Toyohiro
デバイス&モジュールソリューションズカンパニー
技術統括部 材料技術グループ
専門：高分子化学



大谷 修 OTANI Osamu
デバイス&モジュールソリューションズカンパニー
技術統括部 材料技術グループ
専門：高分子化学、有機光化学、有機合成化学
博士（工学）

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

深層学習を活用したポリエステル系樹脂の難燃助剤特性予測とその難燃性評価

今泉 豊博, 大谷 修

機構デバイスといった電子部材に使用されているポリエステル系樹脂に、臭素系難燃剤の難燃助剤として広く使用されている三酸化アンチモンは、RoHS（特定有害物質使用制限）候補物質として挙げられている。今回、深層学習技術を活用し、強度を有し且つ薄肉難燃性に適した三酸化アンチモンの代替を探索した。具体的には、難燃性のメカニズムより、臭素系難燃剤と難燃助剤の反応における難燃助剤の「臭素化エネルギー」と、その臭素化した難燃助剤の揮発のしやすさを示す「沸点」の物性予測を行う深層学習モデルを構築し、候補剤を予測・抽出した。この候補剤を用いた成形材の難燃性を検討したところ、三酸化アンチモンと同等であることを見出した。なお、電子部材では難燃性に加え、強度や流動性等の多くの物性が求められる。しかし、今回は三酸化アンチモン代替として無機物難燃助剤の検討を行ったため、その他の物性への影響は軽微と考え、ここでは難燃性に関してのみ報告をする。

Prediction of the Characteristics of Flame Retardant Coagent for Polyester using Deep Learning Technology and Evaluation of the Retardancy

IMAIZUMI Toyohiro and OTANI Osamu

Using deep learning technology, we searched for an alternative flame retardant coagent to antimony trioxide, which is a flame retardant aid for polyester resins. Specifically, a deep learning model for physical property prediction was constructed based on the flame retardancy mechanism, and candidate materials were predicted and extracted. When the flame retardancy of the molding material using this candidate material was examined, it was found that it was equivalent to antimony oxide. In addition to flame retardancy, many physical properties such as strength and fluidity are required for electronic components. However, since we studied an inorganic flame retardant additive as an alternative to antimony trioxide, we considered that the impact on other physical properties is considered to be minor, and here we will report only the flame retardancy.

1. まえがき

リレーやスイッチ、コネクタなど機構デバイスに使用する樹脂は、電気絶縁性、耐熱性、機械的強度等に優れたPC、PBT、PETなどのポリエステル系樹脂が使用されている¹⁾。これらの樹脂には、火災防止のため難燃性が要求されている。この難燃性を満足するために、ハロゲン系、特に臭素系難燃剤が樹脂に添加されている。さらに、薄肉難燃性を要求される製品で使用されるPBTやPETなどのポリエステル系樹脂は、難燃性を高めるために臭素系難燃剤とともに難燃助剤として三酸化アンチモンが使用されている²⁾。薄肉難燃性を有する材料は、一部の電子部材には必

要不可欠なものではあるが、素材メーカーでは投資対効果の関係から、開発が活発に行われていない状況である。

一方で、難燃助剤に使われている三酸化アンチモンは、RoHS指令の候補に掲載されており、環境リスクが懸念されている³⁾。また、アンチモンの採掘場所は偏在性が高く、地政学リスクが高いと考えられている⁴⁾。このような背景をもとに、素材メーカー各社で難燃剤の代替材料として様々な材料が検討されてきたが、1920年以降、三酸化アンチモンに変わる難燃助剤の発見に至っていない。そのため、三酸化アンチモン代替は従来の探索範囲で見出すのは難しいと想定される。新たな代替材を見出すためには、探索領域を拡大する必要があるが、実験を主体とした従来のアプローチでは膨大な組み合わせを検討するのも困難である⁵⁾。

Contact : IMAIZUMI Toyohiro toyohiro.imaizumi@omron.com

近年、マテリアルズインフォマティクス (MI) が注目を集めている。MI は情報科学を活用して材料開発を行う新しいアプローチ方法であり、従来のアプローチでは解決できなかった化合物の発見や開発期間の短縮に成功している⁶⁾。その中でもマサチューセッツ工科大学とサムスン電子は、MI を用いてリチウム電池向けに安全かつ長寿命な新規の固体電解質を短期間で見出した⁷⁾。このように MI の活用は、高機能の素材の発見までに時間を要するような検討に有効で、技術開発のリードタイムを大幅に短縮できるテクノロジーである。

この MI は新規化合物の発見等に有効な手段であるにもかかわらず、スーパーコンピュータの利用等、素材開発を専門とする大学や研究機関、基礎研究所を有する企業のみ基礎研究に利用が限られることが多かった。しかし、近年、パーソナルコンピュータの著しい性能向上に加え、MI をビジネスとするベンチャー企業が増加し、これらの企業とアライアンスを組むことで MI を利用できるような環境が整ってきた。

そこで、MI を保有する企業とアライアンスを組むことで、MI を活用した新しいアプローチ方法でポリエステル系の難燃助剤探索にチャレンジした。難燃性のメカニズムから、難燃剤と反応する難燃助剤の臭素化エネルギーと、その臭化した難燃助剤の揮発のしやすさを示す沸点を物性予測する深層学習モデルを構築し、候補剤を予測・抽出した。その中から三酸化アンチモンと同等の特性を有する材料を見出したのでここで報告する。

なお、世の中は RoHS 規制対応として、臭素系の難燃剤を使用しないノンハロゲン系の難燃剤が一般的だが、ノンハロゲン系難燃剤の取り組みを今回は除外した。なぜならば、ノンハロゲン系難燃剤はハロゲン系難燃剤と比較して難燃効果が低くなるため、配合量が多くなり樹脂の物性低下につながるものが想定され、我々の要求である薄肉難燃と強度の特性の両立を満足できないと判断したことによる。

2. アプローチ方法

2.1 難燃メカニズムの理解と重要パラメーターの抽出

まずは、難燃剤と難燃助剤の難燃メカニズムに関して重要なパラメーターについて説明する。一般的に樹脂の難燃性は、難燃剤と難燃助剤の組み合わせによる相乗効果で高い効果を発現することがよく知られている⁸⁾。その代表として、上記で述べたハロゲン系難燃剤と三酸化アンチモンが挙げられる。これはハロゲン化合物とアンチモンによる反応生成物の熱分解連鎖反応停止作用 (ラジカルトラップ効果) やハロゲン化アンチモンが気化することによる気相での空気遮断効果による¹⁾。

詳細にメカニズムを考察していく。難燃助剤である三酸

化アンチモン (Sb_2O_3) は臭素系難燃剤の分解により生成した HBr で臭素化される。この気化した臭素化アンチモン (Sb_2Br_3) は、酸化反応系における燃焼反応を阻害する。 Sb_2O_3 を難燃助剤として添加した種々の臭素系難燃剤含有樹脂の燃焼メカニズムについて考える。生成した SbBr_3 は水素原子と反応し、HBr、SbBr、 SbBr_2 および Sb に変換される。特に Sb は燃焼反応の主体となる酸素原子や水分子および水酸基ラジカルと反応し、SbO や SbOH が生成され、燃焼の連鎖反応を遮断することで反応を阻害する⁸⁾。

上記の反応メカニズムから、難燃助剤に求められる特性は、難燃助剤が臭素化しやすく、さらにその臭化物が即座に気化した後に、燃焼点に速やかに拡散して酸化のしやすさが重要と考えた。

つまり、上記の内容から 2 つの観点がこの難燃助剤において重要特性と考えた。

- ①臭化物が生成しやすい難燃助剤であること
- ②生成された①の臭化物が気化しやすいこと

項目①においては、難燃剤から発生した HBr と難燃助剤が反応しやすいこと、言い換えると、難燃助剤の臭化反応における反応前後のギブスの自由エネルギー変化 (臭素化エネルギー) が小さいほど臭素化しやすいことを示している。また、②については気化しやすいことは、物質そのものの沸点が低いことと考えられる。

2.2 物性値の推定方法

2.1 で抽出した難燃助剤の重要特性である臭素化エネルギーと沸点は、臭素化エネルギーが低く、かつ沸点が低い候補剤を抽出することが望ましい。しかし、これらの特性は文献上では一部しかなく、材料探索は限られてきた。そこで我々は、これらの臭素化エネルギーと沸点は、書籍、論文やインターネット上のデータとともに、熱力学的計算と深層モデルをもとに計算し、データを補うこととした。

(1) 臭素化エネルギーの計算

熱力学的計算は、柴田らの報告をもとに図 1 に示す簡易的な反応式をもとに計算した⁸⁾。具体的に金属酸化物を例に説明すると、金属酸化物と金属臭化物のギブスの自由エネルギー⁹⁾を用いて、反応前後のギブスの自由エネルギー差を計算し、臭素化エネルギー (ΔG) を算出した。今回、簡易的に酸化物と HBr による臭素化反応を、以下の式と考え、この式をもとに臭素化エネルギーを計算することとした。

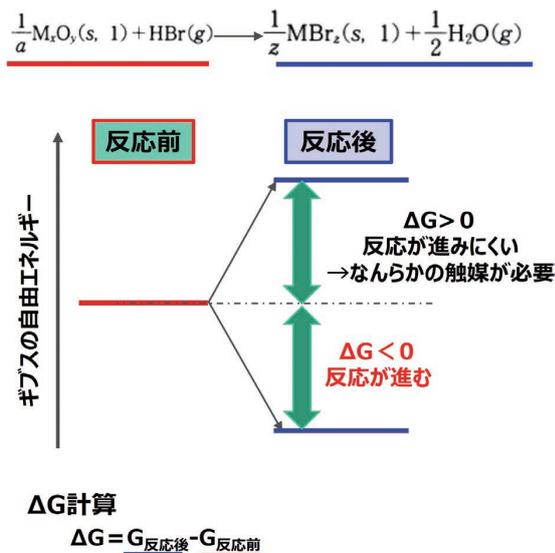


図1 臭素化エネルギー算出の考え方

その他の金属水酸化物などの化合物についても同様なアプローチで臭素化エネルギー変化を算出した。また、一般的な成形材の分解温度は700K付近であり、その温度付近の臭素化エネルギーの値を採用することとした。

(2) 臭化物の沸点の計算

臭化物の沸点は、金属臭化物のギブスの自由エネルギーを用い、金属臭化物の固相と気相が同じになる温度を採用した。

(3) 深層学習モデルの構築

深層学習は、入力データに対応する結果（出力）を導き出す機械学習の手法である。今回、深層学習に、2つの論理的構造（Graph Isomorphism Network (GIN) と Attentive Finger Prints (AttentiveFP)）のモデルを用いた。入力は、分子の化学構造を英数字で文字列化した SMILES を用いた。臭化エネルギーの場合、化合物の物理的状態の2ビットでエンコードされた「Flag」も使用した。

深層学習モデル計算により、ギブスの自由エネルギーと沸点を予測し、文献値や熱力学的計算のデータに含まれていない化合物に関連する物性を推定した。なお、この深層モデルの確度は、次の章で実測値のデータと深層モデルで計算した数値との相関性により確認した。深層学習の精度を向上させるために、上述のギブスの臭化エネルギーと沸点の値とともに、ハロゲン系の化学反応に関するギブスのエネルギーとその沸点のデータも含めて深層学習を実行した。

2.3 難燃性試験

試験片については、三酸化アンチモンまたは深層モデル検証から得られた難燃助剤と臭素化難燃剤をポリエステル

系樹脂に混練し、射出成形することで準備した。試験片 (125±5×13±0.5×t mm : t=0.4mm) をクランプに垂直に取付け、20mmの炎による10秒間接炎を2回行い、その燃焼挙動により難燃性を判断した (UL94 準拠)。UL94 ではV-0が最も難燃性が高く、次いでV-1、V-2、不適合となる。

3. 結果と考察

3.1 深層学習モデルのデータの信頼性

深層学習モデルの信頼性を確認するために、臭素化エネルギーの予測値と文献値をプロットしたデータを示す (図2)。深層学習モデルによる予測値と文献値との間の相関係数 $R^2=0.79$ であり、強い相関性が認められた。なお、予測値と文献値との相関を示す直線から大きく外れるデータは、学習データの質 (カバレッジ範囲) の偏りとデータ量が少ないことによって発生している。学習データを追加することで更に相関性の強いデータが得られると考えられる。

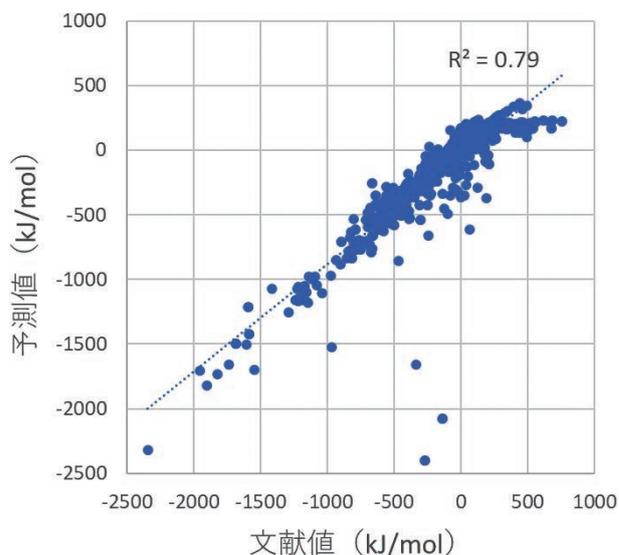


図2 臭素化エネルギーの文献値と深層モデル予測値との相関性

3.2 沸点の予測値

沸点における予測値と文献値のプロットしたデータを図3に示す。沸点の予測値も、予測値と文献値との間の相関係数 $R^2=0.87$ であり、強い相関性が認められた。

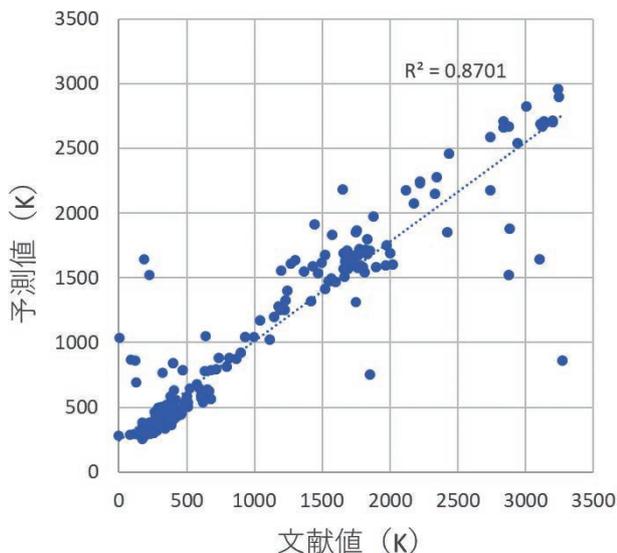


図3 沸点の文献値と深層モデル予測値との相関性

3.3 候補剤の抽出

MI で得られた沸点と臭素化エネルギーをそれぞれ X 軸/Y 軸とし、図 4 にプロットした。グラフは右上から扇形に広がる形状を描いた。2.1. の候補剤の要求特性として設定した①沸点温度が低く（樹脂の一般的な分解温度 700K + 100K 以下）、②臭素化エネルギーが低い（反応が進みやすいゼロ以下）領域の元素を抽出（赤い囲い）した。この領域内に三酸化アンチモン（赤プロット）も含まれた。この中から環境面の観点から労働安全性法および毒劇物取締法にする抵触する化合物、難燃剤として新規性がない物質や入手が困難な材料を除き、結果として 2 種類の化合物を候補剤として抽出した。

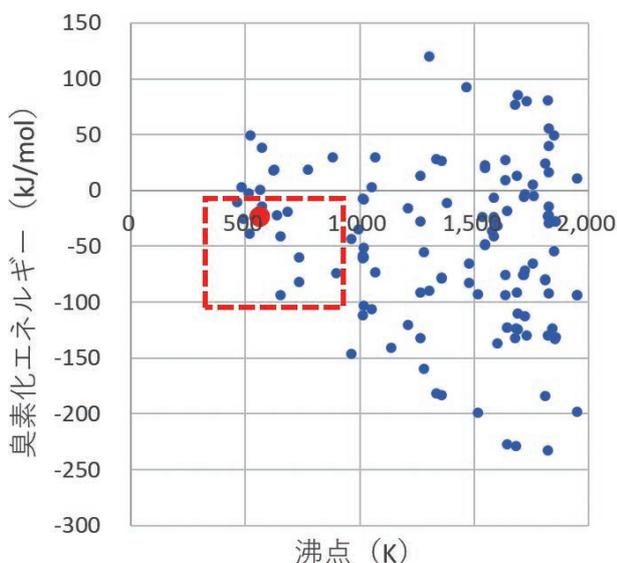


図4 沸点と臭素化のギブスの自由エネルギーとの関係

3.4 難燃性試験

上記で述べた 2 種類の化合物を抽出し、三酸化アンチモンとともに難燃性試験を行った。なお、難燃性試験については適切な量の難燃剤と難燃助剤の量を添加し、UL 試験に基づき実施した。過去の検討から三酸化アンチモンと臭素系難燃剤の組み合わせでは高い難燃性 (V-0) が確保できることが知られている。今回、三酸化アンチモンと候補剤の難燃助剤との難燃性の有意差を確認するために、臭素系難燃剤と三酸化アンチモンの組み合わせにおける難燃性が V-2 になるように、難燃剤の配合比を調整し、成形材料を試作した。また、候補剤の添加量については、化学反応の観点から三酸化アンチモンとポリエステルとのモル比の関係が一定になるように添加量を調整した。

表 1 に示すように化合物 A については、厚みが薄い領域では三酸化アンチモンよりも難燃性が劣る結果であった。しかし、厚みを確保することで難燃性を確保することができた。一方、化合物 B は成形材の厚みが薄い領域でも、三酸化アンチモンと同等の難燃性を有していた。我々の電子部品では薄肉難燃性を必要とする成形体もあるため、この化合物 B が三酸化アンチモン代替として適した難燃助剤と判断した。

表 1 各種難燃助剤と成形材の厚みと難燃特性 (UL) との関係

難燃助剤の種類	成形材の厚み/mm		
	0.4	0.8	1.6
三酸化アンチモン	V-2	V-2	V-2
化合物 A	不適合	V-2	V-2
化合物 B	V-2	V-2	V-2

4. むすび

機構デバイスといった電子部材に使用されているポリエステル系樹脂の三酸化アンチモンは RoHS 規制候補物質のため、今回、我々は代替材料の探索に取り組んだ。

我々は材料メーカーのように多くの材料物性データを蓄積/保有していないが、メカニズム・理論式と文献データを駆使して、自社で必要とするニッチな領域での新規化合物の探索を進められる可能性を見出した。今回は、深層学習技術を活用して難燃性特性に必要な特性予測により、ポリエステル系樹脂の難燃助剤である三酸化アンチモン代替の難燃助剤を探索できた。難燃性メカニズムを基に物性予測の深層学習モデルを構築し、候補剤を予測・抽出した。この候補剤の難燃助剤の特性が三酸化アンチモンと同等であることを見出した。

今回、臭素系難燃剤の難燃助剤として三酸化アンチモン代替となる無機系化合物の検討を行ったため、強度の低下リスクは小さく、強度評価を実施していない。今後は、難

燃性以外の要求特性である強度を含めた材料特性の評価を進める。また、RoHS規制の動向を注視しながら、新規化合物の探索とともに、候補剤を含んだ難燃ポリエステルの量産性検証を進める。

謝辞

本研究に際して、アライアンス頂きました株式会社 Elix 代表 結城伸哉様とご協力頂いた皆様に深く感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 大越雅之. プラスチックの難燃化. 成形加工. 2017, Vol.29, No.12, p.449-455.
- 2) 西澤仁. 臭素系難燃剤. 日本ゴム協会誌. 2019, Vol.92, No.6, p.211-217.
- 3) RoHS 指令「DIRECTIVE 2011/65/EU」第 6 条（制限物質の見直し）
- 4) 石原舜三, 大野哲二. 世界のアンチモン鉱物資源に関する現状. 資源地質. 2012, Vol.62, No.1, p.91-97.
- 5) 西沢仁. これで解る難燃化技術. 工業調査会, 2004.
- 6) 知京豊裕. これでわかる難燃化技術. 情報知識学会誌. 2017, Vol.4, No.27, p.207-211.
- 7) Wang, Y.; Richards, W. D.; Ong, S. P.; Miara, L. J.; Kim, J. C.; Mo, Y.; Ceder, G. Design principles for solid-state lithium superionic conductors. Nature Materials. 2015, Vol.14, p.1026-1031.
- 8) 柴田悦郎, Mariusz Grabda, 中村崇. 無機化合物の臭素化反応に関する熱力学的検討. 廃棄物会論文誌. 2006, Vol.17, No.6, p.361-371.
- 9) Barin, I. Thermochemical Data of Pure Substances. 3rd ed, Wiley, 1995.

執筆者紹介



今泉 豊博 IMAIZUMI Toyohiro
デバイス&モジュールソリューションズカンパニー
技術統括部 材料技術グループ
専門：高分子化学

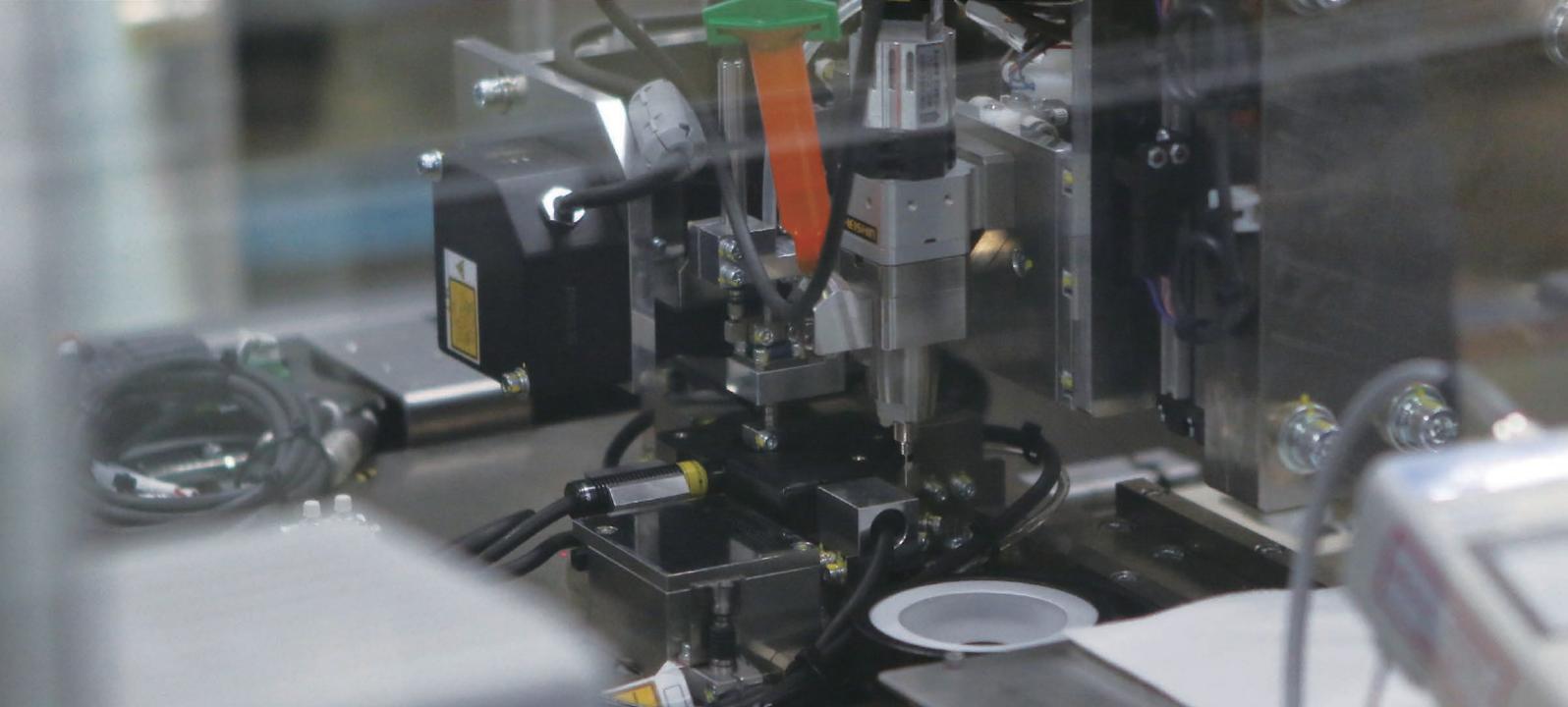
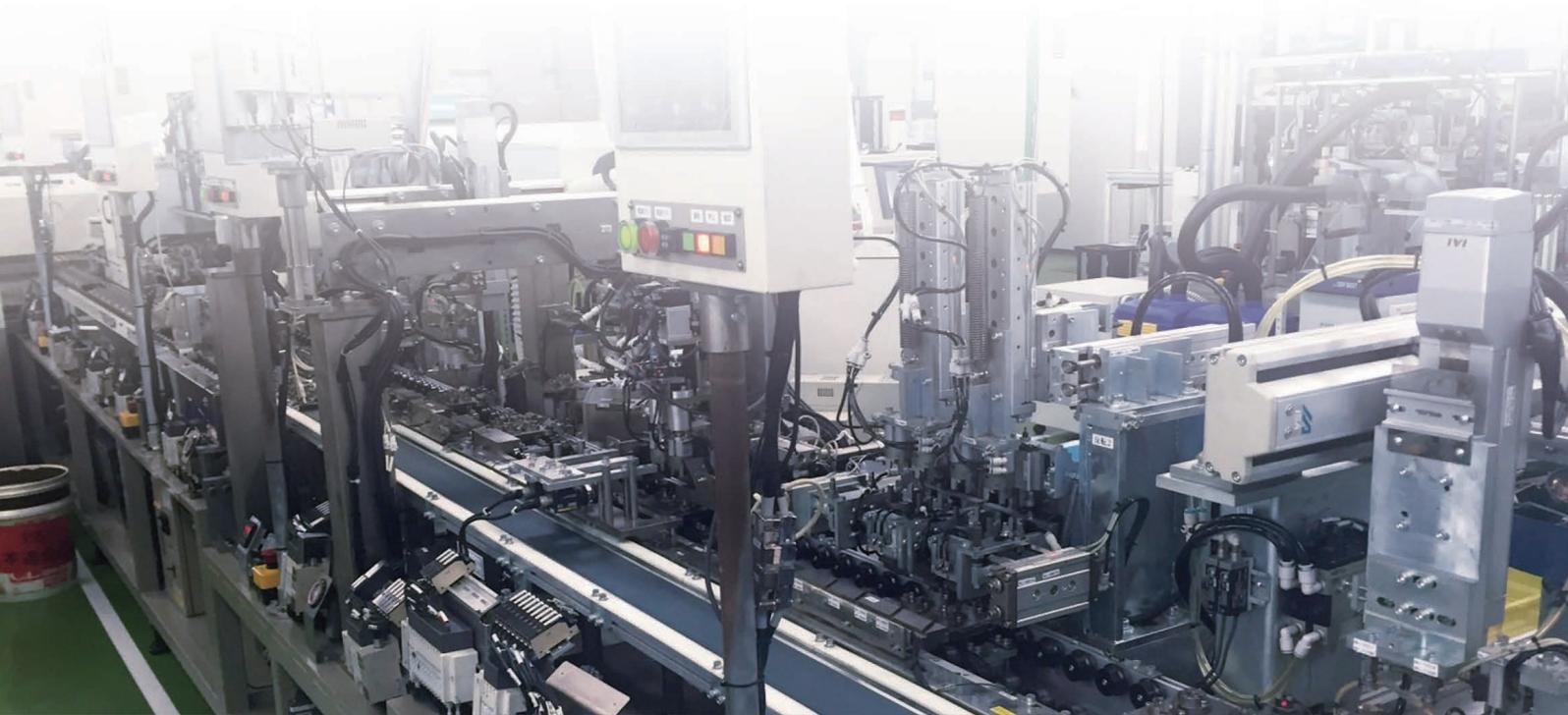


大谷 修 OTANI Osamu
デバイス&モジュールソリューションズカンパニー
技術統括部 材料技術グループ
専門：高分子化学、分析化学、有機光化学
博士（工学）

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

2

オムロンの ものづくりを支える技術



技術ナレッジのグローバル共有化の仕組み構築と活用

赤松 康至

オムロンのファクトリーオートメーション事業では、顧客における製造現場課題に、グローバルに展開するエンジニアが技術的なソリューションを提供し、効果的な解決策を実現することで、顧客への価値提供の向上を行っている。さらなる加速のため、これまで個々のエンジニアあるいは各担当拠点に留まっていた技術ナレッジをグローバルに共有、活用するシステムを構築した。

技術ナレッジにおいては、技術開発、実証実験、操作マニュアルなどエンジニアの活動成果物を蓄積する文書とすることで、エンジニアの作業負担を軽減し、蓄積件数の増加に繋げることができた。グローバルな共有システムにおいては、利用者が輸出管理などの技術の取り扱いを気にすることなく、参照可能な範囲における技術ナレッジを自由に活用できる利便性を実現した。この仕組み、および順調な技術ナレッジ増加による充実した情報共有によって拠点間の技術ナレッジアクセス件数がリリース初月比 2.8 倍にまで増加した。そしてこれらの相乗効果により、システムリリースから 2 年経過して、技術ナレッジを活用した顧客導入事例がリリース初月比 3.0 倍増となり、顧客課題の解決およびオムロンのファクトリーオートメーション事業に貢献している。

Establishment and Utilization of Technological Knowledge Global Sharing System

AKAMATSU Yasuyuki

In OMRON's factory automation business, engineers around the world provide effective technical solutions to address customer manufacturing issues, in order to bring more value to customers. For further acceleration, we have built a system to formalize the technical know-how and to share and to utilize globally, which beforehand, has remained within individual engineers or within each region. We setup and classified technological knowledge as the outcome of engineers' activities, such as technology developments, feasibility studies, verifications, and operational manuals, in order to lessen the burden of engineers and lead to continuous increase of technological accumulation. As for the global sharing system, we developed a mechanism for users to access technological knowledge that they can freely utilize, without the worry of handling of technologies such as export control. The number of technological knowledge accesses between regions increased 2.8 times from the first month of release due to this mechanism and the extensive information sharing through the steady increase in technological knowledge. Furthermore, as the results above, two years after the system release, customer deployment cases have increased 3.0 times from the initial month of release, which reflects the contribution to customer issue resolutions and OMRON's factory automation business.

1. まえがき

近年、製造業においては、消費者ニーズの多様化、カーボンニュートラル、少子高齢化による労働力不足などの社会的要請や課題に対応しつつ持続的な生産性向上、品質向上を図っている。これらの製造現場の課題に対し、オムロンのインダストリアルオートメーションビジネスカンパ

ニーでは、20 万点以上の幅広い品揃えをテコに、顧客個々の製造現場課題を解決する技術ソリューションを提供している。具体的には、センサ、PLC、ドライブ、ロボットなど幅広い製品と制御、AI、IoT などの技術を擦り合わせ、顧客製造現場にロケーションが近いグローバル 6 拠点（日本、中国、韓国、アジアパシフィック、アメリカ、ヨーロッパ）に展開するエンジニアが業界や品目特有の課題、あるいは製造工程、装置などにおけるタクトタイム向

Contact : AKAMATSU Yasuyuki yasuyuki.akamatsu@omron.com

上、検査性能向上などの課題へのソリューションを個々の顧客に提供している¹⁾。

そして、このソリューション提供の質、量、スピードをグローバルで加速することで、顧客課題の解決およびオムロンファクトリーオートメーション事業の拡大を目指している。

1.1 技術ナレッジの定義

ナレッジ (knowledge) とは、Merriam-Webster²⁾ 辞書によると次のとおり定義されている。

- (1) The fact or condition of knowing something with familiarity gained through experience or association
- (2) Acquaintance with or understanding of a science, art, or technique

これを直訳すると、

- (1) 経験や関連を通じて得られた親しみのある物事を知る事実や条件
- (2) 科学、芸術、または技術に関する知識または理解

となる。

上記辞書の定義に沿い、本論文では技術ナレッジを「技術を使った経験を通じて獲得した知識や理解」で、同様な知識・スキルを有する他者にも展開可能な形式に文書化されたものとする。

2. 課題

顧客の製造現場課題へのソリューションには、制御、モーション、画像処理、AI、ロボティクスなど高度な技術を用いたアルゴリズム、商品あるいは複数商品を組合わせた利用技術を必要とする。これら技術ナレッジを各拠点に展開するエンジニア間で共有することで、二重開発を防ぎ、豊富な知見を得ることでソリューション提供の質および効率向上が可能となる。技術ナレッジをグローバルに展開し、エンジニア間で共有する上での課題および対策方針は表1の通りである。

表1 課題と対策方針

課題	説明	対策方針
① エンジニアが保有する技術知識およびスキルの形式知化	これまで技術ナレッジは個々のエンジニアや拠点内に留まっておりどのような形式や内容で言語化するかの明確化が必要	技術ナレッジを登録するユーザにとって負担が少ない、役割と活動に応じた形式で体系化すること
② 技術ナレッジのグローバル共有の仕組み作り	グローバルに在籍するエンジニア間で技術ナレッジを格納し共有する情報システムの構築と運用が必要	<ul style="list-style-type: none"> ・ 上記課題①に対応したシステム構成および機能を実現すること ・ 知的財産権、輸出管理など地域・国によって法令が異なることから技術ナレッジの所有、管理は各拠点に帰属すること ・ ユーザの利便性から、ユーザ側でコンプライアンス対応の負担なく、拠点内外の共有を意識することなくシステムから一元的に技術ナレッジを利用できること

以降に課題①および②における対策、特に対策難易度の高い②の課題について詳細に述べる。

3. 対応策

3.1 エンジニアが保有する技術知識の形式知化

これまで複数の拠点で技術ナレッジ化の取組みを実施しており、それらの方法を集約して形式知化を進めた。

各拠点には、概ね2種類の役割を持つエンジニアが在籍している。ひとつは技術を活用し顧客の製造現場にソリューションを提供する役割のエンジニアで、これをFE (Field Engineer) と呼ぶ。もうひとつは技術を保有、開発あるいはFEを技術的な後方支援する役割のエンジニアでこれをAE (Application Engineer) と呼ぶ。

技術ナレッジの形式知化には、基本的に上記エンジニアの役割や活動に即した観点で体系化を行い、彼らの業務活動結果を技術ナレッジとして文書化できるようにした。具体的には表2の通りである。

表 2 形式知化する技術ナレッジの種類

技術ナレッジの種別	具体的な技術ナレッジ
技術開発、技術支援に関連する技術ナレッジ (主に AE の役割)	技術概要説明
	トレーニング資料
	プログラム取り扱い説明書
	サンプルプログラム
	技術提案書のひな型
技術活用、ソリューション提供に関連する技術ナレッジ (主に FE の役割)	利用ノウハウ・手順・注意事項
	実証実験結果
	導入結果・事例
	利用ノウハウ・手順・注意事項

さらには運用上の対応として上記種別や内容をエンジニアヘガイドとして示し、通常業務において、エンジニアの負担が少なく技術ナレッジを作成し共有できるようにした。また、技術ナレッジのうち、技術概要説明や導入事例結果など共通性が高く、ユーザへ積極的に活用を促進する技術ナレッジ項目は、テンプレート化して同じレベルの記載が容易に作成できるようにした。

3.2 技術ナレッジのグローバル共有の仕組み

3.2.1 システム構成

システムプラットフォームはオムロン標準 IT インフラである Microsoft Office365、SharePoint Online³⁾ とすることにより、ライブラリ・データリスト構築の効率化、情報セキュリティの一定の担保、全ユーザアカウント利用可能などシステム開発上のメリットを活かした。

拠点個別による技術ナレッジ管理を反映させるため、拠点毎に分離した別サイトコレクションとして構成し、技術ナレッジの実体（ファイル、フォルダやこれらに付帯の作成者、作成日、技術種別などのプロパティ情報）はこれら拠点用のサイトに、拠点内に限定した技術ナレッジと、当該拠点発信の全拠点共有可能な技術ナレッジを格納することとした。ホームページはポータル位置づけであり新着情報の案内やシステム管理者からのお知らせ、利用マニュアル掲載に留めている。全体構成については、図 1 の通りである。また各拠点のサイトには技術ナレッジに即した Software, Trainings, Technical Notes, Feasibility Studies, Success Stories などライブラリを整備し、文書化したものを格納しやすくした。

この構成によりシステムとして各拠点による管理区分を明確化した。システム全体とホームページは主管である技術開発本部が担当することとした。さらに各拠点においては拠点代表者を選出し、自拠点の管理および活用推進を担当する体制を構築した。これにより拠点における技術ナ

レッジ管理、ユーザ管理、拠点特有の活用方法を柔軟かつ容易にできるようにした。

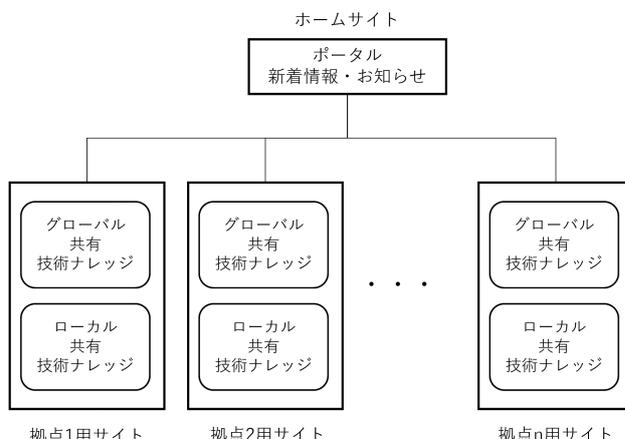


図 1 グローバル技術ナレッジシステム構成

3.2.2 技術ナレッジの公開範囲

技術ナレッジは拠点横断的に共有し活用されることが望ましい。一方課題の章で述べた通り、技術特性により知的財産、輸出管理などの観点から公開範囲を限定せざる得ないものもあり、その範囲設定は技術ナレッジを掲載する拠点の判断によるものとなる。さらには利便性の観点からは、ユーザが参照できるものは公開範囲やコンプライアンス対応などを意識せずに活用可能であることが望ましい。

これらに対応するため、個々の技術ナレッジに公開範囲プロパティを付与し、その設定された公開範囲に従って参照を制御する機能を実現した。技術ナレッジをシステムに格納する際に公開範囲を設定、および公開範囲に応じた参照のメカニズムは以下の通りである。

公開範囲の登録メカニズム

(1) 事前のシステム設定

- 各拠点のサイトに、“ローカル AE”、“ローカル FE”、“他拠点の AE”、“他拠点の FE” の 4 種類の権限グループを設定
- 各サイトでローカル拠点に所属する AE、FE メンバをそれぞれ “ローカル AE”、“ローカル FE” に、他拠点の AE、FE メンバをそれぞれ “他拠点の AE”、“他拠点の FE” に登録する。例えば、拠点 X, Y, Z の 3 つの拠点がある場合、各サイトには表 3 に示す通りのユーザ登録を行う。

表3 各拠点における権限グループ設定の例

権限グループ・拠点	拠点 X	拠点 Y	拠点 Z
ローカル AE	拠点 X の AE ユーザ	拠点 Y の AE ユーザ	拠点 Z の AE ユーザ
ローカル FE	拠点 X の FE ユーザ	拠点 Y の FE ユーザ	拠点 Z の FE ユーザ
他拠点の AE	拠点 Y, Z の AE ユーザ	拠点 X, Z の AE ユーザ	拠点 X, Y の AE ユーザ
他拠点の FE	拠点 Y, Z の FE ユーザ	拠点 X, Z の FE ユーザ	拠点 X, Y の FE ユーザ

- ・技術ナレッジの公開範囲を3種類定義。
 - ・ローカル1は開発中の技術などAEメンバ間で共有する類の技術ナレッジであり、その公開範囲はローカルAEユーザに限定されるもの
 - ・ローカル2は、知的財産、輸出管理など法規の観点から拠点内共有に限定される技術ナレッジで、ローカルAEおよびローカルFEユーザのみが参照可能なもの
 - ・グローバルは、法規制限がなく展開可能な技術ナレッジであり、全ユーザが参照可能なもの

これら公開範囲とその範囲で共有される技術ナレッジの典型的な特性を表4にまとめる。

表4 公開範囲と技術ナレッジの特性

公開範囲	参照可能ユーザ	技術ナレッジの特性
ローカル1	ローカルAEユーザ	開発中の技術
ローカル2	ローカルAE、ローカルFEユーザ	法規制限ありの技術
グローバル	全ユーザ	法規含めて展開可能な技術

(2) ユーザによる技術ナレッジ登録

技術ナレッジ登録の際、ユーザはその特性に応じて、上述三種類のうちいずれかの公開範囲を設定する。なお、適切な公開範囲の設定においては、運用として当該拠点の特権ユーザである拠点代表者が承認することとしている。

(3) システムによる公開範囲設定

技術ナレッジの実体、具体的にはSharePoint Onlineの一つのアイテムに対し、公開範囲設定プロパティに応じたアクセス権限が付与され、ローカル拠点のサイトに格納する。

3.2.3 グローバル公開範囲の技術ナレッジにおける参照範囲設定

グローバル公開範囲の技術ナレッジであれば、自拠点のユーザは当然参照可能であるが、他拠点のユーザも参照可能である。しかし、技術ナレッジによっては、後方支援部隊であるAEが保有していない技術を用いられているためにサポートが不十分になるリスクがあるものや、特有業界向け技術により市場性が低いものなど、展開可否、要否が異なる場合がある。このような技術ナレッジの自拠点への展開をAEが判断して設定できることが必要である。そこでこの課題に対して、以下のメカニズムを実現した。

- ・グローバル公開した情報の初期状態は他拠点のAEユーザ権限グループを持つユーザのみ参照可能にする。
- ・参照できるユーザが内容を確認して、展開可能な場合、開示設定を行う。なお、運用として開示設定するのは当該拠点の特権ユーザである拠点代表者としている。
- ・システムはそのユーザが所属する拠点を確認して当該拠点のみのFEメンバに参照可能となる処理をする。

例えば、拠点X, Y, Zにおいて、拠点Xの技術ナレッジの公開範囲設定および参照の手順は以下の通りである。

- ・拠点Xで作成した技術ナレッジを拠点Xのユーザがグローバル公開範囲で登録する。この状態では拠点XのAE、FEユーザおよび拠点Y, ZのAEユーザが参照可能である。
- ・拠点YのAEメンバが技術ナレッジの内容を確認し拠点Y内で展開可能と判断し、開示操作を行う。
- ・システムは拠点Yに所属するFEメンバにもアクセス権を付与し、参照可能にする。

上述の公開範囲設定により、拠点Xで登録した技術ナレッジにおいて、(1)ローカル1、(2)ローカル2、(3)グローバル、(4)グローバルかつ拠点Yに対する開示設定の4種類のアクセスは、表5の通りとなる。

表5 公開範囲設定における拠点ユーザの技術ナレッジ参照可否

拠点ユーザ / 公開範囲	ローカル1	ローカル2	グローバル	グローバル (拠点Y開示)
拠点X AE	可	可	可	可
拠点X FE	不可	可	可	可
拠点Y AE	不可	不可	可	可
拠点Y FE	不可	不可	不可	可
拠点Z AE	不可	不可	可	可
拠点Z FE	不可	不可	不可	不可

Name	Description	Shared with FEs	Visibility
Global Knowledge B	グローバル、他エリアAEかつエリアYのFE参照可	Site Y	Public global
Global Knowledge A	グローバル、他エリアAEが参照可		Public global
Local2 Knowledge	エリアXのAEとFEのみ参照可		Public to AE and FE
Local1 Knowledge	エリアXのAEのみ参照可		Public to AE

図 2 拠点 X AE ユーザの参照範囲

Name	Description	Shared with FEs	Visibility
Global Knowledge B	グローバル、他エリアAEかつエリアYのFE参照可	Site Y	Public global
Global Knowledge A	グローバル、他エリアAEが参照可		Public global
Local2 Knowledge	エリアXのAEとFEのみ参照可		Public to AE and FE

図 3 拠点 X FE ユーザの参照範囲

Name	Description	Shared with FEs	Visibility
Global Knowledge B	グローバル、他エリアAEかつエリアYのFE参照可	Site Y	Public global
Global Knowledge A	グローバル、他エリアAEが参照可		Public global

図 4 他拠点 AE ユーザの参照範囲

Name	Description	Shared with FEs	Visibility
Global Knowledge B	グローバル、他エリアAEかつエリアYのFE参照可	Site Y	Public global

図 5 拠点 Y FE ユーザの参照範囲

そして、ユーザの属する権限グループに応じて、システムは登録されている技術ナレッジに付与された公開範囲設定（下図の例では Visibility 欄）および拠点開示設定（下図の例では Shared with FEs 欄）と照合して、ユーザが参照可能な範囲の技術ナレッジのみ表示を行う。ユーザの属する権限グループに応じた、実際のシステムにおける技術ナレッジの表示結果を図 2～5 に示す。なお、以下は拠点 Y の FE ユーザへのみ公開設定処理を行っている例の図示であり、拠点 Y 以外の FE ユーザがアクセスを試みても何も表示されない。

上述の通り、技術ナレッジの登録の際には、その技術の特性に応じた適切な公開範囲の設定が必要である。

しかし、このように公開範囲設定と拠点開示設定を照合することでユーザは参照可能な範囲における技術ナレッジ

を自由に活用できる利便性を実現した。

4. 結果と考察

4.1 結果

システムの正式リリースから 2 年経過し、技術ナレッジの累積蓄積数および拠点間のアクセス数の実績（それぞれリリース初月度との相対比較）は図 6、図 7 の通り、順調に推移している。なお初月度の技術ナレッジの蓄積数はこれまでローカル拠点内で共有されていた技術ナレッジをグローバルに展開した数である。

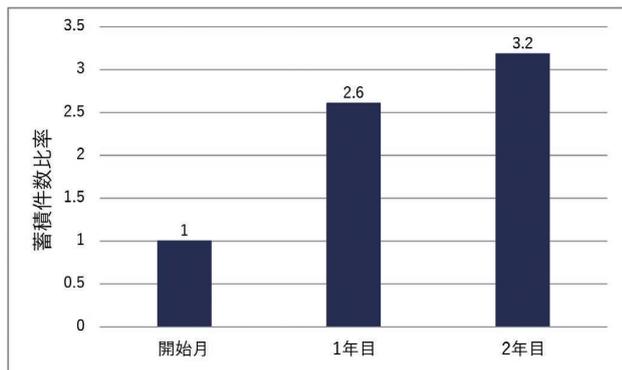


図6 技術ナレッジ累積蓄積件数比

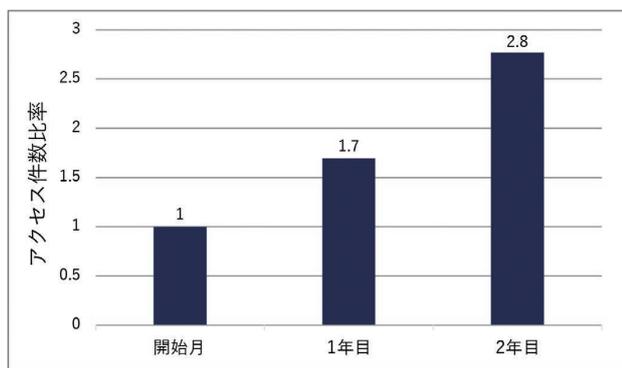


図7 拠点間技術ナレッジアクセス比

4.2 技術ナレッジの蓄積における考察

技術ナレッジ累積蓄積数は、開始月の件数と比較して2.8倍の技術ナレッジを共有できるシステムに成長した。その理由を以下の通り、考察する。

- ・技術ナレッジがエンジニアにおける通常業務の成果を文書化するものであり、過度な負担なく作成できたこと。
- ・文書化する技術ナレッジを体系化しそれをガイドとして示したことにより、個々エンジニアが暗黙知化していた技術ナレッジの文書化が促進されたこと。
- ・技術ナレッジを各拠点によって管理する運用によって各拠点の自発的な蓄積が促進されたこと。具体的に、いくつかの拠点においては本技術ナレッジシステムの登録件数をエンジニアの業績評価と関連付ける運用がなされたこと。

4.3 拠点間のアクセスにおける考察

活発な拠点間アクセスを実現した理由を以下の通り、考察する。

- ・各ユーザーがアクセス可能な技術ナレッジはコンプライアンス対応の制約を気にすることなく自由に活用できる仕組みとして実現したこと。

- ・エンジニアが通常利用する技術ナレッジを本システムに一元化したこと。
- ・技術ナレッジの順調な増加で、常時鮮度のある技術ナレッジにアクセスできたこと。

これらの相乗効果により、顧客へのソリューション提供の成果として作成される顧客導入事例においては図8の通り、技術ナレッジ共有化の本来の目的に対して、初月比3.0倍増という顧客提供価値の効果を生み出した。

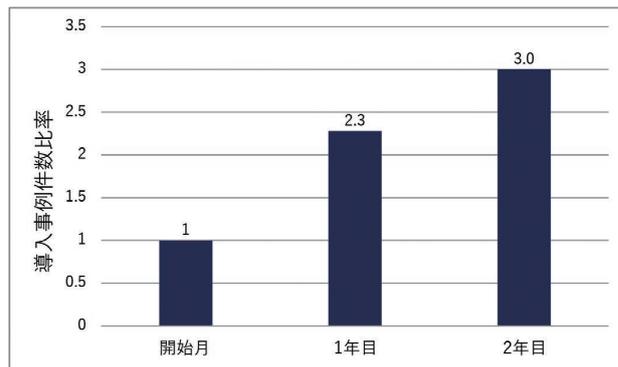


図8 顧客導入事例累積件数比

5. むすび

顧客の製造現場課題に対応する技術的ソリューション提供の加速における課題は、①各拠点のエンジニアが保有する技術知識およびスキルの形式知化、および②その形式知化した技術ナレッジをグローバルに共有する仕組み作りである。これらの対策として技術ナレッジを登録するユーザーにとって負担の少なく役割に応じた形式にし、グローバルに展開するエンジニア間で共有、活用するシステムを構築した。その結果、技術ナレッジの蓄積、共有が促進され、顧客へのソリューション提供の加速を実現した。

今では、本技術ナレッジシステムはファクトリーオートメーション事業における中長期経営戦略上、重要なITインフラの一つとして位置づけられ、技術領域の拡大や深化の対応が求められる。また運用から数年が経過し当初設定した体系に適合しない技術ナレッジも出てきている。これらを踏まえて技術ナレッジ体系や分類、さらにはシステム構成を刷新しさらなる効率的な技術ナレッジの共有化を実現する必要がある。さらに本システムとCRM (Customer Relationship Management: 顧客情報管理) システムと連携させ、技術ナレッジをCRMにフィードフォワードさせて顧客提案への活用、商談成約の加速、また商談成約率、売上などのCRM情報をフィードバックし、技術ナレッジの効果把握、分析、改善を行える仕組みを構築することで顧客課題の解決加速、およびオムロンのファクトリーオートメーション事業に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) オムロン株式会社. “ソリューション・解決提案”. <https://www.fa.omron.co.jp/solution/proposal/?sol=top-nav>, (参照：2022-06-14).
- 2) Merriam-Webster Dictionary. <https://www.merriam-webster.com/dictionary>, (参照：2022-06-23).
- 3) マイクロソフト株式会社. “Microsoft 365 での SharePoint の概要”. <https://docs.microsoft.com/ja-jp/sharepoint/introduction>, (参照：2022-06-14).

執筆者紹介



赤松 康至 AKAMATSU Yasuyuki
インダストリアルオートメーションビジネス
カンパニー
技術開発本部 第3開発部
専門：ソフトウェア工学

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

3

新たな成長領域を 生み出す技術



伝送線路からの不要な放射の抑制による ミリ波レーダの方位推定精度の向上

小澤 尚志, 谷本 雄大, 齋藤 啓介

非接触でヒトやモノの位置などをセンシングする手段としてミリ波レーダが注目されており、車載や交通インフラ、ファクトリーオートメーション (FA)、ヘルスケアなど幅広い領域での活用が期待されている。レーダがターゲットの位置を正しく検出するためには、電波が到来した方位を高い精度で推定することが必要である。レーダの構成部位のうち、伝送線路など、アンテナ以外の部位から電波が放射されると、電波の到来方位の推定精度が低下する。そこで、これまで基板の表面に形成していた伝送線路に替えて、基板の内層を電磁界が伝搬する構造である基板集積伝送線路 (SIW) を導入することで、不要放射を抑制して電波の到来方位の精度を向上させることを検討した。本稿では、電磁界シミュレーションを用いて不要な放射が抑制される効果を示すとともに、ビームフォーマ法に基づく到来方位推定における誤差が従来の 4.1° から 1.2° へ向上することを述べ、SIW の導入がより高い精度でターゲットの位置を検出するミリ波レーダの実現に有効であることを明らかにする。

Improving Direction Estimation Accuracy of Millimeter-wave Radar by Suppressing Unnecessary Radiation from Transmission Lines

OZAWA Hisashi, TANIMOTO Yudai and SAITO Keisuke

Millimeter-wave radars have been drawing interest as a means of contactless sensing of the position of people and objects, and are expected to be used in a wide range of fields such as automotive, transportation infrastructure, factory automation (FA) and healthcare. In order for radars to correctly detect the position of the targets, it is necessary to estimate the direction-of-arrival of the radio waves with high accuracy. When radio waves are radiated from parts other than the antennas, such as transmission lines, the accuracy of estimating the direction-of-arrival decreases. Therefore, we introduce substrate-integrated waveguides (SIWs) in which the electromagnetic field propagates inside the substrate layer instead of the conventional transmission line formed on the surface of the substrate. Then, we investigated the suppression of unnecessary radiation and the improvement of the accuracy of the direction-of-arrival of radio waves.

In this paper, we use electromagnetic field simulations to show the effect of suppressing unwanted radiation, and show that the error in direction-of-arrival estimation is improved from the conventional 4.1° to 1.2° . This result is effective in providing millimeter-wave sensing that detects the position of targets with high accuracy.

1. まえがき

近年、非接触でヒトやモノを検出する手段としてレーダ技術の活用が検討されている。レーダは、逆光や暗闇、霧など環境の状態の影響を受けずにターゲットの位置や速度を検出できるほか、センシングにあたってプライバシーを確保しやすいなどの特徴を備える。とりわけミリ波を使用

するレーダ (以下「ミリ波レーダ」) は、使用する波長が数ミリメートル程度と従来広く用いられてきたレーダに比べて短いことや使用できる周波数帯域幅が広いことから、高い空間分解能を得ることができる。また、半導体製造技術の進化に伴うミリ波 IC の低廉化や、法改正によるミリ波帯の規制緩和に伴い、ミリ波レーダを利用しやすい環境が整いつつある。このような状況を受け、ミリ波レーダは自動車やモバイルロボット (AMR) の自動運転の実現に

Contact : OZAWA Hisashi hisashi.ozawa@omron.com

向けた障害物検出や、歩行者を含めた交通状況の監視¹⁾、住宅や施設内における人物の健康状態把握など幅広い分野²⁾³⁾で活用が広まっていくことが期待されている。

ミリ波レーダをこうした用途で活用するためには、ターゲットの位置を高い精度で検出することが求められる。例として、交差点の近傍に設置したミリ波レーダで交通状況を監視し、検出した結果を周囲の車両に通知することで交通事故の防止を図るシステムが挙げられる。このシステムにおいては、数メートルないし十数メートル離れた人物や車両の位置を正確に検出する必要がある。このとき、ターゲットの位置を誤ると、例えば実際には安全な歩道上に歩行者が存在するにもかかわらず、交差点内の危険な位置に存在すると誤認して、円滑な交通を阻害する可能性がある。また、健康状態を把握するシステムでは、複数の人物が近接して存在するとき、位置の検出精度が低いと、正しくバイタル信号を検出できない可能性がある。例として、保育施設において乳幼児が午睡をとるときに健康状態に変化がないか見守る用途を考える。このような用途では、天井や壁に設置したレーダで、互いに近接して寝ている複数の乳幼児のバイタル信号を同時に検出するシーンが想定される。このとき、位置の検出精度が低いと、ある人物が誤った位置に検出され、別の人物の検出位置と重なるおそれがある。すなわち、レーダが受信した信号を位置ごとの信号に分解して、人物を検出した位置の信号からバイタル信号を取り出すとき、複数の人物の検出位置が重なると、それらのバイタル信号が重畳して、正しくバイタル信号を検出できないことが懸念される。

ミリ波レーダで位置を正しく把握するためには、電波の到来方位を高い精度で検出することが必要となる。そのためには、アンテナ以外の構成要素から電波を放射しないことが求められる。レーダの構成要素のうち、不要な電波を放射しうものとして伝送線路が挙げられる。すなわち、ミリ波レーダではアンテナを物理的に回転させることなく電波の到来方位を推定するために、複数のアンテナを並べて配置したアレーアンテナが広く用いられており、空間的に離れた複数のアンテナを1つのミリ波ICに接続するため、アンテナとミリ波ICとの間に、ある程度の長さの伝送線路を配置する必要がある。より具体的には、小型のミリ波レーダにおいては、設計の容易化のため、プリント基板上にアンテナおよび伝送線路、ミリ波ICが配置されることが多い。プリント基板で多用される伝送線路として、マイクロストリップ線路 (MSL) やグランド (GND) 付きコプレーナ線路 (GCPW) が挙げられる。MSLやGCPWは伝送損失が比較的小さい一方で、信号線が空間に露出し電磁界が空間に放射されやすい構造であるため、到来方位の推定精度が低下することが懸念される。

空中への電波の放射が比較的小さい伝送線路として、両面にGNDを形成した基板の内層に電磁波を伝搬させる構

造である基板集積導波路 (SIW) が挙げられる。基板に形成するアンテナとして多用されるマイクロストリップアンテナ (MSA) にSIWを用いて給電する構成の設計例はこれまでも報告されている⁴⁾⁻⁶⁾。ただし、これらの報告は伝送線路から放射される電力がレーダの到来方位推定精度に与える影響について言及していない。いっぽうで、実際にSIWをレーダに適用すべきか判断するうえでは、SIWを導入することによる到来方位推定精度の具体的な改善効果を明らかにする必要がある。そこで本稿では、MSAへの給電線路としてSIWを導入することによる到来方位推定精度の改善効果を電磁界シミュレーションを用いて定量的に明らかにする。また、この過程で用いる到来方位推定精度の評価指標が定まっていなかった。そこで、真の到来方位をある角度区間内で掃引したときの推定誤差の最悪値で評価する方法を導入して効果を得たのでその内容を報告する。

まず2章でSIWやMSL、GCPWの特性を比較し、3章にて、ミリ波レーダを構成する伝送線路にSIWを導入することで伝送線路からの放射が抑制されることを電磁界シミュレーションを用いて示す。さらに4章にて、電磁界シミュレーションの結果として得られた放射パターンに到来方位推定アルゴリズムを適用して、到来方位の推定精度が向上することを述べる。

2. 伝送線路の特性

2.1 SIWの設計

1章で述べたように基板に形成するミリ波伝送線路のうち代表的なものとして、SIWやMSL、GCPWが挙げられる。このうちSIWは図1(a)のように両面をGNDとした基板に、平行なビア列を形成し、ビア列の間に電磁波を伝搬させる伝送線路である。図1(b)および(c)に示すMSLやGCPWと異なり、電磁界が基板の内部に閉じ込められることから、空間への放射が原理的にきわめて小さい。また、ビア同士の間隔が十分に密であるとき、金属で囲まれた領域の内部を電磁波が伝搬すると見なせることから、方形導波管の一種と言える。

ここで、レーダに使用する周波数帯である60 GHz～64 GHzの電磁波をSIWに伝搬させるための線路幅の要件を検討する。方形導波管の代表的特性として、モードごとの伝搬する最低周波数である遮断周波数が挙げられ、次の式で与えられる：

$$f_{c,pq} = \frac{c_0}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{q\pi}{b}\right)^2}. \quad (1)$$

この式において、 c_0 は真空中における光速、 p および q はモード番号、 μ_r および ϵ_r は導波管内媒質 (すなわち基板の基材) の比透磁率および比誘電率、 a および b は導波管

の寸法である。SIW においては、 a は線路の幅、 b は基板の厚さと考えることができる。例として、表 1 に示す基材を用いるならば、 $b = 0.152 \text{ mm}$ 、 $\mu_r = 1.0$ 、 $\epsilon_r = 3.2$ となる。

これらから、遮断周波数の最も低い TE₁₀ モードを送送させるためには線路幅 a は少なくとも 1.6 mm 以上とする必要があることがわかる。直線状の SIW について a の値を変えながら挿入損失について電磁界シミュレーションを行ったところ、 a を増すと $a = 2.4 \text{ mm}$ 程度までは挿入損失が低減し、以降はほぼ一定値となる傾向が認められた (図 2)。また、3 章にて述べるように、 a が大きいとレーダ基板に適用する際に生じる曲げ部の曲率半径が小さくなることから、曲げ部での損失が大きくなることが懸念される。これらを踏まえて、ここでは $a = 2.4 \text{ mm}$ に設定した。

また、製造工程におけるクラックの発生を考慮してビア壁間の距離を 0.25 mm 以上と設計するようにした。したがってビアの直径を 0.15 mm とするとき、ビアの間隔は 0.4 mm 以上とする必要がある。これを踏まえて、本検討ではシミュレーションモデルにおけるビア間隔を 0.4 mm とした。線路幅やビアの設計値を表 2 に示す。

表 1 基板の諸元

項目		値	
物性値	比誘電率	ϵ_r	3.2
	比透磁率	μ_r	1.0
	誘電正接	$\tan\delta$	0.004
寸法値	基板の厚さ	b	0.152 mm
	銅箔の厚さ	t_c	0.040 mm

表 2 伝送線路の設計値

	SIW	MSL	GCPW
線路幅	2.400 mm	0.370 mm	0.330 mm
ビア直径	0.150 mm	—	0.150 mm
ビア間隔	0.400 mm	—	0.400 mm

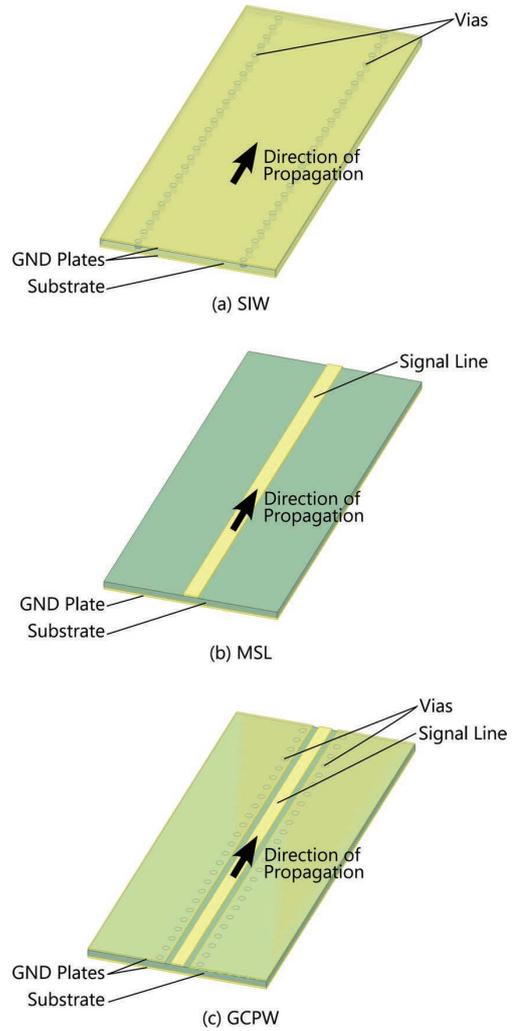


図 1 伝送線路の基本構造

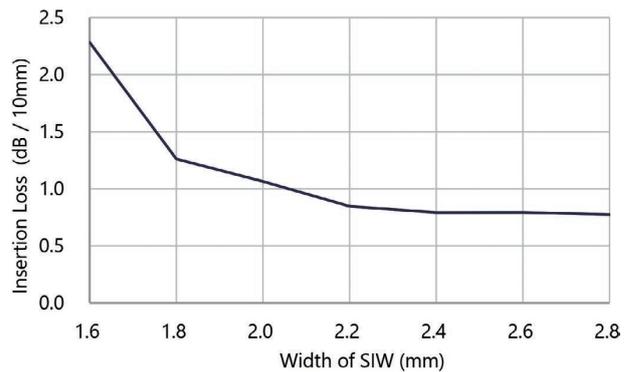


図 2 SIW の線路幅と挿入損失

2.2 導波路の特性の比較

2.1 節で設計した SIW と、信号線が空間に露出した構造である MSL、GCPW について、62 GHz における空間への放射率および挿入損失を比較する (図 3)。ここで放射率は以下のように定義する。線路の両端にそれぞれポートを設置し、一方のポートから電力を供給する。ポートに入力

した電力のうち一部は基板から放射され、解析空間の外へ放出される。ポートに供給した電力と解析空間の外へ放出される電力との比を放射率と定義する。

比較にあたっては、電磁界シミュレータ Ansys HFSS を用いた。なお、GCPW および SIW は特性インピーダンスが 50Ω となるように設計した。具体的な設計値を先に示した表 2 に追記する。また、基板の長さ（伝送線路の長さ）を 10 mm、基板の幅を 4 mm とした。

まず図 3 の縦軸に示す放射率に着目する。想定したとおり、SIW から放射される電力は MSL や GCPW に比べて小さいことが確認された。これは電磁界が通過する領域を基板両面の GND で挟み込む構造によって、電磁界の空間への漏れが抑制されたためと考えられる。

次に図 3 の横軸に示す挿入損失に着目する。SIW の挿入損失は MSL や GCPW に比べて大きい値となった。これは、MSL や GCPW では電界の一部が空気中を通過するのに対して、SIW ではほとんどの電界が基板の内部に閉じ込められることによって誘電損失が大きくなったためである可能性がある。

以上に述べたように、伝送線路から放射される電力を抑制するためには SIW を選択することが望ましいことがわかる。これによって、挿入損失は増すものの、伝送線路からの放射電力がアンテナの放射パターンへ与える影響を低減する効果が見込める。

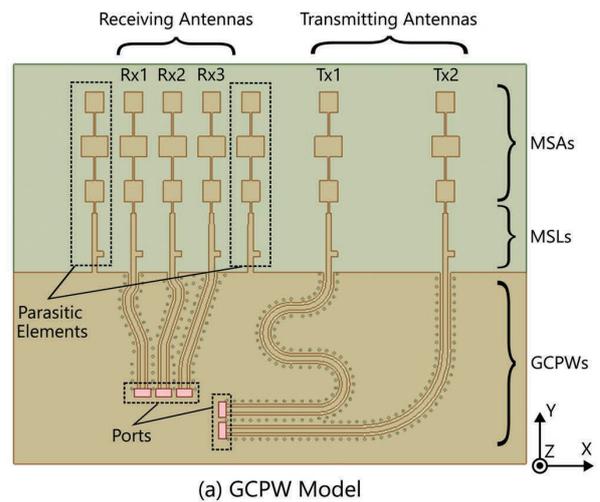


図 3 SIW、MSL、GCPW の特性

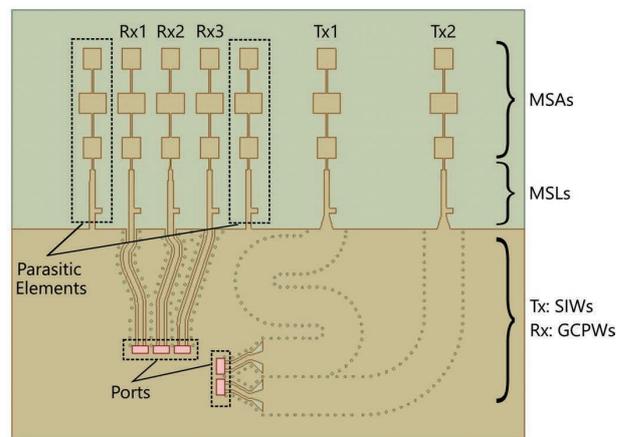
3. レーダ基板への SIW の導入

これまでに著者らが開発したレーダ基板の電磁界シミュレーションモデルを図 4 (a) に示す。XY 面に平行な基板の表面に、2つの送信アンテナ (Tx1、Tx2) と3つの受信アンテナ (Rx1、Rx2、Rx3) を備え、YZ 面内のビームを絞るためにそれぞれ3つの MSA を Y 方向に縦続し、MSL を利用したインピーダンス整合回路を介して GND 端部に引き出す構成としている。GND 端部からポート (図中の赤色矩形) までの区間は GCPW で配線されている。また、2つの送信アンテナへの伝送線路および、3つの受信アンテナへの伝送線路はそれぞれ等長となるように配線している。ここでは、表 1 に示す基材を使用した。また、受信アンテナ同士が近接していることから、相互結合の影響を低減することを意図して、Rx1 および Rx3 に隣接して寄生素子を配置した。以下ではこのモデルを「GCPW モデル」と呼び、伝送線路を SIW に置き換えたものとの比較検討を行う。

テナへの伝送線路はそれぞれ等長となるように配線している。ここでは、表 1 に示す基材を使用した。また、受信アンテナ同士が近接していることから、相互結合の影響を低減することを意図して、Rx1 および Rx3 に隣接して寄生素子を配置した。以下ではこのモデルを「GCPW モデル」と呼び、伝送線路を SIW に置き換えたものとの比較検討を行う。



(a) GCPW Model



(b) SIW Model

図 4 検討したレーダ基板モデル

図 4 (b) に、ポートと送信アンテナとを結ぶ GCPW を SIW に置き換えたモデル (以下「SIW モデル」) を示す。GND 端部で MSL を SIW に接続し⁷⁾、ポートの近傍で SIW を GCPW に変換したうえで⁸⁾、ポートに接続した。すなわち、送信線路のうち従来 GCPW で配線していた部分の大半を SIW に置き換えた。なお、先述したように MSA と基板端部とを接続する MSL はインピーダンス整合に用いているため、SIW に置き換えずに残置した。

送信系統に属する 2つの伝送線路を等長とする前提の下では、ポートとアンテナとの直線距離が短い Tx1 の伝送線

路に複数の曲げ部を設ける必要がある。GCPW モデルの伝送線路を置き換える前提からポートとアンテナの位置が固定されていることを考慮すると、伝送線路の幅が広いほど曲げ部の曲率半径が小さくなる。曲げ部の曲率半径が小さくなると伝送損失が増大することが懸念される。そこで、2 章での検討結果を踏まえて、SIW モデルにおける SIW の幅を 2.4 mm とした。

4. 到来方位推定精度の向上

4.1 放射パターン

GCPW モデルおよび SIW モデルについて、電磁界シミュレータ HFSS を用いて、送信系統および受信系統の各アンテナの放射パターンを計算した。ここでポートから各アンテナに向けて入力する電圧の振幅および位相は同じ値とした。送信系統の 62 GHz における ZX 面内の Y 偏波放射パターンについて、振幅を図 5 に、位相を図 6 にそれぞれ示す。ここで、ZX 面内における方位角は +Z 方向を 0°、+X 方向を +90° と定義する。なお、受信系統については、GCPW モデルと SIW モデルとの間に構造的な違いがないことから放射パターンの図示を省略する。

MSA は Y 軸に対して対称形であるから、アンテナ単体の ZX 面指向性は対称形であることが見込まれる。したがって、得られた指向性が対称形に近いほど伝送線路からの放射の影響が小さいといえる。図 5 および図 6 を参照すると、SIW モデルの方が対称形に近い。このことは、とくに Tx1 の位相パターンで顕著であるほか、Tx1 の振幅パターンの ±45° や ±60° の近傍を比較してもわかる。したがって、伝送線路を SIW に置き換えることで、目論見通り伝送線路からの放射の影響を抑制できたといえる。

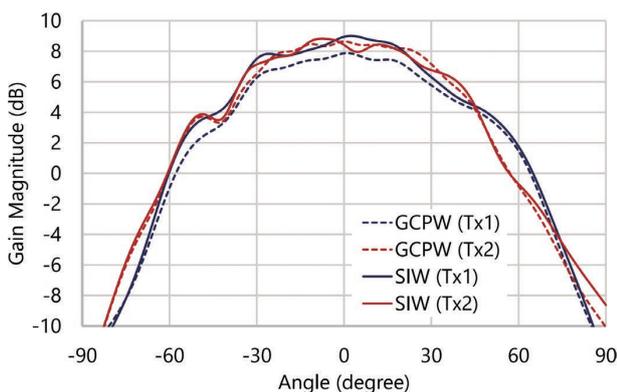


図 5 ZY 面内の放射パターン (振幅、Y 偏波)

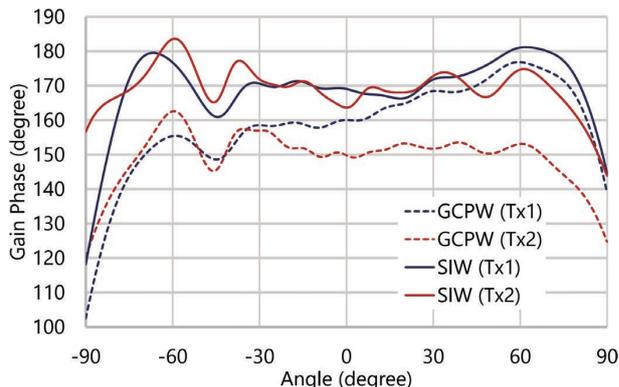


図 6 ZY 面内の放射パターン (位相、Y 偏波)

4.2 到来方位推定精度の算出方法

本節では到来方位推定精度の算出方法について述べる。ここでは、基板に設けた 2 つの送信アンテナと 3 つの受信アンテナの組み合わせにより、6 チャネルの MIMO レーダを構成し、代表的な到来方位推定アルゴリズムであるビームフォーミング法を適用して到来方位を推定する。

ある方位 θ_s から反射波を模した平面波が到来するとき、第 m 送信アンテナと第 n 受信アンテナからなる MIMO チャネルの受信信号 $x_{mn}(\theta_s)$ は

$$x_{mn}(\theta_s) = A G_m(\theta_s) G_n(\theta_s) e^{j\Delta\phi_{mn}} \quad (2)$$

と表すことができる。ここで、 $G_m(\theta)$ および $G_n(\theta_s)$ はそれぞれ第 m 送信アンテナと第 n 受信アンテナの θ_s 方向の利得 (複素数) である。また、 $\Delta\phi_{mn}$ はそれぞれの仮想アンテナの相対位置によって生じる位相差、 A は係数である。

方位 θ_t に対する仮想アレーのモードベクトル $\mathbf{D}(\theta_t)$ を用いると、 θ_t 方向の信号強度 $P_o(\theta_t)$ は

$$P_o(\theta_t) = \left| \mathbf{D}(\theta_t)^H \mathbf{X}(\theta_s) \right|^2 \quad (3)$$

で与えられる。ここで $[\]^H$ は行列 $[\]$ の随伴行列、 $\mathbf{X}(\theta_s) = [x_{11}(\theta_s), \dots, x_{MN}(\theta_s)]$ である。ただし、 M, N はそれぞれ送信アンテナおよび受信アンテナの数を表す。

方位 θ_t ごとに $P_o(\theta_t)$ を計算することで、ビームフォーミング法に基づく方位スペクトラムが得られる。この方位スペクトラムが最大となる方位を検出方位 θ_d とする。

以上の操作によって、真の到来波方位 θ_s に対するレーダによる検出方位 θ_d が求められた。したがって、検出誤差としてこれらの差 $|\theta_d - \theta_s|$ を用いることが考えられる。

いっぽうで、「ある角度範囲の到来方位推定精度」を評価する指標がこれまで定まっていなかった。そこで、「ある角度範囲の到来方位推定精度」を「その角度範囲で保証される角度精度」と定義すると、「その角度範囲での最悪値 (最大の検出誤差)」と言い換えることができる。すなわち、角度範囲 $[\theta_l, \theta_r]$ の範囲における到来方位推定精度 $s(\theta_s, \theta_r)$ は、真の到来波方位 θ_s を $[\theta_l, \theta_r]$ の範囲で動かした

ときの $|\theta_d - \theta_s|$ の最大値であり、

$$s(\theta_i, \theta_r) = \max(|\theta_d - \theta_s|) \quad (\theta_i \leq \theta_s \leq \theta_r) \quad (4)$$

と書ける。本稿ではこの値を用いて到来方位推定精度を評価する。

4.3 到来方位推定精度向上の検証

GCPW モデルと SIW モデルについて、利得パターンの電磁界シミュレーション結果に基づいて計算した到来方位推定精度を図7に示す。横軸の方位 θ_x に対する縦軸は、真の到来波方位 θ_s を 0° から θ_x まで掃引した時の誤差の最大値 $\max(|\theta_d - \theta_s|)$ を示す。 θ_x の掃引の刻み幅およびモードベクトルを生成する方位 θ_i の刻み幅はともに 0.1° とした。なおここでは、チャンネルごとの受信信号を正面方向などからの到来波の受信信号で補正する操作（キャリブレーション）は行っていない。

$-60^\circ \leq \theta_s \leq 60^\circ$ の範囲で見たとき、GCPW での推定誤差は最大で 4.1° に達するいっぽう、SIW モデルでは 1.6° と比較的小さい値に抑えられていることがわかる。すなわち、伝送線路を GCPW から SIW に置き換えることによって、目論見どおり到来方位推定精度が向上する傾向が示された。

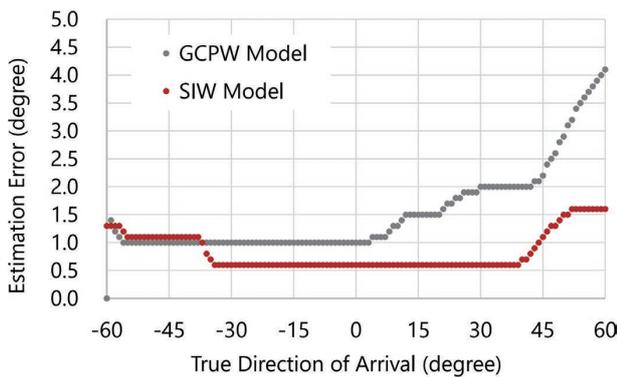


図7 GCPW モデルと SIW モデルの到来方位推定精度

4.4 到来方位推定精度のさらなる向上

GCPW を SIW に置き換えることによって、到来方位推定精度が大部分の方位について改善されることを示した。しかし、 -45° 近傍など一部の方位については GCPW よりも劣る結果となった。この原因として寄生素子と SIW とが近接しているために、寄生素子に不要な電流が流れていることが推定された。寄生素子に不要な電流が流れることは、SIW モデルの Tx1 に接続したポートに給電した際の電流分布のシミュレーション結果（図8）によっても裏付けられた。

そこで、図9のように寄生素子を削除したところ、到来方位推定精度が向上し、すべての方位について GCPW モデルよりも到来方位推定誤差が小さくなる結果を得た（図10）。なお、このときの到来方位推定誤差の最大値は 1.2°

であった。

以上のように、今回検討した形状のアンテナにおいて、寄生素子を削除することで、到来方位推定精度が向上することが明らかになった。この結果は、他の形状のアンテナにおいても、寄生素子を削除したり、伝送線路から寄生素子に流れる電流を抑制したりすることで、到来方位推定精度が向上する可能性を示唆している。

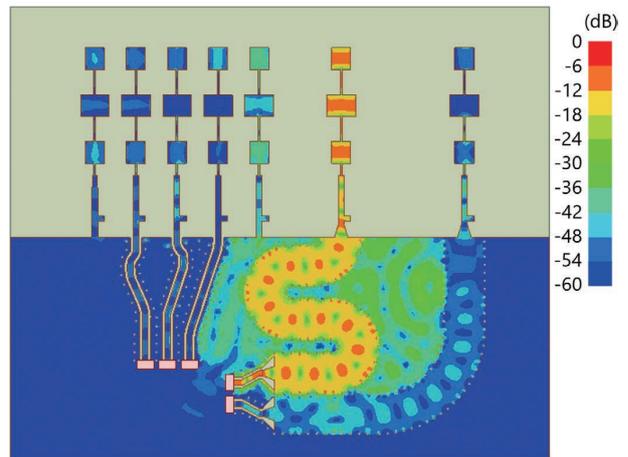


図8 SIW モデルの電流分布 (Tx1 に給電したとき)

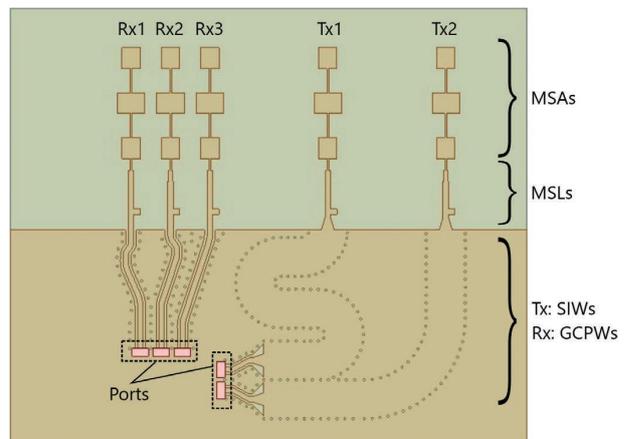


図9 寄生素子を削除した SIW モデル

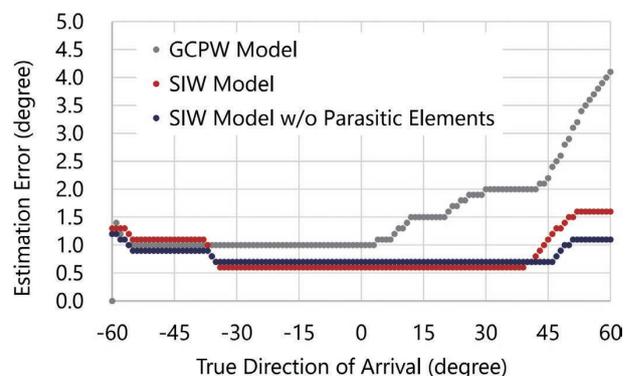


図10 寄生素子を削除した SIW モデルの到来方位推定精度

5. むすび

プリント基板上に形成されるミリ波レーダにおいて、伝送線路からの電波の放射が大きいと到来方位推定精度が劣化する。そこで本稿では、空間への放射が大きい伝送線路である GCPW の代わりに放射の小さい SIW を導入することによって、到来方位推定精度が向上することを電磁界シミュレーションを用いて示し、定量的に効果を明らかにした。具体的には、従来の GCPW モデルで 4.1° であった到来方位推定精度が SIW を導入することで 1.2° まで改善した。

SIW の導入によって、ミリ波レーダを用いたセンシングにおける位置の推定精度が向上し、車載や交通インフラ、FA、ヘルスケアを含めた幅広い分野で、より高い精度でターゲットを検出するミリ波センシングの提供が可能となる。今後は、想定されるアプリケーションの利用シーンにおいて、実機を用いて効果を検証していく。

参考文献

- 1) 大橋卓, 谷本雄大, 齋藤啓介. アレー拡張処理を用いたミリ波レーダによる屋外人物の 3D イメージング. OMRON TECHNICS. 2022, Vol.54, No.1, p.92-100.
- 2) 一般財団法人マルチメディア振興センター. “ミリ波レーダー (センサー) システム等に関する海外動向”. 情報通信審議会 情報通信技術分科会 陸上無線通信委員会, 2019-05-29. https://www.soumu.go.jp/main_content/000624368.pdf, (参照 2023-02-08).
- 3) 情報通信審議会. “小電力の無線システムの高度化に必要な技術的条件”のうち「60GHz 帯の周波数の電波を使用する無線設備の多様化に係る技術的条件」一部答申”. 情報通信審議会, 2021-03-30. https://www.soumu.go.jp/main_content/000741191.pdf, (参照 2023-02-08).
- 4) Xu, J.; Hong, W.; Zhang, H.; Yu, Y. “Design and measurement of array antennas for 77GHz automotive radar application.” 2017 10th UK-Europe-China Workshop on Millimetre Waves and Terahertz Technologies (UCMMT). 2017, p.1-4.
- 5) Fan, Y.; He, M.; An, Z. “An Array Antenna for 24GHz Automotive Radar Application.” 2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). 2020, p.1-3.
- 6) Ye, Y.-J.; Chueh, H.-Y.; Chang, W.-C.; Liao, W.-J. “A Series-Fed Patch Antenna Array for Biomedical Radar Applications.” 2021 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). 2021, p.1-2.
- 7) Deslandes, D.; Wu, K. Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form. IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2001, Vol.11, No.2, p.68-70.
- 8) Kazemi, R.; Fathy, A. E.; Yang, S.; Sadeghzadeh, R. A. “Development of an ultra wide band gcpw to siw transition.” 2012 IEEE Radio and Wireless Symposium. 2012, p.171-174.

執筆者紹介



小澤 尚志 OZAWA Hisashi
技術・知財本部
アドバンステクノロジーセンター
アドバンステクノロジー開発部
専門：電気・電子工学
所属学会：IEEE



谷本 雄大 TANIMOTO Yudai
技術・知財本部
アドバンステクノロジーセンター
アドバンステクノロジー開発部
専門：電気・電子工学
所属学会：IEEE、電子情報通信学会



齋藤 啓介 SAITO Keisuke
技術・知財本部
アドバンステクノロジーセンター
アドバンステクノロジー開発部
専門：電気・電子工学
所属学会：IEEE、電子情報通信学会

Ansys HFSS は、米国 ANSYS, Inc. またはその子会社の米国およびその他の国における登録商標または商標です。
本文に掲載の名称は、各社が商標としている場合があります。

最近発表した主な論文

※所属は発表時の情報です。

論文名・執筆者(所属)・掲載誌	抄 録
<p>PMSMの動力線への単相変圧器を用いた電力重畳回路方程式の実験検証</p> <p>Verification of Circuit Equations in Power Superimposition Using a Single-Phase Transformer on the PMSM Power Line in the Experiment</p> <p>桐淵岳 (インダストリアルオートメーションビジネスカンパニー 商品事業本部 ドライブ事業部 開発部)、井上征則 (大阪公立大学)、森本茂雄 (大阪公立大学)</p> <p>電気学会研究会資料(半導体電力変換/モータドライブ合同研究会)、2022年、一般社団法人 電気学会、No.SPC-22-143-171/MD-22-078-106、p.31-36、日本語</p>	<p>産業界では、自動化の進展とともに、装置に電力変換器と永久磁石同期電動機が数多く採用されている。永久磁石同期電動機は位置検出器を備え、電力変換器より動力線と位置検出器用の電力と情報を含む位置情報線が数m~数十mの長さで配線されている。永久磁石同期電動機の増加に伴い、配線が増加し装置内で複雑な配線が発生し問題となっている。本問題を解決すべく、位置情報線の削除のため、位置情報線の電力を動力線へ重畳・抽出する方法として、変圧器を動力線へ挿入した省配線化を検討している。なお、位置情報線内の情報は、電力線通信を活用した動力線での伝送を想定している。本論文では永久磁石同期電動機の動力線へ変圧器を挿入した回路方程式を構築し、線形計算と実験結果から回路式の妥当性を示す。</p> <p>Copyright (c) 2022 IEEEJ</p>
<p>スマートファクトリーとAI スマートファクトリー R&D —オムロンサイニクエックスにおける研究事例—</p> <p>R&D for Smart Factory -Research Activities at OMRON SINIC X-</p> <p>牛久祥孝 (オムロン サイニクエックス株式会社)、濱屋政志 (オムロン サイニクエックス株式会社)、米谷竜 (オムロン サイニクエックス株式会社)</p> <p>人工知能、2022年、一般社団法人 人工知能学会、Vol.37、No.3、p.299-305、日本語</p>	<p>オムロン サイニクエックス (OSX) は、オムロンの未来予測理論であるサイニク理論から名付けられています。この理論は、オムロンの創業者が1970年に提唱したもので、科学や技術、社会の変化をモデル化したものです。「エックス」は未知の技術を表す記号とされています。本稿では、人と機械の融和する近未来のものづくりに関する OSX の研究について紹介します。機械が担うべき役割としては、人のものづくりを理解し、賢く作業し、賢く移動することが挙げられています。</p> <p>Copyright (c) 2022 JSAI</p>
<p>ロボットセルシステムのための階層的最適化 —レイアウト設計から動作計画まで</p> <p>Hierarchical Optimization for Robotic Cell Systems - From Layout Design to Robot Motion</p> <p>倉谷僚一 (技術・知財本部 コアテクノロジーセンター)、他5名</p> <p>システム制御情報学会論文誌、2022年、一般財団法人 システム制御情報学会、Vol.35、No.5、p.118-125、日本語</p>	<p>ロボットセルの最適化設計を自動化する技術が必要とされている。ロボットセルの設計要素には設備の配置とロボットの動作があり、最適性はロボットの動作時間の合計で定量化できる。しかし、配置・動作の設計と動作時間の計算には数秒を要するため、数万回以上の試行が必要な最適化処理を単純に適用するのは実用的ではない。本論文では、最適化問題の再構成によって実用的な時間でのロボットセルの最適化を可能にした。</p> <p>Copyright (c) 2022 ISCIE</p>
<p>100W マイクロ波電力伝送における人体上電力密度の推定手法の実装及び有効性検証</p> <p>Implementation and Validity Verification of Power Density on Human Body Surface in 100W Microwave Wireless Power Transmission</p> <p>QIAO Chutian (技術・知財本部 研究開発センター)、NGUYEN Manh Tai (技術・知財本部 研究開発センター)</p> <p>電子情報通信学会大会講演論文集 (CD-ROM)、2022年、一般社団法人 電子情報通信学会、Vol.2022、p.ROMBUNNO.B-1-14、日本語</p>	<p>近年、あらゆるセンサ等の端末が無線化される DX 社会が到来すると話題となっている。そこでマイクロ波を用いた無線電力伝送の研究が注目を集めている。マイクロ波無線給電は長距離給電が可能である一方、給電エリア近傍の人体に影響を及ぼさないように人体上の電力密度を電波防護指針の基準値以下に保つ必要がある。本研究では、人体に装着する電力密度推定用 RF タグを用い容易な人体上の電力密度推定方法を提案した。そして、提案手法を100W EIRP マイクロ波電力伝送システムに実装し、電波暗室とシールドルームにおける推定手法の有効性を検証した。本稿では、提案手法の実装方法について簡単に紹介し、二つの環境における提案手法の評価結果を報告する。</p> <p>Copyright (c) 2022 IEICE</p>

論文名・執筆者（所属）・掲載誌	抄 録
<p>負荷非依存性に着目した非接触給電回路の設計方法とその適用事例</p> <p>Design Method of Wireless Power Transfer Circuit using Load Independence and Its Application</p> <p>上松武 (技術・知財本部 アドバンステクノロジーセンタ)、小田博章 (技術・知財本部 アドバンステクノロジーセンタ)、三島大地 (技術・知財本部 アドバンステクノロジーセンタ)</p> <p>電子情報通信学会大会講演論文集、2022年、一般社団法人 電子情報通信学会、Vol.2022、p.ROMBUNNO.BS-5-4、日本語</p>	<p>近年、バッテリーが搭載された各種電気機器の利便性向上のため、非接触給電回路が検討されている。回路方式には共振回路を用い、周波数制御を行うことが多く、その設計方法が検討されている。</p> <p>本稿では、著者らが検討してきた負荷非依存性に着目した設計法とそれを適用したワイヤレス給電システム (WPT) の事例を紹介する。</p> <p>Copyright (c) 2022 IEICE</p>
<p>永久磁石同期電動機の動力線への位置検出器用電力重畳での回路方程式構築と検証</p> <p>A Study on Correction of Bottom Dead Center of Servo Press Machine by Iterative Learning Control</p> <p>桐淵岳 (インダストリアルオートメーションビジネスカンパニー 商品事業本部 ドライブ事業部 開発部)</p> <p>電気学会研究会資料 (モータドライブ/家電・民生合同研究会)、2022年、一般社団法人 電気学会、No.MD-22-049-068/HCA-22-001-020、p.21-26、日本語</p>	<p>産業界では、自動化の進展とともに、装置に電力変換器と永久磁石同期電動機が数多く採用されている。永久磁石同期電動機は位置検出器を備え、電力変換器より動力線と位置検出器用の電力と情報を含む位置情報線が数m～数十mの長さで配線されている。永久磁石同期電動機の増加に伴い、配線が増加し装置内で複雑な配線が発生し問題となっている。本問題を解決すべく、位置情報線の削除のため、位置情報線の電力を動力線へ重畳・抽出する方法として、変圧器を動力線へ挿入した省配線化を検討している。なお、位置情報線内の情報は、電力線通信を活用した動力線での伝送を想定している。本論文では永久磁石同期電動機の動力線へ変圧器を挿入した回路方程式を構築し、線形計算と回路モデルシミュレーションから回路式の妥当性を示す。</p> <p>Copyright (c) 2022 IEEJ</p>
<p>電気接点デバイス特有の故障モードと対策の考察</p> <p>Chemical examination of measures against electrical contact failure</p> <p>森井真喜人 (デバイス&モジュールソリューションズカンパニー 技術統括部 要素技術部)</p> <p>電子情報通信学会技術研究報告 (Web)、2022年、一般社団法人 電子情報通信学会、Vol.121、No.368 (R2021 43-46)、p.1-5 (WEB ONLY)、日本語</p>	<p>電気接点を用いた機構デバイスは遮断時の高い絶縁性と通電時の低い電気抵抗という特性から、安定した電流制御機器として幅広く用いられている。電気接点の信頼性は接触した金属間の電子移動によって維持され、電気接点の接触現象は過去から幅広く研究されている。電気接点の接触通電現象を維持するには適切な材料と機構及び使用される環境からの阻害要因を適切に制御することが重要である。接点上で生じる様々な現象は、接点周囲に存在する物質に何らかのエネルギーが与えられることで別の物質に換わる化学変化が発生していると考えられる。本稿では電気接点で生じる様々な故障現象を化学的に検討した結果を報告する。</p> <p>Copyright (c) 2022 IEICE</p>
<p>電流目標値を有する垂下方式による蓄電システム制御</p> <p>Droop Method with Current Reference for Power Storage System Control</p> <p>上松武 (技術・知財本部 アドバンステクノロジーセンタ)</p> <p>電子情報通信学会 電子通信エネルギー技術研究会 技術報告、2022年、一般社団法人 電子情報通信学会、Vol.121、No.359、p.18-23、日本語</p>	<p>本稿では、従来の垂下方式による複数台のDC-DCコンバータ (以降、コンバータ) で構成された蓄電システムの並列運転制御に、電流目標値を設定する方法を提案する。本方式の特長は、各コンバータが自律制御を行い、かつ、負荷と目標値の総和が不一致の場合、設定した出力電圧範囲内に調整することである。有効性の検証はシミュレーションで行い、確認した。</p> <p>Copyright (c) 2022 IEICE</p>

リカレントニューラルネットワークを用いた部分センサ情報からの連続アームの姿勢推定

Continuum-Body-Pose Estimation From Partial Sensor Information Using Recurrent Neural Networks

田中一敏(オムロン サイニックス株式会社)、南友菜(東京大学 大学院 情報理工学系研究科 國吉中嶋研究室)、徳留勇志(東京大学 大学院 情報理工学系研究科 國吉中嶋研究室)、井上克馬(東京大学 大学院 情報理工学系研究科 國吉中嶋研究室)、國吉康夫(東京大学 大学院 情報理工学系研究科 國吉中嶋研究室)、中嶋浩平(東京大学 大学院 情報理工学系研究科 國吉中嶋研究室)

IEEE Robotics and Automation Letters, 2022年、IEEE、Vol.7、No.4、p.11244-11251、英語

Soft continuum arms have significant potential for use in various applications due to their extremely high degrees of freedom. For example, these soft arms can be used for grasping and manipulating fragile materials in the deep sea or carrying a human to rescue in unstructured environments. However, in these situations, the environment is often dark and visual cues are not always usable. Therefore, these arms must estimate their pose from proprioceptive sensors to control their behavior and execute their tasks in dark places. Estimating the pose in a dynamic situation is still challenging because of the arms' high dimensionality and the complex structural changes in the body shape. Therefore, this study demonstrates a novel method for estimating the pose of proprioceptive bending sensors using recurrent neural networks (RNNs). In particular, an RNN framework known as deep reservoir computing was used for this purpose. Results from experiments using an octopus-inspired soft robotic arm clearly indicate that the proposed method significantly outperforms existing methods using long short-term memory models or linear models. We expect that our proposed method will enable behavioral control of these arms in dark places such as the deep sea, space, and inside the human body in future applications.

Copyright 2022 The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved.

フレーム差分画像を用いたVAEと近傍探索による落下物・不審物検知

Fallen/Suspicious Object Detection by Using VAE and NNS with Frame Difference Image

山本健生(オムロン ソーシャルソリューションズ株式会社 事業開発統轄本部 技術創造センタ)、酒井俊(オムロン ソーシャルソリューションズ株式会社 社会ソリューション事業本部 交通ソリューション事業部 事業開発部)

人工知能学会全国大会(Web)、2022年、一般社団法人 人工知能学会、Vol.36、p.ROMBUNNO、IF4-GS-10-02 (J-STAGE)、日本語

近年、安全・安心・快適な環境へのニーズが高まっており、テロや事件・事故を未然に防ぐために、道路上の落下物や駅をはじめとした施設内での不審物など、普段存在しない物体を自動的に検出することが求められている。従来、このような物体検出には背景差分法が用いられていたが、草木の揺れや日照変化などを誤検出する課題があった。そこで本研究では、フレーム差分画像を用いて、VAE (Variational Auto-Encoder) と近傍探索を組み合わせた異常検知技術を、監視カメラによる落下物・不審物検出問題に適用した。実験データ1(綾部)の場合、検出精度を表すG-mean値は、フレーム差分を用いたVAEと近傍探索を組み合わせた手法では0.974、既報の平均画像を用いたVAEでは0.875、OpenCVによる背景差分法では0.660であった。また、データ2(野洲)では近傍探索の特徴を活かし、Human-In-the-Loopによって誤検出データを再分類して推論することで、約3分でG-mean値を0.07向上させることができた。

Copyright (c) 2022 JSAI

難姿勢に基づいた産業用ロボットアームのためのカスケード構造を有するケーブル経路最適化手法に関する研究

Efficient Cable Path Optimization Based on Critical Robot Poses for Industrial Robot Arms

岩村慎太郎（インダストリアルオートメーションビジネスカンパニー 商品事業本部 コントローラ事業部 ソフトウェア開発部）、水上嘉樹（山口大学 大学院理工学研究科）、遠藤孝浩（京都大学 大学院工学研究科）、松野文俊（京都大学 大学院工学研究科）

IEEE Access、2022年、IEEE、Vol.2022、No.10、p.66028-66044、英語

Although industrial robotic arms are equipped with external cables to supply electricity, gases, or other materials, cable path design is a difficult and demanding task. Herein, an efficient optimization method is proposed for automating cable path design under the assumption that the robot motion path is known. The contribution of this study was to reduce the considerable computation time required for the optimization, which was a concern in our previous work. The previous method represented candidates for cable paths as a set of parameter vectors (PVs) that included cable length and guide configurations, and then selected the optimal PV that satisfies stress constraints and provided the shortest cable path. The proposed method extracted critical poses, i.e., several static robot poses that are prone to applying stress to the cable, from the joint angle time series of the motion path, and then performed attachment and motion tests. The cable geometry for the static critical poses was simulated in the attachment test, while the geometry for dynamic robot motion was simulated in the motion test in an ascending order of the cable length among the PV candidates. Experimental results showed that the computation time for cable path optimization could be significantly reduced.

産業用ロボットアームのためのケーブル経路最適化手法に関する研究

Cable-path optimization method for industrial robot arms

岩村慎太郎（インダストリアルオートメーションビジネスカンパニー 商品事業本部 コントローラ事業部 ソフトウェア開発部）、水上嘉樹（山口大学 大学院理工学研究科）、遠藤孝浩（京都大学 大学院工学研究科）、松野文俊（京都大学 大学院工学研究科）

Robotics and Computer-Integrated Manufacturing、2022年、Elsevier、Vol.73、p.102245、英語

The production line engineer's task of designing the external path for cables feeding electricity, air, and other resources to robot arms is a labor-intensive one. As the motions of robot arms are complex, the manual task of designing their cable path is a time-consuming and continuous trial-and-error process. Herein, we propose an automatic optimization method for planning the cable paths for industrial robot arms. The proposed method applies current physics simulation techniques for reducing the person-hours involved in cable path design. Our method yields an optimal parameter vector (PV) that specifies the cable length and cable-guide configuration via filtering the candidate PV set through a cable-geometry simulation based on the mass-spring model. The proposed method offers two key features: 1) Increased computational efficiency via an optimization procedure that separates the entire cable into the cable segments. In the proposed method, the entire cable is segmented at the positions of the cable guides into several separate cable segments, and the PVs of the cable segments that satisfy the constraints of collision, stretch, and curvature radius are filtered into the local optimal PV set. The global optimal PV is obtained by finding the combination of the local optimal PVs which have the same guide configuration between the adjacent cable segments and have minimal total length of the adjacent cable segments. 2) Robustness to external disturbances, such as fluctuation in the physical properties of the cables and the accuracy of manually attaching the cables. The PVs of the local optimal PV sets are required to satisfy the above constraints, even if the cable length changes in the predefined range, which ensures the robustness of the obtained cable path. To verify the validity of the proposed method, we obtain the global optimal PVs by applying the method to several pick-and-place motions of a six-axis vertical articulated robot arm in our simulations and implement the cable paths on an actual robot arm based on the obtained PVs. Our results indicate that the proposed method can aid line engineers to efficiently design the cable paths along robot arms.

Copyright 2022 Elsevier, All rights reserved.

論文名・執筆者(所属)・掲載誌	抄 録
<p>オブジェクト検出データセットに対する アノテーション品質の改善の効果:予備研究</p> <p>The Effect of Improving Annotation Quality on Object Detection Datasets: A Preliminary Study</p> <p>Ma Jiaxin (オムロン サイニックエックス株式会社)、 牛久祥孝 (オムロン サイニックエックス株式会社)、 相良美織 (株式会社バオバブ)</p> <p>2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)、 2022年、IEEE、Vol.2022、No.CVPRW、p.4850-4859、英語</p>	<p>In this study, we partially reannotate conventional benchmark datasets for object detection and check whether there is performance improvement/drop compared with the original annotations. Recent studies on the annotation qualities of ImageNet for image classification revealed some issues of how to associate only a single label to each image accurately. Object detection, on the other hand, should have other nontrivial issues because there are multiple objects in a single image, and realizing consistency among bounding boxes is challenging. A team of professional annotators was formed for MS COCO and Google Open Images datasets. To realize highly-consistent annotations, we prepared carefully designed guidelines for each category and selected quality inspectors who checked the annotation quality of each annotator. Finally, we applied conventional object detection methods for reannotated parts of each dataset. We found mixed results: whether the performance dropped or improved depended on each category and dataset.</p>
<p>二次元ロードマップ上の 連続時間マルチエージェント経路探索のための 優先順位付き安全区間経路計画</p> <p>Prioritized Safe Interval Path Planning for Multi-Agent Pathfinding With Continuous Time on 2D Roadmaps</p> <p>笠浦一海 (オムロン サイニックエックス株式会社)、 西村真衣 (オムロン サイニックエックス株式会社)、 米谷竜 (オムロン サイニックエックス株式会社)</p> <p>IEEE Robotics and Automation Letters、2022 年、IEEE、Vol.7、No.4、p.10494-10501、英語</p>	<p>We address a challenging multi-agent pathfinding (MAPF) problem for hundreds of agents moving on a 2D roadmap with continuous time. We propose Prioritized Safe-Interval Path Planning with Continuous-Time Conflicts (PSIPP/CTC) that extends a scalable prioritized planning algorithm to work on the 2D roadmap and continuous-time setup by alleviating intensive collision checks. Our approach involves a novel concept named Continuous-Time Conflict (CTC), which describes a pair among vertices and edges associated with continuous-time intervals within which collisions can happen between agents. We pre-compute CTCs using geometric neighbor-search and sweeping techniques and annotate roadmaps with the CTCs just once before planning starts. Doing so allows us to efficiently enumerate collision-free time intervals for all vertices and edges and find each agent's path with continuous time in prioritized planning.</p>

OMRON TECHNICS
推進委員会

推進委員長	大平 真琴				
推進委員	小林 達矢	坂瀬 忠之	中村 芳行	浪江 正樹	
	馬淵 雅夫	山崎 琢也	(50音順)		
事務局	西崎 修	行衛 満智子			
編集協力	オムロン エキスパートエンジニアリング株式会社 三宅 慶幸				

OMRON TECHNICS 非売品

第55巻 第1号
通巻167号(年1回発行)
(禁無断転載)
ISSN 0474-1315

編集兼発行人 諏訪 正樹
発行 オムロン株式会社 技術・知財本部
〒619-0283 京都府木津川市木津川台9-1
電話 0774-74-2000 (代)

2023年5月10日 発行

Published by OMRON Corporation
9-1, Kizugawadai, Kizugawa-city,
Kyoto, 619-0283 Japan
TEL 0774-74-2000

OMRON