

特集

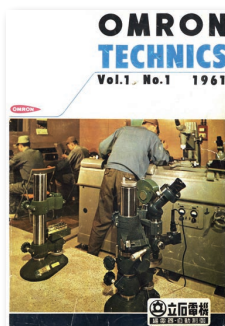
デバイス事業を進化させる エッジセンシング技術



OMRON TECHNICS のご紹介

技術論文誌「OMRON TECHNICS」は、
オムロングループの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技術を活用した新たな価値をぜひご覧ください。

創刊よりこれまで通巻170号発行し、約1,900編の技術論文を公開してきました。



1961年 5月 創刊号



2018年 161号



2019年 162号



2020年 163号



2021年 164号



2021年 165号



2022年 166号



2023年 167号



2024年 168号



2025年 169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

オムロンの事業成長を支える 「全社重要技術」

オムロンは、長期ビジョン「Shaping the Future 2030（略称：SF2030）」において、「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」を捉えるべき社会的課題として設定しています。これらの課題解決に向け、「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」「データソリューション」の4つのドメインにおいて、事業を通じて社会価値を創出し、社会の発展に貢献し続けることを目指しています。

このSF2030ビジョン達成に向けた長期ビジョンの最終章として、2026年度から2030年度までの5年間における成長の道筋を示す中期ロードマップ「SF 2nd Stage」を策定し、グループの成長を牽引する注力事業を特定しました。オムロンは、顧客視点に立ち返り、目指す将来像と成長シナリオを検討することで個別の事業成果に直結する技術にとどまらず、各ドメインの複数の注力事業間でシナジーを生み出す全社横断的な技術領域として、8つの「全社重要技術」を選定しました。

各事業ドメインにおける注力事業の戦略および商品企画を起点として、事業部門とR&D部門が一体となって技術戦略を策定・実行しています。こうした取り組みを推進するため、オムロンは、全社のR&D方針を設定し、全社重要技術を対象に、R&D投資、技術、人財、知財を一体でマネジメントしています。

全社重要技術領域

エッジコントロール

データマネジメント

エッジセンシング

分散・クラウドコンピューティング

電力変換・制御

設計・実装・管理

Agentic AI

開発DX/ソリューション

オムロンの事業成長を支える「全社重要技術」	1 (1)
目次	2 (2)
巻頭言：デバイス事業を進化させるエッジセンシング技術	
オムロン株式会社 執行役員 ストラテジックR&D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)
解説：エッジセンシングで切り拓く現場価値の創出	
—コモディティ化を超えたオムロンの競争優位—	
オムロン株式会社 ストラテジックR&D本部	
センシングテクノロジーセンタ長 光本 大輔	6 (6)
社外表彰論文：CT型X線自動検査装置の高精細・高速検査技術	
オムロン株式会社 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 検査システム事業本部	
X線検査システム事業部 開発部 七呂 真	8 (8)
【この論文はエレクトロニクス実装学会誌より転載しております】	

特集：デバイス事業を進化させるエッジセンシング技術

長距離性能と広い検出角度安定性を両立したTOFセンサの開発	
都築 良介, 安藤 信太郎	16 (16)
UHF帯RFID受信波形を活用した移動する荷物の順序識別方法	
菅野 真行, 喬 楚天, 長岡 真吾, 齋藤 啓介	23 (23)
構造一体化方式による小型光学トルクセンサ提案	
川越 清政	32 (32)
遠隔患者モニタリングによる血圧管理のための測定時間帯自動分析機能の開発	
佐藤 博則	37 (37)
複数信号機制御における強化学習と交通工学の融合的アプローチの考察	
山本 健生, 伊澤 茉莉花	45 (45)

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 —ファクトリーオートメーション—

リアルタイムシステムでPCI Expressを適用するために必要な高精度同期技術について	
中谷 好博, 西村 康裕	58 (58)
狭路走行のためのスーパー楕円を用いたModel Predictive Controlによる軌道計画の障害物制約の改良	
殿谷 徳和, 向井 滋春, 齊藤 ゆみ	65 (65)

2. オムロンのものづくりを支える技術

人作業組立ラインの電力消費量シミュレーション手法	
古川 朋樹	74 (74)
脅威分析ツールによる産業用制御機器に対する脅威分析の自動化	
依田 安基	80 (80)
データ時代のFAシステム進化と標準化技術に関する概念検証	
尾崎 敏之	89 (89)

3. 新たな成長領域を生み出す技術

機械学習を用いた会計データのリスク定量化による内部監査業務の効率化	
太田 雄也, 藤井 徹	96 (96)
最近発表した主な論文	107 (107)

Core Technologies Supporting OMRON's Business Growth	1 (1)
Table of Contents	2 (2)
Introduction; Edge Sensing Technologies Evolving the Device Business	
SUWA Masaki, Executive Officer, Senior General Manager, Strategic R&D Initiative HQ and President and CEO, OMRON SINIC X Corp.	4 (4)
Commentary; Edge Sensing as a Driver of OMRON's Competitive Advantage	
— Creating Real-World Value Beyond Commoditization —	
MITSUMOTO Daisuke, General Manager, Sensing Technology Center, Strategic R&D Initiative HQ	6 (6)
Award-Wining Paper (External Recognition); High-Resolution and High-Speed Inspection Technology for CT-Type Automated X-Ray Inspection Systems	
SHICHIRO Makoto, Development Group 2, Automated X-ray Inspection Business Div., Development Dept., Inspection Systems Business Division HQ, Industrial Automation Company	8 (8)

Special issue: Edge Sensing Technologies Evolving the Device Business

Development of a TOF Sensor for Long-Range and Stable Wide-Angle Detection	
TSUZUKI Ryosuke and ANDO Shintaro	16 (16)
Method for Identifying the Order of Moving Packages Using UHF RFID Reception Waveforms	
SUGANO Masayuki, QIAO Chutian, NAGAOKA Shingo and SAITO Keisuke	23 (23)
Proposal for a Compact Optical Torque Sensor Using a Structural Integration Method	
KAWAGOE Kiyomasa	32 (32)
Development of an Automatic Measurement Time Analysis Function for Blood Pressure Management by Remote Patient Monitoring	
SATO Hironori	37 (37)
A Fusion Approach of Reinforcement Learning and Traffic Engineering in Multiple Traffic Signal Control	
YAMAMOTO Yoshiki and IZAWA Marika	45 (45)

1. Innovative Technology in OMRON's Growth Area — Factory Automation —

High-Accuracy Synchronization Technology for PCI Express in Real-Time Systems	
NAKATANI Yoshihiro and NISHIMURA Yasuhiro	58 (58)
Refinement of Obstacle Constraints in Trajectory Planning Using Super Ellipses for Narrow Passage Navigation with Model Predictive Control	
TONOGAI Norikazu, MUKAI Shigeharu and SAITOH Yumi	65 (65)

2. Technology Supporting OMRON's Manufacturing

Establishment of a Power Consumption Simulation Method for Manual Assembly Lines	
FURUKAWA Tomoki	74 (74)
Automating Threat Analysis for Industrial Control Devices using Threat Modeling Tool	
YODA Yasuki	80 (80)
A Conceptual Validation of the Evolution and Standardization Technologies of FA Systems in the Data Era	
OZAKI Toshiyuki	89 (89)

3. Technology Developing a New Growth Area

Risk Prediction in Accounting Data in Internal Audit using Machine Learning	
OTA Yuya and FUJII Toru	96 (96)
New Publications	107 (107)

デバイス事業を進 エッジセンシング

中期ロードマップ「SF 2nd Stage」における注力事業と全社重要技術領域

オムロンは、長期ビジョン「Shaping the Future 2030 (SF2030)」の達成に向け、2026年4月に最終ステージである中期ロードマップ「SF 2nd Stage」をスタートしました。このロードマップにおけるR&D戦略の核心は、コア技術の強化により開発生産性を高め、市場成長を超えた自社事業成長を実現することにあります。また、事業を通じて3つの社会的課題「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」を解決するため、全社で注力すべき事業を選定しました¹⁾。

しかし、それぞれの事業が個別に技術開発を行っていても、激変するグローバル市場において競合に打ち勝ち、目標とする成長を実現するための優位性を築くことはできません。

そこでオムロンでは、注力事業の成長を支え、事業横断で競争力の源泉となる8つの技術領域を「全社重要技術」として定義しました（本誌P1参照）。

これらは、オムロンが持つ独自の強みをさらに研ぎ澄ましデバイス事業を強化するコア技術「センシング&コントロール+Think」とデータサービス事業へと展開するための「AI/データマネジメント」技術、そして、これらを支える「R&D基盤技術」として抽出したものです。この8領域を全社共通の重要技術として、リソースを集中投下することで、事業間シナジーを生み出すR&Dを推進します²⁾。

フィジカルAIを駆動するエッジセンシング

本号で特集する「エッジセンシング技術」は、この全社重要技術の1つであり、特にデバイス事業の成長を支える重要な原動力です。データを生み出す現場である「エッジ」において、いかに他社の追随を許さない圧倒的な価値を付加できるか。それこそが、オムロンの未来成長の試金石となります。

本誌「OMRON TECHNICS」において、センシング技術の特集を組むのは163号（2020年5月発行）以来となります。振り返れば、163号の巻頭言において私は、「これからの時代、AIが真に社会の役に立つためには、サイバー空間の中だけで完結するのではなく、現実世界（物理世界）と相互作用する機械の『身体』と、世界を正しく認識するための機械の『五感』が必要不可欠になる」と述べました³⁾。

当時はまだ、「フィジカルAI」という言葉自体が技術トレンドの端緒にあったに過ぎませんでした。しかし、それから6年が経過した今、私たちが予見した未来はまさにその通り、いや、それ以上のスピードで技術開発の主戦場となっています。

大規模言語モデル（LLM）をはじめとする生成AIの爆発的な進化は、サイバー空間における情報処理能力を劇的に引き上げました。しかし、どれほどAIという機械の頭脳が賢くなろうとも、それが物理世界において正しく機能するためには、現実世界の「生の情報」をリアルタイムかつ正確に捉える、機械の「五感」が不可欠です。工場での高度な自動化、ヘルスケアでの疾患の予兆検知、あるいはインフラの自律的な監視において、人やAIが適切な判断を下せるかどうかは、すべてエッジ側でどれだけ高精度なデータを担保できる

化させる 技術



かにかかっています。ここで注目すべき点は、機械の「五感」は人の「五感」以上に多様であり、多機能であるため、機械の身体知が生み出す顧客価値は我々が想像するより遥かにポテンシャルがあるということです。

オムロンが「エッジセンシング」にこだわるのは、そのためです。エッジこそが、すべてのデータ、そしてすべての価値が生まれる「起点」だからです。一般的なトレンドとして、データをすべてクラウドに集約し、巨大なコンピューティングパワーで処理するアプローチが注目されがちです。しかし、製造業の現場や自動化の最前線においては、通信の遅延（レイテンシー）やプライバシー、セキュリティ、そして何よりも消費電力の観点から、すべてのデータをクラウドに送ることは現実的ではありませんし、それ以前の話として、どこまでその必要性があるのか？ということが現場ではさかんに議論されています。

つまり、私が163号で提示した「機械の五感としてのセンシング」は、今や「フィジカルAIを社会実装するための大前提」へと進化したのです。

他社には真似できないこれまで培ってきた尖ったデバイスがあるからこそ、その上に構築される自動化ソリューションやAIの価値が最大化されます。エッジセンシングの進化なくして、デバイス事業の成長も、フィジカルAIの実現もあり得ません。オムロンには、「ソーシャルニーズの創造」という創業以来変わらない価値観があります。私たちが取り組んでいるのは単なるスペック競争ではなく、「この技術を使って、いかにして世界の製造現場から不良品をなくすか」「いかにして深刻な人手不足を解決するか」という、社会的課題の解決への挑戦です。

本号では、オムロンの挑戦がどのように具体的な製品やコンポーネントに埋め込まれ、デバイス事業に活かされているのか、その一端をお届けします。そして、これらの技術成果をもとに、未来社会を創る仲間が一人でも多く増えることを心から願っています。

- 1) オムロン株式会社. “長期ビジョン Shaping the Future 2030 (SF2030).” ビジョン. <https://www.omron.com/jp/ja/vision/sf2ndstage/> (Accessed: Aug. 6, 2026).
- 2) オムロン株式会社. “オートメーションの拡張でワクワクする未来を創る.” テクノロジー. <https://www.omron.com/jp/ja/technology/> (Accessed: Aug. 6, 2026).
- 3) オムロン株式会社. “特集：機械の五感としてのセンシング.” OMRON TECHNICS 163. <https://www.omron.com/jp/ja/technology/omrontechnics/163> (Accessed: Aug. 6, 2026).

オムロン株式会社 執行役員 ストラテジックR&D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

エッジセンシングで切り拓く 現場価値の創出 —コモディティ化を超えたオムロンの競争優位—

オムロン株式会社 ストラテジック R&D 本部
センシングテクノロジーセンタ長

光本 大輔

コモディティ化が迫るセンシングの転換点

オムロンでは、2030 年度までの 5 年間の成長の道筋を示した 中期ロードマップ「SF 2nd Stage」を策定し、全社重要技術の一つとして「エッジセンシング」を設定しています。センシング領域ではこれまで性能とコストが主な競争軸でしたが、近年、汎用領域を中心にコモディティ化が進むとともに顧客ニーズが変化・多様化しており、従来の延長線上の改善だけでは価値提供や競争優位の維持が難しくなっています。例えば、ものづくり領域では人手不足を背景に、専門知識がなくても容易に導入・調整・運用したいというニーズが急速に高まっていますし、ヘルスケア領域では医療技術の民主化が進み、多様な企業が参入して新価値をめぐる競争が始まっています。こうした変化によって、製品の「性能・コスト」だけでなく「新しい価値を現場にどのように実装し、継続的に活用してもらうか」を考え、それを技術で実現することの重要性が増しています。

このような状況においては、現有技術の磨き込みに加えて、顧客の新しい困りごとをいち早く捉え、さまざまな技術・知見を活用して新たな技術を作り上げることがますます重要になります。その中核となるのが、私たちが得意とする現場に根差した「エッジセンシング」であり、オムロンの多様な事業と技術が強みになると考えています。

オムロンには事業・商品を通じて積み重ねてきたセンシング技術の歴史があります。1960 年に世界初の無接点近接スイッチを実用化して以来、光電センサ、変位センサ、画像センサ、セーフティセンサなどへ商品を拡大し、対象物の有無、位置、形状、状態を捉える技術を高めてきました。さらに、血圧計や心電計、基板検査装置などにも展開し、人の生体情報や電子部品の品質を捉えるところまで技術を積み重ねてきました。この歩みを通じて、オムロンは顧客現場の課題を解き、判断・制御・改善へつなげる技術と、それらを生み出せる技術者を獲得しました。現在、私たちはさまざまな対象の物理量を検出するトランスデューサ・信号処理技術に加え、データを統合して認識する技術

やハードウェアとソフトウェアをシステムとして構築する技術も保有しています。これらを一気通貫で組み合わせて社会実装までつなげられることがオムロンの強みであり、今後はこの蓄積を基盤として、センサを「検出する部品」から「現場課題を解決する知能化デバイス」へと進化させる取り組みを「エッジセンシング」の強化として推進していきます。

現場知見と AI を融合するエッジセンシング

私たちが目指すエッジセンシングでは AI 技術を活用していきます。ただしそれは、クラウドに大量のデータを送信して処理する一般的な AI 活用とは異なり、センサデバイスに搭載できる限られた演算資源、すなわち演算能力の高くない CPU や FPGA 上で AI を「極限まで小さく、かつ安全に」動作させることを意図しています。これにより、通信遅延やネットワーク環境に左右されず現場の近傍で即時に判断し、制御の精度向上や安全確保につなげることが可能となります。また、必要なデータだけを現場で抽出・処理できるため、データ転送量や電力消費を抑え、プライバシーやセキュリティの観点でも優位性を発揮できます。

エッジセンシングにおける AI は単にモデルの軽量化で実現できるものではなく、オムロンが長年蓄積してきた現場知見と融合させることで実現できる技術です。対象物の特性やその事業ドメインで求められる要件を深く理解しているからこそ、必要な特徴量を見極め、ノイズや外乱の影響を抑えながら限られた演算資源で高いセンシング精度と安定性を実現できます。さらに、モデル圧縮・特徴量設計・信号処理と組み合わせてハードウェア実装を最適化し、現場データを用いて継続的に改善することで、①高性能、②判断根拠を示せる説明性、③エッジで動作可能な軽量性、という通常はトレードオフになりがちな三つの価値を同時に高めることが可能になります。特に②においては、私たちが取り組むものづくり・ヘルスケア・社会システムの領域では、判定結果そのものだけでなく、その結果

に至った理由や納得性、さらに現場の担当者がその意味を理解し、必要に応じて調整・改善できることなどが求められます。これらの要件を満たしつつ各領域での課題解決を推進するため、私たちは各事業の現場知見やデータをAI技術と融合させデバイスに組み込むことで、競合や顧客の期待の一步先を行くエッジセンシングを実現していきます。

ストック＆フローで競争優位を再構築する

エッジセンシングでオムロン全社の競争優位を作り上げるには、各事業領域の商品で開発した技術を蓄積し、事業を越えて活用・還流させる仕組みが必要です。そこで、エッジセンシング技術戦略では注力事業の商品・技術ロードマップを起点に、要素技術、ノウハウ、スキルを横断的に蓄積する「ストック」と、それらを事業で活用・還流させる「フロー」を両立させることを重視しています。オムロンには、ものづくり・ヘルスケア・社会システムなど多様な事業領域があり、それぞれの現場で培われた技術資産（技術・データ・顧客理解・技術者知見）が存在します。コーポレートR&DであるストラテジックR&D本部は、全社に散在する技術資産をつなぎ直すハブとして機能し、開発効率の向上と先端技術のタイムリーな取り込み・展開を加速させていきます。

技術戦略の実行を通して、ものづくり領域では、高度化・高速化・多様化・低コスト化の要求に対し、センシング性能の向上とその活用を容易にする技術によって応えます。ヘルスケア領域では、ゼロイベントの実現に向けて、正確かつ簡便な測定と隠れたリスクを判別する技術を構築し、治療の成功や疾患の早期発見につなげます。社会システム領域では、既存技術とAIなどの新技術を最適に組み合わせながらシステムを構築し、移動の効率化と安全の確保に貢献します。さらには、実現した価値、商品、技術を積極的に発信することで、顧客・パートナーとの共創を広げます。あわせて、技術者に対するプレゼンスを高め、オムロンと共に価値を創りたい人や組織を惹きつける好循環を生み出していきます。

今回のセンシング特集号では、各事業領域で上記環境変化に対応して強みを発揮するセンシング技術とその適用事例を紹介します。社外表彰論文を含む6件の本誌掲載論文は、対象や技術方式こそ異なりますが、いずれも「現場固有の制約を理解し必要な情報を取り出し、判断や行動につなげる」というエッジセンシングの共通思想を具体化したものです。

- ・「CT型X線自動検査装置の高精細・高速検査技術」は、半導体の3D実装技術が進展する中で、微細構造や積層接合をX線で検査する技術です。従来困難であった微細な欠陥検査を、独自の連続撮像技術で高精細かつ高速なCT型X線自動検査で実現しました。
- ・「長距離性能と広い検出角度安定性を両立したTOFセン

サの開発」は、ものづくり領域でのワーク有無を検知する光電センサの新技術です。光の飛行時間を利用したTOF（Time of Flight）技術によって設置の自由度やロバスト性を高め、ユーザーの使い勝手を向上させました。

- ・「遠隔患者モニタリングによる血圧管理のための測定時間帯自動分析機能の開発」は、ヘルスケア領域での遠隔患者モニタリングにおける医療従事者への効果的なデータ提示方法を提案します。医療従事者が患者の状態を適切に把握するために最適な提示アルゴリズムを構築しました。
- ・「複数信号機制御における強化学習と交通工学の融合的アプローチの考察」は、社会システム領域での交通信号制御にAIを適用した技術です。交通工学に基づいた制約を課すことで、AI単体でよりも高い最適化効果を実現する可能性を見出しました。
- ・「UHF帯RFID受信波形を活用した移動する荷物の順序識別方法」は、ものづくり領域等でのトレーサビリティ実現に有効なRFID（Radio Frequency Identification：無線周波数識別）技術です。物流の自動化に向けて、荷物個体の識別だけでなく順序や搬送方向も検出可能としました。
- ・「構造一体化方式による小型光学トルクセンサ提案」は、ものづくり領域等で人と協調するロボットの関節部に用いる新方式のトルクセンサ技術です。光学式トルクセンサを関節の内部構造と融合させることで、センササイズとコストを削減しつつロボットの可搬重量を向上できる可能性を見出しました。

今後オムロンのセンシング技術は、個々の事業内に閉じず全社のストックとして蓄積され、別の現場へ展開するフローを回すことで進化を続けます。現場を深く理解し、必要な技術・商品を現場に届けることの積み重ねによって私たちはコモディティ化を超えて競争優位を確立し、顧客課題を解決し続けます。

執筆者紹介



光本 大輔 MITSUMOTO Daisuke
ストラテジックR&D本部
センシングテクノロジーセンタ長

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。

CT 型 X 線自動検査装置の高精細・高速検査技術

七呂 真^{1*}

High-Resolution and High-Speed Inspection Technology for CT-Type Automated X-Ray Inspection Systems

Makoto SHICHIRO^{1*}

¹ オムロン株式会社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本部 X 線検査システム事業部開発部開発 2 課 (〒 525-0035 滋賀県草津市西草津 2 丁目 2-1)

¹ Development Group 2, Automated X-ray Inspection Business Div., Development Dept., Inspection Systems Business Division HQ, Industrial Automation Company, OMRON Corporation (2-2-1, Nisikusatsu, Kusatsu-shi, Shiga 525-0035)

概要 近年、半導体の 3D 実装技術が進展する中で、微細構造や積層接合の複雑化により、従来の X 線透過検査では欠陥の検出が一層困難になっている。本稿では、これらの課題に対し、われわれが開発した CT 型 X 線自動検査装置 VT-X950 の技術的特徴を紹介する。VT-X950 は、高分解能 X 線源、微細画素 FPD、連続撮像による高速制御、AI 補助による自動レシピ生成といった独自技術を組み合わせることで、 $0.2\ \mu\text{m}/\text{pix}$ の高精細かつ高速な CT 検査を実現している。本技術により、今後ますます重要となる半導体製品の品質保証、開発期間の短縮、ならびに工程の歩留まり改善に貢献していく。

Abstract

With recent developments in 3D semiconductor packaging technology, defects have become even more difficult to detect using conventional X-ray transmission inspection. This is due to the increasing complexity of microstructures and stacked junctions. This paper introduces the technical features of the VT-X950 automatic CT-type X-ray inspection system developed by the company to address these issues: the VT-X950 combines unique technologies such as a high-resolution X-ray source, fine pixel FPD, high-speed control through continuous image capture and automatic recipe generation with AI assistance to realise $0.2\ \mu\text{m}/\text{pix}$, enabling high-resolution and high-speed CT inspections. This technology will contribute to quality assurance of semiconductor products, shortening development times and improving process yields, which will become increasingly important in the future.

Key Words: Inspection and Equipment Technology, X-ray Inspection Method, 3D Connection Reliability, 3D Packaging Design

1. 半導体・3次元実装の課題

1.1 半導体の微細化と高積層化

「半導体の集積密度は 18~24 か月で倍増する」

1965 年、ゴードン・ムーアが提唱したこの法則は、半世紀以上にわたり、半導体技術の進展を予測する指針として、情報処理能力の飛躍的な向上を牽引してきた。しかし近年、微細化技術は物理的・経済的限界に直面しつつある。そのため、従来の法則に依存しない新たな技術革新が求められている。

その中で、「チップレット技術」は、次世代の半導体実装アーキテクチャとして注目されている。チップレットとは複数の小型チップを高精度に統合することで、高性能かつ高歩留まりを実現可能とする技術である。一方で、チップレットは、接続部の形状や実装条件が多様化・複雑化するため、従来の設計・工程管理だけでは品質保証が困難となる。

本稿では、このような課題に対応する検査手法として、CT (Computed Tomography) 型 X 線自動検査装置の有効性について述べる。

1.2 3D 実装の流れ

近年、ロジック半導体においては、TSV (Through-Silicon Via) やマイクロバンプ ($\mu\text{-bump}$) による三次元積層技術の実用化が進展しており、これにより高密度かつ高性能な実装が可能となっている。具体的な例としては、フォトダイオードと信号処理回路を垂直方向に配線し、Cu-Cu 接合を用いる技術や、メモリ半導体における 3D NAND フラッシュメモリの普及などが挙げられる。これらの技術動向は、半導体の 3D 実装 (図 1) として総称される。

従来のフリップチップ実装技術は 1960 年代に開発され、1980 年代以降には、はんだバンプ技術の導入により信頼性が大きく向上した。さらに 2000 年代以降は、鉛フリーはんだの使用が環境規制により義務化されたことで、接合材の材料特性が変化し、それに対応する検査技術の進化が求められるようになった。

特に、はんだ接合部では、ボイド (空隙) や不濡れなど

*: Corresponding author

の内部欠陥が通電や熱負荷によって接合強度を劣化させる可能性があり、製品信頼性の低下を招くおそれがある。これらの欠陥は通電検査やX線透過検査である程度検出可能だが、定量的かつ正確な特定は難しい。

そのため、今後の3D実装技術の信頼性確保には、内部構造を高精度に三次元的に可視化できる検査技術の導入が信頼性確保の鍵となる（図2参照）。

1.3 3D実装の課題

3D実装の課題は、下記の2点が挙げられる。

(1) 反りによるチップ剥がれとはんだ接合部不良

半導体デバイスは、パッケージや基板の材料の熱膨張係数の違いにより、温度変化に伴って反りが生じる。この反

りが大きくなると、はんだ接合部に応力が集中し、断線や剥離のリスクが増大する。特に、バンプのピッチが微細化し、パッケージが大型化するほど、反りの影響が顕著である。そのため、反りの影響を低減する設計や精密な検査技術が不可欠である。

(2) 積層化によるバンプ検査の複雑化

3D実装においては、複数の層にわたる接合部が存在するため、従来の透過方式（2次元X線画像方式）の検査では重なりによって欠陥の検出が困難となる。そのため、X線透過検査では、正確な層別の判別には限界があり、高分解能で三次元的に構造を把握できるCT方式が有効である。

近年、CT型X線解析技術の進化により、試作期間の短縮、品質安定化が期待される。

次章では、CT型X線自動検査装置の特徴と、その導入による効果について詳述する。

2. 半導体検査に適したCT型X線自動検査

2.1 半導体向けのX線検査方式

CT方式によるX線検査は、一度の撮像により3次元構造の情報を可視化できるため、半導体のバンプ検査に有効である¹⁾。

そこで、まず、X線を用いた画像診断方式について説明する。X線検査には、大きく分けて「透過方式」と「CT方式」が存在する（表1）。

透過方式は、医療用レントゲンと同様の2次元画像（以下2Dと表記）を取得する手法であり、撮像スピードが速くデータ量も少ないことから、生産性を重視する用途に広く採用されている。しかし、構造が重なって見えるため、微細構造の特定には限界がある。

一方、CT方式はX線源とカメラを用いて複数方向から撮像を行い、三次元画像を再構成する手法である。立体的な情報が得られ、裏面部品の影響も受けないため、高精度

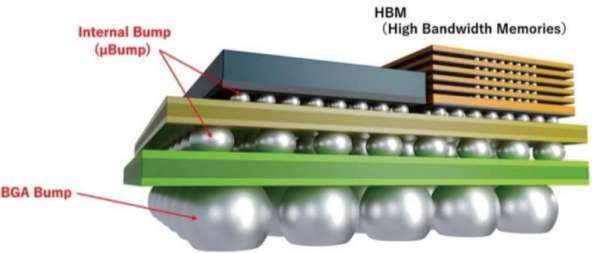


図 1. 3D実装のイメージ

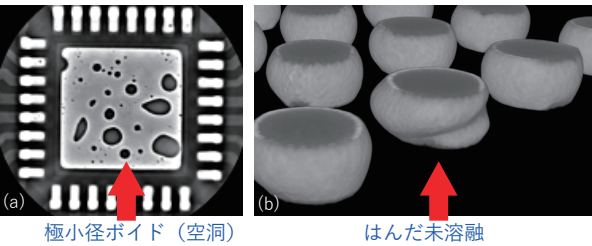


図 2. BGAの(a)ボイド (X線CT断層画像) の例：左、(b) 不濡れ (X線CTレンダリング画像) の例：右

表 1. X線画像診断手法の方式と特徴

	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 空洞がボヤける 裏映りしてしまう	CT断層画像を使った3D検査 ➤分析機主体。 空洞くっきり 裏映りせず立体的

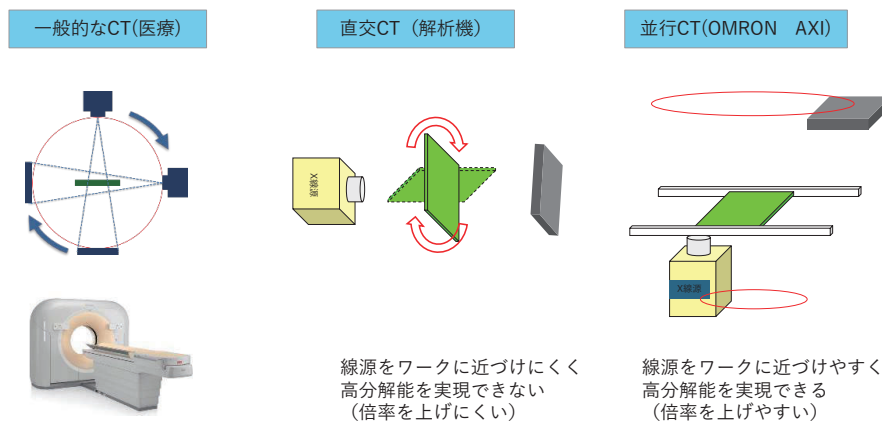


図3. CT方式の種類と特徴

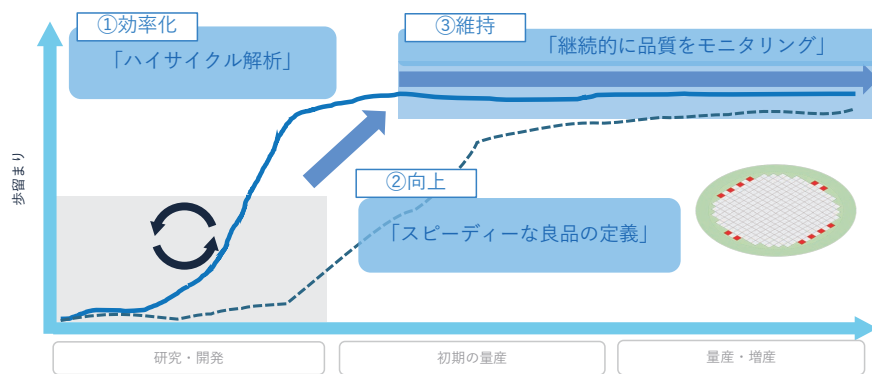


図4. CT型自動検査装置導入の効果

な検査が可能である反面、撮像や処理に時間を要し、データ量も大きくなる²⁾。

CT方式にも複数の種類があり、医療機器で用いられる「フルCT」や、「直交CT」「平行CT」などがある。中でも半導体検査には、対象物を回転させる必要がない「平行CT方式」が最適である。その理由を下記に述べる。

X線撮像の原理は、光源を照射して影絵をスクリーンに映すイメージと同様であり、線源と検査対象物の距離が近いほど倍率が高くなり、分解能の高い画像が得られる。

直交CTでは構造上、線源との距離を縮めにくく、場合により対象物をカットしなければ分解能の高い画像が得られない。しかし、平行CTでは対象物の回転を要さず、線源を近接配置できるため、高分解能撮像に適している(図3)。そのため、われわれの装置では、平行CT方式を採用し³⁾、0.2 $\mu\text{m}/\text{pix}$ の高分解能を実現している。

2.2 CT型自動検査装置導入による期待効果

図4に示すように、CT型自動検査装置を用いた半導体はんだ接合部検査により、(1)開発サイクルの高速化、(2)良品定義の高速化、(3)品質の安定化、が期待されており、実装工程の歩留まり改善、早期立ち上げに貢献できると考え

られる。

近年、X線デバイス、制御技術進化に伴い、CTでありながら高速な検査が可能となってきた。

開発のフェーズでは、非破壊でワーク全体のデータ解析を素早く行い不良箇所を早期に特定することができる。解析機と併用することで開発サイクルを短縮することが期待できる。量産フェーズでは、検査結果を前後工程にリアルタイムでフィードバックし、異常があれば是正をアシストすることができる。また、不良の定量的自動判定、レポート作成向けソフトウェアを搭載できれば、良品出現率の垂直立ち上げが行え、品質の安定化に貢献できる。

次章では、われわれのAXIにおける高精細、高速CT検査を実現するための要素技術をご紹介します。

3. 高分解能X線CT装置の開発

われわれのCT型X線検査装置の技術進化と、VT-X950に搭載された主な技術の特徴を紹介する。

3.1 CT型X線自動検査装置の進化

当社では、電子部品実装検査向けに開発したVT-X750を皮切りに、より高出力・高精細な検査を可能とするVT-X



図 5. CT 型自動検査装置の進化

850, そして先端半導体向けの VT-X950 へと, X 線 CT 自動検査装置の技術革新を推進してきた (図 5)。

VT-X750 では, SMT 基板上の BGA や THT といった高密度実装部品に対し, 2 秒/FOV 以下という業界最高水準の高速検査を実現し, 量産現場での実績を築いてきた。

さらに VT-X850 では, 高出力 X 線源の搭載により, 厚物・高吸取構造体の内部欠陥検査を可能とし, 適用領域を拡大してきた。

これらの技術基盤と現場での信頼性を積み重ねた成果が結実したのが, 分解能 $0.2\mu\text{m}/\text{pix}$ の超高精細 CT 検査を実現した VT-X950 である。次章では, VT-X950 に関する技術の特徴を述べる。

3.2 高精細検査の実現

高精細な画像生成には, 小焦点の X 線源と微細画素の X 線カメラを用いた撮像, 画像処理技術が必要となる。

3.2.1 高分解能透過型 X 線源の採用

X 線源は, 開放管と密閉管に大別される。開放管は排気機構が必要で調整・保守に手間を要する一方, 密閉管は構造が簡素で小型・保守性に優れる。われわれは, これらの利点を活かし, 微小焦点径を持つマイクロフォーカス密閉管を採用している。

われわれが開発した VT-X950 では, 高分解能画像の取得を目的に, 透過型 X 線源を搭載した。透過型は前方散乱 X 線を利用することで, 反射型より焦点径を小さくできる特長を有する。従来はフォーカス電極で電子ビームを絞ることで高解像度を得ていたが, ターゲットの熱劣化が課題であった。これに対し, VT-X950 に搭載している線源では, 高熱伝導材の採用により熱拡散性を向上させ, ターゲットの長寿命化を実現した。

3.2.2 高感度・高鮮鋭度 X 線パネルの採用

X 線非破壊検査において, 撮像性能の根幹を成すのが X 線パネルである。特に近年では, 積層構造の可視化や高密度実装部品の検査精度向上に應えるため, 高感度かつ高鮮鋭度な検出技術の導入が不可欠である。

X 線パネルとして一般的に用いられるフラットパネルディテクタ (FPD) は, X 線を直接撮像するのではなく, シ

ンチレータと呼ばれる蛍光体を介して X 線を可視光に変換し, それを受光センサで読み取り, 電気信号としてデジタル画像に変換する構造を持つ。画素単位で情報を取得する方式のため, 撮像の解像度や感度は, シンチレータの特性やセンサの読み出し方式に大きく依存する。

当社では, 対象物の微細構造をより鮮明に可視化するため, 従来型のアモルファスシリコンベースではなく, CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 方式の FPD を採用している。CMOS 型 FPD は, 画素毎に個別読み出しが可能という利点を有しており, これにより被写体の輪郭を鋭く描写する高鮮鋭度な画像が得られる。

3.3 高速な CT 検査の実現

次に, 高速かつ高精度な CT 検査を実現するために, われわれが独自に培ってきた「連続撮像技術」について述べる。

この技術は, X 線源および X 線カメラのステージを停止させることなく連続回転させながら撮像を行う方式であり, 従来の STOP & GO 方式のように毎回停止して撮像する手法とは一線を画す (図 6)。

視野ごとの画像取得を一連の連続動作で完結させることで, 1FOV⁴⁾あたりの撮像時間を大幅に短縮した。また, 高速化と同時に機械的負荷を軽減し, 装置全体の信頼性向上にも寄与している。

この非停止連続動作を高精度に成立させる鍵は, 各モータの高精度な同期制御にある。われわれは, 当社開発の制御デバイス PLC (Programmable Logic Controller) と, サーボモータおよび専用ドライバを高度に統合することで, 複雑な巡回軌道における高精度な軸同期を実現している⁵⁾。

さらにわれわれは, 検査点間を非停止で移動する独自の高速制御技術 (当社特許) も保有している。

これらは, 長年にわたり制御機器およびモーション制御分野で技術を磨いてきたわれわれだからこそ実現できた, 業界最高峰の高速 CT 撮像技術である。

3.4 高可用プラットフォームによる自動検査技術

X 線検査においては, 安定かつ再現性の高い自動検査を可能とするソフトウェアアプリケーションの品質が, 装置

【他社技術】Stop&Go

【オムロン技術】連続撮像

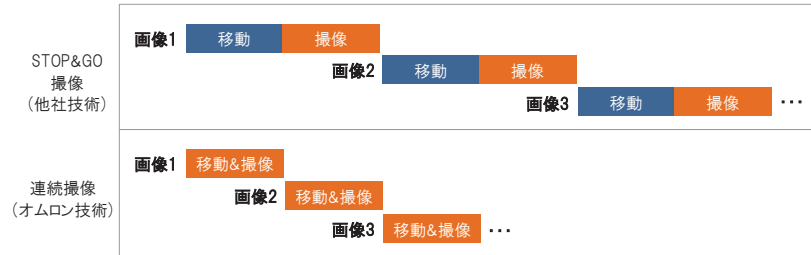


図 6. われわれ独自の連続撮像技術

性能に直結する。当社では、検査対象となるはんだ接合部に対し、管電圧・管電流・分解能・露光時間・プロジェクション枚数（CT 像を構成するために必要な投影画像枚数）などの最適条件を領域ごとに設定し、それらをレシピ（検査プログラム）として保存・運用することで、高精度な自動検査を実現している。

さらに、われわれ独自のソフトウェアは、レシピ作成の効率化にも大きく寄与している。CAD データを基にした自動レシピ生成に加え、AI による検査結果フィードバックを通じたライブラリの自動チューニング機能も搭載している。

これにより、対象部品の特性に応じた最適条件を短時間で導出することが可能である。

加えて、ウェハやサブストレート、JEDEC トレーなど、搬送形態の異なる多様なワークにも柔軟に対応し、自動検査をシームレスに行える点も、われわれの強みである。

また、ボイドや不濡れ、はんだブリッジといった典型的不良の検出にとどまらず、ダイとサブストレート間の高さのような幾何的寸法検査まで網羅する豊富なアルゴリズムを備えている。

これらの技術要素はすべて、制御・画像処理・AI を融合させたわれわれ独自の高可用なソフトウェアプラットフォームによって支えられており、自動検査を実現している。

3.5 今後の展望

われわれは、当社のオートメーションソフトウェア「Sysmac Studio」と NVIDIA Omniverse™ との連携により、デジタルツイン環境の構築を進めている。これにより、CT 型 X 線自動検査装置「VT-X」シリーズの内部構造を高精度に再現し、トラブルシューティングや開発期間の短縮、設計品質の向上が可能となる（図 7）。



図 7. デジタルツインの活用イメージ

さらに、生成 AI とバーチャルヒューマン技術を融合し、自然言語による検査装置の操作を実現させる。これにより、熟練工の技能に依存することなく、誰もが直感的に検査システムを活用できる新たなユーザ体験を提供していく。

今後、NVIDIA 様との協業を通じ、リアルタイムかつ物理的に忠実なデジタルツインと AI アシスタントを組み合わせることで、次世代のスマートファクトリーにおける検査プロセスの革新と、生産性・歩留まりのさらなる向上に貢献していく方針である。

4. むすび

半導体の高密度化・高機能化が進む中で、はんだ接合部に対する非破壊・高精度な検査の重要性はますます高まっている。これに対し、われわれは CT 型 X 線自動検査技術を新たなアプローチとして提案した。

本稿では、その中核を成す X 線源・撮像・画像処理・自動化・ソフトウェア制御といった各技術領域において、われわれが長年培ってきた制御技術と装置開発力が融合することで実現した、半導体検査向けの CT 型 X 線自動検査装

置 VT-X950 を紹介した。

今後もわれわれは、お客様の製品進化と歩調を合わせながら、より高精細かつ高速な検査技術の実現に挑戦し続ける。

CT 型 X 線自動検査技術のさらなる普及と発展を通じて、半導体業界全体の検査効率と品質向上に貢献していきたい。

最後に、本研究に多大なるご協力を賜った関係者の皆様、ならびに執筆の機会を与えてくださった皆様に深く感謝申し上げます。われわれはこれからも、現場に根ざした技術革新を重ね、ものづくりの未来に貢献していく所存である。

(2025.6.18- 受理)

文 献

- 1) Jisso 技術ロードマップ専門員会：“2022 年度版実装技術ロードマップ,” 電子情報技術産業協会, p. 352, pp. 450–451, 2022 年
- 2) 七呂 真：“超高速 CT 型 X 線自動検査装置の開発,”

OMRON TECHNICS, 2019 年

- 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, 溶接学会, p. 4, 2011 年
- 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, pp. 27–28, 2009 年
- 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, Vol. **29**, No. 1, pp. 67–72, 2018

著者紹介



七呂 真 (しちろ まこと)
オムロン株式会社
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 検査システム事業本部
X 線検査システム事業部 開発部
専門：電気工学
X 線自動検査装置の開発に従事

本稿は、一般社団法人エレクトロニクス実装学会の許諾を得て、『エレクトロニクス実装学会誌』28 巻 6 号掲載論文「CT 型 X 線自動検査装置の高精細・高速検査技術」を転載したものです。

著者名：七呂 真「CT 型 X 線自動検査装置の高精細・高速検査技術」, エレクトロニクス実装学会誌, 28 巻 6 号, pp. 570–575, 2025 年.
DOI:<https://doi.org/10.5104/jiep.28.570>

Copyright© The Japan Institute of Electronics Packaging

特集

デバイス事業を進化させる エッジセンシング技術



長距離性能と広い検出角度安定性を両立した TOF センサの開発

都築 良介, 安藤 信太郎

現代の製造業では、少子化による労働力不足によって、さらなる自動化が必要とされている。加えて、ニーズの多様化や技術革新に対応するため、柔軟性の高い自動生産の実現が求められている。そのためには、生産設備の動線および稼働範囲を妨げず、長距離から安定して対象物を検出できるセンサが必要となる。そこで、我々は Time of Flight (TOF) 技術を用いた光電センサを対象に、最大 6 m の検出距離および $\pm 85^\circ$ の角度範囲において、白・黒、粗面・光沢面など様々な色や表面状態を持つ対象物を安定検出することを目指した。特に検出が困難な黒色塗装が施された自動車ボデーに対しては、距離 3.5 m、 $\pm 50^\circ$ の条件下で安定した検出を設計目標とした。その実現に向け、レーザの短パルス駆動とアバランシェフォトダイオード (APD) の超高感度安定駆動により Signal-to-Noise Ratio (S/N 比) を改善し、検出性能を飛躍的に向上させた。その結果、他社製センサでは距離 3.5 m で $\pm 6^\circ$ に制限される条件下においても、本技術では $\pm 66^\circ$ まで安定検出が可能となった。これにより、対象物の色や表面状態に依存せず、高い検出安定性を有する TOF レーザセンサ「E3AS-HF」の開発に成功した。

Development of a TOF Sensor for Long-Range and Stable Wide-Angle Detection

TSUZUKI Ryosuke and ANDO Shintaro

In modern manufacturing, labor shortages due to population decline have increased the need for further automation. Additionally, to respond to diversifying needs and rapid technological innovation, highly flexible automated production is essential. This requires sensors that can reliably detect objects from long distances without obstructing the movement paths or working ranges of equipment and robots. In this study, we focused on a photoelectric sensor using Time-of-Flight (TOF) technology, aiming to achieve stable detection of objects with various colors and surface conditions—such as white or black, rough or glossy—at distances up to 6 meters and within an angular range of $\pm 85^\circ$. For particularly challenging targets such as black-painted automobile bodies, the design target was set at a detection distance of 3.5 meters and an angular range of $\pm 50^\circ$. To achieve this, we enhanced the signal-to-noise ratio (S/N ratio) through short-pulse laser diode driving and ultra-high-sensitivity stable operation of an avalanche photodiode (APD), significantly improving detection performance. As a result, even in cases where conventional sensors are limited to $\pm 6^\circ$ at a distance of 3.5 meters, our technology enables stable detection across a much wider angle of $\pm 66^\circ$. Through this advancement, we successfully developed the TOF laser sensor “E3AS-HF,” which provides high detection stability regardless of object color or surface condition.

1. まえがき

現代の製造業では、市場ニーズの多様化や急速な技術革新に対応するため、柔軟性の高い自動生産が求められる。さらに、世界的な人手不足の深刻化や、新型コロナウイルス感染症の流行を契機として顕在化した企業の社会的供給

責任を果たす観点からも、一層の自動化が求められている。

このような自動生産を実現するためには、ロボットや複雑な自動化設備の活用が必要となる。加えて、生産設備の動線や稼働範囲に干渉することなく、様々な位置に設置しても、長距離から生産対象物の有無を安定かつ正確に把握できるセンサが不可欠である。ロボットや設備の動作を妨

Contact : TSUZUKI Ryosuke ryosuke.tsuzuki@omron.com

げずに対象物の有無を検出するには、一般に指向性の低い超音波や電磁波に比べて、指向性の高い光を使ったセンサの方が適している。

従来から使用されてきた光電センサには、透過形、回帰反射形、拡散反射形といった光量検出タイプや三角測距方式による距離設定タイプが存在するが、それぞれに設置上の制約や検出性能に関する課題がある。たとえば、透過形および回帰反射形は長距離検出が可能である一方、検出対象物の両側にセンサやミラーを設置する必要があり、製造設備のレイアウトを制約する。拡散反射形は、検出対象物の色や表面状態、取り付け角度といった設置条件の影響を受けやすく、検出安定性に課題がある。三角測距方式は、色の影響を受けにくいという利点を有するが、実用上の検出距離は概ね 0.5 m 程度が限界である。これは、検出距離の長距離化のためには投光部と受光部の間隔を長くする必要があり、それに伴って筐体が大型化するためである。結果として、実用上許容される筐体サイズにより、検出距離の上限が制約される。

一方、近年の半導体技術の進歩により、従来の光電センサの限界を克服する技術が現実のものとなってきた。具体的には、半導体プロセスの微細化による信号処理の高速化や、投受光素子の性能向上によって、TOF 方式の距離設定タイプが実用に耐えるレベルに達している。TOF 方式は、時間を計測して距離に換算する原理に基づいており、他の方式に比べ対象物の色や表面状態、さらにはセンサの設置状態による影響を受けにくい。また、筐体の大型化も抑えることができ、長距離検出を実現できる。しかしながら、検出感度の制約により、長距離かつ安定した検出が可能な光電センサの実現には至っておらず、TOF 方式における検出感度の飛躍的な向上が強く求められていた。

このような背景のもと、前述の目的を達成するために、検出感度の向上を図り、ロボットの動作を妨げることなく、様々な色や表面状態をもつ対象物を最大 6 m の長距離から $\pm 85^\circ$ の広い角度範囲で検出可能な TOF レーザセンサを開発した。特に、検出が困難とされる黒色塗装が施された自動車ボデーに対し、生産ラインでの設置場所を考慮して実用上十分とされる検出距離 3.5 m からの検出を想定し、目標検出角度範囲 $\pm 50^\circ$ を達成するように設計した。

2. TOF レーザセンサ

2.1 TOF の原理

TOF の原理には大きく間接 TOF (iTOF) と直接 TOF (dTOF) の 2 種類に分類される。

iTOF はレーザ光をある周波数で強度変調し、その位相情報を用いて対象物までの距離を計測する方式である。図 1 に示すように一定の周波数で強度変調された正弦波などの連続波を投光し、対象物からの反射光との位相差を求める。

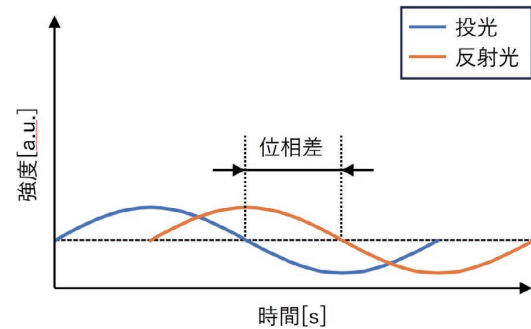


図 1 投受光の位相差

位相差から以下の式(1)により距離 d を導出する。

$$d = \frac{c \cdot \theta}{4\pi f} \quad (1)$$

ここで c は光速 (m/s)、 θ は位相差 (rad)、 f は変調波の周波数 (Hz) である。この方式の特徴は一般的に数 MHz～数十 MHz の比較的低い変調周波数が用いられるため、高速なシステムを必要とせず小型・省電力化が可能なことである。周波数を上げれば位相分解能も上がり、センサとしての検出精度も上がる。しかし、最大 6 m の検出距離範囲に必要な周波数は式(1)より 25 MHz 以下、つまり一回の距離計測に少なくとも 40 ns 以上の投光時間が必要となる。人体へ影響を考慮したレーザクラス基準において単位時間あたりの光出力に制約があるため、光出力を上げることができず長距離化と検出感度向上を両立できない欠点がある。

一方、dTOF は投光した反射光の往復時間を直接計測する方式である。図 2 に示すように、パルス状の投光が対象物に反射して戻ってくるまでの往復遅延時間を計測する。

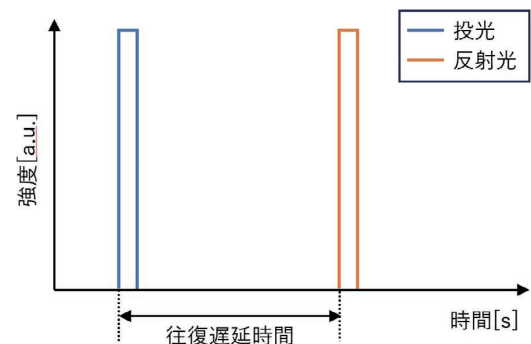


図 2 光の往復遅延時間

往復遅延時間から以下の式(2)により距離 d を導出する。

$$d = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (2)$$

ここで c は光速 (m/s)、 Δt はパルス投光してから光が戻ってくるまでの往復の遅延時間である。受光回路が反応する周波数であれば数 ns オーダ以下の超短パルス投光でも計測可能な原理であるため、iTOF よりも投光パワーを

上げて検出感度を高めやすい。以上より、長距離検出と高感度化を実現し、黒色塗装が施された自動車ボデーを安定検出する手法としては dTOF が適している。

2.2 dTOF の課題

dTOF により黒色塗装が施された自動車ボデーを 50° 以上の角度から安定して検出するには、システム全体の感度向上が不可欠である。感度設計の目標値は、自動車ボデーの角度反射率特性とセンサ構成要素の個体ばらつきを考慮した S/N 比試算結果に基づき設定した。投光系ではピーク光出力を 500 mW 以上とし、受光系では対象物からの微弱的な反射光を高感度に捉えるため、従来の非増幅型受光素子と比較して約 50 倍の検出感度を目標とした。これは、競合製品比で投光系が約 2 倍、受光系が約 50 倍に相当し、両者を組み合わせて約 100 倍の感度向上を想定したものである。

投光系には、長距離検出のため指向性と直進性に優れた半導体レーザダイオード (LD) を使用しており、安全性にも配慮が必要である。例えば、日本産業規格 JIS C 6802 では、レーザ製品の危険度に応じて 8 段階のクラス分類がなされており、その中でもクラス 1 は最も安全な区分として定義されている。実際の製造現場においては、レーザセンサを搭載した装置の周囲で作業者が組立や調整作業を行うことが多く、特別な安全対策を講じることなく使用可能なクラス 1 適合のセンサに対する要求が高い。このような現場のニーズおよび安全要件を踏まえ、クラス 1 の安全基準を満たしつつ、センサ性能の指標である S/N 比を最大化する LD 駆動回路を実現する必要があった。レーザクラスに関する制限の中でも、特に設計上の制約となりやすいのが平均光出力に対する規定であり、使用する光源波長 660 nm では 390 μ W 未満である。平均光出力を低減するための一つの手段として、LD の投光パルス周期を延長する方法が考えられる。しかしながら、この方法では単位時間あたりの受光信号の取り込み回数が減少するため、平均化処理によるノイズ低減効果が十分に得られなくなる。したがって、投光パルス周期については延長しないことを前提条件とし、投光パルス幅を受光回路で検出可能な 2.0~3.0 ns まで短縮することで平均光出力の制限を満たす方針とした。なお、単一パルスのエネルギーについての規定は 200 nJ 未満となっている。また、LD には素子ごとに発光効率の個体差が存在するため、制限内で最大の光出力を得るためには、個体差を補正可能な光出力可変機能を併せ持つことが求められる。従来の LD 駆動回路では、LD パッケージに内蔵されたフォトダイオード (PD) のモニタ電流によるフィードバック制御で光出力を制御していたが、ns オーダの短パルスには追従できないため、短パルス駆動での光出力可変機能の実現が LD 駆動回路の課題となる。

受光回路では、受光素子の選定が最も S/N 比に影響を与

える。表 1 に代表的な受光素子として、PIN フォトダイオード (PIN PD)、APD、シングルフォトンアバランシェダイオード (SPAD) の特性を示す^{1,2)}。相対感度は、PIN PD の受光感度を基準値として 1 とした場合の値を示している。

PIN PD は温度変化に対して非常に安定であるが、他の受光素子と比較して相対感度が 2 桁以上低い。一方、SPAD は最も高い相対感度を有するが、理論上 1 光子で応答して飽和するため、照度耐性に欠けるという欠点がある。

表 1 受光素子の比較

比較項目	PIN PD	APD	SPAD
相対感度※	1	10~100	10000 以上
降伏電圧の個体ばらつき	—	± 十数%	± 十数%
感度の温度特性	無し	数%/°C	数%/°C
照度耐性	数万 lx	10 万 lx 以上	無し

※ PIN PD の感度を 1 としたときの相対値

感度や照度耐性に関する原理的制約を回避し S/N 比を向上させるには、APD を用いて高い増倍率を設定する。このことで、PIN PD に対して相対感度 50 倍が実現可能となる。しかし、APD は個体ごとのばらつきや温度依存性が高いという課題を抱えている。具体的には、図 3 の例に示すように、APD に逆方向電圧を印加した際、ある電圧値を超えると絶縁が破壊され大電流が流れる限界電圧である降伏電圧 (V_{BR}) に顕著なばらつきが見られる。色ごとの実線、破線、一点鎖線はそれぞれ V_{BR} の個体ばらつきを示しており、最大と最小の差は約 40 V に達する。また、温度変化によっても V_{BR} は大きく変動し、同色の曲線が V_{BR} の温度特性を示している。高温と低温とで約 50 V の差が生じる。このように、APD は個体ばらつきと温度変動による特性のばらつきが大きく、一定の逆バイアス電圧で駆動した場合、得られる増倍率にばらつきが生じ、感度の安定性が損なわれる。したがって、高い増倍率を維持しつつ、これらの変動要因を抑制する逆バイアス電圧制御の確立は、受光回路の S/N 比向上における重要な課題である。

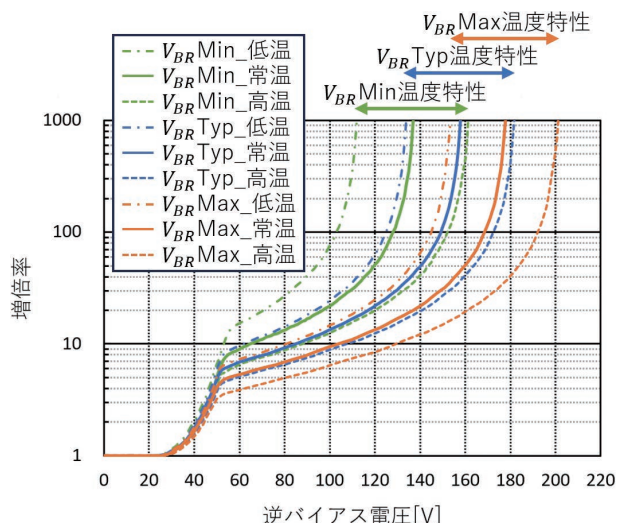


図3 APDの増倍率対逆バイアス電圧特性例

3. 課題を解決する技術

2章で指摘した課題解決に向け、S/N比向上にはLDの短パルス駆動を、APDの超高感度安定駆動については逆バイアス電圧制御回路の新設計を行った。

3.1 LDの短パルス駆動

レーザクラス1の制限を満たしつつ、最大のS/N比を得るために、短パルス駆動と光出力可変機能の実現が求められる。これらの要求を満たすLD駆動回路について検討を行った。

一般的に、LDの駆動には Automatic Power Control (APC) 方式が用いられている。この方式では、LDパッケージに内蔵されたフォトダイオード (PD) から得られるモニタ電流を用いて光出力を検出し、その出力が一定となるように順方向電流をフィードバック制御する。この方式は、LDの温度変化に伴う発光効率の変動に対しても安定した光出力が得られるという利点がある。しかし、応答速度に制限があり、ナノ秒オーダーのパルス発光が求められるdTOFには適さない。そこで、キャパシタやインダクタにパルス1発分に相当するエネルギーを蓄えておき、蓄えたエネルギーに基づいてLDをパルス駆動する方式が提案されている³⁾。今回開発したTOFセンサでは、本方式をベースとして光出力の可変機能の追加を行った。LD駆動回路の構成を図4に示す。

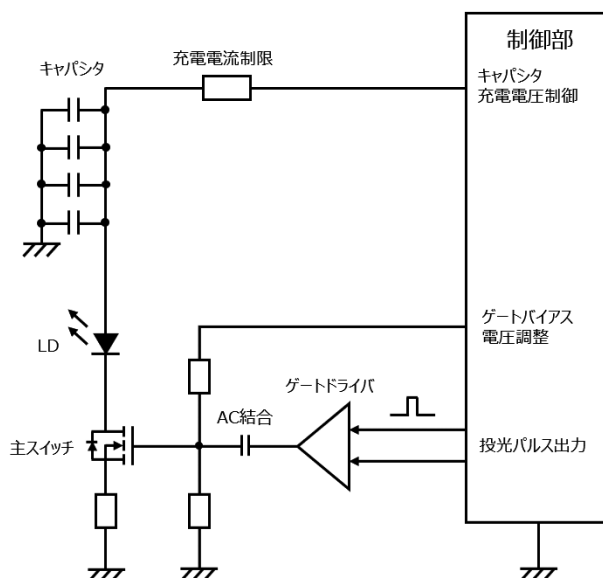


図4 短パルスLD駆動回路の構成図

光出力の可変機能は、制御部でキャパシタの充電電圧を制御することで行う。この制御方式では、LDや駆動回路のばらつきを組立時に調整し、安全かつ最大パワーを出力できる。加えて、ユーザの操作によって光出力を可変するユーザ調整機能も実現する。ユーザ調整機能を使用することで、例えば検出対象物がミラーなどの高反射物体の場合には、光出力を下げることで、APDの過飽和を防ぎ、検出精度を向上させることが可能となる。主スイッチには、窒化ガリウム電界効果トランジスタ (GaN FET) を採用した。GaN FETは、従来のSi MOSFETと比べて、高速なスイッチング速度、小型サイズ、高効率化を実現しており、電気自動車 (EV) や小型のUSB PD充電器などに応用が進んでいる。これにより、短パルスかつ大電流でのLDパルス駆動を実現した。

3.2 APDの超高感度安定駆動

APDの個体ばらつき補正と温度特性の安定制御のために、工程内で個体毎の増倍率を推定する方法の確立と、センサ内で増倍率を補正するための逆バイアス電圧制御回路の設計を行った。

増倍率を推定する方法には、代表的なものとして光電流法、雑音法、暗電流・降伏電圧法の3つが挙げられる⁴⁻⁶⁾。光電流法は、所定の光子数をデバイスに照射し、得られた光電流を測定することで増倍率を算出する方法である。この方法は、電流値を直接測定するため精度が高いものの、量産時には光源の強度変動や位置ずれで不安定になる課題がある。雑音法では、APDの雑音電流の強度から理論式を用いて増倍率を求める。この方法は、光による平均電流と雑音因子から増倍率を算出するため、光強度の絶対値を必要とせず、光源の安定性に影響されにくい。一方で、測定回路の雑音や外部雑音を分離する必要があり、測定系が

複雑になりやすい。以上を踏まえ、我々は暗電流を測定し降伏電圧を求め、APD の増倍率対逆バイアス電圧曲線から増倍率を推定する暗電流・降伏電圧法を採用した。この方法は、生産工程内で APD を遮光する簡素な構成でよい。ため、設備コストを抑えつつ効率的な増倍率の推定と安定した量産が可能となる。

今回採用した増倍率の推定と逆バイアス電圧制御するための受光回路の構成を図 5 に示す。温度センサ、ヒータ、暗電流測定回路、昇圧回路をセンサ内部の基板に搭載することで増倍率の推定と逆バイアス電圧制御を実現した。

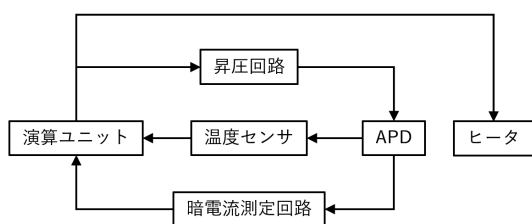


図 5 受光回路構成

この回路を用いて増倍率の決定および制御に関する手順を以下に示す。

センサの組立工程において、昇圧回路を用いて APD に印加する逆バイアス電圧を段階的に上昇させ、増倍率を高めていく。すると、図 6 の例に示すように、ある電圧に達した時点で、増倍率の上昇と共に暗電流が急激に増加する。この暗電流を暗電流測定回路で監視し、値が 100 μ A に達した時の昇圧回路の出力電圧を V_{BR} として記録する。同時に、その時点の温度を温度センサで測定し、あわせて記録する。この一連の測定は、センサ内部のヒータを用いて段階的に温度を変化させながら、異なる温度条件下で複数回実施する。ヒータは主に低温時の LD の加温を目的として搭載しているが、組立工程でも用いることによって短時間で温度差を作り出し、APD の個体値を素早く取得できるよう工夫している。

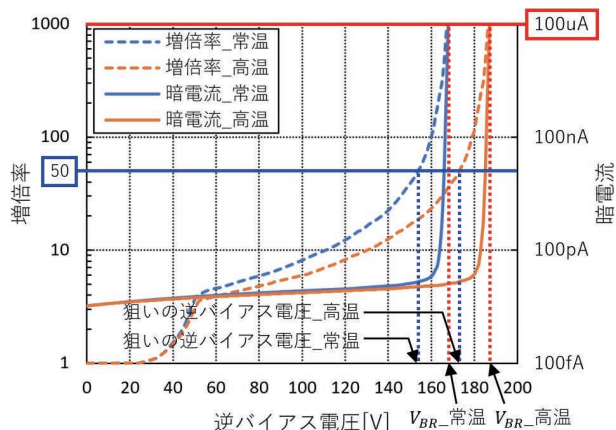
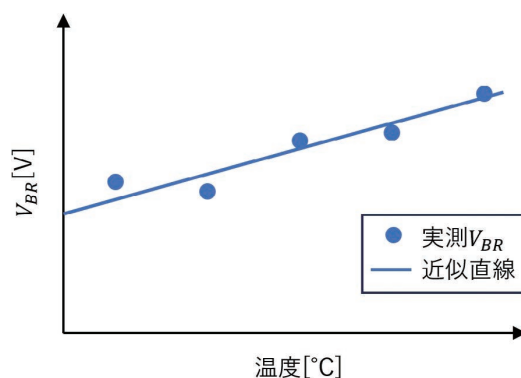


図 6 暗電流、増倍率対逆バイアス電圧特性例

次に、上記の方法で取得した各温度における V_{BR} の値をもとに、APD の代表的な増倍率対逆バイアス電圧曲線を参照し、目標とする増倍率を得るための逆バイアス電圧を算出する。算出された結果は、図 7 の例に示すように、 V_{BR} は温度の上昇に伴ってほぼ比例して増加する。この特性を一次式で近似し、その傾きを温度係数 γ と定義することで、温度変化に応じた逆バイアス電圧の制御により、安定した増倍率の制御ができ、安定した高感度を実現できる。

図 7 V_{BR} 対温度特性例

4. 評価実験

4.1 短パルス LD 駆動回路の性能評価

設計した LD 駆動回路について、LD の光パルス形状、光出力の可変動作の評価を実施した。

光パルス形状は、OE コンバータ（Graviton 社、形式：SPD-1_650 nm、帯域幅：1.2 GHz）と、オシロスコープ（Tektronix 社、形式：DPO7354C、帯域幅：3.5 GHz）を使用して測定した。図 8 に光パルス形状を示す。オーバーシュートの発生は確認できず、良好な形状であった。

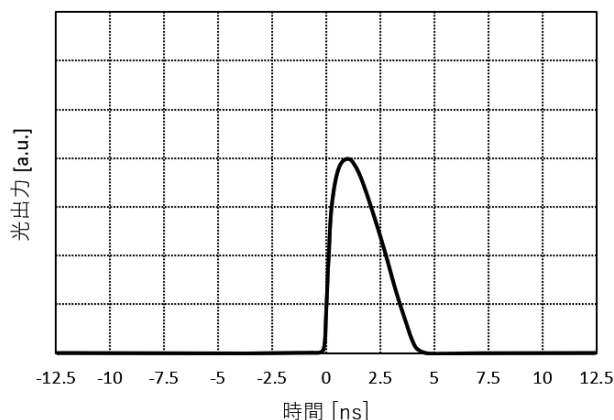


図 8 OE コンバータで測定した光パルス形状

光出力の可変動作の測定は、光パワーメータ（Ophir Optonics Solutions 社、形式：PD300）を使用して行った。なお、PD300 では平均光出力のみが測定されるため、ピー

ク光出力を算出する場合は、OE コンバータで測定された半値全幅および投光周期より投光デューティ比を求め、平均光出力をデューティ比で除する必要がある。

キャパシタ電圧を可変したときの平均光出力の変化を図9に示す。キャパシタ電圧が3 V以上の領域では、電圧にほぼ比例した光出力が得られることが確認できた。これにより、製品の出荷検査工程でLDの発光効率のばらつきを補正して、レーザクラス1の制限内で最大の光出力が得られるように個体ごとに最適な調整が可能となる。

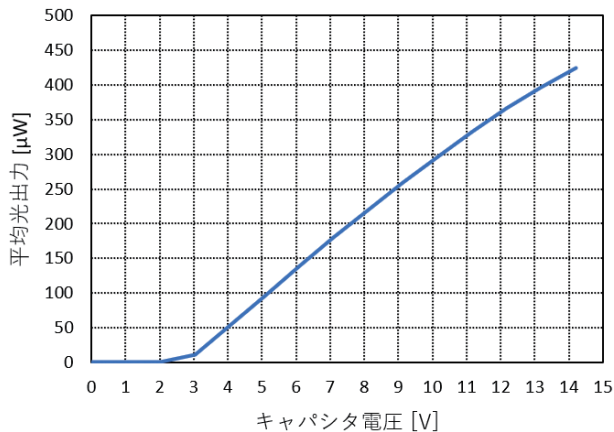


図9 キャパシタ電圧を可変したときの平均光出力

以上の測定結果を整理すると表2の通りとなる。短パルスでのレーザ駆動と、光出力の可変制御が両立できることを確認し、レーザクラス1の制限内で最大のパワーを出力するためのLD駆動回路が実現できた。

表2 LD発光特性の目標値と実測結果

LD 発光特性	目標	実測結果
半値全幅	2.0 ~ 3.0 ns	2.7 ns
ピーク光出力	500 mW 以上	535 mW
平均光出力 (※1)	390 μW 未満	358 μW
単一パルスエネルギー (※1)	200 nJ 未満	1.4 nJ

※1：レーザクラス1の上限値より設定

4.2 APD 増倍率の温度特性評価

3章2の手順の通り、暗電流・降伏電圧法によって、測定した暗電流から V_{BR} を算出し、設計値である増倍率50となる逆バイアス電圧を推定する。加えて、ヒータを用いて段階的に温度を変化させながら取得した V_{BR} と、温度の一次式の傾きである温度係数 γ を用いて逆バイアス電圧の温度補正を行った。環境温度 -20°C ~ 70°C における目標増倍率50での温度特性を 5°C 毎に評価した。図10に補正あり、補正なしそれぞれの場合における増倍率変化を示す。

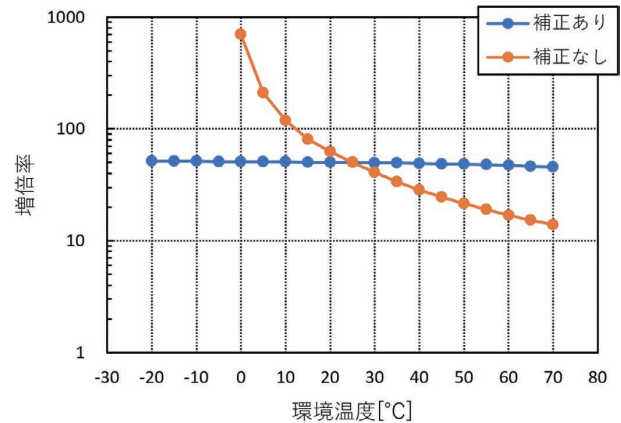


図10 補正有無での増倍率変化

補正なしの場合、増倍率は14~700の範囲で大きく変動したが、補正ありでの増倍率は目標値50を中心として45.6~51.8に収まり、変動率は -9.0% ~ 3.2% に抑制された。これにより、従来1倍の感度に対し約50倍の高い受光感度を維持しつつ、安定駆動が可能であることを確認した。

4.3 検出角度範囲の評価

短パルスLD駆動回路およびAPDの個体ばらつきを補正する受光回路を搭載し、目標感度比100倍で開発したTOFレーザセンサを用いて検出角度範囲を評価した。拡散反射特性を有する白紙および黒紙に対しては、検出距離6 m、センサ応答速度200 msの条件で測定を行った。表3に示すとおり、白紙・黒紙いずれにおいても、測定系として制御可能な最大角度である $\pm 85^{\circ}$ において検出が可能であることが確認された。

表3 白紙および黒紙の検出角度範囲の比較

比較項目	検出角度範囲
白紙	$\pm 85^{\circ}$
黒紙	$\pm 85^{\circ}$

次に、安定検出が困難とされる黒色塗装が施された自動車ボデー（図11）および黒色のABS樹脂（図12）に対しては、検出距離3.5 m、センサ応答速度200 msで測定を行い、その結果を表4に示す。参考として、A社製センサの評価結果も併記した。A社製センサでは、黒色ボデーに対し相対角度が $\pm 6^{\circ}$ を超えるとセンサ出力信号がONからOFFへ変化し検出不可となった。一方、開発した自社センサでは、目標値である $\pm 50^{\circ}$ を上回り、A社製と比較して10倍以上となる $\pm 66^{\circ}$ まで傾けてもセンサ出力信号はON状態を維持し、安定して検出可能であることが確認された。



図 11 黒色塗装の自動車ボデー



図 12 黒色の ABS 樹脂

表 4 ボデーおよび ABS 樹脂の検出角度範囲の比較

比較項目	自社センサ	A 社製センサ
黒色ボデー	$\pm 66^\circ$	$\pm 6^\circ$
黒色 ABS 樹脂	$\pm 75^\circ$	$\pm 16^\circ$

以上より、短パルス LD 駆動回路、APD 個体ばらつき受光回路で S/N を向上させることによって、対象物の色や表面状態に関わらず安定検出が可能であることを確認した。

5. むすび

高度な自動生産の実現に向けて、ロボットや設備の動線および稼働範囲を妨げることなく、長距離から色や表面状態の影響を受けず、広い角度範囲で安定した検出が可能な TOF レーザセンサを開発した。短パルス LD 駆動回路、APD 個体ばらつき補正受光回路によって高い S/N 比を実現することで黒色塗装が施された自動車ボデーでも $\pm 66^\circ$ の角度から検出が可能であることを確認した。

本技術を搭載した TOF レーザセンサ E3AS-HF シリーズ (図 13) を 2025 年 3 月に商品リリースした。



図 13 TOF レーザセンサ E3AS-HF

今後もさらなる感度の向上や小型化を実現する技術に取り組み、お客様がより使いやすく生産効率を最大化できるセンサを開発していきたい。

参考文献

- 1) 浜松ホトニクス. データシート/Si APD S14644 シリーズ. (2021). Accessed: May. 27, 2025. [Online]. Available: https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s14644_series_kapd1067j.pdf
- 2) 浜松ホトニクス. データシート/SPAD (Single Photon Avalanche Diode) S16835 シリーズ. (2024). Accessed: May. 27, 2025. [Online]. Available: https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s16835_series_kapd1087j.pdf
- 3) Efficient Power Conversion (EPC). AN032 ナノ秒の大電流共振パルス・ドライバの設計, レーザー・ダイオード, Lidar などのアプリケーション向け. (2024). Accessed: May. 27, 2025. [Online]. Available: <https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/application-notes/AN032%20Design%20of%20High%20Current%20Nanosecond%20Resonant%20Pulse%20Drivers-jp.pdf>
- 4) K. Tsujino et al., "Experimental Determination of the Gain Distribution of an Avalanche Photodiode at Low Gains," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 30, no. 1, pp. 24–26, 2009.
- 5) 浜松ホトニクス. 技術資料/Si APD. (2025). Accessed: May. 27, 2025. [Online]. Available: https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/si-apd_kapd9007j.pdf
- 6) 日本産業規格, JIS C 5954-8:2025, 2025.

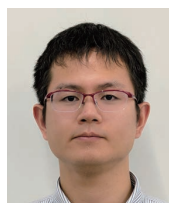
執筆者紹介



都築 良介 TSUZUKI Ryosuke

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: 電気・電子工学



安藤 信太郎 ANDO 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 センサ事業部 第1開発部
専門: 電気・電子工学

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。

UHF 帯 RFID 受信波形を活用した移動する荷物の順序識別方法

菅野 真行, 喬 楚天, 長岡 真吾, 齋藤 啓介

今日の工場内物流は、多品種少量生産や商品の複雑化のため部品管理の重要性が増す一方、労働力不足という社会課題に直面している。これに対応するため、省人化を目指した作業の自動化が進められており、現場では資材や部品の管理システム機能の高度化が求められている。これらの要求に応えるため、特に UHF 帯 RFID は、アンテナから数 m から十数 m 先に離れて存在する複数の RF タグからの返信を一括して個別に読み取ることができるというメリットを持ち、トレーサビリティ確保の有効な手段として期待されている。一方で、現状の UHF 帯 RFID の機能では荷物の存在を認識することはできるが、荷物が並ぶ順序を把握するといった機能は不十分である。

本論文では、汎用の UHF 帯 RFID システムで取得した RF タグの返信の時間波形とその波形の特徴を解析し、高精度に RF タグが貼られた荷物が並ぶ順序を識別する技術を提案する。実機評価にて、コンベア上を数百 mm の間隔で順序良く流れてくる荷物の順番を把握するといった課題について、実用化に向けた有望な結果が得られた。今後、他のアプリケーションへの応用も期待される。

Method for Identifying the Order of Moving Packages Using UHF RFID Reception Waveforms

SUGANO Masayuki, QIAO Chutian, NAGAOKA Shingo and SAITO Keisuke

Today, in-factory logistics faces the social challenge of labor shortages while the importance of parts management increases. To address this, automation aimed at reducing human labor is being implemented, and there is a demand for advanced material and parts management system functions on-site. To meet these requirements, UHF RFID is particularly expected to be an effective means of ensuring traceability, with the advantage of being able to read responses from multiple RF tags located several to dozens of meters away from the antenna individually and simultaneously. However, current UHF RFID functions can only recognize the presence of packages. The order of RF tags is difficult to determine.

This paper proposes a technique for high-precision RF tag identification by analyzing the time waveform of RF tag responses obtained with a general-purpose UHF RFID system and its waveform characteristics. Practical evaluation has yielded promising results for practical application in tasks such as determining the order of packages flowing in sequence at intervals of several hundred millimeters on a conveyor. Future applications to other use cases are also anticipated.

1. まえがき

近年、製造業界においては、製品の複雑化や高機能化、消費者ニーズの多様化に対応するため、多品種少量生産の導入が加速している。これに伴い、膨大な種類と数量の部品を管理する必要性が高まっている。また、少子高齢化による労働力不足という社会的課題も重なり、資材や部品の

管理に関する人員の確保が困難になっている。このような状況下で、工場内物流、すなわち構内物流においては、省人化を目指し、コンベア上を流れる部品や資材の仕分け、倉庫内の在庫管理、倉庫の運搬口での入出庫管理といった業務の自動化が模索されている。とりわけ、資材や部品の管理システム機能の高度化が求められている。

これらの要求に応えるためには、設置型センサによる検知や、センサ搭載ロボットによる探索などで、正確に部品

Contact : SUGANO Masayuki Masayuki.Sugano@omron.com

や資材が並ぶ順序を把握する機能の向上が有効である。これによって、後工程で機械による仕分け作業ができ、棚上の該当する資材や部品が入る箱を特定することで棚卸やピッキングの際の探索時間を減らすことができる。また、ゲートを通過する資材や部品の通過方向がわかれば自動で入出庫の判断が可能になる。

これに対して現状では、工場内でのトレーサビリティを確保する手段として、コードリーダーや RFID (Radio Frequency Identification: 無線周波数識別) といった個体識別システムが利用されている。なかでも、導入コストが低く、コードも作成しやすいため、一般的にはコードリーダーが広く普及しているが、コンベア上を流れる荷物情報を読み取るようなケースでは、光学的にコードを読むことが必要なコードリーダーは様々な方向から荷物に向けて設置するため、リーダーの数が増える、設置時の調整に時間がかかるといった課題が存在する。

一方で、RFID は LF (長波) 帯、HF (短波) 帯、UHF (極超短波) 帯といった周波数帯が存在し、リーダーライト (R/W) とそれに接続されるアンテナで構成されている。しかも、RF タグも必要でコードリーダーと比べ導入コストがかかる。しかしながら、UHF 帯 RFID は、コードリーダーや LF 帯、HF 帯といった他のシステムと比べても、アンテナから数 m から十数 m 先に離れて存在する複数の RF タグからの返信を一括して読み取ることができるため、少ないアンテナの数で設置時の調整もしやすくなり、トレーサビリティ確保の有効な手段として期待されている。だが、現状の UHF 帯 RFID の機能では、検出範囲内で荷物の存在を把握することはできるが、正確に部品や資材の並ぶ順序を把握することは難しい。したがって、我々は UHF 帯 RFID に接続されたアンテナで、荷物に貼られた RF タグからの返信を一定期間蓄え、得られた時間波形のデータから所望の検出範囲内で RF タグが貼られた荷物の並ぶ順序を把握できるアルゴリズムを考案した。これにより、コードリーダーでの課題であったアンテナの数や調整時間を低減しても、部品や資材の並ぶ順序を把握する機能を持たせることができ、コンベア上を流れる荷物情報を読み取るといった活用が可能となる。

本論文では、アルゴリズムの原理および適用した際の効果について報告する。本章に続く第 2 章では、前提となる想定ユースケースでの技術課題とその打ち手を説明する。第 3 章では本論文で提案する検出方式の原理と使用したアルゴリズムを紹介し、得られる効果についてシミュレーションにより妥当性検証した結果について述べる。第 4 章ではユースケースとしてコンベア上を流れる部品や資材の仕分けを想定した模擬環境を使用して移動する RF タグの時間波形データを実測し、アルゴリズムを適用したときの効果について述べる。最後に第 5 章ではあとがきとして今後の発展性と課題を示す。

2. 想定ユースケースでの技術課題とその打ち手

本論文では、構内物流および在庫管理の効率化を目指し、以下の UHF 帯 RFID 適用のユースケースとその技術課題を想定している。例えば、コンベア上を流れる荷物をコンベア横に設置したアンテナで把握し、正確に仕分けして誤配送を防いだり、ロボットに搭載したアンテナで棚上の荷物を把握し、ピッキングや棚卸しでの探索時間を短縮したり、ゲートに設置したアンテナで荷物の移動方向を把握し、入出庫の判断ができるといったユースケースが想定される。

これらのユースケースにおける課題は、荷物の存在を把握するだけでなく、検出したい範囲内に配列する荷物の順番を正確に把握することである。これはアンテナから見た RF タグの距離とアンテナ前方を通過する時間を把握するという技術課題に置き換えることができ、これができるれば、1 台のリーダーライトとアンテナで得られるデータから所望の範囲内を順次流れる荷物や、棚上に並んだ荷物の順番を把握することが可能となる。また、2 台のリーダーライトとアンテナを左右に並べ、それぞれから同一 RF タグの通過時間の差を得ることで、移動方向と移動速度を把握することも可能となる。このような技術課題を解決するため、UHF 帯 RFID では複数のアレイアンテナの測角情報から測位する方式¹⁾ や測角情報と組み合わせて測位することが可能な周波数掃引時の位相データを利用した測距方式²⁾ が提案されている。しかしながら、アレイアンテナはシステム規模が大きくコストがかかり、アンテナ寸法も大きくなるため実現性が低い。また、周波数掃引幅には国内電波法の制約があり、実現できる距離精度がおおよそ 1 m と低く、課題解決に至らない。したがって、ここでは 1 組のリーダーライトとアンテナという小規模なシステム構成で実現でき、距離と通過時間をより高い推定精度で実現可能な方法を考える必要がある。我々はこれまで示した課題に対し、1 組のリーダーライトとアンテナで RF タグからの返信を一定時間検出した時間波形の特徴から距離と通過時間を推定する方法を提案し、課題解決への可能性を見極める。

本論文では、特にコンベア上を順次流れる荷物の仕分けというユースケースを対象とし、これらの課題を解決するための技術調査を進めた内容を示す。これにより、構内物流管理の効率化と自動化に貢献することを目指している。

3. 提案方法と効果の妥当性検証

3.1 原理説明

UHF 帯 RFID は図 1³⁾ に示す構成で RF タグからの返信をアンテナで受信し、リーダーライト内で送信信号と掛け合わせ、これを I (同相成分) と Q (直交成分) のデータとして出力し、式(1)を使い θ (位相データ) を算出する。

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{Q}{I}\right) \quad (1)$$

式(1)から、この受信した位相データは送信信号を基準とした受信信号の変化を表すため、RF タグとアンテナ間の距離に比例して変化する。

次に提案方法はこの位相データの時間波形の特徴から RF タグがアンテナ前方を通過する際の距離や時間を推定するものである。図 2 に示すように RF タグはデータ検出開始位置を X_0 として、一定速度 V でアンテナ前方を横切るように移動している。RF タグが移動するときにはアンテナに接近するまで位相は減少し、アンテナ前方を通過した後、増加に転じる。なお、 X_{tag} 、 Y_{tag} は RF タグの位置座標を示し、 X_{ant} 、 Y_{ant} はアンテナの位置座標を示す。さらにここから、RF タグの移動を検知する位相データは、次の式(2)で表すことができる。ここで、 λ は使用周波数における波長を表す。

$$Phase = 2\sqrt{(X_{tag} - X_{ant})^2 + (Y_{tag} - Y_{ant})^2} \times 360 / \lambda \quad (2)$$

なお、この一連のながれは、式(3)(4)の条件を満たす。

ここで、 t_{smp} はデータサンプリング周期、 n はサンプリング数を示す。

$$X_0 < x_{tag} < X_0 + n \times t_{smp} \times V \quad (3)$$

$$x_{ant}, y_{ant}, y_{tag} \text{ は一定} \quad (4)$$

以上から、時間波形は谷型の波形を形成し、最短距離 ($t' = (n_{max} + 1) / 2 \times t_{smp}$ 、 n_{max} は一定時間の計測で取得する最大のデータサンプル数) のときに位相が最小点となる。

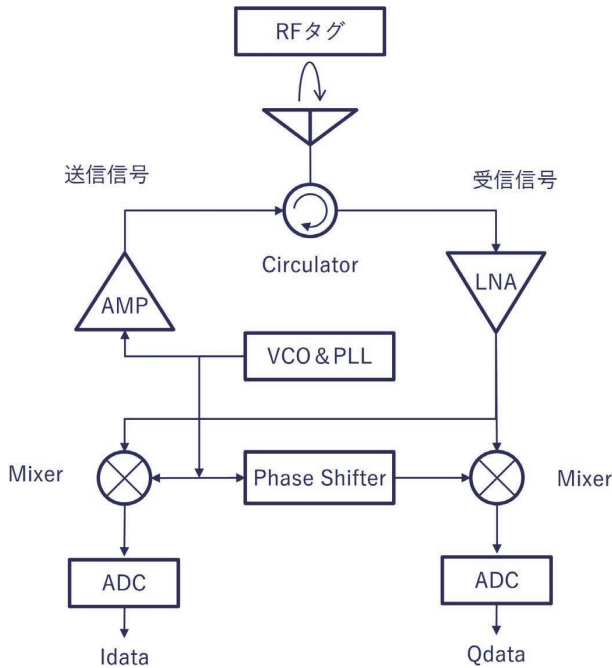


図1 リーダライタのブロック図

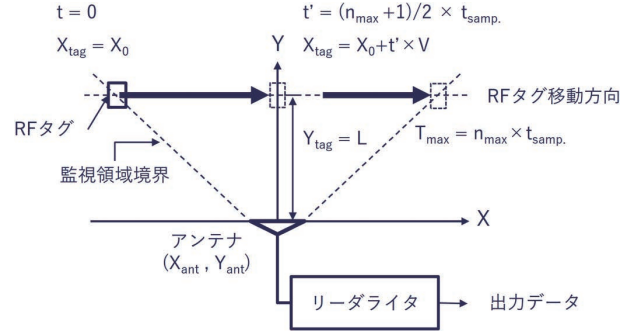


図2 RF タグの移動条件

表1 位相データの算出条件

パラメータ	値
周波数： f	0.91675 GHz
波長： λ	0.327 m
RF タグ移動速度： V	0.1 m/秒
アンテナ位置： (X_{ant}, Y_{ant})	$X_{ant} : 0 \text{ m}, Y_{ant} : 0 \text{ m}$
RF タグ移動開始位置： $(X_0, Y_{tag} = L)$	$X_0 : -1.2, -1.0, -0.8 \text{ m}$ $L : 1.0, 2.0, 3.0 \text{ m}$

図3 は、表1 に示す計算条件に基づき、式(2)、式(3)、式(4)を使用して算出した理論的な位相データの時間波形であり、図3の (a) (b) の違いは、 L を一つ代表例で固定し X_0 を変化させたとき、 X_0 を一つ代表例で固定し L を変化させたときそれぞれの特性の変化を示している。

具体的に図3 (a) は、3つのRFタグの X_0 を20 cm 間隔でずらし、移動させたときに得られる位相データの時間波形を示している。各RFタグの計測開始地点は $X_0 : -0.8, -1.0, -1.2 \text{ m}$ としている。このとき、 $L : 1.0 \text{ m}$ で固定とし、条件に示した移動速度 (0.1 m/s) を想定すると位相最小点をとる通過時間 t' は8, 10, 12 秒となる。

また、図3 (b) は最短距離 L を1.0 m から3.0 m まで1.0 m ずつ変えた際の時間波形の変化を示している。このとき $X_0 : -1.0 \text{ m}$ とし、通過時間 t' は10 秒となる。

各時間波形が作る谷形状の開き角は L が大きくなるにつれ広がる傾向がある。これらの結果から、RF タグがアンテナ前方を通過する時間や最短距離により時間波形は判別可能な特徴を持つことがわかる。我々は、このように一定速度で移動するRF タグがアンテナ前面を通過する際に検出される時間波形の形状を解析し、最短距離 L と通過時間 t' を推定する方法を提案する。

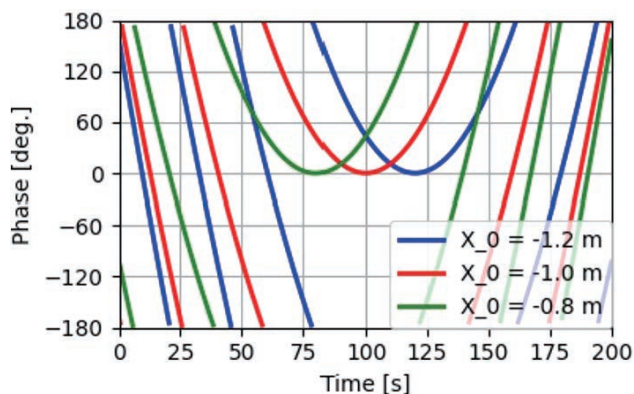
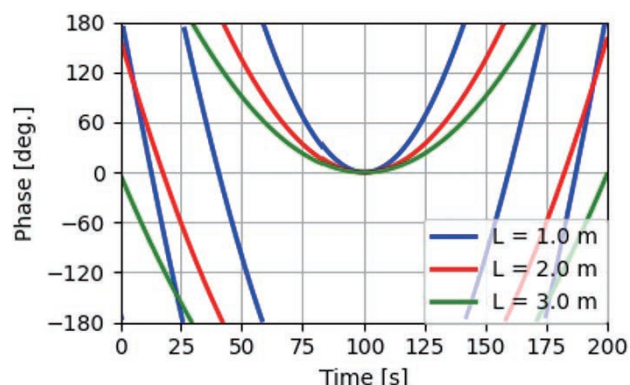
(a) X 軸方向に間隔を持つ RF タグ ($L=1.0$ m)(b) Y 軸方向に距離差を持つ RF タグ ($X_0 = -1.0$ m)

図3 位相データの時間波形の理論値

3.2 提案する推定方法

提案する RF タグとアンテナの最短距離と通過時間の推定方法は、前節で示した表1のパラメータ条件で算出した時間波形をリファレンス波形とし、受信した位相データの時間波形と相関をとり、高い相関を示すときの通過時間や最短距離を推定値として示す方法である。図4に示すフローに従い処理を行う。ここでは例として表1に示す条件で RF タグ移動開始時間を $X_0: -1.0$ m、 $L: 1.0$ m といったときの処理結果を例としてフローの内容を説明する。

移動する RF タグの返信を、検出開始から任意の点数以上となるまで連続して受信し、一定時間で取得した位相データをメモリに保存する (図4中1、2)。次に、最短距離と通過時間、既知の RF タグ移動速度と受信期間に基づいて図3に示した時間波形をリファレンス波形として算出する (図4中3)。この際、RF タグはもっとも単純なユースケースとして、アンテナからの電波放射方向と垂直方向に一定速度で移動するという条件で作成する。なお、リファレンス波形は事前に算出し、データベースを構築しておき、データ取得後に読みだして使用する形でも構わない。

図5は通過時間を掃引したリファレンス波形と受信した

波形の相関値が実際の RF タグの通過時間で最大となることを示している。図5 (a) (b) (c) は、受信した時間波形とリファレンス波形を並べた図を示しており、通過時間を掃引しながら双方の波形の相関値⁴⁾を式(5)で算出し (図4中4)、得られた通過時間と相関値の関係を図5 (d) に示す。

図中の相関値が最大となる通過時間が実際の RF タグの通過時間となる。結果から図5 (b) に示す通過時間10秒のときの波形が最も受信データと相関が高い時間となることが確認できる。

$$\text{Correlation Value} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

同様の処理を距離方向に掃引しながら行い、各距離で最大となる相関値を得る。そしてこの結果を距離毎に並べたグラフを図6に示す。最後に、相関値が最大となる距離と時間を抽出し (図4中5、6)、この値を RF タグとアンテナ間の最短距離と通過時間の推定値とする (図4中7)。ここまで示したフローにより、時間波形から RF タグとアンテナの最短距離と通過時間を推定することができる。

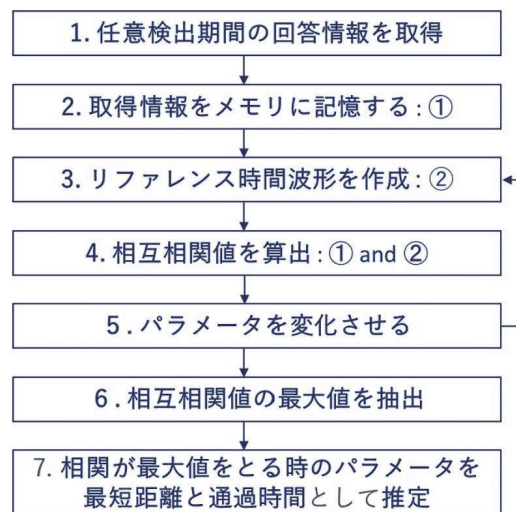


図4 提案方式の処理フロー

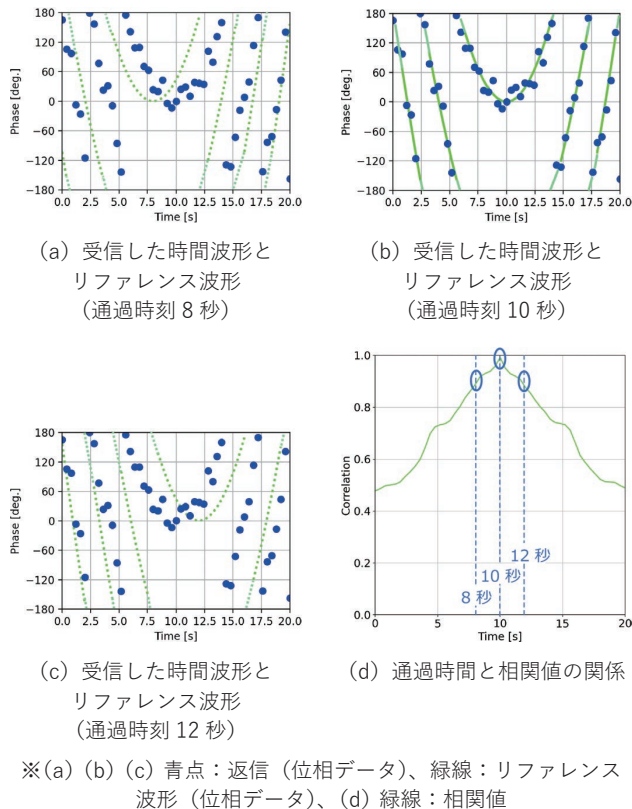


図5 提案方式による推定結果

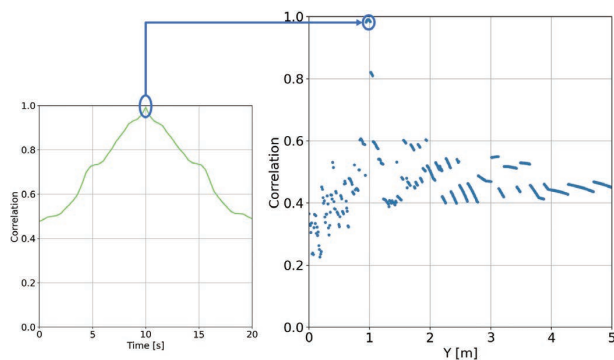


図6 リファレンス波形の距離掃引時の相互相関値変化

一方、ここまで利用していた位相データは図3、図5に示すように位相が ± 180 度となる地点で位相が反転しデータが不連続となる現象 (以下、折り返し) が生じる。これは図6の右図に示す距離方向 (Y [m] で表示) の相関値に現れる不連続の要因となり、極端な相関の低下が見られる。この不連続をなくすため、原理的に折り返しが発生しない式(6)で算出される実部 (Real) データもしくは虚部 (Image) データの時間波形を利用することにした。

$$\text{Real} = \cos(\text{Phase}), \text{Imag} = \sin(\text{Phase}) \quad (6)$$

図7、図8は位相データを実部データに変更した時の計算結果であり、図7 (a) (b) (c) に示すように実部データ

は折り返しが生じず、図8右図のように距離方向の相関値にも不連続が生じていない。よって推定精度低下のリスクが下がることが期待される。また、虚部データを使用した際も同様の効果が期待される。一方、位相アンラップ (制限された位相の範囲 (通常0から360度、または0から 2π) から、元の位相を復元する処理)⁵⁾ により、位相データを折り返しのない連続データに置き換える方法もある。しかしながら、この方法は位相に誤差がある場合にアンラップの判断を間違えやすいデメリットがあり、この問題解決のために追加処理が必要となり複雑である。そのため、本方式では比較的処理がシンプルな実部データもしくは虚部データを利用する方式を選択する。

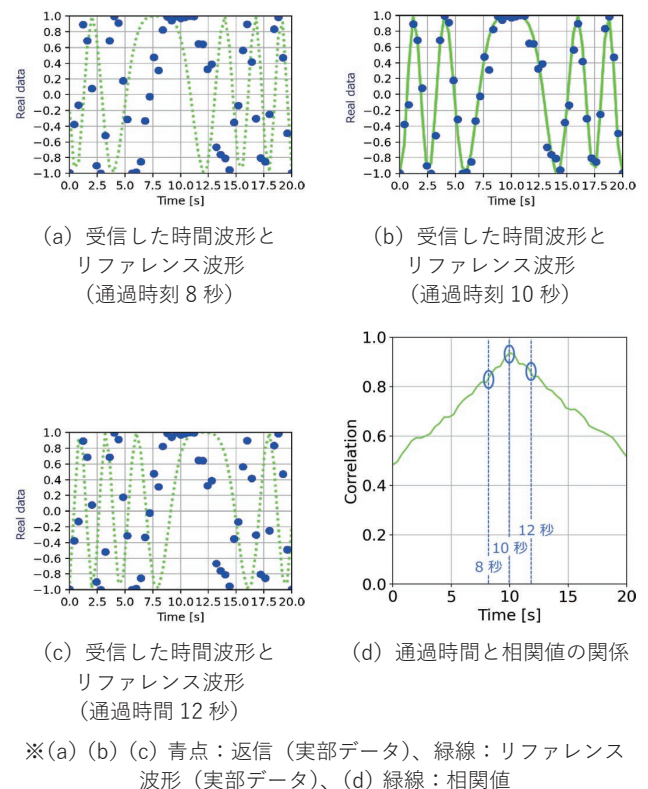


図7 提案方式による推定結果 (位相データを実部データに変更)

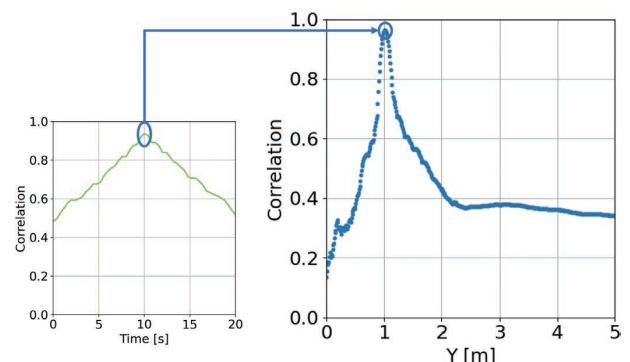


図8 リファレンス波形の距離掃引時の相互相関値変化

3.3 推定精度の比較

ここで、表2に示す条件で受信された位相データおよび実部データから推定した結果を比較する。ここでは推定処理の効果比較が目的のため、式(7)のように位相誤差 (Phase Error、標準偏差：5、10、15 度のランダムな誤差) を加算した位相データ、およびこの位相データを実部データに変換したデータを使用する。3種類の誤差を用いたデータの比較を行った結果として、最短距離 L 1 m での通過時間と最短距離の推定精度を表3、表4に示す。また、推定結果をグラフ化し図9、図10に示す。同一条件で100回の推定を試行したときの推定誤差の平均値と標準偏差を算出した。

$$Phase' = 2\sqrt{(X_{tag} - X_{ant})^2 + (Y_{tag} - Y_{ant})^2} \times 360 / \lambda + Phase Error \quad (7)$$

結果から誤差の平均値、標準偏差ともに位相データに比べて実部データを使用した方が精度向上する効果が得られ、実部データを利用することの有効性が示された。一方で、位相誤差が15度以上では実部データ使用時でも推定誤差が数m、数秒と大きくなる場合も見受けられる。これは正となる通過時間と最短距離での相関値が低下し、他に高い相関値となるポイントを推定値として拾っていることが要因と考えられる。実環境で位相誤差が大きくなる場合にはアンテナ位置調整で位相誤差を低減する、複数のアンテナでの検出や距離の観測範囲を設ける等の精度向上策を講じる必要がある。

表2 計算条件

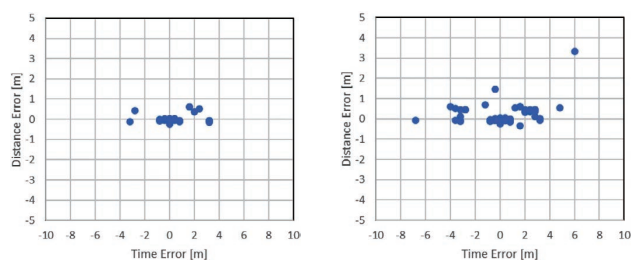
パラメータ	値
周波数： f	0.91675 GHz
波長： λ	0.327 m
RF タグ移動速度： V	0.1 m/秒
サンプリング時間： $t_{smp.}$	0.4 秒
最大サンプル点数： n_{max}	51
アンテナ位置： (X_{ant}, Y_{ant})	$X_{ant} : 0$ m, $Y_{ant} : 0$ m
RF タグ移動開始位置： $(X_0, Y_{tag} = L)$	(-1.0 m, 1.0 m)
位相誤差	標準偏差 5、10、15 度

表3 位相データ使用時の推定精度

位相誤差 (度)	推定精度			
	時間精度 (秒)		距離精度 (m)	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
5	-0.01	0.11	-0.02	0.02
10	0.16	0.89	-0.02	0.13
15	0.03	1.80	0.09	0.42

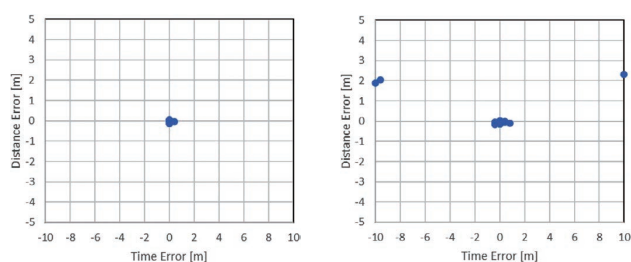
表4 実部データ使用時の推定精度

位相誤差 (度)	推定精度			
	時間精度 (秒)		距離精度 (m)	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
5	0.00	0.00	-0.02	0.02
10	0.00	0.04	-0.05	0.03
15	-0.08	1.71	-0.01	0.37



(a) 位相誤差 10 度 (b) 位相誤差 15 度

図9 位相データ使用時の推定結果



(a) 位相誤差 10 度 (b) 位相誤差 15 度

図10 実部データ使用時の推定結果

4. 提案方法の効果検証

4.1 模擬環境評価

第3章で確定した方法の有効性を評価するため、図11に示すようなコンベア上を順次流れる荷物の仕分けというユースケースに基づき、図12に示すように、固定アンテナの前をRFタグが横切る形で、模擬環境を構築した。監視対象は、側面にRFタグを貼り付けた段ボール箱とし、これをコンベア上に配置し、一定速度で移動させた。使用したアンテナおよびコンベアの動作条件を含む評価条件は、表5に示す通りである。

4.2 評価結果

① 提案方法の効果確認

RFタグのアンテナ性能に影響のない空の段ボール箱にRFタグを貼り付けて実機評価し、提案方法の実現性を確認した。図12(a)には使用するRFタグ付き段ボールの条

件を示し、図 12 (b)、図 12 (c) に示すアンテナと段ボールの位置関係にて距離 L を 1 m および 3 m にした際の検出結果を表 6 に示す。実部データを利用した実測結果は第 3 章で得られた精度と一致しており、効果を確認できた。

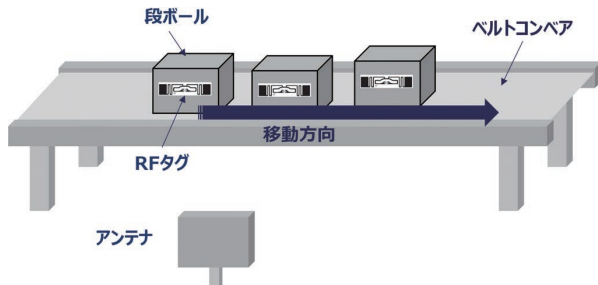
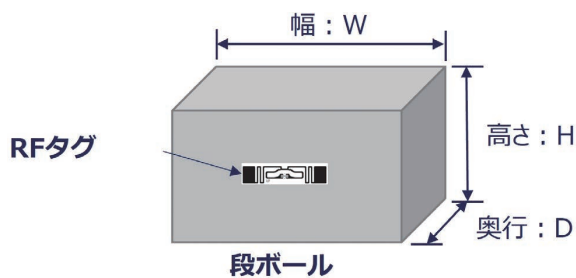
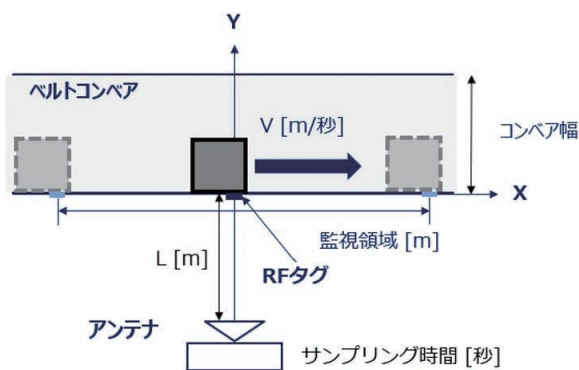


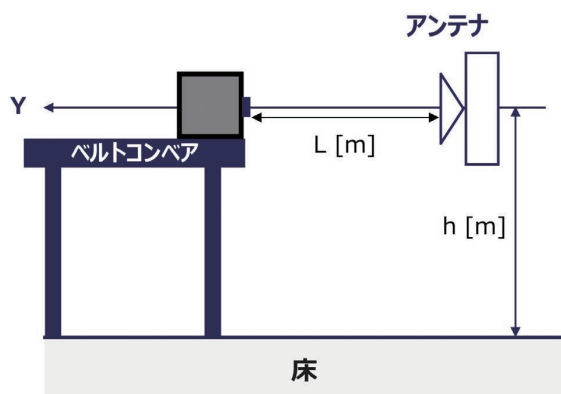
図 11 コンベア上を順次流れる荷物監視のイメージ



(a) 段ボールの条件



(b) 上面図



(c) 側面図

図 12 模擬環境イメージ

表 5 模擬環境のパラメータ

パラメータ	値
周波数: f	0.91675 GHz
波長: λ	0.327 m
RF タグ移動速度: V	0.1 m/秒
サンプリング時間: $t_{\text{samp.}}$	0.4 秒
最大サンプル点数: n_{max}	51
アンテナ位置: $(X_{\text{ant}}, Y_{\text{ant}})$	(0, 0)
RF タグ移動開始位置: $(X_0, Y_{\text{tag}} = L)$	(-1.0 m, 1.0 m) (-1.0 m, 3.0 m)
設置高: H	0.75 m
段ボール箱サイズ	Box W: 390 mm Box H: 200 mm Box D: 290 mm
アンテナ偏波	右旋円偏波
RF タグ偏波	水平偏波

表 6 推定結果

設置距離	推定精度	
	距離精度	通過時間精度
1 m	0.01 m	0.00 秒
3 m	-0.04 m	0.00 秒

② 一般的な荷物を想定した際の推定

次に、一般的な荷物の条件として、表 7, 図 13 に示すように段ボール箱の内容物、位置、回転といった状態を模擬し計測を行った。なお、内容物は水が満たされたペットボトルや、金属の箱を想定しており、段ボール箱の中全体を埋めている。但し、内容物は段ボール箱に貼り付けられた RF タグから 1 cm 程度隙間を開けた状態で固定されている。

隣接する RF タグ間の間隔は図 11 に示すように隣り合って並び、表 5 に示す荷物 (段ボール箱) の 1 辺の寸法から 200~390 mm となる。

推定結果は表 8 に示すように、距離方向では 120 mm、時間方向では 2 秒 (200 mm 相当) の精度で推定でき、流れる箱の順番を把握するといった課題について有望な結果が得られた。特に表 7 の条件 C においては図 14 (a) に示すように荷物による遮蔽で途中までデータが無い状態であり、内容物からの反射による誤差が含まれ、推定困難と思われるケースでも図 14 (b) に示すように推定できる可能性が示された。

ただし、この評価条件と結果は一例であり、具体的なユースケースで考えられる条件に合わせ効果を確認するこ

とが必要である。また、これまでの測定は比較的広い実験室内で実施しており、壁などの反射物からは数mの距離をとった状態で実施しているため、マルチパスの影響は比較的緩和された環境である。したがって、今後は、より複雑な反射環境下での評価を進めることも求められる。

表 7 荷物の条件

荷物条件	内容物	向き	位置
条件 A	空	アンテナ対向	前面
条件 B	金属 (タグとの間隔有)	アンテナ対向	中央
条件 C	水 (タグとの間隔有)	進行方向向き	前面

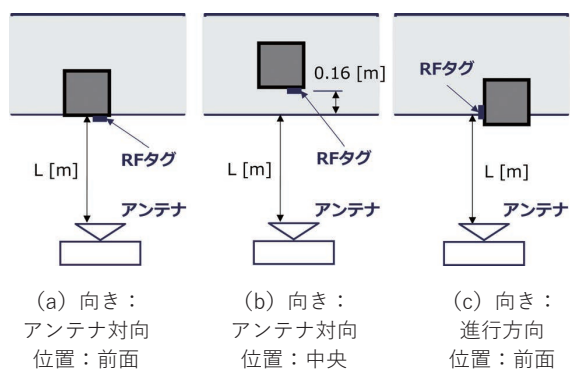
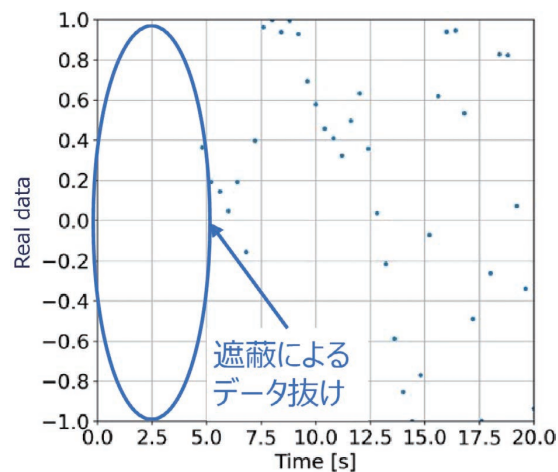


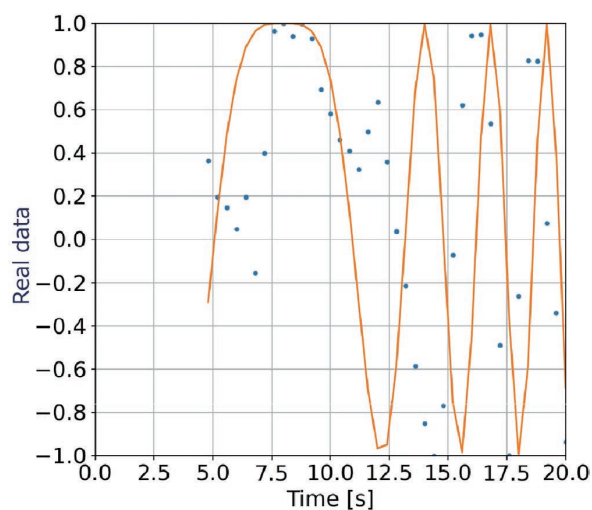
図 13 段ボールの向きと位置

表 8 推定結果

荷物条件	推定精度	
	距離精度	通過時間精度
条件 A	0.06 m	0 秒
条件 B	0.12 m	0 秒
条件 C	0.03 m	2 秒



(a) 受信データの時間波形



(b) 受信データの時間波形とリファレンス波形

図 14 条件 C の結果

5. あとがき

本論文では、汎用の UHF-RFID システムで取得した RF タグの返信の時間波形とその波形の特徴からアルゴリズムによって高精度に RF タグの並ぶ順序を識別する技術の構築を目指した。結果として、実機評価にてコンベア上を数百 mm の間隔で順序良く流れてくる荷物の順番を把握できることを確認し、課題解決に向けた可能性を示すことができた。

また、提案方法は他にも以下のアプリケーションへの展開が可能である。

- ・アンテナ自身を荷物の前方を横切るように移動させることにより、棚上に配列された荷物の順番を把握するアプリケーション。
- ・入出庫ゲートにアンテナを固定して計測することにより、ゲートを通過する荷物の移動方向を把握するアプリケーション。

したがって、この技術により高精度な荷物の並ぶ順序を認識できることで構内物流におけるプロセスの最適化が図られ、業務の効率化やコスト削減が実現できる可能性がある。

一方で、現状では理想に近い模擬環境での評価に留まっているため、実際の現場環境で生じるマルチパスのような課題については別途考慮が必要である。今後の課題としては、実際の物流現場での評価を進め、技術の実用化に向けたさらなる改良が求められる。特に、現場特有の環境要因に対応するための技術的な工夫や、システムの安定性を向上させるための研究が必要である。これにより、資材管理のさらなる効率化と精度向上を目指すことができると考えられる。

参考文献

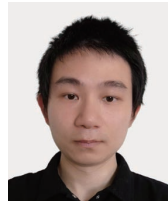
- 1) S. Azzouzi et al., "New measurement results for the localization of UHF RFID transponders using an Angle of Arrival (AoA) approach," in *2011 IEEE Int. Conf. RFID*, 2011, pp. 91-97.
- 2) R. Miesen et al., "Phase based multi carrier ranging for UHF RFID," in *2012 IEEE Int. Conf. Wireless Inf. Technol. Syst. (ICWITS)*, 2012, pp. 1-4.
- 3) 荒井雅行, "RFID リーダーの技術と課題," 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン, vol. 2008, no. 7, pp. 44-50, 2008.
- 4) 辻義之 他, "相関とスペクトル解析," *J. Plasma Fusion Res.*, vol. 85, no. 9, pp. 620-630, 2009.
- 5) 奥山哲, "ブランチカット法で生じた SAR 干渉画像中のアンラップエラーの修正," *測地学会誌*, vol. 56, no. 4, pp. 149-153, 2010.

執筆者紹介



菅野 真行 SUGANO Masayuki

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・電子工学
技術士（電気電子部門）



喬 楚天 QIAO Chutian

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・電子工学



長岡 真吾 NAGAOKA Shingo

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・電子工学



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
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

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。

構造一体化方式による小型光学トルクセンサ提案

川越 清政

人と協調するロボットアームの回転関節は、接触した人や物に損傷を与えない動作を実現するため、関節に加わる力をトルクセンサで計測し力制御を適用する。回転関節の力計測には市販の歪みゲージ式トルクセンサを直列に締結する積み上げ方式が最もシンプルな実現方法であるが、トルクセンサ本体及び締結部の体積・質量増加を招く。これを避けるため歪みゲージ式トルクセンサを回転関節と一体化して小型化する場合、センサ単体のみで1台あたり数十万円／軸のコスト増を招く。

本稿では、計測原理がシンプルであり数万円前後で構成できる光学式トルクセンサに着目し、回転関節と一体化した小型トルクセンサを提案する。これは出力軸側の磁気式マグネットエンコーダのマグネット保持板を遮蔽板として利用し、フォトインタラプタ・調整機構を同心円状に配置する構造一体化方式とする。提案手法により、光学式トルクセンサの積み上げ方式に対して軸方向寸法を52%削減し、関節ユニットで0.05 kg軽量化した。さらに6軸アームの机上計算では可搬質量が0.15 kg増加し、同姿勢における協働ロボットの可搬2 kgに対して約7.5%の可搬増に相当することを示した。

Proposal for a Compact Optical Torque Sensor Using a Structural Integration Method

KAWAGOE Kiyomasa

The rotational joints of collaborative robot arms require force control to prevent damage to people or objects they come into contact with. This is achieved by measuring the forces applied to the joints using torque sensors. The simplest method for force measurement in these joints is a stacked configuration using commercially available strain gauge torque sensors connected in series. However, this approach increases the volume and mass of both the torque sensors themselves and their mounting structures. To avoid this, integrating strain-gauge torque sensors into the rotary joint for miniaturization incurs an additional cost of several hundred thousand yen per unit, solely for the sensors.

This paper focuses on optical torque sensors, which feature a simple measurement principle and can be configured for around tens of thousands of yen. It proposes a compact torque sensor integrated with the rotary joint. This employs a structural integration method in which the magnet-retaining plate of the magnetic encoder on the output shaft side serves as a shielding plate, with the photointerrupter and adjustment mechanism arranged concentrically. This reduces the axial dimension by 52% compared to the stacked-optical-torque-sensor method. This contributes to a weight reduction of 0.05 kg for the joint unit incorporating the torque sensor. Furthermore, in a desktop calculation for a 6-axis arm using this joint unit, an increase in payload capacity of 0.15 kg was evaluated. This represents a 7.5% increase in payload capacity compared to collaborative robots with similar output and posture capabilities, demonstrating the effectiveness of this approach.

1. まえがき

人と協調するロボットアームでは、人や物との安全な接触動作を実現するため、ロボットの関節や手先に加わる力を計測し利用する力制御が用いられる。これに必要な回転

関節の力計測には、高精度な測定が可能である歪みゲージ式トルクセンサを各関節に組み込む方法（以下、従来手法）が一般的である。市販のトルクセンサを回転関節に用いる場合、関節出力軸に直列に締結すると、トルクセンサ

部の体積・質量が増加する。この増加をさけるため、トルクセンサと回転関節を一体化させる方針が考えられる。しかし歪みゲージと回転機構の一体化には、専用起歪体の設計・製造技術が必要となり、各関節に搭載することと相まってコストアップ要因となる。

本稿では、回転関節と一体化させた場合に、歪みゲージ式よりも廉価に実装可能な光学式トルクセンサに着目した。光学式トルクセンサは歪みゲージ式と比較し、構成部品を積み上げる必要性があるため、小型化に課題があった。

これに対して、回転関節の構造部材の一部を光学式トルクセンサの遮蔽板として一体化する方式（以下、構造一体化方式）を提案する。積み上げ方式との比較により体積・質量の削減効果を示すとともに、机上計算におけるトルクセンサ内蔵関節ユニットによる6軸アーム可搬質量変化を評価する。

2. 従来構成と課題

2.1 従来構成

従来手法の歪みゲージ式トルクセンサは高精度である一方、高コストかつ破損しやすいという課題¹⁾が指摘されている。これに対して、低コストにトルクセンサを構成する方法として、光学式トルクセンサ^{2,3)}が提案されている。光学式トルクセンサは、ひずみゲージ式トルクセンサに比べ精度で劣るものの、トルクセンサを内蔵した回転関節単位で数%～10%程度の直進性誤差^{2,6)}を許容できる場合には選択肢となりうる。

先行研究^{2,3)}では、光学式トルクセンサの安価な構成要素と計測原理が述べられている。光学式は出力軸負荷を反映する起歪体の変形を、起歪体に接続された遮蔽板の移動量として検知する。遮蔽板の移動量は、特定の範囲内に物体があることを検知し、微小な変形量をアナログ値で検知可能なアナログ式フォトインタラプタによって計測を行う⁴⁾。

光学式トルクセンサの概要構造を図1に示す。

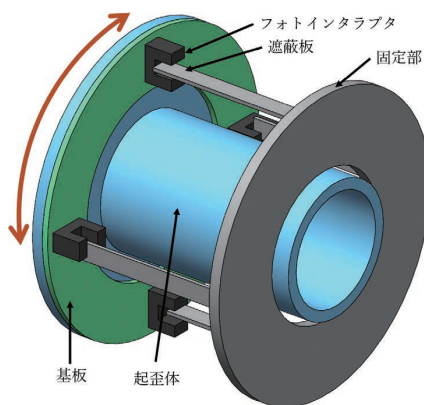


図1 光学式トルクセンサの概要構造

2.2 従来手法の課題

従来手法におけるロボットアームへのトルクセンサ追加は、アーム全体の体積及び質量増加となる。これは可搬質量の低減や、可搬質量を維持するためのリーチ短縮など、性能低下が発生する。従ってトルクセンサは、性能要求範囲内で小型軽量であることが望ましい。

トルクセンサと回転関節の接続方式として、①市販品の歪みゲージ式トルクセンサを直列接続する構成、②回転関節構造を歪みゲージとして一体化する構成、③回転関節の構造材を光学式トルクセンサ構造材として一体化する構成が考えられる。

これらの方式にはそれぞれ以下の課題がある。

- ① 市販トルクセンサ本体と接続構造分の体積・質量が増加し、軸方向高さが増加する。
- ② 異なる関節仕様毎に、歪みゲージ部の専用設計が必要となり、コスト高を招く。
- ③ 専用設計コスト、センサ製造コストはいずれも②より下がるが軸方向に部品を積み上げていく必要があり、②と比較し小型化に難がある。

実際のロボットアームの開発時には可搬質量や可動範囲などの要求を含めた最適設計が可能な② or ③が求められる。

①②③の結合方式ごとの軸方向高さについての概要を図2に示す。

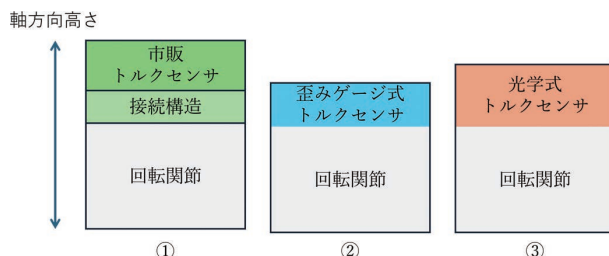


図2 市販トルクセンサ結合方式と一体化方式の軸方向高さ

2.3 光学式トルクセンサの課題

コスト削減を狙い歪みゲージ式から光学式トルクセンサを採用する際の課題として、センサ自体の大きさと検出精度のトレードオフがある。原理的に光学式トルクセンサの精度向上には、起歪体の弾性変形に対する遮蔽板の移動量を十分確保することが求められる。これは「起歪体を薄くする」「歪みの検出点（フォトインタラプタ）を径方向に対して外側に配置する」「起歪体を軸方向に長くすること」で達成されるが、後者2つは大型化に直結する。

一方でロボットに内蔵する場合、他の構成部品と比べてトルクセンサだけを大きくすると、可搬質量や可動領域が低下する。よって実際の設計時には、下記の要求を同時に

満たす必要が出てくる。

- A) 起歪体薄さ：要求される最大トルク発生時にも最低限永久歪みが発生しない肉厚以上であること。起歪体変形量は精度に寄与するため、寿命と併せて考慮しても、必要以上の厚みは避ける。
- B) 径方向：起歪体の歪み検出点は、出力側に配置するベアリングなどの構成部品直径内に収めることで、センサ性能以外に寄与しない構造部を減らす。
- C) 軸方向：精度要求範囲内で起歪体の軸長を短くする。ただし、先行研究では歪み検出部に、遮蔽板・フォトインタラプタ・位置調整機構を軸方向に並べて配置することが求められる。よって部品・機構の合計高さより、起歪体を短くすることが出来ない。

A は定格寿命と精度のトレードオフにより調整可能であり、B は構成部品の質量と精度のトレードオフにより調整可能である。一方、C については軽量化と精度の調整を図ろうとしても、起歪体高さを部品高さより短くできないという課題が残る。

3. 構造一体化方式による小型化の提案

3.1 構造一体化方式の構造

前章 2.3 C) において、部品及び調整機構を積み上げた構造を図 3 に示す。なお調整機構はフォトインタラプタの線形特性が良い検出範囲内に遮蔽板位置を調整する為の機構である。先行研究では、遮蔽板位置をねじで調整する機構である。

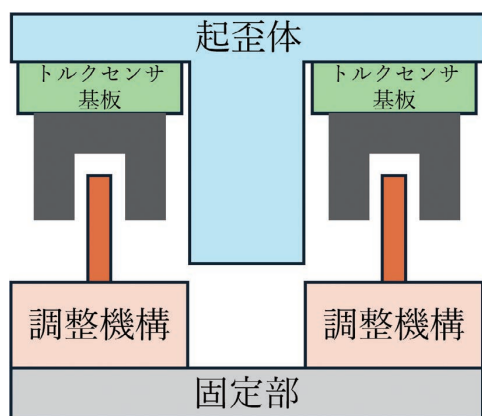


図 3 従来方式構造

従来の積み上げ構造に対して、回転関節内部構造を遮蔽板として一体化し、遮蔽板・フォトインタラプタ・調整機構を同心円状に配置する構造一体化方式を提案する。

提案手法では構成部品を同心円方向に配置すること、トルクセンサ基板のうち、フォトインタラプタ保持部分を別

基板として分割し調整機構をトルクセンサ基板内に持たせることで、軸方向高さを短く設計出来る構造となっている。これにより要求精度と小型化のトレードオフをより狙う事が可能となる。

提案手法構造を図 4 に示す。

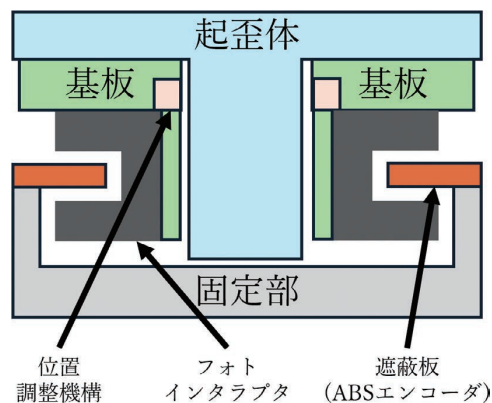


図 4 提案手法構造

本稿では提案手法を用いた光学式トルクセンサ内蔵関節ユニットの構造成立性確認を行った。本稿関節ユニットにおいては出力軸側角度取得のために市販の磁気式 ABS エンコーダ基板を含めた構成となっている。

構造一体化方式の構成部品および起歪体との位置関係を図 5 に示す。

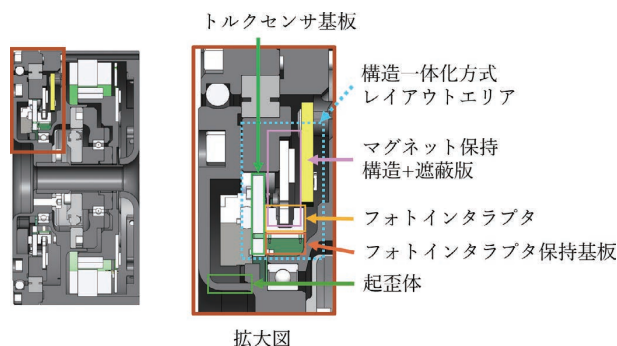


図 5 構造一体化方式の構成部品および起歪体との位置関係

磁気式 ABS エンコーダに使用されているマグネット保持板は金属製であり、フォトインタラプタの光路上を通過するため遮蔽板に転用できる。設計上は、マグネット保持板の一部を切り欠いて、遮蔽板としての機能を持たせている。マグネット保持板及びフォトインタラプタの関係を図 6 に示す。

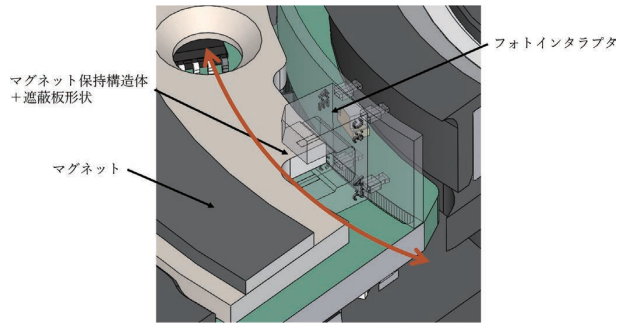


図6 マグネット保持板及び遮蔽板形状

提案手法では固定部にフォトインタラプタの調整機構を置かない為、その設置場所が問題となる。これはフォトインタラプタ保持基板側に電氣的接続が可能な凸形状を作り、トルクセンサ基板側にスライド孔を持たせ、そこに挿入後に位置決め・ハンダ付けを行うことで解決する。具体的には、弾性変形可能な 0.6 mm 厚基板に実装したフォトインタラプタ保持基板を、トルクセンサ基板上の円周方向のスライド孔に沿って調整・接着固定する構造とした。これにより調整機構が独立して存在することによる高さを削減することが可能となる。

フォトインタラプタ保持基板構造を図7に、トルクセンサ基板上のスライド孔を図8に示す。

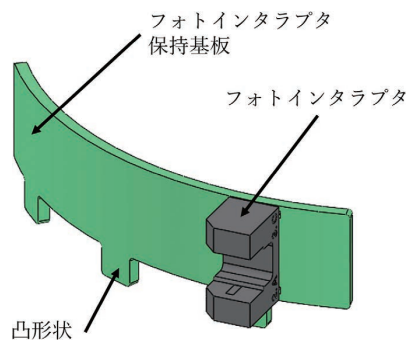


図7 フォトインタラプタ保持基板

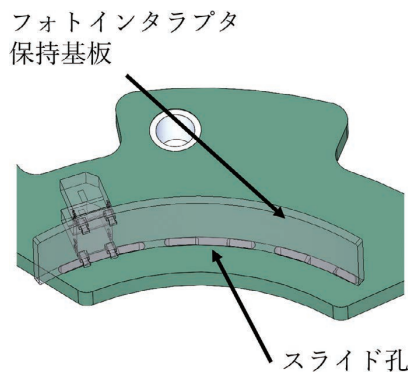


図8 トルクセンサ基板上のスライド孔

提案手法は起歪体自体の軸方向長さに制約を課さない一方、径方向の配置を制約する。検出点であるフォトインタラプタは、最外周部に配置することが理想だが、本提案ではトルクセンサの基板サイズ $\phi 60$ mm に対して、既存部品の制約から $\phi 42$ mm の位置にフォトインタラプタを配置することとなった。この配置は遮蔽板移動量が約 30% 低下する。これは単純計算で直進性誤差が約 1.4 倍増えることとなる為、今後の最適化が課題である。

フォトインタラプタ保持基板を曲げる事によるフォトインタラプタの位置決め精度については、従来手法を用いて構成した関節ユニットと同じ精度で調整出来ることが確認できており精度は同等であると考えられる。一方で、薄肉基板を曲げることについては、内部銅箔部のパターン断線、定常的に発生する応力によるはんだクラックなどのリスクが将来的に懸念される。特にはんだクラックについては、接着方式を含めた固定方式の検証が必要となる可能性がある。

また同心円方向により小型のトルクセンサを開発する場合は、フォトインタラプタ保持基板の曲げ半径が小さくなるため、設計にはより詳細な検証が必要となると考える。

4. 効果検証

4.1 小型化の有効性

参考として本稿で開発した光学式トルクセンサと回転関節を一体化させた、関節ユニット全体を図9に示す。



図9 光学式トルクセンサ内蔵関節ユニット

関節ユニットの仕様は表1に示す通りである。

表1 関節ユニット仕様

項目	パラメータ
外形	$\phi 90 \times L45$ mm
中空径	8 mm
質量	0.57 kg
定格トルク	5.4 N・m
許容最大トルク	19 N・m
瞬間許容最大トルク	31 N・m

従来の積み上げ方式、構造一体化方式それぞれを採用したときの軸方向の高さの試算結果を表2に示す。なお、トルクセンサに採用しているフォトインタラプタはRPI-221⁵⁾である。

表2 部品高さ一覧

設計方式	構造物			合計
	フォトインタラプタ	遮蔽板	ABS エンコーダ	
積み上げ方式	3.3 mm (縦置き)	4 mm (調整機構込)	3 mm	10.3 mm
構造一体化方式	4.9 mm (横置き)	フォトインタラプタ高さに含まれる		4.9 mm

上記より提案手法ではトルクセンサの軸方向長が5.4 mm (52%) 削減された。なお基板配置近傍の関節ユニット外周部形状は外径 $\phi 90$ mm、内径 $\phi 76$ mm、材質 A7075 であり、5.4 mm 削減は 0.05 kg (8.8%) の軽量化に相当する。

関節ユニットとしての軽量化は、ロボットの可搬質量に影響する。ロボットアームとして一般的な6軸アームを構成した場合の影響を考察する。左から根本2軸、肘2軸、手先2軸の関節ユニットを持つロボットアーム概形を図10に示す。

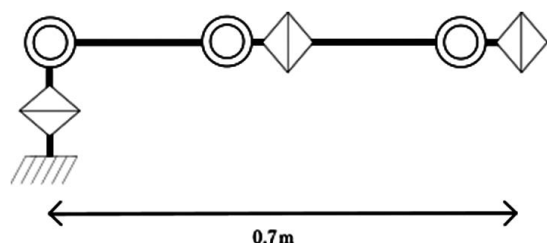


図10 仮想ロボットアーム概形

6軸ロボットアームとして、静止状態における根本第1軸に発生するモーメント荷重の減少量から可搬質量を評価する。

肘2軸および手先2軸の軽量化による根元第1軸の可搬トルク増分は合計 $1.029 \text{ N}\cdot\text{m}$ である。根元第1軸から0.7 mの位置に荷重が作用すると仮定すると、可搬質量の増分は0.15 kgに相当する。

一例として同程度の出力・姿勢時の協働ロボット可搬が2 kg程度である⁷⁾ことから、可搬質量を7.5%増加させることを示している。

実際のロボットアームにおいては、各関節ユニット構造の小型化はフレーム構造部品の軽量化にも寄与することから、実際には上記以上の効果が得られる可能性がある。

5. むすび

本稿では、光学式トルクセンサ内蔵関節ユニットの小型化を目的として、出力軸側の既存構造を遮蔽板として一体化し、センサ構成を同心円上に配置する方式を提案した。

提案手法により軸方向寸法を5.4 mm削減し、軽量化を通じて可搬質量の向上に寄与することを示した。

今後は検出点配置の最適化に加え、曲げ基板の耐久性評価を進める。

また、低コスト性と内製による設計自由度の高さを活かし、各関節で異なる要求仕様に柔軟に対応できる点を活用し、人協調ロボットへの適用と性能検証を進める。

参考文献

- 1) 西尾政紀, 杉原知道, “光学センサの動特性補償による安価な関節トルク計測,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 2014, 1P2-J04.
- 2) 西尾政紀, 石川省吾, 杉原知道, “減速機内部摩擦補償のための光学センサを用いた安価なトルクセンサ,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 2015, 2A1-B08.
- 3) 国立大学法人大阪大学, “トルクセンサ,” 特開 2019-190885, Oct. 31, 2019.
- 4) D. Tsetserukou et al., “Optical torque sensors for implementation of local impedance control of the arm of humanoid robot,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 2006, pp. 1674–1679, doi: 10.1109/ROBOT.2006.1641947.
- 5) ROHM Co., Ltd. RPI-221 フォトインタラプタ小型タイプ, Accessed: Feb. 2, 2026. [Online]. Available: https://fscdn.rohm.com/jp/products/databook/datasheet/opto/optical_sensor/photointerrupter/rpi-221-j.pdf
- 6) 橋本稔, ゴドルール・イヴァン, “ハーモニックドライブ内蔵型トルクセンサの高精度化,” 日本ロボット学会, vol. 15, no. 5, pp. 802–806, 1997.
- 7) OMRON Corporation. TM5-700, Accessed: Feb. 2, 2026. [Online]. Available: <https://store.omron.com.au/knowledge-base/tm-cobot-payload-derating>

執筆者紹介



川越 清政 KAWAGOE Kiyomasa

ストラテジック R&D 本部

コントロール&コンピューティングテクノロジーセンタ

メカトロニクスグループ

専門: 機械

所属学会: 日本ロボット学会、電気学会

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。

遠隔患者モニタリングによる血圧管理のための測定時間帯自動分析機能の開発

佐藤 博則

脳・心血管病予防のためには血圧管理が重要であるが、十分徹底されておらず世界的な社会課題となっている。米国においても官民により様々な取組が実施されてきたが、2019年世界に先駆けて遠隔患者モニタリングを保険償還の対象に定めた。この動きに呼応して、オムロンヘルスケアでも遠隔患者モニタリングシステム VitalSightTMを提供している。電子カルテに家庭血圧を直接送信する提供形態の場合、大量の測定結果が医療者に多くの負荷をかけるという課題が生じた。このためいくつかの解決手法を提案しているが、本論文では、医療者の負荷を増やさずに各個人に適した朝晩血圧表示をするための、測定時間帯自動分析機能の開発・評価結果を報告する。同機能は、個人別に単位時間毎の測定頻度を集計し、毎日の測定習慣を特定する。実際に電子カルテに送信された測定結果を用いて検証し、同機能にて個人別に測定している時間帯を判別できることを確認した。この機能を用いて朝晩血圧グラフを表示すれば、医療者が薬の効果を容易に判断できる、また症状を示唆する普段と異なる測定時間を発見できることが期待され、臨床有用性が確認されることが望まれる。

Development of an Automatic Measurement Time Analysis Function for Blood Pressure Management by Remote Patient Monitoring

SATO Hironori

Blood pressure management is important for preventing cerebrovascular and cardiovascular diseases, but it is not being adequately achieved and has become a global social issue. In the United States, public and private initiatives have tried various solutions. Insurance made remote patient monitoring deductible by reimbursement in 2019 as the first in the world. In response, Omron Healthcare, Inc. also offers the remote patient monitoring system VitalSightTM. When home blood pressure readings were sent directly to electronic medical records, the large volume of measurement records placed a heavy burden on medical professionals, which was an issue. We are proposing several solutions for it. In this paper, we report on our development and evaluation result of an automatic analysis function for measurement time periods in order to display morning and evening blood pressure data appropriate for each individual without increasing medical professional's work load. The function compiles measurement frequency per unit time for each individual and identifies daily measurement habits. We verified this by using actual measurement results sent to electronic medical records and confirmed that the function can be used to distinguish the time periods when measurements were taken for each individual. It is expected that using this function to display morning and evening blood pressure graphs will enable medical professionals to easily judge the effectiveness of medication and detect unusual measurement times which suggest that symptoms are present. It is hoped that its usefulness and clinical meanings will be validated.

1. まえがき

1.1 血圧管理とモニタリングの必要性

世界中で多くの高血圧患者が目標となる血圧値に管理されていない¹⁾。米国においても、国民の半数が高血圧に罹患しているが、目標血圧値まで降圧されている患者は、わずかその4分の1である。さらにそれは年間約50万人の死因となっており、年間1310億ドルの医療費が必要となっている。これらを米国政府は認識し、医療従事者に血圧管理を強化するよう声明を出している²⁾。高血圧治療による降圧目標値達成率の向上は、改善が必要な社会課題となっている。

2012年、米国疾病コントロールセンター（CDC）と米国政府管掌保険であるメディケアメディケイド（CMS）は、心血管イベントを削減することを目的として Million Hearts[®] というプログラムにより降圧目標値達成率80%を設定し血圧管理のための情報提供を行ってきた³⁾。

2017年からは米国心臓協会（AHA）と米国医師会（AMA）が、これに Target: BP[™] というプログラムを連携させ募集した各医療機関の患者の血圧をオンラインで収集し、医療機関毎の降圧目標値達成率ランキングを公表、表彰するなどの取り組みを行っている⁴⁾。

また、Margolis らは、遠隔医療を用いた血圧のモニタリングと薬剤師による管理によって降圧目標値達成率の改善に取り組み、従来治療群よりも血圧が改善され、さらに長期に改善が維持されることを確認している⁵⁾。

1.2 遠隔患者モニタリングサービスの開始

2019年1月CMSは、遠隔生理学的（患者）モニタリング（Remote Physiological Monitoring）への保険償還を開始した⁶⁾。これに呼応する形で、オムロンヘルスケア米国販売会社である Omron Healthcare, Inc. は、2020年8月より家庭で測定した患者の血圧値と体重を医療者に伝える VitalSight[™] サービスを開始した⁷⁾。

同サービスは、スマートフォンとの通信技術である Bluetooth[®] Low Energy に対応した血圧計や体重計を、スマートフォンと同様の通信機能を持つ HUB と呼ばれる装置を経由して 4G LTE/5G 携帯電話網に接続し、測定結果を直接医療者のダッシュボードや電子カルテに表示できるシステムである。あらかじめ通信 HUB を機器とペアリングさせ患者へ発送することにより、スマートフォンを持っていない、あるいは使い慣れていない患者でも利用できるほか、ペアリング操作など技術的な問題も回避することができる。さらに測定値が電子カルテに自動転送されることにより、医療者も他の検査結果と同様に容易に活用できることが期待された。

Northwestern 大学では、電子カルテを通して観察研究を行い、高血圧患者が同システムを活用して治療され、降圧

目標値達成率が向上することを確認した⁸⁻¹⁰⁾。

1.3 これまでのオムロンヘルスケアの取り組み

オムロンヘルスケアでは、医療機器である自動電子血圧計を50年以上に渡り製造販売してきた。産官学協力のもと、安心して利用できるよう血圧計の測定精度の向上に努め、高血圧治療の発展にメーカーの立場で貢献してきた。

1994年には、家庭で測定したデータを電話回線で病院の管理用サーバーに転送するホームドックを開始するなど、家庭血圧を収集・活用する取り組みを幾度となく行い、血圧管理の発展にも貢献してきた。

その中でも2012年から2019年には日本において血圧分析サービス Medical LINK を提供し、3G 携帯電話網に直接送信できる血圧計を用いて患者の家庭血圧を分析し、高血圧治療に役立てて頂くよう医療者に提示していた¹¹⁾。

近年は世界各国で個人向けに血圧等のバイタルデータを収集・保存する OMRON Connect サービスを提供しており、一部の国では、それによる測定記録を医療者に提示する Health data Monitoring System (HMS) のサービスも行っている。

1.4 遠隔患者モニタリングの普及促進のために

以上より、高血圧治療において血圧管理とモニタリングが重要であり、遠隔患者モニタリングが効果的であることが確認できた。そこで、脳・心血管の発症ゼロ（イベントゼロ）を掲げる当社として、より広く普及させることを目的に検討を行った。

まず、医療者へのヒアリングや共同研究によるデータの分析を行い、そこから見えてくる課題と打ち手について検討した。いくつかの検討を行った打ち手のうち朝と晩に分けて血圧の平均値を求める手法は、リスクの高い早朝高血圧を検出する、また降圧薬を服用する時間を決めるために使われている⁶⁾が、今回さらなる課題に直面した。そこで、本論文では、この家庭血圧の分析手法のひとつである、朝晩血圧表示の改良について検討を行ったので報告する。

2. 課題と解決手段の提案

2.1 電子カルテにあふれる家庭血圧

遠隔患者モニタリングを用いて電子カルテに直接血圧値を送信する場合、血圧管理に役立つ一方で、その課題も見えてきた。

電子カルテに送信された血圧値は、フローシートと呼ばれる記録表示領域に一つ一つ追加されていった。医師はこの一つ一つを確認して評価する必要があるほか、投薬の効果を確認する場合には、複数の値の平均値を計算するなどの必要があった。

さらに、予め医師により設定された閾値を超えるか、下回るとそのたびに警報が通知される。このシンプルな警報にも、次のような課題があった。

警報が通知されると、医師や他の医療者は原因を究明するため、患者に連絡する必要があるかその結果が緊急事態を意味するかどうか判断する必要があったが、多くの場合連絡したところ緊急ではないことがわかった。例えば、安静状態でなかったり測定姿勢が適切でなかったりしただけで、普段とは異なる高い値が出るがあった。

他方、臨床対処が必要な警報が通知された場合でも、降圧薬の処方量を増やすなどの対応後、薬の効果により血圧が安定するまでの間は警報が通知され続けることになる。

警報が通知された際に医師が時間を取って確認をしても、対処が不要であれば他の患者への対処が遅れるなど不合理である。一方で、警報を無視してしまうと、本来対処が必要であった場合に見落としの責任も生じてしまう。

このため、単純に電子カルテに接続しただけでは、医師の負担が増える、また医師をサポートする医療者がデータを確認しトリアージを行う必要が生じるなど、医療者の負担が増えてしまうという課題が生じる。

2.2 血圧情報の集約提示による医療者負担の削減

電子カルテに大量に送られる日々の家庭血圧に対して医療者の負担を削減するため、これまでいくつか自動化の提案を行ってきた。複数の血圧値を平均して通知する機能やそれらにより警報が通知される前に、患者にテキストメッセージを送り症状がないか自動で問い合わせる自動問診機能、薬を追加したタイミングとその前後の血圧値のトレンドを示し一目で薬が効いているか確認できる薬効評価機能、また血圧を朝晩で個別に平均し表示する朝晩血圧表示機能などである。これらにより、大量の血圧値を効率よく解釈することができるようになり医療者の負担を減らすことができる。

2.3 血圧測定頻度による時間帯別表示

家庭での血圧の分析の際に朝晩に測定された血圧値をそれぞれ分けて平均値を求めることは有益であるが、医療者の負担になるため自動化が望まれる。しかしながら、時間帯を固定してしまう従来法では実際の測定時間帯とずれが生じる。そこで、毎日の血圧測定時間の頻度を算出し、頻度の高い時間帯を“朝”ないし“晩”と、患者別に定義して分析する手法を提案した。以下提案法と呼ぶ。

当社では従来より、午前4時から午前9時59分を“朝”、午後7時から翌日午前1時59分を“晩”とする固定時間で仕分けた測定値を集計しグラフや平均値を表示することを提案していた。以下、この方法を固定時間法と呼ぶ。

しかしながら、この方法では次のような課題があった。

1. 固定された時間帯に患者が測定できるかわからないこと。
2. 時間帯を外れ除外された測定値が重要な意味を持つ可能性があり、見逃しとなる恐れがあること。
3. 高齢者やシフトワーカーについては、いつ起床して就寝しているのか明確でないこと。
4. 同じ時間帯が朝晩に分割される可能性があること。
(例えば午前午後を分割基準とした場合、正午前後に起床し測定すると起床後の血圧と就寝前の血圧が混在する。)

米国のガイドラインにおいては、家庭血圧の測定法として次の通り記載されている。“服薬前の朝と夕食前の晩に、少なくとも2回、1分の間隔をおいて測定すること”¹²⁾。

患者の生活時間帯にはある程度の規則性があると仮定し、患者が医療者からガイドラインに従って測定するように指示を受けている場合、毎日おおよそ同じ時間帯に測定されることが期待される。すなわち、血圧を測定する頻度の高い時間帯が存在すると考えられるため、提案法の成立が期待される。

3. 方法

3.1 算出アルゴリズム

提案法では、個々の患者の時間帯別測定頻度を分析し、抽出される頻度の高い時間帯を“朝”、“晩”と定め、それ以外の時間帯を、“その他”として分類する。

このフローチャートを図1に示す。

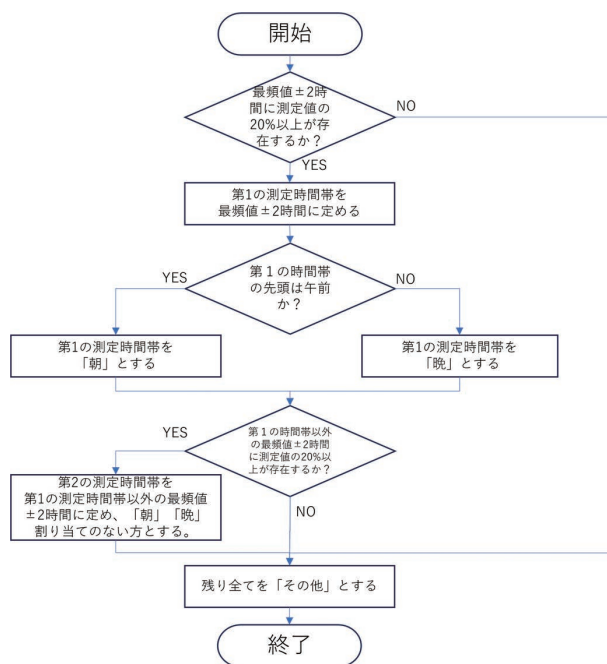


図1 提案手法のフローチャート

主要なルールを以下に示す。

- ① 頻度は、式(1)に基づいて隣接する頻度の加重平均を用いる。

$$wp[k] = \frac{p[k-2] + 2p[k-1] + 3p[k] + 2p[k+1] + p[k+2]}{9} \quad (1)$$

k : 時間帯番号 [無次元]

$wp[k]$: 加重平均測定頻度 [度数]

$p[k]$: 測定頻度 [度数]

- ② 最も頻度の高い時間を含む時間帯を第1の時間帯、この時間帯以外の次に頻度の高い時間を含む時間帯を第2の時間帯、それ以外の時間帯をその他の時間帯とする。ただし、全体の20%以上の測定値を含むこと。
- ③ 第1、第2の時間帯の幅は ± 2 時間とした。
- ④ 第1の時間帯、第2の時間帯、それぞれの開始時間帯が、一日のうちでいずれか早い方を“朝”とする。ただし、第1の時間帯しがなく、午後であれば、“晩”とする。
- ⑤ 第1の時間帯、第2の時間帯、共に開始時刻が属する日とする。終了時刻が翌日深夜となっても、当日の扱いとする。
- ⑥ 各時間帯を1時間以内で前後にシフトさせた場合に頻度の合計が大きくなる場合はそちらを選択することとする。

※下線部のパラメーターは調整の余地があり、患者背景等による最適化は行っていない。

3.2 検証方法

固定時間法と提案法を実在の測定結果に適用し、“朝”、“晩”、“その他”にそれぞれ分類された個人別の割合を算出し、群毎に再度それぞれの平均値を算出した上で、測定頻度の割合を比較する。個人別に適切に時間帯を選択することができれば、全体においても“その他”の測定頻度の平均値が減少する。従って、“その他”の時間帯の頻度を比較し、従来法よりも提案法において減少していることを成功条件とする。

3.3 データセット

A 群 高齢のプライマリケア患者

2020年11月28日から2021年8月14日までの間に、Northwestern Medicine（米国イリノイ州シカゴ）のプライマリケア診療所で高血圧症またはその他の関連適応症に対して VitalSight™ を処方された 288 人の高齢患者（65 歳以上）のうち、血圧値を送信した 238 名の測定結果を電子カルテから抽出した。

B 群 高血圧合併症のある中高年患者

2024年2月8日から2025年1月31日まで Northwestern Medicine（米国イリノイ州シカゴ）で実施されたパイロットスタディに参加した、脳卒中の既往や、心血管疾患、腎疾患、糖尿病等を患う高血圧患者 70 名のうち、VitalSight™ を用いて血圧値を送信した 69 名の測定結果を電子カルテから抽出した。なお、測定回数が少ないと朝晩 2 回ずつ測定するようテキストメッセージが届く設定となっていた。

なお、これらのデータセットの研究での使用は、Northwestern University の倫理委員会及び Northwestern Medicine のデータ管理者より承認され、HIPAA 等の米国の法令や規則に従い、匿名化の上共有されている。

4. 結果

4.1 測定時間帯の分布

検証を行う前に、両群の全測定時間帯分布を確認した。図2、3はそれぞれ A 群、B 群の全測定について、個人を特定せずに、1 時間毎の測定回数の分布をヒストグラムで表したものである。朝晩にピークがあるが、深夜早朝昼間など測定時間帯が広く分布していることがわかる。

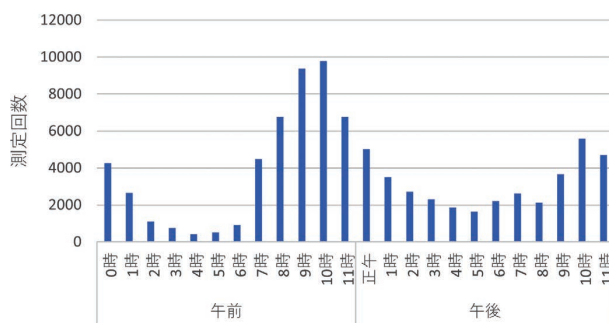


図2 A 群の測定時間帯分布

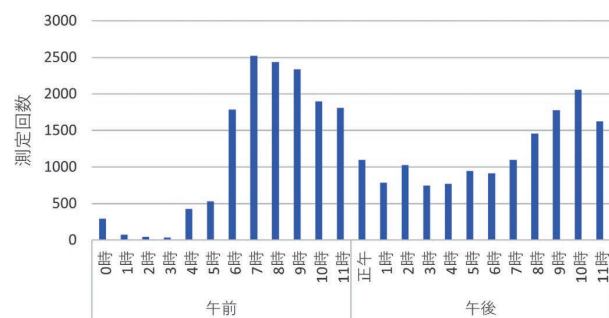


図3 B 群の測定時間帯分布

4.2 アルゴリズムの適用

まず、A 群、B 群、それぞれのデータに対して、提案法を適用しそれぞれ高頻度の時間帯が選択されたか確認した。

図4～9は、実際の個人別の時間帯別測定頻度の代表的

なヒストグラムである。横軸は15分単位で頻度を縦軸で示している。

また、提案法により“朝”と判断された時間帯を赤色で、“晩”と判断した時間帯を青色で、両端が丸印の破線により表している。

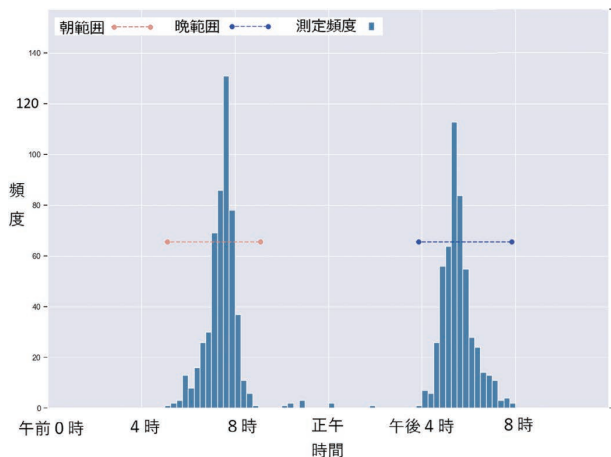


図4 アルゴリズム適用例①

図4は、朝晩の集中した時間帯に主として測定している被験者の例である。

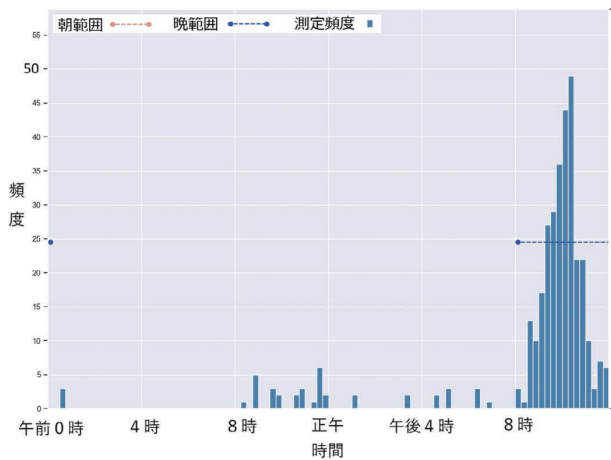


図5 アルゴリズム適用例②

図5は、晩の集中した時間帯に主として測定している被験者の例である。

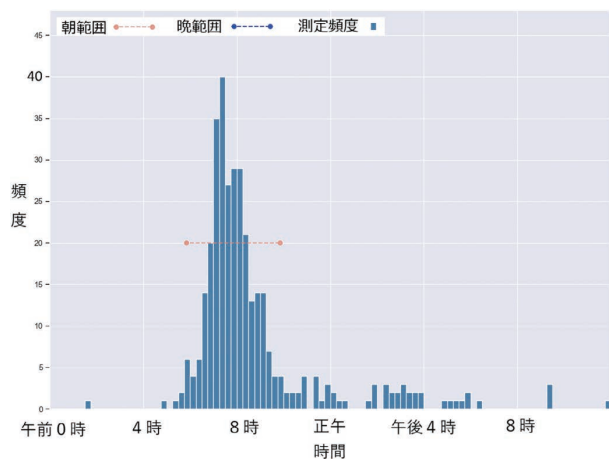


図6 アルゴリズム適用例③

図6は、朝の集中した時間帯に主として測定している被験者の例である。

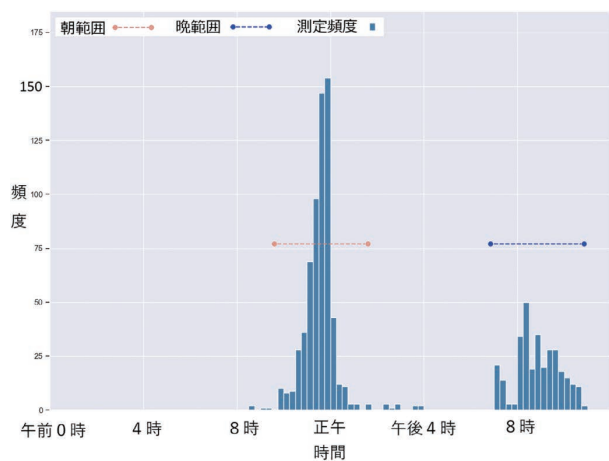


図7 アルゴリズム適用例④

図7は、正午前後と晩の集中した時間帯に主として測定している被験者の例である。

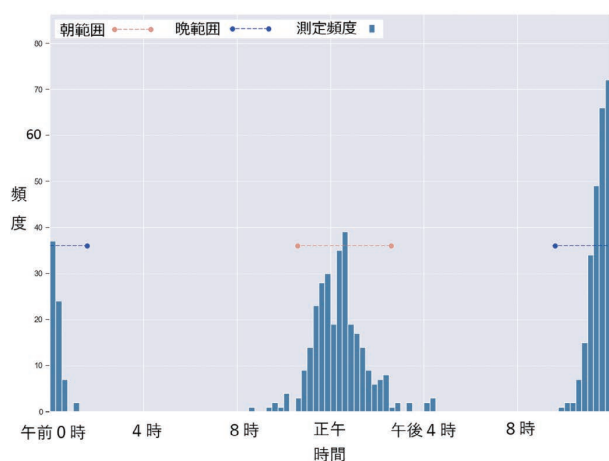


図8 アルゴリズム適用例⑤

図 8 は、正午前後と午前 0 時前後に主として測定している被験者の例である。

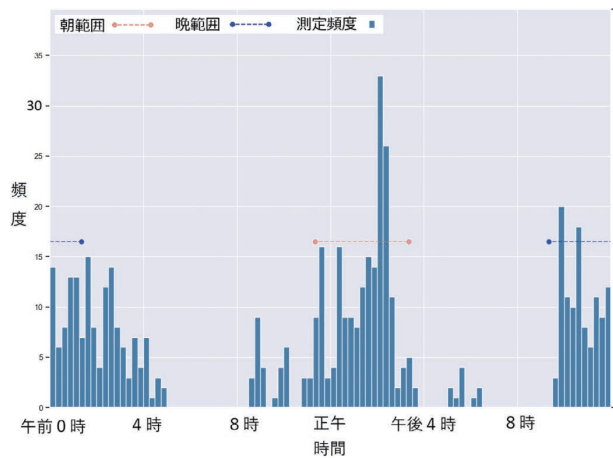


図 9 アルゴリズム適用例⑥

図 9 は、正午過ぎ、深夜に測定しているが、ばらつきが大きい被験者の例である。

表 1 正午・深夜 0 時をまたぐ症例人数

	正午をまたぐ人数 (割合)	深夜 0 時をまたぐ人数 (割合)
A 群	123 (52%)	72 (30%)
B 群	18 (26%)	10 (14%)

正午、深夜 0 時をまたぐ測定事例について、症例人数をカウントした結果は表 1 の通りである。2.3 で懸念された課題の 4 が存在していることがわかる。

4.3 検証結果

表 2、3 は、提案法をそれぞれ A 群、B 群へ適用し、個人別の時間帯別に分離された割合をさらに群毎にそれぞれ平均したものである。これらの表の通り両群において提案法では、固定時間法では“その他”に分離され除外されていた測定結果がより多く“朝”“晩”に分離され、“その他”に分類される測定結果が減少し、両群ともにウィルコクソン順位和検定により有意差が確認された。この結果から、提案法では固定時間法に比して、測定結果をより個人別の時間帯に分離できていることがわかる。

表 2 A 群における測定時間帯分離結果の分布

	朝に分離された割合の平均	晩に分離された割合の平均	その他に分離された割合の平均
固定時間法	24%	26%	50%
提案法	52%	26%	22%

表 3 B 群における測定時間帯分離結果の分布

	朝に分離された割合の平均	晩に分離された割合の平均	その他に分離された割合の平均
固定時間法	37%	28%	36%
提案法	46%	31%	23%

4.4 考察

遠隔モニタリングに参加した米国人患者は、1 日のうち 2 つの異なる時間帯に集中して測定をした患者が多くいたものの、測定のタイミングについては患者間で統一性がなかった。A 群のピークは午前 9 時、B 群のピークは午前 7 時だが、B 群に比して、A 群はやや先鋭である。年齢や群の違いでも、生活時間帯が異なることが示唆されている。また、それぞれ午前 10 時から午後 6 時までの測定も多い。

そのため、固定時間法で分析すると中には分析可能な患者もいるものの、それ以外の患者では固定時間以外の測定結果が失われる懸念が生じる。

さらに、正午や午前 0 時を含む測定時間帯がある患者が半数程度存在し、午前と午後に分けて分析をした場合において、“朝”“晩”あるいは、“服薬前”“夕食前”といった意味が測定値から失われてしまい適切ではない。

これらは、薬効評価の観点で問題となるだけでなく、服薬時刻を検討する際にも誤った判断につながると考えられる。

提案法であれば、個人別の測定パターンを検出できていると同時に、“朝”“晩”に分類されている測定値も固定時間法より増えていることから、期待した効果が得られていると考えられる。

また、個人別の時間帯を分析するためには複数日～数週間の測定が必要であるが、薬効評価等のために測定値を評価する場合は少なくとも 2 機会以上、3 日から 1 週間の平均値を用いるため問題ないと考えられる。

なお、図 9 の事例では、測定時刻のばらつきが多いため、各時間帯に含まれているべき測定値がはみ出しているとも言える。これは、3.1 で示したパラメーターの調整により、時間帯の幅を広げたり、個人別に調整したりする方法も提案する必要があるかもしれない。一方で、血圧の測定が服薬前に推奨されていることから、測定直後に服薬しているとすれば、服薬時刻がばらついている可能性もあり、測定直後に服薬していない場合は、服薬忘れを助長する可能性もある。血圧の測定及び服薬について時間帯を定め習慣化を奨励する観点からは、測定時刻がゆらぐことは好ましくないと考えられる。この点については、今後さらなる検討が必要である。

5. 今後の普及に向けて

5.1 提案法により分別表示された血圧の価値

図 10 は実際の症例から得られた血圧値と脈拍数を、提案法により“朝”“晩”“その他”に分別し週毎の平均を色分けして描画したグラフである。血圧の棒グラフは最上部が最高血圧（収縮期血圧）を表し、最下部が最低血圧（拡張期血圧）を表している。A は“朝”の血圧値であり、その下への延長線上にある丸印が同時に測定された脈拍数を示している。さらに、B は“晩”、C と D は“その他”を同様に示している。

この症例では、当初は血圧が高い状態であったが、上下を繰り返しながら下がってゆくこと、“晩”よりも“朝”が高いことが多いことがわかる。このため、医療者は朝の血圧を下げるように投薬を工夫できることが期待される。

さらに、C は通常測定時より血圧が高く、D は血圧が低い状態であり、患者がめまいなど何らかの症状を感じた為、いつもと異なる時刻に測定したと推定される。これにより医療者は、投薬や服薬条件を変える必要があるか検討できる。

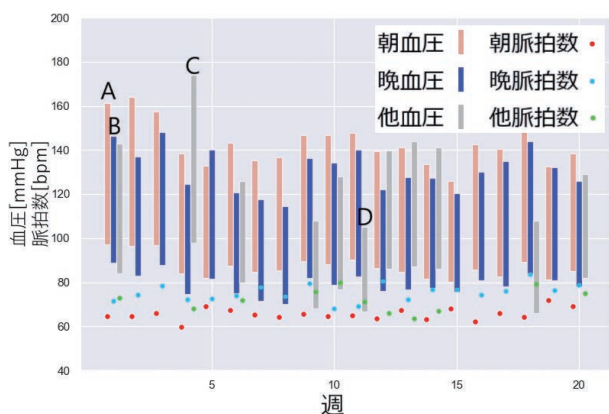


図 10 血圧表示例①

図 11 は別の症例を同様に描画したものである。E は“朝”の血圧値であり、普段は“朝”のみ血圧値を測定していることがわかる。F は“その他”の時間帯であり、通常測定時より脈拍数が高い状態であるため、動悸など何らかの症状を感じ、いつもと異なる時刻に測定したと推定される。G は、同様に通常測定時より血圧が高く、何らかの症状があったものと推定される。これにより医療者は、症状への対処法や頓服の指示などを検討できる。

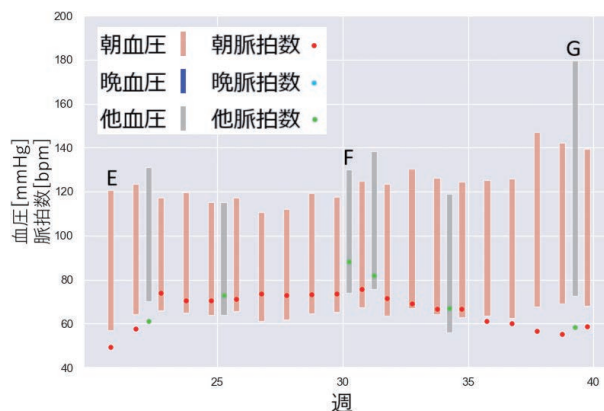


図 11 血圧表示例②

5.2 まとめ

家庭血圧の測定時間帯を認識して時間帯別に平均値を計算することにより、従来法における次の4つの課題を解決し、患者別に通常の生活における“朝”“晩”の血圧値を自動的に算出することができた。

1. 固定された時間帯に患者が測定できるかわからないこと。
2. 時間帯を外れ除外された測定値が重要な意味を持つ可能性があり、見逃しとなる恐れがあること。
3. 高齢者やシフトワーカーについては、いつ起床して就寝しているのか明確でないこと。
4. 同じ時間帯が朝晩に分割される可能性があること。

患者がガイドラインに従い“朝”“晩”測定するように、医師から指導を受けているならば、この時間帯に測定した値を診断や薬効評価のために活用されるであろう。

また、“その他”の時間帯に測定された値は、めまいや動悸など、患者が症状を感じて通常と異なる時間帯に測定を行っており個別に判断できるであろう。

これにより、医療者が特段の負荷を増やすことなく、容易に薬効の過不足の確認、患者の症状への細やかな対応が可能となることが期待される。

今後これらの機能と効果が、遠隔モニタリング等のシステムで活用され、医療現場に広く受け入れられるためには、臨床評価により有効性が確認される必要がある。

そして、さらなる課題を深堀、解決策を提案し、高血圧治療と心血管疾患の発症予防に貢献してゆきたいと考える。

共同研究者であり、VitalSight™の臨床評価等の研究を運営し、今回そのデータを提供していただいた、Feinberg School of Medicine, Northwestern University の、Stephen D. Persell 博士、Lucia Petito 博士、Yaw Peprah 氏、Ji Young Lee 氏の諸氏に感謝します。

参考文献

- 1) E. Harris, "Majority of people live with uncontrolled hypertension worldwide," *JAMA*, vol. 330, no. 16, p. 1515, 2023.
- 2) U.S. Department of Health and Human Services. "The Surgeon General's Call to Action to Control Hypertension." US Department of Health and Human Services /Enhancing the health and well-being of all Americans. <https://www.hhs.gov/sites/default/files/call-to-action-to-control-hypertension.pdf> (Accessed: Feb. 12, 2025).
- 3) H. K. Wall, et al., "Improving blood pressure control in the United States: At the Heart of Million Hearts 2027," *Am. J. Hypertens.*, vol. 36, no. 8, pp. 462-465, 2023.
- 4) A. P. Smith, et al., "Target: BP™: A national initiative to improve blood pressure control," *Hypertension*, vol. 80, no. 12, pp. 2523-2532, 2023.
- 5) K. L. Margolis, et al., "Effect of home blood pressure telemonitoring and pharmacist management on blood pressure control a cluster randomized clinical trial," *JAMA*, vol. 310, no. 1, pp. 46-56, 2013.
- 6) D. Shimbo, et al., "Self-measured blood pressure monitoring at home a joint policy statement from the American Heart Association and American Medical Association," *Circulation*, vol. 142, no. 4, pp. e42-e63, 2020.
- 7) 佐藤博則, "高血圧患者の遠隔モニタリングと米国における社会実装," システム制御情報学会誌, vol. 67, no. 6, pp. 224-229, 2023.
- 8) L. C. Petito, et al., "Remote physiological monitoring for hypertension in primary care: a prospective pragmatic pilot study in electronic health records using propensity score matching," *JAMIA Open*, vol. 6, no. 1, pp. ooac111, 2023.
- 9) S. D. Persell, et al., "Prospective Cohort Study of remote patient monitoring with and without care coordination for hypertension in primary care," *Applied Clinical Informatics*, vol. 14, no. 3, pp. 428-438, 2023.
- 10) L. C. Petito, et al., "Blood pressure outcomes at 12 months in primary care patients prescribed remote physiological monitoring for hypertension: a prospective cohort study," *J. Hum. Hypertens.*, vol. 37, no. 12, pp. 1091-1097, 2023.
- 11) J. Yatabe, et al., "The current state and future of internet technology-based hypertension management in Japan," *Hypertension Research*, vol. 44, pp. 276-285, 2021.
- 12) P. K. Whelton, et al., "2017 ACC/ AHA/ AAPA/ ABC/ ACPM/ AGS/ APhA/ ASH/ ASPC/ NMA/ PCNA Guideline for the prevention, detection, evaluation, and management of high blood pressure in adults: a report of the American college of cardiology/American Heart Association task Force on Clinical Practice Guidelines," *Hypertension*, vol. 71, no. 6, pp. e13-e115, 2018.

執筆者紹介



佐藤 博則 SATO Hironori

オムロン ヘルスケア株式会社
技術開発統轄部 解析技術開発部
専門：生体医工学
所属学会：米国心臓協会、IEEE EMBS
博士（工学）

Bluetooth®、Bluetooth Low Energy は、Bluetooth SIG, Inc. USA の商標または登録商標です。

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。

複数信号機制御における強化学習と交通工学の融合的アプローチの考察

山本 健生, 伊澤 茉莉花

信号制御の品質は交通渋滞や環境負荷といった社会課題に直結しており、その品質は従来、熟練した技術者によって維持・向上されてきた。信号制御では交通工学に基づいてサブエリアと呼ばれる単位で複数の信号を連動させており、この連動要素によって最適化が難しくなっている。そこで近年、AIの発展に伴い、強化学習を用いたサブエリア信号制御手法が数多く提案されている。しかし、これらの多くは、交通工学に基づかず、マルチエージェント強化学習などのAIの技術的アプローチを活用している。そのため、遅れ時間などの評価指標は改善しているとしても、実際の信号制御に適用できるかはまだ十分に検討されているとはいえない。そこで、本研究では、まず現状の強化学習による制御と、交通工学の重要なパラメーターであるサイクルやスプリット、オフセットとの関係を調査する。そのうえで、強化学習と交通工学を融合したサブエリア信号制御手法を提案する。具体的には、マルチエージェント強化学習に信号間の連動制約と、現示の秒数制約を追加することを検討し、従来の交通工学を用いない強化学習と比較した。その結果、従来の交通工学を用いない強化学習では、サイクルやスプリットが毎回大幅に変更され、実用的でないことがわかった。そして、強化学習に秒数制約を適用すると、一台当たり遅れ時間が116秒から95秒に減少し、CO₂排出量が18%減少したという考察が得られた。一方、連動制約は遅れ時間・CO₂排出量の削減に寄与しなかったという考察が得られた。本研究を通して、交通工学と強化学習の融合がもたらす効果的な信号制御手法の可能性が示された。

A Fusion Approach of Reinforcement Learning and Traffic Engineering in Multiple Traffic Signal Control

YAMAMOTO Yoshiki and IZAWA Marika

The quality of traffic signal control is directly linked to social issues such as traffic jams and environmental issues. In the past, skilled engineers have maintained and improved this quality. For signal control, we need to adjust the signals with neighboring ones. The difficulty in optimizing signal control lies in coordinating signals with their neighbor signals. We control multiple signals together in sub-area units based on traffic engineering.

In recent years, with the development of artificial intelligence (AI), many methods using reinforcement learning (RL) for sub-area control have been proposed. However, many of these methods do not rely on traditional traffic engineering. They use AI approaches such as multi-agent reinforcement learning (MARL). Therefore, even if measures such as delay time improve, we find difficult to say that these methods are ready to be used for real-world traffic signal control yet.

In this study, we first investigate how current RL approaches relate to important traffic engineering parameters, such as cycle, split, and offset. Additionally, we propose implementable signal control method by combining reinforcement learning with traditional traffic engineering. Specifically, we introduce two constraints—coordination constraint and time constraint—derived from traffic engineering.

Here we show, in traditional reinforcement learning, the cycle and split significantly vary each time, making it impractical. Additionally, with time constraints, we reduced the delay time, an evaluation metric, from 116

Contact : YAMAMOTO Yoshiki yoshiki.yamamoto@omron.com

seconds/car to 95 seconds/car, and CO₂ emissions decreased by 18%. On the other hand, the coordination constraints did not contribute to reducing delay times or CO₂ emissions. This result demonstrates the potential of integrating traffic engineering with RL to develop effective signal control methods.

1. まえがき

現代の世界では交通渋滞が深刻化し、膨大な時間損失や経済的負担、さらには大気汚染など環境問題の原因となっている。例えば、国土交通省の資料¹⁾は、全国で年間約61億時間の渋滞損失が発生している、と指摘する。このような状況を受け、日本政府の第5次社会資本整備重点計画では、持続可能で暮らしやすい地域社会の実現やインフラ分野のデジタル・トランスフォーメーション、脱炭素化が重要な政策目標の一つとして掲げられている。この中で、警察庁は交通の円滑化と安全性の向上に向けた取り組みを推進している²⁾。

交通の円滑化で重要になる交通管理システムにおける交通信号機制御（以下、信号制御）は、現状、熟練した技術者が現地を調査し、交通工学に基づいて素案を決定、試行を経て導入されている。しかし、近年の少子高齢化による熟練技術者の減少や人件費の高騰によって、機械学習、特に強化学習による信号制御が提案されている。我々も以前、単独信号に対する強化学習を用いた制御方法について調査結果を報告した³⁾。

ところで、信号機は単独で制御されるものではなく、複数の信号機を統括して制御するのが一般的である。この統括される信号機のひとまとまりをサブエリアと呼び、実務上ではサブエリアごとに制御パラメーターを設定する。既にサブエリア内の複数の信号をまとめて制御する強化学習の論文が提案されている^{4,5)}が、近年の主流の研究はマルチエージェント強化学習（Multi-Agent Reinforcement Learning, MARL）や Graph Convolutional Network（GCN）

といった機械学習のテクニックにより最適化を目指している。そのため、遅れ時間などの評価指標は改善していても、実際の信号制御に適用できるかは十分に検討されているとはいいがたい。特に、強化学習による従来手法が現在の交通工学を用いた信号制御の指標であるサイクル、スプリット、オフセットに対してどのような出力をしているか、それが現在の信号制御と比較して実交通流で人間の運転手にとって適切に成り立つものであるかが明らかでない。

そこで、本論文ではまず第2章で現状の強化学習の制御と交通工学の重要なパラメーター、サイクル・オフセット・スプリットを紹介する。そのうえで、第3章で強化学習による信号制御に、従来の交通工学に基づく制約を加える信号制御を提案し、その効果をシミュレーターで実証した結果を第4章で報告する。

2. 従来技術と先行研究

2.1 交通工学による信号制御

一般的な信号機における青、黄、赤の1つの表示のことを現示という。本論文では赤信号に右折矢印が出ている現示も青現示として扱う。一括して統括される信号機群のサブエリア内の複数の信号を制御するうえで、交通工学上最も重要なのがサイクル、オフセット、スプリットの三要素である。（図1）これらについての詳細な計算は交通工学研究会出版の設計手引き、“平面交差の計画と設計”⁶⁾を参照されたい。

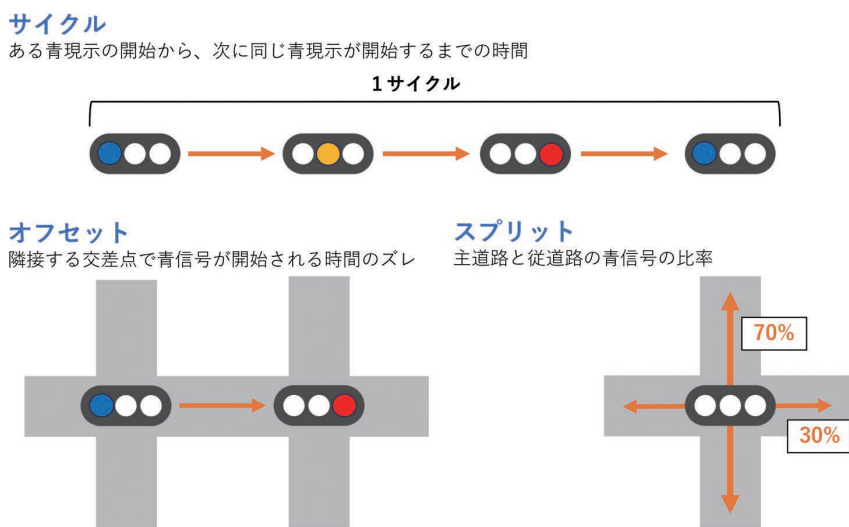


図1 サイクル・オフセット・スプリットの概略

サイクルとは、信号の現示が再び同じ現示に戻るまでの時間のことである。サイクルは、1 サイクル中の黄色・赤信号など実質的に車両が通行できない損失時間 L と、交通容量に対する実際の交通量の割合である需要率 λ を使って計算する。まず、理論上の最小値 $C_{min} = \frac{L}{1-\lambda}$ を下回るサイクルは、交通容量が交通量を下回るため必ず渋滞する。また、 C_{min} に近いサイクルでは車が少し増えただけでも渋滞が発生するため、多少の余裕を見積もっておく必要がある。その余裕を見積もったサイクルが、車の出現がポアソン分布に従う仮定で最適化された F. V. Webster による提案値 C_p と、11%の余裕を見積もった交通工学研究会による提案値 C'_{min} であり、下記の式で計算する。

$$\begin{aligned} C_p &= \frac{1.5L+5}{1-\lambda} \\ C'_{min} &= \frac{L}{1-\frac{\lambda}{0.9}} \end{aligned} \quad (1)$$

実際の現場では、 C_p や C'_{min} の値を参考にして 10 秒単位でサイクルを設定することが多い。また、サイクルが長すぎると運転者の苛立ちを誘発し、強行突破や信号無視などの危険が生じるため、多くの場合、サイクルは 180 秒を超えないように設定されている。サイクルごとにオフセットが一定となるよう、サイクル長はサブエリア内で統一することが望ましく、最も長い交差点のサイクルに合わせられることが多い。

オフセットは、隣接する交差点間で信号の開始タイミングにずれを設けるパラメーターである。適切なオフセットが設定されることで、車両は一つの交差点から次の交差点へとスムーズに進行でき、都市部や幹線道路での渋滞緩和につながる。

実際に使われる主なオフセットは 3 通りである。

- ・同時式オフセット：各信号のオフセットを 0 にし、主道路の青信号を同時に開始する。
- ・交互式オフセット：各信号のオフセットをちょうどサイクル長の半分にし、交互に主道路の青信号を開始する。
- ・優先式オフセット：主道路を上る（または下る）車が青信号に切り替わって出発したあと、制限速度で走ると、次の信号に差し掛かったときにちょうど主道路の青信号が開始されるように調整される。上りと下りで交通需要に差があるときに採用される。

これらの中から、交通状況に応じて適切なオフセットが設定される。

スプリットは、各進行方向に割り当てる青信号の時間比率を指す。車両の流れが多い方向には長い青信号時間が与えられ、交通量が少ない方向には短い青信号時間が設定さ

れることで、全体の待ち時間の低減や交差点の処理能力向上が図られる。

信号制御の技術者は、サブエリア内で、交通量や交差点形状、交差点間距離を考慮し、適切な信号制御パラメーター（サイクル、スプリット、オフセット）を調整・設定する。

2.2 強化学習

強化学習（Reinforcement Learning, RL）は、エージェントが環境と相互作用しながら、試行錯誤を通じて最適な方策（policy）を学ぶ枠組みである。エージェントは、各時刻において環境の状態を観測し、その情報に基づいて行動を選択する。行動の結果、環境は変化し、エージェントには報酬としてフィードバックが与えられる。報酬は、その行動がどれだけ望ましいものであったかを数値的に示す指標である。エージェントは、累積報酬（リターン）を最大化することを目的として学習を進める。

理論的背景としては、強化学習問題はマルコフ決定過程（Markov Decision Process, MDP）として定式化される。MDP は、状態、行動、報酬、遷移確率の 4 要素により環境をモデル化する。この枠組みは、エージェントが将来の報酬を最大化するための最適方策の存在や、ベルマン方程式による最適性条件を導出する基盤を提供する。この枠組みにより、強化学習の多くのアルゴリズムは理論的な正当性を持ち、実際の応用においても有効性を示している。

強化学習の枠組みを説明するため、以下の記号を定義する。

- ・ S ：エージェントが取りうる状態の全体集合。元は s で表す。
- ・ A ：エージェントが取りうる行動の全体集合。元は a で表す。
- ・ $P(s'|s,a)$ ：状態遷移確率と呼び、現在の状態 $s \in S$ と行動 $a \in A$ によって次の状態 $s' \in S$ が決まる確率のこと。
- ・ $r(s,a)$ ：即時報酬と呼び、ある状態 s で行動 a をとったときの報酬のこと。
- ・ $\gamma \in [0,1]$ ：割引率と呼び、将来の報酬をどれだけ重視するかを決めるパラメーター。0 に近いほど短期的な報酬を重視し、1 に近いほど長期的な報酬を考慮する。
- ・ π ：方策と呼び、エージェントが現在の状態に応じてどのような行動を起こすかのルール。特に $\pi(a|s)$ と書いたときは、現在の状態が s の時、行動 a を選択する確率を示す。また、最適な方策を π^* と書く。

エージェントの目標は、これから得られる累積報酬を最大化することである。ある時刻 t における累積報酬 G_t は次

のように定義される。

$$G_t = r_{t+1} + \gamma r_{t+2} + \gamma^2 r_{t+3} + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1} \quad (2)$$

そして、状態や行動の良さを定量的に表す指標を導入する。ある方策 π に従った場合の行動価値関数 $Q^\pi(s, a)$ は、状態 s で行動 a を選択した場合の価値関数であり、以下のように定義される。

$$Q^\pi(s, a) = \mathbb{E}_\pi[G_t | (s_t = s, a_t = a)] \quad (3)$$

これは、状態 s で行動 a を選択し、その後方策 π に従って行動したときの期待累積報酬を示す。したがって、最適な行動価値関数 $Q^*(s, a)$ が得られている場合、エージェントは最も高い行動価値を持つ行動 a を選択していくことで、最も高い期待累積報酬が得られる。そのため、最適方策を $\pi^*(s) = \operatorname{argmax}_a Q^*(s, a)$ と定めれば最適方策が得られる。

ただし、解析的に行動価値関数を計算できる例は少ない。そこで、逐次的に最適な行動価値関数を求める手法として、Q 学習 (Q-Learning) が提案されている。Q 学習は、行動価値関数が

$$Q^\pi(s, a) = \sum_{s'} P(s' | s, a) \left[r(s, a) + \gamma \sum_a \pi(a' | s') Q^\pi(s', a') \right] \quad (4)$$

と再帰的に書き直せることを利用して、

$$Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha [r(s, a) + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a)] \quad (5)$$

の計算式によって行動価値関数を逐次的に更新することで最適化を狙う。ここで、 α は学習率であり、 $\gamma \max_{a'} Q(s', a')$ の項は、次の状態 s' における最大の行動価値を考慮することで、最適な方策を学習することを意味する。ただし、Q 学習は状態数と行動数が少ないときは比較的計算しやすいが、状態数と行動数が増えると途端に計算量が増大し、個別の推定が難しくなってしまう。そこで、ニューラルネットワークを用いて、Q 値を推定するのが Deep Q-Network (DQN)⁷⁾ であり、本論文でもこれを採用している。

2.3 強化学習を用いた信号制御

強化学習を用いた信号制御にはこれまでに様々な方法が提案されている。最初期の 2000 年代には Wiering や Abdulhai が Q-learning で信号制御を行った。^{8,9)} 2010 年代になり、Li が DQN を導入してディープラーニングを用いた信号制御を始めている¹⁰⁾。

さらに、単なる流量と信号の情報だけではなく、上空からの画像を入力とする方法が佐藤¹¹⁾ によって提案されていたり、韓¹²⁾ は待ち行列推定モデルを DQN に導入したりしている。ただし、佐藤や韓は単一の信号について考察している。これに対して、我々は複数信号を強化学習で決定する方法を、シングルエージェント型、情報交換マルチ

エージェント型、独立マルチエージェント型の 3 つに分類して考察する。

シングルエージェント型は、サブエリア全体を単一の強化学習 AI エージェントで制御する方法である。全体の情報がエージェントに入力されるため、全体最適は達成しやすい。その一方、信号機の数が増えると状態数と行動数が爆発的に増加する。特に、弊社の担当するサブエリアでは最大で 16 の信号が存在し、その場合 $2^{16} = 65,536$ 通りの行動数となるため、強化学習によって制御するのは現実的ではない。また、サブエリアの信号数や形状によって各信号の状態が異なるため、サブエリアごとに個別の対応が必要となり、スケーラビリティが低い。桑原¹³⁾ はシングルエージェント型強化学習について報告しており、2 信号サブエリアでも非常に多くの学習回数が必要だとしている。

情報交換マルチエージェント型は、各信号に 1 つのエージェントを配置し、周囲のエージェントと交通量や現在の信号表示など一部の情報を交換し、それを自エージェントの状態として入力して強化学習で制御する方法である。海外での研究報告ではこの型が多く、Wei¹⁴⁾ は周辺の交差点の状態を交差点の入力情報として取り込む手法を提案している。西¹⁵⁾ や Wang¹⁶⁾ は、Graph Neural Network (GNN) を用いて情報を交換する手法を提案している。これらの手法はシングルエージェント型と比較して行動数の問題は解決するものの、サブエリアごとに個別の対応が必要なのは変わらず、スケーラビリティが低い。

独立マルチエージェント型は信号 1 つに対して 1 つのエージェントを配置し、自エージェントの情報のみで制御を行う方法である。この方法は個別最適が達成できる上に、強化学習エージェントの使いまわしが可能で、スケーラビリティが高いメリットがある。一方、自分の交差点の周辺の情報しか入力として受け取らないため、個別最適にはなっても全体最適とは限らないというデメリットがある。

3. 交通工学と強化学習の組み合わせアルゴリズム

本論文では、第 2 章で見た 3 つの分類の中で、独立マルチエージェント型強化学習に交通工学を組み合わせた制御アルゴリズムを提案する。先行研究に多い情報交換マルチエージェント型では、サブエリアごとの個別の対応が必要で、信号制御の検討をする工数が逆に増えてしまうからである。さらに、MARL や GNN などの複雑な AI 技術を用いて全体最適化を試みているが、このような複雑な AI 技術は、現場のエンジニアが理解・運用するには手間がかかり、異常発生時の説明可能性も低い。

独立マルチエージェント型を実際の信号制御に実装していくうえで乗り越えるべき課題は 2 つある。1 つ目の課題は、各信号が各々の周囲環境しか考慮せずに個別最適の制御を行った結果、隣との信号の連携が取れていないことで

ある。そのため、青信号で発進した車が次の信号に到着した途端に赤信号になってしまうなど、個別最適にはなっても全体最適には至らない。2つ目の課題は、強化学習の評価関数が最適とは限らず、特に DQN はディープラーニングを用いるために、過学習や誤差の発散、勾配消失・爆発などで、極端な行動を選択することがある。例えば、60 秒程度必要な主道路の青信号を 3 秒で打ち切ってしまった、逆に 3 秒で処理可能な従道路の右折が 60 秒間続いてしまったりすることが発生する。

そこで、我々は交通工学に基づき、独立マルチエージェント型をベースに次の制約を課すことで、上記の 2 つの課題に対する解決策を提案する。

1 つ目の課題に対しては、隣の信号の現示に合わせた制約を設けることで解決を図る。最も混雑する信号の現示は、わずかなズレでも大きな影響を与える。一方で、交通量の少ない信号では、多少のズレによる影響は小さい。そこで、最も混雑する中央信号は自由に制御し、隣接する信号（従属信号）には中央信号の現示状況に依存した一定の制約を課す。具体的には、オフセットが同時オフセットとなるよう、制約を以下のとおりに設けた。

- ・従属信号は、中央信号が主道路青の現示の場合、主道路青現示が終了するまで、先の現示に進んではならない。
- ・従属信号は、中央信号が主道路青以外の現示の場合、先に次の青現示に進むことは可能だが、それ以降の黄・赤の現示に進んではならない。これ以上先に進むと同時にオフセットから交互オフセットとなってしまうためである。
- ・中央信号が先に次の現示に進んだ場合、6 秒以内に従属信号は次の現示に進む。6 秒は黄信号時間 3 秒 + 最小青信号時間 3 秒の和である。これ以上長くなると中

央信号が従属信号の 2 つ先の現示に進んでしまい、同期が取れなくなるためである。

- ・交互オフセットを実現する場合は中央信号の主道路と従道路の条件を入れ替える。

これらの制約を今後連動制約と呼ぶ。

2 つ目の課題に対しては、短時間すぎて安全上問題があったり、長時間の停止を強いたりするような極端な時間になることを排除するために、最低秒数と最高秒数を現示ごとに設定する。具体的には以下のように設定した。

- ・最低秒数： C_{min} 秒を 10 秒単位に切り上げたサイクルにおいて、交通量の比率から算出したスプリットで決定した秒数。
- ・最高秒数：180 秒サイクルにおいて、交通量の比率から算出したスプリットで決定した秒数。

これらの設定により、各信号の現示時間が交通工学で適切な範囲内に収まるようにする。これを時間制約と呼ぶ。

4. 実験方法と結果

4.1 実験条件・評価方法

サブエリアの形状の中では主道路に沿った一直線上に構成されるサブエリアが最も多い。本論文ではこの形状で、幹線道路に沿った一直線上に構成される 3 つの信号からなるサブエリアを実験対象とした。シミュレーション環境には“Simulation of Urban MObility” (SUMO)¹⁷⁾ を利用した。図 2 のように道路端は左から時計回りに W, N1, N2, N3, E, S3, S2, S1 と名付けた。主道路 (W-E) は制限速度 60 km/h の片側 2 車線道路で、交差点では約 75 m の右折レーンを有する。また、従道路である 3 本の道路 (N1-S1, N2-S2, N3-S3,

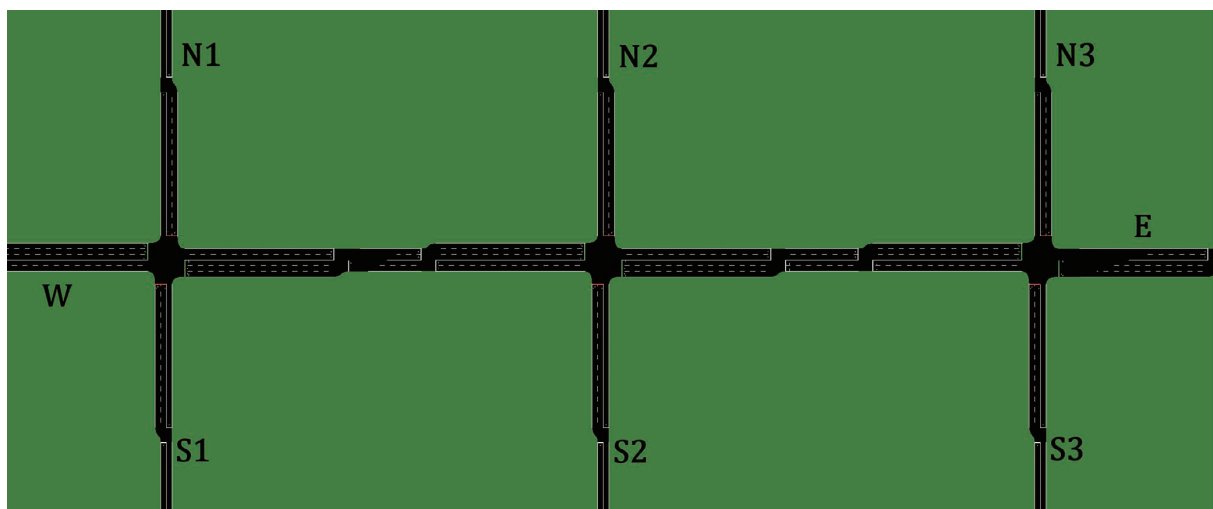


図2 今回対象とする交差点

N3-S3) は、それぞれ制限速度 50 km/h の片側 1 車線道路で、交差点では約 75 m の右折レーンを有する。交差点の中心間の距離はどちらも 250 m である。

“平面交差の計画と設計”に基づいて計算した従来の定時間制御を比較対象とする。定時間制御は状況に関わらず常に同じ時間で現示が進行する、一番基本的な制御である。定時間制御の各信号の現示の時間は次の表 1 のとおりである。この値は、表 3 に定める交通量の需要率 $\lambda=0.74$ から、F. V. Webster の提案値 $C_p=88$ 、交通工学研究会の提案値 $C'_{min}=68$ を参考に、サイクルを 80 秒に設定し、交通量の比率に応じてスプリットを定めたものである。また、今回は交通量の偏りがないため、同時式オフセットに設定した。

強化学習の時間制約秒数は表 2 のとおりである。最小はサイクル 60 秒、最長はサイクル 180 秒に設定し、交通量の比率に応じてスプリットを定めた時間を設定した。

表 1 定時間制御（従来制御）の現示時間の設定（単位：秒）

信号	サイクル	主道路 青	主道路 右折	従道路 青	従道路 右折
中央交差点	80 秒	28	6	25	3
左交差点・ 右交差点	80 秒	33	5	21	3

表 2 「時間制約」の最小秒数～最大秒数（単位：秒）

信号	サイクル	主道路 青	主道路 右折	従道路 青	従道路 右折
中央交差点	最小 (60 秒)	19	3	18	3
	最大 (180 秒)	69	18	64	11
左交差点・ 右交差点	最小 (60 秒)	23	3	15	3
	最大 (180 秒)	81	17	53	11

強化学習の学習・推論には、SUMO-RL¹⁸⁾ の DQN を使用した。DQN に入力される状態 s は、現在の信号現示、各車線の車両密度、および各車線の停車車両密度である。行動 a は、次の現示に切り替えるか、現在の現示を継続するかの二択である。なお、強化学習による推論に基づく行動が第 3 章に記載した制約条件を満たさない場合には、制約を満たすもう一方の行動を選択して実行する。例えば、最小秒数を満たしていないのに、強化学習が行動として「次の現示へ切り替え」を選択しても、信号は切り替わらない。逆に、最大秒数に達すれば、強化学習がどのような行動を選択しても信号は切り替わる。報酬 r は、行動を起こすこと

によって生じた遅れ時間の変化量とした。学習は、以下の P1 パターン流量を用いて、1,500,000 ステップ実施した。

交通流量は、以下の 3 つの流量パターンを用いて、0 秒から 10,800 秒（3 時間）まで検証した。

- P1 表 3 に定める交通量（中央の信号における需要率 $\lambda=0.74$ ）
- P2 P1 において、3,600 秒から 7,200 秒の間だけ、主道路の交通量が増大する（需要率 $\lambda=0.82$ ）
- P3 P1 において、3,600 秒から 7,200 秒の間だけ、主道路の交通量が減少する（需要率 $\lambda=0.66$ ）

なお、車両の出現は等間隔ではなく、車両ごとにランダムとする。その時、車両の出現は時間当たりの期待値が設定台数となるポアソン分布に従う。例えば、360 台/時間であれば、等間隔に 10 秒に 1 度ちょうど車両が出現するのではなく、毎秒ごとに、ポアソン分布 $Po\left(\frac{360}{3600}\right)=Po(0.1)$ に従って出現する。この場合、90.4% の確率で車が登場せず、9% の確率で車が 1 台出現し、0.5% の確率で車が 2 台出現し、0.01% の確率で 3 台以上同時に出現する。（四捨五入の関係で合計は 100% とならない）

表 3 車の設定流量

From/To [台/時間]	W	N1	N2	N3	S1	S2	S3	E
W		120	150	120	120	150	120	560 (P1) 840 (P2) 280 (P3)
N1	80		0	0	320	0	0	80
N2	100	0		0	0	400	0	100
N3	80	0	0		0	0	320	80
S1	80	320	0	0		0	0	80
S2	100	0	400	0	0		0	100
S3	80	0	0	320	0	0		80
E	560 (P1) 840 (P2) 280 (P3)	120	150	120	120	150	120	

※W→E, E→W の 2 段目、3 段目は、それぞれ P2, P3 で 3,600 秒から 7,200 秒の間だけ増加・減少した後の台数である。0 秒から 3,600 秒、7,200 秒から 10,800 秒までは P1 の流量と同じである。

評価方法は、1 台あたりの出発までの遅延時間である出発待ち時間と、出発後の遅延時間である遅れ時間の合計値とした。SUMO では出発地点に車両が既に存在しており、新たな車両が出発できない場合、1 秒遅らせて再度出発を試みる。このように、出発できずに待機している時間を出発待ち時間と呼ぶ。また、遅れ時間とは、出発地点から終

着地点までの実際の所要時間と、常に制限速度で走行した場合の時間との差を指す。これは、信号制御の影響による遅延時間を意味する。

さらに、参考指標として1台あたりのCO₂排出量も算出した。CO₂排出量はSUMOの標準的計算方法である、The Handbook of Emission Factors for Road Transport Ver 3の、4人乗りのガソリンカーモデルで計算している。これらの結果は、ポアソン分布による確率的な車両出現により偏りが生じる可能性がある。そのため、乱数発生器のシード値を変更して50回の試行を行った。

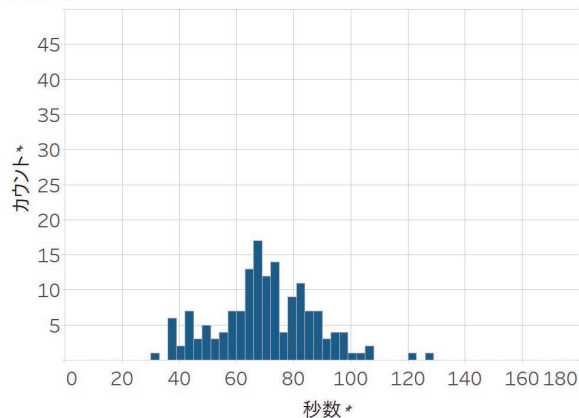
4.2 実験結果

まず、制約なし強化学習について、乱数シード値が1のシミュレーションの右側交差点のサイクル・スプリットと、中央交差点ー右側交差点間のオフセットを図3に示す。(以降、サイクル・オフセット・スプリットの図は乱数シード値が1のシミュレーションの値である。) サイク

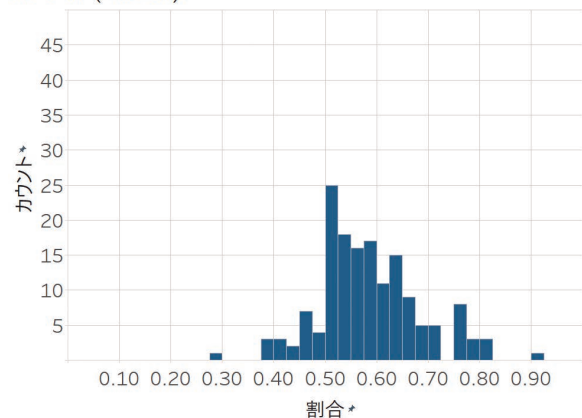
ルが最小30秒から最長130秒、スプリットが30%から90%まで、オフセットがマイナス40秒からプラス40秒までと大きく変動していることがわかる。

また、表4に遅れ時間・CO₂排出量の結果を示す。表では、50回の平均を1段目に示し、標準偏差を2段目に示した。(例：±10.0) P1では、定時間制御と比較して、時間制約のみを付けた強化学習が、遅れ時間とCO₂排出量が有意に減少した。時間制約及び連動制約の両方の制約をつけた強化学習では、遅れ時間に有意差はみられなかったが、CO₂では有意に減少した。また、P2では、定時間制御と比較して、連動制約のみ以外の強化学習で遅れ時間とCO₂排出量が有意に減少した。P3では、時間制約のみ、両方の制約をつけた強化学習が、遅れ時間とCO₂排出量が有意に減少した。連動制約のみの強化学習では、すべてのパターンで遅れ時間とCO₂排出量が大幅に増加した。なお、有意差検定はウィルコクソン符号付き順位検定を使用した。

サイクル



スプリット(主道路)



オフセット

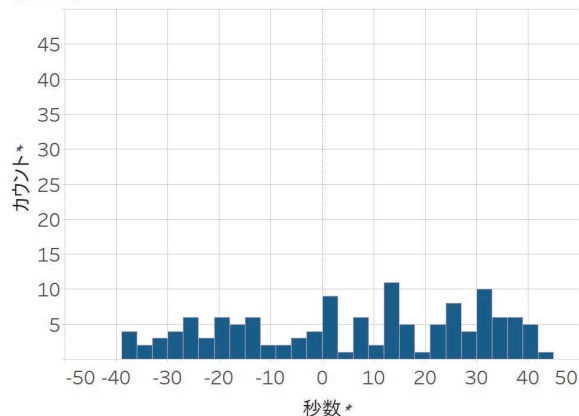


図3 制約なしの強化学習の交通工学のパラメーター

表 4 結果 (上段：平均、下段：標準偏差)

パターン	評価指標	定時間制御	制約なし 強化学習	連動制約のみ強化学習 (提案手法)	時間制約のみ 強化学習 (提案手法)	連動制約・時間制約 強化学習 (提案手法)
P1	遅れ時間 + 出発待ち時間	115.9 (± 23.2)	129.3 (± 21.2)	322.88 (± 56.0)	94.8*** (± 12.5)	113.3 (± 16.2)
	CO ₂ 排出量	530.3 (± 47.5)	511.1* (± 15.1)	679.7 (± 51.5)	434.8*** (± 13.3)	457.6*** (± 12.4)
P2	遅れ時間 + 出発待ち時間	224.3 (± 22.0)	186.8*** (± 21.9)	518.3 (± 70.5)	141.4*** (± 17.2)	174.5*** (± 24.0)
	CO ₂ 排出量	667.7 (± 17.3)	575.2*** (± 23.1)	750.0 (± 28.5)	492.6*** (± 19.1)	535.2*** (± 25.6)
P3	遅れ時間 + 出発待ち時間	97.5 (± 12.2)	99.1 (± 11.7)	182.3 (± 35.9)	77.2*** (± 5.5)	88.9** (± 10.1)
	CO ₂ 排出量	476.0 (± 26.3)	480.1 (± 13.5)	547.3 (± 29.4)	403.7*** (± 9.1)	425.4*** (± 14.2)

遅れ時間 + 出発待ち時間の単位は [秒/台]、CO₂ 排出量の単位は [g/台] である。

*p<0.05、**p<0.01、***p<0.001

4.3 考察

まず、CO₂ の排出量と遅れ時間との相関が大きいことがわかる。本実験ではどのような信号制御でも各車両の移動距離自体は変動しない。そのため CO₂ 排出量はアイドリング時間と停止回수에依存する。アイドリング時間と停止回数が減少すれば、当然遅れ時間が減少するため、CO₂ 排出量と遅れ時間の相関は大きい。

次に、制約なしの強化学習では図 3 で示す通り、サイクルやスプリット、オフセットが大きく変動していることがわかる。特に 30 秒という極めて短いサイクルでは、今回の交通量を処理するのに十分な長さではない。その場の個別最適を追求するがあまり、長期的な流れや全体最適がつかめていないと考える。また、現実世界において、人間の運転手は交通信号の長さを感じ覚的にある程度覚えており、その流れに合わせて運転している。しかし、今回の実験結果では、信号のサイクルやスプリットが毎回大きく変動しているため、混乱や効率の低下を招く可能性がある。このようなサイクルやスプリットが大きく変動する制御方式は人間の運転手にとって適切ではなく、現段階では実用的とは言えない。

そして、表 4 を見ると、定時間制御と制約をつけた強化学習の比較結果として、時間制約のみの強化学習が最も遅れ時間を小さくした。これは、秒数制約により、強化学習による早すぎる現示変更を回避できたためである。図 4 は中央交差点の主道路の青現示の秒数をヒストグラムで表したものである。図 4 から、制約なしや連動制約のみの場合、最も交通量が多い主道路の青現示が 3 秒で終了してしまうことがしばしば発生することがわかる。これを原因として、渋滞を引き起こしていることが多い。一方、時間制約を設けることで、主道路の青現示を最低でも 21 秒確保することで通行量のある程度確保し、強化学習による誤っ

た判断を防ぐことができた。

一方、連動制約は遅れ時間減少に効果がなかった、もしくは悪化させる結果となった。図 5 は右側交差点のサイクルを、図 6 は右側交差点の主道路青スプリットを、図 7 は中央交差点と右側交差点のオフセットをヒストグラムで表したものである。時間制約のみの場合、サイクルは 70 秒から 80 秒付近に、スプリットは 60% 程度に集中している。サイクルやスプリットを一定に保ちつつ、流量に合わせて現示時間の調整を適切に行っていることが確認できる。ただし、オフセットは一定ではなく、大きくバラついている。一方、連動制約を適用した場合、オフセットはある程度まとまったが、サイクルやスプリットが大きくバラついた。これは、中央交差点と右側交差点の連動が原因である。例えば、中央交差点の現示に追いつかれるのを待つために、既に車両が全て捌けているにも関わらず、右側交差点で青現示を続けてしまうことによる。その結果、サイクルが長くなり、渋滞を引き起こす。逆に、中央交差点の現示に追いつこうとすると、右側交差点のサイクルが短くなり、短時間での現示変更が強制される。特に従道路青信号が 3 秒で打ち切られることが多い。その結果、従道路に滞留車両が増加し、渋滞を引き起こす。強制的にオフセット協調を適用すると、サイクルやスプリットが大きく変動することで、全体として遅れ時間や CO₂ 排出量が増加することが示唆された。

また、P1 より流量が増加・減少した P2・P3 では、定時間制御と比較して、時間制約付きの強化学習のほうが遅れ時間の増加幅が小さく、減少幅が大きい。これは、強化学習が突発的な流量の増加・減少に対してリアルタイムに現示時間を調整した結果と考えられる。青現示を延長することで滞留車両を減少させたり、車がない場合に青現示を打ち切ったりすることで、遅れ時間の減少を実現したと推測する。

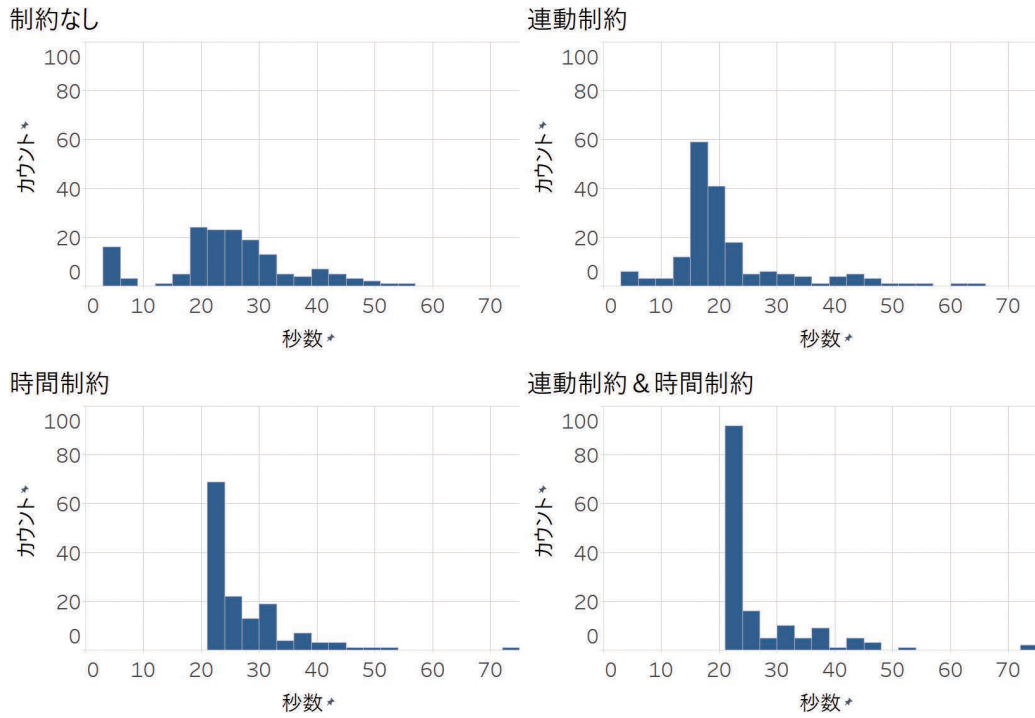


図4 中央交差点の主道路青現示の秒数

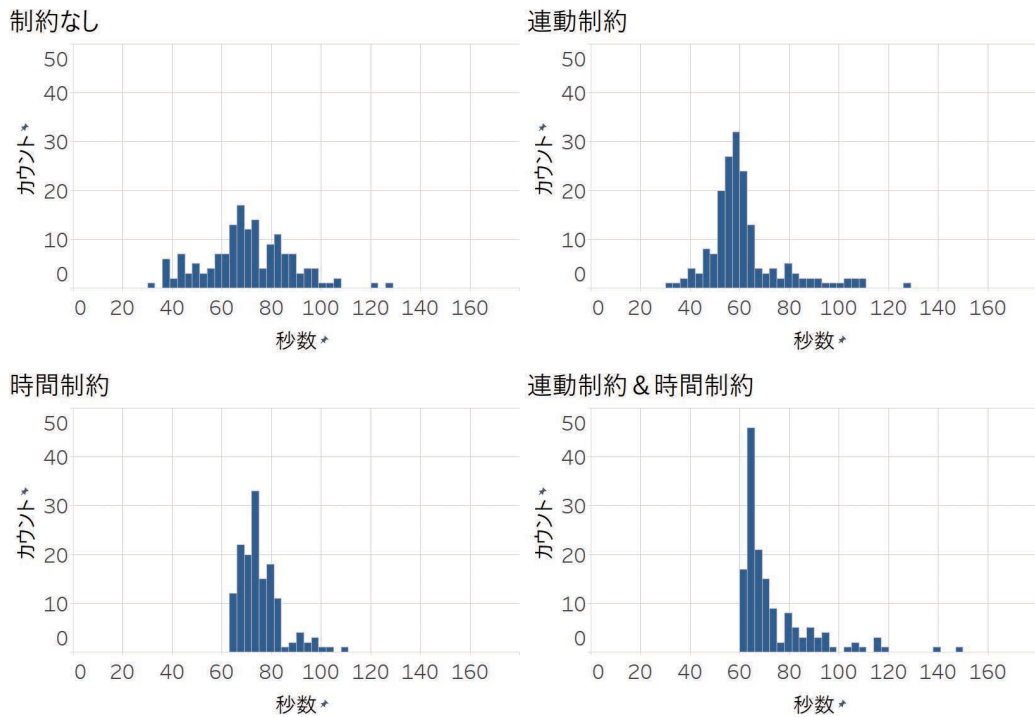


図5 右側交差点のサイクル

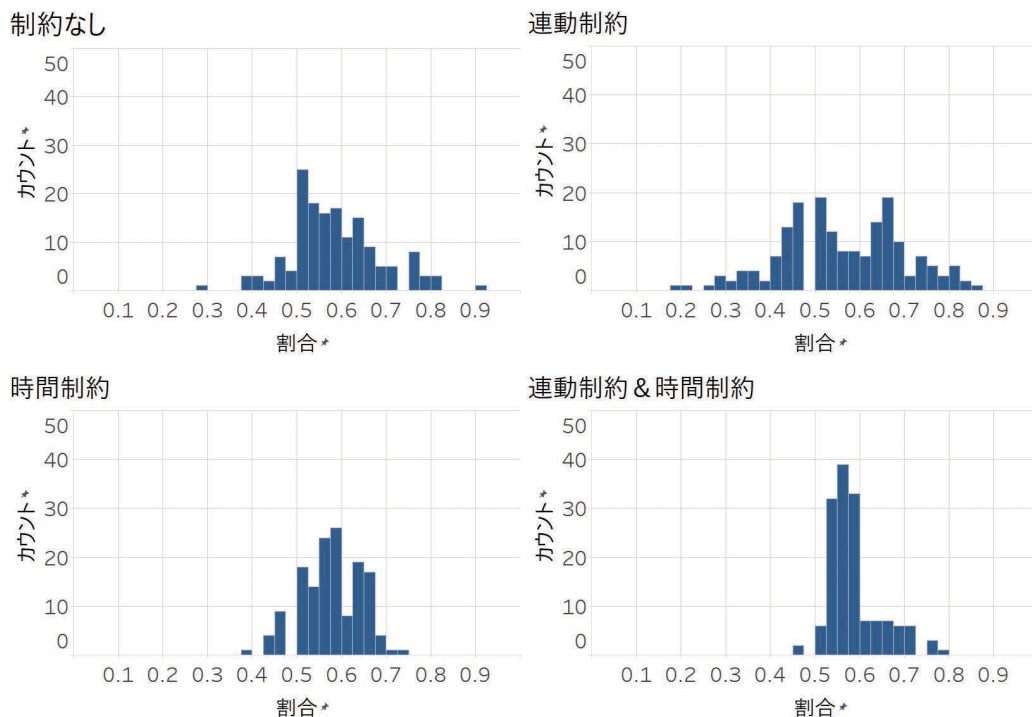


図 6 右側交差点のスプリット比率 (主道路青／総青時間)

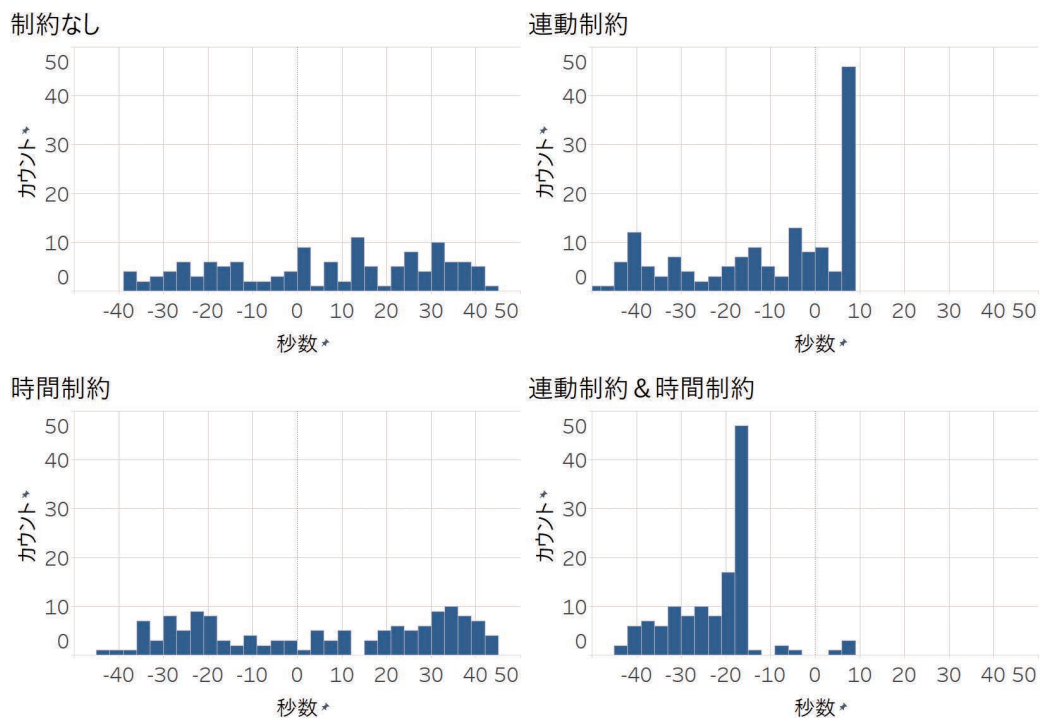


図 7 中央交差点と右側交差点のオフセット

5. むすび

本研究では、まず、従来の強化学習によるサブエリア信号制御は、サイクルやスプリットが大きく変動し、実用的でないことを明らかにした。次に強化学習と交通工学を組み合わせて、現示秒数の制約を行うと、サイクルとスプリットが安定し、有効であることを示した。しかし、オフセットを同時式オフセットに固定し、信号同士を連動させる制約は効果がなく、むしろ結果を悪化させた。サイクルおよびスプリットに関しては、本制約は妥当であると考えられる一方で、オフセットに関しては、交通工学的な知見と整合する適切な制約とは言い難く、現時点では適切な状態・行動・報酬の設計が発見できていない可能性がある。オフセットを適切に制約した強化学習による最適な現示制御については、今後の研究課題とする。

本研究を通じて、交通工学と強化学習の融合による効果的な信号制御手法の可能性が示された。これは、交通渋滞の緩和や環境負荷の低減に寄与し、今後の交通システムの発展に大きく貢献すると期待される。

最後に、交通工学についてご助言頂いたオムロンソーシアルソリューションズ株式会社 交通ソリューション事業本部 事業開発部の大谷龍治氏、谷口弘師氏、また執筆においてご助言頂いたオムロンソーシアルソリューションズ株式会社 事業開発統轄本部 技術創造センタの金森祥太氏に感謝する。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局. “WISNET2050.” 国土交通省. <https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001758738.pdf> (Accessed: Mar. 26, 2025).
- 2) 警察庁. “第5次社会資本整備重点計画（警察関連部分）について.” 警察庁. <https://www.npa.go.jp/bureau/traffic/seibi2/annzen-shisetu/institut/plan/pdf/juutenkeikaku.pdf> (Accessed: Mar. 26, 2025).
- 3) 伊澤茉莉花, 山本健生, “複数の交通流量における深層強化学習を用いた信号制御の実験と考察,” 人工知能学会全国大会, 2023, セッション ID 3Xin4-69.
- 4) K.-L. A. Yau et al., “A survey on reinforcement learning models and algorithms for traffic signal control,” *ACM Comput. Surv.*, vol. 50, no. 3, pp. 1-38, 2017.
- 5) F. Rasheed et al., “Deep reinforcement learning for traffic signal control: A review,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 208016-208044, 2020.
- 6) 一般社団法人 交通工学研究会, 平面交差の計画と設計 基礎編: 計画・設計・交通信号制御の手引, 丸善出版, 2018, pp. 184-215.
- 7) V. Mnih et al., “Human-level control through deep reinforcement learning,” *Nature*, vol. 518, pp. 529-533, 2015.
- 8) M. Wiering, “Multi-agent reinforcement learning for traffic light control,” in *ICML '00: Proc. Seventeenth Int. Conf. Mach. Learn.*,

2000, pp. 1151-1158.

- 9) B. Abdulhai et al., “Reinforcement learning for true adaptive traffic signal control,” *J. Transp. Eng.*, vol. 129, no. 3, pp. 278-285, 2003.
- 10) L. Li et al., “Traffic signal timing via deep reinforcement learning,” *IEEE/CAA J. Autom. Sin.*, vol. 3, no. 3, pp. 247-254, 2016.
- 11) 佐藤季久恵 他, “Deep Q-Network を用いた交通信号制御手法の提案,” 2017年度人工知能学会全国大会 (第31回), 2017, セッション ID 312-OS-13b-4.
- 12) 韓天陽 他, “予測深層強化学習の単独交差点信号制御への適用性に関する一考察,” 生産研究, vol. 73, no. 2, pp. 107-112, 2021.
- 13) 桑原雅夫 他, “強化学習を用いた信号制御パラメータ最適化に関する基礎的研究,” 第42回交通工学研究発表会, 2022, pp. 563-570.
- 14) H. Wei et al., “CoLight: Learning network-level cooperation for traffic signal control,” in *CIKM '19: Proc. 28th ACM Int. Conf. Inf. Knowl. Manag.*, 2019, pp. 1913-1922.
- 15) T. Nishi et al., “Traffic signal control based on reinforcement learning with graph convolutional neural nets,” in *21st Int. Conf. Intell. Transp. Syst. (ITSC)*, 2018, pp. 877-883.
- 16) Y. Wang et al., “STMARL: A spatio-temporal multi-agent reinforcement learning approach for cooperative traffic light control,” *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 21, no. 6, pp. 2228-2242, 2022.
- 17) P. A. Lopez et al., “Microscopic traffic simulation using SUMO,” in *21st Int. Conf. Intell. Transp. Syst. (ITSC)*, 2018, pp. 2575-2582.
- 18) L. N. Alegre, “SUMO-RL.” GitHub. <https://github.com/LucasAlegre/sumo-rl> (Accessed: Mar. 26, 2025).

執筆者紹介



山本 健生 YAMAMOTO Yoshiki
オムロン ソーシア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
専門: 数学・情報工学
所属学会: 人工知能学会



伊澤 茉莉花 IZAWA Marika
オムロン ソーシア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
専門: 情報工学
所属学会: 人工知能学会

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。

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

ーファクトリーオートメーションー



リアルタイムシステムで PCI Express を適用するために必要な高精度同期技術について

中谷 好博, 西村 康裕

オムロンが開発するマシンオートメーションコントローラの NJ シリーズや NX シリーズでは、内部の CPU (Central Processing Unit) と構成するデバイス間が PCIe (PCI Express) を用いて接続されている。PCIe の特長として DMA (Direct Memory Access) を用いて CPU を介さずに直接メモリアクセスを実行し、データ転送を実行することが可能である。マシンオートメーションコントローラといったリアルタイムシステムに PCIe を導入するためには、メモリリソースが競合しないように DMA 転送タイミングを制御する必要がある。

従来は 1 つの CPU による集中制御であったため、DMA 転送タイミングの制御が容易であり、メモリリソースが競合しないように制御することができていた。近年のリアルタイムシステムでは多機能でありつつ高速・高精度な制御性能が求められている。これらを両立するために複数の PCIe デバイスが CPU との間で DMA 転送する分散処理アーキテクチャが必要となる。リアルタイム処理に影響を与えないようにするためには、各 PCIe デバイスが制御周期と高精度に同期したタイミングでデータ転送を行う必要がある。

本稿では PCIe デバイスが CPU とのリソース競合を回避する技術とその技術を実現するために必要不可欠であるハードウェアによる高精度時刻同期技術を提案する。それにより 39 ナノ秒以下という時刻同期精度を実現することができ、複数の PCIe デバイスが CPU と DMA 転送する際にリアルタイム処理への影響を抑えられる。

High-Accuracy Synchronization Technology for PCI Express in Real-Time Systems

NAKATANI Yoshihiro and NISHIMURA Yasuhiro

In the NJ and NX series of OMRON's machine automation controllers, the internal CPU (Central Processing Unit) and the internal devices are connected using PCIe (PCI Express). One of the features of PCIe is that it allows direct memory access (DMA) to be executed data transfer without going through the CPU. To introduce PCIe into real-time systems such as machine automation controllers, it is necessary to control the DMA transfer timing to avoid memory resource conflicts.

Traditionally, centralized control by a single CPU made it easy to control DMA transfer timing and avoid memory resource conflicts. However, modern real-time systems require multifunctionality as well as high-speed and high-precision control cycles. To achieve both, a distributed processing architecture is needed where multiple PCIe devices perform DMA transfers with the CPU. To prevent impacts on real-time processing, each PCIe device must transfer data at timings synchronized with the control cycle and with high precision.

This paper proposes a resource conflict avoidance technology for PCIe devices with the CPU and a high-precision time synchronization technology using hardware, which is essential to realize this technology. Synchronization accuracy can be achieved less than 39 ns. This allows multiple PCIe devices to perform DMA transfers with the CPU while minimizing the impact on real-time processing.

Contact : NAKATANI Yoshihiro yoshihiro.nakatani@omron.com

1. まえがき

オムロンが開発しているマシンオートメーションコントローラ¹⁾のNJシリーズやNXシリーズ（以下、コントローラ）は高速高精度な制御を実現するリアルタイムシステムである。コントローラは複雑な制御処理を高速に実行するために高性能な汎用 CPU（Central Processing Unit、以下汎用 CPU）を用いてリアルタイム制御処理を実行している。汎用 CPU を用いることで、世の中の半導体技術の進化に追従してその処理性能の向上を図ることができている。しかし、汎用 CPU はリアルタイムシステムに専用設計されているわけではないため、定周期かつ低遅延で制御を実行するために必要なタイマ回路がほとんど実装されていない。低遅延で処理を実行するためにはタイマ割り込み発生都度どの処理を実行するのかを判断するのではなく、処理に対応したタイマ割り込みを発生させることが望ましいため、複数のタイマ回路が必要となる。汎用 CPU を使用するだけでは、リアルタイムシステムを制御するために必要なタイミングを正確に複数発生させることが難しいといった課題がある。

この課題を解決するために、コントローラでは独自のタイマデバイス（以下、タイマデバイス）を搭載している。タイマデバイスには複数のタイマ回路が実装されており、リアルタイムシステムを制御するために必要なタイミングで正確な割り込みを複数発生させることができる。その割り込みに応じて汎用 CPU が処理を実施することにより、定周期かつ低遅延な処理を実現している。

汎用 CPU は一般的に PCI Express²⁾（Peripheral Component Interconnect Express 以下、PCIe）という広帯域な汎用バスインターフェースが外部デバイスと接続する標準バスとなっている。コントローラにおいても汎用 CPU とタイマデバイスとの接続には PCIe を使用している。

また、コントローラではタイマデバイス以外に汎用 CPU からフィールドバスやローカルバスへアクセスするインターフェース変換デバイスとの接続にも PCIe を使用している。汎用 CPU と PCIe デバイス間のデータ転送においては、汎用 CPU が PCIe デバイスに対して Read または Write を指示するプログラム転送によって汎用 CPU が持つメモリと PCIe デバイスとの間でデータの転送が実施される。しかし、データ転送のためには汎用 CPU が指示する必要があり、転送オーバーヘッドが大きい上に汎用 CPU の演算リソースが消費されるといった課題がある。

その課題の解決のために一般的に PCIe の通信では DMA（Direct Memory Access）転送という汎用 CPU の演算処理部分を経由せずにデバイス間で直接的にメモリ領域のデータにアクセスできる機能を使用する。DMA 転送を活用することによって、汎用 CPU の演算処理に負荷をかけずに汎用 CPU が持つメモリと PCIe デバイス間でデータを高速に転送することができる。

近年ではコントローラにはリアルタイム性が必要な制御処理以外にも他デバイスとの通信など非リアルタイムの機能追加の要望がある。それらの非リアルタイム機能をコントローラに搭載することにより、汎用 CPU の演算処理の負荷が上昇している。リアルタイム処理と非リアルタイム処理が 1 つの CPU に共存することでリソース競合が発生し、制御処理のリアルタイム性能へ及ぼす影響が顕著になりつつある。そうした中、コントローラを始めとするリアルタイムシステムにおいては、非リアルタイム処理を制御処理用 CPU（以下、制御用 CPU）とは別の CPU（以下、非リアルタイム用 CPU）で制御処理以外の処理を実行する分散アーキテクチャが考えられている。分散アーキテクチャの一形態として、非リアルタイム用 CPU と制御用 CPU が PCIe によって接続され、DMA を使用したデータ交換を実現するアーキテクチャがある。

非リアルタイム用 CPU から制御用 CPU へのデータ転送は制御周期とは非同期で行うが、PCIe の標準機能にはデータ転送タイミングを制御する仕組みがない。データ転送タイミングによっては制御用 CPU が重要な制御処理実行中にデータ転送されることでメモリアクセスに関するリソース競合が発生し、制御処理に影響する懸念が生じている。データ転送による制御処理への影響を最小化するためには、制御処理の重要な処理期間を避けてデータ転送を行えば良い。そのためには制御処理と DMA 転送のタイミングを高精度に同期して制御する必要がある。

この機能を実現するため本稿では、複数の PCIe デバイス間において正確な時刻同期を実現する技術と、DMA 転送タイミングを制御する技術の組み合わせによるデータ転送方法を提案する。

2. リアルタイムシステムにおける PCIe の利用

2.1 コントローラの従来構成

リアルタイムシステムを実現する上で必要となるインターフェース変換機能とタイマ機能を持ったデバイス（以下、リアルタイムサポートデバイス）とコントローラの汎用 CPU で構成される従来のコントローラシステムの構成図を図 1 に示す。汎用 CPU とリアルタイムサポートデバイスは PCIe を介して接続されており、汎用 CPU 側が PCIe の RP（Root Port）、リアルタイムサポートデバイス側が PCIe の EP（Endpoint）として接続されている。

図 1 に示すようにリアルタイムサポートデバイスはその内部にタイマデバイスを有している。タイマデバイス内には FRC（Free Run Counter）と呼ぶカウンタを持っている。FRC は時刻情報としてナノ秒単位で常に高精度にカウントアップしている。タイマデバイスは事前に設定した値に FRC が達すると、PCIe が持つ機能の一つである MSI（Message Signal Interrupt）を用いて汎用 CPU に対して割り

込みを通知する。汎用 CPU は割り込み通知を受けることによって、割り込みを起点にして制御処理を実行することができる。

タイマデバイスは高精度な FRC を元に割り込みを一定周期で発生させることができるため、汎用 CPU は定周期に制御処理を実行することができる。

さらにリアルタイムサポートデバイス内には、図 1 に示すように外部 IF やコントローラのローカルバスへのデータ転送デバイスとして DMAC (DMA Controller) を有している。汎用 CPU が PCIe を介して DMAC に DMA 転送の指示を与えることで外部 IF である Ethernet やローカルバスへのデータ転送を制御に影響のないタイミングで実行することができる。

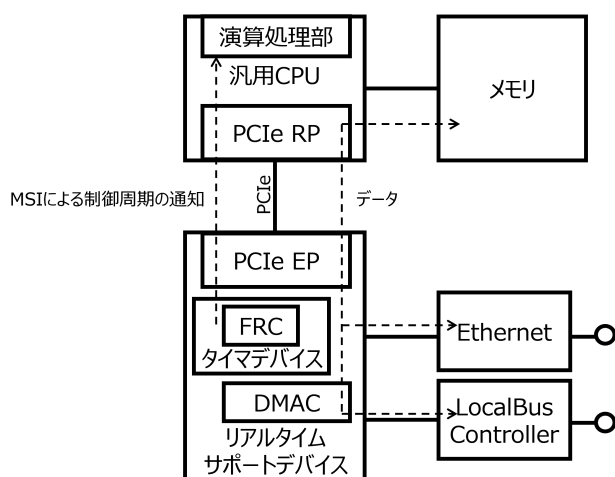


図1 従来のコントローラのPCIe接続構成

2.2 コントローラの分散処理システムへの進化

近年ではコントローラには制御以外に通信など他の機能の搭載も要求されてきている。これらの要求に応えるため、コントローラには制御以外の機能の搭載が進められている。しかし、追加される機能には高い演算処理性能が求められる場合が多く、追加機能を搭載することにより制御処理に悪影響が発生するといった課題が発生してきている。

制御性能と追加機能を両立するために、コントローラを始めとしたリアルタイムシステムでは、追加機能を非リアルタイム用CPUへオフロードする分散処理システムへの進化が考えられる。図2に分散処理を実施するためのリアルタイムシステムにおける汎用CPU間の接続例の図を示す。非リアルタイム用CPUと制御用CPUは、DMACを内蔵したCPU間転送デバイスを介してPCIeで接続されている。1つの制御用CPUに対して非リアルタイム用CPUは複数台接続することが可能である。非リアルタイム用CPUを複数台接続することで追加する機能の規模に応じてシステムを拡張することができる。非リアルタイム用CPUは

CPU間転送デバイスのDMACを使用して制御用CPUとデータ交換を行う。これにより、それぞれのCPUの演算処理部を介さずに必要なデータ転送を行うこととなり、演算処理への負荷を低減した状態でのデータ転送が可能となっている。

図2に示す構成においては、非リアルタイム用CPUが持つメモリと制御用CPUが持つメモリとの間でDMAによる転送が実施される。DMACによるデータ転送の実施タイミングはDMACを起動するタイミングによって決まる。非リアルタイム用CPUは制御用CPUがリアルタイム処理をしているタイミングかどうかに関わらずDMACを起動するため、データ転送は制御処理と非同期に行われることになる。リアルタイム処理中に制御用CPUは頻繁にメモリにアクセスをしており、リアルタイム性を維持するためにはリアルタイム処理中にメモリアccessを阻害しないことが重要になる。非リアルタイム用CPUからのDMAによるメモリアccessが制御用CPU内部におけるリアルタイム処理中に実施された場合、制御用CPU内部でリソース競合が発生し、リアルタイム処理が規定時間内に終了しない可能性が発生する。さらに制御用CPUに複数の非リアルタイム用CPUが接続されるシステムにおいては、DMAによるデータ転送量も増加して制御用CPUのリアルタイム性能に及ぼす影響はより増大することになる。

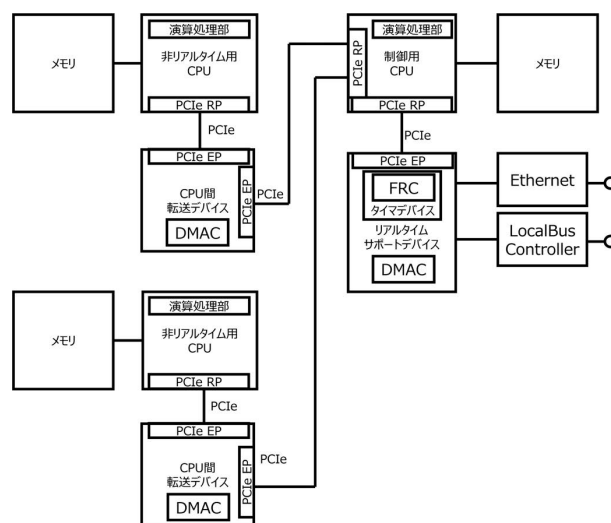


図2 分散型リアルタイムシステムのCPU接続図

2.3 PCIe RP間接続のためのDMAC構成における課題

DMA転送するための指示は制御用CPU及び非リアルタイム用CPUともにFW (Firmware) で実現している。DMA転送に必要な転送先のメモリアドレスを入手するためにはFWが転送先とハンドシェイクを行って、これを取得する必要がある。FWによるDMA転送制御を簡略化するためには転送先アドレスを把握しなくても制御用CPUと非リアルタイム用CPU間でDMAによる転送が実行できるよう

にすることが望ましい。これを実現する CPU 間転送デバイスの DMAC 部分として、図 3 に示すような TX 側 DMAC と RX 側 DMAC を備えた構成³⁾ が考えられる。各 CPU がそれぞれ RX 側 DMAC を制御するため、各 CPU が管理するメモリアドレスを RX 側 DMAC に設定することができる。

リアルタイムシステムでは、制御処理を実行する際には処理に必要なデータが全て揃っている必要があるため、送信したデータが確実に相手側で受信されていることが重要である。そのため各 CPU はそれぞれの RX 側 DMAC を起動し、受信可能状態にしておく。これにより、データ送信時において CPU 間転送デバイス内に送信データを滞留させることなくメモリ領域に送信することができ、送信した直後に確実に相手側で受信することができる。

データを転送する際はそれぞれの CPU がそれぞれの TX 側 DMAC を起動する。TX 側 DMAC はそれぞれの CPU のメモリからデータを取得し、RX 側 DMAC へ渡し、相手先のメモリへデータを転送する。これにより送信する際のタイミングはそれぞれの CPU が決めることができる。制御用 CPU はリアルタイム性に影響のある処理をしている期間は、DMAC を起動しないことによってデータ送信を抑制することが可能である。一方で受信については、DMAC を常に受信可能状態にしておく必要があるため、受信するデータの転送を止めることはできない。制御用 CPU へデータが転送されてくるタイミングは非リアルタイム用 CPU 側 DMAC の送信タイミングに依存する。その結果、DMA 転送タイミングによって制御用 CPU のリアルタイム性能に影響を与えるといった課題が発生する。

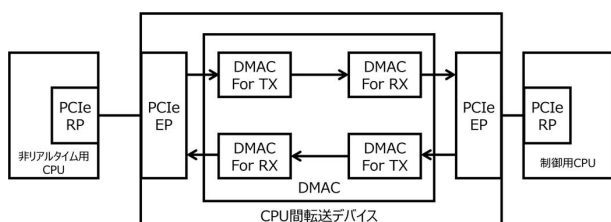


図 3 CPU 間転送デバイスの DMAC 構成

3. 提案する手法と新たに発生する課題

先出の DMA 転送タイミング課題の解決には、各 PCIe に接続される DMA が制御用 CPU のリアルタイム処理期間を避けて転送する必要がある。これを実現するために、制御用 CPU と高精度に時刻同期するタイマ機能と、このタイマにより転送タイミングを自動で制御する DMAC によるデータ転送手法を提案する。

3.1 DMAC の転送タイミング制御

リアルタイム処理への影響の最小化を目的として、非リアルタイム用 CPU から制御用 CPU へのデータ転送の中

断／再開を自動で行う DMA 転送マスク機能⁴⁾ を提案する。

図 4 に DMA 転送マスク機能のタイミングチャートを示す。転送マスク機能は CPU 間転送デバイスが有する。マスクタイミングをリアルタイムサポートデバイスから HW による信号によって配信する方法もあるが、この方法では CPU 間転送デバイスが増える毎にマスク信号を追加する必要がある。HW の変更無く柔軟に複数の CPU 間転送デバイスに転送マスク機能を追加するために、CPU 間転送デバイスでマスクタイミングを生成する方式とする。転送マスクが ON の状態では CPU 間転送デバイスは非リアルタイム用 CPU から制御用 CPU に対して DMA 転送を一時停止させる。一時停止は CPU 間転送デバイスの RX 側 DMAC に対して、次の PCIe パケットの送出を停止させることで実現する。転送マスクが OFF となった後、DMA 転送を再開させる。PCIe はデータの塊をパケットとして転送しており、パケットの途中で転送を停止できない。一時停止時に即座に転送を停止し、リアルタイム処理への影響を最小限に抑えるために、PCIe のパケットサイズを最小の 128 Byte とする。それによってパケット数が増えるために転送効率が悪化し転送帯域は低下するが、転送マスクが ON になってから DMA 転送が一時停止するまでに時間を最小化することができ、リアルタイム処理の定周期性を確保しやすくなる。

転送マスクは CPU 間転送デバイスごとに複数設定することができる。制御用 CPU に複数の非リアルタイム用 CPU が接続されていても、DMA 転送タイミングを個別に設定することが可能なため、メモリ競合を低減させることが可能となる。

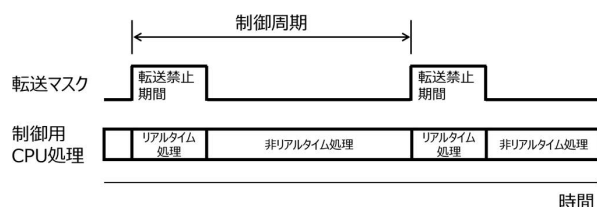


図 4 DMA 転送マスク機能

3.2 PCIe ノード間の高精度時刻同期と新たに発生する課題

前述した DMA 転送マスク機能は制御用 CPU 上の FW がマスクの開始時刻と終了時刻を CPU 間転送デバイスに設定することによって、CPU 間転送デバイス内の FRC がその設定値と一致したタイミングで DMA 転送の一時停止／再開を制御するものである。この場合、制御用 CPU は制御サイクルごとに新たなマスク設定値を CPU 間転送デバイスに設定する必要があるが、FW の負荷となる。この課題を解決するため、CPU 間転送デバイスが DMA 転送マスク機能の設定値を周期的に更新する構成とする。すなわち、コントローラは定周期で動作しているため、制御用 CPU 上の FW から CPU 間転送デバイスに対して、周期と転送禁止

期間の初期設定を行うことで DMA 転送マスク機能は制御周期と同期されたタイミングで有効に機能する。初期設定以降は FW による周期的にマスク設定すると言った制御は不要となる。この DMA 転送マスク機能を制御周期に同期して機能させるためには、図5に示すように CPU 間転送デバイスにタイマデバイスを持たせ、リアルタイムサポートデバイスのタイマデバイスと CPU 間転送デバイスのタイマ値が高精度に同期する必要がある。コントローラと外部機器間の制御で要求される同期精度は 1 マイクロ秒以下である。この同期精度を達成するためにコントローラの設計としては制御処理の揺らぎをその 10% 以下である 100 ナノ秒以下に抑えることを目標とする。

この目標を実現するためには、タイマデバイス間の高精度な時刻同期が不可欠である。DMA 転送を一時停止させたいタイミングによっては、最大で 128 Byte の転送が行われた後に DMA 転送が実際に停止される。すなわち、転送が停止するまでの最大時間は PCIe Gen1 X1 で 128 Byte を転送する時間に等しい 61 ナノ秒となる。機器間の同期精度の目標値が 100 ナノ秒以下であることから、DMA の一時停止にかかる最大時間である 61 ナノ秒を考慮し、リアルタイムサポートデバイスのタイマデバイスと CPU 間転送デバイスのタイマデバイスのタイマ値が 39 ナノ秒以下という高精度で時刻同期することをタイマデバイス間の同期目標とする。各タイマデバイスの高精度な時刻同期は、タイマの基準となる FRC が高精度に値を同期することで実現できる。

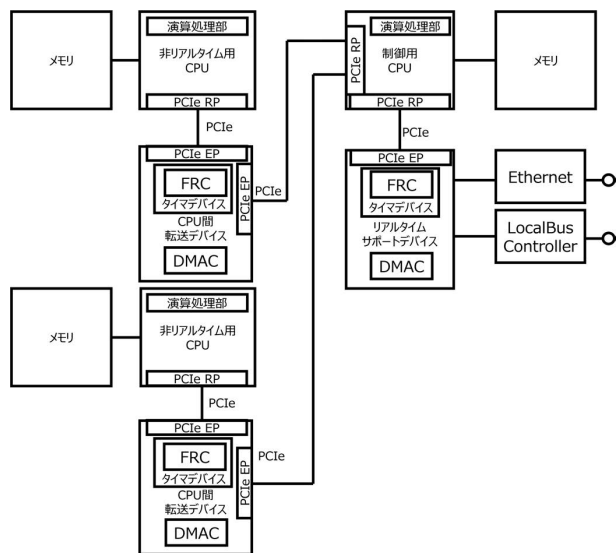


図5 CPU 間転送デバイスにタイマデバイスを搭載した構成図

CPU 間転送デバイスとリアルタイムサポートデバイスではそれぞれ独立した基準クロックを使用するため、各基準クロックの偏差によってそれぞれの FRC が徐々にずれていく現象が発生する。基準クロックに使用されるクロッ

ク発振器は比較的精度の良いもので 1 ミリ秒につき最大で ± 25 ナノ秒程度の偏差を持っている。これらの発振器を図5に示す CPU 間転送デバイスにタイマデバイスを搭載した構成の基準クロックとして採用した場合、CPU 間転送デバイス側のクロックとの精度は、1 ミリ秒につき 2 倍の最大 ± 50 ナノ秒ずれる可能性がある。各 CPU 間転送デバイスの FRC 値を高精度に同期するためには、定期的に CPU 間転送デバイスの FRC の値を、基準となるリアルタイムサポートデバイスの FRC の値に補正をする処理が必要である。従来において採用していた時刻同期の実装方法では FW が各 FRC の時刻情報を取得し、対象の FRC を定期的に補正していた。高精度に FRC 値を同期するためには補正周期を短くする必要があるが、これは制御用 CPU の演算リソースの消費増大につながり制御性能に影響が出てしまう。

一例として、FW で時刻同期することを想定して 8 ミリ秒に 1 回補正を行ったケースを考えると、その 8 ミリ秒の間に最大 ± 400 ナノ秒のずれが発生する可能性がある。前述した通り必要な同期精度は 39 ナノ秒以下のため、 ± 400 ナノ秒の時刻情報のずれは大きな課題となる。その解決策として高精度時刻同期技術を提案する。

4. 高精度時刻同期課題解決手法の提案

4.1 HW による時刻同期

前述の DMA 転送マスク機能を高精度に機能させるためには、PCIe デバイス同士が同じ時刻情報を持って、正確に同期する必要がある。従来においてデバイス間の時刻同期にはいくつかの手法が取られている。その手法の 1 つを図6を用いて説明する。プライマリとなる FRC を持ったデバイスからトリガ信号を出力する。プライマリ/レプリカ双方の FRC はトリガ信号の受信時の値を保存する。それぞれの保存した値を比較し、その差分をレプリカの FRC に対して補正をかけることで時刻を同期させている。

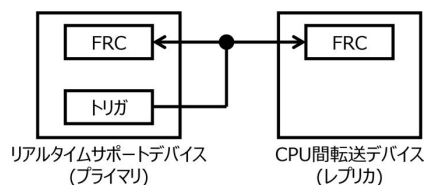


図6 従来の時刻同期手法

従来は FW によって、プライマリに対してトリガ発行を指示する。その後 FW がプライマリ/レプリカの FRC の値を取得し、FW が取得した FRC の値の差分を元にレプリカの FRC 補正していた。この方法は定期的に高頻度に行う必要があり、FW の負荷が増大する傾向がある。FW の負荷を軽減し、より高速に時刻補正を行うために HW (Hard-

ware) によって処理を実現⁵⁾ することを提案する。

図 7 に HW による時刻補正の構成図を示す。プライマリはトリガ発行にตอบสนองして FRC の値を取得し、その値を PCIe とは独立した 1 本の専用線を用いた非同期シリアル伝送にてレプリカに直接転送できる構成とした。レプリカが複数存在している状態においても、プライマリからの FRC データ送信は複数のレプリカに対してマルチドロップ接続によってブロードキャストされる。

図 8 に時刻補正のタイミング図を示す。最初にプライマリはトリガを発行する。プライマリ／レプリカはそれぞれ、トリガ受信時の FRC 値を保存する。次にプライマリはその保存した FRC 値をレプリカに伝送する。レプリカはプライマリからの FRC 値と自身が保存している FRC 値とを比較し、その差分をレプリカの FRC に対して補正処理を実行する。これらにより、FW を使用せず HW のみの実装で時刻同期を実現することができる。

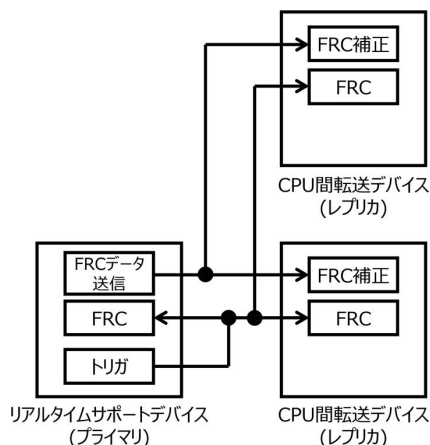


図 7 HW による時刻補正の構成図

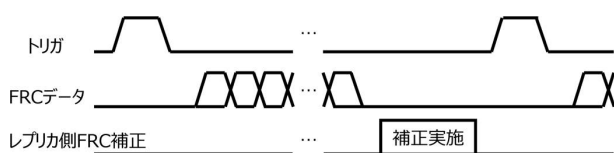


図 8 HW による時刻補正のタイミング図

5. 本提案手法の効果

前章で提案した高速な時刻同期を行うために、本章では HW を用いた時刻同期の実機確認を行い、その結果を図 9、図 10 に示す。

時刻同期実施後、プライマリとレプリカの時刻のずれ幅の大きさは補正処理によっても変わるが、ずれ幅に対して最も影響する要素が補正周期である。そこで、実機確認では補正周期を 8 ミリ秒と 250 マイクロ秒で比較した。

本実機確認で採用した補正処理について説明する。時刻同期におけるレプリカ側での補正処理の実装は様々ある。もっとも単純にはレプリカ側が認識したプライマリ側の

FRC 値をそのままレプリカ側にコピーする方法があるが、それでは FRC 値が大きく変化する場合があり、FRC を使用しているタイマへの影響が出てしまう。そこで、レプリカ側の FRC 値を少しずつ早める、または遅くするなどの補正処理を行うのが一般的である。今回の補正処理では、補正周期が 8 ミリ秒の場合は 70 マイクロ秒毎に 1 ナノ秒の補正、補正周期が 250 マイクロ秒の場合は 1 マイクロ秒毎に 1 ナノ秒の補正を実施することとし、最大 100 ナノ秒の補正を行える回路とした。

5.1 HW を用いた時刻同期手法の実機確認

前章で提案した HW を用いた時刻同期を実施した結果を図 9 に示す。図 9 では図 2 において、リアルタイムサポートデバイス側と CPU 間転送デバイス側の FRC の一部のビットをオシロスコープにて観測した波形である。リアルタイムサポートデバイス側の波形の立ち上がりをトリガにし CPU 側転送デバイスの波形を観測したものである。図 9 では HW にて 8 ミリ秒に一度補正処理を実行しており、補正元である制御用 CPU 側の FRC と比較して、 -65.2 ナノ秒 ~ -24.8 ナノ秒 (センター: -45.0 ナノ秒) の精度となっている。FRC 値の補正する際は徐々に FRC 値を増減していく手法を採用しているため、トリガ発生のタイミングから FRC 値の補正が完了するまでには時間がかかる。そのため、FRC 値の補正が完了した段階においては、トリガ発生時に発生していた FRC 値のずれ量の補正が完了しているが、補正完了までにかかる時間の間に FRC ずれが発生しており、そのずれが 24.8 ナノ秒という形で見えていると考える。また、FRC の補正が完了してから次の補正が開始されるまでの 8 ミリ秒の間に 40.4 ナノ秒の FRC ずれが発生したと考えられる。

本手法によって、HW で問題なく時刻同期が実現できることがわかった。8 ミリ秒で時刻同期する場合、理論上最大 400 ナノ秒の偏差が出る可能性があったが、今回実験に用いた発振器の精度、温度等の条件が比較的良く、時刻のずれ幅の大きさについては約 65 ナノ秒が観測されている。

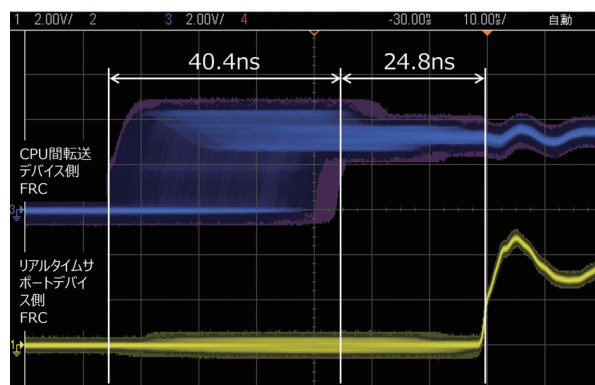


図 9 8 ミリ秒周期で時刻補正時の FRC 出力

5.2 HW による時刻補正周期短縮化の効果

HW で高精度な時刻同期を実現するため、高頻度に時刻補正を実施した結果を図 10 に示す。HW で補正するようにしたため、250 マイクロ秒という高速な補正周期を実現することができた。その同期精度は -6.5 ナノ秒 $\sim +4.5$ ナノ秒（センター： -1.0 ナノ秒）となっており、8 ミリ秒間隔の補正よりも大幅に同期精度が向上している。

今回実験に使用したタイマデバイス内部のクロック周期は 8 ナノ秒であり、トリガ信号は 8 ナノ秒のクロックでラッチされる。トリガ信号とクロックとは非同期であるため、トリガ信号をラッチするタイミングによって ± 8 ナノ秒の時刻同期誤差は発生する。そのため、図 10 においてリアルタイムサポートデバイスよりも CPU 間転送デバイスの方が最大 $+4.5$ ナノ秒進んだ状態が観測されたものと考えられる。

補正周期を短くすることで、FRC 値の同期精度を大幅に改善することが実機評価でも確認でき、目標である 39 ナノ秒以下である 11 ナノ秒の同期精度を実現することができた。

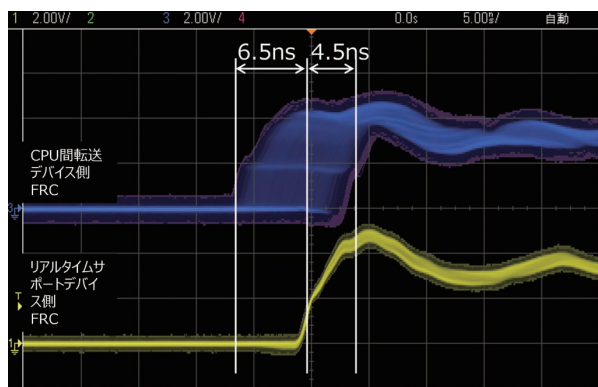


図 10 250 マイクロ秒周期で時刻補正時の FRC 出力

この HW による時刻同期技術によって、リアルタイムサポートデバイスと CPU 間転送デバイスの FRC 値が高精度に同期することができるため、DMA 転送マスク機能を高精度に機能させることができる。DMA 転送マスクは CPU 間転送デバイスごとに設定することができるため、複数の CPU 間転送デバイスからの DMA 転送においてもメモリ競合なく DMA 転送することができ、リアルタイムシステムへの影響を最小限に抑えることができる。

6. むすび

本稿ではリアルタイムシステムに PCIe を適用するために必要な技術について論説した。コントローラの進化の一形態として分散型リアルタイムシステム構成を示した。分散型リアルタイムシステムでは複数の PCIe デバイスからの DMA 転送によってリアルタイム性能への影響が発生するといった課題に対し、DMA 転送マスク機能によるリアルタイム処理中の DMA 転送を抑制する仕組みを提案した。DMA 転送マスク機能を効果的に機能させるためには

リアルタイムサポートデバイスと CPU 間転送デバイスの各タイマデバイスのタイマ値を同期させて DMA 転送タイミングを高精度に同期させるといった新たな課題が発生した。これに対して HW による時刻同期技術を新たに提案し、高頻度に時刻同期を実施することにより、時刻同期の目標値を達成することができた。

今後においても、リアルタイムシステムに PCIe デバイスが活用されていくことが予想される。特に Time Sensitive Network (TSN) など、コントローラは外部機器とのリアルタイム性を維持した接続が求められていくと考える。コントローラにとって時刻同期はリアルタイムシステムとして重要な要素となり、コントローラ内の時刻同期精度が外部機器との同期精度とも密接に関係している。本稿で提案した時刻同期技術は今後、外部機器と高精度に時刻同期するために重要な技術となる。

参考文献

- 1) オムロン株式会社. マシンオートメーションコントローラ NJ/NX シリーズ, 第 AH 版. (2025). Accessed: Feb. 17, 2025. [Online]. Available: https://www.fa.omron.co.jp/data_pdf/cat/nj_nx_sbca-100_14_2.pdf
- 2) PCI-SIG, PCI Express Base Specification Revision 2.1, 2009.
- 3) オムロン株式会社, “転送装置、情報処理装置、および、データ転送方式,” 特許第 7326863 号, Aug. 7, 2023.
- 4) オムロン株式会社, “情報処理装置,” 特許第 7259537 号, Apr. 10, 2023.
- 5) オムロン株式会社, “制御装置,” 特開 2022-119703, Aug. 17, 2022.

執筆者紹介



中谷 好博 NAKATANI Yoshihiro
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：電子工学



西村 康裕 NISHIMURA Yasuhiro
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
ハードウェア開発部
専門：情報工学
技術士（情報工学部門）

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。
PCIe, PCI Express は PCI-SIG の登録商標です。
Ethernet は富士フイルムビジネスソリューション株式会社の登録商標です。

狭路走行のためのスーパー楕円を用いた Model Predictive Control による軌道計画の障害物制約の改良

殿谷 徳和, 向井 滋春, 齊藤 ゆみ

本稿では、Model Predictive Control (MPC) を用いた、自律走行ロボットの軌道計画技術に関する手法を述べる。MPC では、ロボットが与えられた目標を達成するために、時間とともに位置や姿勢を変化させるような速度指令を算出する。MPC の軌道計画では、ロボットの外形が微分可能であることを前提に周辺環境に対する障害物制約を設定する。そのため、ロボットの外形が微分可能ではない正方形等の多角形の場合、円や楕円といったプリミティブ形状で包含することで対応している。しかしこれでは、実際のロボットにサイズに対してクリアランスが過剰に大きくなり、本来通れるはずの狭路を走行できないことがある。そこで本稿では、スーパー楕円の特殊ケースであるスーパー円による近似を採用する。さらに、スーパー円を用いた際に生じる最適化計算の不安定性を解消するための制約式の改良を提案する。シミュレーション評価により、本手法が従来手法と比較してより狭路走行に適していることを示す。さらに、提案手法の平均処理時間は従来手法と同等であり、リアルタイム性があることを示す。

Refinement of Obstacle Constraints in Trajectory Planning Using Super Ellipses for Narrow Passage Navigation with Model Predictive Control

TONOGAI Norikazu, MUKAI Shigeharu and SAITOH Yumi

This paper presents a refinement of obstacle constraints in trajectory planning for autonomous mobile robots using Model Predictive Control (MPC). MPC generates velocity commands that guide the robot to achieve a given goal by adjusting its position and orientation overtime. In MPC formulations, obstacle constraints require differentiable representations of the robot's shape, making it difficult to directly incorporate polygonal shapes such as squares. As a result, robots are typically approximated using primitive shapes like circles or ellipses, which introduce excessive clearance and reduce flexibility in narrow environments. To address this limitation, we adopt a shape approximation method based on super ellipses. However, high-order super ellipses often lead to instability in numerical optimization. To overcome this, we introduce a refined constraints formulation that stabilizes the optimization process. The effectiveness of this method is evaluated through simulations, demonstrating that it is more suitable for narrow passage navigation compared to conventional methods. Furthermore, the average processing time of the proposed method is equivalent to that of conventional methods, ensuring real-time performance.

1. まえがき

製造現場や物流倉庫において、物品を特定の地点から別の地点へ搬送する作業が多く行われている。例えば、電気機器の組立工程では、部品棚から組立てセルまで部品を運

ぶ作業などが挙げられる。このような現場では多くの作業員が搬送作業に従事している。しかし、近年の労働人口の減少により、こうした単純作業の自動化が求められている。そのニーズに応える形で、自律走行ロボットを用いた搬送作業の自動化が進んでいる。搬送作業を自動化するにあたり、その利用範囲を拡大するための課題の一つに狭路

Contact : TONOGAI Norikazu norikazu.tonogai@omron.com

走行がある。工場内はスペースが限られているため、搬送を担うロボットは、設備の複雑なレイアウトによって屈曲し狭い通路を走行する能力が求められる。自動走行ロボットの狭路走行が可能になると、こうした限られたスペースでもスムーズな運用が可能となり、工場での適用範囲が広がるため普及が加速すると考えられる。

自律走行ロボットを走行させるためには自己位置推定、経路計画、軌道計画等の様々な技術が必要になる。本稿では、狭路走行に影響が大きい軌道計画技術に焦点をあてる。自律走行ロボットの軌道計画手法の代表例として、Model Predictive Control (MPC)¹⁾ と呼ばれる手法がある。MPC はロボットの走行を目的関数や制約式としてモデル化し最適化手法を用いて速度指令を算出する。MPC では、予測期間内の速度指令が軌道の滑らかさを考慮して算出される。しかしこの手法は演算量が多いことから、敬遠されることが多かった。近年では自律走行ロボットに搭載される計算リソースの向上により MPC を用いた研究が増加している²⁻⁵⁾。

一般的に、MPC ではロボットの形状を正方形などの多角形で表現することが難しく、障害物との干渉を直接制約式に設定することが困難である。その理由は、MPC で使用される最適化手法が制約式の勾配を必要とし、制約式が微分可能である必要があるためである。このため、ロボットの形状は円や楕円などで近似され制約式に組み込まれる。しかし単純な外接円などの近似では実際のロボットの形状との間に無駄な領域が生じ狭路走行には不向きである。無駄な領域を削減する方法として、複数の円を用いるアプローチもあるが、円の数が増えると計算量が増加する課題がある。一方で円の次数を高くすることで円が正方形に近づく特性を利用し、スーパー楕円の特殊ケースである次数の高い円（スーパー円）で近似する方法もあるが、次数を高くすると最適化計算が不安定になる問題が生じる。本稿では、計算量の増加を抑えつつ、近似による無駄な領域を削減するためにスーパー円を用いた際に生じる最適化計算の不安定性を解消するための制約式の改良を提案する。提案手法は、形状の正確な表現と計算量のトレードオフに対応しており、リアルタイム処理が可能で狭路走行に適したアプローチである。

2. 関連研究

MPC で正方形等の多角形のロボット形状を取り扱う方法として、以下の3つのよく知られている方法がある。以下ではその3つの方法について述べる。

2.1 プリミティブ形状を用いた方法

プリミティブ形状を用いた方法では、ロボットの形状を円や楕円等のプリミティブ形状で近似しそれを制約式に設定することで干渉回避を行う。例えば、長方形のロボット

形状では2つの円を組合せて形状を近似するものが多い^{2,3)}。このメリットは、表現が簡単で計算量が軽いことである。デメリットは長方形を複数のプリミティブ形状で近似しても無駄な部分があり、狭路走行において不利となることである。

2.2 混合整数最適化を用いた方法

混合整数最適化を用いた方法^{6,7)} では、連続値と整数値の2種類の変数を組合せて速度指令を求める。ロボットの外形の境界線を直線で表現し、その境界線の左右を整数値で表現しその組み合わせでロボットの内外を判定する。そして、ロボットの内側が壁や周囲の障害物に干渉しないように軌道を最適化する。この手法のメリットは、直線で形状が表現できるためロボット形状との間に無駄な領域がないことである。しかしデメリットとして障害物の数や通路の複雑さが増加すると最適化の組み合わせの数に伴い、計算時間が増大し、リアルタイム処理が困難になる。

2.3 双対性を用いた方法

ロボット形状と障害物の2つの凸集合間の最小距離を求める主問題とその双対問題の双対性を用いた方法では、制御入力を算出する通常の MPC のモデルとロボット形状内の点と障害物形状内の点の最小距離を算出するモデルの2つを同時に解く⁴⁾。ロボット形状や障害物形状が多角形の場合、微分可能でないため勾配法で解くことができないが、双対問題に変換することによって双対変数は微分可能となる。通常の MPC のモデルとその双対問題を組合せて解くことで、ロボット形状を近似なく表現できるため無駄はない。しかし、解くべき変数が多くなるため計算量が多いデメリットがある。近年では Control Barrier Function (CBF) を用いてそのデメリットを削減した方法もある⁵⁾。しかし依然として計算量が多い点と前処理として障害物を多角形で近似する必要があるため、障害物の形状が変化すると前処理を再度実施する必要がありその分計算量が増える。

3. 提案手法

3.1 Model Predictive Control

今回の提案手法は、第2章関連研究²⁾の2.1で紹介したプリミティブ形状を用いた方法を改良したものである。改良点を述べる前に、ベースとなる Model Predictive Control (MPC) のモデルについて説明する。モデルには目的関数と制約式が含まれている。

まず、目的関数は移動ロボットに実現させたい動作を定義するもので、目的関数を最小化することでその動作を実現する。今回設定した目的関数は式(1)の ϕ で表され、 x と y は移動ロボットが存在する2次元平面の x 軸と y 軸上の

位置を表し、 θ はその平面上の回転角度である。 v は並進速度、 ω は角速度を表している。予測ホライズン N_p は、時刻 t を時間間隔 dt で分割した個数で t 秒後までの予測を行うことを示している。式(1)の右辺の第一項と第二項は、台車の状態と現場のレイアウトなどの情報を元に経路計画等の手法を用いて得られた参照経路との差分を示す参照経路追従項を表している。これらの項を最小化することで、移動ロボットが参照経路をなぞるように走行する。参照経路追従項はターミナルコスト（第一項）とステージコスト（第二項）の二つに分解することができ、ターミナルコストは予測ホライズンの終点の台車の状態と参照経路との差から計算されるコストを表している。ステージコストは、予測ホライズンの始点から N_p-1 までの台車の状態と参照経路との差から計算されるコストを示す。参照経路追従項の概念図を図1に示す。参照経路上にリファレンス点（図中緑点）を設定し、目的関数を最小化する軌道を求め、その1ステップ目の指令値を実行する。これを繰り返すことで参照経路を追従するような走行が可能となる。

右辺第三項は、制御入力と参照速度との差分を計算する入力追従項である。この入力追従項を設定することで、陽に移動速度を調節することができる。例えばゴール付近で減速させたい場合、この項の参照速度に減速指令を設定すればよい。

$$\begin{aligned} \phi(x, y, \theta, v, \omega) = & e_1^T(k + N_p) P e_1(k + N_p) \\ & + \sum_{i=1}^{N_p-1} e_1^T(k+i) Q e_1(k+i) \\ & + \sum_{i=1}^{N_p-1} e_2^T(k+i-1) R e_2(k+i-1) \end{aligned} \quad (1)$$

$$e_1(k+i) = \begin{pmatrix} x(k+i) - x_{ref}(k+i) \\ y(k+i) - y_{ref}(k+i) \\ \theta(k+i) - \theta_{ref}(k+i) \end{pmatrix}$$

$$e_2(k+i-1) = \begin{pmatrix} v(k+i-1) - v_{ref}(k+i-1) \\ \omega(k+i-1) - \omega_{ref}(k+i-1) \end{pmatrix}$$

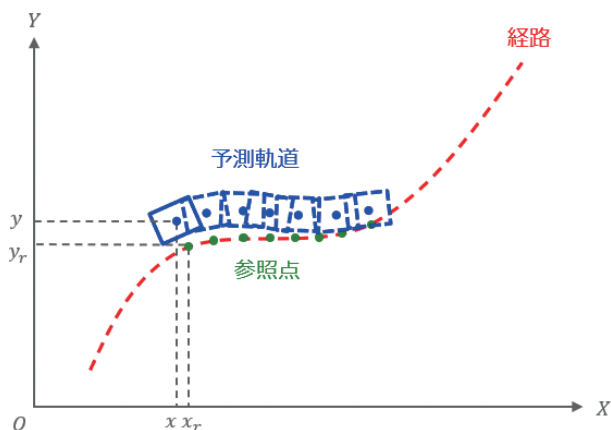


図1 目的関数のイメージ図

制約は次の4つの制約式からなる。キネマティクス制約は自社製品である自動搬送モバイルロボット LD シリーズと同じ構造の差動二輪モデルを用いた。差動二輪モデルは式(2)で表される。速度制約は式(3)のような不等式で表され、ロボットが実現可能な速度の上下限値を決めている。加減速制約は式(4)のように数値微分を用い、式(3)と同様に設定する。障害物制約は式(5)で表されセンサで計測された障害物の点群がロボットを被覆する円の外側にあること、つまり障害物とロボットが干渉していないことを表す。また、ロボットを被覆した時の無駄が少なくなるように、複数円を用いて障害物制約を設定する。図2のように赤い枠で示したロボットの外側に障害物があればこの制約は満たされていることとなる。

$$\begin{cases} x(k+i) = x(k+i-1) + v(k+i-1)\cos(\theta(k+i-1))dt \\ y(k+i) = y(k+i-1) + v(k+i-1)\sin(\theta(k+i-1))dt \\ \theta(k+i) = \theta(k+i-1) + \omega(k+i-1)dt \end{cases} \quad i=1,2,\dots,N_p \quad (2)$$

$$\begin{cases} v_{\min} \leq v(k+i-1) \leq v_{\max} \\ \omega_{\min} \leq \omega(k+i-1) \leq \omega_{\max} \end{cases} \quad i=1,2,\dots,N_p \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{v}_{min} \leq \frac{v(k+i-1)-v(k+i-2)}{dt} \leq \dot{v}_{max} \\ \dot{\omega}_{min} \leq \frac{\omega(k+i-1)-\omega(k+i-2)}{dt} \leq \dot{\omega}_{max} \end{array} \right. \quad i=1,2,\cdots,N_p \quad (4)$$

$$(x_{obsj} - x_i)^2 + (y_{obsj} - y_i)^2 \geq r^2 \quad i = 1, 2, \dots, N_p \quad j = 1, 2, \dots, N_{obs} \quad (5)$$

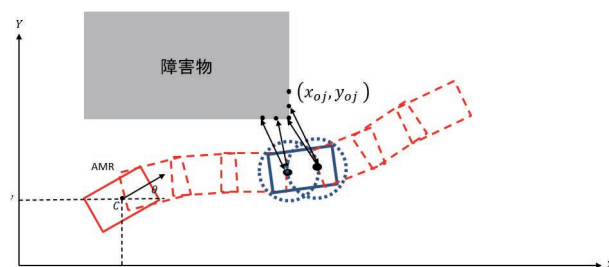


図2 障害物項のイメージ図

3.2 スーパー楕円（スーパー円）

式(6)のように、スーパー楕円の長軸と短軸を同じ長さにしたスーパー楕円の特異ケースをスーパー円として導入する。式(6)の次数を大きくしていくと図3のように円が正方形に近づいていく。この性質を利用し障害物制約を複数円で設定している部分をスーパー円に置き換える。スーパー円の次数 p を上げることで正方形のロボット形状でも実形状からの乖離を限りなく削減できる。

$$\begin{aligned} (x_{\text{obsj}} - x_i)^{2\rho} + (y_{\text{obsj}} - y_i)^{2\rho} &\geq r^{2\rho}, \\ i = 1, 2, \dots, N_p, j = 1, 2, \dots, N_{\text{obs}} \end{aligned} \quad (6)$$

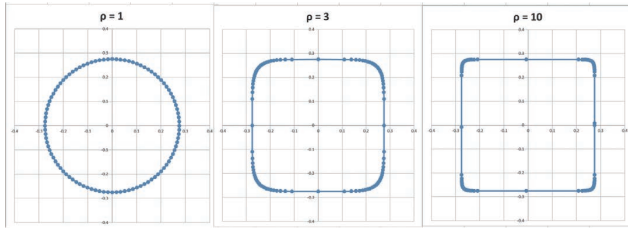


図3 スーパー円

3.3 スーパー円に対する課題と対策

スーパー円を用いる上での課題は、次数を大きくした時に障害物制約の値が発散したり潰れたりすることである。ここで“潰れ”とは、値が1以下の場合に次数が高くなるにつれて値が0に近づき、小さくなる現象を指す。発散や潰れが発生すると数値計算が安定せず最適化を解くことができない。例えば、次数6の場合ある制約の値が527.2だが次数を12にすると527482623.1となる。このように急激に値が大きくなると数値計算が不安定になりやすい。先行研究でもスーパー楕円を用いたものがある^{8,9)}が次数は小さい。この課題を解決するためにスーパー円を使った制約式(6)を式(7)のように変形することを考案した。変形のポイントは次の3つである。まず1つ目は数値の潰れを防ぐために式(6)の両辺をスーパー円の半径の 2ρ 乗である $r^{2\rho}$ で割る。2つ目は対数の値がマイナス無限大になるのを防ぐために両辺に1を足す。3つ目は数値的发散を防ぐために両辺の対数をとる。以上の変形を実施することで数値的な安定性を確保する。式(7)の変換は両辺に対して行われ不等式の大小関係は変換前と変わらないためこの変形を行っても障害物の干渉を判定することが可能である。

$$\begin{aligned} \log\left(\left(\frac{x_{\text{obsj}} - x_i}{r}\right)^{2\rho} + \left(\frac{y_{\text{obsj}} - y_i}{r}\right)^{2\rho} + 1\right) &\geq \log(2), \\ i = 1, 2, \dots, N_p, j = 1, 2, \dots, N_{\text{obs}} \end{aligned} \quad (7)$$

次にスーパー円を用いた際の効果について考察する。例えば、1辺45 cmの正方形に両側3 cmの安全のためのマージンを設けた1辺51 cmの正方形に外接円を設定した場合と、同じ正方形に次数20のスーパー円を適用した場合を比較する。図4より外接円を使用すると1辺45 cmの正方形から最大で13.5 cmの無駄な幅が発生する。スーパー円を適用した場合、無駄な幅は最大で設定したマージンとほぼ一致する3 cmに抑えられる。この結果、スーパー円を利用することで約10 cmの無駄な幅を削減できるため外接円に比べて20 cm狭い通路でも走行可能となる。

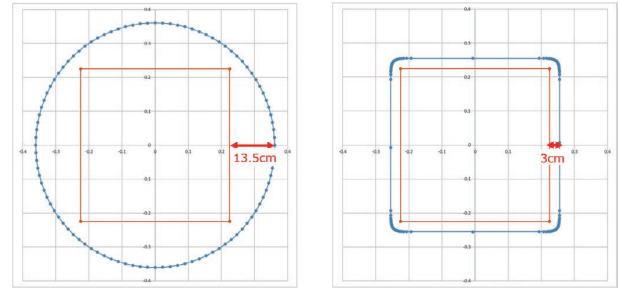


図4 スーパー円の効果

次に制約式の改良の効果を示すために最適化の計算に式(6)や式(7)の不等式制約がどのように影響するのかを述べる。まず初めに最適化手法の1つである内点法について述べる。初めに式(8)のような最適化問題が与えられたとする。

$$\begin{aligned} \min_x \quad & \frac{1}{2} x^T Q x + c^T x \\ \text{s.t.} \quad & A x = b \\ & G x \geq d \end{aligned} \quad (8)$$

ここで1行目の式は目的関数、2行目の式は等式制約、3行目の式は不等式制約を表している。この最適化問題では等式、不等式制約をみたしつつ目的関数を最小する x を求める問題である。最適点では式(9)のKarush-Kuhn-Tucker条件(KKT条件)を満たしている必要があるためこのKKT条件を使って最適な x を求める。

$$\begin{aligned} -Qx - c + A^T \lambda + G^T \mu &= 0 \\ A x &= b \\ G x - d &\geq 0 \\ \mu &\geq 0 \\ (G x - d)_i \mu_i &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

ここで λ 、 μ はラグランジュ乗数である。式(9)において x 、 λ 、 μ の3つが変数となる。KKT条件を直接解いて3つの変数を求めることは難しいので次の式(10)のように各変数の微小量で展開する。この際不等式は一旦無視し0と置く。

$$\begin{aligned} -Q(x+dx) - c + A^T(\lambda+d\lambda) + (\mu+d\mu) &= 0 \\ A(x+dx) &= b \\ \Sigma \mu + \Sigma d\mu + d\Sigma \mu &= 0 \\ \Sigma &= \text{diag}((Gx-d)_1, \dots, (Gx-d)_n) \end{aligned} \quad (10)$$

変化が微小量である必要があるために第3式に $(Gx-d)_i \mu_i$ の平均値 v で計算される緩和項を追加すると式(11)となる。

$$\begin{aligned} A^T(\lambda+d\lambda) + (\mu+d\mu) &= Q(x+dx) + c \\ A(x+dx) &= b \\ X\mu + Xd\mu + \mu dX &= \sigma v e \end{aligned} \quad (11)$$

ここで $\sigma \in [0,1)$ のスケール項、 e は要素がすべて 1 のベクトルである。式(11)を微小量とそれ以外でまとめると式(12)となる。式(12)の微小量にかかる行列を KKT 行列と言う。

$$\begin{bmatrix} -Q & A^T & G^T \\ A & 0 & 0 \\ MG & 0 & \Sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ d\lambda \\ d\mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Qx + c - A^T\lambda - \mu \\ b - Ax \\ \sigma ve - \Sigma\mu \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\Sigma = \text{diag}((Gx - d)_1, \dots, (Gx - d)_n)$$

$$M = \text{diag}(\mu_1, \dots, \mu_n)$$

$$e = [1, \dots, 1]^T$$

これより微小量を求めるには KKT 行列の逆行列をもとめ以下の式(13)を解けばよいことがわかる。

$$\begin{bmatrix} dx \\ d\lambda \\ d\mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Q & A^T & G^T \\ A & 0 & 0 \\ MG & 0 & \Sigma \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Qx + c - A^T\lambda - \mu \\ b - Ax \\ \sigma ve - \Sigma\mu \end{bmatrix} \quad (13)$$

上記より求めた微小量をもとに x 、 λ 、 μ を逐次的に更新することで最適な x を算出する。上記に対して式(6)や式(7)の制約式を適用する場合は式(6)、式(7)が非線形制約であるためある点 x の周りで線形近似したものを代入し解く。そしてそのある点を徐々に更新し最適変数を求める。式(6)や式(7)を、次数20とし、 $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 周りで線形化したものは以下の式(14)、式(15)になる。ここで簡単のために障害物は1点であるとした。

$$G = \begin{bmatrix} -20(x_{obsj} - \bar{x}_i)^{19} & -20(y_{obsj} - \bar{y}_i)^{19} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$d = (x_{obsj} - \bar{x}_i)^{20} + (y_{obsj} - \bar{y}_i)^{20} - r^{20}$$

$$G = \begin{bmatrix} \frac{-20r}{\left(\frac{x_{obsj} - \bar{x}_i}{r}\right)^{20}} \left(\frac{x_{obsj} - \bar{x}_i}{r}\right)^{19} & \frac{-20r}{\left(\frac{y_{obsj} - \bar{y}_i}{r}\right)^{20}} \left(\frac{y_{obsj} - \bar{y}_i}{r}\right)^{19} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$d = \log \left[\left(\frac{x_{obsj} - \bar{x}_i}{r} \right)^{20} + \left(\frac{y_{obsj} - \bar{y}_i}{r} \right)^{20} + 1 \right] - \log(2)$$

ここで仮に $x_{obsj} - \bar{x}_i$ と $y_{obsj} - \bar{y}_i$ の値を 2、 r の値を 1 としてそれぞれの G と d を計算すると以下の表 1 の値になる。

表 1 制約式の改良の効果

次数	パラメータ	従来手法	提案手法
次数 2	G	$(-40, -40)$	$(-10, -10)$
	d	7	0.653212514
次数 10	G	$(-10240, -10240)$	$(-10, -10)$
	d	2047	3.010511963
次数 20	G	$(-10485760, -10485760)$	$(-10, -10)$
	d	2097151	6.02060012

上記の表 1 に示すとおり従来手法では次数が高くなるにつれて G と d の値が急激に大きくなっている。このような大きな値で式(13)の計算を行おうとすると G や Σ の値が大きいため式(13)の KKT 行列の逆行列が計算できず微小量を求めることができない。また仮に計算できたとしても微小量が大きな値になり更新がうまくいかず最適変数を求めることができない。しかし、提案手法では次数が大きくなっても G と d の値の急激な変化が抑えられている。これにより最適解を安定して求めることが可能となる。上記が最適化手法に制約式の変形を導入した時の効果の例である。

3.4 スーパー円の障害物制約に改良を加えた定式化

スーパー円の障害物制約に改良を加えて最終的な定式化は式(16)になる。この問題設定は目的関数が二次式、キネマティクス制約式と障害物制約式が非線形関数であるため非線形最適化手法を用いて最適化を行った。今回は非線形最適化手法の一種である Sequential least squares quadratic programming (SLSQP) を用いた。

$$\begin{aligned} \phi = \min & \left(e_1^T (k + N_p) P e_1 (k + N_p) + \sum_{i=1}^{N_p-1} e_1^T (k + i) Q e_1 (k + i) \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^{N_p-1} e_2^T (k + i - 1) R e_2 (k + i - 1) \right) \end{aligned} \quad (16)$$

s.t.

$$\begin{cases} x(k+i) = x(k+i-1) + v(k+i-1) \cos(\theta(k+i-1)) dt \\ y(k+i) = y(k+i-1) + v(k+i-1) \sin(\theta(k+i-1)) dt \quad i=1,2,\dots,N_p \\ \theta(k+i) = \theta(k+i-1) + \omega(k+i-1) dt \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_{min} \leq v(k+i-1) \leq v_{max} \\ \omega_{min} \leq \omega(k+i-1) \leq \omega_{max} \end{cases} \quad i=1,2,\dots,N_p$$

$$\begin{cases} \dot{v}_{min} \leq \frac{v(k+i-1) - v(k+i-2)}{dt} \leq \dot{v}_{max} \\ \dot{\omega}_{min} \leq \frac{\omega(k+i-1) - \omega(k+i-2)}{dt} \leq \dot{\omega}_{max} \end{cases} \quad i=1,2,\dots,N_p$$

$$\log \left(\left(\frac{x_{obsj} - x_i}{r} \right)^{2\rho} + \left(\frac{y_{obsj} - y_i}{r} \right)^{2\rho} \right) \geq \log(2),$$

$$i = 1, 2, \dots, N_p, \quad j = 1, 2, \dots, N_{obs}$$

4. 評価実験

4.1 評価方法

評価実験として、シミュレーションで狭路をスタートからゴールまで走行可能か評価し提案手法の有効性を確認した。今回の評価実験ではロボットの形状を長辺 65 cm、短辺 45 cm の長方形とし、走行環境として狭路 1 と狭路 2 の 2 種類を用意した。図 5 に狭路 1 と狭路 2 を示す。狭路 1 では狭路に対して旋回し侵入することを想定している。狭路 2 は狭路内にクランクがある。各狭路に対して狭路幅 70 cm、と 80 cm の 2 種類を用意した。

比較手法としては、プリミティブ形状を用いた手法の複数円を用いた手法と比較した。走行に必要な経路は二段階 Fast Marching Method (FMM)¹⁰⁾ と呼ばれる方法で算出し、自己位置は差動二輪のキネマティクスを元に理想的に動いたとして算出した。安全のために設けるマージンはロボットの形状の長方形に対して、その長方形の外側に 3 cm とした。主要なパラメータの設定は、予測ホライズンは 6、ホライズンの時間間隔 dt は 0.2 s、並進速度の上下限は ± 1.0 m/s、並進加減速の上下限は ± 0.5 m/s²、旋回速度の上下限は ± 180 度/s、旋回加速度の上下限は ± 180 度/s² である。スーパー円の半径は 25.5 cm、次数は 20 とし複数円の半径は長方形を包含するために 36.1 cm とした。評価は Intel (R) Core (TM) i7-7700@3.60 GHz の CPU を搭載した計算機を用いて処理時間の計測を行った。

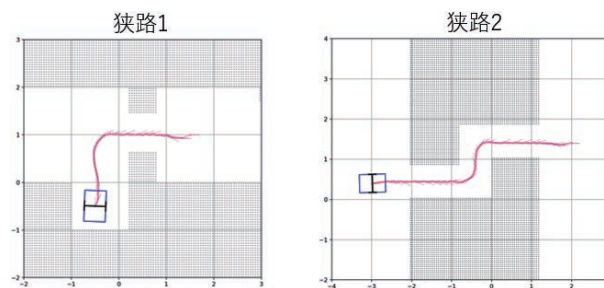


図 5 狭路

図中の長方形が移動するロボット、グレー部分が障害物、赤線が移動ルートである。赤線の終端が移動の終点を表す。

4.2 評価結果

図 5 左側に示すように、狭路 1 はおよそ直角に狭路に侵入するケースである。図 6 左側に示す通り、狭路幅が 80 cm の場合は複数円を用いた方法と提案手法どちらもゴールまでたどり着けている。狭路幅が 70 cm になると複数円を用いた方法では、途中で最適化が解けず停留してしまいゴールまでたどり着けなかった。一方で提案手法はゴールまで到達できている。次に図 5 右の狭路 2 のクランク状の経路に関しては、図 6 右側のように狭路幅が 80 cm の場合は複数円を用いた方法と提案手法はどちらもゴールまで走行できている。狭路幅が 70 cm の場合は複数円を用いた方法は途中で停留してしまったが、提案手法はゴールまで走行することができた。この結果から従来手法よりも提案手法のほうが狭路走行に適していると言える。その理由は提案手法の方がロボットを包含する干渉モデルの無駄が少なく狭路に対して余裕があることで、最適化問題が簡単に

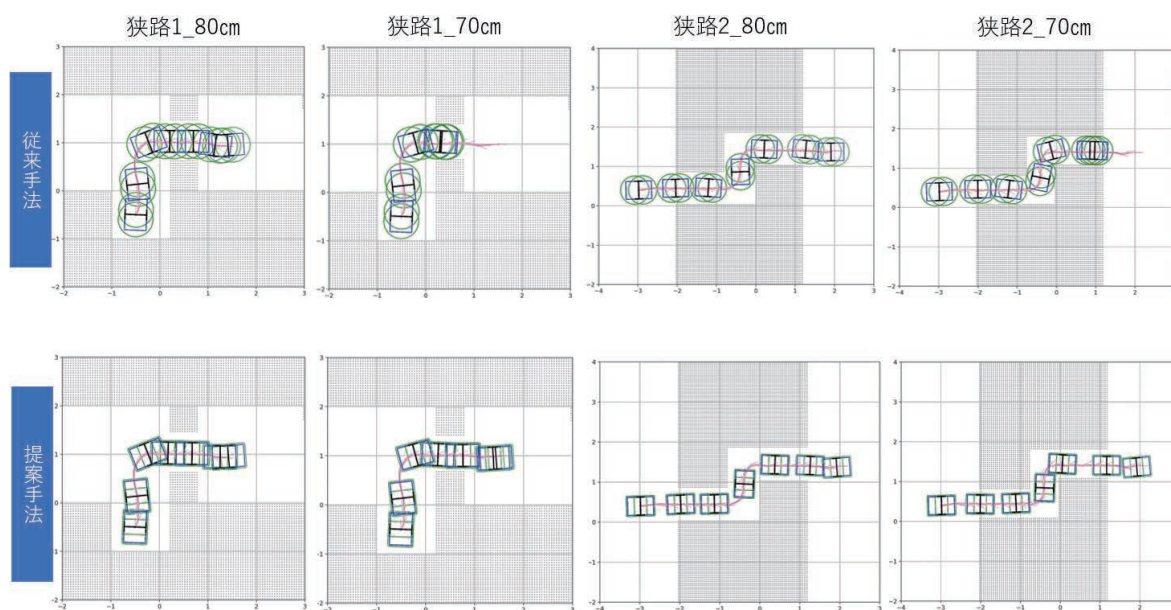


図 6 狭路の走行結果

なったことが原因だと考える。処理時間の結果は表 2 に示す。最適化処理はロボットが経路を進む度に逐次的に実施しており、障害物との近さなどに応じて処理時間が変動する。よって、スタートからゴールまで走行する間に実施した最適化処理の平均と最大の処理時間を算出した。比較手法と提案手法で平均処理時間はほぼ差がない。Max 値に関しては提案手法の方が多少長くなっている。これは次数部分の計算が影響していると考えられる。従来手法も提案手法も Max 値が約 100 ms 程度であるためリアルタイム性を保持していると言える。

表 2 処理時間

狭路	処理時間	従来手法	提案手法
狭路 1 80 cm	平均 [ms]	21	31
	最大 [ms]	64	98
狭路 1 70 cm	平均 [ms]	53	29
	最大 [ms]	123	90
狭路 2 80 cm	平均 [ms]	18	25
	最大 [ms]	70	73
狭路 2 70 cm	平均 [ms]	31	18
	最大 [ms]	110	118

5. むすび

本研究では、MPC で狭路エリアを走行するためのスーパー円の障害物制約を改良した手法を提案した。従来手法との比較では、よりシビアな条件の狭路に対応できることが示された。処理時間に関しても従来手法と比較して同程度の水準であり、リアルタイム性が必要なロボット制御に活用できると考えられる。

今後の課題としては、実機を用いた動作検証の実施に加え、スーパー円をスーパー楕円に戻すことで、必要な円の個数を削減し、計算効率の向上を図ることが挙げられる。また、本手法は障害物制約式の改良であるため他の問題設定への応用が期待される。例えば、オフライン軌道計画や経路計画の手法である。今後はこれらの拡張を行う予定である。

本研究は、中外製薬株式会社との共同研究の一環として行った。

参考文献

- 1) K. Felipe et al., "Model predictive control of a mobile robot using linearization," in *Proc. Mechatron. Robot.*, 2004, vol. 4, pp. 525–530.
- 2) B. Brito et al., "Model predictive contouring control for collision avoidance in unstructured dynamic environments," *IEEE Robot. Automat. Lett.*, vol. 4, pp. 4459–4466, 2019.
- 3) T. M. Cho et al., "Model predictive control of autonomous vehicles with integrated barriers using occupancy grid maps," *IEEE Robot. Automat. Lett.*, vol. 8, pp. 2006–2013, 2023.
- 4) X. Zhang et al., "Optimization-based collision avoidance," *IEEE Trans. Control Syst. Tech.*, vol. 29, pp. 972–983, 2021.
- 5) A. Thirugnanam et al., "Safety-critical control and planning for obstacle avoidance between polytopes with control barrier functions," in *ICRA*, 2022, pp. 286–292.
- 6) A. Richards and J. P. How, "Aircraft trajectory planning with collision avoidance using mixed integer linear programming," in *Proc. 2002 Amer. Cont. Conf.*, 2002, vol. 3, pp. 1936–1941.
- 7) L. Blackmore et al., "Chance-constrained optimal path planning with obstacles," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 27, pp. 1080–1094, 2011.
- 8) H. Febbo et al., "Moving obstacle avoidance for large, high-speed autonomous ground vehicles," in *Amer. Cont. Conf.*, 2017, pp. 5568–5573.
- 9) P. Vlantis et al., "Quadrotor landing on an inclined platform of a moving ground vehicle," in *ICRA*, 2015, pp. 2202–2207.
- 10) S. Garrido et al., "FM2: A real fast marching sensor-based motion planner," *Int. J. Robot. Automa.*, pp. 1–6, 2008.

執筆者紹介



殿谷 徳和 TONOGAI Norikazu
技術・知財本部
ロボティクス R&D センタ
Voyager Project 部
専門：軌道計画、画像処理



向井 滋春 MUKAI Shigeharu
技術・知財本部
ロボティクス R&D センタ
Voyager Project 部
専門：機械学習、経路計画

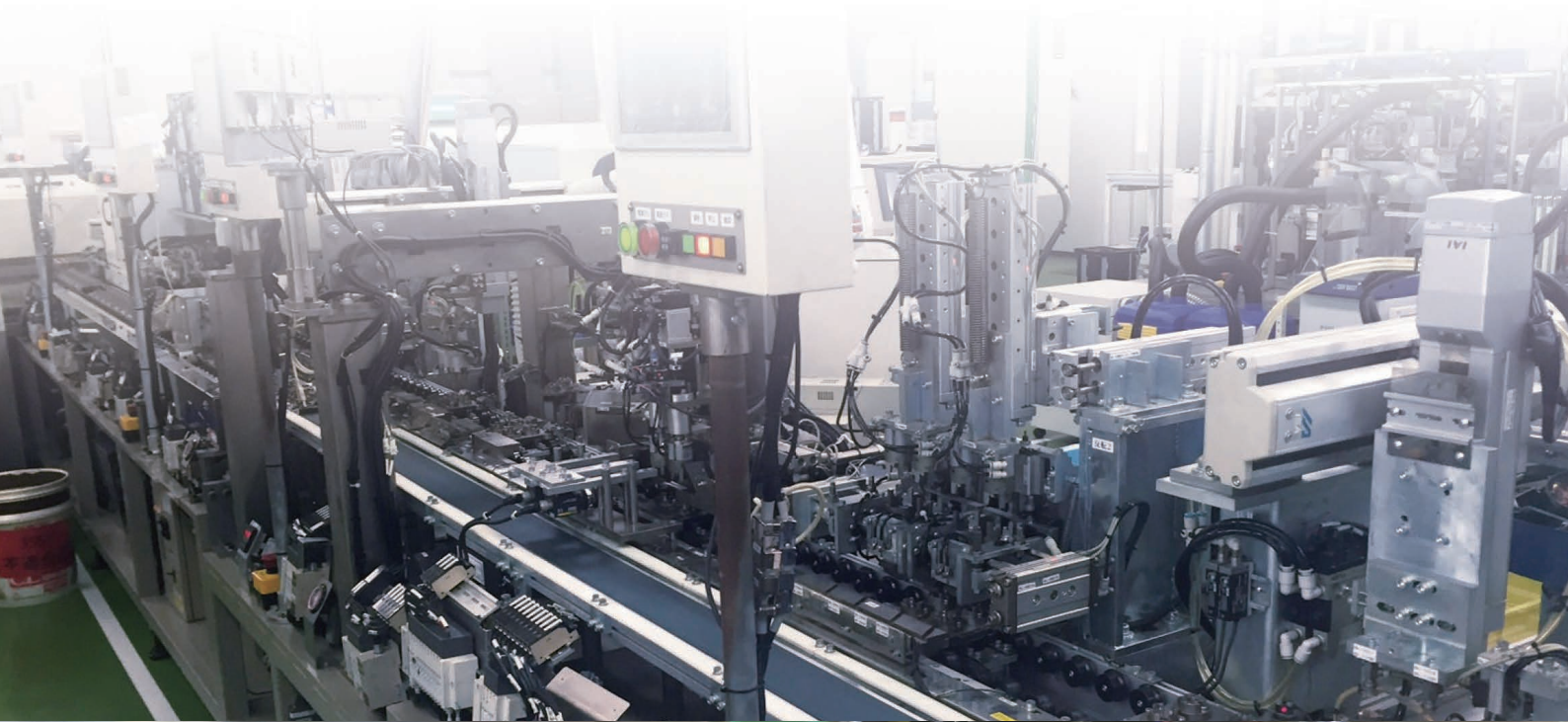


齊藤 ゆみ SAITOH Yumi
技術・知財本部
ロボティクス R&D センタ
専門：制御工学
所属学会：システム制御情報学会、電子情報通信学会、電気学会

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。

2

オムロンの ものづくりを支える技術



人作業組立ラインの電力消費量シミュレーション手法

古川 朋樹

人作業組立ラインは生産性向上に加えて、エネルギー効率化への対応が求められる¹⁾。製造現場では、作業者 (Man)、設備 (Machine)、材料 (Material)、方法 (Method) の4M変動に対する改善活動が進む一方、セル生産方式 (セルライン) は作業者要因の生産影響が大きく、これをシミュレーションへ適切に反映することが技術課題である。本研究では自社工場のセルラインを対象にして、作業者のスキルレベルを取り込める電力消費量シミュレーションモデルを構築した。結果、電力消費の予測精度目標 95%とエネルギー損失の可視化を達成し、非標準であったシミュレーションモデル設計工数を従来の6人日から3人日に短縮した。本論文では、人作業のばらつきを反映したセルラインの電力消費量シミュレーション手法について述べる。

Establishment of a Power Consumption Simulation Method for Manual Assembly Lines

FURUKAWA Tomoki

Manual assembly lines are required to improve not only productivity but also energy efficiency. In manufacturing sites, improvement activities are being conducted to address variations in the 4M factors—Man (operator), Machine (equipment), Material, and Method. However, in cell production systems (cell lines), the influence of operator-related factors on productivity is significant, and appropriately reflecting these human factors in simulations remains a technical challenge.

In this study, a power consumption simulation model capable of incorporating operator skill levels was developed for a cell line in our factory. As a result, the model achieved a power consumption prediction accuracy target of 95% and enabled visualization of energy losses. Moreover, the design effort for simulation model creation—previously non-standardized—was reduced from six days to three.

This paper describes a power consumption simulation method for cell lines that reflects variations in manual operations.

1. まえがき

組立ラインでは生産性向上と省エネ推進の両立が、生産技術者にとっての重要課題である。近年、製造業では生産予測を目的としたシミュレーション技術の導入が進展している²⁾。また、空調施設や工場全体を含む生産活動の KPI 可視化や省エネ推進への適用も進んでいる³⁾。しかし、作業者による組み立てを主とするセルラインでは、シミュレーション技術の適用事例が少なく、作業ばらつきを反映する方法は十分に普及していない。さらに、セルラインの電力消費は工場全体比で小さいため、省エネ効果に基づく

投資判断 (損益分岐点) の見極めが難しい。したがって、経験則に基づく簡易計算に留まり、エネルギー損失の打ち手が具体化されず実行に至らないケースが見受けられる。

このため、短期間かつ高精度で効果を可視化できるシミュレーション手法を確立することは、生産性と省エネの両立課題の解決に有効である。本研究では、4M のうち特に作業者に起因する変動に着目し、**セルラインの電力消費量予測**を対象としたシミュレーション手法の確立について提案する (図 1)。

Contact : FURUKAWA Tomoki tomoki.furukawa@omron.com

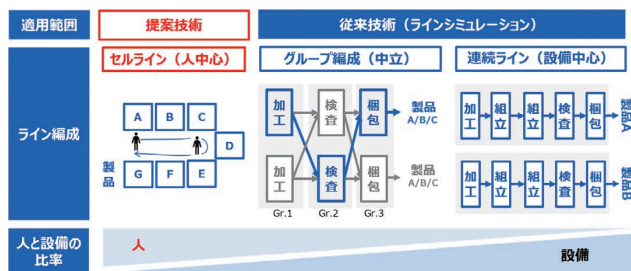


図1 ライン編成と特徴

2. 技術課題

セルラインは多品種少量生産が一般的であり、作業配分やレイアウト編成の自由度が高い一方で、設計・立ち上げには生産技術者の広い視点が必要である。また、現場データは形式・収集方法が多岐にわたり、データ評価方法の属人化がシミュレーション手法の標準化を阻害している。従来は、設備毎の電力消費・稼働率・待機時間に基づき工程順を再現する「設備起点」のラインシミュレーションが主流であった（以下、従来型シミュレーション）。従来型シミュレーションでは、作業者のスキル依存作業と非依存作業の識別が難しく、作業ばらつきの正確な反映が困難である。また、従来型シミュレーションは設備起点の構成のため、作業者要因の4M変動が顕在化しやすいセルラインの特性に適合しにくい。生産性と省エネの両立課題には、評価方法の定量化と、エネルギー損失発生箇所・時間帯を特定するための時間軸による可視化が必要である。したがって、作業ばらつきを反映したシミュレーションモデルの構築は、セルラインの立上げから改善活動に至るまでの各段階において、生産技術上の課題として位置付けられる。

3. 技術内容

3.1 セルラインのシミュレーションモデル構築

セルラインにおける消費電力は、作業者（Man）、設備（Machine）、材料（Material）、方法（Method）といった4M要因に加え、設備配置や空間条件に起因するレイアウトなどの作業環境（Environment）によっても変動する。特にセルラインでは、作業者の動線や製品の滞留時間はレイアウトの影響を強く受けるため、**作業環境を含めた4M+1Eとしての分析が不可欠**である。そこで本研究では、これらの要因を以下のように定義した。

- ・ **Man**：作業者のスキルレベル、動線、歩行速度
- ・ **Machine**：機械・設備の種類、稼働時間、電力消費量
- ・ **Material**：材料（部材・部品）の種類、製造ロット数
- ・ **Method**：作業手順、工法（レシピ）
- ・ **Environment**：レイアウトなどの作業環境

Siemens 社製ラインシミュレーションソフト「Plant Simulation」⁴⁾ を使用し、自社工場のセルラインを模擬したシミュレーションモデルを構築した（図2）。

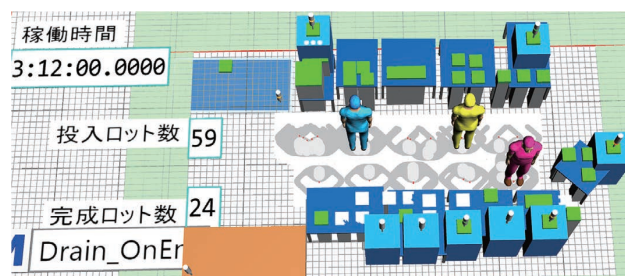


図2 セルラインのシミュレーションモデル

各構成要素のデータを入力し、シミュレーションを実行して所定時間における電力消費を算出する。以下にシミュレーション実行手順を示す（図3）。



図3 シミュレーション実行手順

- ① **データ収集**：半自動化設備の電力計測データを取得。困難な場合は設備仕様値で代替。
- ② **データ前処理**：異常値除去、フィルタリング、補正。
- ③ **モデル反映**：前処理済みデータをシミュレーションモデルへ入力。
- ④ **パラメータ設定**：作業者数、作業時間、生産ロット数等を設定。
- ⑤ **シミュレーション実行**：シミュレーションを実行し、消費電力量等を出力。
- ⑥ **可視化**：ヒートマップやグラフで結果を可視化（図4）。
- ⑦ **改善案検討**：可視化結果に基づき、手順・配置の見直し案を立案。

可視化されたデータには、生産性とエネルギー効率の両立に必要な KPI（作業効率、電力消費量）を含む（図4）。

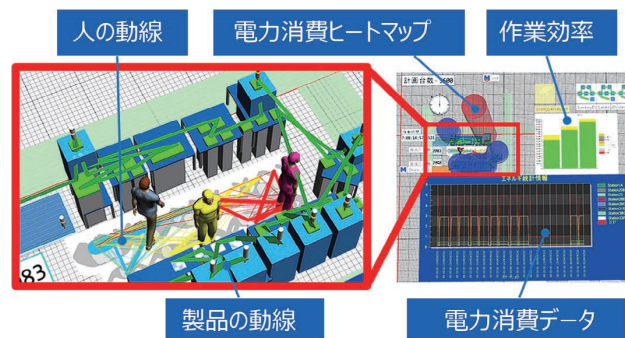


図4 シミュレーションモデルの可視化内容

3.2 作業者スキルレベルのモデル化

従来型シミュレーションのモデルは設備単位の分析に留まり、作業者のスキルレベルの反映が難しい。セルラインは作業者起因の4M変動が生産活動に大きく影響するため、シミュレーションモデルへのスキルレベル反映は不可欠である。本研究では、分析単位を設備から作業単位へ細分化し、スキルレベルに伴う4M変動を再現するシミュレーションモデルを構築した。スキルレベルの反映パラメータを以下に示す。

- ・ **作業速度**：スキル係数（例：新人=0.8、通常=1.0、熟練=1.2）
- ・ **歩行速度**：身体特性・作業エリアに応じて個別設定
- ・ **移動距離**：レイアウトと作業スペースに基づく自動計算

従来型シミュレーションでは複数作業を設備に統合し、単一パラメータで表現していたため精度低下を招いていた。今回提案するシミュレーションでは、設備モデル内部の各作業を作業ブロックとして分解し、個別の設備・作業パラメータを付与することで精度向上を図る。この細分化による最小分析単位を**作業ブロック**と定義する（図5）。

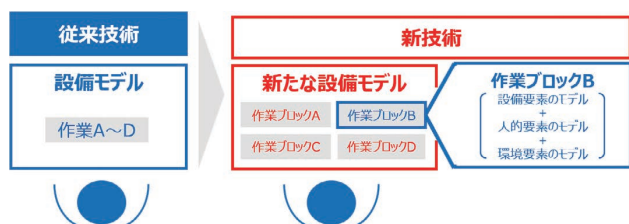


図5 設備モデルから作業ブロックへの細分化

さらに、設計工数短縮を目的に**アローダイアグラム機能**を開発し、今回提案するシミュレーションモデルにプラグインとして実装した。各作業ブロックはアローダイアグラムで接続し、作業順序依存関係と並列処理の可否を決定する（図6）。

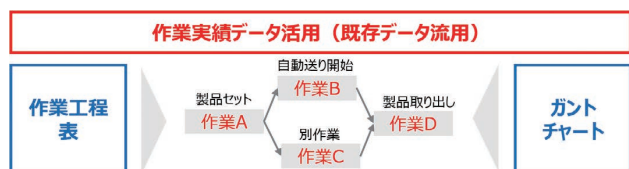


図6 アローダイアグラム機能

ここでは、自動化設備への製品セット・取出しに加え、自動送り中の準備・搬送・検査といった別作業を明示し、同期／非同期のタイミング条件を内包する。作業工程表やガントチャートの既存データを活用して、セットタイミングや製品滞留状況を踏まえた時系列で照合し、ボトルネック特定やスキル係数の設定に用いた。例えば、検査遅延が後続搬送へ波及する場合、シミュレーション上でスキルレ

ベルを実際の作業者に合わせて変更し、人員配置を見直すことで生産性を高める。そして、既存データとシミュレーション出力結果の比較により、工程遷移の整合性を評価し、シミュレーションモデルの妥当性を確認する。

3.3 モデル設計工数の合理化

作業単位への細分化は精度向上の反面、設計工数の増大を招く。これに対し、セルラインの構成単位を**セル**と**要素**に分解し、再利用可能なモジュールを作成した（図7）。

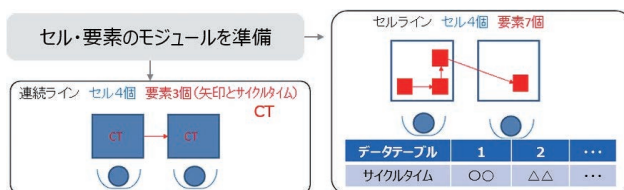


図7 セルと要素のモジュール定義

- ・ **セル**：作業者1人、または設備1ユニットの生産実行単位を1個として数える。
- ・ **要素**：セル間関係（サイクルタイム、工程フロー〈矢印〉）の最小単位を1個として数える。

本定義により、連続ライン・セルラインいずれにも再利用可能なモジュールを準備し、ライン編成の違いに依存しない汎化構造を採用した。例として図7のセルラインは、4セル・7要素で構成し、各セルの作業をデータテーブルで一元管理する。作業番号・作業内容・サイクルタイムは表形式で管理し、参照により作業ブロックを自動生成して設計効率を向上させる。さらに、要素（サイクルタイム・矢印）をベクトル的に接続することで、工程順序変更や動作パターン変更時の修正範囲を限定し、再設計の手間を最小化した。また、アローダイアグラムの共通性に基づき、作業依存関係と並列処理構造を即時反映するシミュレーション手法を構築した（図8）。

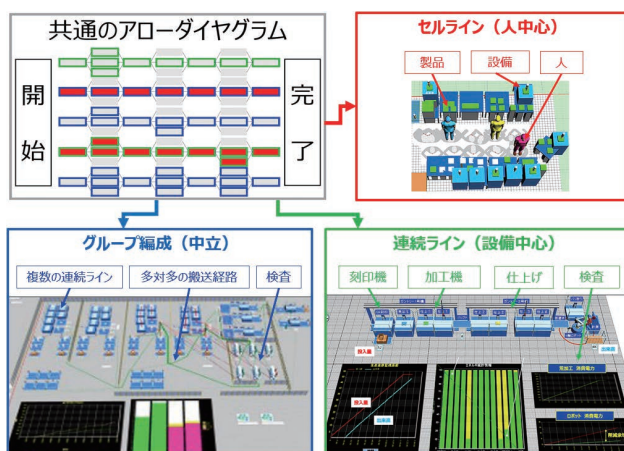


図8 アローダイアグラムの共通性を利用したシミュレーションモデル作成事例

4. 結果と考察

4.1 結果

セルライン電力消費量のシミュレーション精度確認は、2024年11月12日～20日の9日間を対象として実施した。精度確認の指標として予測誤差と予測精度を以下のように定義した。

- ・予測誤差 (%) : $(|消費量 - 予測量|) \div 消費量 \times 100$
- ・予測精度 (%) : $100 - 予測誤差$

従来型のシミュレーションモデルは作業ばらつきを反映せず、設備状態を「稼働／停止」の2分類で表現していたが、予測誤差は7.8%であった。一方、今回のシミュレーションモデルでは作業者のスキルレベル（新人0.8、通常1.0、熟練1.2）を個別に設定し、各作業工程の処理時間に反映した（表1）。

表1 製品1個当たりの作業時間とスキルレベル係数

作業者	従来 (秒)	今回 (秒)	スキルレベル係数
A	82	99	1.0 → 0.8
B	122	109	1.0 → 1.2
C	106	106	1.0 → 1.0

スキルレベルの調整を行った結果、設備状態を「稼働／平日停止／休日停止」の3分類に細分化でき、**予測誤差を4.5%に低減**した（図9）。

ライン消費電力とシミュレーション計算値の推移

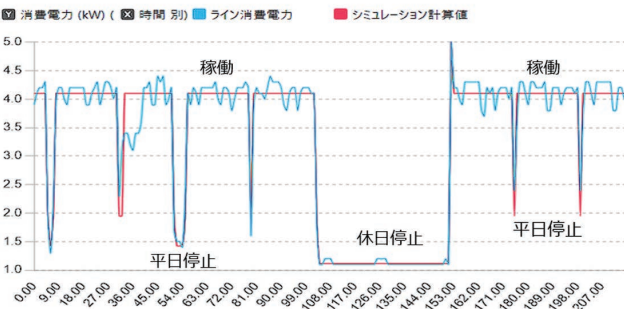


図9 ライン消費電力量とシミュレーション計算値の比較

スキルレベルのばらつきは工程内の処理順序や非稼働時間の発生タイミングを変化させ、設備待機時間のばらつきとして電力消費量に影響を及ぼす。本研究で構築したシミュレーションモデルは、作業者の動線・スキル・作業順序・設備稼働状況を正確に反映することで、予測精度95.5%を達成した。さらに、電力消費のヒートマップによる可視化結果から、消費量の割合が高い設備に着目し、稼働時間（使用可能⇔作業中）と非稼働時間（オフ）を分析

した。今回の規模のセルラインでは、**非稼働時間における約10%の省エネ余地**を確認した（図10）。

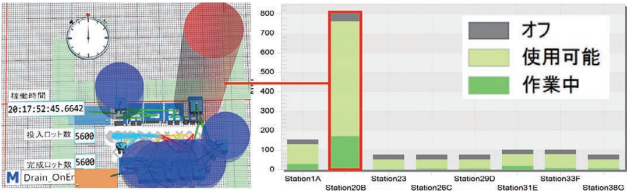


図10 非稼働時間（オフ）に着目した省エネ余地

赤色ヒートマップは、半自動化設備（例：樹脂成形装置の加熱保持、材料冷却）を指す。製品投入待ちに伴う待機電力も発生するため、設備電源のON/OFF制御やタイマ制御による現場管理はさらなる省エネに有効である^{5,6)}。

一方で、従来型シミュレーションは工程単位の個別設計、工程順序の手動設定、データ構造の都度定義が必要であり、今回の規模のセルラインでは設計工数6人日を要した。今回提案するシミュレーション手法では設計データの再利用率を高め、セルライン以外のライン編成への展開も可能にした。結果、設計工数を6人日から3人日に短縮し、50%の工数削減効果を得た（表2）。

表2 設計工数の比較と削減効果

設計工程	従来 (人日)	今回 (人日)	削減効果の理由
工程別モデル設計	1.2	0.2	セル／要素モジュールの再利用
作業順序定義	1.5	0.5	アローダイアグラムの再利用
データ構造・入力設計	1.5	0.8	データテーブルによる一元管理
検証・修正	0.8	0.8	—
可視化設計	0.5	0.2	可視化テンプレートの使用
現場レビュー・調整対応	0.5	0.5	—
合計	6	3	—

4.2 考察

今回提案するシミュレーション手法は、セルライン特有の作業者起因による非定常な動線や作業順序のばらつきを定量的に再現可能とする点で、従来型シミュレーションに対して進歩性を有することが示された。これにより、作業配置や動線の見直しを通じてエネルギー効率の改善に貢献することが可能である。また、今回構築したシミュレーションモデルと設計手順はセルラインに限らず、多品種少量生産を行う人作業組立ラインの生産形態にも展開可能である。特に、アローダイアグラムによる作業順序の構造化

は、工程順序の可視化と再設計の効率化に有効であり、設計変更時の対応力を高める要素技術となった。データ取得に関しては、新たなセンシング技術の導入⁷⁾が必要となる場合もあるが、既存の MES (Manufacturing Execution System) や POP (Point of Production) システムに蓄積された作業工程表や現場が保有するガントチャートを活用することで、追加投資を抑えつつ高精度なシミュレーションを行うことができる。しかし、商用シミュレーションソフトウェアはライセンス制限や操作習熟のハードルが高く、利用が特定の技術部門に限定されがちである。この制限を解消するため、本研究では関係者全員が直接操作・確認可能なデモ用アプリケーションを独自に開発した (図 11)。

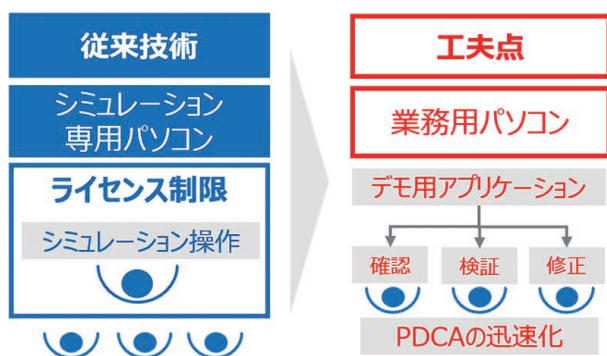


図 11 デモ用アプリケーションの特徴

さらに、現場改善への PDCA サイクルはサイバー・フィジカル空間におけるセルラインのデジタルツインとして適用することで迅速化できる (図 12)。

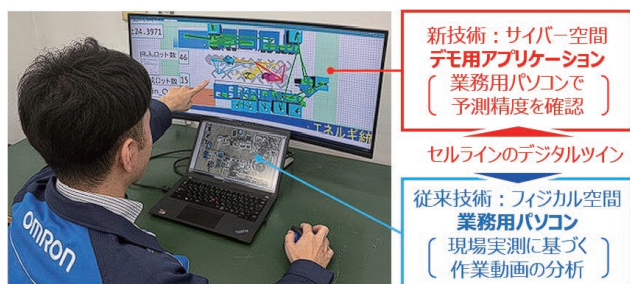


図 12 セルラインのデジタルツインによる PDCA 迅速化

5. 結論

本研究では、セルラインにおけるエネルギー効率の向上とモデル設計工数の削減を目的として、4M+1E の現場データを高精度で反映可能なシミュレーション手法を確立した。今回構築したシミュレーションモデルは、作業者の動線・作業順序・スキル差・設備稼働状況といった実運用上の変動要素を取り込み、電力消費量の予測精度を 95% 超へ向上させた。さらに、作業順序と非稼働時間の分類分析により、装置のアイドリングや滞留時間に伴う最大 10% の省エネ余地を明らかにした。同時に、セル・要素

単位の定義とアローダイアグラム機能を組み合わせたモジュール化設計により、今回の規模のセルラインでは設計工数を従来 6 人日から 3 人日に削減した。加えて、デモ用アプリケーションの導入により、関係者全員が直接改善案を検討できる実行環境を整備し、PDCA の迅速化を実現した。以上により、4M+1E の現場情報を統合した高精度シミュレーションモデル作成と、スキルレベルに対応したラインシミュレーション手法を確立した⁸⁾。

6. むすび

本研究は、セルライン特有の作業員 (Man) による 4M 変動を考慮した新たなシミュレーションモデルを開発し、組立ラインにおける電力消費量の高精度予測を可能にした。これにより、エネルギー損失の定量把握と、具体的な改善施策の立案が可能となった。加えて、モジュール化設計手法とデモ用アプリケーションの導入により、現場主導型で実践的な省エネ技術を提供できる実行環境を整えた。今後は異なるライン規模・業種の製造現場への適用性を検証するとともに、AI や IoT によるリアルタイムデータとの連携・統合を進め、作業員スキルの自動推定と工場運用全体の最適化を実現するシステムへの発展を目指す⁹⁾。

参考文献

- 1) オムロン株式会社. “オムロンが目指す「エネルギー生産性向上」とは.” 制御機器. <https://www.fa.omron.co.jp/solution/energy-productivity/> (Accessed: Nov. 10, 2025).
- 2) 小竹正弘, 杉山尚美, “生産シミュレーション技術の製造ライン設計への適用と生産予測への応用,” 東芝レビュー, vol. 69, no. 9, pp. 8-11, 2014.
- 3) 森脇照雄, “エネルギー計測の有効性及び FEMS 等による継続的な省エネルギー推進活動,” 三菱電機技報, vol. 94, no. 7, pp. 23-27, 2020.
- 4) Siemens AG. “Plant Simulation.” SIEMENS. <https://plm.sw.siemens.com/ja-JP/tecnomatix/plant-simulation-software/> (Accessed: Nov. 10, 2025).
- 5) 伊藤貞芳 他, “省エネソリューション技術による省エネトップランナー工場の実現,” パナソニック技報, vol. 57, no. 1, pp. 25-30, 2011.
- 6) 中井隆樹, 芦田茂樹, “現場データ活用によるエネルギー生産性向上,” 計測技術, vol. 52, no. 5, pp. 5-14, 2024.
- 7) オムロン株式会社. “EQS-AD10-E 環境あんどん／特長.” 制御機器. <https://www.fa.omron.co.jp/products/family/3236/> (Accessed: Nov. 10, 2025).
- 8) 早稲田大学. “オムロン社との研究開発を開始.” <https://www.waseda.jp/top/news/92147> (Accessed: Nov. 10, 2025).
- 9) 内閣府. “科学技術基本計画.” 内閣府ホームページ. https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5honbun.pdf?utm_source=chatgpt.com (Accessed: Nov. 10, 2025).

執筆者紹介



古川 朋樹 FURUKAWA Tomoki

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

アドバンスドソリューション事業本部

ソリューション開発事業部 ビジネス企画部

専門：生産技術（工場エネルギー最適化）

所属学会：日本機械学会、計測自動制御学会
技術士（機械部門）

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。

脅威分析ツールによる産業用制御機器に対する脅威分析の自動化

依田 安基

近年、工場のスマート化とオープン化に伴い、制御システムがサイバー攻撃を受けるリスクが高まり、各国・業界では法規制やガイドラインの整備が進んでいる。

製品セキュリティ対策を体系的に進めるために脅威分析が不可欠であるが、高度な専門知識と熟練を要する。世界的なセキュリティ専門人材の不足の中、製造業者が多数の製品に対して期限内に対応を進めることは困難となっている。脅威分析ツールの活用が解決策として期待されるものの、既存ツールは主に IT 領域を対象としており、産業用制御機器への適用可能性は不明であった。

本研究では、この課題に対し、産業用制御機器のシステム特性を考慮した脅威分析テンプレートを設計し、その正確性と有効性を Microsoft Threat Modeling Tool を用いて概念実証した。組み込み機器が特定の用途に限定して設計されていることに着目し、産業用制御機器特有の情報資産に対する脅威の検出を可能とするとともに、信頼境界内で発生する脅威の検出を抑制することで、脅威の未検出と誤検出を低減した。その結果、脅威分析の品質の均一化と必要となる工数の削減を実現できる可能性を得た。

Automating Threat Analysis for Industrial Control Devices using Threat Modeling Tool

YODA Yasuki

In recent years, the risk of cyberattacks on industrial control systems has increased due to the growing smartification and openness of factories, and accordingly, regulations and guidelines have been established by governments and industry worldwide.

Threat modeling is essential for systematically implementing product security measures; however, it requires specialized knowledge and expertise. Amid the global shortage of cybersecurity professionals, it has become difficult for manufacturers to complete threat modeling and implementation of security measures for large numbers of products within limited timeframes. Although threat modeling tools are expected to address this challenge, existing tools primarily target IT systems, and their applicability to industrial control devices has not been well established.

To address this issue, this study designs threat modeling templates tailored to the system characteristics of industrial control devices and demonstrates their accuracy and effectiveness through a proof of concept using the Microsoft Threat Modeling Tool. By focusing on the fact that embedded devices are designed for specific and limited purposes, the proposed templates enable the detection of threats against assets specific to industrial control devices while suppressing the detection of threats occurring within trust boundaries. As a result, both false negatives and false positives of threats are reduced. The results indicate the proposed approach has the potential to standardize quality of threat modeling and significantly reduce the required effort.

Contact : YODA Yasuki yasuki.yoda@omron.com

1. まえがき

1.1 製品セキュリティ対策の必要性

サイバー攻撃の対象は、従来からの情報システムに対する攻撃にとどまらず、工場などの制御システムへと拡大している。工場のスマート化とオープン化に伴い、IT（情報技術）領域と OT（制御技術）領域の融合が進んだことにより、いまだ独自技術で構成され閉域網でのみ使用されていた産業用制御システムや産業用制御機器においてもサイバー攻撃のリスクにさらされるようになった。今や、制御システムであっても情報システム同様のセキュリティ対策が求められる時代となってきた。

このような背景を受けて、各国・業界はシステムだけでなく、製品そのものに対するセキュリティ法規制やガイドラインの整備を進めている。例えば、欧州サイバーレジリエンス法では広範な“デジタル要素を持つ製品”に対して、製品特性要件と脆弱性処理要件から構成されるサイバーセキュリティ必須要件への適合を要求しており、2027 年 12 月 11 日より強化される予定である¹⁾。また、半導体製造装置では SEMI E187/E188、船用機器では IACS E27 などのセキュリティ規格が制定され調達要件となっている。

製造業者にとってこれらの法規制・ガイドラインへの適合は市場での存続要件として不可欠となっており、オムロンでも対応を進めている。

1.2 脅威分析の必要性と課題

製品のセキュリティ対策を体系的に進める上で、製品のセキュリティリスクを特定するための脅威分析が不可欠である。制御システムセキュリティの国際規格である IEC 62443-4-1 では、脅威モデリングと呼ばれるリスクベースのアプローチを採用することを求めている²⁾。

脅威モデリングとは、潜在的なセキュリティ上の問題を特定するためのセキュリティ設計分析手法であり、STRIDE などのフレームワークに基づいて脅威を抽出する、構造化アプローチの脅威分析手法である³⁾。分析対象のシステム固有の特性や状況を考慮した精度の高い分析ができる一方で、分析者の分析対象およびセキュリティの専門知識や分析フレームワークに対する熟練を必要とする。また、システムの規模や採用したフレームワークによっては多くの工数がかかることがある。

欧州サイバーレジリエンス法では、既存の製品であっても、2027 年 12 月 11 日以降に欧州に出荷する場合は本法の定める必須サイバーセキュリティ要件への適合を求めている。これは各製造業者が、欧州サイバーレジリエンス法の対応期限までに、多くの既存の製品に対して、脅威分析に基づくセキュリティ対策を行わなければならないことを意味する。世界的にセキュリティ人材が不足する中、各製

造業者がそのような人材を必要数確保し、期限までに対応することは難しい状況にある。

1.3 脅威分析ツールの導入による課題の解決

前述の課題の解決策の一つとして、コンピュータ支援による脅威分析の自動化がある。本研究では、脅威分析の未熟練者であっても産業用制御機器の脅威分析を一定品質かつ短期間で実施できるようにすることを目標とし、その手段として脅威分析ツールの導入を検討する。

脅威分析ツールでは、分析対象を表現したモデルに対して、あらかじめ定義された脅威生成ルールとのパターンマッチングを行うことで脅威を抽出する。このマッチング処理は汎用的な機構として実装される一方で、脅威生成ルールの定義は分析対象のシステム特性に依存する。そのため脅威分析の品質を確保するには、分析対象のシステム特性を適切に反映した脅威生成ルールの定義が不可欠である。

従来の脅威分析ツールは IT 領域が対象であることが多く、それらとは異なる特性や運用環境を持つ産業用制御機器に対して、同様の脅威生成ルールを適用した場合の妥当性は必ずしも明らかではなかった。そこで本稿では、産業用制御機器のシステム特性に応じた脅威生成ルールを設計し、産業用制御機器に適した脅威を自動的に抽出する手法を提案する。また、具体的な概念実証として、代表的な脅威分析ツールである Microsoft Threat Modeling Tool（以下、Threat Modeling Tool）を用い、脅威生成ルールをテンプレートとして実装し、その効果を検証する。

2. 脅威モデリングおよび脅威分析ツールの基礎

本章では、次章で述べる産業用制御機器向け脅威モデリングテンプレートの設計を検討するための前提となる、脅威モデリングと脅威分析ツールに関する基礎的な知識について整理する。

2.1 STRIDE による脅威モデリング³⁾

脅威モデリング手法には、高度な専門知識を前提としたものから、比較的簡単に適用可能なものまで多様なアプローチが存在するが、本稿では未熟練者であっても適用可能であり、かつツールによる自動化に適した手法として、STRIDE による脅威モデリングを取り上げる。

STRIDE による脅威モデリングは、システムのモデル表現であるデータフロー図に対して、脅威を抽出するためのガイドワードである STRIDE を体系的にパターンマッチングさせることで包括的な脅威を特定する手法である。以下にその手順を述べる。

Step 1：モデル作成

分析対象のモデルをデータフロー図で作成する。表 1 にデータフロー図の要素を示す。

表 1 データフロー図の要素

要素種別	説明	図記号
External Entity (外部エンティティ)	データの外部入出力先	
Data Store (データストア)	データが保存される場所	
Data Flow (データフロー)	データの流れ	
Process (プロセス)	データの処理	
Trust Boundary (信頼境界)	信頼レベルの切り替わる境界	

脅威モデリングでは、一般的なデータフロー図の図記号に加え、信頼境界の図記号を用いる。信頼境界は信頼できる領域と信頼できない領域を区切る境界線である。信頼境界を越えてくるデータフローは原則として信頼できない入力として扱われ、脅威分析においては認証や入力妥当性確認を検討すべき対象となる。信頼境界は外部からの入力システム内部に到達する箇所を明確化するための概念であり、信頼境界を跨ぐインターフェースやデータフローは、しばしば攻撃面として扱われる。

図 1 に産業用制御機器の代表である PLC (Programmable Logic Controller) の簡易的なデータフロー図の例を示す。本図では信頼境界は PLC の筐体、すなわち物理的境界と置いた。PLC の筐体の内部は信頼できる領域として扱い、PLC と Ethernet 通信をする PC は信頼できない領域と扱うことを意味する。

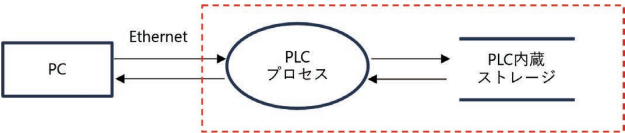


図 1 PLC の簡易的なデータフロー図の例

Step 2 : 脅威抽出

Step 1 で作成したデータフロー図に対して、代表的な脅威のカテゴリを表す STRIDE をガイドワードとして適用することで、脅威を抽出する。STRIDE とは表 2 に示す各ガイドワードの頭文字をとったものである。

表 2 STRIDE

ガイドワード	説明
Spoofing (なりすまし)	自分以外の誰か／何かになりすますこと
Tampering (改ざん)	変更してはいけないものを変更すること
Repudiation (否認)	何かの行為を、自分はやっていないと主張すること
Information Disclosure (情報漏洩)	権限のない人に情報が提供されてしまうこと
Denial of Service (サービス拒否)	システムがサービスを提供できないようにすること
Elevation of Privilege (特権昇格)	プログラムやユーザが、本来実行できてはならないことが実行できるようになること

STRIDE を体系的にデータフロー図へ適用する方法として、データフロー図の要素に着目する STRIDE per Element と相互作用に着目する STRIDE per Interaction がある。

STRIDE per Element では表 3 に定義されるような、データフロー図の要素と STRIDE の対応表を用いて、脅威を抽出する。STRIDE per Element は簡易的で扱いやすいため人による手動での分析に適しているが、脅威の抽象度が高く、その解釈には主観が入りやすいという特徴がある。

表 3 STRIDE per Element

要素	S	T	R	I	D	E
外部エンティティ	○		○			
データストア		○	○(*1)	○	○	
データフロー		○		○	○	
プロセス	○	○	○	○	○	○

(*1) データストアにログが保存されている場合のみ

図 1 のモデルに対して STRIDE per Element を適用した場合に抽出される脅威の一部抜粋を表 4 に示す。

表 4 STRIDE per Element を使って抽出した脅威の例 (抜粋)

適用したデータフロー図の要素	適用したガイドワード	抽出された脅威
PC (外部エンティティ)	Spoofing (なりすまし)	なりすました PC からの PLC への不正アクセス
PLC 内蔵ストレージ (データストア)	Tampering (改ざん)	PLC 内蔵ストレージ上のデータの改ざん
Ethernet (データフロー)	Information Disclosure (情報漏洩)	Ethernet 上の通信データの傍受

表 5 STRIDE per Interaction

要素	相互作用	S	T	R	I	D	E
外部エンティティ	外部エンティティからプロセスへデータフローがある	○		○	○		
	プロセスから外部エンティティへのデータフローがある	○					
データストア	プロセスからデータストアへのデータフローがある		○	○	○	○	
	データストアからプロセスへのデータフローがある			○	○	○	
データフロー	データフローが信頼境界を超える		○		○	○	
プロセス	プロセスからデータストアへのデータフローがある	○			○		
	プロセスから他のプロセスへのデータフローがある	○		○	○	○	○
	プロセスから外部エンティティ（コード）へのデータフローがある	○		○	○	○	
	プロセスから外部エンティティ（人）へのデータフローがある			○			
	データストアからプロセスへのデータフローがある	○	○			○	○
	他のプロセスからプロセスへのデータフローがある	○		○		○	○
	外部エンティティからプロセスへのデータフローがある	○				○	○

一方、STRIDE per Interaction では表 5 に定義されるような、データフロー図の二つの要素間の相互作用と STRIDE の対応表を用いて、脅威を抽出する。STRIDE per Interaction は STRIDE per Element と比較して、複雑度が高くツールの支援が必要となるが、相互作用という文脈が追加されることにより脅威の具体度が高く客観的に理解しやすいという特徴がある。

STRIDE per Interaction を適用した場合の具体例は、2.2 で説明する。

Step 3：対策検討

一般的なリスク管理と同様に、脅威の発生可能性と発生時の影響度の観点からリスク評価を行い、リスク回避、リスク低減、リスク移転、リスク受容のいずれの対応を取るかを判断する。リスク低減と判断したものについては製品への技術的な対策を実施し、リスク移転と判断したものについては、当該リスクおよび必要な対策をユーザに伝達する。表 6 に、リスク低減の際の製品への技術的な対策の例を示す。

表 6 製品への技術的な対策の例

抽出された脅威	技術的な対策
PC になりすました PLC への不正アクセス	ユーザの認証を行う
PLC 内蔵ストレージ上のデータの改ざん	データの改ざん検知を行う
Ethernet 上の通信データの傍受	通信を暗号化する

Step 4：レビュー

設計者、セキュリティ専門家、テスト担当者などの複数の視点から、Step 1 から Step 3 で検討したモデル・脅威・対策のそれぞれに対して、明瞭性、正確性、網羅性、妥当性、一貫性、追跡可能性などの観点を確認する。実施形態としては対面型、配布型、および、その組み合わせ型がある。いずれの場合もレビュー資料に基づき行われ、レビュー結果は記録され、必要に応じてモデル、脅威、対策にフィードバックされる。

2.2 STRIDE による脅威分析ツール

STRIDE による脅威分析ツールは、ユーザが作成したデータフロー図とあらかじめ定義された脅威生成ルールを機械的にパターンマッチングさせることで、該当する脅威を自動抽出する。表 7 に代表的な STRIDE による脅威分析ツールを示す。いずれも IT 領域の製品を主な分析対象としている。

表 7 STRIDE による脅威分析ツールの一例

名称	提供元	想定する主な分析対象	パターンマッチングの方式	脅威生成ルールのカスタマイズ
Threat Modeling Tool ⁴⁾	Microsoft	PC ソフトウェア エンタープライズ クラウドサービス	STRIDE per Interaction	可
Threat Dragon ⁵⁾	OWASP	Web アプリケーション	STRIDE per Element STRIDE per Interaction	不可

Threat Modeling Tool はユーザが脅威生成ルールをカスタマイズ可能なテンプレート機能を持つ。一方、Threat Dragon の脅威生成ルールはツール本体に組み込まれており、脅威生成ルールの変更はできない。

以下に、脅威生成ルールをカスタマイズ可能な Threat Modeling Tool を取り上げ、その仕組みについて説明する。表 8 にテンプレートに定義される脅威生成ルールの一部を示す。

表 8 Threat Modeling Tool の脅威生成ルールの例

脅威名称	条件式
認証情報の漏洩	[プロセス] から [データストア] へのデータフローがある AND [データストア] は認証情報を保存している
入力データの不正操作	(他の [プロセス] から [プロセス] へのデータフローがある OR [外部エンティティ] から [プロセス] へのデータフローがある) AND [データフロー] が信頼境界を超える

ここで、条件にある“[データストア] は認証情報を保存している”は、データストアに設定可能な属性値である。Threat Modeling Tool のテンプレートでは、脅威生成ルールに加えデータフロー図の要素が持つ属性も定義可能であり、各要素において保護すべき資産の取り扱い有無、セキュリティ対策の実装有無などの特性を考慮した脅威生成ルールを定義することができる。これによってデータフロー図の視覚的表現だけでは表しきれない要素の属性を考慮した脅威抽出を可能としている。

図 1 のデータフロー図に対して、表 8 に示した脅威生成ルールを適用した場合の、脅威の検出有無を表 9 に示す。

表 9 相互作用ごとの脅威の検出有無

データフロー (図 1 より)		脅威生成ルール (表 8 より)	
From	To	認証情報の漏洩	入力データの不正操作
PC (外部エンティティ)	PLC プロセス (プロセス)		○
PLC プロセス (プロセス)	PC (外部エンティティ)		
PLC プロセス (プロセス)	PLC 内蔵ストレージ (データストア)	○(*1)	
PLC 内蔵ストレージ (データストア)	PLC プロセス (プロセス)		

(*1) PLC 内蔵ストレージに認証情報を保存している場合のみ

脅威分析ツールの分析結果は、ツール本体の機能そのものよりも、テンプレートに定義された脅威生成ルールの内容に強く依存する。表 10 に示す Microsoft が提供する公式テンプレートにおいても、それぞれの想定する分析対象のシステム特性ごとに用意されていることがわかる。産業用制御機器においても同様に、そのシステム特性に応じたテンプレートの設計を行うことが、脅威分析結果の品質を高めるために重要となる。

表 10 Microsoft の提供する脅威モデリングテンプレート

名称	想定する分析対象
SDL TM Knowledge Base	PC ソフトウェア／エンタープライズ／クラウドサービス
Azure Threat Model Template	Azure
Medical Device Model	医療機器

3. 産業用制御機器のシステム特性を考慮した脅威分析テンプレートの設計

本章では、Threat Modeling Tool を用いた産業用制御機器向け脅威分析テンプレートの設計および実装について詳述する。IT 領域や他の組み込み機器とは異なる産業用制御機器のシステム特性を踏まえ、テンプレートの設計方針を示し、Threat Modeling Tool の産業用制御機器向けテンプレートを作成する。

3.1 脅威モデリングの前提となる産業用制御機器のシステム特性

産業用制御機器は特定の用途に限定して設計されている組み込み機器であり、汎用機器やソフトウェア製品、クラウドサービスといった IT 領域の製品、さらには他の用途を持つ組み込み機器（例：医療機器）とは異なるシステム特性を持つ。本稿では、主要なシステム特性として、保護すべき情報資産および想定すべき攻撃面の違いに着目し、脅威分析テンプレートの設計を行うこととする。

前述のとおり Threat Modeling Tool では、要素、相互関係、属性および信頼境界から構成される条件式によって脅威生成ルールを定義する。要素と相互関係はデータフロー図の一般的要素であるため、分析対象のシステム特性は、属性と信頼境界に現れる。保護すべき情報資産は属性に、想定すべき攻撃面は信頼境界にそれぞれ対応する。

3.1.1 保護すべき情報資産

表 11 に産業用制御機器の扱う代表的な情報資産とその保護特性を示す。一般に特定の用途に限定して設計されている組み込み機器では、汎用機器と比べて扱う情報資産も限定的である。セキュリティとして共通的な資産である認

証情報やログ、組み込み機器として共通的な資産であるファームウェアや設定情報に加え、産業用制御機器特有の情報資産として PLC におけるユーザプログラムがある。特に、産業用制御機器においては、制御ノウハウの流出防止や誤動作／危険動作の防止のために、ファームウェア、設定情報、ユーザプログラムの機密性および完全性の保護が重要となる。また、制御システムの安定稼働を実現するために、ファームウェアやユーザプログラムの可用性の保護も重要である。

表 11 産業用制御機器の代表的な情報資産とその保護特性

情報資産		機密性	完全性	可用性
セキュリティ 共通	認証情報	○	○	
	ログ		○	
組み込み機器 共通	ファームウェア	○	○	○
	設定情報	○	○	
産業用制御機器 特有	ユーザプログラム	○	○	○

なお、本稿では、機密性と完全性はその情報資産がデータストアに保存またはデータフローを伝送されている状態に対する特性とし、可用性はその情報資産がプロセスとして実行されている状態に対する特性と位置付ける。

3.1.2 想定すべき攻撃面

表 12 に製品／サービス種別ごとの典型的な攻撃面の違いを示す。一般に特定の用途に限定して設計されている組み込み機器では、ユーザが OS にログインして自由な操作を行うようなローカル権限を提供していない。そのため、ローカル権限を悪用した攻撃の可能性よりも、ネットワーク経由での攻撃や、ハードウェア製品として特有の物理攻撃（製品の物理インタフェース経由での攻撃や、製品内部部品に対して直接読み書きする攻撃）を考慮する方が適切である。

3.2 産業用制御機器のシステム特性に基づくテンプレートの設計方針

本稿では、Threat Modeling Tool の公式テンプレートの中でも、最も汎用性が高い SDL TM Knowledge Base（以下、デフォルトテンプレート）に対して、3.1 で明らかにした産業用制御機器のシステム特性を考慮したカスタマイズを加えることで、産業用制御機器向けのテンプレートを作成する。

3.2.1 保護すべき情報資産

データストアの属性として、保護すべき情報資産を表現する方法を採用する。Threat Modeling Tool のデフォルトテンプレートのデータストアには、認証情報やログを保存していることを表す属性が存在している。産業用制御機器向けのテンプレートでは、これに、ファームウェア、設定情報、ユーザプログラムを保存していることを表す属性を追加する。また、これらの属性を参照した脅威生成ルールを追加し、該当する情報資産の機密性および完全性を脅かす脅威を検出する。

この方法により、“データストアの改ざん”という抽象的な脅威ではなく、“ファームウェアの改ざん”や“ユーザプログラムの情報漏洩”といった産業用制御機器として守るべき資産に対する具体的な脅威の検出を可能とする。なお、データフローやプロセスに関してはデフォルトテンプレートに存在している脅威生成ルールをそのまま利用することとした。

3.2.2 想定すべき攻撃面

産業用制御機器の物理的境界を信頼境界ととらえ、外部インタフェース経由での脅威を検出の対象とする。データフローが信頼境界を越えない脅威については、ローカル権限を必要とする攻撃と見なし、検出の対象から除外する。

一方で、組み込み機器として考慮すべき脅威として、外部インタフェースとして現れない電子回路基板上のデバッグインタフェースやメモリデバイスの直接読み書きなどの、製品内部への物理攻撃がある。データフロー図では表

表 12 製品／サービス種別ごとの典型的な攻撃面の違い

製品／サービス種別		ネットワーク	ローカル	物理
ソフトウェア製品		◎	○	×
クラウドサービス	IaaS (Infrastructure as a Service)/PaaS (Platform as a Service)	◎	△	×
	SaaS (Software as a Service)	◎	×	×
ハードウェア製品	汎用機器（PC／サーバ機器など）	◎	○	△
	組み込み機器（産業用制御機器、医療機器、IoT 機器など）	◎	×	△

◎：よくある、○：たまにある、△：まれにある、×：めったにない

現が難しいこれらの脅威を検出するために、3.2.1 に挙げた保護すべき情報資産に対する脅威に限り、データフローが信頼境界を越えない場合においても脅威を検出する方法を採用する。

これらの方法により、リスクの高い外部インタフェース経由での攻撃と、製品内部に保存された保護すべき情報資産への物理攻撃を中心とした脅威の検出を可能とする。

3.3 産業用制御機器のシステム特性に基づくテンプレートの実装

3.2 に基づき、実際に Threat Modeling Tool のデフォルトテンプレートに対して行ったカスタマイズの内容を示す。

3.3.1 保護すべき情報資産

まず、産業用制御機器として保護すべき情報資産をデータストアの属性として定義した。実際に追加した属性を表 13 に示す。認証情報およびログについては、デフォルトテンプレートに定義されている属性をそのまま利用することとした。

表 13 データストアに追加した属性

要素種別	属性名	属性値
データストア	ファームウェアを保存している	Yes, No
	設定情報を保存している	Yes, No
	ユーザプログラムを保存している	Yes, No

次に、産業用制御機器として保護すべき情報資産に対する脅威生成ルールを追加した。追加した脅威のうち改ざんの脅威の抜粋を表 14 に示す。実際には情報漏洩についても同様に追加を行っている。なお、前述のとおり物理攻撃を想定するため、脅威生成ルールの条件式には“[データフロー] が信頼境界を超える”という条件は含めていない。また、認証情報の情報漏洩やログの改ざんに対する脅威は、デフォルトテンプレートに定義されているものをそのまま利用することとした。

3.3.2 想定すべき攻撃面

前述の産業用制御機器として保護すべき情報資産が対象となる脅威以外の脅威については信頼境界を超えた場合にのみ脅威を検出するよう変更を行った。表 15 に変更した脅威生成ルールの例を示す。なお、外部エンティティのなりすましや、信頼境界を超えるデータフローの盗聴などの脅威は、デフォルトテンプレートに定義されているものをそのまま利用することとした。

4. 検証結果と考察

4.1 検証方法

ユーザプログラム実行機能を持ったオムロンの産業用制御コントローラ製品に対して、スプレッドシートを使った手動による分析、Threat Modeling Tool のデフォルトテンプレートおよびカスタマイズ後のテンプレート（以下、カス

表 14 追加した脅威生成ルールの一部

脅威名称	条件式
ファームウェアの改ざん	[プロセス] から [データストア] へのデータフローがある AND [データストア] はファームウェアを保存している
設定情報の改ざん	[プロセス] から [データストア] へのデータフローがある AND [データストア] は設定情報を保存している
ユーザプログラムの改ざん	[プロセス] から [データストア] へのデータフローがある AND [データストア] はユーザプログラムを保存している
認証情報の改ざん	[プロセス] から [データストア] へのデータフローがある AND [データストア] は認証情報を保存している

表 15 変更した脅威生成ルールの例

名称	条件式（変更前）	条件式（変更後）
プロセスメモリの改ざん	[プロセス] から [プロセス] へのデータフローがある	[プロセス] から [プロセス] へのデータフローがある AND [データフロー] が信頼境界を超える
データストアのなりすまし	[プロセス] から [データストア] へのデータフローがある OR [データストア] から [プロセス] へのデータフローがある	([プロセス] から [データストア] へのデータフローがある OR [データストア] から [プロセス] へのデータフローがある) AND [データフロー] が信頼境界を超える

タムテンプレート)を使ったツールによる分析の結果に対し、脅威検出傾向の分析と工数削減効果を見積もることにより、カスタムテンプレートの正確性および有効性の評価を行う。また、それらの結果をもとに、本テンプレート設計の適用範囲と限界について考察を行う。なお、手動による分析の結果は、オムロンの制御機器事業で取り扱う製品に対する開発プロジェクトにおける実績に基づいている。

4.2 検証結果

4.2.1 正確性（誤検出・未検出）の評価

手動による分析と、Threat Modeling Toolのカスタマイズ前後のテンプレートでそれぞれ検出した脅威の傾向を表16に示す。手動による分析は、熟練者が実施し、専門家によるレビューを受けた後の値を示している。

デフォルトテンプレートを使った場合、誤検出や未検出の脅威があることがわかる。これは、デフォルトテンプレートが想定する分析対象のシステム特性が産業用制御機器に適しておらず、正確性に問題があることを示している。これに対し、カスタムテンプレートを使った場合、誤検出や未検出が取り除けていることがわかる。これは、テンプレートのカスタマイズにより産業用制御機器のシステム特性を適切に考慮できるようになり、未熟練者であっても熟練者が分析を行う場合と同等の正確性を持った脅威の抽出が可能になったことを意味している。

一方で、手動による分析と比較すると脅威の検出数が約2倍となっていることがわかる。これは主にSTRIDE per ElementとSTRIDE per Interactionの違いに起因する。STRIDE per Interactionは二つの要素間の相互作用に対して脅威を抽出する方式であるため、双方向のデータフローがある場合、その両端の要素に対する脅威がそれぞれの方向に対して検出される。相互作用を考慮せず要素ごとに独立して脅威を抽出するSTRIDE per Elementと比較して、脅威数は相対的に多くなる。なお、属性や信頼境界を条件として考慮していることと、同じ条件式であっても異なる脅威がある場合、脅威が複数種類検出されることがあるため、単純に2倍とはならない。

4.2.2 有効性（工数・再現性）の評価

手動による分析とカスタムテンプレートによる分析にかかる工数の削減効果を見積もった。その結果を図2に示す。なお、手動による分析は、熟練者が実施し、専門家によるレビューを受けた後の値を示している。また、工数は分析担当者のものであり、レビュー担当者などの工数は含んでいない。手動による分析では、熟練者であっても脅威分析全体の工程のうち、約36%の工数がかかっていることがわかる。カスタムテンプレートを使った分析では、脅威の自動生成が可能になったことから、脅威抽出にかかる工数は0とした。検出数は約2倍となったが、双方向のデータフローに対する脅威への対策は共通であることと、脅威の具体化・細分化により分析結果の理解容易性、追跡可能性、および再現性が向上することから、検出数増に伴う工数増を対策検討やレビューの効率化に伴う工数減で相殺可能と考え、対策検討工数とレビュー工数は変化なしとした。その結果約36%の工数の削減効果が見込めることが分かった。

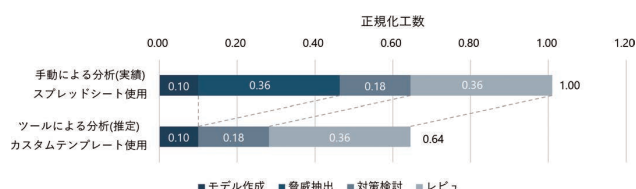


図2 産業用制御機器向け脅威分析ツール導入による工数削減効果（熟練者）

4.3 考察

本稿では産業用制御機器を対象として、脅威分析ツールにおけるテンプレートをシステム特性に基づいてカスタマイズすることにより、脅威分析の正確性および有効性を向上させる手法を示した。その結果、未熟練者であっても熟練者と同等品質の脅威抽出が可能となり、さらに脅威分析全体に対して約36%の工数削減効果があることを確認した。また、手動で分析した場合と比べ、抽出された脅威の数が約2倍となったが、これはSTRIDE per Interactionの特徴である脅威の具体化・細分化によるものであり、脅威シナリオの理解容易性の向上や標準的な対策の提案、脅威抑

表16 脅威分析の方法による検出件数の比較

脅威分析の方法		検出数	正検出	誤検出	未検出
手動による分析 (STRIDE per Element)	スプレッドシート使用	143	143	0	0
ツールによる分析 (STRIDE per Interaction)	Threat Modeling Tool 使用 (デフォルトテンプレート)	185	169	16	123
	Threat Modeling Tool 使用 (カスタムテンプレート)	292	292	0	0

制のための属性の追加などのテンプレートの改善を継続することで、さらなる対策検討工数およびレビュー工数の削減ができる可能性がある。

本手法の適用範囲は、特定の用途に限定して設計されている組み込み機器で、かつ、ユーザが OS にログインして自由に操作可能なローカル権限を持たないものに限定される。そのため産業用 PC や産業用シングルボードコンピュータのように、ユーザがローカル権限を利用可能な機器については、本稿で示した前提条件が成立せず、同一のテンプレート設計方針を適用することはできない。また、本稿では、製品のセキュリティ要件を定めるための、外部インタフェースや資産に着目した最上位レベルの抽象度での脅威分析を対象としている。そのため製品内部での多層防御を目的とした、製品アーキテクチャレベルでの詳細な脅威分析を行う場合については、適切な詳細度に応じたテンプレート設計が必要となる。

なお、本稿で提案した考え方は、特定のツールに依存するものではなく、分析対象をモデル化し、事前に定義されたルールによるパターンマッチングによって脅威を抽出する仕組みを持つ脅威分析ツール全般に適用可能なものである。さらに、本手法は、用途が限定され、ユーザがローカル権限を持たないという特性を有する組み込み機器に共通する考え方と位置付けることができ、産業用制御機器以外の組み込み機器全般においても、脅威分析のテンプレートを設計する際の指針として有用であると考えられる。

5. むすび

本稿では、製品セキュリティに関する法規制や業界要求の強化により、既存製品を含む多くの製品に対して脅威分析に基づくセキュリティ対策が求められている一方で、専門人材や対応工数の不足を社会課題と捉えた。これらの課題に対し、未熟練者であっても一定品質かつ短期間で脅威分析を実施可能とすることを目的として、産業用制御機器向けの脅威分析テンプレートの設計と自動化に取り組んだ。

その結果、産業用制御機器のシステム特性を考慮したテンプレートを用いることで、未熟練者であっても熟練者と同等品質の脅威抽出が可能となることを確認するとともに、脅威分析全体の工数を約 36%削減できることを示した。本成果は、従来、専門家や熟練者への依存度が高かった脅威分析を、分析者の熟練度に依存せず、複数の製品や開発チームに対して横断的かつ継続的に適用可能な、再現性の高いプロセスへと転換できる可能性を示している。特に IT 業界と比べてセキュリティの専門家や熟練者の少ない産業用制御機器業界にこそ、大きな効果が期待されるものである。

今後は、最新の脅威・技術動向や既存の攻撃・対策技術の知識体系を活用し、産業用制御機器特有の脅威シナリオ

や標準的対策をテンプレートに反映していくことで、継続的な製品セキュリティの向上を図る。

本稿で示した考え方は、特定のツールに依存するものではなく、同様の仕組みを持つ脅威分析ツールにも展開可能である。本アプローチが広く活用されることで、産業用制御機器をはじめとする組み込み機器分野における製品セキュリティ対応の迅速化と品質確保の両立が進み、産業界全体のサイバーレジリエンス向上に寄与することを期待する。

参考文献

- 1) European Union. “Regulation (EU) 2024/2847 of the European Parliament and of the Council of 23 October 2024 on Horizontal Cybersecurity Requirements for Products with Digital Elements and Amending Regulations (EU) No 168/2013 and (EU) 2019/1020 and Directive (EU) 2020/1828 (Cyber Resilience Act).” EUR-Lex. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32024R2847> (Accessed: Jan. 5, 2026).
- 2) *Security for industrial automation and control systems – Part 4-1: Secure product development lifecycle requirements*, IEC 62443-4-1 Edition 1.0, 2018.
- 3) A. Shostack, *Threat Modeling: Designing for Security*, Wiley, 2014.
- 4) Microsoft Corporation. “Microsoft Threat Modeling Tool の概要.” Microsoft Learn. <https://learn.microsoft.com/ja-jp/azure/security/develop/threat-modeling-tool-getting-started> (Accessed: Jan. 5, 2026).
- 5) OWASP Foundation. “OWASP Threat Dragon.” OWASP. <https://owasp.org/www-project-threat-dragon/> (Accessed: Jan. 5, 2026).

執筆者紹介



依田 安基 YODA Yasuki

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

PLC ソフトウェア開発部

専門：情報工学

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。

Microsoft は、米国 Microsoft Corporation 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。

OWASP は OWASP Foundation, Inc. の登録商標または商標です。

データ時代の FA システム進化と標準化技術に関する概念検証

尾崎 敏之

近年、製造業ではデータ活用の重要性が高まっている。FA (Factory Automation) システムは従来の制御中心型からデータ中心型への転換が求められており、IoT や AI、クラウド技術の進展を背景に、エンジニアリングチェーンおよびサプライチェーンの両面でデータ連携・標準化技術の活用が不可欠となっている。本論文では、オムロンによる PoC (概念実証) を通じて、製品ライフサイクルトレーサビリティ、環境負荷の可視化、顧客向け情報開示、スマートメンテナンス、生産ラインの柔軟化、出荷・検査の自動化の 6 つのユースケースを検証した。AAS (Asset Administration Shell) や OPC UA、GS1 Digital Link 等の標準化技術を活用することで、現場・設計・経営層が一体となったデータ活用基盤の構築が可能となり、製品ライフサイクル全体にわたるトレーサビリティの確保や環境負荷・品質情報の可視化、現場作業の効率化、サプライチェーン全体の信頼性向上など、多面的な価値創出を実現できることを確認した。今後は AI やデータ解析技術との連携、業界標準化への対応、グローバル展開など、持続可能なものづくりへの貢献が期待される。

A Conceptual Validation of the Evolution and Standardization Technologies of FA Systems in the Data Era

OZAKI Toshiyuki

The importance of data utilization in manufacturing has rapidly increased in recent years. Factory Automation (FA) systems are shifting from control-centric to data-centric architectures, driven by advances in IoT, AI, and cloud technologies. This paper presents OMRON's proof-of-concept (PoC) implementation, which verified six use cases: product lifecycle traceability, visualization of environmental impact, customer information disclosure, smart maintenance, flexible production lines, and automation of shipping and inspection. By leveraging standardization technologies such as Asset Administration Shell (AAS), OPC UA, and GS1 Digital Link, it is possible to build a unified data utilization platform that enables collaboration among shop floor, design, and management layers. This enabled comprehensive traceability throughout the product lifecycle, visualization of environmental and quality information, improved operational efficiency, and enhanced reliability across the supply chain. In the future, collaboration with AI and data analytics, adaptation to industry standardization, and global expansion will be necessary to contribute to sustainable manufacturing.

1. まえがき

近年、製造業を取り巻く環境は大きく変化している。データ活用の重要性が急速に高まる中、FA (Factory Automation) システムは現場の制御に加えて情報を積極的に活用することが、ものづくり現場の競争力強化に不可欠となっている¹⁾。IoT や AI、クラウド技術の進展により、現

場で生成される膨大なデータをいかに収集・活用するかが企業競争力の源泉となっている。

一方、現場では「FA システムがどのように進化していくのか」「どのような標準化技術が必要か」が明確でない状況が続いている。欧州ではインダストリー 4.0 を中心にデータ連携・標準化が進展し、米国でもスマートマニュファクチャリングの潮流が加速している^{2,3)}。なお、日本のものづくり現場では「多品種少量生産」「現場力」「技能

Contact : OZAKI Toshiyuki toshiyuki.ozaki@omron.com

継承」といった独自の強みが存在している。これらの特徴を活かしつつ、グローバルで運用可能なシステムの構築が求められる。

本論文では、こうした背景を踏まえ、顧客価値に応えるための FA システム進化の方向性を探るとともに、オムロンによる PoC (概念実証) を通じて、将来のものづくり像と必要な標準化技術の方向性を明らかにすることを目的とする。

2. 想定するユースケースと顧客価値

製造業におけるデータ活用は、主に「エンジニアリングチェーンマネジメント (ECM)」と「サプライチェーンマネジメント (SCM)」の 2 つの流れに分類される (図 1 参照)。

ECM は、製品設計、設備構成、制御プログラムなどの技術情報を設計・製造・運用の各工程で連携させる仕組みであり、設計変更や仕様更新をリアルタイムに現場へ反映することで、開発と生産の統合管理を可能にする。

一方、SCM は、部品調達から製造、出荷、保守、廃棄に至るまでの物流・品質・在庫・環境情報を企業間で共有・連携することで、需給バランスの最適化や持続可能な供給体制を実現する。

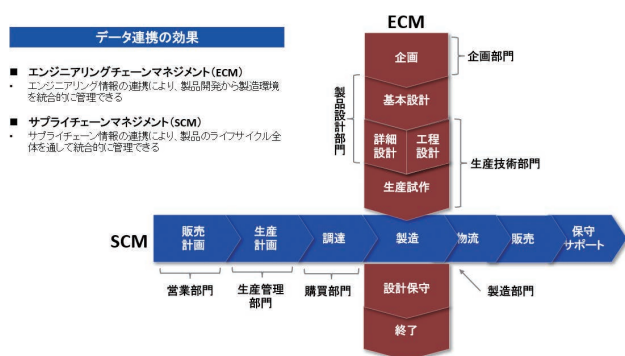


図1 エンジニアリングチェーンマネジメントとサプライチェーンマネジメントの連携によるデータ活用効果

本論文では、これらのチェーンを横断的に活用し、グローバルな現場で普遍的に求められる代表的な 6 つのユースケースを整理した。これらは、製品ライフサイクルトレーサビリティ、環境負荷の可視化、顧客向け情報開示、スマートメンテナンス、生産ラインの柔軟化、出荷・検査の自動化である。なお、これら 6 つのユースケースは、製造業のバリューチェーン全体（設計・製造・出荷・保守・廃棄）を体系的にカバーするとともに、日本の現場に特有の「多品種少量生産」「現場力」「技能継承」といった課題にも対応可能な設計となっている。

このようなユースケースの整理により、グローバルな標準化技術を活用しつつ、日本の現場の強みや課題にも柔軟に対応できるデータ活用基盤の構築を目指す。

2.1 製品ライフサイクルトレーサビリティと品質保証

関連チェーン：ECM および SCM 全体

製品や部品に一意の識別子を付与し、設計・製造・出荷・使用・保守・廃棄までの全工程で履歴情報を追跡・管理することで、製品のライフサイクル全体を通じたトレーサビリティを実現する。この仕組みにより、顧客は製品の信頼性や安全性を確信でき、製造業者のブランド価値向上につながる。

2.2 環境負荷の可視化とサステナビリティ対応

関連チェーン：SCM (製造から販売まで)

製品や設備、部品ごとに CO₂ 排出量を算定し、サプライチェーン全体でのデータ共有により、企業間での環境影響評価や国際規制への対応が加速する。顧客は透明性の高い環境情報をもとに製品を選択できる。

2.3 顧客向け製品情報開示と信頼性向上

関連チェーン：SCM (販売)

最終製品に印字された QR コードをスマートフォン等で読み取ることで、製品仕様、原産地、環境負荷、トレーサビリティ情報などを顧客が直接確認できる仕組みを構築する。これにより、ブランドの透明性と信頼性が向上し、ESG (Environmental, Social, and Governance) 対応力の強化にもつながる。

2.4 スマートメンテナンスによるサービス品質向上

関連チェーン：ECM (製造から設計保守) + SCM (製造から保守サポート)

設備や部品に識別コードを付与し、現場でスキャンすることで稼働履歴や保守履歴、摩耗状況などの情報に即時アクセス可能となる。これにより、ダウンタイムの削減、保守作業の効率化、設備稼働率の向上が可能となる。

2.5 生産ラインの柔軟化とカスタマイズ対応

関連チェーン：ECM (企画から設計保守)

製造装置や部品を自動識別し、Digital Twin に基づいて最適な設備設定を自動適用することで、工程状態を仮想空間でシミュレーション・最適化できる。これにより、顧客の多様なニーズに柔軟に対応できる生産体制が構築される。

2.6 出荷・検査・受入の自動化と信頼性向上

関連チェーン：SCM (調達から製造)

納入部品や出荷製品に付与された 2 次元コードをスキャンすることで、Digital Twin 上の製造・品質データと照合し、受入・検査・真贋確認を自動化する。これにより、顧客への納品品質と対応スピードが向上し、信頼性の高い取引が実現する。

3. 従来技術による方法

従来の FA システムでは、現場ごとに個別最適化された業務プロセスが長年運用されてきた。主な情報管理手段は紙や Excel による記録であり、設計変更や設備構成などのエンジニアリングチェーンの情報は現場にリアルタイムで反映されず、サプライチェーンにおいても部品調達や品質情報が企業間で分断されていた。

このため、情報の分断や属人化が発生しやすく、設計と製造、供給と保守が分断されることで、ユースケースで求められる全体最適やリアルタイムなデータ活用が困難となっていた。

これらの課題は、グローバルなものづくり現場に共通している。多品種少量生産への柔軟な対応、現場改善活動の知見の組織的共有、技能継承の効率化など、日本の現場に特有の課題に対しても、従来技術では十分な対応ができていなかった。

設計から製造、出荷、保守に至るまでの全工程で一貫したデータ連携を実現するためには、システム間の相互運用性を確保することが不可欠であり、標準化技術の導入による情報連携・業務効率化が求められている。

4. ユースケース実現に向けた PoC の検証項目

ユースケースを実現するためには、エンジニアリングチェーンとサプライチェーンの各フェーズで関係者やデータの利用目的が異なるため、標準化された仕組みやコンテナ、インターフェースの導入が不可欠である。

本章では、ユースケース実現のための PoC 検証内容を「データの記録」「データの共有」「Dataspace を含めたデータの活用」の3点から整理した。図2は PoC の全体像を示したものであり、製品生産時・流通時・稼働時の各フェーズで標準化技術の有効性を評価した。なお、Dataspace を「複数の企業やシステム間で、データ主権を保ったまま安全かつ柔軟にデータを共有・連携できる仕組み」と定義する。

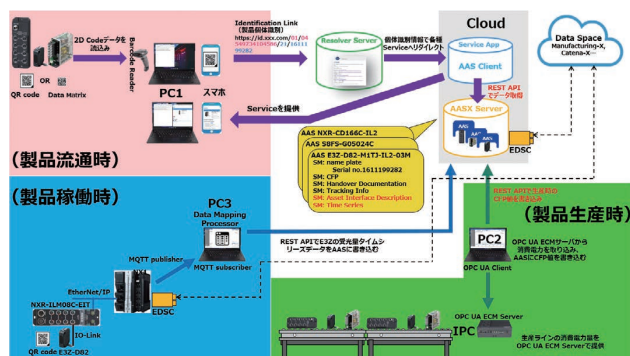


図2 PoC の全体像

4.1 PoC で使用した標準化技術

本 PoC では、データの記録・共有・活用に関する各機能

検証を具体化するため、現時点で有望かつ国際的な標準化技術を選定し、実装・評価を行った。以下に、活用した主要な標準化技術について概要を示す。

- Asset Administration Shell (AAS)⁴⁻⁷⁾

AAS は、インダストリー 4.0 における Digital Twin の中核技術であり、物理資産の属性や機能を標準化された形式で記述する枠組みである。これにより、異なるシステム間での情報交換が可能となり、製造業における自動化と相互運用性の向上に寄与する。AAS は、設計・製造・保守・廃棄までのライフサイクル情報を一元管理する基盤として機能する。

- OPC UA 情報モデル^{8,9)}

OPC UA における情報モデルとは、アドレス空間上のノード (Object/Variable/Method/DataType 等) とそれらを結ぶ参照を用いて、設備やサービスの意味・構造を定義するメタモデルである。情報モデルは Type 定義 (ObjectType/VariableType) とインスタンスで構成され、モデリングルールに従って汎用的かつ拡張可能に設計される。

- OPC UA for Energy Consumption Management (ECM)¹⁰⁾

OPC UA ECM は、エネルギー消費に関するデータの収集・管理を標準化する情報モデルである。OPC UA の通信基盤を活用し、設備のエネルギー使用状況をリアルタイムで可視化・分析することで、効率的なエネルギー管理を実現する。これにより、環境負荷の可視化や省エネ施策の推進が可能となる。

- REST API

REST API は、Web 技術に基づくシステム間通信の標準的なインターフェースである。HTTP プロトコルを用いて、リソースの取得・更新・削除を簡潔に実行可能であり、軽量かつ柔軟性に優れる。IoT やクラウド環境との連携に広く利用されており、PoC では AAS や各種データベースとの情報連携に活用した。

- Identification Link¹¹⁾

Identification Link は、製品や資産の識別情報をデジタルで一元管理する URI 構文と表現である。この PoC では、GS1 Digital Link を用いて、製品のライフサイクル全体にわたる情報追跡を可能にし、品質管理とトレーサビリティの強化を支援した。

- GS1 Digital Link¹²⁾

GS1 Digital Link は、製品識別子 (GTIN など) を URI として表現する構文である。これにより、バーコードや RFID を通じて製品情報、トレーサビリティ、保証情報などにアクセス可能となり、サプライチェーンの透明性と効率性を向上させる。PoC では、QR コードを用いた個体識別や情報取得の基盤として活用した。

- Eclipse Dataspace Components (EDSC)¹³⁾

EDSC は、企業間での安全かつ制御されたデータ共有を実現するオープンソースコンポーネントである。データ主権を保持しながら、信頼性の高いデータ連携を可能にする。欧州を中心にデータスペース構築に活用されており、今後の企業間連携やエコシステム形成の基盤技術として期待される。なお、EDSC は Data-space Connector の主要な実装のひとつであり、Data-space Connector を通じて企業間のデータ共有やアクセス制御を実現する。

4.2 データの記録

本 PoC では、図 3 に示すシステム構成を用い、製造現場における製品および設備情報の体系的な記録手法を検証した。記録対象は、(1) タイプ（形式）情報、(2) ロットごとの情報、(3) デバイス固有の情報（シリアルナンバーに紐付いた情報）の 3 階層である。

まず、各製品・設備に対し、AASを用いて情報モデルを構築した。AASは属性情報・履歴情報・環境負荷情報等を標準化されたデータ構造で記述した。各情報はAASの標準仕様に従い管理され、タイプ・ロット・シリアルナンバーごとに一意にアクセス可能となるよう設計した。AASのメタデータには、データの意味・構造・単位・関連性を明確化するためのセマンティクス情報を付与し、現場担当者・管理者・機械のいずれも一貫して理解・利用できるようにした。

実装手順は以下の通りである。

1. AAS 情報モデルの設計・生成
 - ・製品・設備ごとに AAS 情報モデルを設計し、タイプ・ロット・シリアルナンバー階層の属性を定義した。
 - ・AAS 情報は、標準インターフェースによってアクセス可能なようにサーバ上に格納した。
2. QR コードの生成・付与
 - ・Identification Link 規格に基づき、各製品・設備に QR コードを生成・貼付した。
 - ・QR コードには Resolver へのアクセス URI を埋め込み、現場や顧客がスマートフォンや専用端末で情報取得可能とした。本論文では Resolver を、QR コードに格納された URI を入力として、Identification Link 規格に基づく識別子と情報リソースとの対応関係を解決し、利用者に対して適切な情報取得手段を提供する機能と定義する。
3. 情報記録・更新の運用
 - ・製造・検査・保守工程で発生する履歴情報や環境負荷データを AAS に自動的に記録した（例：図 3 の製品稼働時の時系列データ参照）。

- ・生産設備は現場でよく使われている OPC UA の情報モデルで定義し、設備の情報を AAS の情報とスムーズに統合した（例：図 3 の製品生産時の OPC UA 参照）。
- ・設計変更や工程変更時は、AAS 情報をリアルタイムで更新し、現場・設計・経営層間で一貫した情報共有を実現した。

この仕組みにより、従来の紙や Excel による属人的な記録管理から脱却し、リアルタイムかつ体系的な情報記録・管理基盤を構築できることを確認した。

また、QRコードを介した現場・顧客による情報アクセスの容易化により、トレーサビリティ・品質保証・環境対応力の向上を実現した。

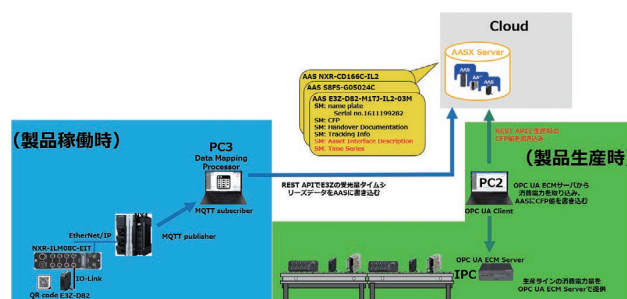


図3 製品生産時および稼働時の情報の記録方法

4.3 データの共有

本PoCでは、図4に示すシステム構成を用い、製品および設備に関する情報を関係者間で安全かつ容易に共有する仕組みを検証した。共有対象は、AASに記録されたタイプ・ロット・シリアルナンバーごとの情報であり、図5に示すように現場担当者は稼働履歴、設計部門はマニュアル、経営層は製造場所、サプライチェーンパートナーはロットやCFP値など、それぞれの立場で必要な情報にアクセスできることを目指した。

情報共有の実現には、以下の標準化技術を活用した。

1. Identification Link を用いた QR コードの活用
 - Identification Link の実装として GS1 Digital Link 技術を採用し、粒度毎のアクセスに必要なタイプ・ロット・シリアルナンバーの情報を組み込みエンコーディングした。
 - 製品・設備に貼付された QR コード（GS1 Digital Link 規格）を現場担当者や顧客がスマートフォンや専用端末でスキャンすることで、AAS 情報への直接アクセスを可能とした。
2. Resolver による異なるサービスの実現

それぞれのユーザからのリクエストに含まれているサービス情報を解釈し、該当する情報へのリダイレ

クトを実現した。

3. REST API の活用

- サーバ上に格納された AAS 情報モデルを REST API を用い、関係者が必要な粒度（タイプ・ロット・シリアルナンバーごと）の情報にアクセス可能とした。
- REST API 仕様に準拠した実装とし、GET 操作で情報取得を実現した。

この仕組みにより、従来の紙や Excel への依存から脱却し、リアルタイムな情報共有・自動化の実現に寄与できることを確認した。

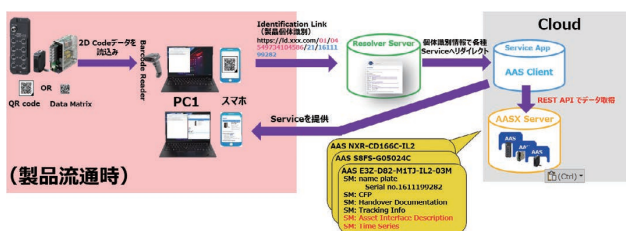


図 4 製品流通時の製品情報の共有方法

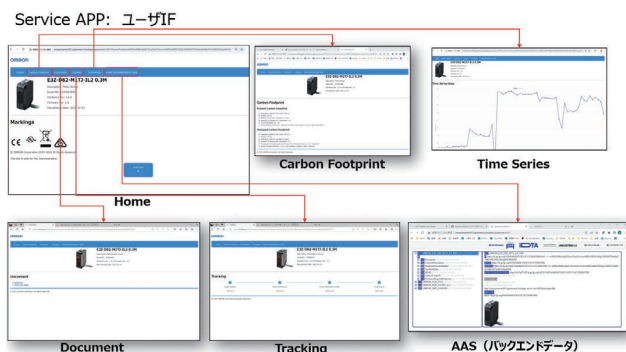


図 5 製品情報とユーザインターフェース

4.4 Dataspace を含めたデータの活用

本 PoC では、図 6 に示すシステム構成を用い、Dataspace との連携の可能性を検証した。

Dataspace との連携には、以下の標準化技術を活用した。

1. Dataspace Connector による Dataspace との連携

Dataspace Connector とは、企業や組織間で安全かつ相互運用可能なデータ共有を実現するためのソフトウェアで、データ主権を保持しながらカタログ参照、契約交渉、データ転送を行う仕組みである。

2. Eclipse Dataspace Components (EDSC) の実装

- データ連携に EDSC を活用し、利用者ごとのアクセス権限・セキュリティ要件を設定した。
- EDSC による AAS サーバ全てのデータを提供した。
- PLC 制御に必要な情報を Dataspace から獲得した。

この仕組みにより、データ主権の確保、アクセス権限管理、自動契約、セキュリティの実現の可能性を確認できた。

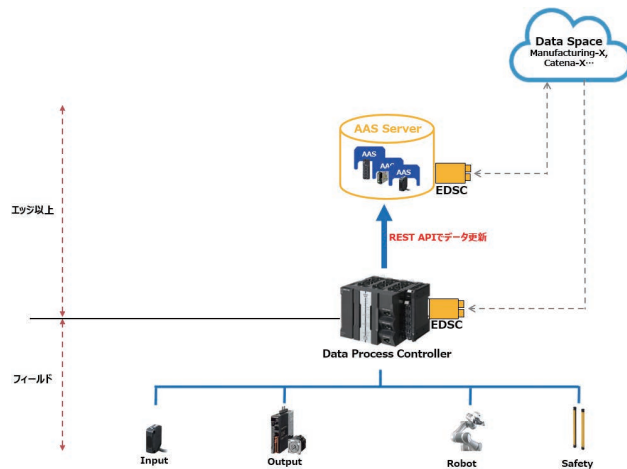


図 6 Dataspace を想定したスマートコントラクトや対象データの探索方法

5. ユースケースの達成状況と残課題

5.1 PoC によるユースケースの達成状況

第 4 章で述べた PoC の結果、各ユースケースに対し以下の達成状況が得られた。

1. 製品ライフサイクルトレーサビリティと品質保証

AAS や GS1 コードを活用し、設計・製造・出荷・保守・廃棄までの情報を一元管理した。QR コードによる個体識別と即時アクセスにより、現場での履歴確認やリコール対応、品質監査の迅速化が可能となった。

2. 環境負荷の可視化とサステナビリティ対応

製品単位での CO₂ 排出量 (CFP) を AAS に記録し、OPC UA ECM や REST API を通じて環境負荷を可視化した。現場や顧客が QR コードで CFP 情報を取得できる仕組みを実現した。

3. 顧客向け製品情報開示と信頼性向上

QR コードを用いて、顧客が AAS に格納された製品仕様・原産地・CFP・履歴情報を取得可能とし、透明性と信頼性の向上を確認した。

4. スマートメンテナンスによるサービス品質向上

設備や部品の QR コードスキャンにより、AAS に格納された保守履歴・稼働情報へ即時アクセスできるようになった。これにより、作業時間短縮とミス削減に寄与することを確認した。

5. 生産ラインの柔軟化とカスタマイズ対応

装置の QR コードスキャンで AAS から装置情報を取得し、工程変更時の準備作業効率化や柔軟な生産対応の可能性を確認した。

6. 出荷・検査・受入の自動化と信頼性向上

製品の QR コードと AAS の製造・品質データを照合し、検査工程の自動化や誤納・偽造防止、出荷ミス削減ができることを確認した。

本 PoC の結果、AAS や Identification Link などの標準化技術を活用することで、製品ライフサイクル全体にわたるトレーサビリティの確保、環境負荷の可視化、顧客への情報提供の高度化など、従来の属人化・分断された業務プロセスからの脱却が可能であることが示された。これにより、現場・設計・経営層を横断したデータ活用基盤を強化する構想を示すことができた。

5.2 残課題

一方で、企業間や工場間の本格的なデータ共有、Dataspace Connector を活用した外部連携、ユーザアクセス権限管理やエコシステム全体のセキュリティ設計などについては、現状では限定的な検証にとどまっている。

また、人がデータを選択し共有できることは確認できたが、機械が自動でデータを指定するためのサービスコードのセマンティクスが不十分であることがわかった。ここでいうサービスコードとは、機械やシステムが必要とするデータの種類や内容を指定するためのコードや識別子であり、これにより人手を介さずに目的に応じたデータの自動取得・共有が可能となる。そのため、機械を含めた全ての関係者のニーズを満たすには、サービスコードの更なる標準化が必要となる。

6. むすび

本論文では、制御に加えて情報を活用した FA システムへの進化と、標準化技術の活用によるデータ基盤構築の可能性について検討した。AAS、OPC UA、Identification Link、REST API、Dataspace Connector などの標準化技術を活用することで、現場・設計・経営層が一体となったデータ活用基盤の構想を示し、製品ライフサイクル全体のトレーサビリティや環境負荷の可視化、顧客への情報提供の高度化など、多面的な価値創出が可能であることを確認した。

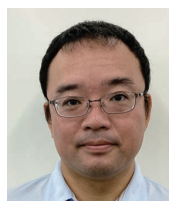
今後は、AAS の自動生成・更新機能の強化、Dataspace Connector を活用した企業間連携の実証、DPP (Digital Product Passport) との統合による顧客向け情報提供の高度化、AI やデータ解析技術との連携による工程最適化など、さらなる技術開発と実証が必要である。特に、機械による自動アクセスを実現するためのサービスコード標準化は、グローバルなものづくり現場全体に共通する重要な課題であり、国際標準化活動の加速が求められる。

本研究の成果を読者の皆様と共有し、課題解決や将来ビジョンの実現に向けて、次世代のものづくりとともに切り拓いていきたい。

参考文献

- 1) Object Management Group. *The Data Centric Architecture of a Factory Digital Twin*, 26th ed. (2025). Accessed: Dec. 25, 2025. [Online]. Available: https://www.objectmanagementgroup.org/wp-content/uploads/sites/8/2025/02/JOI_20250204_6_The_Data_Centric_Architecture_of_a_Factory_Digital_Twin_Standalone.pdf
- 2) European Parliamentary Research Service. "Standards and the Digitalisation of EU Industry: Economic Implications and Policy Developments." European Parliament. https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/635608/EPRS_BRI%282019%29635608_EN.pdf (Accessed: Dec. 25, 2025).
- 3) Deloitte. "2025 Smart Manufacturing and Operations Survey: Navigating Challenges to Implementation." Deloitte Insights. <https://www.deloitte.com/us/en/insights/industry/manufacturing-industrial-products/2025-smart-manufacturing-survey.html> (Accessed: Dec. 25, 2025).
- 4) *Specification of the Asset Administration Shell Part 1: Metamodel*, IDTA Number: 01001, 2025.
- 5) *Specification of the Asset Administration Shell Part 2: Application Programming Interfaces*, IDTA Number: 01002, 2025.
- 6) *Specification of the Asset Administration Shell Part 3a: Data Specification – IEC 61360*, IDTA Number: 01003-a, 2025.
- 7) *Specification of the Asset Administration Shell Part 5: Package File Format (AASX)*, IDTA Number: 01005, 2025.
- 8) *UA Part 3: Address Space Model*, OPC 10000-3, 2025.
- 9) *UA Part 5: Information Model*, OPC 10000-5, 2025.
- 10) *Energy Consumption Management*, OPC 34100, 2025.
- 11) *Identification Link – Part 1: General Requirements*, IEC 61406-1:2022, 2022.
- 12) GS1. "GS1 Digital Link." GS1. <https://www.gs1.org/standards/gs1-digital-link> (Accessed: Dec. 25, 2025).
- 13) Github, inc. "EDC Connector." Github. <https://github.com/eclipse-edc/Connector> (Accessed: Dec. 25, 2025).

執筆者紹介



尾崎 敏之 OZAKI Toshiyuki

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 テクニカルイノベーションセンタ
開発部

専門：ソフトウェア工学

所属団体：ODVA テクニカルレビューボード、
IEC/TC65/SC65E/WG10

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。
Microsoft および Excel は、米国 Microsoft Corporation 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。

3

新たな成長領域を 生み出す技術



機械学習を用いた会計データのリスク定量化による内部監査業務の効率化

太田 雄也, 藤井 徹

近年、不適切会計の開示企業数は増加傾向にあり、内部監査の実施によるリスク低減が重要である。そのため、監査人による会計データのリスク確認が必要だが、膨大な会計データに対し網羅的に人手で確認することは現実的ではない。

本稿では、BRF (Balanced Random Forest) をベースに、摘要欄の活用と監査人のリスク分析ノウハウを考慮したモデル構造の採用により内部監査特有の技術課題を解決した異常検知手法を提案する。これにより、会計データのリスクを異常スコアとして定量化でき、網羅的かつ効率的なリスク分析が可能となることを示す。

自社の会計データに提案手法を適用し、異常スコア上位 2% を閾値とした場合の再現率が 72.1% に達することを確認した。さらに、実際の内部監査業務に活用し、従来の人手でのリスク分析と比較して 1 会計単位あたりの分析時間を 43% 削減することができた。

Risk Prediction in Accounting Data in Internal Audit using Machine Learning

OTA Yuya and FUJII Toru

In recent years, the number of companies disclosing inappropriate accounting has been increasing, and it is important to conduct internal audits to reduce risks. Therefore, it is necessary for auditors to inspect the risks of accounting data. However, it is difficult to manually inspect all the large amount of accounting data accumulated daily.

In this paper, we propose an anomaly detection method that addresses the unique technical challenges of internal auditing by leveraging the Balanced Random Forest (BRF) approach, utilizing descriptions, and incorporating auditors' risk analysis processes into the model structure. This method allows for the quantification of accounting data risks as anomaly scores, enabling comprehensive and efficient risk analysis.

We applied the proposed method to our company's accounting data and confirmed that the recall rate reached 72.1% when the top 2% of anomaly scores were used as the threshold. Furthermore, by applying this method to actual internal audit operations, we were able to reduce the analysis time per accounting unit by 43% compared to traditional manual risk analysis.

1. まえがき

1.1 背景

近年国内における不適切会計の開示件数は増加傾向にある¹⁾。そのため、内部監査の実施を通して社内の内部統制意識を向上させることで、不正行為は当然のこと、会計処理におけるミスやムダの発生に対するリスクを低減させる

ことが重要である。具体的には、会計および内部統制に関する知見・ノウハウを有する社内の担当者が、監査人として会計データを確認してミス・ムダ・不正につながるレコードを抽出するリスク分析を行う必要がある。しかし、膨大な会計データに対して人手で網羅的な分析を行うことは困難である。

この問題の解決策の一つとして、会計データを効率的に分析するための CAAT (Computer Assisted Audit Techniques, コンピュータ利用監査技法) ツールが商用化されてい

Contact : OTA Yuya yuya.ota@omron.com

る²⁾。しかし、高リスクなレコードを抽出するための仮説の洗い出しや、具体的な分析手法の選定・構築は監査人自身で行う必要がある³⁾。そのため、リスク分析の効率化に対する効果は限定的、かつリスク分析の質は監査人の知見・ノウハウに依存する。もう一つの解決策として、外部監査においては機械学習を用いて会計データの不正のリスクを異常スコアとして定量化し異常検知を実現することで、監査業務を効率化する試みがなされている⁴⁾。一方で内部監査を対象とした先行研究は公開されていない。これは、外部監査における異常検知手法を内部監査に適用して効率化を実現するには課題が存在するためである。それらの課題は、外部監査と内部監査の目的と業務内容の違いから説明できる。

1.2 内部監査におけるリスク分析の特徴

外部監査は企業の財務情報の信頼性を担保することが目的であり、監査法人や公認会計士などの第三者機関によって行われる監査である。一方、内部監査は企業の経営目標に対する経営および業務の適切性を確認し改善することが目的である。そのため、業務の不正や正確性（ミス）だけでなく、効率性（ムダ）も対象とすることが特徴である⁵⁾。内部監査におけるリスク分析を対象とした異常検知手法では、機械学習の観点から以下の特徴を考慮する必要がある。

- (1) 正常データに対して異常データが著しく少ない（不均衡データ）
- (2) 入力に数値データ・カテゴリデータに加えテキストデータも含まれる
- (3) 真値に対してラベル付きデータは一部にのみ存在する（半教師あり）

(1) は外部監査・内部監査に共通する特徴であり、(2) (3) は内部監査において重視される特徴である。(1) は、膨大な会計データと比較するとミス・ムダ・不正の疑いがあるレコードがごく僅かであることによる。このようなデータに対処策なく学習を行うと、すべてのデータに対して正常であると予測する無意味なモデルを構築してしまう可能性がある。

(2) は、会計処理の背景にある内部統制意識を確認するために摘要欄も重視することによる。摘要欄とは取引内容をわかりやすくするために記入されるフリーテキストの項目であり、取引の詳細や用途、特記事項などが記載される。外部監査では、財務情報の信頼性担保の観点から金額や日付、勘定科目といった数値データやカテゴリデータを主な分析対象とする。一方で、内部監査ではそれらに加えてテキストデータである摘要欄も考慮する必要がある。

(3) は、ミス・ムダ・不正の疑いがあるレコードすべて

にラベル付けすることは現実的ではないことによる。外部監査では不適切会計として公開された情報を教師ラベルとして扱うことができる。一方、内部監査の対象であるミス・ムダ・不正の疑いがあるレコードは軽微なものまで含めると膨大な件数となる。また、取引実態の調査には工数を要するためすべての対象レコードを抽出することは現実的ではない。このようなデータで学習を行い、新たなレコードに対して異常スコアを予測すると、真値では高リスクとなるレコードであっても異常スコアが低く予測される可能性がある。

本稿の貢献は、内部監査の特徴 (2) (3) を考慮した教師あり機械学習手法を構築し、内部監査におけるリスク分析に有効な異常検知を実現することにある。本稿では、特徴 (1) のみ考慮した外部監査で活用実績のある機械学習手法をベースに、まず特徴 (2) への対応として摘要欄を対象とした監査人のリスク分析の知見・ノウハウに基づいた特徴量の抽出を行った。さらに、特徴 (3) への対応として監査人のリスク分析プロセスを考慮したモデル構造を採用した。以上により内部監査を対象とした異常検知を提案する。

本稿の構成は次の通りである。2章では特徴 (1) への対応として外部監査での機械学習手法を述べたうえで、特徴 (2) (3) に対する関連研究を述べる。3章では提案手法を述べる。4章では自社の会計データを用いて提案手法の有効性を示す。最後に5章で本稿のまとめを示すとともに、他の業務プロセスへの展開による事業貢献の展望を述べる。

2. 先行研究

2.1 外部監査における異常検知

外部監査を対象とした異常検知の先行事例として文献6)がある。文献6)では、まず会計データから抽出した特徴量を不正リスクの種別毎に分類する。そして、各種別に対して、不均衡データに対応可能な教師あり機械学習手法のBalanced Random Forest (BRF)を適用し、サブモデルを構築する。最後にサブモデルを統合して判定結果を得る。

監査人は、蓄積された経験知に基づいて会計データから多岐にわたる特徴を捉えたうえで、様々な不正の手口を想定して当該レコードのリスクを判断する。そのため、説明変数が高次元であることと、識別モデルが高い非線形性を有することが前提となる。BRFは決定木を用いた識別モデルRandom Forest (RF)をベースとしていることから、これらの前提にも適した手法である。これらの前提は内部監査でも共通する。

2.1.1 Balanced Random Forest (BRF)

BRF は、RF に対し不均衡データ適用時の課題解決策を施した機械学習手法である。RF では、復元抽出によるサンプリング（ブートストラップサンプル）を複数回行ったうえで各ブートストラップサンプルから決定木を構築し、それらの多数決などにより識別を行う。一方、BRF では各ブートストラップサンプルから決定木を構築する前に、各クラスラベルのサンプル数が同数になるように多数派のクラスラベルのサンプル数を減らすことでデータの不均衡を解消する手法である（図 1）。

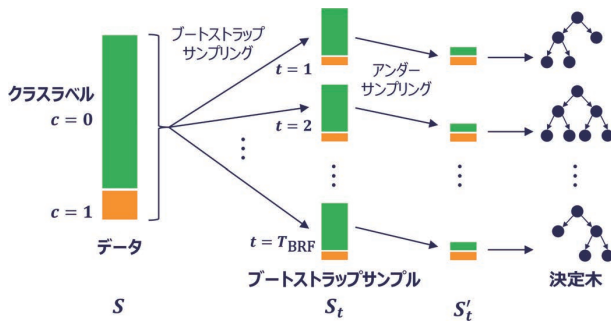


図 1 BRF の概要

まず、学習時ではデータ S から T_{BRF} 個の決定木を構築する。 S から抽出した t 番目 ($t=1, \dots, T_{\text{BRF}}$) のブートストラップサンプル S_t において、 $c=0$ のデータ数 $n_{c=0}$ と $c=1$ のデータ数 $n_{c=1}$ を比較し、 $n_{c=0} = n_{c=1}$ となるように、多数派のクラスラベルのデータからランダムに間引き（アンダーサンプリング）を行うことでサンプル S'_t を得る。 S'_t に対して決定木アルゴリズムを適用することで 1 つの決定木が構築される。すべてのブートストラップサンプルに対して同様の処理を行うことで T_{BRF} 個の決定木が構築される。 t 番目の決定木のある葉ノードに $x \in S$ が属するとき、一つの決定木の葉ノードにおけるクラスラベルの予測確率 $p_t(c|x)$ は、葉ノードにおける各クラスラベルのデータの割合で表すことができる。

次に、テストデータ $x_i (i=1, \dots, N)$ の各クラスラベル $c \in \{0, 1\}$ の予測確率 $p(c|x_i)$ を求める。まず、 t 番目の決定木に注目すると、 x_i は決定木の条件分岐に従ってある葉ノードに属することになる。従って、 x_i に対する t 番目の決定木の葉ノードにおけるクラスラベルの予測確率 $p_t(c|x_i)$ が推定結果となる。

以上より、最終的な予測確率 $p(c|x_i)$ は、 T_{BRF} 個の決定木における予測確率の相加平均として得られ、次式で表される。

$$p(c|x_i) = \frac{1}{T_{\text{BRF}}} \sum_{t=1}^{T_{\text{BRF}}} p_t(c|x_i) \quad (1)$$

2.2 関連研究

特徴 (2) に対応する関連研究を 2.2.1 と 2.2.2 で、特徴 (3) に対応する関連研究を 2.2.3 で述べる。

2.2.1 テキストデータの数値ベクトル化

特徴 (2) に関し、テキストデータに対する異常検知手法として、数値ベクトル化と外れ値検知を組み合わせる手法が提案されている⁷⁾。具体的には、テキストデータを数値ベクトル化したのち、得られた数値ベクトルに対して外れ値検知を行うことで異常なテキストデータを検知する方法である。

数値ベクトル化はテキストを単語単位に分割したうえで、各単語を何らかの数値に変換することで、テキストを数値ベクトルに変換する手法である。一般的な手法として、BoW (Bag of Words) や TF-IDF (term frequency - inverse document frequency) がある。

・ BoW

BoW は文書における各単語の出現回数である。 N_{doc} 個の文書が N_{word} 個の単語で構成されるとする。また、 i 番目の文書 $d_i (i=1, \dots, N_{\text{doc}})$ の単語 $w_j (j=1, \dots, N_{\text{word}})$ の出現回数を n_{ij} とする。このとき、文書 d_i に対する BoW は次式を要素とする N_{word} 次元のベクトルとなる。

$$\text{bow}(w_j | d_i) = n_{ij} \quad (2)$$

・ TF-IDF

TF-IDF は、BoW に対して全文書における各単語の珍しさを重視した指標である。文書 d_i に対する TF-IDF は次式を要素とする N_{word} 次元のベクトルとなる。ここで、 $|\cdot|$ は要素数を表す。

$$\text{tf-idf}(w_j | d_i) = \text{tf}_{ij} \cdot \text{idf}_j \quad (3)$$

$$\text{tf}_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_{k=1}^{N_{\text{word}}} n_{ik}} \quad (4)$$

$$\text{idf}_j = \log \frac{N_{\text{doc}}}{|\{d_i : w_j \in d_i\}| + 1} \quad (5)$$

TF は BoW を各文書の単語数で除した値であり、文書における各単語の出現割合を示している。IDF は全文書に対して、ある単語が出現する文書数の割合の逆数であり、各単語の全文書における珍しさを示している。これらを掛け合わせることで TF-IDF が得られる。

2.2.2 外れ値検知

外れ値検知は、正常と異常を識別する境界を直接推定する識別モデルベース、推定した正常の確率分布に基づいて生起確率の低いデータを異常と見なす確率分布ベース、異常と正常は距離的に離れている前提のもとデータ間の距離に基づいて異常を判別する距離ベースの 3 つに分類され

る⁸⁾。摘要欄は部門や勘定科目によって記載内容の傾向が大きく異なるため、正常データの確率分布の仮定を要する確率分布ベースの手法は適さない。従って本節では、提案手法として採用した識別モデルベースの OC-SVM (One Class-Support Vector Machine) および、距離ベースの LOF (Local Outlier Factor) と IF (Isolation Forest) について述べる。ここでは、数値ベクトル化により文書 d_i から得られる N_{word} 次元の数値ベクトルを $v_i = (v_{i,1}, \dots, v_{i,N_{\text{word}}})$ とする。

・ OC-SVM

OC-SVM⁹⁾ は、教師ありの識別タスクで用いられる機械学習手法 SVM (Support Vector Machine) を教師なしの外れ値検知に改良した手法である。図2に OC-SVM の概念図を示す。

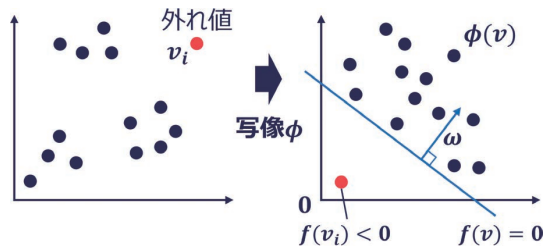


図2 OC-SVM の概要

図内の赤色のデータ点が検知すべき外れ値とする。まず、異常なデータほど原点に近くなるような写像 ϕ によって特徴空間にデータ点群を変換する。その後、異常データの割合 $\rho \in (0,1]$ をハイパーパラメータとして、特徴空間において正常データと異常データを識別する超平面 $f=0$ を作成する。すると、数値ベクトル v_i に対して関数 f は次式で表される。ここで、 ω は特徴空間において超平面と直交し、超平面から原点方向を負とするベクトルである。

$$f(v_i | \rho) = \omega \cdot \phi(v_i) - \rho \quad (6)$$

式6より、外れ値を判別する閾値を0として、 $f(v_i)$ が正であれば正常データ、負であれば異常データと予測される。従って、 $f(v_i)$ の値を用いて異常スコアが定義できる。

・ LOF

LOF¹⁰⁾ は各データ点に対する周囲のデータ点群までの距離にその密集度合いを加味して、どの程度乖離しているかを異常スコアとして算出する教師なしの外れ値検知手法である。LOF の概念図を図3に示す。

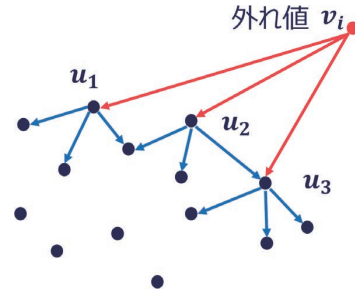


図3 LOF の概要

数値ベクトル v_i に対する LOF による異常スコアは次式で定義される。

$$\text{lof}(v_i | k) = \frac{1}{k} \sum_{u \in N_k(v_i)} \frac{\text{dist}_k(v_i)}{\text{dist}_k(u)} \quad (7)$$

ここで、 $N_k(v_i)$ は v_i の k 近傍であり、 v_i からのユークリッド距離が近い上位 k 個のデータ集合を表す。また、 $\text{dist}_k(v_i)$ は v_i の k 近傍内の各データ点 u から v_i への近傍有効距離の平均である。近傍有効距離 $l_k(u \rightarrow v_i)$ は次式で定義される。ここで、 $\varepsilon_k(u)$ は u の k 近傍のデータ点をすべて含む u を中心とする最小球の半径である。

$$\text{dist}_k(v_i) = \frac{1}{k} \sum_{u \in N_k(v_i)} l_k(u \rightarrow v_i) \quad (8)$$

$$l_k(u \rightarrow v_i) = \begin{cases} \varepsilon_k(u), & v_i \in N_k(u) \wedge u \in N_k(v_i) \\ \text{dist}(u, v_i), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

LOF の異常スコアは式8の定義より正常なデータであれば1に近くなり、異常なデータほど異常スコアが高くなることから、一般に外れ値を判別する閾値は1.5とされる。

・ IF

IF¹¹⁾ は対象のデータ点を二分木によって孤立させるときに必要な二分木の分割回数（二分木の深さ）に基づいて異常スコアを算出する手法である。IF の概念図を図4に示す。

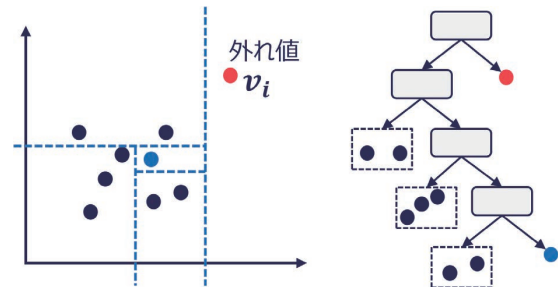


図4 IF の概要

同図より、疎な領域に存在する外れ値のデータ点は必要な分割回数が少なく、密な領域に存在する正常なデータ点は分割回数が多くなるため、二分木の深さ（浅さ）が異常

スコアとして利用できることが分かる。数値ベクトル v_i に対する IF による異常スコアは次式で定義される。

$$s(v_i|\psi) = 2 \frac{E[h(v_i)]}{c(\psi)} \quad (10)$$

$$c(\psi) = H(\psi - 1) - (2(\psi - 1))/\psi \quad (11)$$

$$H(i) = \log i + \gamma \quad (12)$$

ここで、 ψ は文書数 N_{doc} からの T_{IF} 回繰り返すサブサンプリングサイズで、 $E[h(v_i)]$ は数値ベクトル v_i に対する T_{IF} 個の二分木の深さの平均である。 $c(\psi)$ は各データ点を孤立させる（＝二分木探索に失敗する）ときの二分木の深さの平均であり、 γ はオイラー定数（ ≈ 0.5772156649 ）である。式 10 より異常スコアは $(0, 1]$ の値をとり、正常なデータの異常スコアは 0 に近く、異常なデータの異常スコアは 1 に近くなり、外れ値を判別する閾値は 0.5 となる。

2.2.3 ラベル付きデータ不足への対応

特徴 (3) への対応方法は大きく 2 つに分類される。一つは、機械学習分野において半教師あり学習と呼ばれる手法である。既存のラベル付きデータの内挿または近傍のデータは同種のクラスラベルを持つという前提のもと、ラベルなしデータのクラスラベルを推定し、擬似的なラベル（疑似ラベル）を付与するアプローチである¹²⁾。しかし、内部監査におけるリスク分析では、多岐にわたる分析観点の組合せによってリスクが判断されている。そのため、監査人が知見・ノウハウとして保有する分析観点の組合せ全体から想定される真値のドメインに対して、ラベル付きデータはカバーしていない可能性が高い。この場合、半教師あり学習では真値のドメインの一部にしか疑似ラベルが生成できない。

もう一つは先見知識を活用することで、少ないラベル付きデータからでも汎用的なモデルが得られるようにモデル構造を設計する方法である。具体的な方法は適用対象によって異なる。最も簡易な例として、適用対象の非線形性が強くなく線形性を仮定できることが分かっている場合に、深層学習などの非線形性が強い手法ではなく、線形回帰を採用することなどが挙げられる。

3. 提案手法

3.1 全体像

提案手法は 3 つのステップで構成される。ステップ 1 は特徴抽出で、会計データから監査人のリスク分析の知見・ノウハウに基づいて特徴量を抽出するステップであり、摘要欄からの特徴抽出も本ステップで行う。ステップ 2 はサブモデルの構築で、ステップ 1 で抽出した特徴量に対して監査人の分析観点毎に BRF を適用することで分析観点毎

のモデル（サブモデル）を構築する。ステップ 3 はモデル統合で、ステップ 2 で構築したサブモデルを統合し最終的なモデルを得る。以下では、各ステップの内容を示すとともに、特徴 (2) (3) への対応方法の詳細を示す。

3.2 ステップ 1：特徴抽出

3.2.1 概要

監査人は会計や内部統制の知識および実務経験に基づいた様々な分析観点を持っている。分析観点とは会計データからミス・ムダ・不正の兆候を判断する観点であり、例えば、「取引額が他の取引と比べて異常に高い」「仕訳日がある特定日に近い」「摘要欄が不記載」などのように金額や仕訳日、摘要欄といった会計データの項目とその見方から構成される。特徴量は分析観点を定量的に表現するために会計データから算出されるものであり、例えば「月次取引額の前年度同月比」「仕訳日から特定日までの日数」などが特徴量として考えられる。

監査人へのヒアリングを通じ「金額の異常」などの分析観点のカテゴリ（分析観点カテゴリ）を整理したうえで、各分析観点カテゴリに属する特徴量をデータサイエンティストが設計・実装した。抽出した 10 種の分析観点カテゴリ計 147 種の特徴量を表 1 に示す（グループについては 3.3 節で述べる）。ある会計単位のある勘定科目の会計データに N 件のレコードが存在する場合、 i 番目のレコードから抽出した特徴量 $x_i (i=1, \dots, N)$ は、147 次元のベクトルとなる。

表 1 分析観点カテゴリの一覧

グループ	分析観点カテゴリ	会計データ項目	特徴量数
主要	金額の異常	取引額	85
	摘要欄の珍しさ	摘要欄	19
層別	国固有のリスク	国	1
	勘定科目固有のリスク	勘定科目	11
調整	取引額が基準値超え	取引額	1
	仕訳作成プロセスの異常	仕訳作成プロセス種別	14
	仕訳日の異常	仕訳日	2
	取引の継続性の異常	取引額	2
	取引通貨の珍しさ	取引額通貨	3
	摘要欄内の単語固有のリスク	摘要欄	9

本稿では全特徴量の内、特徴（2）に関する特徴量「摘要欄の珍しさ」に絞って詳細な抽出方法を述べる。

3.2.2 特徴量「摘要欄の珍しさ」

「摘要欄の珍しさ」は、特定の期間・会計単位・勘定科目の会計データに含まれる摘要欄を俯瞰した際の珍しさを定量化した特徴量である。頻出する単語が使われているレコードは頻繁に発生する通常の取引である。一方、珍しい単語が使われているレコードは減多に発生しない取引であり、リスク分析上注視すべきという考えに基づいている。

まず、摘要欄の記載内容を単語に分割する。摘要欄の記載内容は、「①」と「1」など等価な文字を統一する Uni-code 正規化や、数値はすべて 0 に置換するなどの前処理が施されているものとする。単語の分割には多言語対応が容易なオープンソース自然言語処理ライブラリ spaCy¹³⁾ の言語毎（日本語、英語、中国語）の中規模モデル（表 2）を用いた。

表 2 自然言語処理モデル

言語	モデル
日本語	ja_core_news_md
英語	en_core_web_md
中国語	zh_core_web_md

次に分割した単語を、BoW および TF-IDF により数値ベクトル化する。 i 番目のレコードの摘要欄 $d_i (i=1, \dots, N)$ に単語 $w_j (j=1, \dots, N_{\text{word}})$ が出現したとすると、得られる数値ベクトルは N_{word} 次元のベクトル $v_i = (v_{i,1}, \dots, v_{i,N_{\text{word}}})$ となる。BoW および TF-IDF による数値ベクトルの要素はそれぞれ式 2 と式 3 より次式の通りとなる。

$$v_{i,j} = \text{bow}(w_j | d_i) \quad (13)$$

$$v_{i,j} = \text{tf-idf}(w_j | d_i) \quad (14)$$

続いて、数値ベクトル v_i に対して外れ値検知手法を適用することで、各レコードの摘要欄の異常スコア $a_{\text{desc}}(v_i)$ を得る。適用する外れ値検知手法は 2.2 節で述べた OC-SVM、LOF、IF の 3 種類である。

OC-SVM を適用する場合、式 6 に示した通り $f(v_i)$ が異常スコアとして利用できる。具体的には、異常データの異常スコアを正の値として取得するため、 $f(v_i)$ の正負を入れ替える。すなわち、数値ベクトル v_i に対する OC-SVM による異常スコアは次式で得られる。

$$a_{\text{desc}}(v_i) = -f(v_i | \rho) \quad (15)$$

LOF、IF を適用すると、式 7 と式 10 よりそれぞれ異常スコアは次式で得られる。

$$a_{\text{desc}}(v_i) = \text{lof}(v_i | k) \quad (16)$$

$$a_{\text{desc}}(v_i) = s(v_i | \psi) \quad (17)$$

さらに、会計単位や勘定科目によって異常スコアのレンジや分布形状が異なるため、各異常スコアに対する閾値の判別結果（カテゴリデータ）と、異常スコアを降順で並べたときの順位（順序データ）も特徴量として算出した。このとき用いた閾値は 2.2 節で示した各手法の一般的な閾値とした。加えて、TF-IDF はそれ自体が異常スコアとしての性質を持つため、数値ベクトル v_i に対して次式で定義される TF-IDF の平均値も特徴量として算出した。

$$a_{\text{desc}}(v_i) = \frac{1}{N_{\text{word}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{word}}} \text{tf-idf}(d_i, w_j) \quad (18)$$

以上より、数値ベクトル化手法 2 種と外れ値検知手法 3 種の組合せ 6 種それぞれに対して、異常スコアと異常スコアに対する判別結果と順位の 3 種の特徴量（ $18=6 \times 3$ ）を抽出した。さらに、式 18 の TF-IDF の平均値を加えて、表 1 の「摘要欄の珍しさ」特徴量計 19 種を抽出した。

3.3 ステップ 2：BRF によるサブモデル構築

ステップ 1 で抽出した特徴量から主要な分析観点カテゴリ毎に BRF を適用しサブモデルを構築することで、分析観点カテゴリ毎の異常スコアを算出する。

まず、 i 番目のレコードから抽出した特徴量 $x_i = (x_{i,1}, \dots, x_{i,M})$ として、対応する分析観点カテゴリをリスク分析での使われ方に応じて 3 つのグループ（主要 G_m 、層別 G_s 、調整 G_a ）に分類する。ここで、 M は特徴量数 147 のことである。特徴量と各グループの対応を図 5 に示す。主要グループは各レコードのベースとなるリスクの程度を判別する特徴量であり、「金額の異常」や「摘要欄の珍しさ」などが該当する。層別グループは対象の部門や勘定科目に応じてリスクの考え方を変更する特徴量であり、「国固有のリスク」などが該当する。調整グループは主要グループに対して付加的にリスクを考慮する特徴量であり、「仕訳日の異常」などが該当する。各グループと特徴量 $x_{i,j}$ の対応関係を図 5 に示す。

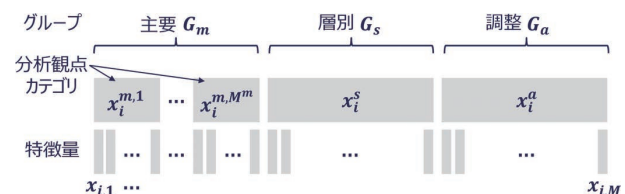


図 5 特徴量と分析観点カテゴリの対応

主要グループ G_m の l 番目の分析観点カテゴリに対応する特徴量を $x_i^{m,l}$ ($l=1, \dots, M^m$)、層別グループ G_s 全体に対応する特徴量を x_i^s 、調整グループ G_a 全体に対応する特徴量を x_i^a とする。サブモデルは主要グループの各分析観点カテゴリに適用される。つまり、主要グループの l 番目の分析観点カテゴリ特徴量 $x_i^{m,l}$ と特徴量 x_i^s を説明変数、監査人のリスク判別結果を教師ラベル（目的変数）として BRF で学習しサブモデルを構築する。従って、 M^m 個のサブモデルが構築される。なお、層別グループの特徴量 x_i^s は共通して用いられる分析観点であるという考えから、各サブモデル共通の説明変数として用いる。

得られたサブモデルを用いて各レコードの特徴量 $x=x_i$ を入力として、監査人が高リスク ($c=1$) と判別する予測確率（異常スコア）を出力する。主要グループの l 番目の分析観点カテゴリにおいて、BRF による予測確率は式 1 に基づいて次式で算出される。

$$\text{score}(x|l) = p(c=1|(x^{m,l}, x^s)) \quad (19)$$

3.4 ステップ 3：モデル統合

ステップ 2 で算出した各サブモデルの異常スコアを統合し、1 つの異常スコアにする。特徴 (3) に対応するため、監査人の分析ノウハウに適した統合方法とする必要がある。提案手法におけるモデル構造の全体像を図 6 に示す。監査人はまず、主要な分析観点を用いて会計データを概観し大まかな絞込みを行う。そのうえで、主要な分析観点以外の分析観点に基づいて優先順位付けすることで高リスクなレコードを抽出する傾向がある。このとき、主要グループの分析観点による絞込みでは、特定の分析観点でリスクが低い場合でも抽出候補からは除外せず、いずれかの分析観点でリスクが高いと判断されれば抽出候補として残す傾向があることが分かった。

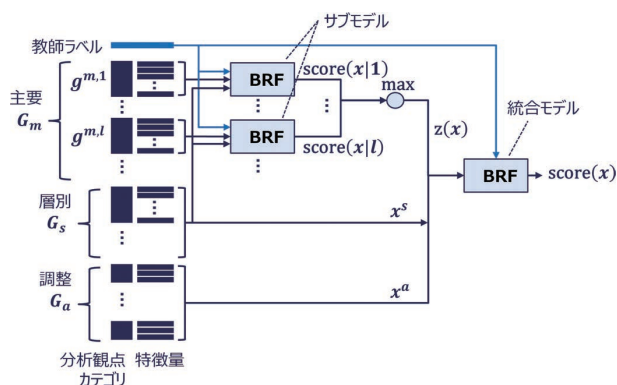


図 6 モデル構造の全体像

このような監査人の分析ノウハウを踏まえ、主要グループに対応するサブモデルの異常スコアを最大値により統合する。すなわち、次式で得られる値を新たな特徴量 z とする。

$$z(x) = \max_{l=1, \dots, M^m} \{\text{score}(x|l)\} \quad (20)$$

最大値を用いることで、いずれかのサブモデルの異常スコアが高ければ統合後の異常スコアが高くなるため、監査人の分析ノウハウに適した異常スコアを算出することが可能となる。最後に、新たな特徴量 z と層別グループの特徴量 x^s と調整グループの特徴量 x^a を説明変数として、BRF によるモデルを構築し（統合モデル）、1 つの異常スコアに統合する。このとき、層別グループの特徴量 x^s は調整グループの分析観点の使い分けにも用いるため、統合モデルでも説明変数とする。以上より、会計データの各レコードに対する特徴量 x を入力として、対象レコードの異常スコアは次式により定量化される。

$$\text{score}(x) = p(c=1|(z(x), x^s, x^a)) \quad (21)$$

4. 効果検証

4.1 検証方法

実際の内部監査で用いる自社の会計データに提案手法を適用し、監査人のリスク分析の結果を教師ラベルとして量・質両面から有効性を検証する。ここで教師ラベルは高リスクか低リスクであり、監査人が実際のレコードを確認した結果である。なお、監査人が確認していないレコード（ラベルなしデータ）には低リスクのラベルを付与した。

まず量の観点として、監査人が異常スコアの高いレコードから優先的に抽出候補とする場合を考え、学習データにおける異常スコア上位 2% に基づいて閾値を設定する。ここで 2% という値は、監査人が目視でレコードを確認する作業を想定した時に業務上許容されるレコード数の上限の目安として設定した。そして質の観点として、テストデータにおける高リスクのレコードの内、異常スコアが閾値以上のレコード数（検出件数）の割合（再現率）を評価する。

検証に用いた会計データの内訳を表 3 に示す。事前検証として、学習データの期間を半年・1 年・2 年と変えた場合の、テストデータでの再現率を比較した。最も再現率が高い結果より、学習データの期間はテストデータの期間の直近 1 年間とした。

表 3 データの内訳

学習／テスト	年度	期	レコード件数	
			全体	高リスク
学習	2021	上期	1,850,264	1,259
	2021	下期	1,938,135	1,976
テスト	2022	上期	1,987,539	1,991

また、学習およびテストデータの期間中に新設・廃止された部門や子会社は検証対象から除外し、137の会計単位を対象とした。会計単位とは、企業において個別に管理すべき会計の範囲のことである。対象の勘定科目は監査人が通常リスク分析の対象とする140種に限定した。

なお、実行環境はOS：Windows10、CPU：インテル Core i7-8700、動作周波数：3.2 GHz、RAM：16 GBのPCを用い、python 3.8、spaCy 3.6.0、scikit-learn 1.1.1、imbalanced-learn 0.9.1にて実装した。imbalanced-learn¹⁴⁾はアンダーサンプリングなど不均衡データに関する機能を提供するライブラリである。

提案手法の有効性を示すため、特徴(2)(3)への対応有無を変更した3つの手法を検証対象とする。1つ目は、すべての特徴量のうち摘要欄から抽出される特徴量を除外し、サブモデルの異常スコアをそのまま統合モデルの入力とする手法(Desc(-)Max(-))。2つ目は、摘要欄から抽出される特徴量も含めたすべての特徴量を用いるが、サブモデルの統合には最大値を用いず、サブモデルの異常スコアをそのまま統合モデルの入力とした手法(Desc(+))Max(-))。3つ目は、すべての特徴量を用いたうえで、最大値による統合を行う手法(Desc(+))Max(+))である。なお、本検証では表1に示した通り「金額の異常」と「摘要欄の珍しさ」を主要グループとした。

また、OC-SVM、LOF、IFの各種ハイパーパラメータは会計単位・勘定科目毎に設定することが困難なため、一般的な初期値で固定した。BRFにおける決定木アルゴリズムの処理を規定する各種ハイパーパラメータはクロスバリデーション¹⁵⁾(分割数3)とベイズ最適化¹⁶⁾により得た最適値を設定した。最適値探索における評価関数はF値¹⁵⁾とした。

4.2 検証結果と考察

テストデータにおける各手法の再現率と検出件数を表4に示す。Desc(+))Max(+))の再現率が72.1%と最も高く、Desc(-))Max(-))と比較して3.8ポイント高かった。

表4 検証結果(再現率)

手法	再現率	検出件数
Desc(-))Max(-))	68.3%	1,360
Desc(+))Max(-))	66.9%	1,332
Desc(+))Max(+))	72.1%	1,436

Desc(-))Max(-))とDesc(+))Max(-))では検出できなかったが、Desc(+))Max(+))では検出できた事例をもとに、提案手法のポイントである「摘要欄の珍しさ」特徴量と最大値によるモデル統合の効果を確認する。対象とする事例の部門と勘定科目における各手法の異常スコアの違いを図7に示す。同図内横軸は取引額が高いレコードから順に並べた時の順位である。

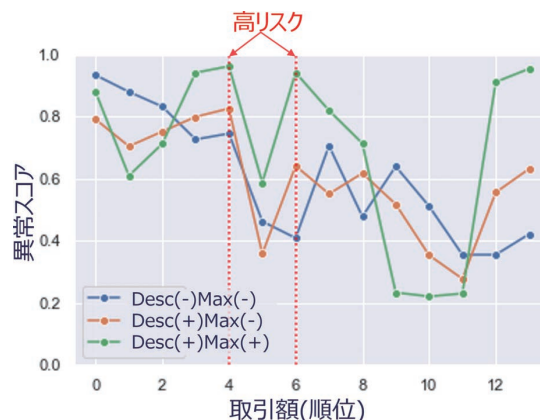


図7 各手法の異常スコアの比較

Desc(-))Max(-))とDesc(+))Max(-))では異常スコアが低いレコードの一部が、Desc(+))Max(+))では異常スコアが高いことが確認できる。実際、当該レコードでは摘要欄以外の金額などの分析観点では高リスクと判断できるような情報が乏しいが、摘要欄の内容から、減多に発生しない珍しい用途の経費利用であることが分かった。これは通常発生しない取引であり、高リスクなレコードとして検出すべきである。このようなレコードに対し、Desc(-))Max(-))は摘要欄を考慮していないため検出が困難である。また、Desc(+))Max(-))でも「摘要欄の珍しさ」以外の「金額の異常」の異常スコアが低いことに引っ張られ、最終的な異常スコアが低くなったと考えられる。

同様に複数レコードについて、監査人2名により妥当な異常スコアが算出されていることを確認した。さらに、検出できなかったレコードは、高リスクなレコードの中でも相対的に優先度が低く、監査人によって抽出要否が分かれるレコードであることを確認した。これは、リスク分析に異常スコアを用いることで監査人の属人性の低減にも効果があることを示唆している。

4.3 リスク分析工数の削減効果

Desc(+))Max(+))を実際のリスク分析業務に適用し、工数削減に対する効果を検証した。監査人には、各レコードの異常スコアが降順で併記された会計データを用いて、異常スコアが高いレコードから順に目視確認し、高リスクと判断したレコードを抽出してもらった。この時、実際に調査が行えるレコード件数は限られることから、抽出件数は従来と同程度とし、結果1,176件であった。なお、検証対象の会計データは、表3とは異なる期間、かつ監査人がリスク分析未実施の会計データとした。リスク分析実施済みのデータセットでは、既知であることがバイアスとなって分析時間が短くなる可能性が高いためである。

高リスクなレコードを抽出し終わるまでの分析時間を計測し、従来のすべて人手で行っていた場合の分析時間と比較した。なお、モデル学習と異常スコア推定にかかる処理

時間は分析時間に含めない。その結果、従来の1会計単位あたりの平均分析時間2時間40分に対し、Desc(+)Max(+)を用いた場合は1時間30分となり、43%削減となることを確認した(図8)。

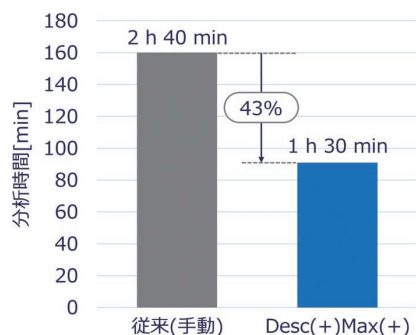


図8 分析時間の比較

従来の人手によるリスク分析では8.4人月/年の監査人の工数を要している。本検証より、監査人は異常スコアを用いたリスク分析を行うことで、従来の人手によるリスク分析での質を維持しつつ、3.6人月/年の工数削減が期待できる。

5. むすび

本稿では、内部監査において膨大な会計データの網羅的なリスク分析が人手では現実的に困難であることに對して、異常検知によるリスク分析業務の効率化を試みた。具体的には、BRFをベースとした機械学習モデルにより、ミス・ムダ・不正のリスクを定量化する異常検知手法を提案した。提案手法においては、テキストデータに対する異常検知手法を用いて摘要欄の珍しさを定量化することと、分析観点に応じてサブモデルを構築したうえで、監査人の分析ノウハウに適した最大値によるサブモデルの統合方法が、内部監査特有の技術課題解決のポイントであることを示した。

実際に、提案手法を自社の会計データに適用することで、前述の技術課題の解決策により監査人のリスク分析結果に対する再現率が72.1%に達することを確認した。さらに、監査人に異常スコアを参照しながらリスク分析を行ってもらうことで、従来の人手による分析方法と比較して、分析時間が大幅に削減されることを確認した。

本稿では内部監査におけるリスク分析を対象に検証を行った。リスク分析が対象とする業務を一般化すると、外部環境の変化が発生する中で、リスクに関する判断材料を収集し、リスクを見通し、対応を意思決定・アクションし、その結果を評価するサイクルを継続的に行う業務と捉えることができる。本稿で提案した手法は「リスクの見通し」における判断基準が属人化する課題に対して、形式知化を実現する解決策の一つである。一方で「判断材料の収

集」「意思決定・アクション」においては、それぞれ外部環境の変化への追従や、意思決定・アクションの妥当性評価が課題として挙げられる。前者に対しては入力データ分布やラベルのコンテキストの変化を検知し対策するコンセプトドリフト適応が、後者に対しては予測の不確かさを定量的に評価する技術、例えばベイズ推定や Conformal Prediction の活用が有効と考えられる。これらの技術確立によりリスク分析を核とする業務の工数削減と再現性・質向上の両立を目指す。具体的には、SCM での需要予測に基づく在庫・生産管理や、製造設備の保全履歴や稼働データに基づく予兆保全などへの展開可能性がある。

参考文献

- 1) 株式会社東京商工リサーチ. “2023 年上半期の「不適切会計」開示 過去 2 番目の 35 社 (36 件)、最多はサービス業の 9 社.” 東京商工リサーチ. https://www.tsr-net.co.jp/data/detail/1197827_1527.html (Accessed: Jan. 17, 2024).
- 2) 伊集院大助. “「CAAT ツール」利用状況についてのアンケート結果 報告書.” 一般社団法人日本内部監査協会. <https://www.iiajapan.com/pdf/kenkyu/c0041510.pdf> (Accessed: Feb. 19, 2026).
- 3) 中村元彦, “会計監査における CAAT 活用の影響と課題,” 現代監査, vol. 2015, no. 25, pp. 162-170, 2015.
- 4) 島田裕次, “監査業務への AI の導入可能性 AI 導入における課題,” 日本情報経営学会第 84 回全国大会, pp. 59-60, 2022.
- 5) 久保恵一, 図解 一番はじめに読む内部監査の本, 第 2 版. 東洋経済新報社, 2010, pp. 44-45.
- 6) 清水多賀雄, 深見英二, 宇宿哲平, “AI・機械学習を用いた不正リスク検知 SUN モデル,” KPMG Insight, vol. 39, pp. 15-18, 2019.
- 7) S. Kalra et al., “Automatic classification of pathology reports using TF-IDF Features,” 2019. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1903.07406>.
- 8) 吉澤亜耶, 橋本洋一, “異常検知技術の概要とその応用動向について,” Intec Tech. J., vol. 17, pp. 42-47, 2016.
- 9) B. Schölkopf et al., “Support vector method for novelty detection,” in *NeurIPS 1999 Conf.*, 2019, pp. 582-588.
- 10) M. M Breunig et al., “LOF: Identifying density-based local outliers,” *ACM SIGMOD Rec.*, vol. 29, no. 2, pp. 93-104, 2000.
- 11) F. T. Liu et al., “Isolation-based anomaly detection,” *ACM Trans. Knowl. Discovery Data (TKDD)*, vol. 6, no. 1, pp. 1-39, 2012.
- 12) X. Zhu, “Semi-Supervised Learning Literature Survey,” 2007. [Online]. Available: https://pages.cs.wisc.edu/~jerryzhu/pub/ssl_survey_6_24_2007.pdf.
- 13) M. Honnibal et al. “spaCy: Industrial-Strength Natural Language Processing in Python.” spaCy. <https://spacy.io> (Accessed: Feb. 19, 2026).
- 14) G. Lemaître et al. “GitHub - scikit-learn-contrib/imbalanced-learn: A Python Package to Tackle the Curse of Imbalanced Datasets in Machine Learning.” GitHub. <https://github.com/scikit-learn-contrib/imbalanced-learn> (Accessed: Feb. 19, 2026).
- 15) 井手剛, 杉山将, 異常検知と変化検知 (機械学習プロフェッ

ショナルシリーズ), 講談社, 2015, pp. 8-13.

- 16) J. Bergstra et al., "Algorithms for hyper-parameter optimization," in *NeurIPS 2011 Conf.*, 2011, pp. 2546-2554.

執筆者



太田 雄也 OTA Yuya
ストラテジック R&D 本部
デジタルソリューションセンタ
専門：情報工学



藤井 徹 FUJII Toru
ストラテジック R&D 本部
デジタルソリューションセンタ
専門：情報工学、データ分析
所属学会：電子情報通信学会

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。

最近発表した主な論文

※所属は発表時の情報です、掲載は発表順です。

論文名・執筆者・掲載誌	紹介文
形状特徴付き立方体型リファレンスマーカの設計によるRGB-Dカメラネットワークのワンショットキャリブレーション One-Shot Calibration of RGB-D Camera Networks Based on the Novel Design of Cubic Reference Marker with Unique Shape Features 大城篤志¹⁾、相原邦光¹⁾、JI Yonghoon²⁾ 他3名 1) 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 技術開発部 第1技術部 2) 北陸先端科学技術大学院大学 精密工学会誌、2025年、公益社団法人 精密工学会、vol. 91、no. 1、pp. 104-110、日本語 本論文はオープンアクセスとして公開されており、[CC BY-NC-ND 4.0] ライセンスに基づき紹介しています	本論文では、RGB-Dカメラを用いた高精度なキャリブレーション手法を提案している。反射マーカやAprilTagを活用し、RGB画像と深度情報の対応関係を安定して推定することで、従来手法で課題となっていた誤差や再現性の問題を改善した。実機実験を通じて、提案手法が異なる撮影条件下でも有効であることを示し、ロボットビジョンや三次元計測など、実応用における有用性を明らかにした。
電流垂下方式 単相GFMインバータの検討 Study of a single-phase GFM inverter with current droop control 上松武¹⁾ 1) 技術・知財本部 パワーエレクトロニクスセンタ 電子情報通信学会 技術研究報告、2025年、一般社団法人 電子情報通信学会、vol. 124、no. 345、pp. 12-17、日本語 Copyright (c) 2025 IEICE	パワーコンディショナー（パワコン）は発電機とは異なり、回転に伴う慣性力を有していない。そのため、パワコンが普及することで電力系統を不安定化させることが懸念されている。こうした背景から、パワコンに擬似的な慣性力を発生させるGFM（Grid forming）インバータが注目されている。本稿では、単相GFMインバータを擬似dq変換することにより、直流電源と同様の電流垂下制御を用いて実現する方式を検討した。本方式は並列運転制御に優位性があり、かつ、VSG等の慣性力発生機構を追加することにより、GFM動作も可能である。その有効性をシミュレーションにて検証した。
再生可能エネルギーの効率的な利用を可能にするFEMSの提案 Proposal of FEMS that enables efficient use of renewable energy 西垣弘二¹⁾ 1) 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開発部 情報処理学会全国大会講演論文集、2025年、一般社団法人 情報処理学会、vol. 87th、no. 4、pp. 4.307-4.308、日本語 Copyright (c) 2025 IPSJ	再生可能エネルギーの発電量変動に起因する電力需給課題に対し、工場全体の電力を測定・予測・最適化する Industrial Facility Energy Management System（FEMS）を提案する。生産設備に加え、空調・照明などのユーティリティを含む電力データを生産計画と統合し、IEC 63376:2023 に準拠した「モニタリング」「分析」「最適化」「指示」の4機能を実装する。実工場データを用いたプロトタイプにより、生産に連動した電力可視化を実現、データ分析に基づいたモデルを作成することで高精度な需要予測が可能であることを示した。また、外部システムとの連携のために、国際標準に基づいた実装を行った。
根拠に基づいたレビュー生成のための LLM を用いた自動アノテーションの検討 田中翔平¹⁾、平澤寅庄¹⁾、牛久祥孝¹⁾ 1) オムロン サイニックエックス株式会社 言語処理学会 第31回年次大会 発表論文集、2025年、一般社団法人 言語処理学会、pp. 2562-2566、日本語 本論文はオープンアクセスとして公開されており、[CC BY 4.0] ライセンスに基づき紹介しています	本論文は、論文内容に基づいた根拠あるレビュー生成を目的として、LLMによる自動アノテーション手法を検討する。レビュー文が論文のどのセクションに基づくかの推定と、メタレビューを用いて論文内容を正確に反映したレビュー文を選別する二つのタスクを設定した。レビューデータを用いた実験の結果、前者では約66%の精度、後者では90%以上の高い精度が得られ、LLMを用いた高品質なレビューデータ構築の有効性が示された。また、人手アノテーションのコスト削減に資する点も重要な貢献であり、査読支援への応用が期待される。

論文名・執筆者・掲載誌	紹介文
Paper2Poster: LLMを用いた学術ポスターの生成 増田大河^{1),2)}、田中翔平²⁾、平澤寅庄²⁾、牛久祥孝²⁾ 1) 中部大学 2) オムロン サイニックス株式会社 言語処理学会 第31回年次大会 発表論文集、2025年、一般社団法人 言語処理学会、pp. 1297-1302、日本語 本論文はオープンアクセスとして公開されており、[CC BY 4.0] ライセンスに基づき紹介しています	本論文は、論文から学術ポスターを自動生成するPaper2Posterを提案する。ポスターは短時間で研究概要を把握できる一方、作成には精読と編集が必要で負担が大きい。提案法では、LLMでポスター向け要約を作成し、セクションごとの文章と、キャプションや本文参照を手掛かりに選んだ図表を抽出してJSONに整理する。次に、その情報を条件として大枠の配置を規則で決め、LLMで要素の位置・サイズを調整して重ならないレイアウトを得る。図表はPDFから切り出して配置する。50本での定量評価では整列性と非重複がほぼ達成され、人手評価でも見やすさや構造の良さが確認された。
受動的アラインメントから能動的参加へ: 協調タスク戦略探索のための人間目標変化を追跡するロボット From Passive Alignment to Active Participation: Robots Tracking Human Goal Changes for Collaborative Task Strategy Exploration 水山遼¹⁾、金森祥太¹⁾、岩本直人¹⁾ 他3名 1) 技術・知財本部 ロボティクスR&Dセンタ IEEE Conference Proceedings、2025年、IEEE、vol. 2025、no. HRI 2025、pp. 1503-1508、英語 Copyright 2025 The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved.	Building on D. Norman's seven-stage model, humans continuously adapt their strategies as their underlying goals evolve during task execution. This study presents a hierarchical framework that enables robots to infer human goals from observed actions and respond appropriately, even when those goals shift implicitly. Upon detecting a goal change, the robot proactively engages the human in dialogue to confirm the new goal and propose actions aligned with it. Rather than simply following fixed intentions, the robot dynamically adjusts its behavior to support humans throughout the collaboration process. Validated through a human-robot table tennis scenario, the proposed approach demonstrates improved responsiveness to shifting goals, leading to more perceptually collaborative and efficient interactions between humans and robots.
製造業におけるデジタルツインの実現解 八竹英紀¹⁾ 1) 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 アドバンスドソリューション事業本部 企画室 システム／制御／情報、2025年、一般社団法人 システム制御情報学会、vol. 69、no. 3、pp. 80-85、日本語 Copyright (c) 2025 ISCIE	本稿では、混迷を深める現代において製造業が直面する経済合理性と持続可能性の両立というジレンマへの解決策としてデジタルツインを提示した。SINIC理論が提示する工業社会から自律社会への移行期である「最適化社会」において重要となるのは、従来の三現主義とデジタル技術を融合した「デジタル三現主義」の実践にある。この具体事例として、生成AIによる熟練技能の形式知化・伝承や、エネルギー生産性向上を通じた脱炭素化の推進など、オムロンでの豊富な実践内容を詳説。デジタルツインを鍵とした、持続可能で人間中心のスマートファクトリの実現に向けた道筋を論じた。
人を理解し共に意思決定する卓球ロボット FORPHEUS The Table Tennis Robot FORPHEUS: Understanding Humans and Making Joint Decision 水山遼¹⁾、金森祥太¹⁾ 1) 技術・知財本部 ロボティクスR&Dセンタ 日本ロボット学会誌、2025年、一般社団法人 日本ロボット学会、vol. 43、no. 2、pp. 162-165、日本語 Copyright (c) 2025 RSJ	本稿では、人と機械の「融和」を体現する卓球ロボット「FORPHEUS」の開発について述べる。我々はこれまで、自律的な返球技術に加え、骨格や生体情報から個人の技能・感情、ダブルスにおける連携度を推定し、人の能力を引き出す「人理解技術」を構築してきた。 さらに最新世代では、練習の過程で変動する人の目的にロボットが能動的に追従し、音声対話を通じて人と共にラリー内容を決定する「インタラクション技術」を新たに提案する。本研究は、人と機械が融和し、共に意思決定を行う未来の自律社会の実現に向けた、一つの実践的なアプローチを示すものである。

論文名・執筆者・掲載誌	紹介文
複雑環境内高効率ナビゲーションのための時間猶予を考慮した安全停止戦略 Time-Margin Safety Stop Strategies for Efficient Navigation in Complex Environments 向井滋春¹⁾、杉原知道¹⁾ 1) 技術・知財本部 ロボティクス R&D センタ IEEE Robotics and Automation Letters、2025年、IEEE、vol. 10、no. 4、pp. 3700-3706、英語 Copyright 2025 The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved.	This letter studies how mobile robots can navigate cluttered spaces while still remaining safe when the control software suddenly fails. The authors focus on a practical requirement: even without additional computation or replanning, the robot must be able to stop immediately without colliding with obstacles. To address this issue, we introduce a navigation method that explicitly includes a time margin for emergency stopping in trajectory design. By considering this condition during motion generation, the method preserves safety while allowing greater flexibility than conventional approaches, which often become overly restrictive. The experiments show that the proposed framework achieves reliable collision-free stopping after software crashes and improves overall navigation efficiency, reducing travel time to the goal by 34% compared with previous methods.
VisDev : 手書き訓練のための点集合レジストレーションを用いたストローク偏差可視化システム VisDev: A Stroke Deviation Visualization System Using Point-Set Registration for Handwriting Training Yuzheng Xu¹⁾、吉田成朗¹⁾、橋本敦史¹⁾、牛久祥孝¹⁾ 1) オムロン サイニクエックス株式会社 Proceedings of the Extended Abstracts of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2025年、Association for Computing Machinery (ACM)、vol. CHI EA 2025、no. 574、pp. 1-7、英語 本論文はオープンアクセスとして公開されており、本誌で紹介しています	Common handwriting training strategies often have certain drawbacks. For example, tracing does not require learners to rely on memory, while copying lacks an immediate feedback system, which limits overall training efficiency. However, with the support of digital devices, writing media have become more flexible and intelligent, allowing us to integrate the advantages of both tracing and copying. In VisDev, we first apply a point-set registration method to obtain alignment information between handwritten and template characters. Based on this alignment, we generate color-coded visualizations that highlight correct and incorrect regions. In addition, we construct an animation that transforms the handwritten characters into the template characters. By combining these two components, users can receive effective feedback within a short period of time. Our results demonstrate that VisDev can indeed improve users' handwriting quality with relatively few training sessions.
PLEXUS Hand : 精密把握と側面把握間の器用な物体操作を実現する軽量4モータ電動義手 PLEXUS Hand: Lightweight Four-Motor Prosthetic Hand Enabling Precision-Lateral Dexterous Manipulation 黒田勇幹¹⁾、高橋知也¹⁾、Cristian C. Beltran-Hernandez¹⁾ 他2名 1) オムロン サイニクエックス株式会社 2025 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)、2025年、IEEE、pp. 22-29、英語 Copyright 2025 The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved.	Performing activities of daily living often requires in-hand manipulation, especially the reorientation of objects between different grasp types. Commercial prosthetic hands lack this capability, while dexterous robotic hands are too heavy for clinical use. This study introduces the PLEXUS Hand, a 311 g prosthesis that bridges this gap by enabling smooth transitions between fingertip (precision) and side-pinch (lateral) grasps with a minimal four-motor configuration. By computationally optimizing the thumb axis position, the lightweight design houses all actuators internally, protecting them from environmental damage. Experimental evaluations demonstrated high success rates (90–100%) for reorienting various primitive objects. Moreover, practical demonstrations-such as operating a screwdriver, seal stamping, and inserting USB devices-highlight its potential to enhance activities of daily living.

論文名・執筆者・掲載誌	紹介文
SCU-Hand : 可変サイズ機構による不定形物のすくい取り用エンドエフェクタ SCU-Hand: Soft Conical Universal Robotic Hand for Scooping Granular Media from Containers of Various Sizes 高橋知也¹⁾、Cristian C. Beltran-Hernandez¹⁾、黒田勇幹¹⁾ 他3名 1) オムロン サイニックス株式会社 2025 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) Proceedings、2025年、IEEE、pp. 5549–5555、英語 Copyright 2025 The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved.	This paper presents the SCU-Hand, a reconfigurable flexible end-effector designed to automate powder scooping from laboratory containers of varying sizes. The design employs a single thin sheet morphed into a conical developable surface, enabling size reconfiguration by adjusting the sliding angle of the circular sheet. This conical structure provides anisotropic stiffness-resisting buckling during sliding while deforming adaptively upon contact with container walls-eliminating the need for force sensing or learning-based control. Experiments using a CRANE-X7 robotic arm demonstrated scooping performance exceeding 95% across containers ranging from 67 mm to 110 mm in diameter. Comparisons against rigid metal sheets and commercial ladles confirmed that flexibility contributes 10–20% improvement in scooping efficiency. The system also achieved over 95% performance across multiple granular materials including flour, coffee, and rice.
デカップリング回路を有する単相三線式インバータの動作検討 Study on the Operation of a Single-Phase Three-Wire Inverter with a Decoupling Circuit 野坂紀元¹⁾、佐藤充¹⁾、朴青云¹⁾、上松武¹⁾ 1) 技術・知財本部 パワーエレクトロニクスセンタ 電子情報通信学会技術研究報告、2025年、一般社団法人 電子情報通信学会、vol. 125、no. 140、pp. 39–43、日本語 Copyright (c) 2025 IEICE	近年、再生可能エネルギーの導入が加速しており、住宅向け太陽光発電システムにおいては、自家消費も含めたシステム設計が必須である。これに対応するため、特に単相三線式インバータに注目が集まっている。汎用トポロジである3レグインバータは、シンプルな構成、かつ単相三線配電方式に対応可能である。しかしながら、2レベル動作であるため、ノイズ、およびスイッチング損失の課題があった。これに対し、我々はNORICトポロジを提案する。提案トポロジでは、単相三線式に対応しつつ、3レベル動作を実現することで、高効率化、低ノイズ化を同時に達成できる。
画像特徴量の凝集性に着目した視覚言語モデルのアクティブプロンプトラニング Active Prompt Learning for Vision Language Models based on Image Feature Clustering 広橋佑紀¹⁾、山下隆義²⁾、平川翼²⁾、藤吉弘亘²⁾ 1) 技術知財本部 ロボティクスR&Dセンタ 2) 中部大学 工学部情報工学科 機械知覚ロボティクスグループ 電子情報通信学会論文誌 D (Web)、2025年、一般社団法人 電子情報通信学会、vol. J108-D、no. 8、pp. 458–461、日本語 本論文はオープンアクセスとして公開されており、[CC BY-NC-ND 4.0] ライセンスに基づき紹介しています	視覚言語モデル（CLIP）とラベル無しデータプールが存在する状況において継続的にプロンプトを学習するアクティブプロンプトラニング（APL）を想定する。APLの従来手法であるpcbは、CLIPで付与した疑似ラベルからカテゴリ均衡なサンプル群を選択するが、一部カテゴリの疑似ラベルが得られない場合に、当該カテゴリの知識が不足し性能低下を招く。我々は画像特徴量の同一カテゴリ間での凝集性に着目したクラスタ重点サンプリングを提案する。提案手法は、画像特徴量に教師無しクラスタリングを施し、得られた各クラスタ内でサンプル選択を実施する。これによりカテゴリ全体を均等に学習し、従来手法を上回る精度向上を示した。

論文名・執筆者・掲載誌	紹介文
生成 AI を活用した知財活動の新展開 熊日創¹⁾、大谷正樹²⁾ 1) 技術・知財本部 知財企画部 2) 技術・知財本部 技術・知財戦略室 システム／制御／情報、2025年、一般社団法人 システム制御情報学会、vol. 69、no. 9、pp. 327-331、日本語 Copyright (c) 2025 ISCIE	本稿は、オムロンの生成AI活用推進プロジェクト「AIZAQ」について、スマートな働き方とDXカルチャー醸成を目標に、トップダウンとボトムアップを組み合わせた推進体制を概説する。知的財産センタではSeason 1で特許文献の自動分類アプリの試作やプロンプト集の整備を行い、Season 2ではプロンプト集の部門内展開、全3段階の教育プログラムとスキル評価制度の構築、および社内HPC環境（RDinX）を基盤とした知財AIエージェントの自社開発を進めた。これらの取り組みにより、業務効率化にとどまらず、知財業務の質的向上と創造的活動へのリソース配分の実現を目指している。
疾患検出および予測のための改良型モダリティドロップアウトを用いた対照的マルチモーダル融合学習 Learning Contrastive Multimodal Fusion with Improved Modality Dropout for Disease Detection and Prediction Gu Yi^{1),2)}、齋藤邦章¹⁾、Ma Jiaxin¹⁾ 1) オムロン サイニックス株式会社 2) 奈良先端科学技術大学院大学 Lecture Notes in Computer Science (MICCAI 2025 Proceedings, Part XV)、2025 年、Springer Nature、vol. 15974、pp. 280-290、英語 Copyright 2025 Springer Nature Switzerland AG. All rights reserved.	Our work studies how to combine medical images and clinical records when some modalities are missing in practice. We propose a contrastive multimodal fusion framework with an improved modality dropout strategy that uses learnable tokens to model missing inputs and aligns fused representations across modalities. The method can be plugged into existing pretrained encoders with minimal additional training cost, making it practical for real clinical pipelines. Experiments on large-scale CT and electronic health record datasets show consistent improvements in disease detection and future risk prediction, especially when some modalities are missing at inference. This work demonstrates that carefully designed multimodal fusion can improve robustness, efficiency, and scalability for real-world healthcare applications. 本論文はSpringer Nature社の下記URLにて公開されている。 https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-032-05182-0_28

OMRON TECHNICS
推進委員会

推進委員長	大平 真琴				
推進委員	今泉 豊博	川ノ上 真輔	小林 達矢	西垣 弘二	
	馬淵 雅夫	山崎 琢也	吉野 広太郎	(50音順)	
事務局	島野 真代	福岡 かおり			
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58巻 第1号
通巻170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 ストラテジック R&D 本部
〒619-0283 京都府木津川市木津川台9-1
電話 0774-74-2000 (代)

2026年9月30日 発行

Published by OMRON Corporation
9-1, Kizugawadai, Kizugawa-city,
Kyoto, 619-0283 Japan
TEL 0774-74-2000

OMRON