

OMRON TECHNICS

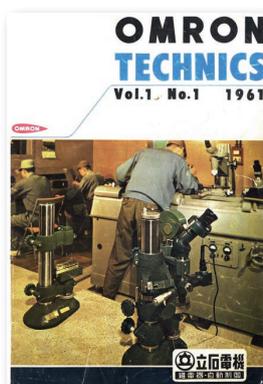
のご紹介

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

よりよい社会の実現に寄与することを目的に発行しております。

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

創刊よりこれまで通巻168号発行し、約1,821編以上の論文を公開しております。



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

オムロンテクニクス

検索

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



日本語



English

オムロンのコア技術

Sensing & Control +Think

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

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

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

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

Sensing & Control +Think



オムロンのコア技術「Sensing & Control +Think」	1 (1)
目次	2 (2)
巻頭言：持続可能な未来への一步を踏み出す開発プロセスの革新と省エネ・省資源技術 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 技術開発本部長 太田 康裕	4 (4)
寄稿文：工場の自動化とエネルギーマネジメントの連携に向けて 早稲田大学 理工学術院 教授 天野 嘉春	7 (7)

特集：持続可能な未来への一步を踏み出す開発プロセスの革新と省エネ・省資源技術

【技術解説】 バイオマスプラスチック普及におけるマスバランス方式の意義 田中 泰法	10 (10)
脱炭素社会に貢献するFA用大容量電源の開発 谷野 光平, 長野 昌明, 渡邊 智紀, 鶴口 祐規	17 (17)
必要最小限の貴金属でデバイス性能を実現する部分めっき技術の確立 立石 圭一郎	27 (27)
グローバルで活用するシステムの効率的な仕様改善に向けた、情報アーキテクチャモデリングの活用 高田 智史, 赤松 康至	33 (33)
作業時間自動計測に向けた多様な工場環境に対応できる人位置検知技術 宇治田 康浩, 森 滯希	40 (40)

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—

製造現場の突発的な変動の影響を受けたデータにおける異常検知の改善 杉原 哲朗	48 (48)
FEM解析と逆問題的アプローチを使ったバラツキに起因する製品特性挙動の明確化 夏田 遥介	58 (58)
製品規模のシミュレーションと動的な探索を用いた電気的外乱の範囲推定手法の構築 藤田 浩志	67 (67)
数クロック単位で互換性を担保するASIC (Application Specific Integrated Circuit) リメイク手法 古石 憲男	77 (77)

2. 新たな成長領域を生み出す技術

ミリ波レーダを用いた呼吸波形計測における波形不連続性の低減 谷本 雄大, 松浦 圭記, 齋藤 啓介	88 (88)
ミリ波レーダを用いた時系列クラスタリングによる複数人の呼吸数計測の実現 松浦 圭記, 川上 莉穂, 谷本 雄大, 齋藤 啓介	97 (97)
最近発表した主な論文	105 (105)

OMRON's Core Technology "Sensing & Control +Think" 1 (1)
 Table of Contents 2 (2)
 Introduction; Innovative Development Processes and Energy-saving, Resource-efficient Technologies for Taking
 a Step Towards a Sustainable Future
 OTA Yasuhiro, Ph.D., Senior General Manager, Technology Development Division HQ.
 Industrial Automation Company 4 (4)
 Contribution; Integration of Factory Automation and Energy Management
 AMANO Yoshiharu, Dr. Eng., Professor: Waseda Research Institute for Science and Engineering 7 (7)

Special issue: Innovative Development Processes and Energy-saving, Resource-efficient Technologies for Taking a Step Towards a Sustainable Future

[Expository Articles] Significance of Mass Balance Approach in the Dissemination of Biomass Plastics
 TANAKA Yasunori 10 (10)
Development of High-Capacity Power Supply for FA, Contributing to Decarbonized Society
 TANINO Kohei, NAGANO Masaaki, WATANABE Tomonori and TSURUGUCHI Yuki 17 (17)
Establishment of Partial Plating Technology that Realizes Device Performance with the Minimum Necessary Precious Metals
 TATEISHI Keiichiro 27 (27)
Efficient Specification Improvement of a System Used Globally, by Utilization of Information Architecture Modeling
 TAKADA Satoshi and AKAMATSU Yasuyuki 33 (33)
Sensing Technology of Worker Location Adaptable to Various Factory Environment for Measuring Actual Work Time
 UJITA Yasuhiro and MORI Mizuki 40 (40)

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

Improved Anomaly Detection in Data Affected by Sudden Changes in the Factory
 SUGIHARA Tetsuro 48 (48)
Clarification for Output Characteristic Causing by Uncontrollable Input Variable Using FEM Analysis and Inverse-Problem Approach
 NATSUDA Yosuke 58 (58)
Development of a Method for Estimating the Range of Electrical Disturbances Using Product-scale Simulation and Dynamic Search
 FUJITA Koji 67 (67)
ASIC (Application Specific Integrated Circuit) Remake Method Guaranteeing Compatibility at the Clock Cycle Level
 FURUISHI Norio 77 (77)

2. Technology Developing a New Growth Area

Reduction of Waveform Discontinuity in Respiratory Waveform Measurement using Millimeter-Wave Radar
 TANIMOTO Yudai, MATSUURA Keiki and SAITO Keisuke 88 (88)
Realization of Multi-Person Respiratory Rate Measurement using Time-series Clustering with Millimeter-Wave Radar
 MATSUURA Keiki, KAWAKAMI Riho, TANIMOTO Yudai and SAITO Keisuke 97 (97)

New Publications 105 (105)

巻頭言

持続可能な未来への 開発プロセスの革新と

オムロンは、創業以来、「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」を使命としてきました。1933年の創業当時から、レントゲン写真撮影用タイマにはじまり、国産初のマイクロスイッチや世界初の無接点近接スイッチの開発など、世に先駆けてソーシャルニーズの創造に挑戦し続けてきました。その後、事業を拡大し、産業用オートメーション機器や社会インフラ向けの制御機器の開発・製造を通じて、社会全体の安心・安全の実現に貢献し、また血圧計や体温計などの医療機器の開発・製造を通じて、人々の健康と命を守ることに取り組んできました。

SDGsは、2030年までに持続可能でより良い世界を目指すための17の目標と169のターゲットから構成されています。オムロンは、SDGsの達成に貢献するために、長期ビジョン「Shaping the Future 2030 (SF2030)¹⁾」を策定し、サステナビリティ方針のもとサステナビリティ重要課題を設定しました。このビジョンでは、事業を通じた社会課題の解決と、事業活動そのものの持続可能性の向上を両立させ、持続可能な社会の実現に貢献することを目指しています。またSF2030において、オムロンのコア技術である“Sensing & Control+Think”の技術を基盤として、社会に大きなインパクトを与える以下3つの社会的課題を設定しました。

- ① カーボンニュートラルの実現
- ② デジタル化社会の実現
- ③ 健康寿命の延伸

これらの社会的課題が解決された自律社会を目指して、特に持続可能な消費と生産、エネルギー、経済成長と雇用に向けた革新的な技術と商品の開発の取り組みに注力しています。

SDGsを達成するオムロンユニークな技術と商品：

オムロンは、SDGsの達成に貢献する様々な技術と商品を創出し提供しています。具体的には、「産業用オートメーション」の分野では、環境負荷の低減やエネルギー生産性の向上といった社会的課題の解決に貢献する独自の*i-Automation!* アプリケーション技術²⁾と幅広いファクトリーオートメーション (Factory Automation: FA) 商品を開発しています。例えば、省エネやCO₂削減を実現する制御機器の開発を通じて、環境負荷の低減に取り組み、また生産ラインの自動化や作業工程・作業動線の可視化、更には労働人口減少に対応すべく省人化を実現する機器の開発を通じて、生産性向上に貢献しています。

「社会インフラ」の分野では、安心・安全の確保や災害への対応といった社会課題の解決に貢献する技術と商品を開発しています。例えば、交通システムやエネルギーシステムの安心・安全を確保する機器の開発

一步を踏み出す 省エネ・省資源技術



を通じて、安心・安全の確保に取り組み、また災害の早期発見・早期対応を実現する機器の開発を通じて、災害への対応に貢献しています。

「ヘルスケア」の分野では、高齢化や生活習慣病の増加といった社会的課題の解決に貢献する技術と商品を開発しています。血圧計や体温計などの家庭用医療機器のグローバルでの普及を通じて、生活習慣病の早期発見・早期治療の促進に取り組み、またAIやロボット技術を活用した医療機器の開発を通じて、医療の質と効率性の向上に貢献し続けています。

オムロンの事業展開の方向性：

オムロンは、SDGsの継続的な実現に向け、3つの方向性で事業を加速・展開していきたいと考えています。

1. 社会課題の解決に向けた技術開発の強化

オムロンは、AIやロボティクス、IoTなどの先進技術と豊富な現場ナレッジや「データ」を利活用・統合し、社会的課題の解決に向けた技術開発を強化していきます。例えば、株式会社JMDC³⁾で収集された豊富な健康データを活用したAI医療診断の高度化や、唯一無二のロボット統合コントローラー⁴⁾と様々な現場アプリケーション技術を活用したモノづくり現場の自動化・省人化、IoTを活用したインフラの高度化など、様々な分野で社会的課題の解決に貢献する技術の開発をオープンイノベーションも積極的に活用しながら進めていきます。

2. 事業活動そのものの持続可能性の向上

オムロンは、事業活動そのものの持続可能性の向上にも取り組んでいきます。例えば、環境負荷の低減や資源循環の促進、サプライチェーンの透明性確保など、様々な取り組みを進めていきます。具体的な事例では、オムロンヘルスケア株式会社 松坂事業所では、“All in Half (すべてを半分に)”をスローガンに、Scope 1-3についてGHG排出量削減に取り組んでいます⁵⁾。これは、

- ① 需要連動型生産で進める国内回帰、必要量のみ製造で在庫保管スペースを縮小
- ② 生産フロアに画像型人感センサーや温湿度センサー、CO₂センサーなど計230個ほどのセンサーを導入し、作業員数や周辺環境に合わせて空調や照明を自動制御し削減
- ③ 生産ラインのエネルギー使用量や生産量、更には製品1台当たりのCO₂排出量を「見える化」するシステムを導入

といったものです。

別の事例として、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 綾部事業所では、「環境あんどん」と呼ばれる工場エネルギーマネジメントシステム (Factory Energy Management System: FEMS)⁶⁾を開発・現場導入しています。工場内の生産設備やエアコン、発電機などの電力量だけでなく、品質に関わる製造現場の環境を見える化するシステムを構築し、更にこのFEMS技術の進化に向けて内閣府による「戦略的イノベーション創造プログラム⁷⁾」なども活用し、オープンイノベーションに積極的に取り組み、単なる技術開発だけでなく、生産工場での実用化・事業化、更には創出したFEMS技術の国際標準化も視野に活動を推進しています。

3. ステークホルダーとの連携の強化

オムロンは、SDGsの達成に向けて、ステークホルダーとの連携も強化していきます。例えば、顧客やパートナー企業、社会団体などと連携して、SDGsの達成に向けた取り組みを進めていきます。

このように、オムロンはSDGsの達成に向け、事業を通じた社会的課題の解決と、事業活動そのものの持続可能性の向上の両立を図り、業界をリードして持続可能な社会の実現に貢献していきたいと考えています。

本号では、長期ビジョンSF2030を基にした、SDGs社会を実現するオムロンの技術の中でも、特に注力している「持続可能な消費と生産、エネルギー、経済成長と雇用」に向けた革新的な技術を中心にご紹介いたします。

- 1) “価値創造コンセプト「i-Automation!」.” <https://www.fa.omron.co.jp/our-value/i-automation/>
- 2) “長期ビジョン「Shaping The Future 2030」.” <https://www.omron.com/jp/ja/sf2030/overview/>
- 3) “株式会社JMDCとの資本業務提携契約変更契約の締結 及び同社株式に対する公開買付けの開始に関するお知らせ.” <https://www.omron.com/jp/ja/news/2023/09/c0908.html>
- 4) “ロボットと制御機器を統合制御する世界初*1「ロボット統合コントローラー」を発売.” <https://www.omron.com/jp/ja/news/2020/07/c0729.html>
- 5) “「All in Half」で徹底した可視化と改善で挑戦、オムロンのカーボンニュートラルの取り組み.” <https://www.omron.com/jp/ja/edge-link/news/682.html>
- 6) “EQS-AD10-E 環境あんどん／特長.” <https://www.fa.omron.co.jp/products/family/3236/>
- 7) 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>

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 技術開発本部長



工場の自動化とエネルギーマネジメントの連携に向けて



早稲田大学 理工学術院 教授

天野 嘉春

技術は、「あんなことを実現したい」という願望を特定の機能として現実化する「機械」を創りエネルギーを注ぐことで、特定の機能を人が実行するのではなく外部化し、容量・能力を拡張することが可能になる。独立した一つの要素だけでは実現出来ない機能であっても、複数の要素が協調することで実現できる。独立した要素同士がコミュニケーションを取ることでシステムとして大きな効能を発揮する仕組みを、ホモサビエンスは既に「社会システム」として取り込んでいると観ることも出来よう。人工システム同士が通信する場合には慎重にデータ定義する必要がある。ところが人同士であれば、五感を通じて互いに相手の「心」を推測し合いながらセマンティクス上の不一致を補正し、意思疎通を図る事が可能だ。しかし、このような機能を実装した人工システム同士理解しあうシステムの実装はまだない。面白そうだ。

Buckminster Fuller は、食料として体内に摂取するエネルギー量を基準に、1人あたりのエネルギー消費量を energy slave という単位で表現した。日本や欧州の平均は、40~50 energy slave であり、米国は、80 energy slave 以上になる。他の生物はすべて 1 energy slave で生きているが、人はその数十倍のエネルギー資源を消費する存在なのである。この社会を持続可能にするためには、持続性の高いエネルギー資源の利用が前提となる。いつか枯渇すると騒がれた化石資源を掘り尽くす前に、大気中の温室効果ガス (GHG) 濃度の上昇による気候変動がもたらす負のインパクトがあまりに大きいことが認知され、GHG 管理の必要性が前面に出てきた。

エネルギーマネジメントの仕組みを脱炭素化に結びつけるためにはどうすれば良いのだろうか？ 国際標準 ISO 50001 シリーズでは、エネルギーパフォーマンスを継続的に改善する組織の活動として、エネルギーマネジメント (EnMS) 活動を規定している。この継続的に改善する活動

は、よく知られた PDCA サイクルとして説明されている。それぞれの活動は PDCA の順に Planning、Support and operation、Performance evaluation、Improvement である。工場であれば、工場内でのエネルギーパフォーマンスを継続的に改善するための活動が対象であり、工場から出荷された製品をエンドユーザがどのように使用するかはスコープ外としている。しかし、GHG プロトコルの Scope 3 のひとつであるエンドユーザの製品利用にともなう GHG 排出量を重視する生産最適化の考え方もあろう。そうなれば、工場内の部分的な狭い領域を評価すべき境界領域とするのではなく、製品のライフサイクル全体にわたる GHG 排出量の総計を重視する生産最適化も視野に入る。EnPI (Energy Performance Indicator) とは、エネルギーパフォーマンスの変化を識別するための KPI (Key Performance Indicator) であり、この変化を検知し、何らかの改善を実行することで、継続的にシステム全体のエネルギーパフォーマンスを維持、向上させる。この変化の基準を、エネルギーベースライン (EnB) と呼び、一般的には初期状態における EnPI の値とする。エネルギーパフォーマンスの結果は、例えばエネルギー消費原単位、使用量、ピーク使用量、無次元化した比あるいは効率で示すことが多い。ところで、「効率」の概念には、異なる 2つの考え方があることをご存じであろうか。ひとつは、熱効率に代表されるように、系に投入したエネルギーに対して、出力された有用な形態のエネルギーとの比とするもの。出力を得るのに、どの程度のコストを掛けたのかが重要な場合がこれである。もう一つは、エクセルギー効率や、タービンの断熱効率に代表されるように、理想的なエネルギー変化過程 (断熱過程、生成エントロピーがゼロとなる等エントロピー過程) を基準にして、実際の変化の比をとるもの。これは、理想的な過程が容易に定義でき定量化できる場合には有効で、現実と理想とのギャップを示してくれるので、その効率を上げる余地

がどの程度かを示す意味で、より本質的ともいえる。

産業用設備のエネルギーマネジメントシステムとして日本が提案し成立した国際標準規格として、筆者も提案作業に関わった IEC 63376:2023 がある。これはいわゆる FEMS と略記され、工場用エネルギーマネジメントシステムの基本要件と情報モデルを規定したものであり、実装されている機能要件によってレベル分けができるよう工夫されている。工場用エネルギーマネジメントシステムの基本的な要求事項を定義しており、基本機能を4つのカテゴリーに区分している。Monitoring、Analysis、Optimization、そして、Instruction である。これらは、外界をセンシングし、分析することで現状を認識し、次の一手を決めるべく最適解を導出し、外部にある他のシステムにその結果を出力する手続きであり、継続的に実行することで、目的であるエネルギーマネジメントを実現する。FEMS は IEC/ISO 62264 に規定されている ISA-95 モデルのレベル3に配置される。すなわち、レベル4のビジネスロジックを扱う ERP (Enterprise Resource Planning) の下位に設置され、工場内のエネルギーマネジメントの機能を自動化するシステムを対象としている。現在、最適化目的をエネルギーパフォーマンスの向上だけでなく、GHG 発生量の最小化とする場合にも適用できるような仕組みへの拡張が要請されている。また、より広い境界領域へと最適化対象領域を拡張するために、複数の FEMS が連携するための基本要件を定義する活動は、オムロンと早稲田大学とが協力して、内閣府が主導する戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) における第3期課題「スマートエネルギーマネジメントシステムの構築」研究の一つとして実施している。

エネルギー利用に伴い発生する GHG 排出量を最適化しようとする場合に立ちはだかる本質的な問題の一つが、

対象を物理的に計測するだけではわからない履歴情報の扱いである。例えば系統の電力も刻一刻と電源種の寄与率が変化しているため、厳密に言えば時刻毎に CO2 排出係数が変化する。しかし、電力メータで物理量としての電力を計測するだけではその時刻における CO2 排出係数、Scope 2 としての GHG 排出量がわからない。受入時の計測とは別にデータを共有する仕組みで履歴情報を取得しなければならない。しかも、異なる履歴をもつエネルギー資源を一箇所に貯蔵し、これを再度出力する場合、一旦混ざったモノはどの程度の時間的・空間的粒度まで区分すべきなのだろうか？これは、各種の燃料の CO2 排出係数においても同様である。化学的に全く同じ組成の燃料であっても、製造プロセスでどの程度の GHG が排出されてきたのかによって、「色分け」される。いろいろな「色」の燃料を混ぜたとき、どんな「色」になると合意できるのだろうか？このような情報と、エネルギー資源（実体）との対応付けの仕組みは、社会システムとして構築されなければ、個々の努力だけでは、理想的なカーボンニュートラル社会に向けた行動指針が立てられない。エネルギーが生成端から、輸送され、利用の現場に至るまで、適切な時間・空間粒度でデータと対応づけできるシステムを構築し、共有することが、この脱炭素社会構築というグローバル課題解決の必要条件であろう。

コモンセンスを共有することで、社会は成り立っている。複数の FEMS が協調するためのコモンセンスは何だろうか？新しいエネルギーシステムを本質的に歪んだシステムとしないために、自然界、そして人と社会の現在の有り様をよく観察し、人を含む自然界と人工システムの親和性を意識した協調的な仕組みを構築したい。

特集

持続可能な未来への
一歩を踏み出す開発プロセスの
革新と省エネ・省資源技術



【技術解説】 バイオマスプラスチック普及における マスバランス方式の意義

田中 泰法

近年、日本政府が 2050 年までの目標に掲げるカーボンニュートラル社会の実現に向けて、バイオマスプラスチック普及促進が活発化している。既存の石油由来プラスチックからバイオマスプラスチックへの転換では、とりわけ産業界においては、材料特性の実用性とリードタイムの双方において、シームレスな切り替えが主要な課題となる。本稿では、複数ある切り替え方式について、その中で最も現実的な方式として適用が進むマスバランス方式の意義について述べる。また、マスバランス方式の採用における懸念点について材料技術の視点から検証する。

【Expository Articles】 Significance of Mass Balance Approach in the Dissemination of Biomass Plastics

TANAKA Yasunori

In recent years, toward the realization of a carbon-neutral society, which is the Japanese government's goal of achieving a carbon-neutral society by 2050, a movement to promote the spread of biomass plastics is becoming active. When switching from existing petroleum-derived plastics to biomass plastics, seamless switching in material properties and lead time is an issue, especially in the industrial world. In this paper, we describe the significance of the mass balance approach, which is being applied as the most realistic method among the multiple switching methods. In addition, concerns in the adoption of the mass balance approach will be examined from the viewpoint of material technology.

1. まえがき

1.1 カーボンニュートラルの概要

近年、気候変動の要因として指摘される GHG（温室効果ガス）のうち、人間の活動により大量に大気中に排出される二酸化炭素を対象として、実質的に排出量をゼロにする「カーボンニュートラル」の施策に注目が集まっている。

この考え方は、2015 年に採択されたパリ協定¹⁾ で世界共通の長期目標として掲げられている。この協定では、世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2°C より十分低く保つとともに、1.5°C に抑える努力を追求すること（2°C 目標）としている。この目標を 2050 年までに達成することとし、我が国においても実現に向けた長期戦略²⁾ が政府から示されている。

単純な二酸化炭素排出量の削減だけでは排出量をゼロにすることは困難である。これに対して「カーボンニュート

ラル」は、二酸化炭素を吸収、固定化することにより残分を相殺し、実質的にゼロとするものである。

1.2 オムロンにおけるカーボンニュートラル目標の設定

オムロンは、カーボンニュートラル社会の実現に向けた具体目標として、2018 年 7 月に、「オムロン カーボンゼロ」を設定した。当初は 2°C シナリオに基づき、2050 年にスコープ 1・スコープ 2（自社領域から直接的・間接的に排出される温室効果ガス）で温室効果ガス排出量ゼロを目指す方針であった。これを 2022 年 3 月には、1.5°C シナリオに基づいたより野心的な目標に改めた。ここでは、新たにスコープ 3（自社のバリューチェーンからの温室効果ガスの排出）について、2030 年に 18% 削減（2016 年度比、2°C シナリオに基づく）という目標を新たに設定した³⁾。このように、オムロンはカーボンニュートラル社会の実現に向けて意欲的な取り組みを推進している。

1.3 政府によるバイオマスプラスチック導入目標の設定

日本国内におけるカーボンニュートラルの推進につい

Contact : TANAKA Yasunori yasunori.tanaka@omron.com

て、各方面への施策が政府から示されている。材料面では、経済産業省が示すグリーン成長戦略の重点14分野の中にプラスチック原料に関わる項目が含まれている。このなかで、バイオマスプラスチックを年間200万t導入することを目標に掲げ、実現に向けたロードマップが示されている。現状では主に消費者向けの製品でバイオマスプラスチック導入が進んでいるが、産業用途では少なく、今後の採用拡大が期待される。なお、産業用途では、価格の高さが最大の障壁となっており、バイオポリエチレンを例に挙げた場合に石油由来品と比較して3倍の価格となっている⁴⁾。この他にも性能面では、新規材料への変更といったリスクも伴うことになる。とりわけ制御機器事業においては、材料に対して高い難燃特性を求める場合が多く、バイオマスプラスチックが検討対象として取り扱われること自体が稀である。現在はエネルギー効率化によるカーボンニュートラル推進が目下の潮流となっているが一方で、オムロン制御機器事業では材料による貢献も必要と判断し、早期段階からバイオマスプラスチック導入にかかる技術獲得を進めている。

2. バイオマスプラスチックの概要

2.1 バイオマスプラスチックの定義

現時点でのバイオマスプラスチックおよびその周辺材料を図1に示した。バイオマスプラスチックは、植物などの再生可能な有機資源（バイオマス）を原料として製造されるプラスチックと定義される。また、環境中で微生物等の働きにより二酸化炭素や水に分解する機能を有するプラスチックを生分解性プラスチックという。これらを総称してバイオプラスチックと呼ぶ。よって、すべてのバイオマスプラスチックが生分解性を有するものではなく、またすべての生分解性プラスチックがバイオマスを原料として製造されるものではない。例えば、生分解性を有しないバイオマスプラスチック（バイオポリエチレン等）や、石油由来の生分解性プラスチック（ポリブチレンサクシネート等）といったものも存在する。バイオプラスチックは今後さらなる多様化の可能性がある、それにより各呼称の整理が進むと想定される。

バイオマスプラスチックの分類には、既存材料と同じ化学構造のものを既存のプラント内で並行製造するマスバランス方式や、専用プラントにより製造するドロップイン方式（セグリゲーション方式）がある。さらにバイオマス由来特有の機能を追求し、特定のバイオマス原料からではしか製造できないオリジナルバイオマスプラがある。これらの製法や原料などそれぞれの特徴に沿った分類は、時代ごとに求められてきた付加価値に沿った分類である。

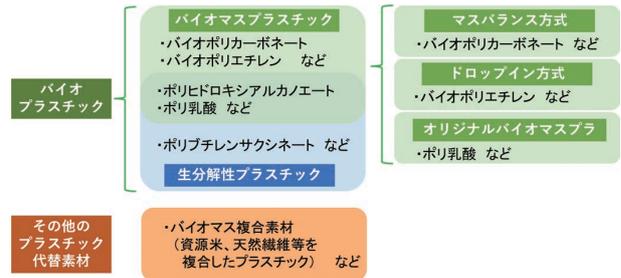


図1 バイオマスプラスチックおよびその周辺材料の分類

なお近年、既存のプラスチックに対して資源米などのバイオマス資源を組み合わせた複合素材の登場が相次いでいる。これらをバイオプラスチックやバイオマスプラスチックに含めるケースがあるが、プラスチックの主体であるポリマーの原料にバイオマス原料が使用されないことから、本稿では除外する。

2.2 バイオマスプラスチックのメリット

従来のプラスチックでは、主に石油をはじめとする化石資源を粗原料に製造されている。石油は太古の昔に生育した生物の死骸が地中の熱や圧力により変化して生成した化石資源であり、人類はそのような資源を採掘しプラスチックの原料として利用している。プラスチックが使用後に廃棄される際には、おおむね焼却されて二酸化炭素として放出されることから、ライフサイクル全体で見た場合、地中内で化石資源として固定化された炭素を二酸化炭素として環境中に放出し、大気中の二酸化炭素濃度を上昇させる。一方、バイオマスプラスチックの場合は、使用後の挙動は同等ながら、原料とする植物は大気中の二酸化炭素を吸収して成長することから地上で炭素循環が成立し、大気中の二酸化炭素濃度の上昇要因から除外して考える事ができる⁵⁾。このような石油由来のプラスチックとバイオマスプラスチックとの比較を図2に示した。このような特長から、バイオマスプラスチックはカーボンニュートラルに貢献する材料といえる。

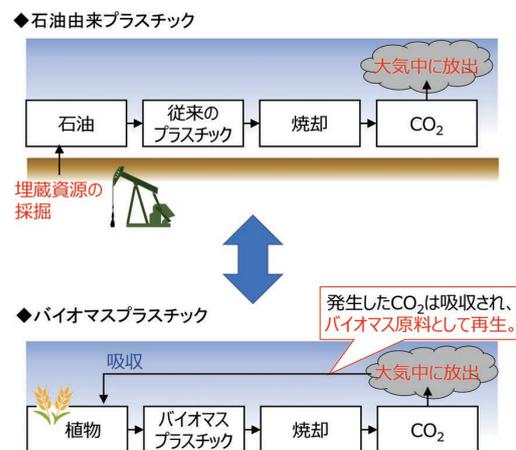


図2 石油由来プラスチックとバイオマスプラスチックの比較

2.3 バイオマスプラスチックの変遷

バイオマスプラスチックの開発の初期段階では、既存の原材料とは全く異なる新しい化学物質の創出に軸足を置いていた。代表的な材料として、ポリ乳酸が挙げられる。これらはバイオマス原料から得られる特有の化学構造を活用しようとしたものの、使いにくさ等から市場規模は限定的であった。ただし、近年は取り扱い技術の発達とカーボンニュートラルの社会要請から市場の拡大に向けた動きがみられる。

次いで石油枯渇の懸念の高まりから、既存プラスチックであるポリエチレンを対象に、バイオマス由来原料への置き換えが模索された。2010年にはBraskem社から、サトウキビ由来のバイオポリエチレンの商業生産をドロップイン方式で世界で初めて開始した。同バイオポリエチレンは現在も生産されており、同社が唯一のサプライヤーである。初期の段階では、バイオポリエチレンは既存のポリエチレンと化学構造が同じであるものの、価格が高くなるため市場の拡大は低調であったが、近年のカーボンニュートラルへの期待から見直され需要が増加している。

近年は、SDGsの浸透やカーボンニュートラル社会の実現に向けた具体的な目標設定といった観点から、バイオマスプラスチックに注目が集まっている。日本国内においては、三井化学が最有力サプライヤーであるフィンランドのNeste社からバイオマスナフサの供給を受け、そこから製造した基礎化学品を各プラスチックメーカーへ供給し始めており、各種のバイオマスプラスチックが続々と登場している⁶⁾。ここではマスバランス方式が採用されており、これを契機にマスバランス方式のバイオマスプラスチックの展開が2021年以降、急速に進展している⁷⁾。

3. マスバランス方式バイオマスプラスチックの概要

3.1 マスバランス方式の考え方

ここからは、前述の通り急速に進展しているマスバラン

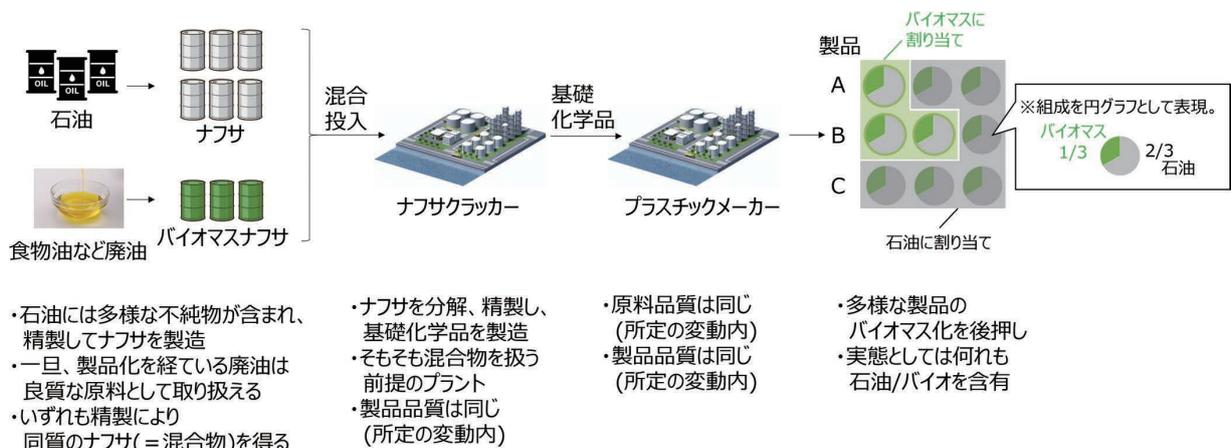
ス方式について詳細を述べる。マスバランス方式は、導入原料のうちのある特性を持つ原料について、その投入量に応じて、生産された製品の一部にその特性を割り当てる手法である。例えば、従来の原料と環境価値の高い新原料を7:3の割合で混合して使用した場合、製品の30%に環境価値の高い新原料から製造された、という特性を与え、残り70%の製品は従来の原料から製造されたとみなす。この方式は、パーム油や紙などの多くの業界で適用されている。

マスバランス方式を適用したバイオマスプラスチック製造について図3に示した。ここでは、プラスチック材料の粗原料であるナフサについて、石油ソースとバイオマスソースの各ナフサを混合してナフサクラッカーに投入し、エチレンやプロピレンをはじめとする基礎化学品を製造し、さらにそこからプラスチックを製造する。この製品には、各原料ソースが一様に含まれており、原料ソースごとの区別ができない状態になっている。しかしマスバランス方式では、ある特性を持つ原料（ここでは主にバイオマス由来であること）の投入量に応じ、生産された製品の一部にその特性を割り当てる。正確な割り当てを行うためには、粗原料、原料、樹脂、プラスチック製品、さらにはそれを使用した最終製品に至るまでの全体のサプライチェーンについて、認証システムによりトレーサビリティを確保しなければならない。

3.2 マスバランス方式のメリット

3.2.1 バイオマス度 100%の製品の創出

マスバランス方式を採用することで、その製品の実態のバイオマス含有量に関わらず、バイオマス 100%の製品として展開が可能になる。これにより、顧客の要求に合わせた材料を100%バイオマスプラスチックとして提供できるようになり、バイオマスプラスチックの社会浸透を後押しすることができる。



- ・石油には多様な不純物が含まれ、精製してナフサを製造
- ・一旦、製品化を経ている廃油は良質な原料として取り扱える
- ・いずれも精製により同質のナフサ(=混合物)を得る

- ・ナフサを分解、精製し、基礎化学品を製造
- ・そもそも混合物を扱う前提のプラント
- ・製品品質は同じ(所定の変動内)

- ・原料品質は同じ(所定の変動内)
- ・製品品質は同じ(所定の変動内)

- ・多様な製品のバイオマス化を後押し
- ・実態としては何れも石油/バイオを含有

図3 マスバランス方式の製造の流れ

マスバランス方式を採用する最大のメリットとしては、多くのプラスチック製品への展開可能性が挙げられる。これまでのバイオマスプラスチックは、前述のポリ乳酸やバイオポリエチレンといった現にバイオマス由来の原料からドロップイン方式により製造できるものに限られていた。ここで新たにマスバランス方式を導入することで、従来は技術的にも実現が困難であったプラスチックにもバイオマスプラスチックとしての割り当てが可能となる。これは技術課題を直接克服するものではないが、バイオマスプラスチックとみなした取り扱いが可能となる方法を提供することで、多種のプラスチックのバイオマス化を後押しできる。さらに、ユーザー側には環境価値の訴求、サプライヤー側には販売数量増加の機会となり得る。マスバランス方式の採用は、社会全体のカーボンニュートラル化を促すものであり、社会的側面からも導入の価値が大きい。

3.2.2 品質の変動管理の容易性

マスバランス方式によるバイオマスプラスチックの製造では、食物油など一旦精製された原料から製造されたナフサを使用する。産地やロットによる品質の差異が比較的大きい石油に対して、食物油は品質の安定したソースと捉えることができ、生産管理上有利である。

バイオマスソースから製造されるナフサは、厳格な品質管理のもと製造される SAF (Sustainable Aviation Fuel) の副生物であり、今後見込まれる SAF の需給の増加を背景に、品質面、調達面の安定性も担保されている。さらに、これらナフサはナフサクラッカーに投入され、化学分解を経たうえで蒸留を繰り返しエチレンやプロピレンといった基礎化学品に分離される。前述のとおり、品質が比較的安定した原料から製造されたバイオナフサを投入するので、ナフサクラッカーのプラントの変動管理にも有利である。品質管理のうえでは石油由来ナフサの投入を前提とした既存のプラントに対して、バイオナフサを投入した場合の工程管理値の急峻な変動が最も注目される。石油化学におけるバ

イオマスソースは依然として僅かであり、直ちに現行のプラント規模に対して全量が置き換わるとは考えにくい。そのなかでマスバランス方式であれば、製造者が自己の判断により投入量・投入比を調整できることは、バイオマスソースの導入を容易にする。

3.2.3 設備投資の軽減

マスバランス方式の適用においては、投入する各原料ソースは同質であるという前提を置いている。この前提により石油由来原料を前提に稼働していた既設のプラントに対し、バイオマス由来原料の混合が可能となる。

これによるメリットは第一に、既存の設備をそのまま使用することで、新たな設備投資を最小化できることである。また、大型設備の追加設置が不要なので建設期間や立ち上げ期間が短くて済み、導入決定から実稼働までのタイムラグを抑制できる。次に、導入後の利点として他の原料ソースを任意に混合できる汎用性があり、原料ソースごとの専用設備の設置が不要になる。バイオマスソースは今後多様化すると考えられるが、状況変化に応じた柔軟な対応が可能になる。

マスバランス方式の優位性を検討するために、これを用いない場合のバイオマスプラスチック製造状況について図4に示した。この場合、既存のプラントと、新設するバイオマスプラスチック製造プラントとが並行操業の状態となり、それぞれの製造ラインにおいて多くの課題が生じる。まず既存のプラントにおいては、現状では社会全体の需要に応じた生産規模をとっているなかで、バイオマスプラスチックの台頭により需要を奪われ、最終的にすべてのプラスチックがバイオマスプラスチックに置き換わる場合、既存のプラントは操業停止に至る。このように既存設備では、稼働率低下・遊休化というコスト増が生じる。一方、バイオマスプラスチック製造プラントにおいては、専用設備として新たに設備投資が必要となり、初期供給段階から過大なコスト構成要素となる。操業開始までのリードタイ

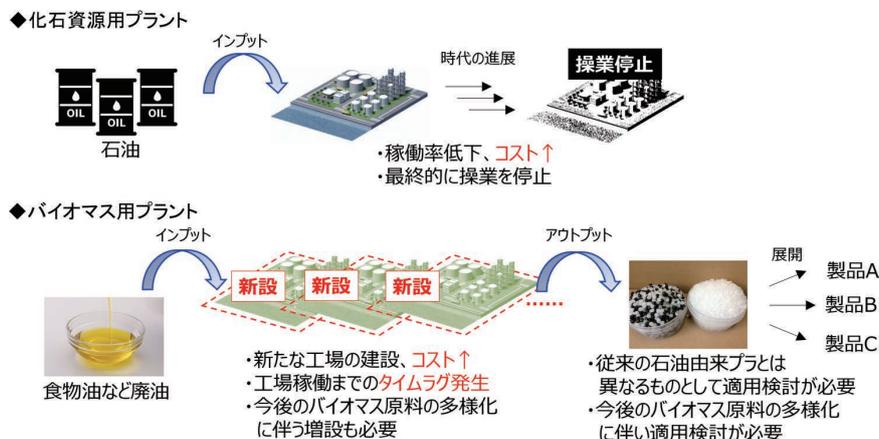


図4 マスバランス方式を用いない場合のバイオマスプラスチック製造設備の状況

ムも発生し、多くの場合は年単位の期間が必要となるため、社会状況に応じて機敏にバイオマスプラスチック提供体制を整えることには至らない。また、新たな原料ソースが登場した場合、それに応じた専用設備の増設が必要になる。さらに増設後も、それぞれの設備をそれぞれの原料ソースの供給量、あるいは需要量に応じて独立で運用する必要がある。ユーザー側も、各製造ラインから製造される製品は異なるものとして取り扱うことになり、製品試験や生産管理等の周辺業務が過大となる。このため、バイオマスプラスチックの社会浸透には大きな足かせになる。このような困難さが双方で並行して生じるため、およそ現実的な施策でなく、その解決策としてマスバランス方式は極めて有効な手段となり得る。

3.2.4 社会情勢に応じた生産調整の容易性

マスバランス方式においては、社会のバイオマスプラスチックのニーズに沿ってバイオマス由来成分の投入比率を任意に調整できる点が挙げられる。現状では全体のプラスチック生産量に対してバイオマスプラスチックの割合は僅かではあるが、今後さらに需要が拡大した際にもバイオマス由来成分の投入比率を任意に調整できるため、状況に応じたより柔軟な対応が可能である。今後の状況変化について確定できない現状において、想定される事象としてはバイオマス由来成分の投入比率の増加や、原料ソースの多様化、原料導入の複線化といったものが挙げられる。やがて、当該生産ラインの全量がバイオマスプラスチックに置き換わりドロップイン方式へと終着する際にも既存設備での延長線上での取り扱いとなるため過渡期対応として極めて現実的である。

3.3 マスバランス方式のリスクに関する考え方

3.3.1 不純物混入リスク

マスバランス方式を採用する際には、従来の石油由来原料を前提として設計された生産設備に対して、異なるソースの原料を混合して投入することから、製品の品質面におけるリスクの発生が考えられる。石油由来品で設計した品質規格において想定されていなかったバイオマスソース由来の差異が顕在化し品質に影響を及ぼすことである。具体例として想定外の不純物の存在が該当するが、ナフサのクラッキングプロセスでは、そもそも混合物であるナフサに対して化学分解を行い、分留するプロセスである。このことを踏まえると、工程管理内の運転制御がなされている限り基本的に不純物の混入は阻止され、同質のアウトプットとなる。

3.3.2 工程変動リスク

工程管理それ自体のリスクとして、既存のプラントに新

たにバイオマスナフサを混合投入する際の工程変動がある。通常、このようなプロセスにおいては、アウトプットの製品の品質項目値のみに限らず、製造時の工程管理値を設定して所定の範囲内で制御することにより安定的に同質の製品を生産している。しかし、異なる原料を混合することにより工程管理値に急峻な変動が起こる場合には、制御が困難になり管理値を外れるリスクの発生がある。投入するナフサのロット間の品質の差異においても同様の制御が必要であるが、食物油から製造されるバイオナフサなどマスバランス方式で使用される原料は、人為的に一旦精製済みの粗原料から製造されるため石油由来のナフサと比較して工程管理上はむしろ有利と考えられる。例として、図5に石油由来原料をもとに連続プロセスとして稼働する設備に、バイオマス由来原料を投入した際の品質に関する工程管理項目の挙動を示した。

なお、ナフサの投入の際には予め原料タンク内で混合し平準化されるのが普通であり、急峻な変動に至らぬよう管理される。このような過程にて製造された基礎化学品は、原料ソースによらず実質的に均質と判断してよく、さらにこれらを原料として製造されるバイオマスプラスチックについても通常の品質管理内での取り扱いが可能となる。

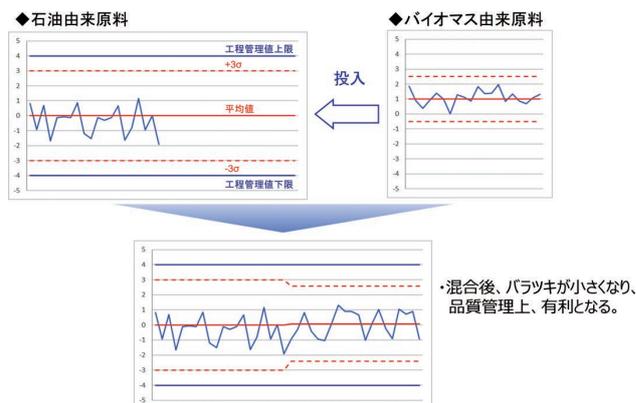


図5 マスバランス方式によりバイオマス由来成分を原料に混合した場合の品質に関する工程変動の例

3.3.3 マスバランス方式で石油由来プラスチックに割り当てられた製品の扱い

マスバランス方式では、石油由来プラスチックに割り当てられた製品にも、バイオマス由来成分が含まれている。よって、マスバランス方式の適用前後において石油由来品を継続的に取り扱う場合についても、品質への影響についてユーザー側への通知と許諾判断が必要である。品質については前述のとおり、既存の工程管理内であり影響は無い、ないしは管理上より優位であるとして取り扱うことができるが、その許容の判断はユーザー側に委ねられる事項である。ユーザーが許容しない場合には、複数の製造ラインがある場合は原料混合をしないラインから優先的に供給

するか、メーカーの変更により回避するといった対応が必要となる。

バイオマスナフサと石油由来ナフサ、またはバイオマスプラスチックと石油由来プラスチックは、同じ製造ロット内での割り当てを行う場合には、いずれも品質的な“差異”は無く実質的に同質であるといえる。しかしながら、既存の原料に対するバイオマス由来成分の投入量の大小に伴う品質の“変動”についてユーザー側の理解が必要である。マスバランス方式を適用する場合、バイオマス由来成分の混合比は可変であるため、例えばバイオマス由来成分の比率が高いロットを用いて商品設計を行った場合、そこから比率が下降した際に生じる品質変動の可能性が受容可能であるかを判断する必要がある。なお、原料品質の変動による影響は既存の石油由来原料にも言えることであり、投入時の規格に即した原料を投入する限り、制御可能な範囲内の取り扱いとなり、品質面の実質的な影響は無いと考えてよい。

このように、バイオマス由来成分の混合による品質への影響は極めて小さいながらも、これまでにない新しいプロセスであることから、投入比率に対する品質への影響を継続監視する姿勢が肝要である。サプライチェーン全体で、各製造ロットに対する投入比率情報を共有し、各工程の管理条件や品質規格との相関関係を理解することが、最終的にドロップイン方式に至るまでの姿勢として望ましい。

3.4 マスバランス方式の優位性

マスバランス方式により享受できるメリット、およびそれに伴うリスクについて前述した。各リスクの検証結果からはマスバランス方式バイオマスプラスチックの導入に致命的な阻害要件は見いだせず、一定の理解のもと取り扱うことで、産業上の多大なメリットを享受できる。

4. オムロン制御機器事業におけるバイオマスプラスチック搭載技術の動向

マスバランス方式バイオマスプラスチックの導入には、検討対象となり得る材料の有無や材料の特性値のほか、製造プロセスや材料品質の変動など、多岐にわたる技術的な受容体制の獲得が求められる。オムロン制御機器事業では、前述の技術的知見の獲得をもとに、精緻な検証を経てマスバランス方式バイオマスプラスチックを受容するための理論体制を新たに構築した。

バイオマスプラスチックのオムロン制御機器事業の製品への展開については、すでに複数の商品、部材を対象に試作検証を実施している。各対象部材において、それぞれ対応する石油由来プラスチックとマスバランス方式バイオマスプラスチックの各物性値、および社内指定の各環境条件に晒した際の物性値の変化を比較したが、いずれも有意な差は認められなかった。部材の成形工程では、双方とも同

じ成形条件で問題なく成形が可能であり、製品評価の結果からも同等の品質を担保できることを技術的に確認した。石油由来プラスチックとマスバランス方式バイオマスプラスチックとは、その製造プロセスから材料としての差異は認められないことを、上記の検討結果から実際に確認し、いずれも同質として取り扱いが可能であると結論付けた。試作品の一例として、制御機器製品の筐体を図6に示した。特性、外観含めて従来の石油由来プラスチック品と比較しても見分けがつかず、製品搭載に適う技術を獲得している。

バイオマスプラスチックの積極導入を希求する技術推進は、オムロン制御機器事業の競合他社である国内10社においても顕在化しておらず（2023年5月現在）、業界においても極めて先進的な取り組みである。



図6 マスバランス方式バイオマスプラスチックを使用した製品筐体の試作例

以上見たようにマスバランス方式の考え方は、バイオマスプラスチックの普及に対して極めて有効な手法である。また、バイオマスプラスチックに限らずプラスチックリサイクルの分野にも有効に適用できると考えられる。

世界のプラスチック需要は人口増加に伴いますます高まると予想され、カーボンニュートラル社会の実現に向けては原料ソースのバイオマス化のほかに、リサイクルによる循環利用、および社会全体でのプラスチック資源の積み増しが必須と考える。プラスチックリサイクルには、使用後に再度溶融して新たな製品とするマテリアルリサイクルや、化学分解して原料として再使用するケミカルリサイクル、焼却処分する際の熱を有効利用するサーマルリサイクルがある。リサイクル手法の優先順位はこの序列に従い、マテリアルリサイクルの取り組みが先行して進んでいる。マテリアルリサイクルが困難なプラスチックは主に焼却されていたが、近年のケミカルリサイクル技術の発展に伴い適用範囲が拡大し、今後ますます技術の高度化が進むと予想される。ケミカルリサイクルでは分子レベルでの取り扱いになること、原料ソースが極めて多岐にわたることか

ら、バイオマスプラスチックと同様にマスバランス方式の適用は有効な手法である。

5. むすび

バイオマスプラスチックの普及を目指すうえで、マスバランス方式を採用する意義について述べるとともに、実際の取り扱い面におけるリスクについて考察し実質的に問題なく使用できることを述べた。マスバランス方式の導入の意義については、バイオマスプラスチックに限らずケミカルリサイクル材料などの環境価値を表出する材料への適用にも広く活用できると考えられ、今後広く活用されカーボンニュートラル社会の実現に貢献する有力な手段のひとつになり得ると考えられる。オムロン制御機器事業では上記の独自の指針のもと、バイオマスプラスチックのほかにケミカルリサイクル材料の適用可能性と、それらを組み合わせた場合の影響について積極的に検証を進め、カーボンニュートラル社会の実現を後押しする。

執筆者紹介



田中 泰法 TANAKA Yasunori
 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2技術部
 専門：有機化学、化学工学
 所属学会：日本化学会

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。

参考文献

- 1) 外務省. “バリ協定.” https://www.mofa.go.jp/mofaj/ila/et/page24_000810.html (Accessed: Nov. 17, 2023).
- 2) 令和3年10月22日閣議決定. “バリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略.” <https://www.mofa.go.jp/mofaj/files/100305868.pdf> (Accessed: Nov. 17, 2023).
- 3) オムロン株式会社. “オムロン 統合レポート 2022.” https://www.omron.com/jp/ja/ir/irlib/pdfs/ar22j/OMRON_Integrated_Report_2022_jp_A4.pdf (Accessed: Nov. 17, 2023).
- 4) 環境省, 経済産業省, 農林水産省, 文部科学省. “バイオプラスチック導入ロードマップ.” <https://www.env.go.jp/content/900534511.pdf> (Accessed: Nov. 17, 2023).
- 5) 菊池康紀, 平尾雅彦, 成田賢治, 杉山英路, Sueli Oliveira, Sonia Chapman, Rita M. Marzullo, Mariana M. Arakaki, Leonora M. Novaes, “バイオマス由来ポリエチレンのライフサイクル評価,” 第6回日本LCA学会研究発表会講演要旨集, 2021, pp. 204-205.
- 6) 瀧敬一, 川島信之, “バイオマスプラスチックの動向とバイオポリプロピレンへの取り組み,” 日本ゴム協会誌, vol. 95, no. 5, pp. 145-152, 2022.
- 7) 令和4年度マスバランス方式に関する研究会. “参考資料(マスバランス方式に関する国内外の状況等).” 環境省. <https://www.env.go.jp/content/000143869.pdf> (Accessed: Nov. 17, 2023).

脱炭素社会に貢献する FA 用大容量電源の開発

谷野 光平, 長野 昌明, 渡邊 智紀, 鶴口 祐規

カーボンニュートラル・脱炭素社会への取り組みと並行し、労働人口の減少やサテライト工場の推進から、製造業の自動化が加速している。このため、製造現場の電動機器やセーフティー機器、IoT 機器は増加傾向であり、エネルギー消費量増加と装置や制御盤の占有スペース増大が問題となっている。これら問題解決のために電源機器へは、“より小型でより大容量・高効率” であって、故障もしにくい（装置のエネルギー生産性に貢献する）といった進化が求められている。

今回、大容量電源に一次直列二次並列型 LLC コンバータを適用することにより、2 kW 電源（形 S8VK-WA20224）において 95.4% の効率を達成、従来の 1.5 kW 電源の効率 88.7% より大幅に向上させた。更に磁気と熱を併用したシミュレーションによって最適な放熱構造を実現し、自然空冷とすることで故障率を低減させている。また、電源を搭載した装置や制御盤の小型化にも着目し、配線電流を電源側で制限する技術を用いることで、使用する配線の線径を小さくし、制御盤のサイズを 10% 減らすことができた。

今回の技術は、2 kW を超える大容量電源にも適用可能であり、さらなる脱炭素社会実現への貢献が期待される。

Development of High-Capacity Power Supply for FA, Contributing to Decarbonized Society

TANINO Kohei, NAGANO Masaaki, WATANABE Tomonori and TSURUGUCHI Yuki

Amidst efforts for a carbon-neutral and decarbonized society, manufacturing automation speeds up due to the declining labor force and satellite factory promotion. Growing use of electric, safety, and IoT devices in manufacturing raises concerns about increased energy consumption and growing occupancy of space within equipment and control panels. To address these issues, power supplies are expected to evolve, becoming ‘smaller yet higher capacity and efficiency,’ enhancing energy productivity of the systems and reducing susceptibility to malfunctions. This time, by applying a LLC converter of primary series-secondary parallel type to a high-capacity power supply, a 95.4% efficiency has been achieved for a 2 kW power supply (S8VK-WA20224), which is a significant improvement over the 88.7% efficiency of a conventional 1.5 kW power supply. Furthermore, the optimal heat dissipation structure has been achieved by a simulation that combines magnetism and heat, resulting in natural air cooling to reduce the failure rate. Focusing also on downsizing devices and control panels equipped with power supplies, the technology to limit the wiring current on the power supply side has been incorporated to reduce the wire diameter used for wiring and the size of the control panel by 10%. This technology can also be applied to high-capacity power supplies exceeding 2 kW and is expected to contribute to further realization of a decarbonized society.

1. まえがき

2050 年のカーボンニュートラル実現に向け、脱炭素社会への取り組みが進行している。更には、労働人口の減少やサテライト工場の推進から、製造業の自動化は近年加速している。自動化に伴い電動機器やセーフティー機器、

IoT 機器などは増加し、使用する電源の容量は大きくなる。しかもコスト低減と環境負荷減少のために、それらによる装置や制御盤の大型化を抑制することが求められている。こういった要求に答えるためには、“より小型でかつ大容量・高効率（低損失）な電源” が必要となる。なお、小型化は、製品の原材料の削減や製品の輸送に伴う温室効果ガス（GHG）低減効果についても期待されている。

Contact : TANINO Kohei kohei.tanino@omron.com

従来の技術では大容量の電源は内部の発熱が大きく、強制空冷が必須であるが、強制空冷はファンの寿命や粉塵などの異物の侵入などの観点から自然空冷よりも故障率が高い。より高頻度で装置が停止することになるため、生産性が低下し、装置の待機電力が増え、エネルギー生産性を低下させてしまう。つまり GHG 排出量を増加させるという問題がある。

本稿ではこれらの問題に対応できる、制御盤の小型化に貢献し GHG を低減できる大容量電源を実現する技術について説明する。

2. 技術課題

2.1 複数素子の並列接続における電流の均一化

現在 100 W~1 kW 程度の小~中容量電源では、一次側 MOSFET のゼロ電圧スイッチングと二次側ダイオードのゼロ電流スイッチングによる高効率が達成できるという理由により、ハーフブリッジ型 LLC コンバータ（以下 LLC コンバータ）が広く採用されている。ただし 1 kW を超える大容量電源において LLC コンバータを採用した場合、パワーデバイスやトランスに共振回路特有の大電流ストレスがかかる。以降で詳細を説明する。

図 1 に LLC コンバータと従来大容量電源に採用されていたフルブリッジコンバータの二次側のトランスに流れる電流波形を比較したものを示す。LLC コンバータの場合、二次側には正弦波に近い電流が流れるため、フルブリッジコンバータと比較して、ピーク電流、また実効電流が増加しており、従来よりも大電流ストレスがかかることが分かる。

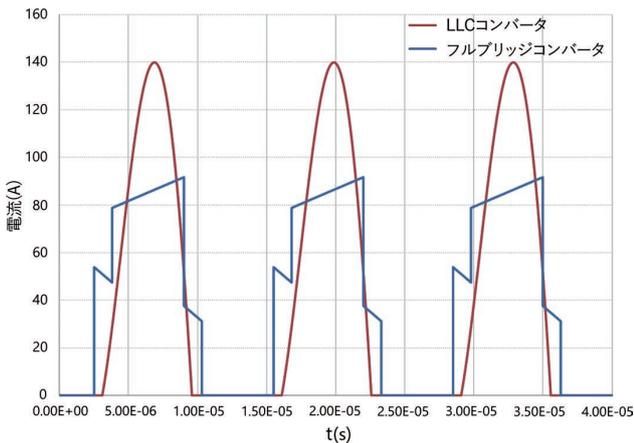


図 1 LLC コンバータとフルブリッジコンバータの二次側電流波形の比較

また図 2 は各電力容量でトランス二次側巻線に流れる実効電流の二乗を LLC コンバータとフルブリッジコンバータで比較したものである。半導体やトランス巻き線などの

抵抗分損失は実効電流の 2 乗に比例しており、抵抗成分が一定の場合、容量が大きくなるほど従来よりも損失が増加するということになる。

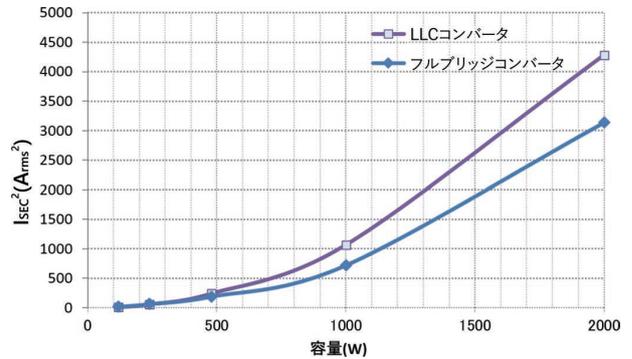


図 2 電力容量と二次巻線 2 乗実効電流値の関係

大電流ストレスを回避するためには図 3 のようにデバイスを並列に接続する方法がある。

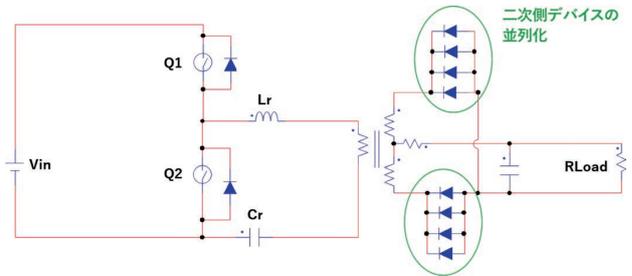


図 3 LLC コンバータで二次側電流ストレスのデバイス並列による回避

しかしデバイス毎の電流バランスは保証されず一つのデバイスに電流が偏った場合、効率の低下や信頼性低下を招く。この問題を解決するためには、大電流を複数素子に分散させ、かつ各素子に流れる電流を均一にすることが課題となる。

2.2 自然空冷と小型化の両立

1 kW を超える大容量の電源は強制空冷の採用が一般的になっているが、FAN の寿命や粉塵などの異物の侵入により、電源が停止することでエネルギー生産性を低下させるという問題がある。そのため、自然空冷の電源のニーズが高まっている。

大容量電源において小型化と自然空冷を両立させるには、発熱部を冷やす最適な放熱構造が必要になり、試作機を用いた試行錯誤により決定していた。しかし図 4 (2 kW 電源の断面図を 3D データで示したもの) のように大容量では部品点数も多く、構造が複雑なため、試作機を複数種作製するなど開発と検証の期間が莫大となる。そのため熱シミュレーションを活用し、放熱構造を効率的に検討する。

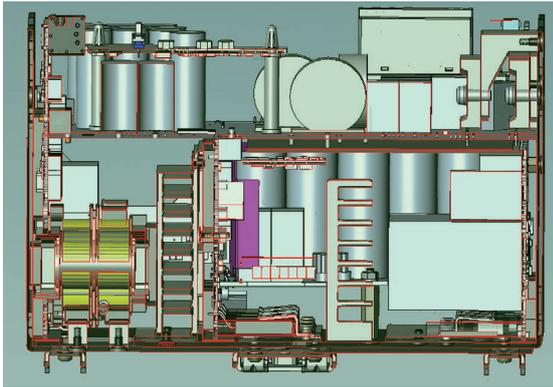


図 4 2 kW 電源内部構造

熱シミュレーションでは発熱部品の損失を正しく入力することで精度が高い結果が得られるが、特に発熱の大きいトランスなどの大型磁性部品は損失計算が難しく、熱シミュレーションに必要な精度が確保できないという問題があった。

大型磁性部品の損失において巻き線に電流が流れることによる損失（銅損）を計算する場合、 $P_c = R \times I^2$ で計算するが、この R、つまり巻き線の抵抗値は近接効果や表皮効果などの影響を受け変動する。また図 5 のようにコアの中央ギャップからの漏れ磁束が巻き線を通る。これにより巻き線に渦電流が流れ発生する渦電流損などもあり、計算と一致しない。損失を実機で確認することも考えられるが、上述の現象は部品の内部で発生するため、電流波形などをとらえることができず、トランスの損失を実測することは困難である。

熱シミュレーションで多くのパターンの試行錯誤を短時間で検討し最適な放熱構造を見つけることにより小型・自然空冷の両立を実現するためには、磁気シミュレーションを活用して大型磁性部品の損失を正確に見積もることが課題となる。

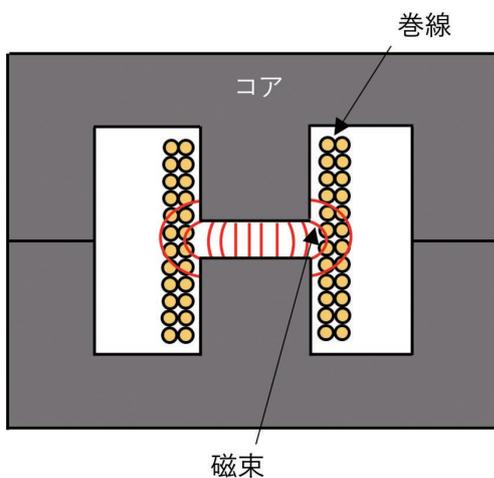


図 5 コア中央ギャップからの漏れ磁束

2.3 使用線径の制限緩和

2 kW クラスの電源は出力が大電流になり、配線に線径の大きい線を使う必要が出てくる。線径の大きい線は曲げ R が大きくなるので制御盤のサイズに影響する。配線を制御盤の上のダクトに入れるなどの目的で曲げる場合、およその曲げ R は次式で見積れる。

$$\text{曲げ外 } R = 5 \times \text{線径} \quad (\text{曲げ外 } R \text{ は線径 } 4 \text{ 倍} + \text{基本線}) \quad (1)$$

図 6 に示す通り、例えば 85 A（出力容量 2 kW、電圧 24 V の場合に流れる電流）を流すためには AWG2 相当の線が必要になり、制御盤の奥行方向が 181 mm 必要となってしまふ。そこで、曲げ R を減らすためには線径の小さい線で複数配線することが考えられる。85 A を 2 本の配線で流す場合、AWG6 を使うことになり、制御盤の奥行方向は 164.5 mm とすることができ、AWG2 を使った場合に比べ 10% 制御盤の体積を削減できる。

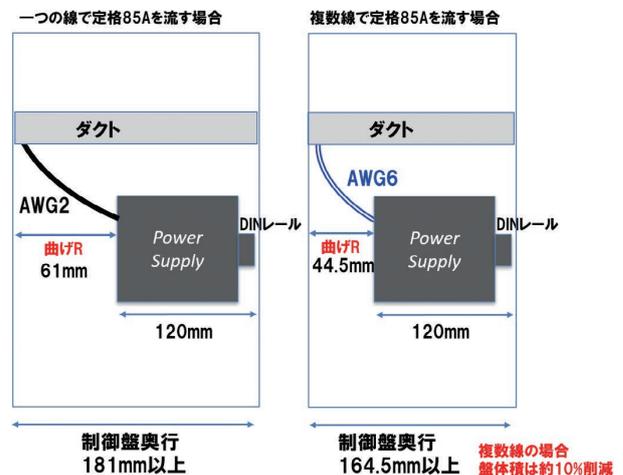


図 6 線径の大きい線（AWG2）を使った場合と線径の小さい線（AWG6）を使った場合の制御盤奥行

ただし、図 7 に示す通り、異常時に対する安全設計として、断線時の電流集中や短絡電流を考慮して使用線径を決定する必要があるため、線径が大きい線を採用せざるを得ないという問題がある。

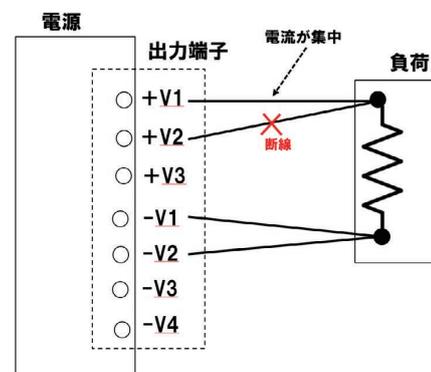


図 7 複数配線で断線が起こった場合の電流集中

こういった問題に対応するために、異常時でも配線焼損等の事故が起きないように電流制限する技術が課題となる。

3. 解決する技術

3.1 電流バランス技術

3.1.1 高効率回路で電流分散をさせる回路方式

2.1 節の課題を解決し小型高効率を実現するためには、トランスやパワーデバイスを複数に分けて電流分散しつつ、各素子に流れる電流を均一にする技術が必要となる。一次側 MOSEFT のゼロ電圧スイッチングによる低損失を維持しつつ、電流を分散させることでトランスや半導体素子に流れる電流を減らす方策について、その代表的なものを比較して表 1 に示す。

表 1 高効率回路で電流を分散させる回路案とその長所・短所

回路方式	長所	短所
・フルブリッジ型 LLC コンバータ	・トランス一次側の電流は LLC コンバータの 1/2。	・トランスの一次側巻き数は LLC コンバータの 2 倍必要。 ・トランス二次側には LLC コンバータ同様の電流が流れるため、大容量で使用する際の電流ストレスの問題が二次側素子（トランス二次側巻き線、半導体）において残る。
・ LLC コンバータ並列化 ・ 3 相 インタリーブ LLC コンバータ	・電流を複数素子に分散させることができるのでトランス、デバイスへの大電流ストレスを軽減でき、高効率化が可能。 ・インタリーブ方式の場合、二次側のリップル電流を小さくでき、出力電解コンの数を減らせる。	・各相トランスや共振 C にバラツキが発生した場合に電流バランスが崩れる。電流バランスを良くするためには複雑な回路の追加が必要となる。
・一次直列二次並列型 LLC コンバータ	・電流を複数素子に分散させることができるのでトランス、デバイスへの大電流ストレスを軽減でき、高効率化が可能。 ・部品バラツキがあっても各トランスの電流バランスが良好。	・インタリーブ LLC コンバータと比較すると出力平滑 C のリップル電流を小さくできないため、LLC コンバータ同様の出力電解コンの数が必要。

今回大容量 2 kW の設計にあたり、フルブリッジ型 LLC コンバータでは二次側の電流ストレスに課題が残る。また LLC コンバータの並列化やインタリーブ LLC コンバータの場合、電流ストレスの軽減はできるものの、各相の共振コンデンサがばらついた際の電流バランスが課題となり追加のアクティブカレントシェア回路などが必要となる¹⁾。よって、これら二つの方式は今回の大容量電源で効率・信頼性を確保するのに適さない。

その他の方法として、LLC コンバータに使用するトランスを複数に分け、これらの結線について、一次側を直列、二次側を並列に接続する方法がある²⁾。一次巻き線や二次巻き線を直列または並列に接続した構成のトランスは Matrix Transformer として知られているが、本稿では、本構成を“一次直列二次並列型 LLC コンバータ”と記載している。一次直列二次並列型 LLC コンバータでは一次側のトランス巻き線が直列であるため、各トランスの二次側巻き線に流れる電流バランスが良好となる³⁾。大電流を複数素子に分散させた回路で部品バラツキがある場合でも、各素子に流れる電流を均一にできる利点が大いことから、今回の大容量電源を開発するにあたって、この方式を採用する。

ここで、設計の際に重要となるのは以下二点となる。一次直列二次並列型 LLC コンバータのこれらの点は今回参考にした文献では述べられておらず、本稿で明確にする。

一つ目は周波数—ゲイン特性および共振周波数の算出である。

周波数—ゲイン特性は効率や出力電圧の可変範囲に大きく関わる。図 8 は LLC コンバータでの周波数—ゲイン特性の一例を示している。ただし、LLC コンバータではスイッチング周波数を変化させることで出力電圧を制御していることから、縦軸はゲインではなく、出力電圧 V_o ($V_o = 1/2 \times \text{入力電圧} \times \text{ゲイン}$) に変換してある。

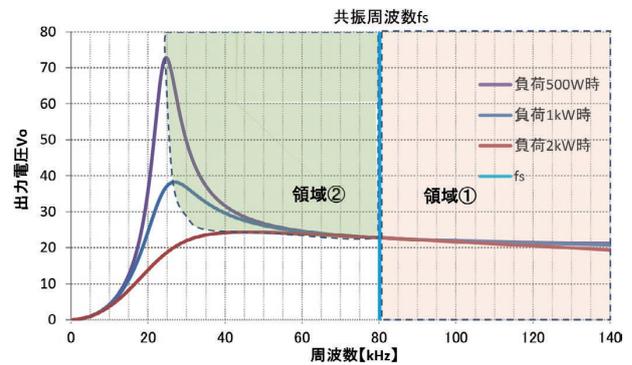


図 8 LLC コンバータの周波数—ゲイン特性

また図に縦線で示すのは共振周波数 (f_s) であり、この周波数より高い周波数で動作させるか低い周波数で動作させるかにより、LLC コンバータの動作モードが変化する

る。領域①で動作させる場合、一次側 MOSFET のスイッチング損失が増加し、電源の効率に影響を及ぼす⁴⁾。またスイッチング周波数を大きく変動させても出力電圧の変化量が小さいため、出力電圧を可変させる電源において、商品仕様を満足できなくなる場合がある。

領域②で動作させる場合は、周波数が低いほど一次側電流が大きくなることにより、導通損失が増加する⁴⁾。

これらの要件を考慮するため、一次直列二次並列型 LLC コンバータにおける周波数-ゲイン特性、および共振周波数を算出する。

二つ目は電流バランスに対する各部品のバラツキの影響確認である。

一次直列二次並列型 LLC コンバータでは、トランスを複数使い、素子に流れる電流を分散する。それらトランスの各パラメータにバラツキがあった場合に、この電流バランスへ与える影響の大きさを確認する必要がある。その上で、各素子に流れる電流バランスについて、5%程度を狙うためのトランスの各パラメータの許容範囲を求め、最適なトランスをカスタマイズ設計する。ここで5%は電源回路の電流バランスを設計する際の当社の設計基準である。

3.1.2 一次直列二次並列型 LLC コンバータの周波数-ゲイン特性

一次直列二次並列型 LLC コンバータを検討するにあたり、基本波近似法 (FHA) を用いて周波数-ゲイン特性についての関係式ゲイン M、共振周波数 f_s を導出する。

図9はこの方式の回路図となる。T1, T2 はトランスである。

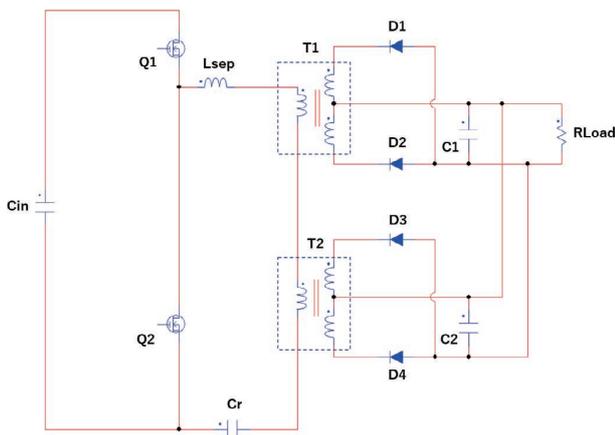


図9 一次直列二次並列型 LLC コンバータ

次に FHA でゲインを計算するために図9を変換した等価回路を図10に示す。

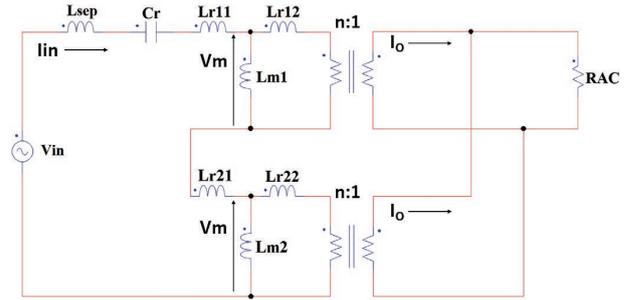


図10 FHAによるゲイン計算に用いた一次直列二次並列型 LLC コンバータの等価回路

ここで図の各記号はそれぞれ以下を表している。

Lr1, Lr21: トランス T1, T2 の一次側漏れインダクタンス

Lr12, Lr22: トランス T1, T2 の二次側漏れインダクタンス

Lm1, Lm2: トランス T1, T2 の励磁インダクタンス

Cr: 共振コンデンサ

Lsep: 共振用インダクタンス

また R_{AC} は以下式により出力負荷抵抗 R_{LOAD} を交流出力抵抗に変換したものである。

$$R_{AC} = \frac{8R_{LOAD}}{\pi^2} \quad (2)$$

この等価回路においてゲイン M を計算する。簡易化のため各パラメータは以下のようにした。

$$L_{r11} = L_{r12} = L_{r21} = L_{r22} = L_r \quad (3)$$

$$L_{m1} = L_{m2} = L_m \quad (4)$$

R_{AC} 発生電圧を V_o とし、 $M = V_o/V_{in}$ を算出する。

等価回路より以下の回路方程式が得られる。

$$V_{in} = \left(j\omega L_{sep} + \frac{1}{j\omega C_r} + 2j\omega L_r \right) \cdot I_{in} + 2V_m \quad (5)$$

$$\frac{I_o}{n} = \frac{V_m - nV_o}{j\omega L_r} \quad (6)$$

$$V_m = j\omega L_m \left(I_{in} - \frac{I_o}{n} \right) \quad (7)$$

$$I_o = \frac{V_o}{2R_{AC}} \quad (8)$$

上式より、ゲイン M を算出すると、

$$M = \frac{\frac{1}{n} \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2}{\sqrt{\left(\left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^2 - 1 \right)^2 + \left(\frac{Z_s}{2R_{AC}} \cdot \frac{\omega}{\omega_s} \right)^2 \cdot \left(\left(\frac{\omega}{\omega_r} \right)^2 - 1 \right)^2}} \quad (9)$$

と得られる。ただし

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{C_r(L_{sep} + 2L_r + 2L_m)}} \quad (10)$$

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{C_r \left(L_{sep} + \frac{2L_r(L_r + 2L_m)}{L_r + L_m} \right)}} \quad (11)$$

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{C_r L_m}} \quad (12)$$

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{C_r L_{ms}}} \quad (13)$$

$$L_{ms} = \frac{L_r + L_m}{n^2} \quad (14)$$

$$Z_s = \sqrt{\frac{L_{ms}}{C_r}} \quad (15)$$

であり、共振周波数 f_s は以下となる。

$$f_s = \frac{\omega_r}{2\pi} \quad (16)$$

図9において C_{in} に印加されている直流電圧を V_{inDC} とすると出力電圧 V_o は導出したゲイン M を使い、以下式で表される。

$$V_o = \frac{V_{inDC}}{2} \cdot M \quad (17)$$

解析結果の妥当性を検証するために、シミュレーション結果との比較を図11に示す。回路シミュレーションにはSCALE（株式会社スマートエナジー研究所）を使用した。図11より、解析とシミュレーション結果は概ね一致しており、一次直列二次並列型 LLC コンバータの設計には十分な精度を有していることがわかる。

今回、以下のパラメータを利用し確認した。

$V_{inDC} = 390 \text{ V}$, $L_{sep} = 1 \text{ uH}$, $L_m = 39.7 \text{ uH}$, $C_r = 376 \text{ nF}$, $R_{LOAD} = 282 \text{ m}\Omega$

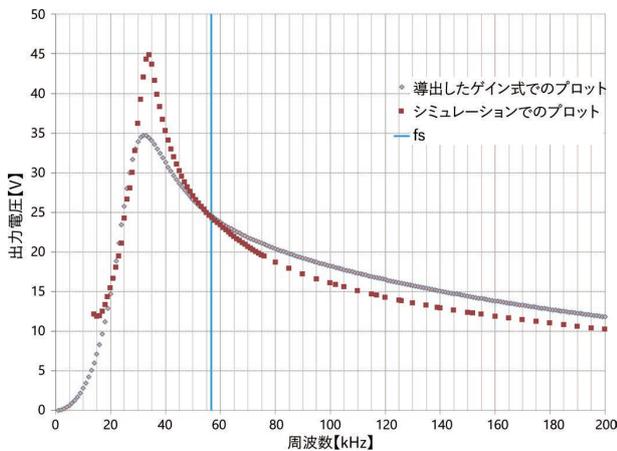


図11 計算した M を用いてプロットしたゲイン特性と回路シミュレーションを用いてプロットしたゲイン特性の比較

3.1.3 電流バランスの検証

一次直列二次並列型 LLC コンバータにおいて、共振インダクタを外付けにするかトランスの内蔵漏れインダクタンスを使用するかが重要になるが、製品のサイズを考慮し、今回はトランス内蔵漏れインダクタンスを共振インダクタとした。その際、電流バランスを確保するにはインダクタンス、およびトランス内蔵漏れインダクタンスの許容差が重要になるため、その許容差を求める。

実際にトランスパラメータの L_p (一次側インダクタンス) と LLK (トランス内蔵漏れインダクタンス) のバラツキが、電流バランスに与える影響を検証した。ここで L_p , LLK の L_r , L_m との関係は以下になっている。

$$L_p = L_m + L_r \quad (18)$$

$$LLK = L_p \left(1 - \left(\frac{L_m}{L_p} \right)^2 \right) \quad (19)$$

$L_p = 33 \text{ uH}$ (Typ), $LLK = 7.2 \text{ uH}$ (Typ) として図12の回路シミュレーションにてバラツキを与えた場合の実効電流を確認した。図12に示す R_{sense1} , R_{sense2} の実効電流波形を取得し、その実効電流を表2にて比較している。

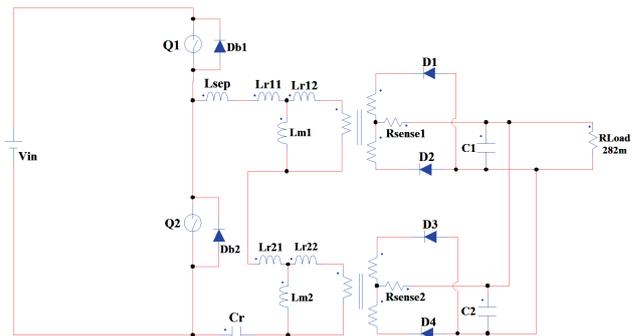


図12 回路シミュレーション

表2において、ケースAはバラツキがない場合の R_{sense1} , R_{sense2} の実効電流、ケースB1, B2やC1, C2はバラツキがあった場合の実効電流となっている。それぞれ $\pm 10\%$ 変動させたときはケースC1、 $\pm 20\%$ 変動させたときはケースC2の電流バランスが最も崩れる条件であった。

検討結果より、トランスの L_p , L_r はそれぞれ $\pm 20\%$ のずれがあると実際にトランスに流れる電流は $+15\%$ も増加し、許容することができないが、 $\pm 10\%$ 以下で管理することができれば実際にトランスに流れる電流は増加しても $+5.5\%$ 程度で収まり、問題ないレベルにできることが分かった。

以上により、電流バランスの要件を満たすための L_p , LLK の許容差要件が分かった。

実際にシミュレーションの確からしさを確認する目的で、表3のバラツキのあるトランスを準備し、実機にて電流波形を取得したものを図13、今回の実験と同様の条件でシミュレーションしたものを図14に示す。絶対値にず

表 2 パラメータバラツキ時の二次側実効電流

トランス	項目	ケース A パラメータ同じ	ケース B1 Lp ± 10% LLK ± 10%	ケース B2 Lp ± 20% LLK ± 20%	ケース C1 Lp ± 10% LLK ± 10%	ケース C2 Lp ± 20% LLK ± 20%
トランス①	Lp	TYP	+10%	+20%	-10%	-20%
	LLK	TYP	+10%	+20%	+10%	+20%
	I (Rsense1)	47.6 Arms	48.29 Arms	49.92 Arms	44.74 Arms	42.09 Arms
	バランス時 (ケース A) に対しての実効電流の増加率		1.45%	4.87%	-6.01%	-11.58%
トランス②	Lp	TYP	-10%	-20%	+10%	+20%
	LLK	TYP	-10%	-20%	-10%	-20%
	I (Rsense2)	47.6 Arms	46.31 Arms	44.94 Arms	50.19 Arms	54.8 Arms
	バランス時 (ケース A) に対しての実効電流の増加率		-2.71%	-5.59%	5.44%	15.13%

これはあるものの二つのトランスに流れる電流の差などはシミュレーションと実機で一致していることが分かり、上記のシミュレーションでの検討が妥当であるといえる。

表 3 実機検証に使用したトランスのバラツキ

トランス	項目	バラツキ
トランス①	Lp	-8%
	LLK	+5%
トランス②	Lp	+7%
	LLK	-7%

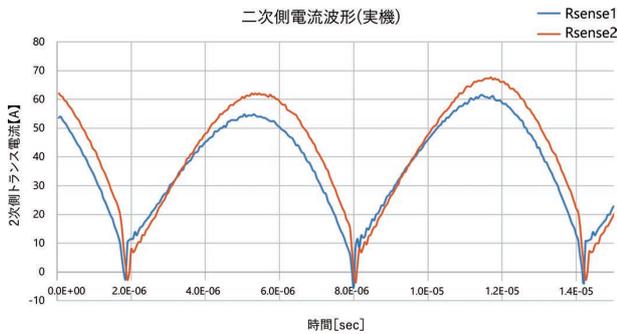


図 13 実機にて測定した二次側電流波形

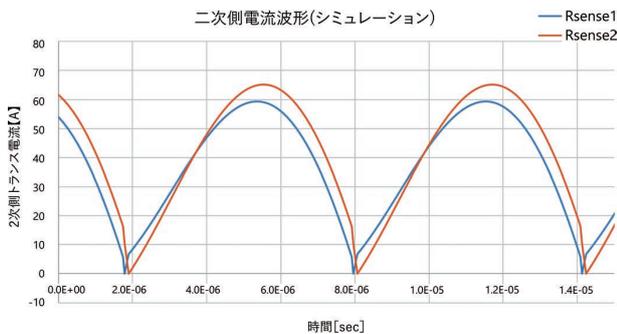


図 14 シミュレーションによる二次側電流波形

3.1.4 一次直列二次並列型 LLC コンバータによる損失改善効果の確認

高効率回路方式の採用、電流経路分散させ、トランス、半導体の電流ストレスを軽減させたことにより、DCDC コンバータ部の効率が上昇し、製品としての効率は図 15 に示すように 95.4% を達成することができた。これは、当社の従来の大容量機種 1500 W の効率が 88.7% であったことに対し、大きく上昇させることができています。

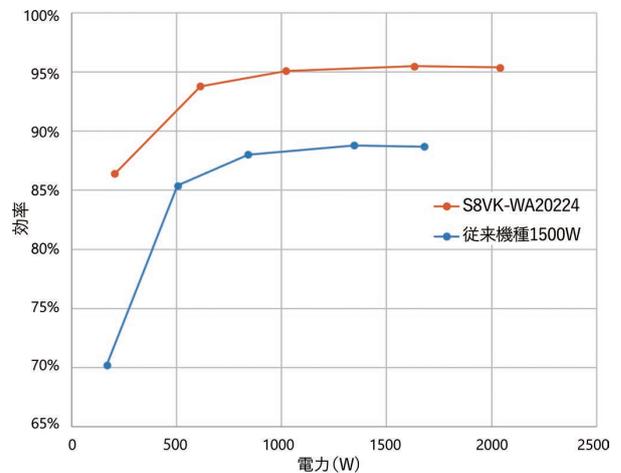


図 15 S8VK-WA20224 と従来機種 1500 W との効率比較 (Vin = 200 VAC)

3.2 磁気シミュレーションによる損失の算出

熱シミュレーションでの放熱構造検討にあたり各素子の損失を算出する。

トランスなどの大型磁性部品では前述したように、机上計算でその損失を正確に見積もるのは困難であるため、磁気シミュレーションにより損失を算出した。図 16 にシミュレーション結果を示す。磁気シミュレーションには JMAG (株式会社 JSOL) を使用した。

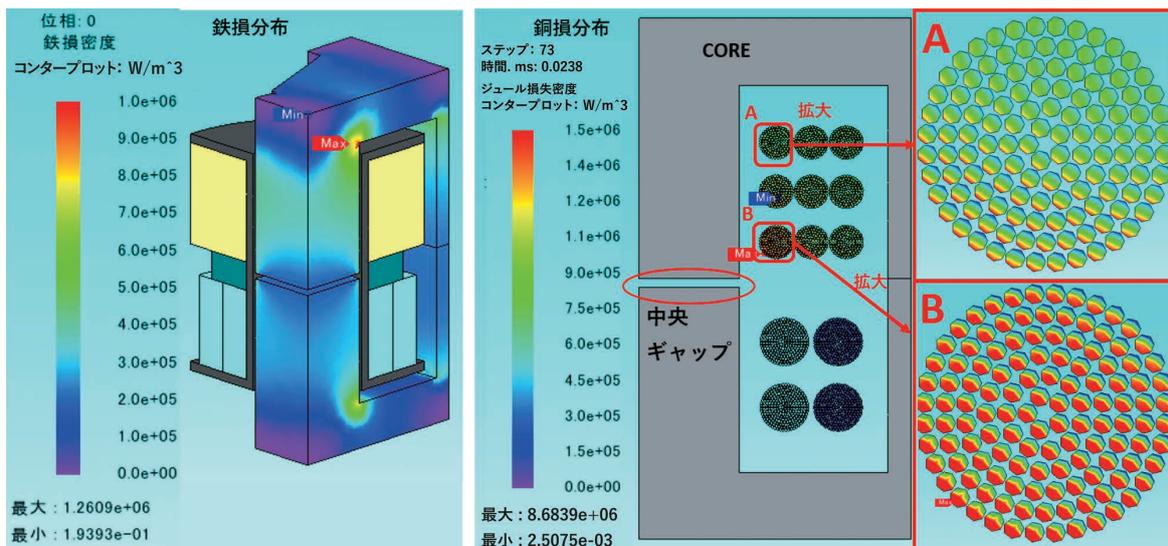


図 16 磁気シミュレーションによる損失の確認

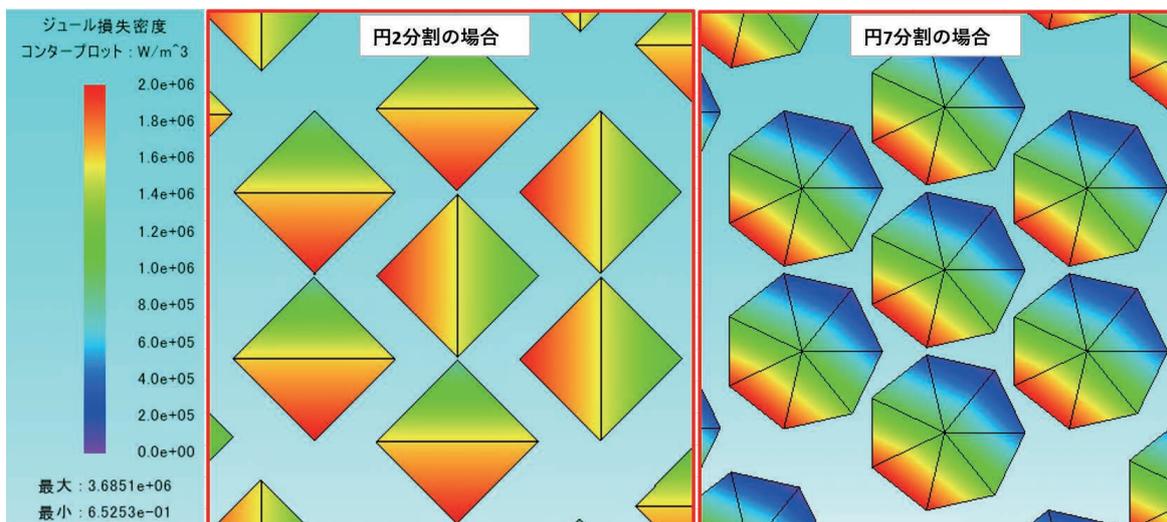


図 17 メッシュサイズの違いによる損失分布の比較

このとき、磁気シミュレーションによる損失の精度を向上させるために以下のような点に留意した。

- ①図 16 で示すようにコアの中央ギャップ付近の巻き線（図中の B の巻き線）の損失が大きく、そこから離れた場所の巻き線（図中の A の巻き線）の損失は小さくなっており、中央ギャップからの漏れ磁束により発生する渦電流損の影響がシミュレーションにおいても現れていることが分かる。渦電流損の精度向上のため、シミュレーションモデル構築の際、コアの中央ギャップと巻き線の位置関係をできるだけ実際のトランスに近くなるようにした。
- ②近接効果・表皮効果の影響の再現には巻き線の素線やコアギャップ付近のメッシュサイズが重要となってくる。具体的には図 17 に示すように、素線付近のメ

ッシュサイズは円 2 分割の場合では素線の損失分布において近接効果の影響が十分に反映されていないのに対し、円を 7 分割した場合には近接効果の影響がシミュレーションで確認でき、損失算出の精度が向上していることが分かる。なお表皮効果については使用線径が 0.1 mm と十分小さく、その影響がシミュレーションでも現れていない。ただしメッシュサイズを細かくしすぎるとシミュレーションに要する時間が増えるため、必要な精度が得る最低限のメッシュサイズを損失分布によって確認しながら、シミュレーションのスピードと精度が両立するようにしている。今回の場合は円 7 分割で実施した。

表 4 のように、机上計算により算出した損失を元に導出した温度では実測の温度と差異があったが、磁気シミュ

レーションにより算出した損失を熱シミュレーションで利用した場合には実測との温度差を減らすことができた。熱シミュレーションには Ansys Icepak (ANSYS社) を使用している。

表4 机上計算、磁気シミュレーションによる損失とそのときのトランス温度比較

項目	損失	温度
机上計算	6.81 W	115.5°C (熱シミュレーション)
磁気シミュレーション	8.81 W	130°C (熱シミュレーション)
実測		127.5°C (実測)

これにより最適な放熱構造を熱シミュレーションで検討することができ、自然空冷と小型化を両立することができた。

3.3 端子台過電流保護機能による異常時の安全確保

2.3節で示した電流集中の解決策について、図18を用いて説明する。2 kWの容量の電源では、負荷に約85 A以上の電流を流す能力がある。今回電源の負荷線を接続する端子台ごとに電流検出回路を搭載し、45 A以上の電流を検出すると保護回路により出力電圧を低下させ、電流を制限する機能(端子台過電流保護)を追加した。これにより一つの線が断線した場合、従来であれば意図しない大電流(85 A)が例えば許容電流45 Aの配線に流れていたが、今回上記機能により最大電流を45 Aに制限することで、線径の小さい配線を使用した場合の焼損するリスクを回避することが可能となった。

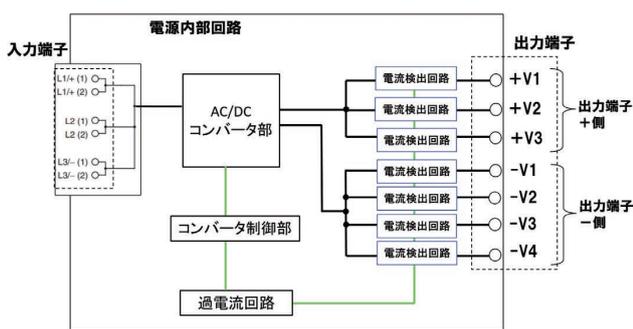


図18 端子台過電流保護機能

しかしこの端子台過電流保護機能の実現にあたり、各端子台において制限したい電流が仕様(目標値)からずれる問題があった。表5に具体例を示す。端子台-V2の制限電流値が、他の端子台(表5の場合は端子台-V1)に電流が流れることで、変化する現象が発生していた。

表5 端子台過電流保護制限電流値のずれ

端子台-V1に流れる電流	端子台-V2の制限電流値	目標値45 Aとのずれ
0 A	45 A	無し
20 A	44.4 A	-0.6 A
40 A	43.8 A	-1.2 A

この発生メカニズムを図19を使って説明する。図19は端子台過電流保護の出力端子の一方(-V1~-V4)に搭載している回路である。なお簡略化のために端子台は2極(-V1, -V2)の場合で記載している。Rs1, Rs2は電流検出抵抗、ra, rb, rcはパターンによる抵抗成分を示している。

-V2端子を例にすると通常端子台過電流保護は電流が流れることで検出抵抗に発生した電圧($V_{s2} = R_{s2} \times I_2$)を検出し、比較電圧(オペアンプのV-の電圧)よりも大きくなった場合に制御側に過電流信号を送る回路となっている。しかし端子台-V2の制限電流は端子台-V1に流れる電流(I_1)の大きさによって変化してしまう。この原因は検出抵抗までの共通インピーダンスraによるものである。-V2端子の制限電流は、以下式で表されるようにI1の影響を受けることが分かる。

$$\text{制限電流 (-V2端子)} = \frac{V_{V-(U2)}}{r_a + r_c + R_{s2}} - \frac{r_a I_1}{r_a + r_c + R_{s2}} \quad (20)$$

この共通インピーダンスraを小さくすることは、検出抵抗の部品配置やパターンの工夫で可能だが完全にゼロにすることは難しい。

そこでこの問題を解決するために図20のように検出抵抗Rs1, Rs2付近からそれぞれ個別に比較基準電圧を作った。これにより他の端子に電流が流れているかどうかにかかわらず制限電流を一定にすることができた。これにより、十分実用的な端子台過電流保護機能が実現した。

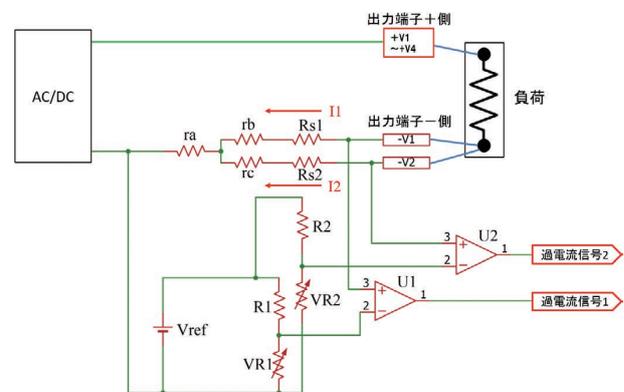


図19 端子台過電流保護の詳細回路(改善前)

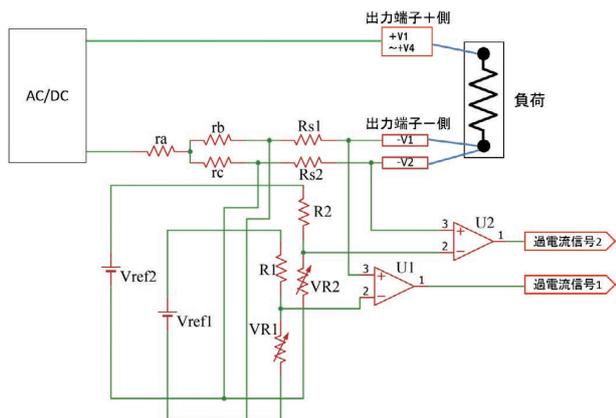


図 20 端子台過電流保護の詳細回路 (改善後)

4. むすび

制御盤の小型化に貢献し、GHGを低減できる大容量電源を実現する技術について検討した。

- 流れる電流を複数素子に分散させて損失を低減できる一次直列二次並列型 LLC コンバータを採用することで、大容量電源の高効率化を実現した。設計にあたり本稿ではこの回路方式のゲイン特性を明確にし、コンバータの各素子の電流バランスについて 5%程度を狙うための各パラメータの許容範囲を求めた。これにより 2 kW 電源 (形 S8VK-WA20224) において 95.4%の効率を達成、従来の 1.5 kW 電源の効率 88.7%より大幅に向上させ、サイズについては 17%の小型化に成功した。
- 磁気シミュレーションによりトランスなどの大型磁性部品の損失を正確に算出し、熱シミュレーションの精度を向上させた。この磁気シミュレーションを併用した熱シミュレーションによって最適な放熱構造を実現し、大容量電源の小型化と自然空冷とを両立させることができた。
- 負荷線を接続する端子台ごとに電流検出回路を搭載し、電流を制限する機能 (端子台過電流保護機能) を追加した。この機能により使用する配線の線径を小さくでき、制御盤のサイズを 10%減らすことができた。

これら技術により、超小型、低損失の 2 kW の電源を開発し、サプライチェーン排出量における「製品の使用」(Scope3 Category11)での GHG 排出量を従来製品比で 63% (CO₂ 排出量 FROM : 286 kg/年 TO : 106 kg/年) まで削減できた。

市場ではさらに 3 kW, 4 kW といった大容量電源が求められている。そのような大容量電源に対応するためトランスの数をさらに増やした一次直列二次並列型 LLC コンバータのバリエーションも考えられ、容量ごとに小型と高効率を実現できる最適なトランスの数とそのサイズ、コンバータの設計パラメータについて今後追及していく。

参考文献

- 1) E. Orietti, P. Mattavelli, G. Spiazzi, C. Adragna, and G. Gattavari, "Current sharing in three-phase LLC interleaved resonant converter," in *2009 IEEE Energy Convers. Congr. Expo.* 2009, pp. 1145-1152.
- 2) D. Huang, S. Ji, and F. C. Lee, "LLC resonant converter with matrix transformer," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 8, pp. 4339-4347, Aug. 2014.
- 3) J. Yuyang, R. Xinbo, D. Renxi, and X. Ye, "A DCX-LLC Resonant Converter with High Input-Output Voltage Ratio Based on an Integrated Matrix Transformer," in *IEEE Conf. Proc.*, 2022, vol. 2022, no. IECON, pp. 1-5.
- 4) Infineon Technologies. *Resonant LLC Converter: Operation and Design*. V1.0. (2012). Accessed: Oct. 1, 2023. [Online]. Available: https://www.infineon.com/dgdl/Application_Note_Resonant+LLC+Converter+Operation+and+Design_Infineon.pdf?fileId=db3a30433a047ba0013a4a60e3be64a1

執筆者紹介



谷野 光平 TANINO Kohei

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 コンポ事業部
第 1 開発部
専門：電気工学



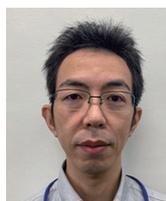
長野 昌明 NAGANO Masaaki

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 コンポ事業部
第 1 開発部
専門：電気工学



渡邊 智紀 WATANABE Tomonori

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 コンポ事業部
第 1 開発部
専門：電気工学



鶴口 祐規 TSURUGUCHI Yuki

インダストリアルオートメーションビジネス カンパニー
商品事業本部 コンポ事業部
第 1 開発部
専門：電気工学

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

必要最小限の貴金属でデバイス性能を実現する部分めっき技術の確立

立石 圭一郎

オムロンではカーボンニュートラル・デジタル化社会の実現に向けて、デバイスとモジュールの提供を通して再生可能エネルギー機器・高速通信機器の普及へ貢献していくことに挑戦し続けている。これらのデバイス性能を実現する為には、高度な商品設計技術と製造工程で品質を作り込む生産技術が重要である。特に電気めっきは低コストで素材の表面を改質し、デバイス性能（接触信頼性、耐食性など）を実現する重要な要素技術である。屋外での接触信頼性が求められる太陽光発電用インバータの基板間接続に採用されている MIL コネクタの接触部には電気めっきによる金めっきを施している。

本稿では、環境負荷低減を目的に金使用量を削減するため、MIL コネクタの商品性能を実現する必要箇所のみ金めっき液を接触させる部分めっき技術を開発・量産化し、従来比1/3のめっき面積で従来同等の商品性能を実現したので、その内容を紹介する。

Establishment of Partial Plating Technology that Realizes Device Performance with the Minimum Necessary Precious Metals

TATEISHI Keiichiro

OMRON continues to take on the challenge of contributing to the spread of renewable energy equipment and high-speed communication equipment by providing devices and modules toward the realization of a carbon-neutral and digitalized society. In order to realize these device performances, advanced product design technology and production technology that incorporates quality in the manufacturing process are important. In particular, electroplating is an important technology that modifies the surface of materials at low cost and realizes device performance (contact reliability, corrosion resistance, etc.). The contact part of the MIL connector, which is used for the inter-board connection of solar power generation inverters that require outdoor contact reliability, is electroplated with gold plating.

In this paper, in order to reduce the amount of gold used for the purpose of reducing environmental impact, we developed and mass-produced a partial plating technology that contacts the gold plating solution only where it is necessary to realize the product performance of MIL connectors. Although the same product performance as the conventional has been achieved with a plating area of 1/3, we will introduce the details.

1. まえがき

オムロンではカーボンニュートラル・デジタル化社会の実現に向けて、デバイスとモジュールの提供を通して再生可能エネルギー機器・高速通信機器の普及へ貢献していくことに挑戦し続けている。これらのデバイス性能を実現する為には、高度な商品設計技術と製造工程で品質を作り込

む生産技術が重要である。特に電気めっきは低コストで素材の表面を改質しデバイス性能（接触信頼性、耐食性など）を実現する重要な要素技術であり、現在もグローバルで多く採用されている必要不可欠な表面処理技術である。

しかし、電気めっきは製造工程で化学薬品を使用する為、排水処理が必要である。さらに原材料には貴金属・レアメタルを使用する為、金属資源を鉱山から採取する際の環境破壊、選鉱や製錬に伴う CO2 排出もあり、環境負荷

Contact : TATEISHI Keiichiro keiichiro.tateishi@omron.com

が高い一面もある。

オムロンではこのような環境負荷を少しでも低減させるために2つの取り組みを行っている。

1つ目の化学薬品の処理に関しては、近年急速な発展を遂げた中国において、めっき排水に対する環境規制が年々厳しくなっており、オムロンの中国深圳工場では排水設備を改良し厳格化される排水基準に対応している。

2つ目の貴金属・レアメタルの使用に関しては、リレー、スイッチ、コネクタ等、電子部品の性能を満足する、めっき仕様（材質、膜厚、範囲）を明確にし、その必要箇所のみ、めっきを施すことで貴金属の使用量削減につなげる取り組みを推進中である。

事例として太陽光発電用インバータの基板間接続に採用されている MIL コネクタにおいては、屋外での接触信頼性が求められることから接触部に金めっきを使用しているが、商品性能上不要な箇所にも金が付着している。

本稿では、金めっき液を MIL コネクタプラグ端子の性能上必要な箇所のみ接触させ、必要最小限の金で接触信頼性を実現する部分めっき技術を開発し量産化したので、その内容と特徴を述べる。

2. 従来の部分めっき技術

2.1 一般的な部分めっきの現状と課題

めっき業界で一般的に採用されている部分めっきは、部分浸漬方式、ブラシめっき方式¹⁾等がある。

図1にブラシめっき方式の概要を示す。陽極を内蔵した多孔性物質にめっき液を吸収させ被めっき物と接触した箇所にめっきが施される。MIL コネクタのプラグ端子を事例に、一般的な部分めっき工法の現状と課題を記述する。多孔性物質と接触するプラグ端子面とその両側面にめっき液が接触する為、プラグ端子1ピンあたり3面に金めっきが施される。めっき液とプラグ端子の接触面積が安定しない事からめっき膜厚バラツキが大きくなり、またプラグ端子と接触する多孔性物質表面に金が析出するため、それを定期的に除去する必要があり量産性にも課題がある。

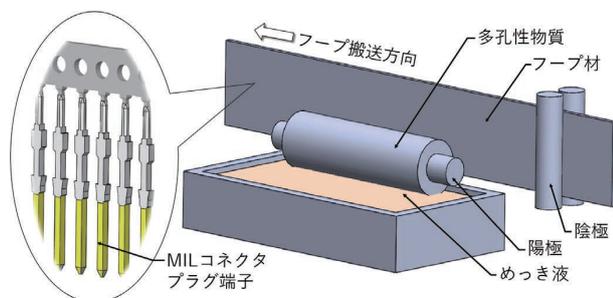


図1 ブラシめっき方式概要

このようにブラシめっき方式では、めっき範囲（原材料使用量）、品質（めっき膜厚精度）、量産性（装置メンテ頻度）のいずれにも課題があった。

2.2 オムロン従来方式部分めっきの現状と課題

オムロンでは2005年から横型ドラム方式による独自の部分めっき技術を開発し量産してきた。

図2にオムロンの従来の部分めっきシステム概要、図3に従来の部分めっき装置を示す。内部に電解液循環路を有する電解液循環部と被めっき物を搬送する被めっき物搬送部とを備えている。電解液循環装置内部に陽極を配置し、被めっき物との間に電解液を上から下方向へ循環させる構造となっており、被めっき物搬送部にプレス加工したフープ材を巻き付け搬送させることで連続めっき処理する。

図4に従来の部分めっき装置断面図を示す。陰極にあたる被めっき物（プラグ端子）と陽極との距離を一定にすると同時に、電解液中のイオン濃度を均一に保つことにより、プラグ端子のめっき面における電気量が均一となりめっき膜厚バラツキが小さく抑えられる。さらに、プラグ端子の電解印加部分に物理的に接触するのはめっき液のみであるので装置への金の異常析出が発生せず、装置のメンテ頻度は1週間以上を確保できた。これにより、MIL コネクタに要求される品質及び量産性の目標は達成できた。

しかし、この方式では商品性能上不要なプラグ端子両側面にも金めっきが施される為めっき使用量に課題が残った。電解液を循環させる際プラグ端子の電解液接触面とその両側面に電解液が接触する為プラグ端子の3面に金めっきが施される。フープの裏面をベルトで押さえ搬送しているため、ベルトに接している面は金めっきが施されない。

一般に電解反応によって金属の析出あるいは溶解が起るとき、その電気量と反応生成物との間にはファラデーの法則が成立する²⁾。

第1法則：電気分解において、陰極に析出あるいは陽極で溶融する金属の量は、その電気量に比例する。

第2法則：同一の電気量によって、析出あるいは溶解する金属の量は、それぞれの金属の電気化学当量に比例する。

電気めっきの場合、電解液（めっき液）を通して電気分解を行う為、商品性能上不要な箇所に電解液が存在すると金めっきが施されてしまう。

言い換えると部分めっきの安定量産には下記2条件を成立させる装置の開発が必要であった。

条件1：被めっき物の必要な箇所へ電解液を接触させる。

条件2：電解液中のイオン濃度を一定に保つ。

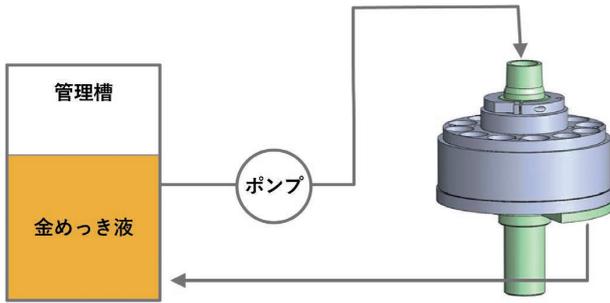


図2 オムロン従来の部分めっきシステム概要

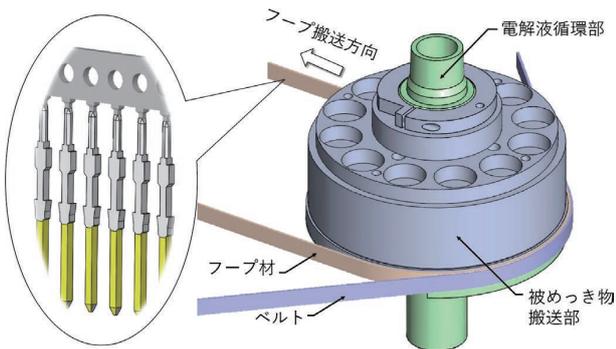


図3 オムロン従来の部分めっき装置

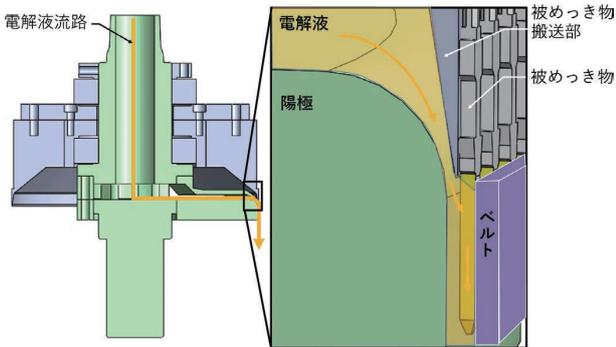


図4 オムロン従来の部分めっき装置 断面図

2.3 MIL コネクタにおけるめっきの現状と課題

MIL コネクタは、MIL 規格 (MIL-C-83503) に準拠したフラットケーブルを圧接結線してハーネスするタイプのコネクタであり MIL タイプのほかオリジナルのロック付きソケット、オリジナル簡易ロックなど、豊富なロックバリエーションを品揃えしており、屋外での接触信頼性が要求される太陽光発電用インバータの基板間接続にも採用されている。図5に MIL コネクタの外観を示す。

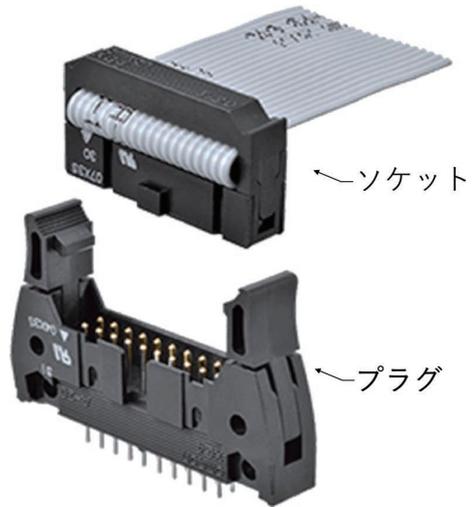


図5 MIL コネクタ外観

MIL コネクタはプラグとソケットで勘合しており、プラグとソケットの接触面は1面のみである。

商品性能上、金めっきが必要なのはプラグとソケットの接触面だけであるが、接触面以外のプラグ端子両側面にも無用の金めっきが施されている。従来めっき品での接触状態を図6に示す。

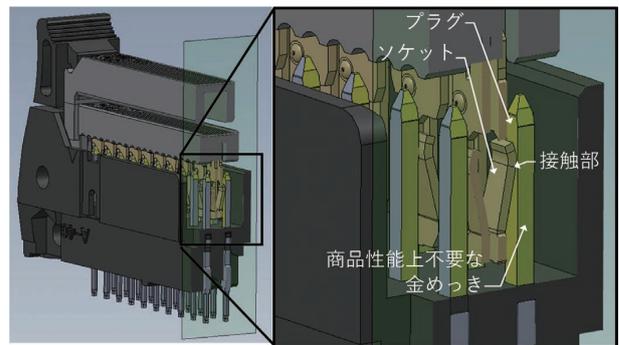


図6 従来めっき品での MIL コネクタ勘合状態

3. 新たに開発した部分めっき技術

3.1 開発した部分めっき技術

新たに開発した部分めっき技術は下記3つの装置で構成され、2.2項で記述した安定量産2条件を成立させた。図7に部分めっきシステム概要を示す。

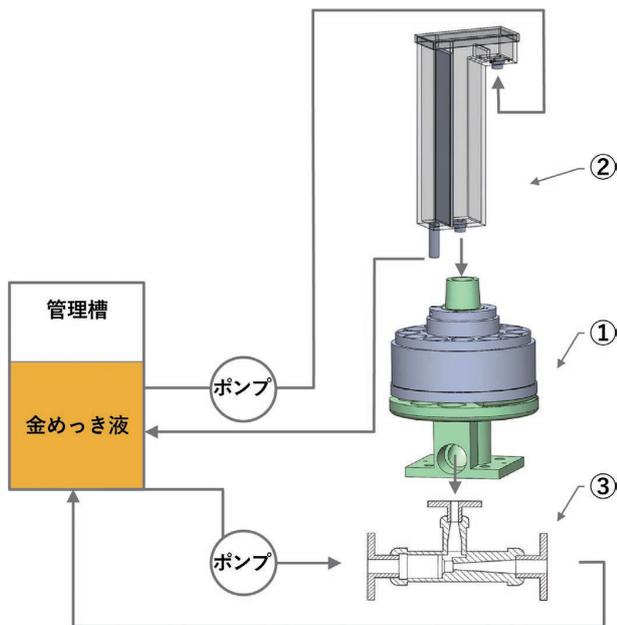


図7 開発した部分めっきシステム概要

- ①電解液循環及び被めっき物搬送装置
- ②定量電解液供給装置
- ③電解液吸引装置

次節で各装置の機能を説明する。

3.2 電解液循環及び被めっき物搬送装置

電解液循環及び被めっき物搬送装置は、被めっき物へ選択的に電解液を接触させながら被めっき物を搬送する機能を備える。内部に電解液循環路を有する電解液循環部と、被めっき物を搬送する被めっき物搬送部とを備えている。図8に装置の外観を示す。

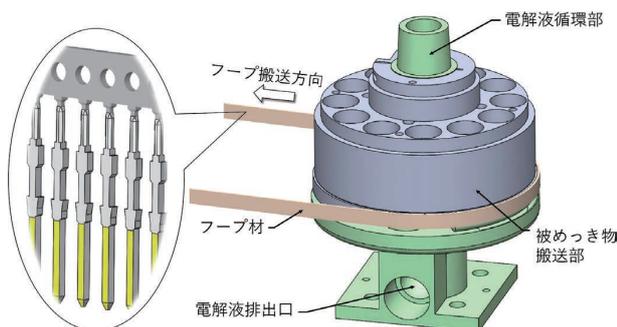


図8 電解液循環及び被めっき物搬送装置 外観

電解液循環部の外部に開放されるスリット状の窓部を有しており、被めっき物搬送部は被めっき物の1面におけるめっき領域を窓部に対応させながら被めっき物を搬送する。

この構造により、電解液を被めっき物の1面のみに接触

させ、かつ循環させることで電解液中のイオン濃度を一定に保ち部分めっきを施す事ができる。電解液循環路は、その一部に円弧状箇所を有しておりスリット状の窓部を通過した電解液は、被めっき物表面から法線方向に離れるように流れる。この現象をコアンダ効果と呼び、粘性流体の噴流が近くの壁に引き寄せられる効果のことを指す。図9に陽極、被めっき物 (MIL コネクタプラグ端子)、電解液の位置関係を示す。陽極のRに電解液が引き寄せられ、被めっき物の1面のみに電解液が接している事が分かる。

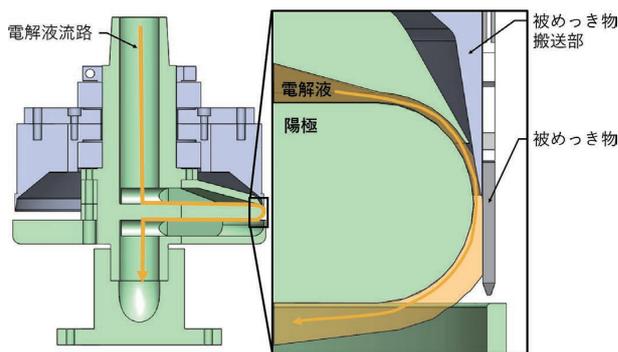


図9 電解液循環及び被めっき物搬送装置 断面図

3.3 定量電解液供給装置

定量電解液供給装置は、電解液中のイオン濃度を一定に保ち、装置①へ定量の電解液を供給する機能を備える。装置①の機能を満たすためには、電解液循環路体積 (A) と電解液供給量 (B) を等しくする必要がある。両者のバランスが崩れると下記不具合に繋がる。

- A < B : 不要箇所への金付着とめっき膜厚バラツキ発生
- A > B : 無めっきとめっき膜厚バラツキ発生

開発当初、流量センサによるフィードバック制御を検討したが、応答速度遅延による電解液供給量のバラツキに加えポンプの脈動を抑える事が出来なかった。またポンプアップ時に電解液中に巻き込まれる気泡がアノードと被めっき物との間に存在することによる無めっきのリスクも懸念された。これらのことを踏まえて、定量電解液供給装置に求められる機能を次の2つに定義した。

- (1) 機能1: ポンプの脈動と電解液中の気泡を抑制
- (2) 機能2: 電解液供給量を一定に制御

新たに開発した定量電解液供給装置の断面図を図10に示す。上記の各機能は以下の構造によってそれぞれ実現している。

(1) 構造 1：オーバーフロー構造

管理槽からポンプアップされた電解液は、①電解液供給口から②タンク 1 に供給されタンク 1 が満たされると③仕切り板 1 からオーバーフローし、④タンク 2 に供給される。タンク 2 が満たされると⑤仕切り板 2 からオーバーフローし、⑥電解液排出口 2 から管理槽へ戻される。2 回のオーバーフローでポンプの脈動を吸収し、タンク 1、2 の上面より電解液中の気泡を解放する。

(2) 構造 2：液面高さ・流路面積固定構造

⑦電解液排出口 1 から排出される電解液の流量 Q は次式より求められる³⁾。

$$Q = CA\sqrt{2gh}$$

Q ：流量 (m^3/s)

C ：流量係数

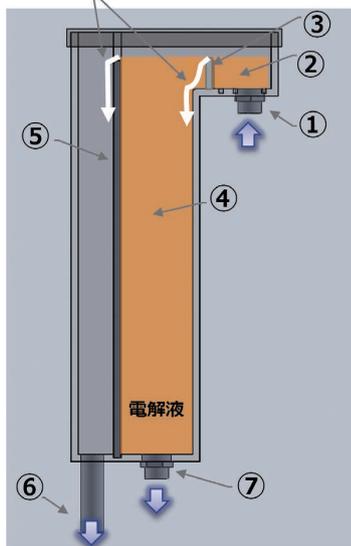
A ：流路面積 (m^2)

g ：重力加速度 (9.8 m/s^2)

h ：液面高さ (m)

上記式は、液面高さ h と流路面積 A を固定する事で、流量 Q を一定に制御できることを表す。構造 1 で説明したように電解液が循環することで⑤仕切り板 2 の高さで液面高さ h が固定できる。流路面積 A は、⑦電解液排出口 1 に設置されたバルブの開口量を調整し開口面積を固定できる。

オーバーフロー



- ① 電解液供給口
- ② タンク 1
- ③ 仕切り板 1
- ④ タンク 2
- ⑤ 仕切り板 2
- ⑥ 電解液排出口 2
- ⑦ 電解液排出口 1

図 10 定量電解液供給装置 断面図

3.4 電解液吸引装置

電解液吸引装置には市販の汎用型エジェクタを使用した。図 11 に電解液吸引装置の断面図を示す。A 部から C 部へ電解液を供給すると、B 部に吸引力が発生する構造と

なっている。B 部を電解液循環装置の電解液排出口（図 8 参照）へ接続する事で電解液を吸引しコアンダ効果を補助する効果がある。

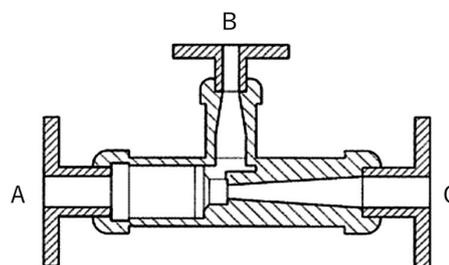


図 11 電解液吸引装置 断面図

4. 効果検証

4.1 検証結果

新たに開発した部分めっき技術で、MIL コネクタプラグ端子 1 ピンあたり、従来比 1/3 のめっき面積を実現し、商品性能上必要な箇所にのみ金めっきを施す事ができた。表 1 に改善前後の MIL コネクタプラグ端子めっき状態、図 12 に改善後めっき品での MIL コネクタ勘合状態を示す。プラグ端子両側面の金めっきが削減できている事が分かる。

改善後のプラグにおいても改善前と同等の接触信頼性を実現している。

表 1 改善前後の MIL コネクタプラグ端子めっき状態

めっき状態	A 面	B 面	C 面	D 面	金めっき
改善前					3 面
改善後					1 面

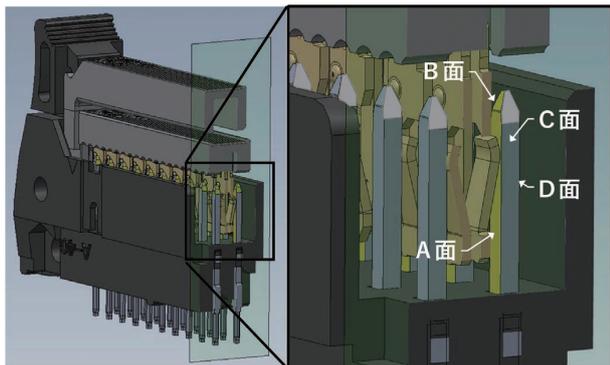


図 12 改善後めっき品での MIL コネクタ勘合状態

4.2 部分めっき工法毎の比較

MIL コネクタの要求項目に対する、各めっき方式の比較結果を表 2 に示す。新たに開発した部分めっき技術（オムロン新方式）は、原材料使用量（めっき面）、品質（めっき膜厚精度）、量産性（装置メンテ頻度）ともに開発目標を達成した。

表 2 MIL コネクタ要求項目に対する部分めっき実力比較

部分めっき方式	部分浸漬方式	ブラシめっき方式	オムロン従来方式	オムロン新方式
原材料使用量（めっき面）	×	△	△	○
品質（めっき膜厚精度）	×	×	○	○
量産性（装置メンテ頻度）	○	×	○	○

凡例

原材料使用量（めっき面）：○1面、△3面、×4面

品質（めっき膜厚精度）：○バラツキ小、×バラツキ大

量産性（装置メンテ頻度）：○1週間以上、×1週間未満

5. むすび

太陽光発電用インバータの基板間接続に採用されている MIL コネクタは、屋外での接触信頼性が求められることから接触部に金めっきを使用している。今回 MIL コネクタの接触信頼性を実現する上で、必要不可欠な金めっきの使用量削減に取り組み、従来比 1/3 のめっき面積で、従来同等の接触信頼性を実現し貴金属使用量削減による環境負荷低減に繋がった。

部分めっき技術で最終的に目指す姿は、任意形状の任意箇所だけに選択的にめっきができる状態であり、今後はその実現に向けて汎用技術開発を行いリレー・スイッチデバイスへ展開する。

また、オムロンのデバイスに搭載されるめっき部品はグ

ローバルのサプライヤで生産いただいております。今回開発した部分めっき技術をサプライヤの生産現場で活用いただくことで、貴金属の使用量を削減し環境負荷低減に貢献したい。

参考文献

- 1) 西村宜幸, 平松実, “コネクタにおける部分めっき技術,” 表面技術, vol. 68, no. 2, pp. 80-83, 2017.
- 2) 石原祥江, 加瀬敬年, 齊藤いほえ, 鈴木昭一, 矢部賢, 先端技術に対応するめっきの基礎. 槇書店, 1994.
- 3) 杉山弘, 松村昌典, 河合秀樹, 風間俊治, 明解入門流体力学. 森北出版, 2012.

執筆者紹介



立石 圭一郎 TATEISHI Keiichiro

デバイス&モジュールソリューションズカンパニー
生産統轄本部 生産技術センタ
生産システム設計部

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。

グローバルで活用するシステムの効率的な仕様改善に向けた、情報アーキテクチャモデリングの活用

高田 智史, 赤松 康至

オムロンのファクトリーオートメーション事業では、豊富な商品群と制御アルゴリズムを組み合わせ、顧客の製造現場課題へのソリューションを提供している。これをグローバルで横展開する技術ナレッジ共有システムを構築し開発と運用の連携（DevOps）を通じて小規模な改良を重ねている。今回、技術ナレッジの活用効率のさらなる向上のために、システムの再開発を企画する。

ユーザの声に耳を傾けつつも、ビジネスゴールや法令、データ品質など様々な要素のバランスを保ったシステム仕様はどのように導出すればよいか。グローバルでどのように合意すればよいか。その解法が情報アーキテクチャモデリングである。システム仕様の策定意図を端的に俯瞰的かつ多面的に表現できる6モデルを特定し、約30%の操作性向上と連鎖的なナレッジ参照を改善する新システムの構想をモデル表現した。モデルによってステークホルダの言語と知識量のハードルを下げてコンセプトの共通理解を確立し、そのうえでシステム仕様を策定し合意した。

Efficient Specification Improvement of a System Used Globally, by Utilization of Information Architecture Modeling

TAKADA Satoshi and AKAMATSU Yasuyuki

In OMRON's factory automation business, we provide solutions to address customer manufacturing issues by combining a rich product lineup and control algorithms. To expand this solution horizontally, we have built a technological knowledge sharing system have made small improvements through DevOps, a collaborative effort between development and operation, but we are redeveloping it to improve efficiency of technological knowledge use. How can we derive system specifications that balance various elements such as business goals, laws and regulations, and data quality while listening to the voices of users? How should we reach agreement globally? The solution is information architecture modeling. We identified 6 models that can express the intent of formulating system specifications in a simple, bird's-eye view, in multifaceted manner, and modeled the concept of a new system that improves operability by about 30% and improves chained knowledge reference. Using the model, we lowered the language and knowledge hurdles of the stakeholders, established a common understanding of the concept, and then formulated and agreed on the system specifications.

1. まえがき

顧客の製造現場課題へのソリューションには、制御、モーション、画像処理、AI、ロボティクスなど高度な技術を用いたアルゴリズム、商品あるいは複数商品を組み合わせた利用技術を必要とする。この利用技術をナレッジ化しグローバルの各拠点に展開するエンジニア間で共有することで、二重開発を防ぎ、豊富な知見を得ることでソリュー

ション提供の質および効率向上が可能となる¹⁾。

この技術ナレッジの蓄積と共有のために、グローバル技術ナレッジ共有システムを開発した。本システムの初期リリースは必要最小限の機能のみをサポートしたものであったが、DevOpsを通じて小規模なシステム改修を重ねている。技術ナレッジの登録と参照の数は増加している。

さらなる効率的な技術ナレッジの共有化¹⁾に向けて、大規模なシステム改修を企画する。ユーザおよび運用部門に対するインタビューから効率的活用に対する課題を抽出

Contact : TAKADA Satoshi satoshi.takada@omron.com

し、それを解決できる新システムのシステム仕様を策定する。一方、システム仕様はグローバルな各拠点の代表ユーザ（以下、拠点代表ユーザ）と整合して決定するが、言語の違いや知識量の格差から部分最適な議論になりやすく困難である。これに対し、情報アーキテクチャのモデリング技術を活用する。現行システムの分析と新システムの構想を、情報アーキテクチャのモデリングによって表現し、モデルを用いて拠点代表ユーザと共通理解を確立し、そのうえで全体最適なシステム仕様を整合する。

2. 課題

ユーザ及び運用部門に対するインタビューを実施し、様々な要望を収集した。これに対し、画面やロジックの局所的な対応では解決できない要望をスクリーニングした。本論文では、活用効率の観点から集約した2つの課題について説明する。

2.1 課題① 横断的な画面操作が多い

本システムは SharePoint Online を活用している。知的財産や輸出管理などの観点からグローバルの拠点ごとに独立したサイトを構築し、それぞれのサイトで技術ナレッジ種別ごとにライブラリを構成している。また、システム全体を管理するホームページも存在する。

本システムでは、SharePoint Online により提供されるライブラリ操作に標準的に用意された画面（以下、標準画面）と、SharePoint Framework を用いた独自開発の画面（以下、独自画面）を複合的に使用している。標準画面は開発コストが抑えられるが他サイトとの連携が容易でなく、独自画面は他サイトとの連携が容易であるが開発コストがかかる、といった特徴がある。また、標準画面と独自画面は拠点ごとのサイトとホームページに設置されている。

このように画面数が多いため、画面を横断した操作が必要であり、ユーザの操作が非効率である。

2.2 課題② 蓄積された技術ナレッジ間の関連性が低い

体系的な技術ナレッジの登録は、連鎖的な参照を可能とする。これを目的に技術ナレッジ間で関連を持たせられる。

ただし、自由に関連を持たせられるわけではなく一定のルールをもつ。例えば技術ナレッジ種別 Applications に属する技術ナレッジは、技術ナレッジ種別 Success Stories に属する技術ナレッジと関連を持つことができる。しかし、蓄積された技術ナレッジ間に正しい関連を持たせられていないケースが多いことが分かっている。

このような体系的でない技術ナレッジの蓄積は、その共有の効果が低くなり、ユーザによる活用が非効率である。

3. 対応策

ステークホルダにとって理解しやすいシステム構築のための分析と構想設計を行うため、情報アーキテクチャの技法に着眼した。

3.1 情報アーキテクチャ

文献^{2,3)}を参考に、本論文では情報アーキテクチャを次のとおりに表現する。

- ・情報アーキテクチャは、システムに内在する情報の構造である
- ・情報アーキテクチャは、システム仕様の策定意図となる
- ・情報アーキテクチャは、システムごとに異なる

情報アーキテクチャに求められる要素を表1に示す。これらの要素には相互依存性がある。対象システムによって何を重視すべきかあるいは何を制約とするかは異なるとしても、各要素のバランスを保った情報アーキテクチャを構築することが重要である。

表1 情報アーキテクチャに求められる要素

分類	分類に含まれる要素
コンテキスト	ビジネスゴール、財源、法令、政治、文化、コアコンピタンス、技術、資源、他
ユーザ	ニーズ、タスク、情報探索行動、エクスペリエンス、他
コンテンツ	データ、データタイプ、メタデータ、既存構造、他

3.2 情報アーキテクチャモデリング

情報アーキテクチャモデリングとは、情報アーキテクチャを端的に俯瞰的かつ多面的にモデルとして表現することである。ステークホルダの有効な意見はモデルにフィードバックでき、また特定の要素に偏った意見に対してモデルを用いて説明することができる。モデルはステークホルダとの共通理解の確立を可能とする。

3.2.1 アプローチ

構造化分析⁴⁾における現行物理・現行論理・将来論理・将来物理の概念を参考にアプローチした。これを図1に示す。

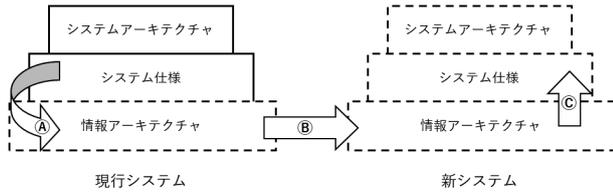


図1 本取組みにおけるアプローチ

現行システムの情報アーキテクチャが表現されていない現状に対し、システム仕様から内在する情報アーキテクチャをリバースモデリング (A) し、現行システムと比較可能なかたちで新システムの情報アーキテクチャをモデリング (B) し、これをもとにシステム仕様を策定 (C) する。

拠点代表ユーザとのシステム仕様整合の事前に、その策定意図にあたる情報アーキテクチャを用いて共通理解を確立しておく。

拠点代表ユーザには情報アーキテクチャが理解しにくいことを想定し、既に理解がある現行システムのシステム仕様に対するモデルから理解を促進し、そのうえで新システムのモデルを比較できるアプローチをとった。

3.2.2 モデルの特定

一般的なモデル種別にはサイトマップとワイヤフレームがある。ただし、表現すべきモデルの種別やその記法には画一的なルールはない。また、表1に示す各要素の違いにより対象システムごとに情報アーキテクチャは異なることから、モデルの種別と記法も対象システムごとに特定する必要がある。

本システムにおいても、まず表1に示す要素の観点から分析した。タスクや情報探索行動についてはログの分析、データや既存構造については蓄積データの分析、ビジネスゴールについてはビジネス変革の分析、ニーズやエクスペリエンスについてはインタビュー結果の分析などを実施し成果物を作成した。また、画面再設計のためのエリア分割定義や用語統一のリスト、その他様々な成果物も作成した。これらの成果物は全てモデルになり得るが、既に運用中である本システムの拠点代表ユーザにとって過度なモデル表現や開示は理解を妨げると考えた。そのうえで、これらの成果物を元に作成した6種類のモデルを、本システムにおいて表現すべきモデル種別として特定した。その記法も含めて表2に示す。

表2 モデル一覧

名称	説明	記法
ナレッジ関係図	システムにて取り扱うデータを中心となる技術ナレッジについて、技術ナレッジの種別とその関係を網羅的に表現する。	UMLのクラス図で表現する。(パッケージ:技術ナレッジ分類、クラス:技術ナレッジ種別、関連:技術ナレッジ種別間の関連)
タグ構造図	検索などフィルタリングに必要な技術ナレッジのタグについて、タグの種別とその関係を網羅的に表現する。	UMLのクラス図で表現する。(クラス:タグ種別と技術ナレッジ種別、関連:技術ナレッジ種別とタグ種別の関連)
配置図	技術ナレッジと画面・ロジックの配置を網羅的に表現する。	UMLの配置図で表現する。(ノード:ホームページ・拠点サイト、コンポーネント:画面・ロジック、アーティファクト:技術ナレッジ種別)
静的サイトマップ	画面・メニューと遷移の関係を網羅的に表現する。	UMLのクラス図で表現する。(パッケージ:画面分類・メニュー分類、クラス:画面・メニュー、関連:遷移)
ワイヤフレーム	静的サイトマップに現れる個々の画面について、代表的な画面のイメージを表現する。	画面をエリアに分割し、そこにUI部品を配置した簡易的な絵として表現する。
動的サイトマップ	代表的なシナリオを用いて、静的サイトマップ上で操作を表現する。これを用いて操作をシミュレーションする。	シナリオの文章表現と、静的サイトマップ上にそのシナリオを満たすための操作や画面遷移を矢印や番号などを用いて表現する。

技術ナレッジ種別とその関係をナレッジ関係図で表現し、個々の技術ナレッジに付与するタグをタグ構造図で表現した。知的財産や輸出管理などの観点により、拠点ごとに独立したサイトを構成することはシステムの制約であるため、これを配置図で表現した。画面と遷移を静的サイトマップで表現し、各画面構成をワイヤフレームで表現した。代表的なシナリオによるシミュレーションを動的サイトマップで表現した。

3.2.3 モデリングにおける留意点

各モデルはビデオ会議を想定して、PC ディスプレイ 1 枚で確認し議論できる程度に俯瞰して表現した。また、変更前後で比較しやすいように、モデル上で変化がないものは大きさや位置を変えないようにした。

モデルをグローバルで共通化するため、モデル上の言語は理解しやすい英語表現とした。

特に、モデルは対象となる情報を齟齬なくモデリングすることが重要である。複雑なモデル、例えば関連の線が多い場合でも、省略するのではなくモデル上の要素の配置や色分けを工夫して分かりやすく表現した。ただし、公開先によって冗長すぎるモデル表現がその理解を妨げると判断する場合は、齟齬がないことを前提とした簡易版のモデルを別途用意した。

3.2.4 モデリング結果

現行システムは分析を通じてありのままにモデリングした。可視化によって気づく曖昧さには再分析を実施して表現した。これに対し、表 1 の要素のバランスを鑑みつつ課題を解決できる新システムのモデルを表現した。

次に、課題①②に関係性の深い 2 種類のモデルについて論ずる。なお、本論文においても論旨に対して冗長とならない簡易版のモデルを掲載する。

(1) ナレッジ関係図

現行システムについてモデリングした結果を図 2 に示す。なお、図中の太線は Products と他技術ナレッジ種別の間、または Applications と他技術ナレッジ種別の間の関連を示す。ここでは、下記について表現した。

- ・技術ナレッジ種別 Applications と技術ナレッジ種別 Success Stories の従属関係が曖昧であること
- ・初期リリース時は必要と判断した技術ナレッジ種別 Companies は、他システムと二重管理であることが判明し暗黙的に使用されなくなったが、本システム上には残存したままであること

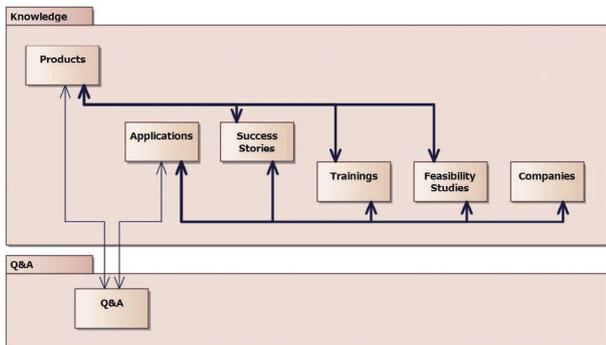


図 2 現行システムのナレッジ関係図

新システムについてモデリングした結果を図 3 に示す。ここでは、下記について表現した。

- ・技術ナレッジ種別を Primary Knowledge と Secondary Knowledge に分類し、技術ナレッジ種別 Applications には Success Stories をはじめとする技術ナレッジ種別が従属すること
- ・技術ナレッジ種別 Applications について、登録済の技術ナレッジを基底として別の技術ナレッジを登録するユースケースを考慮し、Applications 間の関連を設定可能にすること
- ・技術ナレッジ種別 Companies は、システム責務分割の観点から本システムでは正式に管理外とすること

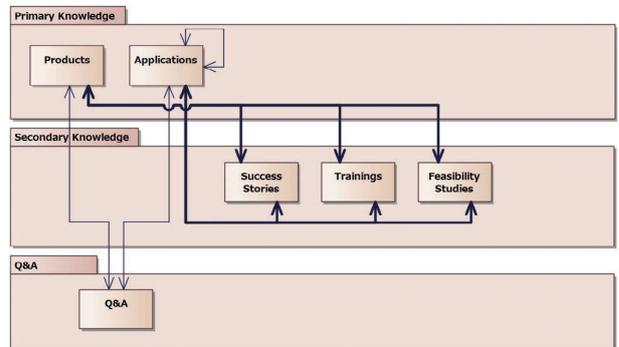


図 3 新システムのナレッジ関係図

(2) 静的サイトマップ

現行システムについてモデリングした結果を図 4 に示す。なお、図中の太線は Applications と他画面の間の遷移を示す。ここでは、下記について表現した。

- ・技術ナレッジ種別 Applications へのアクセスは、Navigation Menu の Industries からの導線となっていること
- ・標準画面（画面分類のうち SP から始まるもの）と独自画面の複合的な使用により、画面数が多く画面遷移が複雑であること

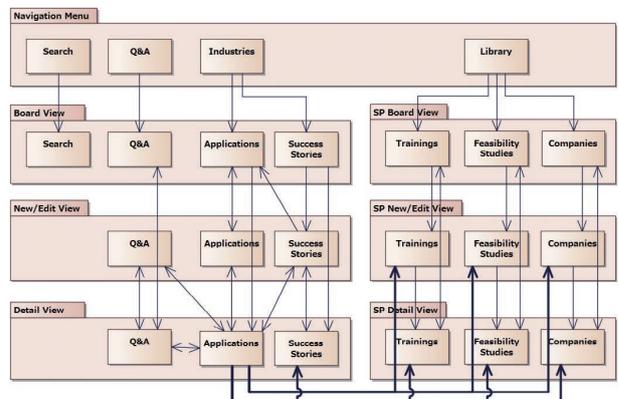


図 4 現行システムの静的サイトマップ

新システムについてモデリングした結果を図5に示す。ここでは、下記について表現した。

- ・技術ナレッジ種別 Applications を Navigation Menu に表示させること
- ・Secondary Knowledge へのアクセスは、Primary Knowledge からの導線とすること
- ・独自画面のみとすることで、画面数を少なくし画面遷移を単純にすること

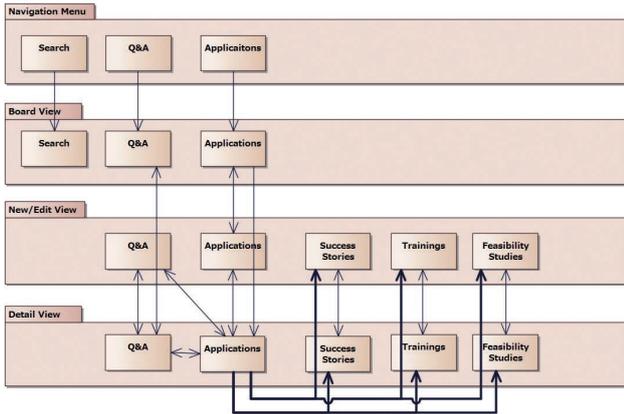


図5 新システムの静的サイトマップ

3.3 モデルのレビューとシステム仕様

拠点代表ユーザとモデルのレビューを繰り返し、共通理解を確立した。このモデルを根拠としてシステム仕様を策定するが、拠点代表ユーザにとってシステム仕様書の書面では理解しにくい。このため、拠点代表ユーザには開発したプロトタイプをレビュー対象とし、内部関係者と開発者にはシステム仕様書をレビュー対象とした。モデルとプロトタイプのリビューフローを図6に示す。

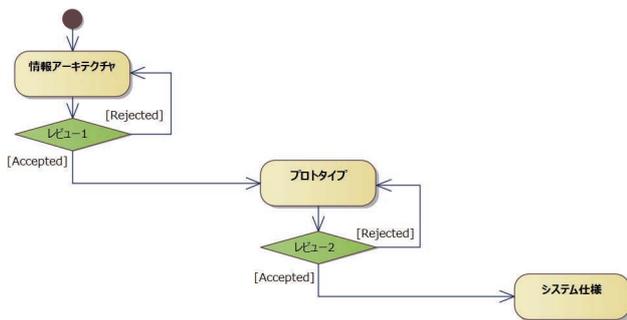


図6 モデルとプロトタイプのリビューフロー

4. 効果検証

4.1 課題①について

現行システムから新システムに対して、画面数の比率を図7、画面遷移数の比率を図8にそれぞれ示す。画面数は42%減少、画面遷移数は36%減少した。

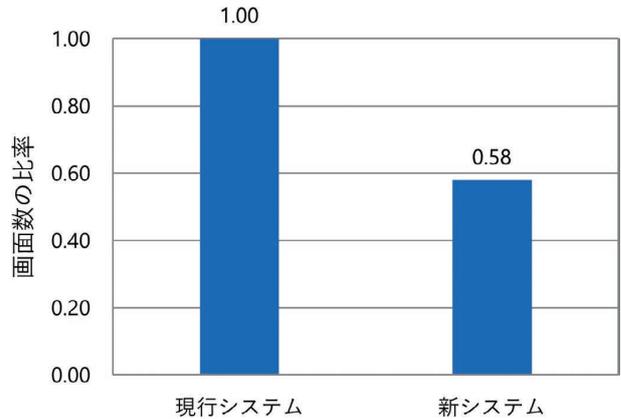


図7 画面数の比率

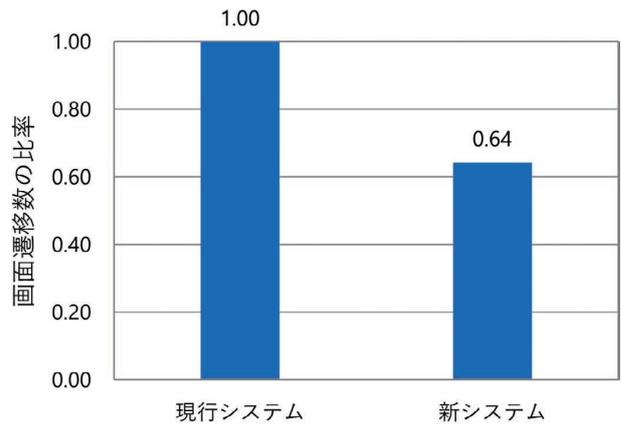


図8 画面遷移数の比率

また、代表的なユースケースおよびユーザビリティの低さが指摘されたユースケースからA～Jの10シナリオを作成し、動的サイトマップ上で操作をシミュレーションした。各シナリオに対し、ユーザによる操作回数を図9、画面遷移が行われる回数を図10にそれぞれ示す。操作回数は合計で30%減少、画面遷移回数は合計で27%減少した。

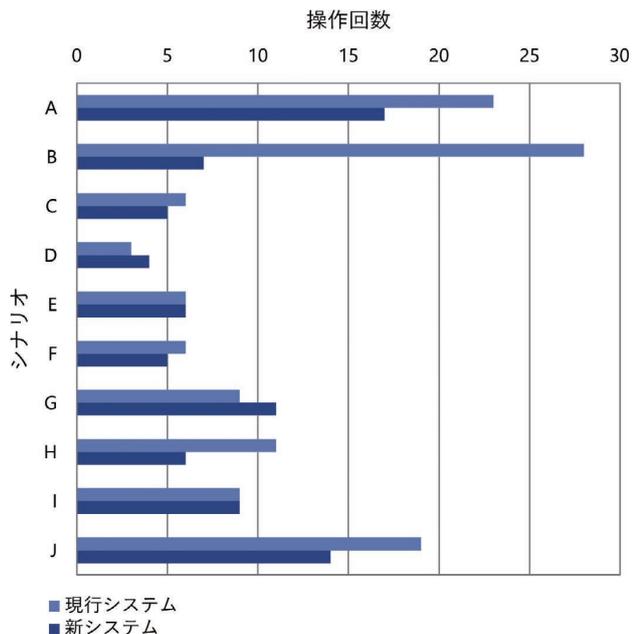


図9 シナリオに対する操作回数

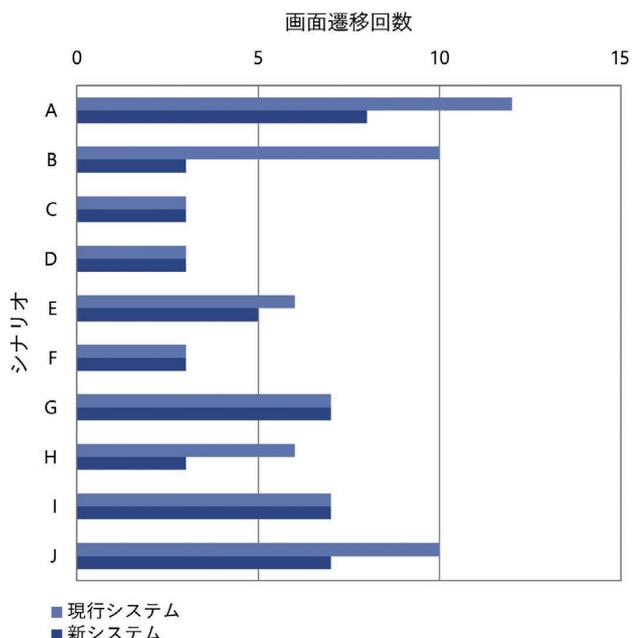


図10 シナリオに対する画面遷移回数

シナリオ A/B/J では、操作回数と画面遷移数が大幅に減少している。これは、独自画面への統一とホームサイトに集約した画面設置による効果であった。

シナリオ D/G では、操作回数が微増している。これは、画面の簡潔さを配慮し非表示とした UI を再表示させるための操作によるものであり、画面遷移にも影響がないことから許容した。

このように、画面と画面遷移の数を抑え、実際の使用を想定したシミュレーションにおいても操作回数と画面遷移

回数が減少したことから、ユーザの操作効率は改善できたといえる。

4.2 課題②について

現行システムでは、Applications と Success Stories が同一階層のメニューに存在しており、Success Stories に属する技術ナレッジを単独で登録することを許容していた。つまりシステム上は、Success Stories に属する技術ナレッジは、必ずしも Applications に属する技術ナレッジと関連を持たせる必要はなく、ユーザの判断によって自由に関連を持たせることができたものであった。

新システムでは、技術ナレッジ種別に対して Primary Knowledge と Secondary Knowledge の分類を設けて導線を見直し、Applications を最上位階層のメニューに表出させている。そのうえで Applications に属する技術ナレッジの一環として、Success Stories に属する技術ナレッジを登録するように仕様を見直している。つまりシステムとして、Success Stories に属する技術ナレッジは、必ず Applications に属する技術ナレッジとの関連を持って登録することを保証している。ただし、この仕様により Applications に属する技術ナレッジを登録する機会の増加が予測されるため、類似の Applications に属する技術ナレッジがあればその派生として登録できるように仕様を見直しており、登録の負荷軽減も考慮している。

このように、体系的な技術ナレッジ蓄積が保証されることで連鎖的な参照が可能となり、ユーザによる活用効率が改善できると考える。

4.3 システム仕様整合について

図6に示すレビューを実施し、指摘への対応も完了した。この対応はモデルにフィードバック済である。それぞれのレビューに対する指摘数の割合を図11に示す。

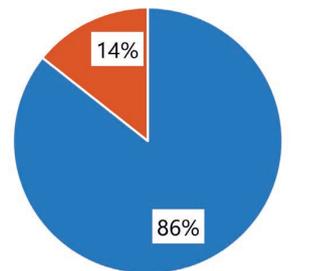


図11 レビュー指摘数の割合

情報アーキテクチャに対するレビュー指摘数は、全体の86%である。情報アーキテクチャのレビュー段階で拠点代表ユーザとの共通理解を確立したことにより、プロトタイプに対するレビュー指摘数を抑制することにつながった

と考える。

このように、情報アーキテクチャを共通理解することで、全体最適なシステム仕様の整合を効率的に行うことができた。

5. むすび

効率的な技術ナレッジ共有の課題は、①横断的な画面操作が多いこと、②蓄積された技術ナレッジ間における関連性が低いことである。そして、拠点代表ユーザとのシステム仕様整合には、言語や知識格差の障壁があり難しさが伴う。

これに対し、情報アーキテクチャモデリングにより、現行システムに内在したモデル表現を行った。そして、横断的な画面操作を抑えつつ体系的な技術ナレッジ蓄積を改善し、効率的な技術ナレッジ共有を可能とする新システムのモデル表現を行った。拠点代表ユーザには事前にモデルの共通理解を得ることで、言語や知識格差の障壁を乗り越え、かつ効率的に全体最適なシステム仕様を整合した。

このシステム仕様を具現化するための開発に着手する。企画段階では考慮されていないビジュアルデザインの適応が必要である。また、新システムでは独自画面構成のためコスト増加が懸念されるが、早期リリースに向けてUIの部品化と再利用によって開発を効率化していく。

時間経過や環境変化に伴い、システムに対する要求も変化するものである。情報アーキテクチャに求められる要素のバランスに立ち返り、慎重かつ柔軟にモデルの改定およびシステムの改善を行っていく所存である。

執筆者紹介



高田 智史 TAKADA Satoshi
 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2技術部
 専門：ソフトウェア工学



赤松 康至 AKAMATSU Yasuyuki
 インダストリアルオートメーションビジネス
 カンパニー
 技術開発本部 第2技術部
 専門：ソフトウェア工学

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

参考文献

- 1) 赤松康至, “技術ナレッジのグローバル共有化の仕組み構築と活用,” *OMRON TECHNICS*, vol. 55, no. 1, pp. 108-114, 2023.
- 2) L. Rosenfeld, P. Morville, and J. Arango, *情報アーキテクチャ 見つけやすく理解しやすい情報設計*, 篠原稔和 監訳. 第4版. オライリージャパン, 2016.
- 3) 長谷川敦士, *ユーザーエクスペリエンスデザインのための情報アーキテクチャ設計*, ビー・エヌ・エヌ新社, 2009.
- 4) T. Demarco, *構造化分析とシステム仕様*, 高梨智弘, 黒田純一郎 監訳, 日経 BP, 1994, pp. 265-320.

作業時間自動計測に向けた多様な工場環境に対応できる人位置検知技術

宇治田 康浩, 森 滯希

近年の生産現場では、多品種少量生産の増加、定職率の低下による新人作業者の増加等、生産性や製品品質の低下に直結するバラツキ要因が増加している。バラツキ要因の特定には長期間の作業時間データが必要だが、現在はワークサンプリング法と呼ばれるサンプリング計測手法しかなく、リアルタイムに継続的に情報を収集できない。

そこで我々は、作業者が着用したカラーマーカーを、画像認識技術を用いて検知する人位置検知技術、およびその技術を用いた作業時間計測技術を開発した。一般的に画像認識を用いた位置検知では、環境変化による認識精度の低下が課題となる。そこで今回、環境が変化してもカラーマーカーを検知出来るような位置検知アルゴリズムを開発した。その結果、照明環境を変化させても、作業時間計測精度0.1秒未満の精度で最大6名の作業者を識別できることを確認した。

本技術を活用することで、作業者毎に作業時間バラツキが大きい工程や、想定よりも時間がかかっている工程の特定が容易になり、スピーディな課題解決につながる。

Sensing Technology of Worker Location Adaptable to Various Factory Environment for Measuring Actual Work Time

UJITA Yasuhiro and MORI Mizuki

In recent years, production factories are required to identify the productivity bottlenecks and its factor to respond to the diversification of production variety and/or worker turnover. Analysis of bottlenecks require not only equipment operation data but also workers worktime. However, the method measuring worktime has not been established.

Therefore, we've developed a worker-position-detection technology for worktime measurement. Our developed method enables to detect the position of color markers worn by workers by image processing algorithm.

In general, color detection is sensitive to environmental changes such as brightness, so initial setup takes much time. We improved the algorithm so that it can detect color markers even when the environment changes. In addition, by turning the functions necessary for configuration into software tools, it is possible to configurate for a short time. Since setting time will be significantly reduced, it can be installed to many environmental factories. In addition, the results of verification at a factory confirmed high accuracy of worktime measurement, with a worktime accuracy of less than 0.1 second.

By utilizing this technology, productivity issues such as dispersion of worktime by workers and processes that are taking longer than expected can be clarified, so that customers are able to solve issues in a short time.

1. まえがき

近年の生産現場では、消費者ニーズの多様化による多品種少量生産の増加、定職率の低下による作業者の入れ替わ

り等により、生産性や製品品質の低下に直結するバラツキ要因が増加している。バラツキ要因の特定には生産中の設備や作業のデータが必要となるが、特に人の作業に関わるデータを自動で収集する手法は無い。人作業データを取得する方法として直接時間観察法（DTS）が知られている

Contact : UJITA Yasuhiro yasuihiro.ujita@omron.com

が、これは観測者が現場に赴いて作業者を観察しながら時間を計測する手法であり、効率が悪い。DTS以外にはワークサンプリング法と呼ばれる、観測時刻をランダム（無作為）に設定して作業内容を観察し、作業時間や内容を統計的に分析する手法も知られている¹⁾。しかし、この手法でも、分析に最低1日以上が必要な上、設定した時間以外で発生したバラツキ要因は分析できない、という課題がある。

この問題の解決を目指して、作業時間の自動計測技術が多く提案されている。提案の1つに、人作業認識技術がある。これは、AIを用いて動画像から作業者の手や指の動きを分析し、人の作業工程を認識する手法である²⁻⁴⁾。作業認識技術は詳細な作業分析ができる反面、カメラを1-2m間隔で設置する必要があり、導入工数が課題となっている。

この他にも作業時間を自動計測する他の手法として、工程の滞在時間を作業時間として計測する手法が提案されている⁵⁾。これは、作業者の位置を計測し、工程毎の作業領域に滞在する時間を計測するものである。これに必要な人位置の計測手法としては、無線（UWB帯）を用いるものや、カメラを用いた人画像認識を用いる手法が知られている。

しかし、無線を用いる手法では、導入時にアンテナの設置やキャリブレーションに時間を要するという課題がある。また、人画像認識は人の識別が一般的に斜め上から全身を撮影するため、人の識別が出来ないことに加え、作業者が設備や他の作業者に隠れると検出できないという課題がある。

以上の課題を解決する技術として、本稿では高精度かつ短時間で現場への導入が可能な人位置計測技術を紹介する。

まず、2章で従来技術の課題の詳細を説明する。3章では開発した人位置計測技術の詳細を説明し、4章で技術の原理検証（識別精度検証）結果について述べる。5章では、この技術を工場の生産ラインに導入し、時間計測の効果検証を行った結果について述べ、6章で今後に向けた課題と展望を述べる。

2. 課題

2.1 対象とする生産方式

本稿では作業者が複数の領域を移動しながら作業する工程を対象とする。具体的にはセル生産方式や装置の多台持ち工程を想定している。図1にセル生産方式（U字）の一例を示す。セル生産方式は、電子部品や自動車の組立工程で用いられている生産方式であり、生産量に応じて一人もしくは数人の作業者が分担して作業する。作業台の幅は60cm程度、各工程の作業は凡そ5～20秒で行われる。そ

れぞれの作業者の移動範囲は最大15m程度を想定している。

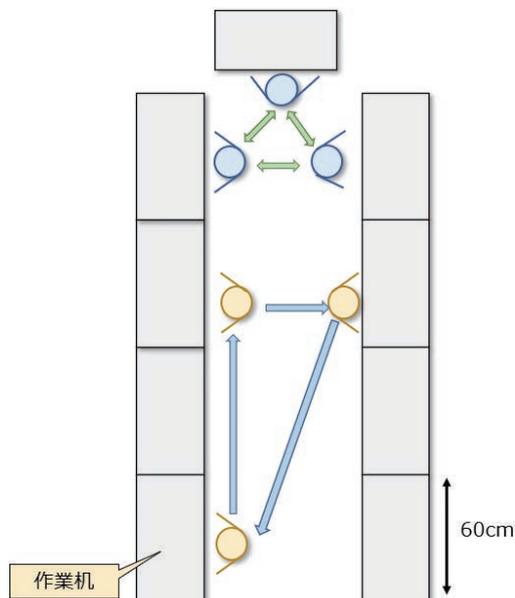


図1 セル生産方式の模式図（作業者が2名の場合）

2.2 人位置自動計測に求められる要件

2章1節で示した工程において人の作業時間を自動で計測するためには、人位置計測技術に以下の機能及び性能が求められる。

1) 位置計測精度

位置計測は作業台の幅より十分に高精度である必要があるため、許容される誤差は10cm未満である。精度の計測範囲は、一般的なセル生産ラインが十分収まるエリアとして、15m×5mを対象とした。

2) 作業時間計測精度

人作業は1工程につき少なくとも1～2秒ばらつく。そこで計測精度は人作業のバラツキよりも充分小さくする必要がある。

3) 人の識別

セルラインでは、同じ作業領域で複数の作業者が作業するため、測位とともに人の識別が求められる。この識別はラインへの頻繁な人の出入りや、姿勢の変化、照明の明るさなどの作業環境の変化に対応できる必要がある。

4) 導入の容易さ

計測を始める前にはキャリブレーションなどの前処理が必要となる。工場は照明環境、ラインレイアウトが異なるため、一般的に計測前にキャリブレーションが必要となるため、短時間で導入出来る必要がある。

2.3 既存技術の課題

従来の人位置計測技術である、無線電波方式と、人認識 AI 方式に分けて説明する。

1) 無線電波方式

無線電波方式としては、人工衛星を用いる GPS 測位、Wi-Fi アクセスポイントを用いる Wi-Fi 測位、ビーコン端末を用いる Bluetooth 測位、無線 (UWB 帯) による三角測位、等が知られている。

このうち、GPS、Wi-Fi、Bluetooth の測位誤差は数 m 以上のため、我々が目指すセル生産での作業機レベルでの移動の計測はできない。

無線を用いた三角測距では、数十 cm 以内の誤差で測位可能である⁶⁾。しかし、UWB 測位は導入に時間を要する。これは、電波の遮蔽や反射影響を除去するための受信機的位置調整というキャリブレーション作業や、高所での設置や配線作業が必要になるためである。これらの作業を完了させるには少なくとも 1 日以上を必要とする。また、無線方式では作業時間のボトルネックは特定できても、そのときの現場の具体的な状況が視覚的にはわからないため、改善へのフィードバックにつながりにくいという問題点がある。

2) 人認識 AI 方式

人認識 AI 方式は、学習した人認識モデルを用いて画像に映る作業者を検出する手法である。この方式は車両の自動運転での歩行者検知等で活用されており、人の全身が映る場合に高い精度で検知できる⁷⁾。一方、一般的に個人の識別ができない上、セル生産方式では、作業者が設備や他の作業者に隠れると検出できなくなる問題がある。それを解消するための 1 つの策として、セルラインの真上の天井から真下に向けて撮影することで、作業者を映すことは可能になるが、頭頂部しか映らないため、人認識 AI では検知精度が低下する。

3. 提案手法

2 章で述べたように、現状では、作業者の位置計測に必要な測位精度、検出精度、人の識別、導入容易性を満たす技術が無い。

そこで我々は複数色のカラーマーカー (色帽子) を用いた人位置検知技術を開発した。このような、カラーマーカーを用いた位置検出手法は画像認識で古くから知られている。一例として、あらかじめ設定した特徴物体をトラッキングする手法が挙げられる⁸⁾ が、類似色の誤検知や、照明の明るさによる精度低下が発生する。本開発では、工場での作業時間計測に特化したアルゴリズムと設定ツールを用いることでこの問題を解決している。表 1 に想定した工場環境とその対策の一覧を示す。

更に我々は、照明の色/明るさは工場毎に異なるが、時間による変化はほぼ一定のため、初期設定を容易化するツールを開発した。類似色との誤検知については、色検知アルゴリズムの改良、およびトラッキング補正によって対策した。以下 3 章 1 節ではアルゴリズムの改良について、3 章 2 節ではツール化の概要を紹介する。

表 1 検討範囲と対策一覧

変動要因		工場環境の特性	対策 (色検知技術)
照明	色	初期値は現場毎に異なるが、時間変化はない	初期設定容易化ツール (ゲイン・色調整)
	照度		
類似色	床色	存在する	色検知アルゴリズム開発 1. 複数色設定 2. トラッキング補正 3. サイズ指定
	機材		
作業者の姿勢変化		天井から作業者の距離はほぼ一定	
ライン規模		2 m-15 m	複数カメラの連動

3.1 色検知アルゴリズム

1) 複数の色検知範囲設定

一般的な色検知では、1 色当たり 1 つの検知範囲を HSV 色空間 (Hue : 色相、Saturation : 彩度、Value : 明度から構成される座標系) に設定する。しかし生産現場では、スポット照明や周辺の照明のオンオフ等の影響により、場所によって HSV の値が変動し、これが色検知精度を低下させる。加えて、機材やワークに色帽子と同系色の物があると誤検知に繋がる。これを解決するため、我々は、HSV の値が変動してもその値は複数のクラスタによって分類できると考え、色帽子の色変動に合わせて検知範囲を複数設定した。具体的には、事前に現場で撮影した色帽子の HSV 値を K-means 法を用いて分類することにした。この手法は、近い場所にあるデータは同じクラスタであるという考えのもと、データ間の距離に基づいてクラスタリングを行う手法である。

図 2 で、橙色帽子での検知範囲設定のイメージを示す。この例では帽子の色相や明るさの変動に合わせて検知範囲を 3 つ設定している。

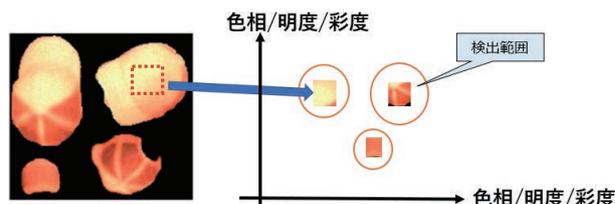


図 2 色検知範囲の設定

2) 色帽子の検知結果の補正

検知精度の低下は、前章で記載した照明色や照度変化以外に、作業者のしゃがみ込みなどの姿勢変化や、隣り合う作業者の影に隠れることによる未検知が発生する。そこで人の動きを追跡して動く方向を予測し、検知結果を補正することにした。予測にはオプティカルフローを用いた。具体的には、色検知実行時に以下のステップを常時実行して補正を実施することとした。

1. 過去に検知した位置と現在の位置から帽子の移動方向を予測する。
2. 帽子を検知しなかったとき、予測した移動方向上に検知を補完する。
3. 予測から明らかに外れた位置の検知結果は除外する。

この手法は追跡対象加えて、作業者の位置検出に特化しているため、完全に静止している物体を検知しない補正により、誤検知を防止にも活用した。

3.2 初期設定ツールを用いた導入容易化

画像認識の専門スキルが無くても短時間で導入できる仕組みとするため、以下機能を備えた設定ツールを開発した。

1) カメラのゲイン調整

人にとって視認性が高い状態で撮影すると白飛びが発生し、作業計測精度が低下する（図3 (a)）。そこで、白飛びが発生しないよう意図的にカメラのゲインを下げることにした。具体的には、設定する作業者がカラースペクトルを確認しながら、白飛びしないゲインに調整する機能をツール化した（図3 (b)）。結果としてゲイン調整が、専門知識が無くても短時間で設定できるようになった。

なお、このツールは色検知の後に、ガンマ補正して保存することで、工程改善に活用できる視認性を確保する（図3 (c)）。

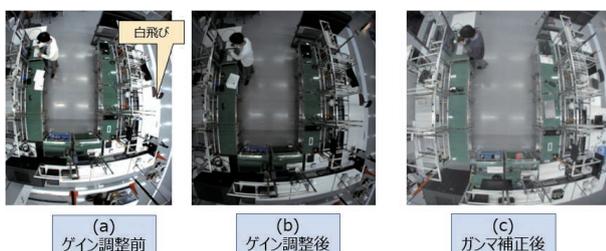


図3 ゲイン調整とガンマ補正

2) 色調補正

3章1節で記載の色検知範囲の設定もツール化した。具体的には以下の作業をボタン操作だけで実行し、色範囲を設定できるようにした。

- ① カメラのホワイトバランスを調整
- ② 色帽子を着用してライン内を歩く（1色当たり1分程度）様子を録画
- ③ 撮影した映像に映る色帽子のHSV値をクラスタ分類し、色検知範囲を複数設定
- ④ 設定した検知範囲に基づく色帽子の検知結果を、動画を再生しながら確認

結果として、色検知範囲の設定が短時間でできるようになった。

以上、専門知識がなくても、初期設定が短時間で行えるようになった。また、1台のPCで最大3台までカメラを連携できる仕組みを併せて持たせることで、1台のカメラでカバーできない比較的広いセルラインにも対応できるツールとした。

4. 色検知アルゴリズムの検証

3章で述べたアルゴリズムとツールの効果を以下の方法で、実験室環境で検証した。

4.1 検知範囲と作業者の識別

まず、検知範囲と精度を検証した。検証では8色の帽子を用いて、カメラ直下から3m以内の6地点で姿勢を3種類（直立/前かがみ/しゃがみ込み）変えた合計18項目で誤検知と検知の有無を検証した。カメラは魚眼カメラを用い、天井の高さは3m、身長は1.7mとした。作業者の位置は帽子の色を検出した矩形の中央としている。色ごとのカメラ直下からの距離と、誤検知や未検知が発生した件数を実験した結果を表2に示す。

表2 検知範囲の検証結果

	2 m	2.5 m	3 m
青緑	0	0	3 (未検知)
橙	0	0	0
桃	0	0	0
黄	0	0	3 (未検知)
黄緑	0	0	3 (未検知)
緑	0	0	3 (未検知)
赤	0	4 (誤検知)	4 (誤検知)
紫	6 (未検知)	6 (未検知)	3 (未検知)

赤色、紫色以外の6色はカメラ中心より2.5m以内で誤検知、未検知なく検知できることを確認した。3m離れると多くの色で未検知が発生した。これは、魚眼カメラの特性上、カメラ直下から離れるに従い帽子が小さく映ることで、未検知が発生しているためである。また、2.5mの範

囲でも赤色は4地点で誤検知が発生し、紫色は全ての地点で未検知となった。

次にこうした誤検知・未検知の発生要因について考察する。そのために、それぞれの色のHSV値を測定した結果を表3に示す。

表3 帽子の色ごとのHSV値

色	H (色相)	S (彩度)	V (明度)
青緑	196	171	68
橙	12	206	204
桃	2	183	117
黄	37	165	130
黄緑	66	129	159
緑	114	108	83
赤	7	207	115
紫	228	94	55

赤色と桃色では、色相の値の差が5、明度の差2しかないため、誤検知に繋がったと考えられる。紫色は彩度と明度が他の色に比べ低く、検知自体が困難であったと考えられる。一方、橙色と桃色は検知可能だったため、色相差が10あれば検知可能と考えられる。

以上、5m×5mの範囲で6色の識別ができることから、我々の想定する多くの生産方式での作業者の識別ができると考えている。大規模なラインで作業者が7名以上となる場合は、同一色の帽子を使用し、作業位置とトラッキング補正をすることで、認証可能と考えている。

4.2 多様な環境への対応

多様な環境への対応は、照明色と照度の影響を評価した。検証には識別が可能な6色を用いた。

1) 照明色

3章2節に記載の通り、カメラのホワイトバランス調整によって照明色による色帽子の色相変化を最小化している。表4に、各照明色におけるホワイトバランス調整後のHSV値の代表例として色相差が小さい橙色と桃色を示す。

表4 照明色変化に対するキャリブレーション後のHSV値

色	色温度 [K]	H (色相)	S (彩度)	V (明度)
橙	2700	17	186	228
	5000	16	189	214
桃	2700	7	164	172
	5000	4	168	169

橙色、桃色ともに色温度の変化に対して色相の変化は最大3であった。これは橙色と桃色の色相差(10)に比べて充分小さくなっている。他色でも同様の傾向を示しており、結果として、照明色を変化させても誤検知・未検知は発生しなかった。

2) 照度

3章2節に記載の通り、照度の影響はカメラのゲイン調整によって最小化している。表5に、照度を変化させたときの、ゲイン調整後のHSVの値を示す。

表5 照度変化に対するキャリブレーション後のHSV値

色	照度 [Lux]	H (色相)	S (彩度)	V (明度)
橙	530	16	220	168
	700	16	218	180
	820	16	221	181
桃	530	4	175	132
	700	7	186	123
	820	4	177	145

橙色、桃色ともに照度の変化に対して色相の変化は最大3であり、橙色と桃色の色相差(10)に比べて充分小さくなっている。照明色との場合と同じく、他色でも同様の傾向を示しており、結果として、照明色を変化させても誤検知・未検知は発生しなかった。

以上の検証により、照明色や照度の変動があっても、我々の開発したアルゴリズムおよびツールを用いることで、誤検知や未検知のなく検知できることを確認した。

4.3 位置計測精度

次に位置計測精度を検証した。検証は、2章1節で述べた広さの実験用セルライン環境で行った。カメラ直下とラインの左右奥と左右手前(カメラ直下から2.5m四方の地点)の5地点で30秒間色帽子を固定して計測し、計測位置のバラツキを計測した。ピクセル単位でのバラツキ(X,Y)と、それを長さに換算した結果を表6に示す。

表6 計測の誤差

	バラツキ (ピクセル値)		バラツキ (長さ [cm])	
	X	Y	X	Y
直下	2.1	2.1	1.7	1.7
ライン左奥	4.0	0.6	0.0	0.5
ライン右奥	0.0	0.0	0.0	0.0
ライン左手前	0.0	0.4	0.0	0.3
ライン右手前	0.0	2.4	0.0	2.1

全ての地点でバラツキは5 cm 未満であり、位置計測精度の要件を満たすことを確認した。

4.4 まとめ

以上の検証により、セル生産方式を代表とする人生産における作業時間計測に十分な作業者の識別、多様な環境への対応、および位置計測精度を満たすことが分かった。

5. 作業時間計測検証

次に、工場の生産現場に導入して、導入容易性と作業時間計測の精度を検証した。

5.1 導入容易性の検証

3章2節で述べたツールを用いて実際に初期設定に要した時間を計測した。その結果、カメラ1台当たりゲイン調整に3分、色調補正に10分を要した。従って短時間で導入できると考えている。

5.2 作業時間の計測

検証は4名で生産するセル生産のラインで実施した。作業領域は60 cmの作業机毎に10領域設定し、各領域内の滞在時間を作業時間としてみなした。ここでいう滞在時間とは図4で示すように領域に侵入してから、作業台で作業し、退出するまでの時間である。作業時間計測精度は、ストップウォッチを用いた目視確認の結果との比較により評価した。

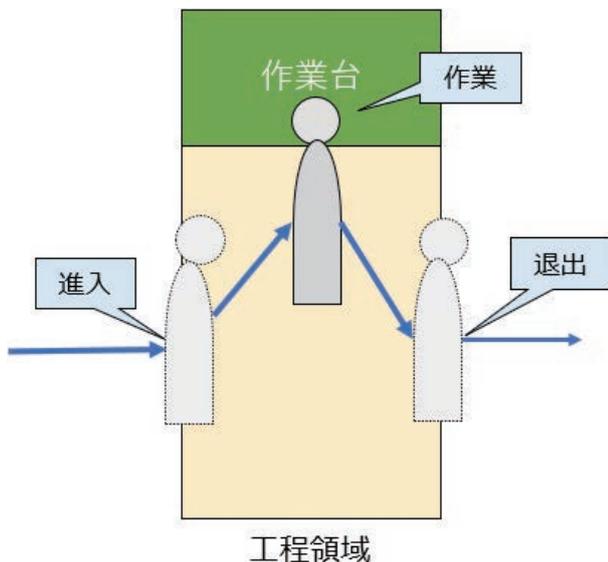


図4 作業時間の計測方法

5.3 検証結果

自動計測した作業時間と、目視計測結果を比較した結果を表7に示す。

表7 作業時間の計測結果

サイクル	自動計測した作業時間 (秒)	目視確認 (秒)	誤差
1	8.14	6.90	1.24
2	9.05	7.80	1.25
3	9.44	8.30	1.14
4	9.14	7.92	1.22
5	7.88	6.67	1.21
6	8.49	7.29	1.20
7	7.88	6.66	1.22
8	8.18	6.97	1.21
9	7.61	6.41	1.20
10	7.92	6.70	1.22

全てのサイクルで本手法による作業時間が目視確認に比べて1.1~1.2秒長い結果となった。その要因は、目視確認作業時間が作業台での作業開始から終了までであるのに対して、本計測では目視確認の作業時間に加え、領域に入ってから作業台まで、および作業終了後に領域を出るまでの時間が含まれるためである。

このように、自動計測した作業時間と目視確認の作業時間との間には1秒以上の差分が発生している。しかし我々は、それらの差分がすべてのサイクルで一定時間であることに着目した。つまり、生産現場では移動速度は作業時間によらず一定のため、本手法による計測時間から差し引くことで、従来手法と同精度(誤差±0.1秒未満)で作業時間計測が可能になる。このように人の作業時間バラツキよりも十分に計測誤差が小さいため、この手法は人作業の計測に活用できる。

6. むすび

我々は、人作業時間の自動計測の実現を目指して、カラーマーカーを用いた人位置検知技術を開発した。具体的には、作業者を天井から撮影し、画像に映るカラーマーカーの位置を検知する。検知アルゴリズムとしては、クラスタリング法を用いたマーカー色の複数検知範囲設定や、オプティカルフローを用いた人位置の補正などのアルゴリズムを開発することで、照度、照明色の変化や、作業者の姿勢変化があっても検知出来るようにした。また、現場にあわせたキャリブレーション等の初期設定をツール化したことで、様々な工場環境に簡単に導入できるようになった。

本技術の導入効果として、生産中すべての作業時間がリアルタイムに取得出来ることで、品質不具合につながる標準外作業や、熟練者と初心者の作業時間バラツキ等の情報が得られる。これらの情報を元に適切な業務変更を実施することで、バラツキ要因が増加する中でも生産性/品質の

安定化が実現できることが期待される。今後、得られた情報を作業者にフィードバックすることにより、作業者の習熟やモチベーションの向上に繋がれると考えている。

以上、現場主導での素早い変化対応に加え、作業者自身がスキルアップを実感できるワクワクする製造現場の実現に向けた技術の開発に取り組んでいく。具体的には、計測した作業時間を用いてボトルネックを可視化・分析する技術や、作業者の異常な挙動を検知する技術を検討していく。

参考文献

- 1) W.-H. Tsai, "A Technical Note on Using Work Sampling to Estimate the Effort on Activities Under Activity-Based Costing," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 43, issue 1, pp. 11-16, 1996.
- 2) 奥村誠司 他, "作業分析ソリューション "骨紋"," 三菱電機技術報, vol. 94, no. 6, pp. 352-355, 2020.
- 3) 西田一貴, 音田浩臣, "セル生産ラインにおける作業者の標準外動作検知システムの開発," システム制御情報学会論文誌, vol. 33, no. 5, pp. 149-155, 2020.
- 4) 株式会社ライブラリー, "3次元動画計測ソフトウェア." Cosmos. https://www.library-inc.co.jp/product/?id=1372147489-429207&ca=11&list_flg=1 (Accessed: Mar. 6, 2024).
- 5) オムロン株式会社, "データ抽出装置、データ抽出装置の制御方法、情報処理プログラム、及び記録媒体," 特開 2020-205027, Dec. 24, 2020.
- 6) F. Mazhar et al., "Precise Indoor Positioning Using UWB: A Review of Methods, Algorithms and Implementations," *Wireless Pers. Commun.*, vol. 97, pp. 4467-4491, 2017.
- 7) 福井宏 他, "Deep Learning を用いた歩行者検出の研究動向," 電子情報通信学会技術研究報告 =IEICE technical report: 信学技術報, vol. 116, no. 366, pp. 37-46, 2016.
- 8) 株式会社ライブラリー, "2次元動画計測ソフトウェア." Move-tr/2D. https://www.library-inc.co.jp/product/?id=1372146225-105767&ca=11&list_flg=1 (Accessed: Mar. 6, 2024).

執筆者紹介



宇治田 康浩 UJITA 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
 技術開発本部 第1技術部
 専門：ソフトウェア工学



森 滯希 MORI Mizuki
 インダストリアルオートメーションビジネス
 カンパニー
 技術開発本部 第1技術部
 専門：ソフトウェア工学

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

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—



製造現場の突発的な変動の影響を受けたデータにおける異常検知の改善

杉原 哲朗

人手不足の解消や、製品品質の向上は、製造現場における大きな課題であり、その改善の手段として、AI (Artificial Intelligence : 人工知能) の適用が進められている。

ところが、従来の AI では、適用が困難なケースがある。そのひとつに、AI のアルゴリズムが前提としているデータの分布と、実際の製造現場のデータの乖離がある。製造現場では、原料の変化や、治具の交換、設備の設定変更など、多くの要因に変動があり、データはその影響を受ける。このような変動があった場合、データには突発的な変動が現れる。

従来の AI は、突発的な変動がないことを前提としている。そのため、変動の影響があるデータに対して従来の AI を適用すると、誤った判定の原因となる。この改善が、AI 活用の課題の一つとなっている。

本稿では、従来のアルゴリズムに、品質管理の分野で従来から使われている管理図の手法を加えた、新たなアルゴリズムを提案する。従来のアルゴリズムでは対応が困難であった現場課題について、提案手法による偽陽性率が 18% であるのに対し、2 種類の従来手法は、いずれも約 70% であった。このアルゴリズムは偽陽性率を約 50% 改善でき、有効であることを確認した。

本稿により、データの変動に対応が可能な AI として、管理図の手法による変動の検知と、逐次学習を合わせたアルゴリズムによる方向性を示す。

Improved Anomaly Detection in Data Affected by Sudden Changes in the Factory

SUGIHARA Tetsuro

Solving labor shortages and improving product quality are major issues at manufacturing sites, and AI (Artificial Intelligence) is being applied as a means of improvement.

However, there are cases where it is difficult to apply conventional AI. One of them is the discrepancy between the distribution of data assumed by AI algorithms and the data at the actual manufacturing site. At the manufacturing site, there are fluctuations in many factors, such as changes in raw materials, replacement of jigs, and changes in equipment settings, and data is affected by them. If there is such a fluctuation, sudden fluctuations will also appear in the data.

Conventional AI assumes that there will be no sudden fluctuations. Therefore, when conventional AI is applied to cases where the influence of fluctuations is large, it causes erroneous judgments. This improvement is one of the challenges in utilizing AI.

In this paper, we propose a new algorithm that adds the control chart method that has been conventionally used in the field of quality control to the conventional algorithm. And for on-site issues that were difficult to deal with with conventional algorithms, the false positive rate of the proposed method is 18%, while the two conventional methods are both about 70%. It was. This algorithm can improve the false positive rate by about 50% and has been confirmed to be effective. In this paper, as an AI that can respond to fluctuations in data, we show the direction by an algorithm that combines detection of fluctuations by the control chart method and sequential learning.

Contact : SUGIHARA Tetsuro tetsuro.sugihara@omron.com

1. まえがき

AIの導入は、人の作業の軽減や代替を目的とするのが一般的と考えられる。例えば、オムロンにおいては、「AIを活用し、熟練検査員の技を再現」、「人と機械の新しい協調で食品製造現場の労働生産性と品質を革新」と言った表現で、AIの導入効果が説明されている¹⁾。

AIには、様々な形態やアルゴリズムがあるが、中でも「機械学習」と呼ばれているアルゴリズムが広く用いられている²⁾。

機械学習では、データを用意して機械に学習させる作業がある。学習ができた機械は、予測や判定などを実行する。この機能を使って、人間が行っている予測や判定という行為を、機械で代替できるようにする。例えば、前述のような製造現場の事例においては、装置や各種センサのデータを学習データとして収集し、機械学習のモデルを構築した後、そのモデルを適用することで製造現場における異常を検知する。

従来、機械学習の適用フローとして、バッチ学習と逐次学習が知られている³⁾。

バッチ学習とは、ある程度の量のデータを学習用データとして用意して、それらを一括して処理することで学習する方法である。学習後は、AIを使った予測や判定の段階になる。バッチ学習では、学習用のデータを収集している間は、AIが使用できない期間になる。オムロンの商品であるAI搭載マシンオートメーションコントローラもこの方式である⁴⁾。

逐次学習とは、サンプルが増えるごとに、学習を繰り返していく方法である。逐次学習では、サンプルが増えるごとに、過去の学習用のデータに追加して、新しい学習用のデータでバッチ学習をするのではなく、過去の学習結果を、新しいサンプルで修正していく処理を繰り返して行く。これによって、大量のサンプルデータを同時に扱う必要がなくなり、計算量が少なくなる。また、学習とAIの利用時期が同時進行になり、学習用のデータを蓄積するための期間が不要になる。

このように、バッチ学習では学習のフェーズと予測のフェーズが分かれているため、データの分布の変動に追従できない。逐次学習では、データの変動に追従できるが、学習が一時的な変動の影響を受けやすい。また、過去のデータの影響があるため、分布の変化への追従は遅い。

次節で詳述するように、考え得る条件を一定にしても、このような変動は発生することがあり、機械学習を製造現場に適用する際の、課題の一つになっている。

本稿ではこのような課題の解決方法として、管理図の手法による変動の検知と、逐次学習を合わせたアルゴリズムを提案する。2章では本稿が解決する課題を示し、3章では提案手法を示す。4章は、具体的な設備による実験結果を示し、5章にて実験結果を踏まえ、提案手法を考察する。

2. 課題

データの収集を継続的に進めていると、あるタイミングで傾向が大きく変わることがある。製造現場であれば、原料の素材変化や、治具の交換、設備の設定変更など、多くの要因で起こり得る現象である。

本稿では、横ピロー式包装機における、切断時のカッターの位置のデータを用いて課題を説明する。横ピロー式包装機では、ロール状のフィルムで被包装物を囲み、熱圧着することで、被包装物が包まれた状態にする。最後に、フィルムから切断することで、包装を完成させる。切断にはカッターを用いるが、実験装置では、カッターの両端に変位センサが取り付けられており、カッターが上下運動をして切断する時の、カッターの高さを測定している。変位センサが2つあるため、データは同時刻に2つが収集される。図1にカッターの概要図を示す。

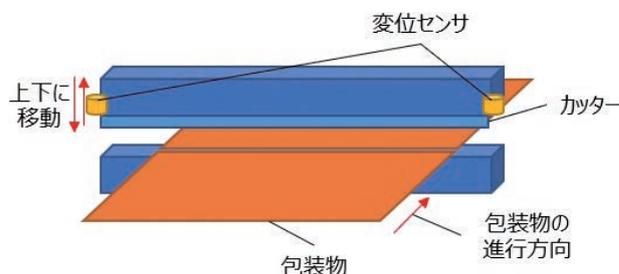


図1 包装機のカッターの概要図

それぞれのセンサのデータを図2、図3に示す。包装後の寸法、材質、被包装物が同一の時のデータであり、途中、条件が異なるデータは除いてある。図の縦軸は、実際の変位センサのデータの測定値に対して、定数を乗じて処理したものである。ひとつのサイクルの中で、被包装物の移動や切断等の一連の動作があり、カッターの高さは変化する。その高さを変位として測定する。そのサイクルの中で、カッターが切断するタイミングの高さだけを抽出したのが、本稿で使用しているデータである。

図2、図3の赤丸は、意図的に異物を噛み込ませた時であることを示している。異物がある時は、その前後で異物がない時に比べて、値が突出する傾向が見られる。センサ1の値はプラス側に突出し、センサ2の値はマイナス側に突出する場合と、センサ2の値はプラス側に突出し、センサ1の値はマイナス側に突出する場合がある。実験時は、異物の位置を実験者が決めているため、値の突出の向きは、異物の位置と、2つのセンサとの位置関係に依存していることがわかっている。

図4は、図2、図3のデータの散布図である。異物なしのサンプルは、2つの領域に集まるようにして分布している。この2つの領域は、サイクル212の前後の領域である。また、異物ありのサンプルは、それらの集まりとは異なる特徴を持って分布していることがわかる。

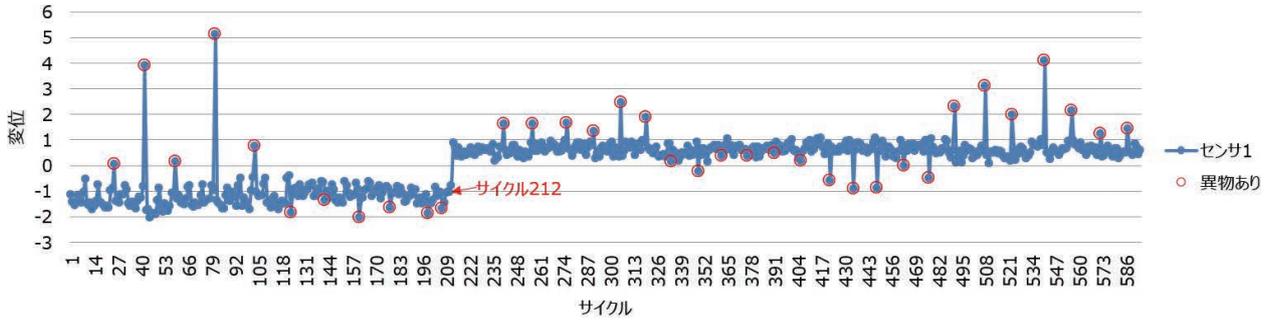


図2 カッター高さの変動 (センサ1)

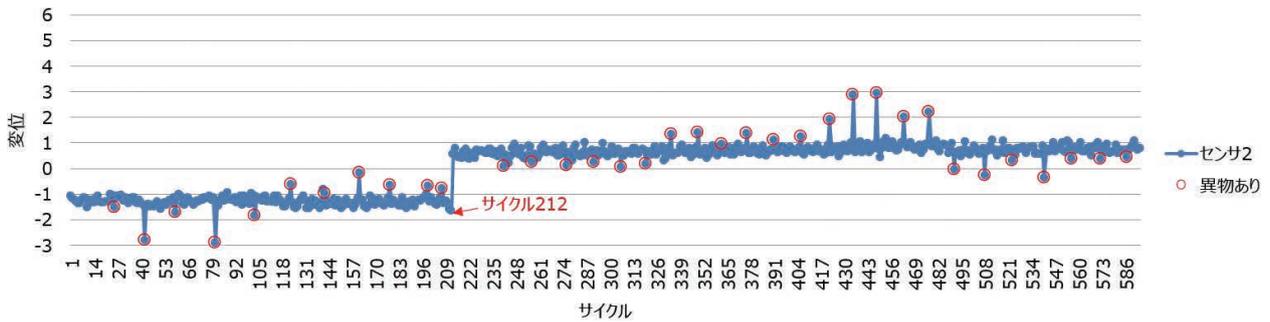


図3 カッター高さの変動 (センサ2)

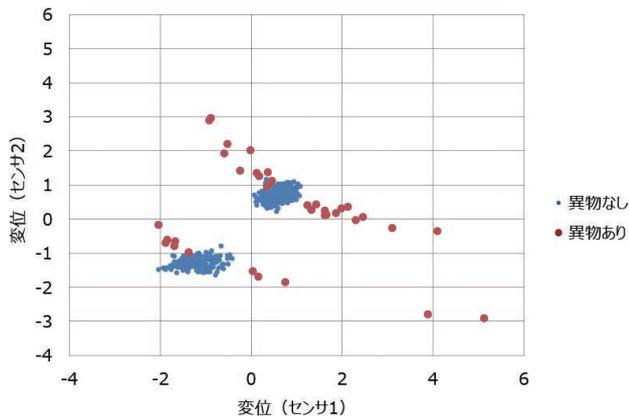


図4 センサ1とセンサ2のデータの散布図

本稿が対象とするAIは、加工の直後に、その加工によって良品・不良品のどちらになるのかを判定することを目的とする。そのためには、加工の後に検査工程を置いて

判定するのではなく、加工時のデータだけから判定する。

具体的にこのAIで解決したい課題は、図2、図3のようなケースであり、途中で大きな変化が発生している。包装機用AIを開発する際に、このケースに対応する必要があった。図2、図3のデータは、時間の経過と共に、測定した値が記録されている。図2において、サイクル212までは、変位が-2から0の間で推移しているのに対して、サイクル212より後は、変位が0から1の間で推移しているため、このタイミングで、大きな変化があったことが見受けられる。図3においても、同様にして、サイクル212のタイミングで大きな変化が見受けられる。

異常検知の従来手法として、バッチ学習の一種であるMT法⁵⁾を使った結果を、図5に示す。学習データとしてサイクル1~24のサンプルを使っている。図5の縦軸は、マハラノビス距離 (MD: Mahalanobis' Distance) である。マハラノビス距離については、3.2.1で説明する。

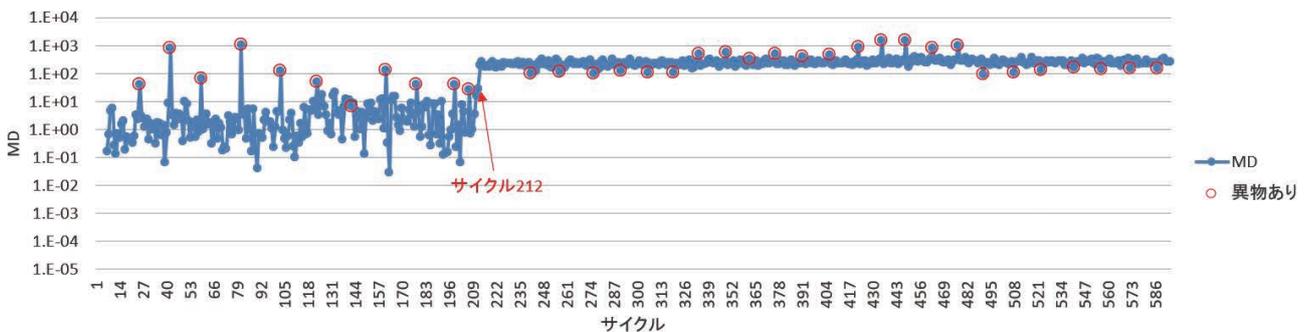


図5 従来の方法によるマハラノビス距離の計算結果

この方法では、サイクル212までで、異物ありと異物なしのサンプルについてMDの値を比べると、異物ありの場合はMDが高いことがわかる。サイクル212までは、MDが1.E+02から1.E+03のあたりであれば、異物ありのサンプルである。サイクル212より後は、異物の有無に関わらず、1.E+02から1.E+03のあたりになっている。例えば、「1.E+01以上なら、不良品と判定」というルールにした場合、サイクル212までは、異物なしのサンプルの多くは「良品」と判定されるが、サイクル212より後は、すべての異物なしのサンプルが不良品と判定されることになり、判定の仕組みとして利用できない。

なお、本例では、機械学習アルゴリズムとしてはMT法を用いたが、問題はバッチ学習というフローに起因して起きているものであり、他の機械学習アルゴリズムでもバッチ学習を用いるならば同様の問題が生じる。

図2、図3のようなケースへの対応としては、まず、サイクル212よりも後に変化が起きたことを、自動で検知することが課題である。さらに、検知をした後に速やかに新しい基準による判定を開始することも課題である。また、包装機は1サイクルが0.1～1秒のオーダーであるため、計算量が少なく、高速で計算できるようにすることも課題である。

3. 提案手法

提案する方法は、課題としている変化を検知した時には、過去の基準を破棄して新たに学習を始める方法とした。また、逐次学習をベースとすることによって、変化を検知した後に速やかに新しい基準による判定を開始できるようにすると共に、高速の計算の課題にも対応することにした。これらにより、前章で示した課題の解決を図っている。

3.1 連を用いた学習フロー

課題の解決には、まず、変化のタイミングを自動で判断する方法が必要になる。この方法として、管理図で「連(れん)」⁶⁾と呼ばれる指標を応用することにした。

「連」とは、管理している値が、中心値を0として、プラス側あるいはマイナス側に連続して、一定回数出現した場合に「異常」と見なす指標である。JIS⁶⁾では、出現回数が9回となった時を連として定めている。連続して9回プラス側の値が出現した場合、この場合が発生する確率は、

$$0.2\% \approx (1/2)^9 \tag{1}$$

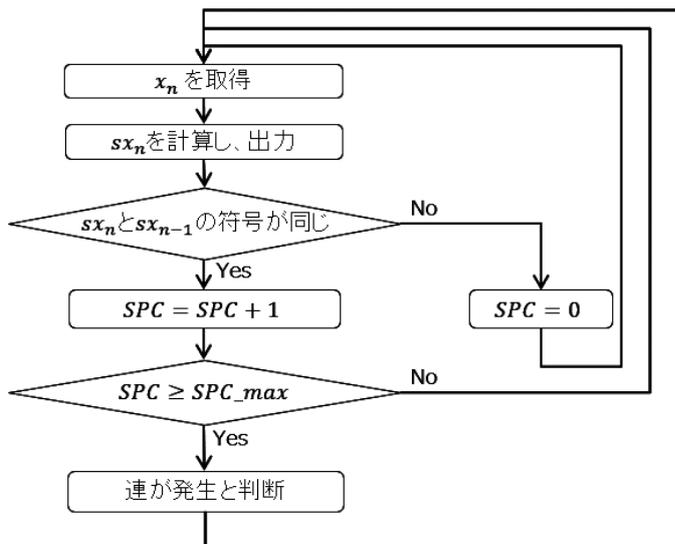
である。このような小さな確率で発生する状態が発生した場合に、偶然その事象が発生したのではなく、「異常なことが起きているので、偶然では起きにくいことが起きている」とみなすのが、連の考え方である。

連の発生を判断するためのフロー図を図6に示す。図6の sx_n とは、新しく得られた x_n というデータに対し、フローの運用開始前に準備したデータの平均値(Ave)と、標準偏差(Std)から求める値である。この処理は「標準化⁷⁾」と呼ばれる。

$$sx_n = \frac{x_n - Ave}{Std} \tag{2}$$

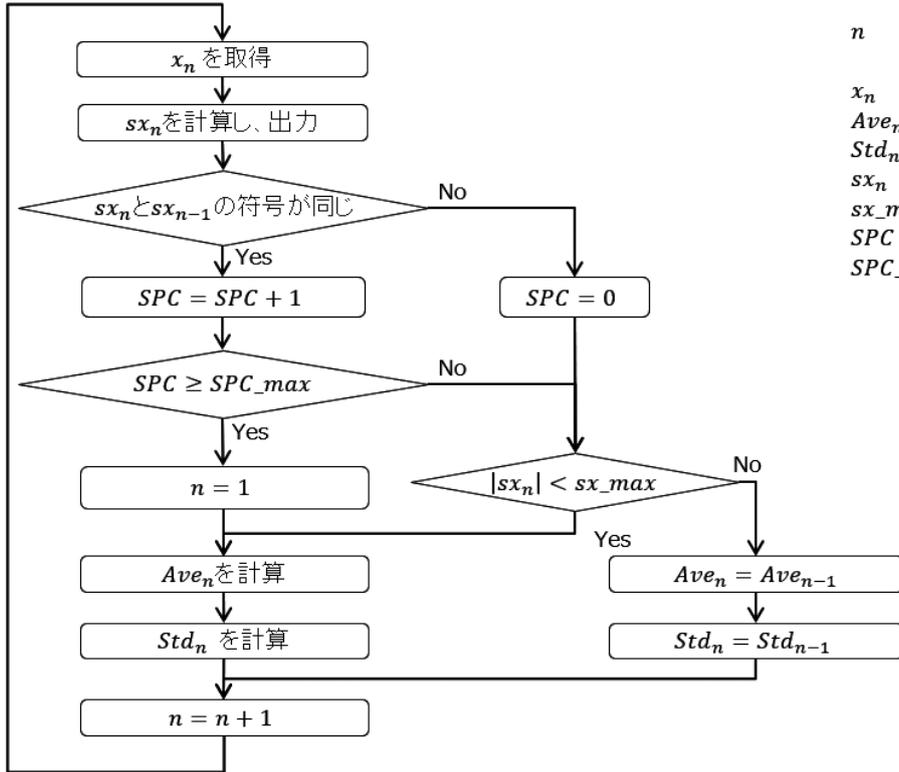
なお、このフローの中では、 sx_n は、連の発生を抽出するために必要な値として用いているが、 sx_n は、平均値(Ave)から離れるほど絶対値が大きくなる性質があり、そのサンプルの平均値からの逸脱度を評価するための指標としても、用いることができる。

提案する方法では、「連の発生」を「変化の発生」とみなす。連が発生した時に、過去のデータを破棄して、新たに学習を始める方法に利用している。新たに学習を始めるための処理のフローを、図7に示す。



- n : データの番号
- x_n : n 番目のデータ
- sx_n : x_n を標準化した値
- SPC : 同一の符号が続いた回数
- SPC_max : 連の管理値

図6 連を用いた学習のフロー図



- n : データの番号
再学習する時は1に戻る
- x_n : n 番目のデータ
- Ave_n : x_1 から x_n までの平均値
- Std_n : x_1 から x_n までの標準偏差
- sx_n : x_n を標準化した値
- sx_max : Sx_n の管理値。3が推奨値
- SPC : 連の数
- SPC_max : 連の管理値

図7 連が発生した場合の処理を含むフロー図

「 $SPC \geq SPC_max$ 」というステップによって、連の成立を判定する。連が成立した場合、「 $n=1$ 」となるが、こうすることで、過去の学習を破棄して、新たに逐次学習が始まるようにしている。

「 $|sx_n| < sx_max$ 」というステップは、得られた sx_n が外れ値かどうかを判断するためのステップである。標準化したデータを外れ値と判断するための基準は、3シグマのルール⁶⁾を参考にして、3を推奨値とした。外れ値と判断された場合、平均値と標準偏差の値を再計算しないようにしている。こうすることで、外れ値の影響を受けにくい方法にした。

平均値を逐次学習で求める式は、式(3)である。 $n-1$ 番目までの平均値 Ave_{n-1} と n 番目のサンプル値 x_n を使って、 n 番目までの平均値 Ave_n を求める式になっている。式(3)は、一般に知られている平均値の計算式から、逐次学習の式を導いている。 $Ave_0 = 0$ である。

$$\begin{aligned}
 Ave_n &= \frac{1}{n} \sum_1^n x_i \\
 &= \frac{x_n}{n} + \frac{1}{n} \sum_1^{n-1} x_i \\
 &= \frac{x_n}{n} + \frac{n-1}{n} \cdot \frac{1}{n-1} \sum_1^{n-1} x_i \\
 &= \frac{x_n}{n} + \frac{n-1}{n} Ave_{n-1}
 \end{aligned} \tag{3}$$

標準偏差を逐次学習で求める式の導出の前に、共分散を逐次学習で求める式を導出する。変数 l と変数 m について、 n 番目までのサンプルまでの共分散を $Cov_n^{l,m}$ と記述する。 $Cov_0^{l,m} = 0$ である。一般に知られている共分散の計算式から逐次学習の式を導くと、式(5)となる。導出を下記に示す。

まず、 $Cov_n^{l,m}$ の一般に知られている計算式は、式(4)である。

$$Cov_n^{l,m} = \frac{1}{n} \sum_1^n (x_i^l - Ave_n^l)(x_i^m - Ave_n^m) \tag{4}$$

ここで、

$$\begin{aligned}
 &\sum_1^n (x_i^l - Ave_n^l)(x_i^m - Ave_n^m) \\
 &= \sum_1^n \left(x_i^l - \left(\frac{x_n^l}{n} + \frac{n-1}{n} Ave_{n-1}^l \right) \right) \left(x_i^m - \left(\frac{x_n^m}{n} + \frac{n-1}{n} Ave_{n-1}^m \right) \right) \\
 &= \sum_1^{n-1} \left(x_i^l - Ave_{n-1}^l + \frac{1}{n} (Ave_{n-1}^l - x_n^l) \right) \left(x_i^m - Ave_{n-1}^m + \frac{1}{n} (Ave_{n-1}^m - x_n^m) \right) \\
 &\quad + \left(\frac{n-1}{n} (x_n^l - Ave_{n-1}^l) \right) \left(\frac{n-1}{n} (x_n^m - Ave_{n-1}^m) \right) \\
 &= (n-1) \left(Cov_{n-1}^{l,m} + \frac{(x_n^l - Ave_{n-1}^l)(x_n^m - Ave_{n-1}^m)}{n} \right)
 \end{aligned}$$

である。よって、

$$Cov_n^{l,m} = \frac{n-1}{n} \left(Cov_{n-1}^{l,m} + \frac{(x_n^l - Ave_{n-1}^l)(x_n^m - Ave_{n-1}^m)}{n} \right) \quad (5)$$

となり、共分散を求める逐次学習の計算式が求まる。

分散は、共分散の式において $m=l$ の場合である。n 番目のサンプルまでの分散を Var_n と記述した時に、 Var_n を逐次学習で計算する式は、式(5)より、

$$Var_n = \frac{n-1}{n} \left(Var_{n-1} + \frac{(x_n - Ave_{n-1})^2}{n} \right) \quad (6)$$

である。 $Var_0 = 0$ である。

標準偏差は、分散の平方根である。n 番目のサンプルまでの標準偏差を Std_n と記述した時に、 Std_n を逐次学習で計算する式は、式(6)より、

$$Std_n = \sqrt{\frac{n-1}{n} \left(Std_{n-1}^2 + \frac{(x_n - Ave_{n-1})^2}{n} \right)} \quad (7)$$

である。 $Std_0 = 0$ である。

データを逐次的に標準化⁷⁾する方法は、逐次学習で求め

た平均値と標準偏差を用いると、式(8)になる。ここで、 sx_n とは、標準化された n 番目のサンプル値である。

$$sx_n = \frac{x_n - Ave_{n-1}}{Std_{n-1}} \quad (8)$$

3.2 変数が複数ある場合の方法

前節は、変数が1つの場合の方法である。これを複数の場合に拡張した場合のフロー図が、図8である。

3.2.1 マハラノビス距離

前節では、平均値からの逸脱度を示す指標と、外れ値の影響を受けにくい方法にするための値として、 sx_n という指標を使っている。変数が複数ある場合に、 sx_n の役割を持つ値として、提案手法では、マハラノビス距離を使用している。

マハラノビス距離とは、例えば、図9の矢印の長さであり、基準点と各サンプルの距離を表している。図9では、例として異物なしのサンプルが集まっている領域の1点を基準点としているが、実際の計算では、学習に使用したサンプルにおける各変数の平均値を基準点の座標とする。

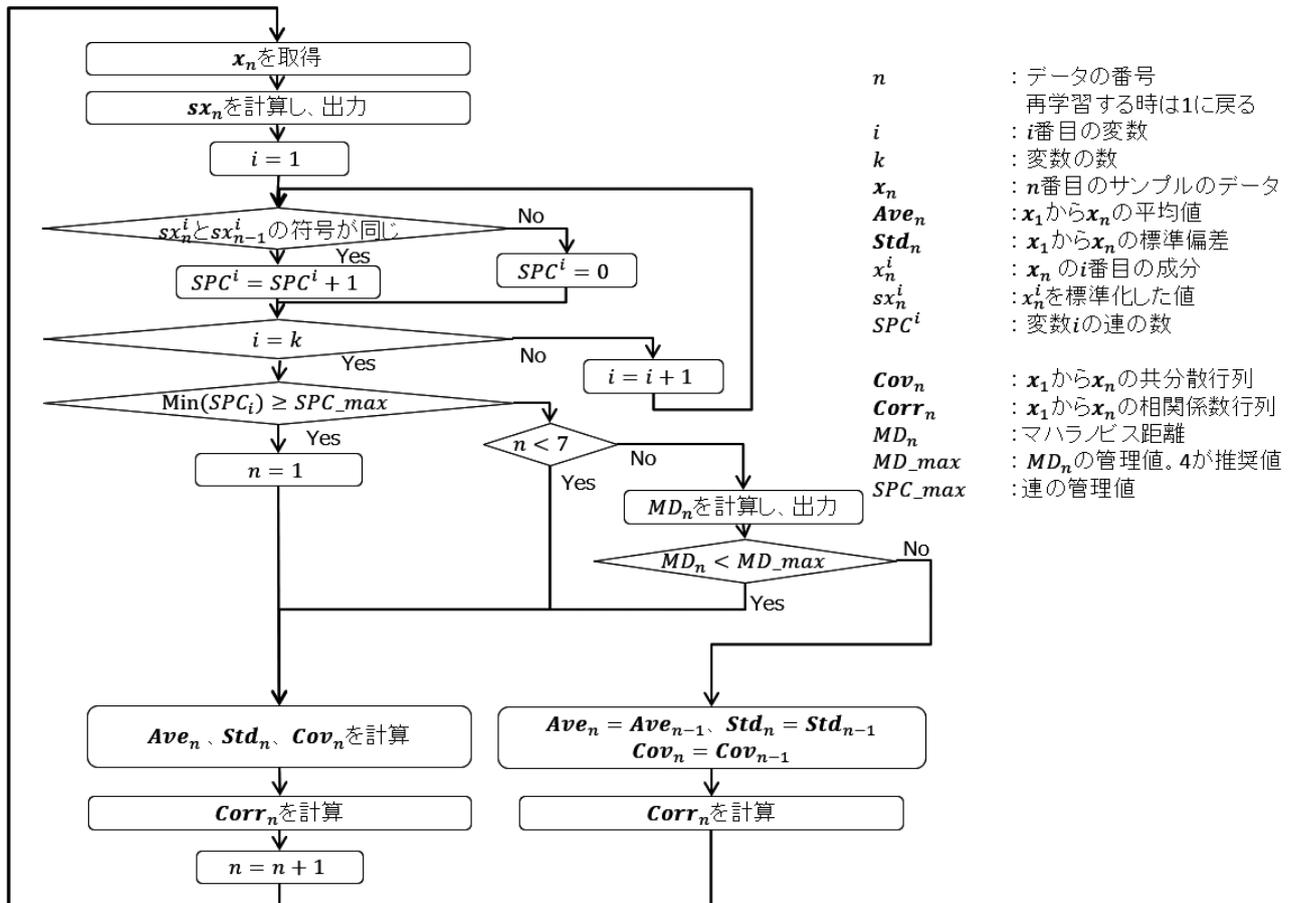


図8 変数が複数ある場合のフロー図

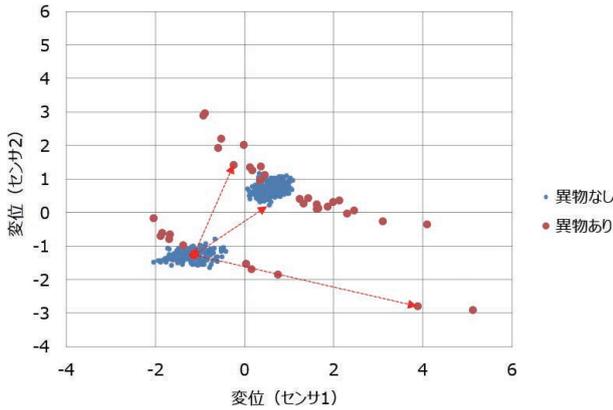


図9 マハラノビス距離のイメージ図

マハラノビス距離を、本手法で使用する場合、まず、変数が1つの時と同じように、平均値と標準偏差を逐次学習する必要がある。また、共分散も逐次学習する必要がある。共分散を逐次学習で計算する式は、既出の式(5)である。

共分散から、相関係数 $Corr_n^{l,m}$ を求める式は、式(9)である。

$$Corr_n^{l,m} = \frac{Cov_n^{l,m}}{Std_n^l Std_n^m} \quad (9)$$

マハラノビス距離を求める式として、変数の数が変化しても管理値を変えないことが製造現場で使用する際に便利であることを考慮して、ここでは、品質工学のMT法における定義式⁵⁾を採用することにした。マハラノビス距離(MD)の計算式を、式(10)に示す。ここで、 \mathbf{sx}_n とは、 n 番目のサンプルのデータであり、ベクトル \mathbf{x}_n を各変数について、標準化の処理をしたベクトルとして表している。なお、 \mathbf{x}_n ではなく \mathbf{sx}_n を使用すると、共分散行列は相関係数行列になる⁸⁾ため、 $n-1$ 番目のサンプルまでのデータを使って作成した相関係数行列 $Corr_{n-1}$ を使用している。

$$MD_n = \frac{1}{k} (\mathbf{sx}_n^T Corr_{n-1}^{-1} \mathbf{sx}_n) \quad (10)$$

2変数の場合、式(10)に含まれる逆行列の部分は、

$$Corr_{n-1}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & Corr_{n-1}^{1,2} \\ Corr_{n-1}^{1,2} & 1 \end{pmatrix}^{-1} \quad (11)$$

となる。

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}^{-1} = \frac{1}{ad-bc} \begin{pmatrix} d & -b \\ -c & a \end{pmatrix} \quad (12)$$

の公式を使うと、

$$Corr_{n-1}^{-1} = \frac{1}{1-Corr_{n-1}^{1,2}{}^2} \begin{pmatrix} 1 & -Corr_{n-1}^{1,2} \\ -Corr_{n-1}^{1,2} & 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

と書き下すことができる。

図2、図3のデータは2変数の場合であり、4章における提案手法の実験では、この公式を使って逆行列の部分を実算している。

なお、 $n \leq 3$ では、以下に示す理由により、マハラノビス距離は計算できない。

- $n = 1$ の時 前の周期のデータがない。
- $n = 2$ の時 前の周期までのデータが1サンプル分となり、相関係数が計算できない。
- $n = 3$ の時 前の周期までのデータが2サンプル分となり、相関係数は1になるので、逆行列が計算できない。

よって、原理的には $n \geq 4$ ならば、マハラノビス距離が計算できるのであるが、本手法では、 $n \geq 7$ の場合にマハラノビス距離を計算するアルゴリズムとしており、フロー図の中で「 $n < 7$ 」と表現している。この条件は、サンプル数が少ないと、標準偏差の推定値が過小に計算される可能性があることから定めている。標準偏差が小さいと、新しいサンプルが「外れ値」と判定されやすくなる。「外れ値」と判定されると、そのサンプルのデータは、逐次学習に利用されないアルゴリズムにしているため、いつまでも過小に計算された標準偏差が使われ続け、本当は外れ値ではないサンプルが「外れ値」と判定され続けてしまう可能性がある。

この点を考慮して、フロー図では、「 $n < 4$ 」ではなく、「 $n < 7$ 」と置いているが、これは仮の値である。この値は、小さいと、外れ値ではないサンプルを「外れ値」と判定する誤りが起きやすくなる。一方で、大きいと、マハラノビス距離が計算されないサンプルの数が増えやすくなるリスクがある。

3.2.2 変数が複数の場合の連

前節のように、1変数の場合は、「標準化した値がプラス側で連続する。または、標準化した値がマイナス側で連続する。」というルールで連が定義されている。

提案手法では、変数が複数の場合の連を定義した。まず、それぞれの変数に対して個別に連を判断し、いずれかが連になった場合に、複数の変数における連として、定義することにした。この部分は、フロー図において、

$$\text{Min}(SPC_i) \geq SPC_max$$

と記した部分が相当する。

3.2.3 外れ値の判定の方法

外れ値の判定については、多変数の外れ値を判定する指標として、マハラノビス距離で行うこととした。判定値は、MT法における判定基準⁹⁾を参考にして、4を推奨値

とした。外れ値と判定されたサンプルのデータは、逐次学習に含まないことで、外れ値の影響を受けにくい方法にした。

4. 実験

2章で示した包装機のデータに対して、提案手法を適用した結果を述べる。

4.1 連の管理値の調整

図10は、図2のデータ x_n に、平均値 Ave_n の計算結果を赤の点で重ね合わせたグラフである。平均値 Ave_n は、サイクル212の後に、大きく変化しており、これは狙い通りの計算結果となった。しかし、図10に黄色の点線で囲んだ部分のように、サイクル212の後以外の部分でも、平均値が非連続的に変化している部分が散見された。サイクル212以外の変化については、比較的短期間のみの変化となっている。

ここで、提案手法の利用方法としては、比較的短期間の変化も検知する方法と、比較的短期間の変化は検知しない方法が考えられる。

2章で示した課題から要請されるのは、後者であるため、以降、比較的短期間の変化は検知しない方法を用いる。そのためには、連を9よりも長めにした方が良くと考えられる。

図11は、試行として、連の管理値を25に変更した場合

である。この変更をすれば、平均値が非連続的に大きく変化するのは、サイクル212の後だけになった。

本稿で明らかになったのは、連の管理値の調整が重要なことである。この管理値は、小さくすれば、平均値の非連続的な変化の頻度が増加し、変化の直後の「 $n < 7$ 」の期間は判定不能となるため、判定不能なサンプル（= $6 \times$ 変化点の数）が増加する。一方で、この管理値を大きくすれば、連の成立を判断するために必要なサンプル数（= 連の管理値 \times 変化点の数）が多くなり、そのサンプルについては、変化前の基準で扱われるため、適切な判定がされない。この関係を試算すると、表1となる。判定不能なサンプルと、変化前の基準が適用されるサンプルの合計値は、表1の中では、連の管理値が25の 때가最も少ない。このことから、連の管理値は、大き過ぎず、かつ、小さ過ぎないように調整する必要があることがわかる。

表1 判定不能なサンプルと、変化前の基準が適用されるサンプルの数

連の管理値	変化点の数	判定不能なサンプル	変化前の基準が適用されるサンプル	合計
9	7	42	63	105
25	1	6	25	31
50	1	6	50	56
75	1	6	75	81

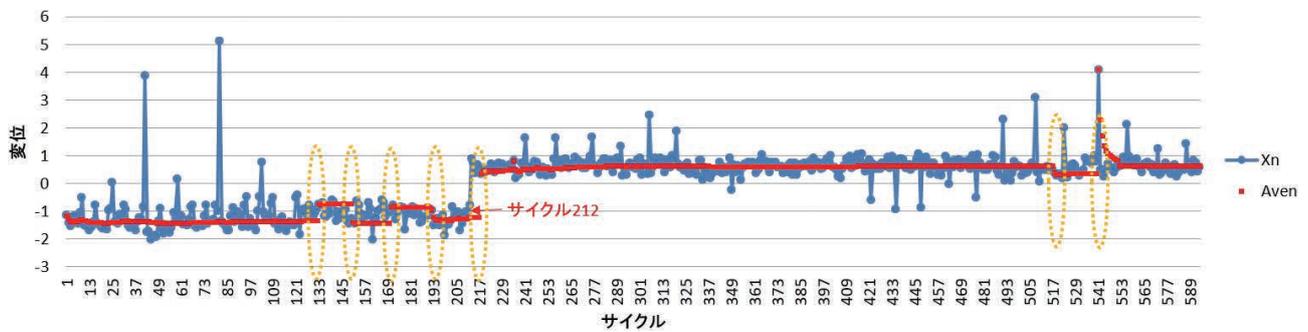


図10 連の管理値が9の場合における平均値の計算結果

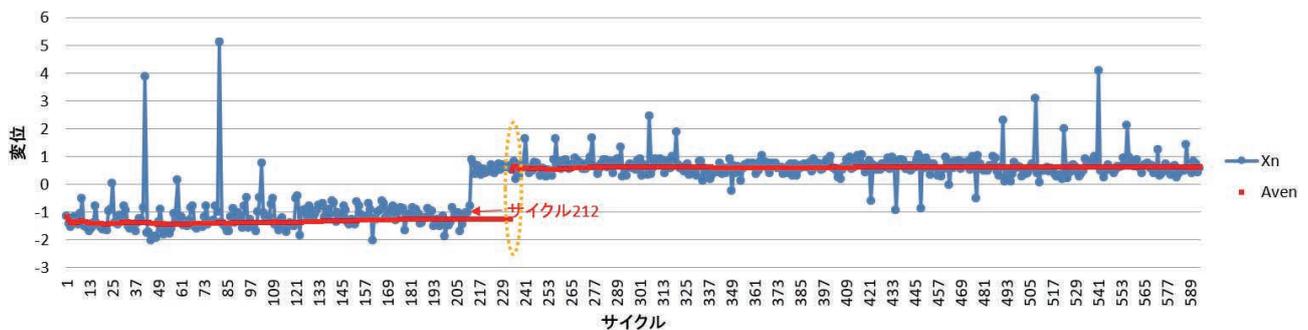


図11 連の管理値が25の場合における平均値の計算結果

4.2 従来手法との結果の比較

提案手法を実施し、従来手法とも比較した。比較対象とした従来手法は、以下に、「バッチ学習」と「逐次学習」と呼ぶ2種類の方法である。いずれもマハラノビス距離MDを計算する点は共通している。

提案手法では、連の判定値は4.1の結果を元にして、25に設定して実行している。

バッチ学習は、1～24サイクルのサンプルを学習用データし、これらのデータの平均値、標準偏差、相関係数を元にして、MDを計算する。

逐次学習は、1サイクル目から平均値、標準偏差、相関係数を順次計算して更新し、それらによりMDを計算する方法である。提案手法との違いは、連が発生しても「n=1」とはしない点である。

結果を図12に示す。「異物なし」とは、異物を噛み込ませていないサンプルのグループである。「異物あり」とは異物を噛み込ませたサンプルのグループである。これらのグループについて、MDの分布を比較した。バッチ学習と、逐次学習では、異物ありとなしの分布が大きく重なるのに対して、提案手法では、分布が比較的分かれている様子がわかる。

図13は、偽陽性率であり、異物ありのサンプルのマハラノビス距離MDの最小値を基準とした場合に、異物なしのサンプルで、その値よりも高くなるサンプルの割合を表している。つまり、異物ありのサンプルは、確実に不良品と判定されるように基準を決めた場合の誤判別率である。提案手法は18%であり、従来手法は、いずれも約70%であることから、約50%改善できることが確認できた。よって、図2、図3で示したデータの変動に対して、提案手法が有効であることを確認できた。

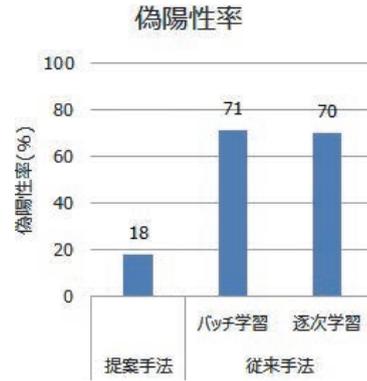


図13 提案手法と従来手法における偽陽性率の比較

5. むすび

製造現場におけるデータには、急激な変化が起きることがあり、その対応は、製造現場における機械学習適用の課題の一つである。

本稿では、その課題に対して、逐次学習のアルゴリズムや、管理図における安定状態の指標のアイデアを応用することで、変化に自動的に追従して対応することができる異常判定のアルゴリズムを提案した。包装機を使った実験データに対して、このアルゴリズムを適用し、提案手法による偽陽性率が18%であるのに対し、従来手法として比較した2種類は、いずれも約70%であり、約50%改善できることが確認できた。

本手法を実施する場合は、連の長さの設定がユーザに委ねられている。本手法では、変動の検知が連を使って自動に行われ、学習データの取得が逐次学習によって自動に行われるが、この調整についても、対象とする現象の性質に合わせて、自動的に設定することが課題である。

また、本手法は、急激な変化が時々発生するものの、その前後では一定期間にわたって、平均的な値が維持される状況を想定している。一定期間にわたって平均的な値が維持されず、常に変化を続けているような現象については、

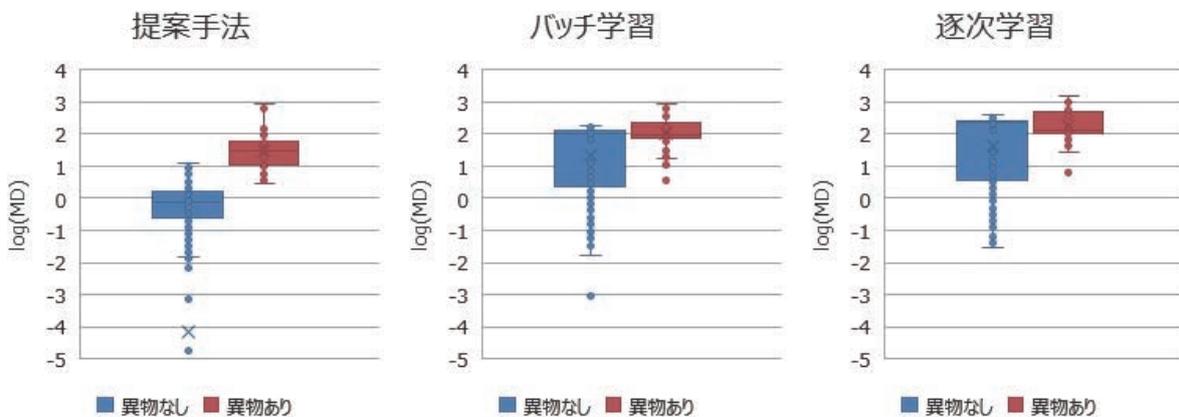


図12 提案手法と従来手法におけるマハラノビス距離の比較

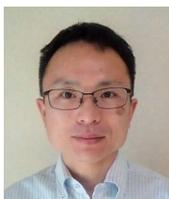
本手法は対応できない。このような現象については、別のアルゴリズムを考案することが課題である。

今後は、上記の残された課題も踏まえ、この技術をオムロンのコントローラに取り入れる等、顧客課題解決への貢献を検討していく。

参考文献

- 1) オムロン株式会社. “ソリューション AI.” <https://www.fa.omron.co.jp/solution/technology-trends/ai/> (Accessed: Dec. 1, 2022).
- 2) 溝口理一郎, 石田亨, 人工知能, オーム社, 2013.
- 3) 海野裕也, 岡野原大輔, 得居誠也, 徳永拓之, オンライン機械学習, 講談社, 2015.
- 4) 坂元佑気, 中村芳行, 杉岡真行, “リアルタイム処理可能な特徴量を用いた機械学習によるねじ締め底付き不良検知の事例,” *OMRON TECHNICS*, vol. 55, no. 1, pp. 35-44, 2023.
- 5) 宮川雅巳, 永田靖, タグチメソッドの探究, 日科技連出版社, 2022.
- 6) 日本規格協会, *JIS ハンドブック 品質管理*, 日本規格協会, 2022.
- 7) 荻原大, データ分析の進め方及び AI・機械学習導入の指南, 情報機構, 2020.
- 8) 涌井良幸, 涌井貞美, 図解でわかる多変量解析, 日本実業出版社, 2001.
- 9) 立林和夫, 入門 MT システム, 日科技連出版社, 2008.

執筆者紹介



杉原 哲朗 SUGIHARA Tetsuro
インダストリアルオートメーションビジネス
カンパニー
技術開発本部 第1技術部
専門：データサイエンス、品質管理

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

FEM 解析と逆問題的アプローチを使ったバラツキに起因する製品特性挙動の明確化

夏田 遥介

設計段階で想定していなかった問題が、試作段階で初めて問題となって発生することがある。その要因の1つに、実機評価で制御／観測困難なバラツキによる影響が挙げられる。バラツキの振れ方によって出力値やその変化特性が一定にならない現象は、ロジックをもとに検証していく“順問題的アプローチ”で真のメカニズムを捉えることができない。そのため、“逆問題的アプローチ”という多数の評価データから推論・検証するアプローチに着目し、熱衝撃下における 3D ビジョンセンサの測距値変動を題材に、その有効性を検証した。

本検証では、まず非線形接触を考慮した熱応力解析により、熱衝撃下における力学的挙動と測距値変動量の推移を再現した。次に、入力値をバラツキ範囲で変動させて解析した多数のデータから、測距値変動量の傾向やバラツキの影響度を可視化・分析した。その結果、測距値変動に与える本質的な要因と熱衝撃下における締結部の挙動を明確化できた。また、実験計画法に適用型実験計画を使用することで、更に検証の効率化が可能なことを示し、逆問題的アプローチが開発期間の短縮や製品の価値創出に寄与する手法であることを確認した。

Clarification for Output Characteristic Causing by Uncontrollable Input Variable Using FEM Analysis and Inverse-Problem Approach

NATSUDA Yosuke

Defects that were not anticipated in the design stage may occur at the prototyping stage. One of the reasons for this is the variability that is difficult to control and observe in the experience. If the output value or its change characteristics are not constant due to the variation, the true mechanism cannot be considered by the “Forward-problem approach” that verifies it based on logic. Therefore, we focused on the “Inverse-problem approach” that infers and verifies from a large number of evaluation data, and verified its effectiveness based on the variation of the distance measurement value of the 3D vision sensor under thermal shock. In this verification, we first reproduced the mechanical behavior under thermal shock and the change in the amount of distance measurement value variation by thermal stress analysis considering nonlinear contact. Next, we visualized the output trends and influence of the factors by a large number of analysis data giving input variations. As a result, we found the essential factors and logic that affect the distance measurement value. In addition, we showed that more efficient verification is possible by using an adaptive DOE, and confirmed that the Inverse-problem approach is a method that contributes to shortening the development period and creating value of the product.

1. まえがき

当初想定された技術課題を設計上流で解決しても、試作評価時に想定外の問題が生じ、製品の要求仕様を満たせないことがある。その1つの要因として、実機評価時のバラツキが挙げられる。実機の評価系では制御／観測が困難な

ランダムに発生するバラツキ（寸法・物性バラツキ、組立バラツキ、測定環境など）によって入出力の因果関係が追えず、評価結果の再現性を得られない。そのため、問題の背景にあるロジックを設計者が推定しても、意図した条件下での実機評価および評価結果が得られず、ロジックに対する適切な妥当性検証が実施できない。特に複数のバラツキが影響し合う場合、実機評価結果から傾向を確認するこ

Contact : NATSUDA Yosuke yosuke.natsuda@omron.com

とは更に難しく、本質的な課題対策ができなくなってしまう。

前述の様なケースにおいて、少しでも論理的にメカニズムを解明するために FEM 解析を併用することが多いが、一般的な FEM 解析においては、モデル作成段階でメカニズムの仮説を立てながら構築する、いわゆる“順問題的アプローチ”による検証を実行することになる。しかしながら、前述の通り、ランダム性により挙動を特定しきれない現象に対しては、一部の現象を再現しているにすぎず、真のメカニズム再現には至らない。その結果、誤った理解・判断となり大きな手戻りや市場問題を招く可能性がある。

そこで今回、ランダム性が強く、メカニズム推定が非常に難しい課題に対して“逆問題的アプローチ”の活用を試みる。逆問題的アプローチは収集した多数の評価データを俯瞰した上で、データ起点でロジック推定する考え方であり、検証の網羅性や確度を担保しながら効率的に検証をすることができる。世の中には FEM 解析と逆アプローチで検証する事例は多数報告されているが^{1,2)}、ランダム性の強いバラツキ全体の影響を解析した事例は公開されておらず、今回図 1 に示す 3D ビジョンセンサの熱衝撃課題を題材に本アプローチの試行を実施した。



図 1 3D ビジョンセンサ

2. 熱衝撃による測距値変動と発生要因

2.1 異材締結を起因とした 3D ビジョンセンサの課題

3D ビジョンセンサはパターンを対象物に投影して画像情報を取得・解析し、図 2 で示すプロジェクタ（投影）／カメラ（受光）モジュールの対応関係を特定することで測距値を算出している³⁾。また、測距原理や製品の要求制度から見積ると、 μm オーダの構造的変動であっても、数 mm オーダのセンシング特性に影響する。特に、周囲環境の温度変化による膨張・収縮が精度へ与える影響は大きく、ヒートショックのような急激かつ大幅な温度変動に対する測距精度の安定性確保のため、図 3 に示すような樹脂とアルミ合金のボルト締結を採用している。また、使用するモジュールの位置決め精度向上のため、位置決めピンを

筐体側に設置する構造を採用している。

しかし、ヒートショックを想定した評価（以下、熱衝撃試験）において、初期サイクルで許容値を超える測距値変動が生じ、早急な対策が必要となった。まず原因分析のため、試験後の製品状態を確認すると、モジュール固定自体には問題無いレベルだが、樹脂とアルミ合金を締結している M2 ボルトのゆるみが確認された。一般に熱負荷を受ける異材締結では、その締結性能が低下しやすいことが知られている。既往の研究では、異材締結部に繰り返し熱負荷を与えた場合、同材料で構成される締結体よりゆるみやすいことが実測・解析の双方から確認されている^{4,5)}。そのため、3D ビジョンセンサのように構造物の微小変形や幾何配置が出力特性に影響する機器では、異材締結が温度変化時に影響を与えると考えられる。

しかし、同一サンプル／同一条件下でも測距値変動量が大きくバラつくことが確認され、再現性のある評価の実施ができなかった。その結果、ゆるみが測距値にどのように影響するのか、また、ゆるみ以外に測距値に影響を与える因子があるか等、十分な検証結果を得るには至らなかった。

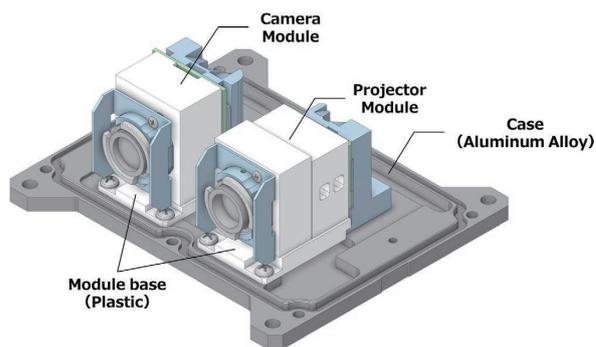


図 2 3D ビジョンセンサの基本構造

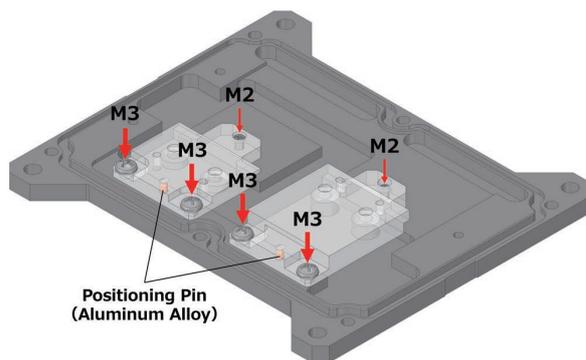


図 3 各光学モジュールの固定方法

2.2 熱負荷による締結力の変化

測距値変動の挙動明確化に向けて、まずは実際に確認されたボルトのゆるみが重要と考える。熱負荷時のゆるみの要因として、締結力低下による各接触面（ネジ部／座面

部／被締結体表面) のすべりが挙げられる。そのため、簡単な力学モデルで熱負荷時の締結状態を表し、その傾向を推定する。

まず、接触面の状態を表す式として、クーロンの摩擦法則が知られている。クーロン摩擦では、作用する力に対して同等の静止摩擦力が反対方向に生じることで、力の釣合い(静止)状態を保つとされる。また、作用する力が閾値を越えると、一定の動摩擦力を伴いながらすべり状態へ移行する。すべり状態へ移行する単位面積あたりの力を限界静止摩擦応力 σ_{lim} とすると、(1)式のように表すことができる。

$$\sigma_{lim} = \mu(P + \Delta P) > 0 \quad (1)$$

μ は接触面の静止摩擦係数、 $P + \Delta P$ は各時点の接触面圧であり、 P は常温時の接触面圧、 ΔP は温度変化による接触面圧増分である。締結体において、 P および ΔP はその定義上、ボルトに発生する軸力 F_B および増分値 ΔF_B と比例関係があると推定できる。そのため、組立(常温)時にゆるみが発生しない限り、 ΔF_B が摩擦状態を決めるうえで重要になる。ここで、実際の締結状態について検討するため、ビジョン 3D センサの異材締結部の構成を図 4 に示す。なお、各部材の物性値から、Material-I、Material-II およびボルトの線膨張係数 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_B$ の関係は $\alpha_1 \gg \alpha_2, \alpha_B$ となる。組立時に締付トルクを与えるとボルトには軸力 F_B が発生する。この状態で温度変化を与えると、各部材は寸法／物性に従った熱膨張を開始する。しかし、各部材の熱膨張量が異なるため、結果的に自由な熱膨張を互いに妨げ、 ΔF_B が発生する。

熱膨張量の差による ΔF_B を推定するため、図 5 に異材締結部を簡略化した力学モデルを示す。ボルト軸方向について考えると、各部材は図に示すような膨張量となる。しかし、座面で膨張が妨げられるため、Material-I と Material-II の変位量の和とボルトの変位量が一致した状態で力が釣合う。このとき、温度変化量 ΔT に応じてボルトには熱応力による ΔF_B が生じる。 ΔF_B は軸方向の釣合い式を解くことで、(2)、(3)式の様に近似できる。

$$\Delta F_B (\propto \Delta P) = K(\alpha_1 L_1 + \alpha_2 L_2 - \alpha_B L_B) \Delta T \quad (2)$$

$$K = \frac{K_1 K_2 K_B}{K_1 K_2 + K_2 K_B + K_B K_1} \quad (3)$$

(2)式の $K_i (i=1, 2, B)$ は材料 I、II およびボルトの軸方向剛性であり、 $E_i A_i / L_i$ を置き換えた値である。なお、 E_i は材料 i のヤング率、 A_i は材料 i の断面積、 L_i は材料 i の部材長さである。(2)式から、 ΔF_B は低温時に負の値となり、ボルトの軸力および接触面圧が減少する。

一方、各接触面ではせん断応力が発生し、すべりを引き起こす力の主要因となる。せん断応力は ΔF_B と同様に熱膨張量の差の影響を受けて増減するが、その値は ΔT ではな

く、温度変化量の絶対値 $|\Delta T|$ に比例する。よって、 ΔF_B 減少による σ_{lim} の低下とせん断応力の増加が同時に進行する低温側で、各接触面のすべりおよびボルトのゆるみが生じやすい状態となり、測距値変動に寄与すると推定できる。

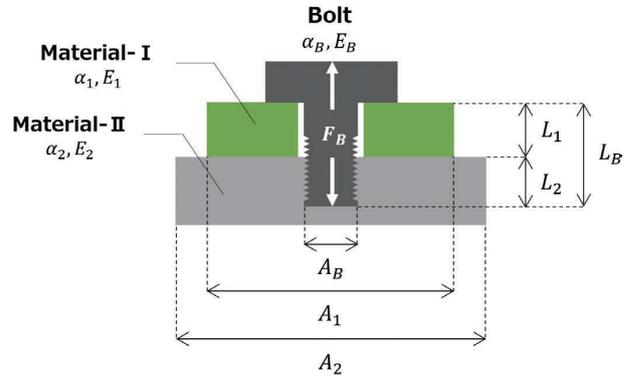


図 4 モジュールベースにおける異材締結部の構成

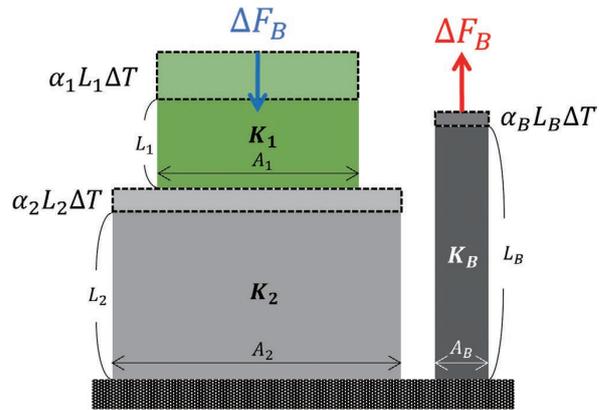


図 5 軸力増分 ΔF_B を推定する力学モデル

3. FEM 解析による異材締結部の挙動再現

3.1 解析モデルの作成

順問題・逆問題のアプローチに関わらず検証に必要となる、現象再現可能な解析モデルについて述べる。熱衝撃による締結部の挙動を再現するため、非線形接触を考慮した熱応力解析を実施した。まず、形状モデル作成のため、光学部品の固定に寄与しない部品を削除し、詳細形状は簡略化した。また、2つの光学モジュールの内、測距値変動への影響の大部分を占めるプロジェクタ側モジュールのみを解析対象とした。図 6 に、メッシュ分割したモデルを示す。

次に、境界条件について説明する。熱衝撃試験を模擬するため、図 7 で示すように基準温度で各ボルトに軸力を、軸力印加後に試験条件と同一の 10 サイクルの温度履歴を与えた。また、 F_B と締付けトルク値 T_q の関係はボルトの各寸法と摩擦係数から(4)および(5)式のように表される^{6,7)}。

$$Tq = \frac{1}{2} \left(d_2 \tan \beta + \mu_1 d_2 \sec \frac{\gamma}{2} + \mu_2 d_w \right) F_B \quad (4)$$

$$d_w = \frac{2 d_0^3 - d_i^3}{3 d_0^2 - d_i^2} \quad (5)$$

(4)式の μ_1, μ_2 は、座面およびネジ山での摩擦係数である。また、 β, γ, d_2, d_w はボルトの寸法パラメータであり、ネジのリード角、ネジ山の角度、ネジの有効径、座面摩擦の等価直径である。(5)式は座面の等価直径を導出する式であり、ボルト座面接触部の外径 d_0 と内径 d_i から求められる。上式に締付トルク値とボルト寸法、摩擦係数を代入し、M2、M3 ボルトの軸力をそれぞれ 339N、713N とした。なお、センサの測距値変動量 ΔZ は、図 8 に示すように各光学部品との幾何的な位置関係の変化によりターゲット上でのズレによって生じる。そのため、サイクル毎に取得した光学部品の変位量からターゲット上でのズレ量に換算し、ズレ量と各光学パラメータから ΔZ を算出した。

最後に、接触モデリングについて説明する。締結部の収束性悪化とモデル規模増大を防ぐため、図 9 に示すようネジ山部の詳細形状は再現せず、ネジ山相当部のみ固着、他の接触面は全てクーロン摩擦とした。また、接触アルゴリズムは収束性と精度の両立を図るため、拡張ラグランジュ法を用いた。なお、上述のモデル化および解析には AYSYS Workbench Mechanical 2021R2 を使用した。

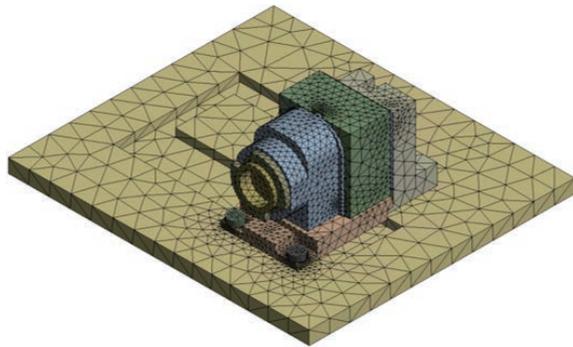


図 6 3D ビジョンセンサのメッシュ分割

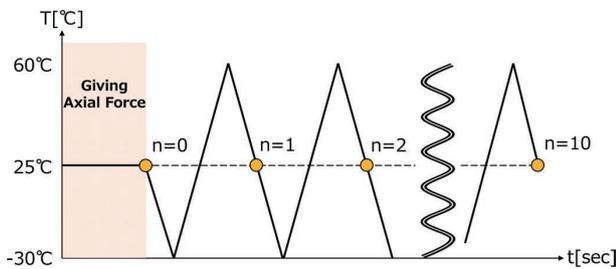


図 7 解析モデルに与える温度履歴

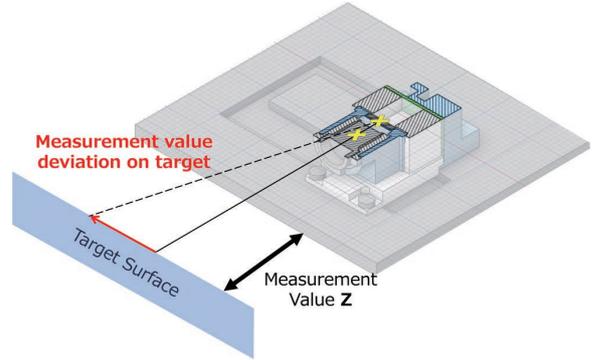


図 8 光学部品的位置関係と測距値変動量 ΔZ

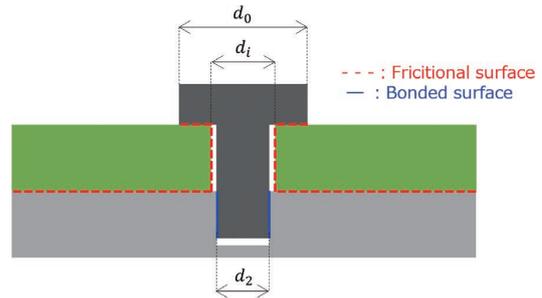


図 9 ボルト締結部の接触定義

3.2 解析結果とモデルの妥当性検証

図 10 に、実測と FEM 解析から求めたセンサの測距値変動量の絶対値 $|\Delta Z|$ を示す。実測でサンプルに共通して確認された 1 サイクル目の $|\Delta Z|$ が大きくなる傾向を、解析で捉えることができている。一方、解析では実測より過小評価する傾向にあるが、部品の温度分布／各種物性の温度依存性を考慮していないこと、固着定義によるネジ部剛性の過大評価、測距値変換式に含まれる誤差等が要因として挙げられる。

各棒グラフは 1 サイクル内における低温・高温過程での $|\Delta Z|$ を示しており、1 サイクル目では低温過程の $|\Delta Z|$ が支配的となっている。また、図 11 に樹脂ベース-アルミ合金筐体間の接触面圧を示す。各温度で接触面圧に差が生じており、低温時は高温時より 30% 程度減少していた。これは、2.2 項で述べた接触面圧増分 ΔP の減少に由来した結果であるといずれも説明できる。また、2 サイクル目以降 $|\Delta Z|$ が大きく減少する理由は、すべり発生による蓄積されたせん断応力の解放と推定される。図 12 に、サイクル間の最大せん断応力の差分を示す。1-2 サイクル間では締結部周辺の最大せん断応力が最大 1 MPa 程度減少しているが、2-3 サイクル間では 1-2 サイクル間程の顕著な低下は確認できない。よって、1 サイクル目に作用していたせん断力が 2 サイクル目以降減少したことが分かる。

上述した実測における $|\Delta Z|$ の定性的挙動や各物理量（接触面圧、せん断応力）の変化が理論と一致したことから、対象とする現象の傾向再現は可能と判断した。次章では、以上の現象に影響し得るバラツキについて検討する。

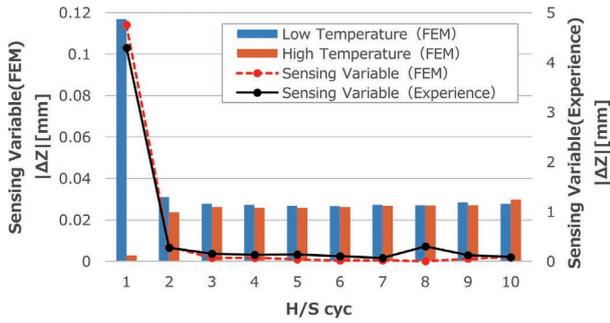


図 10 センサ測距値の変動量結果

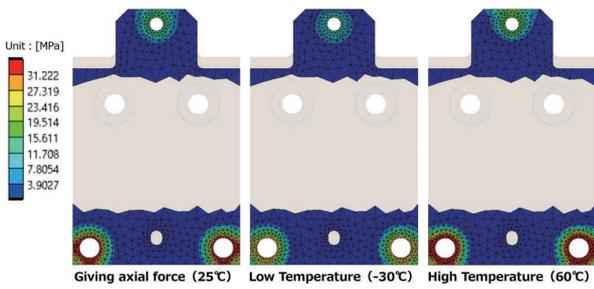


図 11 各温度における接触面圧 (底面視)

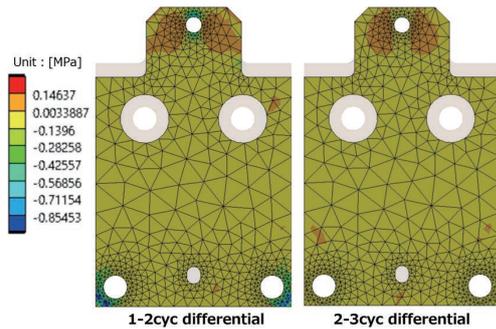


図 12 サイクル間での最大せん断応力の差分 (底面視)

4. 逆問題的アプローチと FEM 解析による検証

4.1 ロジック検証の具体的な流れ

逆問題的アプローチの具体的な流れについて説明する。まず、解析モデルの入力値となる部品寸法・物性・荷重条件等の一部を変数化し、実験計画法により各条件での解析結果を蓄積していく。本事例では同一条件・同一サンプルでも結果の再現性が取れないことと接触が重要であることから、荷重条件と組立時に累積する誤差の 2 種類に着目する。

まず、荷重条件に関しては各ボルトに生じる軸力を変動させる。一般的なトルク法による締結では、トルク値を厳密に管理しても軸力のバラツキが認められる。JIS では、同一トルクに対する軸力の最大値と最小値の比 (締付係数) は 1.4 ~ 3 程度と記載されている⁸⁾。そのため、微小な変位・変形が重要となる本事例では、ネジ径に関わらず考慮すべきバラツキと考える。しかし、(4)、(5)式に従って摩擦係数を変数化すると、パラメータの数が膨大になる点

と、各ボルトの軸力を独立して扱えないという問題が生じる。そのため、図 13 に示す樹脂ベース-アルミ合金筐体を固定する M2/M3 ボルトの軸力を直接変数化した。

次に、組立時に累積する誤差に関しては樹脂ベースの実装位置を変動させる。先行研究では、ボルトや被締結体の各種公差も締結性能に大きく影響することが報告されている⁹⁻¹¹⁾。樹脂ベース実装位置は図 13 中の M2 ボルトを回転軸中心とする、樹脂ベースの回転ズレ量 angle として定義した。これは、angle を変動させることにより各固定構造 (各ボルト座面、位置決めピン) の状態が連動して変化し、各部品 (樹脂ベース、位置決めピン、ボルト) の寸法を 1 つずつ変数化するよりも、効率的な検証が可能であるためである。

実測・解析ともに 1 サイクル目が支配的かつ重要であることから、応答変数は 1 サイクル目の ΔZ とした。表 1 に設定した変数とレンジを示す。実験計画法にはユーザが実験回数を指定可能であり、設計空間を満遍なく探索可能なラテン超方格法を使用した。取得するサンプル総数は 250 とし、80% は応答曲面生成用の学習用に、残り 20% は精度評価用のサンプルとした。なお、解析モデル上で定義した説明変数の自動更新・解析実行、および実験計画法の詳細設定には modeFRONTIER 2022R3 を使用した。

解析と実験計画によるサンプル取得完了後、傾向の可視化や寄与度分析等により、特徴的な領域や着目すべき評価条件を選定する。但し、この時点では解析結果は単なる数値データ群として扱い、物理的な解釈は入れずに検討する。最後に、選定した各評価条件での解析結果を確認し、物理的な解釈を加えることで適切なロジックを推定していく。

表 1 実験計画法での各種変数

Variable	Category	Range
M3_right	Explanatory variables	374N ~ 713N
M3_left	Explanatory variables	374N ~ 713N
M2	Explanatory variables	180N ~ 339N
angle	Explanatory variables	-0.29° ~ 0.29°
ΔZ	Response variables	

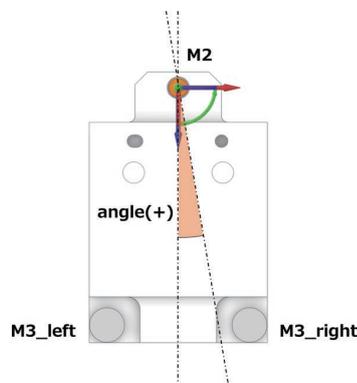


図 13 各説明変数の定義 (上面視)

4.2 データ取得結果とロジック推定・検証

図 14 および図 15 に、サンプリングと寄与度分析結果を示す。angle の相関係数および寄与度が最も高く、M2 が最も低くなった。また、M3_right と M3_left の相関係数や寄与度は同程度の値を示しており、散布図から両者の傾向が左右対称であることも確認できる。傾向を詳細に可視化するため、図 16 に作成した応答曲面を示す。なお、比較した複数手法の中で決定係数 R^2 が 0.95 と最も高くなり、サンプリング点間を放射基底関数で補間する RBF で曲面を作成した。angle = 0.29° , -0.29° の応答曲面から、angle により ΔZ の方向が規定されていることが分かった。また、angle > 0 では M3_right が、angle < 0 では M3_left が因子として有意になることを確認できた。

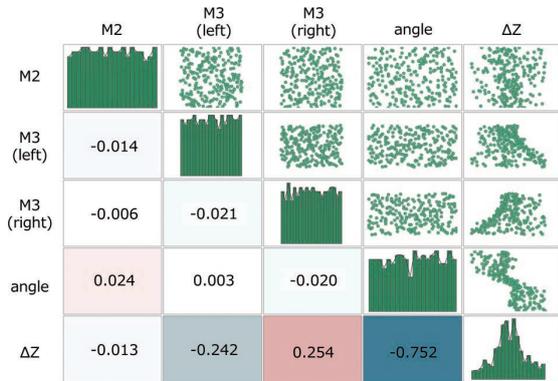


図 14 取得サンプル (N = 250) の相関散布図

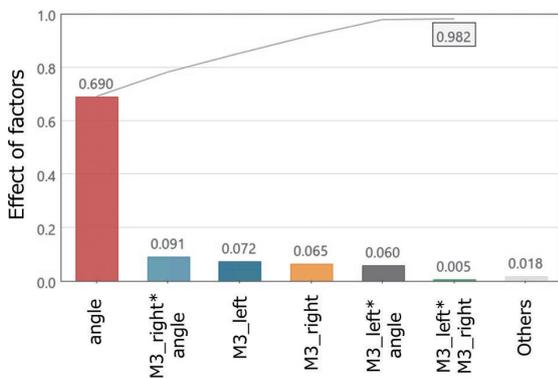


図 15 説明変数の寄与度分析結果 (N = 250)

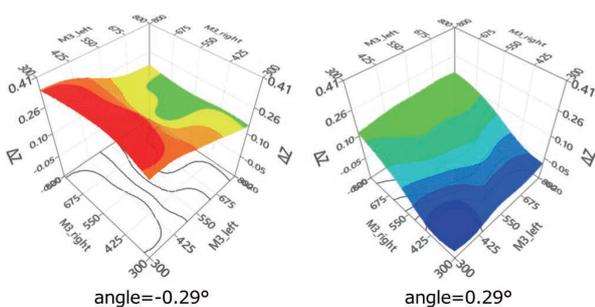


図 16 RBF で作成した応答曲面 (N = 200)

分析結果を参考に、表 2 に示した 4 条件を再計算した。内訳は、 ΔZ の絶対値が大きい 2 条件と M3_right/M3_left の値を反転させた 2 条件の計 4 条件である。図 17 に、各条件での樹脂ベースと筐体間の接触状態分布を示す。但し、底面視表示であるため、左右反転していることに留意されたい。まず、angle = 0.29° の状態で M3_right、M3_left の値が反転している条件 1 と条件 2 で比較する。条件 1 では M3_right の低下で周辺領域が全てすべり状態となる一方、条件 2 では M3_left 周辺領域に固着状態が残存した。次に angle = -0.29° の場合、条件 4 の M3_left 周辺領域が全てすべり状態となったが、条件 3 では M3_right 周辺に固着状態が残存し、angle = 0.29° と正反対の挙動となった。理論に従えば、軸力低下によりすべりのリスクは高くなるため、条件 2 と条件 3 で特異な現象が起こったと推定できる。また、条件 2 と条件 3 の特有の事象として、位置決めピン周辺で強い固着状態が生じていることを確認できる。

表 2 FEM 解析で再計算した条件

Variable	Condition 1	Condition 2	Condition 3	Condition 4
M3_right	374N	713N	374N	713N
M3_left	713N	374N	713N	374N
M2	180N	180N	180N	180N
angle	0.29°	0.29°	-0.29°	-0.29°

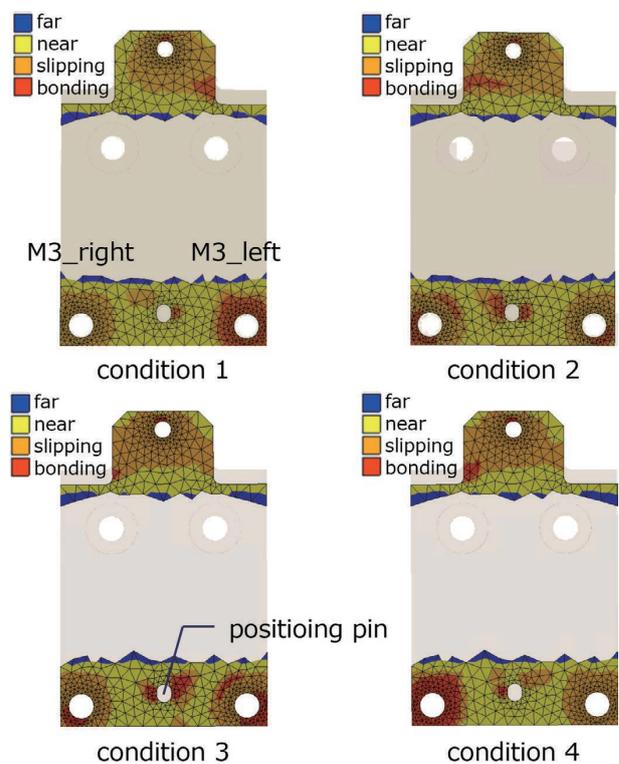


図 17 -30°Cでの樹脂ベース-筐体間の接触状態 (底面視)

上述の挙動を示す要因として、位置決めピン部のクリアランスが推定される。図 18 に、樹脂ベース前方部の構成を示す。組立バラツキにより $\text{angle} > 0$ となった場合、位置決めピン部のクリアランス量には図に示すような左右差が生じる。 $\text{angle} > 0$ かつ M3_right が低い場合（条件 1）、理論および解析結果から、低温時には左側の M3 ボルト周辺が固着、右側の M3 ボルト周辺がすべり状態となる。そのため、右側の M3 ボルト周辺の樹脂ベースが、右側から左側に向かってすべりするような挙動となる。このとき、 $\text{angle} > 0$ では、すべり方向に対するクリアランス量 c が大きいいため許容すべり量が増加する。その結果、温度変化前後でモジュールおよびモジュール内部の光学部品にもズレが生じ、 ΔZ が大きくなったと推定される。一方で、 $\text{angle} > 0$ かつ M3_left が低い場合（条件 2）では、 c が極端に小さくなるため、 ΔZ が小さくなると推定される。条件 3 と条件 4 についても、 c とボルト軸力値の対応関係が条件 1 / 条件 2 と反転したのみであり、同様の挙動で説明が可能である。

以上の仮説の妥当性確認のため、条件 2 の c を変化させた際の ΔZ の変化を検証した。具体的には、位置決めピンの外径 D （基準寸法 2 mm）を 0.02 mm ずつ小さくして c を増加させていった。その結果を、図 19 に示す。条件 2 の状態であっても、 D が小さくなる（ c が大きくなる）に従って ΔZ が大きくなることが分かった。よって、組立時の c の増減によって樹脂ベースのすべり量が変化し、 ΔZ に影響を与えたと結論付ける。

ここまでの検討結果から、最終的な結論として ΔZ が大きくなる要因は以下 2 つである。

- ・すべり方向に対する位置決め部のクリアランス量 c
- ・クリアランス量 c と M3 ボルト軸力の交互作用

また、 ΔZ を抑える条件は以下のいずれかである。

- ・クリアランス量 c の低減 / 適正化
- ・M3 ボルトもしくは全ボルトの軸力向上

但し、 c は製品構造上、直接測定ができず、各 부품の寸法公差および組立手順により容易に変化する値である。また、軸力はボルト外径の小ささから超音波軸力計やひずみゲージ等での測定が難しく、(4)式で示したように表面状態や各種寸法で変化するため、 c と同様に不安定なバラツキである。そのため、 ΔZ 抑制に向けては生産工程ではなく、位置決め設計や光学モジュールの材質変更のような設計観点での対策が課題となる。

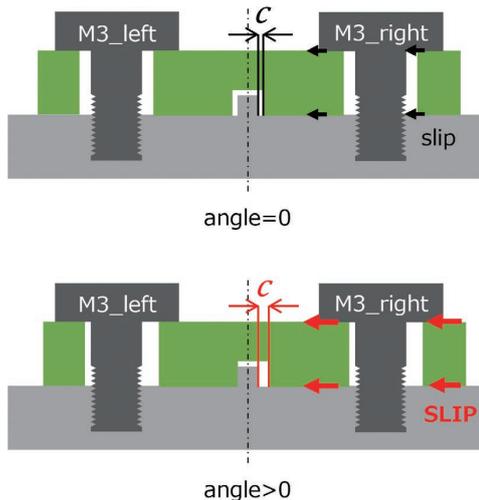


図 18 因子 angle によるクリアランス量の変化（正面視）

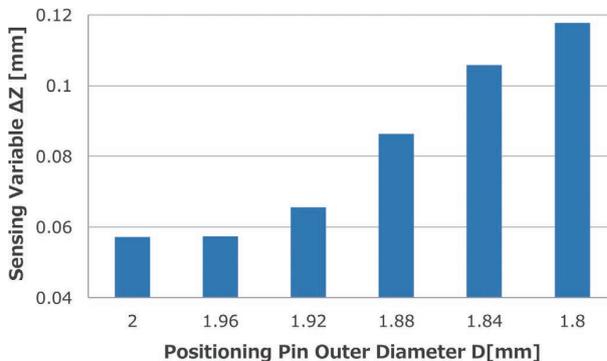


図 19 位置決めピン外径による計測値変動量の推移

4.3 逆問題的アプローチの効率化

逆問題的アプローチの核である実験計画法では、可能な実験数（もしくは時間）と精度のトレードオフ性という大きな課題がある。設計プロセス内での活用を考えると、検証行為に費やせる時間や工数は限られるため、最小限のサンプルで精度を担保し、有益な情報を最大限得ることが期待される。また、1 回あたりの検証サイクルが早くなれば、パラメータを変更 / 増加による追加検証や複数の構造案の比較なども可能となり、設計はより充実したものとなる。しかし、未知の設計空間に対して事前に適切なサンプル数や実験計画法を定義することは難しく、過剰なサンプリングによる工数増加、サンプル不足による精度低下といった問題を招く。

以上の問題を解決する手法として、適応型実験計画を本事例で検討した。適応型実験計画は予めサンプルの取得計画を決めず、サンプル取得と設計空間の評価を内部で繰り返すため、少ないサンプル数での精度向上が期待されている^{12,13)}。本稿では、適応型実験計画の 1 種である MACK（多変量適応型交差検証 Kriging）¹⁴⁾ に着目した。MACK は、はじめに設計空間内を粗くサンプリングした後、応答

曲面の交差検証を内部で実行し、不確実性の高い領域をリサンプリングする手法である。本稿では、MACK の活用による効果検証をするため、ラテン超方格法との比較を実施した。

図 20 に、各手法でのサンプリング結果を示す。ラテン超方格法では設計空間内を一律にサンプリングする一方、MACK ではサンプリング領域の偏りが確認できる。特に、4.2 項で寄与が高いと判断された angle の上下限值付近を集中的にサンプリングしており、 ΔZ が変動しやすい領域を集中探査したと推測できる。また、MACK を適用することで目標精度に到達するまでのサンプル数が 100 から 40、計算時間に換算すると 25 h から 10 h 程度まで低減した。以上の結果から、MACK は設計空間内の特徴的な領域を効率的に探索することが可能であり、逆問題的アプローチによる検証期間の短縮に大きく貢献する手法であることを確認できた。

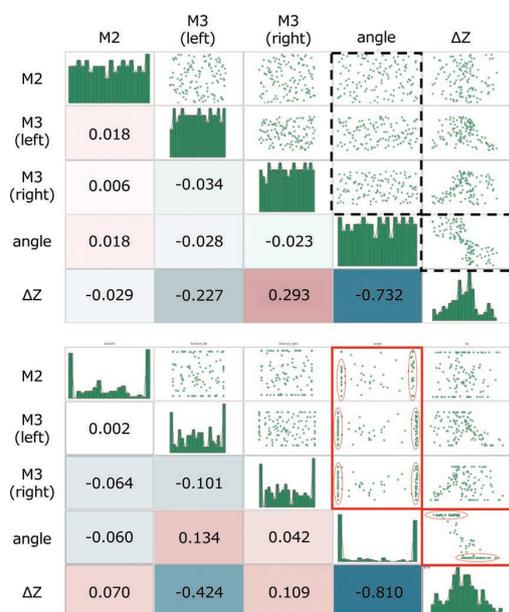


図 20 相関散布図 (上: ラテン超方格法、下: MACK)

5. むすび

実機評価における制御／観測不可能なバラツキにより、製品特性挙動の解明が難しい問題に対して、FEM 解析と逆問題的アプローチを使った手法に着目した。本稿では、熱衝撃試験下における 3D ビジョンセンサの測距値変動を対象とし、上述の手法による検証を実施した。その結果、実機で確認された M2 ボルトのゆるみは測距値変動に寄与せず、“M3 ボルトの軸力低下時における、樹脂ベースすべり方向に対するクリアランス量が影響する”というロジックを明確化できた。また、サンプリング効率向上のため実験計画法に MACK を採用することで、本事例では最大 60% 程度 N 数を削減し、効率化に向けた有効な手法であ

ることを実証した。

複数のバラツキが結果に影響する場合、適切なロジック推定および評価条件の設定が課題となり、順問題的アプローチによるロジック検証は困難を極める。今回、このような課題に対して逆問題的アプローチを活用することで、逆問題的アプローチが課題解決に有効であると同時に、設計者が無暗に試行錯誤を繰り返すことなく、限られた工数の中でロジック検証できることを示した。この成果は様々な技術課題に対して適用可能であり、開発期間の短縮および、より早いサイクルで製品の市場投入の実現に繋がる技術である。

今後の課題として、精度および効率の向上が挙げられる。まず、精度の観点として、樹脂ベースの詳細物性考慮による熱応力解析の精度向上が挙げられる。樹脂は金属材料に比較して温度依存性や成型過程に起因した異方性の影響が大きく、急速な温度変動の影響も大きいと考えられる。そのため、TMA (熱機械分析) 等の各種試験により詳細な樹脂の物性値を取得し、解析へ反映することが必要である。一方、効率の観点に関しては、サンプル数の自動決定が挙げられる。本事例では MACK の効果検証のため、筆者がサンプル数を予め指定してサンプルを取得した。しかし、本来はサンプル数もユーザが事前に決めるのではなく、一定精度を満たした段階でサンプリングを終了する状態が望ましい。そのため、最大実験可能数のみを制約として、狙った精度実現する考え方や具体的な手法を構築する必要がある。

以上、熱応力解析の精度向上とサンプリング効率向上により、発生事象や製品挙動に対する解析能力を更に高め、ロバスト性の高い設計を実現する設計技術の構築を目指す。

参考文献

- 1) 池田正哲, “商品開発における技術要素間のトレードオフを解消するバランス設計手法の革新,” *OMRON TECHNICS*, vol. 52, no. 1, pp. 105-110, 2020.
- 2) 佐藤一樹 他, “機械学習を用いた電力変換機器の最適化設計プロセスの実証,” *OMRON TECHNICS*, vol. 54, no. 1, pp. 101-106, 2022.
- 3) 太田潤 他, “小型・軽量かつ耐環境性を備えたロボットハンド搭載型 3D センサの開発,” *OMRON TECHNICS*, vol. 54, no. 1, pp. 60-65, 2022.
- 4) 沢俊行 他, “繰返し温度変化を受けるボルト締結体のねじの回転ゆるみメカニズム,” *山梨講演会講演論文集 (日本機械学会)*, 2007, pp. 149-150.
- 5) 小林光男 他, “熱負荷を受けるねじ締結体の軸力挙動へ及ぼす被締結体の影響,” *日本機械学会東北支部秋季講演会論文集*, 2016, vol. 52.
- 6) 晴山蒼一, “トルク法によるねじ締付けにおける軸力管理に関

- する研究：第1報，ねじ軸力分布の信頼限界について，”日本機械学会論文集 C編，vol. 53，no. 495，pp. 2373-2379，1987.
- 7) 小林光男，“ねじ締結体の基礎知識，”精密工学会誌，vol. 81，no. 7，pp. 619-622，2015.
 - 8) 日本産業規格. JIS B 1083，2008.
 - 9) 岡田学 他，“ボルト締結における座面圧分布について：座面の角度偏差が及ぼす影響，”日本機械学会論文集 C編，vol. 70，no. 699，pp. 3324-3330，2004.
 - 10) 福岡俊道 他，“ねじ部品の形状誤差を考慮したトルク法の締め付け精度の改善，”マリンエンジニアリング，vol. 51，no. 2，pp. 238-245，2016.
 - 11) 笠井周 他，“中空ねじ締結体の締結状態に及ぼすナット座面制度の影響：第1報，ナット座面精度と中空ボルトの軸方向ひずみ分布との関係，”日本機械学会論文集 C編，vol. 61，no. 583，pp. 1136-1142，1995.
 - 12) 上野哲朗 他，“機械学習による X 線スペクトル計測の効率化，”表面と真空，vol. 62，no. 3，pp. 147-152，2019.
 - 13) K. Shimoyama et al.，“A Kriging-Based Dynamic Adaptive Sampling Method for Uncertainty Quantification，”*Trans. J. Soc. Aero-naut. Space Sci.*，vol. 62，no. 3，pp. 137-150，2019.
 - 14) ESTECO S.p.A. “modeFRONTIER.” <https://engineering.esteco.com/modefrontier/> (Accessed: Oct. 1, 2023).

執筆者紹介



夏田 遥介 NATSUDA Yosuke

インダストリアルオートメーション

ビジネスカンパニー

技術開発本部 第3技術部

専門：計算力学

所属学会：日本機械学会

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。

製品規模のシミュレーションと動的な探索を用いた電気的外乱の範囲推定手法の構築

藤田 浩志

製品には、様々な使用環境の変動に対して安定して動作するロバストな品質が要求される。電気製品では、急激な電圧・電流の変動などの電気的外乱に対して、動作が不安定になる条件を潰しこむ必要がある。様々な外乱に対する動作の検証にはシミュレーション技術の活用が有効であるが、従来の回路シミュレーションでは製品の制御動作に起因する解析規模の増大が問題となり、製品レベルの規模での電気的な動作の解析が難しい。そのため、従来は電気的外乱に対する評価は実機中心であり、不安定な動作を招く外乱条件の見落としによって設計の後戻りが発生するリスクがあった。

本検討では、製品規模の電気的挙動を解析可能なシステムシミュレーション技術と動的な探索手法によって、広範囲の条件から製品の挙動を不安定にする外乱の条件を効率的に推定する手法を構築し、実機検証によって有効性を確認できた。本技術の活用によって、製品開発での限られた検証期間においても、不安定な挙動を招く外乱条件を設計段階で発見し対処できる効果が期待できる。

Development of a Method for Estimating the Range of Electrical Disturbances Using Product-scale Simulation and Dynamic Search

FUJITA Koji

Products are required to have robust quality to operate stably against disturbances in various usage environment. To satisfy such requirements, it is necessary to verify operation under various conditions and to eliminate conditions that cause unstable operation, which is where CAE technology is effective. However, it is difficult to analyze electrical behavior at the product level using conventional circuit simulation, and the evaluation of electrical disturbances has been conducted mainly on actual equipment.

In this study, we developed a method to efficiently estimate the conditions of disturbances that make product behavior unstable from a wide range of conditions by using system simulation technology that can analyze product-scale electrical behavior and a dynamic search method, and confirmed its effectiveness through verification of actual equipment. By utilizing this technology, it is expected to be effective in preventing the overlooking of disturbance conditions that cause unstable behavior, which was conventionally judged on an individual basis.

1. まえがき

近年は市場環境が多様化し、製品がさらされる環境も多様化している。そのような状況の中で、製品には、様々な環境変動に起因する外乱に対して安定して動作するロバストな品質が要求される。電気製品では、急激な電圧・電流の変動などの電気的外乱が製品の不安定な動作を引き起こ

すため、この外乱への対策設計が求められる。

外乱への対策として、開発では論理的な検証や経験による設計を実施し、実機検証に依存した評価によって品質確認を実施する。評価においては、過去の評価結果やベテラン設計者の知見を基にして製品が不安定となる外乱条件のあたりをつけ、この条件下で実機へ電気的外乱を加えて挙動を確認しているのが現状である。

しかし、これでは以下の問題が発生する。

Contact : FUJITA Koji koji.fujita@omron.com

- 1) 設計者が想定した最悪条件が正しいことを机上で検証できず、不安定な挙動の見落としが発生する。
- 2) 過去機種とは異なる製品のため、不安定となる外乱条件やその範囲が変わり、不安定な挙動の見落としが発生する。
- 3) 不安定な挙動への対処は実機でのカット&トライが中心であるため、対処した条件以外の問題点が悪化したことに気づかず、不安定な挙動の見落としが発生する。

このような状況から、限られた検証期間で、設計で想定しきれない挙動や外乱に対して不安定な条件を的確に発見し対処することが課題となっている。

上記の課題を解決するためには、製品レベルの規模での広い範囲の回路挙動を確認可能な、実機に頼らない検証手段が必要である。

本稿は、システムシミュレーション技術と、動的な条件探索手法を組み合わせた、不安定な挙動となる外乱条件範囲を的確に発見する活用技術について報告する。2章で回路シミュレーションの課題と条件範囲推定の課題、および課題を解決する手法について述べる。3章で構築した製品規模の電氣的挙動を再現するシステムシミュレーションについて、4章でシミュレーション結果から製品動作に影響のある外乱の範囲を推定する分析手法について記述する。そして5章で結果を、6章でまとめと今後の展望について述べる。

2. 製品規模で外乱条件を効率的に探索する手法の提案

2.1 現状

机上検証の従来手法である、電氣的な挙動を確認するための回路シミュレーション技術と、シミュレーション活用における条件探索の現状について述べる。

2.1.1 回路シミュレーションの現状

電氣的な挙動を机上で再現するための技術として、回路シミュレーションがある。本稿では、回路シミュレーションとは、電気回路の設計および解析を効率的に行うためのツールや解析手法の総称を示す。代表的な回路シミュレーションには SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) がある。

回路シミュレーションでは、電気部品の特性と部品間の結線からなる電気回路モデルを回路図に基づいて構築する。そして、検証目的に応じた解析エンジンを使用して、モデルから電気波形を得る。電氣的な外乱に対する挙動を検証するためには、過渡解析 (Transient 解析) を用いて時間経過に対する回路内の各部の波形を得るのが一般的である。

2.1.2 条件範囲推定の現状

シミュレーション活用において、パラメータの範囲を一度に探索することは一般的である。主に“静的な”探索手法が用いられ、しらみつぶし (グリッドサーチ)、統計的な条件間引き (実験計画法) によるパラメータの探索などがある。1回あたりの解析時間×探索数が範囲探索の総時間となるため、総時間と得られる範囲の解像度のトレードオフを加味しながら探索数を設定することが活用の上で重要になる。

2.2 課題

2.1節で述べた現状に対して、製品規模で外乱条件範囲を探索することの課題を説明する。

2.2.1 製品規模の回路シミュレーションの課題

現状の回路シミュレーションでは、製品全体での外乱に対する挙動を解析することは現実的ではない。製品の回路全体の解析を対象とした場合、大量の電気部品やデバイスのモデルを扱う必要がある。部品点数が多いほど電気回路モデルの規模が大きくなり、解析時間は増大する。加えて、大量の電気部品を結線することで解析の収束性が悪化し、回路挙動を解析できなくなるケースも存在する。特に、制御回路のようなフィードバック回路 (クロズドループ) を含むモデルの場合、非線形な電気特性をもつ複雑なデバイスが多数使用されるため、収束性は格段に悪くなる。このため、製品の回路全体を解析することは現実的ではなく、一部の回路ブロックのみを解析の対象とした、部分的な特性検証としての活用にとどまることが多い。

2.2.2 条件範囲推定の課題

前項の課題を解決し、製品レベルの規模の回路シミュレーションが実行可能になったとしても、不安定な挙動を引き起こす外乱範囲を探索することは難しい。製品レベルの大規模なモデルに対して対象となる条件を探索するには、製品動作や外乱の条件を漏れなく組み合わせて挙動を解析する必要がある。この結果、解析条件としてのパラメータが増えるにつれて解析時間が指数関数的に増大し、設計の上流の限られた検証期間では活用できない。

よって、製品レベルの規模の挙動の解析結果から動作に影響を与える外乱範囲を特定するためには、広い探索範囲から効率的に不安定な条件を見つける活用方法の構築が課題である。

2.3 課題解決の方針

2.2.1項の課題を解決するために、従来の回路シミュレーションに因果モデルを追加することで計算規模が増大しないようにし、製品レベルの規模の動作を解析できるシステムシミュレーション技術を構築した。

また、2.2.2 項の課題を解決するために、探索条件を動的に変更しながら不安定な挙動を示す条件範囲を重点的に探索する手法を導入した。

併せて、システムシミュレーション技術と動的な条件探索手法を連動させて、製品動作が不安定となる外乱範囲の推定を実現した。

2.3.1 因果モデルの追加

製品全体での挙動の解析を可能にするために、因果モデルを付加する方針とした。

従来の回路シミュレーションにおける電気回路モデルは、非因果モデルと呼ばれる物理的なモデル要素ですべてを記述する方式である。表 1 に示すように、電気回路では、抵抗、コンデンサ、電源などがモデル要素に該当する。非因果モデルは物理的平衡則（例・キルヒホッフの法則）を満たすようなモデルのため、電気回路と親和性がよい。

表 1 非因果モデルの特徴

観点	非因果モデル
考え方	要素間は等式で表され、モデル全体を方程式として解析する
接続方法の例	
モデル要素	抵抗、コイル、コンデンサ、電源など
特徴	物理方程式を直接表現できるため、電気回路モデルとの親和性がよい
利点	物理的平衡則を満足するため、物理構造をモデル化することで電気的挙動を精度よく解析できる

しかし、フィードバック回路等の制御回路を扱う際には、制御回路を構成するデバイスの機能を非因果モデルで構築すると膨大な要素数になる。そのため、表 2 に示すような、制御回路のデバイスで規定される入出力間の信号の関係性や演算の順序を簡潔に表現でき¹⁾、収束がよく反復計算に時間がかからない因果モデルが適している。

ただし、因果モデルは、モデル要素ごとに必要な詳細度を見極め、回路シミュレーションで表現する複雑な等価回路の機能を、数式やデータテーブル、状態遷移等を用いた

変換を行う。これらを組み合わせて、少ない要素数で複雑な機能を表現する因果モデルを複数使用することで、製品レベルでのモデル規模と電気的挙動を表現可能な精度を両立するモデルを実現する。

表 2 因果モデルの特徴

観点	因果モデル
考え方	要素同士は入力と出力の関係になり、要素間での逐次代入によって解析する
接続方法の例	
モデル要素	ゲイン、加算器、伝達関数など
特徴	計算順序を明示できるため、制御モデルやプログラムとの親和性がよい
利点	非因果モデルに比べて収束性がよいため、反復計算に時間がかからない

よって、製品の主機能を実現するために必要な回路部分は従来の回路モデル（非因果）を使い、製品の制御回路を構成する部分に因果モデルを用いるのが最適であるため、この構成を実装した。本稿では、回路モデルと因果モデルを組み合わせたモデルをシステムモデルと呼び、製品全体での電気的挙動の解析を可能にする。具体的なモデル構築結果は、3章で示す。

2.3.2 不安定条件の動的な探索

広い探索範囲から効率的に不安定条件を探索するために、動的な探索手法を導入する方針とした。動的な探索とは、条件を探索する過程で得られた情報を利用して、次の条件を逐次決定しながら探索を進める手法である。

比較のため、2.1.2 項で挙げた“静的な”探索手法について述べる。静的な探索では、解析前に条件を一括で指定し、指定した条件をそれぞれ解析する。探索する条件をあらかじめ計画するため、実行が容易である。図 1 に 2 つの条件から故障範囲を探索する例を示す。左の図は各条件を一定間隔で網羅的に探索する最も単純な探索手法（しらみつぶし）、右の図は少ない条件で広範囲を探索する実験計画法（統計的な条件の間引き）を用いた探索点を可視化したものである。

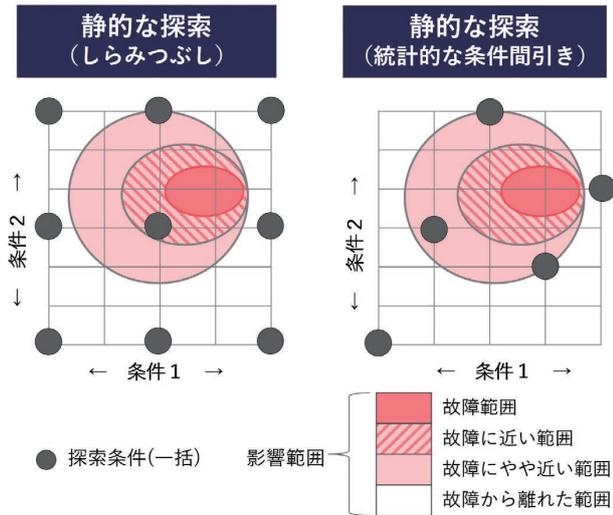


図1 静的な条件探索の概略 (故障条件の解析)

しかし、いずれの場合も、図中の「故障範囲」に示すようにあらかじめ計画した探索点の間で故障条件がある場合は、故障の見落としが発生してしまう。

これに対して、条件を逐次決定しながら探索を進める動的な探索手法を、図2を用いて説明する。まず、広い範囲から抽出した探索点を探索し(点1)、このうち故障範囲に近くなる点を発見する。つぎに、発見した点を中心として再度探索点を設定し(点2)、同様に探索する。さらに、このうち故障範囲に近くなる点を中心に探索点を設定し(点3)、探索する。このように動的に条件を変えながら探索することで、不安定となる条件を的確かつ効率的に発見する。

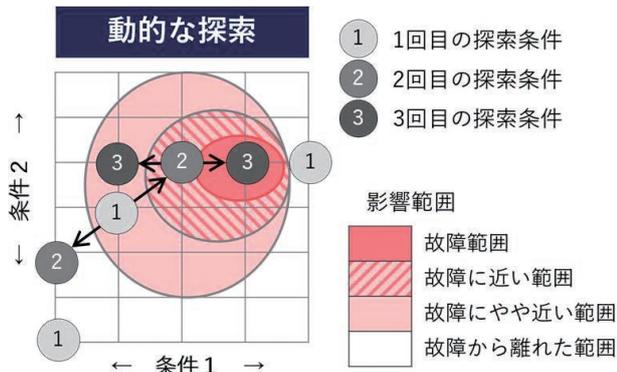


図2 動的な条件探索の概略 (故障条件の解析)

動的な探索によって外乱の条件範囲を具体的に分析した結果は、4章で示す。

3. 製品規模の電氣的挙動を再現するシステムシミュレーション技術

3.1 実現したモデル構成

製品レベルの規模での動作解析を可能にするシステムモ

デルの構成を述べる。製品内の電力を扱う回路や電源系に関わる回路部分を、電気回路としての非因果モデルで表現する。これに対して、製品の制御回路を構成する部分と電氣的な外乱を生成する製品外の部分を因果モデルで表す。これらを統合したモデルで全体の過渡解析を行う。以下の図3に、スイッチング電源を例としたモデル構成を示す。

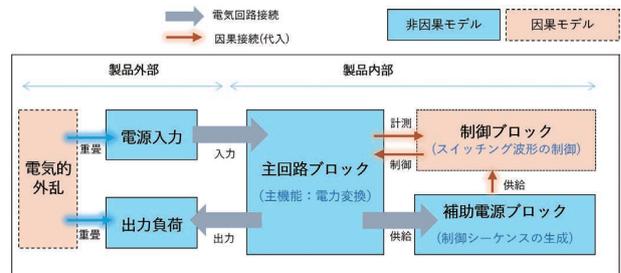


図3 モデル構成の例 (スイッチング電源)

本技術においては、非因果モデルと因果モデルの使い分けを定義した。非因果モデルで表現することを基本とし、以下の3つの基準のいずれかに該当する場合は因果モデルを用いた。

- 1) 電圧、電流のどちらか一方が信号として用いられ、電圧と電流の関係性を考慮しない回路。たとえば、電圧伝送方式のアナログ回路や、MPU・メモリ等の論理的な動作のためのデジタル回路が該当する。
- 2) 入力に応じて出力が変化し、その関係性が数式またはデータテーブルで表現できる回路。入出力間の伝達関数を定式化できるオペアンプ応用回路や、入出力間の関係性のデータテーブルが明確に定義されているフォトカプラなどが該当する。
- 3) 特性の時間変動パターンを制御する場合。たとえば、JISC 61000-4-11²⁾ で規定される電圧ディップ/電断のような電氣的な外乱のシーケンスが該当する。

上記の構成と基準で構築したモデルに対し、因果モデルと非因果モデルを同一モデル上に表現できる解析ツールを用いて過渡解析を行うことで、製品全体での挙動の解析を可能にした。以降、本解析をシステムシミュレーションと呼ぶ。以降で述べる解析事例では、ANSYS社のAnsys Twin Builder 2023R1を解析ツールとして用いた。

3.2 製品規模での挙動を解析する具体的なモデル

本技術によって構築したスイッチング電源のシステムモデルを図4に示す。スイッチング電源の基本構成である各回路³⁾を、3.1節で定義した使い分けに応じて非因果または因果でモデル化した。

因果モデルを使用することでモデル規模を低減させることができた。たとえば図5に示すように、オペアンプとそ

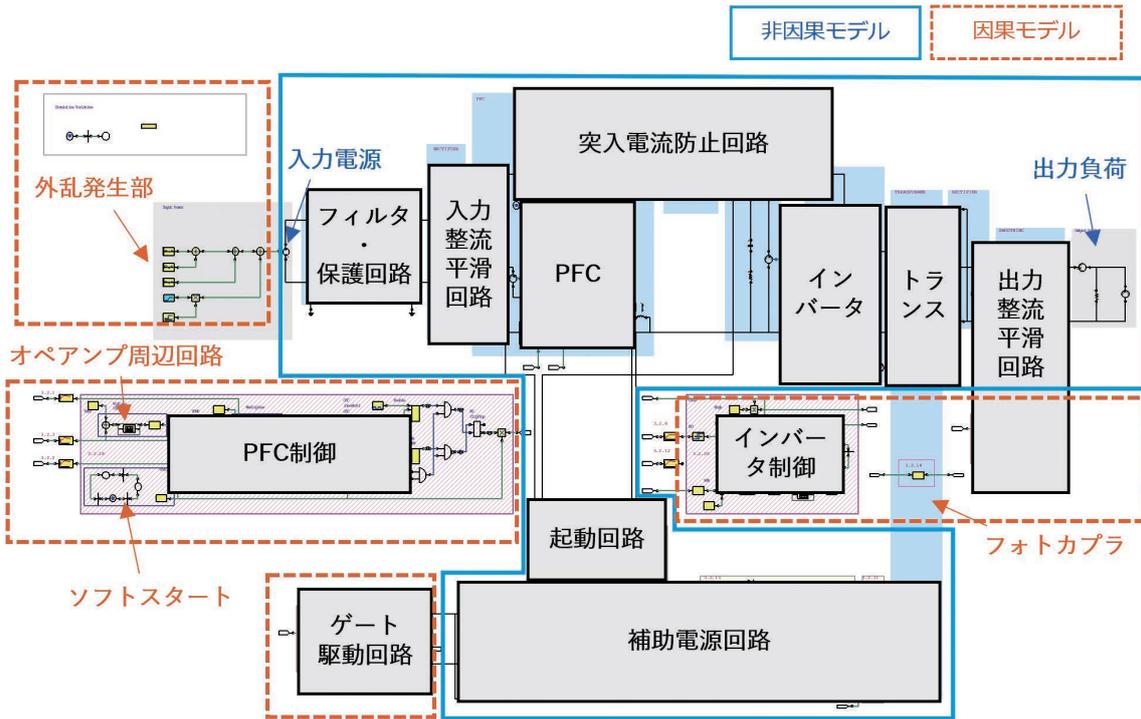


図4 システムモデルの具体例（スイッチング電源）

の周辺回路を電気回路モデルで表すと数10点のモデル要素が必要になるが⁴⁾、因果モデルで表すことで加算器、非線形ゲインを表すデータテーブル、周波数特性を表す伝達関数の3要素でモデルを構成できた。

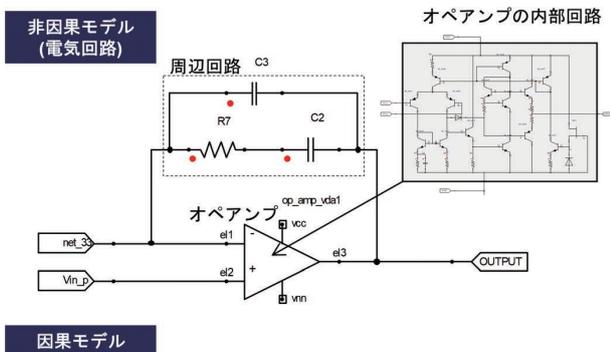


図5 モデル要素の具体例（オペアンプと周辺回路）

3.3 製品の定常状態の挙動の再現結果

本技術によって製品規模での挙動解析が可能になったことを、スイッチング電源の駆動波形の解析結果を例として述べる。

図6の上段に示すとおり、スイッチング電源回路にAC

電圧を入力し、DC電圧を出力できることを確認した。これは、主機能のAC⇒DC電力変換そのものである。また、図6の下段に示すとおり、製品入力電圧を整流した全波整流波がPFC入力部で確認でき、これを一定電圧へ変換した波形がPFC出力部で確認できた。インバータ～整流部出力では、PFC出力部の電圧を降圧した波形が確認できた。

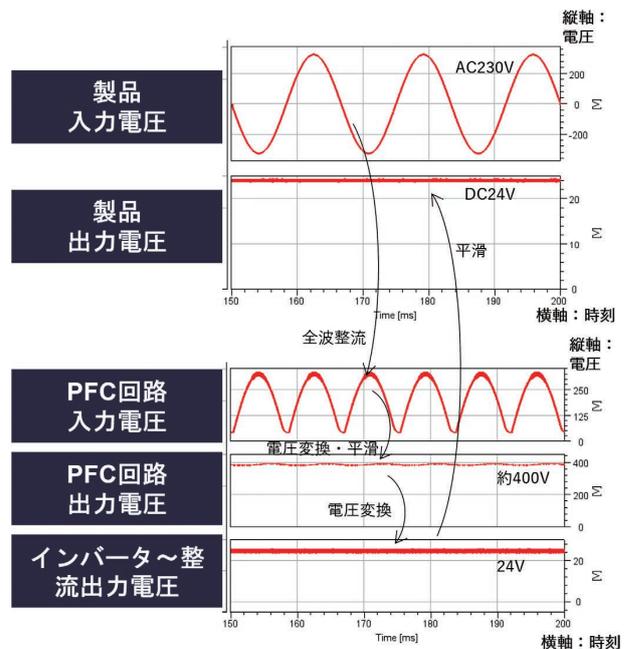


図6 スwitchング電源の駆動波形

つぎに、モデルが定常状態の波形を正しく出力できていることを説明する。定常状態の波形を適切に確認できる回路箇所として、入力と出力条件によって制御状態が変化し異なる波形を示すPFC回路を対象とした。PFC回路は、矩形波によるスイッチングで内部電圧を一定に保つ動作を行い、入力電圧および出力負荷に応じてスイッチング電圧波形が変化することが広く知られている。この挙動は製品内の大部分の回路が影響することから、モデル化の難易度が高い。本検証では、外乱を加えないときの定常状態として、入力電圧および出力負荷を最小・最大にした場合のPFC回路のスイッチング電圧の波形を確認した。

定常状態でのスイッチング電圧波形の解析結果を図7および図8に示す。図7は入力を最小としたときの0%負荷(無負荷)、100%負荷(定格負荷)の2条件の波形である。図8は定格負荷としたときの、入力電圧が仕様の最小値と最大値の2条件である。解析結果はスイッチングで生じる矩形波を再現しており、入力電圧と出力負荷容量に応じた波形を出力できていることを確認した。

検証で用いたスイッチング電源は昇圧チョップ方式のPFC回路を搭載しており、図7より0%負荷のときは波形が振動する不連続モード、100%負荷のときは連続した矩形波となる連続モードの動作になっている。また、図8より最小入力電圧のときはオン期間が長く、最大入力電圧のときはオン期間が短くなっている。これらは昇圧チョップ一般の特徴⁵⁾であるため、妥当な結果である。

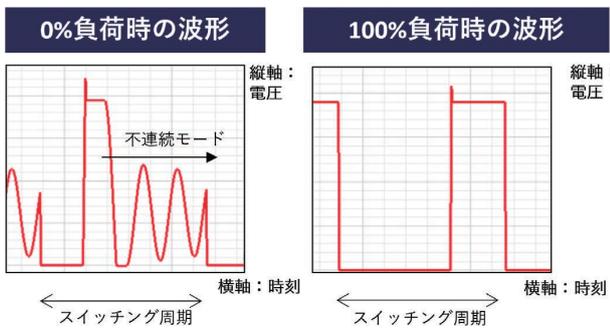


図7 定常状態の解析結果 - 0%負荷、100%負荷

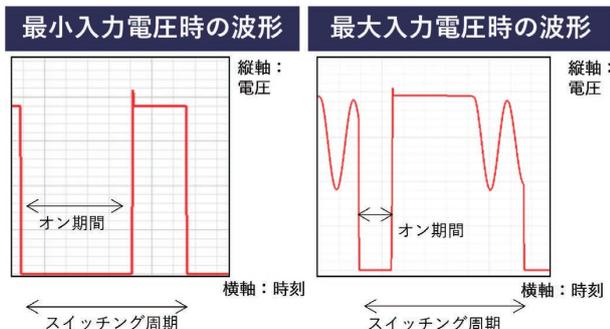


図8 定常状態の解析結果 - 最小入力、最大入力

これらの解析結果より、モデルがスイッチング電源の主要な機能を再現しており、製品全体の挙動を正しく解析できることを確認できた。

3.4 外乱を加えたときの挙動の再現結果

外乱に対する製品の挙動を再現した結果について説明する。スイッチング電源の入力部に外乱波形を与え、製品の内部で発生する過渡的な挙動の波形が実測同様に再現することを確認した。以降の3.4.1項で与えた外乱を示し、3.4.2項で実測と解析結果の比較を示す。

3.4.1 製品に加える外乱の波形

電源入力部を有する製品への代表的な外乱のひとつに、入力電源の電断がある。JIS C 61000-4-11に規定されるように、通常の入力電圧を維持した後、一定期間入力電圧を低下させ、その後入力電圧を戻す一連の電圧変動である。特に電圧低下が100%のときを電断と呼ぶ。以下の図9に示すとおり、本解析ではAC 230Vで動作するスイッチング電源に対し、160msの電断を外乱として加えた。

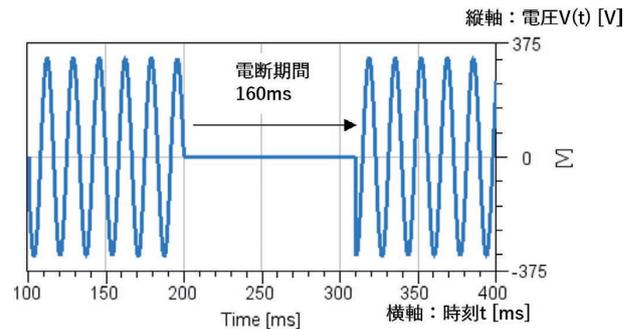


図9 入力電源部の外乱 - 160ms電断波形

3.4.2 過渡的な挙動の実測波形と解析結果の比較

前項に示す外乱を加えた結果、実測と解析結果が同様の挙動を示した。検証したスイッチング電源は、外乱に対して過渡的な電圧ストレスが発生しない通常サンプルと、意図的に対策部品を外した対策なしサンプルの2種類があり、それぞれに外乱を加えた結果について論じる。

表3の2行目に示すとおり、通常サンプルでは電断によって内部のスイッチング電圧が低下するが、電断が終わると元の電圧レベルに戻る。通常サンプルは、電断の外乱に対して安定して動作する結果となった。

一方で表3の3・4行目に示すとおり、対策なしサンプルでは実機と解析結果の両方で、電断復帰時にスイッチング電圧の過度な上昇が生じる挙動が確認できた。この挙動は、以下の①～③に示す3つの現象が重要な特徴であった。

- ① 電断期間に、スイッチング電圧が低下する。
- ② 電断復帰時に、低下したスイッチング電圧は①の電

表 3 解析波形と実測波形の比較

製品	観測箇所	解析結果	実測結果
通常サンプル	スイッチング電圧 (全体)	<p>縦軸: 電圧V(t) [V] 横軸: 時刻 [ms]</p> <p>①電断期間中の電圧低下 ②復帰後の間欠動作 電断期間 160ms 電断復帰</p>	<p>縦軸: 電圧V(t) [V] 横軸: 時刻 [ms]</p> <p>①電断期間中の電圧低下 ②復帰後の間欠動作 電断期間 160ms 電断復帰</p>
対策なしサンプル	スイッチング電圧 (全体)	<p>縦軸: 電圧V(t) [V] 横軸: 時刻 [ms]</p> <p>①電断期間中の電圧低下 ②復帰後の間欠動作 ③電圧跳ね上がり 電断期間 160ms 電断復帰</p>	<p>縦軸: 電圧V(t) [V] 横軸: 時刻 [ms]</p> <p>①電断期間中の電圧低下 ②復帰後の間欠動作 ③電圧跳ね上がり 電断期間 160ms 電断復帰</p>
	スイッチング電圧 (拡大)	<p>縦軸: 電圧V(t) [V] 横軸: 時刻 [ms]</p> <p>③電圧跳ね上がり (拡大) 629.6V</p>	<p>縦軸: 電圧V(t) [V] 横軸: 時刻 [ms]</p> <p>③電圧跳ね上がり (拡大) 626.1V</p>

圧レベルに戻り、その後間欠動作を繰り返す。

- ③ 電断復帰時の間欠動作において、スイッチング波形の跳ね上がりが生じる。

これら3つの現象の波形は実測と解析で同じ①～③の特徴を示した。また、電圧跳ね上がりの最大値は、実測と解析で近い値となった。よってこの結果から、外乱に対する製品の過渡的な挙動を再現したといえる。

4. シミュレーション結果から不安定な挙動を示す外乱範囲を動的に探索する手法

4.1 モデルからインプット範囲を抽出する手法の概要

本手法は、3章で述べたモデルの解析のインプットとアウトプットの定量化と、アウトプットから次のインプットを決定する探索を動的に繰り返す適応型実験計画法によって構成した。

まず、システムモデルのインプットとアウトプットの定量化について説明する。システムモデルを適応型実験計画法で利用するために、モデルのインプットをパラメータとして定義し、モデルがアウトプットする波形を定量化する

必要がある。

システムモデルへのインプットは、外乱波形の特徴を表すパラメータとした。電断の外乱の場合は、3.4.1項に示す電断時間 [ms] や電断期間中の電圧低下率 [%] がシステムモデルにインプットするパラメータに相当する。

システムモデルのアウトプットは、モデルの解析結果から得られる波形の特徴量とした。電気波形の特徴量は、数学的な演算によって抽出した。たとえば最大値、最小値、平均値などが特徴量を抽出する関数に相当する。

つぎに、動的な条件探索を実現する適応型実験計画法について述べる。本手法は、ESTECO社の最適化ソフトウェアである modeFRONTIER 2022R3 に搭載されている適応型実験計画法のアルゴリズムである Lipschitz サンプルング⁶⁾ を動的な探索方法として使用した。範囲の探索においては、不安定な条件を発見することだけでなく、不安定な挙動が発生する条件と発生しない条件の境界を含めた範囲を特定する必要がある。そのため、定量化したアウトプットの変動が大きい条件を集中的に探索する Lipschitz サンプルングを動的な探索アルゴリズムとして用いた。Lipschitz サンプルングは、モデル化された現象の振る舞いに重要な変化が起こる領域を絞り込む場合に有効である。

上記の動的な条件探索を実現する一連の手順を図 10 に示す。初期の外乱条件を指定し（手順 1）、システムシミュレーションによって挙動の解析結果の波形を得る（手順 2）。この波形の特徴量を適応型実験計画法によって評価し、次の解析条件を指定する（手順 3）。その後、手順 2～手順 3 の一連のサイクルを繰り返すことで、外乱条件範囲を効率的に探索する。

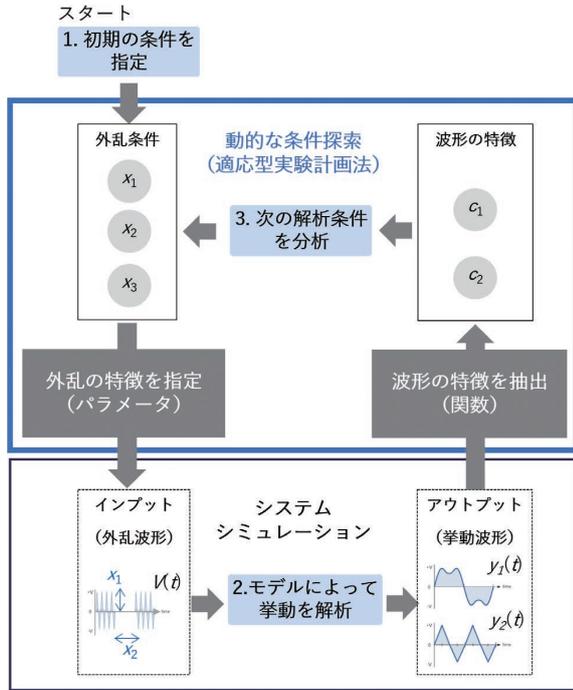


図 10 動的な条件探索の手順

4.2 適応型実験計画法による不安定範囲の探索結果

3章に示したスイッチング電源のシステムモデルを用いて、対策なしサンプルにおける過渡的な電圧の跳ね上がりの挙動を例として、不安定な挙動が発生する外乱範囲を抽出できることを説明する。

探索には表 4 のとおり定量化した指標を用いた。電断の外乱と製品使用条件を表すパラメータをインプットとし、PFC 回路のスイッチング電圧の最大値を定量化したアウトプットとした。探索条件は、スイッチング電圧が素子の高ストレス領域である 600 V を超える範囲とした。

表 4 システムモデルのインプットとアウトプット

種別	定量化した指標
インプット	1) 電断条件のパラメータ … 電断時間 [ms]、電断率 [%] 2) 製品使用条件のパラメータ … 入力電圧 [V]、出力負荷 [W]
アウトプット	3) スwitchング部の最大電圧 ※ … MAX() 関数 ※600 V を超えると高ストレス領域

上記の指標から動的に条件を決定し、システムシミュレーションで解析することで、必要な数のインプットに対応するアウトプットのデータを得た。インプットとアウトプットの関係性を散布図プロットで可視化した結果を図 11 に示す。探索によって、電圧が素子の高ストレス領域に達する条件を以下のように特定することができた。

- 範囲 1. 電断率が 47% 以上の時、高ストレス領域に達する。
- 範囲 2. 入力電圧が 130 V 以上の時、高ストレス領域に達する。
- 範囲 3. 電断率・電断時間・出力負荷の交互作用によって、特定の範囲で高ストレス領域に達する。

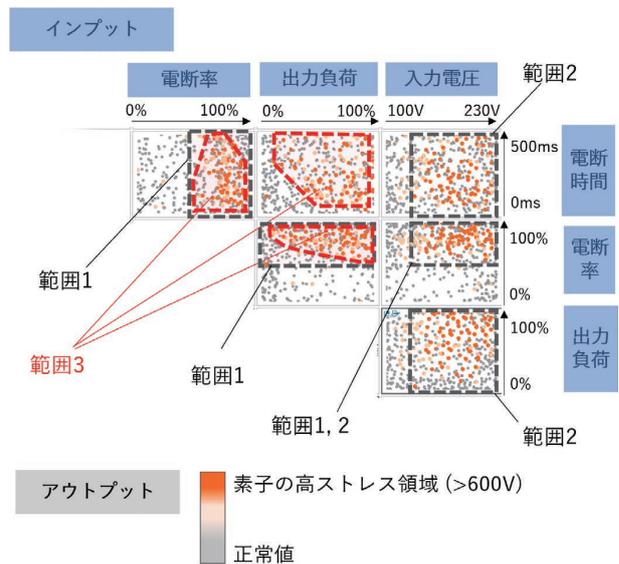


図 11 素子の高ストレス領域に達する条件の探索結果

また、解析データ数は $n=456$ であり、これは 4 パラメータの静的な探索（しらみつぶし）に換算すると、1 パラメータあたり 4.6 水準での探索に相当する。静的な探索によって同様の分析結果が得られる範囲を導出するためには、1 パラメータあたり 8 水準、つまり $n=4096$ の解析データが必要と見込まれるので、動的な探索によって不安定な挙動を示す領域を効率的に探索できたといえる。

併せて、図 11 では素子の高ストレス領域とその周辺の領域が密に探索できており、正常値となる条件では疎となっていることがわかる。これは Lipschitz サンプリングの探索の特徴であり、不安定と定めた条件範囲を的確に探索し可視化できたといえる。

5. 本手法の有効性

5.1 推定範囲の実機との一致性

本手法によって推定した不安定範囲を、実測で確認した実際の不安定範囲と比較し、範囲推定手法として妥当であ

ることを述べる。本節では、設計での手戻りが必要かを検証する観点から、不安定な範囲と正常値を示す範囲を以下のように区別して呼ぶ。

- ・ Pass…素子の高ストレス領域（600 V）以下となる条件
- ・ Fail…素子の高ストレス領域（600 V）を超える条件

4.2節で探索した条件のうち、交互作用を含む出力負荷と電断時間の Fail 範囲は実測での Fail の傾向とよく一致した。

図 12 に、スイッチング部の電圧最大値をモデルから得た結果と、実測の結果を示す。左が解析結果、右が実測結果で、色をつけた箇所が Fail 範囲である。固定した条件は電断率=100%、入力電圧=230 V で、変化させた条件は出力負荷、電断時間である。

		Fail 素子の高ストレス領域範囲					
解析結果		実測結果					
出力負荷電力 [W]	240	537	629	632	528	528	
	120	526	626	628	526	526	
	60	525	573	630	525	525	
	30	527	527	554	527	527	
	0	523	523	523	523	523	
	10	50	100	250	500		
		電断時間 [ms]					

図 12 実測の Fail 範囲との比較

確認した 25 条件のうち、23 条件で Pass/Fail を正しく判定できた。加えて、実測と解析のいずれも電断時間と出力負荷電力の特定の範囲に Fail が集中する傾向が見られた。

一致しない 2 条件においては、解析では Pass と判定するが、実測では Fail であった。これは、電気回路モデル（非因果モデル）の再現精度によって、解析値は実測値より低くなる傾向が生じているためである。一方で、解析で Fail と判定した条件は、すべて実機でも同様に Fail となる条件であった。

これら 2 つの観点を総合的に評価し、統計解析の指標である再現率・適合率を算出すると、表 5 のとおり再現率は 71%、適合率 100% となった。

表 5 本手法による再現率と適合率

観点	再現率	適合率
考え方	実際の Fail を、何% 正しく特定できたか	解析で特定した Fail のうち、何% が本当に Fail だったか
意味合い	不安定条件の取りこぼしがないことを示す精度	誤判定なく不安定条件を発見する精度
計算式	(解析と実測が Fail となる条件数) ÷ (実測の Fail 条件数)	(解析と実測が Fail となる条件数) ÷ (解析の Fail 条件数)
計算結果	71.4% (5/7)	100% (5/5)

Fail を示す範囲は実測と解析で重なっており、また再現率・適合率がともに目安である 70% を上回る。上記の理由により、本手法によって抽出した外乱による Fail 範囲が、実際に発生する Fail 範囲を推定できたといえる。

5.2 範囲を推定することによる効果

本技術によって、製品開発において課題であった外乱に対する不安定な挙動が発生する条件範囲を、効率的に見発することが可能になる。特に、実機試作前の机上検証時に電気的外乱に対する不安定動作を発見し対処することで、その後の後戻りのリスクを低減する未然防止の効果が得られる。5.1 項での一致性で不安定な挙動範囲の推定が実現できたことを示しており、本技術は課題解決に有効である。

また、実機を使って製品全体の挙動を解析する従来の製品開発と比較して、実機では分析が困難であった制御回路の挙動の分析も容易になり、設計の質の向上が期待できる。

6. むすび

製品開発において、限られた検証期間で外乱に対して不安定な条件を的確に発見し対処することが課題であった。

本稿では、因果モデルを付加したシステムシミュレーション技術により、製品全体を対象とする規模の電気的挙動の解析を可能にした。不安定条件の動的な探索手法により、広い範囲の条件から効率的に不安定となる条件を発見することを可能にした。

その結果、電気的外乱によって生じる製品の不安定な動作の発生範囲を特定する技術を構築し、試作後に設計工程まで後戻りするリスクを低減できる効果があることを示した。これにより、製品開発での限られた検証期間においても、電気的外乱に対して不安定な挙動を示す条件を設計段階で発見し対処できる効果が期待できる。

今後には、市場や使用環境でのあらゆる挙動を検証可能にするために、モデルで解析可能な電気的外乱のパリエーションを増やすことが技術課題である。また、実用化に向けては、多数かつ複雑な条件に対応するための適応型実験計画法の使いこなしを中心とした探索手法の高度化が課題である。このような課題解決に引き続き取り組み、外乱に対する安定動作を論理的に担保する技術の開発での実践をより早く実現する。

参考文献

- 1) 国際標準記述によるモデル開発・流通検討委員会, 自動車システムのモデルベース開発入門, 公益社団法人自動車技術会, 2017, pp. 2-3.
- 2) 日本産業標準調査会, JISC61000-4-11, 2021

- 3) 江口啓. “1 群-7 編-6 章 6-5 スイッチング電源回路”. 電子情報通信学会『知識の森』. https://www.ieice-hbkb.org/files/01/01gun_07hen_06.pdf (Accessed: Nov. 1, 2023)
- 4) 佐藤尚一, “OP アンプの 2 大トラブル「オフセットと発振」の原因と対策,” *トランジスタ技術*, vol. 51, no. 12, pp. 124-132, 2014.
- 5) 堀考正. *インターユニバーシティ パワーエレクトロニクス*, オーム社, 1996, pp. 89-91.
- 6) A. Lovison and E. Rigoni, “Adaptive sampling with a Lipschitz criterion for accurate metamodeling,” *Communications in Applied and Industrial Mathematics*, vol. 1, no. 2, pp. 110-126, 2010.

執筆者紹介



藤田 浩志 FUJITA Koji

インダストリアルオートメーション

ビジネスカンパニー

技術開発本部 第3 技術部

専門：ノイズ・EMC 設計

所属学会：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。

数クロック単位で互換性を担保する ASIC (Application Specific Integrated Circuit) リメイク手法

古石 憲男

近年、国内半導体業界は競争激化や半導体不足によるサプライチェーンの混乱に直面し、古いプロセスの ASIC の生産終了が進む中、我々は、顧客への商品供給維持のために ASIC 生産終了時の対応に苦慮している。一般的な対応策としては、一括購入 (ラストバイ) か、再設計 (リメイク) が考えられるが、リメイクでは、しばしば、設計資産が一部残っていないという課題や、古い ASIC に広く採用されてきた非同期回路の技術的な課題に直面する。

このような課題に対して、我々は、設計資産が一部残っていない中で非同期回路から同期回路への再設計を可能とする開発手法を提案する。具体的には、RTL 検証において、非同期回路である元の RTL と同期回路に再設計された RTL に対して同時に信号を入力し、それぞれの RTL からの出力信号をクロック毎に比較することで、これらの課題を同時に克服し、機能と性能の互換性を確保している。我々はこの手法を用いてすでに 6 個の ASIC をリメイクし、市場クレームは 0 件という成果を上げた。

ASIC (Application Specific Integrated Circuit) Remake Method Guaranteeing Compatibility at the Clock Cycle Level

FURUISHI Norio

In recent years, the domestic semiconductor industry has faced intense competition and supply chain disruptions due to semiconductor shortages. Amid the phase-out of ASIC production using older processes, we have struggled with how to respond when ASIC production is discontinued to maintain product supply to customers. Common responses include bulk purchases (last buys) or redesigns (remakes). However, redesigns often face challenges such as the lack of design assets and technical issues with asynchronous circuits widely used in older ASICs.

To address these challenges, we propose a development method that enables redesign from asynchronous to synchronous circuits even when design assets are unavailable. Specifically, in RTL verification, we simultaneously input signals to both the original RTL circuit, which is asynchronous, and the RTL redesigned into synchronous circuits. By comparing the output signals from each RTL circuit clock by clock, we overcome these challenges simultaneously, ensuring functional and performance compatibility. We have already remade six ASICs using this method and achieved zero market claims.

1. まえがき

1.1 半導体業界の動向について

近年、国外の半導体ベンダとの競争激化により国内の多くの半導体ベンダの縮小・撤退が進んでいる^{1,2)}。また、

COVID-19 パンデミック、洪水・地震などによる自然災害、米中デカップリングなどの地政学的要因などを要因とした半導体不足は、サプライチェーンに大きな混乱をもたらしている。このような状況下で国内外を問わず一部の半導体ベンダは付加価値率の高い先端プロセスにリソースを集中し³⁾、古いプロセスの生産終了が加速すると思われる。

Contact : FURUISHI Norio norio.furuishi@omron.com

1.2 半導体部品生産終了に対する弊社の対応

我々の商品である CS/CJ シリーズにも、多くの ASIC と呼ばれる半導体部品を使用している。ASIC とは特定の用途や目的に合わせて最適化された半導体集積回路の一種である。特定の機能および処理に最適化されて設計されているため、商品の性能向上や差別化を図ることができる。

CS/CJ シリーズは、機械制御や工場の自動化、プラント制御など産業機器向けに使用される汎用プログラマブルコントローラの商品群である。図 1 に CJ シリーズの外観を示す。



図 1 CJ シリーズの外観

CS/CJ シリーズなどの汎用プログラマブルコントローラ商品群は、工場の自動化やプラント制御などの用途から、製品サイクルが非常に長くなる傾向にある。事実、CS/CJ シリーズも 1990 年半ばの販売開始から現在に至るまで、30 年近く顧客にご愛顧いただいております、今後も生産を継続する予定である。

しかしながら、先ほど述べたように、近年 ASIC の生産終了が頻発しており、その対応に直面している。我々は、顧客が我々の商品を安心して長期間にわたって使用いただけるように、部品の長期的な確保を行い、顧客への商品の供給責任を果たす必要がある。

1.3 ASIC リメイクの必要性について

顧客への供給責任を果たすために、生産終了される ASIC への対応方法は、大きく分けて、ラストバイ (Last Buy) と呼ばれる生涯使用数量の一括購入か、ASIC リメイクと呼ばれる ASIC の再設計のいずれかである。

ラストバイは、ASIC 生産終了時に将来の需要予測から搭載商品が生産終了するまでに必要な数量を算出し、一括購入し在庫確保する方法である。ASIC の生産終了時期と、当該 ASIC を使用している製品の生産終了時期が比較的近い場合に採用される方法である。本方法は、将来の製品需要を正確に予測し、適切な数量を購入する必要がある。過剰に購入した場合は製品の生産終了時に余った ASIC の廃棄ロスが発生するリスク、逆に不足した場合は製品の供給ができなくなるというリスクがある。またラストバイ数量

が非常に多い場合は、購入した ASIC の保管場所の確保、湿度管理などの適切な管理が必要となり追加コストが必要になるリスクがある。

ASIC リメイクは、異なった半導体ベンダや比較的新しい半導体プロセスを使用して、ASIC を再開発する方法である。ASIC の開発方法については、「1.4 一般的な ASIC 開発フロー」にて簡単に説明する。ASIC リメイクは、ASIC の生産終了時期と当該 ASIC を搭載している製品の生産終了時期が離れており正確な将来の需要予測が困難な場合、そもそも製品の生産終了時期が決まっておらず必要な数量が算出できない場合、購入すべき数量が非常に多く在庫管理コストが膨大になる場合などに採用される。本方法のメリットとして、比較的新しい半導体プロセスを採用することにより、供給の持続性を確保しコスト効率を向上させる効果が期待される

1.4 一般的な ASIC 開発フロー

ASIC 開発の主要な工程について「図 2 一般的な ASIC 開発フロー」を用いて簡単に説明する。

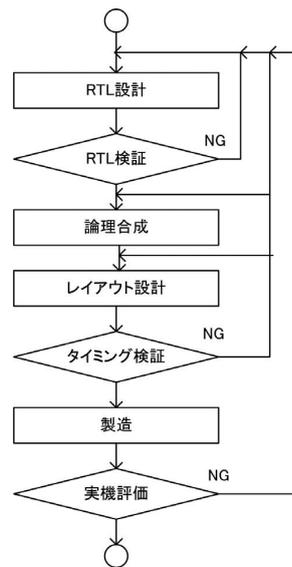


図 2 一般的な ASIC 開発フロー

RTL 設計 (Register Transfer Level Design) : ASIC 内部の回路設計を行う工程である。回路の実現方法や設計意図を設計仕様書に回路図やタイミングチャートなどで記載し、その内容を Verilog HDL や VHDL といったハードウェア記述言語を用いて、論理回路よりも抽象度の高い、フリップフロップと呼ばれる記憶素子間の処理を明確化したレジスタ転送レベル (RTL : Register Transfer Level) でシステムの機能と動作をモデル化する⁴⁾。

RTL 検証 (Register Transfer Level Verification) : RTL 設計工程で設計された RTL モデルの正確性を検証する工程である。論理シミュレーション、フォーマル検証などの技術

を活用し、設計が指定された仕様に適合していることを確認する。設計が仕様に適合していない場合は、RTL 設計工程に戻り修正が行われる。本工程には、テストモデルなどの検証環境の作成や検証計画の実行が含まれる。

論理合成 (Logic Synthesis) : RTL モデルを物理的なゲートレベルのネットリストに変換する工程である。本工程により、高レベルの抽象化された設計が、実際の論理ゲートとしての表現へと変換される。この論理ゲート表現に変換された設計データをネットリストと呼ぶ。変換時には、回路の最適化、エリアとパフォーマンスのトレードオフ、電力消費の最小化などが重要な考慮事項となる。

レイアウト設計 (Layout Design) : レイアウト設計は、論理合成によって得られたネットリストを基に、ASIC 内の物理的な構成要素 (トランジスタ、配線など) の配置と配線を行う工程である。本工程は半導体ベンダにて実施される。本工程では、チップの面積効率、配線の最適化、熱管理、電力分配などの物理的な要件を考慮しながら、設計の物理的実装が行われネットリストに反映する。

タイミング検証 (Timing Verification) : タイミング検証は、設計された回路が特定のタイミング要件を満たすことを保証するための工程である。本工程は半導体ベンダによる検証の後、設計者側でも実施される。本工程は、レイアウト工程で行われた配置や配線の情報を反映したクロックや信号の伝播遅延情報をもとに、各タイミング要件を検証する。回路が特定のタイミング要件を満たさない場合は、レイアウト工程に戻り回路の配置や配線を見直す。それでもタイミング要件を満たさない場合は RTL 設計工程に戻る。

製造 (Manufacturing) : ASIC を製造する工程である。これまでの工程を経て生成された設計データをもとに、半導体製造工場にて製造される。製造された ASIC は、機能テストと品質検証のプロセスを経て、出荷される。

実機評価 (Device Evaluation) : 製造された ASIC を製品に搭載し評価する工程である。機能評価、性能評価、耐環境評価などが行われる。本工程により、ASIC は仕様通りの機能、性能および信頼性を確保する。

2. ASIC リメイク時の課題について

2.1 設計資産の問題

過去に開発された ASIC の設計資産は一部存在しないか、または正確性に欠ける不完全な状態のものであることが多い。ここで言う設計資産とは、「1.4 一般的な ASIC 開発フロー」で述べた各工程で作成された設計仕様、回路図や RTL、検証環境や検証結果、各種の検討結果書などである。これら設計資料の不足は、ASIC リメイク実行時において重大な障害となり得る。また設計資産の不確実性は、過去の設計に関わった技術者やチームの専門知識の不足に起因することがある。特に、設計の意図や過程が文書化さ

れていない場合、ASIC リメイク時に元の回路の正確性を確認し、必要に応じて修正を行うことがより困難になる。

さらに、知的財産権の対応も重要である。ASIC リメイクには、元の設計で使用された特許や他の知的財産権に関する権利の再確認が含まれる。特に、ライセンス契約が更新されていないか、期限切れである場合、法務部門と連携し対応に当たる必要がある。

2.2 技術的な問題

2.2.1 非同期回路の問題

多くの古い ASIC においては非同期回路が広く用いられていた。非同期回路は同期回路に比べて、消費電力の抑制、性能や回路効率がよいというメリットがある一方、以下に示すようなデメリットがある。

- ・メタステーブルのリスク：非同期信号をフリップフロップなどの記憶素子で受ける場合、メタステーブルという信号が不安定な状態になる期間が発生する可能性があり^{4,5)}、システムの信頼性に重大な影響を与えるリスクがある。このため、非同期信号をフリップフロップなどの記憶素子で受ける場合には、適切な同期化回路を挿入する必要がある。
- ・設計の複雑性の増大：非同期回路は信号間の実時間でのタイミングを個体のばらつきや温度や電圧変化の影響まで考慮した設計が必要であり、設計全体の複雑性を増加させ、保守性や拡張性に悪影響を及ぼす。
- ・検証網羅性の確保の難しさ：非同期回路は、実時間でのタイミングを個体のばらつきや温度や電圧変化の影響まで考慮した挙動を検証する必要があるが、RTL 検証ではすべての組み合わせを検証することが困難であり、一般的なタイミングの組み合わせで済ませることが多い。この結果、RTL 検証の網羅性を確保できていないことがある。タイミング検証についても、タイミング検証ツールでは信号の遅延時間が最大のケース、一般的なケース、最小のケースの3条件しかツールによる自動判定することができない。それ以外のケースは設計者が机上計算にて判断する必要があり、タイミング検証の網羅性が確保できていないリスクがある。

このため、非同期回路で設計された古い ASIC を非同期回路のままリメイクした場合、設計が複雑なため不具合を混入するリスクが高く、設計の妥当性や互換性は、実機評価による波形測定やランニング試験などで確認する必要がある。この結果、実機評価で問題が発生した場合は論理合成やレイアウト設計、最悪の場合 RTL 設計に戻るリスクが非常に大きい。リスクが発現した場合は、製造コストと期間が大きく増加する問題がある。

2.2.2 同期化再設計の問題

時代が進むにつれ半導体プロセスが微細化され、ASICの回路規模が大きくなると、非同期回路のメリットをデメリットが上回るようになった。2003年には、設計者によって異なる記述スタイルや合成、RTL 検証やタイミング検証などの設計手法を共通化して可読性と流用性の向上を図ることを目的とし、株式会社半導体理工学研究センターにより「RTL 設計スタイルガイド」が発行された。現在では本スタイルガイドが事実上の業界標準となっており、本スタイルガイドで非推奨とされた⁶⁾ 非同期回路設計は次第に採用されなくなり、同期設計が主流となっている。同期回路設計により、非同期回路のような実時間単位での設計および検証は不要になり、クロック単位での設計および検証ですべての挙動が網羅できるというメリットがある。

一方、非同期回路で設計された古い ASIC を同期回路で再設計する場合、元の非同期回路と再設計後の同期回路で挙動が変わるという問題がある。具体的な例を、図3に示した実際に古い ASIC で採用されていた非同期回路の例を用いて説明する。

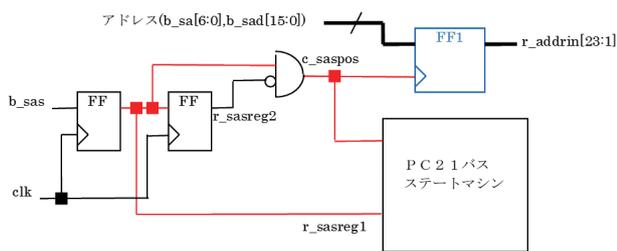


図3 非同期回路の例

図3の非同期回路の問題点は2つである。

1. 外部信号である b_sas をフリップフロップ (FF : flip-flop) でラッチしているが、同期化用のシリアライザーが挿入されていないため、メタステーブルと呼ばれる信号が不安定な状態が発生するリスクがあり^{4,5)}、発生したメタステーブルが赤色のラインを経由して PC21 バスステートマシンに伝搬し、このステートマシンの挙動が不安定になるリスクがある。
2. 青色のフリップフロップ (FF1) のクロック端子にクロック (clk) 以外の信号が接続されているため、青色のフリップフロップ (FF1) の出力である $r_addrin[23:1]$ もクロックに同期しておらず、この信号を使用する後段の回路の検証網羅性の確保、およびタイミング検証が複雑になる。

上記の問題を解決するために図3の非同期回路を同期回路に修正した例を図4に示す。図4の同期回路では、図3

の非同期回路の問題点がそれぞれ以下のように解決する。

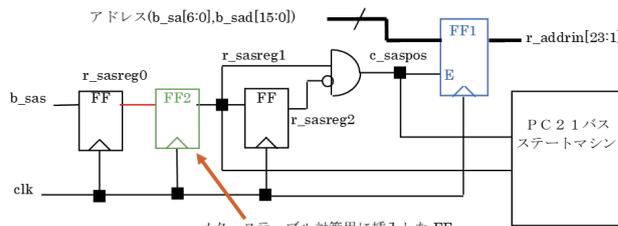


図4 同期回路への修正例

1. 同期化用のシリアライザーを構築するために緑色のフリップフロップ (FF2) を挿入し、外部信号である b_sas を同期化させる。これによりメタステーブルの発生は赤色のラインで示した区間のみで発生し、メタステーブルは後段の PC21 バスステートマシンには伝搬せず、当該ステートマシンの挙動が不安定になることはない。
2. 青色のフリップフロップ (FF1) をイネーブル端子付きのフリップフロップに変更し、クロック端子にクロックである clk 信号を接続、イネーブル端子に以前のクロック端子に接続していた c_saspos 信号を接続する。これにより青色のフリップフロップ (FF1) の出力信号である r_addrin はクロックに同期され、検証網羅性の確保、およびタイミング検証が容易になる。

ただしこの場合、同期化用のフリップフロップを追加したことにより $r_sasreg1$ 信号や c_saspos 信号の出力が1クロック分遅れ、オリジナルの非同期回路との動作が異なるという課題が発生する。「2.1 設計資産の問題」でも述べたように古い ASIC の設計資産は正確性のリスクがあり、同期化による動作タイミング変更の影響を正確に判断できないリスクがある。また、同期化による動作タイミングの変更箇所が複数ある場合は、その影響が相互作用するため、その判断はさらに困難になる。

2.3 ASIC リメイク時の課題

従来の ASIC リメイクでは、「2.1 設計資産の問題」がある中では、「2.2.2 同期化再設計の問題」を解決することができないと判断し、非同期回路を非同期回路のままリメイクしていた。その結果、「2.2.1 非同期回路の問題」で述べた実機評価での不具合発覚によるイタレーションが発生し、開発期間とコストが計画時から大幅に増加するという問題が複数の ASIC リメイクで発生した。

そこで筆者らは、従来手法の問題を解決するために、「2.1 設計資産の問題」がある中で、「2.2.2 同期化再設計の問題」を解決できる、すなわち同期化による動作タイミング変更の影響が十分に検証できる ASIC リメイク手法を

提案する。

3. 提案する ASIC リメイク手法

今回提案する手法は、まず「2.3 ASIC リメイク時の課題」で述べた従来の ASIC リメイク手法の課題を回避するために、非同期回路を同期回路に修正する。すなわち非同期設計手法で開発された古い ASIC を、現在主流である同期設計手法⁶⁾を用いてリメイクする。これにより、従来の ASIC リメイク手法で課題となっていたイタレーションの発生リスクを抑える。また、従来の ASIC リメイク手法で同期設計が採用できなかった理由である同期化による動作タイミング変更の影響が十分に見極められなかった課題を解決するために、本提案手法では RTL 検証に新たな作業を追加する。それぞれの工程の作業と確認内容について以下に述べる。

3.1 設計資産の正確性の確認

本提案手法の RTL 設計工程の最初の作業は、現存する RTL ソースコードの信頼性の確認である。「2.1 設計資産の問題」で述べたように、現存する設計資産が正確性に欠ける不完全な状態であるリスクがある。そこで、現存する RTL ソースコードと半導体ベンダで保管されているレイアウト後のネットリストが一致するか、等価検証ツールを用いて確認する。等価検証ツールは、本来、合成工程やレイアウト工程内で合成結果やネットリストが元の RTL と機能的に等価であるかを確認するためのツールであるが、本提案手法では、RTL 設計工程で、RTL が元のネットリストと等価であるかを確認するためにも使用する。RTL と元のネットリストの等価性を確認することにより、少なくとも現存する RTL の正確性は担保される。図 5 に Synopsys 社の等価検証ツールである Formality⁷⁾ による等価検証結果の出力例を示す。

```

***** Verification Results *****
Verification SUCCEEDED
ATTENTION: RTL interpretation messages were produced during link
of reference and implementation designs.
Verification results may disagree with a logic simulator.

-----
Reference design: r:/WORK/s_msmc_top
Implementation design: i:/WORK/s_msmc_top
1105 Passing compare points

-----
Matched Compare Points
-----
Passing (equivalent)      144      0      59      0      85      359      458      1105
Failing (not equivalent)  0         0         0         0         0         0         0         0
    
```

図 5 等価検証結果の出力例

RTL ソースコードと半導体ベンダに保管されているネットリストとが一致しなかった場合は ASIC リメイクの継続を含めて検討が必要である。少量の不一致の場合は RTL ソースコードを修正して一致させる。大量の不一致が発生している場合は、RTL ソースコードは使用できず、ラストバイや同等以上の機能や性能をもつ後継機種の開発など代

替策を検討する必要がある。

3.2 同期化再設計の妥当性確認

RTL ソースコードとネットリストの一致がとれた場合、次の作業は非同期回路の洗い出しと同期化再設計の実行である。近年では、非同期回路の検出は人手で行わず CDC (Clock Domain Crossing) チェックツールと呼ばれるツールを用いて非同期回路の検出を行い、人手による検出漏れを防いでいる。本提案手法でも同様に CDC ツールを用いて非同期回路の検出を行う。代表的な CDC ツールの 1 つである Synopsys 社の SpyGlass CDC⁸⁾ で指摘された非同期回路の例を図 6 に示す。

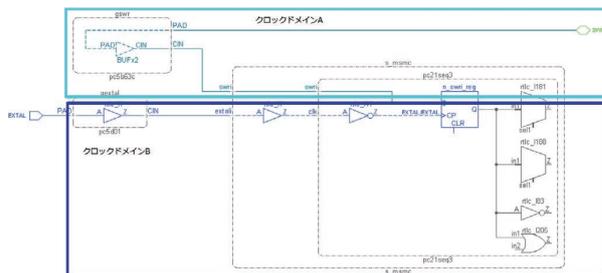


図 6 CDC による非同期箇所解析例

図 6 では、空色の信号 (クロックドメイン A) と青色の信号 (クロックドメイン B) がそれぞれ異なったクロックを持つため、青色の最終段のフリップフロップの出力にメタステーブルが発生するリスクがあり、後段の論理がその信号をそのまま使用しているため、システムに悪影響を及ぼす可能性があることを示している。検出された非同期回路を同期回路に修正し、修正が正しいか再度 CDC チェックを実施する。図 7 に SpyGlass CDC の結果出力を示す。本作業は、図 7 に示すようにすべての CDC エラーが無くなるか、当該エラーが問題ないことを確認できるまで繰り返す。これにより、同期化再設計の妥当性が担保される。

```

Results Summary:
-----
Command-line read : 0 error, 0 warning, 0 information message
Design Read : 0 error, 16 warnings, 2 information messages
Found 1 top module:
s_msmc_top (file: ../src/s_msmc_top.v)

-----
Blackbox Resolution: 0 error, 0 warning, 14 information messages
SDGC Checks : 0 error, 0 warning, 0 information message
Policy lint : 0 error, 177 warnings, 2 information messages
Policy clock-reset : 0 error, 2 warnings, 14 information messages

-----
Total : 0 error, 195 warnings, 32 information messages

-----
Total Number of Generated Messages : 227
Number of Reported Messages : 227
    
```

図 7 CDC 結果の出力例

3.3 同期化再設計による互換性への影響確認

RTL 検証工程では、「2.2.2 同期化再設計の問題」で述べたように同期化による動作タイミング変更の影響が十分に見極められなかった課題を解決し、機能的および性能的な

互換性を担保するために図 8 に示す様な検証環境を構築する。緑色でハッチングした部分が本提案手法で追加されたモジュールである。

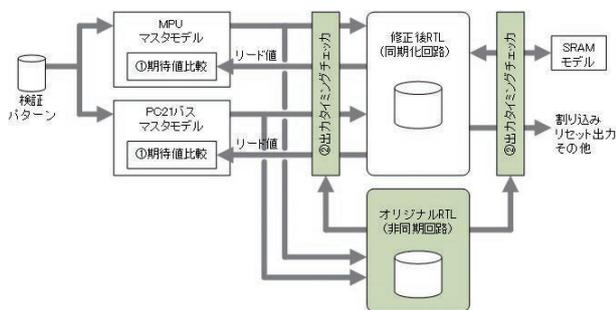


図 8 リメイク用検証環境構成の例

本環境の各モジュールの説明を以下に記述する。

- MPU マスタモデル：マイコンのリードアクセスタイミングの生成、ライトアクセスのタイミングの生成を行う。リードアクセス時には検証対象ユニットである修正後 RTL からのリードデータとあらかじめ検証パターンで示された期待値との比較を行いリードアクセスが正しく実行されたか判定を行う。
- PC21 バスマスタモデル：弊社独自のバスプロトコルである PC21 バスのシングルリードアクセスおよびバーストリードアクセスのタイミング生成、シングルライトアクセスおよびバーストライトアクセスのタイミングの生成を行う。シングルリードアクセスおよびバーストリードアクセス時には検証対象ユニットである修正後 RTL からのリードデータとあらかじめ検証パターンで示された期待値との比較を行いリードアクセスが正しく実行されたか判定を行う。
- 修正後 RTL：検証対象のモジュール。リメイク対象 ASIC の RTL を前述の RTL 設計で同期化再設計したもの。外部 SRAM を経由して PC21 バスマスタモデルと MPU マスタモデル間でデータのやり取りを行う。
- SRAM モデル：修正後 RTL からのライトアクセスに対して、指定されたアドレスにデータを格納する。また、修正後 RTL からのリードアクセスに対して、指定されたアドレスのデータを返す。
- オリジナル RTL：本提案手法で追加されたモジュール、すなわちリメイク対象 ASIC の RTL である。機能的には修正後 RTL と同じであるが、非同期回路で構成されているため信号の出力タイミングが異なる。図 8 に示すように本モジュールにも修正後 RTL モデルと同様に PC21 バスマスタモデルからの入力信号が接続されているが、本モデルからの出力信号は各マスタモデルには接続されておらず、後述の出力タイミングチェッカに接続されている。このため、本モジュール

からのリードデータは、各マスタモデルとの期待値比較には使用されない。

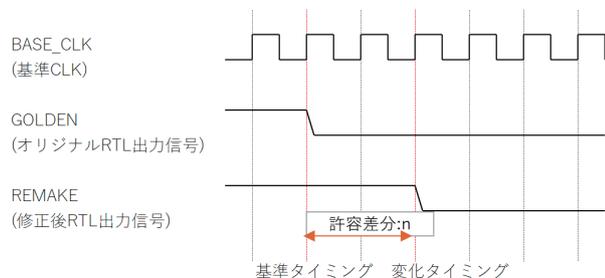
- 出力タイミングチェッカ：本提案手法で追加されたモジュールである。図 8 に示すように修正前 RTL モジュールと修正後 RTL モジュールの出力信号が接続されており、それぞれの信号の値および出力タイミングの差をクロック単位で確認する。出力信号の差が一定のクロック数以上、または値が一致しない場合にシミュレーションエラーを通知する。

本提案手法では、MPU マスタモデルや PC21 バスマスタモデルなどの各モデルから同時に修正後 RTL モジュールおよび修正前 RTL モジュールに対してアクセスを行う。リードアクセスの場合は、一般的な RTL 検証と同様に各モデルで実施する修正後 RTL モジュールからのリードデータと期待値比較の他に、本提案手法で追加された出力タイミングチェッカモジュールにて修正後 RTL モジュールからの出力と修正前 RTL モジュールからの出力を比較する。モデルによる期待値チェックおよび出力タイミングチェッカモジュールでの出力タイミングの差が一定のクロック数以内であれば問題がないと判定する。モデルによる期待値チェックは一致しているが出力タイミングチェッカモジュールでの出力タイミングの差が一定のクロック数以上の場合は、問題ありと判定し修正後 RTL モジュールの修正を行う。また、モデルによる期待値チェックは不一致であるが出力タイミングチェッカモジュールでの出力タイミングの差が一定のクロック数以内の場合は、既存の検証パターンの問題である可能性が高く、検証パターンを確認し必要に応じて検証パターンを修正する。また、各モデルから外部 SRAM へのアクセスの場合も同様に、出力タイミングチェッカモジュールにて修正後 RTL モジュールおよび修正前 RTL モジュールからの SRAM モデルへの出力を比較し、出力タイミングの差をクロック単位で判定する。上記の他に必要機能については、出力タイミングチェッカにて出力タイミングの比較を行い、出力タイミングの差が問題ないか判定を行う。

本提案手法の特徴の 1 つである出力タイミングチェッカでの出力タイミングの比較方法について以下に述べる。これまでも再三述べたように、非同期回路を同期設計した場合、同期回路の出力タイミングは元の非同期回路の出力と比べて数クロック遅くなる。どの程度までのクロック数の差を許容できるかはシステムに依存するが、MPU やメモリなどのアクセス時間が変わらない範囲であれば問題はない。もし出力の差が許容できない場合には、当該出力タイミングを変更するために内部回路を修正する必要がある。リメイク開発の場合、リメイクに使用する ASIC の半導体プロセスが元の ASIC の半導体プロセスよりも微細化されているケースが多く、その結果内部回路の伝搬遅延が早く

なっているため、内部回路の修正による出力タイミングの変更が可能な場合が多い。また、出力の差が許容できず、かつ出力タイミングの変更が不可能な場合は、顧客にリメイク前の ASIC と同様に使用して頂くことができないため、リメイクを継続するか再考する必要がある。

出力タイミングの比較はアサーションベース検証 (ABV: Assertion-Based Verification) と呼ばれる手法を適用し、動作クロック単位で自動的に比較する。本来、アサーションベース検証では回路内部やインタフェース信号の挙動を、SVA (System Verilog Assertion)、PSL (Property Specification Language) といったアサーション専用言語で記述する必要ある¹⁰⁾。本提案手法では、内部回路やインタフェース信号の挙動はオリジナル RTL の内部信号や出力信号を使用するため、新たに SVA や PSL などのアサーション言語で記述する必要はない。本提案手法で必要な記述を図 9 で示す。



```
unique_name : assert property(
  @(posedge BASE_CLK)
  $fell(GOLDEN) | => ##[0:n] !REMAKE
) else sim_top.err = sim_top.err+1;
```

図 9 出力波形比較のアサーション言語記述例

図 9 に示すように、修正後 RTL と修正前 RTL の出力をクロック毎に比較し、何クロックまでの信号の差を許容するかを記述するのみである。このため、アサーション記述言語の習得に苦勞することなく、比較的容易に適用することができる。

このように本提案手法では、非同期回路である修正前 RTL の出力と同期回路に修正した RTL との出力をクロック毎に比較することにより、機能の互換性および性能の互換性を数クロックの範囲内で担保する。

3.4 検証網羅性の確保について

最後に検証網羅性の確保について述べる。「2.2.1 非同期回路の問題」でも述べたが、非同期回路は個体ばらつきや温度および電圧変化を考慮したタイミングを含めて検証する必要があり、RTL 検証ではそれらを考慮した検証ができないため代表的なタイミングの組み合わせのみを検証し、RTL 検証での網羅性はあまり重要視されなかった。一

方、一般的に同期回路は回路構造に合わせて、適切なクロック単位でのタイミングの組み合わせで検証パターンを用いて検証した場合、ほぼすべての回路の検証が可能である。また、非同期回路時に考慮が必要であった個体ばらつきや温度および電圧変化の影響については、タイミング検証時に解析ツールで自動的に判定される。

本提案手法では、現存する検証パターンを図 8 で示した検証環境を用いて検証する際にカバレッジ測定ツールを用いて検証網羅性を測定し、一般的な同期回路の検証と同様に十分な検証網羅性が確保されるまで、検証パターンの追加とカバレッジ測定を行い品質の確保を行う。図 10 に Cadence 社の論理シミュレータ Xcelium⁹⁾ を用いたカバレッジ測定結果の例を示す。

Ex	Unit	Name	Overall Average Grade	Overall Covered
		(no filter)	(no filter)	(no filter)
		Verification Metrics	94.83%	6280 / 7278 (86.29%)
		Types	95.23%	2984 / 3483 (85.67%)
		Instances	94.43%	3296 / 3795 (86.85%)
		aiop_ibcif	94.43%	3296 / 3795 (86.85%)
		ibcifdelaybuf	100%	549 / 549 (100%)
		ibcifavalon	95.06%	362 / 475 (76.21%)
		ibcifdmac	96.16%	580 / 714 (81.23%)
		ibcifarb	97.92%	424 / 474 (89.45%)
		ibcifmpu	98.62%	759 / 794 (95.59%)

図 10 カバレッジ測定結果の例

カバレッジの測定結果が 100% であっても検証網羅性が十分であるかはユースケースや実際の RTL から検討が必要であるが、少なくともカバレッジ測定結果が 100% でない場合は、未検証のコードが残っていることを示す。しかし、デッドコードと呼ばれる実際には動作しない不要なコードが元の RTL 内に残っていると、いくら検証パターンを追加してもカバレッジは 100% にならない。カバレッジが 100% にならない場合、原因が検証パターンの不足によるものか、そのコードがデッドコードであるかを設計者が都度判断する必要がある。

本提案手法では、非同期回路である古い ASIC を同期回路に再設計し、本提案手法の特徴である非同期回路である再設計前の RTL の出力と同期回路に再設計した RTL との出力をクロック毎に比較することにより機能の互換性および性能の互換性を数クロックの範囲内で担保し、一般的な同期回路の検証と同様に十分な検証網羅性が確保されるまで、検証パターンの追加とカバレッジ測定を行い品質の確保を行う。その結果、安定した品質で ASIC をリメイクすることができ、顧客への供給責任が果たせると考える。

4. 本提案手法の効果と今後の課題

4.1 効果

筆者は過去に従来の ASIC リメイク手法でも 4 件の ASIC

リメイクを経験している。その結果を表 1 に示す。

表 1 従来 ASIC リメイク手法による結果

No	用途	実現手段	実機評価結果	市場不具合
1	ラダーエンジン	FPGA	修正多数	1 件発生 出荷停止半年
2	バス制御用 ASIC	ASIC	基板修正 1 件	問題なし
3	ネットワーク用 ASIC	ASIC	ASIC リワーク 2 件 基板修正 1 件	問題なし
4	カウンタ制御用 ASIC	ASIC	問題なし	問題なし

表 1 の 1 番目に示したラダーエンジン用 ASIC のリメイクでは、イタレーションが多数発生すると見込まれたため ASIC へのリメイクを断念し、FPGA (Field-Programmable Gate Array) でのリメイクを実施したが、結果として市場不具合を発生させ、出荷が約半年程度止まるという事態を招いた。また、その後のリメイクでも市場不具合の発生こそなかったが、表 1 の 2 番目に示したバス制御用 ASIC では、市場投入前の実機評価で不具合が判明し、ASIC の作り直しや基板での対応を行う必要があった。表 1 の 4 番目のカウンタ制御用 ASIC のリメイクは、本提案手法で述べた修正前 RTL モジュールとの出力比較は行っていないが、内部回路は同期回路に修正を行っており、従来手法から今回の提案手法に移る過渡期の ASIC リメイクである。

筆者らは、本提案手法を用いてすでに 6 件のリメイクを ASIC で実現し、リメイクした ASIC を搭載した商品を市場投入した。その結果を表 2 に示す。

表 2 本提案 ASIC リメイク手法による結果

No	用途	実現手段	実機評価結果	市場不具合
1	バス制御用 ASIC	ASIC	問題なし	なし
2	バス制御用 ASIC	ASIC	問題なし	なし
3	ネットワーク用 ASIC	ASIC	問題なし	なし
4	バス制御用 ASIC	ASIC	問題なし	なし
5	バス制御用 ASIC	ASIC	問題なし	なし
6	バス制御用 ASIC	ASIC	ASIC リワーク 1 件	なし

表 2 に示すように、本不具合も含めて市場投入後の不具合報告は発生していない。このように本提案手法は、安定した品質を確保できており有効性の高い開発手法であると

考える。

一方で表 2 の 6 番目のバス制御用 ASIC では、市場投入前に実施した実機評価で 1 件の不具合が発見され、ASIC をリワークしなければならなくなった。これは図 7 で示した検証環境にて修正前 RTL と修正後 RTL の差があることを担当者は認識していたが、その差分は問題ないと誤った判断をしたためである。本不具合は、修正前 RTL と修正後 RTL の差が無いように修正した後、市場投入された。本件は修正前 RTL と修正後 RTL の差がある場合の判断は、複数人で確認し判断しなければならないという示唆であると考ええる。

4.2 今後の課題

筆者らのチームは現在、本提案手法を用いて、さらに 2 件の ASIC リメイクを実行中である。そこで回路規模の拡大に伴い、網羅性を確保するために必要な工数が大幅に増加していることが確認されている。この増加の主因として、「3.2 検証網羅性の確保について」の最後に述べたデッドコードと称される、実行されることのないコードの存在が挙げられる。デッドコードは、特定の条件が恒常的に偽であるために実行されず、また、プログラムの流れが到達することのないコードブロックを指す。ASIC 開発においては、デッドコードは論理合成の際に自動的に削除されるため、通常、回路の規模や挙動、性能に影響を与えないと見なされ、特に対策は講じられていなかった。このため、検証で網羅されない原因が、検証パターンの検討不足によるものかデッドコードによるものかの判断に多くの工数を要している。今後の課題として、リメイク ASIC の回路規模は拡大する傾向にあり、本提案手法を持続的に適用するためにデッドコードの効果的な検出方法の検討が必要であると考ええる。

5. むすび

本稿では、ASIC 生産の中止への対応策として、ASIC リメイクの必要性について述べた。ASIC リメイクの課題として「設計資産の問題」と「技術的な問題」から「ASIC リメイク時の課題」を明示し、これらに対処する新たな手法を提案した。提案手法では、古い ASIC に広く採用されている非同期回路を、現在の ASIC の主流である同期回路にリメイクする手続きを具体的に提示し、先に論じた課題に対して柔軟で効果的な対策を講じると同時に、機能と性能の互換性を担保しつつ同期回路への移行が可能であることを示した。具体的な成果として、提案手法を用いて 6 つの ASIC をリメイクし、安定かつ高品質な製品を提供できたことを確認した。これにより、半導体業界が迅速に変化する状況に柔軟かつ持続的に対応し、安定かつ高品質な ASIC を供給することで、顧客への商品の供給責任を果たすことができると考える。

ただし、回路規模の増加に伴う検証工数の増加原因として、デッドコードの存在が浮かび上がった。デッドコードの効果的な検出手法が今後の課題として残る。将来的には、デッドコードの検出手法の向上に加え、提案手法を持続的に適用することでより効率的な開発手法を構築する必要があると考える。

参考文献

- 1) 日本経済新聞社. “富士通、三重の半導体工場売却 台湾 UMC に 576 億円で.” 日本経済新聞. <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO32425480Z20C18A6TJC000/> (Accessed: Feb. 07, 2024).
- 2) ルネサスエレクトロニクス株式会社. “山口工場閉鎖のお知らせ.” ニュース. <https://www.renesas.com/jp/ja/about/press-room/notice-regarding-closure-yamaguchi-factory> (Accessed: Feb. 07, 2024).
- 3) 商務情報政策局. “半導体・デジタル産業戦略.” 経済産業省. <https://www.meti.go.jp/press/2023/06/20230606003/20230606003-1.pdf> (Accessed: Feb. 07, 2024).
- 4) 東芝デバイス & ストレージ株式会社. “メタステーブル対策.” CMOS ロジック IC 使用上の注意. <https://toshiba.semicon-storage.com/jp/semiconductor/knowledge/e-learning/cmos-logic-usage-considerations/usage-11.html> (Accessed: Jan. 22, 2024).
- 5) Intel Corporation. *AN 42: Metastability in Altera Devices*, 第 4.0 版. (2019). Accessed: Jan. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www.intel.com/content/www/us/en/content-details/653636/an-42-metastability-in-altera-devices.html?wapkw=an42>
- 6) 株式会社 半導体理工学研究センター 設計技術開発部 IP 技術開発室, *RTL 設計スタイルガイド Verilog-HDL* 編. 初版. 株式会社 半導体理工学研究センター, 2003, 1章, pp. 17-18.
- 7) Synopsys, Inc. “Formality 等 価 検 証.” Synopsys. <https://www.synopsys.com/ja-jp/implementation-and-signoff/signoff/formality-equivalence-checking.html> (Accessed: Feb. 21, 2024).
- 8) Synopsys, Inc. “SpyGlass CDC.” Synopsys. <https://www.synopsys.com/ja-jp/verification/static-and-formal-verification/spyglass/spyglass-cdc.html> (Accessed: Feb. 21, 2024).
- 9) Cadence Design Systems, Inc. “Xcelium Logic Simulator.” Cadence. https://www.cadence.com/ja_JP/home/tools/system-design-and-verification/simulation-and-testbench-verification/xcelium-simulator.html (Accessed: Feb. 21, 2024).
- 10) J. Bergeron 他, *ベリフィケーション・メソッドロジ・マニュアル*. 初版. CQ 出版社, 2006, pp. 53-112.

執筆者紹介



古石 憲男 FURUISHI Norio

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

第 2 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。Synopsys、Formality および SpyGlass は、Synopsys, Inc. の米国およびその他の国における登録商標または商標です。Cadence および Xcelium は、Cadence Design Systems, Inc. の米国およびその他の国における登録商標または商標です。Altera は Intel Corporation またはその子会社の商標です。

2

新たな成長領域を 生み出す技術



ミリ波レーダを用いた呼吸波形計測における 波形不連続性の低減

谷本 雄大, 松浦 圭記, 齋藤 啓介

ヒトの動きやバイタルサインを計測する人体センシングは、計測デバイスの普及と関連サービスの拡大に伴い我々にとって身近な存在となっている。様々な計測デバイスの中でも、人体と接触せずに非接触でヒトのバイタルサインを精度よく計測できるミリ波レーダが注目されている。バイタルサインの一つである呼吸を体表面の変位としてレーダで計測した呼吸波形には、複数の反射信号の存在や周囲環境変化の影響により、実際の呼吸には存在しない不連続部が現れることがある。このような不連続性は、特に長時間の波形トレンドから健康状態を推定するうえで妨げとなり得るため、低減することが望ましい。

本論文では、波形の特徴とレーダで得られる空間情報に基づいて、推定された波形群の中から不連続性が小さくなる波形を選択する手法を提案している。ミリ波レーダを用いて複数人の呼吸波形を同時に計測する実験を行い、提案手法を用いて長時間の呼吸波形を構成した結果、不連続性を考慮しない場合と比較して波形に含まれる不連続性が低減することを示している。

Reduction of Waveform Discontinuity in Respiratory Waveform Measurement using Millimeter-Wave Radar

TANIMOTO Yudai, MATSUURA Keiki and SAITO Keisuke

Human sensing, which measures human movements and vital signs, has become familiar to us with the proliferation of measurement devices and the expansion of related services. Among various measurement devices, millimeter-wave radar has attracted much attention as it can accurately measure human vital signs without physical contact. Discontinuous parts that do not exist in actual respiration may appear in the respiratory waveform, which is measured by the radar as the chest wall movement. This is due to the presence of multiple reflection signals and the influence of environmental changes. Such discontinuities can hinder the estimation of health status from long-term waveform trends, so it is desirable to reduce them.

This paper proposes a method of selecting waveforms with less discontinuity from the estimated waveform group. This method is based on the characteristics of the waveform and the spatial information obtained by the radar. We conducted an experiment to simultaneously measure the respiratory waveforms of multiple people using millimeter-wave radar. The results showed that the discontinuity contained in the waveform was reduced compared to the case where discontinuity was not considered when constructing a long-term respiratory waveform using the proposed method.

1. まえがき

ヒトの動きやバイタルサインを計測する人体センシングは、急速なセンサの高度化・普及とパーソナルヘルスケアサービスの拡大に伴い、我々の生活において身近な存在となっている。例えばスマートウォッチに代表されるウェア

ラブルデバイスで心拍数、血中酸素飽和度や皮膚温度などを計測し、ストレス状態や睡眠パターンと紐づけて心身状態を日常的にモニタリングすること^{1,2)}が広く行われている。また、カメラを用いた自動車ドライバーの覚醒状態判定³⁾や、対象物を立体として認識できる深度センサを用いたヒトの運動・姿勢計測⁴⁾といった応用も進められている。こうしたことから、人体センシング技術の重要性は、

Contact : TANIMOTO Yudai yudai.tanimoto@omron.com

医療・ヘルスケアや労働安全の分野において、今後ますます高まることが期待される。

一方で普及が進むこれらの計測手段には、実用上の懸念点も存在する。例えばウェアラブルデバイスなどの接触型センサは、計測中常にユーザの皮膚に接触させる必要がある。そのため、長時間にわたる計測では不快感を覚えたり、アレルギーを持つユーザの場合は皮膚炎を生じたりすることがある。カメラなどの光学センサでは、センサに接続される通信ネットワークを介して顔画像などの個人情報が流出し、ユーザのプライバシーを侵害するおそれがある。

このような懸念に対応する手段として、レーダなど電波を用いた人体センシング技術が注目されている。電波を用いた計測は、一般に身体とは非接触で行うため、センサの装着に関する様々な課題から解放される。また、ヒトの顔を識別できるほどの空間分解能を持たず、プライバシーに関する懸念も小さい。電波の中でもマイクロ波やミリ波は着衣を透過し、ヒト体表面の動きを捉えることができる。とりわけミリ波を送信信号として用いるミリ波レーダは、その波長の短さと信号の広帯域性に基づく、微小変位に対する精度の高い計測手段として注目されており、ヒトの呼吸や心拍を計測対象とした様々な検討が行われている⁵⁻⁷⁾。

呼吸に伴う換気量の推移や体表面の微小変位を時間波形として表した呼吸波形は、呼吸の深さや吸気・呼気の時間比率などの情報を含んでおり、睡眠や健康の状態を推定する手段として有用である^{8,9)}。レーダを用いて呼吸波形を計測するとき、後述するように、計測の繰り返し周期として数秒から数十秒の時間区間（以下、観測区間）を設定することがよく行われる⁵⁻⁷⁾。数分以上の連続波形を得るには、数秒から数十秒単位の各観測区間で推定した波形同士を接続することになる。健康や睡眠の状態変化を把握するには、数分以上の単位で呼吸を観察することが有効である。しかし、従来の報告は単一の観測区間における計測結果を扱うものが殆どであり、複数の観測区間において波形を接続するときの整合性は考慮されていない。その結果、波形の接続部である観測区間境界において不連続性を生じることがある。これは実際の呼吸には存在しない成分であり、波形をもとに様々な推定をするときの妨げとなり得るため、低減することが望ましい。

本論文では、連続呼吸波形に含まれる不連続性を小さくするための、各観測区間における波形選択手法を提案する。2. でレーダを用いた呼吸波形計測の原理について述べ、3. では不連続性の評価指標を導入する。4. で提案手法の詳細について述べ、5. ではミリ波レーダを用いて計測した複数観測区間の波形群から提案手法を用いて波形を選択し、連続波形を構成したときの不連続性の評価結果を示す。

2. レーダを用いた呼吸波形計測

2.1 信号モデル

簡単のため、連続波 (Continuous Wave: CW) 方式のレーダにおいてアンテナを送受信共用とし、ヒトの体表面における電波の反射が一点のみで生じる場合を考える。このとき、送信信号が体表面で反射され、アンテナで受信される受信信号を直交検波して得られるベースバンド信号は次のように表せる¹⁰⁾。

$$s(t) = A \exp\left(j \frac{4\pi f_0 d(t)}{c}\right) + s_{DC} + n(t) \quad (1)$$

ここで t は時間、 A は複素振幅、 f_0 は送信信号の周波数、 $d(t)$ は呼吸に伴うレーダ視線方向の体表面変位、 c は光速、 s_{DC} は静止物からの反射波などに相当する静止クラッタと呼ばれる直流成分、 $n(t)$ は雑音である。上式からわかるように、体表面変位成分が位相項 $\exp(j4\pi f_0 d(t)/c)$ に含まれており、その位相変化量は周波数に比例する。同じ体表面変位に対して周波数が高いほど位相変化量が増大するため、呼吸に伴う微小変位については、ミリ波を用いることでマイクロ波よりも感度の高い計測が可能となる。いま、Albanese らの研究¹¹⁾ から、 $d(t)$ を次のように定式化する。

$$d(t) = \begin{cases} -\frac{K}{T_1 T_E} t^2 + \frac{KT}{T_1 T_E} t & (t \in [0, T_1]) \\ \frac{K}{1 - \exp\left(-\frac{T_E}{\tau}\right)} \left(\exp\left(-\frac{(t-T_1)}{\tau}\right) - \exp\left(-\frac{T_E}{\tau}\right) \right) & (t \in [T_1, T]) \end{cases} \quad (2)$$

ここで K は変位量を表す係数、 T_1 は呼吸周期における吸気時間、 T_E は同呼気時間、 $T = T_1 + T_E$ は呼吸周期、 τ は呼気における時定数である。例として、式(2)において体表面変位のピークトゥピークを $K = 0.005$ (5 mm)、呼吸周期を $T = 4$ s、吸気と呼気の時間比率を $T_1 : T_E = 1:2$ と仮定し、式(1)に代入してベースバンド信号を求める。ただし式(1)において $f_0 = 60$ GHz、 $|A| = 1$ 、 $s_{DC} = 25 - 50j$ 、信号対雑音比を 12 dB とし、信号は周期 50 ms でサンプリングされた離散時間信号であるとする。

図1上は上記で設定した体表面変位の時間波形、図1下はそれに対して求めたベースバンド信号を複素平面上でプロットしたものである。信号は、複素平面上で静止クラッタ成分を中心とした円弧を描くことがわかる。この性質を利用し、円フィッティングなどで推定した円の中心を基準とする信号偏角から位相（体表面変位成分）を求め、呼吸波形を推定する逆正接復調と呼ばれる手法が提案され広く用いられている^{12,13)}。この手法では、円の中心を正確に推

定できなければ波形に歪みが生じる。そのため、クラッタの経時変化が大きい場合には計測精度が低下することに注意する必要がある。

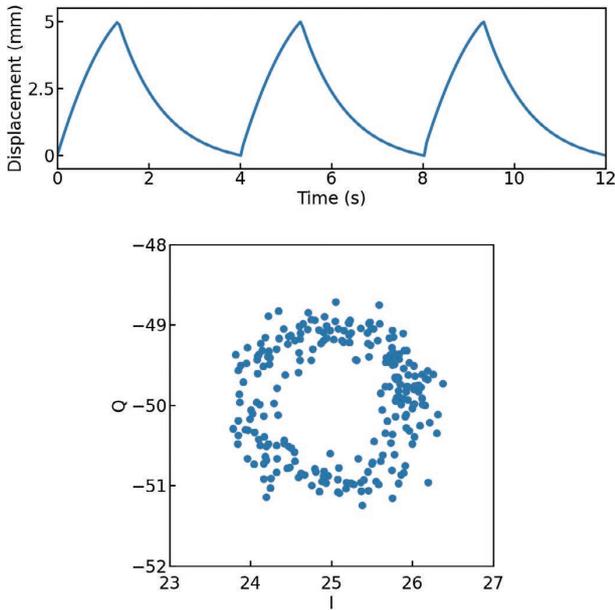


図1 体表面変位の時間波形（上）とベースバンド信号（下）

2.2 複数信号の分離

前節で扱った理想的な反射信号に対し、実際の反射信号について考える。体表面における電波の反射は人体の様々な部位において同時に生じ得るため、反射信号は一つだけでなく複数受信されることが普通である。さらにレーダの計測エリア内に複数のヒトが存在すると、異なる呼吸に対応した体表面変位成分が信号に重畳する。各々の呼吸波形を精度よく計測するためには、適切に信号を分離・推定することが必要である。その手法は様々であるが、本論文ではレーダと反射点間の距離や反射信号のアンテナ入射角推定結果に基づいて信号を空間的に分離する手法をとる。ミリ波レーダでは、周波数変調した送信信号を用いて距離推定を行う周波数連続変調波（Frequency Modulated Continuous Wave: FMCW）方式による広帯域信号の送受信や、複数の送受信アンテナを用いて仮想的なアレーアンテナを形成し方位推定性能を高める多入力多出力（Multiple-Input Multiple-Output: MIMO）レーダ技術を採用することで、センチメートルオーダーの空間分解能を実現できる¹⁴⁾。

2.3 観測区間における呼吸波形計測

呼吸波形計測で行われる信号処理について説明する。図2はレーダを用いた呼吸波形計測の、観測区間における信号処理フローの一例を示している。はじめにレーダ信号の送受信を行う（図2（a））。反射信号を空間的に分離するため、得られたベースバンド信号をもとに距離や方位に対す

る空間プロファイルを求める（図2（b））。これらの計算にはフーリエ変換がよく用いられ、計測空間を距離や方位方向に離散的にサンプリングして得られる空間上の各点をビン（bin）と呼ぶ。各ビンは振幅と位相からなる複素振幅のデータを持つ。レーダ信号送受信と空間プロファイル算出は所定周期で繰り返し行う。後に推定する波形のエリアシングを防ぐため、空間プロファイルの算出周期は想定される呼吸周期に対して十分短くなるように設定する。

次に観測区間が終了するまで空間プロファイルを蓄積してから、各ビンの時間方向データに対して静止クラッタを推定・除去して逆正接復調を行う（図2（c））。想定される呼吸周期よりも観測時間を長く設定することで、波形に含まれる（準）周期性の検出が容易になる。一方で数分以上の長い観測区間を設定すると、周囲環境やヒトの位置が経時変化することで歪んだ波形が推定され、長時間にわたり正確な計測結果が得られなくなるという課題がある。また、観測区間が長くなるほど信号処理対象のデータサイズと計算規模が増大し、計測システムのコストアップにつながる。そのため、観測区間は数秒から数十秒程度に設定されることが多い。

その後、各ビンで得られた波形が呼吸由来のものであるかを判定し、呼吸と相関があると考えられた信号成分が含まれるビンを抽出する（図2（d））。呼吸周期に対応したバンドパスフィルタの適用や、クラスタリングによる分類など様々な手法が提案されている⁵⁻⁷⁾。ここで得た波形（群）をもとに、観測区間における出力として代表となる波形を構成する（図2（e））。

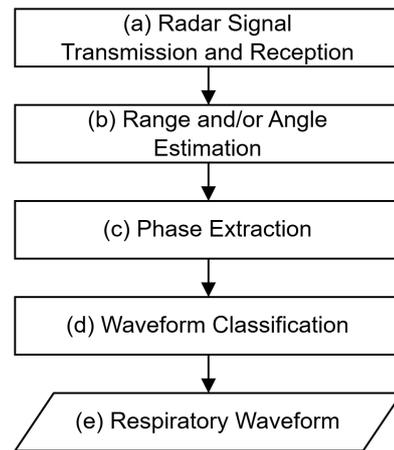


図2 呼吸波形計測における信号処理フローの例

3. 呼吸波形の不連続性と評価指標

3.1 呼吸波形に含まれる不連続性

呼吸波形に含まれ得る不連続性の一例を図3に示す。図中ではレーダで推定した波形と、フローセンサやベルト型

センサ（以下、呼吸ベルト）など信頼性の高い他の計測手段を用いて得た波形（以下、リファレンス波形）を併せて示している。ここで各波形は、離散時間信号としてサンプリングされているものとする。図3 (a) は、単一のサンプリング点でスパイク状の応答が得られた場合に相当する。計測中に何らかの外乱が混入することや、波形の歪みなどで生じる。図3 (b) は、ある時点（例えば観測区間の境界）を境に波形がオフセットした、あるいは位相差が生じた場合を示している。こうした現象が起きるのは、2. で述べたように、受信信号に含まれる静止クラッタの推定精度は経時変化などによって観測区間ごとに変化し得るため、各観測区間で異なった歪み成分が波形に重畳することなどによる。また、体表面における反射信号が空間分解能やビンの空間上の広がりよりも狭い範囲で複数得られることや、反射信号が複数の伝播経路を経るマルチパスにおいて、レーダとヒトの位置関係の僅かな変化に伴い状態が変化することも原因になり得る。たとえ同一ビンであっても、支配的となる信号成分が経時変化することで推定される波形は観測区間前後で変化し得る。図3 (c) は、ある時点で波形の位相が反転した場合を示している。これは、レーダで推定した波形がレーダ視線方向の体表面変位を反映していることに起因する。特に送信波が体表面に対して浅い角度で入射すると、変位方向と視線方向が直交ようになり、ヒトの部位形状によってはレーダから見て互いに逆方向の変位成分が同時に計測されることもある。また、我々の観察によると、人によっては呼吸時に腹部と胸部が互いに逆方向に変位することがしばしば生じる。この場合、送信波が体表面に対して垂直に近い角度で入射したとしても、同相・逆相の関係にある波形が得られる。

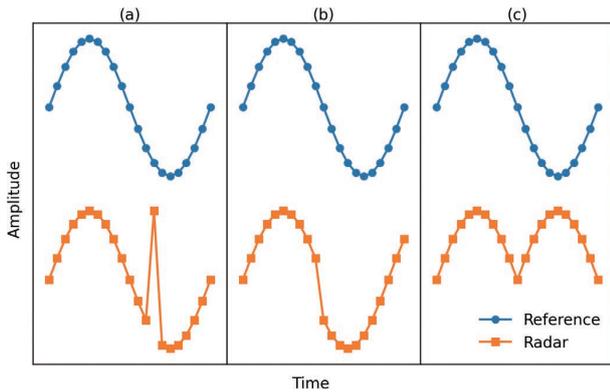


図3 波形に含まれる不連続性の例

3.2 不連続性の評価指標

呼吸波形に含まれる不連続性の低減について検討するため、不連続性の大小を定量的に評価する指標を導入する。波形は呼吸の状態に応じて様々な傾きをとるため、単に隣接するサンプリング点間の値の変化量だけで不連続性を評

価することは適切でない。そこでリファレンス波形との値の差に注目する指標（以下、差の指標）と、波形傾きの変化に注目する指標（以下、傾きの指標）という観点の異なる二つの指標を導入する。なお、本論文では特に観測区間境界の不連続性に注目するが、スパイク応答状の不連続性は境界以外でも生じ得るため、観測区間境界以外も含む波形中の全てのサンプリング点を不連続性の評価対象とする。また、以降の議論において、各観測区間内の波形は N 個の離散点 $n=1, \dots, N$ を用いて等時間間隔でサンプリングされているものとする。

3.2.1 差の指標

隣接するサンプリング点間の差分値を、リファレンス波形とレーダで推定した波形とでそれぞれ求める。それらの差の絶対値を求めたものが差の指標であり、式(3)のように表される。ここで $\hat{d}(n)$ は、現在の観測区間で指標計算対象となる波形の n 番目のサンプリング点における変位推定値である。ただし $\hat{d}(0)$ は、直前の観測区間で指標計算対象となる波形の N 番目のサンプリング点における変位推定値を指すものとする。サンプリングタイミングは両波形とも共通とし、値の比較を容易にするため標準化によってスケールする。この指標では両波形の形状が近いほど指標値が小さくなり、不連続性が小さいと見做される。ただし、同じ呼吸を対象に計測したとしても、計測原理の違いによって得られる波形が異なる場合がある。レーダは呼吸に伴う体表面変位から波形を得ているが、例えばフローセンサは呼吸に伴う気流変化から波形を得ており、計測原理が全く異なる。レーダと計測原理が大きく異なる手段でリファレンス波形を取得すると、図3に示したような不連続部がレーダの推定波形に含まれていなかったとしても、指標値が大きくなり不連続性が大きいと見做される可能性があることに注意が必要である。

$$F_{\text{diff}} = \left| \left(\hat{d}_{\text{ref}}(n) - \hat{d}_{\text{ref}}(n-1) \right) - \left(\hat{d}_{\text{radar}}(n) - \hat{d}_{\text{radar}}(n-1) \right) \right| \quad (3)$$

3.2.2 傾きの指標

傾きの指標は、レーダで推定した波形において評価対象となるサンプリング点前後の傾きの平均値と、サンプリング点における傾きの差の絶対値を求めたものであり、式(4)のように表される。ここで $\hat{d}'(n)$ は現在の観測区間で指標計算対象となる波形の n 番目のサンプリング点における後方差分で求めた傾きである。ただし $\hat{d}'(0)$ は直前の観測区間で指標計算対象となる波形の N 番目のサンプリング点における後方差分で求めた傾き、 $\hat{d}'(N+1)$ は直後の観測区間で指標計算対象となる波形の1番目のサンプリング点における後方差分で求めた傾きを指すものとする。差の指標と同様に、標準化でスケールした波形を対象とす

る。この指標は傾きの変化率を反映しており、変化率が小さい滑らかな波形形状であれば指標値が小さくなり不連続性が小さいと見做される。一方で指標の算出にリファレンス波形が関与しないため、リファレンス波形と大きく形状が異なる波形が推定されたとしても、不連続性が小さいと見做される可能性もある。

$$F_{\text{grad}} = \left| \frac{\hat{d}'_{\text{radar}}(n+1) + \hat{d}'_{\text{radar}}(n-1)}{2} - \hat{d}'_{\text{radar}}(n) \right| \quad (4)$$

3.3 指標の検証

上記の評価指標が機能することを確認するため、シミュレーションを行う。リファレンス波形とレーダに関する設定は2.で述べた条件に基づくものとし、観測区間長は5sとする。図4(a)は評価対象となるリファレンス波形と、レーダで推定した呼吸波形を示している。両波形は標準化でスケールしている。図中の破線は観測区間境界を表している。いま、レーダで推定した波形において観測区間の1周期目2.5s時点でスパイク応答、2周期目にリファレンス波形に対して呼吸周期5分の1相当の位相差、3周期目にリファレンス波形に対して逆相となる不連続部を与えている。この波形について差の指標値を求めたものが図4(b)、傾きの指標値を求めたものが図4(c)である。両指標ともに、不連続部では指標値が相対的に大きく、それ以外では小さくなっている。両指標が機能することを確認できたため、これらを用いて不連続性の評価を行うこととした。

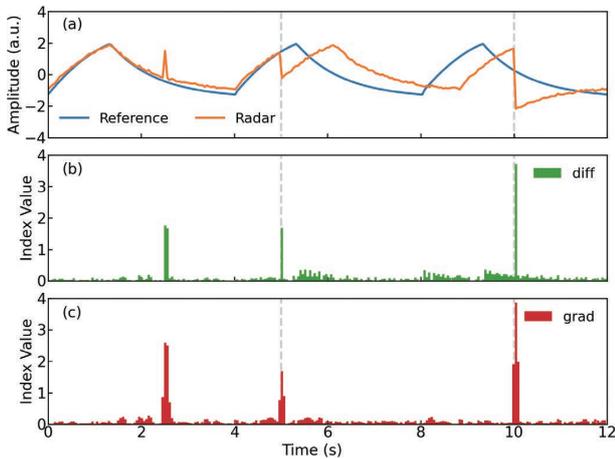


図4 波形不連続性に対する評価指標の比較

4. 波形選択手法

前述したように、一般にレーダでは複数の反射信号が同時に受信されるため、呼吸に対応した成分を持つ波形も同様に複数得られる。各観測区間で推定した呼吸波形群をもとに長時間にわたる不連続性の小さい連続波形を構成するには、それら波形群の中から適切な波形を何らかの手法に

よって選択する必要がある。これは図2の信号処理フローにおいて、同図(d)と同図(e)の間の処理として実行される。なお、波形をリアルタイムに連続出力するためには逐次的な処理が必要となる。そこで以降の説明では、図5に示すように直前の観測区間において波形群が既に選択済みという前提で、現在の観測区間における未選択の波形群の中から1つ以上の波形を選択する場合の手法について考える。本論文では、上記二つの波形群の情報を利用して、差(difference)・傾き(gradient)・ビン(bin)というそれぞれ異なる基準を用いて波形を選択する、三つの手法を提案する。

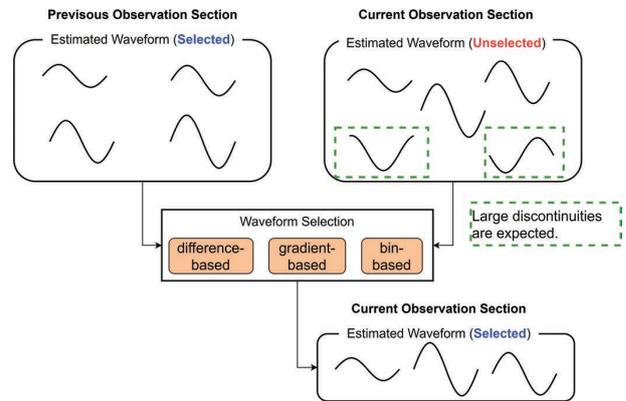


図5 波形選択の概念

4.1 差による選択基準

現在の観測区間sにおいて推定した M_s 個の呼吸波形群について、 i 個目($i=1, \dots, M_s$)の波形の1番目のサンプリング点における変位推定値を $\hat{d}'_{i,s}(1)$ とする。同様に、直前の観測区間s-1において推定した M_{s-1} 個の波形群について、 j 個目($j=1, \dots, M_{s-1}$)の波形のN番目のサンプリング点における変位推定値を $\hat{d}'_{j,s-1}(N)$ とする。現在の観測区間における i 個目の波形の変位推定値について、観測区間境界における直前の観測区間の波形群の平均変位推定値との差を式(5)のように求める。この値について昇順にソートすると、各観測区間の波形同士を接続したとき、観測区間境界前後で値の変化が小さくなるような波形が上位となることが期待される。計測条件に応じて適切な波形選択数を設定し、その数だけ上位の波形を選択する。

$$\left| \frac{1}{M_{s-1}} \sum_{j=1}^{M_{s-1}} \hat{d}'_{j,s-1}(N) - \hat{d}'_{i,s}(1) \right| \quad (5)$$

4.2 傾きによる選択基準

直前の観測区間において推定した呼吸波形群について、 j 個目の変位推定波形のN番目のサンプリング点における後方差分で求めた傾きを $\hat{d}'_{j,s-1}(N)$ とする。同様に、現在の観測区間において推定した波形群について、 i 個目の変

位推定波形の2番目のサンプリング点における後方差分で求めた傾きを $\hat{d}'_{i,s}(2)$ とする。これらの平均値と、同じく i 個目の変位推定波形の1番目のサンプリング点における後方差分で求めた傾き $grad_{i,j}$ との差を、 $j=1, \dots, M_{s-1}$ にわたって平均したうえで式(6)のように求める。ここで $grad_{i,j}$ は、観測区間境界前後の変位推定値を用いて求める。この値について昇順にソートすると、各観測区間の波形同士を接続したとき、観測区間境界前後で波形傾きの変化が急峻でない、滑らかな波形が上位となることが期待される。差による選択基準と同様に、設定した波形選択数だけ上位の波形を選択する。

$$\left| \frac{1}{M_{s-1}} \sum_{j=1}^{M_{s-1}} \left(\frac{\hat{d}'_{j,s-1}(N) + \hat{d}'_{i,s}(2)}{2} - grad_{i,j} \right) \right|$$

$$where grad_{i,j} = \frac{\hat{d}_{i,s}(1) - \hat{d}_{j,s-1}(N)}{2} \quad (6)$$

4.3 ビンによる選択基準

呼吸に伴う体表面変位は、皮膚で繋がった複数の部位が運動して生じる。そのため、空間的に近い部位同士での反射信号には相関の高い体表面変位成分、つまり互いに形状の近い呼吸波形が含まれ得ると考えられる。また、レーダでの計測が困難となる大きな体動が生じなければ、同一部位からの反射が得られる空間座標は、隣接する観測区間において同じであるか、大きく変化しないことが期待できる。この仮定に基づいて、波形が得られた空間プロフィールにおけるビンの分布から基準となるピンを決定し、基準ピンとより近い距離にあるピンから得られた波形を選択する。基準ピンは、直前の観測区間において推定した波形群について、 j 個目の波形が得られたピン $\mathbf{b}_{j,s-1}$ の集合

$$\{\mathbf{b}_{1,s-1}, \dots, \mathbf{b}_{M_{s-1},s-1}\} \quad (7)$$

に対して、集合内のピンが対応する空間座標の中央値となる座標に対応するピン $\tilde{\mathbf{b}}_{s-1}$ とする。現在の観測区間において推定した波形群について、 i 個目の波形が得られたピン $\mathbf{b}_{i,s}$ と基準ピンとのユークリッド距離を次式のように求める。

$$d_{i,s} = \|\mathbf{b}_{i,s} - \tilde{\mathbf{b}}_{s-1}\| \quad (8)$$

この値について昇順にソートし、他の選択基準と同様、設定した波形選択数だけ上位の波形を選択する。本手法では、空間座標に基づいて波形が選択されるため、観測区間の境界における波形の値そのものは考慮されない。また、ビンの情報が存在しない、距離方向や方位方向の信号分離能力を持たないレーダを用いて計測を行う場合には適用できないことに注意が必要である。

5. 実験評価

不連続性評価指標を用いて、呼吸波形に含まれる不連続

性の低減効果について検証した。具体的には、ヒトを対象にした呼吸波形計測実験を行い、提案手法の適用有無による波形不連続性への影響を評価した。

5.1 実験環境

送信信号の中心周波数を 62 GHz、帯域幅を 3.3 GHz に設定した FMCW 方式のミリ波レーダを用いる。送信 2 素子、受信 3 素子のアンテナを備え、MIMO アレーとして素子間隔が 0.5 波長である 6 素子のリニアアレーアンテナを形成する。レーダ（空間プロフィール）サンプリング周期は 80 ms、観測区間長は 20 s（サンプリング点数 $N=250$ ）である。図 6 は実験における被験者とレーダの配置関係を示している。家庭における家族の就寝シーンを想定し、被験者は 3 名 (A, B, C) として、仰向けの状態で肩を接するように 0.45 m 間隔で横並びに配置する。レーダは被験者頭側、中央の被験者 B が正面に来るように設置し被験者胸部からの水平距離を 0.5 m、設置高さを被験者背面からの垂直距離を 0.3 m とする。レーダの計測と同時にリファレンス波形を取得するため、呼吸ベルトを各被験者の体幹に装着する。レーダと呼吸ベルトは、体表面の変位を捉えて呼吸波形として表すという点で共通しており、理想的には両者の波形は高い相関を持ちうる。呼吸ベルトのサンプリング周期は 10 ms である。レーダのサンプリングタイミングと同期させることで、共通のサンプリング点において両者の値を比較できるようにする。

以上の構成により、各被験者の呼吸波形を連続的に計測した。観測区間 30 周期分に相当する 600 s にわたる計測結果を対象として、時系列クラスタリング¹⁵⁾を用いて各観測区間で被験者ごとに呼吸波形群を抽出した。提案手法における波形の選択数は、各観測区間の計測条件に応じて適応的に設定することで、波形不連続性の低減効果が高まることが期待される。その点は今後の課題とし、今回は全観測区間で共通の波形選択数とした。そのために、全観測区間のうち得られた波形数が最も少ない区間の波形数を、提案手法における波形の選択数として設定した。これをもとに、各観測区間で提案手法を用いて波形を選択した。

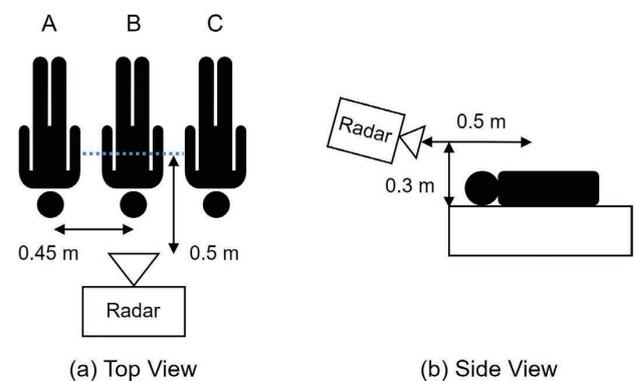


図 6 実験環境概略図

5.2 評価結果

提案手法を用いて各観測区間で波形を選択し、全観測区間にわたる連続呼吸波形を構成した。連続波形は、各観測区間で選択した波形群の各サンプリング点における中央値から構成した。このときの、各観測区間境界のサンプリング点における不連続性指標の平均値を表 1 に示す。なお、比較対象として設定した選択基準なしの場合では、各被験者に対応した波形群を抽出するクラスタリングの過程において、ビンに対して一意に付与されるインデックスに基づき昇順に選択している。これは信号処理の過程で副次的に得られるものであり、不連続性の低減を意図したものではない。

表 1 から、提案手法を用いることで、元々不連続性が小さい被験者 B を除き不連続性が低減されていることがわかる。また、三つの提案手法の間では指標値の差が小さく、いずれも観測区間境界の不連続性低減に対して同程度の効果が得られた。被験者 B のみ指標値が変化しなかった理由として、レーダの正面に位置しているため、正面方向で信号分解能が高くなるという方位推定の性質によって、適切に空間分離された信号が毎回の観測区間で得られ易かったことや、後述するマルチパスによる反射信号が比較的少なく、波形の歪みが小さかったことなどが考えられる。

表 2 は連続波形を構成したときの、観測区間境界を除くサンプリング点における不連続性指標の平均値を示している。観測区間境界の場合と同様に、提案手法を用いることで不連続性が低減されている。3.1 で述べたように、各波形に重畳する歪み成分は異なっている。歪みが比較的大きい波形は瞬時的に変位推定値が大きく変化し得る。そのため、歪みが小さい波形と比較して、差・傾きの選択基準において不連続性が大きいと見做される可能性が高くなる。歪みが大きい波形が選択されなくなることで、観測区間境界以外においても指標値が小さくなり、不連続性が低減される。また、各観測区間におけるマルチパスの状態も不連続性に影響する。ヒトからの直接反射信号は前後の観測区間で比較的安定して受信される傾向にある一方、マルチパスによる反射信号は、ヒトや周囲環境の状態に応じて各観測区間で異なる伝播経路を取ることがある。直接反射信号とマルチパスによる反射信号は、互いに干渉することで受信強度の変動や波形の歪みを引き起こす。ビンによる選択基準は他の選択基準とは異なり、各観測区間で伝播経路が大きく異なる反射信号や、安定した受信強度が得られない反射信号を選択しづらくする働きがある。様々な伝播経路をとることで波形の歪みを増大させる、マルチパスによる反射信号の影響を抑制し、ヒトからの直接反射信号をもとに推定した波形が選択され易くなることで、不連続性の低減が期待できる。

図 7 は、表 1 と表 2 に示した結果において提案手法による不連続性指標値の低減効果が最も高かった被験者 A のリ

ファレンス連続波形、選択基準なしとして構成した連続波形と各提案手法を用いて構成した連続波形を併せて示している。図中の破線は 20 s ごとの観測区間境界を表している。図 8 は、観測区間境界における不連続性低減の一例として、図 7 の 160 s 時点と 560 s 時点付近の波形を拡大して示したものである。同図から、選択基準なしの場合に見られる不連続性が、いずれの提案手法を用いた場合でも同程度に低減され、リファレンス波形に近い波形が得られていることがわかる。

また、図 7 の選択基準なしとして構成した波形において、特に 0 s から 160 s にかけて顕著に見られる波形の歪みが、同図の提案手法を用いて構成した波形では明らかに低減されていることがわかる。ここに、表 2 で示した観測区間境界以外での不連続性指標値の低減効果が表れている。差・傾きによる選択基準を用いる手法では観測区間境界付近の変位推定値を判断基準としているが、前述したように観測区間境界以外においても、ある程度の波形不連続性の低減効果がある。さらにビンによる選択基準を用いて構成した波形に注目すると、他の選択基準を用いた場合の波形と比較して歪みがさらに低減され、しかも各観測区間における波形振幅の変化傾向がリファレンス波形に近づいていることがわかる。これは、歪みが少なく、安定した波形を得やすいビンによる選択基準の効果を反映していると考えられる。以上のことから、限られた被験者数ではあるものの、三つの提案手法にはいずれも波形不連続性の低減効果があり、中でもビンによる選択基準を用いる手法が最も高い効果を示す傾向にあることを確認した。

表 1 不連続性指標値 (観測区間境界)

基準/指標	被験者 A		被験者 B		被験者 C	
	差	傾き	差	傾き	差	傾き
なし	0.37	0.41	0.07	0.09	0.21	0.22
差	0.07	0.09	0.07	0.09	0.10	0.11
傾き	0.08	0.10	0.06	0.08	0.11	0.09
ビン	0.06	0.06	0.06	0.08	0.10	0.10

表 2 不連続性指標値 (観測区間境界以外)

基準/指標	被験者 A		被験者 B		被験者 C	
	差	傾き	差	傾き	差	傾き
なし	0.10	0.09	0.07	0.09	0.10	0.11
差	0.06	0.06	0.07	0.09	0.07	0.08
傾き	0.07	0.07	0.07	0.09	0.08	0.09
ビン	0.03	0.03	0.07	0.09	0.07	0.08

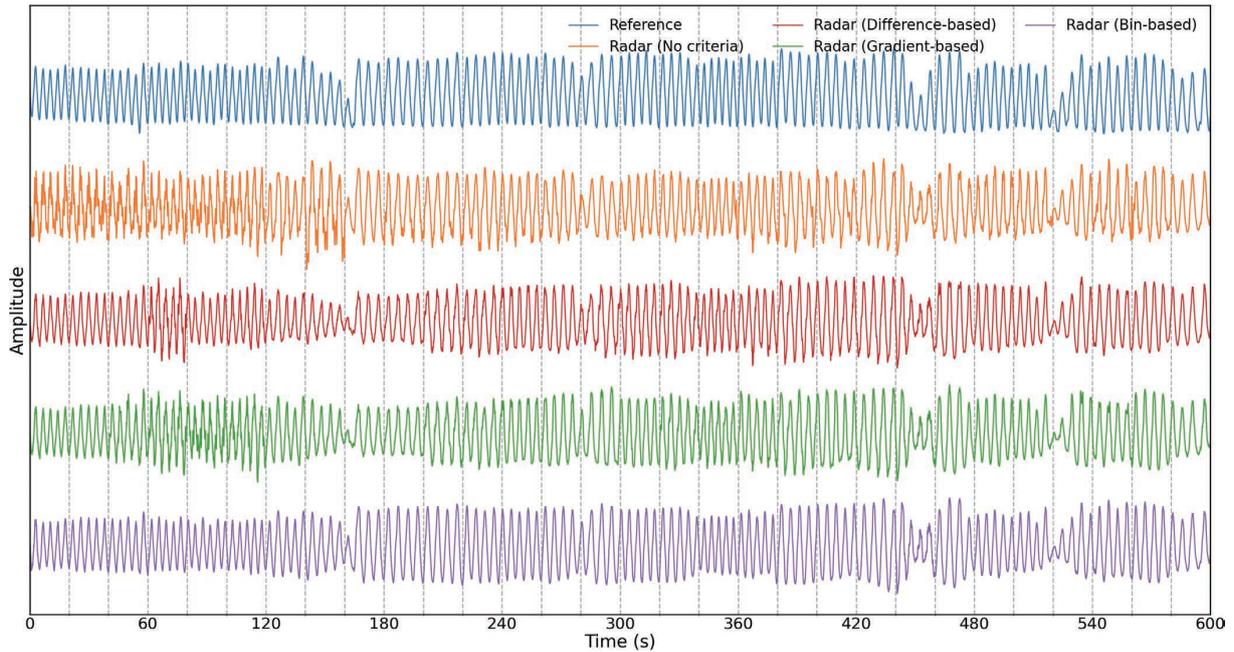


図7 連続呼吸波形 (被験者 A)

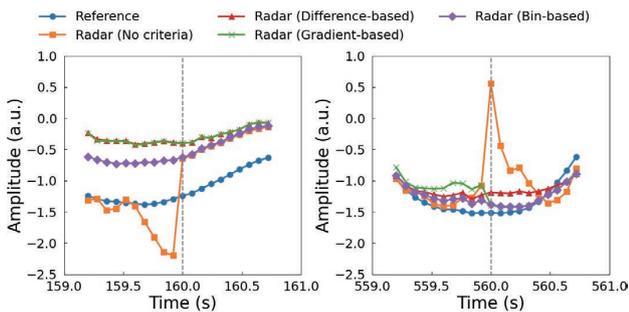


図8 観測区間境界付近の波形 (左 160 s、右 560 s 時点)

6. むすび

本論文では、レーダにおけるヒトの呼吸波形計測を対象として、所定周期で繰り返される観測区間で推定した波形群をもとに不連続性の小さい連続波形を構成するための波形選択手法を提案した。提案手法の有効性を評価するための不連続性指標を導入し、シミュレーションによって指標が機能することを示した。ミリ波レーダを用いた複数人の呼吸波形計測実験において提案手法を適用し、限られた被験者数ではあるものの、指標を用いた評価で各被験者の連続波形に含まれる不連続性が低減することを示して提案手法の有効性を明らかにした。

今回得られた結果は、限られた数の被験者を対象にしたものに留まるため、より多くの被験者に対して提案手法の有効性を明らかにすることが必要である。また、提案手法は本来の呼吸波形には不連続性が含まれないことを前提にしているが、呼吸の状態に異常が生じた場合、波形として選択されないような不連続性が含まれることも想定され

る。そのため、連続波形をもとにヒトの状態を推定する実際のアプリケーションにおいて、提案手法が推定結果に与える影響を検証していくことも必要である。

今後、これらの課題も踏まえ、レーダを用いたバイタルサイン計測の展開を検討していく。

参考文献

- 1) Y. S. Can, B. Arnrich, and C. Ersoy, "Stress detection in daily life scenarios using smart phones and wearable sensors: A survey," *J. Biomed. Inform.*, vol. 92, 2019, 103139.
- 2) A. L. Alfeo, P. Barsocchi, M. G. C. A. Cimino, D. L. Rosa, F. Palumbo, and G. Vaglini, "Sleep behavior assessment via smartwatch and stigmergic receptive fields," *Pers. Ubiquitous Comput.*, vol. 22, no. 2, pp. 227-243, 2018.
- 3) 日向匡史, 木下航一, 西行健太, 長谷川友紀, "自動運転時代におけるドライバモニタリング技術," *OMRON TECHNICS*, vol. 50, no. 1, pp. 36-31, 2018.
- 4) J. Yin, D. Zhu, M. Shi, and Z. Wang, "Depth Maps Restoration for Human Using RealSense," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 112544-112553, 2019.
- 5) G. Paterniani *et al.*, "Radar-Based Monitoring of Vital Signs: A Tutorial Overview," *Proc. IEEE*, vol. 111, no. 3, pp. 277-317, 2023.
- 6) M. Alizadeh, G. Shaker, J. C. M. D. Almeida, P. P. Morita, and S. Safavi-Naeini, "Remote Monitoring of Human Vital Signs Using mm-Wave FMCW Radar," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 54958-54968, 2019.
- 7) T. Koda, T. Sakamoto, S. Okumura, and H. Taki, "Noncontact Respiratory Measurement for Multiple People at Arbitrary Loca-

- tions Using Array Radar and Respiratory-Space Clustering,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 106895–106906, 2021.
- 8) T. Penzel *et al.*, “Cardiovascular and respiratory dynamics during normal and pathological sleep,” *Chaos*, vol. 17, no. 1, 2007, 015116.
 - 9) H. D. Cohen, D. R. Goodenough, H. A. Witkin, P. Oltman, H. Gould, and E. Shulman, “The Effects of Stress on Components of the Respiration Cycle,” *Psychophysiology*, vol. 12, no. 4, pp. 377–380, 1975.
 - 10) 阪本卓也, *ワイヤレス人体センシング*, オーム社, 2023.
 - 11) A. Albanese, L. Cheng, M. Ursino, and N. W. Chbat, “An integrated mathematical model of the human cardiopulmonary system: model development,” *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, vol. 310, no. 7, pp. H899–H921, 2016.
 - 12) B.-K. Park, O. Boric-Lubecke, and V. M. Lubecke, “Arctangent demodulation with DC offset compensation in quadrature Doppler radar receiver systems,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 55, no. 5, pp. 1073–1079, 2007.
 - 13) Q. Lv, D. Ye, S. Qiao, Y. Salamin, J. Huangfu, and C. Li, “High dynamic-range motion imaging based on linearized Doppler radar sensor,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 62, no. 9, pp. 1837–1846, 2014.
 - 14) 山田寛喜, “ミリ波レーダによる高分解能イメージング技術,” *電子情報通信学会論文誌 B*, vol. J104-B, no. 2, pp. 66–82, 2021.
 - 15) 松浦圭記, 川上莉穂, 谷本雄大, 齋藤啓介, “ミリ波レーダを用いた時系列クラスタリングによる複数人の呼吸数計測の実現,” *OMRON TECHNICS*, vol. 56, no. 1, pp. 97–104, 2024.

執筆者紹介



谷本 雄大 TANIMOTO Yudai
 技術・知財本部
 アドバンステクノロジーセンター
 アドバンステクノロジー開発部
 専門：電気・電子工学
 所属学会：IEEE, 電子情報通信学会



松浦 圭記 MATSUURA Keiki
 技術・知財本部
 アドバンステクノロジーセンター
 アドバンステクノロジー開発部
 専門：電気・電子工学



齋藤 啓介 SAITO Keisuke
 技術・知財本部
 アドバンステクノロジーセンター
 アドバンステクノロジー開発部
 専門：電気・電子工学
 所属学会：IEEE, 電子情報通信学会

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。

ミリ波レーダを用いた時系列クラスタリングによる複数人の呼吸数計測の実現

松浦 圭記, 川上 莉穂, 谷本 雄大, 齋藤 啓介

医療や健康管理をはじめ様々な分野で、関連サービスの普及に伴い、バイタルセンシングへの需要が高まっている。その一つであるミリ波レーダは、非接触で複数人のバイタルサインを同時計測できる手段として有望視されている。ミリ波レーダでの複数物標の検出は、空間分離された反射波の強度情報に基づいて生成した点群を入力とするクラスタリングによる方法が一般的である。この分類された各被験者の反射波を解析することで、呼吸数や心拍などのバイタルサインが決定される。しかし、アンテナ数の制約から角度分解能が光学系のセンサと比較して不利となりやすく、被験者間の距離が近い場合など検出が困難となるケースが発生する。

本論文では、ミリ波レーダの空間反射分布から空間上に観測される呼吸数の時間変動を捉えた呼吸数の時間トレンドマップを生成し、生成したトレンド情報に基づいて複数人の呼吸数を検出する時系列クラスタリング手法を提案する。複数人の呼吸数を同時に計測する実験を行い、被験者間距離が近く、瞬時的に呼吸数が一致する様な状況でも呼吸数を検出できることを確認し、既存手法の検出率 51% に対して 93% と大幅な性能向上を達成した。

Realization of Multi-Person Respiratory Rate Measurement using Time-series Clustering with Millimeter-Wave Radar

MATSUURA Keiki, KAWAKAMI Riho, TANIMOTO Yudai and SAITO Keisuke

In various fields, including medical and health management, the demand for vital sensing technology is increasing due to the proliferation of related services. One of them, millimeter-wave radar, is seen as a promising technology that can simultaneously measure the vital signs of multiple people in a non-contact manner with the body. The detection of multiple targets in millimeter-wave radar is generally performed by clustering based on the intensity information of spatially separated reflected waves, which is generated as input from point clouds. By analyzing the reflected waves of each subject identified as a result, vital signs such as respiration rate and heart rate can be determined. However, millimeter-wave radar tends to be at a disadvantage in terms of angular resolution compared to optical sensors due to the constraint of the number of antennas, and there are cases where detection becomes difficult when the distance between the subjects to be measured is close.

In this paper, we propose a time-series clustering method to detect the respiration rate of multiple people based on the trend information generated by creating a respiration rate time trend map that captures the time variation of the respiration rate observed in space from the spatial reflection distribution of millimeter-wave radar. We conducted an experiment to simultaneously measure the respiration rate of multiple people, and confirmed that we can detect the respiration rate even in situations where the distance between subjects is close or the respiration rate matches instantaneously, achieving a significant performance improvement of 93% compared to the detection rate of 51% of existing methods.

1. まえがき

バイタルセンシング技術は、近年の情報通信技術の発展と相まって高度化・多様化が進んでおり、医療や健康管理の分野をはじめとした様々な分野での応用が進んでいる。センシングの方式は接触型と非接触型に大別される。接触型は、人体に直接触れる様にセンサを装着してバイタルサインを取得する方法で、心拍数、血圧、血中酸素濃度、体温など、様々なバイタルサインを計測するセンサが研究・開発されている。据置型の筐体やケーブルの存在により自由を奪われてしまう拘束型の接触型センサに加えて、デバイスの小型化・低消費電力化に伴い、非拘束で長時間計測することが可能なウェアラブル型のセンサデバイスを用いた方法が普及している¹⁻³⁾。ウェアラブル型のセンサは身体に装着することを前提としているため、長時間にわたる計測を行う場合、ユーザーに不快感を与え、場合によっては装着部に炎症を起こす等、快適性、安全性の面で問題が発生する場合がある。

非接触型のバイタルセンサには、カメラやレーダ、マイク等を用いた方法があり、身体にセンサを装着する必要がないため、装着によるストレスや不快感なくバイタルサインの計測ができる³⁻⁶⁾。また、家庭での就寝シーン想定した場合、計測範囲内に被験者が1人であるとは限らず、複数人の計測が必要となる。カメラやレーダなどの距離や方位などの空間情報を取得できるセンサを用いることで、計測範囲内の複数の被験者のバイタルサインを同時に取得可能となる。

こうしたセンサには複数の方式が存在するが、それぞれ実用上の課題が存在する。例えば、カメラを用いた方法では、被験者の撮影データから個人が特定できる顔画像などが流出するリスクなどプライバシーに対する懸念がある⁷⁾。マイクアレイを用いた方法では、騒音など外乱の影響により適用可能なシーンが限られてくる。

これに対して、レーダを用いた方法はこのようなプライバシーの懸念なく高精度にバイタル情報を取得する技術として注目を集めている。波長が数ミリメートルの電波を用いるミリ波レーダでは、衣服や布団などを透過して人体の体表面の動きをとらえ、この動きに基づいて呼吸数や心拍数などのバイタルサインを計測することができる⁸⁻¹⁰⁾。

呼吸に伴う体表面の微小変位として表した呼吸波形やそこから算出する呼吸数などの呼吸に関する情報は睡眠や健康状態を推定する手段として有用である。

複数のアンテナ素子を搭載したミリ波レーダを用いることで、反射波の到来方向推定を行い、計測対象の方位と距離を取得することができる。レーダの方位分解能はアンテナ数に比例して向上する性質があり、方位分解能は一般的には数度から数十度となり、光学系の距離センサであるライダー (Light Detection And Ranging: LiDAR) と比較して安価で実現可能である一方で方位分解能は劣る¹¹⁻¹³⁾。その

ため、被験者間の距離が近い場合や遠方に存在する場合は、空間情報に基づいて複数人の呼吸波形や呼吸数を検出することは難しく、現在商品化されているものはレーダから最も近くにいる被験者1人を計測対象としており、複数人の計測には対応していない。

本論文では、家庭での複数人での就寝シーンを想定し、ミリ波レーダの計測信号から、呼吸数の時間変動を捉えた呼吸数トレンド情報を生成し、生成したトレンド情報に基づいて複数人の呼吸数を検出する手法を提案する。2.でレーダを用いた呼吸数計測の原理について述べ、3.でレーダ信号から抽出した呼吸数データを用いた複数人計測の課題を述べ、4.で提案手法について述べ、5.ではミリ波レーダを用いて複数人を同時計測したレーダ信号から提案手法を用いて呼吸数の時間トレンド情報を取得した結果を示す。

2. ミリ波レーダによる呼吸数計測原理

2.1 距離・方位計測

体表面における電波の反射波は人体の様々な部位で反射されるため、1人の被験者から複数の反射信号が同時に受信される。さらに複数人の被験者が存在する場合には、複数人の被験者の複数の部位の反射信号が同時に受信されることになる。このように同時受信される複数の反射波を空間的に分離する必要がある。

レーダによる距離分解能 d_{res} は送信信号の帯域幅に依存し、次式で表される。

$$d_{res} = \frac{c}{2B} \quad (1)$$

ここで、 c は光の速度、 B は帯域幅である。

ミリ波レーダでは、周波数連続変調波 (Frequency Modulated Continuous Wave radar: FMCW) 方式やパルス方式による広帯域信号の送受信を行うことで高い距離分解能をもつ。また、アレーアンテナを用いた到来方向推定により受信される反射波の方位を推定することができる。距離が d 離れたアンテナに対して θ の方向から反射波が到来した場合、アンテナ間の信号位相差は $d \sin\theta$ となり、以下の式により到来方向の推定が可能となる。

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2d}\right) \quad (2)$$

ここで λ は電波の波長である。

アレーアンテナを持つレーダの場合、後続のアンテナの受信信号は先行するアンテナ信号に対して $\omega = (2\pi/\lambda)d \sin\theta$ の位相シフトが発生し、各アンテナの位相はアンテナ位置に応じて線形進行する。従って、アンテナごとの位相変動から到来方向 θ を推定することができる¹³⁾。

このような距離・方位計測の処理には高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform: FFT) を用いる方法がよく用いられる。演算結果は距離ビン (range bin)、方位ビン (azimuth

bin) をもつ複素信号データとなりこれを可視化してマップ化したものをレーダ画像と呼ぶ。

2.2 バイタル情報の抽出

図1 (a) に3人の計測対象者を同時計測した際のレーダ画像の振幅データの典型例を示す。被験者は第20距離ビン付近に3人の被験者が方位方向に横並びで配置されている。距離レーダ画像の振幅情報は受信した反射波の受信強度と対応しており、対応する距離・方位の反射物の有無と形状・材質によって決まる反射強度を判定可能である。ただし、周辺の強い反射率を持つ物標やごく近傍に複数物標が存在する場合には、干渉の影響があることには注意が必要である。

図1 (b) および図1 (c) に人体からの反射波及び不要反射波(クラッタ)それぞれの位相成分の時系列変化を示す。位相情報にはターゲットの距離の情報を含み、静止物やアンテナリーク等の静止クラッタ成分の場合は時間変動がないが、人体の場合は体の動きに応じて位相が時間的に変化する。特に呼吸や心拍などに伴う体表面の振動には周期性があるため、対応する複素信号成分は複素平面上で円弧の様な軌跡を描くことが知られており¹³⁾、これを利用して、波形成分を抽出することができる。

以上の様に、レーダ画像の振幅情報から反射物の有無と位置を判別し、位相情報の時系列変化から被験者の体動に伴う体表面の移動情報である位相波形を抽出し、位相波形から呼吸数や心拍数などのバイタルサインを推定することができる。

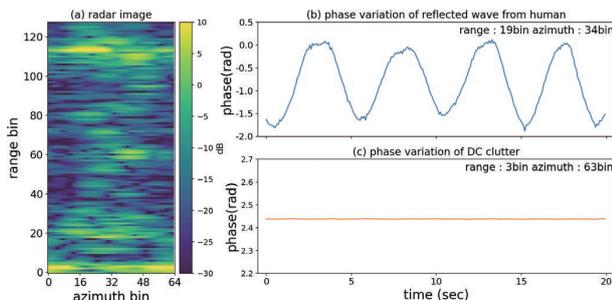


図1 レーダ画像と位相の時間変化の例

2.3 信号処理フロー

図2 にレーダを用いた複数人の呼吸数計測の処理フローを示す。まず、レーダ信号の送受信を行う。受信波と送信信号の参照波を乗算したベースバンド信号に対して距離・方位推定を行いレーダ画像の生成を行う。このレーダ信号の送受信と距離・方位推定処理を繰り返し行い、呼吸数を算出する解析区間分のレーダ画像の時系列データを取得する。次に、得られた各ビンの時系列データに対して静止クラッタの推定・除去を行い、位相波形情報を取得する。さらに、得られた波形に呼吸に由来する成分が含まれている

のかを判定し呼吸波形群を抽出する。得られた呼吸波形群は体の各部位からの反射波に基づいているため複数のビンで観測される。また被験者が複数人いる場合は各被験者の呼吸波形が混在することになり、各被験者の呼吸計測を行うためには呼吸波形群から各被験者の波形を抽出する必要がある。その方法には波形自体の相関性や独立性に基づいて分類もしくは分離する方法⁹⁾と波形群を1次元又は多次元の特徴量に変換した後に分類する方法¹⁰⁾が考えられる。波形自体を用いる方法は計算量が多くなることが問題となる。一方、特徴量を用いる方法は後述するように適切な特徴量を用いないと正しく分類することが出来ないことが課題となる。本検討では、特徴量を用いる手法を選択した。

各波形から呼吸数を算出することで、呼吸波形が抽出されたビンに対して算出した呼吸数が紐づいたマップ(以下「呼吸数抽出マップ」という)を取得する。その後、得られた呼吸数抽出マップの座標情報や呼吸数を入力としたクラスタリングを実施することで各ビンに対応する被験者ごとに分類する。分類された各クラスターのマップ情報から被験者ごとの呼吸数及び座標情報を推定する。

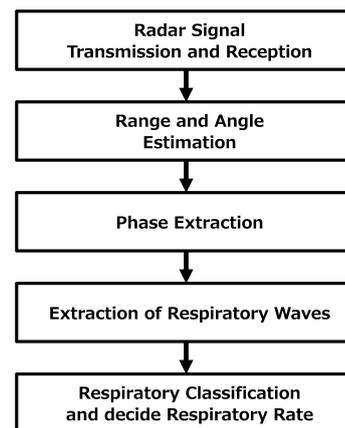


図2 呼吸数抽出フロー

3. 複数人の呼吸数計測の課題

3.1 空間情報を活用した場合の課題

図3 に方位・距離情報を持つ点群データを入力としたクラスタリングを実行した結果例を示す。なお、分類結果は各ビンの色分けで表現している。

図3 (a) は第20距離ビン付近に2人の被験者が存在している場合の結果である。それぞれの被験者の位置に対応する座標に点群が抽出されており、それらは座標上で十分に離れているため2人の被験者に対応するクラスターに正しく分類されている。

図3 (b) は第20距離ビン付近に3人の被験者が存在している状況での結果例である。2人の時と同様に被験者位置に対応する座標に点群が抽出されているが、その点群は

2つのクラスタであると判定されている。このケースでは抽出された3人の点群の空間座標が近く、分類が困難なため、3人の被験者が存在するにもかかわらず、第20距離ビン付近では1つのクラスタしか得られていない。また、遠方の第115距離ビン近傍にも点群が抽出され、別のクラスタと判定されているが、これは周辺の静止物体を經由したマルチパスの影響により発生した偽像である。

このように空間の座標情報を活用した場合には、被験者位置が近く点群がつながってしまう場合に正しく分類できない。また、マルチパスによる偽像を別のクラスタと判定してしまう。結果として、本来抽出されるはずの被験者のバイタルサインが抽出できない、あるいは存在する人数よりも多くのバイタルサインが抽出されてしまうという問題が発生する。

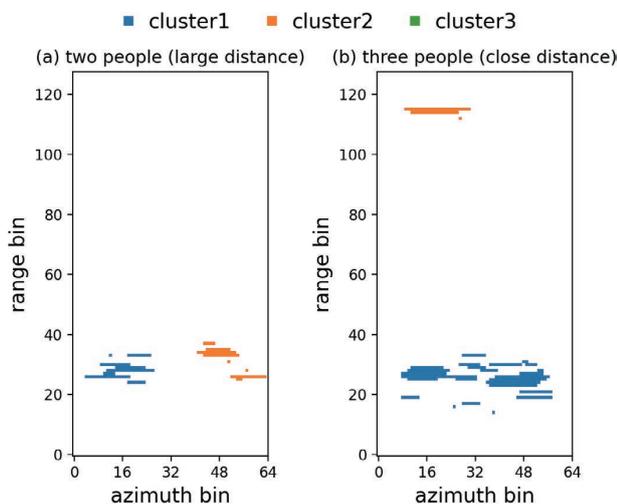


図3 空間情報を活用したクラスタリング結果例

3.2 呼吸数情報を利用した場合の課題

空間の座標情報を入力とした場合の課題の対策として、別の入力情報を用いて分類することが考えられる。ここでは呼吸数を入力としたクラスタリングの結果例と課題を示す。

まず呼吸数を入力とするクラスタリングで、空間の座標情報を用いたクラスタリングの課題を解決できた例を示す。図4に3人の被験者の呼吸波形が抽出された各ビンの波形から算出した1分あたりの呼吸数の分布(図4(a))と、呼吸数を入力としたクラスタリングの結果(図4(b))を示す。ここで、クラスタリングの入力データは抽出マップの各ビンの呼吸数を1次元のデータに変換したものを用いた。図4(a)に示すように、マップ上の呼吸数が3つの異なる呼吸数で構成されており、図4(b)に示すように被験者位置に対応する点群が3つのクラスタに分類されていることが分かる。また、遠方の偽像成分も異なるクラスタではなく実像付近のクラスタと同一クラスタと分類されていることが分かる。すなわち、呼吸数を入力とするク

ラスタリングを行うことによって、空間上のデータを呼吸数のクラスタと同じ数のクラスタに分類することができた。

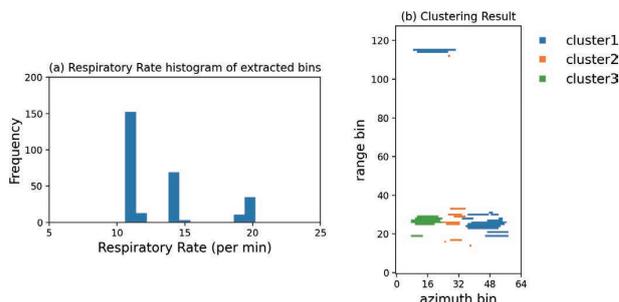


図4 呼吸数を入力としたクラスタリングの成功例

図5に3人の被験者に対する別の結果例を示す。図5(a)に示すように、成功した例とは異なり3人の呼吸数がほぼ一致している。また、図4の例とほぼ同じ位置に被験者がいる条件でデータを取得した。このデータにクラスタリングをしたところ、図5(b)に示すように、被験者位置に対応する点群が3人いるにもかかわらず、1つのクラスタと判定されている。

このように呼吸数を入力とした場合は、被験者の位置関係や偽像の影響を受けずに分類が可能である一方で、呼吸数が近い場合に分類が困難になるという課題がある。

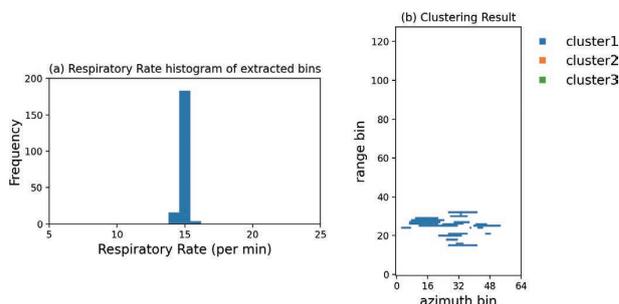


図5 呼吸数を入力としたクラスタリングの失敗例

4. トレンド情報を利用したクラスタリング手法

4.1 自然呼吸時の呼吸数の時間変動

3章で示した課題を解決する手段を検討するために、人間の呼吸数に時間的なトレンドが存在するのかを検証した。図6に呼吸ベルトを用いた3人の被験者の呼吸数の自然呼吸の時間トレンドを示す。呼吸数は20秒を1回の解析区間(以下「スロット」という)とし、ベルト式センサ(以下「呼吸ベルト」という)で計測した波形を解析して算出している。横軸は呼吸数を算出したスロットのインデックス番号である。

各被験者の呼吸数はスロットごとに変動しており、被験者ごとで異なる時間トレンドとなっていることが分かる。従って、スロットで被験者間の呼吸数が一致したスロット

が存在しても時系列の変化を見れば被験者ごとの呼吸数を分離することが可能となると考えられる。

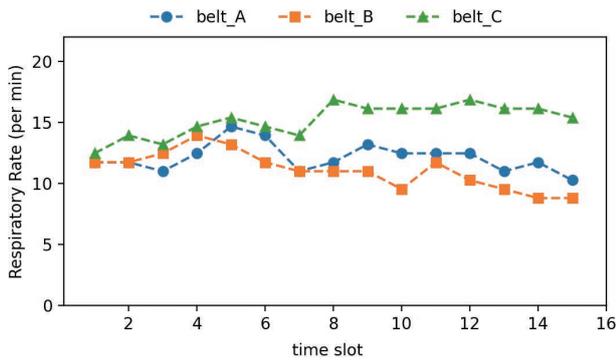


図 6 呼吸ベルトを用いた呼吸数計測結果

4.2 時系列情報を活用したクラスタリング

4.1 で示した呼吸数のトレンド情報を活用した分離手法として、複数の解析スロットに対応する呼吸数抽出マップを用いて時系列データを生成し、各スロットの呼吸数を分類する時系列クラスタリング手法を考案した。

図 7 に考案した時系列情報を活用したクラスタリング手法のフローを示す。

まず、呼吸波形の解析区間のデータを解析して呼吸数抽出マップを生成する処理を繰り返し、各時間スロットで算出された呼吸数抽出マップを蓄積する。次に、蓄積したデータを変換して、各ビンの呼吸数および時間スロットとビンインデックスの情報をもった時間トレンドマップを生成する。

さらに、時間トレンドマップにおいて、抽出された呼吸数が一定の時間スロット以上格納されているビンのみを選択し抽出する。これは特定の被験者のトレンド情報を保有しているビンを選定するためである。選定されなかったビンでは、被験者の呼吸に伴う体動が含まれた反射波が観測されていない、もしくは被験者間の境界付近など安定して観測されていないことが想定される。

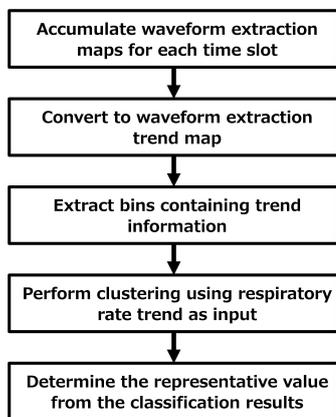


図 7 時系列クラスタリングによる呼吸数計測フロー

その後、選択された時間トレンド情報を 2 次元データとして入力した時系列クラスタリングを実行する。最後に、クラスタリングの結果を用いて各クラスタのスロットごとの呼吸数を決定して被験者ごとの呼吸数トレンドを出力する。

5. 評価

5.1 実験環境

複数人の被験者を対象とした呼吸数計測実験を行い、提案手法による呼吸数計測の性能評価を行った。データ取得には中心周波数 62 GHz、周波数帯域幅 3.3 GHz の FMCW 方式ミリ波レーダを使用した。アンテナは送信 2 素子、受信 3 素子をそれぞれ備え、多入力・多出力 (Multiple-Input Multiple-Output: MIMO) によって素子間隔が 0.5 波長の 6 素子の等間隔リニアアレーアンテナを形成する。1 枚のレーダ画像を取得するサンプリング周期は 80 ms、呼吸数を算出するスロットの時間長さは 20 s (サンプリング点数 250 点) とした。

図 8 に実験での被験者とレーダの配置を示す。家庭にて家族で就寝するシーンを想定して、被験者は 3 人 (A, B, C) とする。被験者間の間隔は 0.45 m とし、肩を接するように仰向けの状態で横並びに配置する。レーダは被験者の頭側で中央の被験者をレーダの正面とした。被験者胸部からの水平距離を 0.5 m、設置高さを被験者背面から 0.3 m とした。レーダの計測と同時にリファレンス波形を取得するため呼吸ベルトを被験者の体幹に装着する。

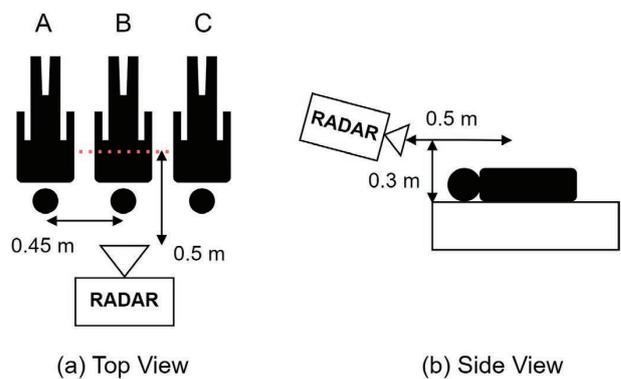


図 8 実験環境概略図

呼吸ベルトのサンプリング周期は 10 ms であり、レーダと同期して計測し、共通の時間スロットにおける呼吸数を算出して両者を比較できる様にする。以上の構成で、各被験者の呼吸数の計測を時間スロット 30 回分に当たる 600 s に渡って行い、呼吸ベルトと提案手法による呼吸数の時間トレンドの計測結果を比較した。

5.2 時間トレンドマップ

図9 (a) に蓄積した呼吸数マップから生成した時間トレンドマップを、図9 (b) に20 スロット以上で呼吸波形が抽出されたビンごとの時間トレンドマップを示す。縦軸が時間スロットのインデックス番号、横軸がビンのインデックス番号である。ビンのインデックス番号は、方位、距離座標を1次元化し、昇順に並べた番号である。ヒートマップの色は算出された呼吸数を示している。呼吸波形が抽出されなかったビンには0が格納されており、多くのビンでは呼吸波形が抽出されていないことが分かる。各被験者は特定の位置に存在しているため、特定のビンで呼吸波形が抽出されており、そのビンでは、多くの時間スロットにわたって抽出されている。

20 スロット以上で呼吸波形が抽出されたビンは全体の6.5%であった。抽出ビンごとの時間トレンドを見ると、例えば、ビンのインデックス番号が100付近と、300付近では異なるグラデーションを有しており、時間スロット方向の変化の種類がいくつか存在することが分かる。これは、被験者ごとのトレンドの違いを表していると考えられる。

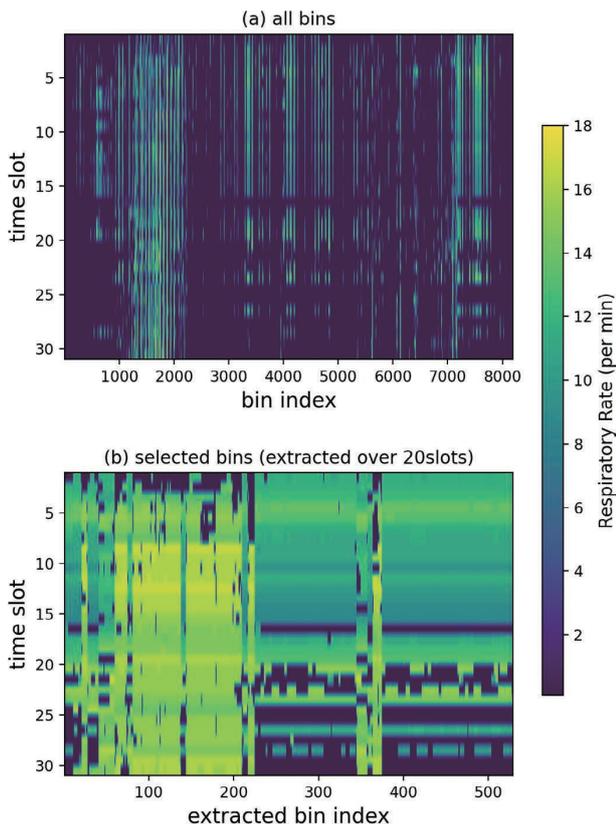


図9 抽出した呼吸数の時間トレンドマップ

図10 に抽出された全ビンのスロットごとの呼吸数と呼吸ベルト波形から算出した呼吸数との比較結果を示す。ビンの数が少なく見えるのは、近い値をとる結果が重なっているためである。ほとんどのビンの結果は、呼吸ベルトの

いずれかの被験者の結果と近い値となっていることが分かる。また、同じビンの結果を線で結んでいるが、同一ビンでのスロット間の変化も呼吸ベルトのいずれかの被験者の結果に追従しており、それぞれのビンの結果は特定の被験者の時間トレンド情報を保有していることが分かる。

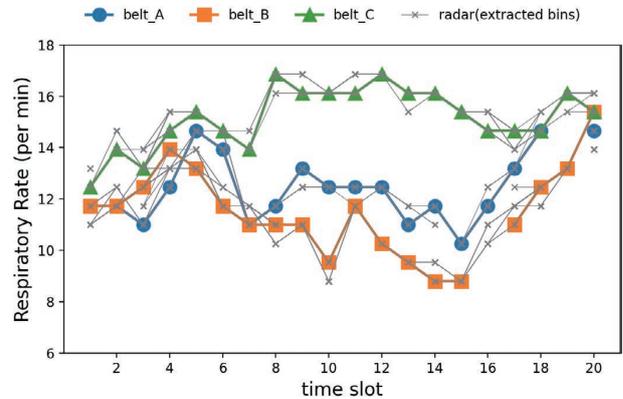


図10 抽出ビンの呼吸数と呼吸ベルト呼吸数の比較

5.3 呼吸数の計測結果

図11 にスロットごとのクラスタリングにより推定した呼吸数トレンド、図12 に提案手法である時系列クラスタリングにより推定したクラスターごとの呼吸数トレンドを呼吸ベルトの測定結果と比較した結果をそれぞれ示す。スロットごとのクラスタリングでは、各ビンの呼吸数を入力とした。また、レーダと呼吸ベルトの結果の対応関係は、推定されたクラスターごとの位置関係に基づいて決定した。

スロットごとのクラスタリングでは、多くのスロットで2人分の呼吸数しか推定できておらず、3人分の呼吸数を推定できたのは30スロット中6スロットのみであった。一方、提案手法では30スロット中21スロットで推定できており、複数人の呼吸数推定の性能の大幅な向上がみられる。

提案手法の結果では、被験者AとBにおいては、呼吸ベルトにて呼吸数が算出できているすべてのスロットにて提案手法でも呼吸数の計測ができている。被験者Bに関しては呼吸ベルトにて呼吸数が出力されていないスロットが多くみられるが、これは被験者の呼吸波形の乱れが大きく、呼吸数判定不能と判断されたためである。レーダの結果でも呼吸数を算出可能な波形はないと判定されたため同様に出力されていない。

被験者Cに関しては、呼吸ベルトでは呼吸数が出力されているにも関わらず、提案手法では呼吸数を出力することができていないスロットが存在する。この理由としては、該当するスロットにおいて、レーダ信号から被験者Cに対応する呼吸波形を抽出できていないためと考えられる。レーダ信号から対象被験者の呼吸波形を抽出できなかった原因としては、レーダと対象被験者の位置関係や対象被験者間の位置関係が目視で判定できない程度に変化すること

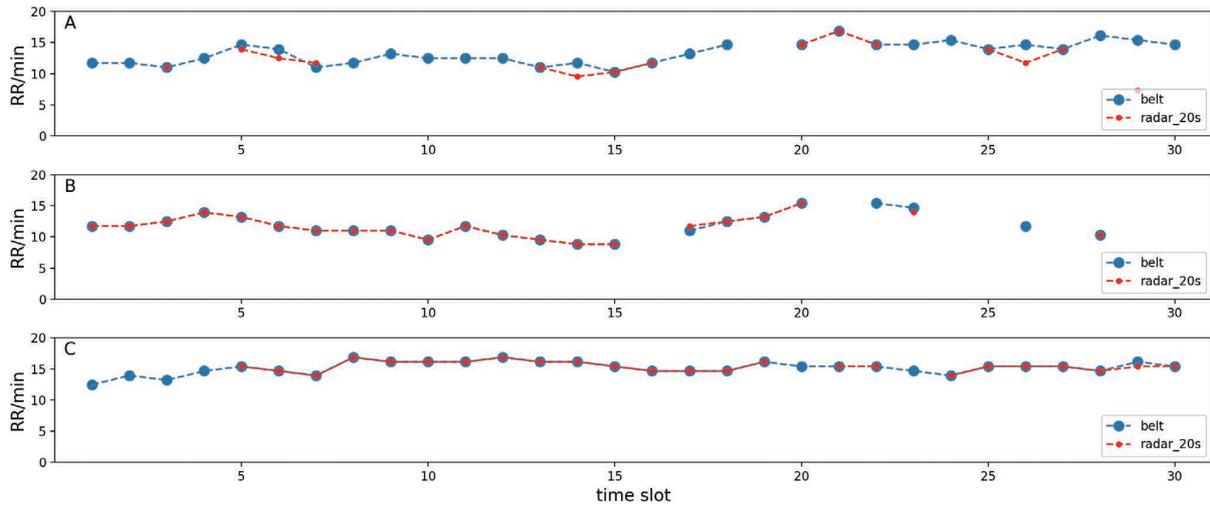


図 11 スロットごとのクラスタリングによる呼吸数の推定結果

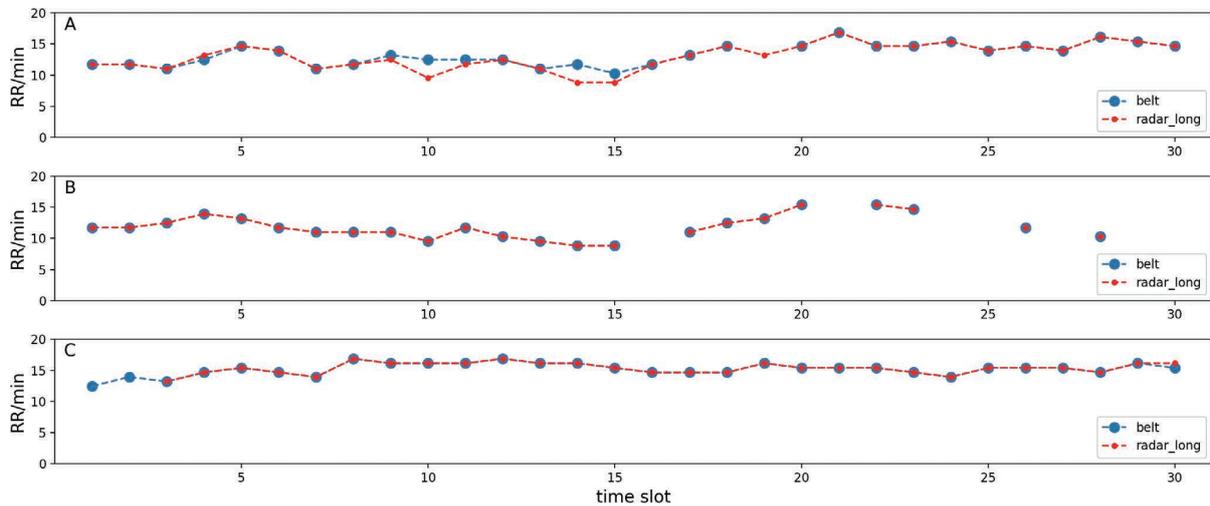


図 12 時系列クラスタリングによる呼吸数の推定結果

により、対象被験者からの反射信号強度の低下や、フェージングの影響による SN 比 (Signal-Noise Ratio) の低下等が考えられる。

表 1 に各手法の被験者毎の抽出スロット数と検出率を示す。検出率は呼吸ベルトにて呼吸数を計測出来たスロット数に対するレーダでの抽出スロット数の割合で定義している。スロットごとのクラスタリングでは最も悪い被験者で 51% の検出率であるのに対して、提案手法では 93% と大幅な向上が確認された。

表 1 各手法の被験者ごとの抽出スロット数と検出率

アルゴ	項目	被験者 A	被験者 B	被験者 C
スロットごと	スロット数	15	21	24
	検出率	51%	91%	80%
時系列	スロット数	29	23	28
	検出率	100%	100%	93%

6. むすび

レーダにおいて空間上の複数のターゲットの計測を行う場合、カメラ等と比較して方位分解能が低い為、ターゲットごとの信号分離が課題となる。本論文では、ミリ波レーダにおける複数人の呼吸数の計測を行うことを目的として、計測信号から生成した呼吸数の時間トレンドマップを入力とした時系列クラスタリング手法を提案した。3 人の被験者を対象とした検証実験を実施し、従来手法と比較して検出率が大幅に改善することを確認した。

本検討結果は限られた条件での検証に留まるため、より多くの被験者や条件に対する検証が必要である。特に本検討では、被験者の安静状態を想定しているが、家庭での就寝時には寝返り等の体動の発生や人の移動等より複雑な状況が想定される。このような実用上起きうるシーンへの適応の検証も必要となる。

また、本手法は複数人の呼吸数の計測だけに留まらず、複数人のバイタル計測、ひいては人以外の複数の物標を計

測対象とした場合の信号分離手法としての応用も期待できる。今後は、先に上げた課題を踏まえ、レーダを用いたバイタルサインの計測やその他のアプリ展開を検討していく。

参考文献

- 1) 長峯邦明 他, “ここまで来たウェアラブルセンシング技術と今後への挑戦,” *化学と教育*, vol. 68, no. 11, pp. 490-493, 2020.
- 2) 山田一郎, “ヘルスケアモニタリングを目指す生体情報センシング技術,” *電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review*, vol. 12, no. 1, pp. 30-37, 2018.
- 3) 田村俊世, “ウェアラブルセンサ、非接触センサの医療応用,” *医療機器学*, vol. 90, no. 1, pp. 11-23, 2020.
- 4) 手塚 忠則, 中村 剛, “カメラを用いた非接触バイタルセンシング技術とその応用,” *バイオフィードバック研究*, vol. 45, no. 1, pp. 3-9, 2018.
- 5) 日向匡史 他, “自動運転時代におけるドライバモニタリング技術,” *OMRON TECHNICS*, vol. 50, no. 1, pp. 31-36, 2018.
- 6) E. Dafna et al., “Sleep staging using nocturnal sound analysis,” *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, pp. 1-14, 2018.
- 7) 渡邊涼介, “顔認識技術を用いたカメラ画像利活用と個人情報・プライバシー保護,” *映像情報メディア学会誌*, vol. 71, no. 11, pp. 811-818, 2017.
- 8) G. Paterniani et al., “Radar-Based Monitoring of Vital Signs: A Tutorial Overview,” in *Proc. IEEE*, 2023, vol. 111, no. 3, pp. 277-317.
- 9) S. Yue et al., “Extracting Multi-Person Respiration from Entangled RF Signals,” *PACM IMWUT*, vol. 2, no. 2, pp. 1-22, 2018.
- 10) T. Koda et al., “Noncontact Respiratory Measurement for Multiple People at Arbitrary Locations Using Array Radar and Respiratory-Space Clustering,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 106895-106906, 2021.
- 11) 小澤尚志 他, “伝送線路からの不要な放射の抑制によるミリ波レーダの方位推定精度の向上,” *OMRON TECHNICS*, vol. 55, no. 1, pp. 116-122, 2023.
- 12) 大橋卓 他, “アレー拡張処理を用いたミリ波レーダによる屋外人物の3Dイメージング,” *OMRON TECHNICS*, vol. 54, no. 1, p. 92, 2022.
- 13) 阪本卓也, *ワイヤレス人体センシング*, オーム社, 2023.

執筆者紹介



松浦 圭記 MATSUURA Keiki
 技術・知財本部
 アドバンステクノロジーセンター
 アドバンステクノロジー開発部
 専門：電気・電子工学



川上 莉穂 KAWAKAMI Riho
 技術・知財本部
 アドバンステクノロジーセンター
 アドバンステクノロジー開発部
 専門：電気・電子工学



谷本 雄大 TANIMOTO Yudai
 技術・知財本部
 アドバンステクノロジーセンター
 アドバンステクノロジー開発部
 専門：電気・電子工学
 所属学会：IEEE, 電子情報通信学会



齋藤 啓介 SAITO Keisuke
 技術・知財本部
 アドバンステクノロジーセンター
 アドバンステクノロジー開発部
 専門：電気・電子工学
 所属学会：IEEE, 電子情報通信学会

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(所属)・掲載誌	抄 録
<p>仮想ダミー抵抗による三相インバータの波形改善 Waveform Improvement of Three-Phase Inverter with Virtual Dummy Resistor 上松武(技術・知財本部 アドバンステクノロジーセンター)、佐藤充(技術・知財本部 アドバンステクノロジーセンター)、桐淵岳(インダストリアルオートメーションビジネス カンパニー 商品事業本部 ドライブ事業部 開発部) 電子情報通信学会技術研究報告、2023年、一般社団法人 電子情報通信学会、Vol. 122、No. 343、EE2022-52、p. 145-150、日本語</p>	<p>本稿では、先行研究の成果をパワコンの自立運転、あるいは、無停電電源などの電圧出力のインバータに適用し、出力電圧に重畳した振動を抑制するダンピング制御法を検討する。提案する方法は、インバータの出力に仮想ダミー抵抗を補償器で実現し、ダンピング効果を得ている。本方法の有効性をシミュレーションにより検証し、他制御方式と比較を行ったので報告する。 Copyright (c) 2023 IEICE</p>
<p>物体操作を学習するロボットアームの空気圧駆動可変剛性手首 田中一敏(オムロン サイニックエクス株式会社) フルードパワーシステム、2023年、一般社団法人 日本フルードパワーシステム学会、Vol. 54、No. 1、p. 25-27、日本語</p>	<p>人間の作業を代用するロボットによる変種変量生産の自動化が求められている。変種変量生産を可能にする技術としてソフトロボットと機械学習と組み合わせたロボット技術が期待されている。本稿では、機械学習技術を活用するためにマニピュレータをソフトロボット化するための柔軟手首について解説する。開発した手首は、ボーデンケーブルを通るワイヤを介して空気圧シリンダで駆動される。手首にはバネが備えられており、ワイヤで牽引することで剛性を増加させ、最大牽引で固定される。手首にワイヤ駆動を用いることで、限られた容積内で6自由度の大変位を可能にしている。この手首を用いて柔軟ロボットの作業学習が研究されている。 Copyright (c) 2023 JFPS</p>
<p>マイクロ波電力伝送における人体防護機能の検証 Validation of Human Protection Technology in Microwave Wireless Power Transmission QIAO Chutian(技術・知財本部 アドバンステクノロジーセンター)、川島靖史(技術・知財本部 アドバンステクノロジーセンター)、NGUYEN Manh Tai(技術・知財本部 アドバンステクノロジーセンター) 電子情報通信学会大会講演論文集(CD-ROM)、2023年、一般社団法人 電子情報通信学会、Vol. 2023、p. ROMBUNNO.B-1-15、日本語</p>	<p>DX化の加速に伴い、センサなどのIoTデバイスの活用が広がっている。マイクロ波電力伝送は、工場内のセンサなどの配線を減らすことができ、配線が難しい位置へのセンサ設置などさまざまなメリットがあるため注目を集めている。一方、マイクロ波電力伝送では送電の大電力化により給電エリア近傍の人体に影響を及ぼす恐れがあるため人体防護対策が必要となる。既存の人体防護方法としては人感センサ、カメラなどの外部装置で人体を検知し、人が給電エリアに存在する場合は送電を止めるため無人環境でしか使えない。人介在環境で電力伝送を行うため、著者らは実装が容易な人体上の電力密度推定方法を提案し、電波暗室、シールドルームで評価を行った。そして、本稿では、実証環境で提案した人体電力密度の推定及び人体防護機能の有効性を検証した。 Copyright (c) 2023 IEICE</p>

論文名・執筆者（所属）・掲載誌	抄 録
<p>PMSMの動力線への単相変圧器を用いた位置検出用電力重畳の二次側電力制御方法</p> <p>Secondary Side Power Control Method of Power Superimposition for Position Sensor Using a Single-Phase Transformer on the Power Lines of a PMSM</p> <p>桐淵岳（インダストリアルオートメーションビジネスカンパニー 商品事業本部 ドライブ事業部 開発部）、井上征則（大阪公立大学 大学院 工学研究科）、森本茂雄（大阪公立大学 大学院 工学研究科）</p> <p>電気学会研究会資料 電力技術/電力系統技術/半導体電力変換合同研究会、2023年、一般社団法人電気学会、No. SPC-23-080、p. 1-6、日本語</p>	<p>永久磁石同期電動機と電力変換器間には動力線と位置情報線があり配線が煩雑である。本稿は位置情報線の除去のための一つの技術とし、動力線に変圧器を配置し、一定以上の電力を取り出す方法を示す。単相変圧器を用いた電力重畳の回路方程式に基づいて二次側電力方程式を求める。この式を用いて、永久磁石同期電動機の回転数対トルク（NT）特性の全領域で一定電力を得るため、エリア判別法と電力重畳制御法を提案する。提案手法の検証のため、エリアの境界条件を設定し、シミュレーションにより、判別手法の検証を行った。電力重畳制御法は、電力推定器を用いた電流制御方法を、シミュレーションにより検証した。検証結果により、エリア判別法と電力重畳制御法の有効性を示すことができた。</p> <p>Copyright (c) 2023 IEEJ</p>
<p>混雑環境下における自己位置及び周辺歩行者の軌跡復元・予測</p> <p>View Birdification: On-Ground Pedestrian Movement Estimation and Prediction from Ego-centric In-Crowd Views</p> <p>西村真衣（オムロン サイニックエックス株式会社、京都大学 大学院情報学研究所）、延原章平（京都大学 大学院情報学研究所）、西野恒（京都大学 大学院情報学研究所）</p> <p>情報処理学会研究報告、2023年、一般社団法人情報処理学会、Vol. 2023-CVIM-234、No. 3、p. 1-16、英語</p>	<p>This paper introduces view birdification, a task of recovering ground-plane movements of people in a crowd from an ego-centric video captured by an observer also moving in the crowd. Unlike conventional geometric reconstruction methods that assume a static world, view birdification relies solely on the perceived movements of dynamic objects. The key difficulty of this task is that the two kinds of trajectories, the camera ego-motion and pedestrian trajectories, are deeply intertwined in the observed movements. To address this, we present a cascaded optimization approach from a Bayesian perspective and a data-driven solver for view birdification which simultaneously learn an underlying motion model. Furthermore, we extend view birdification as an object-oriented world model that can estimate the future state of each pedestrian on the ground solely from the ego-centric view observation.</p> <p>Our extensive evaluation demonstrates the effectiveness of our methods in diverse densities of crowds, and shows some promising results in zero-shot adaptation to real video sequences.</p> <p>We believe view birdification will serve as a sound foundation for crowd and pedestrian movement modeling and enable a wide range of downstream applications including but not limited to navigation.</p> <p>Copyright (c) 2023 IPSJ</p>
<p>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</p> <p>Hypertension patient remote monitoring and its social implementation in the U.S.</p> <p>佐藤博則（オムロン ヘルスケア株式会社 技術開発統轄部 解析技術部）</p> <p>システム制御情報学会 学会誌「システム/制御/情報」、2023年、一般社団法人システム制御情報学会、Vol. 67、No. 6、p. 224-229、日本語</p>	<p>オムロンヘルスケアでは、主に高血圧症患者を対象として、血圧計、体重計、通信ハブからなる VitalSight™ サービスを米国で商用化した。これにより、家庭で測定した血圧、体重を電子カルテ（EMR）に直接記録し、医療従事者が活用できるようになった。これは、主に65歳以上の米国民を対象とする政府管掌医療保険のメディケアが、2019年1月から遠隔生理指標モニタリング（Remote Physiologic Monitoring）を慢性疾患患者を対象として、保険償還開始したことに対応している。本稿では、早期に導入した医療機関での医学的アウトカムと、システムの活用における課題と期待される効果について述べている。</p> <p>Copyright (c) 2023 ISCIE</p>

論文名・執筆者(所属)・掲載誌	抄 録
<p>SUCSフレームワークにおけるメタデータの構成とその活用法</p> <p>Improving the Value of SUCS Sensing Systems by Utilizing Metadata</p> <p>小田利彦(イノベーション推進本部 DXビジネス革新センタ)</p> <p>第40回センシングフォーラム 計測部門大会 センシングフォーラム資料(CD-ROM)、2023年、公益社団法人 計測自動制御学会、p. ROMBUNNO. 2A1-3、日本語</p>	<p>新しいIoTセンシング系の枠組みを提唱するSUCS®(ザックス)では、センシングトレインと呼ぶセンサ/AD変換/電源/通信の4つのユニットの組合せによってセンサによる多様な観測の用途に対応できる。これらのユニットに関する仕様情報をメタデータとして登録して管理することで、ユニットの適切な選択やセンシングデータ処理の自動化の支援が可能となる。さらにセンシングデータの属性情報のメタデータや、観測に関する情報のメタデータを登録することでセンシングデータの再利用性や付加価値を高められる。SUCSコンソーシアムの標準化WGにより策定されたメタデータのデータモデルや共通フォーマットのガイドラインを本稿で紹介する。</p> <p>Copyright (c) 2023 SICE</p>
<p>電源システム観点におけるパワーコンディショナの安定性</p> <p>Power Conditioner Stability in Power System Perspective</p> <p>上松武(技術・知財本部 アドバンステクノロジーセンタ)、桐淵岳(インダストリアルオートメーションビジネスカンパニー 商品事業本部 ドライブ事業部開発部)</p> <p>2023年 電子情報通信学会ソサエティ大会講演論文集、2023年、一般社団法人 電子情報通信学会、No. BS-5-1、p. S-16、日本語</p>	<p>2050年のカーボンニュートラル(CN)宣言を受け、政府はGX(グリーントランスフォーメーション)経済移行債の発行を検討している。特に、再生可能エネルギーの有効利用は重要であり、パワーコンディショナ(PCS)は不可欠な機器である。本稿では、システムの構成要素としてのPCSの安定性に関する現況について、著者らの検討内容を紹介する。</p> <p>Copyright (c) 2023 IEICE</p>
<p>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</p> <p>Experiments and Considerations on Signal Control Using Deep Reinforcement Learning at Multiple Traffic Flow</p> <p>伊澤茉莉花(オムロン ソーシャルソリューションズ株式会社 事業開発統轄本部 技術創造センタ)、山本健生(オムロン ソーシャルソリューションズ株式会社 事業開発統轄本部 技術創造センタ)</p> <p>人工知能学会全国大会論文集(Web)、2023年、一般社団法人 人工知能学会、Vol. 37、p. ROMBUNNO. 3Xin4-69 (J-STAGE)、日本語</p>	<p>交通管理システムにおける信号制御のパラメータは熟練の技術者により決定されている。しかし、近年熟練技術者の減少によりAI代替による省人化が期待されている。強化学習を用いた信号制御に関する既存研究では、交通流量が一定、もしくはランダムに車が流入する状況を想定しているが、現実的には交通流量が時間帯や曜日に応じて増加・減少する、また主従道路の割合が変化するような場合がある。本稿では、単一交差点を対象とし、基準となる交通流量から主道路や従道路の流量が変化する場合、常に閑散となる場合等、時間変化する複数の交通流量に関し、1つの強化学習AIを用いて信号制御法を学習させた結果を既存の制御手法と比較し、強化学習による信号制御の柔軟性・汎用性を確認した。</p> <p>Copyright (c) 2023 JSAI</p>

論文名・執筆者（所属）・掲載誌	抄 録
<p>眼底疾患の疑いのあるユーザに寄り添う Virtual Enabler の検討</p> <p>Study of a virtual enabler for the care of users with suspicion of pre-symptomatic state</p> <p>曾根周作 (オムロン サイニックス株式会社、東北大学)、合澤典子 (お茶の水女子大学)、二宮高洋 (東北大学)、高田菜生子 (東北大学)、嘉陽彩乃 (お茶の水女子大学)、檜森紀子 (東北大学)、牛久祥孝 (オムロン サイニックス株式会社、東北大学)、大森美香 (お茶の水女子大学、東北大学)、中澤徹 (東北大学)、乾健太郎 (東北大学、理化学研究所)</p> <p>人工知能学会全国大会論文集、2023年、一般社団法人 人工知能学会、Vol. 37、日本語</p>	<p>緑内障のような慢性化と永久的な視覚喪失の脅威によって、不安や抑うつを生じている病気や障害をもったユーザが、目標を見つけることで病気や障害を、克服あるいは受け入れ、人と社会につながっていくことをサポートするために、私達は、そのようなユーザに寄り添い、支えとなるような仮想的な協力者 (Enabler) を創造したい。そのために、私達は、それに必要な要件を定義し、それを実現するための技術を調査し、その具現化のための最初のプロトタイプを開発し、簡単な評価を行った。その結果、Virtual Enablerを実現するためには、ユーザの感情を認識し、ユーザに寄り添った感情を表出し、ユーザを正しく理解することが必要であることが分かった。</p> <p>Copyright (c) 2023 JSAI</p>
<p>カフ圧脈波による血圧計測：音源分離手法に着目したカフ圧脈波形状の特徴モデリング</p> <p>Blood Pressure Measurement by Cuff Pressure Pulse Wave: Feature Modeling Cuff Pressure Pulse Waveform Inspired by Audio Source Separation</p> <p>内田滋穂里 (技術・知財本部 デジタルデザインセンタ)、柳川由紀子 (技術・知財本部 アドバンステクノロジセンター)、佐々木勇輝 (技術・知財本部 アドバンステクノロジセンター)</p> <p>人工知能学会全国大会論文集 (Web)、2023年、一般社団法人 人工知能学会、Vol. 37、p. ROMBUNNO.3Xin4-62 (J-STAGE)、日本語</p>	<p>本研究は、血圧測定のため従来モデルを改善することを目的とする。オシロメトリック法はカフ圧センサを使用して血圧測定する広く知られた方法だが、体の動きなどによる波形形状の変動の影響を受ける。以前の研究では、波形特性を持つ適切なモデル構造によって波形形状の変動性に対処していなかった。そこで、カフ圧脈波形状と音声波形の類似性に着目し、波形形状の変動性に対するロバスト性を持つ新しい血圧測定方法を開発した。このモデルは大域・局所両方の特徴を捉える性質を持つ WAVE-U-NET を採用し、入力チャンネル、モデルのサイズ、損失関数を考慮し、拡張した。提案手法を独自のデータベースに適応したところオシロメトリック法を上回ることを確認した。</p> <p>Copyright (c) 2023 JSAI</p>
<p>逐次意思決定における諸問題設定と問題に関する事前知識が性能保証に及ぼす影響について</p> <p>On Various Problem Settings of Sequential Decision Making and How Prior Knowledge of Problems Affects Theoretical Guarantees</p> <p>小津野将 (オムロン サイニックス株式会社)、北村俊徳 (東京大学)、市原有生希 (奈良先端科学技術大学院大学、株式会社 国際電気通信基礎技術研究所)、萩原誠 (株式会社 pluszero)</p> <p>人工知能学会全国大会論文集、2023年、一般社団法人 人工知能学会、Vol. 37、p. ROMBUNNO. 2Q1-OS-27a-04、日本語</p>	<p>近年、さまざまな逐次意思決定の問題設定が考えられ、それらに対するさまざまな性能保証が示されている。非定常 MDP や制約付き MDP などがある例となる。本論文では、諸設定に対する性能保証の最近の発展をまとめ、どういった事前知識 (問題のパラメータ) が性能向上に有益となるかを説明する。そして最後に、現在未解決の問題と将来の逐次意思決定理論の方向に関し議論する。</p> <p>Copyright (c) 2023 JSAI</p>

論文名・執筆者(所属)・掲載誌	抄 録
<p>一拍脈波特徴量を用いた血圧脈波のフェーズ推定法</p> <p>Phase Estimation Method by Pulse Waveform of Blood Pressure Using Beat-by-Beat Features</p> <p>佐々木勇輝 (技術・知財本部 アドバンステクノロジーセンタ)、内田滋穂里 (技術・知財本部 デジタルデザインセンタ)、和田洋貴 (技術・知財本部 アドバンステクノロジーセンタ)</p> <p>人工知能学会全国大会論文集 (Web)、2023年、一般社団法人 人工知能学会、Vol. 37、p. ROMBUNNO. 2E1-GS-10-02、日本語</p>	<p>現在、多くの血圧計がオシロメトリック法を用いて拡張期血圧と収縮期血圧を測定している。この手法は脈波の振幅の変化から簡便に血圧を測定できるが、体動等の影響で発生したノイズには弱いといった課題もある。近年、一拍の形状特徴に基づき、深層学習を用いて血圧を測定する手法が提案されている。この手法では、各拍が拡張期前、拡張期と収縮期の間、収縮期後の3フェーズのうちどれに属するか推定する。フェーズ推定に基づく手法はオシロメトリック法よりも多くの情報を基に血圧を推定できるが、実用的な精度には達していなかった。そこで本稿では、新たな特徴量の導入及びネットワーク構造の改良を行い、フェーズ推定手法の高精度化を行った。評価実験の結果から、提案手法が拡張期血圧と収縮期血圧の推定精度を向上させることが分かった。</p> <p>Copyright (c) 2023 JSAI</p>
<p>耐ノイズ性を高めた血圧計測法</p> <p>Novel Method of Blood Pressure Measurement with High Noise Resistance</p> <p>和田洋貴 (技術・知財本部 アドバンステクノロジーセンタ)、内田滋穂里 (技術・知財本部 デジタルデザインセンタ)、佐々木勇輝 (技術・知財本部 アドバンステクノロジーセンタ)</p> <p>人工知能学会全国大会 (Web)、2023年、一般社団法人 人工知能学会、Vol. 37、p. ROMBUNNO. 1L4-OS-18a-02 (J-STAGE)、日本語</p>	<p>日本人の死因で1位の「がん」に続く2位、3位は「心疾患・脳血管疾患」であり、高血圧がそれを引き起こす要因として挙げられている。心疾患、脳血管疾患は初期段階では自覚症状がないことが多いため、毎日の血圧測定によって健康状態を正しく把握することが重要である。近年、ウェアラブル型の血圧計が開発されており、日中の活動時や就寝時の血圧計測を行うことで、より詳細な健康管理が可能になってきている。しかし、ウェアラブル型の血圧計はデバイスの小型化によって、従来の据え置き型よりも計測精度が悪くなる課題がある。筆者らは、オシロメトリック波形に関する新しい特徴量の導入を行い、血圧推定の精度向上を試みた。高血圧者を含む85名の被験者、1名あたり3回計測のデータに対して血圧推定を行った結果、従来法との比較において、SDE (standard deviation of error) が最高血圧で1.177、最低血圧で0.657向上した。</p> <p>Copyright (c) 2023 JSAI</p>
<p>行動制約付きのロボット制御のための Actor-Critic 深層強化学習アルゴリズムのベンチマーク</p> <p>Benchmarking Actor-Critic Deep Reinforcement Learning Algorithms for Robotics Control with Action Constraints</p> <p>笠浦一海 (オムロン サイニックエックス株式会社)、三浦脩和 (Manning College of Information and Computer Sciences University of Massachusetts Amherst)、小津野将 (オムロン サイニックエックス株式会社)、米谷竜 (オムロン サイニックエックス株式会社)、星野健太 (京都大学 大学院情報学研究所)、細江陽平 (京都大学 大学院工学研究科)</p> <p>IEEE Robotics and Automation Letters、2023年、IEEE、Vol. 8、No. 8、p. 4449-4456、英語</p>	<p>This study presents a benchmark for evaluating action-constrained reinforcement learning (RL) algorithms. In action-constrained RL, each action taken by the learning system must comply with certain constraints. These constraints are crucial for ensuring the feasibility and safety of actions in real-world systems. We evaluate existing algorithms and their novel variants across multiple robotics control environments, encompassing multiple action constraint types. Our evaluation provides the first in-depth perspective of the field, revealing surprising insights, including the effectiveness of a straightforward baseline approach. The benchmark problems and associated code utilized in our experiments are made available online at github.com/omron-sinicx/action-constrained-RL-benchmark for further research and development.</p> <p>Copyright 2023 The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved.</p>

一人称映像の観測に基づく群衆及びカメラ移動軌跡の同時復元

ViewBirdformer: Learning to Recover Ground-Plane Crowd Trajectories and Ego-Motion From a Single Ego-Centric View

西村真衣 (オムロン サイニクエックス株式会社、京都大学)、延原章平 (京都大学)、西野恒 (京都大学)

IEEE Robotics and Automation Letters, 2023年、IEEE、Vol. 8、No. 1、p. 368-375、英語

We introduce a novel learning-based method for view birdification, the task of recovering ground-plane trajectories of pedestrians of a crowd and their observer in the same crowd just from the observed ego-centric video. View birdification becomes essential for mobile robot navigation and localization in dense crowds where the static background is hard to see and reliably track. It is challenging mainly for two reasons; i) absolute trajectories of pedestrians are entangled with the movement of the observer which needs to be decoupled from their observed relative movements in the ego-centric video, and ii) a crowd motion model describing the pedestrian movement interactions is specific to the scene yet unknown a priori. For this, we introduce a Transformer-based network referred to as ViewBirdformer which implicitly models the crowd motion through self-attention and decomposes relative 2D movement observations onto the ground-plane trajectories of the crowd and the camera through cross-attention between views. Extensive experimental results demonstrate that ViewBirdformer achieves accuracy similar to or better than state-of-the-art with three orders of magnitude reduction in execution time.

Copyright 2023 The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved.

OMRON TECHNICS
推進委員会

推進委員長	大平 真琴				
推進委員	今泉 豊博	小林 達矢	中村 芳行	西垣 弘二	
	馬淵 雅夫	山崎 琢也	(50音順)		
事務局	西崎 修	大塩 祥剛	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56巻 第1号
通巻168号 (年1回発行)
(禁無断転載)
ISSN 0474-1315

編集兼発行人 諏訪 正樹
発行 オムロン株式会社 技術・知財本部
〒619-0283 京都府木津川市木津川台9-1
電話 0774-74-2000 (代)

2024年 5月10日 発行

Published by OMRON Corporation
9-1, Kizugawadai, Kizugawa-city,
Kyoto, 619-0283 Japan
TEL 0774-74-2000

OMRON