

OMRON 169 Vol.57 No.1 2025 TECHNICS®

オムロングループ技術論文誌

特集

デジタル化社会の実現に向けた オムロンのDX推進技術

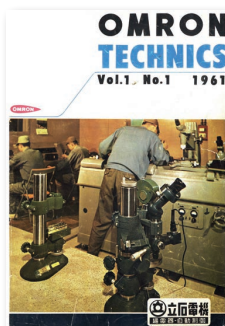


OMRON TECHNICS

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169号発行し、約1,830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



2024年 168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

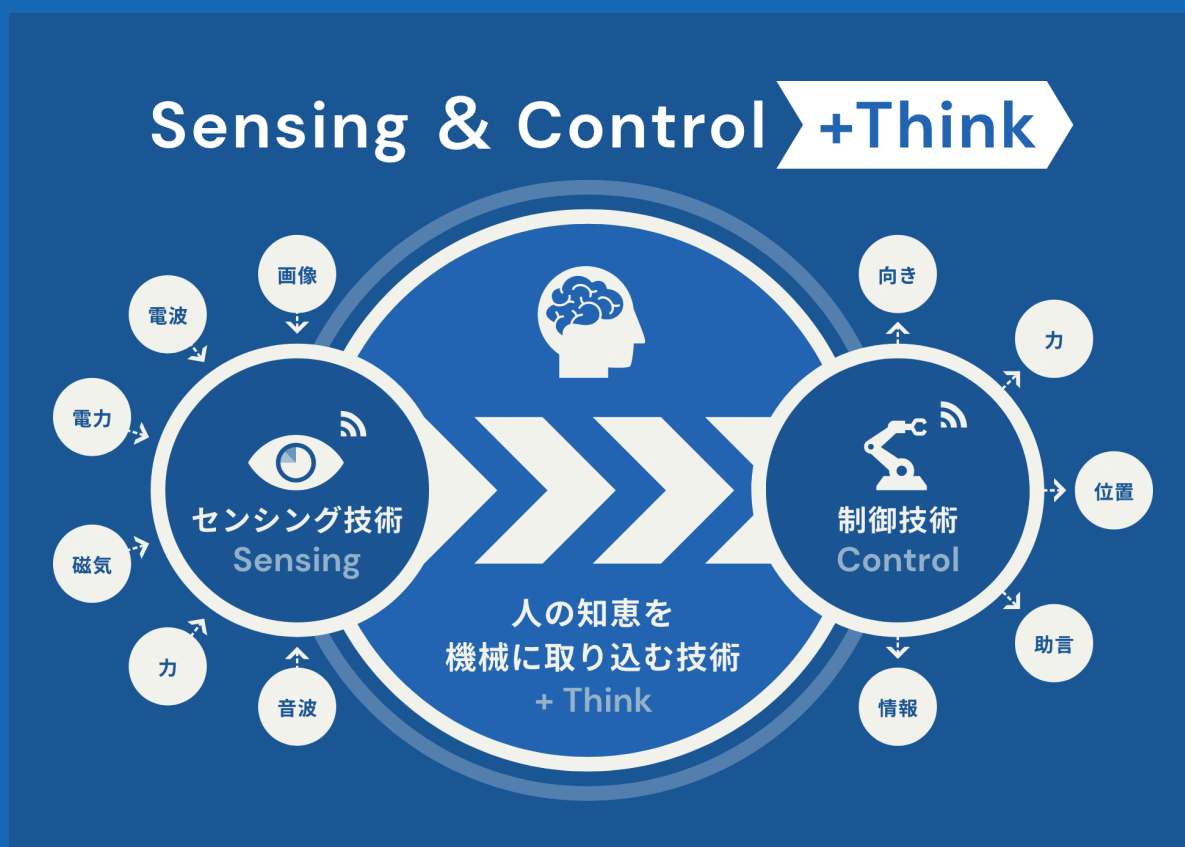
Sensing & Control +Think

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。



オムロンのコア技術「Sensing & Control +Think」	1 (1)
目次	2 (2)
巻頭言：デジタル化社会の実現に向けたオムロンのDX推進技術 オムロン株式会社	
技術・知財本部 技術・知財戦略室 経営基幹職 松原 大典	4 (4)
寄稿文：物理モデルとデータ駆動モデル 北海道大学 データ駆動型融合研究創発拠点 (D-RED) 特任教授 北海道大学 大学院情報科学研究院 名誉教授 五十嵐 一 長崎大学 大学院総合生産科学研究科 (工学系) 助教 大友 佳嗣	6 (6)
解説：研究開発プロセスのデジタルトランスフォーメーション ークラウド・AIネイティブ時代の研究開発プラットフォームー 津田 学*, 小野 秀将**, 日下 武紀**, 原田 真太郎** *: オムロン株式会社, **: オムロン ソフトウェア株式会社	8 (8)

特集：デジタル化社会の実現に向けたオムロンのDX推進技術

セル生産ラインにおける3Dシミュレーションに基づくロボット制御プログラムの生成手法 吉田 寛	14 (14)
安定性解析とシミュレーションを活用したサーボドライバパラメータ調整技術の開発 原田 浩行, 恵木 守, 藤岡 巧, 海田 僧太	25 (25)
製造現場での機械学習運用におけるコンセプトドリフト検知手法の提案 川ノ上 真輔	36 (36)
TensorFlow Lite for Microcontrollersを使用した組込みAIの実現性検討 小河原 徹, 渡辺 泰久	44 (44)

1. オムロンの成長領域でイノベーションを生み出す技術

1. ファクトリーオートメーション オープン標準 (OPC UA, PackML) を活用した標準化とカスタマイズの両立実現 小川 喜明, 高橋 稔, 澤田 成憲, 植木 琢也	56 (56)
2. ヘルスケア 診断に有用な高品質波形の記録を家庭向け携帯型心電計で実現する本体形状と接触検知機能の検討 小高 心哉, 小野 健児	68 (68)
3. ソーシャルソリューション 定量的な着雪防止機能と車両検知性能を両立したミリ波レーダフードの開発 樋上 智彦, 萩原 祥行, 谷本 雄大	78 (78)
4. デバイス&モジュール 機構デバイス向けの低温短時間加熱硬化と高耐熱機能を有する一液性エポキシ樹脂の開発 大谷 修, 今泉 豊博, 福原 智博	88 (88)

2. オムロンのものづくりを支える技術

仮想バッファマネジメント (VBM) による高変動型開発の効果的な可視化と計画変更の手間軽減 高瀬 志保, 西山 哲人	96 (96)
--	---------

3. 新たな成長領域を生み出す技術

並列型行動アーキテクチャを有するロボットのラピッドプロトタイピングを実現するミドルウェア開発 松永 大介, 山本 智哉, 藤井 春香, 小島 岳史	106 (106)
--	-----------

最近発表した主な論文	117 (117)
------------	-----------

OMRON's Core Technology "Sensing & Control +Think"	1 (1)
Table of Contents	2 (2)
Introduction; OMRON's DX Technology for Realizing a Digital Society	
MATSUBARA Daisuke, Manager, Strategy Division	
Technology and Intellectual Property H.Q.	4 (4)
Contribution; On Physics and Data-driven Models	
IGARASHI Hajime, Specially Appointed Professor, Data-Driven Interdisciplinary Research Emergence	
Department: D-RED, Hokkaido University & Professor Emeritus, Graduate School of Information	
Science and Technology, Hokkaido University	
OTOMO Yoshitsugu, Assistant Professor, Graduate School of Integrated Science and Technology,	
Nagasaki University	6 (6)
Commentary; Digital Transformation of Research and Development Processes	
— Research and Development Platforms in the Cloud and AI-Native Era —	
TSUDA Manabu*, ONO Hidemasa**, KUSAKA Takenori** and HARADA Shintaro**	
*: OMRON Corporation, **: OMRON SOFTWARE Co., Ltd.	8 (8)

Special issue: OMRON's DX Technology for Realizing a Digital Society

Robot Control Program Generation for Cell Production System Based on 3D Simulation	
YOSHIDA Hiroshi	14 (14)
Development of Tuning Technology for Servo Driver Parameter Based on Stability Analysis and Simulation	
HARADA Hiroyuki, EGI Mamoru, FUJIOKA Takumi and KAIDA Sota	25 (25)
Proposal of Concept Drift Detection in Factory Automation (FA) Domain	
KAWANOUE Shinsuke	36 (36)
Feasibility Study for Embedded AI Using TensorFlow Lite for Microcontrollers	
KOGAWARA Toru and WATANABE Yasuhisa	44 (44)

1. Innovative Technology in OMRON's Growth Area

1. Factory Automation

Realization to Achieve Both Standardization and Customization with Open Standards (OPC UA, PackML)	
OGAWA Yoshiaki, TAKAHASHI Minoru, SAWADA Shigenori and UEKI Takuya	56 (56)

2. Healthcare

Development of the Device Body Shape and Contact Detection Function to Realize High-quality Waveform Recording Effective for Diagnosis with the Portable Electrocardiograph for Home Use	
KODAKA Shinya and ONO Kenji	68 (68)

3. Social Solutions

Development of a Millimeter-Wave Radar Hood Having Quantitative Snow Avoidance and Vehicle Detection Accuracy	
HINOUE Tomohiko, HAGIWARA Yoshiyuki and TANIMOTO Yudai	78 (78)

4. Device & Module

Development of One-component Epoxy Resin with Short-time Curing and High Heat Resistance for Mechanical Devices	
OTANI Osamu, IMAIZUMI Toyohiro and FUKUHARA Tomohiro	88 (88)

2. Technology Supporting OMRON's Manufacturing

Virtual Buffer Management (VBM) for Effective Visibility into Highly Variable Development and Reduce the Need to Change Plans	
TAKASE Shiho and NISHIYAMA Tetsuto	96 (96)

3. Technology Developing a New Growth Area

Development of a Middleware for Rapid Prototyping of Robots Based on Parallel Action Architecture	
MATSUNAGA Daisuke, YAMAMOTO Tomoya, FUJII Haruka and KOJIMA Takeshi	106 (106)

New Publications	117 (117)
------------------------	-----------

デジタル化社会の オムロンのDX推進

現在、社会の様々な場面において、データ解析・機械学習・AI（Artificial Intelligence）、シミュレーションに代表されるデジタル技術の浸透が急速に進んでいます。この現象は、社会の自動化（オートメーション）が半世紀以上続いたことに加え、情報化社会の中で発展したデジタル技術が社会に浸透していくことによって進展してきました。デジタル技術によって実現する、社会の生産性向上や安心・安全・利便性の向上などの社会変革をデジタルトランスフォーメーション（DX: Digital Transformation）と呼びます。このDXを支える新たな技術の開発および社会への実装が今後更に加速していくと予想されます¹⁾。本稿では特にモノづくりの現場におけるオムロンのDX推進を紹介し、将来取り組むべき技術開発の方向性と中長期的に期待される展開について述べます。

モノづくりにおけるDX

現在、オムロンではモノづくり現場の生産性向上に取り組んでいます。具体的には、デジタル技術を積極的に活用する製品設計や生産ラインの確立に向けた現場プロセスの変革を推進しています。工場のファクトリーオートメーション向け電源や、家庭用の太陽光発電向けパワーコンディショナの製品設計の現場では、最終製品の性能や品質を担保するために試作品を用いた検証を複数回実施する必要があり、その開発工数と期間が多大になるという課題がありました。これに対し、デジタル化した設計情報にCAE（Computer Aided Engineering）等のシミュレーションツールを適用し、シミュレーション上で性能や品質の検証を行います。このような開発手法を現場プロセスに組み入れることにより、試作の製作と実験に係るコストを削減し、開発リードタイムを短縮することが可能となります。

シミュレーションを活用した開発手法の可能性は、開発リードタイムの短縮に留まりません。設計情報のパラメータの組み合わせを何通りもシミュレーションで再現しながら調整し最適化することで、従来の試作による検証ではコストや開発期間の制約により困難であった小型化や高性能化が可能となります。このような設計最適化に関する技術開発を現在、外部研究機関と連携しながら進めています。

デジタル技術の活用は生産ラインでも進めています。生産ラインでは、製造する製品の変更や設備の不具合発生などの変化が発生した時に設備の調整が必要となります。これらの調整は複雑な操作が必要なものが多く、経験が豊富な熟練者のノウハウとスキルが必要となります。また調整中は生産ラインのダウンタイムとなり、生産性の低下につながります。これらの課題に対応するために、デジタル技術を活用し設備を調整する手法を開発しています。シミュレーションは生産ラインを調整した後の生産ライン全体の動作を検証するために活用します。データ解析・機械学習・AIは設備の状態を把握し調整を支援する役割を果たします。

本号では、このようなモノづくり現場の生産性向上を実現するデジタル技術に関して、オムロンの取り組みをご紹介します。

人と機械のインタラクション

近年におけるAIの技術発展は目覚ましく、大規模言語モデル（LLM: Large Language Model）をはじめと

実現に向けた 技術



する生成AIにより、人と遜色のない自然な会話のやりとりが可能となってきました。生成AIは、人が本来持っている言語表現のゆらぎを吸収し抽象的な表現を補足することで、人の意図を解釈します。この生成AIの能力を活用し、人が伝える意図を解釈した上で機械が理解できる形に変換することで、自然な言葉を用いて機械に指示を出すことが可能となります。これにより、複雑な操作が必要な機械に対して平易な言葉で指示ができるようになることが期待されます。更には、生成AIの発展形であり、自発的に人や機械に働きかける「AI エージェント²⁾」の出現により、熟練者でなければ理解できない調整に対しても適切な操作をAI エージェントが人にアドバイスする、またはAI エージェントが自律的に機械を操作するようになることが期待されます。

今後オムロンは、このような人と機械のインタラクションの実現も視野に入れつつ、生成AIを活用する技術の開発に取り組んでいきます。

「人と機械の協働」と自律社会に向けて

デジタル技術により人と機械の自然言語を用いたインタラクションが実現すれば、人は煩雑な現場プロセスの負担から解放されるようになります。デジタル技術がこのようなレベルに到達すると、人に合わせて機械が動作する「人と機械の協働」に近づきます。「人と機械の協働」はモノづくりの現場だけに留まらず、社会のあらゆる場面で活きる概念です。

今までの社会発展をSINIC理論³⁾と照らし合わせると、機械が人の負担を代替する自動化社会、様々な機械が情報通信技術によってデータでつながる情報化社会、価値観が物による豊かさから精神的な豊かさに変化する最適化社会を経て、現在は自律社会に向かっています。今後、効率や生産性だけを求めて機械を操作する人に負担を課すのではなく、「人と機械の協働」により人が機械の支援を受けながら自律して働き生活するようになれば、人が個人の個性と自由を生かしつつ個々の豊かさを追求できる自律社会に近づくと考えられます。その意味でもデジタル技術の重要性は今後も増すばかりであり、オムロンはその可能性に向けた挑戦を続けていく所存です。

1) 経済産業省, “デジタルガバナンス・コード3.0 ～DX経営による企業価値向上に向けて～,” 経済産業省, https://www.meti.go.jp/policy/it_policy/investment/dgc/dgc3.0.pdf (Accessed: Mar. 14, 2025).

2) Y. Shavit et.al., “Practices for Governing Agentic AI Systems,” OpenAI, <https://cdn.openai.com/papers/practices-for-governing-agentic-ai-systems.pdf> (Accessed: Mar. 14, 2025).

3) 中間真一, SINIC理論, 日本能率協会マネジメントセンター, 2022.

オムロン株式会社

技術・知財本部 技術・知財戦略室 経営基幹職

松原大貴

物理モデルとデータ駆動モデル

北海道大学 データ駆動型融合研究創発拠点 (D-RED) 特任教授
北海道大学 大学院情報科学研究院 名誉教授

五十嵐 一



長崎大学 大学院総合生産科学研究科 (工学系) 助教

大友 佳嗣



物理学の黎明期、ガリレオ・ガリレイは物体の落下を調べるため、空気抵抗による効果を取り除き、運動の本質に迫った。私達の目の前に展開する世界は、風が吹き雲流れ、まさに万物が流転しており、単純な法則に支配されているようには見えない。その中から様々な副次的因子を取り除き、本質を抽出することが、世界を記述し理解するために必要である。このアプローチはさらに洗練され、ニュートンの運動法則や、マクスウェルの方程式につながった。そして現在に至るまで、できるだけ少数の法則で物理現象を統一的に記述するための努力がなされている。

対象の本質的な物理的特性を抽出し、可能な限り単純化したモデルで記述するアプローチは工学でも広く使われている。著者らが専門とする電気電子工学では、等価回路が広く用いられる。変圧器を考えると、実際には磁束や損失は空間分布を持つが、これらを単純化して集中定数で表すことで等価回路を構成する。この近似により主磁束を励磁インダクタンスと理想変圧器に、漏れ磁束を漏れインダクタンス、ヒステリシス損失やジュール損失を抵抗に置き換えることができる。電気技術者はインダクタンスや抵抗の物理的・直観的なイメージを持つため、等価回路を通して変圧器全体を理解できる。また巻き数や寸法、材料特性を与えたときの特性を定量的に予測できる。

人体やロボットのダイナミクスのモデリングにおいては、ダンパやバネ、質点（または剛体）からなる機械系が広く用いられる。エッセンシャルな性質を維持しつつ自由

度を低減することで、解析や制御がずっと容易になる。このように、対象の物理的考察の上に構築されたモデルを物理モデルと呼ぶことにする。物理モデルは、近似の範囲内で定量的な予測が可能であること、物理法則に立脚しているため人による理解がしやすいなどの利点を持つ。

さて近年、人工知能・機械学習の普及が進み、測定データや解析データに基づくデータ駆動モデルが広く用いられるようになってきた。データ駆動の具体的な方法として、ニューラルネットワーク (NN) やカーネル回帰、回帰木などがある。データ駆動モデルの学習では、入力値に対して与えられた出力値になるように、パラメータ (NN では重み係数) を決定する。これらモデルは通常ブラックボックスであり、また物理法則をモデル化していない。したがって、対象の理解につなげることは難しい。一方、データ駆動モデルには物理モデルにない多くの長所がある。たとえば複合材料の合成を例にとると、各材料種の混合割合で多様な特性が発現するが、これを物理モデルで理解するためには、極めて複雑なマイクロ現象を解析しなければならず、それはしばしば困難である。これに対してデータ駆動モデルでは、混合割合と特性の関係を直接的に表すことで、測定データにはない混合割合に対しても一定の精度で特性予測を行うことができる。また他の例として、モータの騒音を考えると、その原因を特定するためには、電磁力による変形や磁歪、偏心など様々な仮説を立てて解析を行い、測定された周波数分布を再現できるか試す必要があ

る。これに対して、様々なノイズの原因と対応する周波数特性を関連付けるデータ駆動モデルを構成しておけば、測定された周波数スペクトル（結果）から原因を高速に予測できるだろう。上記のようにデータ駆動モデルは因果関係の説明が難しいデータや、摩擦や損失、材料や寸法のばらつき、環境依存性など複雑な要因が絡むデータに威力を発揮する。そして製品の設計開発や品質管理・異常検出には、このようなデータの取り扱いがしばしば重要になる。

物理モデルとデータ駆動モデルを併用することも有効である。2024年のノーベル化学賞は、アミノ酸配列からタンパク質構造を予測する AlphaFold2 の開発者に与えられた。このシステムは、蓄積された大規模測定データに基づいてデータ駆動モデルを構築し、それによりタンパク質の折り畳みを予測する。さらに分子動力学に基づく物理モデルにより予測値を補正することで、予測精度を向上させる。また PINN（Physics-Informed NN）においては、対象

の物理を記述する偏微分方程式と境界条件が NN 内で表現され、任意の点に対する場の値を出力する。これは物理モデルとデータ駆動モデルを融合したものと見なすことができる。物理モデルから生成したデータにより、データ駆動モデルの学習を行う例もある。また逆にデータ駆動モデルを用いて物理モデルを生成することもできるだろう。物理モデルは対象の本質を表し、データ駆動モデルは対象をあるがままに記述する。このような双対性を有する新旧二つのモデルを融合することで、さらに何ができるだろうか。

冒頭の話に戻ると、ガリレオは発明間もない望遠鏡をいち早く自家薬籠中の物とし、それを天体に向けてことで、木星の衛星を発見した。そしてこれが地動説につながることになる。新しく出現した技術を誰も考えていなかった対象に用い、これまでにない世界を拓く。われわれはいま、人工知能・機械学習をガリレオの望遠鏡のように用いることができる。

研究開発プロセスの デジタルトランスフォーメーション

ークラウド・AIネイティブ時代の研究開発プラットフォームー

津田 学*, 小野 秀将**, 日下 武紀**, 原田 真太郎**

*：オムロン株式会社, **：オムロン ソフトウェア株式会社

はじめに

これまでの製造業において、研究開発力は競争優位性を決定づける重要な要素の1つであった。しかし、近年のデジタル技術の発展により、優れた研究開発力に加えて、その力を最大限に引き出す研究開発環境の高度化が、企業の競争力を大きく左右する時代が到来している。同じ研究開発力を持っていたとしても、デジタル技術により試行錯誤を高速に実行（ハイサイクル化）できる環境があれば、成果の質とスピードを格段に向上させることが可能となる。とりわけ、“クラウドネイティブ”、“AI ネイティブ”な研究開発基盤を構築し、研究者がハイサイクルに成果を創出できる環境の整備が、企業競争力の鍵となっている。本稿では、オムロンの研究開発におけるクラウド開発環境と生成 AI 活用環境の構築に対する2つの具体的事例を通じて、この変革の実際を紹介したい。

1. クラウド開発環境 “RDinX”

1.1 ハイサイクルな研究開発を実現するクラウド開発環境の現状

オムロンは、生産工程を自動化するファクトリーオートメーション（以下、FA）をはじめとして、ヘルスケア、デバイス&モジュール、社会システム、エネルギーソリューションなど多岐にわたる事業を展開しており、オムロンの研究開発部門はこれらの領域における先端技術開発を担っている。特に FA やエネルギーソリューションにおけるパワーエレクトロニクス分野では、熱設計の最適化に Computer Aided Engineering（以下、CAE）および最適化技術を積極的に導入することで、従来の熟練設計者の経験と試作の反復による設計プロセスから脱却し、設計工数の大幅削減を実現してきた。

しかしながら、CAE や最適化技術の活用には高スペックの演算リソースが大量に必要となる一方で、研究開発現場では依然としてパーソナルコンピュータ（以下、PC）などのハードウェアに依存した従来型の研究開発環境が主

流であった。こうした環境下では、大量のハードウェア PC の調達から実験を実行可能な状態にするまでに数ヶ月のリードタイムを要し、さらに各 PC への環境設定も手作業で行う必要があるため、研究開発の開始までに相当の時間と工数が費やされる課題が顕在化していた。

1.2 オムロンでのクラウド開発環境の構築とその課題

この課題を解決するため、オムロンの研究開発部門は Amazon Web Service（以下、AWS）クラウドを活用した高スペック PC の仮想化に着手した。クラウド上の仮想環境では、研究者が必要なときに必要な量の演算リソースをほぼリアルタイムで調達できるため、いつでも望む実験を遅滞なく実行できる環境の実現が可能となる。

しかしながら、研究開発環境を仮想化するには、ローカルネットワーク上にあるオンプレミスの研究開発環境をクラウド上の仮想空間へ移行するという発想の転換が求められ、その実現には2つの重要な課題が存在した。

1つ目の課題は、セキュリティ設計である。研究開発プロセスで生成される実験データやその分析結果は、オムロンの競争力の源泉となる技術資産であり、高度な機密性を有する。従来のローカルネットワーク上のオンプレミス環境においては、本社 IT 部門が構築した堅牢なセキュリティ設計で保護されていたが、これをクラウド上に移行する際には、同等以上のセキュリティレベルを確保する必要があった。

2つ目の課題はコスト最適化である。クラウド上の仮想 PC は、そのスペックと利用時間に応じた従量課金方式を採用しているため、無計画な利用はコストの急激な増大を招く恐れがある。したがって、研究開発の自由度と柔軟性を確保しつつも、適切な利用管理によるコスト抑制の仕組みが不可欠であった。

これらの課題に対し、オムロンの研究開発部門では以下に述べる対策で、研究者にとっての利便性と、研究開発の質・スピード向上を両立する環境「RDinX（R&D infrastructure on Cloud Systems）」を実現した。

1.3 課題への対策

1.3.1 セキュリティ設計への対策

RDinX の特徴は次の 2 点に集約される。

1 つ目は、オムロンの情報セキュリティルールに徹底的に準拠したセキュリティ設計である。RDinX の開発にあたっては、当社の情報セキュリティルールで規制されている事項を詳細に分析し、これらを構想設計に落とし込んだ。「利便性とセキュリティの両立」を設計コンセプトとすることで、オムロンの研究開発 DX 基盤となることを目指した。研究開発を後押しする使いやすいクラウド環境を迅速に提供したいという要請がある一方で、多数のチームによる環境利用に伴うセキュリティレベルの低下や、運用作業の増加による提供スピードの遅延が懸念された。通常、AWS 環境を構築する際には「アカウント」と呼ばれる管理単位を用途ごとに複数準備することが推奨されている¹⁾が、RDinX の利用拡大のスピードを維持しつつ、セキュリティ設定の統一性を確保することが技術的課題であった。

この課題を解決する手段として採用したのが、「AWS Control Tower²⁾」の戦略的活用である。Control Tower は、AWS が数千の企業との連携を通じて確立したベストプラクティスに基づき、複数アカウントを効率的に管理する機能を提供するサービスである。特に、代表アカウントから全アカウントに対してセキュリティ設定を一元配布する機能を活用することで、セキュリティ設定の迅速な統一が可能になることが採用の決め手となった。実装にあたり、クラウド特有のセキュリティルールについては AWS が提供する「ガードレール³⁾」を精査して最適なものを採用し、当社固有のセキュリティ要件については詳細な分析を行い、クラウド環境設定として体系化した。

この仕組みは期待通りに機能し、セキュリティ設定を完備したアカウントを研究開発部門や協創パートナーに短期間で提供することが可能となった。「利便性とセキュリティの両立」というコンセプトを具現化したこの設計は、日本で初めて Control Tower を本格活用した事例として AWS 社公式サイトに掲載されるなど、その先進性が高く評価されている⁴⁾。研究開発部門の研究者向けには、専用のポータルサイトを構築した。研究者は仮想 PC が必要になった際、このポータルサイトにアクセスし、必要な CPU/GPU のスペック、メモリ容量などを指定するだけで、わずか 5 分程度で仮想 PC を利用開始できる。払い出される仮想 PC には前述のセキュリティ設定が自動的に適用されるため、研究者はセキュリティ設定を意識することなく、安全な環境で研究活動に専念できる。また、環境設定を含めたマシンイメージの複製機能により、複数の仮想 PC 導入時における設定作業の重複も解消された。

1.3.2 コスト最適化への対策

2 つ目は、コスト最適化を目的としたシステム設計と運用プロセスである。コスト最適化を実現する上で最も重要な要素は、利用実態の正確な把握である。すなわち、研究者がいつ、どのようなスペックの仮想 PC を何台、どれくらいの頻度と時間で利用するかを見極めることが不可欠であった。

オムロンの研究開発部門では、これらを明確にするため RDinX のトライアル運用を実施し、仮想 PC の利用実績を詳細に分析した。その結果、AI や最適化のためのトレーニング実行時には大量の仮想 PC リソースが必要となるものの、それ以外の用途ではリソース需要が限定的であることが判明した。また、クラウド上の仮想 PC は稼働時間に応じた課金体系であることから、未使用時に確実に電源を OFF にすることで、コストを効果的に削減できることが確認された。

一般的なクラウド利用のコスト削減策としては、社内アカウントの集約によるボリュームディスカウント、AWS 社が提供する Reserved Instance⁵⁾ や Savings Plans⁶⁾ などのコスト削減オプションの活用が挙げられるが、オムロンの研究開発における利用実態分析の結果、これらの対策以上に、未使用時の確実な電源 OFF がコスト削減に大きく寄与することが明らかとなった。

この知見に基づき、独自の仮想 PC 管理コンソールを開発した。このコンソールにより、指定時間帯のみ仮想 PC を稼働させる、あるいは特定の時間帯に自動的に電源を OFF にするなどの細やかな設定が可能となった。これにより、例えば「休日夜間は自動で OFF にする」「基本的に休日夜間は OFF だが、今週末の土日のみ学習アルゴリズム実行のため ON を維持する」など、研究プロセスに応じた柔軟な運用計画を研究者自身が容易に設定できるようになった。

さらに、研究者ごとの仮想 PC 利用時間と利用料の可視化機能や、予算消化率が一定の水準を超えた時点でアラートメールを自動送信するリマインド機能なども実装し、研究者の負担を最小化しつつ効果的なコスト管理を実現している。

1.4 導入効果

これらの取り組みにより、オムロンの研究開発部門は RDinX という DX 基盤の構築を通して、クラウド導入時のセキュリティ設計とコスト最適化という 2 つの本質的課題を解決し、研究開発プロセスにおける調達や環境設定の工数を大幅に削減した。その結果、研究者は本来の創造的活動に集中でき、研究開発の競争力が劇的に向上している。これこそが、我々が目指す“研究開発のデジタルトランスフォーメーション”の実現である。

2. 生成 AI 活用環境 “RD Buddy”

2.1 生成 AI 活用における現状と課題

RDinX の構築と運用によるデジタルトランスフォーメーションを進める中、2022 年 11 月の OpenAI 社による ChatGPT の公開は、生成 AI という新たな技術トレンドの幕開けとなった。

ChatGPT の登場後、オムロンの研究開発部門の研究者から「研究開発プロセスの効率化に有用であるため、社内でも早急に生成 AI を活用できる環境を整備してほしい」という要望が多数寄せられた。これを受け、当部門では導入に向けた詳細な調査を開始したが、RDinX と同様に 2 つの本質的課題が浮上した。すなわち、セキュリティ設計とコスト最適化である。

セキュリティ設計における最大の懸念は情報漏洩リスクであった。研究者が生成 AI サービスを利用する過程で、意図せず機密情報をプロンプトとして入力してしまう可能性がある。こうした情報がサービスプロバイダによってモデル強化のための再学習に利用されると、企業秘密の流出につながりかねない。特に個人情報が含まれる場合は、個人情報保護法で規制されている「目的外利用」や「第三者提供」に該当する恐れがあり、法令違反となるリスクも生じる。

コスト最適化に関する課題は、生成 AI サービスの課金体系に起因している。一般的な生成 AI サービスは、プロンプトの入力量や出力量に応じた従量課金制を採用しているため、研究開発のような大量の技術情報を扱う用途では、活用が進むほどコストが増大する傾向にある。特に研究者が手動でチャットインターフェースを操作する段階を超え、API（Application Programming Interface）を介して自動化されたシステムから生成 AI を呼び出すようになると、短時間で膨大な入出力が発生し、コストが急激に上昇する可能性が高い。

2.2 生成 AI 活用環境の構築

これらの課題に対応するため、研究開発プロセスに特化した独自の生成 AI 基盤「RD Buddy」の構築に着手した。

RD Buddy の特徴は次の 2 点に集約される。

1 つ目は、情報漏洩防止のための多層的セキュリティ設計である。RD Buddy は RDinX 基盤上、すなわち AWS 上に構築されたオムロン専用のプライベートクラウド環境に配置することで、外部サービスへの機密情報流出リスクを最小化している。第一層では、生成 AI モデルを提供するクラウドサービス（Amazon Bedrock, Microsoft Azure OpenAI Service）を専用のリソースとして構築し、一般利用者と共有されるパブリックな生成 AI サービスとは完全に分離した。

第二層では、生成 AI モデルへのリクエストを用いた攻

撃、特にプロンプトインジェクション攻撃をコンテンツフィルタにより防止している。

第三層では、生成 AI に対するリクエストをハンドリングする API 処理層を前段に設け、外部からの攻撃防御、認証認可、ログ監視を行うことでセキュアな運用を可能にした。

第四層では、ユーザーが「プライベートモード」を選択できる機能を実装し、機密性の高い会話をナレッジデータベースから除外できるようにしている。

この実装により、オムロンの厳格な情報セキュリティルールに完全準拠することが可能となった。さらに、プロンプトとして入力された情報の包括的なログ監視機能を実装することで、情報漏洩を技術的に防止する環境を実現している。

2 つ目は、コスト最適化を目的とした効率的サーバ設計である。生成 AI モデルは運用にハイスpek的な環境を必要とするため、「必要な時に必要なリソースだけを使用する」というサーバーレスアーキテクチャの利点を最大限に活用した設計を採用した。

特に生成 AI の応答時間の長さに対応するため、ユーザーからの問い合わせに対して生成 AI が回答を作成している間、必要最小限の接続状態を保持し、実際の計算処理は必要な時のみ実行する仕組みを構築した。これにより、長時間の接続維持に伴う固定費用の発生を防ぎつつ、ユーザー体験を損なわない応答性を実現している。

また、ユースケースに応じた最適なモデル選択を可能にするインターフェースも提供し、高精度が必要な場合と応答速度・コスト効率が重要な場合で異なるモデルを使い分けられるようにした。これにより、必要以上に高価なモデルを使用することによるコスト増大を防止している。

このような最適化されたサーバ構成の実装により、従量課金要素は残るものの、全社的な利用コストを大幅に低減することに成功した。RD Buddy の構築により、オムロンの研究開発部門における生成 AI 活用時の二大課題である情報漏洩リスクとコスト増大問題を同時に解決し、研究者が安全かつ効率的に生成 AI を活用できる環境を整備できた。現在、オムロンの研究開発部門では、この基盤を活用した具体的な応用開発として、自然言語によるロボット制御アルゴリズムの開発や、特許庁のデータを DB 化して生成 AI と連携させた知財 AI エージェント⁷⁾などに活用し、それぞれ実用化に向けた検証を進めている。

3. DX を推進する体制と今後の展望

RDinX および RD Buddy の構築と運用は、オムロングループの IT 専業会社であるオムロン ソフトウェア株式会社（以下、OSK）が内製している点も特筆に値する。この内製化アプローチには複数の戦略的利点が存在する。

第一に、OSK のエンジニアはオムロンの情報セキュリ

ティールールに精通しており、かつ AWS 実装技術に関する専門人材を戦略的に育成している⁸⁾ ため、高度なセキュリティ設計を迅速かつ高品質に実装することが可能である。第二に、グループ内企業であるため、オムロンの機密情報を適切に取り扱う体制が確立されている点が挙げられる。

さらに、RDinX や RD Buddy で実現した機能は、セキュリティ基盤、仮想 PC 払い出し基盤、生成 AI 活用基盤など、機能ごとにアセット化されている。このモジュラー設計により、事業部門の商品開発チームが必要とする機能のみを選択的に導入することが可能となり、柔軟かつ効率的なシステム展開を実現している。

このような取り組みにより、オムロンは研究開発プロセスのみならず、商品開発プロセス全体のデジタルトランスフォーメーションも視野に入れた取り組みを推進している。特筆すべきは、社内で培った生成 AI 活用基盤の技術が社外からも高い関心を集めた結果、2024 年 12 月には OSK から「koto-Buddy」としてサービス化され、オムロングループ外への提供が開始された点である。これはオムロンの研究開発 DX の取り組みが、グループ内の技術革新にとどまらず、新たな事業機会の創出にも寄与していることを示す顕著な事例といえる。

オムロンの研究開発部門および一部商品開発部門では、RDinX と RD Buddy という「クラウドネイティブ」、「AI ネイティブ」な研究開発基盤の導入により、開発プロセスの効率化と成果物の質的向上を実現する事例が次々と生まれている。本稿で紹介したオムロンの取り組みは、グローバルおよび日本の製造業全体に押し寄せつつある大きな変革の潮流の一端を示すものである。この波は今後、単なる変化を超えた根本的なパラダイムシフトとなって、研究開発の在り方そのものを変革していくであろう。

しかしながら、真の研究開発のデジタルトランスフォーメーションは、遠い海の向こうで形作られたシステムを受動的に導入するだけでは決して実現し得ない。それは、研究者が自らの創造的活動の本質を見極め、研究開発のハイサイクル化を実現する DX 基盤を我々のような DX 基盤構築部門との協働によって主体的に創造し、活用する過程において初めて結実するものである。

我々は今、研究開発の歴史における重大な転換点に立っている。クラウドと AI の力を創造的に活用することで、これまで想像もできなかった研究開発の可能性が開かれつつある。この新時代の幕開けにあたり、本稿の結びとして、次の言葉を記したい。

“世界を変えるのは、オレ達だ！！”

参考文献：

- 1) AWS社. “Benefits of using multiple AWS accounts.” AWS Documentation. <https://docs.aws.amazon.com/whitepapers/latest/organizing-your-aws-environment/benefits-of-using-multiple-aws-accounts.html> (Accessed: Mar. 27, 2025).
- 2) AWS社. “AWS Control Tower.” AWS の製品・サービス一覧. <https://aws.amazon.com/jp/controltower/> (Accessed: Mar. 27, 2025).
- 3) AWS社. “コントロールの仕組み.” AWS Documentation. https://docs.aws.amazon.com/ja_jp/controltower/latest/userguide/how-controls-work.html (Accessed: Mar. 27, 2025).
- 4) AWS社. “オムロン、研究開発用の HPC 基盤を AWS 上に構築、最適なコンピューティングリソースを活用し、革新的技術開発をリード.” クラウドソリューション. <https://aws.amazon.com/jp/solutions/case-studies/omron-case-study/> (Accessed: Mar. 27, 2025).
- 5) AWS社. “Amazon EC2 リザーブドインスタンス.” Amazon EC2. <https://aws.amazon.com/jp/ec2/pricing/reserved-instances/> (Accessed: Mar. 27, 2025).
- 6) AWS社. “Savings Plans.” Savings Plans. <https://aws.amazon.com/jp/savingsplans/> (Accessed: Mar. 27, 2025).
- 7) 奥田武夫 他, “IP ランドスケープを基軸とした知財マネジメントの革新—オムロンにおける両利きの知財活動の体系化と実践—,” *IP ジャーナル*, no. 32, 2025.
- 8) AWS社. “グループのデジタル戦略実現に向けて AWS 人材を育成 半年間のトレーニングで 7 名が AWS 認定 5 冠を取得 自社勉強会を継続し AWS 技術者 100 名体制へ.” AWS トレーニング活用事例. <https://aws.amazon.com/jp/training/case-studies/osk-training/> (Accessed: Mar. 27, 2025).

執筆者紹介



津田 学 TSUDA Manabu
技術・知財本部
基盤デザイン部 副部長



小野 秀将 ONO Hidemasa
オムロン ソフトウェア株式会社
コア技術センタ アセット推進部
スペシャリスト（クラウド）



日下 武紀 KUSAKA Takenori
オムロン ソフトウェア株式会社
コア技術センタ アセット推進部



原田 真太郎 HARADA Shintaro
オムロン ソフトウェア株式会社
コア技術センタ アセット推進部 部長

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

特集

デジタル化社会の実現に向けた オムロンのDX推進技術



セル生産ラインにおける 3D シミュレーションに基づくロボット制御プログラムの生成手法

吉田 寛

近年、技術革新に伴って製品型式の短命化が進んでおり、製造設備にも新製品型式への迅速な対応が求められている。そのため PLM (Product Lifecycle Management) 情報基盤を導入して、製品と設備の設計情報を統合管理することが行われている。そして製品型式ごとの製造作業指示を自動生成して、製造作業者に柔軟に作業指示を行うことが試みられている。一方で製造現場では人手不足も深刻な問題であり、ロボットによる自動化が試みられている。教育を受けた作業員によるセル生産ラインでは、作業指示の変更によって工程を柔軟に変更することができる。しかしロボットで自動化された設備では、制御プログラムを変更・改造する必要がある。

本稿では、PLM 情報基盤上の製品部品表 (BOM) / 工程表 (BOP) 情報を元に、ロボット組立作業セルに特定の品目の組立作業工程を実行させるロボット制御プログラムを、3D シミュレーションを利用して生成する方法を提案する。この方法により、設備改造に伴う機器レイアウト変更の事前シミュレーション検証と実機制御用プログラムの改造作業を省力化する。これによって新派生品目に対する設備改造工数を 11% 削減できるとの試算結果を得た。

Robot Control Program Generation for Cell Production System Based on 3D Simulation

YOSHIDA Hiroshi

In recent years, product lifespans are becoming shorter due to technological innovation, and it requires manufacturing facility to quickly support new product types. In response to this request, design information of products and manufacturing facilities are comprehensively managed using PLM (Product Lifecycle Management) information platform. Generate manufacturing work instructions for each product type, and issue work instructions to manufacturing workers. On the other hand, labor shortage is another serious problem and robotic automation is being attempted at manufacturing sites. Cell production lines run by trained workers can flexibly change the process by changing work instructions. But in the case of equipment automated by robots, it is necessary to change or modify the control programs.

In this paper, we propose a method to generate robot control program which instructs a robot assembly work-cell to execute the assembly process for a specific item, using 3D simulation and product's Bill of Material (BOM)/Bill of Process (BOP) information on the PLM information platform. We have obtained a desk calculation result that the man-hours required to modify manufacturing facility to adapt to newly derived items can be reduced by 11% with this method.

1. まえがき

近年、技術革新に伴う製品の進化や調達事情の変化による使用部品の設計変更等の事由により、製品型式の短命化や派生型式の増加が進んでいる。それに対応すべく製造設備立上げ期間の短縮と製造品種切替の迅速な実行がより強

く求められている。それに対し製品の企画から設計・開発・販売・廃棄までの一連のプロセス、すなわち製品のライフサイクルを管理する Product Lifecycle Management (以下、PLM) 情報基盤を導入し、製品型式のバリエーション構成、部品構成、製造工程、設備リソース情報などを統合管理する環境を整備する方法が試みられている。これによって、製品／製造設備構想の 3D シミュレーション検証

Contact : YOSHIDA Hiroshi hiroshi.yoshida.3@omron.com

と修正改善を製造エンジニアリング・チェーン上流の構想段階から行っていく“コンカレント・エンジニアリング”が PLM 情報基盤提供企業等から提唱されている¹⁾。また PLM 情報基盤には個別の製品型式に対応した作業指示書の生成や、XR 技術を応用した作業支援システムと連携する機能を備えるものもあり、セル生産方式における柔軟な作業指示に活用する取り組みが行われている²⁾。

一方で近年の製造現場では人手不足も深刻な問題であり、製造作業をロボットに置き換える自動化が盛んに試みられている。人間の作業によるセル生産ラインでは、事前の作業教育と作業指示書による指示の変更によって製造作業工程を変更することができたが、自動化した設備の場合には制御プログラムを変更・改造する必要性が生じる。

本稿では、ロボット組立作業セルを対象として、PLM 情報基盤上に整備された情報を元に特定の製品型式の組立作業工程を実行する制御プログラムを構成する方法を提案する。

2. 従来技術と課題

2.1 作業によるセル生産方式

派生品目が多い製品の変種変量生産に適した製造方式として、セル生産方式が知られている³⁾。この方式では、一人または少人数の作業者の周りに製造工程作業に必要な部品や治具・工具を配置した単位を“セル”とし、セル単位で製品ワークの品目に応じた製造工程が実行される。セルの独立性を保ち、セル単位でのレイアウト変更や、需要に応じたセル増減を容易にすることで、変種変量生産に対応する。さらに PLM 情報基盤が導入され、製品品目ごとの部品表 (BOM)、工程表 (BOP) がデータベースとして整備されている工場では、PLM の情報を用いたセル作業への作業指示書の自動生成や、タブレットや XR 技術を用いた電子的作業指示による迅速な製造品目変更が試みられている。

2.2 セル生産方式のロボットによる自動化

従来のセル生産方式では、作業者を教育し一定レベルのスキルを有した多能工とする必要があり、作業者の流動性が高い環境には適さない。そのため近年の製造現場の人件費高騰・人材不足を受けて、作業者をロボットで置き換える試みが広まっている。さらに、さまざまなサイズや形状の産業用ロボットに加え、安全性に考慮された人協調型ロボットも急速に普及してきた。それを受けて、セル生産方式の製造ラインで多く行われるねじ締結、嵌合、シール貼り付けといった組立作業を、6 軸力覚センサを用いたインピーダンス制御によって高精度に実現するロボット組立アプリケーションが開発され、一定の成果が出ている⁴⁾。

2.3 ロボットセルの変種変量対応や派生品対応の課題

ロボットで自動化したセルで変種変量生産に対応するには、個々の製造作業の実現のみならず、製造品目に応じた製造作業手順 (工程) の変更や、新たな派生品目への生産対応のための設備改造に対する制御プログラムの修正・変更が必要となる。教育を受けた作業による従来のセル生産方式であれば、PLM 情報基盤から製造指示を作成し直すことで派生品目に柔軟に対応することができる。しかしロボットで自動化したセルでは、作業指示に相当する制御プログラムの作成・変更と、セル内部機器レイアウト変更やワーク形状の変更に応じたティーチング作業のやり直しが必要となる。ティーチング作業のため発生する製造ラインのダウンタイムを削減するためには、3D シミュレータを用いたオフライン・ティーチング機能が利用される。しかしそのための机上作業にもやはり多くの工数が必要となる。

3. 提案する手法

ロボットで自動化したセルにおいても柔軟な変種変量生産や派生品種対応を実現する、という課題に対して本稿では、図 1 に示すように、PLM 情報基盤を入力元として、ロボット制御プログラムを 3D シミュレーションを利用して生成する手法を提案する。

- ① PLM 情報基盤で管理している製造対象製品群の 3DCAD、部品表 (BOM)、工程表 (BOP) 情報を、オムロンの FA 統合開発環境 Sysmac Studio 上に試作した“作業シーケンスエディタ”に取り込む (インポート)。
- ② “作業シーケンスエディタ”によって、ユーザにロボットセルによる製造作業工程の詳細を定義させ、そこから Sysmac Studio 上で 3D シミュレーション実行するための C# ベースのシミュレーションスクリプトである Shape Script を生成する。
- ③ その 3D シミュレーションの実行を通じてワーク 3D 形状モデルの現在位置から作業目標座標を得て、オムロン製ロボット実機を制御するプログラムである eV+ プログラムモジュールを生成する。

この方法に必要な機能の一部試作を行い、その実現性と期待効果を検証した。

4. 試作による実現性検証内容

4.1 検証ターゲット設備と検証シナリオ

検証ターゲットとして図 2 および図 3 に示す“基板モジュール自動組立セル モデル機” (以下、ロボットセル) の設計情報を用いた。このロボットセルはオムロンのロ

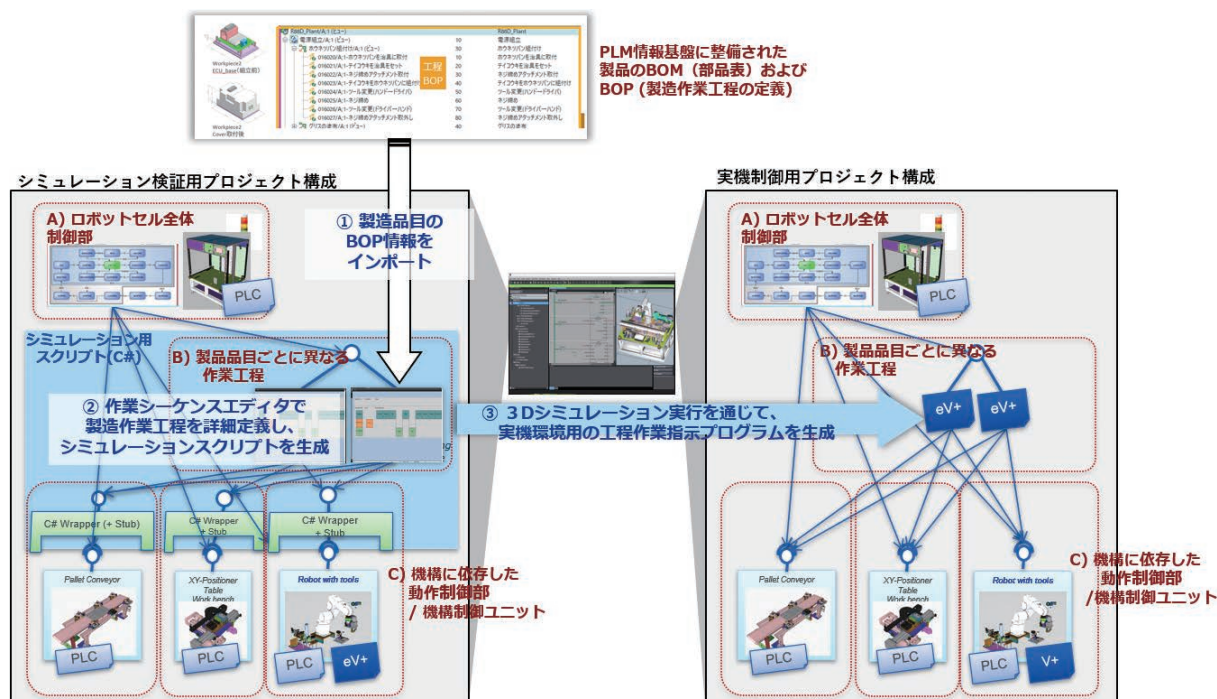


図1 BOPを利用した工程作業指示プログラム生成の概要

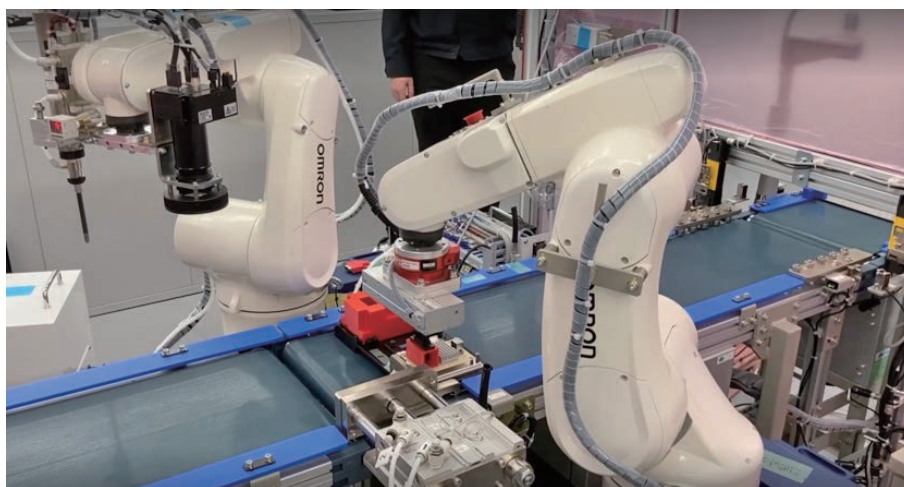


図2 検証ターゲット設備の実機写真

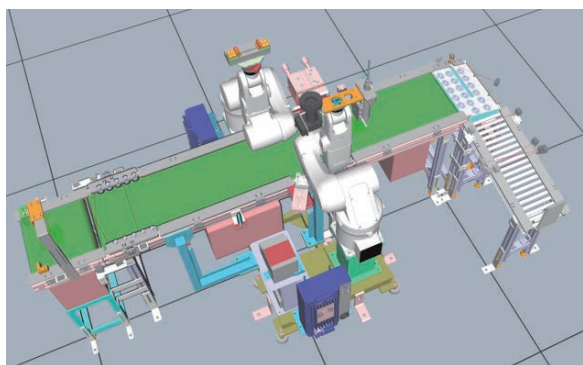


図3 検証ターゲット設備全体像の3Dモデル

ボット統合コントローラ⁵⁾のデモ用に制作されたものであり、自動車用の電子制御基板ユニットを模した複数品目の模擬製品の混流組立が行えるように設計されている。

また市販のPLM情報基盤システム⁶⁾を利用し、そこに模擬製品の品目ファミリーについて3DCAD情報と部品表(BOM)、工程表(BOP)、およびロボットセルの3DCAD情報と設備モジュール構成情報(BOE)を整備・格納した。2種の製品品目について既に混流生産がなされている状況から、3つめの派生品目が生じ、その品目の部品表と工程表がPLM情報基盤に追加された状態を想定した。これら3品目の組立工程の概要を図4に示す。

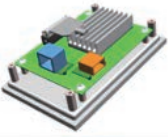
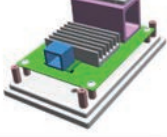
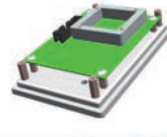
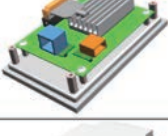
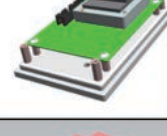
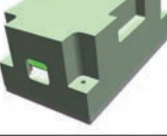
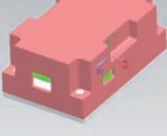
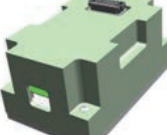
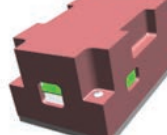
	既製造品目		新規派生品目
	ProductModel 01	ProductModel 02	ProductModel 03
工程投入時			
コネクタ挿入 または ヒートシンク挿入		該当なし	
カバーを付ける			
コネクタ挿入	該当なし		該当なし
ねじを締める			
外観検査する	3面撮像検査	3面撮像検査	3面撮像検査

図4 検証設備の模擬製品3品目の製造工程

この3つ目の派生品目を、ロボットセルの混流生産対象に追加する設備改造を行うシナリオについて、提案する方法の実現性とそれによる工数削減効果の試算を行った。

4.2 ロボットセル制御プログラムの内部構成

本稿で提案する手法を活用するためには、対象品目に応じて製造作業工程を差し替えることができるよう制御プログラムの構造に工夫が必要である。検証用ロボットセルでは制御プログラムを、図5のような構造で制御責務を分割した構成とした。

図5の「(C) 機構に依存した動作制御部」には、セル内部に配置した機構ユニット毎に、その機構の動作により特定の機能／製造作業を実現するための動作制御プログラムを配置した。

図5の「(B) 製品品目ごとに異なる作業工程部」は、製品品目ごとの組立作業工程に従い、「(C) 機構に依存した動作制御部」が提供する各種の機能／作業実行プログラムを順次実行する作業工程プログラムである。

図5の「(A) ロボットセル全体制御部」には、ラインを構成する各セルが共通で持つべき振る舞い／外部インタ

フェース仕様として以下の振る舞いを実現するプログラムとした。

- セル全体の動作モードやステートの管理
- 上位の製造実行システム (MES) や、上流／下流セルとのインタフェース
- 安全策、ライトカーテン、非常停止スイッチなどのセーフティ制御
- 操作パネルやシグナルタワーなどの人間と位階の間に立つインタフェース (Human-Machine Interface: HMI) の共通制御
- 自動モードで実行可能な「(B) 製品品目ごとに異なる作業工程」プログラムの選択と実行
- 手動モードで実行可能な「(C) 機構に依存した動作制御部」の機能／作業プログラムの選択と実行

本稿では新規派生品種に対して、「(B) 製品品目ごとに異なる作業工程部」の工程制御プログラムを、BOP情報を元にして生成・追加することで対応した。

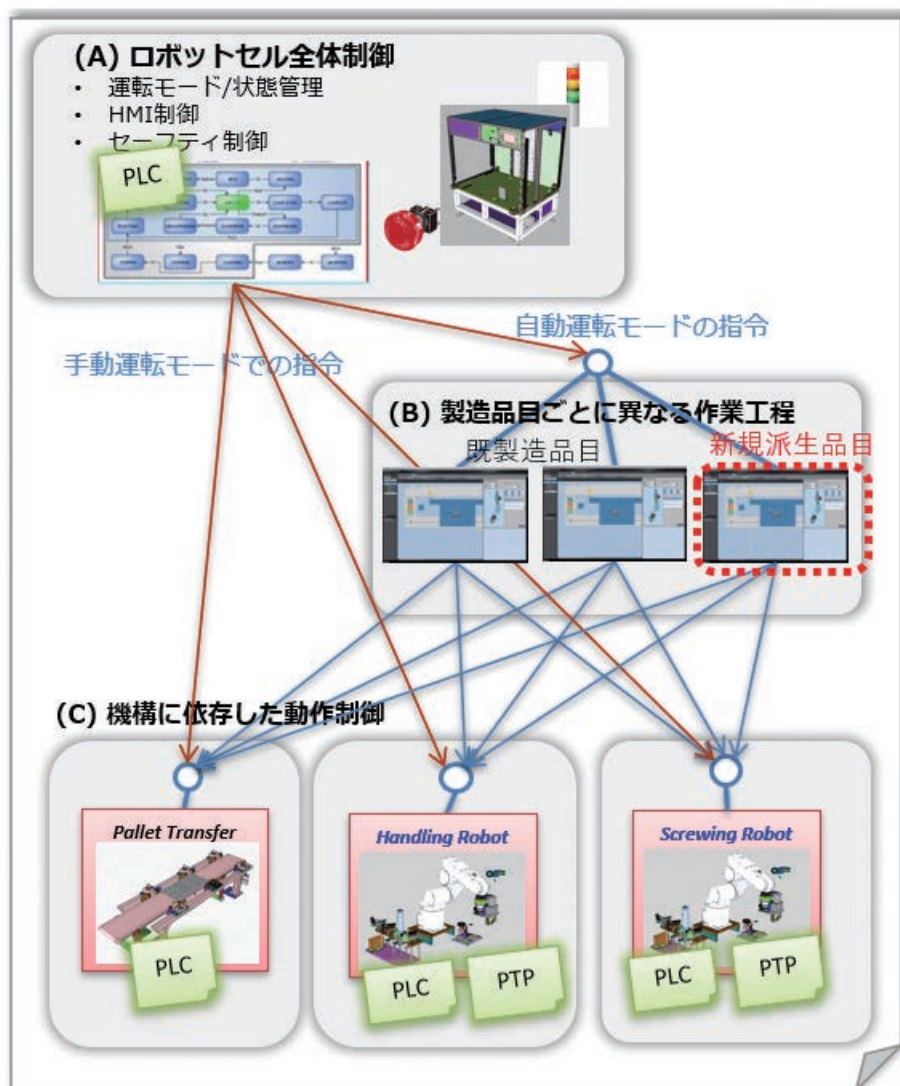


図5 ロボットセル制御プログラムの想定構成

4.3 製品 BOM/BOP 情報の準備

本節では、工程制御プログラム生成の検証用に PLM 情報基盤上に準備した BOP 情報について説明する。PLM 情報基盤には一般的に、製造される製品ファミリの型式（品目）構成の定義と、製品品目ごとの部品表（BOM）と工程表（BOP）、場合によって設備構成情報（BOE）が管理される。しかしながら一口に BOM, BOP といっても実際には運用する工場により、その情報の粒度や詳細度は様々である。本稿では市販の PLM 情報基盤上に図 6 に示す構造で検証ターゲットの BOM, BOP, BOE 情報を整備した。

製品品目に紐づく BOP には、一般的にその品目の組立工程を構成する各作業間の先行／後続関係と、各組立作業において、入力となる仕掛かりワークに対して、どの部品を、どの製造リソース（装置／ツール／治具／あるいは作業員）によって、どのように組み付けを行うか、が定義される。利用した市販 PLM 情報基盤システムでは付属する

製造工程エディタを用いて⁷⁾ 工程作業の前後関係を PERT チャート型式で定義できる。

本稿では BOP を元に工程制御プログラムを生成するために、各工程作業アイテムに以下の情報を引き出せるようなプロパティを構成した。

- ・ 先行作業の識別子
- ・ 事前状態となる仕掛かりワークの 3D モデル
- ・ 追加部品の 3D モデル
- ・ 事後状態となる仕掛かりワークの 3D モデル
- ・ 後続作業の識別子

4.4 機構制御ユニット群のシミュレーション準備

BOP 情報に基づいて組立工程シミュレーションを実行できるようにする準備として、まず Sysmac Studio 上でロボットセルの 3D 機構シミュレーションモデルを予め作成

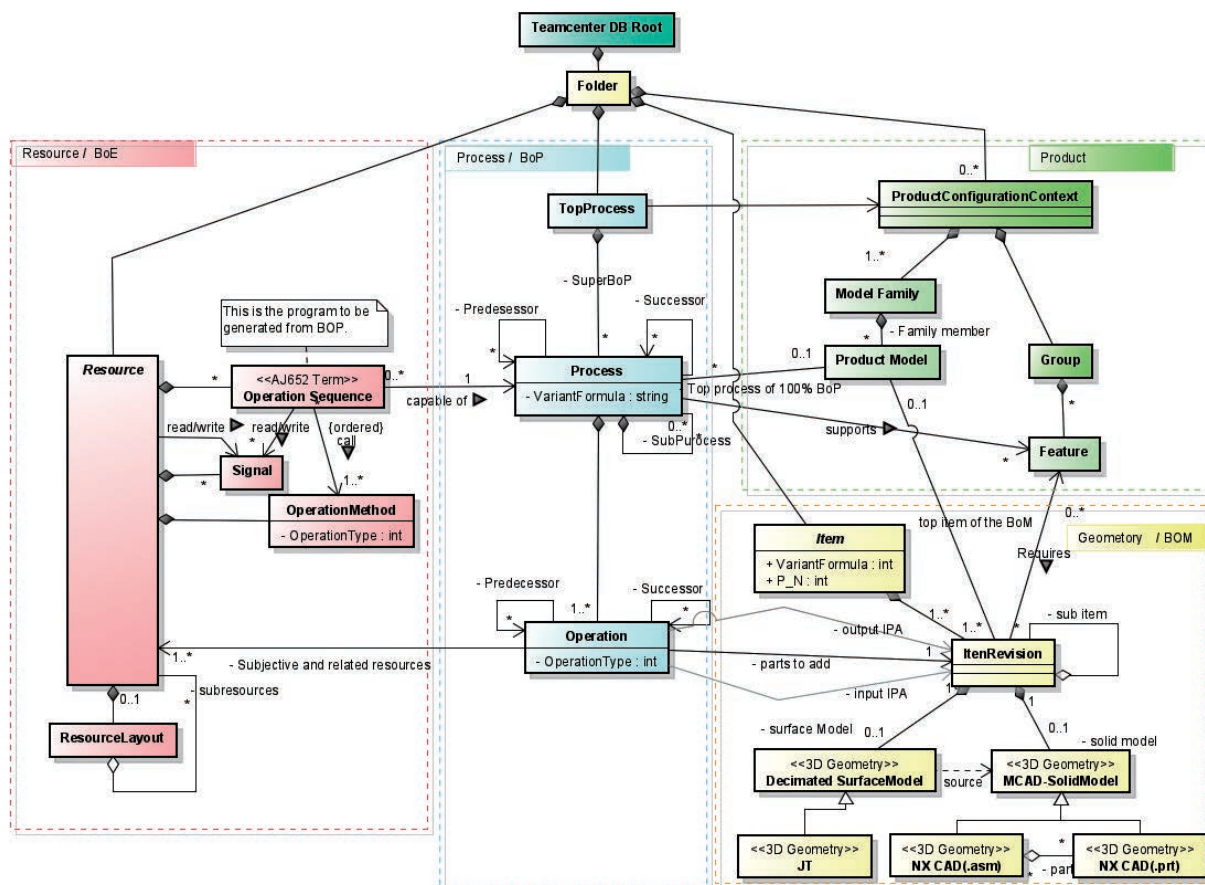


図6 市販のPLMシステム上に作成したBOM/BOP/BOEデータの構造

した。これによって、図5の「(C) 機構に依存した動作制御部」に示した機構ユニットごとに提供する機能／作業をそれぞれシミュレータ上で再現できるよう準備した。検証ターゲットのロボットセルでは、「パレット搬送ユニット」、「ハンドリングロボットユニット」、「ねじ締結ロボットユニット」の3種の機構ユニットで構成するものとし、各機構ユニットが提供する機能を図7のように構成した。

図7に示した機構ユニットの各機能／作業を Sysmac Studio の3D シミュレーション上で実行できるように Shape Script を準備した。ここで留意すべきことは、実機を動作させるための機構ユニットの制御プログラムは、機構側へのアクチュエータ出力に対するセンサからの入力 that 適切に応答されなければ正常に動作しないことである。コンベアのような単純な機構であれば応答を Sysmac Studio 上で再現することができるが、例えばロボット手首に設置された6軸力センサからの入力に基づくロボットの力制御は適切に再現することができない。そのような箇所は実機用の制御プログラムではなく、3D シミュレーション上でのみ適切なタクトタイムで見かけ上の作業を再現するスタブとして Shape Script を実装した。

そのように機構ユニットが提供する機能を再現する Shape Script を定義する上で、機能呼び出しインターフェー

スの構成を以下のように考慮した。

- 機構ユニットが提供する機能や作業の呼び出しインターフェースを仮想的なメソッドとして構成する。
- 他の機構ユニットの作業と並行実行を行う作業は非同期呼び出しを前提とする仮想メソッドには、名前に接尾語“Async”をつける。作業完了待ちには機構ユニット内で共通の WaitOperationResult メソッドを定義する。
- 同一の機能／作業に対して、引数（実行時に引き渡す値）により作業対象を指定できるようにする。作業対象に指定には座標値は用いず、3D シミュレーションオブジェクトの識別名を利用する。
- 作業対象の3Dオブジェクトに対するアプローチ方向や距離などの詳細は、後述する“エンドエフェクト・プロファイル”と呼ぶ情報に予め定義し、引数として指定できるようにする。

図7の“05_HandlingRobot”に示した「ハンドリングロボットユニット」に対して準備したシミュレーション用仮想メソッドとその引数構成の例を表1に示す。

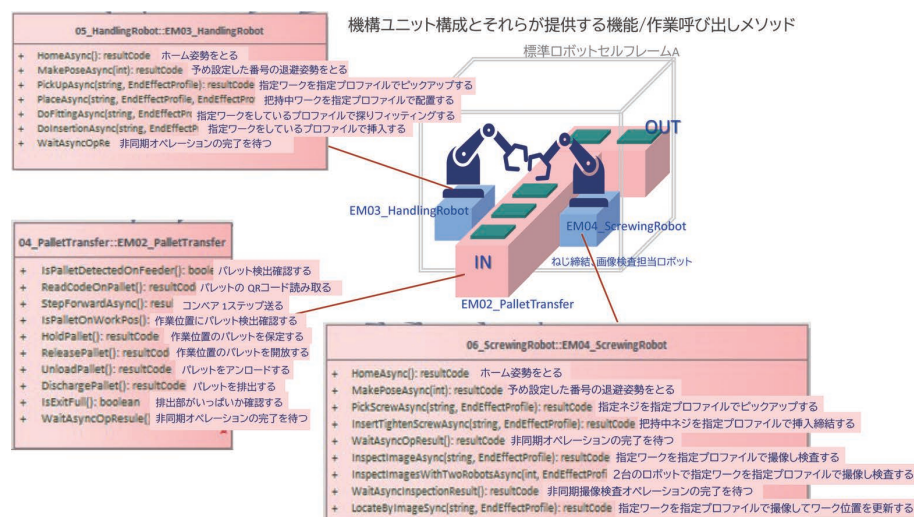


図7 検証用ロボットセルの機構制御部構成

表1 「ハンドリングロボットユニット」のメソッドと引数の一覧

仮想メソッド	引数構成
HomeAsync ホームポジションへ移動開始	— なし
MakePoseAsync 指定した姿勢への移動開始	1. poseIndex : int 姿勢インデックス
PickUpAsync 指定ワークをピックアップする作業開始	1. workpieceName:string 把持対象 3D オブジェクト名 2. graspProfile: EndEffectProfile 把持プロファイルオブジェクト
PlaceAsync 把持中のワークを指定オブジェクト上に置く作業開始	1. placeProfile:EndEffectProfile 把持ワークを置く動作に利用するプロファイルオブジェクト 2. releaseProfile:EndEffectProfile 置いた後にハンドを離す動作に利用するプロファイルオブジェクト
DoFittingAsync 把持ワークの指定オブジェクトへの嵌合位置探り動作開始	1. targetObjName:string 対象 3D オブジェクト名 2. fittingProfile:EndEffectProfile 嵌合位置探り動作に対するプロファイルオブジェクト
DoInsertionAsync 把持ワークの食い挿入作業開始	3. targetObjName:string 対象 3D オブジェクト名 4. insertProfile:EndEffectProfile 挿入動作に対するプロファイルオブジェクト
WaitOperationResult 直前に開始された作業完了を待って結果を得る	— なし

同様に図7の“04_PalletTransfer”および“06_Screwing Robot”に示した「パレット搬送ユニット」と「ねじ締結ロボット」にも機能構成相当する仮想上のメソッドのシミュレーションスクリプトを準備した。こうすることで、Sysmac Studio 上に読み込ませた製品 BOP 情報に含まれる仕掛かりワークや組みつけ部品の 3D ワークオブジェクト名を引数として渡しつつ、「(B) 製品品目ごとに異なる作業工程部」として各機構ユニットの提供機能の呼び出しシーケンスを定義できる。こうして製品 BOP が求める組立工程を実現する 3D 設備シミュレーションが動く状態を作った。

4.5 製品品目ごとの組立作業工程の記述

前述の BOP 情報を元に、Sysmac Studio の 3D シミュレーション機能を用いて組立工程シミュレーションを実行するための Shape Script を生成する方法を説明する。

利用した市販の PLM 情報基盤システムは、選択した任意の情報を XML ファイル形式⁸⁾でエクスポートすることができる。そして、その XML スキーマ仕様は無償公開されている。この点に技術課題は見当たらないため、本稿の取組では事前に整備した BOP 情報をエクスポートして SysmacStudio へ取り込むことができたことと仮定し、実際にインポートする機能の試作は省略した。

PLM 情報基盤から取り込んだ製品の BOP には、仕掛かりワークに対してどんな形状の部品をどのように組み付けるべきかといった、製品視点での組立作業に対する要求が記載されている。だが、その要求の設備の機能による実現手順までは詳細に記載されていない。本稿では、製品の BOP 情報を作業要求として取り込み、それを満足するよう機構ユニットが提供する各種機能／作業を呼び出だす“組立作業シーケンス定義”をユーザに行わせること想定する。そのための“作業シーケンスエディタ”の試作を

行った。作業シーケンスエディタ上では、仕掛けワークのロード作業やワークに組み付けるパーツの受供給、完成ワークのアンロード作業、並列作業間での完了待ち、各作業での異常検出時の状態遷移指定などを行う。一般的なロボット組立セルでの利用を想定し、それに必要なロジック制御要素を検討した結果、以下 6 種を識別した。

A) 同期呼び出し処理

通常の順序性のある作業の逐次処理に利用する。

B) 非同期呼び出しと完了待ち

並列処理、並列作業間でのインタロック記述に利用する。ロボットなどの動作主体が複数個、同一セルにレイアウトされているおり、同期せずに動作する場合に必要となる。

C) 条件分岐と繰り返し処理

同一のねじ締めを複数個所に行う場合や、自動回復して継続できるような軽度な異常処理の記述に利用する。

D) シーケンス処理のサブルーチン化と呼び出し

処理の構造化、特に機構ユニットが提供する各種機能の構成と呼び出しに必要である。

E) 例外の発生とキャッチ

必須ではないが、利用できるとエラー処理に有用である。

F) シーケンスの中断と再開

重度のエラー発生で中断し、オペレータが手動操作で復旧後、中断した作業から再開を指示した場合などに利用する。

次に、作業シーケンスエディタの操作画面（Graphical User Interface : GUI）の仕様案を検討した。本稿では、図8に示すタイミングチャートライクな GUI 案にて試作を行った。

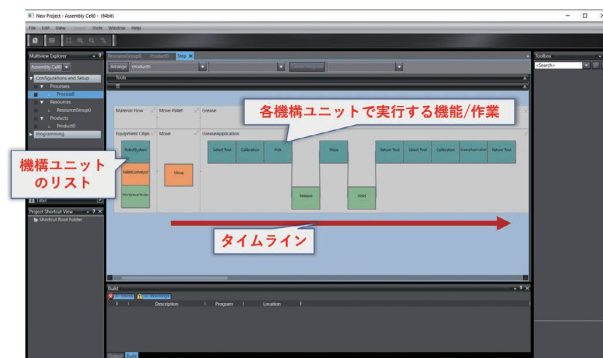


図 8 試作した作業シーケンスエディタ外観

4.6 エンドエフェクト・プロファイルの定義

前述の作業シーケンスエディタによって個々の組付け作業の作業種、例えばねじピックアップ、ねじ締結、嵌合、ならい挿入など、と対象ワークおよび対象部品の 3D オブジェクト型、さらに作業順序を指定することができる。しかし実際にロボットを動作させるにはまだ情報が不足である。例えばワークのピックアップ作業の場合には、ロボット手首に装着されたグリッパを対象ワーク／部品に対してどの方向からどの経路で接近させ、どの位置と方向に来たらグリッパを閉じ、把握後にどちらの方向に持ち上げるか、という詳細な対象物との位置関係とグリッパへの動作コマンド発行を指定する必要がある。

本稿では、ロボット手首に装着されたグリッパや電動ドライバなどのエンドエフェクタを用いて、対象オブジェクトに対して行う末端作業の詳細仕様について、作業対象となる 3D オブジェクトの Shape Script 上での型名とインスタンス名を用いて指定した「エンドエフェクト・プロファイル」と呼ぶ情報を、識別名を与えて保存できる図 9 に示すようなエディタを試作した。

エンドエフェクト・プロファイルの情報構成は以下の通りである。

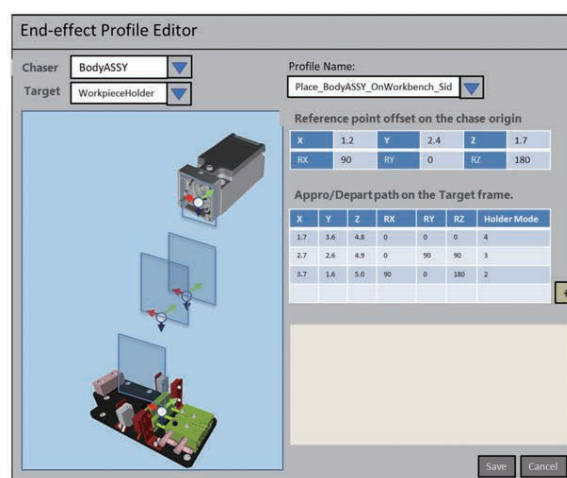
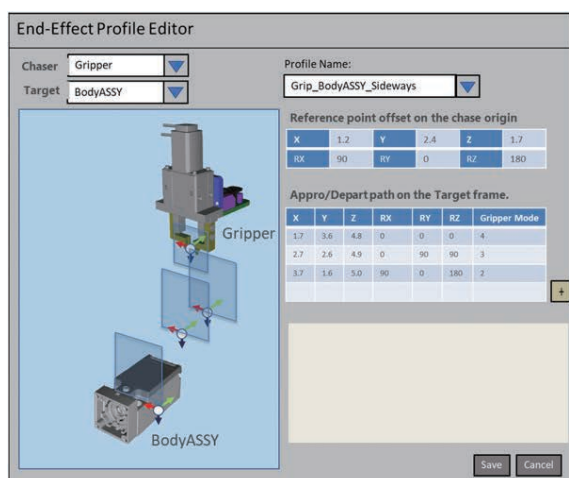


図 9 試作したエンドエフェクト・プロファイルエディタの設定画面

- 1) プロファイル識別子。プロジェクト内で当該エンドエフェクト・プロファイルを一意に識別する ID。
- 2) プロファイル表示名。例えば以下のような、ユーザが内容を認識できる名前。
 - “Gripper_A” による “BodyASSY” の横向き把持
 - “BodyASSY” のパレットへの横置き
 - “HeadASSY” の “BodyASSY” への重ね合わせ
- 3) スレーブ 3D オブジェクトの型名。例えば “Gripper_A” のような、動かす側の 3D オブジェクトの型名。
- 4) マスタ 3D オブジェクトの型名。例えば “BodyASSY” のような、ターゲットとされる側の 3D オブジェクトの型名。
- 5) マスタ 3D オブジェクトのローカル座標系を基準座標系とした、スレーブ 3D オブジェクトの [相対位置、相対姿勢、相対移動速度] の順序付リスト。
- 6) 上記リストの要素 (相対位置・姿勢) 毎に行うべき周辺機器への指令値。例えばグリッパへの把持・リリース動作コマンド出力、グリッパからの把持完了入力待ち、など。

このエンドエフェクト・プロファイルを引数として、各機構ユニットが提供する機能/作業メソッドを実行できるようにする。これにより、たとえばワーク上の複数個所にある同様のねじ締結作業や、同じ 3D 形状のワークを異な

る位置に移載する際の把持やリリースについて、ロボットとエンドエフェクタの同様の詳細動作を繰り返し定義することを不要にした。

4.7 シミュレーション実行と工程制御プログラム生成

PLM 情報基盤で管理された製造品目ごとの BOP 情報を元に、図 5 の「(B) 製品品目ごとに異なる作業工程部」に相当する工程制御プログラムを生成する全体像を図 10 に示す。

前節までで、図中の①～⑤のうち、①作業シーケンスエディタが PLM 情報基盤から BOP 情報をインポートし、②設備開発者が作業シーケンスエディタを用いて BOP に記載された作業工程の詳細定義することを説明した。本節では③作業シーケンスエディタがシミュレーション用 Shape Script を生成し、④設備開発者がそれを用いて 3D シミュレーションで動作検証を行うと、⑤シミュレーションスクリプトが工程制御 eV+ プログラムを生成する、ことを説明する。

図 10 の③では、試作した作業シーケンスエディタとエンドエフェクト・プロファイルエディタで定義した情報から Shape Script を生成する。ここではまず、エディタで定義された作業シーケンスのロジックを、シミュレーション実行時に再現できるように、Shape Script でロジックの枠組みを生成する。それと同時に、そのロジック実行により

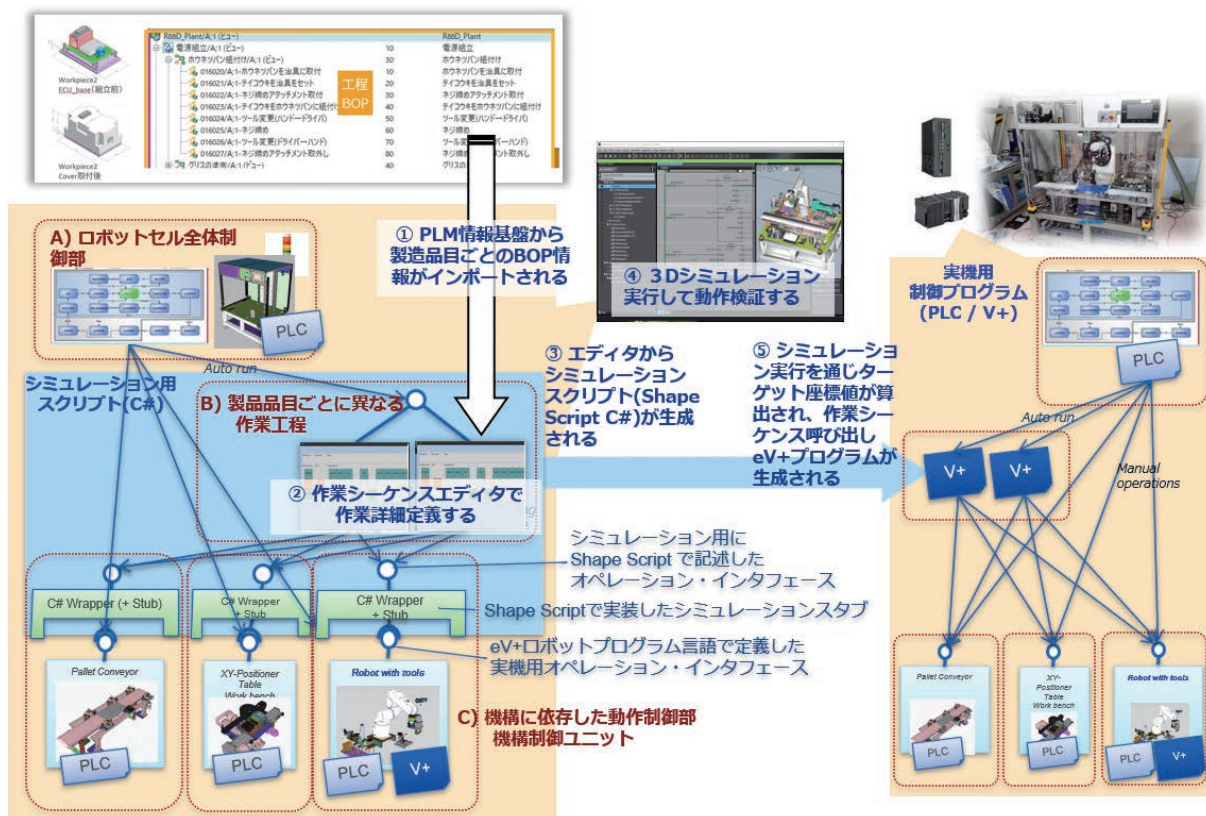


図 10 シミュレーション実行と工程制御プログラムの生成方法概要

展開される作業順序と待ち条件を再現するよう、各機構ユニットの作業メソッド呼び出す eV+プログラム・テキスト生成を行う C# 生成コードを、Shape Script のロジック枠組み内に埋め込むように試作した。ここで各機構ユニットが提供する作業メソッドは実機制御用に eV+ で実装されており、作業目標の指定は eV+ のロケーション変数（当該ロボット座標系での 6 自由度座標値）で行う必要がある。そこで、作業シーケンスエディタで指定された作業対象 3D オブジェクトの現在位置情報を、シミュレーションエンジンに問い合わせ取得し、エンドエフェクト・プロファイルエディタで事前定義された作業対象 3D オブジェクト型とロボット手先位置との相対位置情報を、当該ロボット座標系での絶対座標値に変換する。それを機構ユニットの作業メソッドに与えるような eV+ プログラムを生成するよう、Shape Script を生成した。

そうすることで、図 10 の④において製品品目に対する作業工程の 3D シミュレーション検証を行うと、Shape Script 実行により 3D オブジェクトのその時の位置情報を元に eV+ プログラムコードが動的に生成され、ロボットシミュレーションエンジンに与えられて、ロボットを含む設備動作シミュレーション挙動が再現されるようにした。そしてその Shape Script の最後の処理で図 10 の⑤のように、3D シミュレーション実行に用いた eV+ プログラムコード群を、作業シーケンスを表す eV+ プログラムモジュールにまとめ、Sysmac Studio プロジェクト上に追加するようにした。

このようにして、作業シーケンスエディタとエンドエフェクト・プロファイルエディタで定義した内容から、一連の組立作業工程を再現する 3D シミュレーションを実行し、その実行を通じて各作業目標座標値ベースで機構ユニットに作業工程指示を行う eV+ ロボットプログラムモジュールを生成できることを確認した。

5. 工数削減効果の試算結果

本稿で試作した機能の効果を試算するにあたり、前章で示した 2 品目の製品組立を行うロボットセルに対して、3 つ目の新しい派生品目への対応を行うための改造を行うシナリオを想定した。このシナリオでは、新規派生品目の製品では既存品目とは異なるサイズのネジが使用されている。このため、既存製品目用のネジフィーダの位置を横にずらして空けたスペースに、派生品目用のネジフィーダをもう一台追加配置するような、セル内機器レイアウト変更を行うことを想定した。

ロボットセル内部の機器レイアウトの変更は、新品目の製造のみならず、既存品目の製造にも影響を与える。そのため設備改造のシステム構想では、機器レイアウト案毎に既存／新規を含めたすべての製造品目の組立工程に対して、製造作業性とタクトタイムを検証する必要がある。従来の 3D シミュレーション手法では、大量のオフライン・ティーチング作業とプログラム修正を、適切な機器レイアウト案が得られるまで何度も繰り返すが必要になる。本稿で試作した工程制御プログラムの生成機能を用いた場合、品目ごとの組立工程の 3D シミュレーション検証を、スクリプトの修正やオフライン・ティーチング作業を一切やり直すことなく実行できる。これにより設備改造案の立案を行うシステム構想を迅速に行うことができる。また実機を動作させるための工程制御プログラムが生成されることでソフトウェア制作工数も削減できる。

ロボット統合コントローラ開発の工数削減効果試算のために制作された、類似のロボットセルでの開発作業工数データを用いて、上記シナリオで本稿での試作機能を用いた工数削減効果の机上試算を行った結果を図 11 に示す。図 11 の (A) は設備シミュレーション環境を用いないケースに対し、図 11 の (B) は設備シミュレーションを用いるケースである。(A) に対して (B) では、システム構想でのシミュレーション検証により問題を先出しすることで、

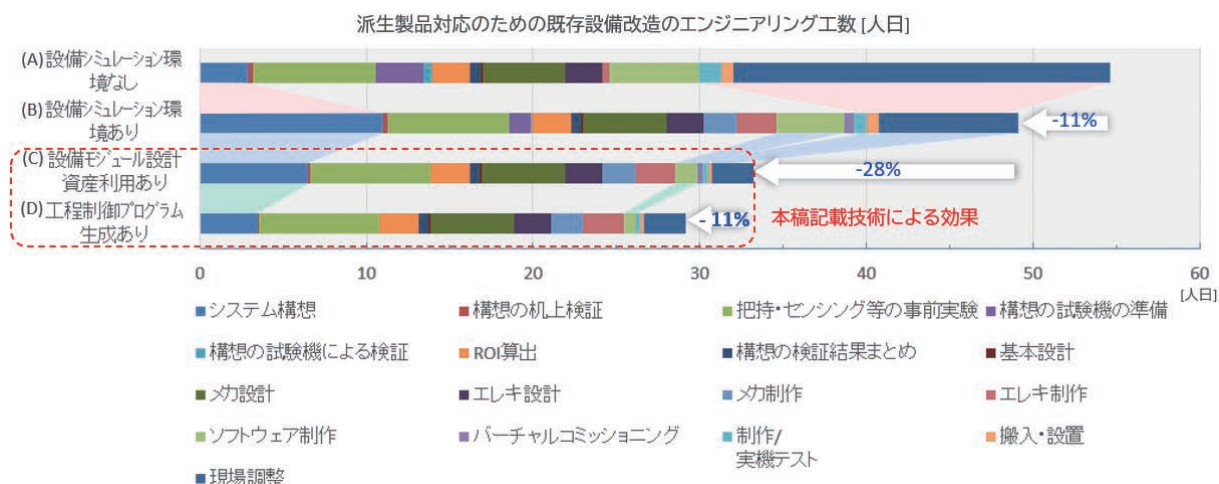


図 11 工数削減効果の机上試算結果

制作／実機テストと現場調整の大幅な削減が期待できる。しかしシミュレーション準備のための工数が増えるため、全体では 11% (4.5 人日) 程度の工数削減に留まることが示唆された。図 11 の (B) に対して (C) は、設備シミュレーション環境の利用に加え、図 7 に例示したような機構ユニットの設計資産を組み合わせてモジュールベースで設備設計したと仮定したケースである。設備の新規設計時に設備モジュール設計を行い、予め整備された機構ユニットのシミュレーションモデルと、実績ある制御プログラムを再利用できることを想定している。それによりシステム構想とソフトウェア制作の工数が削減できるとともに、機構ユニット単位で機能実現上の技術課題がクリアされていることで、実機テストと現場調整段階での問題発現が減少し、全体で 28% (16.5 人日) の工数削減を見込める。そしてさらに、本稿記載の技術を適用した図 11 の (D) では、派生品目の BOP 情報に基づいたシミュレーションスクリプトとロボット制御プログラムの生成により、システム構想とソフトウェア制作工数をさらに全体の 11% (4.5 人日) 削減できる見込みという結果を得た。

6. むすび

本稿では自動化設備における柔軟な派生品目対応を実現すべく、PLM 情報基盤上に整備した製品バリエーションを表す BOM/BOP 情報を元に、ロボット組立作業セル上での品目ごとの組立作業シーケンスをユーザに定義させる支援機能を試作した。その組立作業を 3D シミュレーションで実行するスクリプトを生成し、その実行を通じてワーク 3D モデルの形状と位置情報から作業目標座標値を算出して、実機用ロボット制御プログラムを生成する、という一連の方法を考案し、機能試作によって実現性を検証した。またこの機能の利用によりオフライン・ティーチング作業を不要とし、設備改造に伴う機器レイアウト変更の事前シミュレーション検証と実機制御用プログラムの改造作業を自動化することで、新派生品目に対する設備改造工数を 11% 削減できるとの試算結果を得た。

本手法を適用するには、ロボットセル自体が図 5 や図 8 に示したように複数品目の製造作業に必要な機能／作業メソッドを備えた機構ユニット群で構成されている必要がある。そのような設計を行った機構ユニットを、ある製造作業を実現するための“工法”としてデジタル設計資産化し、設備のモジュールベース設計に利用するには相応の設計知見を要する。しかしそれが実現できれば図 11 の (B) に示したように、より多くの作業工数削減が期待できる。次にはそのような“工法”のデジタル資産化とそれを利用したモジュールベースでの設備設計による工数削減の実現について、費用対効果の期待できる適用設備ドメインの特定と必要な技術獲得を進めていく。

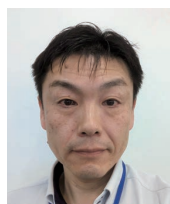
謝辞

本稿は、2021 年から 2023 年にかけて実施した技術開発の成果の一部をまとめたものである。執筆者の他に、本技術開発に尽力いただいた森健一郎氏、杉原哲郎氏、Ramon Latorre 氏、Ian Mcardle 氏、Mark Tammadge 氏、Stephen Blake 氏に深く感謝申し上げる。また、本稿において検証ターゲットとしたロボットセルの設計情報をご提供いただいた内山雄樹氏にも深く感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 柏木守孝, “PLM と成長戦略 (第 4 回) 開発期間の短縮—開発プロセスの再設計とコンカレント・エンジニアリング,” 機械設計, vol. 51, pp. 100-103, 2007.
- 2) PTC ジャパン. “PLM ソリューション「Windchill」が実現する製造業の DX-製品の品質向上やコスト削減、業務効率化の先にある未来とは.” TECH+. <https://news.mynavi.jp/techplus/kikaku/20230929-2779239/> (Accessed: Oct. 1, 2023).
- 3) 岩室宏, セル生産システム, 日刊工業新聞社, 2002.
- 4) 安藤慎悟 他, “組立作業のためのインピーダンス制御粘性パラメータの自動調整,” 日本ロボット学会誌, vol. 29, no. 7, pp. 564-572, 2011.
- 5) オムロン株式会社. “ロボット統合システム.” 商品ラインナップ. <https://www.fa.omron.co.jp/product/robotics/lineup/integratedcontroller/> (Accessed: Feb. 20, 2024).
- 6) SIEMENS. “Teamcenter PLM ソフトウェア.” Teamcenter. <https://plm.sw.siemens.com/ja-JP/teamcenter/> (Accessed: Feb. 20, 2024).
- 7) ERP Information. “Manufacturing and material data management.” Siemens Teamcenter (Modules, Benefits, and Limits). <https://www.erp-information.com/siemens-teamcenter> (Accessed: Feb. 20, 2024).
- 8) SIEMENS. “PLM XML.” PLM Components. <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ja/products/plm-components/plm-xml.html> (Accessed: Feb. 20, 2024).

執筆者紹介



吉田 寛 YOSHIDA Hiroshi
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。

安定性解析とシミュレーションを活用したサーボドライバパラメータ調整技術の開発

原田 浩行, 恵木 守, 藤岡 巧, 海田 僧太

近年の消費者ニーズの多様化に対応するために、変種変量生産を大量生産に劣らない低コストで実現する取り組みが盛んに行われている。その実現には、個々の装置でのタクトアップと装置立ち上げ時間の短縮が必要となる。特に、装置の重要パーツであるサーボドライバには、装置の最大性能を短時間で実現することが望まれる。しかし、現在主力となっている時間応答波形に基づくサーボパラメータ調整手法は、制御系の安定性を定量的に評価していない。このため、装置で実現可能な位置決め時間や追従誤差といった実現性能を十分に引き出せなかったり、装置の個体差やワーク変更といった僅かな動作環境の変化で、制御系が不安定になったりするという問題がある。

この問題に対して、装置を含む制御系の周波数解析を実施し、安定性を定量的に評価することで、調整の専門家ではなくても装置の最大性能を短時間に引き出せるサーボパラメータのオートチューニング手法を開発した。安定性解析には、実機だけでなくシミュレーションを活用し、装置の加振回数を削減することで、調整時間の削減と装置ダメージの抑制を図った。シミュレーションを活用することで、ノッチフィルタなどのサーボパラメータの組み合わせについて、一回の加振動作で約 400 通りの評価が可能になり、調整の専門家であっても調整時間の制約から到達が難しい実現性能を数分で達成可能にした。

本手法により、現場作業者には難解な調整完了条件設定が不要になるとともに、これまで数日かかっていた調整時間を数分に短縮した。その結果、顧客は装置本来のコンピタンス構築に集中することが可能になった。

Development of Tuning Technology for Servo Driver Parameter Based on Stability Analysis and Simulation

HARADA Hiroyuki, EGI Mamoru, FUJIOKA Takumi and KAIDA Sota

In order to meet the diversifying needs of today's consumers, there is a growing effort to realize variable-type, variable-volume production at a cost no less than that of mass production. To this end, it is necessary to shorten tact time and start-up time for individual manufacturing equipment. In particular, the servo drivers, which are important parts of manufacturing equipment, are expected to achieve maximum manufacturing equipment performance in a short period of time. However, most servo parameters tuning method based on time response do not quantitatively evaluate the stability of the control system. Therefore, there is a problem that the achievable performance of the manufacturing equipment, such as achievable positioning time and tracking error, cannot be fully realized, or that the control system becomes unstable due to slight changes in the operating environment such as individual differences in manufacturing equipment or workpiece changes.

To address this problem, we have developed an auto-tuning method for servo parameters that can bring out the maximum performance of manufacturing equipment in a short time without the need for a tuning expert by conducting a frequency analysis of the control system including manufacturing equipment and quantitatively evaluating the stability based on stability margins. For stability analysis, we utilized simulation as well as actual manufacturing equipment to reduce the number of vibration tests, thereby minimizing tuning time and manufacturing equipment damage. By utilizing simulation, about 400 combinations of servo parameters, such as notch filters,

Contact : HARADA Hiroyuki hiroyuki.harada.2@omron.com

can be evaluated in a single vibration test, making it possible to realize achievable performance in a few minutes, which is difficult to reach even for tuning experts due to the limited tuning time.

This method eliminates the need for on-site operators to set difficult tuning completion conditions and reduces tuning time from several days to a few minutes. As a result, customers can concentrate on building the original competence of their manufacturing equipment.

1. まえがき

近年の消費者ニーズの多様化に対応するために、Just In Time 生産方式に代表されるように、変種変量生産を大量生産に劣らない低コストで実現する取り組みが盛んに行われている。その実現には、個々の装置でのタクトアップと立ち上げ時間の短縮が必要となる。特に、装置の重要パーツであるサーボドライバには装置の最大性能を短時間で実現することが望まれる。これに応えるべくサーボドライバの搭載機能は多様化しているが、少子高齢化による労働人口の減少も相まって、サーボドライバの搭載機能を使いこなせる人材の確保・育成が難しい。これに対し、現在主力となっているサーボパラメータ調整手法は、装置を試運転したときの時間応答波形に基づくものであり、制御系の安定性を定量的に評価するものではない。そのため、装置で実現可能な位置決め時間や追従誤差といった実現性能を十分に引き出せなかったり、装置の個体差やワーク変更といった僅かな動作環境の変化で、制御系が不安定になったりするという問題がある¹⁻⁴⁾。

そこで、装置を含む制御系の安定性を定量的に評価することで、調整の専門家でなくても装置の最大性能を引き出せるオートチューニング手法を開発したので紹介する。

2. 従来手法の課題

2.1 サーボドライバの役割と従来のパラメータオートチューニング手法

サーボドライバは、サーボモータの位置・速度をユーザからの指令値に追従させる制御機器であり、当社からは 1S サーボドライバシリーズ（図 1）などが提供されている。サーボモータを使用するためには、サーボモータに電流を供給するサーボドライバに対してサーボパラメータの調整を行い、各種制御パラメータを装置に最適化する必要がある。特に、目標値と実測値の誤差補正感度であるフィードバックゲインや共振を除去するノッチフィルタ調整の良否が装置の実現性能や安定性に大きく影響する。



図 1 1S サーボドライバシリーズ

サーボパラメータの調整では、フィードバックゲインを大きくすると指令に追従できる周波数範囲（制御帯域）を拡げられるが、これを上げ過ぎるとゲイン余裕・位相余裕が不足し制御系が不安定化してしまう。従来の調整手法では、装置の時間応答波形を監視し、装置が振動を発生しない範囲でフィードバックゲインを最大化して指令追従性の向上を図っている。具体的には、装置にサーボパラメータ調整用の動作を行わせ、動作指令完了後から実際に装置が位置決め完了するまでの時間が目標以内になるまでフィードバックゲインを徐々に上昇させる。

2.2 従来手法の課題

2.2.1 制御構造の不適合

従来手法では、例えばフィードバックゲインが適切に調整できていたとしても、サーボドライバの制御構造が顧客アプリケーションの目的に適合していない場合には十分な実現性能を得る事は難しい。

顧客アプリケーションの制御目的は、大きく 2 つに分類される。1 つ目は、搬送アプリケーションの様に、目標位置までオーバーシュート無く最短時間で移動させる位置決め時間重視のアプリケーションである。そして 2 つ目は、レーザーカットアプリケーションの様に、目標軌道に偏差なく追従させることが重要な軌道追従性重視のアプリケーションである。

1 つ目の位置決め時間を短縮するには、フィードバック制御系の制御帯域を拡大するとともに、目標軌道の加減速

を抑制することも重要である。ユーザによって与えられた目標軌道の加減速が大きい場合には、装置の加減速に必要なトルクも比例して大きくなり、必要トルクがサーボドライバの出力可能範囲を超えた場合には制御不可能な状態に陥ってしまう。従って、位置決め時間を短縮するためには、フィードバック系に与える目標軌道がトルク飽和を起こしにくい制御構造を選択する必要がある。

2つ目の軌道追従性を高めるには、誤差が発生する前にフィードフォワード制御で補正することが重要である。従って、軌道追従性重視のアプリケーションでは、フィードフォワードトルクで装置をほぼ目標軌道通りに動かすことが可能な制御構造を選択する必要がある。

当社の 1S サーボドライバシリーズでは、これらの要求に応えるために複数の制御構造を搭載している。しかし、サーボドライバに搭載されている機能は多岐に渡っており、ユーザがこれらの機能を把握するには本来の業務とは関係の無い作業に多くの時間を割く必要があり、現実的には難しい。従って、サーボパラメータ調整はデフォルトの制御構造のままで実施されるケースが殆どであり、制御構造がアプリケーションの目的に適合していない場合には十分な実現性能を得られないという問題があった。

2.2.2 実現性能不足または安定性不足

従来の時間応答波形に基づくサーボパラメータ調整手法は、装置の安定性を定量的に指定及び評価することができないので、以下の何れかの問題が発生しやすい。

- ・調整完了条件である目標整定時間が大きすぎると、フィードバックゲインを十分に上昇させることができず、装置で実現可能な性能を出し切れない。
- ・調整完了条件である目標整定時間が小さすぎると、フィードバック制御系が不安定化直前のフィードバックゲインを選択される可能性がある。この場合、装置の個体差やワーク重量変化といった僅かな動作環境変動で実運転時に制御系が不安定化する。

2.2.3 動作範囲逸脱による装置破損

時間応答波形に基づくサーボパラメータ調整は、十分な加減速を伴う動作を行わせた上で動作波形を評価する必要がある。原理的に装置の移動量を大きくとる必要があるので、もしサーボパラメータの調整開始位置が装置の動作範囲限界近傍であった場合に、動作範囲限界を超えて装置を破損してしまうリスクがある。このことは、サーボパラメータ調整を行うオペレータの心理的負担になっている。

3. 本開発の内容

サーボパラメータ調整の専門家ではなくても、装置の限界性能を短時間で引き出せる調整手法として、Advanced

Auto-Tuning を提案する。専門家以外では設定が難しい調整完了条件パラメータの設定を一切なくし、装置の制御目的を選択するだけの調整手法とした。本章の構成は以下の通りである。

3.1 では、制御目的を指定するユーザインタフェースと選択される制御構造の特徴について説明する。

3.2 では、装置の最大性能を引き出すための、安定性に基づくサーボパラメータの調整原理について説明する。

3.3 では、サーボパラメータ調整時の装置動作範囲を数 mm 以内に抑制し装置破損リスクを低減する方法について述べる。

3.1 制御目的指定による制御構造の選択

3.1.1 調整ユーザインタフェース

本開発では、アプリケーションの制御目的に適合した制御構造が必ずしも選択されていないという問題の解決を目指した。そのため、制御目的を選択指定するだけで自動的に最適な制御構造が採用される方式とし、専門的な知見や装置の再起動などの煩雑なオペレーションを不要にした。

図 2 に Advanced Auto-Tuning のユーザインタフェース画面を示す。画面の上段ではアプリケーションの制御目的を選択し、下段では調整強度を 3 段階の中から選択する。上段の制御目的で位置決め時間重視を選択した場合にはモデル追従制御構造が選択され、軌道追従性重視を選択した場合には 100% フィードフォワード制御構造が選択される。下段の調整強度で、「High」を選択した場合には実現性能が優先され、「Low」を選択した場合には動作環境の変動に対する安定性が優先される。

選択される制御構造の特徴については、3.1.2 以降に示す。調整強度の働きについては、3.2 で述べる。

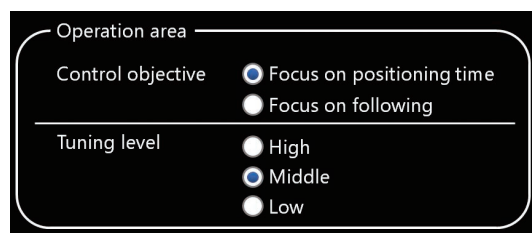


図 2 Advanced Auto-Tuning のユーザインタフェース画面

3.1.2 位置決め時間重視の制御構造

制御目的が位置決め時間の場合、サーボドライバはモデル追従制御構造を採用する。図 3 は、そのブロック線図である。モデル追従制御は、装置モデルを用いて制御シミュレーションを行うモデル制御ループ（同図上部）と実際に装置を制御するフィードバック制御ループ（同図下部）からなる。そして、モデル制御ループで得られた装置モデルの位置をフィードバック制御ループの指令値（内部指令

値)として与える。

仮に、ユーザからの指令値が急激に変化してもモデル制御ループで実現できた装置位置をフィードバック系の内部指令値として与えるので、装置は内部指令値に対しては遅れなく追従できる。つまり、モデル制御ループが、目標軌道に含まれる周波数成分から制御対象が追従できない周波数成分を取り除くローパスフィルタとして作用している。このことは、ユーザ指定の指令値に対して乖離があるものの、整定時にオーバーシュートが発生しない目標軌道を内部的に生成していることに相当する。これにより、目標軌道をそのままフィードバック制御ループに与えてオーバーシュートが発生する場合より、整定時間を短くしている。

また、目標軌道は台形速度で指定される場合が多いが、モデル追従制御構造は最大速度を高く設定し易い。これは、位置軌道の2回微分である加速度は必要トルクに比例するが、モデル制御ループのローパスフィルタとしての作用が加減速に必要なピークトルクを抑制するからである。

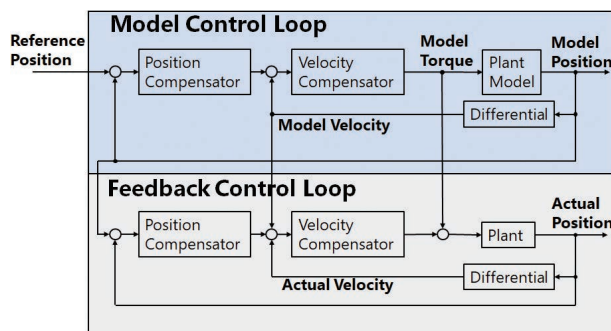


図3 モデル追従制御構造のブロック線図

3.1.3 軌道追従性重視の制御構造

制御目的が軌道追従性重視の場合、サーボドライバは100%フィードフォワード制御構造を採用する。図4は、そのブロック線図である。同図上部がフィードフォワード部で、下部がフィードバック制御ループである。制御対象を単慣性で近似できる場合は、フィードフォワード部で目標軌道から計算した必要トルクを制御対象に与えるだけで、実際の装置もほぼ目標軌道に近い動作を実現できる。モデルと実機の相違から発生する僅かな誤差は、フィードバック制御ループで補償する。目標軌道に装置が追従できない高周波成分が含まれない場合には、フィードフォワード制御の効果で高い軌道追従性能を実現できる。

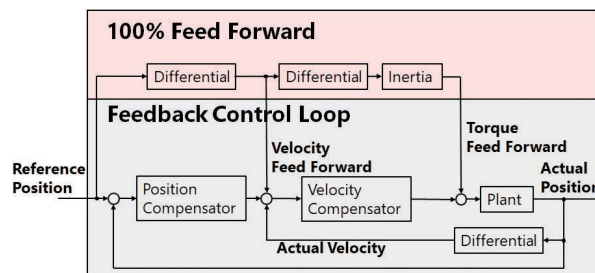


図4 100%フィードフォワード制御構造のブロック線図

3.2 安定性に基づくサーボパラメータ調整

装置の最大性能を引き出すためには、装置で実現可能な性能限界を定量的に把握した上で調整を行う必要がある。Advanced Auto-Tuningは、周波数解析機能（FFT解析）を用いてフィードバックゲインを変数とする制御系の安定性マップを作成する。この安定性マップを用いてアプリの制御目的に沿ったサーボパラメータ調整を行う。その具体的な方法は、3.2.1に示す。

安定性解析に必要な実機データ取得回数は、時間削減及び装置ダメージの観点から最小限に抑えたい。そこで、ある1条件でのデータ取得後は、シミュレーションを用いることで実機データ取得回数の削減を図る。シミュレーションを用いた安定性マップの作成方法について3.2.2に示す。

また、制御帯域を拡大するためには、フィードバックゲインの他に、機械共振を抑制するノッチフィルタの数や減衰特性の最適化も重要である。実際、ノッチフィルタの最適化により、制御帯域を数倍広げられるケースも存在する。フィードバックゲインとノッチフィルタ形状の最適化で安定性を向上させ、制御帯域を拡大する手順について3.2.3に示す。

以上に加え、安定性マップを使用したサーボパラメータの自動調整フロー全体を3.2.4に示す。

3.2.1 安定性マップによるフィードバックゲインの調整原理

図5に速度制御ループの安定性マップを示す。これは、横軸を速度比例ゲイン、縦軸を速度積分ゲインとした時の安定性をコンター図として表現したものである。安定性は、マップ領域を微小区間に分割し、その区間の代表ゲインを用いて装置を加振試験した時のFFT解析結果より決定する。図6にFFT解析により求めた速度閉ループの周波数伝達関数をボード線図として示す。望ましい速度閉ループのゲイン特性は、出来るだけ高周波数まで0 dBであることである。ゲインが0 dBとは指令速度に対して装置の実速度も同じ大きさであることを示す。ゲインが0 dBより大きければ、指令速度に対して装置の実速度の方が大きく、制御系が不安定化し始めていることを示唆している。このボード線図のゲインピーク値を安定性と定義し、0 dB以下を青色の安定領域、5 dB以上を赤色の不安定領域と

して定義した。

次に、安定性マップを用いた実現性能と安定性のトレードオフの図り方について述べる。高周波指令への追従性能は、速度比例ゲインに比例する。従って、ユーザによる調整強度が「High」の場合、安定性マップの安定領域内においてできるだけ大きな速度比例ゲインを選択する。速度積分ゲインに関しては、速度比例ゲインと同様に安定領域内においてできるだけ大きなゲインを選択することが考えられる。しかし、装置の摩耗原因となるオーバーシュート抑制の観点から、係数図法⁵⁾に基づき速度比例ゲインの 1/4 とした。

ユーザによる調整強度が「Middle」および「Low」の場合は、環境変動に対する安定性をより重視し、安定性指標が 0 dB 未満となるフィードバックゲインの組み合わせの中から選択する。このことは、安定性マップの安定領域のより内側のゲインセットを選択することに相当する。

位置制御ループゲインの決定については、速度ループのフィードバックゲイン決定後、位置比例ゲインをパラメータとした安定性マップを作成し、速度ループと同様に調整強度に従った安定性を確保できるゲインを選択する。

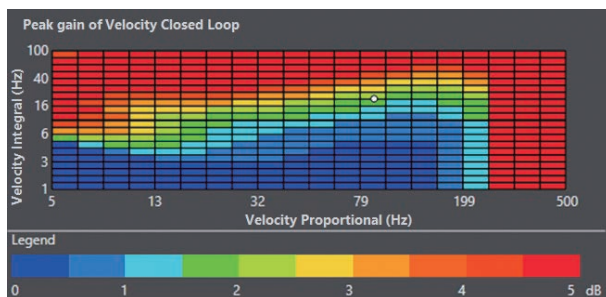


図 5 速度制御ループの安定性マップ

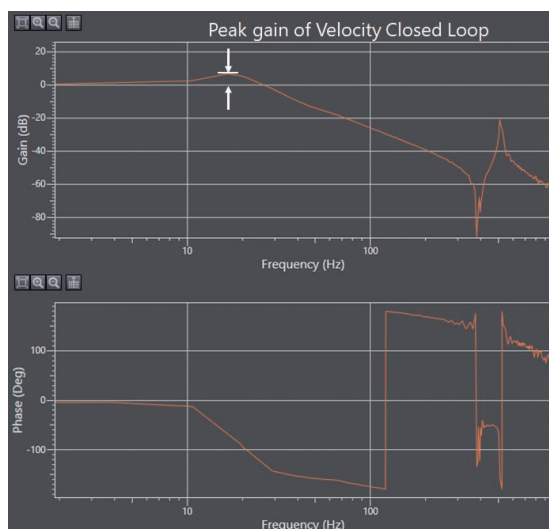


図 6 速度閉ループのボード線図

3.2.2 シミュレーションを活用した安定性マップの作成

安定性マップを作成するには、マップ領域の微小区間数だけ FFT 解析を行い、更に得られたボード線図からピークゲインを求める必要がある。これら全てに対して実機を用いて実施すると、データ収集時間及び FFT 解析時間が膨大になる。また、加振回数の多さから装置へのダメージも危惧される。そこで、安定性マップの作成にシミュレーションを活用することで、安定性マップの作成時間削減と装置へのダメージ抑制を図る。

図 7 に、速度制御ループのブロック線図を示す。安定性の評価は、速度閉ループのゲインピークで行う。これについては、図 7 から明らかな様に一度装置の周波数伝達関数が判れば、その他の制御補償要素は既知であるので、実機を用いた加振試験を行う事無く速度閉ループ周波数伝達関数の計算が行える。

尚、装置の周波数伝達関数はトルク指令を入力とした開ループの加振試験で求めることが一般的だが、本提案手法では制御系が閉ループの状態に加振試験を実施している。これは、開ループ状態で加振試験を実施すると装置の移動距離が特定できず装置破壊につながるおそれがあるからである。また、フィードバック制御が実施されていないと装置が落下する垂直軸に対応するためでもある。

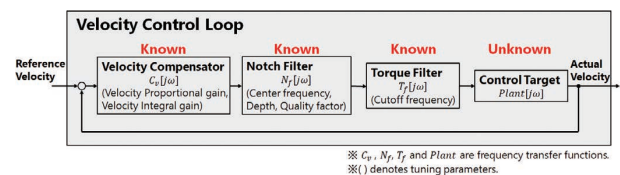


図 7 速度制御ループブロック線図

図 8 にシミュレーションを活用した安定性マップの作成フローを示す。

まず、既知のサーボパラメータを用いて図 9 に示す加振パターンで装置の加振実験を実施する。得られた入出力波形から FFT 解析を実施し、図 6 に示す速度閉ループのボード線図を得る。図 6 の上段がゲイン線図、下段が位相線図になっている。次に、得られたゲインと位相を複素数表現することで周波数伝達関数 ($G_{sc}[j\omega]$) を得る。この $G_{sc}[j\omega]$ を用いて(1)式から速度開ループ周波数伝達関数 $G_{so}[j\omega]$ を導出する。

$$G_{so}[j\omega] = \frac{G_{sc}[j\omega]}{1 - G_{sc}[j\omega]} \quad (1)$$

$G_{so}[j\omega]$ が判れば、制御の補償要素は全て既知であるので、(2)式から装置だけの周波数伝達関数 $Plant[j\omega]$ を導出できる。尚、速度補償器、ノッチフィルタ、トルクフィルタの周波数伝達関数をそれぞれ $C_v[j\omega]$ 、 $N_f[j\omega]$ 、 $T_f[j\omega]$ とした。

$$Plant[j\omega] = \frac{G_{so}[j\omega]}{C_v[j\omega] * Nf[j\omega] * Tf[j\omega]} \quad (2)$$

一度 $Plant[j\omega]$ が求めれば、あとは安定性マップの全微小区間について上記の計算を逆に辿りフィードバックゲインを変更した速度閉ループ周波数伝達関数 $G'_{sc}[j\omega]$ を計算する。そのゲイン線図からゲインピークを探索することで安定性マップを作成することができる。

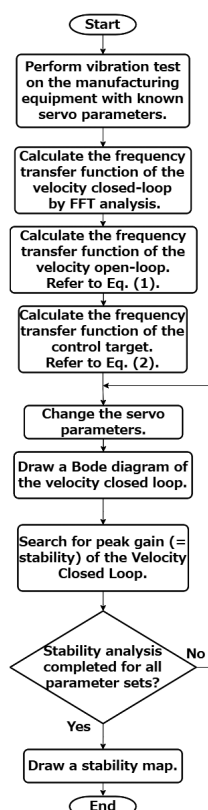


図8 シミュレーションを活用した安定性マップ作成フロー

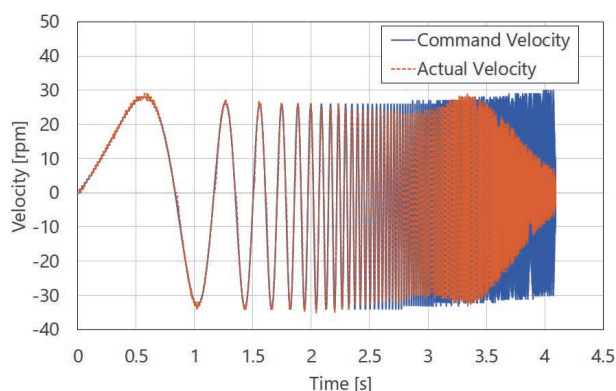


図9 速度制御ループ加振波形

3.2.3 安定領域の最大化

3.2.2 ではフィードバックゲインを変更した場合の安定性マップの導出方法を述べたが、速度ループの補償器にはその他にノッチフィルタやトルクフィルタも存在する。これらのフィルタパラメータの調整の良否は、安定領域すなわち速度制御帯域の大きさに大きく影響する。これまではサーボパラメータ調整技術者が、ボード線図を視察しながらフィルタパラメータの最適化を実施していた。そのため、調整時間の制約から十分に最適化が行えるとは限らなかった。本提案手法では、フィルタパラメータにもシミュレーションを活用している。これによって、幅広いパラメータの組み合わせについて安定性を評価し、最も安定領域が広がるフィルタパラメータを選択している。

3.2.4 サーボパラメータ自動調整フロー

図10 にサーボパラメータの自動調整フローを示す。自動調整の流れは、次のようになる。

- 速度ループの周波数解析結果に基づきシミュレーションを活用して安定性マップを作成する。
- ユーザが指定した調整強度に従って、速度ループのフィードバックゲインを仮決定する。
- (b)で仮決定したフィードバックゲインを用いて再度実機を用いた加振試験を実施し、安定性マップの精度を改善する。
- ノッチフィルタパラメータ（中心周波数、深さ、Q 値）を変更する。当社独自のアルゴリズムに従って、安定領域が最大となるノッチフィルタパラメータを探索する。
- ノッチフィルタパラメータの変更で安定領域が更に拡大していれば、(b)に戻って再度フィードバックゲインの向上を試みる。安定領域を拡大できなければ、ノッチフィルタパラメータを確定し、位置ループのフィードバックゲインの決定に進む。
- 位置フィードバックゲインを変更した場合の位置ループの安定性マップを作成する。

図11 に位置ループの安定性マップを示す。位置ループの補償器は位置比例ゲインのみなので1次元のマップとなっている。速度ループと同様に、ユーザが指定した調整強度に従って実現性能と安定性のトレードオフを図り、適切な位置フィードバックゲインを決定することができる。

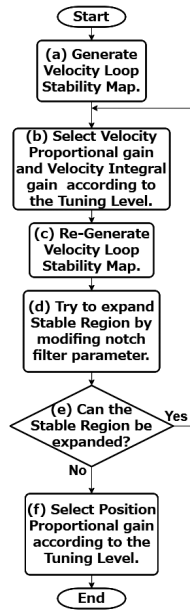


図 10 サーボパラメータの自動調整フロー

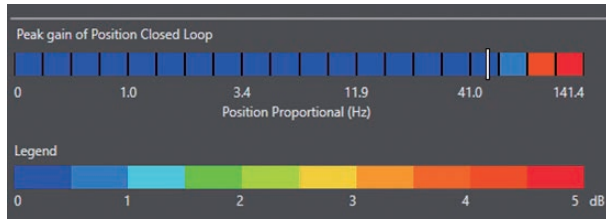


図 11 位置ループ安定性マップ

3.3 調整時動作範囲の抑制

本提案手法は、装置を加振しその周波数解析結果に基づきサーボパラメータを決定する。速度のフィードバック制御が有効な状態で装置を加振するので、移動量が確定的であり、周波数解析に必要な指令値の振幅が数 mm 以内である。このことから、装置が意図せず動作範囲外に移動し破損するリスクは小さい。

しかし、3.2.4 のサーボパラメータ自動調整フローで示した通り、安定性マップの精度をより確からしくするために加振操作を繰り返し実施している。もし、加振操作の度に装置の現在位置が徐々に移動すると、最終的に装置が動作範囲外になるおそれがある。図 12 に実線 (w/o offset cancel) で、一般的な周波数解析用の加振信号波形を示す。時間とともに加振周波数を掃引する SweptSine 波形であるが、最終的な位置が加振開始位置から移動してしまう (図 13 の実線: w/o offset cancel)。

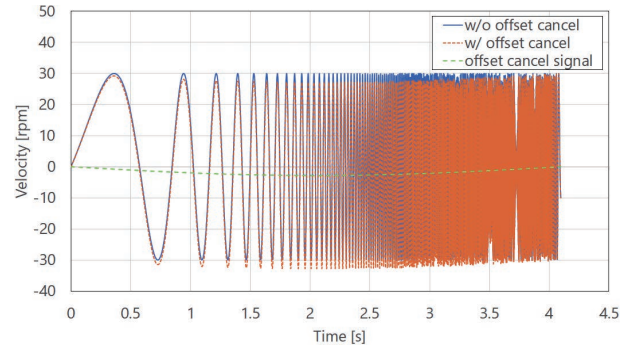


図 12 低周波正弦波を重畳した SweptSine 波形

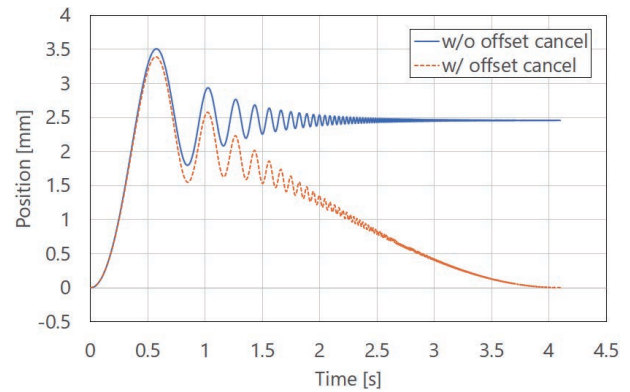


図 13 SweptSine 印可時の位置変化

そこで、本提案手法では、加振完了位置が加振開始位置に戻る対策を講じた。具体的には、SweptSine の加振波形により生じる位置オフセットをキャンセルするように低周波正弦波を重畳した。図 12 に点線 (w/ offset cancel) で低周波正弦波を重畳した SweptSine 波形、図 13 に点線 (w/ offset cancel) でそのときの位置応答をそれぞれ示す。

重畳する低周波正弦波の同定方法を以下に示す。(3)式のように振幅を V_{Lmax} 、角周波数を ω_L 、時間 t として重畳する低周波正弦波を定義する。

$$V_{Lmax} \sin \omega_L t \quad (3)$$

重畳前の SweptSine 波形によって生じる位置オフセットを L 、総加振時間を T_{inv} とすると、重畳する低周波正弦波の移動総量は(4)式のように表せる。

$$V_{Lmax} \int_0^{T_{inv}} \sin(\omega_L t) dt = \frac{V_{Lmax}}{\omega_L} \{1 - \cos(\omega_L T_{inv})\} = L \quad (4)$$

同定が煩雑になることを防ぐため、生じた位置オフセットとは反対の一方のみに移動する速度正弦波を重畳する。このとき重畳する正弦波は半周期が加振時間 T_{inv} となるので、角周波数 ω_L は(5)式となる。

$$\omega_L = \frac{\pi}{T_{inv}} \quad (5)$$

(5)式を(4)式に代入して整理すると、(6)式から振幅 V_{Lmax}

が導出できる。

$$V_{Lmax} = \frac{\pi L}{2T_{inv}} \quad (6)$$

(5)、(6)式を(3)式に代入すると、重畳する正弦波は(7)式となる。

$$\frac{\pi L}{2T_{inv}} \sin\left(\frac{\pi}{T_{inv}}t\right) \quad (7)$$

4. 実験結果

4.1 制御目的に応じた制御構造を選択した効果

制御目的に則した制御構造を採用することの効果を示すために、位置決め時間の最小化を目指す実験と、軌道追従誤差の最小化を目指す実験を実施し、制御構造の違いによる実現性能の差を比較した。前者の実験では図 14 に示す円盤負荷装置、後者の実験では図 15 に示すボールねじをそれぞれ用いた。比較したのは、モデル追従制御構造 (Model Following Control) と 100% フィードフォワード制御構造 (100% Feed Forward) の 2 方式である。

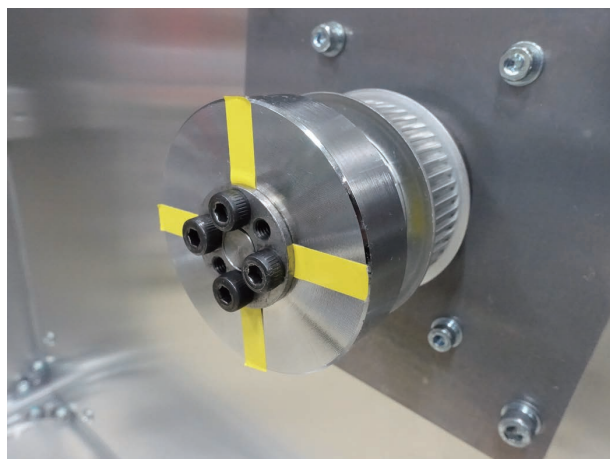


図 14 円盤負荷装置 (位置決め時間の比較)

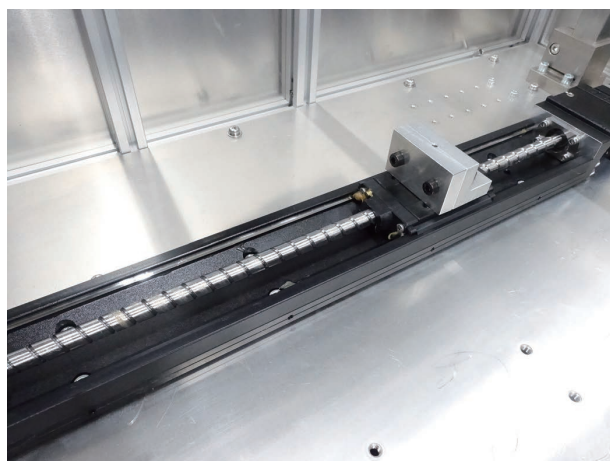


図 15 ボールねじ (目標軌道への追従誤差の比較)

図 16 は制御構造の違いによる位置決め時間の違いを示すもので、各制御構造においてトルクが出力制限を超えない範囲で実現可能な最速の目標軌道を与えている。表 1 に実験条件を示す。モデル追従制御では、目標軌道と内部指令値に乖離が発生する。その一方で、オーバーシュートを抑制することができ、装置へのダメージを減らせる。また、トルク飽和を抑制できるので最大速度を大きく設定することが可能になる。その結果、100% フィードフォワード制御構造に対して、位置決め移動時間を 11% 短縮できている。

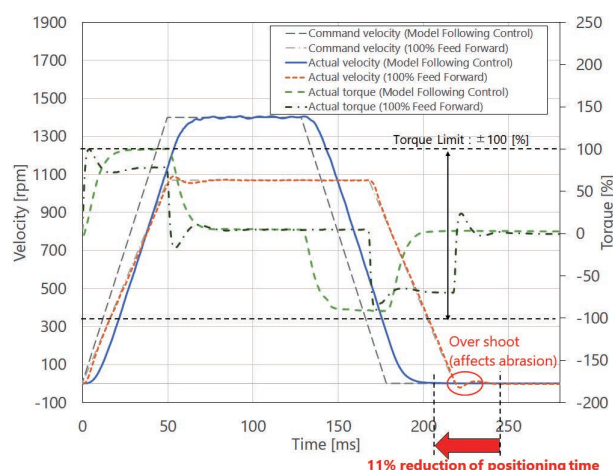


図 16 制御構造の違いによる位置決め時間の比較

表 1 実験条件 (制御構造の違いによる位置決め時間の比較)

条件項目	値
最大速度 (モデル追従制御)	1070 rpm
最大速度 (100% フィードフォワード制御)	1400 rpm
加減速時間	50 msec
移動距離	3 revolutions
トルク出力制限	±100% (±0.318 N.m)
Advanced Auto-Tuning の調整強度	Middle

図 17 は制御構造の違いによる目標軌道への追従性の差を示すもので、目標軌道との誤差を 200 倍拡大したものを目標軌道に加算した誤差円で示している。図 18 は追従誤差が最大となる象限突起部⁶⁾の拡大図である。表 2 に実験条件、表 3 に制御構造毎の目標軌道との平均誤差、最大誤差をそれぞれ示す。表 3 から、目標軌道から推定した必要トルクをフィードフォワードで与える 100% フィードフォワード制御構造の方が、モデル追従制御より 42% 追従誤差が小さいことが分かる。このことから、目標軌道に対するローパスフィルタ効果があるモデル追従制御構造は、目

標軌道追従性重視のアプリケーションには適していないことが判る。

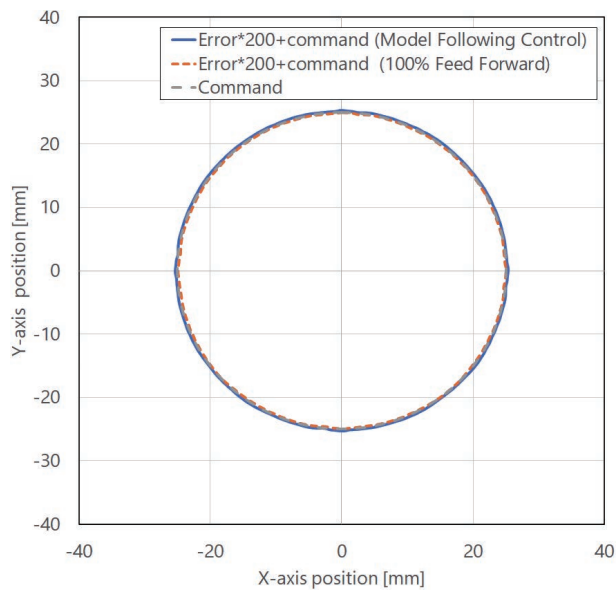


図 17 制御構造の違いによる目標軌道への追従誤差の比較

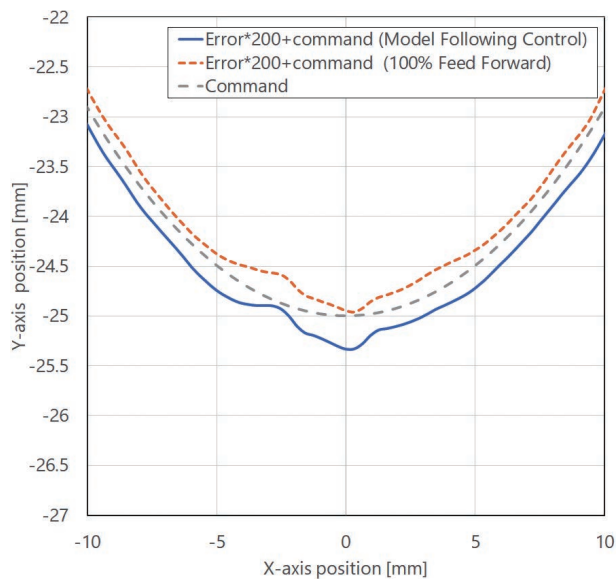


図 18 制御構造の違いによる目標軌道への追従誤差の比較（図 17 の象限突起部を拡大）

表 2 実験条件（制御構造の違いによる目標軌道への追従誤差の比較）

条件項目	値
円半径	25 mm
移動速度	2π rad/s
Advanced Auto-Tuning の調整強度	Middle

表 3 制御構造の違いによる目標軌道への追従誤差

目標軌道との誤差	モデル追従制御	100%フィードフォワード制御
平均誤差	1.1 μm	0.7 μm
最大誤差	4.1 μm	2.4 μm

4.2 安定性解析に基づく調整の効果

図 19 に従来の時間応答波形に基づくゲイン調整方法（Easy Tuning）と、本手法（Advanced Auto-Tuning）による整定時間の比較結果を示す。Easy Tuning の制御構造、目標整定時間は何れもデフォルト値とし、それぞれ「モデル追従制御」、「50 ms」とする。本手法での制御目的は、「位置決め時間重視」、調整強度は「Middle」とした。その他の実験条件は表 4 に示した。制御構造はどちらもモデル追従制御構造で差はない。本手法ではフィードバック系の安定性を定量的に評価しながら、フィードバックゲインを上昇させて制御帯域を拡大する。このことで、Easy Tuning に対して 90%もの整定時間の削減が行えた。

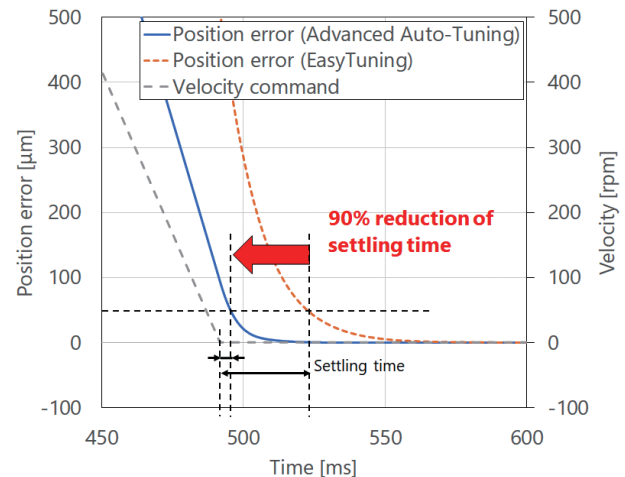


図 19 安定性解析の有無による整定時間の比較
安定性解析なし：EasyTuning、安定性解析あり：Advanced Auto-Tuning

表 4 実験条件（安定性解析の有無による整定時間の比較）

条件項目	値
最大速度	500 rpm
加減速時間	50 msec
移動距離	3 revolutions

図 20 に Easy Tuning と本手法（Advanced Auto-Tuning）による軌道追従性の比較結果（誤差円）を示す。本手法での制御目的は「軌道追従性重視」、調整強度は「Middle」とした。その他の実験条件は、表 2 に示したものと同様であ

る。本手法では、制御構造に 100% フィードフォワード制御構造が選択されるため、内部的に目標軌道をフィルタリングすることは無く、またフィードフォワードトルクにより遅れ無く目標位置に動作させることが可能になる。更に、安定性を定量的に評価しながら制御帯域を最大限拡大することで、装置モデルに含まれない象限突起に対しても高速に補正動作が行える。その結果、Easy Tuning に対して 98% の軌道追従誤差の削減が行えた。

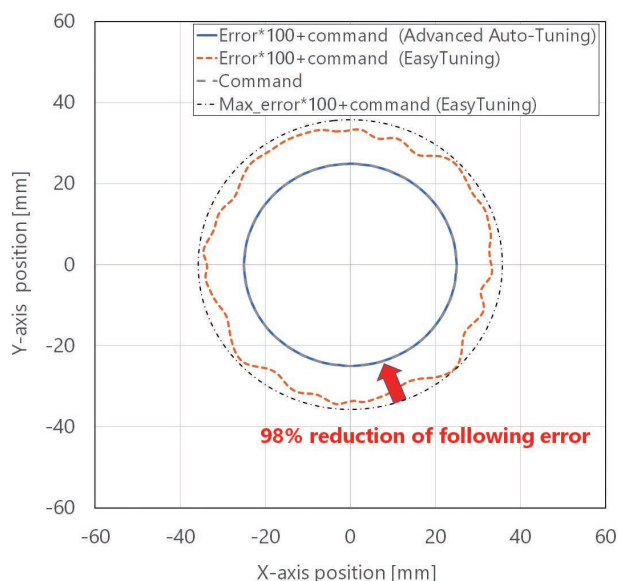


図 20 安定性解析の有無による目標軌道との追従誤差の比較
安定性解析なし：EasyTuning、安定性解析あり：Advanced Auto-Tuning

4.3 調整時動作範囲削減の効果

図 21 に、SweptSine の加振波形により生じる位置オフセットをキャンセルする低周波正弦波の重畳効果を示す。本提案手法（Advanced Auto-Tuning）では、調整完了までに多い場合は 40 回程度の装置加振試験を実施する。リードピッチ 10 mm のボールねじの場合、本提案手法によらない場合、調整完了までに 35 mm 程度の装置移動が発生する。一方、本提案手法では、1 回の加振試験での最大移動量は 2.5 mm、39 回加振後の位置のオフセット量は実測値で 0.8 mm に抑えられた。このことは、装置が動作範囲外に移動して破損するリスクを極めて小さく抑えられ、本提案手法がオペレータの心理的負担軽減に貢献できることを意味する。

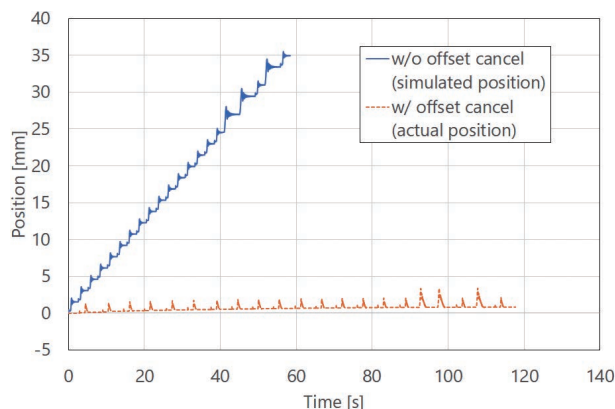


図 21 位置オフセットキャンセル信号の有無による移動量の比較

5. むすび

従来の時間応答波形に基づくサーボパラメータ調整では、十分な実現性能が得られなかったり、僅かな動作環境の変化で装置が不安定になったりするという問題がある。この問題に対して、サーボパラメータ調整の専門知識を必要とすることなく制御目的を指定するだけで装置の最大性能を引き出せるサーボパラメータ調整手法を提案した。

本提案手法では、装置を含む制御系の安定性について、周波数解析技術を用いて定量的に評価することで、実現性能と安定性のトレードオフを図っている。安定性解析には、実機だけでなくシミュレーションを活用し、装置の加振回数を削減することで調整時間の削減と装置ダメージの抑制を図った。シミュレーションを活用することで、ノッチフィルタなどのサーボパラメータの組み合わせについて、一回の加振動作で約 400 通りの評価が可能になり、調整の専門家であっても調整時間の制約から到達が難しい実現性能を数分で達成可能にした。更に、周波数解析の加振軌道の工夫により装置の動作範囲を数 mm 以内に抑制し、誤操作による装置破壊リスクと現場オペレータの心理的負担の軽減に貢献できた。尚、安定性についてフィードバックゲインを変数とする安定性マップとして見える化した。これによって、実現可能な制御帯域の限界や安定性の余裕度が直感的に把握でき、実現不可能な性能を追い求め続けることの回避や、装置の機械剛性の改善度評価に活用することが期待できる。

今後は、上記の安定性解析とシミュレーションを活用したサーボドライバパラメータ調整手法を、複数のモータが機械的に結合された装置に展開し、対応可能なアプリケーションの拡大を図っていく。

参考文献

- 1) オムロン, “サーボモータを調整するための制御装置および方法,” 特許第 6409886 号, Oct. 24, 2018.
- 2) オムロン, “処理装置、制御パラメータ決定方法、及び制御パ

- ラメータ決定プログラム,” 特許第 6460138号, Jan. 30, 2019.
- 3) オムロン, “設定支援装置,” 特許第 7119760号, Aug. 17, 2022.
- 4) オムロン, “設定支援装置,” 特許第 7119761号, Aug. 17, 2022.
- 5) S. Manabe and Y. C. Kim, *Coefficient Diagram Method for Control System Design*, Springer, 2022.
- 6) 松原厚, 精密位置決め・送り系設計のための制御工学, 森北出版株式会社, 2008, pp. 185-198.

執筆者紹介



原田 浩行 HARADA Hiroyuki
 インダストリアルオートメーションビジネス
 カンパニー
 商品事業本部 ドライブ事業部 開発部
 第2開発課
 専門：制御工学
 所属学会：電気学会



恵木 守 EGI Mamoru
 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
 第2開発課
 専門：制御工学
 技術士（機械部門：機械力学・制御）



藤岡 巧 FUJIOKA Takumi
 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
 第2開発課
 専門：制御工学



海田 僧太 KAIDA Sota
 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
 第4開発課
 専門：制御工学

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。

製造現場での機械学習運用におけるコンセプトドリフト検知手法の提案

川ノ上 真輔

近年は機械学習の普及に伴い、Factory Automation (FA) 領域の製造現場においても、製品不良を予測するために異常検知を適用する事例が増えている。しかしながら、昨今の製品多様化や製造技術の複雑化により、FA 製造現場では、Man (人)、Machine (機械)、Material (材料)、Method (方法) の 4M 変動の頻度が増加している。変動前に構築された異常検知モデルをそのまま運用している場合、誤検知が発生する。そしてこれへの対処が遅れると、製品不良率の増加につながる。

異常検知を運用中に入力データと推論結果の関係が、4M 変動などによって運用前の学習時から変化することをコンセプトドリフトと呼ぶ。従来は平均値などを用いてこの変動によるコンセプトドリフトを対策していた。しかしこれでは、検知が遅れてしまい、課題があった。

本稿では、因果関係を考慮して、複数の異常検知モデルを統合することにより、製品不良の予測と 4M 変動によるコンセプトドリフト検知を両立する手法を提案する。この提案の有効性を、製造現場で使用される射出成型機を用いて検証した。

Proposal of Concept Drift Detection in Factory Automation (FA) Domain

KAWANOUE Shinsuke

In recent years, with trend of machine learning, there has been an increase in application of anomaly detection using machine learning to predict product defects in Factory Automation (FA) domain. However, due to the diversification of products and efficiency of manufacturing processes, frequency of 4M (Man, Machine, Material, Method) variations has increased. If the anomaly detection model, which was operational before the variation, continues to be used, false detection happens. And they can lead to an increase product defect.

This phenomenon, where relationship between input data and inference results changes during operation of anomaly detection from the time of learning, is referred to as concept drift. Previously, the concept drift by variations have been measured using means such as averages. But these methods have been problematic due to delayed detection and issues with real-time performance.

This paper proposes a method that integrates multiple anomaly detection models by considering causal relationships, thereby achieving both the prediction of product defects and the detection of concept drift caused by 4M variations. Furthermore, the effectiveness of the proposed method was verified using an injection molding machine utilized in manufacturing sites.

1. まえがき

近年は機械学習の普及に伴い、Factory Automation (FA) 領域の製造現場においても、機械学習を用いて、製品不良を予測する事例が増加している。製造現場では良品率を向

上させるために、少量の不良ラベルデータに適した異常検知が運用されることが多い。オムロンにおいても、AI 搭載マシンオートメーションコントローラ¹⁾を製品化しており、製造装置から収集したセンシングデータを入力として異常検知を行うことが可能となっている。

しかしながら、昨今の製品多様化や製造技術の複雑化に

Contact : KAWANOUE Shinsuke shinsuke.kawanoue@omron.com

より、FA 製造現場では、Man (人)、Machine (機械)、Material (材料)、Method (方法) の 4M 変動の頻度が増加している。変動前に構築された異常検知モデルをそのまま運用している場合、誤検知が発生する。そしてこれへの対応が遅れると、製品不良率の増加につながる。

異常検知を運用中に入力データと推論結果の関係が、4M 変動などによって運用前の学習時から変化することをコンセプトドリフト²⁾と呼ぶ。これへの対策として、従来は移動平均や、管理図の中心値に対して連続した高低を評価する連を使用した手法³⁾がとられてきた。しかし、これらの手法はリアルタイム性と運用スキル、工数の問題があった。

本稿では、因果関係を考慮して、製品不良の要因となる変数群と、それらの変数に影響を与える 4M 変動の変数群を特定する。それぞれの変数群から生成される複数の異常検知モデルを統合することにより、製品不良の予兆と 4M 変動によるコンセプトドリフト検知を両立する手法を提案する。さらに、提案手法によって、それぞれの事象を検知できることを製造現場で使用される射出成型機を用いて実証する。

2. 課題

本章では、対象システムの振る舞いを説明したうえで、解析対象の異常検知を行う際に発生するコンセプトドリフトの課題について説明する。

2.1 対象システム

対象となる射出成型機について、図 1 に紹介する。

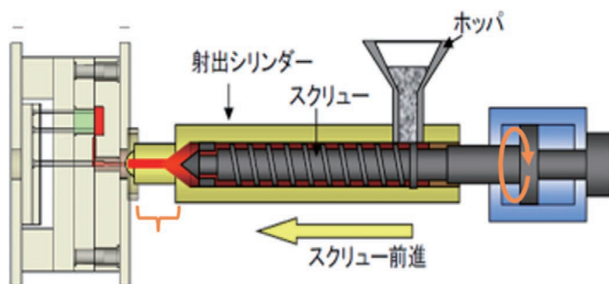


図1 射出成型機

射出成型機は、金型内に可塑化溶融した樹脂（図1の赤部分）を高圧かつ高速で管（図1の左）方内に射出することで、複雑な形状のプラスチック部品を精密かつ大量に生産できる⁴⁾。また、製品の型式毎に射出条件を変更することで、多品種の生産に対応できることが特徴となる。しかしながら、不適切な条件設定やスクリーに樹脂が残ることで、樹脂が金型内に十分に充填されない時には不良品となる。この不良品が発生する兆候を検知するために、圧力や時間、射出量などの変数を監視する。設定されたしきい

値を超えた場合、不良が発生する前に、条件変更や清掃などの対策を実施することができる。

2.2 課題

成型不良の要因となる変数は、前節に示した通り圧力や時間、射出量など 70 種類程度存在する。従来は、ある条件下で発生した不良について、決定木の重要度による寄与度の高い変数を選択し、異常検知モデルを構築して、成型不良の予兆を監視していた⁵⁾。異常検知は正常データのみで学習モデルを構築できるため、不良データの少ない製造現場では有効な手法である。この方式を採用しているオムロンの製品である AI 搭載マシンオートメーションコントローラと同様の従来手法を用いて異常検知を実施した例を図2に示す。

図2上のグラフは、異常検知の指標である異常度を示すスコアで、下のグラフは異常検知モデルを構成する説明変数の1つである。このモデルは異常度のしきい値を 0.555 として、成型不良の予兆検知を実施する。図2左の前半は、目論見通りの異常検知結果が得られているが、右となる後半の 114 ショット以降は、常にしきい値を超えている。これは、114 ショット以降で生産している製品の型式が変更となったためである。結果として、型式変更後の異常を適切に検知できないことになる。型式変更後の不良を検知するためには、114 ショットの時点で再学習をすることが必要になるが、このタイミングでは再学習することの判断が出来ない。そのため、長期に亘って不良を検知できないまま生産が続いてしまう。型式変更を即時に検知して再学習することにより、製品不良率の低減が見込まれる。

以上から、本稿では、成型不良の予兆検知の運用中に型式変更を検知することを課題とする。

2.3 提案手法に対する要件

前節で示したように、異常検知を運用中に入力データと推論結果の関係が学習時から変化することをコンセプトドリフトと呼ぶ。コンセプトドリフトには、時間経過に伴って変化するものと、突発的に変化するものがあり、製造する製品の型式変更などの 4M 変動は突発的に発生するものに分類される。対象となる成型機では、不良品生産を防ぐため、不良の予兆検知のリアルタイム性が要求される。

よって前節で示した課題は、製造現場での異常検知を運用中に、突発的なコンセプトドリフトを検知する手法によって解決される。

従来手法として、まずは連続してしきい値を超える状況を検知する方法が考えられる。具体的には、移動平均や管理図の連を用いるものがある。しかしながら、移動平均を使う方法は突発的な変動に対する追従が遅れるため、リアルタイム性の観点で適さない。さらに、連を用いた手法では、管理値などのしきい値以外のパラメータを決める難易

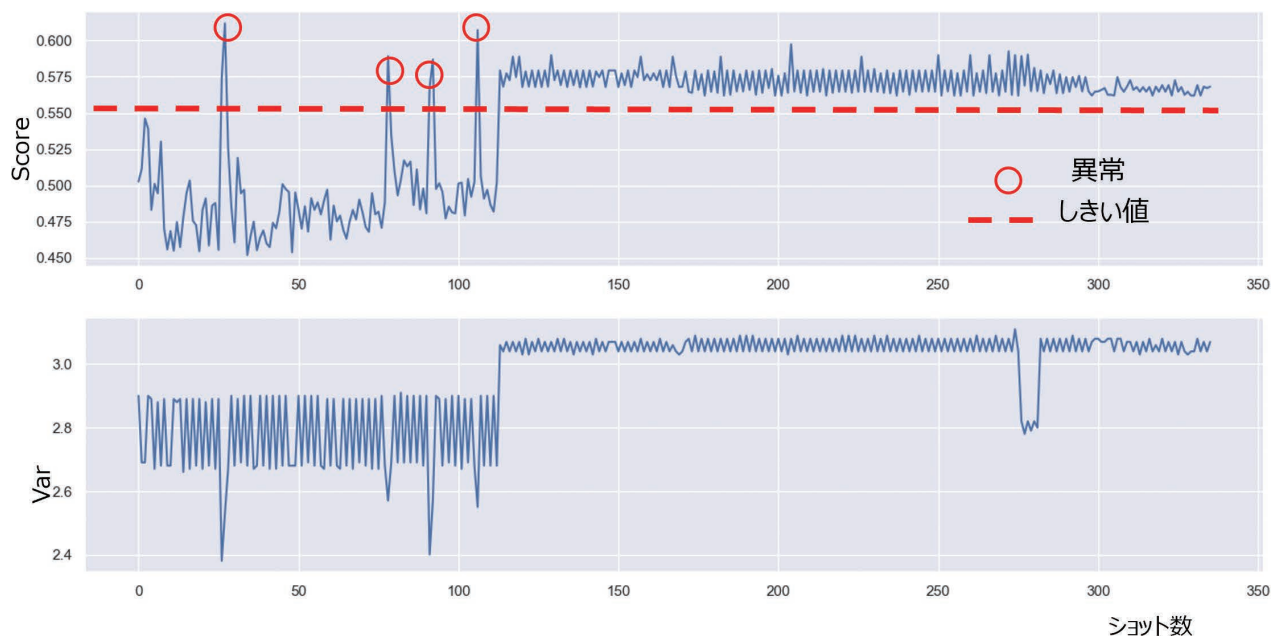


図2 異常検知結果

度が高く、スキル面の問題がある。よって、スキルレスで運用するために調整するパラメータが不要であることが望ましい。

次に、製品の型式毎に異常検知モデルを構築することが考えられる。しかし、昨今の製品多様化のために型式数は10種類を超えるものが大半であり、それぞれについて異常検知モデルを構築して運用することは、データ管理やモデル生成、しきい値の設定など、運用工数面の問題がある。よって、運用中に監視する異常検知モデルは1つであることが望ましい。

以上から本稿では、まずリアルタイム性を持つコンセプトドリフト検知が必要となる。さらに、スキルレス運用のためにパラメータ調整が不要なことで、製品不良の予兆検知と4M変動としての型式変更の検知を両立することを要件とする。

3. 提案手法

3.1 提案手法の概要

本提案手法では、多岐に渡る異常検知アルゴリズム⁶⁾の中から、Isolation Forest⁷⁾を採用する。Isolation Forestは高速な推論を特徴としており、リアルタイムな検知が可能である。また、運用上しきい値以外のパラメータを考慮する必要が無く、運用スキル面の問題も少ない。本稿ではIsolation Forestを使用して、製品不良の予兆検知と4M変動である型式変更の検知を両立し、1つの異常検知モデルとして統合することを考える。不良の予兆検知と型式変更検知は、それぞれのしきい値を設定するのみである。これによって、運用工数減・スキルの簡易化・リアルタイム性の

向上が可能となる。

以下、3.2節でIsolation Forestの概要を記載し、3.3節で製品型式と不良要因それぞれの影響・要因特定、3.4節で異常検知の統合、3.5節で異常度の算出について記載する。

3.2 Isolation Forest の概要

Isolation Forestは、正常、異常のラベルがついていない学習データからモデルを構築し、データの疎密に基づいて正常データと異常データを分類する異常検知アルゴリズムである。疎密は、データを一点になるまで分離するために必要なパーティションの数で判断される。疎な部分に属している点は図3 a)のように比較的少ないパーティション数で一点までに分割され、密な部分に属している点は図3 b)のように一点までのパーティションが多くなる。このパーティション数は図4に示すように2分木の深さとなり、これをもとに異常度を算出する。

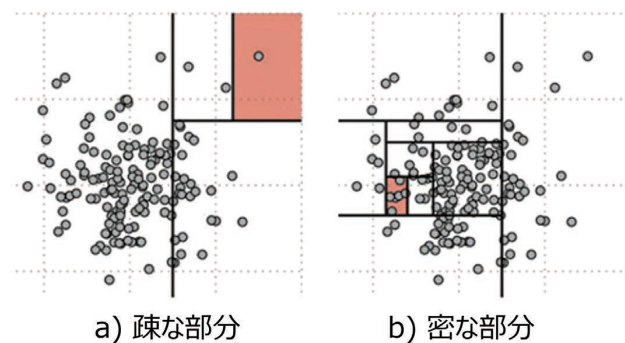


図3 パーティションによるデータ分割

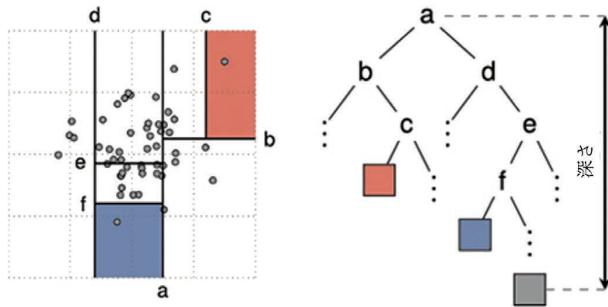


図4 データ分割の2分木による表現

異常度は、サンプリングされた学習データ $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ から2分木を構築し、評価するデータについての深さ情報から式(1)によって算出される。具体的には、以下の操作を行う。

$$s(x, n) = 2^{-\frac{E(h(x))}{c(n)}} \quad (1)$$

$$c(n) = H(n-1) - \frac{2(n-1)}{n}$$

$$H(i) = \log(i) + \gamma$$

ここで、 $h(x)$ は、 n 点のサンプリングされたデータから構築された2分木において、評価点である x の深さを表す。例えば 256 ($=2^8$) 点のサンプリングデータにおいては、2分木の深さは1から8の値を取りうる。複数の2分木における評価点 x の深さの期待値である $E(h(x))$ を正規化することにより、異常度は $(0, 1]$ の範囲をとる。この異常度に対してしきい値を設定することで異常検知を行う。なお、 γ はオイラー定数 (≈ 0.57721) である。

3.3 影響・要因特定

本節では、製品不良と型式変更の要因となる変数の特定について記す。

3.3.1 製品不良の要因特定

まずは、成形不良に至る要因を特定する。成形機で収集された変数の集合を *measured data* として、これらの変数 ($\text{var1}, \text{var2}, \text{var3}, \text{var4}, \dots$) が成形不良に影響している様子を図5に示す。

特定された次に成形不良の要因となる変数の集合は式(2)により算出される。

$$X_{\text{defect-factors}} = \{x \mid \text{Importance}_{\text{defect-factors}}(x) > Th_{\text{defect-factors}}\} \quad (2)$$

ここで、 x は成形機から収集される温度や圧力など変数の集合である。 $\text{Importance}_{\text{defect-factors}}$ は製品不良と正常品を離散変数としてラベル付けした x について Random Forest の重要度を算出する。 $X_{\text{defect-factors}}$ は、前述で算出した重要度について、任意のしきい値 $Th_{\text{defect-factors}}$ で条件付けした変数の集合である。

3.3.2 製品型式変更の影響変数の特定

次に製品型式の変更により、影響を受ける変数を特定する。型式の変更が成形機で収集された変数に影響する様子を図6に示す。

型式変更の影響を受ける変数は、図5に示された成形不良の要因である変数 ($\text{var1}, \text{var2}, \text{var3}, \text{var4}$) と、成形不良の要因ではない変数 ($\text{var11}, \text{var12}, \text{var13}, \text{var14}, \dots$) から構成される。

次に型式変更が影響する変数の集合を式(3)により算出する。

$$X_{\text{type-factors}} = \{x \mid \text{Importance}_{\text{type-factors}}(x) > Th_{\text{type-factors}}\} \quad (3)$$

型式変更が影響する変数の集合 $X_{\text{type-factors}}$ は式(2)と同様に型式を離散変数でラベル付けした x に対する重要度を任意のしきい値で条件づけたものである。

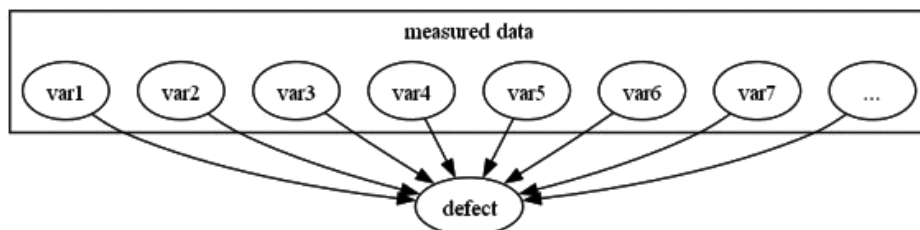


図5 成形不良の要因

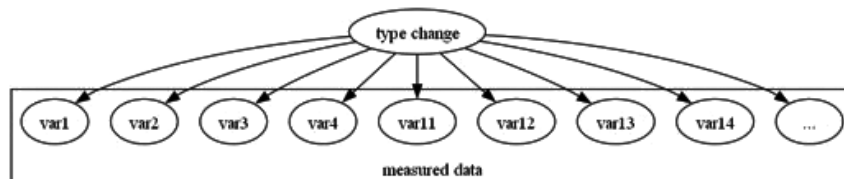


図6 型式変更の影響

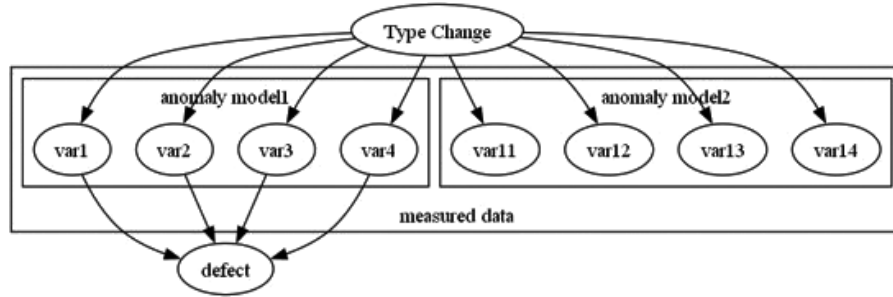


図7 異常検知モデルの外観

3.4 異常検知モデルの生成

本節では、品質不良と型式変更を検知する異常検知モデルを生成する。図7に示すように、品質不良の予兆を検知するモデル（anomaly model1）は型式変更に影響を受け、不良の要因となる変数の集合から構成される。型式の変更を検知するモデル（anomaly model2）は、型式変更の影響は受けるが、不良の要因とはならない変数の集合から構成される。

3.4.1 製品不良予兆の異常検知モデル

製品不良の予兆検知を行う異常検知モデルの学習データを式(4)に示す。

$$X_{anomaly-model1} = X_{defect-factors} \cap X_{type-factors} \quad (4)$$

このように $X_{anomaly-model1}$ は、製品不良の要因と製品型式の影響の積集合となる。

次に、本モデルの異常度 $s_{anomaly-model1}$ の算出方法を式(5)に記す。

$$s_{anomaly-model1}(x_{anomaly-model1}, n) = 2 \frac{E(h(x_{anomaly-model1}))}{c(n)} \quad (5)$$

ここで、 $x_{anomaly-model1}$ は、学習データ $X_{anomaly-model1}$ から構成された異常検知モデルで評価されるデータである。

本モデルは、正常である学習データが異常度を超えない任意の、 $Threshold_{anomaly-model1}$ をしきい値とする。

3.4.2 製品型式変更の異常検知モデル

製品型式変更を検知する異常検知モデルの学習データを式(6)に示す。

$$X_{anomaly-model2} = \overline{X_{defect-factors}} \cap X_{type-factors} \quad (6)$$

このように $X_{anomaly-model2}$ は、製品不良の要因ではない集合と製品型式が影響する集合の積集合となる。

次に、本モデルの異常度の算出方法 $s_{anomaly-model2}$ を式(5)と同様に、式(7)に記す。

$$s_{anomaly-model2}(x_{anomaly-model2}, n) = 2 \frac{E(h(x_{anomaly-model2}))}{c(n)} \quad (7)$$

$x_{anomaly-model2}$ は、学習データ $X_{anomaly-model2}$ から構成された異常検知モデルで評価されるデータである。

本モデルは、正常である学習データが異常度を超えない任意の、 $Threshold_{anomaly-model2}$ をしきい値とする。

3.5 異常度の算出

本節では、成型不良の予兆検知である anomaly-model1 と型式変更の検知を行う anomaly-model2 を統合する異常度の算出としきい値について述べる。

式(8)に本手法で提案する複数の異常検知モデルを統合した異常度を示す。

$$s_{union} = 2 \frac{E(h(x_{union})) + E(h(x_{union}))}{2c(n)} = \sqrt{s_{anomaly-model1}(x_{union}, n) s_{anomaly-model2}(x_{union}, n)} \quad (8)$$

3.2節で示した通り、Isolation Forest の異常度は、評価するデータの深さの期待値を正規化したものである。よって、2つの異常検知モデルにおいて、同じデータ x_{union} を評価した場合、指数法則により、異常度のスコアの乗算の平方根で表すことができる。

統合された異常度である s_{union} は、Isolation Forest の異常度と同じ $(0, 1]$ の範囲をとるため、成型不良の予兆検知のしきい値は3.3.1節で記した、 $Threshold_{anomaly-model1}$ を使用し、型式変更検知のしきい値は $Threshold_{anomaly-model2}$ を使用する。

4. 検証

本章では、2.1 節で示した射出成型機で収集したデータを用いて、提案手法の有効性について検証した結果を述べる。比較する従来手法は、2.2 節で示した AI 搭載マシンオートメーションコントローラと同様の従来手法を用いた異常検知手法である。

4.1 検証内容

検証したデータの概要を表 1 に示す。

表 1 検証データの概要

製品型式	ショット数	収集変数の数	異常検知と判定すべきショット数
A	113	70	4
B	223	70	70

製造する製品型式は 2 種類であり、A 型式を 113 ショット製造後に、B 型式の製造に移行する。本検証の目的は、A 型式で 4 ショットの予兆検知を判定した後、B 型式への変更を検知することである。

なお、本稿においては、機密上の観点から具体的な説明変数の内容は記載しない。

4.2 異常検知モデル

提案手法により生成した異常検知モデルの内容を表 2 に示す。

表 2 異常検知モデルの概要

異常検知モデル	異常検知モデルの説明変数	サンプル数
anomaly model1	var1, var2, var3, var4	40
anomaly model2	var11, var12, var13, var14	40

3.4 節に記載した、anomaly model1 と anomaly model2 の 2 種類の異常検知モデルを生成する。モデル生成のサンプル

数は製品型式 A の 40 ショット分とした。説明変数は 3.3 節にしたがい、それぞれ 4 変数を選択する。それぞれの説明変数のヒストグラムを、図 8 に示す。

Anomaly model1 を構成する変数 var1, var2, var3, var4 は、特に不良を含む製品型式 A において分布のばらつきが確認される。これらの変数による異常検知で製品不良の予兆検知を行う。一方で、Anomaly model2 を構成する変数の var11, var12, var13, var14 は、製品型式毎のばらつきは確認されない。これらの変数による異常検知は製品型式を判定することに適していることが分かる。

4.3 検証結果

3.4.1 節と 3.4.2 節にしたがい、anomaly model1, anomaly model2 の異常検知モデルについて、学習した結果の異常度から正常の異常度を超えない値を、それぞれしきい値 1、しきい値 2 として設定した。

表 3 に、anomaly model1, anomaly model2 それぞれのしきい値を記す。

表 3 各異常検知モデルのしきい値

異常検知モデル	しきい値の名称	しきい値の用途	しきい値
anomaly model1	しきい値 1	不良予兆の検知	0.550
anomaly model2	しきい値 2	製品型式変更の検知	0.570

提案手法での異常度の評価結果を図 9 に示す。

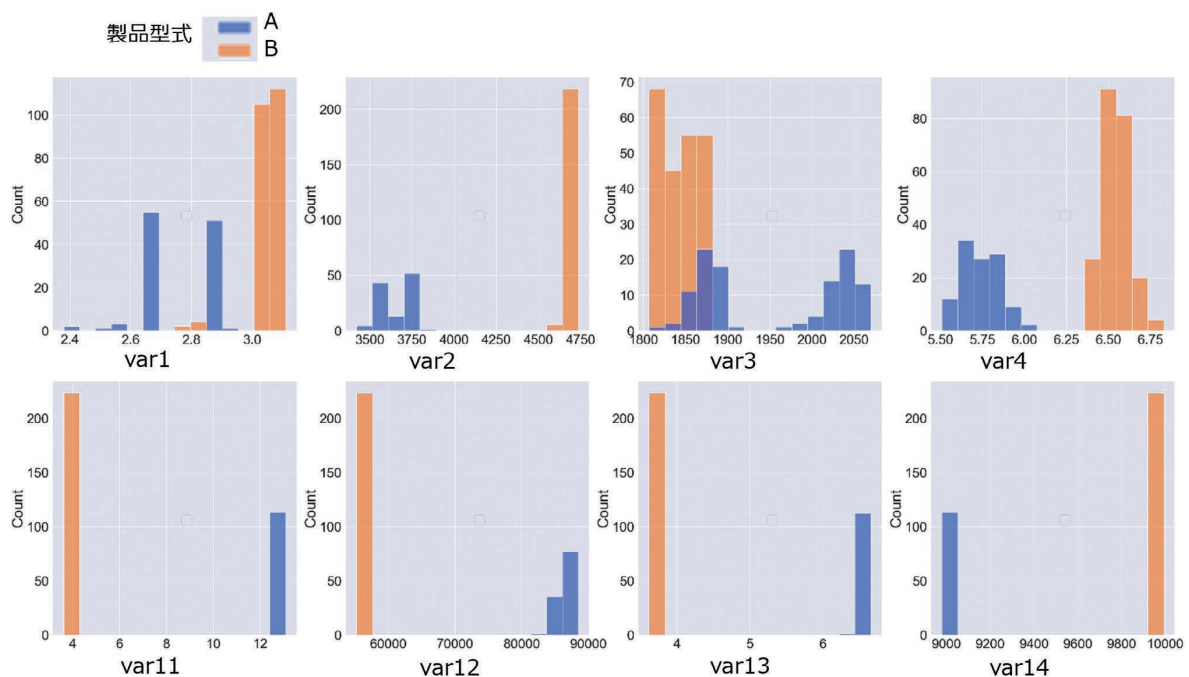


図 8 異常検知モデルを構成する説明変数のヒストグラム

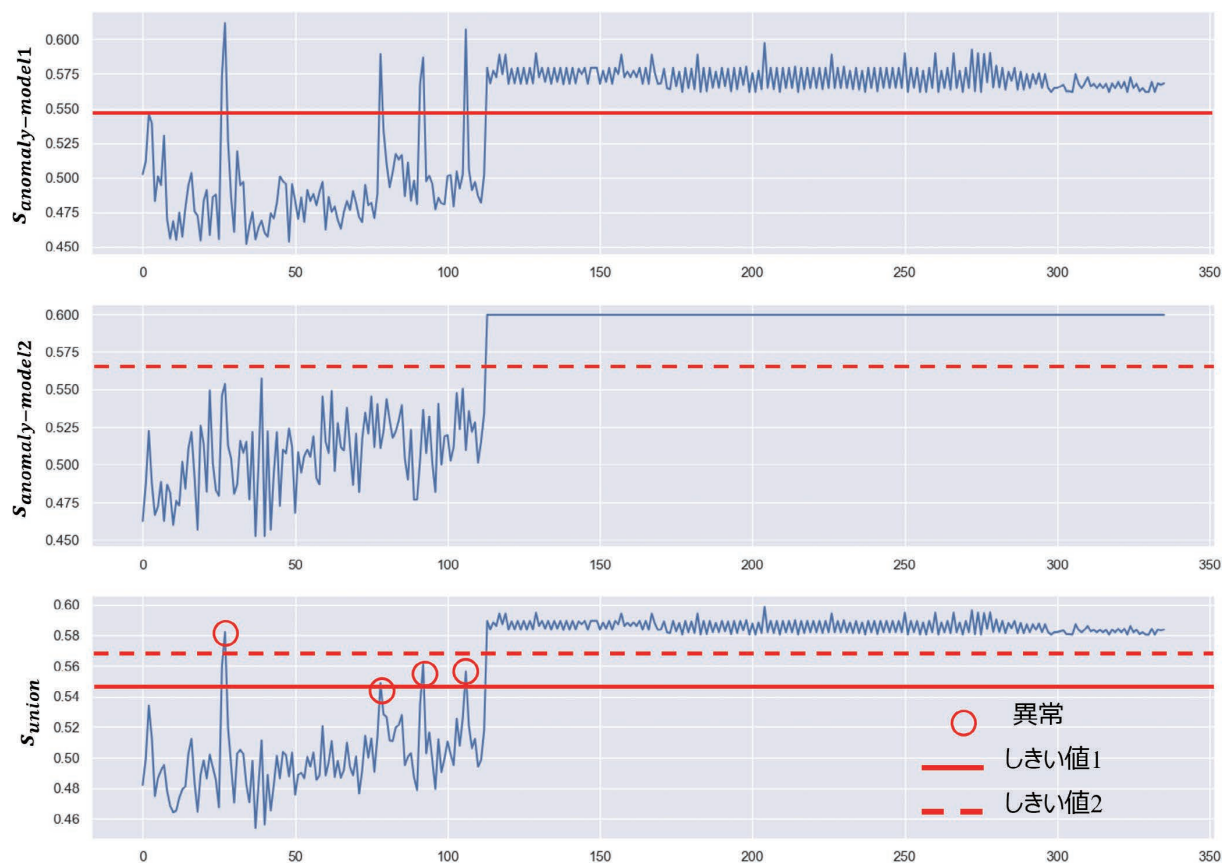


図9 それぞれの異常度の評価結果

グラフは上から、anomaly model1 の異常度 $s_{anomaly-model1}$ 、anomaly model2 の異常度 $s_{anomaly-model2}$ 、異常検知モデルを統合した異常度 s_{union} である。

1 つめのグラフの $s_{anomaly-model1}$ は従来手法である製品不良の要因となる変数で構築された異常検知モデルの結果である。前半の4つの不良は判定できているが、型式変更後はすべての異常度がしきい値を超えているため、不良と判断されることがわかる。

2 つめのグラフ $s_{anomaly-model2}$ は、製品不良の判定はできていないが、型式変更をすべて検知できていることが分かる。

3 つめのグラフの s_{union} は提案手法での結果となる。製品不良と型式変更について、すべて検知できている。さらに、しきい値1としきい値2により、製品不良と型式変更の違いについては37番目の1ショットを除いて分類することができた。

本検証の評価結果を表4にまとめる。

表4 評価結果

製品 型式	ショット 数	収集変数 の数	異常検知と判定 すべきショット数	正答率
A	113	70	4 (不良予兆)	99.1%
B	223	70	223 (製品型式)	100%

製品型式Aの評価データについては、37番目のショットデータについて、製品不良と型式変更の違いを分類できていないため、正答率は99.1%となった。製品型式Bの評価データについては、型式変更をすべて検知できている。

4.4 考察

検証データにおいて、製品型式A, B区間の正答率はそれぞれ99.1%, 100%となった。提案手法で示した異常度については、ほぼ意図通りの振る舞いを確認できたものの、1ショットは正しく検知できない結果となった。

37番目のショットで異常度がしきい値2を超えて型式変更前のショットを型式変更として検知してしまった原因は、異常度の変動範囲が前半と後半で異なることが考えられる。 $s_{anomaly-model2}$ を確認すると、前半である型式A区間の異常度は0.45から0.55の範囲で変動しているが、後半である型式B区間の異常度は、ほぼ一定となっている。 $s_{anomaly-model1}$ と $s_{anomaly-model2}$ を統合した s_{union} についても、前半の型式A区間の異常度の変動が影響して、不良予兆検知の異常度が大きくなり、しきい値2を超えていると考えられる。

これを対策するには、異常度を合成する前に、それぞれの異常度の変動範囲を調整する必要がある、今後の検討事項となる。

改善すべき点があるものの、1つのリアルタイムな異常検知モデルで、製品不良の予兆検知と型式変更検知を両立できるため、2.3節で示した要件を満たすことができる。結果として、2.2節で示した不良率の低減を実現することが可能となる。

異常検知モデルの運用面で考えると、複数の異常度の乗算で統合して評価できることは、管理上容易である。過去のスコアのみを使って新たに評価が出来ることは、多数の異常検知モデルの統合も容易になるため、今後さらなる利用の展開が見込まれる。

5. むすび

本稿では、4M変動によるコンセプトドリフト検知する課題に対して、リアルタイム性を持つこと、スキルレス運用のためにパラメータ調整が不要なことから、製品不良の予兆検知と型式変更の検知を両立することの3点を要件とした。解決手法では、因果関係を考慮して製品不良の要因となる変数群と、それらの変数に影響を与える4M変動の変数群を特定し、それぞれの変数群から生成される複数の異常検知モデルを統合する手法を提案した。検証においては、1つの異常検知モデルで、1ショットを除いて、製品不良と型式変更を意図通りに分類して検知できることを確認した。本稿では1事例のみの評価となったが、今後は提案手法を改善し、事例を積み上げることで、多くの製造現場での不良率低減が見込まれる。

製造現場では、機械学習の運用が難しいことが課題となっており、今後の機械学習運用を広げていくうえで有用な手法になり得ると考える。本手法は異常度のみで演算可能なことから、過去の異常度を用いての新たな評価や多数の異常検知モデルの統合など、用途を拡大できる可能性を見出した。

今後は本手法を改善して実際の製造現場に適用し、詳細な評価を実施する。将来的には、大規模なデータで評価を行い、汎用性を高めていくことと、3つ以上の異常検知モデルを組み合わせることで、多数の異常検知モデルの管理を効率化するソリューションへと展開していく。

参考文献

- 1) オムロン株式会社. “AI搭載マシンオートメーションコントローラ.” <https://www.fa.omron.co.jp/product/special/sysmac/featured-products/ai-controller.html> (Accessed: Mar. 14, 2024).
- 2) 大川佳寛, 小林健一, “ラベルなし運用データに対するコンセプトドリフト適応技術に関するサーベイ,” 2021 年度人工知能学会全国大会 (第35回), 2021, 2G4GS2f03.
- 3) 杉山昭, 宮田陽一, 現場で役立つ射出成形の基本と仕組み, 秀和システム, 2014, p. 15.
- 4) 杉原哲郎, “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,” *OMRON TECHNICS*, vol. 56, no. 1, pp.

48-57, 2024.

- 5) 鶴田浩輔 他, “マシンコントローラに搭載可能なAI技術の開発 (1) 装置制御用データを利用した生産ラインの異常検知手法について,” *OMRON TECHNICS*, vol. 50, no. 1, pp. 6-11, 2018.
- 6) 阿部泰明 他, “マシンコントローラに搭載可能なAI技術の開発 (2) 異常検知コントローラプロトタイプ開発における実証例について,” *OMRON TECHNICS*, vol. 50, no. 1, pp. 12-17, 2018.
- 7) F. T. Liu et al., “Isolation-based anomaly detection,” *ACM Trans. Knowl. Discovery Data (TKDD)*, vol. 6, no. 1, p. 3, 2012.

執筆者紹介



川ノ上 真輔 KAWANOUE Shinsuke
インダストリアルオートメーションビジネス
カンパニー
技術開発本部 第1技術部
専門：ソフトウェア工学
所属学会：電子情報通信学会

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

TensorFlow Lite for Microcontrollers を使用した組み込み AI の実現性検討

小河原 徹, 渡辺 泰久

近年、深層学習アルゴリズムがセンシングに適用され、画像センサなどの高精度化に貢献している。

本研究では、単純な一次元信号を扱うシンプルなセンサに深層学習アルゴリズムを適用し、センサの精度向上を目的とする。シンプルなセンサは製品価格を廉価にしなければならず、コスト面の制約がある。このため、大規模なアルゴリズムの搭載は難しいが、組み込み用深層学習プラットフォームの活用とモデルの軽量化により実現を目指す。

本稿では、シンプルなセンサの実例として血圧計を用いる。まず深層学習プラットフォームの選定を行い、次にアルゴリズム開発環境で学習済みのモデルを血圧計に組み込む手法と、モデルの軽量化手法について説明する。最後に ROM・RAM 容量や精度・実行時間を評価し、提案手法の有効性を示す。

Feasibility Study for Embedded AI Using TensorFlow Lite for Microcontrollers

KOGAWARA Toru and WATANABE Yasuhisa

In recent years, deep learning algorithms have been applied to sensing, and are contributing to the enhancement of high-precision devices such as image sensors.

This study aims to apply deep learning algorithms to simple sensors that handle one-dimensional signals, with the goal of improving their accuracy. Due to cost constraints to realize lower product prices, it is challenging to implement large-scale algorithms into simple sensors; however, we aim to achieve this by utilizing embedded deep learning platforms and applying model optimization techniques.

In this paper, we use a blood pressure monitor as a practical example of a simple sensor. First, we choose a deep learning platform, and then we describe the method for integrating a pre-trained model into the blood pressure monitor, as well as the techniques for model optimization. Finally, we evaluate the ROM and RAM capacity, accuracy, and execution time, demonstrating the feasibility of the proposed method.

1. まえがき

近年、深層学習技術がセンシングのアルゴリズムに適用され始めている。深層学習の長所は、高精度化とノイズに対するロバスト性である。深層学習を利用することで、複雑なデータパターンの自動抽出による精度の高い認識や、ノイズの多い環境や多様なデータにも適応してノイズに惑わされない認識を実現できる。深層学習センシングは、自動運転車両における画像認識や、スマートスピーカーにおける音声認識などに適用されている。

オムロンはセンシングをコア技術の一つに掲げており、これまで多数のセンサ商品を創出してきた。画像センサの

ような大容量の信号を扱う複雑な商品もあるが、単純な一次元の信号を扱うシンプルなセンサ商品も多く存在している。シンプルなセンサにおいては、製品価格を高額にできないというコストの観点からハードウェアに制約があり、深層学習のような大規模なアルゴリズムを搭載することは難しい。

一方で、シンプルなセンサ商品においても、認識精度の向上やノイズ適応性を高めることは常に望まれている。そこで我々は、この深層学習を単純な一次元の信号を扱うセンサに搭載することで、低コストでセンシング精度をさらに改善することを目的として検討を行うこととした。

深層学習には「学習」と「推論」の2つのフェーズがあるが、一般に学習機能は推論機能に比べてアルゴリズムが

Contact : KOGAWARA Toru toru.kogawara@omron.com

複雑であり、必要とするメモリ容量や計算量が大きい。ハードウェア制約が厳しいことを考慮し、まず推論機能のみをセンサに搭載することから検討を開始する。

従って本稿での実現性検討の流れは、まずアルゴリズム開発環境で深層学習モデルを開発して学習させた後、そのモデルをセンサに搭載して計測・推論を実行させる、とする。図 1 に本稿で検討する深層学習センシング開発の構成を示す。

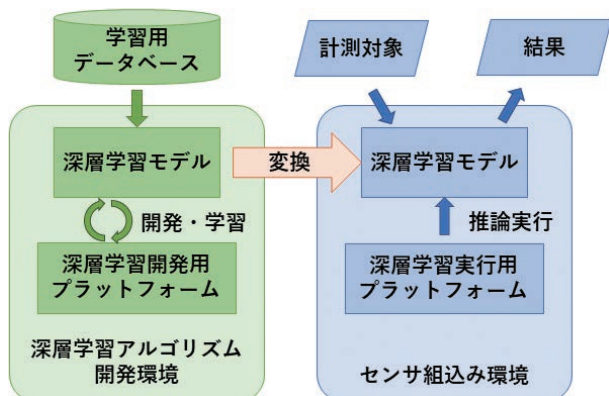


図 1 本稿で検討する深層学習センシング開発

本稿では、まず深層学習の開発用プラットフォームと実行用プラットフォームについて説明し、選定を行う。その後、開発環境での深層学習モデルをセンサ組み込み環境用に変換する手法と、モデルを軽量化する手法について説明する。最後に、提案手法の評価のため、実装例として血圧計を使用してハードウェアリソース使用量や実行時間、精度などの結果を示す。

以上で述べた一連の流れを図 2 に示す。図中の吹き出しに付された「2.1」等の番号は、本稿の項目番号と対応している。

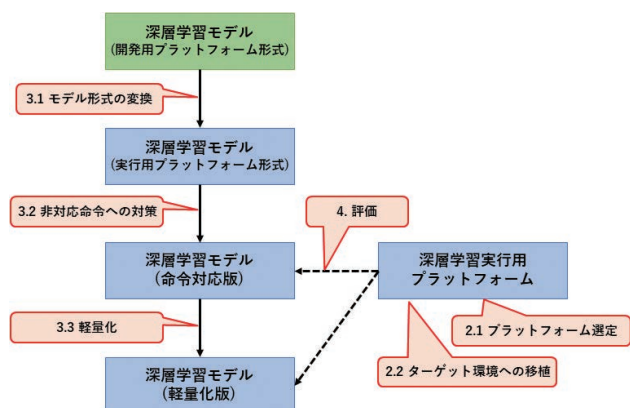


図 2 本稿での検討の流れ

2. プラットフォーム

深層学習アルゴリズムを開発する際には、まず深層学習

プラットフォームを選定し、そのプラットフォーム上で動作するようにモデルを記述して学習させることでアルゴリズムを開発する。

開発したモデルを組み込み環境で動作させるためには、組み込み環境で動作するプラットフォームが別途必要になる。

2.1 深層学習開発用プラットフォーム

深層学習アルゴリズムを開発するためのプラットフォームの実例を表 1 にて説明する。

表 1 代表的な深層学習開発用プラットフォーム

プラットフォーム名	特徴
PyTorch	Facebook が開発したオープンソースライブラリ。代表的な深層学習開発プラットフォームの一つ。直感的にモデルを構築できる特徴があり、学術研究で多く用いられている。
TensorFlow (Keras)	Google が開発したオープンソースライブラリ。代表的な深層学習開発プラットフォームの一つ。TensorFlow に高レベル API を追加した Keras というプラットフォームもある。モデルのデプロイや管理等に関する周辺ツールが豊富。
TensorFlow Lite (以下 TFLite と略記)	TensorFlow を軽量化し、モバイル・エッジデバイス向けに最適化したもの。TensorFlow の命令のサブセットに対応。2024 年 9 月に LiteRT に改称した。
TVM	Apache が開発しているオープンソースの深層学習プラットフォーム。異なるハードウェアプラットフォームに対して最適化されたコードを生成できる。

本稿では、モデル構築や学習の容易さを重視し、PyTorch を採用した。

2.2 組み込み環境プラットフォーム

深層学習アルゴリズム・モデルを組み込み環境で動作させるためのプラットフォームにどのようなものがあるか調査し、選定を行う。本稿では深層学習をシンプルなセンサに搭載することを目的としている。実装例として血圧計を想定していることも考慮し、以下の 2 点を選定基準とする。

- ・シンプルなセンサにおいては設計におけるコスト制約が厳しいため、ハードウェアの選定において制約が少ないこと。
- ・Linux 等の高機能な OS を搭載できないような小規模なマイコンでも動作すること。

以上の基準でプラットフォームを調査した結果を表 2 に示す。

表 2 組込み用プラットフォーム調査結果

プラットフォーム名	特徴
TensorFlow Lite for Microcontrollers (以下、TFLM と略記)	TFLite をさらに組込みマイコン上で動作できるまで軽量化したオープンソースライブラリ。利用できるメモリサイズが数 kB のマイコンまで想定しており、対応命令も TFLite のさらにサブセットとなっている。モデル実行機能だけを持っており、再学習機能は持たない。
microTVM	TVM モデルを組込みマイコン上で動作させるオープンソースライブラリ。OS を搭載しないマイコンまで想定している。まだ開発中であり、今後大きな変更が予想される。
Edge Impulse	Edge Impulse 社の商用ソリューション。モデルの開発・学習機能から組込みデバイスへのデプロイまで総合的な機能を持つ。C 言語ソースコードとして出力し、他のソフトウェアに組込むことも可能。
STM32 X-CUBE-AI	STMicro 社のマイコン STM32 シリーズ統合開発環境の無償プラグイン。他のプラットフォームで開発されたモデルを取り込み、高効率な C 言語コードに変換する。モデルの実行機能だけを持っている。

microTVM と TFLM の 2 つが、先に挙げた選定条件を満たしている。ただし microTVM は大きな変更が予想されるため、検討結果が将来に活かさない可能性がある。よって本稿では TFLM を選定する。

2.3 ターゲットの選定

最終目的である小規模なハードウェアに、最初から実装するには技術的な困難が予想される。そこで、小規模なものから大規模なものまでバリエーションのあるマイコンファミリーの中で、比較的ハードウェアが大規模なものを使って実装検討を行うものとした。まずは大規模なマイコンで実装に成功した後で、小規模なマイコンに搭載できるような軽量化を検討することで、実現性の検討を容易にするためである。

本稿では、バリエーションの幅が広い STM32 ファミリーの中から、評価ボード STM32F769I-DISCO を採用する。このボードは STM32 ファミリーでは上位のマイコンを搭載しており、マイコン内蔵メモリに加えて外部 Flash

メモリと SDRAM を搭載しているため、組込み環境に最適化する前でも動作することが期待できる。選定したターゲットの詳細仕様を表 3 に示す。

表 3 実装ターゲットの仕様

項目	仕様	
ボード名	STM32F769I-DISCO	
マイコン	STM32F769NIH6	
CPU コア	Arm Cortex-M7 216 MHz	
内蔵 Flash メモリ	2 MB	ROM 合計 66 MB
外部 Flash メモリ	64 MB	
内蔵 RAM	512 kB	RAM 合計 16.5 MB
外部 SDRAM	16 MB	

2.4 移植実行

本稿で採用した TFLM はソースコードで提供されているため、ユーザが使用する環境に合わせてコンパイル・ビルドする必要がある。本稿の検討では、Cortex-M7 用の静的ライブラリとしてビルドし、アプリケーションに静的リンクして用いる。TFLM を利用する場合のソフトウェア構成を図 3 に示す。

TFLM ライブラリは、TFLite 形式モデルのインタープリタとして働き、モデルの記述を逐次翻訳して一階層ずつ計算を進める。

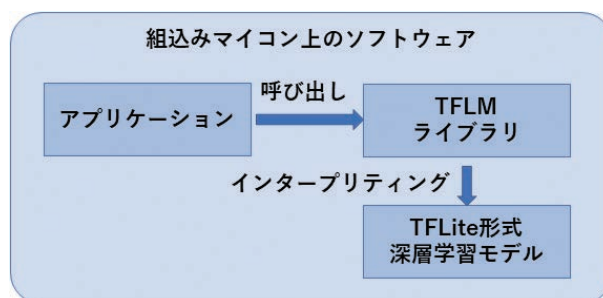


図 3 TFLM ライブラリ使用時のソフトウェア構成

3. モデル

深層学習アルゴリズムのモデルを表現する形式は、複数存在している。一つのプラットフォームが複数のモデル形式に対応していることが多く、またモデル形式を相互に変換するツールも存在している。

3.1 使用するモデル形式と変換ツールの選定

本稿で用いる深層学習モデルは、PyTorch 上で開発されたモデルである。そのモデルを TFLM 上で実行するため、モデル形式の変換が必要となる。

3.1.1 モデル形式

代表的な深層学習モデルを表 4 に示す。

表 4 代表的な深層学習モデル

プラットフォーム名	特徴
PyTorch Saved Model	PyTorch で開発したモデルの情報。各レイヤーの形式や重み情報は保存されているが、レイヤー間の接続は Python プログラム側に記述されるため、PyTorch 上でしか利用できない。
ONNX	Open Neural Network eXchange の略で、様々なプラットフォームで利用可能になっているオープンな形式。モデル構造と重み情報の両方が保存される。
TensorFlow	TensorFlow で開発したモデルの情報。ONNX と同様、モデル構造と重み情報の両方が保存される。
TFLite	TensorFlow のモデル情報を TFLite 命令に置き換え、Flatbuffers (Google が開発したシリアル化ライブラリ) を利用してサイズを圧縮した形式。

上記のモデル形式と、2.1、2.2 に示したプラットフォームとの対応を表 5 に示す。

表 5 プラットフォームとモデルの対応表

プラットフォーム モデル形式	PyTorch Saved Model	ONNX	TensorFlow	TFLite
PyTorch	○	○		
TensorFlow			○	
TFLite, TFLM				○
TVM		○	○	
Edge Impulse		○	○	○
STM32 X-CUBE-AI		○		○

3.1.2 変換ツールの選定

現在使用されている深層学習モデルのモデル形式を変換するツールは、複数存在する。モデル形式間の変換可否とそのツールを表 6 に示す。

表 6 モデル形式の相互変換表

変換先形式 変換元形式	PyTorch Saved Model	ONNX	TensorFlow	TFLite
PyTorch Saved Model		(1)		
ONNX	(1)		(2) (4)	(2)
TensorFlow				(3)
TFLite				

- (1) PyTorch で ONNX インポート／エクスポート可能
(2) オープンソースソフトウェア `onnx2tf`⁽¹⁾
(3) TensorFlow 公式配布の TensorFlow Lite Converter⁽²⁾
(4) ONNX コミュニティ配布の `onnx-tensorflow`⁽³⁾

本稿では、PyTorch で開発した深層学習モデルを TFLite 形式に変換する。この場合、以下の 2 つの経路が考えられる。

- A) (1)→(2) : PyTorch にて ONNX 形式でエクスポートした後、`onnx2tf` で TFLite 形式に変換
B) (1)→(4)→(3) : PyTorch にて ONNX 形式でエクスポートした後、`onnx-tensorflow` で TensorFlow 形式に変換し、さらに TensorFlow Lite Converter で TFLite 形式に変換

このうち、B) の経路で使用する `onnx-tensorflow` は最終更新が 2022 年 11 月であり、本稿執筆時点 (2024 年 11 月) でも 2 年近く更新が無い。つまり ONNX や TensorFlow の最新の機能を利用することができないという短所がある。

よって本稿では、A) の経路でモデルの変換を行うこととする。ただし `onnx2tf` は全ての ONNX 命令に対応していないわけではない。ONNX モデルに `onnx2tf` が未対応の命令が使用されている場合、エラーとなり変換できないため、何らかの対策が必要となる。この詳細は、次の 3.2 で説明する。

3.2 非対応命令への対策

3.1.2 で触れたように、ONNX の命令によっては `onnx2tf` が未対応であり、TFLite 形式に変換できない場合がある。

また、TFLite 形式に変換できたとしても、TFLM は全ての TFLite 命令に対応しているわけではない。変換した TFLite モデルに TFLM 未対応命令が含まれる場合、プログラム実行時にエラーとなる。

このような障害と、その対策案について概要を図 4 に示

し、詳細を説明する。図中の吹き出しに付された「3.2.1」等の番号は、本稿の項目番号と対応している。

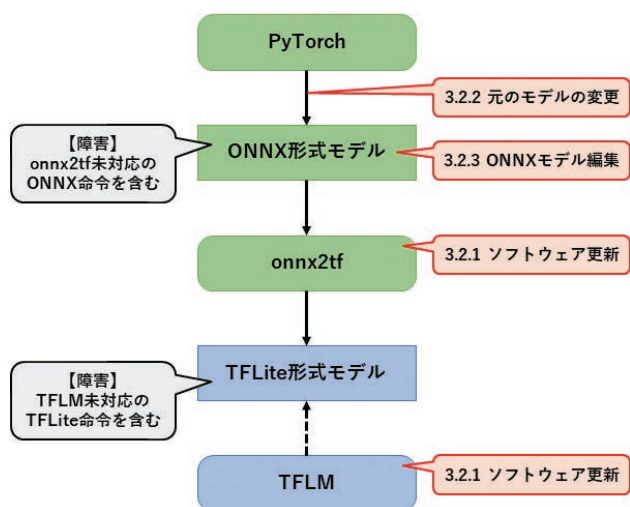


図4 非対応命令による障害と対策

3.2.1 ソフトウェアの更新

onnx2tf も TFLM も、活発に開発が継続されているオープンソースソフトウェアである。あるバージョンでは未対応だった命令が、数か月後には動作可能になっていたり、別の単純な命令に変換されるようになっていたりすることがある。定期的にソフトウェアのアップデート情報を参照し、状況が変化していないかを確認する必要がある。

ソフトウェアアップデートによってモデル変換や動作が可能になっていれば、それが最善の対策となる。

3.2.2 変換前モデルの使用命令を変更

変換後のモデル形式では非対応な命令を使用している場合、変換前のモデルで使用する命令を別のものに変更することで、変換後のモデル形式でも対応している命令になるように改善することができる。

ニューラルネットワークの活性化関数 SELU を ReLU に置き換えた事例を示す。

ReLU (Rectified Linear Unit) は、深層学習の中間層の活性化関数として一般的に用いられている。深層学習の精度を向上させるための工夫として、ReLU の代わりに SELU (Scaled Exponential Linear Unit) が考案された。本稿で対象とするアルゴリズムも、SELU を用いて開発された。図5に各活性化関数の入出力を示す。

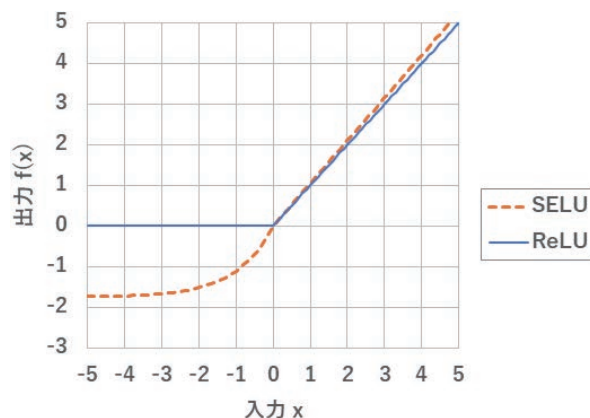


図5 活性化関数 SELU と ReLU

図5に示した通り、SELU と ReLU の出力が大きく異なるのは入力 x が負の場合のみである。この差異により、深層学習モデルとしては SELUの方がわずかに高い精度を示す場合がある⁴⁾。

しかし、TFLite は SELU に相当する命令を持たない。そのため、SELU 命令を用いた ONNX モデルを onnx2tf で変換する際、onnx2tfは複数の命令を組み合わせることで SELU と同等の計算をするモデルを生成する（図6参照）。計算結果は等価になるものの、計算時間もメモリ使用量も非常に大きくなってしまふ。

対策として、PyTorch でのアルゴリズム開発時点で活性化関数に SELU ではなく、TFLite も対応している ReLU を使用するように変更する。深層学習アルゴリズムの精度はわずかに低下する可能性があるが、ONNX 形式を経由して TFLite 形式に変換した際も ReLU 命令のままであり、計算時間もメモリ使用量も大きく節約できる（図7参照）。

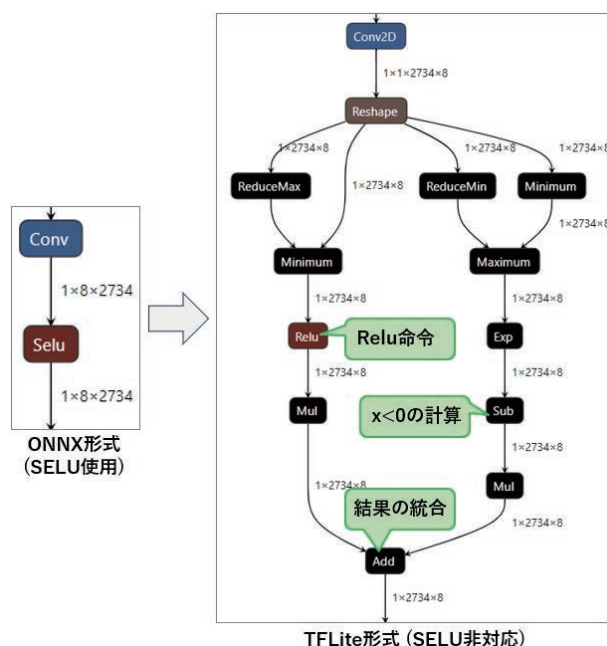


図6 SELU 命令の TFLite 変換

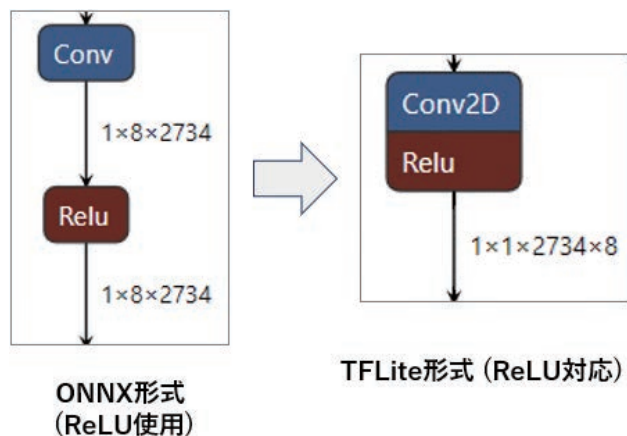


図7 ReLU 命令の TFLite 変換

3.2.3 ONNX モデルの編集

PyTorch から出力された ONNX 形式モデルの中に、onnx2tf が未対応のため変換できない命令が含まれており、なおかつ PyTorch モデルの変更ではこの問題を解決できない場合がある。

この未対応命令を、動作に互換性がある onnx2tf が対応している別の ONNX 命令に置き換えることで、onnx2tf での変換が可能となる。

例として、PyTorch の MultiHeadAttention 命令を ONNX 形式で出力した際の冒頭部分のモデルを図 8 に示す。ONNX は MultiHeadAttention 命令に対応していないため、多数の命令を組み合わせたモデルが出力されるが、この中で用いられている ATen::unflatten 命令に onnx2tf は未対応であるため、TFLite 形式に変換できない。

ATen::unflatten 命令は、多次元配列に対して“dim”で指定された 1 つの次元を、“size”で指定された次元と大きさに変換する命令である。これは ONNX や TFLite で標準的な Reshape 命令でも同じ動作を実現できるため、図 9 のように Reshape 命令に置き換えれば、動作を保ったまま onnx2tf で変換できるようになる。

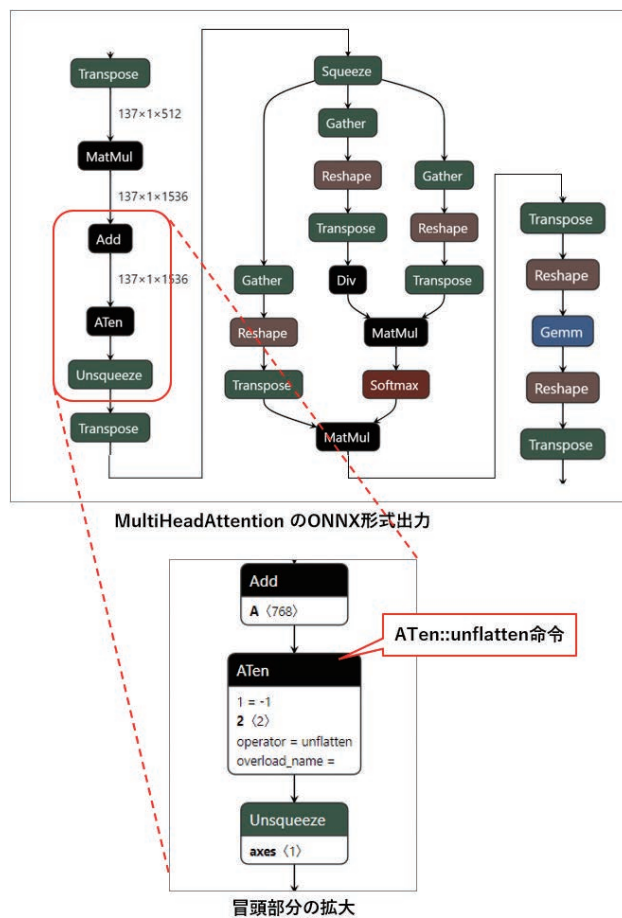


図8 MultiHeadAttention の ONNX 形式出力

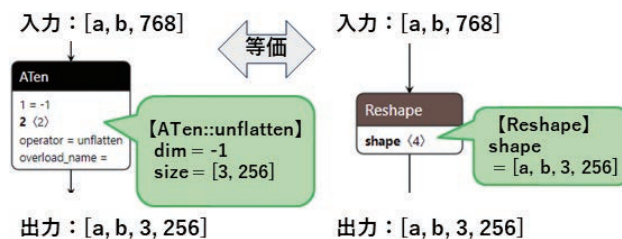


図9 ATen::unflatten 命令と等価な Reshape 命令

ONNX モデルを編集するには、protocol buffer compiler⁵⁾ (以下 protoc) というソフトウェアを利用する。protoc を使って ONNX モデルをテキストファイルに変換し、テキストファイル上で命令を書き換え、再度 protoc を使って ONNX モデルに変換しなおす。手順を図 10 に示す。

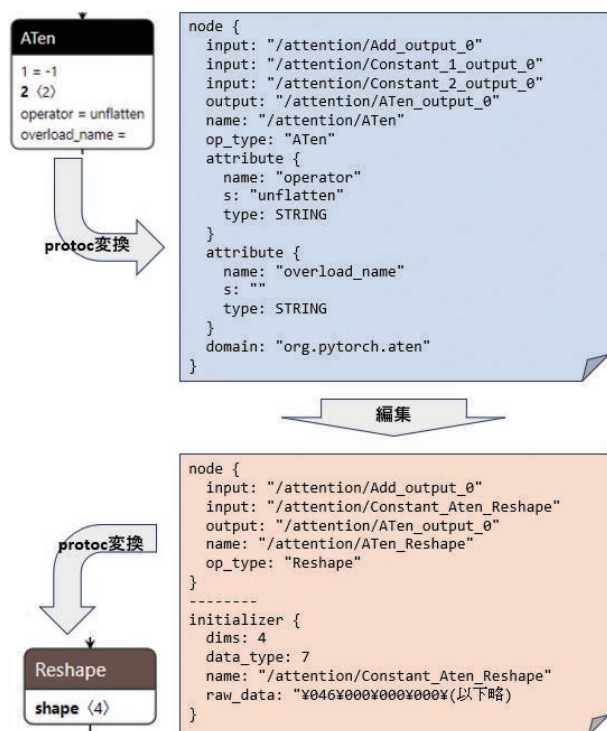


図 10 ONNX モデル編集フロー

3.3 軽量化

3.1、3.2 の工程を経て組込み環境に合わせたモデルが完成したが、組込み環境では ROM・RAM 容量に制約があるため、そのままでは動作しない場合がある。

ROM 容量とはプログラム実行時には値が固定された領域のことであり、プログラムコードやモデルのデータを格納する。特にモデルのデータ、その中でもニューラルネットワークのニューロンごとの重みデータが、ROM 容量の大部分を占めることになる。例えば全結合層 (Linear, FullyConnected 等) では、「入力ノード数×出力ノード数」分の重みデータの容量が必要となる。

また RAM 容量とは、プログラム実行中の途中計算に用いる領域のことである。例えば畳み込み計算 (Convolution) を使用する場合、「入力データ数×フィルタサイズ×チャンネル数」分のデータを途中計算として RAM 上に保持する必要がある。ニューラルネットワークの一階層分ごとにまとめて計算するため、一階層の計算量が多いモデルほど大量の RAM を必要とすることになる。

これらの ROM 必要量・RAM 必要量が、組込み環境で利用できる ROM 容量・RAM 容量に収まらない場合、モデルを軽量化する必要がある。以下にその手法を示す。

3.3.1 ハイパーパラメータチューニング

モデルの各階層の大きさなどを指定するパラメータを、「ハイパーパラメータ」と呼ぶ。ハイパーパラメータの調整は、深層学習アルゴリズムの開発の中でも重要な位置を

占める。ハイパーパラメータの設定によりモデルのサイズは変化し、同時に精度も変化する。モデルのサイズを大きくしても必ずしも精度が向上するとは限らず、サイズと精度がバランスする組み合わせを探索する必要がある。

ハイパーパラメータのチューニングは、深層学習アルゴリズム開発環境で実施する。自動探索ツール Optuna⁶⁾ を用いて、各パラメータの候補の組合せを変えて再学習・評価を繰り返し、より精度の高くなる組み合わせを探索する。

例として、深層学習アルゴリズムの 10 個のハイパーパラメータに対し、それぞれ 3～5 通り程度の選択肢を与えて探索を行った。その探索結果において「ある組み合わせについて、よりサイズが小さく、かつ精度の高い結果は存在しない」という解が複数得られる。チューニングをモデルサイズと精度の最適化問題と捉えると、これらはパレート解と呼ばれる。実測値とパレート解を図 11 に示す。パレート解の中から、モデルサイズや精度の要件を満たすチューニング結果を選定する。

こうして得られたチューニング結果に対し、再度 3.1、3.2 の工程を繰り返し、組込み環境に搭載可能なモデルを得る。

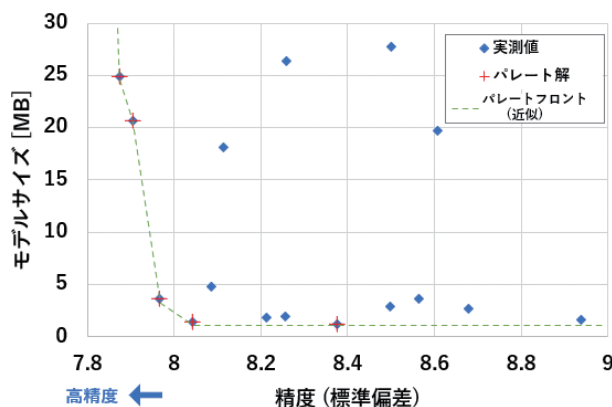


図 11 探索時のモデルサイズと精度

3.3.2 モデル量子化

深層学習モデルの軽量化において一般的な手法として、重みデータの量子化がある。量子化とは、浮動小数点数を固定小数点化し、低ビット数の整数型で表現することで計算量とメモリ使用量を削減することである。

深層学習モデルの量子化は、3.1 に挙げたモデルの変換時にオプションを指定することで実施する。入力データ群を与えることでニューラルネットワークの各層の数値範囲を自動的に計算し、その範囲にデータを収めて整数化するような命令が付与される。図 12 に概念図を示す。

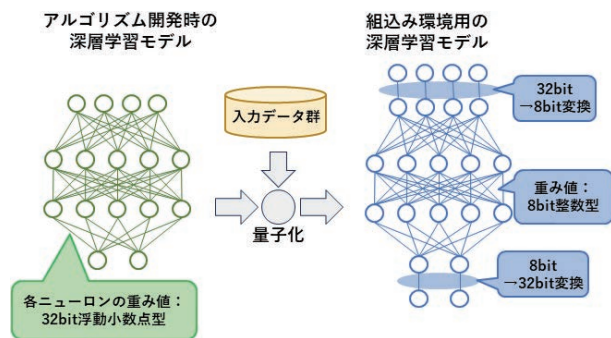


図 12 モデル変換時の量子化の概念図

32 bit→8 bit への量子化の場合、モデルサイズはおよそ 1/4 にまで縮小できる。この方法はアルゴリズムに影響を与えない一方で、アルゴリズムが量子化に最適化されないため、精度面に課題がある。

4. 評価

2 章、3 章で説明した深層学習モデルの組み込み手法を、実際のセンサ商品を想定したアルゴリズムとハードウェアに対して実施し、手法の是非を評価する。

4.1 評価対象

想定商品として血圧計を例とする。血圧計は腕帯（カフ）を膨張させて血管を圧迫することで得られる「カフ圧」と、心収縮の際に生じる波動である「脈波」という 2 組の一次元の時系列データを入力とし、「最高血圧値（収縮期血圧値）」と「最低血圧値（拡張期血圧値）」という 2 つの数値を出力とするセンサである。加圧式の血圧計の場合、カフ圧と脈波それぞれの入力とは図 13 に示すグラフのようになる。

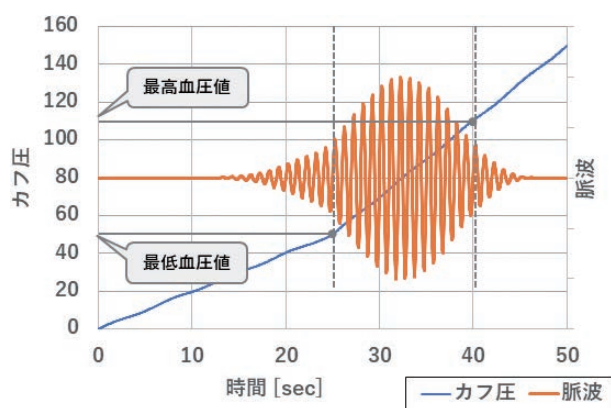


図 13 血圧計の入力と出力

血圧計は一般的に、PC 等に比べて製品価格を抑える必要があるため、PC の CPU より何桁も低容量・低速のマイコンで制御されている。そのため PC 上で開発した深層学習アルゴリズムをそのまま載せるのは困難であるという

ハードウェア的制約がある。2.3 で選定した実装ターゲットのハードウェア仕様を抜粋し、表 7 に再掲する。

表 7 評価環境のハードウェア仕様

項目	仕様	備考
CPU コア	Cortex-M7	FPU 内蔵
クロック周波数	216 MHz	
Flash ROM 容量	66 MB	内蔵 2 MB、外付 64 MB
RAM 容量	16.5 MB	内蔵 532 kB、外付 16 MB

評価対象のモデルは以下の 3 種を用意する。

i. サイズ無視モデル

アルゴリズム開発環境で、精度を最重要視して開発したモデル。3.3.1 のハイパーパラメータチューニング結果にて、最も精度の高かったモデルを選定する。

ii. サイズと精度のバランスモデル

3.3.1 のチューニング結果から、サイズと精度のバランスを取って選定したモデル。

4.2 に示した評価基準のうちの「誤差の標準偏差」が基準を満たす範囲で、最もサイズが小さいモデルを選定する。

iii. 量子化モデル

上記のバランスモデルに対し、3.3.2 の手法にて量子化を行ったモデル。

上記の各モデルと、パラメータチューニング結果との対応を図 14 に示す。

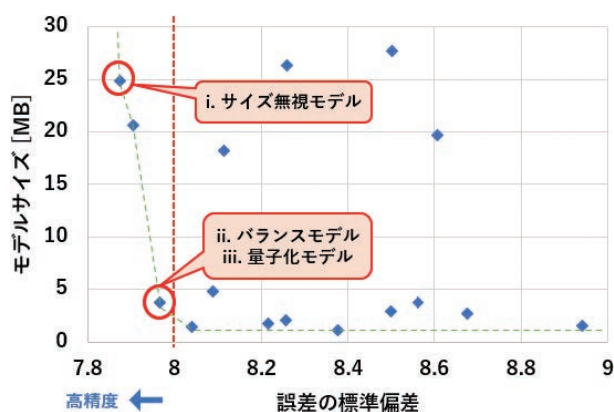


図 14 評価対象モデルとチューニング結果の対応

4.2 評価基準

4.1 で示した i、ii、iii、の各モデルに対して、以下の指標に対して評価を行う。

- ・ MAE (平均絶対誤差)
精度の指標の一つ。血圧計の国際規格⁷⁾によれば、5 未満が求められる。
- ・ SDE (誤差の標準偏差)
精度の指標の一つ。血圧計の国際規格⁷⁾によれば、8 未満が求められる。
- ・ 実行時間
測定データから血圧値を算出するまでの時間。市販の血圧計において、測定終了から血圧値表示までの時間が 3 秒程度であったので、3 秒未満で実行できることが望ましい。
- ・ ROM 容量
- ・ RAM 容量

4.3 評価方法と評価結果

テスト用の脈波とカフ圧のデータ約 500 組を入力して深層学習モデルにより推定を行い、最高血圧値において出力値と真値の誤差を算出した。その模式図を図 15 に示す。

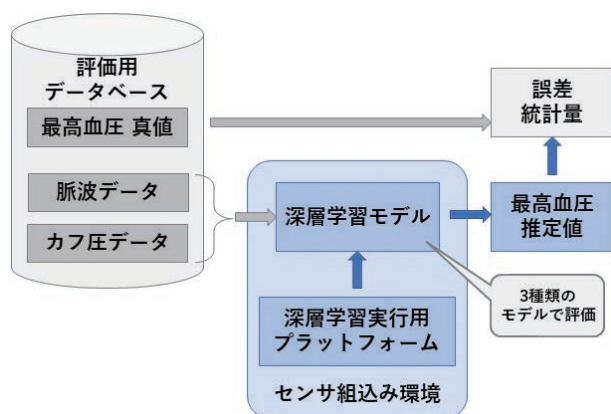


図 15 評価方法

3 種類の評価対象に対して実行した結果を表 8 に示す。

表 8 評価結果

指標	ハイパーパラメータチューニングモデル		iii. 量子化モデル
	i. サイズ無視	ii. バランス	
精度 (MAE)	6.66	6.74	8.16
精度 (SDE)	7.83	7.97	10.71
実行時間 [ms]	12,214	1,938	348
ROM 容量 [MB]	18.37	3.72	0.98
RAM 容量 [kB]	663.4	221.0	63.7

- ・ サイズ無視モデルでは、精度の評価はアルゴ開発環境で実施した。ROM 容量・RAM 容量は大きいものの今

回のターゲットに実装できる範囲内だったため、ターゲット上でも実行可能であった。しかし、時間が 12 秒超と血圧計として実用に耐えない速度であった。

- ・ サイズと精度のバランスを取ったモデルでは、ROM 容量は 2 MB を超えるため外付け Flash ROM が必要となるが、RAM 容量は 221 kB でマイコン内蔵 RAM だけで実行できるサイズとなった。また、実行時間も 2 秒以内と現行の市販品より短く、許容可能な速度であった。
- ・ 量子化モデルでは、ROM 容量 0.98 MB、RAM 容量 63.7 kB でどちらもマイコン内蔵メモリの範囲内であるとともに、実行時間も 348 ms (0.348 秒) と実用的な速度で実行できた。精度については大きく劣化し、血圧計の国際規格 SDE<8 を満たさなくなっている。
- ・ すべてのモデルで、平均絶対誤差の指標 MAE<5 を満たしていない。本稿の目的は従来技術からの精度向上ではなく、深層学習技術が組み込み可能であることを示すことであるため、この指標を満たさなくても本稿の目的は達せられる。

以上より、深層学習アルゴリズムを、血圧計を想定した組み込み環境で動作させることを実現できた。また、量子化を行うことで実行時間と ROM・RAM 容量を大きく削減できることが分かった。

5. むすび

5.1 本稿での到達点

本稿では、深層学習アルゴリズムを組み込み環境で実行するための手順を確立した。

深層学習アルゴリズム開発環境である PyTorch で開発された深層学習モデルを、組み込み用の深層学習アルゴリズムの実行環境である TensorFlow Lite for Microcontrollers 向けに変換し、変換時に発生する幾つかの問題に対して具体的な解決手段を示した。また、組み込み環境の要求であるメモリや実行時間の制約に応えられるよう、モデルの軽量化の手段についても、ハイパーパラメータチューニングとモデル量子化の 2 つの手段を示した。最後に、マイコン上で軽量化したモデルを実行し、組み込み環境での深層学習アルゴリズム動作の実現性があることを示した。

本稿の 3 章で示した手順は、様々な開発に適用可能である。本稿では血圧計を事例として実装検討を行い、一定の実現性があることを検証した。血圧計に限らず、一次元のデータ列に対して信号処理を行うようなセンサに対して、同様に深層学習アルゴリズムを適用できる可能性がある。候補として、例えば光や温度など物理量を計測するセンサが考えられる。

5.2 今後の課題

ハイパーパラメータチューニングでは、精度をある程度保つことはできたものの、マイコン内蔵メモリの範囲内に収めるには至らず、改善の余地がある。

量子化では、本稿の手法では精度を大きく落とした。量子化しつつ精度を保つ手段として、例えば開発環境でモデルに学習させる時点から量子化した状態で進め、量子化した状態で精度を保つように開発するという手法がある。今後の実用化に向け、サイズ削減と精度の両立に向けて検討を継続する。

参考文献

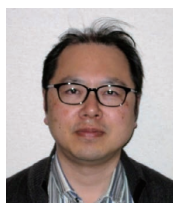
- 1) Katsuya Hyodo. “onnx2tf.” GitHub. <https://github.com/PINTO0309/onnx2tf> (Accessed: Nov. 1, 2024).
- 2) Google. “TensorFlow Lite コンバータ.” TensorFlow. <https://www.tensorflow.org/lite/convert?hl=ja> (Accessed: Nov.1, 2024).
- 3) Open Neural Network Exchange. “TensorFlow Backend for ONNX.” GitHub. <https://github.com/onnx/onnx-tensorflow> (Accessed: Nov. 1, 2024).
- 4) Dabal Pedamonti. “Comparison of non-linear activation functions for deep neural networks on MNIST classification task.” arXiv. <https://arxiv.org/abs/1804.02763> (Accessed: Apr. 8, 2018).
- 5) Google. “Protocol Buffers - Google’s data interchange format.” GitHub. <https://github.com/protocolbuffers/protobuf> (Accessed: Nov. 5, 2024).
- 6) T. Akiba et al., “Optuna: A Next-generation Hyperparameter Optimization Framework,” in *Proc. ACM SIGKDD Int. Conf. Knowl. Discovery Data Min.*, 2019, pp. 2623–2631.
- 7) *Non-invasive sphygmomanometers - Part 2: Clinical investigation of intermittent automated measurement type*, ISO 81060-2, 2018.

執筆者紹介



小河原 徹 KOGAWARA Toru

技術・知財本部
アドバンステクノロジーセンタ
アドバンステクノロジー開発部
専門：ソフトウェア科学
所属学会：システム制御情報学会



渡辺 泰久 WATANABE Yasuhisa

技術・知財本部
アドバンステクノロジーセンタ
専門：ソフトウェア科学
所属学会：電子情報通信学会、システム制御情報学会、計測自動制御学会

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

1

オムロンの成長領域で イノベーションを生み出す技術

ー 1. ファクトリーオートメーションー



オープン標準（OPC UA, PackML）を活用した標準化とカスタマイズの両立実現

小川 喜明, 高橋 稔, 澤田 成憲, 植木 琢也

近年の製造業において、製造のためのデータ（情報）を標準化し、設計や保守を統一化することで生産性を上げる等の取り組みは各所で行われている。その一方で、価値創出や競合優位性の強化のためのカスタマイズ（独自仕様化）は、その目的の重要性故に様々な局面で行われている。このことは必然的に標準化と相反する方向であり、その両立が課題である。

上記課題を解決するために我々は、オープン標準である OPC UA (OPC Unified Architecture)¹⁻³⁾ や PackML (Packaging Machine Language)⁴⁻⁶⁾ を用いて、製造現場で情報の重要なハブ（中心）となるコントローラ上において情報の標準化を簡単に実現できる製品と、カスタマイズが実現できる複数の手法を開発した。これらにより、情報の標準化とカスタマイズが両立し、かつ、情報の分離を強化した。

本稿では上記の取り組みの詳細について説明する。また、この取り組みに基づき、同様の取り組みを他のオープン標準の使用時や個別顧客対応などのケースへも広げていくことを提案する。

Realization to Achieve Both Standardization and Customization with Open Standards (OPC UA, PackML)

OGAWA Yoshiaki, TAKAHASHI Minoru, SAWADA Shigenori and UEKI Takuya

In recent years, many efforts have been made to increase productivity by standardizing manufacturing data (information) and unifying the design and maintenance in the manufacturing industry. On the other hand, customization (unique specifications or vendor-specific specifications) to create value and strengthen competitive advantage is carried out in various aspects due to the importance of its purpose. However, this is contradictory to standardization and the way to achieve both (standardization and customization) has become an issue now.

In order to solve the issue mentioned above, open standards OPC UA (OPC Unified Architecture)¹⁻³⁾ and PackML (Packaging Machine Language)⁴⁻⁶⁾ have been used to develop a product that can easily standardize information on the Controller which serves as an important hub (center) of information at the manufacturing site, as well as several methods that can customize. These have made it possible to both standardize and customize the information and to strengthen the separation of information.

The details of the above approaches are explained in this paper, which can be applicable to cases such as the use of other open standards and individual customer support.

1. まえがき

近年の製造現場においては、生産性の持続的な向上や、資源の有効活用などを目指し、情報の標準化が各社・ベンダ・業界・国・経済圏等のレベルの内外において進められている⁷⁻¹⁰⁾。図1に製造システムにおける標準化の例を示

す。

一方で、各社・ベンダ・業界・国・経済圏等は、価値創出や競合優位性等を維持するために、各々の暗黙知を含むコアコンピタンスを、カスタマイズされた情報という形で各々固有の仕様として扱おうとする。

図2に製造システムにおける独自仕様や標準化を望ましい例を示す。

Contact : OGAWA Yoshiaki yoshiaki.ogawa@omron.com

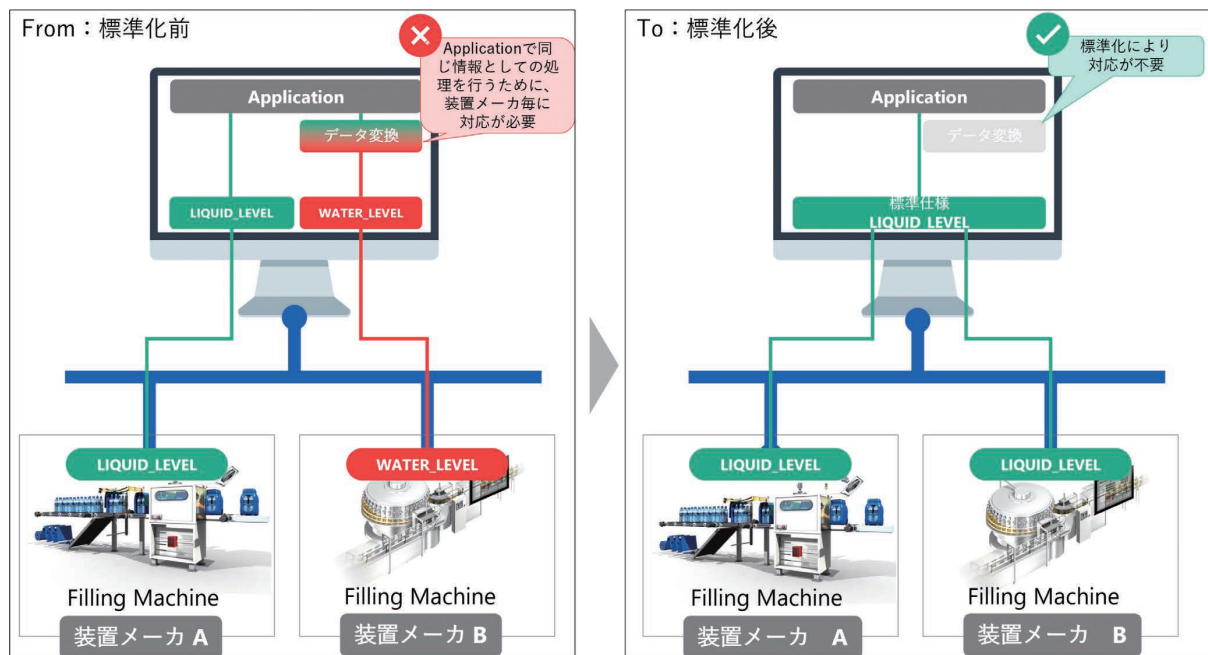


図1 製造システムにおける標準化の例

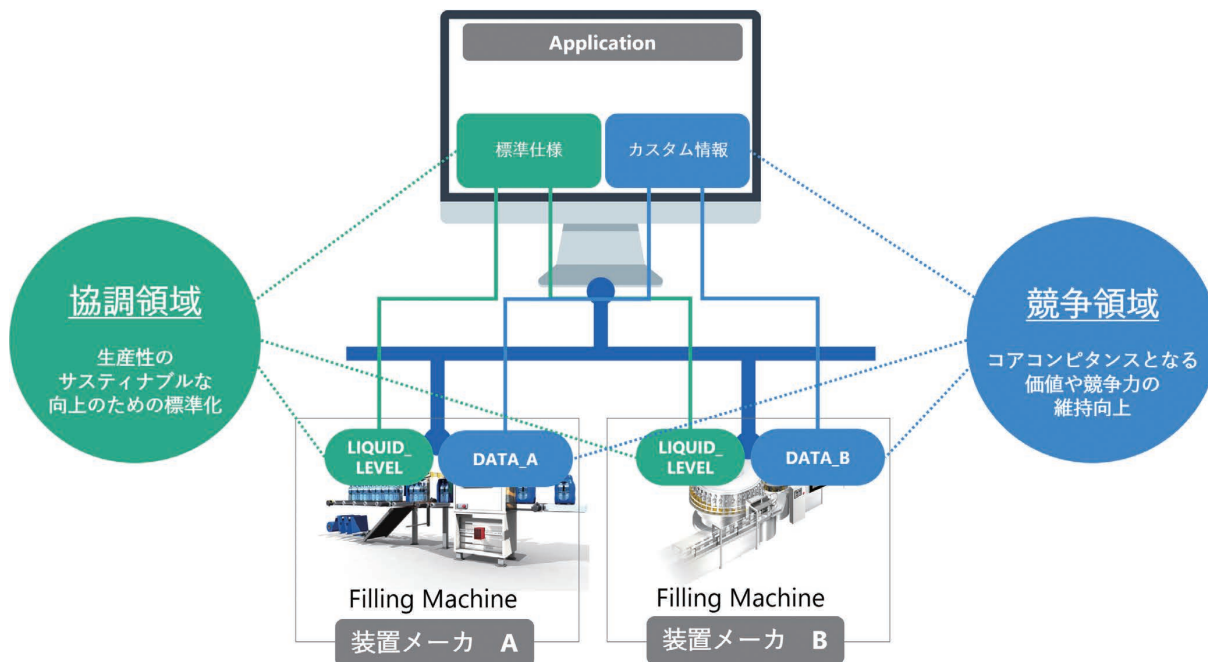


図2 製造システムにおける独自仕様と標準化を望まないイメージ

これらの両立は従来から取り組まれているものの、例えばベンダにおける設計時において、標準仕様とカスタマイズ部分の切り分けや最適化において課題がある。

上記に対して我々は、製造現場で情報の重要なハブ（中心）となるコントローラ上において、現在、注目を集めているオープン標準規格である OPC UA（IEC62541）や PackML（ANSI/ISA-TR88）を用いて、情報の標準化を簡

単に実現できるライブラリ製品と、カスタマイズが実現できる手法を新たに開発した。

本稿では、2 章で OPC UA や PackML について従来技術における標準化やカスタマイズへの対応について説明する。3 章ではそれらの課題を述べ、4 章では解決方法について述べる。5 章にて考察および今後の課題と展望について述べる。

2. 従来技術における対応

2.1 紹介

OPC UA は、主に IT (Information Technology)-OT (Operational Technology) 間で求められる汎用の通信の標準仕様である。機器の種類やオペレーティングシステム (OS)、メーカーの垣根を越えて、セキュリティが確保された信頼性の高いデータ交換が行えることから Industrie4.0 の標準通信として推奨され、それを契機に世界中で一気に関心が高まっている³⁾。

また、PackML は、機械アプリケーションに特化した標準仕様である。PackML では従来から製造現場レベルの機械の動作・操作・上位システムとのインターフェースを規定していたが、OMAC (Organization for Machine Automation and Control) と OPC Foundation によって OPC UA に適用することが合意され、2018 年に V1.00 仕様が通信の標準仕様として仕様化されている (OPC UA for PackML)⁴⁾。

本章では、従来技術における標準化やカスタマイズへの具体的な対応状況を説明する。

2.2 標準化への対応

2.2.1 OPC UA

OPC UA 仕様では、情報を情報モデルという形で表す。情報モデルは、デバイス・機械・ラインのいわばプロファイルである。デバイス・機械・ラインの特性に合わせた具体的な情報モデルは、コンパニオン仕様と呼ばれている。これら仕様は各業界団体と OPC 協議会のコラボレーションなどの形で標準化が行われている^{3,4)}。コンパニオン仕様は、人間が読みやすい仕様書 (文書) と、データ構造を表す、コンピュータが処理しやすい XML から成り立っている。標準化されたコンパニオン仕様を記述した XML ファイルは、インターネット上などで取得可能となっている。標準化された情報モデル仕様における各情報項目などは、標準仕様の柔軟性担保などのために唯一無二の仕様とはなっておらず、当該項目について Mandatory (必須) や Optional (必須ではない) などの形で実質的に選択可能な仕様となっている¹⁾。

一方、本稿で言うカスタマイズ (独自仕様化) とは、顧客独自の情報モデル定義 (拡張) を指しており、コンパニオン仕様などの情報モデル定義の上に成り立つ。

図 3 に OPC UA における情報モデルの論理的な構成を示す。また、図 4 にコンパニオン仕様について示す。

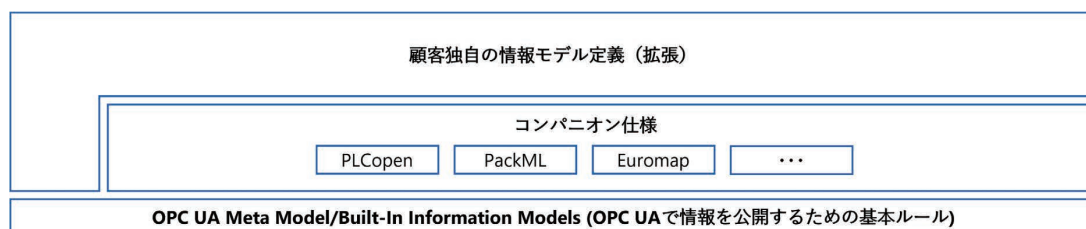


図 3 OPC UA における情報モデルの論理的な構成

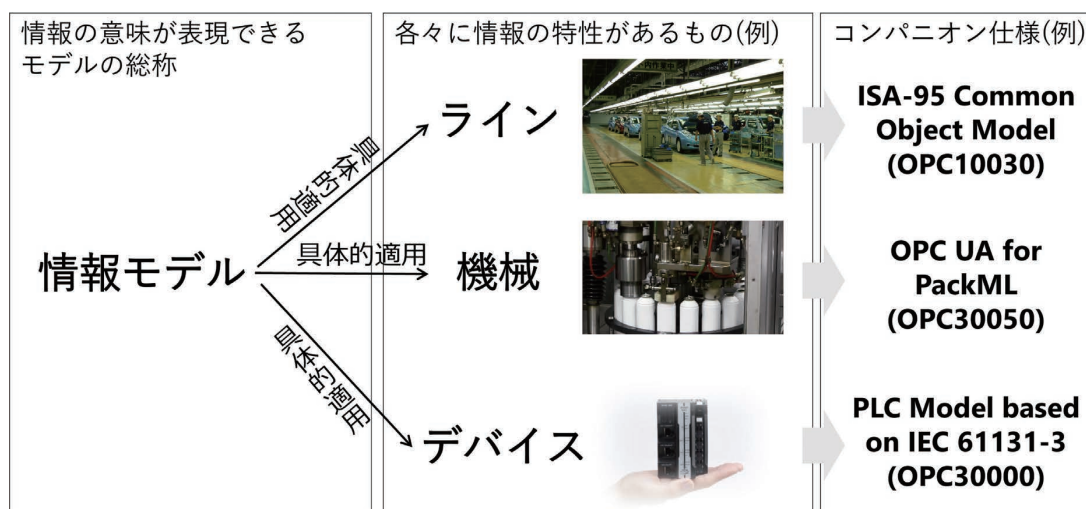


図 4 情報モデルへのコンパニオン仕様適用例

2.2.2 PackML・OPC UA for PackML

PackML 仕様では、制御プログラム構造や機械の運転モードや状態遷移、機械の外部インターフェース（Pack-Tag）などを標準定義している⁴⁾。図5に PackML の状態遷移の例を示す。このうち、主に機械の外部インターフェースを OPC UA 仕様として標準定義したものが OPC UA for

PackML としてコンパニオン仕様化されている。これにより、PackML で標準定義されている情報に国際標準の通信 OPC UA でアクセスできる形となっている⁴⁾。図6に OPC UA for PackML の情報モデルについて示す。

OPC UA for PackML 仕様もコンパニオン仕様であり、その具体的な形は XML ファイルである。このことは前項の

Pack MLでは、機械の動作を下記の標準状態遷移図で定義。
通常、この状態遷移はプログラム構造“UN（Unit）”の階層で制御。

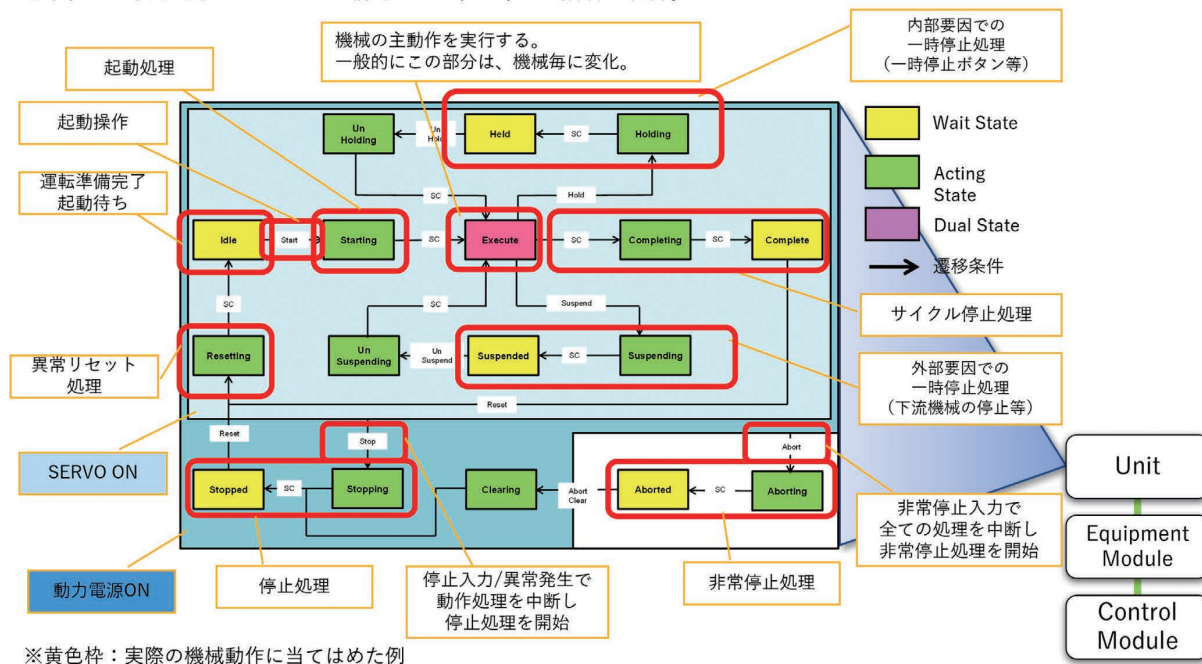


図5 PackML の状態遷移の例

OPC UA for PackMLでは、PackMLで標準定義されている情報(下記例)に、
国際標準の通信OPC UAでアクセスできる

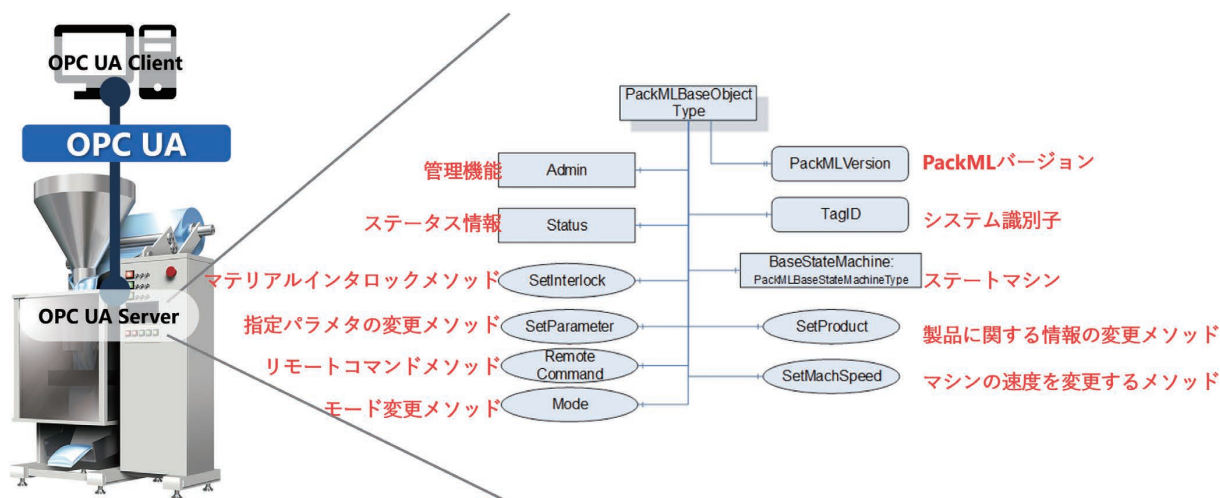


図6 OPC UA for PackML の情報モデル⁴⁾

他のコンパニオン仕様とも同様である。

2.3 カスタマイズへの対応

前節までで OPC UA において、標準化された情報モデルの具体的な形は、多くの場合 XML ファイルとなっていることを述べた。カスタマイズとは具体的にはこの XML への対応となる場合が多い。我々の知見に基づき、この時のカスタマイズには主に以下の 4 種類があると考えている。文脈や要求内容に応じ注意が必要である。

1. 標準化された情報モデル仕様の Optional の選択を指す場合
2. 標準化された情報モデル仕様の定義内容を変えてしまう場合
3. 標準化された情報モデル仕様にはないものを入れ込む場合
4. まったく標準化されていない場合（独自仕様化）

ただし、4. については、論理的にはケースが存在するものの、独自仕様化であれば、従来の技術、製品で十分に実現が可能であり、本稿で言及する標準化にもカスタマイズにも該当しないため、以降は言及しない。

標準化された情報モデルのカスタマイズ要求などに対応するために、各社・ベンダ（機器のみならず、OPC UA の SDK（Software Development Kit）などを提供するベンダも含む）・業界などは、モデラー・情報モデルエディタ・ノードセットジェネレータなどの名前で情報モデルの編集・生成ツールを開発・提供・使用している。これにより、情報モデルの独自新規作成やカスタマイズ要求に対応している。これら編集・生成ツールは、所謂、XML エディタである。（以後、これら編集・生成ツールを総称して情報モデルエディタと記す）

この情報モデルエディタにおける編集・生成は、一般の開発者が簡単にできるものではない。なぜなら、OPC UA 仕様に関する専門知識が必要であること、またその業界や装置の標準仕様も踏まえた上での適切なカスタマイズ仕様化を行うためには、それらの専門家に匹敵する業界・装置知識が必要となるためである。この状況のため、情報モデルエディタのベンダ等は、同エディタの顧客と相談しながらカスタマイズを行う場合がある。あるいは、垂直統合型システム開発が可能な場合、自社内で独自に開発を行う場合もある。あるいは専門の委託先を活用する場合もある。

3. 課題

前章までで標準化やカスタマイズへの OPC UA や PackML などの従来技術における具体的な対応を説明した。本章ではこれらの課題を説明する。

3.1 標準化対応における課題

3.1.1 標準仕様準拠でも異なる情報・情報量（Mandatory と Optional）

前章にて OPC UA 仕様には Mandatory や Optional などの形で実質的に選択可能な仕様（正確には Modelling Rule という仕様）となっていることについて触れた。

このことは標準仕様対応として考えた時、厄介な状況を生む。なぜなら、標準仕様準拠と言っても、この Optional の選択が異なることで、様々な情報構造の組み合わせが発生することにより、そこにアクセスする OPC UA クライアントの開発や、汎用化の難易度などの問題を生じさせる可能性があるためである。図 7 に標準モデリング・ルール Optional と Mandatory を使った場合の、実際に仕様書に記載されている例を示す。図 7 は、TYPE_A の型定義に従って、A1-A14 のインスタンスが定義できることを示している。

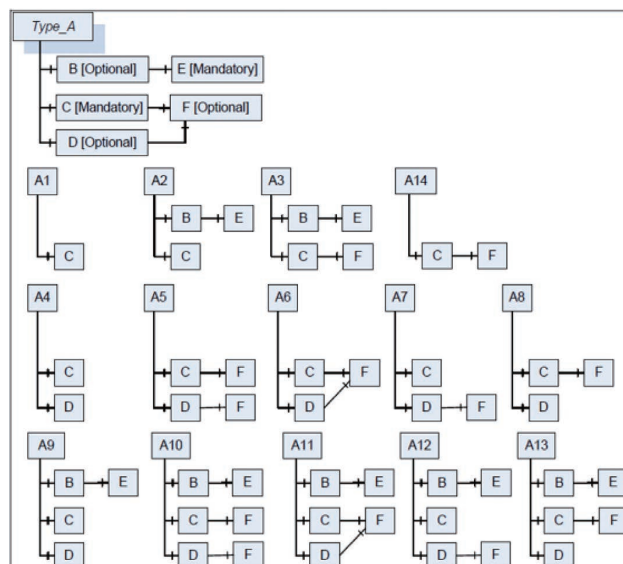


図 7 標準モデリング・ルール Optional と Mandatory を使った例（OPC10000-3 より）¹⁾

標準仕様が様々な理由で Optional を持つこと自体は、これまでの経緯や仕様の知見上、一定の必要性があると思われることができる。また、OPC UA では、OPC UA クライアントは図 7 上部にある Type（型）情報を Optional 含め取得し把握した上で OPC UA サーバが持つインスタンス情報にアクセスすることが前提として想定されているため、Optional という仕様を持つことは仕様としては課題にならない。しかし、現実問題としては、例えば図 7 だけで見ても Type_A ひとつに A1～A14 の全ての情報構造に対応している必要があることとなり、OPC UA クライアントの開発の困難さは増し、課題となる。

3.1.2 顧客が必要とする情報量と標準仕様の情報量との間のギャップ

次に課題となるのは、顧客が必要とする情報量と、標準仕様が持つ豊富な情報量との間にギャップが生じる場合があることである。

実際に、あるコンパニオン仕様に関して小規模装置メーカーにおいて得た VOC（Voice of Customer）としては、「自身の装置がこれまで提供してきた情報量に対して、コンパニオン仕様が持つ最大量の実装を行う必要はない。」というものがあつた。

すなわち、コンパニオン仕様に対応するためには、顧客の装置がこれまで提供していなかった情報を新たに提供しなければならない場合が発生し得るため、今まで以上の開発コストがかかり得ることが顧客にとって課題となる。

3.2 カスタマイズ対応における課題

3.2.1 標準化された情報モデル仕様の Optional の選択を指す場合

Mandatory と Optional は前節までも課題として登場したが、標準とカスタマイズの切り分けという視点においても現実問題として下記のとおり課題となる。

標準仕様における Optional の選択が異なる要求をすることは、標準化要求なのか、カスタマイズ要求なのかは明確には言えない。また、OPC UA クライアントがどの範囲までの標準仕様のサポートしていれば標準仕様クライアントなのか、明瞭とは言えない。

これらにより、標準仕様クライアントの開発の困難さは増し、かつ、切り分けが曖昧なことで、顧客が自身のカスタマイズ部分にフォーカスし更なる生産性改善などに注力することなどを阻害する。

実際に、ある顧客においては、標準仕様でよいのであれば何も考えたくはなく、どうしても独自の情報を入れなければならないならば、そこだけに注目したいとの声を得ており、これは顧客にとって課題である。

本ケースは、次章以降では標準化対応における標準仕様準拠の同一性の担保の課題解決として取り上げる。

3.2.2 標準化された情報モデル仕様の定義内容を変えてしまう場合

これまでの OPC Foundation や弊社顧客から知れた情報などにより、下記のような状況を背景として、標準化された情報モデル仕様の定義内容を変えてしまう形でのカスタマイズが発生している。これらは標準化による更なる生産性向上などを阻害する課題となり得ると分析している。このため本ケースは、次章以降では標準化対応における標準仕様準拠の同一性の担保の課題解決として取り上げる。

1. 各社・ベンダに標準適用の動機が発生しない／しづらい現況

現在、標準化の実施は改善の一環として多くの場合、各社・ベンダが主体となって自身のために進めている⁹⁻¹¹⁾。そして、これまでの OPC Foundation や弊社顧客から知れた情報などにより、各社・ベンダの多くは、“自社内の範囲での”標準化ができればそれでよいと考えていると推測される。しかし、1社・1ベンダ内の標準化などのみでは、今後の生産性・競争力等の更なるサステナブルな向上などの視点は望めない⁹⁻¹¹⁾。

2. 独自の情報化が自由にできてしまう現況

(ア) 情報モデルエディタは多くの場合、何でも書けるし変えられる。OPC UA 標準仕様を持ってきて、これを自社に最適な情報構造に変更し、それを使おうとするのは、これまでの OPC Foundation や弊社顧客から知れた情報などにより、企業にとって現状自然な行動であると分析している。

(イ) 情報モデルのカスタマイズは、前述のとおり、かなりのスキルを必要とする。このため、多くの場合、コンサルタントが必要になったり、外注が必要になったりする。

(ウ) 現在のベンダの中には、上記までのコンサルティングサービスや機能、請負事業を提供しているところもあり、自由にカスタマイズできる状況にある。

3.2.3 標準化された情報モデル仕様がないものを入れ込む場合

この種類のカスタマイズについて言えば、“標準化された情報モデル仕様がないもの”の質にも依るものの、以下のとおりむしろ前向きな進化のための課題であると分析している。

“標準化された情報モデル仕様がないものを入れ込もう”とする場合や要求する／される場合、これまでの OPC Foundation や弊社顧客から知れた情報などにより、多くの場合以下のケースに分けられる。

1. 標準仕様として必要な情報にもかかわらず存在しない

カスタマイズ仕様として要求されるが、その内容は、他社や他装置・他業界・国・経済圏に依らず必要な情報である場合がある。また、複数の標準仕様の混在やマージのために、結果としてカスタマイズ仕様要求となる場合もある。標準仕様の理解上、これらは単に標準仕様やその適用範囲などが不足していると見ることができる。標準仕様にも継続的な進

化が求められる。

本ケースは標準仕様の継続的進化の課題であり、本稿ではこれ以上取り上げない。

2. 標準化（オープン）してはいけない情報である

これらの情報は、各社・ベンダ・業界・国・経済圏等は、各々の価値や競争力等を維持するために、各々の暗黙知を含むコアコンピタンスを特定し、カスタマイズされた情報という形で形式知化・情報化する情報である。また、将来性や拡張を考えている場合もある。これらの情報は機密性が高いため、堅固に守られなければならない。本ケースが、現状のカスタマイズを更に改善し適切に推し進めようとするときのカスタマイズ対応における課題であると分析している。

本ケースについてのみを、次章以降のカスタマイズ対応における解決方法として取り上げていく。

4. 解決方法

ここまで見てきたとおり、現状の標準化、カスタマイズを更に改善し推し進めようとしたとき、標準仕様準拠でも異なる情報・情報量や顧客要求とのギャップ、標準とカスタマイズの切り分けには依然課題がある。これら課題の解決方法として、我々は以下を実現した。

4.1 標準化対応における解決

標準化への対応の課題解決方法として、情報の標準化を簡単に実現できるライブラリを新たに開発した¹¹⁻¹⁵⁾。具体的には、コンパニオン仕様 OPC UA for PackML を実現する FA 統合開発環境 Sysmac Studio 用の FB（Function Block）ライブラリ（形 SYSMAC-XR101）である。以下その技術的特徴を述べる。

4.1.1 標準仕様準拠の同一性の担保

3.1.1 にて標準仕様準拠でも異なる情報・情報量となることや、Mandatory と Optional の課題について触れた。Optional の選択のばらつきに伴う、外部から見た時の仕様や実装の違いが出ることを吸収していくために、我々は全ての Optional について本ライブラリとしてサポートすることとした。

これらにより、本ライブラリの使用者の誰にとっても同じ標準・情報となることが担保された。図 8 にこのイメージを図示する。

4.1.2 実装量の選択性確保

3.1.2 にて標準仕様対応をしようとしたときの顧客が必要とする情報量と標準仕様の情報量との間のギャップについて触れた。前節の通り、全ての Optional を含めて対応したならば尚更である。この点に関して我々は、そのノードのデータを扱うかどうかは、コントローラプログラムの設計として決められるように本ライブラリを設計した。

これにより、本ライブラリの使用者は、Optional の選択をコントローラプログラムの設計時に決められる。具体的には FB の引数としてデータをセットするか、しないかで決められるようにした。図 9 にこの実現イメージを図示する。

4.1.3 標準部分とカスタマイズ部分の完全分離

3 章全体を通して、標準とカスタマイズが混在する現況とカスタマイズの種類が複数あることを見てきた。前節までのとおり、我々はこのライブラリを Optional のデータ領域も含めて誰にとっても同じ標準とすることで、標準部分を確固たるものとし、また、ライブラリの使用者が無制限に改造できないように設計することで、カスタマイズが入

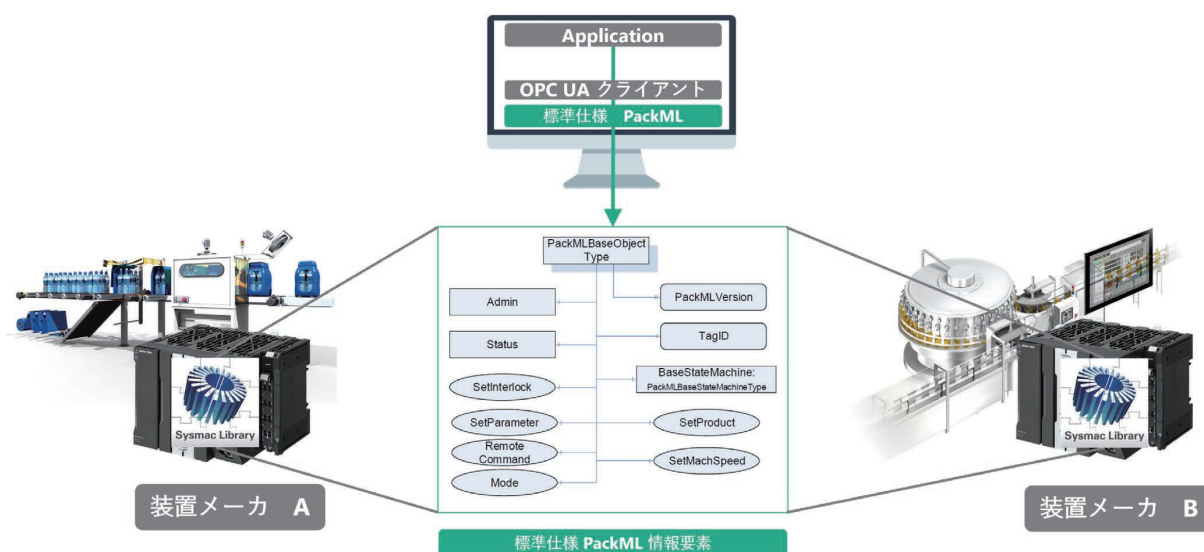


図 8 ライブラリを使用する複数コントローラで常に同じものが使用されるイメージ

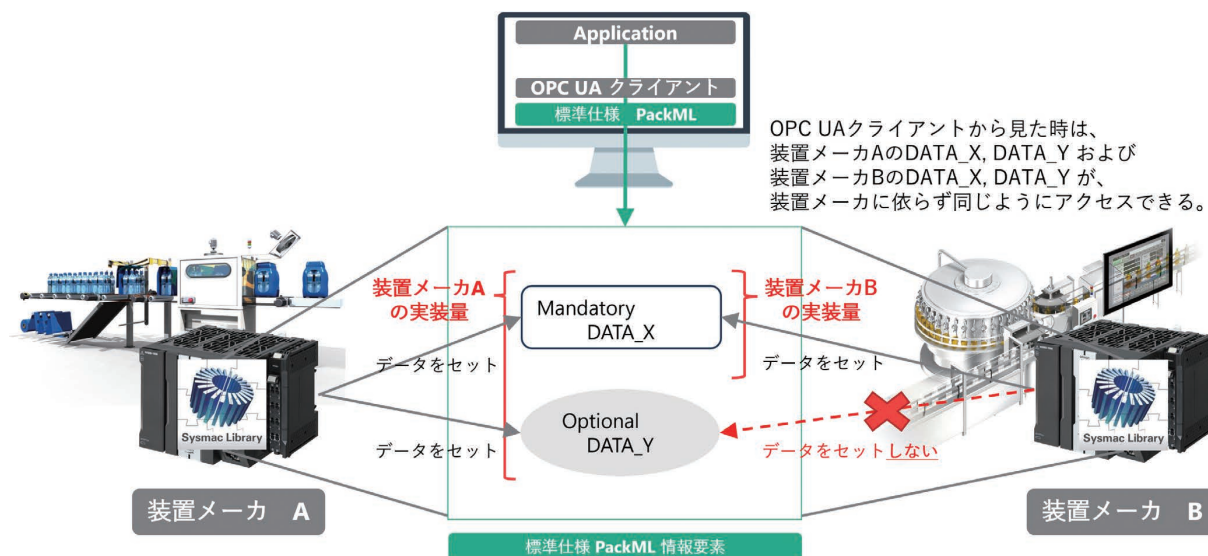


図9 コントローラプログラムが選択的にライブラリ内の情報を実装できる実現イメージ

り込む余地を排除した。これらにより標準部分とカスタマイズ部分の完全分離が確立した。

4.2 カスタマイズ対応における解決

3.2.3の2項目の課題解決に資するべく、カスタマイズが実現できる3つの手法を開発した¹¹⁻¹⁵⁾。以下その技術的特徴を述べる。

4.2.1 PLC 情報としての情報モデルの機能拡張（解決方法1）

本稿冒頭で言及した通り、この解決は製造現場で情報の重要なハブ（中心）となるコントローラ上において行われる必要がある。従来の技術、製品で独自の情報化はサポートされていたが、これをカスタマイズ対応としても適切な形に拡充をしていく必要がある。

上記を踏まえ我々は、弊社製品のNJ/NXシリーズCPUユニットで対応していたPLC（Programmable Logic Controller）としてのコンパニオン仕様であるOPC UA Information Model for IEC 61131-3（OPC 30000）¹⁶⁾の対応範囲を拡大した。具体的には、従来グローバル変数の公開のみの対応であったところを、グローバル変数に加え、（FBの）ローカル変数も公開できる仕様とした。これにより、グローバル変数による単にPLC内の変数の公開であったものが、名前空間機能やFB機能なども使用し、情報をより構造的に分割・構造化し柔軟に表現することが可能となった。また、これらの領域には新たにOPC UAネットワークからのロール（操作権限）を付与できるようにもした。これにより、よりセキュリティが確保された形での情報格納が可能となった。なお、このロール（操作権限）機能は、他のコンパニオン仕様の場合にも適用することができる。

これらの機能拡張対応により、情報はより柔軟に表現できるようになり、かつ、よりセキュリティが確保された形となり、OPC 30000に従う情報格納場所を、カスタマイズ情報を格納するための場所として、よりふさわしい場所とした。

図10にOPC 30000対応の変化点と拡張された後の実現イメージを示す。また、図11にロール機能による情報秘匿のイメージを示す。

4.2.2 OPC UA ノード構成のカスタマイズ手段の提供（解決方法2）

前項の方法は、従来仕様の拡張であるため、コントローラとしてのこれまでの情報の見え方の仕様に従う。すなわち、OPC UA for PackMLのノード構成の見え方までをカスタマイズすることはさせない。

このため、OPC UA ノード構成をカスタマイズできる方法として、自社SE/開発者が使用することができる販促ツールとして、簡易情報モデルエディタを新たに開発した。

これにより、OPC UA for PackMLのノード構成を変更する手法を提供できるようになった。なお、この手段は、OPC UA for PackMLに限らない他の情報モデルのOPC UA ノード構成においても適用することができる。現状の簡易情報モデルエディタの限定的な制約（変数ノード構成のみがカスタマイズできること）については、今後検討を進め、適用範囲を広げられるように努める。

4.2.3 専用ライブラリを開発可能な技術状態へ（解決方法3）

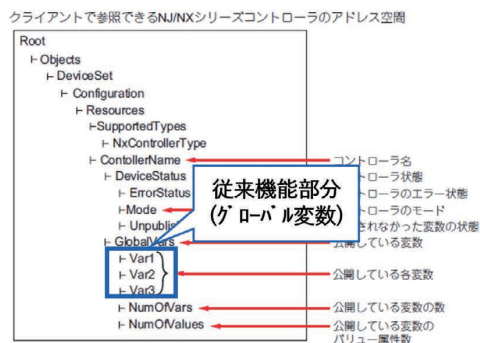
前項の方法では、カスタマイズすることができるのは、言及のとおり、OPC UA ノードの一部（変数ノード）の構

【From】

グローバル変数の公開のみ

6-2-1 NJ/NX シリーズコントローラのアドレス空間

NJ/NX シリーズコントローラのアドレス空間は、以下のように公開されます。



【To】

グローバル変数に加え、ローカル変数も公開できる

6-2-1 NJ/NX シリーズコントローラのアドレス空間

NJ/NX シリーズコントローラのアドレス空間は、以下のように公開されます。

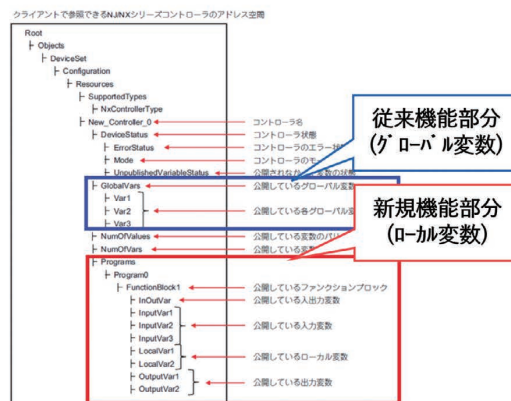


図 10 OPC 30000 対応の変化点と拡張された後の実現イメージ

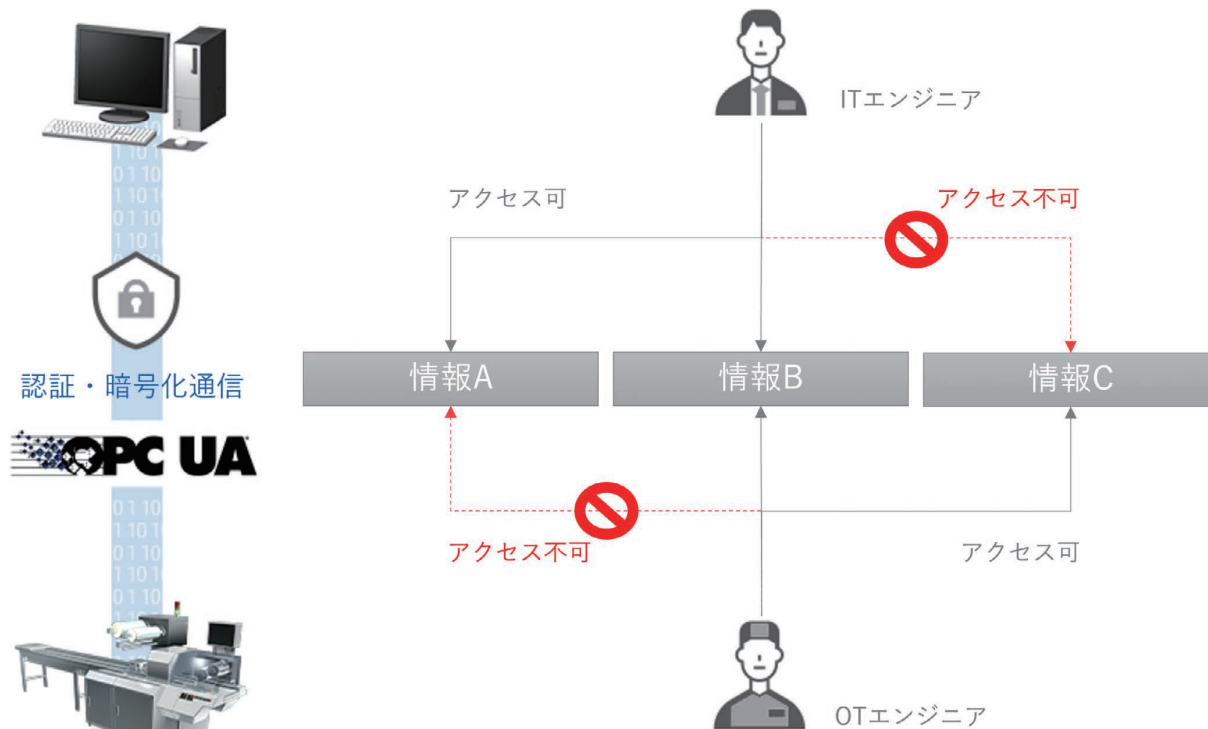


図 11 ロール機能による情報秘匿のイメージ

成についてであり、制約がある。

このため、今回の対応において新たに以下を実現し、顧客専用のカスタムモデルのライブラリも開発可能な技術状態とした。

1. OPC UA の情報空間（アドレス空間）とコントローラ機能の対応付け仕様の汎用仕様化確立
今回の対応を行うことにより、OPC UA の情報空間

間とコントローラ機能の対応付け仕様の汎用的にマッピングする内部仕様を新たに確立した。

2. FB を OPC UA ネットワークから呼び出す内部汎用 I/F 確立

前項同様、FB を OPC UA ネットワークから呼び出す内部汎用 I/F を新たに確立した。これらにより、技術的には製品開発者以外でも個別の専用ライブラリが開発可能となる状態を確立した。

5. むすび

本稿での取組みにより、3章で述べた標準化対応における標準の情報・情報量のばらつきや、顧客要求とのギャップなどの現状課題への対応を、単純化を含めてひとつの形として実現した。また、利用者の環境の規模に応じた標準仕様の適用方法についても提供することができた。これらの実現により、標準部分とカスタマイズ部分は、完全分離できるようになった。このことは、今後、更に進化をするために何が必要となるか、例えば、標準をクラウドに置くとしたらどうなるか・どうすべきかなど、現状の標準化やカスタマイズへの対応の方法を大きく変える材料ともなり得ると考えている。

カスタマイズについては、3章で述べたカスタマイズ対応における標準化との更なる切り分けに関する課題への対応として、標準化対応への統合、およびカスタマイズの3つの機能・手法として新たに開発・提示した。ただし、標準化への簡単さ・堅牢さを重視した分、カスタマイズについては、今後も更なる検討や改善を行っていく必要があると考えている。カスタマイズ情報の格納先として、現状のPLCの情報モデルが最適であるかの議論もあると想定される。

今後については、VOCも取り込みながら、この標準化をより多くの製造現場・業界等に広める活動を進める。また、今回実現された技術は他の標準化や機能追加時等、様々に適用可能である。今後の標準化や機能を更に進化させるよう、技術の展開や課題解決への貢献を目指す。

最後に、本稿で紹介した技術・機能や製品の実現にあたり多大なご協力を頂いた方々、また、この機能や製品の今後の展開などにご協力頂く全ての方々に、この場を借りて深く感謝申し上げる。

参考文献

- 1) *OPC Unified Architecture Core*, OPC10000, 2016–2024.
- 2) オムロン株式会社. “オリジナル解説 OPC UA とは？” 特設サイト. <https://www.fa.omron.co.jp/product/special/sysmac/nx1/opcu.html> (Accessed: Jan. 19, 2024).
- 3) 小川喜明. “OPC UA の FA 適用におけるソリューション事例.” 日本 OPC 協議会 OPC UA ソリューション紹介セミナー. https://jp.opcfoundation.org/wp-content/uploads/sites/2/2022/09/OPC-UA-Seminar_Session4_Omron.pdf (Accessed: Aug. 26, 2022).
- 4) 植木琢也. “複雑化する製造業のデータ活用を支える標準化.” 日本 OPC 協議会 OPC Day2023. https://jp.opcfoundation.org/wp-content/uploads/sites/2/2023/12/1-3_Standardization%E3%83%BCOPC-UA_for_PackML%E3%83%BC.pdf (Accessed: Dec. 7, 2023).
- 5) *OPC UA for PackML*, OPC30050, 2020.
- 6) オムロン株式会社. *Sysmac Library ユーザーズマニュアル OPC UA PackML ライブラリ 編 形 SYSMAC-XR101, SB*CA-505B. (2023). Accessed: Jan. 19, 2024. [Online]. Available: https://www.fa.omron.co.jp/data_pdf/mnu/sbca-505b_sysmac-xr101.pdf?id=3459.
- 7) 川野俊充, “ドイツのモノづくり政策 Industrie4.0 が狙う製造業の標準化戦略,” *日本ロボット学会誌*, vol. 33, no. 5, pp. 318–324, 2015.
- 8) 小川絃一. “オープン＆クローズ戦略とそのビジネス展開.” エンジニアリング協会 2023 年度 第 6 回 エンジニアリングの最新 DX セミナー 第 3 期. <https://www.enaa.or.jp/?fname=DX2023-6.pdf> (Accessed: Dec. 22, 2023).
- 9) 江藤学, “欧州企業の標準化戦略,” *研究・技術計画学会 年次学術大会講演要旨集*, 2013, vol. 28, p. 954–959.
- 10) 徳田昭雄 他, *オープン・イノベーション・システム*, 初版. 晃洋書房, 2011.
- 11) 新宅純二郎, “アーキテクチャ分析に基づく日本企業の競争戦略,” *MMRC Discussion Paper*, no. 54, 2005.
- 12) 片野浩一, 西尾チヅル, “マス・カスタマイゼーション戦略における顧客インターフェイスとデカップリング・ポイントの効果,” *流通研究*, vol. 7, no. 2, pp. 19–37, 2004.
- 13) 小野晃典, “カスタマイゼーションとパーソナライゼーション,” *マーケティングジャーナル*, vol. 40, no. 1, pp. 3–5, 2020.
- 14) 小野晃典, “マス・カスタマイズ製品の購買意図,” *三田商学研究*, vol. 50, no. 2, pp. 1–18, 2007.
- 15) 片野浩一, “マス・カスタマイゼーション戦略から個客経験の共創へ,” *明星大学経営学研究紀要*, no. 7, pp. 45–58, 2012.
- 16) *OPC UA Information Model for IEC 61131-3*, OPC30000, 2010–2020.

執筆者紹介



小川 喜明 OGAWA Yoshiaki
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1開発部
専門：ソフトウェア工学
所属団体：日本 OPC 協議会、IEC/SC65E/WG8



高橋 稔 TAKAHASHI Minoru
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1開発部
専門：ソフトウェア工学



澤田 成憲 SAWADA Shigenori
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1開発部
専門：ソフトウェア工学



植木 琢也 UEKI Takuya
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
新プラットフォーム推進 G
専門：ソフトウェア工学
所属団体：日本 OPC 協議会

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

1

オムロンの成長領域で イノベーションを生み出す技術

— 2. ヘルスケア —



診断に有用な高品質波形の記録を家庭向け携帯型心電計で実現する本体形状と接触検知機能の検討

小高 心哉, 小野 健児

心電図の取得は、これまで 12 誘導心電計やホルター心電計が主だった。しかし患者によっては常に波形に症状が表われるわけではなく、従来の心電計による数秒～数日の記録では症状を捉えることのできない事例も存在する。症状が出た際に家庭で記録できる携帯型心電計は、従来の機器では症状を捉えることのできなかった患者、医師にとって重要度が増している。しかし現在の携帯型心電計の大きさはポケット等での携帯には大きく、さらなる小型化が求められている。それには、機器上で波形を表示していたディスプレイの廃止が効果的だが、記録姿勢の安定に効果のあった記録中の波形表示がなくなることと、機器自体が小型化し安定記録姿勢が取りづらくなることから、波形品質の悪化が想定される。本論文ではディスプレイなしでも高品質な波形を記録するための本体形状の検討と、安定した接触抵抗のための接触検知機能の検討結果について述べる。

Development of the Device Body Shape and Contact Detection Function to Realize High-quality Waveform Recording Effective for Diagnosis with the Portable Electrocardiograph for Home Use

KODAKA Shinya and ONO Kenji

Traditionally, electrocardiograms (ECG) have mainly been taken using 12-lead ECG or Holter monitors in the medical field. However, depending on the patient, symptoms do not always appear on the waveform, and there are some patients whose symptoms cannot be detected by recording for a few seconds to a few days as with conventional ECG. Portable ECG that can record at home when symptoms appear are becoming increasingly important for patients and doctors who were previously unable to detect symptoms. But current portable ECG size is too large to be carried in a pocket, etc. More miniaturization of portable ECG is required. For its realization, it is effective to eliminate the display that previously showed waveforms on the device; however, this is expected to result in a deterioration in waveform quality because the waveform display during recording, which was effective in stabilizing recording posture, will be eliminated and it will be difficult to maintain a stable recording posture as the device itself becomes smaller. This paper describes the results of our study on the no display ECG's body shape for recording high-quality waveforms and the contact detection function for stable contact resistance.

1. まえがき

1.1 背景

診断に使用する心電図の取得は、古くから医療現場で使われてきた 12 誘導心電計やホルター心電計が主だった¹⁾。

- ・ 12 誘導心電計：四肢及び胸部に取り付けた 10 個の電極から 12 種類の誘導波形を記録する。記録時間は 10 秒程度の短時間であり、病院で仰向けの安静姿勢で記録する。
- ・ ホルター心電計：リード付き心電計で 2 または 3 種類の誘導波形を記録することを基本とし、主に 24~48 時間の心電図を記録する。電極の貼り付けは医療機関に行う。

Contact : KODAKA Shinya shinya.kodaka@omron.com

しかし症状によっては常に波形に表れているわけではなく、不安を抱え医師の診断を仰ぐも確定診断に至らない場合も多く存在する。前述の通り従来の病院中心の心電図記録では症状を捉えることができない患者が存在するため、家庭での心電図記録の需要が高まっている。そのため、下記のように家庭で心電図記録をする機器の種類も増え、症状を捉えることのできなかった患者、医師にとって有用な存在となっている¹⁾。

- ・貼付型心電計：小型、軽量で胸部に直接貼り付ける。24 時間以上の長期の継続的な記録を目的とする。誘導数は 1 つで、リード線がなく防水で動きの制約が少ない。
- ・携帯型心電計：主に 1 ～ 6 種類の誘導波形を記録し、持ち運びが容易で、患者自身が必要に応じて手や胸に押し当てて心電図を記録する。一度の記録時間は 30 秒程度であり、肌への常時貼り付けも必要なく、記録時以外の患者負担が軽い。
- ・装着型心電計：近年普及し始めている心電計で、スマートウォッチ型が主流である。主に 1 種類の誘導波形を記録し、一度の記録時間は 30 秒程度である。常に装着しているため、自覚症状のない患者や症状の頻度の低い患者に有用。
- ・植込み型心電計：胸部の皮下に植込み、1 種類の誘導波形心電図を継続的にモニターする。長時間心電図でも検出困難な病態の検出に用いる。

日常生活での携帯性による患者への負荷の面から、携帯型心電計や装着型心電計の小型化需要は今後も増加することが予想される。

1.2 課題

前述の通り、携帯型心電計の小型化は、家庭での心電図記録による患者の早期治療のために求められている。これまで家庭で心電図を記録する用途では、図 1 で示す携帯型心電計の「HCG-801」や「HCG-901」（共にオムロンヘルスケア株式会社、京都府、日本）が医療現場で多く使用されてきた。これらの機種はディスプレイで波形を見ることが安定した波形記録ができる反面、ディスプレイが機器のサイズの制約にもなっている。ディスプレイなしでも安定した心電図波形を記録できるようにすることで、機器を小型化し携帯性向上が実現できる。

しかし病院で安静にして記録する 12 誘導心電計や、パッチ電極を医師が貼りつけるホルター心電計に比べ、携帯型心電計や装着型心電計では波形品質が悪化しやすい。その原因は患者が自ら肌に電極を押し当て記録する必要があるため、患者の体動や体に力が入ることで波形に、後述のようなノイズが発生しやすくなることである。そのた

め、記録中の安定姿勢が難しい携帯型心電計を小型化することで機器の保持が難しくなり、記録姿勢の不安定から波形品質の更なる悪化が懸念される。

本論文では携帯型心電計の小型化と、波形品質の両立のための検討を行う。



左：HCG-801、右：HCG-901

図 1 既存の携帯型心電計

2. 心電図波形品質

前章で課題として挙げた心電波の波形品質を低下させる要因とそれに対応した解決策を考える。

2.1 ノイズ要因

心電計の波形のノイズ要因としては、主に下記 3 種があげられる。具体的な波形は図 2 で例示する。

1) 交流障害（ハム）

高さや幅が一定した規則的な細かいノイズ。電気機器から発生する磁力線が原因となる。本論文で目的としている小型化はハムに影響しないため、以降の検討の対象としない。

2) 基線変動（ドリフト）

電極と皮膚間のインピーダンスが変化することによって生じる。患者の体動や大きな呼吸、会話などにより、電極と肌が動き発生する。患者の緊張や体力、関節の可動域や、患者の肌の乾燥状態も影響を与える。

3) 筋電図混入

患者の緊張・不安からくる硬直・振戦などの不随意運動や、寒さによる震えによって生じる。背中が曲がっている場合、手足に震えが生じる疾患を有する場合、衣服で手足が締め付けられている場合にもよく見られる。

12 誘導心電計、ホルター心電計に比べ、携帯型心電計では患者自らが機器を操作するため、2) の基線変動と 3) の筋電図混入が起こりやすい。立位／座位で患者が機器を押し付ける際、機器を保持するだけで腕に力が入りやすく、これが筋電ノイズとなる。また記録時間中の姿勢の変化や呼吸から肌への押しつけ具合も変化しやすく、これらの体動は基線変動として現れる。12 誘導心電計やホルター心電計との違いとして、電極にペーストを用いないことから、接触抵抗が大きくなることも安定性に影響を与えている。

上記ノイズ発生原因は、患者の手の大きさ、筋力、年齢、使う環境など多岐にわたる。また今回小型化を目的にディスプレイをなくすため、記録時に波形を患者自ら見ることができず、波形が悪化していても気がつかないリスクもある。

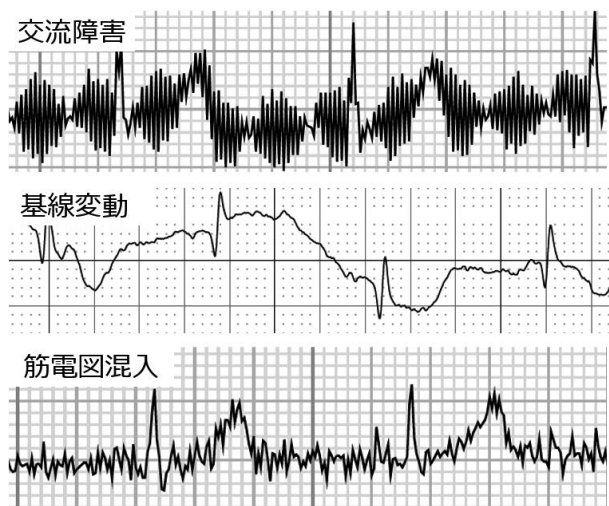


図2 ノイズ波形

2.2 ノイズ低減

本論文では携帯型心電計の中でも特に、胸部誘導の中の1種類の誘導波形を記録する機器（右手で機器を保持し胸部に押し付ける機器）に対して、ノイズを低減し、品質の良い波形を入手するため、下記2つの対策を実施する。

- ① 誰もが保持しやすく、無駄な力が入らない、体が安定する機器の形状を実現する。
- ② 記録開始時に肌と電極の接触安定性を検知し、接触が安定してから記録を開始する機能を実現する。

以下、①については3. 筐体形状によるノイズ低減検討で、②については4. 接触検知によるノイズ低減検討でそれぞれ詳しく考察する。また、本論文では量産性（コストや部材調達性）の観点から、電極材料と電極面積は固定して検討を行った。また、今回の機器は1種類の誘導波形を記録する前提のため、波形記録に使用する2枚の電極と、グラウンド電極の1枚の、合計3枚の電極を用いて検討を行った。

3. 筐体形状によるノイズ低減検討

3.1 形状検討方針

検討した形状を説明し、試作結果からわかった波形安定のためのポイントをまとめる。2.1節で述べた2) 基線変動、3) 筋電図混入が起こらないよう、保持した機器がふらつかないこと、保持した腕や体幹に力が入らないことを

目的とし、波形安定に寄与する要素として下記4つを考慮した。

- ・要素1：各電極への押付け方向が同一ベクトル上にあること。ベクトルが違う向きにあると、患者は各指や腕をそれぞれ別の方向に力を与える必要があり、被験者の条件（例えば指の力、手の大きさ、指の長さ、関節の可動域など）によっては、電極ごとに力のかかり方が偏ることや体の力みに繋がるのが想定される。その例を図3に示す。
- ・要素2：本体保持部と電極部が近くにあること。距離があると、記録中に保持をした姿勢で機器に回転方向の力が働きやすくなり、安定性が損なわれることで被験者によってはふらつきの要因となることが想定される。その例を図4に示す。
- ・要素3：機器の保持姿勢が、関節の自然な向きや湾曲、可動域など人体の構造に合っていること。例えば指の関節が固くなっている患者や腕や体幹の筋力が落ちている患者が、無理をした姿勢で機器を保持した場合、電極を肌へ正確に接触できない、または無理な姿勢で力が発生し筋電図が混入する恐れがある。
- ・要素4：電極接触部が、性別や体形に影響を受けず、誰でも同じように肌に接触できる形状であること。胸部や腹部は体形の差が大きく表れやすい。例えば、女性には乳房を避ける必要があるため電極と肌の接触面積が限られるうえ、筐体の高さが低いとどこに接触しているかが目視しづらくなる。また太って肉が重なっている人、痩せて骨ばっている人も、電極を接触する面が平面になりづらくなる。



図3 電極押え方向



図4 電極位置と保持位置

3.2 サンプル形状

人体の構造を考慮し、自然な姿勢で保持、電極接触を行うことのできる形状として、下記 No. 1～5 を検討して試作した。その具体的な形状は図 5 に示す。

No.1



No.2



No.3



No.4



No.5



図 5 試作形状外観

No. 1：既存製品である HCG-801 をベースとして、全体を小型化したサンプル。

No. 2, 3：手首の角度、指のカーブを人体にとってより自然なカーブとなるよう設計したサンプル。

No. 4, 5：電極を当てたい箇所へ明確に狙って当てることができるよう設計したサンプル。

No. 2, 3 と No. 4, 5 はそれぞれ同じ保持姿勢を取る筐体で、No. 3 と 5 はグラウンド電極と片方の記録電極を隣に並べたもの、No. 2 と 4 は 3 枚の電極を近づけることなく設置したものである。

各サンプルと検討要素の関係を表 1 にまとめる。○はサンプルが該当要素を満足することを示し、×はサンプルが該当要素を満足しないことを示す。

表 1 サンプルと検討要素の関係

サンプル	要素 1	要素 2	要素 3	要素 4
No. 1	○	○	○	○
No. 2	×	○	○	○
No. 3	×	○	○	○
No. 4	×	×	×	○
No. 5	×	×	×	○

3.3 評価方法

各サンプルを対象として、波形品質を下記の基準で評価した。

①基線変動：基線から各 P 波起点への変動幅を確認し、基線から 0.1 mV 以上変動している場合を変動ありと判定した。0.1 mV の基準については従来からの経験上、機器の良否を判別するのに適当と判断し採用した。30 秒間の基線からの変動度合いを式 1（図 6 参照）で数値化し、100% に近い変動の少ない波形を、体動影響の少ない安定した波形と判断した。

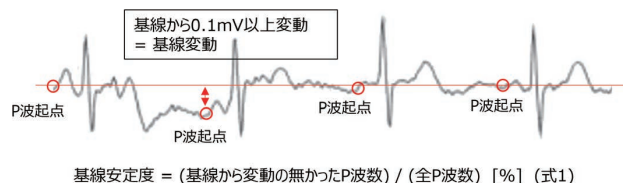


図 6 基線変動判定

②筋電図混入：波形を目視し、P 波の読み取りに支障が出るレベルのノイズの有無を確認した。ノイズにより P 波が読み取れない場合、診断へ使用するには品質が不十分な波形と判断した。P 波の読み取り困難な波形の例を図 7 に示す。目視は複数の開発者により実施した。

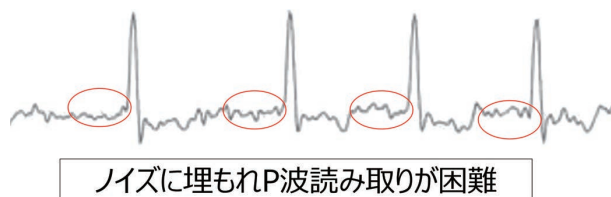


図 7 筋電ノイズ判定

被験者は次のような人々であった。なお評価にさきがけて自社の倫理審査委員会の認可を受け、被験者に十分なインフォームドコンセントを実施した。

- ・人数：10 名（男性 5 名、女性 5 名）
- ・年齢：68 歳～ 81 歳
- ・実施期間：2019 年 2 月 25 日～ 3 月 4 日

- ・評価手法：回路は既存製品を使用し、筐体のみを切替えた。その上で、図8のとおり、各被験者に対して全てのサンプルで30秒/回で2回記録した。サンプルの評価の順番は、乱数表を用い被験者毎に順番を変更した。記録姿勢はI誘導（右手－左手間）とV4誘導相当（右手－胸部間）の2種類で記録した。

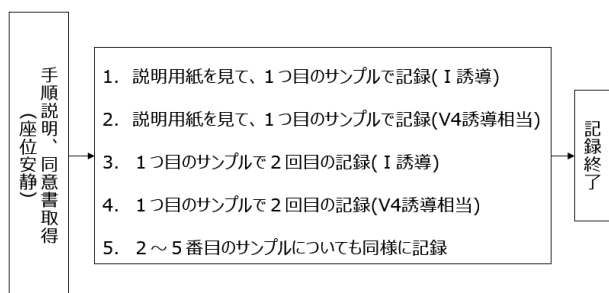


図8 検証プロトコル

3. 筐体形状によるノイズ低減検討、4. 接触検知によるノイズ低減検討の評価は、形状の優劣を目途付けする位置づけであり、10名前後の被験者にて検討を行った。最終的には5. 製品波形品質の検討により、機器の有効性を確認した。

3.4 評価結果

基線変動の評価結果を図9、表2で示す。基線安定度は、No. 1>No. 2, 3>No. 4, 5という傾向がみられる。4つの要素を満足するNo. 1は基線安定度が一番良く、かつ被験者によるバラつきも少ない安定した形状であった。No. 2, 3も基線安定度が良い結果となったが、特にV4誘導相当での記録時に被験者によるバラつきが大きかった。No. 4, 5は被験者によるバラつきがどちらの記録姿勢でも大きく、多くの患者が使用するには適さない形状である。

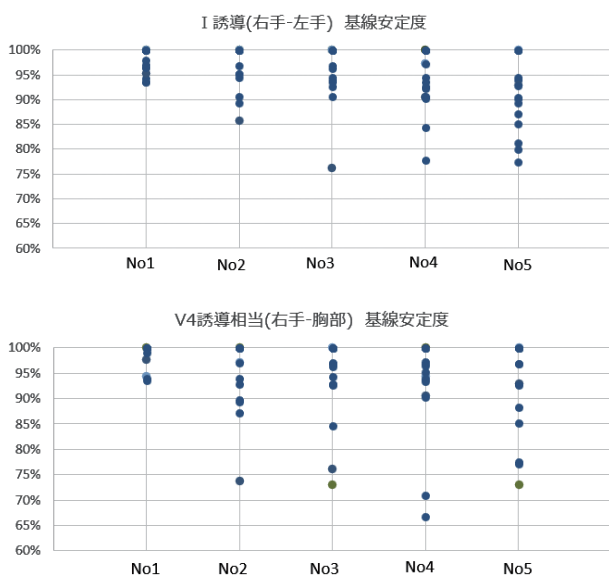


図9 形状と波形品質の評価結果

基線変動がどこまで許容されるかは、医師の熟練度や目的によって変わるため、一概に決めることは出来ないが、より安定した波形であるほど、使用できる医師や目的の許容範囲を広げることができる。よって、被験者間のバラつきが少なく、安定した結果を示したNo. 1が、携帯型心電計としてもっとも適した形状であると判断した。

以上より表2に示すとおり、事前に想定した4つの要素すべてを満足することが波形品質を向上する上で重要であることが確認できた。

表2 評価形状ごとの安定度比較

サンプル	要素1	要素2	要素3	要素4	基線安定度
No. 1	○	○	○	○	A
No. 2	×	○	○	○	B
No. 3	×	○	○	○	B
No. 4	×	×	×	○	B
No. 5	×	×	×	○	C

（基線安定度 A：全て90%以上、B：半数が90%以上、C：半数が90%以下）

- 要素1：電極押付け方向が同一ベクトル上にあること。
- 要素2：本体保持部と電極部が離れ、回転方向での不安定さが無いこと。
- 要素3：機器の保持姿勢が、関節の自然な向きや湾曲、可動域など人体の構造に合っていること。
- 要素4：電極接触部が、性別や体形に影響を受けず、誰もが接触できる形状であること。

なお、筋電ノイズに関しては評価の結果、形状による差が見られなかったため、今回は基線変動の結果のみを参照した。

4. 接触検知によるノイズ低減検討

4.1 接触検知の考え方

皮膚と電極の接触力が弱い場合や皮膚が乾燥している場合、体動により皮膚と電極の間の接触抵抗が変化しやすくなり、心電図波形に基線変動ノイズが乗りやすくなる。そのため安定した接触状態が保たれたことが確認された後に、自動で記録を開始するように設計する。このことによって正しく電極に接触できていない状態での記録を防止し、品質の良い波形の取得に繋げる。

接触検知回路のブロック図を図10に記載する。接触検知中はプルアップ抵抗により心電入力用の電極（指電極、胸電極）を電源電位へ接続させる。具体的には、電極に肌が接触した際、これらの電極電位は電源電位をプルアップ抵抗と人体抵抗で分圧した電位となる。電極と肌の接触が安定し接

触抵抗が十分下がってれば、電極電位は低下する。この機能によって、判定基準の電圧まで低下したことが確認された場合、接触が安定したと判断し心電図記録が開始される。

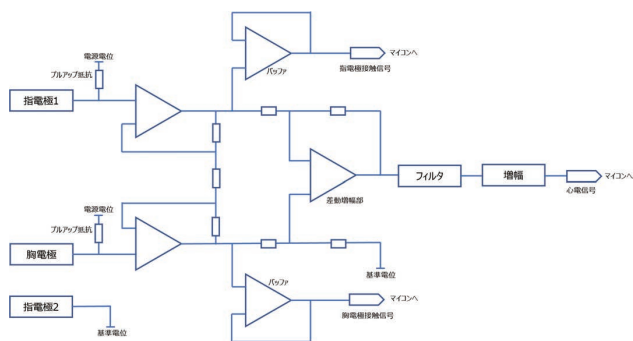


図10 接触検知回路のブロック図

4.2 接触検知基準の決定方法

4.1 節記載の接触検知回路を用いた心電計で被験者の心電図波形を記録し、同時に接触抵抗値（電極電位から計算）も計測しておく。心電図波形の記録品質を点数化したものと接触抵抗値を見比べ、許容できる心電図波形を記録できる接触抵抗の基準を導き出す。以下の被験者群にて評価試験を行った。なお評価にさきがけて自社の倫理審査委員会の認可を受け、被験者に十分なインフォームドコンセントを実施した。

- ・人数：8名
- ・実施期間：2023年3月1日～3月25日
- ・評価手法：被験者に心電計を渡し、自宅で心電図を記録するよう依頼した。起床後、就寝前、安静時2回の合計4回／日を必須とし、3日間記録した。

4.3 評価結果

評価結果から、接触抵抗値と波形品質の関係を確認した。被験者全員の指と胸の接触抵抗の分布を図11に示す。必須の4回以上記録した被験者もいたため、記録数は93データとなった。また接触抵抗と波形品質の関係を図12に示す。図12には全被験者の内、特に波形品質が悪い被験者4名のデータを使用した。波形品質は3.3節の評価方法と同様の手順で点数化しており、30秒の心電図記録波形の内、基線が安定している時間の割合を示している。読図の観点からは記録された心電図波形の内、開発部門の目安値である8割以上の時間で基線が安定していることを基準とした。指の接触抵抗と胸の接触抵抗の間には波形品質への影響度の差異が無かったことから、指と胸は区別せずに結果をまとめた。接触抵抗値は20 MΩ以下に集中しているが、20 MΩ以上100 MΩ以下にも分布していた。また50 MΩ以上の状態で記録された心電図は波形品質が悪化する結果が得られた。接触抵抗が大きい場合、心電図波

形の減衰が起こりやすく、体動の影響を受けて心電の基線が変動しやすくなる。そのため、接触抵抗の基準値を設定し、基準値より大きくなった場合には皮膚と電極の接触力を強くすることや、皮膚を水で湿らせることをユーザーに促すことで記録品質を向上できると考えられる。今回開発した機種「HCG-8010T1」²⁾／「HCG-9010U」³⁾では、接触抵抗50 MΩを基準抵抗とし、接触抵抗が基準より大きい場合には心電図記録を開始しないことで（例外あり）心電図波形品質を向上させた。またアプリと接続して使用する「HCG-8010T」では、図13に示すように、接触状態が好ましくないことをアプリ上でユーザーにフィードバックするようにした。皮膚と電極の接触状態を色や3段階のレベルバーで通知することによって、より好ましい接触状態へ誘導することができる。

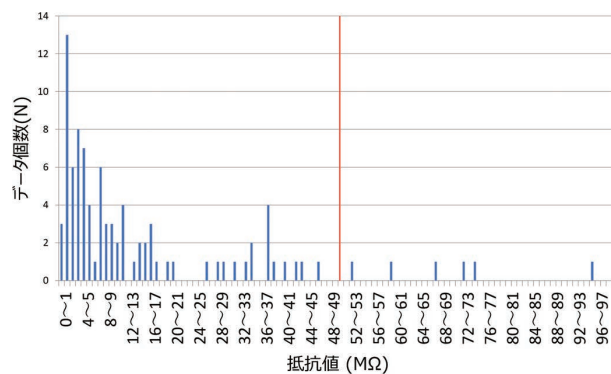


図11 接触抵抗の分布図

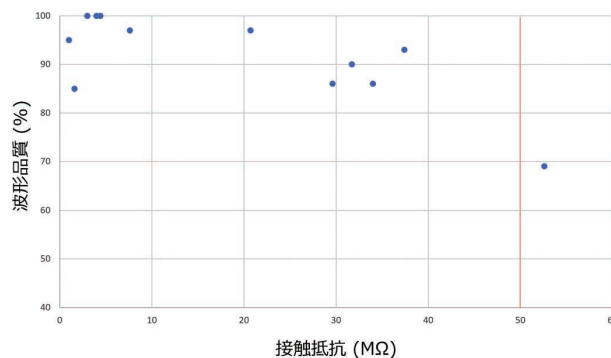


図12 接触抵抗と波形品質の関係図

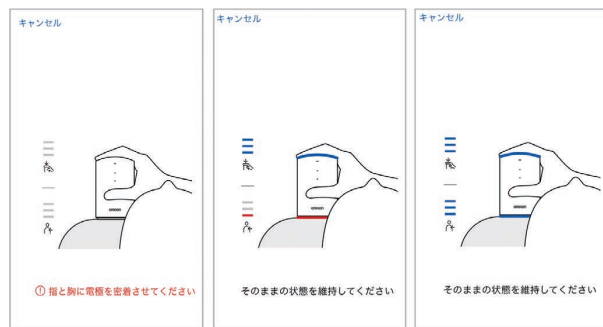


図13 アプリの接触抵抗フィードバック画面

参考として、接触抵抗が高い場合の心電図記録例を図 14 に示す。この心電図は接触抵抗が 50 M Ω 以上あった時の記録例である。基線変動が発生しており、心電図が読図し難い記録結果となっている。今回の接触検知機能により、このようにノイズの大きな波形の記録を防ぎ、診断に有用な波形を得ることができる。

接触抵抗が高い場合において、必ずしも基線変動が発生するわけではないが、記録中の体の動きによる影響を受けて心電図波形品質が低下しやすい状態になることが評価結果からわかっている。

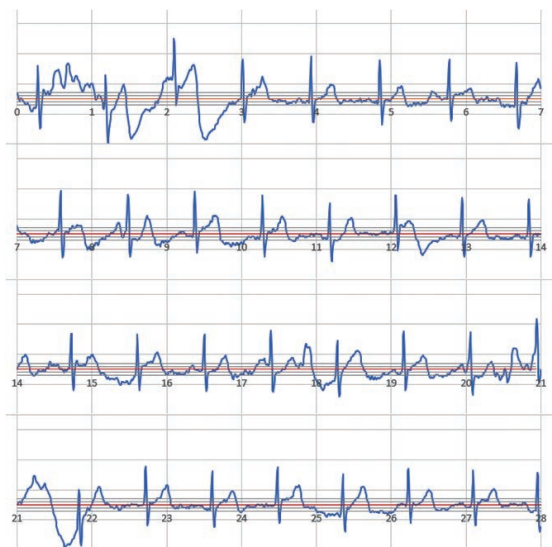


図 14 記録品質が悪かった際の心電図波形例

同じ被験者における、接触抵抗が低かった場合の心電図波形記録例を図 15 に示す。この記録回の接触抵抗は 9.7 M Ω と低く、基線に沿った心電図波形が記録できていることが分かる。

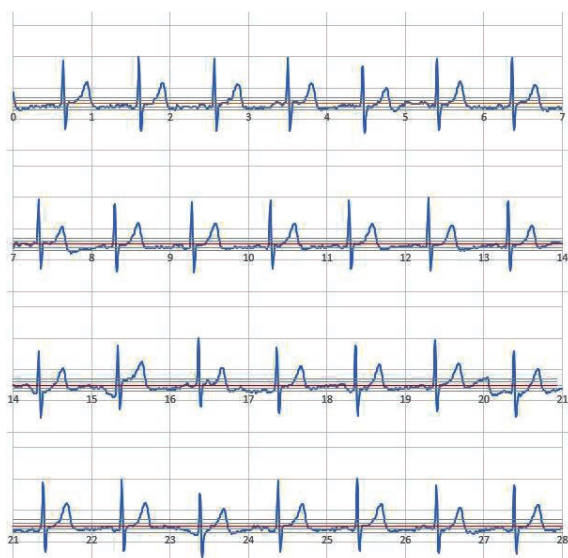


図 15 記録品質が良かった際の心電図波形例

5. 製品波形品質

本論文の検討内容を反映した実機 HCG-9010U の試作機を用いて、波形品質を確認した。図 16 a) に示したように、既存機種からディスプレイを除いた形状となっている。製品による心電図波形記録の対象となる症状を持った患者の心電図波形を記録し、その実用性を検証した。なお評価にさきがけて試験実施病院の倫理審査委員会の認可を受け、被験者に十分なインフォームドコンセントを実施した。

5.1 検証内容

- ・実施場所：康生会クリニック（日本 京都府京都市）
- ・被験者人数：27 名

検証の結果、医師が診断した症状の内訳は下記の通りだった。

- 正常 8 名
- 頻脈／徐脈 3 名
- 心房細動 5 名
- 期外収縮／上室期外収縮 5 名
- ST 上昇／ST 下降／陰性 T 波 4 名
- その他（房室ブロック、T 波平低）2 名

- ・実施期間：2023 年 6 月 17 日～7 月 26 日
- ・記録手順：図 17 の通り、12 誘導心電計で心電図を記録後、本論文の機能を反映した「HCG-9010U」と既存の心電計「HCG-901」でも心電図を記録する。
- ・記録姿勢：12 誘導心電計は仰臥位、携帯型心電計は座位と、実際に使用される際と同じ姿勢で記録する。
- ・結果の判定：12 誘導心電計の波形と携帯型心電計の波形から、診断に影響を及ぼす波形品質の悪化が新機種で見られるかどうかを医師が確認する。また、12 誘導心電計と携帯型心電計の波形から症状を判読し、差が見られた場合には、既存の心電計と比較し、従来と同等の結果であることを確認する。



a) 新機種
HCG-9010U
53mm × 83mm × 30mm



b) 既存機種
HCG-901
67mm × 121mm × 24mm

図 16 検証使用機器

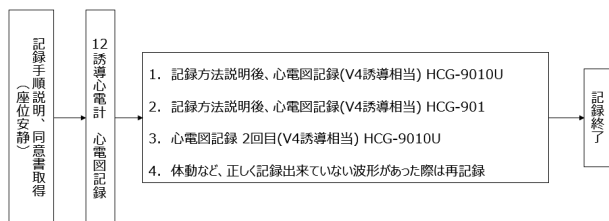


図 17 検証プロトコル

5.2 検証結果

医師による 12 誘導心電計波形と携帯型心電計波形の比較の結果、27 件中 26 件は両波形からの診断結果が一致し、症状を正しく読み取れることを確認した。不一致となった 1 件は、12 誘導心電計では T 波平低が見られ、携帯型心電計では正常波形だった。この差は、12 誘導心電計が V6 誘導で T 波平定を読み取ったことにに対し、携帯型心電計は V4 誘導相当のみのため波形に病態が現れなかったことが原因であり、従来機器でも同様の結果を示した。これは対象とする誘導の違いの影響であり、機器の波形品質の影響ではない。結果、携帯型心電計は、正しい診断が可能な波形を記録できていることが確認できた。また医師のコメントから、誤診断に繋がるような品質の悪い波形がないことも確認できた。

6. むすび

検討の結果、波形品質の安定には、「電極押付け方向が同一ベクトル上にあること」、「本体保持部と電極部が離れ回転方向での不安定さがいないこと」、「機器の保持姿勢が、関節の自然な向きや湾曲、可動域など人体の構造に合っていること」、「電極接触部が、性別や体形に影響を受けず、誰でも同じように肌に接触できる形状であること」をすべて満足することが重要であると確認した。また安定した波形を記録するために必要な接触抵抗を明確にし、必要な接触抵抗が保たれることを確認した後に自動で記録を開始する機能も検討できた。これらの対策により、記録中に波形の品質を確認することができないディスプレイなしの携帯型心電計でも、品質の良い心電図波形記録を可能にし、小型化による携帯性向上を実現した。

3 章で紹介した本体形状は、研究当時、オムロン ヘルスケア株式会社 商品事業統轄部 デザイン部に所属していた Brian Brigham 氏、井上皓介氏の協力により完成しました。両氏の貢献に感謝いたします。

また 5 章で記載した評価において、康生会クリニックの榊田出医師及び心電技師や看護師のみなさんに多大なご協力をいただきました。ご協力に感謝いたします。

参考文献

- 1) 池田隆徳 他, “2024 年日本不整脈心電学会／日本循環器学会 携帯型／装着型心電計の適切使用に関するコンセンサスステートメント,” 心電図, vol. 44, no. 4, pp. 275-307, 2024.
- 2) オムロン ヘルスケア株式会社. “携帯型心電計 HCG-8010T1.” オムロン ヘルスケアストア. https://store.healthcare.omron.co.jp/category/28/HCG_8010T1.html (Accessed: Jan. 15, 2025).
- 3) オムロン ヘルスケア株式会社. “携帯型心電計 HCG-9010U.” オムロン ヘルスケアストア. https://store.healthcare.omron.co.jp/item/HCG_9010U.html (Accessed: Jan. 15, 2025).

執筆者紹介

**小高 心哉 KODAKA Shinya**

オムロン ヘルスケア株式会社
商品開発統轄部 循環器商品設計部
専門：機械工学

**小野 健児 ONO Kenji**

オムロン ヘルスケア株式会社
商品開発統轄部 循環器商品設計部
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。

1

オムロンの成長領域で イノベーションを生み出す技術

ー 3. ソーシャルソリューションー



定量的な着雪防止機能と車両検知性能を両立したミリ波レーダフードの開発

樋上 智彦, 萩原 祥行, 谷本 雄大

安全で円滑な道路交通の実現に向けて、道路交通インフラとして整備されたセンサから車両情報を取得し、信号制御や車両の自動運転支援に活用する高度道路交通システムが重要となる。この一環として当社では交通監視用ミリ波レーダの展開を行っている。ミリ波レーダは従来のセンサに比べ、広い範囲で車両情報が取得できるが、電波照射面に着雪が発生すると、電波が減衰し検出性能の低下を招く。そこで、降雪地域も含めた日本全国へのミリ波レーダの展開に際し、着雪防止フードの開発を実施した。本報告ではミリ波レーダ用着雪防止フードを設計するにあたって、まず目標とする風雪量の定量化を実施した。また、フード付加により車両検知性能に影響を及ぼさないようなフード構造を電磁界シミュレーションにより決定した。そして、着雪防止と車両検知の両面からの有効性を実験的に確認できたことを示す。

Development of a Millimeter-Wave Radar Hood Having Quantitative Snow Avoidance and Vehicle Detection Accuracy

HINOUE Tomohiko, HAGIWARA Yoshiyuki and TANIMOTO Yudai

It is crucial to utilize an intelligent transport system that gathers vehicle information from sensors installed as part of the road traffic infrastructure and uses this data for signal control and support for autonomous driving to ensure safe and smooth traffic flow control. We have developed millimeter-wave radars for future traffic monitoring. Millimeter-wave radars can gather vehicle information over a wider range compared to the other sensors. However, when snow accumulates on the radar's emission surface, it causes the radio waves to attenuate, leading to a decrease in detection accuracy. Therefore, we have developed a snow protection hood because we would like to try spreading the millimeter-wave radars throughout Japan, including snowy regions. In this report, we quantified the target amount of snow and wind for the design of the snow protection hood. Furthermore, we determined a hood shape that would not affect vehicle detection accuracy by attaching the hood to the sensor, as confirmed through electromagnetic field simulation. In conclusion, we would like to report those results that we have experimentally confirmed the effectiveness in terms of both snow avoidance and vehicle detection.

1. まえがき

日本国政府は世界一安全な道路交通の実現を目指し、およそ5年周期で交通安全基本計画を策定している。現在は、令和3年度から7年度までの5か年を第11次交通安全基本計画として施策推進が行われている¹⁾。その中での具体的な施策として、高度道路交通システム (Intelligent Transport Systems: 以下、ITS) の活用があげられている。ITS活用の目的として、道路交通の安全性、輸送効率およ

び快適性の向上を実現するとともに、渋滞の軽減といった交通流の円滑化が考えられている。その施策としては、詳細な道路交通情報の収集・提供のための車両感知器のインフラ整備を推進し、インフラから提供される情報を補完するため、広範囲なリアルタイムの自動車走行履歴 (プローブ) 情報なども集約・配信しようとしている。

我々はこの施策をもとに、現在の一般道路における交通量の収集に利用されている超音波感知器の代替として、低コストでより広範に車両情報を収集できるミリ波レーダを展開している。車両用感知器の種類は警察庁で定められて

Contact : HINOUE Tomohiko tomohiko.hinoue@omron.com

おり²⁾、現在、日本で最も多く使われている車両感知器は超音波感知器³⁾である。その超音波感知器に対して、ミリ波レーダはいくつかの利点を有している。図1に示す通り、複数の車線を1台で検知可能であることや路肩設置が可能であり、保守性に優れている。また、超音波感知器のように点での感知ではなく、面で感知が可能であるため、車両の挙動などを把握することができる⁴⁾。これは超音波感知器が設置点を通る車両より挙動を推測するのに対し、ミリ波レーダは設置点以外の部分の挙動も取得可能ということである。そのため、信号待ち車両の発進や車列長の検知などを行うことが可能となる。この特性を活かし、ミリ波レーダと信号制御機を連携させ、適切な信号制御を行うことにより、交通渋滞を緩和させるといった、ITSへの活用⁵⁾も期待されている。

ミリ波レーダは、図2に示すように、高所から道路面にに対して電波が照射されるよう設置される。これにより、走行する車両を広い範囲で計測できる。一方で懸念点として、横風を伴う降雪が発生した場合は、雪が電波照射面に直接あたることになり、時間と共に着雪する可能性がある。実際に、着雪が発生すると電波が減衰し、車両検出精度に影響があることが、実験より確認されている。

日本では沖縄を除く全都道府県で降雪があり、2019年度にはそのうちの27都道府県で5日以上以上の降雪が確認されたとする統計結果⁶⁾がある。そのため、日本全域へのミリ波レーダを展開するにあたり、着雪に対する対応が必要と考えた。

着雪を防止するための対応策として最も簡便な方法は、着雪防止コーティングをすることである。しかし、この方法では、長期間にわたって屋外に暴露した場合、コーティングの劣化により着雪防止性能が低下することが考えられる。また、ミリ波レーダにヒータを設置方法もあるが、電波照射面にはヒータを設置できない。そこで我々は物理的に着雪が発生せず、後付けが可能であるフードを検討した。

フード検討に際しては、電波照射面に雪が付着せず、同時に車両検知性能に影響を及ぼさないような電波特性を確保する必要がある。これら両面の性能確保のため、次のプロセスに従って設計を実施した。

1. 全国的な風速の統計データから目標とする風雪量を決定し、着雪しないモデルを構築。
2. 構築したモデルに対して、電波的な側面からフード無と同等の性能が担保できるかをシミュレーションし、フード形状を決定。
3. 目標とする風雪量に対する耐性確認。
4. 実道路でのフード有/無のセンサを用いた比較精度検証

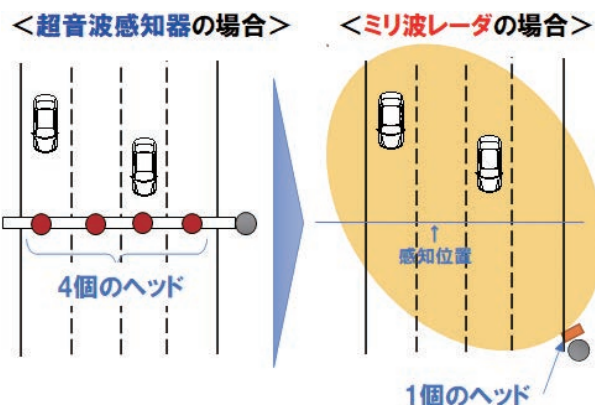


図1 超音波感知器とミリ波レーダの比較

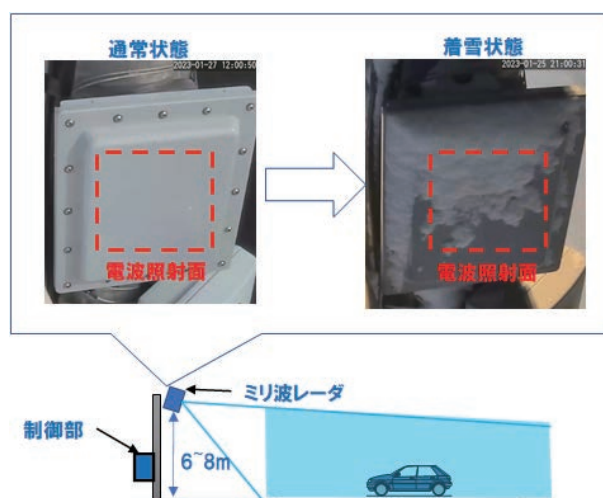


図2 ミリ波レーダ設置構成・着雪課題

2. フード設計モデルの構築

2.1 耐風雪量目標値の決定

センサ用のフードは、そのセンサに合わせて様々な種類が開発されているが、そのフードが持つ防風雪性能に関しては、明示されていないことが大多数である。そこで、ミリ波用着雪防止フードを開発するにあたり、防護すべき耐風雪量として、平均風速と目標値を定めた。

風速の指標分類として、最大風速（10分間平均風速の最大値）、瞬間風速（3秒間の平均風速）、瞬間最大風速（3秒間の最大風速）、平均風速（10分間の平均風速）の4指標がある。それらの内、平均風速の指標を採用した理由として、雪がある程度の厚みを伴ってミリ波レーダに付着するためには、一定時間が必要であること、および、定常的な風雪に耐えることを考慮したためである。

次に、気象庁ホームページより、過去10年間（2013～2023）の降雪期間として定義した1～2月の平均風速のデータを取得し、表1を作成した⁷⁾。データの作成において、各都道府県に少なくとも一つ存在する気象台、もしくは

は主要な観測所を合計 136 地点選定した。また、表 1 では 90% タイルとしてまとめを行っている。これは第一に、平均風速の中でも異常値となる平均風速を排除するためである。第二に、10 年間のデータから、一般的に発生が想定される風雪に対して、着雪防止を図ることを目的としたためである。

この結果として、この中の最大である北海道：道南の 9.9 m/s の平均風速を充足できるようにフードの防護性能目標値を 10 m/s とした。

表 1 該当地点での平均風速 (90% タイル表)

地方	地点数	平均風速 (m/s)
全体 (沖縄除く)	136	5.8
北海道全域	22	7.3
・道北 (宗谷、留萌)	5	8.0
・道東 (十勝、釧路、根室)	7	6.7
・道央 (石狩、後志、空知、胆振、日高)	8	6.3
・道南 (渡島、檜山)	2	9.9
東北地方 (青森、秋田、岩手、山形、宮城、福島)	17	6.3
北陸地方 (新潟、石川、富山、福井)	9	6.7
関東地方 (茨城、栃木、群馬、千葉、埼玉、東京、神奈川)	13	5.5
甲信地方 (長野、山梨)	7	4.1
中部地方 (岐阜、静岡、愛知、三重)	14	6.2
近畿地方 (滋賀、京都、大阪、兵庫、奈良、和歌山)	11	5.1
中国地方 (鳥取、島根、岡山、広島、山口)	14	4.9
四国地方 (徳島、香川、愛媛、高知)	9	5.6
九州地方 (福岡、佐賀、長崎、大分、熊本、宮崎、鹿児島)	20	4.7
沖縄 (本島のみ)	2	6.6

2.2 雪の飛翔方向の理論モデル

フードが 10 m/s の風雪に耐性を有するかは、理論的に雪の落下速度の関係から導き出せると考えた。

代表的な雪の結晶の落下速度は、0.94 m/s で落下すると報告されている⁸⁾。ここに横方向へのベクトルである風の要因を付加し、雪の飛翔方向の単純理論的モデルとして、雪の鉛直落下速度 (f) と風速 (v) の関係で表した。この時、センサ表面への雪の入射角度は式(1)および図 3 で表される。例として、簡便化のために落下速度を 1 m/s と換算す

ると 10 m/s の風速に対しては 5.7° の角度でセンサ表面に入射されることがわかる。なお、単純化のため、このモデルでは、下からの吹上の風に関しては考慮しないこととする。

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{f}{v} \quad (1)$$

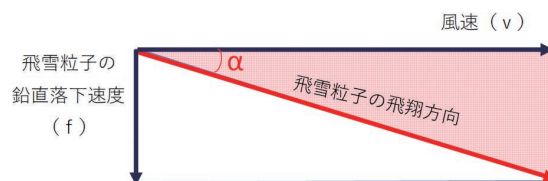


図 3 雪の飛翔方向の理論モデル

2.3 フード形状の仮決定

雪の飛翔方向の理論モデルを利用し、フードの検討を実施した。フードをミリ波レーダに適用した場合に、着雪が、ミリ波レーダからの電波照射を阻害しないように、レーダの送受信アンテナを含むプリント基板 (以下：レーダアンテナ基板) の範囲には、雪を付着させない構造の検討が必要である。そのモデルを図 4 に示す。このとき、レーダアンテナ基板の下端に雪が付着する検知限界角 β は以下のパラメータと式(2)で表される。これに式(1)とミリ波レーダの俯角 θ を加味した場合、理論式として式(3)が成り立つ。これは、理論式(3)を満足する場合、レーダアンテナ基板の下端より上には着雪発生しないこと、すなわち電波の送受信に問題が発生しないことを表している。

これらのパラメータを元として、図 5 のようにフードの仮形状を設計した。

なお、フードの素材としては電波の透過性やシミュレーションでの外乱要因をなくすことを考慮し、特性が既知である電波照射面カバー (以下：レドーム) と同様の素材であるポリカーボネートを採用した。

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{H - H' + T}{L} \right) \quad (2)$$

$$\beta < \theta + \alpha \quad (3)$$

- ・ H : フードの高さ (mm)
- ・ H' : 前垂の長さ (mm)
- ・ L : フードの長さ (mm)
- ・ T : レーダアンテナ基板下面までの長さ (mm)
- ・ θ : ミリ波レーダの俯角 ($^\circ$)

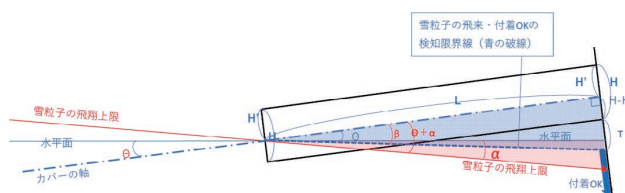


図 4 フードへの理論適用

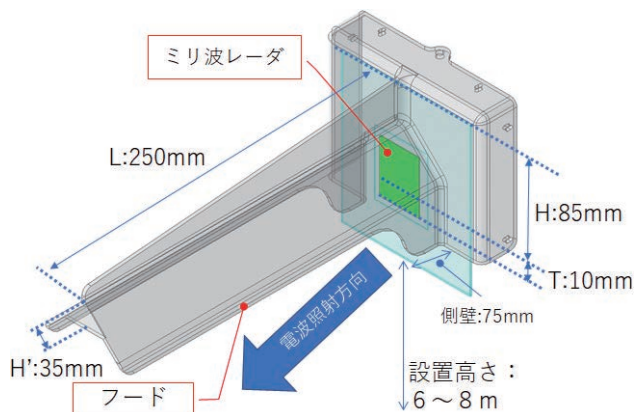


図5 センサフード形状

3. フード形状の詳細設計

前章で仮決定したフード形状はミリ波レーダへの着雪の観点のみで設計されており、ミリ波レーダから送受信される電波への影響は考慮されていない。フードの付加によって電波特性が大きく変化すると、車両検知性能に影響を与えるおそれがある。そこで、フード形状が電波特性に与える影響をシミュレーションによって評価し、影響を低減するように設計を行うこととした。

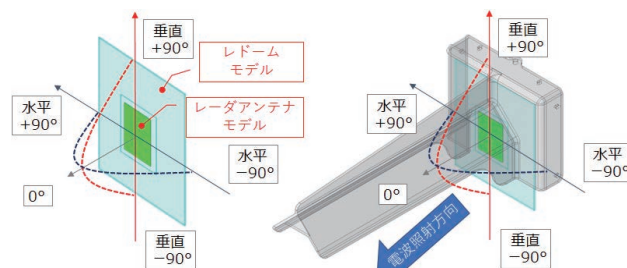
3.1 シミュレーション条件

フード形状がミリ波レーダの電波特性に与える影響について、電磁界シミュレータ Ansys HFSS を用いて解析した。図6 (a) に、フード付加前のミリ波レーダ単体としての解析モデルを示す。なお、解析モデルは、計算負荷を低減するため、レーダから送受信される電波特性への寄与度が大きい、以下の2つのみで構成している。

- ・レーダアンテナ基板
- ・レドームの一部

そして、図6 (b) はフードを付加した解析モデルである。

これらフード付加前後のモデルについて解析を行い、水平面と垂直面におけるアンテナ放射パターンを比較評価した。アンテナ放射パターンにおける利得が低下すると、ミリ波レーダとしての車両検知距離が低下する。また、利得が最大値の半分となる放射パターンの角度幅をビーム幅と呼び、ビーム幅が狭くなると車両検知角度範囲も狭くなり、検知可能な車線数の減少につながる。したがって、フード付加による放射パターンの変化が小さければ、車両検知性能への影響も小さくなる。



(a) フード無解析モデル (b) フード有解析モデル

図6 電磁界シミュレータでの解析モデル

3.2 シミュレーション結果

ミリ波レーダの設置形態と検知対象である車両の位置関係を考慮すると、ミリ波レーダから見て検知対象の車両は、図6の解析モデルにおける垂直角度がゼロ度以下の範囲にしか存在しない。フードは垂直角度が負の範囲に大きく開放された形状であり、シミュレーションにおいても垂直面の該当範囲で利得とビーム幅に明確な変化が見られなかった。そのため、垂直方向への影響するフード長 L としては250 mm 固定として検討から除外し、今回は水平面の放射パターンを評価対象とした。

ミリ波レーダの使用周波数である、76 GHz における水平面放射パターンのシミュレーション結果を図7に示す。フードを付加することで、水平角度がフード無に比べて 47° から 9° へと約1/5 になっている。また、放射パターンに細かい振動成分が重畳しているが、これは電波がフードで多重反射することにより発生したリップルと呼ばれるものである。これらの変化は、車両検知距離の低下や車両検知可能な車線数の減少につながる。

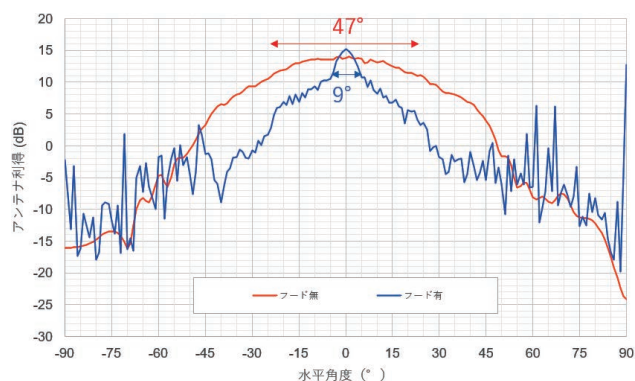


図7 水平方向シミュレーション結果

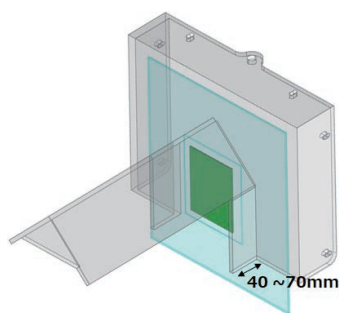
3.3 フードの改善

3.2 で示したフードの影響を低減するためには、その原因の特定が重要となる。これはフードのいずれかの部位が電波の指向性を阻害しているためである。そのため、その部位を特定し、指向性を阻害しないような形状へ改善を検

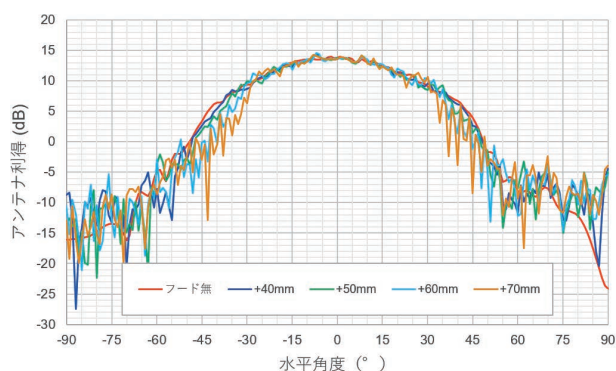
討した。ここで、水平面の放射パターンに影響を与える主要因は、水平面と直交するように存在するフード側壁部分の形状にあると考えた。フード側壁からの風雪に対しての防護性能も必要であることから、側壁部分そのものは残しつつ、放射パターンへの影響が小さくなるように側壁の長さを調整することを検討した。検討方法としては図 8 (a) に示すようにフード側面の部分をレドーム表面から 40 mm/50 mm/60 mm/70 mm と異なる長さに設定したモデルを用意した。そして、長さを変更した場合の水平面放射パターンへの影響を比較した。

結果を図 8 (b) に示す。この結果より側壁の長さが 50 mm 以上になると明確にビーム幅への影響が強くなり、リップルも増大することがわかったため、側壁の長さは 40 mm に決定した。

また、フードの前垂部分に関してもできるだけレーダアンテナ基板を覆い隠せる構造が着雪防止機構としては望ましいため、長さを図 9 (a) に示すように 35 mm/45 mm/55 mm と変更し、シミュレーションを実施した。その結果を図 9 (b) に示す。この結果からは前垂はどの長さでも大きく放射パターンに影響しないことが分かったため、長さは最終的な着雪実験により決定することとした。

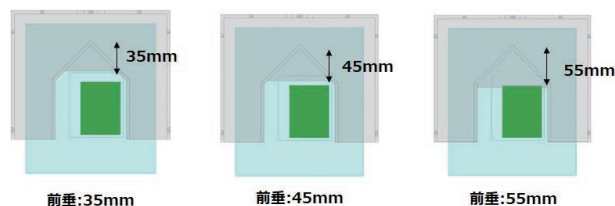


(a) フード形状の変更パターン

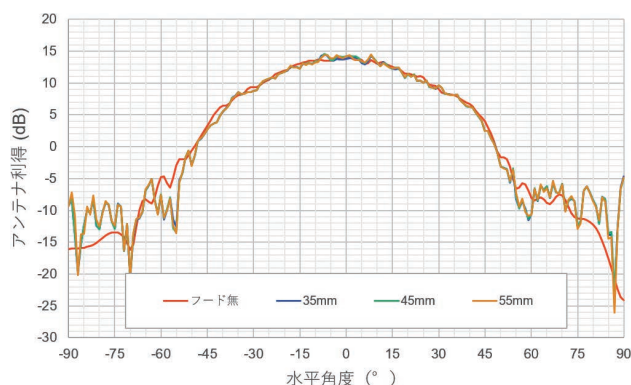


(b) 側面フード形状シミュレーション結果

図 8 フード側面形状における水平放射への影響比較



(a) 前垂形状のパターン



(b) 前垂長さによるシミュレーション結果

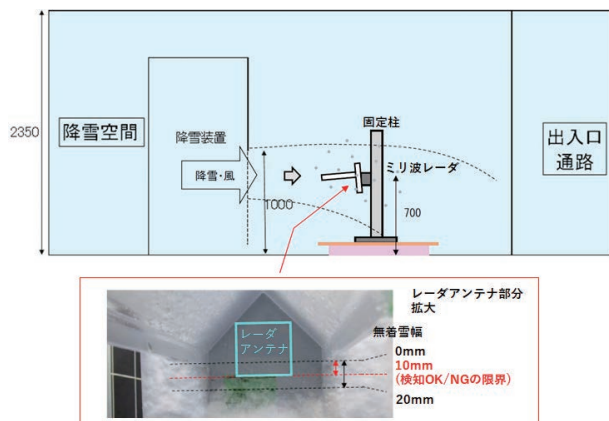
図 9 フード前垂形状における水平放射への影響比較

4. 着雪実験

前章での電磁界シミュレーションで、電波の指向性に影響を与えないフード形状の決定を実施した。本章では形状の決定したフードを用いて、レーダアンテナ部に着雪が発生するかの着雪実験を実施した。

4.1 実験条件

着雪実験に関する実験条件を図 10 に示す。風速 10 m/s までを再現できる降雪装置を用いてフードを付加したミリ波レーダを図の中央の固定柱に設置し、雪の吹付を行った。フードの実験条件としては図中条件の通り、 H' および Θ を変化させた。また、降雪装置により風速 v を変化させつつ、雪の吹き付けを実施し、一定の実験時間経過後のミリ波レーダのレーダアンテナ基板範囲に付着する雪の有無を合格の判断基準とした。なお、実験のパラメータは全網羅的に実施するのではなく、風速 10 m/s を合格できるパラメータを探索しつつ、実験を行った。また雪質は最もミリ波レーダに付着しやすい湿雪として実験を実施した。



【フードパラメータ】

- ・フードの高さ H : 85 (mm)
- ・前垂の長さ H' : 35/45/55/65 (mm)
- ・フードの長さ L : 250 (mm)
- ・レーダアンテナ基板下面までの長さ T : 10 (mm)
- ・ミリ波レーダの俯角 Θ : 2/3/4/5/6 ($^{\circ}$)

【降雪装置パラメータ】

- ・風速 v : 4/6/8/10 (m/s)
- ・実験時間 t : 10 (min)

図10 着雪実験条件

4.2 実験結果

着雪実験の結果を図11に示す。図での横軸 β は理論式(2)の通り、ミリ波レーダにフードを付加し、水平に置いた状態でレーダアンテナ基板下端に入射される角度を決定している。本実験では前垂の長さを変更することにより、角度 β を可変とした。また、縦軸 $\Theta + \alpha$ は雪の進入角度 α にミリ波レーダの俯角を加味した場合の角度であり、風速および俯角を変更することにより角度を可変とした。そしてそれらのパラメータを変更して決定された縦軸、横軸の角度に対して実験結果をOK、OK（限界）及びNGの点でプロットした。OKとなっている点は、図10で示されるレーダアンテナ基板下端より上部に着雪が認められなかった実験条件である。OK（限界）とした点は、レーダアンテナ基板下端から10 mmのラインより上部に着雪が認められなかった実験条件である。10 mmと定義した理由は、レーダアンテナ基板の下端から送受信に関連するアンテナ素子部分まで10 mmのクリアランスがあるためであり、電波特性に影響を与えない限界のラインとして定義したためである。そして、OK（限界）以上に着雪が発生した実験条件はNGとした。

それらをプロットした図に対して理論式(3)に基づき検知可能領域と検知不可領域に区分した。この区分は、理論的に下記のように定義される。これは理論式(3)で与えられたパラメータが正しいとすると次のようになることが予想される。

- ・検知可能領域：レーダアンテナ基板下端への着雪を予想した領域
- ・検知不可領域：レーダアンテナ基板下端以上への着雪を予想した領域

その結果、NGの点は検知不可能領域に位置することが確認され、OK（限界）がほぼ境界に位置することが分かった。それにより、実験と理論値は近い関係となることがわかった。なお、図中での赤枠でのプロットは風速10 m/sで実験した結果であり、レーダアンテナ基板以下の着雪となり、OKと判定された。それにより、本フードでの着雪防止性能は満足することがわかった。

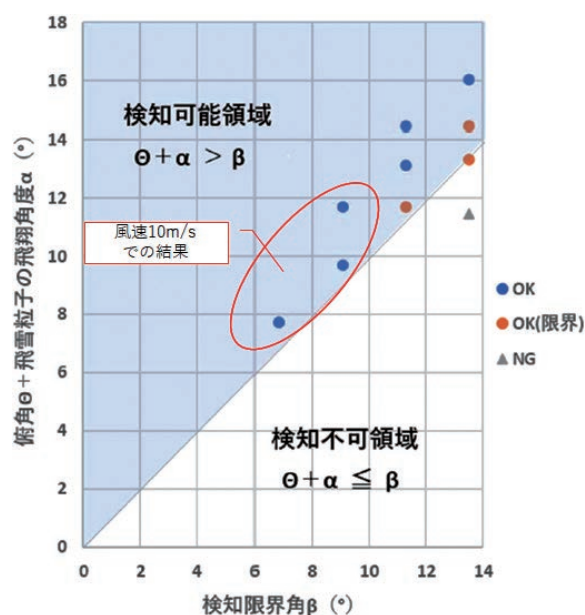


図11 着雪実験結果

5. 実フィールドでの検証

前章までの実験で電波として指向性を阻害せず、かつ目標値である10 m/s風雪に対して耐性のあるフードが完成した。ここでは最終的な確認として、実フィールドを用いた車両検知実験を実施した。

5.1 実験条件

実験として、図12に示す通り、道路上で実際に車両の検知を行い、フードを付加した状態でも検知に影響がないかの実験を行った。実験方法は、時刻同期されたミリ波レーダ（フード無/有）および車両の真値台数計測用カメラを作動させ、フード無のミリ波レーダとフード有のミリ波レーダで検知した検知台数と比較することとした。

また、その他の実験条件としては以下の通りである。

- ・ミリ波レーダ設置高さ: 5.85 m

- ・実験車線数：4 車線
- ・車両検知方向：遠ざかる方向（後方検知）
- ・車両検出位置：センサから 60 m 地点



図 12 道路上での検知実験

5.2 実験結果

フード無でのミリ波レーダとフード有でのミリ波レーダの車両検知台数および車両検知精度の結果を表 2 に示す。

なお、表 2 での検知精度は式 (4) を用いて算出した。結果は、フード有のミリ波レーダのほうが、フード無のミリ波レーダよりも 2.4 ポイント高い検知精度を示す結果となった。この結果より両条件で精度に違いはあるが精度目標は達成できていることを確認した。

今回、フード有のミリ波レーダがフード無のミリ波レーダを上回る検知精度を達成している要因について、次のような可能性が考えられる。一つは、フードにより車線外などからのマルチパスによりミリ波レーダに戻ってくる不要な電波をカットできた可能性である。なお、今回のフードを設計する上では、送信アンテナについて放射パターンをシミュレーション評価したが、受信アンテナの評価は行っていない。

もう一つは、フード有無のミリ波レーダの設置位置の関係で、対象物への電波の照射および反射波の受信状況が異なるため、若干の誤差が発生した可能性がある。

上記の要因考察も含めた結論として、フードを付加したミリ波レーダはフード無と同等の精度を達成できると判断した。

$$\text{検知精度 (\%)} = \left(1 - \frac{\left| \text{真値台数 (台)} - \text{検知台数 (台)} \right|}{\text{真値台数 (台)}} \right) \times 100 \quad (4)$$

表 2 フード有無での検知精度比較

カメラによる真値台数	検知台数	検知精度
フード無 ミリ波レーダ	661 台	97.4%
フード有 ミリ波レーダ	645 台	99.8%

6. むすび

本報告ではミリ波レーダへの課題として存在したレーダ表面への着雪に対して、防護するための方法として次のようなことを検討、決定した。第一に全国の風雪量のデータをまとめ、防護すべき風雪の目標値を 10 m/s として定めることができた。次にフードの開発に際しては、フード自身がミリ波レーダの電波を阻害しないように、影響の無いフード形状を電波シミュレーションにより決定することができた。また、決定したフード形状に対して着雪実験を実施することにより、目標値とする 10 m/s の風雪に対してもレーダアンテナ基板の範囲に着雪が起きないことを実証することができた。そして、最終的に実道で実車両を用いた検証を実施し、フードをミリ波レーダに付加したとしても、フードが無い状態と比較して、変わらない検知精度を有することが確認できた。

以上より、定量的な風雪に対する着雪防止機構を備え、同時に車両検知に影響のない電波照射範囲を具備するフードの開発を達成することができた。

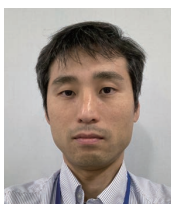
また、副次的には本フードの開発を手戻りなく検証することができた。その要因としては、着雪の理論構築と電磁界シミュレーションで詳細形状を決定した上で実験に臨んだことにより、実験結果からのフィードバックにより改善を行っていく従来のカット＆トライのプロセスを省略することができたことがあげられる。

今後は、本フードを用いることにより従来では設置が難しいと考えられている降雪地帯に関してもミリ波レーダを展開していく予定である。

参考文献

- 1) 中央交通安全対策会議. “第 11 次交通安全基本計画.” 内閣府. <https://www8.cao.go.jp/koutu/kihon/keikaku11/index.html> (Accessed: May. 17, 2024).
- 2) 車両用感知器仕様書, 警交仕規第 1017 号「版 2」, 2019-03-13.
- 3) 警察庁交通局 監修, 警察による ITS, 財団法人 日本交通管理技術協会／都市交通問題調査会, 1998, pp. 44-45.
- 4) 谷本雄大 他, “高角度分離分解能を有する到来方向推定を導入した交通監視用ミリ波レーダ,” *OMRON TECHNICS*, vol. 52, no. 1, pp. 41-46, 2020.
- 5) 藤森立 他, “ばねモデルを用いた交通信号機スプリット制御法,” *研究報告数理モデル化と問題解決 (MPS)*, 2021-MPS-136, no. 2, pp. 1-6, 2021.
- 6) 総務省統計局. “統計でみる都道府県のすがた 2021 (B 自然環境).” e-Stat. <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/file-download?statId=000032055319&fileKind=0> (Accessed: Jun. 13, 2024).
- 7) 国土交通省 気象庁. “過去の気象データ・ダウンロード.” 国土交通省 気象庁. <https://www.data.jma.go.jp/risk/obsdl/index.php> (Accessed: Jul. 17, 2023).
- 8) 孫野長治, “雪の結晶の落下速度,” *雪氷*, vol. 15, no. 6, pp. 1-4, 1954.

執筆者紹介



樋上 智彦 HINOUE Tomohiko

オムロンソーシャルソリューションズ株式会社
交通ソリューション事業本部
事業開発部
専門：電気・電子工学



萩原 祥行 HAGIWARA Yoshiyuki

オムロンソーシャルソリューションズ株式会社
交通ソリューション事業本部
事業開発部
専門：電気・電子工学
所属学会：電子情報通信学会、日本技術士会
技術士（電気電子部門）



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
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。

機構デバイス向けの低温短時間加熱硬化と高耐熱機能を有する一液性エポキシ樹脂の開発

大谷 修, 今泉 豊博, 福原 智博

機構デバイスに使用される異種材接合用接着剤として、一液性エポキシ樹脂はその高い強度および使いやすさの観点から広く利用されている。当社においても一液性エポキシ樹脂をリレーやスイッチなどの機構デバイスに採用してきた。近年、有害化学物質の排除という観点から、鉛フリーはんだ実装の普及に伴う実装温度の上昇により、機構デバイスの耐熱性向上も求められている。一方、環境への配慮が高まる中、製造工程における低エネルギー消費が求められており、低温短時間での加熱硬化が必要とされている。本研究では、主剤と硬化剤の反応機構に基づいて一液性エポキシ樹脂の配合を調整し、耐熱性および低温短時間硬化を実現した。本論文はその技術内容について報告する。

Development of One-component Epoxy Resin with Short-time Curing and High Heat Resistance for Mechanical Devices

OTANI Osamu, IMAIZUMI Toyohiro and FUKUHARA Tomohiro

As an adhesive for bonding dissimilar materials used in mechanical devices, one-component epoxy resins are widely used from the viewpoint of their high strength and ease of use. We have also used one-component epoxy resins for mechanical devices such as relays and switches. In recent years, from the viewpoint of eliminating hazardous chemical substances, there has been a demand to improve the heat resistance of mechanical devices due to the increase in mounting temperature due to the spread of lead-free solder mounting. On the other hand, as environmental considerations increase, low energy consumption in the manufacturing process is required, and heat curing at low temperatures and in a short time is required. In this study, the composition of the one-component epoxy resin was adjusted based on the reaction mechanism of the main agent and the curing agent, and heat resistance and low-temperature short-time curing were achieved. This paper reports on the technical contents.

1. まえがき

リレーやスイッチなどの機構デバイスは、家電機器、車両、通信機器など様々な用途に使用される制御部品として不可欠なものである。リレーには、開放タイプと気密タイプの2種類が存在する。開放タイプのリレーはケースがない、またはケースが接着されていないものである。気密タイプのリレーはケースとベースが接着され、密封されている。この気密タイプのリレーは、基板実装時のハンダフラックスや周囲環境からの異物、腐食ガスなどの侵入による接触障害を防止するために、接着剤で気密封止されている。気密性以外にも、塗布および硬化の生産性、基材との

接着性、絶縁物の表面に生じる放電によるトラッキングを防ぐ耐トラッキング性などが求められる。当社でも、これらの特性を満たす一液性エポキシ樹脂の接着剤を利用している¹⁻³⁾。

一液性エポキシ樹脂は、一般的に液状の主剤、固形の硬化剤、無機物のフィラーから構成される。主剤と硬化剤は加熱によって化学反応を起こし、液体から固体へと変化して固化する。この固化により、成形体同士を接着させることが可能となる。我々は、これらの成分を改良し、機構デバイスの要求特性に適合する一液性エポキシ樹脂をこれまでに開発してきた⁴⁻⁶⁾。

近年、有害化学物質の排除を目的とした表面実装の普及に伴い、実装工程の処理温度が高くなっている。また、従

Contact : OTANI Osamu osamu.otani@omron.com

来主流であったスルーホール実装では、基板の一部が数秒程度溶融はんだに接触するだけであったが、表面実装では、リフローと呼ばれる加熱工程において基板全体を30秒以上はんだ溶融温度に保つことが求められる。したがって、表面実装用の電子部品に用いる一液性エポキシ樹脂には、リフロー工程に耐える高耐熱性が要求される。一方で環境負荷低減の観点から、一液性エポキシ樹脂の硬化時におけるエネルギー消費の削減も重要な課題となっており、低温短時間で硬化できる性能も求められる。

リフロー工程における耐熱性の確保を目的として、一液性エポキシ樹脂に高耐熱性を付与するためには、樹脂そのものの耐熱性を向上させる必要がある。つまり1液性エポキシ樹脂を構成する主剤または硬化剤の改良アプローチが考えられる。これまで耐熱性を向上させる方法として、主剤側の改良が選択されてきた。具体的には、フェノールやナフタレン骨格を持つ芳香族を多く含む主剤を用いることで、硬化物の耐熱性を向上させることが報告されている¹⁾。しかし、これらの主剤は固体であるため、主剤を溶解してから硬化反応を行う必要があり、その結果として硬化温度が高くなる。このように耐熱性と低温短時間硬化は共に要求される特性であるが、相反する特性でもある。

これらの相反する特性を両立する既存の方法が提案されているが、いずれも樹脂や製造工程の大幅な変更が求められる上、実用上の課題もある。例えば、二液性エポキシ樹脂は、主剤と硬化剤を常温で混合するだけで固化し、エネルギー消費が低いという利点がある。また、UV硬化型樹脂は、樹脂内で光重合反応が起こり、液体が固体に変わる化学反応である。UV硬化型樹脂の構成要素は主剤（液体）と光開始剤から構成される。UV照射による光エネルギーを受けると、室温下でも光開始剤がモノマー（液体）に作用し、光ラジカル重合と呼ばれるモノマー同士を高速で反応させる重合タイプであるため、樹脂（固体）へと瞬時に変化する。このように、室温下でも硬化速度が非常に速い特性を持つため、短時間での硬化およびエネルギー消費の削減¹⁾につながるという利点がある。しかし、二液性エポキシ樹脂と光硬化型樹脂ともに、十分な強度や耐熱性を確保できないため、現状では機構デバイス向けの接着材としては用途が限定される。さらに、光硬化樹脂においては、光が照射されない影の部分が硬化しないため、UVが届かない場所では樹脂が未硬化となり、強度不足などの問題を引き起こす可能性がある。

以上より耐熱性と低温短時間硬化の相反する特性を両立するためには、新しいアプローチで一液性エポキシ樹脂での改善が必要不可欠と考えた。本研究では主剤と硬化剤の反応機構に基づき、一液性エポキシ樹脂に含まれる硬化剤の成分を検討し、耐熱性および低温短時間硬化を実現した。本論文はこの技術内容について報告する。

2. 一液性エポキシ樹脂の組成と評価方法

2.1 一液性エポキシ樹脂の作製

一液性エポキシ樹脂は、樹脂成分である主剤および硬化剤、強度を補強するための無機フィラー、ならびに各種添加剤で構成される。本研究は、化学反応と効果を明確にするために、主剤と硬化剤のみを用いて組成を検討した。主剤には、ビスフェノールA型の一般的なエポキシ樹脂（以下、エポキシ樹脂モノマーと称する）を使用した。硬化剤は、エポキシ樹脂用の一般的なアミンアダクト系硬化剤、シアナミド系硬化剤およびイミダゾール系硬化剤の三種類を用いた。

アミンアダクト系硬化剤は潜在性硬化剤と呼ばれ、比較的低温で硬化が促進される特性を有する硬化剤である。シアナミド系硬化剤は、二級アミン型の付加反応を引き起こすことで知られており、耐熱性および金属との接着性を付与することが可能である¹⁾。なお、アミンアダクト系硬化剤は、低温でエポキシ樹脂を硬化させることができる硬化剤としてよく知られている。

イミダゾール系硬化剤は連鎖移動型アニオン重合反応を誘起するため、触媒作用により少量の添加でもエポキシ樹脂モノマーに対して、3次元的に高分子反応が進む。そのために耐熱性の付与が期待できる硬化剤の1つである¹⁾。

シアナミド系硬化剤は熱硬化性樹脂の典型的な硬化剤である⁷⁾。一液性でポットライフが長く、エポキシ樹脂内のデシアンジアミドは三次元で非常に密接しており、硬化物の機械的、化学的特性に優れ、電子部品向けの接着剤の硬化剤として利用される。この硬化剤は高温まで上げないと、硬化が進まないとされる。

上記の硬化剤の特性より、Sample 1から3の組成はそれぞれの低温での硬化性を見極めることとした。Sample 4から6の組成は、低温での硬化が優位とされるアミンアダクト型硬化剤とその他の硬化剤を併用する配合とした。

表1 エポキシ樹脂の組成（重量部）

エポキシ樹脂の組成 (重量部)		Sample					
		1	2	3	4	5	6
主剤	ビスフェノールA型 エポキシ樹脂	100	100	100	100	100	100
硬化剤	アミンアダクト系 硬化剤	3			3	3	3
	シアナミド系 硬化剤		3		3		3
	イミダゾール系 硬化剤			3		3	3

樹脂の作製方法について述べる。表 1 に示す重量比率を基に主剤と硬化剤の総重量が 3 kg になるようにプラスチック容器に計量した。その後、エポキシ樹脂モノマーの液体と硬化剤などの粉末が均一に分散するよう攪拌機と三本ロールで混合した。なお、比較のため機構デバイス用市販品の一液性エポキシ樹脂も評価しデータを取得した。

2.2 評価方法

低温短時間硬化および耐熱性機能について、一液性エポキシ樹脂を以下の方法で評価した。

2.2.1 低温短時間硬化の評価方法

一液性エポキシ樹脂の化学反応を詳細に分析するため、示差走査熱量分析装置 (DSC) と赤外線分光装置 (FT-IR) を用いて解析した。

(1) DSC

一般的にエポキシ樹脂モノマーと硬化剤に熱を加えることで発熱反応を引き起こし、樹脂は硬化する。DSC は試料の吸熱・発熱に伴う熱流の変化を検知し、この発熱反応を検出することができる。さらに DSC の温度条件を工夫することで、一液性エポキシ樹脂の化学反応の温度依存性を解析することが可能である。例えば、オープン温度を一定に保つことで、一定温度での反応終了時間を明らかにすることができる。また、温度を室温から高温域に昇温することで、反応の開始温度も検出可能である。本研究では、熱分析の温度条件として以下の 2 つのプロファイルを採用した。

- ・ 120°C 一定
- ・ 50°C から 200°C までの昇温

低温短時間硬化の温度を 120°C に設定した理由は以下の通りである。一般に温度を上げるほど短時間で硬化が可能となるが、同時に環境負荷も増加する。そのため、低温での硬化を優先的に考慮し、一般的に硬化剤の融解が終了する温度である 120°C を熱硬化温度として設定した。なお、低温短時間硬化の目標値は、120°C 温度一定の条件下で市販品より短い時間で硬化反応を終えることとした。

(2) FT-IR

FT-IR は試料に赤外光を照射し、透過または反射した光量を測定する。赤外光が分子結合の振動や回転運動のエネルギーとして吸収されるため、FT-IR 測定によって分子の構造や官能基の情報をスペクトルから得ることができ、物質の同定に関する有効な情報を得ることができる。また、吸収する光量は物質の濃度や厚みに比例することから、スペクトル上のピークの高さや面積を用いて特定の分子の定

量もできる。

FT-IR 測定からエポキシ基の反応に関与するエポキシ環のピークは赤外領域の 918 cm^{-1} 付近で検出され、そのピークの変化を通じて化学反応（硬化反応）の進行を追跡することが可能である。具体的には加熱によりエポキシ樹脂モノマーが化学反応を進行させる過程で、エポキシ基が開環してエポキシ樹脂モノマー同士が結合するため、このエポキシ環のピークは減少する。さらに化学反応が進行すると、このピークは最終的に消失し、エポキシ樹脂が完全に固化したことを示す。FT-IR 分析は KBr 透過法により、500 から 2000 cm^{-1} までの赤外線スペクトルを取得した。

2.2.2 耐熱性の評価方法

耐熱性は、材料の観点と実機での両方の評価が必要と考え、動的粘弾性測定 (DMA) およびリフロー耐熱性試験を実施した。

(1) DMA

DMA は試験片に時間変化する歪みまたは応力を与え、その結果生じる応力または歪みを測定することで、試料の力学的特性を評価する手法である。この測定により、力学特性の温度依存性に基づく一液性エポキシ樹脂の耐熱性を明らかにすることができる。具体的には、DMA を用いて試験片の粘弾性特性である貯蔵弾性率 (E')、損失弾性率 (E'')、および損失正接 ($\tan\delta = E''/E'$) の温度依存性および周波数依存性を測定した。貯蔵弾性率 (E') の変化から樹脂の耐熱性を評価できるため、本研究では E' の温度依存性に着目した。実際の試験では、 $3\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 1.5\text{ cm}$ のフィルム状の試料を用い、25°C から 250°C まで加熱しながら動的粘弾性を測定した。なお、耐熱性の目標値は市販品よりも優れていることとした。具体的には、力学特性 E' の値が $1.0 \times 10^8\text{ MPa}$ 以下に低下する温度を強度低下の閾値と設定し、この温度が市販品よりも高いこととした。

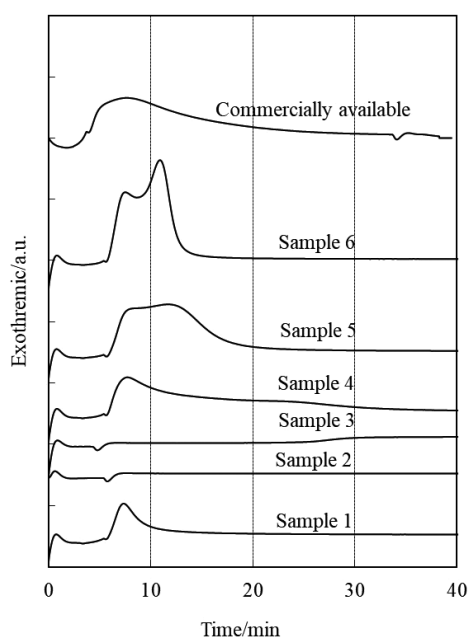
(2) リフロー耐熱性試験方法

リフローに対する耐熱性については、実機リレーを用いて評価を行った。実際の試験では、一液性エポキシ樹脂をリフロー耐熱性が要求される車載用リレーに塗布し、リフロー試験によりその耐熱性を評価した。温度条件は JIS C 60068-2-58:2020 に準拠とした。リフロー試験後、気密性を確認するために 90°C の高沸点フッ素系不活性液に浸漬し、発生する気泡の有無を観察した。このリフロー試験を 3 回繰り返す、一液性エポキシ樹脂のリフロー耐熱性を評価した。なお、リフロー耐熱性の目標値は JIS C 60068-2-58:2020 の条件下で気密性試験をクリアすることとした。

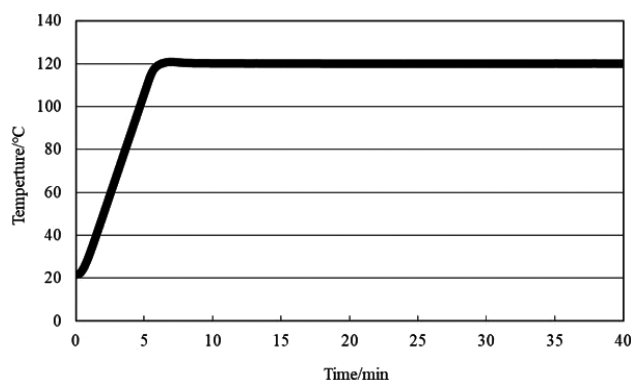
3. 評価結果と考察

3.1 DSC による低温短時間硬化の評価結果と考察

120℃での硬化時間を評価するために、DSC の温度条件を 120℃で 1 時間保持するように設定し、発熱エネルギーを測定した (図 1 (a))。なお、DSC 測定装置は温度を 120℃に短時間で到達させることが困難であるため、25℃から 120℃までの昇温に約 7 分を要するよう設定した (図 1 (b))。図 1 (a) では、横軸に図 1 (b) の温度プロファイルに基づいた 120℃の保持時間を示し、縦軸に発熱量を示している。この図から、一液性エポキシ樹脂の反応開始時間および終了時間を、発熱ピークの変化を通して読み取ることができる⁸⁾。



(a) 試料の DSC チャート



(b) 試料の硬化温度プロファイル

図 1 DSC による低温短時間硬化の検証結果

Sample 1 では、約 7 分付近に急激な発熱ピークの立ち上がりが確認された。その後、発熱エネルギーが約 15 分まで緩やかに減少した。これにより、15 分付近で化学反応が終了したことが示唆される。一方、Sample 2 および Sample 3 では発熱ピークが全く確認されなかった。これは、これら 2 つの硬化剤を単独で使用した場合、120℃では一液性エポキシ樹脂が反応しないことを示唆する。

二種類の硬化剤を用いた Sample 4 と Sample 5 では、アミンダクト系硬化剤の硬化反応に由来する約 7 分付近の発熱ピークの立ち上がりが確認され、40 分および 25 分付近でそれぞれ発熱エネルギーの消失が認められた。これは、アミンダクト系硬化剤の添加により、イミダゾール系硬化剤とシアナミド系硬化剤の両方の反応が促進されたことを示唆している。三種類の硬化剤を添加した Sample 6 でも、7 分付近に急激な発熱ピークの立ち上がりが確認され、15 分付近で発熱エネルギーの消失が認められた。

以上の結果より、硬化に必要な時間は Sample 1 と Sample 6 が最も短く、以下、Sample 5、Sample 4 の順であった。なお、市販品の一液性エポキシ樹脂を同様の温度プロファイルで測定した結果 (図 1 : commercially available) では、発熱エネルギーの減衰に約 40 分を要した。したがって、Sample 1、Sample 5 および Sample 6 の一液性エポキシ樹脂は、市販品よりも低温短時間硬化において優位性があると判断した。

さらに、硬化剤の反応性要因を明確にするため、Sample 1 から Sample 6 までの一液性エポキシ樹脂を 50℃から 250℃まで 10℃/min で昇温し、反応開始温度を分析した (図 2)。

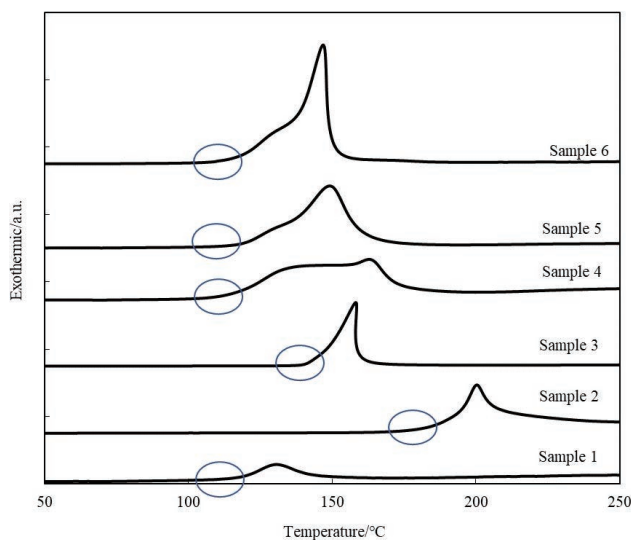


図 2 DSC チャート

図2は、横軸に温度、縦軸に発熱エネルギーを示している。Sample 1 から Sample 3 の DSC 測定結果から、発熱ピークの立ち上がりがそれぞれ100°C、180°C、140°Cで観察された。Sample 2 および Sample 3 では、120°C以下で発熱ピークは観察されなかったため、120°Cの温度条件下では硬化反応が進まないことが示唆された。これは、図1(a)に示すように、120°C一定条件下で発熱ピークが観察されなかった結果と一致している。

Sample 4 および、Sample 5、Sample 6はSample 1と同様に、100°Cから110°C付近での発熱ピークの立ち上がりが観察された。これらの共通点は、アミンダクト系硬化剤を含んでいることであり、この硬化剤を用いると反応開始温度が低下することが確認された。Sample 1でも発熱エネルギーは認められるものの、発熱ピーク面積が小さいこと、また硬化物がゲル状であったことから、エポキシ樹脂の化学反応が十分に進行しなかったと推定される。これを確認するために、次にFT-IR測定で硬化度合いを確認した。なお、Sample 2 および Sample 3 については、120°Cで

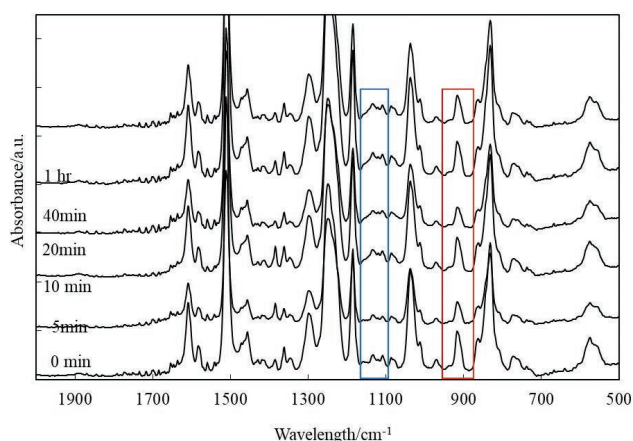
の硬化が不十分であるため、後の検討から省略する。

3.2 FT-IR による低温短時間硬化の評価結果と考察

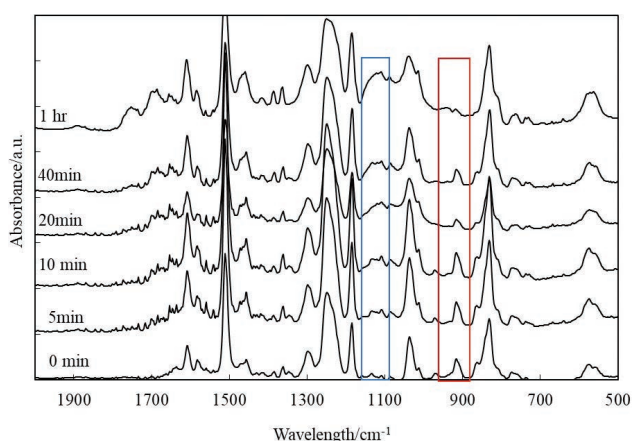
Sample 1 と Sample 4 から Sample 6 の各種試料を120°C 1時間で加熱したときのFT-IRチャートを図3(a)から(d)に示す。なお、図の左に記載されている数値は加熱時間を示す。

硬化剤としてアミンダクト系硬化剤のみを含むSample 1のFT-IRチャートを図3(a)に示す。Sample 1では、40分以降でも918 cm⁻¹のピークが多く残存しており、未反応のエポキシ樹脂が存在していることが確認された。従ってアミンダクト系硬化剤のみでは局所的な反応に留まり、硬化が不十分であった。

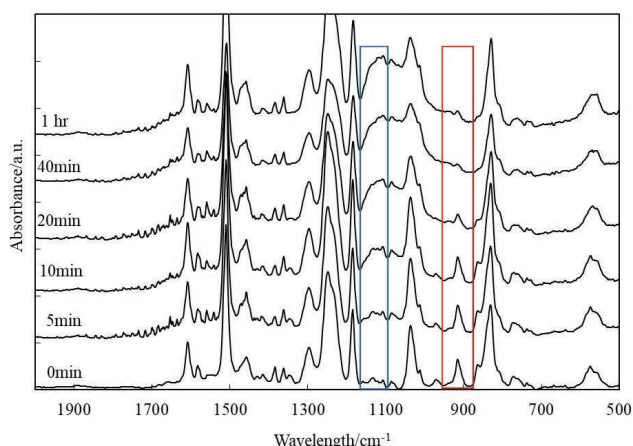
次に、アミンダクト系硬化剤とシアナミド系硬化剤またはイミダゾール系硬化剤を含むSample 4 および Sample 5のFT-IRチャートを図3(b)および図3(c)に示す。Sample 1と同様に、エポキシ基の開環反応を示す918 cm⁻¹のピークの減少と、エーテル基由来の1190 cm⁻¹付



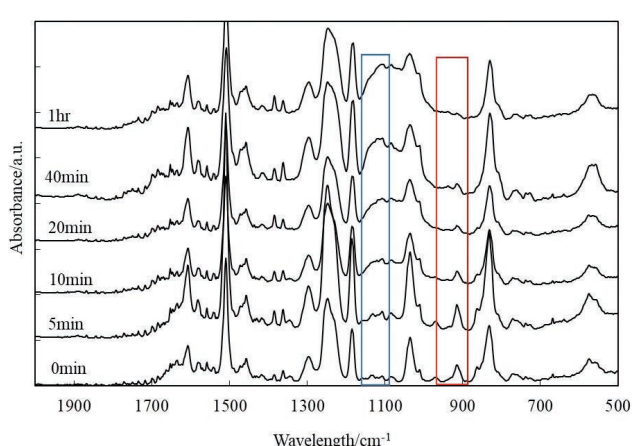
(a) Sample 1



(b) Sample 4



(c) Sample 5



(d) Sample 6

図3 試料のFT-IRチャート

近のピークの増加が確認され、化学反応の進行が示唆された。さらに、Sample 4 および Sample 5 では、加熱 20 分後にはエポキシ環に由来するピークが大きく減少した。加えて、3 種類の硬化剤を含む Sample 6 (図 3 (d)) においても、 918 cm^{-1} のピークの減少が確認され、同様に化学反応が進んでいることが示唆された。

3.3 耐熱性の評価結果と考察

次に、一液性エポキシ樹脂の耐熱性を評価するために、DMA 測定をした (図 4)。

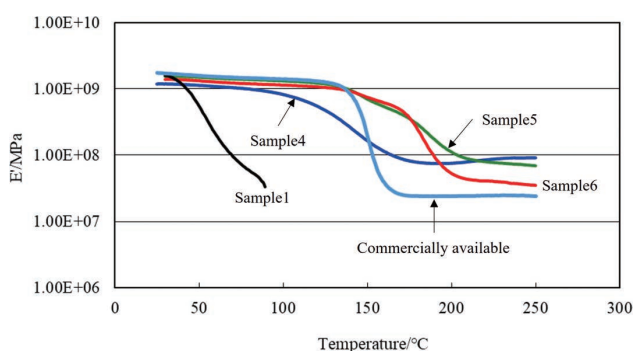


図 4 動的粘弾性測定

図 4 に、力学特性を示す貯蔵弾性率 (E') の温度依存性データを示す。力学特性 E' の値が $1.0 \times 10^8\text{ MPa}$ 以下に低下する温度を強度低下の閾値と設定した。Sample 1 では、室温付近から E' が低下し、 70°C 付近で E' の値が $1.0 \times 10^8\text{ MPa}$ 以下になった。一方、Sample 4 では 150°C 付近、Sample 5 および Sample 6 では、それぞれ 200°C および 190°C 付近で E' の値が $1.0 \times 10^8\text{ MPa}$ 以下に低下した。

Sample 4 と Sample 5 の耐熱性の違いは、それぞれの硬化剤の特徴によると考えられる。イミダゾール系硬化剤は連鎖移動型の硬化剤であり、主剤の重合度を上げることができる。このため、一液性エポキシ樹脂の架橋が高密度化し、耐熱性が向上したと推測される。一方、シアナミド系硬化剤は連鎖移動型の硬化剤ではないため、同様の耐熱性向上効果が得られなかったと推測される。

3.4 低温短時間硬化と耐熱性との関係

表 2 に、これまでの低温短時間硬化と耐熱性の関係をま

とめた。表 2 より、これらの 2 つの特性を両立する一液性エポキシ樹脂として、3 種類の硬化剤を混合した Sample 6 が最も望ましいと判断した。さらに、市販品と比較しても、Sample 6 が優れた特性を有していた。

3.5 リフロー耐熱性試験

低温短時間硬化と耐熱性を両立した Sample 6 を用いて、リレーのリフロー耐熱性試験を実施した。試験に先立ち、リレーのベース表面にこの一液性エポキシ樹脂を塗布・硬化させた。試験の結果、3 回繰り返しても気泡漏れは認められず、気密性は維持された。従って、実機評価においても高い耐熱性を維持できる一液性エポキシ樹脂であることが証明できた。なお市販品では、同じ気密試験の目標値を満足できなかった。

4. むすび

有害化学物質の排除および環境への配慮といった社会の要請に応えるため、異種材接合用接着剤において耐熱性の向上と低温短時間硬化の両立が課題であった。本研究では、機構デバイスの異種材接合用接着剤として使用される一液性エポキシ樹脂を対象とし、この配合を調整することで課題解決した。アミンアダクト系硬化剤の触媒作用により 120°C 付近での化学反応を促進させ、シアナミド系硬化剤およびイミダゾール系硬化剤を併用することで、 120°C において 20 分以内で硬化する方法である。また、イミダゾール系硬化剤の連鎖移動型触媒作用により耐熱性を 190°C 付近まで向上し、硬化剤の特徴をもとに耐熱性と低温短時間硬化を両立できる一液性エポキシ樹脂を開発した。さらに、耐熱性においては、実機リレーを用いたリフロー試験で気密性の維持も確認した。

以上より、化学反応の原理に基づいた一液性エポキシ樹脂の設計が、優れた特性を持つ製品の開発に寄与することを示した。当社では、同様のアプローチで開発した一液性エポキシ樹脂を商品で利用している。

今後、さらなる環境負荷低減を目指すためには熱硬化性樹脂を用いるのではなく、1 章で述べた UV 硬化型樹脂および二液性エポキシ樹脂などの開発が必要と考える。このためには、主剤や硬化剤の分子構造などの改良から必要であり、今後の課題である。

表 2 低温短時間硬化と耐熱性のまとめ

要求性能	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6	市販品
低温短時間硬化	×	×	×	△	△	○	△
耐熱性	×	—	—	×	○	○	×

低温短時間硬化は反応終了時間ごとに判断した ○；20 分以内、▲；30 分以内、×；反応しない
耐熱性は E' の低下温度 (10^8 MPa 以下に下がる温度) で判断した ○： 170°C 以上、×； 170°C 以下、—：検証せず

参考文献

- 1) 垣内弘, エポキシ樹脂, 第 1～4 巻. エポキシ樹脂技術協会, 2003.
- 2) 桑原涼 他, “長期高精度塗布 SMD 接着剤の開発,” *Matsushita Tech. J.*, vol. 54, no. 1, pp. 19-23, 2008.
- 3) 福原智博, “エレクトロニクスデバイスにおける接着技術,” 電子情報通信学会技術研究報告, 2009, OPE2009-104.
- 4) 福原智博, “機構デバイスにおける封止信頼性,” 電子情報通信学会技術研究報告, 2009, R2009-34.
- 5) 森井真喜人, “接着剤の接合信頼性評価に関する検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, 2007, R2006-47.
- 6) 達野陽介 他, “ポリカーボネートケースを使用したリレーの封止信頼性の改善,” 電子情報通信学会技術研究報告, 2012, R2011-42.
- 7) M. D. Gilbert et al., “Mechanism of the dicyandiamide/epoxide reaction,” *Macromolecules*, vol. 24, no. 2, pp. 360-369, 1991.
- 8) 神戸博太郎, 小沢丈夫, 熱分析, 講談社, 1992.

執筆者紹介



大谷 修 OTANI Osamu

デバイス&モジュールソリューションズカンパニー
技術統括部材料技術グループ
専門：有機化学、分析化学
所属学会：日本化学会
博士（工学）



今泉 豊博 IMAIZUMI Toyohiro

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



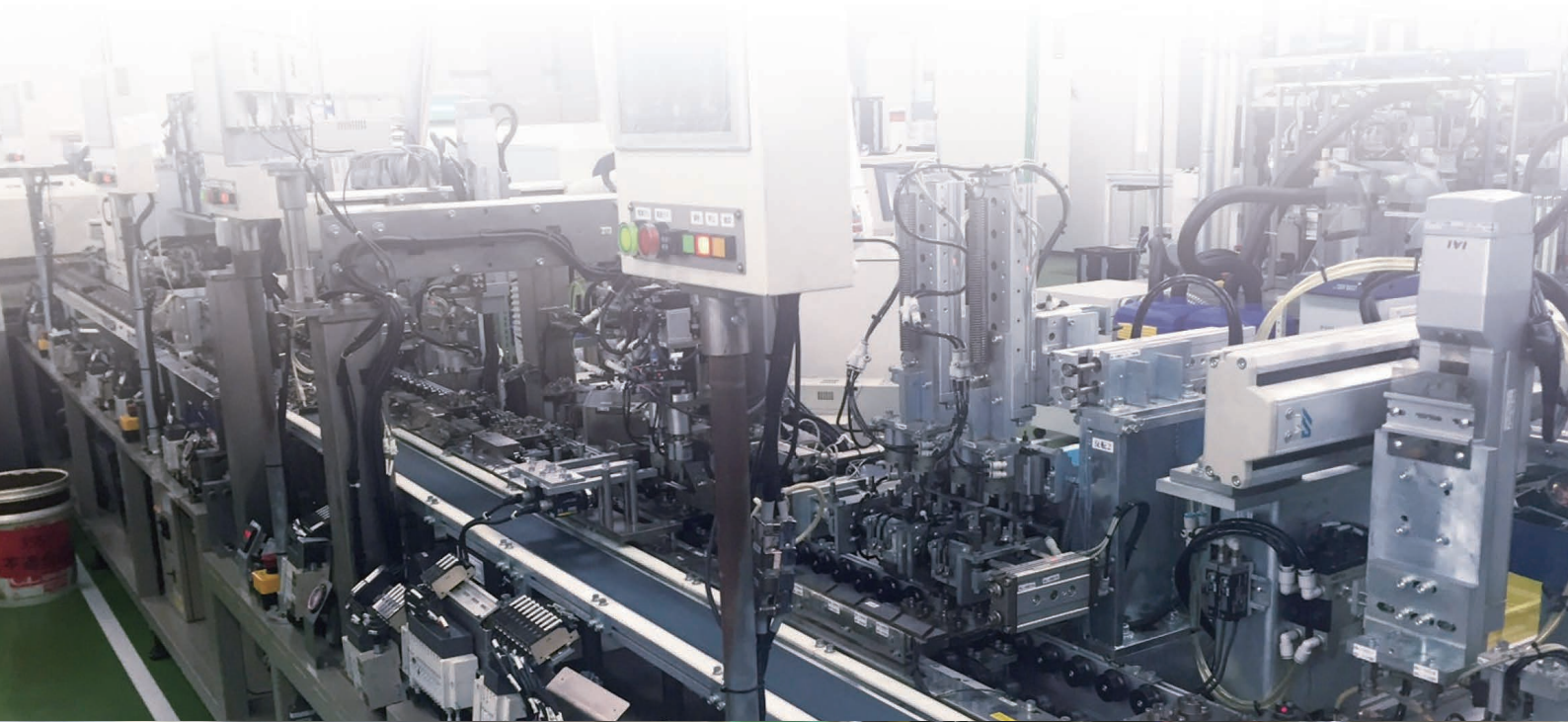
福原 智博 FUKUHARA Tomohiro

デバイス&モジュールソリューションズカンパニー
技術統括部材料技術グループ
専門：高分子化学
所属学会：日本化学会
技術士（化学）

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

2

オムロンの ものづくりを支える技術



仮想バッファマネジメント（VBM）による高変動型開発の効果的な可視化と計画変更の手間軽減

高瀬 志保, 西山 哲人

Critical Chain Project Management (CCPM) は、バッファマネジメントによってプロジェクトを効率的かつ期日通りに完了させることを特徴とする、代表的なプロジェクトマネジメント手法の1つである。しかし、高い変動性と不確実性を持つ研究開発（Research and Development: R&D）プロジェクトに CCPM を適用する場合、バッファの変動が大きすぎて状況把握が難しく、また計画変更に多くの手間が必要だという課題がある。本論文ではこの課題を解決し、R&D プロジェクトでも効果的なバッファマネジメントが実践できるプロジェクトマネジメントの仕組みとして、仮想バッファマネジメント（Virtual Buffer Management: VBM）を提案する。VBMは CCPMのようにクリティカルチェーンに指定されたタスクを基にプロジェクトバッファを計算するのではなく、プロジェクトの全てのタスクを基にバッファを計算する。これにより、プロジェクト状況の可視化を改善し、CCPM より少ない作業量で計画変更が可能な仕組みを実現した。VBMは CCPM の利用が困難なプロジェクトにおいて、有効な代替手段の一つとして利用できると考える。本論文では VBM の仕組みについて詳細に説明する。

Virtual Buffer Management (VBM) for Effective Visibility into Highly Variable Development and Reduce the Need to Change Plans

TAKASE Shiho and NISHIYAMA Tetsuto

Critical Chain Project Management (CCPM) is one of the representative project management methods characterized by completing projects efficiently and on time through buffer management. However, when applying CCPM to R&D (Research and Development) projects with high variability and uncertainty, there are challenges such as difficulty in grasping the situation due to large buffer fluctuations and the need for extensive effort in plan adjustments. This paper proposes Virtual Buffer Management (VBM) as a project management mechanism that can solve these challenges and implement effective buffer management even in R&D projects. Unlike CCPM, which calculates project buffers based on tasks designated in the critical chain, VBM calculates buffers based on all tasks in the project. This improves project status visualization and enables plan adjustments with less effort than CCPM. VBM can be considered a viable alternative in projects where the use of CCPM is challenging. This paper will explain the VBM mechanism in detail.

1. まえがき

ビジネス環境の競争が激化し、将来の予測が困難とされる VUCA 時代において、革新的な成果を生み出す研究開発（R&D）プロジェクトは、成果創出までのスピードアップが求められる。R&D プロジェクトのスピードアップには、早い段階での課題発見と軌道修正が重要であり、それにはプロジェクトマネジメントが必要である。

そこで、代表的なプロジェクトマネジメント手法の1つである Critical Chain Project Management (CCPM)¹⁾ に注目した。CCPM では、プロジェクトの進捗率を横軸に、バッファの消費率を縦軸にとった傾向グラフ（図 1）を用い、日々の進捗率とバッファ消費率をプロットする。傾向グラフは、進捗率に対してバッファの消費が少なく予定日数に余裕がある場合には「安全（緑）」、予定日数ぎりぎりなら「注意（黄）」、予定日数超過が予想される場合には「危険（赤）」と 3 段階に色分けされて（図 1）おり、プロジェク

Contact : TAKASE Shiho shiho.takase@omron.com

トの状況を一目で確認することができる。これは各タスクに含まれているバッファをプロジェクトの最後に集約し、プロジェクトバッファとして管理することで実現しており、これをバッファマネジメントという^{2,3)}。

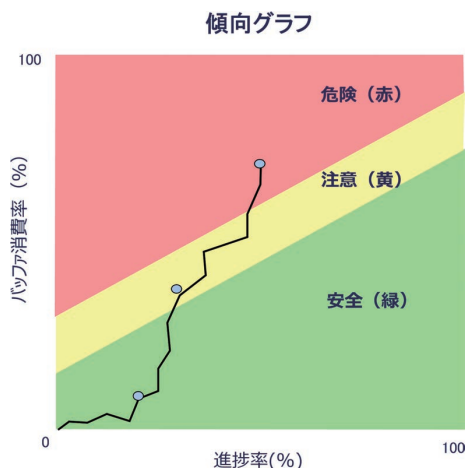


図1 傾向グラフ

傾向グラフは、プロジェクトが進捗しながらバッファも適度に消費することを理想とし、基本的に左下から右上に向かって作業の進捗に伴い、バッファが消費されるという形で進展する。左下の点は進捗率とバッファ消費率がともに0%であり、プロジェクトの開始時点を表す。右上の点では進捗率とバッファ消費率がともに100%となり、予定通りの完了を表す。

さらに、傾向グラフでは現在日の進捗率とバッファ消費率だけでなく、過去の履歴も踏まえて状況を判断することが重要である。例えば、同じ進捗率55%、バッファ消費率70%の場合でも、過去の傾向によって異なるマネジメント判断を行うことになる (図2)。



図2 進捗の傾向によるマネジメント判断の違い

CCPMは当社の商品開発プロジェクトで数多くの実績を残しており、その効果をR&Dプロジェクトでも発揮すべく導入を進めた。ところが、非常に高い変動性と不確実性を持つプロジェクトでは、傾向グラフでプロットした点と線が複雑に絡み合い、状況を正しく読み取れなくなるケースを複数観測した (図3)。

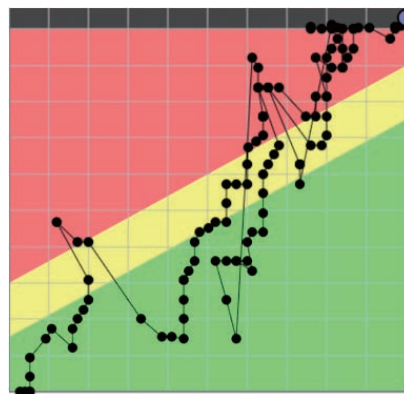


図3 R&Dプロジェクト傾向グラフの実例

これは商品開発プロジェクトでは見られなかった現象であり、このような状態では、マネジメント判断の基準となる傾向グラフが機能しない。そこで、このようにCCPMを適用できないR&Dプロジェクトでも、傾向グラフを使った効果的なバッファマネジメントを実現する代替案として、仮想バッファマネジメント (Virtual Buffer Management: VBM) を考案した。

2. 課題

2.1 マネジメント判断が困難な傾向グラフ

R&DプロジェクトにCCPMを適用した際に傾向グラフが複雑化する現象は、R&Dプロジェクトが持つ高い不確実性に起因する。例えば、CCPMでは、プロジェクトバッファを計算するために、目標達成までの段取りを詳細に作成し、一連のタスクの中で一番期間の長いタスクの集合であるクリティカルチェーンを特定しなければならない。しかし、不確実性が高いR&Dプロジェクトは「やってみないと分からない」ことが多く、短期的な見通ししか立たない場合がある。このようなプロジェクトでCCPMを導入するには、目標を達成するためにまず手順を仮説として立て、それに基づいて具体的な段取りをとりあえず作ることになる。だが、プロジェクトが進展するにつれ、新たな発見や技術的な課題の発生によって、仮説と実態が乖離し、タスクの追加や削除、優先順位の変更が必要になる。この段取りの変更によってクリティカルチェーン上の残作業量が増加した場合、遅れが生じ、進捗率が減少するので傾向グラフは左側に移動する。この遅れを吸収するためにバッファも消費されるため、傾向グラフの点は上に移動するので、全体として左上に移動する (図4-①)。

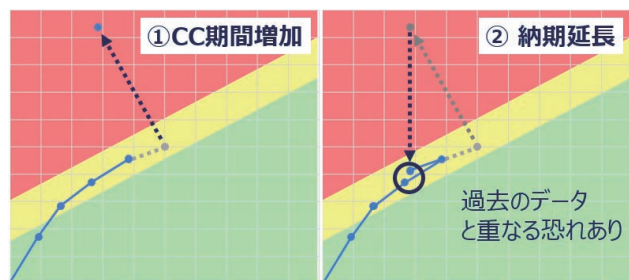


図4 CCPMにおける期間増加と納期延長の影響

さらに、R&Dプロジェクトでは、新しい技術に挑戦しながら品質を担保するため開発の難易度が高く、通常の商品開発と比べ遅れが生じやすい。これにより高い確率でバッファを使い切ってしまう、バッファ消費率が100%を超過する。このような時プロジェクトマネージャーは、目指す品質を担保するためにコストや納期の調整を迫られるが、組織の予算には限りがあるため、納期を延ばすことが多い。納期の延長により、バッファが回復し、傾向グラフの点は下方方向に移動する（図4-②）。この①と②の変更が同時に行われた結果、グラフの点は変更前の点から左下に戻るようプロットされる。

前述の通り、傾向グラフは通常進捗する過程で左下から右上に進むため、段取り変更後、再度右上に向かう際に以前と似た経路を通ることとなり、プロットした点と線が重なり、傾向グラフが複雑化する（図3）。①と②のどちらか一方の変更だけでは問題ないが、①と②の両方の変更が同時に行われると、この現象が発生する。このようにグラフの点が複雑に移動するため、傾向グラフの視認性が低下する。その結果、進捗状況を正しく把握できず、最適なマネジメント判断ができなくなる。観測したプロジェクトの中でも、特に難易度が高いプロジェクトでは、このような現象が1週間に1回の頻度で繰り返し発生し、図3のグラフの様な、ますますマネジメント判断に使えないものとなってしまった。

2.2 技術者の実感とずれた可視化

CCPMでは、クリティカルチェーンは優先的に実行されるべき重要なタスクが配置されている。しかし、R&Dプロジェクトではタスクの優先度が頻繁に変わるため、クリティカルチェーン以外のタスクの重要度が上がり、そちらを優先して実行することがある。このような状況では、重要なタスクが進行していても傾向グラフの進捗率は上がらない。プロジェクトマネージャーや技術者は傾向グラフから正しい進捗状況を把握できず、計画の見直しや対応策の検討が遅れる可能性がある。

さらに、このような齟齬が頻発すると、技術者の傾向グラフに対する信頼性が低下する恐れがある。技術者は傾向グラフが実態を正確に反映していないと感じることで、グ

ラフのデータを参考にしなくなり、プロジェクト管理全体の効率が低下してしまう。このように傾向グラフが示す進捗状況が技術者の実感とずれる状況も、視認性の問題といえる。

2.3 段取り変更の手間

R&DプロジェクトにCCPMを導入する際、視認性の低下以外にも段取り変更の手間がかかることが課題である。前述の通り、R&Dプロジェクトでは計画段階で立てた段取りが実際の進行にそぐわなくなることが多く、頻繁に段取りを変更する必要が生じる。しかし、段取り変更には、タスク間の依存関係を再考し、バッファ確保のためにリソースを確保する必要があり、多くの時間を要する。

結果、管理工数が増加して、複数のプロジェクトリーダーから不満が上がっていた。

さらに、頻繁な段取り変更は作業を止め、技術者の作業効率やモチベーションが低下する事例や、かかる手間から段取りの変更作業が追い付かず、段取りと実態が徐々に乖離してしまい、バッファマネジメントそのものに対する信頼性が低下する事例も発生した。

3. 技術内容

3.1 取り組みの狙い

上記の課題から、高い変動性と不確実性を伴うR&Dプロジェクトにおいて、以下2つの目的を果たす新しいバッファマネジメントの仕組みが必要と考えた。

- ・傾向グラフの視認性を高める。
- ・段取り変更の手間を軽減する。

CCPMの大きな特徴は、クリティカルチェーンの特定によるバッファマネジメントの実現である。計画時に特定したクリティカルチェーンは、原則としてプロジェクト完了まで変わらないものとされ、通常、計画と実績のずれはバッファで吸収するため、計画変更はほとんど発生しない。

しかし、高い変動性と不確実性を持つR&Dプロジェクトの場合、タスクの優先順位が変わることで、クリティカルチェーンが変わってしまう。これが、傾向グラフの視認性を低下させ、計画変更に大きな手間がかかる要因となっている。そこで、このクリティカルチェーンの特定に頼らずプロジェクトバッファを計算する代替手段を準備することができれば、課題を解決できると考えた。

そこで、本論文ではどんなプロジェクトであっても必ず収集できる「リソース」、「プロジェクトの期間」、「見積もり」の3つの要素だけを用いてバッファマネジメントを行う方法を提案する。後述するようにプロジェクトバッファ

を仮想して設定するため、VBMと名付けた。3要素の具体的な内容は、以下のとおりである。

- ・リソース：プロジェクトのメンバー数（人）
- ・プロジェクトの期間：開始から完了までの期間（日）
- ・見積もり：タスクの期間見積もり（日）

なお、見積もりはその時点で見通しが立つ範囲内のタスクの期間見積もりでよい。

3.2 期間見積もりの工数への変換

VBMは、CCPMのようにクリティカルチェーンを特定しないため、プロジェクトで利用可能な全てのキャパシティ（リソース×期間＝工数）からプロジェクトバッファ（VBMでは「仮想バッファ」ともいう）を算出する。そのため、VBMは基本単位に工数を用いることとし、次の式で各タスクの期間見積もりを全て工数（ E ）へ変換する。

$$E_i = T_i \times N_i$$

E_i ：タスク i の工数見積もり

T_i ：タスク i の期間見積もり

N_i ：タスク i に割り当てられる担当人数

3.3 VBMにおけるプロジェクトバッファの計算

クリティカルチェーンを使わずに仮想バッファを計算する式を次の通りとした。

$$Bf = Ut \times 1/3$$

Bf ：仮想バッファの長さ [人日]

Ut ：総工数 [人日]

CCPMではABP見積もり（Aggressive But Possible：厳しいがなんとかできるぎりぎりの日数）を基にクリティカルチェーンを特定する。そしてこのクリティカルチェーンの1/2に相当する期間をプロジェクトバッファとして設定し、プロジェクトの最後に配置する^{1,3)}。つまり、プロジェクトバッファはプロジェクト期間のおよそ1/3になる。VBMでもCCPMの1/3の目安を用いてプロジェクトバッファを計算するが、全てのタスク工数を合計した総工数を基に計算することとした。これは、CCPMの知識がない技術者でも使える仕組みにするため、タスクの期間見積もりはバッファを含んだ見積もりを基に計算することにした。そのため、技術者は慣れた方法でバッファを含んだ見積もりをすれば良く、もしCCPMに慣れている場合はABP見積もりを1.5倍すれば良い。

3.4 総工数の定義と使い分け

VBMでは、進捗率とプロジェクトバッファを計算する

重要な値として、プロジェクト期間中に実行する全てのタスクの工数見積もりを表す総工数（ Ut ）を用いる。ただし Ut は、計画変更に合わせて変動する値である。さらに Ut は、プロジェクトが短期的な見通ししか立たない場合に、納期までのプロジェクトバッファを算出できる値でなければならない。そのため、 Ut は以下の2つの値を使い分けることとする。

まず、 Ut の1つ目の考え方として、現時点で見通せる全てのタスクの工数見積もり（ E ）を合計した値を、計画総工数（ Up ）とし、次の式で表す。

$$Up = \sum_{i \in \text{全タスク}} E_i$$

Up ：計画総工数 [人日]

E_i ：タスク i の工数見積もり [人日]

しかし、前述の通り R&D プロジェクトは短期的な見通ししかたない場合がある。この場合、 Up では納期までの期間におけるバッファの計算ができない。そうした状況下でも納期までのプロジェクトバッファを算出し、バッファマネジメントを実現するために、 Ut のもう一つの考え方として最大総工数（ Um ）を用意し、次の式で表す。

$$Um = Pd \times R$$

Um ：最大総工数 [人日]

Pd ：プロジェクト期間 [日]

R ：プロジェクトメンバー数 [人]

この Um から仮想的にプロジェクトバッファを算出することで、短期間の見通しから納期までのバッファマネジメントを可能とする。本手法を VBM とする所以である。

ただし、 Um はプロジェクト期間とメンバー数を基に仮想的に設定した工数見積もりであり、プロジェクト完了時の計画総工数（ Up ）と合致するとは限らない。そのため、プロジェクト完了時まで Um を使い続けてしまうと、計画した全てのタスクが完了しても進捗率が100%にならない可能性がある。この問題を解決するため、納期までの見通しが立ったタイミングで、 Ut を Um から Up に切り替えることにした。切り替えるタイミングは、 Up と Um の差を%換算した見積もり工数の差異（ Du ）を見て判断する。

$$Du = (Um - Up) \div Um$$

Du ：見積工数の差異 [%]

短期的な見通ししか立たない場合、プロジェクトの初期段階では Up を基に進捗率や仮想バッファが計算できないため、 Um を用いる。プロジェクトの期間中は、見通しが立つにつれタスクの追加や削除により計画総工数が日々変化するため、差異も日々計算し直す。その差異があらかじめ

め設定した閾値までは、 U_m を使い続ける。プロジェクトが進み、差異が閾値を下回ったタイミングで U_p に切り替えることで、計画した全てのタスクが完了した時点で進捗率が 100% を示すようになる。

3.5 閾値の考え方

いくつかの閾値のパターンを検討した結果、現在当社では閾値を 15% と設定している。

- ・ $Du \geq 15\%$: 総工数 (U_t) を U_m とする
- ・ $Du < 15\%$: 総工数 (U_t) を U_p とする

閾値を 15% に設定した理由は、1. 最大総工数 (U_m) とプロジェクト完了時の計画総工数 (U_p) のずれ、2. 納期までの見通しが確定する時期、の 2 つである。

見通しの立たないプロジェクトの初期段階では、洗い出されるタスクが限られているため、 U_p と U_m との間に大きな差がある。プロジェクトが進むにつれ、その差は縮小していくが、プロジェクト完了時に U_p と U_m が完全に一致することはなく、ずれが生じる。閾値がこのずれより小さいと、 U_p に切り替えることができないため、閾値はずれより大きい値を設定する必要がある。当社では、大半のプロジェクトで、プロジェクト完了時の U_p と U_m のずれが 10% 以内に収まることが観察された。この結果から、閾値は 10% より大きい値が望ましいと判断した。

次に、プロジェクトが進行し納期までの見通しが確定する時期についても考慮した。閾値が大きすぎると、納期までの見通しが立っていない段階で U_m から U_p に切り替わることになる。早すぎる切り替えはその後の計画変更で傾向グラフの変動を招き、プロジェクトマネージャーを混乱させる恐れがある。当社では、例えば 100 日のプロジェクトの場合、納期まで残り 10 日 (10%、2 週間) 程度の時点になれば大半のプロジェクトは最後まで見通しが立ったのに対し、納期まで残り 20 日 (20%、約 1 か月) では、まだ見通しが立たなかった。この結果から、閾値は 20% より小さい値が望ましいと判断した。

これら 2 つの要素を考慮し、小さすぎず、大きすぎず、の最適な閾値を 10% と 20% の間の 15% に設定した。

3.6 計画変更に合わせて変動する仮想バッファ

前述の通り、CCPM ではクリティカルチェーンを特定し、クリティカルチェーンの長さを分母としてプロジェクトバッファを算出する。クリティカルチェーンとプロジェクトバッファの値は、プロジェクトの進捗状況を分かりやすくし、評価を容易にするため、固定されている。この値の固定は、計画されたプロジェクトの段取りが比較的安定していることを前提としている。そのため、R&D プロジェクトのように高い変動性と不確実性を持つプロジェク

トでは、プロジェクトバッファの変動が大きくなり、進捗状況が分かりにくくなる。

一方、VBM は、バッファを含めた必要工数を表すため、 U_t の 1/3 を仮想バッファとした。仮想バッファの大きな特徴は、タスクの追加や削除によって U_t が変動しても、常にこの比率を保ってバッファの量を調整することである。例えば U_t が 90 の場合、仮想バッファは 30 となるが、タスクの追加によって U_t が 99 に増えた場合仮想バッファは 1/3 の比率を保ち 33 となる。

3.7 進捗率とバッファ消費率の計算

VBM の進捗率 (Pr) は、総工数 (U_t) の内の完了工数 (U_c) の割合で計算する。完了工数 (U_c) とは、ある時点で、各タスクの残作業日数を工数換算し合計したものを、総工数 (U_t) から引いた値である。ただし、実際には確定した U_t はプロジェクト完了まで得られないため、仮想値である U_p または U_m を用いる。

$$Pr = \frac{U_c}{U_t}$$

$$U_c = U_t - \sum_{i \in \text{全タスク}} R_i$$

Pr : 進捗率 [%]

U_c : 完了工数 [人日]

R_i : 工数換算したタスク i の残作業日数

バッファ消費率 (Br) は、標準バッファ消費率にバッファ差異率を足して計算する。

$$Br = \text{標準バッファ消費率} + \text{バッファ差異率}$$

Br : バッファ消費率 [%]

バッファ差異率は、期間経過率と進捗率の差異である。期間経過率とは、プロジェクト期間 (Pd) に対して現在までに経過した期間 (De) の割合で示す。

$$\text{バッファ差異率} = \text{期間経過率} - \text{進捗率} = \frac{De}{Pd} - \frac{U_c}{U_t}$$

$$\text{期間経過率} = De/Pd$$

De : 経過日数 [日]

傾向グラフでは、プロジェクトがバッファを安定的に消費しながらプロジェクト完了した場合、進捗率 0%・バッファ消費率 0% の点と、進捗率 100%・バッファ消費率 100% の点を結んだ直線が、期間経過に対する理想的なバッファの消費量を表す。VBM ではこの直線を「標準バッファ消費率」と呼び、期間経過率と標準バッファ消費率は 1 : 1 で比例する。

$$\text{標準バッファ消費率} = \text{期間経過率} = \frac{De}{Pd}$$

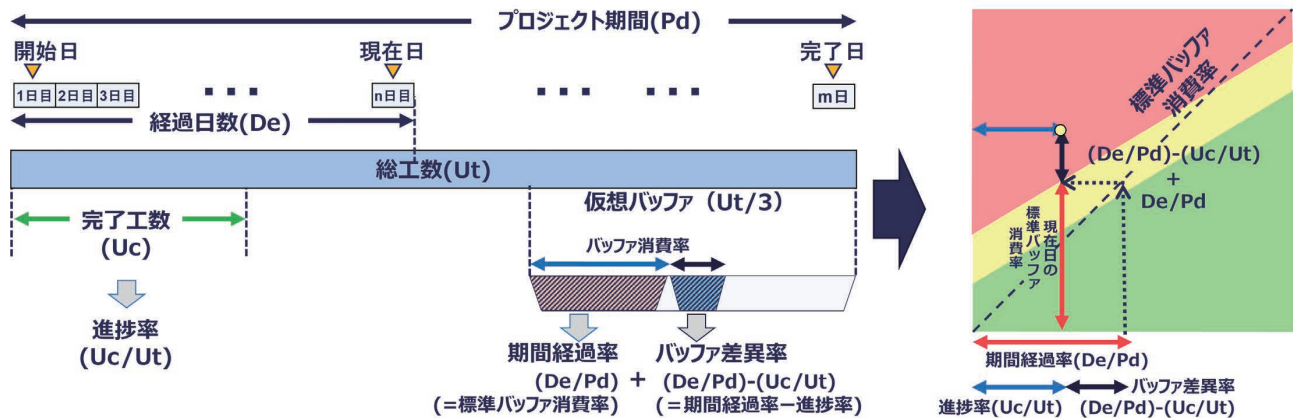


図5 VBMの計算ロジック

例えば、仮想バッファの総量が30の場合、期間経過率50%では標準バッファ消費率50%となり、理想的なバッファの消費量は15となる。この期間経過率が25%に低下した場合、標準バッファ消費率は25%となり、理想的なバッファの消費量は7.5となる。

以上のロジックを1つの式としてまとめるとバッファ消費率 (Br) の計算式は以下の通りとなり、ロジックを視覚的に表現したものを図5で示す。

$$Br = 2 \frac{De}{Pd} - \frac{Uc}{Ut}$$

3.8 グラフの視認性を維持する仕組み

VBM では、タスクが増えると、CCPM と同様に進捗率が低下し、バッファ消費率が上がる。これにより、グラフ上でのプロット点は CCPM と同様に左上方向に移動する(図6-①)。プロジェクトマネージャーがこのままではプロジェクトが間に合わないと判断し、納期を延長すると、プロジェクトの開始から完了までの期間が伸び、現在日の相対的な期間経過率は下がることになる。例えば、プロジェクトの総日数が10日間の計画に対し、5日が経過した場合、期間経過率は50%であるが、納期を10日間延長すると、20日間に対して5日が経過したことになり、期間経過率は25%となる。

期間経過率が低下するとバッファ消費率 (Br) は低下し、プロット点は下方向に移動する。仕組みは異なるが、VBM の傾向グラフは CCPM と同様の動きをすることが分かる。これを、上記のタスク増加の現象と合わせると、結果的にプロットした点が左下方向へ移動することになり、課題で述べた点と線が重なってしまう現象が発生するように思える。しかし、VBM では、納期延長により低下した標準バッファ消費率を基に、過去のプロットされたバッファ消費率の実績もすべて再計算される。そのため、過去の実績も最新の点と同様に、下方向へ移動することとなり、CCPM のように過去にプロットされた点と新しい点が

重なることはない(図6-②)。なお、進捗率はプロットした時点での総工数を基に計算しているため、値は変わらない。これにより、プロジェクトの最新状況と過去の傾向の一貫性が保たれ、視認性を維持した形で適切な管理が可能となる。

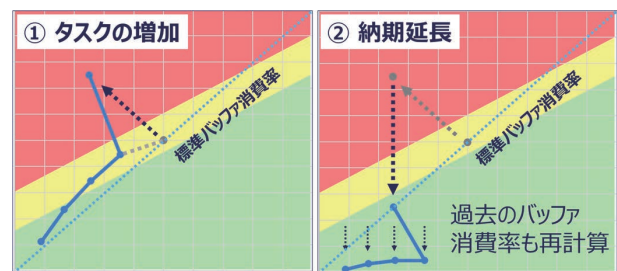


図6 VBMにおける総工数増加と納期延長の影響

4. 結果と考察

VBM の概念を Microsoft Excel® でツール化し、複数の R&D プロジェクトに導入した。VBM での管理を開始してから1年が経過した現在、以下の結果が得られている。

4.1 視認性の向上

図3で示した実例の1つをもとに、CCPM の実績データを VBM データに変換した結果を示す(図7)。CCPM の傾向グラフの視認性を低下させる現象は図中のAに現れている。このプロジェクトではバッファ消費率が100%を超え、さらにタスクが追加されたことをきっかけに、納期を1か月延長した。結果、CCPM の傾向グラフでは、点が左下にプロットされたことでグラフが複雑化し、視認性が低下していることが分かる。

一方 VBM のグラフでは、納期を延長した際に全ての進捗率・バッファ消費率の実績が再計算されたことでグラフ全体が下方向へ移動していることが分かる。これは、3.6で述べた仮想バッファが常に Ut の1/3の比率を保って変動

する特徴と、3.8 で述べた視認性を維持する仕組みによるものである。これにより、グラフ下部に過去のデータの傾向を残しつつ、グラフ上部に納期延長後の進捗をプロットするスペースが確保される。その結果、VBM では納期延長後も、CCPM のように過去にプロットされた点と新しい点が重なることはなく、グラフの視認性を保っている。

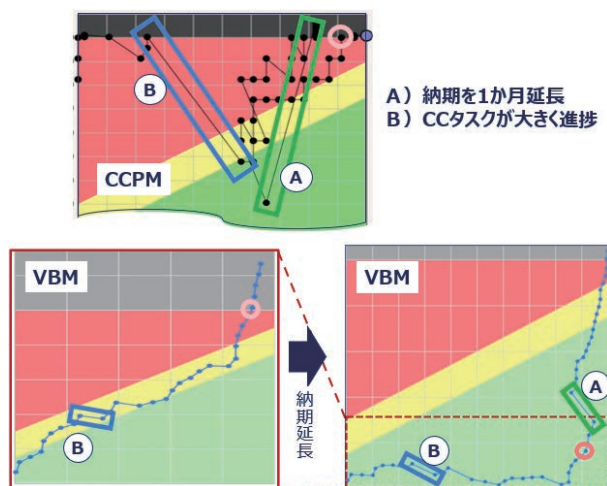


図7 CCPMとVBMの視認性比較

4.2 技術者の実感に近い可視化

図7の検証を通じて、変動性の高いR&Dプロジェクトでは、CCPMよりVBMの方が技術者の実感により近い可視化を実現できることも確認した。

図7のBではクリティカルチェーン上のタスクが大きく進展し、CCPMの傾向グラフが急激に右下へ動いているのに対し、VBMでは緩やかに右下へ動いており、VBMの傾向グラフの変化がCCPMより小さい。この動きの違いは、進捗率とバッファ消費率を計算するときの分母の違いによる。CCPMではクリティカルチェーンは全タスクの一部であり、進捗率とバッファ消費率を計算するための分母となる。クリティカルチェーンのタスクが進捗すれば、グラフはそれを反映する。逆に言えば、クリティカルチェーンではないタスクが進捗しても、クリティカルチェーンのタスクの進捗に変化がなければ、グラフの進捗率は変化せず、バッファのみが消費される。そのため、クリティカルチェーン以外のタスクが優先的に実行されることがあるR&Dプロジェクトでは、重要なタスクが進捗しているにもかかわらず、傾向グラフの進捗率には反映されず、技術者の進捗の実感とずれてしまう。

一方、VBMでは全てのタスクを分母として進捗率とバッファ消費率を計算するため、すべての作業実績が進捗率とバッファ消費率に反映される。その結果、CCPMと比較して、VBMのほうが変化は少なく表示されるが、技術者が実施した全てのタスクがグラフに反映されることで、技術者の実感により近い進捗状況を傾向グラフで可視化できる。

4.3 計画変更における手間の軽減

CCPMでは、段取りを変更するためにタスクの依存関係、順序、リソース競合などを見直し、クリティカルチェーンを再度特定する必要があるため、一度の段取り変更で30分から数時間を要していた。

一方、VBMでは、3.2で述べた通り、プロジェクトのキャパシティからバッファを計算している。そのため、CCPMのようにタスク間の依存関係や順序、リソース競合を考慮する必要はない。計画変更をしたい場合は、計画総工数(U_p)が最大総工数(U_m)を超えないように注意しながらタスクの追加・削除を行うだけで済み、ほとんどの変更は数十秒から数分で完了する。その結果、VBMを導入したプロジェクトでは、毎日15分程度の進捗会議中に計画変更が行われており、CCPMと比較して大幅に手間が少なくなっている。

4.4 ユーザー評価

VBMによるプロジェクト管理の検証に協力いただいた技術者6名に、VBMの有効性に関して「1. そう思わない」～「5. そう思う」の5段階評価のアンケートを実施した(表1)。この結果から、VBMの計画変更の容易性・プロジェクト状況可視化の改善・VBMの高変動型プロジェクトでの有用性の評価がいずれも高いことが分かる。また、回答者からは「CCPMでは管理が難しかったが、VBMでは管理がとてもしやすい。上司から無理な要求が来た場合も、実際に動かせるリソースを工数で可視化できることで、達成可能な計画を上司と議論できるようになった。」とのコメントもあり、VBMが実際のプロジェクト管理において有効であると評価された。

表1 ユーザーへのアンケート結果

No.	アンケート項目	平均点
1	VBMの利用において、タスクの変更に柔軟かつ効果的に対応できている	4.5
2	VBMの利用により、PJの進捗状況をリアルタイムで可視化されるようになった	4.7
3	研究開発のように、優先順位が頻繁に変わったタスクの追加や削除が頻発したり、短期間の見通ししか立たないPJにおいて、VBMの利用を他のPMに勧めたい	4.3

5. むすび

5.1 VBMの適用条件

CCPMの基本概念のうち、クリティカルチェーンとそれに関連する合流チェーンや合流バッファ以外の要素は、VBMでの適用が可能である。期間見積もりやプロジェク

トバッファの活用、傾向グラフによる進捗の可視化に加え、タスクの集中化やリソースの最適化はプロジェクト実行時の基本動作である。

VBM の導入により、これまで CCPM での管理が困難であった複数のプロジェクトにおいて効果的にバッファマネジメントを実践するための可視化と、計画変更の手間の軽減が可能となった。ただし、VBM は CCPM から完全に置き換えることを意図した仕組みではない。

CCPM では、タスクの依存関係からクリティカルチェーンを特定し、プロジェクトバッファを算出することで、タスクの遅れによる納期への影響を厳密に管理することができる。しかし、VBM ではこれを厳密に管理することができない。CCPM で管理できるような、ある程度安定した段取りを作れるプロジェクトに VBM を導入すると、クリティカルチェーンが進捗していなくても他のタスクが進捗していることで進捗率が上がってしまう。このような場合、クリティカルチェーンの遅れに気づかず、マネジメント判断が遅れる可能性がある。そのため、プロジェクトの見通しが立ち、タスク間の依存関係が明確であり、頻繁な段取り変更を要しないプロジェクトでは、CCPM の利用を強く推奨する。VBM はあくまで高い変動性と不確実性により CCPM の適用が困難なプロジェクトを管理するための仕組みである。

5.2 今後の展開

本論文では非常に高い変動性と不確実性をもつ R&D プロジェクトにおいて、それらの課題を解決しつつバッファマネジメントを実践できる新しい可視化と計画変更の手間軽減の仕組みとして VBM を提案した。

本仕組みは、R&D プロジェクトに限らず、CCPM の利用が困難なプロジェクト管理において、有効な代替案の一つとして活用できると考えている。例えば、市場調査や競合分析が必要となる製品企画や新規事業立ち上げ、新しい技術やシステムの導入、要件の変更、市場の変化など、多くの要因により影響を受ける IT プロジェクトの構想や企画フェーズなどのプロジェクトにも適用できると考える。今後も、VBM の有効性の検証と改善を続け、技術者の負荷軽減とプロジェクトの生産性向上に努めていきたい。

参考文献

- 1) 西原隆, 栗山潤, *TOC/CCPM 標準ハンドブック*, 株式会社秀和システム, 2010, p. 69-82, 112-113, 271.
- 2) 岸良裕司, *マネジメント改革の工程表*, 中経出版, 2006, p. 70-71, 239.
- 3) 後藤智博 他, *Project Management 進化論*, プレジデント社, 2022, p. 102-125, 199.

執筆者紹介



高瀬 志保 TAKASE Shiho

技術・知財本部
技術・知財戦略室
戦略統括部
専門：プロジェクトマネジメント
所属学会：日本 PMO 協会



西山 哲人 NISHIYAMA Tetsuto

技術・知財本部
技術・知財戦略室
戦略統括部
専門：ソフトウェア工学、プロジェクトマネジメント
所属学会：TOCICO、日本 TOC 推進協議会、日本 TOC 協会

Microsoft Excel® はマイクロソフト社の登録商標です。
本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

3

新たな成長領域を 生み出す技術



並列型行動アーキテクチャを有するロボットのラピッドプロトタイピングを実現するミドルウェア開発

松永 大介, 山本 智哉, 藤井 春香, 小島 岳史

人と同じ空間で柔軟に動き、非定型な作業を自動化するロボットの実現には、認識、計画、制御といった異なる特性を持つ機能を並列処理し、即応性を高める必要がある。

この要件を満たすアーキテクチャとして、並列型行動アーキテクチャが存在する。このアーキテクチャでは認識・計画などの高次情報処理を行う上位処理とロボットの動作機能を実現する下位処理が並列処理される。さらに、上位処理が下位処理に対して必要に応じて作用することにより、ロボットアプリケーションの即応性が担保される。

筆者らはこのようなアーキテクチャを持つロボットのラピッドプロトタイピングを実現するため、ロボット技術開発用ミドルウェアを開発した。本ミドルウェアは、リアルタイム処理や並列処理などの実装に専門性が必要な機能を提供し、開発を効率化する。また、実際に本ミドルウェアを用いて並列型行動アーキテクチャを有する複数のロボットを短期間で開発することができた。

本稿では、本ミドルウェアの仕様と有用性について既存のものと比較を交えて述べる。また、本ミドルウェアとその開発環境の適用事例を用いて、性能検証結果と開発効率に関する考察を述べる。

Development of a Middleware for Rapid Prototyping of Robots Based on Parallel Action Architecture

MATSUNAGA Daisuke, YAMAMOTO Tomoya, FUJII Haruka and KOJIMA Takeshi

To realize robots that can move flexibly in human environments and automate non-standard tasks, it is essential to parallel process functions like recognition, planning, and control to enhance responsiveness. The parallel behavior architecture addresses this need by executing high-level information processing in upper layers and motion capabilities in lower layers simultaneously. This structure ensures that upper processing can influence lower processing as needed, maintaining the responsiveness of the robot application.

The authors developed middleware for robotic technology to enable rapid prototyping of robots with such architectures. This middleware provides functionalities that require expertise in implementing real-time processing and parallel processing, thereby streamlining the development process. Additionally, using this middleware, multiple robots with a parallel behavior architecture were developed in a short period of time.

This paper presents the specifications and advantages of the middleware, comparing it with existing solutions. It also presents performance verification results and considerations regarding development efficiency using case studies of the middleware and its development environment.

1. まえがき

近年、少子化や人手不足などの問題を背景に、ロボットによる生産性向上のニーズが高まっている。これらを受け

オムロンでは、主に FA 分野でライン作業などの定型な作業の自動化に取り組んできた。今後はより広範な分野・作業に対応するため、人と同じ空間で柔軟に動き、非定型な作業を自動化する様々なロボットの実現を目指している¹⁾。このようなロボットの開発では、開発初期の要件定

Contact : MATSUNAGA Daisuke daisuke.matsunaga@omron.com

義では想定が難しい条件や作業の変更が多く発生する。そのため、ラビッドプロトタイピングによりユーザからのフィードバックを受けて改良を繰り返す開発アプローチが有用である。

ロボットが人と同じ空間で作業するためには、未知の環境や環境の動的な変化に柔軟に対応しながら、確実に作業を遂行することが必要である。そのためには、認識、計画、制御といったロボット内部処理を高サイクルで連携させる必要がある。

ロボットの内部処理は認識・計画といった高次情報を取り扱う上位処理と、モータ制御のようなロボットの動作機能を実現する下位処理に分類できる。ここで、下位処理は上位処理の結果を入力として使用するため上位処理に対して依存関係をもつ。さらに、計画処理や認識処理といった上位処理間にも依存関係が存在する。これらの関係を直接モデル化した従来型のシーケンシャルな実行方式では、上位処理が下位処理を律速して周期性を実現できず、ロボットアプリケーションの即応性が低下する問題があった。Brooks の包摂アーキテクチャ²⁾ や Yamamoto と Sugihara の積層変調アーキテクチャ³⁾ は、この問題に対する一つの方向性を示した (図 1)。これらの並列型行動アーキテクチャは、上位と下位の処理を独立かつ並列に実行し、上位処理が必要に応じて下位処理に対して作用する。そのため、下位処理による動作の実行を妨げず、システムの即応性を担保できる。これらのアーキテクチャを実現するには、複数の制御器を柔軟に実装可能かつマルチスレッドスケジューリング可能なソフトウェアが必要となる。

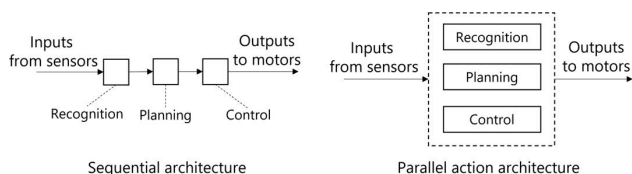


図1 従来型と並列型行動アーキテクチャによる実行方式

一方、ロボットのソフトウェア開発の側面に目を向けると、専門的知見を要求する機能の実装が開発のボトルネックとなることが多い。例えば、モータ制御をはじめとする周期処理の実装にはリアルタイム性能の考慮が要求される。また、並列型行動アーキテクチャの場合、データ競合やデッドロックを避けたスレッドセーフな実装や、並列処理に起因する不具合の解析や実装の修正が必要となり、これらにも専門的知見が必要となる。さらに、ロボットシステムとしての改良を繰り返すうちにハードウェアやOS (Operation System) などの実行環境が変更されることによる手戻りが発生することもある。

ロボット開発効率化を目的とするソフトウェアのコンポーネント化やオープン化が進んでいるが、並列処理のスケジューリングに主眼をおいたミドルウェアはなく、並列

型行動アーキテクチャを持つロボットの効率的な開発は難しい。さらに、一般にソフトウェアの開発効率化を図るには、保守性や移植性などのソフトウェア品質を高めることも要求される。

以上の経緯から、筆者らは上記アーキテクチャの実現とロボット開発効率化を両立するロボット技術開発用ミドルウェアを開発した。本ミドルウェアは、並列型行動アーキテクチャを有するロボットのソフトウェア開発において課題となるリアルタイム性の実現、データ競合の防止、実行環境の変更を容易にする。

リアルタイム性の実現には、実行周期や優先度、CPU コアの割り当てをはじめとする種々の設定が必要であり、OS や実行環境に依存した組み込み開発特有の専門性が要求される。また、ラビッドプロトタイピングで開発するには、これらの設定が容易に変更可能であることが望ましい。そこで、本ミドルウェアは、これらを容易に設定できるマルチスレッドスケジューリング機能を提供した。この機能はリアルタイム処理の概念をモデル化し、ミドルウェアのインターフェースで各種設定を実行可能にする。これにより、OS や実行環境に関する知識がなくてもリアルタイム処理の実装や設定変更が可能となり、開発中の仕様変更にも柔軟に対応できるようにした。

データ競合の防止の実現には、スレッド間の指令送受信機能および出版 - 購読型モデルを基本としたデータ共有機能をミドルウェアの機能として提供した。これらの機能にスレッド間アクセス時のデータ競合の対策を集約することにより、開発者はデータ競合を考慮することなく、スレッド間アクセスを実現できる。

実行環境の変更には、開発ターゲットに依存しない OS 環境でのクロス開発を可能にすることで対応した。このアプローチにより、ターゲット環境とは異なる環境での実装やデバッグに好適なハードウェア・OS 環境上での不具合解析が可能となる。この実現は、ミドルウェアに OS の抽象化層を設けることにより達成している。

本稿では、従来手法との比較を交えて、その内容と本ミドルウェアの有用性について述べる。また、本ミドルウェアとその開発環境の適用事例を用いて、性能検証結果と開発効率に関する考察を述べる。

2. 既存のロボットミドルウェア

広く使用されている同種のミドルウェアのうち代表的な ROS と RT ミドルウェアについて紹介し、各ミドルウェアの課題について述べる。

2.1 ROS

ROS (Robot Operating System)⁴⁾ とは、Willow Garage 社が開発したロボットシステム開発用のオープンソースミドルウェア、またそのミドルウェアを使った開発環境ツール

群及び開発成果のエコシステムである。現在は非営利団体 Open Robotics が維持・管理している。様々な機能をノードと呼ばれる単位で実装し、ノード同士が P2P で通信することでロボットシステムを実現することができる。この疎結合によるシステム構築が可能な点と、開発環境ツール群が充実していること、エコシステムによるモジュールの公開・共有の仕組みがあること、ライセンスが条件を満たせばソースコードを公開する必要がない BSD であることにより、現在研究開発の場で最も使われている。

また、現在 ROS2⁵⁾ と呼ばれる次世代バージョンの開発が進んでいる。これは、ROS 開発当初に設定された要件定義が陳腐化してきたため、要件を見直して新たに開発されたものである。旧版との主な差異としては、複数台のロボット制御・組み込みシステム・リアルタイム制御への対応が挙げられる。

2.2 RT ミドルウェア

RT ミドルウェア (RT-Middleware: RTM)⁶⁾ とは、産業技術総合研究所 (産総研) などによって開発された、ロボットやロボット技術 (Robotics Technologies: RT) を用いたシステムを構築するためのソフトウェアプラットフォームである。

RTM では各機能要素をコンポーネント化したソフトウェアモジュールを組み合わせることでロボットシステムを構築できるようになっている。このソフトウェアモジュールは RT コンポーネント (RT-Component: RTC) と呼ばれ、そのインターフェース仕様は国際標準化団体 OMG (Object Management Group) に公式標準仕様として規格化されている⁷⁾。

また、RTM は (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の次世代ロボット知能化技術開発プロジェクトにおける開発基盤として採用されている。

OpenRTM-aist⁸⁾ は、産総研が実装・配布している RT ミドルウェアの実装を含むソフトウェアプラットフォームで、RTC の実行を管理するためのミドルウェア、RTC を実装するためのフレームワーク、ソフトウェア開発環境などで構成されている。RTC のフレームワークや管理機能が提供されていることから、ユーザはコアロジックの開発に専念できる。

2.3 既存ミドルウェアの課題

ROS に関しては、ノードと呼ばれる処理単位の独立性が高く、並列型行動アーキテクチャ実現のための処理の並列実行という点では適していると言える。しかし、ノード自体の処理やノード間の通信がリアルタイム処理に対応していないため⁹⁾、即応性の高いロボットの制御を目指す本件に対しては不適である。ROS2 ではリアルタイム制御への対応を謳っているが、通信部分のリアルタイム性の向上

がなされるにとどまっているのが現状である¹⁰⁾。したがって、リアルタイム性の保証ができないため、即応性の高いロボットシステムの実現という筆者らの目的に対して十分ではない。これは、ROS は元々ロボット自体の制御ではなくロボットを構成要素の一つとするロボットシステムの開発を目的としたフレームワークであることが原因であると考えられる。

RT ミドルウェアの実装である OpenRTM-aist に関しては、RTC と呼ばれる処理単位の独立性が ROS 同様に高く、またノードの処理・通信に関してもリアルタイム処理に対応しており、筆者らが目指す即応性の高いロボットの実現という目的に対して好適な設計であると言える。しかし、並列型行動アーキテクチャのような構成を実現するには、標準の OS (Ubuntu) をリアルタイム化するためにカーネルにパッチ適用したうえで、リアルタイムに実行させる全ての RTC に対して以下の作業が必要になる。

- ・周期実行部分の前後でリアルタイムプロセス/非リアルタイムへの変換処理を実装
- ・実行周期と優先度ごとのコンテキストへの割り当て設定
- ・データ送受信方式を、周期実行に遅延が発生しないように自身の処理や送受信先の周期に応じて設定

このように実装されたシステムは、RTM が本来想定する、独立したモジュール群によりネットワーク的に構成されたシステムとは異なる。そのため、これらの設定作業は標準のフレームワークと開発環境ではサポートされておらず、ミドルウェアのユーザ自身ですべて対応する必要がある負担である¹¹⁾。

3. 提案手法

3.1 本ミドルウェアへの要求事項

本節では、前章で述べた問題の解決を目的とする主要要求事項を示す。また、ラビッドプロトタイピングの実現に必要なミドルウェア全体の要求事項を品質特性ごとにまとめる。

3.1.1 主要要求事項

1) マルチスレッドスケジューリング

リアルタイム性能要求の高いスレッドに対して明示的に高い優先度やシステムリソースを割り当て可能とするマルチスレッドスケジューリング機能を提供する。これにより、リアルタイム性能要求の高いスレッドに対するそれ以外のスレッドからの影響を低減する。

2) データ競合の防止

スレッド間の指令送受信機能および出版-購読型モデルを基本としたデータ共有機能をミドルウェアの機能として提供する。これらの機能にスレッド間アクセス時のデータ競合の対策を集約し、スレッドセーフかつノンブロッキングでデータ共有を行う仕組みを持たせる。

3) マルチプラットフォーム対応

ミドルウェアに OS の抽象化層を設けることにより、開発ターゲットに依存しない OS 環境でのクロス開発を可能にする。このアプローチにより、ターゲット環境とは異なる実装/デバッグに好適な OS/ハードウェア環境上での不具合解析を可能にする。

なお、主要要求事項 1) のスレッド周期実行処理、主要要求事項 2) のデータ共有の仕様を決めるに伴い、弊社マシンオートメーションコントローラ NJ/NX CPU ユニットの仕様であるタスク、変数同期機能¹²⁾の振る舞いを参考にした。

3.1.2 ミドルウェア全体の要求事項

本ミドルウェアの要求事項を ISO/IEC25010 のソフトウェア品質特性モデル¹³⁾に分類する。本ミドルウェアは、ラビッドプロトタイピングを実現し技術開発の生産性向上を重視しているため、機能適合性、信頼性、セキュリティのような製品に求められる特性は考慮していない。なお、表 1 には開発効率化に必要となる開発補助機能、開発環境に対する要求も含めて記載している。

表 1 本ミドルウェアの要求事項

品質特性	要求
性能 効率性	リアルタイム処理、非リアルタイム処理が混在したマルチスレッドスケジューリングができること
保守性	最低限の変更で様々なキネマティクスのロボットに対応できること
互換性	外部システムと接続ができること
移植性	マルチプラットフォーム（複数の OS 環境）で動作可能であること
使用性	高級プログラミング言語を用いた開発ができること
	認識、計画、制御などの処理をすべて同一システムに作り込めること
その他	開発環境に CI（Continuous Integration）/CD（Continuous Delivery）をサポートすること

3.2 機能説明

本節では、前節で述べた要求事項を満たす本ミドルウェアの主要機能と、ラビッドプロトタイピング実現に必要なソフトウェア要件をまとめた補助機能について説明する。なお、主要機能 1)、2) は性能効率性、3) は移植性に関する品質の要求事項を満たす。

3.2.1 主要機能

1) マルチスレッドスケジューリング機能

本機能は、各処理の実行周期・優先度とスケジューリング方式に基づき、処理の実行順序をスケジューリングする。周期・優先度・スケジューリング方式などのパラメータは所望のシステムに応じて開発者が任意に設定できる。これは従来手法と異なり、実行スケジューリングのフレキシビリティに重点をおいた機能仕様である。

本機能により、リアルタイム性が要求されるモータ制御部のような処理と、それ以外の処理を並列実行するシステムを構築できる。ここでのリアルタイム性とは、一定周期で期待した時間に遅延なく処理が行われることであり、ロボット制御の重要な処理に必要な要件である。例えば、モータ制御部で遅延が発生するとモータの指令値に対する追従が遅れ、ロボットの位置精度や軌跡追従性能が低下する。

図 2 にマルチスレッドスケジューリング機能の概要図を示す。指定のスケジューリング方式に基づき定周期スレッド（図中 Periodic thread）と非定周期スレッド（図中 Non-periodic thread）が生成される。また、並列実行される各実行処理（図中 proc と表記）は、開発者指定に基づいてスレッドに割り付けされる。

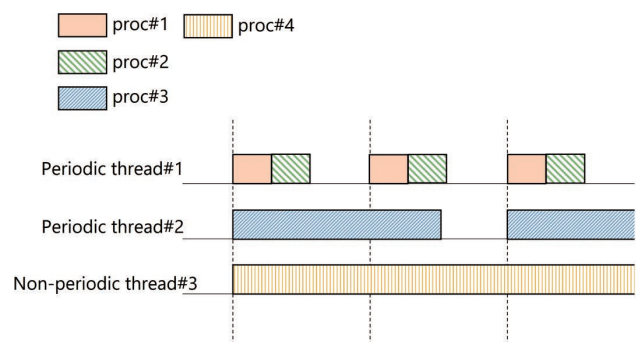


図 2 マルチスレッドスケジューリングの概要

2) データ競合を防止する機能群

下記の 2 つの機能によりスレッド間のデータ競合を防止する。

① スレッド間の指令送受信機能

スレッドまたは、別プロセスからミドルウェアの内部モジュールへのアクセスを可能にするため、汎用インター

フェースによるアクセス（コマンド機能）を実現する。ミドルウェアがコマンド受信スレッドを常駐させ、コマンド受信時に各モジュールのコマンドの実行スレッドを起動することで、コマンドの実行順序の保証とスレッド実行を確実に行えるようにする。また、コマンドの送信方式を同期/非同期の2種類を用いることで、ロボット動作のような順次実行が必要なコマンドと、ロボット内部状態表示のような順序性が不要なコマンドの両立を可能にする。

- ・ 同期型：コマンド送信後、呼び出し先がコマンドを受け付けて結果を受信するまで呼び出し元の処理がブロックされる。呼び出し元の処理とコマンドの実行を同期したい場合に使用する。実行時間が長いコマンドには向かない。また、処理がブロッキングされるため、定周期スレッド内での同期コマンド送信は禁止とする。
- ・ 非同期型：コマンド送信後、呼び出し先がコマンドを受け付けた後は呼び出し元の処理はノンブロッキングとなる。結果は指定したコマンド送信時に登録した関数にコールバックされる。実行時間が長いコマンドや定周期スレッド内での使用を想定している。

また、ミドルウェアの内部モジュールが定周期スレッド上でコマンドを受信するため、スレッドセーフキューを用いてコマンドを一次受けする仕組みをミドルウェアに搭載する。これにより、定周期スレッドのクリティカルセクションを最小化し、リアルタイム性能への影響を抑える。

② データ共有機能

スレッド間でデータ一貫性を保持しつつ、データ変更タイミングの保証と他スレッドからのアクセス保護を行う。各スレッドでデータの同時性を持たせるため、ROS や RT ミドルウェアでも使用されている出版-購読型モデルを使用する（図3）。具体的には各スレッドで使用するデータに対し、公開（Publish）するのか、他スレッドのデータを購読（Subscribe）するのかを定義し、スレッド実行後に Publish、スレッド開始前に Subscribe している。それにより、各スレッドの実行前にはデータが更新され、各スレッド実行中は Subscribe しているデータは同一であることが保証できる。

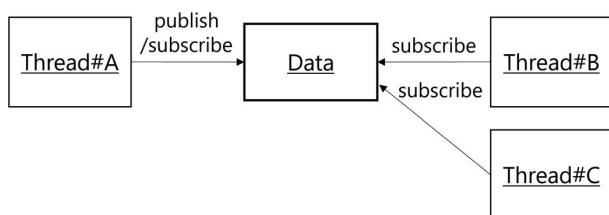


図3 データ共有の概念図

3) マルチプラットフォーム対応

OS（Operating system）やハードウェアとミドルウェア間の依存を減らす。一般にロボットの技術開発着手時にはOS／ハードウェア環境が定まっていないことが多い。また、開発中にこれらの環境変更があることも多い。そのため、実装工程では開発ターゲットに依存せず、実装に好適なOS／ハードウェア環境で開発し、実機検証工程ではターゲットとするOS／ハードウェア環境へ柔軟に変更可能であることが望ましい。そこで、Operating System Abstraction Layer（OSAL）層を設けOS固有の処理を抽象化することで、柔軟なOSの変更を可能とする。また、ハードウェアも同様に抽象化層を設けることで、H/Wなしでも検証を可能にする。

3.2.2 補助機能

本節では、補助機能を本ミドルウェアへの要求品質特性ごとに説明する。

1) 保守性

図4にソフトウェアアーキテクチャ図を示す。ユーザーインターフェースやデバッガに相当するApplication部、今回提案するミドルウェアであるRobot Framework部、OS部、Hardware部で構成する。Robot Frameworkには、ロボット固有の機能を実装したFunction Modules、スケジューリングや通信、リソース管理などの基本機能をまとめるRuntime、OSALを含む。認識（Recognition）・計画（Planning）・制御（Control）などのロボット固有の機能はFunction Modules内で個別にモジュール化・ライブラリ化し、プラグイン可能な構造とする。これにより、所望のシステムに対し最小のモジュール構成で動作可能な構造とし、保守性の向上と計算リソースの削減を実現する。

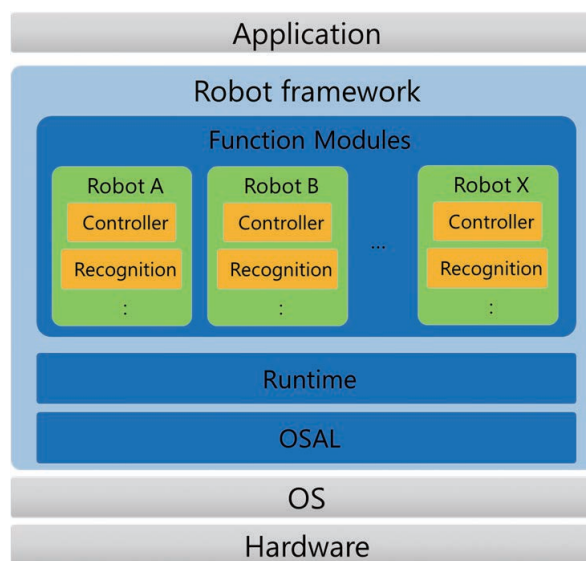


図4 ソフトウェアアーキテクチャ図

2) 互換性

ラピッドプロトタイピングを促進するため、技術開発対象外となる機能は外部システムを使用することにより実装工数を削減する。そこで、3rd-party ソフトウェアといった外部システムが提供する既存機能を活用するため、外部システムとの通信機能を提供する。本ミドルウェアでは、ROS との通信機能を提供することで、ROS をサポートしている様々なシステムを利用できるようにした。

3) 使用性／その他

クロス開発環境および CI/CD 環境をサポートする。ロボット技術開発でラピッドプロトタイピングを実現するためには、アルゴリズム開発と実機検証のサイクルをハイサイクルで実施することが求められる。そこで、アルゴリズム開発工程向けに、高級言語が使用可能な Windows 環境やオープンソースで研究に好適な Ubuntu 環境を使用した開発環境をサポートする。開発者は本環境で実装とシミュレーションを行い、開発成果は CI 環境により自動テストが行われる。一方、実機検証工程ではターゲット環境用のバイナリを CD 環境により自動生成する。これらの結果、シミュレーションや試作機での事前検証と実ロボットにおける開発者の手間やミスを削減し開発効率向上を図る。

4. 検証結果

本章では、本ミドルウェアとその開発環境の適用事例を用いて、提案するロボットミドルウェアの性能検証結果およびその開発効率に関する考察を述べる。

4.1 検証環境

4.1.1 ロボットシステム

提案するロボットミドルウェアを用いて構築したモバイルマニピュレータシステムを例に示す。図5はその外観である。2自由度の走行台車上に、8自由度ロボットアームを搭載している。台車とアーム先端にカメラを使い、外界・物体を認識する。

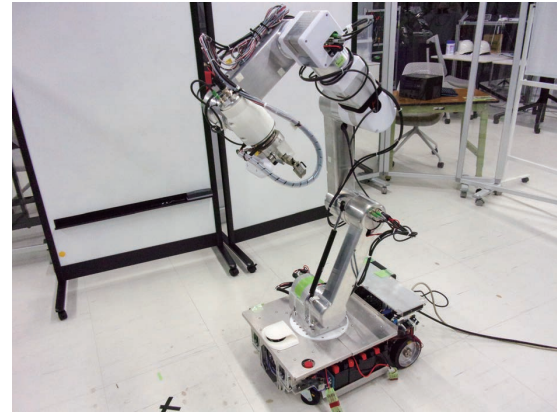


図5 開発事例：モバイルマニピュレータ外観

本ロボットシステムの内部構成を図6に示す。カメラ (Vision Sensors)、外界を認識する PC (Environment Recognition PC)、車輪とアームを動かす制御 PC (Control PC)、モータ (Motors)、外部センサ (Sensors) で構成されている。SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)¹⁴⁾ による自己位置推定 (Self-Location Estimation)、経路生成 (Path Planning)、経路追従 (Navigation)、制御 (Control)、

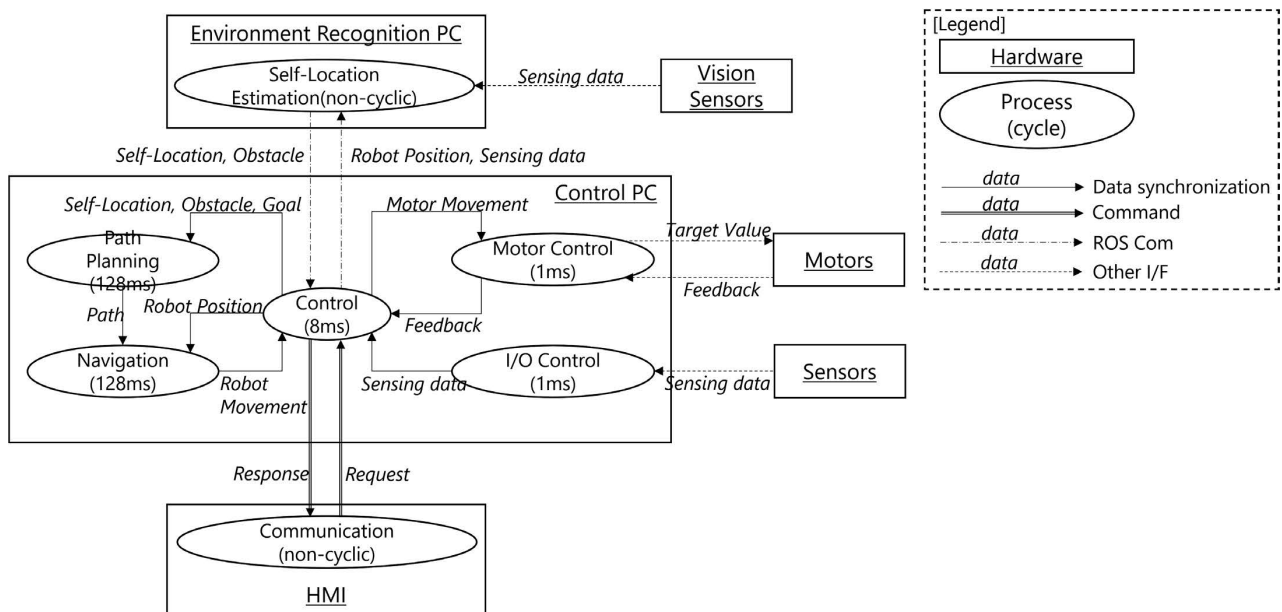


図6 開発事例：モバイルマニピュレータシステム

I/O 制御 (I/O Control)、モータ指令通信処理 (Motor Control) が並列に実行され、所望の移動動作を実現する。

自己位置推定以外の処理はリアルタイム OS の Control PC で定周期処理として実行される。このうち、Path Planning と Navigation は数理最適化を含むために実行処理時間変動が大きいので、実行周期の長い 128 [ms/cycle] スレッドとして定義される。一方、Control・I/O Control、Motor Control はリアルタイム性の要求が強い処理であるため、それぞれ実行周期の短い 1 [ms/cycle] スレッド、8 [ms/cycle] スレッドとして定義される。これら定周期のスレッドはミドルウェアのデータ共有機能を介してデータをやり取りしている。スケジューリングは設定ファイルにて、周期、優先度、実行スレッドを指定できるようにしている。

自己位置推定は実行処理時間が実行周期よりも大幅に長くなることや、センサとのインターフェースの必要上非リアルタイム OS の Environment Recognition PC 上で非定周期の処理として実行される。この処理は ROS で実装されており、ミドルウェアの ROS 通信機能を通じて制御 PC と非同期通信を行っている。

また、本ロボットシステムは HMI (Human Machine Interface) からの指令を受けて動作する。HMI からの動作指令はミドルウェアのコマンド機能を使用している。

4.1.2 開発環境

マルチプラットフォーム対応による開発効率向上のため、図 7 のような CI/CD を実行する開発環境を構築した。

開発したアルゴリズムや機能は Function Modules として GitLab 上で管理し、Push したソースコードを自動でビルド・テストを行う。本ミドルウェアで対応している実行環境に合わせた実行バイナリに対し自動テストを行うことで、設計品質を確保している。

CI/CD のビルド、テスト環境は AWS (Amazon Web Service)¹⁵⁾ 上の仮想マシンと開発成果をデプロイする実機を

併用して構築している。仮想マシンでは Docker を動かし、CI 環境のコンテナを構築・起動している。

4.2 検証結果・考察

本ミドルウェアに要求される品質特性ごとに結果および考察を記載する。

4.2.1 性能効率性

構築したシステムを実環境で動作させた際の性能効率性に関する考察を以下に示す。測定環境として、OS: VxWorks、CPU: Intel Core i7-1165G7 2.8 GHz、メモリ: 64 GB を搭載した制御 PC を使用した。

1) マルチスレッドスケジューリング

構築したシステムに対し、モバイルコンピュータ移動中のスレッド実行処理を図 8 に示す。本情報は VxWorks の IDE (Integrated Development Environment) である Wind River Workbench を用いて取得した。

図中では、各スレッドの実行状態を緑色の太線にて表しており、待機状態は波線で表している。図中左にはスレッド名と各スレッド Priority を明記しており、Priority の値が小さいスレッドが優先的に実行される。上から順に、定周期スレッドを生成するための 1 ms 割込み、(Interrupt200)、Motor Control、I/O Control、Control、Non-cyclic Thread1、2、…、5 スレッドが表示されている。Non-cyclic Thread は 3.2.1 2) ①に記載のスレッド間の指令送受信機能やデータ共有機能を実行する度にスレッドが生成されるため、同時に数十スレッドが生成される場合がある。本図より実行処理時間変動が大きい複数の非周期スレッド (Non-cyclic Thread1、2、…、5) とリアルタイム性の要求が強い Motor Control、I/O Control、Control スレッドが期待の実行順序、実行優先度で、安定して周期実行されることを確認した。なお、表記の都合上 Planning と Navigation スレッド (128 ms 周期) については記載していない。

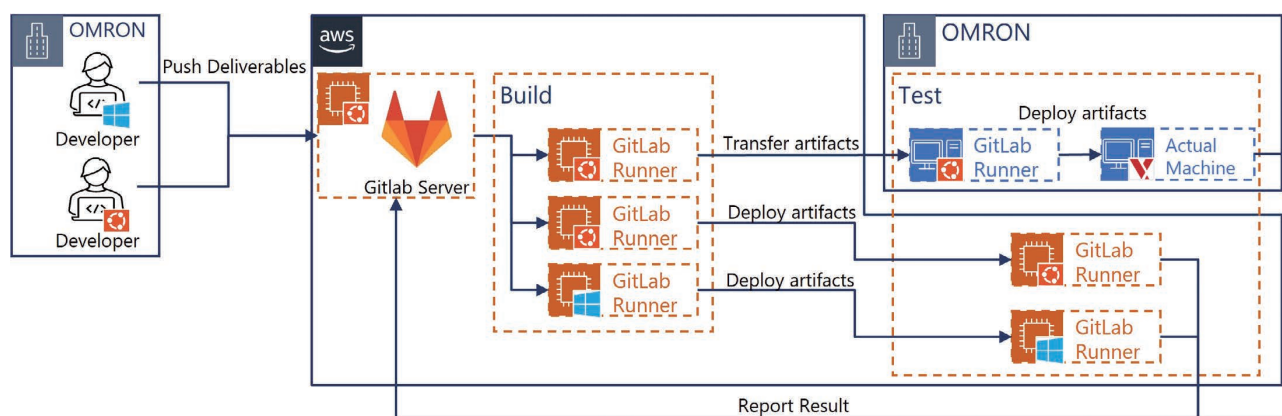


図 7 開発環境

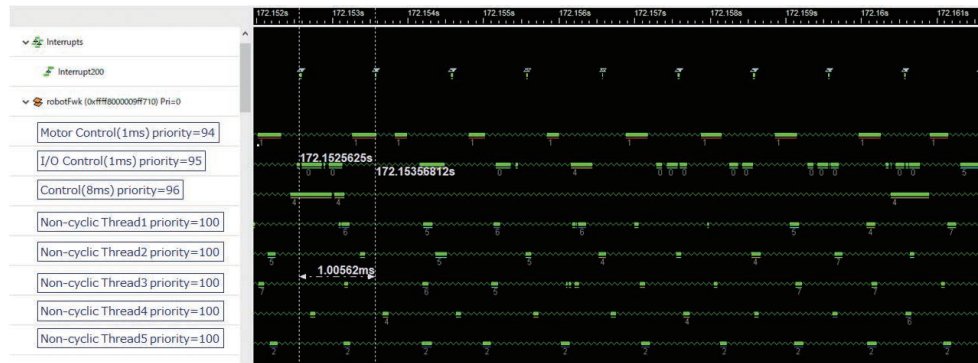


図 8 並列スレッドスケジューリング

2) リアルタイム性

リアルタイム性の要求が強い Motor Control、I/O Control、Control スレッドの実行時間統計情報（最小、最大、平均、標準偏差）を表 2 に示す。

表 2 実行時間統計情報

スレッド名 (周期 [ms]/Priority)	最小 [ms]	最大 [ms]	平均 [ms]	標準偏差 [ms]
Motor Control (1/94)	0.066	0.117	0.074	0.006
I/O Control (1/95)	0.163	0.229	0.172	0.011
Control (8/96)	0.211	0.369	0.276	0.031

本ロボットシステムでは、定周期処理は 1 ms の割込みから指定した間隔でスレッドを実行させることで実現している。割込み処理の統計情報は最小 0.991 [ms]、最大 1.009 [ms]、平均 1.0 [ms]、標準偏差 0.001 [ms] と安定した割込みを実現している。表 2 で示す通り、各スレッドは最大値が周期未満となっており、周期実行時間を超えるようなスパイクは発生していない。標準偏差を見ても Motor Control 0.006 [ms]、I/O Control 0.011 [ms]、Control 0.031 [ms] と Priority の高いスレッドの方が少ないばらつきになっている。以上からリアルタイム性が求められるスレッドが安定的に周期実行されていることを確認した。

4.2.2 保守性

本ロボットシステムでは図 4 に示した通り、ロボット固有の機能は、Function Modules 内で実装、ライブラリ化している。一方、共通の機能は本ミドルウェアの必要なライブラリをロードすることで実現している。これにより、ロボット設計者は該当するロボットの Function Module 開発に専念することができた。その結果、モバイルコンピュータを開発したテーマでは双腕ロボットも同時に開発することができ、本ミドルウェアが様々なロボットの共通フレームワークになりうることを確認した。

4.2.3 互換性

図 6 で示した通り、自己位置推定処理は制御 PC とは別の PC で実行されている。この処理や外部センサの制御に関しては、画像処理のライブラリやセンサのドライバが豊富な ROS を使うことで、短期間で開発することができた。ROS との通信機能を使用することで、この機能をロボットシステムに簡単に取り込むことができ、開発の効率化を実現できることを確認した。

4.2.4 移植性

コマンド機能によって Runtime や Function Modules 内のモジュールそれぞれの機能に対してアクセス可能であるため、開発フェーズに合わせた検証用ツールを使用して開発を効率化することができた。例えば Runtime の開発フェーズではデータ共有機能で public/subscribe されたデータの確認、ロボットの制御機能の開発フェーズではモータ入出力値の監視、計画機能の開発フェーズではロボットシミュレータによるロボット挙動の確認などが可能だった。

また、コマンド機能がマルチクライアント可能な設計になっていることから、その時々で必要なツールを複数同時に使用することができる。これにより、各機能の開発者が自分の作業のために開発した検証ツールを他者が再利用することが容易になり、開発が進んでシステムが複雑化した後に発生した問題の分析も効率的に行うことができた。

これらの検証用ツールは各開発者が開発したものを CI 環境で共有することで別の開発者が改良するという良いサイクルが発生した。その結果、ロボットシミュレータツールは高機能化が進み、仮想空間に任意のロボットを可視化・検証できるようになるまでになった。ロボットの可視化モデルは汎用的なロボット記述フォーマットである URDF (Unified Robot Description Format)¹⁶⁾ で記述できるようになっているため、今後の別の開発テーマにも流用可能であり、ミドルウェアとともに展開予定である。

4.2.5 使用性／その他

1) GitLab での CI (自動ビルド・テスト)

本 CI 環境により、設計者が任意の OS で開発した Function Modules をターゲット環境の実機上での自動テストと実行バイナリの自動生成を可能にした。これにより、シミュレーションで検証を行った後、実機で実際に動かすまでをリードタイムなしでシームレスにできた。結果として、各設計者の検証が、リアルタイム性を考慮した実機動作まで行えるようになり、実ロボットでも使用可能なアルゴリズムや機能の開発を加速できた。

2) AWS を活用したサーバリソースの最適提供

仮想マシンでの運用により、複製、初期化が容易になり、これまで発生していた、サーバやネットワーク負荷の調整、管理負荷が低減した。その結果、開発状況に応じたビルドサーバ・テストサーバの増減や異常時の復旧を 30 分以内で可能にした。

5. むすび

人と同じ空間で柔軟に動き、非定型な作業を自動化するロボットの早期実現には、動的な変化への柔軟性や即応性を備えたロボットをラビッドプロトタイピングで効率的に開発することが課題となる。

本論文では、この課題に対して、並列型行動アーキテクチャを有するロボットをラビッドプロトタイピングで開発可能な技術開発用ミドルウェアを提案した。

具体的には、提案ミドルウェアの特徴と従来ミドルウェアに対する優位性を述べた。本ミドルウェアは、ROS/ROS2 では実現が難しい複数スレッドのリアルタイム性を保証したスケジューリングを実現している。また、データ共有方法やスケジューリングについて個別に考慮する必要がない点で、OpenRTM-aist よりも高い開発効率をユーザーに提供できていると言える。

また、本ミドルウェアとそのソフトウェア開発環境の適用事例を用いて、性能検証結果およびその開発効率に関する考察を述べた。

今後は、並列型行動アーキテクチャを搭載するロボットの社会実装を目指し、本ミドルウェアの更なる改善とともに、世の中に革新的なロボットを送り出し続ける所存である。

参考文献

- 1) オムロン. “中外製薬とオムロン, オムロン サイニックエックスが目指す人が活きる「次世代ラボオートメーション」.” オムロン EDGE&LINK. <https://www.omron.com/jp/ja/edge-link/news/688.html> (Accessed: Jun. 5, 2024).
- 2) R. Brooks, “A robust layered control system for a mobile robot,” *IEEE J. Robot. and Automat.*, vol. 2, no. 1, pp. 14–23, 1986.
- 3) 山本孝信, 杉原知道, “積層変調アーキテクチャに基づく二脚ロボットの SEAN システム,” *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集*, pp. 1A1-D05, 2021.
- 4) Quigley Morgan et al., “ROS: an open-source Robot Operating System,” *ICRA workshop on open source softw.*, vol. 3, no. 3.2, p. 5, 2009.
- 5) S. Macenski et al., “Robot Operating System 2: Design, architecture, and uses in the wild,” *Sci. robot.*, vol. 7, no. 66, 2022.
- 6) N. Ando et al., “RT-middleware: distributed component middleware for RT (robot technology),” in *IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots and Syst.*, 2005, pp. 3933–3938.
- 7) *Robotic Technology Component Specification*, formal/08-04-04, 2008.
- 8) N. Ando et al., “A software platform for component based rt-system development: Openrtm-aist,” in *Int. Conf. Simul., Model., and Program. Auton. Robots*, 2008, pp. 87–98.
- 9) 安藤慶昭, “ロボットミドルウェアの実時間処理・排他処理の比較,” *日本ロボット学会誌*, vol. 34, no. 6, pp. 366–369, 2016.
- 10) J. Kay. “Introduction to Real-time Systems.” ROS 2 Design. https://design.ros2.org/articles/realtime_background.html (Accessed: Jun. 5, 2024).
- 11) 菅谷みどり 他, “IXM: ロボット制御ソフトウェア向けプロセス間通信ミドルウェア,” *情報処理学会論文誌*, vol. 58, no. 10, pp. 1578–1590, 2017.
- 12) オムロン株式会社. *NJ/NX シリーズ CPU ユニット ユーザーズマニュアル ソフトウェア編 (SBCA-467Z)*, pp. 5–46–5–90.
- 13) *Systems and software engineering*, ISO/IEC 25010, 2011.
- 14) H. Durrant-Whyte, T. Bailey, “Simultaneous localization and mapping: part I,” *IEEE Robot. & Automat. Mag.*, vol. 13, no. 2, pp. 99–110, 2006.
- 15) AWS. “オムロン, 研究開発用の HPC 基盤を AWS 上に構築, 最適なコンピューティングリソースを活用し, 革新的技術開発をリード.” AWS 導入事例: オムロン株式会社 | AWS. <https://aws.amazon.com/jp/solutions/case-studies/omron-case-study/> (Accessed: Jun. 19, 2024).
- 16) ROS.org. “urdf.” urdf - ROS Wiki. <https://wiki.ros.org/urdf> (Accessed: Jun. 19, 2024).

執筆者紹介



松永 大介 MATSUNAGA Daisuke

技術・知財本部
ロボティクス R&D センタ
Voyager Project 部
専門：ソフトウェア工学



山本 智哉 YAMAMOTO Tomoya

技術・知財本部
ロボティクス R&D センタ
Voyager Project 部
専門：ソフトウェア工学



藤井 春香 FUJII Haruka

技術・知財本部
ロボティクス R&D センタ
Voyager Project 部
専門：ソフトウェア工学



小島 岳史 KOJIMA Takeshi

技術・知財本部
ロボティクス R&D センタ
Voyager Project 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。

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	紹介文
電源回路における磁気部品と基板配線の電磁結合に関する測定評価 Measurement and evaluation of electromagnetic coupling between magnetic components and board wiring in power circuits. 濱名建太郎（技術・知財本部 デジタルデザインセンタ）、渡邊智紀（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 コンボ事業部 コンボ開発部）、上松武（技術・知財本部 アドバンステクノロジーセンタ） 電子情報通信学会大会講演論文集（CD-ROM）、2024年、一般社団法人 電子情報通信学会、Vol. 2024、p. B-9-13、日本語 Copyright (c) 2024 IEICE	近年、世界的なCO₂削減の要請により、電源回路の高効率・小型化が進んでいる。それに伴うスイッチングの高速化と回路部品の高密度化により、電源回路から基板配線への電磁結合が増加している。これは伝導ノイズ増加の要因となる。この現象について、先行研究では、磁界および電界ノイズ源から配線を含むEMIフィルタへの電磁結合のメカニズムが報告されている。本稿では、先行研究に基づき、実電源回路における磁気部品から基板配線への電磁結合のメカニズムを評価したので報告する。
科学論文中の同じ貢献を説明しているイントロダクションの文と本文のパラグラフを判定するためのデータセット 田中翔平（オムロン サイニックス株式会社）、牛久祥孝（オムロン サイニックス株式会社） 言語処理学会第30回年次大会、2024年、言語処理学会、Vol. 30、p. 1852-1857、日本語 Copyright (c) 2024 言語処理学会	本研究では論文中の同じ貢献を説明しているイントロダクションの文と本文のパラグラフを判定するという新しいタスクを提案する。よく書かれた論文では、イントロダクションの貢献が本文で詳細に説明されるが、専門外の研究者や初学者にとって、その対応を把握するのは難しい。本研究では、機械学習モデルがこの対応関係をハイライトすることで、論文読解を支援できると考えた。提案タスクのために、自動アノテーションと人手アノテーションを組み合わせたデータセットを収集し、エンコーダーモデルを用いたパラグラフ検索タスクで評価を行った。その結果、科学ドメインで事前学習されたモデルが最も高性能で、38%の精度でイントロダクション中の貢献を説明する本文のパラグラフを選択できることがわかった。
MATLAB/Simulink+dSPACE による高速センサフュージョンロボットシステム A High-speed Sensor Fusion Robot System Using MATLAB/Simulink + dSPACE 川上真司（技術・知財本部 ロボティクスR&Dセンタ）、阿部将佳（技術・知財本部 ロボティクスR&Dセンタ） システム制御情報学会学会誌、2024年、一般財団法人 システム制御情報学会、Vol. 68、No. 3、p. 90-95、日本語 Copyright (c) 2024 ISCIE	本解説では、高速センサフュージョンロボットシステムに関する取り組みを紹介する。産業用ロボットは自動車業界を中心に広く導入されているものの、精密部品の嵌合や不定形物体の移載など、依然として人間の能力に劣る作業が存在する。これらの課題に対処するため、筆者らは大学との共同研究やNEDOプロジェクトを通じて、MATLAB/Simulinkを基盤とした高速センサフュージョンロボットシステムを構築した。このシステムにより、実ロボットでそのまま動く高速センサフュージョン系が直感的に構築できるようになり、仮説検証が容易になった。本稿では、同様の課題に取り組む研究者の仮説検証が加速することを期待して、精密部品の嵌合や不定形物体の移載が実行可能なシステムの詳細を紹介する。

論文名・執筆者（所属）・掲載誌	紹介文
装置状態監視における変動モード分類法の実用化 奥村亮祐（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）、山田隆章（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）、宮本泰地（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） システム/制御/情報、2024年、一般社団法人 システム制御情報学会、Vol. 68、No. 4、p. 148-153、日本語 Copyright (c) 2024 ISCIE	生産設備の突発的ダウンは、製品出荷の停止による事業機会の喪失を招く。そのため、生産設備からなんらかの異常的兆候が見て取れる場合、その要因を早期に分析・特定する必要がある。製造業では、人手不足が問題になっており、前述の分析・特定ができる高度人材の確保は難しくなっている。そこで、我々は、生産設備の変動モードを事前に分類・検知する技術の開発に取り組み、人材不足の状況でも生産設備の突発的ダウンを防止する予防保全の実現を目指す。本稿では、温度制御精度が要求される生産設備を対象として、コサイン類似度を用いた変動モードの検知方法の実用化について述べる。また、弊社製温度調節ユニットに組み込んだ場合の効果について解説する。
人と融和して知の創造・越境をするAIロボット AI Robots That Harmonize with Humans to Create Knowledge and Cross Borders 牛久祥孝（オムロン サイニックス株式会社）、進藤裕之（国立大学法人奈良先端科学技術大学院大学 データ駆動型サイエンス創造センター）、藤吉弘亘（学校法人中部大学 理工学部）、山下隆義（学校法人中部大学 工学部）、馬場雪乃（国立大学法人東京大学 大学院総合文化研究科）、吉野幸一郎（国立研究開発法人理化学研究所）、松原誠二郎（国立大学法人京都大学 大学院工学研究科） 電子情報通信学会誌、2024年、一般社団法人 電子情報通信学会、Vol. 107、No. 5、p. 403-410、日本語 Copyright (c) 2024 IEICE	AIとロボットの活用により、実験科学に参加する人々の生産性が向上することを目指して、2023 年からJST ムーンショット型研究開発事業「人と融和して知の創造・越境をするAIロボット」プロジェクトが開始した。このプロジェクトは、AIロボットと人間の共進化を重視し、人間の協力の下でAIロボットが自動化できる領域を段階的に増やしていくとともに、人間の科学者もAIロボットからひらめきを得て、創発的研究活動のレベルが引き上がることを目指している。本稿では、本プロジェクトの取組みと、AIロボットと科学者の共進化の可能性について解説していく。
ロボットとバックドライバビリティ Robot and Backdriverbility 川上真司（技術・知財本部 ロボティクスR&Dセンタ）、上岡拓未（技術・知財本部 ロボティクスR&Dセンタ）、杉原知道（技術・知財本部 ロボティクスR&Dセンタ） システム制御情報学会学会誌、2024年、一般財団法人 システム制御情報学会、Vol. 68、No. 8、p. 302-308、日本語 Copyright (c) 2024 ISCIE	マテハンや組み立てといった、外界との能動的接触を伴う作業をロボットに行わせる際には、外界とアクチュエータが直接力を交換できる性質、すなわちバックドライバビリティが重要となる。本稿では、ロボットのバックドライバビリティが損なわれる理由を数理的に解析し、それに基づいてバックドライバビリティの回復方針を整理した後、各々の方針に沿って現在各社が開発している技術と、精度・剛性・コストといった観点でのそれぞれの長所・短所を解説する。

論文名・執筆者（所属）・掲載誌	紹介文
基礎から一歩進んだ深層学習トピックス—Vドメイン適応 橋本敦史（オムロン サイニックエックス株式会社） システム/制御/情報、2024年、一般社団法人 システム制御情報学会、Vol. 68、No. 10、p. 411-418、日本語 Copyright (c) 2024 ISCIE	機械学習がAIという名前で社会に浸透し、様々なプロダクトが社会で実用化されている。しかし、その裏には目標精度に到達できずに頓挫したたくさんのプロジェクトもあっただろう。ドメイン適応は、機械学習を用いたプロダクト開発における難点、つまり、開発時に収集した学習・評価用データと実際にプロダクトを運用する中で得られるデータの違いをあの手この手で乗り越えるための技術である。機械学習エンジニアを目指す読者にとっては知っていて損のない知識であることを約束する。また、機械学習の研究者を目指すものにとっては、2022年以降は基盤モデルの隆盛により、急速に熱が冷めた話題と思われるかもしれない。しかし、筆者は基盤モデルに対する追加学習が一般的になれば再び研究が活発化すると予想しており、そのときに向けて知識として備えておいて然るべき分野であると考えている。本稿ではドメイン適応の多様なキーワードをそのコンセプトと共に伝える。
PMSMの動力線への単相変圧器を用いた位置検出用電力供給のための電力重畳制御方法 Power Superposition Control Method of Power for Position Sensor Using a Single-Phase Transformer on the Power Lines of a PMSM 桐淵岳（インダストリアルオートメーションビジネスカンパニー 商品事業本部 ドライブ事業部 開発部）、井上征則（大阪公立大学）、森本茂雄（大阪公立大学） 電気学会論文誌 D、2024年、一般社団法人 電気学会、Vol. 144、No. 8、p. 613-621、日本語 Copyright (c) 2024 IEEEJ	本論文は、永久磁石同期電動機の動力線に変圧器の一次側を直列につなぎ、一定電力を二次側より取り出す方法を提案する。永久磁石同期電動機と変圧器の統合の回路方程式より、二次側出力の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特性上の領域を判別する判別法と、その領域毎に適した電力重畳制御法を提案する。提案手法を検証するため、電力方程式より境界条件を算出し、シミュレーションと実験により判別法を検証する。電力重畳制御法については、電力推定器を用いて指令電流を算出し電流制御にて、シミュレーションと実験により検証する。その結果より、提案手法の有効性を示す。
調理作業理解のための言語資源付き固定視点映像データセットの構築 Unedited Fixed-viewpoint Procedural Videos with Language Resources for Understanding Cooking Activities 橋本敦史（オムロン サイニックエックス株式会社）、前田航希（オムロン サイニックエックス株式会社、東京工業大学）、平澤寅庄（オムロン サイニックエックス株式会社、東京都立大学）、原島純（クックパッド株式会社）、RYBICKI Leszek（クックパッド株式会社）、深澤祐援（クックパッド株式会社） 人工知能学会全国大会論文集（Web）、2024年、一般社団法人 人工知能学会、Vol. 38、p. ROMBUNNO.4Xin2-52（J-STAGE）、https://doi.org/10.11517/pjsai.JSAI2024.0_4Xin252、日本語 Copyright (c) 2024 JSAI	Webから収集した大規模動画データは深層学習時代の動画解析技術の発展に大きく寄与してきた。一方で、Web上の動画は一般的に編集済みであり、人の手を介さずに手に入る未編集動画に対しては、そのドメインギャップから精度に大きな違いがあった。この問題に対応するために一人称視点映像では大規模データセットを収集する取り組みが進んでいる。本研究では一人称視点とはまた別の主要な動画フォーマットである固定視点の未編集ビデオを対象に、商用のスマートフォンで収集した作業映像データセットとしてCOM Kitchensデータセットを提供する。手順テキストと動画を構造化されたワークフローに基づくアノテーションにより結びつけ、オンラインレシピ検索とDence Video Captioning課題の2つをベンチマークとして、Web動画により訓練された従来モデルがこの動画形式に対して十分に能力を発揮できないことを確認した。

論文名・執筆者（所属）・掲載誌	紹介文
視覚言語モデルの特徴空間分析に基づく 極少数サンプルによるプロンプトラニング Prompt Learning with One-Shot Setting based Feature Space Analysis in Vision-and-Language Models 広橋佑紀（技術・知財本部 ロボティクスR&Dセン タ）、山下隆義（中部大学 工学部情報工学科 機械知 覚ロボティクスグループ）、藤吉弘宣（中部大学 工学 部情報工学科 機械知覚ロボティクスグループ）、平 川翼（中部大学 工学部情報工学科 機械知覚ロボ ティクスグループ） IEEE Conference Proceedings、2024年、IEEE、 Vol. 2024、No. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops、p. 7761-7770、英語 Copyright 2024 The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved.	By leveraging few-shot data and labels, prompt learning acquires optimal prompts that achieve strong performance on downstream tasks. However, they often struggle when very limited data (e.g., one-shot) is accessible. We tackle this difficult one-shot setting and present a novel prompt learning framework called the Image-Text Feature Alignment Branch (ITFAB). ITFAB addresses misalignment in the feature space by bringing text features nearer to the centroids of image features and separating text features corresponding to different classes, thereby easing the acquisition of effective prompts with very limited data. Under a one-shot condition, our approach exceeds the performance of existing methods. It is also compatible with modern prompt learning methods such as MapLe and PromptSRC, enhancing their performance under a one-shot regime.
ビデオチャットにおけるユーザー操作と AI操作アバターの切り替え時の 視覚的印象の調査 Toward AI-Mediated Avatar-Based Telecommu- nication: Investigating Visual Impression of Switching Between User- and AI-Controlled Avatars in Video Chat 吉田成朗（オムロン サイニックス株式会社）、 小山裕己（国立研究開発法人産業技術総合研究所）、 牛久祥孝（オムロン サイニックス株式会社） IEEE Access、Vol. 2024、IEEE、Vol. 12、p. 113372-113383、英語 Copyright 2024 The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved.	Telecommunications technology has advanced rapidly, enabling AI-mediated communication. We envision users seamlessly switching between user-controlled (directly mapped movements) and AI-controlled avatars (autonomous actions) in daily interactions. For instance, users may rely on AI-controlled mode during distractions. This study highlights the importance of investigating auto-switching to enhance user experience in AI-mediated communication. We conducted a crowdsourced video chat experiment, analyzing how avatar switching affects visual impressions. Results indicate improved impressions with appropriate switch settings, emphasizing this research's significance. To determine optimal settings, we developed an adaptive experimental design tool using Bayesian optimization, which we plan to release publicly.
対象性を考慮した柔軟手首を使用した部分 観測環境下での部品挿入強化学習 Symmetry-aware Reinforcement Learning for Robotic Assembly under Partial Observability with a Soft Wrist Nguyen Hai（オムロン サイニックス株式会社）、 小津野将（オムロン サイニックス株式会社）、 Beltran-Hernandez Cristian C.（オムロン サイニックス株式会社）、濱屋政志（オムロン サイニックス株式会社） IEEE Conference Proceedings、2024年、IEEE、 Vol. 2024、No. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)、p. 9369- 9375、英語 Copyright 2024 The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved.	This study addresses the peg-in-hole assembly task using a soft wrist. Rather than relying on fully observable setups and external estimators, we use a partially observable formulation with deep reinforcement learning from demonstrations. The robot learns to perform the task using only haptic and proprioceptive signals and incorporates domain symmetry—via data augmentation and auxiliary losses—to improve sample efficiency. Simulation results with five different symmetric peg shapes demonstrate that this method is comparable to or even outperforms state-based agents, and it enables direct learning on a real robot within just 3 hours.

論文名・執筆者（所属）・掲載誌	紹介文
Slicet! - 2種類のシミュレータを活用したロボット食品カット学習 Slicet! - A Dual Simulator Framework for Learning Robot Food Slicing BELTRAN-HERNANDEZ Cristian C. (オムロンサイニックス株式会社)、ERBETTI Nicolas (オムロン サイニックス株式会社)、濱屋政志 (オムロン サイニックス株式会社) IEEE Conference Proceedings、2024年、IEEE、Vol. 2024、No. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)、p. 4296-4302、英語 Copyright 2024 The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved.	We present SliceIt!, a novel framework that enables robotic systems to learn complex food-cutting policies through a high-fidelity simulation environment. While autonomous cooking robots offer significant potential for domestic automation, manipulating sharp implements presents unique technical challenges in human-shared environments. This paper introduces an innovative real2sim2real methodology for training robotic arms to perform precise cutting tasks using compliance control. Our approach leverages reinforcement learning (RL) to optimize forceful manipulation policies, with particular emphasis on minimizing contact forces between the knife, food materials, and the cutting surface. To address the inherent risks and inefficiencies of real-world training, we propose the use of a dual simulation architecture that combines a high-fidelity cutting simulator with a robotic simulator. The system workflow encompasses four steps: first, collection of a few samples of real-world data. Second, calibration of our dual simulation environment. Third, learning the slicing policy in simulation. Finally, zero-shot testing on the real robot. By enabling safe and efficient learning of complex manipulation tasks in simulation, our framework demonstrates a practical solution for developing robust robotic cutting capabilities.
画像型触覚センサの電磁気学に基づく把持トルク推定手法 An Electromagnetism-Inspired Method for Estimating In-Grasp Torque from Visuotactile Sensors 淵岡湧仁 (オムロン サイニックス株式会社)、濱屋政志 (オムロン サイニックス株式会社) IEEE Conference Proceedings、2024年、IEEE、Vol. 2024、No. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)、p. 1077-1083、英語 Copyright 2024 The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved.	This study introduces the Tactile Dipole Moment as a new method for estimating tilt torques in gel-based visuotactile sensors. Unlike approaches based on deep learning or detailed sensor modeling, the method leverages electromechanical principles to analyze 2D marker displacement vector fields. It demonstrates accurate torque estimation across various tactile sensors and object geometries and proves effective in practical applications such as USB stick insertion with a compliant robot arm.
Swarm Body: 群ロボットによる新たな身体性の獲得 Swarm Body: Embodied Swarm Robots 市橋爽介 (オムロン サイニックス株式会社、Georgia Institute of Technology)、黒木颯 (オムロン サイニックス株式会社)、西村真衣 (オムロン サイニックス株式会社)、笠浦一海 (オムロン サイニックス株式会社)、平木剛史 (クラスター株式会社 メタバース研究所)、田中一敏 (オムロン サイニックス株式会社)、吉田成朗 (オムロン サイニックス株式会社) In Proceedings of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '24)、2024年、ACM、No. CHI '24、p. 1-19、英語 Copyright (c) 2024 ACM	The brain's plasticity enables the integration of artificial body parts, allowing embodied systems to facilitate intuitive interactions. We propose embodied swarm robots, where a collective of robots functions as dynamic body parts. These robots can adapt their shape, density, and mapping to body parts. We investigate swarm-specific factors affecting embodiment, focusing on the hand, through VR and real-world robot studies. Our study provides key design insights and applications for embodied swarm robots. Through quantitative and qualitative analysis, we identify an optimal system configuration to enhance embodiment. This is the first work to explore these factors, offering essential considerations for future developments of swarm robots.

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	吉野 広太郎	(50音順)
事務局	島野 真代	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57巻 第1号

通巻169号 (年1回発行)

(禁無断転載)

ISSN 0474-1315

2025年5月9日 発行

編集兼発行人
発行

諏訪 正樹

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)

Published by

OMRON Corporation
9-1, Kizugawadai, Kizugawa-city,
Kyoto, 619-0283 Japan
TEL 0774-74-2000

本誌に記載している会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標または登録商標です。

©OMRON Corporation 2025 All Rights Reserved.

OMRON