

OMRON TECHNICS®

164
Vol.53 No.1
2021

オムロングループ技術論文誌

特集

人が活躍する
ニューノーマルを
創るロボット技術

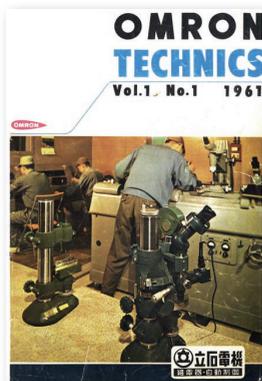


OMRON TECHNICS

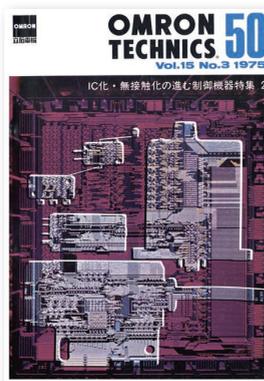
のご紹介

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課題を解決し、より良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。

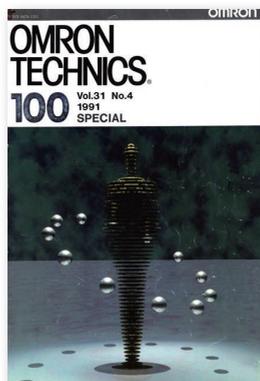
創刊よりこれまで通巻163号発行し、約1,750編以上の論文を公開しております。



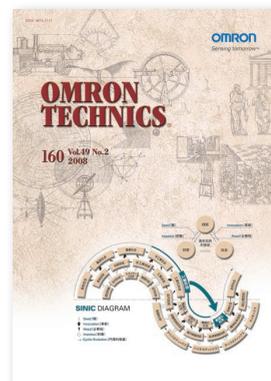
1961年5月 創刊号



1975年 50号



1991年 100号



2008年 160号



2018年 161号



2019年 162号



2020年 163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。

オムロンでは、この「Sensing & Control」に「人の知恵」を表す「+ Think」を新たに加えました。今後AI、IoTなどの技術革新が進む中で、より賢く価値に変換させる必要があるからです。

オムロンでは、「ファクトリーオートメーション」、「ヘルスケア」、「ソーシャルソリューション」を注力する事業領域として、これからも社会に貢献できる価値を最大限に生み出すべくコア技術の強化と進化に取り組んでいきます。

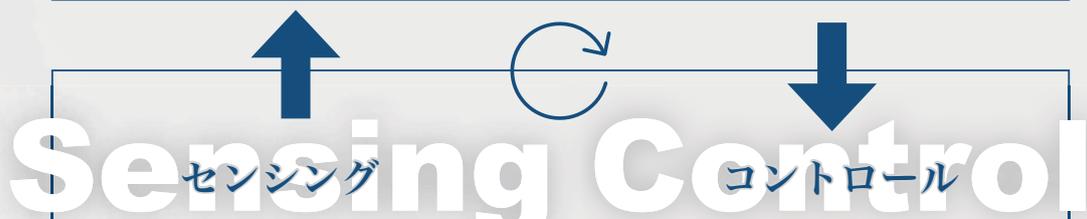
Sensing & Control + Think

+Think

蓄積した現場データ 人の知見

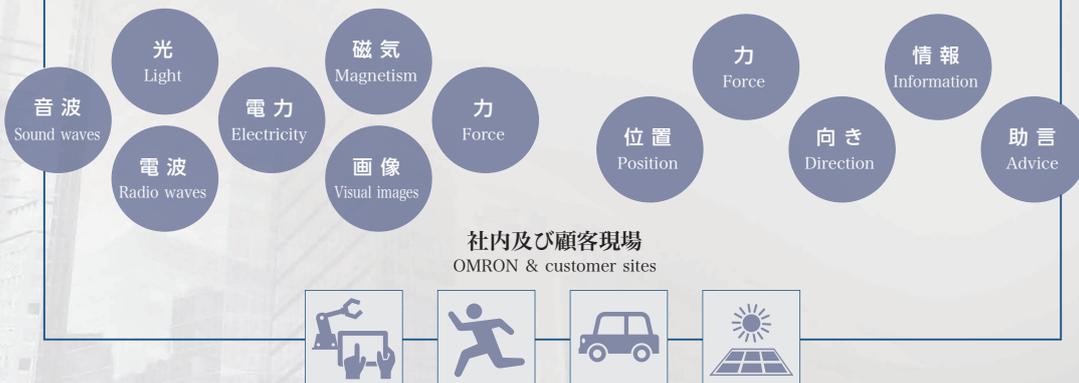
Accumulated field data: Human expertise

現場の知見に基づき、データから読み取れる現象に意味づけをする
Based on knowledge at work sites, significance is given to phenomena identified from the data



現場の知見に基づき、必要なデータを取得する
Based on knowledge at work sites, gathering necessary data

解釈に基づき、現場に適切なフィードバックをおこなう
Based on interpretations, providing appropriate feedback to sites



巻頭言

人が活躍する時代に ロボットの進化

1. ロボットを取り巻く潮流

アフターコロナを見据え、非接触や遠隔作業、そして、より一層の省人化の観点から、ロボットに対する期待は高まる一方です。そのような中で、人と機械の関わり方も大きな変換点を迎えています。読者の皆様もこうした中で起こりつつある様々な変化は、一過性ではなく、今後の世界観を不可逆的に変える可能性があると感じておられるでしょう。

様々な業種で在宅勤務やソーシャルディスタンスの確保が必要とされる中で、人手でやってきた業務を見直す機会になっています。今までは、人手で実現可能なのであれば、その方が融通も利くので良いという声もよく聞きました。しかし、今現在、一つ一つの作業を見直す中、その作業は本当に機械にできないのか、あるいはできるようにするにはどうすればよいかという考え方に変わりつつあります。このような考え方は、製造現場のみならず、医療、食品、オフィス業務、研究開発などの現場に広がりつつあります。そのような変化の中でロボットは、特定の作業を代替するのに特化した機械と異なり、人がやっていた様々な作業を代替できる可能性があることから、特に注目を浴びています。

一方でこれらの期待に応えようとする、一部の作業の代替は、特に大きな挑戦となります。

まず一つ目は、機転の利いた現場判断が必要とされる作業です。人は、非常に簡単な作業であっても、状況に応じて頭脳を駆使し自らの動きを調整します。また何かの作業が失敗した場合には、挽回する方法を自分で考え手順の組み換えをします。これらを機械で代替するのは容易ではないため、人が一部の作業を遠隔で補助し人の柔軟性と機械を組み合わせるなどの考え方も出てきます。

二つ目は、人と機械が協働する作業です。工場におけるセル生産ライン、食品製造における盛りつけライン、農業における農作物の仕分けラインなど、複数人で作業を分担する中で、一部の作業を機械に任せる場合には、人と機械の動作範囲が重複することになり、安全・衛生への配慮が必要となります。しかし、機械にとって動き回る周辺の人を正確に感知し回避するのは容易ではありません。また、人と機械の協働による作業などを考えた時、人と機械の阿吽の呼吸が必要ですが、人の状態を理解した上での支援・介入は簡単ではありません。

三つ目は、作業自体の自動化はできたとしても残る、機械の調整や補助業務です。ほとんどの機械において、信頼性高く機能させるには緻密な設定・調整が欠かせませんが、これが属人的になっているということが多くの現場で課題となっています。また、多くの機械を組み合わせる工程を実現することは容易ではなく

おける



それらの調整や補助をする技術が必要です。様々な自動化が進んだとしても、自動化の狭間で残る部品の供給や入れ替えなどの単純作業をどうするかが課題になる現場もあります。

顕在化してきた様々な課題を振り返ると、人と機械の新たな協働関係が必要なことが見えてきます。このためオムロンでは、単に人の作業の「代替」のみならず、人と機械の「協働」、さらには人と機械が「融和」して人の知性と機械の効率性を一体化させるためのプラットフォームが必要になると考え、その実現のために研究開発を行ってきましたが、それらをさらに加速させるべき時代に突入してきています。

2. ロボットの現状とその課題

ここまでの議論は、一般的な機械とロボットの差なく論じてきました。言うまでもなく、ロボットは機械のサブカテゴリであるわけですが、敢えてロボットと言う時には、やはり汎用的、もしくは多目的に使える機械というニュアンスが含まれます。ここに、ユーザーの期待と、現状の技術レベルとのギャップが生まれます。ユーザーの期待は、いろいろあります。そもそも機械としての信頼性や安全性に加えて、ロボットに対しては、様々な作業を一つの機械でできること、様々な作業を簡単に教えられること、などがよく聞かれます。また場合によっては、対象のモノや作業内容そのもの、あるいは環境が変化しても、ユーザーが意図した作業を簡単にできることも期待されます。

一方で、現状のロボット技術を見ても、ユーザーの期待と大きくかけ離れている部分があります。まず、ロボットが間違いなく動作ができるようにするには、対象のモノや作業内容毎に、ロボットの手先や周辺環境を設計する必要があります。これらの設計には専門家が必要なことに加え、特定の対象や作業に合わせ込んだ技術やノウハウは他の対象や作業に活用できず、ロボットがロボットたる所以である汎用性が失われます。さらに、ロボットの動作に関しても何度もテストをしながら作り込む必要があります。誤差との闘いには終わりがなく、対象や環境によるばらつきを簡単かつ実用的なレベルに抑え込むには相当な機器コストとその調整コストが必要となります。これを早く回避するには、誤差を機械的に抑え込むための治具が有用ですが、対象への特化性が強いので、専用機にまた一歩近づき汎用性は失われます。このようにして、現在のロボットは汎用機械というより、専用機の中で使われる汎用部品の一つとして存在しているのが実態です。つまり、ロボットを使うためには結局のところいわば「専用機化」する必要があり、その設計・調整には特殊な知識・膨大な時間・コストがかかるため、ユーザーは「汎用機械」との謳い文句に違和感を覚え

ることになります。

これらを打開するのに、いくつかの段階を踏む必要があります。

一段階目は、既存のエンジニアリングチェーンがより円滑に進むようにすることです。例えば、治具を簡単に作れるようにする、あるいはロボットの手先となる部分の商品選定を容易にする、動作の作り込みをシミュレーション上で簡単にできるようにするなどです。

二段階目は、最小限の作り込みで作業を実現し様々な対象を扱えるようにすることです。たとえば、汎用的なロボットと手先を用いつつ、人のような状況判断をする知能を構築し、様々な対象や作業に一般化することなどが考えられます。近年のAI技術により、人の知見を反映した高度なモデル化が可能となる中で、実応用においても、この段階に手が届くようになってきています。

このように、冒頭に述べた人と機械の関係の変化からくる課題と、ロボットの汎用性の軸での進化が、SINIC理論^{1,2)} でのような、科学と技術と社会の相互刺激となり、アフターコロナの時代における、人と機械、人とロボットの間関係を形作っていくと考えます。本特集号がそのための挑戦のいくつかをお示しできるものになることを願っております。

1) オムロン 未来を描く「SINIC理論」

<https://www.omron.com/jp/ja/about/corporate/vision/sinic/theory.html>

2) 未来接近へのSINIC理論, OMRON TECHNICS, 1970, Vol.10, No.3 (通巻34号).

オムロン株式会社 技術・知財本部 技術専門職
兼 オムロン サイニックエックス株式会社 Research Organizer

井尻 善久



オムロンのコア技術「Sensing & Control +Think」	1 (1)
巻頭言：人が活躍する時代におけるロボットの進化	
オムロン株式会社 技術・知財本部 技術専門職	
兼 オムロン サイニックス株式会社 Research Organizer 井尻 善久	2 (2)
目次	5 (5)

特集 人が活躍するニューノーマルを創るロボット技術

FA統合開発環境における生産設備の仮想化技術	
島川 はる奈, 岩村 慎太郎	8 (8)
協調生産システムの安全設計手法	
築山 和成, 武田 紗織	17 (17)
垂直多関節ロボット動作の高速自動生成技術	
小島 岳史, 林 剣之介, 藤井 春香, 細見 心一	24 (24)
プレイヤーのモチベーションコントロールを実現する卓球ロボットシステム	
中山 雅宗, 栗栖 崇紀, 水野 勇太, 三宅 陽一郎, 八瀬 哲志	34 (34)
3D TOFセンサモジュールへの誤差補正及び3次元座標変換の組み込み	
田中 宏行, 石井 昭宏	42 (42)

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

生産条件の最適化における精度と効率を両立する転移学習技術	
太田 雄也, 服部 玲子, 宮本 真実, 藤井 徹	52 (52)
生産現場の情報化で予防保全効果を向上するセーフティライトカーテンシステム	
橋本 実	60 (60)
照明シミュレーション技術による外観検査におけるマルチチャンネル照明最適化	
成瀬 洋介, 大西 康裕, 栗田 真嗣, 長谷川 友紀	67 (67)

2. ヘルスケア

ヘルスケアに関する事業やプロジェクトの社会的価値を評価するためのロジックモデルのひな形となるドラフトモデルの作成	
押野 沙紀, 伊藤 泰久, 川合 朋音	78 (78)

3. ソーシャルソリューション

画像合成による物体検出モデルの効率的な環境適応技術	
山本 健生, 平井 佐和, 濱走 秀人, 岡本 大和	90 (90)
高効率・低ノイズ化を実現するGaNデバイス駆動技術	
野坂 紀元, 岡田 亘, 上松 武	97 (97)

2. オムロンのものづくりを支える技術

基板検査システム開発におけるシステム安全性解析手法 (STAMP/STPA) 導入の試み	
吉田 邦雄	106 (106)
多様なドメインの組込機器製品における費用対効果に優れた脅威分析手法の検討	
芹川 正孝, 丹羽 徹, 吉岡 幸恵, 原田 真太郎	112 (112)
感震センサ検証の精度向上と時間削減を実現する再現ソフトの開発	
成宮 章紀, 栗山 真司, 宇野 裕	121 (121)
磁性体の増分透磁率測定手段とそれを利用した直流重量特性推定フローの構築	
福田 雅也, 山田 隆志	129 (129)
閉空間における直流アーク遮断のためのアーク長算出式の導出	
川口 直樹, 箕輪 亮太, 大塚 航平	136 (136)

最近発表した主な論文	143 (143)
------------	-----------

OMRON's Core Technology "Sensing & Control +Think"	1 (1)
Introduction; Evolution of Robots in an Age Where Humans Work Lively and Creatively IJIRI Yoshihisa, Technical profession, Technology and Intellectual Property H.Q. OMRON Corporation & Research Organizer, OMRON SINIC X Corporation	2 (2)
Table of Contents	5 (5)

Special issue: Robot Technologies Realize New Normal Where Humans Work Lively and Creatively

Production Equipment Virtualization Technology by Integrated Development Environment for Factory Automation SHIMAKAWA Haruna and IWAMURA Shintaro	8 (8)
Safety Design Method for Interactive Manufacturing System TSUKIYAMA Kazunari and TAKETA Saori	17 (17)
Fast Motion Planning Technology for Vertical Articulated Robot KOJIMA Takeshi, HAYASHI Kennosuke, FUJII Haruka and HOSOMI Shinichi	24 (24)
The Ping Pong Robot to Control Motivation of a Human-Player NAKAYAMA Masamune, KURISU Takanori, MIZUNO Yuta, MIYAKE Youichiro and YASE Satoshi	34 (34)
Incorporating Error Correction and 3D Coordinate Conversion in 3D TOF Sensor Module TANAKA Hiroyuki and ISHII Akihiro	42 (42)

1. Innovative Technology in OMRON's Growth Area

1. Factory Automation	
Transfer Learning Technique for Identifying Optimal Production Conditions with Accuracy and Efficiency OTA Yuya, HATTORI Reiko, MIYAMOTO Mami and FUJII Toru	52 (52)
Safety Light Curtain System That Improves Preventive Maintenance Effects by Realizing Information-Driven Production Sites HASHIMOTO Minoru	60 (60)
Optimization of Multi-Channel Lighting by Lighting Simulation for Visual Inspection NARUSE Yosuke, OHNISHI Yasuhiro, KURITA Masashi and HASEGAWA Yuki	67 (67)
2. Healthcare	
Developing a Draft Model to be Utilized as a Framework for a Logic Model to Evaluate the Social Values of Programs and Projects in the Field of Healthcare OSHINO Saki, ITO Yasuhisa and KAWAI Tomone	78 (78)
3. Social Solutions	
Efficient Scene Adaptation Technology for Object Detection Using Auto Image Synthesis YAMAMOTO Yoshiki, HIRAI Sawa, HAMABASHIRI Hideto and OKAMOTO Yamato	90 (90)
Novel GaN Device Gate Driving Technique For High Efficiency and Noise Reduction NOSAKA Noriyuki, OKADA Wataru and UEMATSU Takeshi	97 (97)

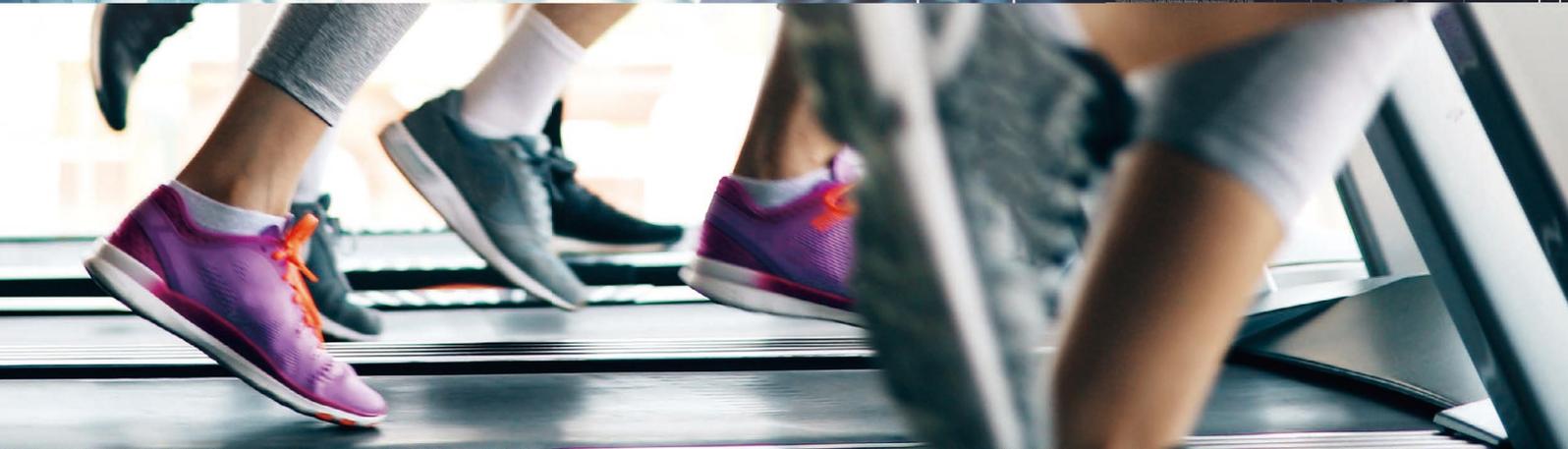
2. Technology Supporting OMRON's Manufacturing

Introduction of System Safety Analysis Method (STAMP/STPA) in the PCB Inspection System Development YOSHIDA Kunio	106 (106)
Study of Cost-effective Threat Analysis Methods for Embedded Devices in Various Domains SERIKAWA Masataka, NIWA Toru, YOSHIOKA Sachie and HARADA Shintaro	112 (112)
Development of the Vibrate Reproduction Software for Vibration Sensors NARUMIYA Akinori, KURIYAMA Shinji and UNO Yutaka	121 (121)
Method for Measuring Incremental Magnetic Permeability of Magnetic Materials and Construction of a DC Superposition Estimation Flow by Using It FUKUDA Masaya and YAMADA Takashi	129 (129)
Derivation of Arc Length Calculation for DC High Voltage Arc Interruption in Closed Space KAWAGUCHI Naoki, MINOWA Ryota and OTSUKA Kohei	136 (136)

New Publications	143 (143)
------------------------	-----------

特集

人が活躍するニューノーマルを 創るロボット技術



FA 統合開発環境における生産設備の仮想化技術

島川 はる奈, 岩村 慎太郎

近年は市場ニーズの変化が速く、製品ライフサイクルの短命化が進んでいる。このような市場動向に対応するため、より短い期間での生産設備の立ち上げが必要である。従来は実機のみで立ち上げていたため、作業の待ち時間の発生やロボットの作業位置、姿勢を教示するティーチングに時間がかかっていた。これを解決するため、独立した複数のソフトウェアを連携させて仮想立ち上げ環境の実現が提案されてきたが、データ連携のための設定の複雑さと各ソフトウェア間の時間の同期が難しいという課題があった。

これらの課題を解決するために、FA 統合開発環境において各機能でデータを連携するためにシステム全体で使えるシステムデータを定義し、このデータをシームレスに相互連携・同期できる仮想モジュール群を開発した。

実現した仮想化技術の有効性を検証するため、仮想化技術を使用して生産設備の立ち上げを行った。その結果、立ち上げ時間を 56%削減でき、仮想化技術の有効性を確認できた。

Production Equipment Virtualization Technology by Integrated Development Environment for Factory Automation

SHIMAKAWA Haruna and IWAMURA Shintaro

The rapidly changing market needs have demanded shorter launching time for production facilities. In conventional methods where only physical machines used, production facility launching took longer time due to stand-by time and teaching positions and poses to robots. A virtual launching environment where multiple independent software work together has been proposed to solve this issue, but complex configurations for data coordination and difficulty in time synchronization between software are challenges.

To solve those challenges, we have defined system data that can be used throughout the system for linking the data in each function on an FA integrated development environment and developed virtual modules that can seamlessly interlink and synchronize the data.

We have launched actual production facilities with our virtualization technology for the purpose of validation. The launching time decreased by 56%, and it proves the effectiveness of our virtualization technology.

1. まえがき

近年は市場ニーズの変化が速く、製品ライフサイクルの短命化が進んでいる。このような市場動向に対応するには、より短い期間で生産設備を立ち上げて早期に製品を生産することが製造業において競争力を高めるには必要不可欠である。

生産設備の立ち上げの際、従来は一般的に実機を用いて制御プログラムのデバッグを行っていた¹⁾。しかし、実機でデバッグを行う場合は組立や配線が終わるまでデバッグできないなどの待ち時間が多いことや、干渉を避けるため

に低速で動かす必要があるなど非効率な点が多い。

実機による生産設備の立ち上げにおいて効率を落とす課題を解決するため、実機を用いない生産設備のデバッグやティーチングを行う仮想化技術が使用されている。しかし、生産設備全体を仮想化するためには複数のシミュレーションソフトウェアを連携する必要があり、シミュレーションソフトウェア間での連携の設定と時間の同期が難しいという課題がある。

これらの課題を解決するために、オムロンが提供する FA 統合開発環境 Sysmac Studio で生産設備の仮想化を実現した。Sysmac Studio は一つのソフトウェアで構成されるという特徴を持っており、これによりデータ連携の自動化

Contact : SHIMAKAWA Haruna haruna.shimakawa@omron.com

や時間の同期を実現した。各機能でデータを連携するためにシステム全体で使えるシステムデータを定義し、このデータをシームレスに相互連携・同期できる仮想モジュール群を開発した。

本稿では、2章で従来の生産設備開発の課題の詳細を説明する。3章では実現した仮想化技術の詳細を説明し、4章では仮想化技術の有効性の検証結果について述べる。そして、5章にて本稿での総括及び今後の展望と課題を述べる。

2. 課題

2.1 実機のみで行う生産設備立ち上げの非効率性

従来の生産設備立ち上げ時の開発プロセスを図1に示す。

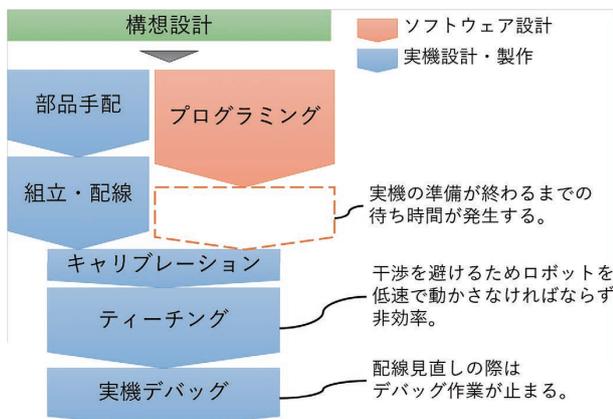


図1 従来の生産設備立ち上げプロセス

従来、生産設備の開発は一般的に実機を用いて行なっていた。ロボット及び周辺機器の制御プログラムは図2に示すシステムを制御することを目的に作られており、制御対象がないと動作を検証できなかつたためである¹⁾。このため、プログラミングの後、実機の準備が終わるまでの作業待ち期間が生じることが多く、生産設備立ち上げの効率を落とす要因となっていた。また、実機でデバッグする際は機構位置や配線が見直されることがある。見直す間はデバッグが止まってしまうことも効率を落とす要因となっていた。ロボットのティーチング作業においても干渉による破損を避けるため、ロボットを低速で動かさなければならず作業に時間を要していた。

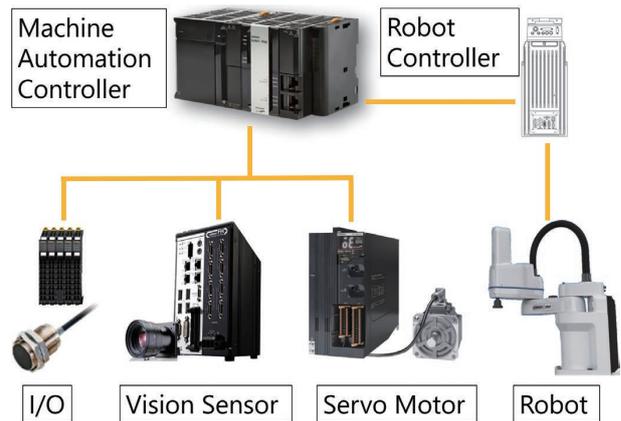


図2 生産設備の制御システム構成例

2.2 複数のソフトウェアによる仮想化の課題

2.1で述べた生産設備立ち上げの非効率性の解消を目的として、生産設備全体の仮想化技術が使用されている。生産設備全体を仮想化すれば、実機の組立や配線を行う間に仮想空間上でデバッグやティーチングを進めることができるため、実機のみで行うよりも効率的に設計を進められるためである。

しかし、生産設備全体の仮想化を行うためには、生産設備を構成する全ての機器を仮想化する必要がある。それぞれの機器は異なるシミュレータで仮想化を実現する。複数のシミュレータ間で時間の同期を取ることは難しいため、結果として実機と同じ動作を実現することは困難である²⁾。

3. 生産設備全体の仮想化を一つのソフトウェアで実現

生産設備全体の仮想化を実現するため、複数のシミュレータをオムロンが提供するFA統合開発環境 Sysmac Studioに統合した。これによって生産設備を構成する全ての要素であるロボット、周辺機器、I/O機器、画像センサの他、生産設備で作業対象となるワークの仮想化を実現した。

具体的にはロボットと制御機器の制御を一体化するためにマシンオートメーションコントローラーとロボットコントローラーを1つに統合した機器、ロボット統合コントローラー³⁾を開発した。そして、ロボット統合コントローラーをPC上で仮想的に動作させるロボット統合シミュレータを実現し、Sysmac Studioに統合した。これによって一つのシミュレータでロボットと制御機器のI/Oデータをリアルタイムに連携・同期できるようになった。

次に、生産設備を構成する全ての要素を仮想化するためにモジュール（仮想化モジュール）を開発した。各仮想化モジュールで構成される Sysmac Studio のソフトウェア構造を実現するための課題解決策を3.1章で述べる。また、

仮想動作を定義するために仮想化用プログラミング環境を実現する必要がある。仮想化用プログラミング環境の詳細を 3.2 章で述べる。3.3 章以降は、3.1 章で定義した各仮想化モジュールの詳細を述べる。

3.1 生産設備全体の仮想化を一つのソフトウェアで実現するためのソフトウェア構造

Sysmac Studio で生産設備全体を仮想化するために実現したソフトウェア構造を図 3 に示す。また、図 4 にロボット統合コントローラーの生産設備全体の構成例を示す。その構成要素にはセンサ制御に使用する I/O、画像センサ (Vision Sensor)、周辺機器の制御に用いるサーボモータ (Servo Motor)、及びロボット (Robot) が含まれる。

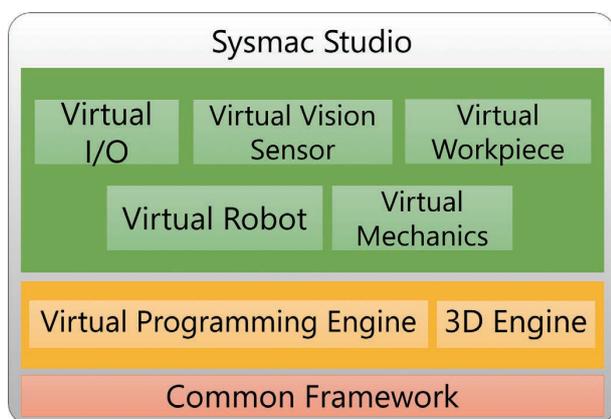


図 3 Sysmac Studio による仮想化のソフトウェア構造

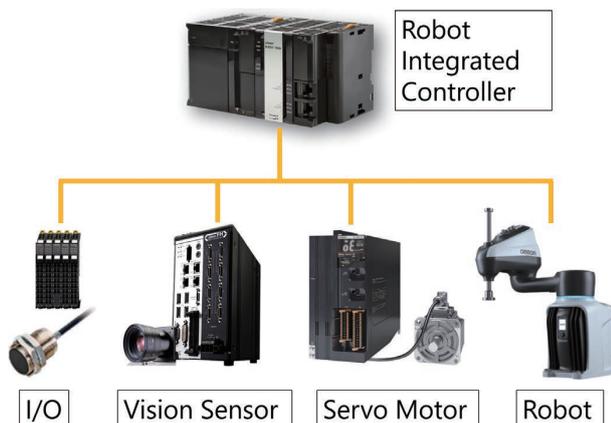


図 4 ロボット統合コントローラーによる生産設備の構成例

仮想化した全てのモジュールを一つのソフトウェアで実現するための基盤となるのが、「Common Framework」である。Common Framework は各モジュールに対して共通機能や共通インタフェースを提供し、モジュールの生成・消滅のライフサイクルを管理するモジュールである。次に、生産設備の制御プログラムやシミュレーション用のプログラムを実行するのが、「仮想プログラミング環境 (Virtual

Programming Engine)」である。仮想プログラミング環境にはロボット統合コントローラーのシミュレータ及びシミュレーション用プログラム構築環境が含まれる。そして、生産設備全体の 3D モデルの形状データを管理し、3D 表示機能やモデル同士の干渉チェックを実現するのが「3D Engine」である。この 3D Engine 上で、生産設備の要素であるロボット、周辺機器、I/O 機器、画像センサ及びワークを仮想化したモジュールが、それぞれ「仮想ロボット (Virtual Robot)」、「仮想周辺機器 (Virtual Mechanics)」、「仮想 I/O (Virtual I/O)」、「仮想画像センサ (Virtual Vision Sensor)」、「仮想ワーク (Virtual Part)」である。このうち、仮想ロボットと仮想周辺機器は 3D モデルを可動部毎に分離し、ロボットの種別に応じたキネマティクスの計算モデルを与えた。そして、制御プログラムの演算結果であるモータの指令値を入力することで、仮想ロボット及び仮想周辺機器の動作を 3D Engine 上で再現した。

一つのソフトウェアで生産設備のシステム全体を仮想化するためには個別機能の持っているデータをシステム全体で使えるシステムデータとして共有することが必要であった。このためには各モジュール間でのデータを、モジュールを超えて共有する必要があった。そうするとモジュール間の相互依存が増えて、複雑度が上がり結果として動作性能の低下やメモリ使用量の増大といった課題が発生する。こうした課題を回避するため、モジュールで扱っているデータを共通データであるシステムデータとして扱えるようにした。具体的には仮想化におけるシステムデータは 3D モデルの位置を表すデータとその状態を記憶する状態変数のデータをモジュール間で共有することが必要である。このため 3D モデルの 3D 位置データや周辺機器の動作位置データなどの異なる位置データを共通の抽象インタフェースを定義して扱えるようにした。これらのデータを 3D Engine 上で表示するとき自動的に 3D Engine 上の絶対座標で扱えるような機能を開発しどのモジュールからも共通の扱いで位置データを管理できるようにした。状態変数についてもシステム全体で一意的に扱える階層構造を持った ID 情報を付加して抽象化することでモジュール間の直接結合を防ぎながらデータを共有するシステムデータを実現した。このシステムデータの数は通常の生産設備では 1000 を超える。このためデータの増加に伴う性能低下やメモリ使用量の増大といった課題が生じた。この課題に対して階層構造を持った ID を用いることで単純に並列にデータを並べてデータの受け渡しを行うのに比べて検索量を減らし高速にアクセスできるようにすることで解決した。この ID は相対的な ID となっておりデータの階層が増えてもメモリ使用量の増大も抑えることができた。これらのシステムデータを用いることで大規模な生産設備であってもリアルタイムの動きを確認できる生産設備全体の仮想化を実現した。

3.2 生産設備全体の仮想化のためのシミュレーション用プログラム構築環境の実現

生産設備全体の動作を仮想化するには、ワークのようなアクチュエータによって直接制御されない物体の仮想動作をプログラムする必要がある。なぜならワークの仮想動作を定義するための生成条件や表示位置は制御プログラムに含まれないためである。また、センサなどの I/O 機器についても仮想空間では実際の I/O が接続されていないため、仮想的に I/O の動作を定義する必要がある。

このような仮想空間上における動作は、単純かつ定型的な定義よりも制御プログラムの状態によって柔軟に定義できることが求められるため、専用言語を使用した仮想化用のプログラムによって定義されることが多い。一般的に、仮想化用のプログラムには専用言語が使用される。しかし、専用言語を習得するには時間を要する⁴⁾。そこで、Sysmac Studio には汎用プログラム言語である C# 言語をベースとしたスクリプト言語（シェイプスクリプト）を開発した。

シェイプスクリプトの実行時は I/O の動作などの制御情報をリアルタイムに取得し、ワークなどの表示位置を制御に合わせて変更することが必要となる。このリアルタイム性を実現するには Sysmac Studio とメモリ空間を共有できる同一プロセスで実行されなければならない。ここでプロセスとは、Windows におけるプログラムの実行単位である。シェイプスクリプトを同一プロセスにすることでメモリ空間を共有し、リアルタイムでの情報交換が可能となる。これを実現するために、シェイプスクリプトを実行前にコンパイルしアセンブリを生成して同一プロセスにロードする仕組みを構築した。しかし、単純にシェイプスクリプトを同一プロセスにロードすると、シェイプスクリプト停止時に共有されたメモリを開放できないという問題が発生する。そこで、同一プロセスにおいてメモリ空間を分ける仕組みを構築した。

シェイプスクリプトと Sysmac Studio は Windows 上で動作するアプリケーションであるため、Microsoft の提供する共通ライブラリである .NET Framework を活用している。.NET Framework は、Windows プログラムの動作環境である共通言語ランタイム (CLR: Common Language Runtime) の 1 つである。CLR にはアプリケーション・ドメインという実行コードの管理単位がある。アプリケーション・ドメインを分離すると、メモリ空間を分けることが可能になる。そこで、図 5 に示すようにシェイプスクリプトと Sysmac Studio のアプリケーション・ドメインを分離した。これにより、シェイプスクリプトのアセンブリがロードまたはアンロードされても、Sysmac Studio には影響を与えないようにした。

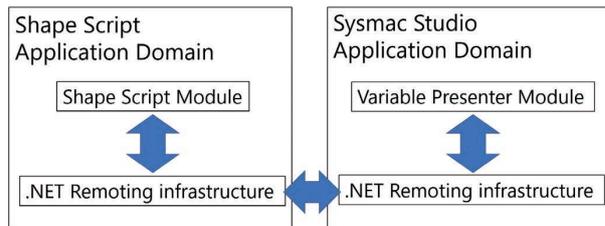


図 5 シェイプスクリプトと Sysmac Studio 間の通信

定義したい動作を実行する条件は、ロボット統合コントローラーの状態によって変わることが多い。これらの状態は変数に格納される。このため、シェイプスクリプトはロボット統合コントローラーのシミュレータから変数の値を取得する必要がある。

Sysmac Studio には、指定した変数の値をロボット統合コントローラーのシミュレータより取得する機能を備えている。シェイプスクリプトと Sysmac Studio のアプリケーション・ドメインを分離したため、アプリケーション・ドメイン間での通信を行うことでシェイプスクリプトから変数の値を取得できるようにした。

図 5 に示したように、アプリケーション・ドメイン間の通信を行うために、Sysmac Studio のアプリケーション・ドメイン内で取得した状態変数を抽象化し、各モジュール間で共有できる仕組みを提供する専用モジュール (Variable Presenter モジュール) を開発した。これを用いることでモジュールを超えた状態変数のマーシャリング (データ交換) を実現した。同様に、シェイプスクリプトのアセンブリをマーシャリングの対象とすることで、システムデータのマーシャリングができる仕組みを実現した。マーシャリングにおいてはデータ交換をする上でデータを一旦シリアライズしてメモリ空間に格納し、このメモリをアプリケーション・ドメイン間で交換した後でデシリアライズすることでデータ交換を実現しているため、データ構造が性能やメモリサイズに直接影響を与える。この性能を確保するためにアプリケーション・ドメインを超えて再構築できる情報は除き、仮想化を実現するための位置や状態を持つデータなどのみをマーシャリングの対象とすることでロボット統合コントローラーのシミュレータが持つ状態変数の高速なマーシャリングを実現した。

3.3 生産設備全体の仮想化のための仮想ワークの実現

3.2 で述べた通り、仮想ワークは制御プログラムのシミュレーションを実行するだけでは仮想化を実現できない。そこで仮想化空間における動作を記述するシェイプスクリプトを使用することで、制御プログラムのシミュレーションに合わせて仮想ワークの状態を定義できるようにした。

仮想ワークを動作させるには、まずはその条件をシェイプスクリプトに定義する必要がある。条件は、ロボット統

合コントローラーの状態から決める。例えば、仮想ワークがロボットハンドに把持される動作を定義する場合、ロボットハンドに対して把持信号が入力されたことを検知するスクリプトを記述することで定義できる。

次に、条件成立時の仮想ワークの状態をシェイプスクリプトに定義する必要がある。設定する状態は、仮想ワークの表示・非表示状態または表示位置（座標）である。表示・非表示状態は、仮想ワークが生産設備に搬入されたら表示、搬出されたら非表示にする。表示位置は、例えば、ロボットハンドに対して把持信号が入力されたことを検知したら、仮想ワークがロボットハンドに追従するように定義する。これらの設定ができるように、シェイプスクリプトで仮想ワークのインスタンスを生成し、各インスタンスの表示・非表示状態及び表示位置を変更できるようにした。

また、ワークに関連する不具合が発生したとき、ワークの位置情報が重要になる。例えば、ロボットがコンベア上を流れるワークを把持できなかった場合、そのワークはどの位置を流れていたかを調査する必要がある。そこでデバッグを容易に行えるように、仮想化された生産設備における仮想ワークの表示位置をトレースし、結果をグラフに表示することで、仮想ワークに生じた問題を簡単に確認・デバッグできるようにした。表示位置のグラフの例を図6に示す。

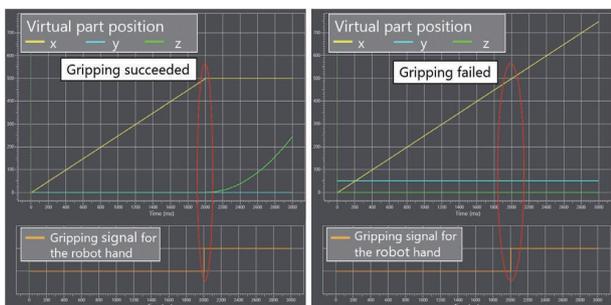


図6 仮想ワークの表示位置のトレース結果

図6では、仮想空間上をx軸方向にコンベアで搬送される仮想ワークをロボットハンドが把持して真上に移動した時のx、y、z座標の変化を示している。図6の左のグラフでは、ロボットハンドの把持信号が入力されると同時に、仮想ワークのx方向の動きが止まり、z方向に上昇していることが分かる。それに対し、図6の右のグラフでは、把持信号が入力されてもx方向の動きが止まらないため、把持に失敗したことが分かる。左右のグラフを比較すると、仮想ワークの位置がy方向にずれていることが分かる。以上の情報から仮想ワークの位置またはロボットが把持する位置をy方向に補正すれば良い。このように仮想ワークの位置をトレースすることで、問題発生箇所を簡単に特定できる。

3.4 生産設備全体の仮想化のための仮想 I/O の実現

3.2で述べた通り、仮想化された生産設備には実際のI/Oは接続されていない。このため、I/Oの仮想動作を定義する必要がある。生産設備で多用されるI/Oには光電センサのようなワークを検出するセンサと、エアシリンダに取り付けられたリミットスイッチのような機構の動作位置を検出するセンサがあるため、「仮想ワーク検出用センサ」と「仮想動作位置検出用センサ」を仮想I/Oとして実現した。

両センサに共通することは、仮想ワークの検出等の条件が成立したら、対応するI/O変数の値をTrueまたはFalseに切り替えることである。I/O変数はロボット統合コントローラーに定義されているため、シェイプスクリプトからVariable Presenter モジュールを通して設定することができる。

仮想ワーク検出用センサのI/O変数が切り替わる条件は、仮想ワークがあるエリアに入った時、またはあるエリアから出た時である。この条件を設定できるように、仮想ワーク検出用センサの検出エリアを3D Engine 上に表示できるようにした。そして、仮想ワーク検出用センサの検出エリアと仮想ワークの3Dモデルが3D Engine 上で干渉しているかどうかをI/O変数を切り替える条件とした。3D Engine 上に表示した仮想ワーク検出用センサ (Virtual Part Detection Sensor) と仮想ワーク (Virtual Part) の3Dモデルの例を図7に示す。

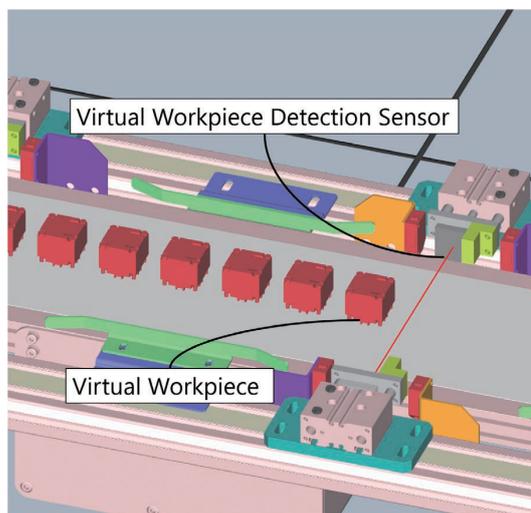


図7 仮想ワーク検出用センサと仮想ワークの3Dモデル

3Dモデル同士の干渉は、3.6にて後述する干渉チェックにより3D Engine が検出する。3D Engine が検出した干渉を、シェイプスクリプトが3Dモデルのインスタンスを参照することで取得できるようにした。これにより、設計者が仮想ワーク検出用センサと仮想ワークの3Dモデルが干渉したときにI/O変数を切り替えるシェイプスクリプトを記述するだけで、実際のI/O機器の動作を補うスクリプト

を簡単に作成できるようになった。

次に、仮想動作位置検出用センサの I/O 変数が切り替わる条件は、周辺機器の可動部がある場所に移動した時である。エアシリンダの場合、ピストンの押出時及び引込時に I/O 変数が切り替わるため、エアの注入を開始する I/O 変数が True になってから一定時間経過した後にピストンの押出完了信号に対応する I/O 変数を切り替える必要がある。

I/O 変数の変化は、Variable Presenter モジュールを使用したシェイプスクリプトを記述することで検知できる。また、ロボット統合コントローラーのシミュレータは時刻情報を変数に格納しており、I/O 変数と同様にシェイプスクリプトを記述することで時刻情報を取得し、時間経過を計測できる。以上より、エア注入開始 I/O 変数が True となった後、一定時間経過後に仮想動作検出用センサの I/O 変数を切り替えるシェイプスクリプトを簡単に作成できるようになった。

ワークを検出するセンサや周辺機器の動作位置を検出するセンサは、生産設備によって 100 を超えることがあり、これら全ての仮想動作をシェイプスクリプトに定義するにはかなりの工数を要してしまう。しかし、I/O の仮想動作の場合、仮想ワークとは異なり定型的なコードになる。そこで、各仮想 I/O に対応する I/O 変数等の簡単な設定をするだけでシェイプスクリプトによる仮想動作の定義を自動で行えるようにした。これにより、シェイプスクリプトでの I/O の仮想動作を短時間で定義できるようになった。

3.5 生産設備全体の仮想化のための仮想画像センサの実現

生産設備には、コンベア上をランダムに流れてくるワークの位置の検出や、製品の外観検査を行う等の目的で画像センサが使用される。そこで、画像センサのエンジンを PC で仮想的に実行できる仮想画像センサを開発した。あらかじめ用意した画像を仮想画像センサに入力することで、ワークの位置の検出や外観検査のシミュレーションを実行できるようになった。

画像センサを使用する際、実機の場合は画像センサ、ロボット及び周辺機器の位置を合わせるキャリブレーション作業が必要である。仮想空間上では画像センサ、周辺機器、ロボットを配置するだけで自動的にキャリブレーションできるようにした。更に、シェイプスクリプトを使用することで複数の画像を用いた画像センサのワークの仮想化が可能となった。これは仮想ワークを自動的に生成し、画像を用いた複数種類の仮想ワークの位置検出を現実の生産設備と同様に再現できるようになったことを示している。これにより、仮想空間上でワークのコンベアトラッキングを行う場合、配置するだけでロボットが正確に仮想ワークを把持できるようになった。仮想画像センサにより位置を検出し、複数種類の仮想ワークのコンベアトラッキングを行う例を図 8 に示す。図 8 の (a) はワークを把持する例、

(b) はワークを置く例を示している。仮想ワークの種類ごとに 3D 上でも把持された順番を表示することでシステム全体としてのシステムデータワーク管理を実現し、その可視化も行えるようにした。

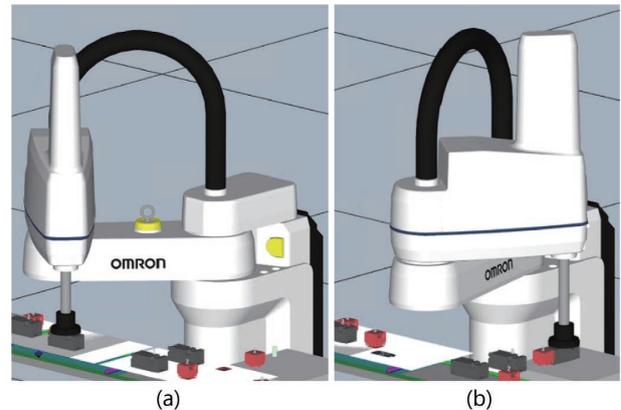


図 8 仮想画像センサによるコンベアトラッキング

3.6 生産設備全体の仮想化のための干渉チェックの実現

生産設備の立ち上げにおいて最も時間がかかる作業の一つがロボットのティーチングである。ティーチングではロボットの TCP (Tool Center Point) を覚えさせたい位置まで移動させ、その場所を記録することでティーチングポイントを作成する。そして、記録したティーチングポイントを繋ぐロボットプログラムを作成することで、ロボットのパスを生成する。

実際のロボットを使用したティーチングでは、干渉を回避するためロボットを低速かつ慎重に動かさなければならない。それに対し、仮想空間上でのティーチングは、仮想空間上で干渉しても機器が壊れる恐れがなく、実際のロボットよりも高速で動かすことができるため、短い時間で行うことができる。仮想空間上でオフラインティーチングを事前に行うことで、実際のロボットでティーチングする際はティーチングポイントの微調整を行うだけで良いため、ロボットのティーチング作業時間を短縮することができる。

オフラインティーチングで重要となるのが、干渉しないパスの生成である。仮想空間上でロボットと周辺機器が干渉した場合、ティーチングポイントを設定し直すことで干渉を回避することができる。したがって、ロボットがパスを描く上で、どのタイミングでどこが干渉したかを検出する必要がある。

そこで、3D Engine に干渉チェックを導入し、干渉した 3D モデルの色を変更して通知するようにした。一般的に 3D 空間上での干渉チェックでは、表示されている 3D モデルを使って干渉チェックを行うと、チェックに要する計算時間が長くなり、かつメモリの消費量が大きくなってしまいうため、3D モデルを簡略化した境界ボックスを内部的に

生成して干渉をチェックすることが多い。Sysmac Studio の 3D シミュレーションでは、凸包 (Convex Hull) または近似凸分解 (Approximate Convex Decomposition)⁵⁾⁶⁾ を用いて境界ボックスを生成することで干渉チェックを実現した。以下に凸包および近似凸分解によって境界ボックスを生成した例を図 9 に示す。

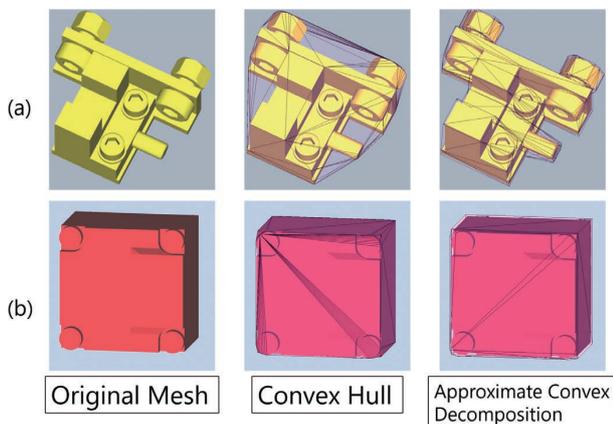


図 9 凸包と近似凸分解による境界ボックス

凸包または近似凸分解は、3D モデルの特性によってどちらを選択すれば良いかが異なる。(a) のように複雑な形状の場合は近似凸分解の方が表示上の 3D モデルに近似されるが、(b) のように比較的単純な形状だと計算コストの少ない凸包の方が良い。このように 3D モデルによってユーザが最適な境界ボックスを選択できるようにした。

オフラインティーチングの後、仮想空間上で生産設備全体のシミュレーションを行う際、周辺機器や仮想ワークの位置がオフラインティーチング時とは異なることがある。このため、生産設備全体のシミュレーションの際にロボットが周辺機器やワークと干渉することがある。干渉が検出された場合、再度オフラインティーチングが必要となる。この時、シミュレーション中にどのタイミングでどこが干渉したかが正確に分かれないと、どのティーチングポイントを修正すれば良いか特定できなくなり、再オフラインティーチングに時間を要してしまう。

シミュレーション中、干渉したときに 3D モデルの色を変えて通知するだけでは干渉を見逃してしまう可能性がある。干渉を見逃さないようにするために、干渉タイミングと干渉箇所の情報をシェイプスクリプトの実行によりログに出力できるようにした。3.4 で述べた通り、シェイプスクリプトは 3D Engine 上の 3D モデル同士の干渉を取得できる。したがって、3D モデル同士の干渉時、シェイプスクリプトに干渉した時のタイムスタンプと干渉したインスタンス名をログに出力するコードを記述することで、干渉タイミングと干渉箇所の確認が可能となり、再オフラインティーチングの手間を省くことができた。

4. 生産設備全体の仮想化による有効性の検証

生産設備全体を仮想化することによる有効性を検証するため、生産設備の立ち上げを行った。検証に使用した生産設備の上面図を図 10 に示す。図 10 の生産設備は、ワーク供給トレイで搬入されたワークを垂直多関節ロボット Viper650 によって組み立てる検証用の生産設備である。

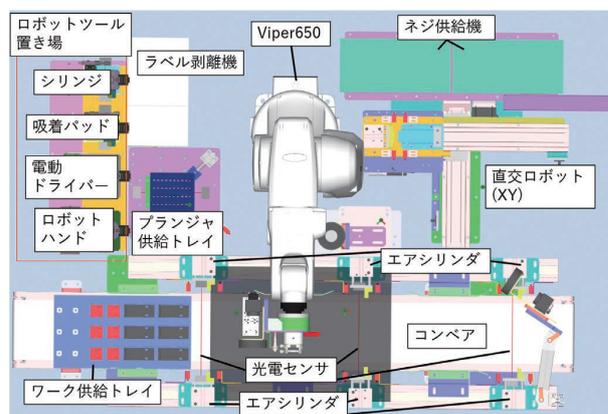


図 10 検証用の生産設備の上面図

検証は組立・配線が既に行われた生産設備に対して制御プログラムの作成やデバッグ、キャリブレーション及びティーチングを行い、各工程の作業に要した工数を記録し、仮想化技術未使用時と使用時の工数を比較した。比較結果を図 11 に示す。

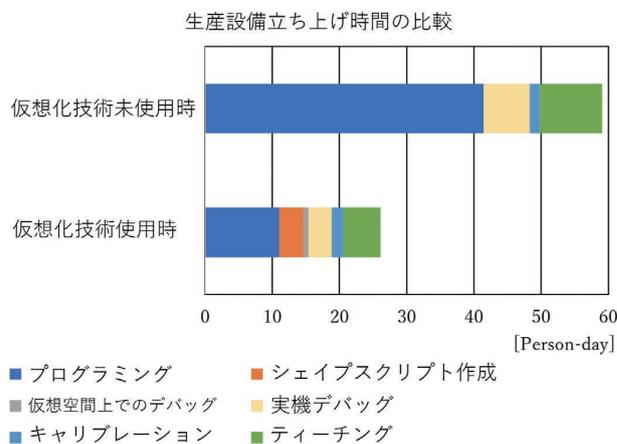


図 11 生産設備の仮想化による有効性の検証結果

図 11 に示した通り、仮想化技術を使用しなかった場合、立ち上げには約 59 人日要した。それに対し、仮想化技術を使用した場合は約 26 人日となり、仮想化技術を使用することで立ち上げ工数を約 56% 削減することができた。

削減効果が最も大きかったのはプログラミング工程である。仮想化技術を使用しなかった場合、プログラミング工程には約 41 人日要したが、仮想化技術を使用した場合はシェイプスクリプト作成工数と合わせて約 15 人日となり、

工数を約 63%削減することができた。仮想化技術を使わず実機のみでプログラミングを行う場合、干渉を避けるため組立手順ごとに単機能の設計・実装作業を実施する必要があった。そのため手順全体で使う状態変数や手順をまたぐ機能に関しては手順全体の結合時に追加設計・実装が必要であった。それに対し、仮想化技術を用いた場合は干渉を気にする必要がないため単機能の設計・実装作業を行わずに最初から組立手順全体で作業を進められることが検証を通して分かった。このため追加設計・実装無しで作業を行うことができ、生産設備全体のプログラミング工数を大幅に削減できた。

次に削減効果が大きかったのは実機デバッグ工程で、仮想化技術を使用しなかった場合は約 7 人日要したが、仮想化技術を使用した場合は仮想空間上でのデバッグ工程と合わせて約 4 人日となり、工数を約 43%削減することができた。仮想空間上でのデバッグ工程は、ロボットや周辺機器を高速で動かすことができたため実機でのデバッグより短時間で行うことができた。また、一度実施したデバッグを再度行う場合、実機ではロボットや周辺機器、ワークの状態を全て初期位置に戻す必要があるが、仮想空間ではそれらの状態をリセットするだけで良いため工数を削減できた。仮想空間上でのデバッグが完了すれば実機でのデバッグはワークの吸着・把持の調整など実機での調整が必須の作業のみ行うため、総じてデバッグ工数を削減できた。

今回の検証では生産設備の組立・配線時間およびその待ち時間が含まれていない。したがって、実際の生産設備の立ち上げではプログラミング及びデバッグ工程に要する時間のより大きな削減が期待できる。

3 番目に削減効果が大きかったのはティーチング工程である。仮想化技術を使用しなかった場合は約 9 人日要したが、仮想化技術を使用した場合は約 5.5 人日となり、工数を約 39%削減することができた。2.1 に記載した通り、実機でティーチングを行う場合、干渉による機器の破損を避けるためロボットを低速で動かさなければならない。それに対し、オフラインティーチングでは仮想ロボットを高速に動かすことができる。したがって、オフラインティーチングを行い実機では微調整のみ行うことで実機での作業時間を削減でき、結果としてティーチング工数を削減できた。

5. むすび

生産設備の立ち上げ工数の削減を目指し、FA 統合開発環境である Sysmac Studio に生産設備の仮想化技術を導入した。仮想化技術によって I/O、画像センサ、周辺機器やロボットを仮想空間上で動作させることを可能にした。また、仮想ワークの動作を柔軟に定義するシミュレーション用プログラム構築環境を実現した。更に、全ての機器及び仮想ワーク間の干渉チェックを導入することでオフライン

ティーチングを可能とした。

仮想化技術の有効性を検証するために生産設備の立ち上げを行った。検証の結果、仮想化技術を使用することで生産設備の立ち上げ工数を約 56%削減できることが分かった。

プログラミング及びデバッグ工程は仮想化技術によって工数を十分削減できた。今後は仮想化技術以外の手法でプログラミングエディタの改善等による更なる工数削減を検討する。また、プログラミング及びデバッグの次に工数を要する工程はロボットのティーチングである。今後はオフラインティーチングの工数削減を目指し、始点と終点のみを指定するだけでパスを自動で生成するパスプランニング技術の開発に取り組んでいく。

参考文献

- 1) 宮内孝, 小林大輔, 藤田和明. 設備制御ソフトウェア開発の効率を向上させる実機レス デバッグシステムの適用. 東芝レビュー. 2009, Vol. 64, No. 5, p.10-13.
- 2) 日本ロボット工業会. “ロボットシステムインテグレータのスキル読本 [第一版]”. 経済産業省. 2018-5-31. <https://www.meti.go.jp/press/2018/05/20180531008/20180531008-1.pdf>, (参照 2021-01-04).
- 3) オムロン株式会社. “ロボット統合システム”. 2020-02-09. https://www.fa.omron.co.jp/product/robotics/lineup/integrated_controller/, (参照 2021-01-13).
- 4) Hosseinpour, F.; Hajihosseini, H. “Importance of Simulation in Manufacturing”. World Academy of Science, Engineering and Technology 27, 2009, p.285-288.
- 5) Mamou, K.; Ghorbel, F. “A simple and efficient approach for 3D mesh approximate convex decomposition”. 16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 2009, p.3501-3504.
- 6) Lien, J.-M.; Amato, N. M. “Approximate convex decomposition of polygons”. Proceedings of the 20-th Annual Symposium on Computational Geometry, 2004, p.17-26.

執筆者紹介



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



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

Windows、Microsoft.NET Framework は、Microsoft Corporation の米国およびその他の国における登録商標または商標です。

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。

協調生産システムの安全設計手法

築山 和成, 武田 紗織

近年、人とロボットが協調して製品を生産するための、様々な協調生産システムが開発されている。しかし現時点では適用可能な国際安全規格がないため、協調生産システムの安全設計を行う設計者は、最適な安全設計手法を見出すことができていない。また、協調生産システムのリスクアセスメントにおいて同定される多くの危険源に対して、どこまでのリスク低減が必要かを判断するための手法も存在していない。これらによって、協調生産システムのコスト増大や使い勝手の低下、安全設計の妥当性の証明ができない問題が生じている。

本稿では、この問題を解決するために創出した新たな手法と、その効果について検証した結果を報告する。

まず、協調生産システムのアプリケーションを分析し、“Consecutive application”という新しい概念を創出した。次に、この概念を適用することで、安全設計の基礎となる最も適切な安全基準を選択する方法を考案した。さらに、体系的な危険源同定と、リスク低減の必要性を判断するための手法を検討し、その有効性を確認した。

これらの手法を適用することで、設計者は、安全性を適切に立証できる協調生産システムを、最適な設計コストで使い勝手よく実現することが可能となる。

Safety Design Method for Interactive Manufacturing System

TSUKIYAMA Kazunari and TAKETA Saori

Various interactive manufacturing systems are developing to enable humans and robots to produce products in cooperation. For safety designers who design the safety of interactive manufacturing systems face difficulties to select a practical safety design method. The origin of this issue is a lack of appropriate safety standards for references. Determination measures of risk reduction against identified risks are also challenging to set the criteria for interactive manufacturing system. It leads to increased cost and decreased usability of the interactive manufacturing systems and the inability to prove the safety design's validity.

This paper reports on a new method for the efficient safety design of an interactive manufacturing system is studied and its effectiveness is verified.

First, applications of the interactive manufacturing systems were analyzed and a new concept of “Consecutive application” was created. Then, by applying this concept, a method was devised to select the most appropriate safety criteria as a basis for safety design. Furthermore, a method for systematic hazard identification and determination of the need for risk reduction was studied and its effectiveness was confirmed.

By applying these methods, designers can demonstrate safety of the interactive manufacturing system that adequate cost and user-friendly system.

1. まえがき

モノづくりを取り巻く環境は、製造技術の革新や多様化するグローバル社会の動向を捉え、時々刻々と変化している。この変化に対応する新たな生産システムの事例として、オムロンでは Cell Line Control System (CLCS) を提唱

している。CLCS は、変種変量生産において良品を最も効率良くつくるための生産管理の仕組みと情報プラットフォームを備えたセルラインである。この CLCS の一つとして、人と作業空間を共有して同時に運転する産業用ロボット (Cobot) を作業者と同一のセルに配置し、人と協調して動作する協調生産システムが存在する。

人と機械が協調する協調生産システムでは、働く人の安

Contact : TSUKIYAMA Kazunari kazunari.tsukiyama@omron.com

全を確保するための考え方も進化させる必要がある。従来の安全の考え方では、物理的なガードなどで明確に作業空間を分離するのが基本だったが、協調生産システムは、人と機械が作業空間を共有しながらも安全で生産効率の高いシステムが求められる。

生産システムの安全を実現するためには、ISO などの国際安全規格を活用して設計を進めるのが合理的である。しかし、Cobot を用いた協調生産システムの安全設計を行う際には二つの問題がある。一つ目は、Cobot を用いた協調生産システムのアプリケーションと産業用ロボット類の国際安全規格が想定しているアプリケーションとが合致せず、安全設計が過剰となることで、設備コストの増大と使用者の使い勝手の低下を招くことである。二つ目は、協調生産システムの危険源同定を行う際の問題である。危険源は体系的に抽出し、抽出した危険源に対してはリスク低減の要否を検討しなければならないが、どこまでリスク低減方策を実施すべきかを判断する基準はない。そのため設計者個人の感覚に依存した判断とならざるを得ず、使用者に対して安全の説明責任を果たせない事態が生じている。

これらの問題点に対する解決策として、まず、協調生産システムのアプリケーションの分析を行い、新しく“Consecutive application”という概念を創出した。次にこの新しい概念を用いて、新しい協調生産システムを特定の規格に縛られず設計する方法を考案した。さらに、危険源の体系的な抽出とリスク低減方策の要否の論理的な判断のための手法を検討し、実際のアプリケーションで効果を検証した。設計者は、これらの解決策を用いることで既存規格にとらわれない最適な協調生産システムの安全設計の実現と、安全設計に対する客観的な説明を行うことができるという効果が期待できる。その結果、設計コストの低減や柔軟な設備安全設計の実現にも繋げることができる。

2. 協調生産システムの安全設計と安全規格

2.1 協調生産システムの安全設計の現状

本稿で対象とした CLCS は、人と作業空間を共有して同時に運転する産業用ロボット (Cobot) と作業者とが同一セルに配置されている協調生産システムである。この CLCS は、表 1 のようにワークの組み立て、ネジ締め、レーザーマーキング、検査などの作業を人と Cobot が独立してそれぞれ行いながらも、セルライン全体としては連動して一連の工程を完了させるものである。これらの作業は、図 1 のように 3 つの空間を左から右に向かって順次実行されていく。このように人と機械が協調して作業を行う CLCS を、本稿では協調型 CLCS と呼ぶ。

表 1 工程と作業内容・空間の分析

工程	作業内容	作業が行われる空間
工程 1)	作業者が標準作業手順に従ってワークの組み立て作業を実行する。	人の作業空間
工程 2)	作業者は組み立て作業が完了したワークを Cobot の手前の共有空間にセットし Cobot にワークを引き渡す。	共有空間
工程 3)	Cobot は、共有空間にセットされたワークを掴み、Cobot の作業空間に移動させる。	共有空間
工程 4)	Cobot は、Cobot の作業空間に移動させたワークのネジ締め作業を実行する。	Cobot の作業空間
工程 5)	Cobot は、ネジ締め工程完了後、次工程のレーザーマーキング部にワークを投入する。	Cobot の作業空間
工程 6)	これ以降別の Cobot が、レーザーマーキング部からのワーク取り出し・検査・払い出しの工程を実施する。	Cobot の作業空間

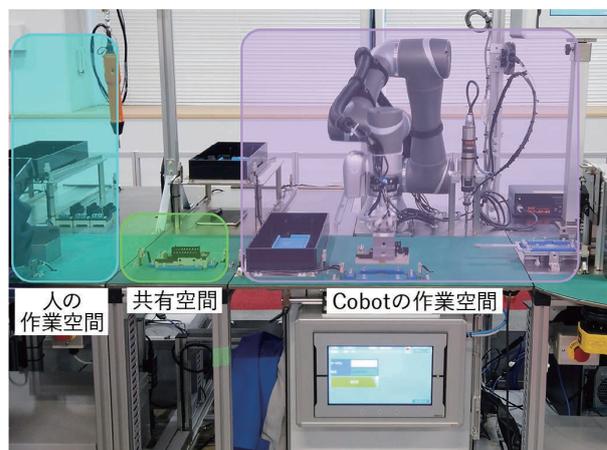


図 1 アプリケーションの空間分析

協調型 CLCS をはじめとする協調生産システムでは、人と機械が作業空間を共有することが前提とされている。このようなアプリケーションの代表的な例としては、Cobot のアプリケーションに関する国際規格である ISO/TS 15066¹⁾ で規定されている Collaborative operation がある。これは、Cobot と人とが同じタイミングで作業を行う Collaborative workspace と、Cobot が単独で動作する Operating space で構成されるシステムであり、本稿では Collaborative application と呼ぶ。

一般的に Cobot を使用する設計者は、Cobot を用いたす

すべてのアプリケーションをまずは Collaborative application と判断し、ISO/TS 15066 や、産業用ロボットシステムの安全規格である ISO 10218-2²⁾ を安全設計の適用規格とする。しかし、これらの規格が対象としているのは、Collaborative application に対する要求事項である。そのため、協調型 CLCS のように Cobot は使用するものの人と Cobot とは独立作業をしながら連動する協調生産システムでは、この二つの安全規格を満足する設計を行おうとすると、コストと使い勝手の点で問題がある。なぜなら、安全規格の規定を厳密に適用すると多くの安全機能を採用せざるを得ないことから、安全機能構築に必要なコストが増大するためである。またそれらの安全機能によって Cobot の停止要因が増えることで頻繁なリセット操作が必要となり、使い勝手の低下につながるからである。

2.2 協調型 CLCS のアプリケーションと Collaborative application との違い

ここで、Cobot を使用するすべての協調生産システムに ISO/TS 15066 が適用できるかどうかを判断するため、協調生産システムの工程とタスクが実行される空間の観点でアプリケーションの分析を実施する。これにより、既存規格が適用できるかどうかの基準となる、Collaborative application の有無を明らかにする。

まず、表 1 の工程 1)~6) の作業から人と機械 (Cobot) が接近する工程を抽出する。人と機械 (Cobot) の関係が最接近する工程は、工程 2) および工程 3) のワークの受け渡しである。この工程は、人が、人の作業スペースと Cobot の作業スペースの間に設けられた共有空間にワークをセットし、Cobot がそのワークをつかみに行くことで成立する。このとき Cobot は、共有空間の所定の位置にワークが置かれたことをトリガに動作を開始することから、人のワークセット作業と Cobot のワーク把持作業は同時に行

われることはない。そのため、2.1 で述べた二つの産業用ロボット安全規格が規定する、人と Cobot が同じ空間で同時に作業を行う Collaborative operation は存在せず、Collaborative application に含まれないことが判断できる。これによって協調型 CLCS は、Collaborative application とは異なる新たな協調生産システムとして、ISO/TS 15066 によらない安全設計が選択可能であることを明確にできた。

このような新たな協調生産システムのアプリケーションは、図 1 のように、人の作業空間、人と Cobot のワーク受け渡しのための共有空間、Cobot の作業空間の 3 つの空間で構成されるものと定義できる。このそれぞれの空間を Human workspace、Common space、Operating space とし、これらの 3 つの空間で構成される生産システムのアプリケーションを、本稿では Consecutive application と呼ぶ。2.1 で述べた Collaborative application との空間の違いは図 2 のように示すことができる。

2.3 協調生産システムのアプリケーションに応じた安全規格

2.1 および 2.2 で述べたとおり、協調生産システムはアプリケーションの特徴によって Collaborative application または Consecutive application の 2 つに分類することができる。これらを比較すると、表 2 のように表すことができる。

協調生産システムはいずれも人と機械が協調して作業を行うことから人と機械の間に物理的な分離手段はない。しかし人と機械が協調して作業をするための空間は、作業の特性に応じて Collaborative workspace と Common space のいずれかに分けることができる。またこの空間特性から、安全設計の指針として既存の個別機械安全規格が活用できるかどうか異なる。Collaborative application は Cobot を使用し、人と Cobot とが同じ空間で同時に作業を行うアプリケーションであるため、産業用ロボットの個別製品安全規格によりその安全性を評価できる。一方の Consecutive

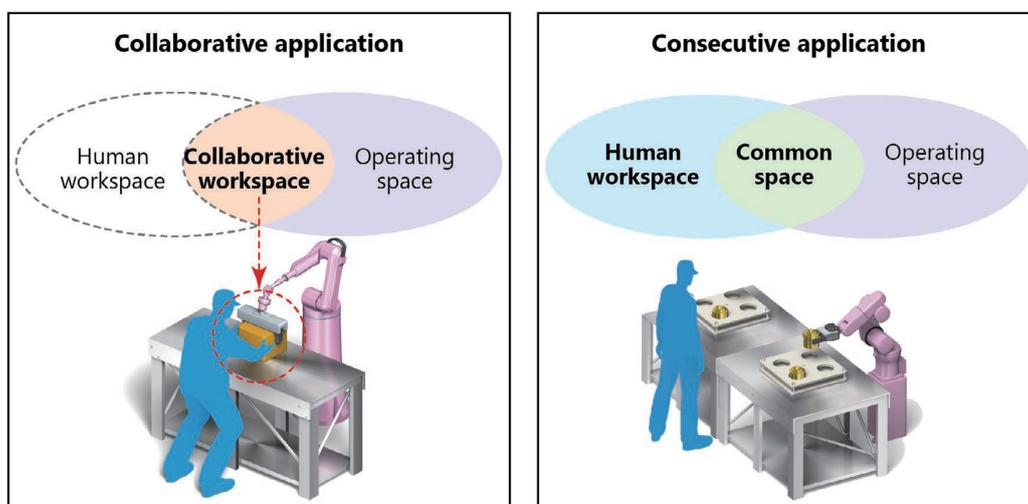


図 2 Collaborative application と Consecutive application の空間構成の違い

表2 協調生産システム (Interactive manufacturing system) の分類

分類項目	協調生産システム (例: 協調型 CLCS). Interactive Manufacturing System	
	Collaborative application	Consecutive application
人-機械間の物理的分離手段	なし	なし
Cobot の使用	必須	任意
人と機械の同時作業	あり	なし
人と機械の作業空間	Collaborative workspace	Common space
個別機械安全規格 (C 規格)	ISO10218-2, ISO/TS 15066	なし

application は、人と機械が連動して製品を作り出すが同じ空間で同時に作業はしないアプリケーションが対象であり、人と連動する機械の種類は Cobot に限定されない。そのため、既存の個別機械安全規格における規定では、適切な安全設計が実現できない。

この表は、協調生産システムの設計の際に行うアプリケーション分析の着目点を示しており、適切な参照規格を選択することに役立つものである。この表を活用することで、Cobot が含まれる場合でもアプリケーションによっては ISO 10218-2、ISO/TS 15066 の適用の対象外であることを明確にできるため、実態にあわないそれらの規格の安全要求事項に対応することによる過剰な安全設計を避けることができる。

3. 協調生産システムのリスクアセスメント

3.1 協調生産システムの危険源同定の現状

協調型 CLCS は、人と機械 (Cobot) の間に物理的なガードなどを設けないシステムであることから、物理的な防護手段がある一般的な生産システムに比べて、危険源へのアクセスが容易である。そのため、機械の稼働エリアに人が誤って入り込む可能性も高いことから、それらの誤った人の挙動すなわち誤使用による危険状態を考慮したリスクアセスメントを行う必要がある。

生産システムのリスクアセスメントでは、幅広いリスクを設計の初期から考慮するために、誤使用を含む様々な事故シナリオを想定し、危険源を漏れなく同定する必要がある³⁾。しかし漏れなく同定することに注力するあまり、現実的にはおよそ発生し得ない危険事象や極めて限定的な条件でしか起こり得ない誤使用も含めて、事故シナリオを数

多く想定することばかりに努力が注がれてしまうことがある。またリスクアセスメントは、多様な経験や知識をもつ人がチームで行うことが望ましいとされている⁴⁾ が、実際には生産システムの設計担当者など特定の人のみによって行われることも多く、想定される誤使用の範囲が担当者の過去の経験などによって精度がばらつくことが問題視されている。さらに、危険源同定の中で想定した誤使用は、「合理的に予見可能」な場合には設計によってそれを避けるための方策を実施しなければならないが、何を根拠に合理的に予見可能か否かを判断すればよいかについては ISO 12100 等の国際安全規格では規定されておらず、個々の設計者の感覚に委ねられている。しかし、無作為に数ばかりを求めた事故シナリオの想定、属人的な経験値や想像力に依存した誤使用の検討、個人の感覚的なリスク低減要否の判断を行っているだけでは、その網羅性や根拠に偏りが生じ、結果的に重大な危険源の見落としやリスク低減の不足につながってしまう。その結果、使用者に対して安全の説明責任を果たせないという問題が生じている。

そこで、2章で取り上げた空間の分類と、人の誤った挙動の分類に着目して、これらの問題を解決する方法を考案した。

3.2 体系的な危険源同定および誤使用の分析によるリスク低減の要否の判断手法

まず、人の誤った挙動に起因する危険源の抽出を体系的に行う方法を検討する。危険状態につながる人の挙動の原因は、図3のように a~d の4つに分けることができる^{5,6)}。この人の挙動の4分類を手がかりとして、協調型 CLCS の空間における危険源と人との関わり・挙動を考慮し、事故シナリオを検討していく。

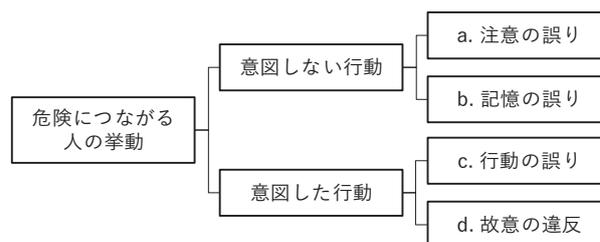


図3 人の挙動の分類

協調型 CLCS に関わる人の挙動に起因する事故シナリオを、機械 (Cobot) が作業を行う Common space と Operating space を対象に検討し、危険状態につながる人の挙動の分類 a~d にあてはめたものを表3に示す。ここでは機械 (Cobot) が Common space に存在しているにもかかわらず人がその空間に侵入することに起因する事故シナリオを No. 1~4 に、Cobot が動作中の Operating space に人が侵入することに起因する事故シナリオを No. 5~8 に記載した。

表 3 人の誤使用による事故シナリオ

No.	空間	人の挙動の分類	事故シナリオ
1	Common space	a	Cobot が Common space 内でワークの移載作業遂行中であることに気付かず、Cobot が Common space から離脱したと勘違いして、次のワークをセットするために手を Common space に侵入させ、エンドエフェクタとワークの間に挟まれる。
2	Common space	b	Cobot のワーク移載工程のプロセスが即時に終了すると見込んで Common space に手を入れたところ、工程完了のための追加タスクを行うために Common space に入ってきた Cobot のエンドエフェクタに衝突する。
3	Common space	c	標準作業手順の勘違いによって、Cobot がワークをつかもうとしているときに Common space に手を入れてしまい、エンドエフェクタに捕捉される。
4	Common space	d	いたずらで Cobot のワーク移載タスクのトリガとなるセンサーを細工した結果、作業者がワークをセットしている途中に Cobot が Common space に侵入し、エンドエフェクタと衝突する。
5	Operating space	a	他工程で発生したエラーに対処する指示を作業者が見誤り、Cobot が正常にネジ締めタスクを遂行中の Operating space 内に侵入し、ドライバーに接触する。
6	Operating space	b	Cobot が自動的にタスクを遂行中に、Cobot が停止していると作業者が誤認識し、状況を観察するために Operating space 内に頭部を侵入させ、エンドエフェクタと衝突する。
7	Operating space	c	標準作業手順の勘違いによって、Operating space 内で Cobot のタスク実行中に手を入れてしまい、エンドエフェクタに衝突する。
8	Operating space	d	Cobot が使用するネジの数量が足りないことを認識した作業者が、Cobot がネジ締めタスクの実行中に Cobot 代わりに Operating space のネジ供給パレットを交換しようとしたときに、パレットを掴もうと動作した Cobot のエンドエフェクタに挟まれる。

次に表 3 で検討した人の誤使用による事故シナリオに対して、リスク低減の必要性を判断するための分析を行う。3.1 で述べたとおり、リスク低減の必要な誤使用を見極めるためには、その誤使用が合理的に予見可能か否かを見極める必要がある。このプロセスを検討し、図 4 のとおりフローチャートにして示した。このフローチャートで合理的に予見可能と判断した誤使用は、その後のリスク見積り等のフローを経て、リスク低減までを行わなければならないものと判断できる。それ以外はリスク低減の必要はないことから、この判断結果を記録することで誤使用の分析を終了できる。

ここで、事故シナリオの原因となる人の動機による判断基準を示す。「a. 注意の誤り」「b. 記憶の誤り」のように人が意図せずとってしまう行動については、それらを誘発することで危険事象を招かない設計が必要であり、合理的に予見可能な範囲として扱う。「c. 行動の誤り」は、なんらかの人の認識の誤りによって意図的に行動をとった結果起きる事象のため、誤った認識や行動の原因を作らない設計とすべきであり、合理的に予見可能な誤使用に含める。

しかし「d. 故意の違反」には、「人の意図的な違反」によって発生するものと、近道反応・省略行動などの「最小抵抗経路」をとることで発生するものとの 2 種類が考えられる。そのいずれにあてはまるかによって合理的に予見可能か否かが分かれることから、さらなる分析を必要とす

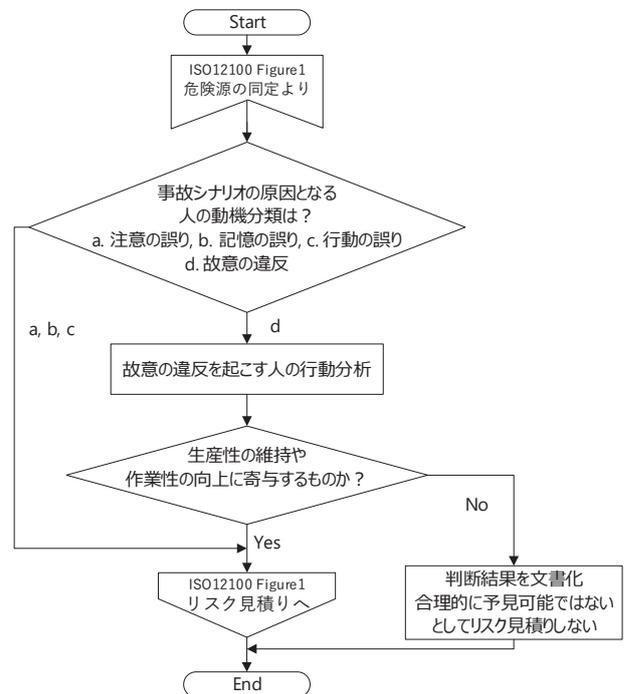


図 4 協調生産システムの誤使用の分析プロセス

る。「d. 故意の違反」のうち意図的な違反は、悪意をもった人による機械の乱用などが考えられる。この機械の乱用については、一般的に機械類の安全性を考える際には検討

の対象としないため、合理的に予見可能な範囲に含む必要はない。一方で近道反応・省略行動によるものは、規定の手順に沿わないことで作業の簡略化や工程の短縮化が図れるなどの、生産性や作業性を向上させる意図でとられることの多い行動である。機械を稼働し続けなければならないというプレッシャーから、不具合発生時などに正しい手順を踏まずにとってしまうとっさの行動もここに含まれる。これらの行動の多くは、生産システムの設計や標準作業手順の不備に起因すると考えられるため、合理的に予見可能な範囲としてリスクを評価し、設計方策を検討しなければならない。つまり故意の違反に含まれる誤使用は、その行動が生産性や作業性の向上や工程の継続を意図したものか否かという「行動の動機」を判断基準とすることで、合理的に予見可能な範囲に含めるべきか否かを判断することができる。

3.3 協調型 CLCS への危険源同定および誤使用の分析手法の適用

これまで述べた判断のプロセスを、表3で抽出された協調型 CLCS に適用し、その結果を以下に示す。

Common space で考慮した事故シナリオのうち No.1～3 は、挙動の分類 a～c にあてはまるものである。そのため、合理的に予見可能な範囲とする必要がある。分類 d にあてはまる No.4 は、作業による制御機器への故意の操作に起因して発生するものであることから、その行動の動機についての分析が必要となる。Cobot は、通常のタスクにおいて作業者が Common space 内の所定位置にワークをセットしたことをセンサーの入力によって検知し、そのワークを Common space から Operating space へ移動させるための動作を行う。この Cobot の移載動作のためのセンサーに対する細工という行為は作業時間の短縮や作業手順の省略などの最小抵抗経路につながらないことから、その行動をとる際の動機は、好奇心やいたずらによるものであると判断する。その結果、この事故シナリオ No.4 は合理的に予見可能ではない、つまり設計上考慮する必要のない誤使用として取り扱うことができる。

同様に、Operating space について考慮したシナリオそれぞれに対して誤使用とすかどうかの判断を行う。挙動の分類 a～c にあてはまる事故シナリオ No.5～7 は、合理的に予見可能な範囲とする必要がある。分類 d にあてはまる No.8 は、合理的に予見可能か否かを判断するために工程と違反行為の動機を分析する必要がある。Cobot は、通常のタスクにおいて図5の赤枠部に示されるパレットに存在するネジを画像認識し、ネジを吸着させてワーク上に移動してネジ締めを実行する。その後パレット上のネジがなくなると、空になったパレットの払い出しと新たなパレットの供給を Cobot 自身で行う。そのため、パレット交換は人の標準作業手順になく人はパレット交換の作業に介入する

必要はないが、生産システムの作業時間を短縮するために、この作業工程の Cobot 動作のタイミングを作業者が学習した上で Cobot のネジ締め作業時間内にパレットを交換することを試みる可能性がある。これは生産性を向上させる行為と判断できるため、このシナリオ No.8 は合理的に予見可能な誤使用として取り扱わなければならないと判断できる。



図5 事故シナリオ No.8 が想定される空間

3.4 危険源同定と誤使用の分析手法の適用のポイントと効果

協調型 CLCS においても、当初は 3.1 で述べたように設計者の経験に依存した危険源同定が行われていたが、今回考案した方法を使用することで、人の誤使用による危険事象を論理的に導き出した。またそれらの誤使用が合理的に予見可能か否かについて、設計者の感覚に依存せず機械的に判断できることが実証できた。これらによって、協調型 CLCS で想定される事故シナリオに対して、どこまでのリスク低減が必要かを明らかにすることができた。

また、図3による誤使用の分類を活用した事故シナリオの想定と、図4のフローチャートを適用した誤使用の分析にあたって共通して重要なポイントは、「人が行動を起こす原因・きっかけ」「人が侵入する場所」「危険源との関わり・危険状態」である。これらのポイントに着目することで、リスクアセスメントに関与する人の経験や感覚のばらつきを最小化しながら危険源を同定することができ、やみくもに数を求める危険源同定から、体系的な危険源同定に進化させ、設計効率の向上とリスクの見落としの可能性の低減につなげることができる。これらの3つの着目点については、表3のように具体的な表現で記録することで、リスクアセスメントに関与した担当者以外の第三者にも、リスクの成り立ちやリスク低減方策の要否の判断の根拠を明確に示すことができる。

4. むすび

本稿では、協調生産システムの安全設計の問題を解決する手法として、既存の安全規格の適用可否とリスクアセスメントの観点を取り上げてその解決手法を創出し、協調型 CLCS を対象に検証することでそれらの手法の効果を示した。

2章においては、協調生産システムを作業空間および人と機械との作業の同時性の2つの観点で捉え、Collaborative application と Consecutive application の2種類に分類できることを明確にした。これによって、従来は既存規格を選択するしかなかった協調生産システムに対して、アプリケーションの実態に合わせた適切な安全設計とするための手法を示すことができた。3章においては、既存規格に明示されていないことで設計者の論理的な安全設計の妨げとなっていた、人の挙動に起因する事故シナリオの体系的な抽出法や表現方法、抽出された誤使用に対する合理的に予見可能か否かの判断手法を創出した。これらを適用することで、設計時点で考慮しなければならない誤使用に対する判断基準が明確にでき、設計者は協調生産システムの使用者に対する安全の説明責任を果たせるようになる。本稿に示した各手法は、論理的で妥当性のある安全設計を最適な設計コストで使い勝手よく実装するための指針として活用できるものとする。

今後のさらなる取り組みとしては、3.4で示した危険源同定のポイントの具体的な表現方法を反映したリスクアセスメントシート事例の創出と、合理的に予見可能な誤使用を考慮した協調生産システムの新たなリスク低減方策に関する検討を行いたい。これらによって人と機械が自律的に協調する生産システムの進化に貢献するとともに、新たな生産システムの安全化に対する提言として、既存規格等へ盛り込んでいくように活動していきたい。

参考文献

- 1) ISO/TS 15066:2016. Robots and robotic devices-Collaborative robots.
- 2) ISO 10218-2:2011. Robots and robotic devices-Safety requirements for industrial robots- Part 2: Robot systems and integration.
- 3) ISO 12100:2010. Safety of machinery-General principles for design- Risk assessment and risk reduction.
- 4) ISO/TR 14121-2:2012. Safety of machinery- Risk assessment – Part2: Practical guidance and examples of methods.
- 5) James Reason, *Menschliches Versagen: Psychologische Risikofaktoren und moderne Technologien (in German)*, Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag, 1994.
- 6) ノイドルファ, A. 安全な機械の設計. 田中紘一訳・監修. 第1版, NPO 安全工学研究所, 2002, 365p.

執筆者紹介



築山 和成 TSUKIYAMA Kazunari

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：機械安全



武田 紗織 TAKETA Saori

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
営業本部 オートメーションセンタ 技術部
専門：機械安全

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。

垂直多関節ロボット動作の高速自動生成技術

小島 岳史, 林 剣之介, 藤井 春香, 細見 心一

近年、人件費の高騰や新型コロナウイルスの流行などの影響により、生産現場では省人化が求められている。省人化の手段の一つとして産業用ロボット、特に垂直多関節ロボットのニーズが高まっているが、高い生産性を実現するロボットの動作を生成するには大きな工数がかかるうえ、専門知識も必要となるため、普及が進んでいないのが現状である。そこで、本研究では垂直多関節ロボットを対象に、自動かつ高速に動作生成する技術を開発した。動作生成技術は経路計画技術と動作高速化技術の2つから構成されている。前者は状況に応じたアルゴリズムの選択と高速な干渉判定処理を実現することで、1動作の経路計画を既存技術の数秒から実時間対応可能な100 msecに短縮した。後者は動作速度に対して効果の高い加速度パラメータの最適化とロボットの関節にかかる慣性を軽減する経路補正を行うことで、ロボットのデフォルトパラメータで動作させた場合と比べてタクトタイムを約20%改善できた。そして、これらの開発技術の効果を確認するために構築したばら積みピッキングシステムでは、ユーザーにロボット動作生成を全くさせることなく、人と同等のタクトタイム3秒で作業することができた。

Fast Motion Planning Technology for Vertical Articulated Robot

KOJIMA Takeshi, HAYASHI Kennosuke, FUJII Haruka and HOSOMI Shinichi

In recent years, due to soaring labor costs and the spread of a new type of coronavirus, there has been an increasing demand for labor-saving at production sites. However, the needs for industrial robots, especially vertical articulated robots, has been increasing as one of the labor-saving measures, but they have not been widely used because of the large man-hours and expertise required to generate the motions of the robots to achieve high productivity. In this study, we have developed a fast motion planning technology for a vertically articulated robot. The motion planning technology consists of two technologies: path planning and motion acceleration. In the former, we have reduced the processing time for the path planning to 100 msec, which is several seconds per motion in the conventional technology, by selecting a context-specific algorithm and fast collision checking. In the latter, by optimizing the acceleration parameters and path correction to reduce the inertia on the robot joints, the tact time was improved by about 20% compared to the robot's default parameters. To confirm the effectiveness of these technologies, we built a bin-picking system. It works in the 3 seconds as much as a person's tact time without any robot motion generation by user.

1. まえがき

近年、人件費の高騰や新型コロナウイルスの流行などの影響により、生産現場では省人化が求められている。省人化手段の一つとして産業用ロボットの導入が盛んに検討されており、人の行っている作業の置き換えや協働のために、可動領域が広く動作の自由度が大きい垂直多関節ロボットのニーズが高まっている。しかし、実際の生産現場、特に中小企業においてはロボットの導入が進んでいな

い。この問題に関しては、ロボットの動作生成に時間がかかること、さらには、作業の難易度が高いことが、いくつかの要因のうち主なものとされている¹⁾。

産業用ロボットに作業を行わせるには、ロボットが動く位置・姿勢を設定するティーチングと呼ばれる作業と、設定された動きの速度等のパラメータ調整作業により、動作を生成する必要がある。これらはどちらもロボットを実際に動かしてトライアンドエラーで作業するため時間がかかる。また、作業内容に関しても、関節角度によるロボットの制御やトルクの考慮など、いずれの作業についても専門

Contact : KOJIMA Takeshi takeshi.kojima@omron.com

知識と熟練が必要になる。

そこで、本研究では垂直多関節ロボットを対象に、位置姿勢の設定と動作パラメータの調整を自動で行うロボット動作自動生成技術を開発した。この技術により、ロボットの知識のないユーザーでもロボットを生産現場に導入できるようになる。また、本技術は1動作当たり100 msec以下の計算時間で動作が生成できるため、ばら積みピッキングのような都度動作生成が必要なアプリケーションにも対応できる。

以下、2章では産業用ロボットによる動作生成の課題と開発目標について、3・4章では開発したロボット動作自動生成技術について、5章では開発成果をもとに実装したばら積みピッキングアプリケーションについて説明し、6章でまとめと今後の展望について述べる。

2. ロボット動作生成の課題と技術開発目標

2.1 ロボットの動作生成について

垂直多関節ロボットは関節のサーボモータの回転角度により制御される。各関節の回転角度の集合によって構成されるロボットの状態を**姿勢 (Posture)**と呼ぶ。ロボットの動作生成は、単純にはロボットの動作開始姿勢 (現在姿勢) から何らかの作業を行うための目標姿勢の二つを指定することで実現できる。このような制御方法をPTP (Point To Point) 制御と呼ぶ。しかし、PTP制御による動作は単純に2姿勢間を線形補間でつないでしまうため、開始姿勢と目標姿勢の間に障害物があるようなときに干渉が発生してしまう。

これに対して、開始姿勢と目標姿勢の間の姿勢を細かに指定することで精密な動作を行わせる制御方式があり、これをCP (Continuous Point) 制御と呼ぶ。CP制御のために与えられるロボットの開始姿勢と終了姿勢、およびその中間姿勢の集合のことを**経路 (Path)**と呼ぶ。図1にPTP制御とCP制御による動作の違いを示す。

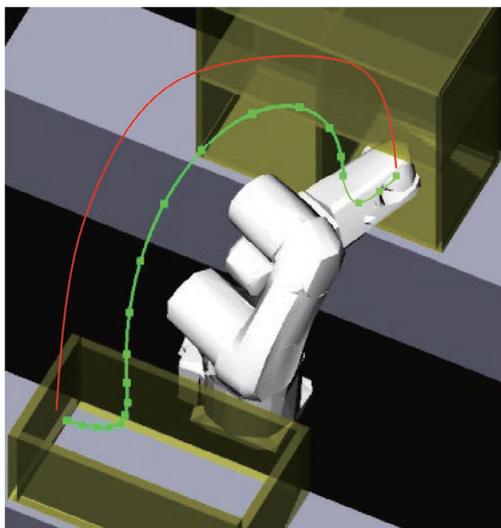


図1 PTP動作 (赤) とCP動作 (緑、■は手先の空間位置)

さらに、実際にロボットを動作させるには、設定した経路を時間とともにどのように実行するかを設定する必要がある。この時間的な変化は、サーボモータの回転速度・回転加速度などの動作パラメータを制御することによって実現できる。このように、動作パラメータを与えられて時間軸上で実行される経路のことを**軌道 (Trajectory)**と呼ぶ。つまり、ロボットによる動作生成とは軌道を生成することと言える。

2.2 経路生成の課題

CP制御を行うための経路を生成するには、一般にティーチングと呼ばれる作業を行う。これは、人がティーチングペンダント (TP) と呼ばれるロボットの操作装置を使ってロボットを実際に動かして、経路を構成する姿勢を逐一登録する作業である。ティーチングで与えられる姿勢のことを教示点とも呼ぶ。

作業の複雑さや量にもよるが、一般にロボットを生産設備として使用するには数十から数百の教示点が必要とされている。正確に教示点を設定するためには、ロボットの動作速度を落としたり停止させたりしながら姿勢を検証する必要がある。したがって、ティーチングには大きな工数がかかるという課題がある。

また、教示点として与える姿勢をとらせるためのロボット操作は熟練を要するという課題もある。これは、人が空間を縦横高さと傾きという直交座標系 (実空間) に基づいて認識しているのに対して、ロボットを動かすパラメータが関節の回転角度 (関節空間) というギャップがあることに起因する。図2に平面を動く2軸のロボットを例に説明する。

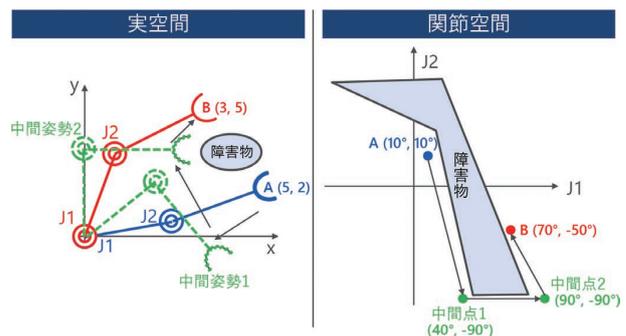


図2 実空間と関節空間

実空間で開始姿勢Aから障害物を回避しつつ目標姿勢Bにロボットを動かそうとした場合、干渉を避けるため中間姿勢1,2を経由する必要がある。中間姿勢の実空間上の位置を人は直感的にあたりをつけることができるが、ロボットを制御するための関節角度に変換するのは容易ではない。TPには直交ジョグ操作というロボットの手先を実空間の座標で並行移動させる機能があり、ある程度は人の感

覚に合わせた操作も可能である。しかし、直交ジョグ操作による手先の移動はロボットコントローラが各関節の動きを制御することによって実現されるため、ユーザーはロボットの手先以外の部分（肘・肩）がどのように動くかは制御できない。そのため、直交ジョグ操作だけでティーチングしようとしても、ロボットと周辺環境が干渉する危険がある。また、実空間と関節空間は非線形な関係にあるため、実空間では連続であっても、関節空間では不連続になる領域が存在する。そのような領域ではロボットコントローラで計算する関節値が不定となり、冗長な動作が発生したりロボットが停止したりするため、直交ジョグ操作で長い距離を動かしてもユーザーが望むような動きは得られないことが多い。そのため、実際のティーチングでは関節の回転角度を試行錯誤しながら所望の教示点に近い姿勢まで変化させ、直交ジョグ操作で精密な位置合わせを行うという作業をすることになる。

以上から、現状のロボットのティーチングは熟練者が勘と経験に基づいてトライアンドエラーを繰り返して作業する必要があり、ユーザーにとって非常に負担の大きいものであると言える。

2.3 軌道生成の課題

ロボットを生産設備として使用するには、ティーチングで生成した経路をユーザーが求めるタクトタイムを満たす時間で実行できなければならない。そのためには、経路上の中間姿勢間の関節の回転速度を調整して、高速な軌道を生成する必要がある。

ロボットの関節回転速度は速度最大値と加速度のパラメータによって制御される。基本的にはこれらを大きな値にすれば動作は速くなるが、過大なパラメータを与えた場合は関節のサーボモータにかかるトルク負荷が高くなり、安全装置が動作してロボットが停止してしまうので、適切な値を設定する必要がある。

トルクは以下の式(1)で示されるように、質量や慣性の影響を受けるため、最適なパラメータを求めるためにはロボットに取り付けられたハンドやハンドでつかんだワークの質量や姿勢まで考慮しなければならない。

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + F(\dot{\theta}) + G(\theta) \quad (1)$$

τ : 負荷 (トルク)

$M(\theta)$: 質量に関する行列

$V(\theta, \dot{\theta})$: 遠心力やコリオリ力の項を示すベクトル

$F(\dot{\theta})$: 摩擦力の項を示すベクトル

$G(\theta)$: 重力項を示すベクトル

そのため、ユーザーは推奨値でタクトタイムが満たされない場合は実機を動かしながら試行錯誤してパラメータを調整する必要がある。これはティーチング同様、熟練が必

要で時間のかかる作業、すなわちユーザーにとって負担の大きい作業であり、課題となっている。

また、別の課題として、短いタクトタイムを達成しようとするならば、動作パラメータだけでなく経路の再調整が必要になることがある。例えば、腕を伸ばした姿勢で動かすよりも、いったん腕を縮めてから動かしたほうが関節にかかる負荷が小さくなり、より高速に動作させることでトータルの動作時間が短くなるようなケースが存在する。

以上から、ロボットで高い生産性を実現する軌道を生成するには、動作パラメータと経路の両方を試行錯誤で調整するという課題が存在する。

2.4 技術開発目標と評価環境

ロボット動作生成の課題を解決するため、経路の自動生成技術と動作の自動高速化技術を開発した。開発技術の特色は1動作当たり 100 msec という計算時間の高速性にある。この高速性により、本技術は幅広いアプリケーションへの対応が可能である。

現在、産業用ロボットは、動作の繰り返し精度の高さを生かして、高精度に位置決めされたワークをティーチングされた固定の動作で搬送するような使われ方が主流である。しかし、ばら積みされたワークのピッキングのように事前に動作の条件が固定できないアプリケーションに関しては、ティーチングで対応するには膨大な動作パターンを登録しておいて条件分岐で対応する必要があり、ロボットの適用が困難であるという課題がある。一方、本技術はロボットの動作と並行して次の動作を生成するのに十分な高速性を実現しているため、3D センサや認識技術との連携により、この課題を解決できる。つまり、本技術は現在人手で行われているティーチングを自動で行うようにだけでなく、ティーチングでは対応が困難だったアプリケーションにもロボットを使用できるようにできるものであると言える。

100 msec という目標値は、図3に示すようにばら積みピッキングをターゲットとして設定した。

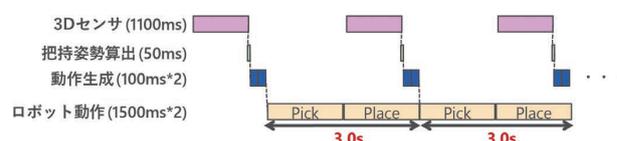


図3 ばら積みピッキングのタイムチャート (開発目標設定時)

ワークを認識する 3D センサは、ばら積みの上方に固定する方式とロボットの手先に設置する方式の2通りが考えられるが、本研究では撮影のための動作が不要でより高速な作業が可能な前者の方式を前提とする。

ばら積みピッキングは、ばら積みされたワークを取り出す Pick 動作と、取り出したワークを整列させる Place 動作

で構成される。人同等の作業時間を目標とすると、1ワークあたり3~4 secで実行する必要がある。自動でピッキングを行うためには、3D センサでばら積みされたワークを計測・認識した後、ピッキングするワークの選定とワークのつかみ方の決定（把持姿勢算出）を行い、Pick 動作と Place 動作を生成する必要がある。しかし、Pick 動作中は上方に設置されたセンサとばら積みワークの間にロボットが存在してセンサからワークが見えなくなってしまう。そのため、計測から Pick/Place 動作の生成までの処理は、Place 動作の 1.5 sec 中にすべて処理が完了していなければならない。開発目標設定時点では、当時最新のロボット用 3D センサによる計測・認識には 1100 msec、オムロンで開発中の把持姿勢算出技術には 50 msec かかっていた。そのため、動作生成に使える時間は Pick と Place の 2 動作で 350 msec となる。さらに、通信その他のオーバーヘッドを鑑みて 1 動作あたり 100 msec と設定した。

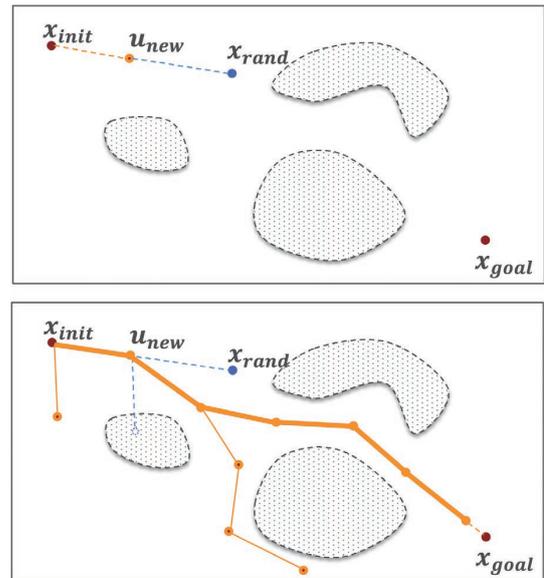


図 4 RRT 手法概要

3. 経路の自動生成技術

3.1 関連研究

ロボットの経路や軌道を自動生成する技術は、経路計画 (Path Planning)・軌道計画 (Trajectory Planning) 技術と呼ばれ、多くの研究が存在する²⁾。古典的にはポテンシャル法³⁾・セル分割法⁴⁾などの手法があり、最近ではランダムサンプリング法⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾や最適化問題として解く手法¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾が存在する。古典的手法は実空間をベースにロボットの通過可能な空間位置を探索してから対応するロボットの経路に変換するもので、探索や変換処理の計算コストが高いほか、実空間と関節空間の非線形性により実行不可能な不連続解を生成してしまう問題がある。ランダムサンプリング法は計算コストが低く、理論上は必ず解を生成するという利点があるが、与えられた状況によって計算時間や生成される経路が大きくばらつくという問題がある。最適化手法は計算時間が安定しており、設定されたコストに応じて最適な経路を生成するが、ランダムサンプリング法と比較して計算時間は長く、経路の生成に失敗する可能性もある。

3.2 既存技術の評価と問題分析

本研究では、計算コストの低さと経路の生成可能性の高さからランダムサンプリング法に分類される手法が有望だと考えた。

ランダムサンプリング方式を、最も基本的なアルゴリズムである RRT (Rapidly-exploring Random Trees)⁵⁾を例に説明する。RRT は図 4 に示すように、開始姿勢 x_{init} から目標姿勢 x_{goal} までの間をつなぐツリーを成長させて探索する方式である。

探索は関節空間で行うので、図中の点はロボットの姿勢に対応するベクトルとなる。6つの関節を持つ垂直多関節ロボットならば、関節空間およびベクトルは6次元である。探索は次の手順で行う。ランダムな点 x_{rand} をサンプリングし、 x_{rand} と既存のツリー上の近傍点 x_{near} を発見する。図 4 の上図の場合、初回の探索なので $x_{near} = x_{init}$ である。次に、 x_{near} から x_{rand} まで一定距離進めた点 u_{new} を設定し、 u_{new} と x_{near} の間で障害物との干渉が発生しなければ u_{new} と $x_{near} - u_{new}$ 間の枝をツリーに追加する。サンプリングの仕方やツリーの成長方法がアルゴリズムによって異なるが、基本的な処理は共通である。

既存研究の中で評価の高いアルゴリズムを選択して評価する。選択したアルゴリズムと概要を表 1 に示す。

表 1 選択したアルゴリズムの概要

アルゴリズム	概要
RRT ⁵⁾	図 4 で説明した手法。評価で用いた実装では 5% の確率で x_{goal} をサンプリング点に含めてバイアスを掛けている。
RRT-Connect ⁷⁾	x_{init} と x_{goal} の両方からツリーを生成し、他方のツリーの存在する方向に探索することで、障害物の少ないエリアの探索効率を向上する。
TRRT (Transition-based RRT) ⁸⁾	$u_{new} \cdot x_{near}$ がともに障害物から閾値以下の距離にある場合は u_{new} をツリーに追加しないことで、障害物とツリーが近接することによる成長の阻害を防ぐ。
BIT* (Batch Informed Trees Star) ⁹⁾	x_{init} と x_{goal} を包含する部分空間を設定してその内部だけを探索することで、探索効率を向上する。

評価は図5の条件で開始姿勢から目標姿勢の間の経路を生成させ、計算時間と成功率を計測する。

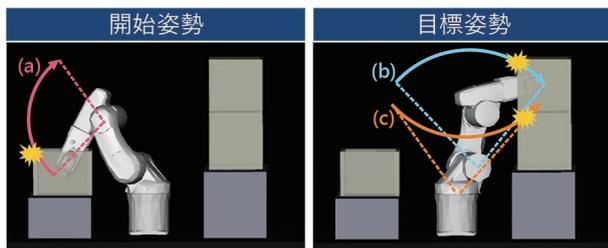


図5 評価環境

垂直多関節ロボットの第1～3軸は手先の空間位置を変化させ、第4～6軸は手先の向き・傾きを変化させる。つまり、ロボットの動作はほぼ第1～3軸によって決定される。そこで、開始姿勢から目標姿勢の間に第1軸(図5(c))・2軸(図5(b))・第3軸(図5(a))によるロボットの動作をそれぞれ阻害するように障害物を配置した。この条件下でも経路が生成できるのであれば、第1～3軸のどの軸の動作が阻害されても対応可能な、ロボット動作に対して汎用性の高い経路計画アルゴリズムであると言える。なお、計算時間目標に設定したばら積みピッキングの動作としては図5(a)の障害物が回避できれば十分であるが、ばら積みピッキング以外の汎用的な動作生成への適用を考えてこのような条件を設定した。

評価は Intel (R) Core (TM) i5-4310U @2.0GHz の CPU を搭載した計算機で行った。ランダム探索の特性上、計算時間の上限を 10 秒に設定し、経路生成 100 回の成功率と成功したときの計算時間を計測した(表2)。その結果、経路生成の成功率はいずれの手法も 90%以上と高くなったが、計算時間については 100 msec 以内という目標に対して、大幅に超過した。

表2 既存アルゴリズムの評価結果

アルゴリズム	計算時間 (msec)		成功率 (%)
	平均	最大	
RRT	826	2086	97
RRT-Connect	761	1629	99
TRRT	892	2047	94
BIT*	696	2115	100

アルゴリズム改善のため、ランダムサンプリング方式の問題分析を行った。ランダムサンプリング方式の計算時間 t は式(2)で示すことができる。

$$t = \sum_{i=1}^n \left(t_s + i \cdot t_{nm} + \frac{d}{\Delta d} \cdot t_{cc} \right) \quad (2)$$

- n : 目標姿勢に到達するまでのサンプリング回数
- t_s : サンプリング点生成にかかる時間
- t_{nm} : サンプリング点の近傍点探索時間
- d : 追加する点と近傍点の距離
- Δd : 干渉判定する間隔
- t_{cc} : 干渉判定 1 回あたりの時間

したがって、計算時間を短くするには、目標姿勢に到達するまでのサンプリング回数を減らすことと、1回あたりの計算時間を減らすことが必要である。なお、表2で示した実験結果では、サンプリング回数 n が平均で 10000 回、サンプリング 1 回あたりの計算時間が 0.08 msec かかっていた。

3.3 探索アルゴリズム改善

既存のアルゴリズムの探索処理を分析したところ、コンテナや棚への出入り部分でサンプリング回数 n が著しく増加していることが分かった。図6は、この問題を簡単に説明するために2軸のロボットの関節空間と実空間を示したものである。実空間では広く開いている開口部でも、関節空間では通過可能なエリアが著しく狭くなり、橙色で示した開始姿勢から緑色で示した目標姿勢に至る経路をランダムな探索ではなかなか見つけられない。この問題は、ランダムサンプリングに特有の Bug-Trap 問題として知られている¹³⁾。

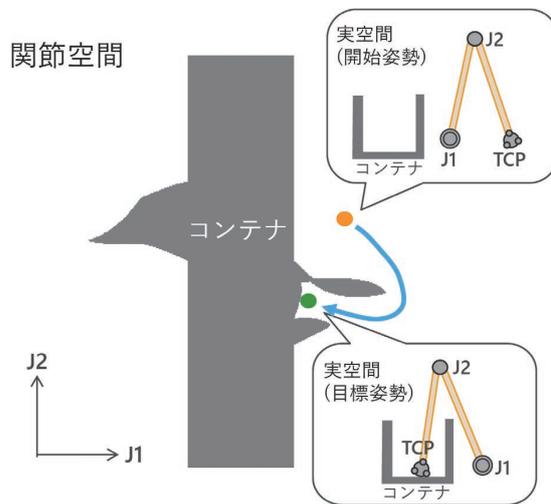


図6 Bug-Trap の例 (2 次元)

このような問題に対応する手法としては、実空間の情報を使って探索する手法が知られている。代表的なアルゴリズムとしては、実空間で仮想の球を使って探索し関節空間に結果をフィードバックする EET¹⁴⁾ がある。この方法は実空間の障害物から離れる方向に向けて探索するので、Bug-Trap の出入り部分に関しての探索性能は高いが、Bug-Trap でないエリアに関しては探索の手掛かりが無くなるた

め著しく性能が悪化する。一方、表2で評価したアルゴリズムのうち、RRT-ConnectはBug-Trapでないエリアに関して高いパフォーマンスを発揮する。これは、探索範囲に障害物が少ないエリアがあることを期待して設計されたアルゴリズムであり、開始姿勢と目標姿勢の両方からツリーを生成し、他方のツリーの存在する方向に探索するという方針をとっている。そのため、障害物が少ないエリアでは2つのツリーがすぐにつながるため、探索性能が高い。

そこで、これら2つのアルゴリズムを併用するアルゴリズムを新たに考案した。すなわち、Bug-Trap状態であると判断された場合はEETを使用し、そうでないときはRRT-Connectを使用して経路を生成する。なお、図5の例ではロボットの手先とコンテナによるBug-Trapの発生を示したが、これ以外にもジョイント値の上限や、手先以外の部分と障害物の干渉の発生によるBug-Trapも存在するので、考案したアルゴリズムではこれらすべてのBug-Trapの発生要因をチェックしている。

探索アルゴリズムの改善により、サンプリング回数 n は200回以下に削減することができた。

3.4 干渉判定処理改善

次に、サンプリング1回あたりの計算時間を短くする。計算時間のプロファイル分析を行った結果、干渉判定にかかる時間が処理の9割ほどを占めることが分かった。そこで、干渉判定にかかる時間 $(d/\Delta d) \cdot t_{cc}$ を短くすることを検討した。

干渉判定はロボットと周辺障害物のCADデータを使った3Dシミュレーションによって行われている。一般的には、式(2)で示した通り経路上の中間姿勢間の関節角度の変化 d を Δd で離散化し、離散化した各姿勢をシミュレーション空間上でロボットに取らせて、障害物とぶつかっていないか判定する¹⁵⁾。中間姿勢の距離 d は一定であるため、干渉判定間隔 Δd を大きくして離散化率を下げれば判定回数を減らすことができるが、干渉を見逃してしまう恐れがある。そこで、ロボットと障害物が遠いときは疎に、近いときは密に干渉判定を行う図7のようなアルゴリズムを考案した。

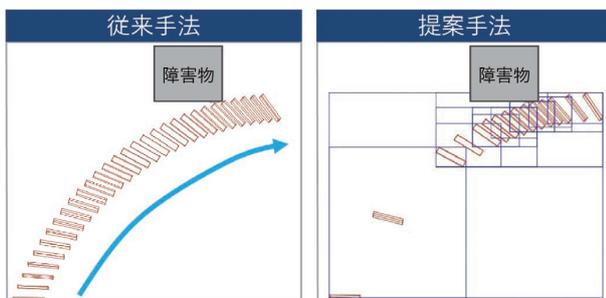


図7 干渉判定の従来手法と提案手法

この手法により、干渉判定の正確性を保ったまま、判定回数 $d/\Delta d$ を削減することができた。

さらに、干渉判定1回あたりの計算時間 t_{cc} を削減する。干渉判定で使用するCADデータはロボットメーカーが提供したものやユーザーが設備設計で作成したものであるため、メッシュ数が数万から数十万の精密なもので与えられる。1回あたりの計算時間はこのメッシュ数に比例して長くなるため、形状の特徴を残したままメッシュ数が少ないものであることが望ましい。また、干渉判定に使うモデルの形状についても、凹形状では処理が複雑になるが、凸包で形状が表現されていれば、形状の中心位置同士の距離で判定できるため処理を高速化できることが知られている¹⁶⁾。以上を踏まえて、経路計画を行うシミュレーション空間では、入力されたCADデータのメッシュを削減し、形状を凸包分割してから処理するようにしている。図8はロボットの肘部分の形状簡易化の例を示している。



図8 形状簡易化の例

以上の干渉判定の粗密探索とモデルの簡易化により、サンプリング一回当たりの計算時間を0.05 msec以下にすることができた。

3.5 経路自動生成技術の評価

開発した探索アルゴリズムと干渉判定処理を反映して、表2と同じ条件で評価した結果を表3示す。RRT-Connectは表2の結果の転記である。

表3 開発した手法の評価結果

アルゴリズム	計算時間 (msec)		成功率 (%)
	平均	最大	
開発手法	28.9	90.4	100
RRT-Connect	761	1629	99

以上から、探索アルゴリズムによるサンプリング回数の削減と、干渉判定処理の高速化により、目標である100 msecの計算時間を達成できた。

4. 動作の自動高速化技術

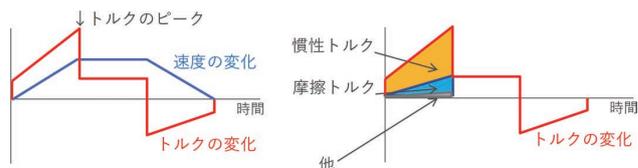
4.1 関連研究

ロボットの動作時間を短くするためには、生成する経路の冗長性をなくすことと、動作パラメータを適切に設定する必要がある。そのような技術としては、経路の自動生成技術の関連研究でも触れた軌道計画技術が存在する。軌道計画技術はロボットの経路のほか、ロボットと障害物の距離・手先の向き・関節にかかるトルクをコスト関数のパラメータとして最適化する技術である。この種の技術で有名なものとしては STOMP (Stochastic Trajectory Optimization for Motion Planning)¹¹⁾ や TrajOpt (Trajectory Optimization for Motion Planning)¹²⁾ がある。STOMP は最適化して得られた結果にランダムなノイズを付加して計算することで局所解への収束を抑制して最適解の探索を効率化する、TrajOpt は逐次的に凸最適化を行うことで計算時間を短くする、という特徴がある。しかし、事前の評価によりこれらの効率の良い手法を用いたとしても計算時間が数秒から数十秒かかり、開発目標の 100 msec には適さないことが分かった。さらに、これらの手法は事前に中間姿勢の点数を決めておく必要があり、その点数が少なすぎれば解を生成できる可能性が低くなり、多すぎれば生成される動作の加減速が多発して動作時間が長くなってしまいう問題もある。

このように、経路の生成・最適化と動作パラメータの最適化を一つの最適化問題として解くと、トレードオフ関係にある多数のパラメータの収束に時間がかかり、設定も複雑になってしまう。そこで、本研究では経路生成技術で生成された経路をベースに、動作パラメータをいったん最適化し、その後で、動作速度に悪影響のある部分を補正するという手順にすることで、高速な動作パラメータ最適化技術を実現した。

4.2 動作パラメータの最適化

ロボットを高速に動作させるためには、速度 $\dot{\theta}$ ・加速度 $\ddot{\theta}$ のパラメータをロボットのトルクリミットを超えない範囲で最大化する必要がある。一般には加速度は固定して速度のパラメータを変化させて調整が行われている。ロボットの関節にかかるトルクは(1)式に示した通り、慣性トルク $M(\theta)\ddot{\theta}$ や摩擦トルク $F(\dot{\theta})$ の和で表現されるが、高速に動作する垂直多関節ロボットにおいては慣性トルクの影響が一番大きい。(1)式の通り、慣性トルクは加速度の大きさにより決まり、摩擦トルクは速度の大きさによって決まる。したがって、垂直多関節ロボットの関節のトルク負荷が最も高まるのは、図9で示すように加減速が発生したタイミングとなる。



(a) 速度・加速度・トルクの関係 (b) トルクの内訳
図9 関節にかかるトルクと速度・加速度の関係

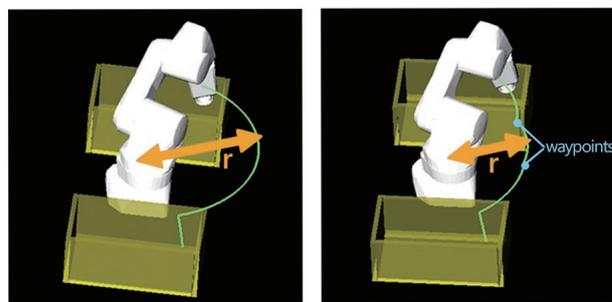
以上から、一般にされているように速度を調整するのではなく、加速度を調整する方が効果は高いことが分かる。そこで、本研究ではロボットの速度はユーザー指定の任意の値かロボット仕様値の最大値のどちらかに固定し、加速度を調整してロボットの動作を高速化させることとした。

加速度は以下の手順で調整する。

1. 経路・与えられた最大速度・ロボット仕様の加速度の 50%の値を使って軌道を生成し、1 msec ごとに離散化して各関節にかかるトルクを計算する
2. 算出した各関節のトルクの時系列データから関節ごとにピークを抽出し、ピーク位置でのトルクとトルクリミットの差が閾値以下で、かつすべての関節がトルクリミットを超えていなければその加速度を最適値として設定する
3. ピークトルクがトルクリミットを超過または差が閾値よりも大きい場合は、二分探索で条件を満たす値になるまで加速度を調整し、1.に戻る

4.3 経路の補正

加速度パラメータでロボットの動作を高速化することを考えたとき、慣性トルク $M(\theta)\ddot{\theta}$ の $M(\theta)$ 部分の値が大きければ、加速度を十分に高くすることができない。 $M(\theta)$ 部分の値が大きいということは、図10で示すような関節の回転中心と質点の距離 r が長くなり、慣性の大きくなるような姿勢が経路上に存在するということである。



(a) 慣性の大きい経路 (b) 慣性の小さい経路
図10 慣性の大きい経路と小さい経路

慣性が大きくなるような経路になっていた場合、動作時間が長くない範囲でロボットの姿勢を慣性が小さくな

るように補正することができれば、加速度をさらに大きくすることができる。しかし、経路のすべての区間・すべての関節に対して変更可能かどうかを評価するのは、関連研究で挙げた最適化問題として解く手法と同様の処理となり、計算時間が長くなる。

そこで、関節第1軸に着目して探索範囲を限定し、経路を変更する部分を第2・3軸に限定することで、短時間で補正可能な部分を特定する。第1軸に着目する理由は、垂直多関節ロボットでは根元に近い軸にかかる慣性ほど低減の効果が高いからである。また、変更を第2・3軸にのみ限定するのは、第1軸にかかる慣性は第2・3軸の影響が大部分であるのが理由である。以下に補正方法を説明する。

まず、経路上で第1軸に律速している連続した区間を補正対象区間として抽出する。抽出した区間のうち、第1軸の変化量が十分に長く、区間の中央に第2・3軸を動かして腕を折りたたむ中間点を追加しても動作の減速が発生しないエリアを軌道データから抽出する。そして、第2・3軸をいったん折りたたんでから元の状態に戻すのにかかる時間が、第1軸が補正区間を動くのにかかる時間を超えないように第2・3軸の変化量を設定する。以上の方法で、慣性が小さくなるように経路を補正できる。なお、第1軸に律速する区間とは経路上の隣り合った中間点間において、関節ごとの変化にかかる時間で第1軸の時間が最大になっている区間のことである。

4.4 ロボット動作高速化の効果

動作パラメータの最適化による加速度の最大化と経路の補正による慣性の最小化を交互に繰り返すことで、ロボット動作を限界まで高速化できる。以下に、評価結果を示す。実験ケースは図11に示すような、ロボットの第1軸が180°動きつつ、コンテナから手先を出し入れする動作5パターンで、動作高速化技術を適用する前後の動作時間を比較した。

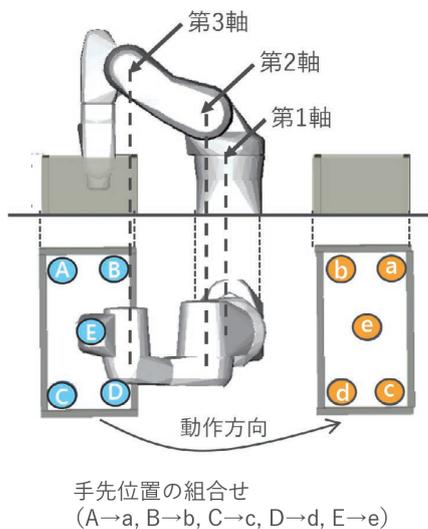


図11 動作高速化技術の評価パターン

動作時間の比較の際は、ロボット実機動作のばらつきの影響を小さくするため、高速化適用前後の動作をそれぞれ1000回実行して各回の動作時間を計測し、高速化前の動作時間は1000回のうちの最小値、高速化後の動作時間は最大値を使って評価した。また、経路の算出と動作最適の計算は経路計画の評価と同じ計算機で行っている。表4に動作時間の高速化比率と経路計画を含む計算時間を示す。

表4 ロボット動作高速化評価結果

実験ケース	高速化比率 (%)	最大計算時間 (msec)
A → a	24.7	95.1
B → b	19.4	97.1
C → c	28.1	96.5
D → d	28.3	85.3
E → e	23.3	90.0

以上から、100 msec以下の計算時間で動作時間を約20%高速化できていることが確認できた。

5. 実装したデモシステム

5.1 システム概要

本研究で開発したロボット動作自動生成技術と3Dセンサを組み合わせてばら積みピッキングのデモシステムを開発した。ロボットはオムロンのViper650、センサと認識処理は開発目標の見積りに使用したロボット用3Dセンサを使用している。図12にデモシステムの外観を示す。

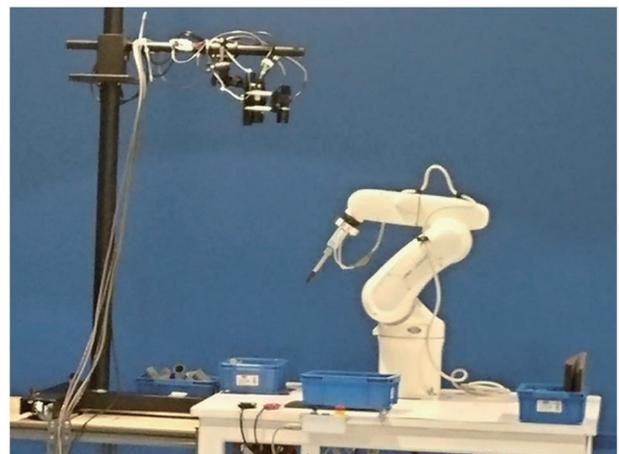


図12 開発したデモシステム

デモシステムでは、ユーザーがGUIから所定のデータを登録することで、ティーチングやパラメータ調整を行うことなくピッキングアプリケーションを実現できる。登録の必要なデータは以下のものである。

- ・ センサ位置
- ・ ばら積みトレイの位置
- ・ 整列トレイの位置
- ・ 整列する座標情報
- ・ ピッキングするワークの CAD 形状
- ・ ロボットハンドの形状・仕様

これらは設備の設計に必要なデータのみであり、ロボットの動作生成のための特別なデータは必要ない。

5.2 性能評価

デモシステムで6種類の電子部品のばら積みピッキングをしたタクトタイムを評価した。タクトタイムは図3で示した Pick 動作と Place 動作のペアを実行するのにかかる時間 20 回を平均したもので、初回のセンシングから動作生成の時間は評価に含めない。評価結果を表5に示す。

表5 デモシステムのタクトタイム

ワーク (寸法, cm)	タクトタイム (sec)
A (2×3×1)	2.9
B (3×3×2)	2.7
C (15×1×0.5)	2.9
D (1×1×1)	2.9
E (1×0.5×1)	2.9
F (1×1×0.5)	3.0

この結果は、センシングから動作生成にかかる時間はすべて Place 動作中に完了することで達成されており、計算処理のためのロボット停止は発生していない。以上から、デモシステムが人同等のタクトタイムでピッキングできていることが確認できた。

6. むすび

本研究では、ロボットの生産現場への普及を妨げている要因の一つである、垂直多関節ロボットの動作生成の困難さという問題の解決に取り組んだ。開発した技術はロボットの位置姿勢の設定と動作パラメータ調整を自動で行うロボット動作自動生成技術である。前者は状況に応じたアルゴリズムの選択と干渉判定処理の効率化により短時間での動作生成を実現した。後者はロボットの動作時間に対して効果の高い加速度パラメータを最適化することと、慣性を軽減するように経路を補正することを繰り返し実行することで、ロボットの動作を限界まで高速化することができる。これらの技術は高速に処理可能なので、大量のティーチングが必要なばら積みピッキングにも対応でき、構築したばら積みピッキングのデモシステムでは人と同等のタクトタイムを実現した。開発成果は、ばら積みピッキングア

プリケーションやロボットティーチングツールとして商品化の見込みである。

今後は、より複雑なロボットシステムにも対応できるよう、複数台のロボットの同時・協調動作の自動生成への拡張を検討している。

謝辞

本論文の成果は、2016年から2019年にかけての研究開発をまとめたものである。

執筆者のほかにも本研究開発に尽力した中島茜氏、森谷俊洋氏、殿谷徳和氏、鈴木章洋氏、倉谷僚一氏に深く感謝申し上げます。

また、本研究の要件設定と商品化検証にご協力いただいた OMRON Research Center of America 及び OMRON Robotics and Safety Technologies, Inc. のメンバに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 近畿経済産業局. “平成 27 年度「産業用ロボットの分野展開における導入阻害要因調査」”. 経済産業省. 2016-05-31. <https://www.kansai.meti.go.jp/3jisedai/report/report2015.html>, (参照 2020-11-16).
- 2) 比留川博久. 経路探索問題—ロボットの動作計画—. 情報処理. 1994, Vol.35, No.8, p.751-760.
- 3) Loeff, L. A. Algorithm for Computer Guidance of a Manipulator in Between Obstacles. Diss. Oklahoma State University, 1973.
- 4) Schwartz, J. T.; Sharir, M. On the “piano movers” problem. II. General techniques for computing topological properties of real algebraic manifolds. Advances in Applied Mathematics. 1983, Vol.4, No.3, p.298-351.
- 5) LaValle, S. M. Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning. Computer Science Dept. Oct. 1998, Vol.98, No.11.
- 6) LaValle, S. M.; Yakey, J. H.; Kavraki, L. E. “A probabilistic roadmap approach for systems with closed kinematic chains”. Proceedings of 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 99CH36288C). 1999, Vol.3. p.1671-1676.
- 7) Kuffner, J. J.; LaValle, S. M. “RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning”. Proceedings of 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No. 00CH37065). IEEE, 2000, p. 995-1001.
- 8) Jaillet, L.; Cortés, J.; Siméon, T. “Transition-based RRT for path planning in continuous cost spaces”. 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2008, p.2145-2150.
- 9) Gammell, J. D.; Srinivasa, S. S.; Barfoot, T. D. “Batch informed trees (BIT*) : Sampling-based optimal planning via the heuristically guided search of implicit random geometric graphs”. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2015, p.3067-3074.
- 10) Ratliff, N., et al. “CHOMP: Gradient optimization techniques for efficient motion planning”. 2009 IEEE International Conference on

- Robotics and Automation. 2009, p. 489-494.
- 11) Kalakrishnan, M., *et al.* "STOMP: Stochastic trajectory optimization for motion planning". 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2011, p.4569-4574.
 - 12) Schulman, J.; Ho, J.; Lee, A. X.; Awwal, I.; Bradlow, H.; Abbeel, P. Finding Locally Optimal, Collision-Free Trajectories with Sequential Convex Optimization. Robotics: Science and Systems. 2013, Vol.9, No.1, p.1-10.
 - 13) LaValle, S. M. PLANNING ALGORITHMS. Cambridge University Press, 2006, 842p., ISBN978-0-52186-205-9
 - 14) Rickert, M.; Sieverling, A.; Brock, O. Balancing exploration and exploitation in sampling-based motion planning. IEEE Transactions on Robotics. 2014, Vol.30, No.6, p.1305-1317.
 - 15) Ericson, C. Real-Time Collision Detection. CRC Press, 2005, 632p., ISBN978-1-55860-732-3.
 - 16) Gaschler, A.; Fischer, Q.; Knoll, A. The bounding mesh algorithm. Technical Report TUM-I1522, Technische Universität München, 2015.

執筆者紹介



小島 岳史 KOJIMA Takeshi
 技術・知財本部
 研究開発センタ
 専門：ソフトウェア工学



林 剣之介 HAYASHI Kenosuke
 技術・知財本部
 研究開発センタ
 専門：電気電子工学



藤井 春香 FUJII Haruka
 技術・知財本部
 研究開発センタ
 専門：ソフトウェア工学



細見 心一 HOSOMI Shinichi
 イノベーション推進本部
 アグリオートメーション事業推進室
 開発部
 専門：ソフトウェア工学
 博士（情報科学）

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

プレイヤーのモチベーションコントロールを実現する卓球ロボットシステム

中山 雅宗, 栗栖 崇紀, 水野 勇太, 三宅 陽一郎, 八瀬 哲志

我々は、人と機械の未来の関係性「融和」を訴求するために、人とラリーを継続しインタラクティブする卓球ロボット「フォルフェウス」を開発している。年々の開発により卓球ロボットの返球性能は高まっているが、単調なラリーが続く傾向があり、ラリーを継続するためのモチベーションが低下してしまう問題があった。

そこで我々は、人がラリーを継続して行うことに対するモチベーションを向上させることを目的としたインタラクティブ機能を提案する。人の動作と生体情報を非接触で計測し、卓球技能と感情を推定する技術を開発した。また、スクウェア・エニックスの「メタ AI」を組み込むことで、人を心地良くし集中力を高めさせるような返球計画を実装した。本機能により、体験者の 8 割以上において卓球ロボットとラリーを継続するためのモチベーションが向上された。人の限界を引きだし成長を促すという観点で「融和」を体現することができた。

The Ping Pong Robot to Control Motivation of a Human-Player

NAKAYAMA Masamune, KURISU Takanori, MIZUNO Yuta, MIYAKE Youichiro and YASE Satoshi

We are developing a Ping Pong Robot called “FORPHEUS” which can keep table tennis rally and interact with people to appeal the “Harmonization”, which is future relationship between humans and machines. Although the performance of the table tennis robot has been improving year by year, player’s motivation to keep a rally tended to decrease because of the tendency for rallies to be monotonous.

Therefore, we propose an interaction system to control player’s motivation to continue a rally. In our work, the table tennis robot can measure player’s motion and vital signals to estimate the skill and emotion. In addition, we also implemented a ball-return planning to make the player feel comfortable and focused using a “MetaAI” of SQUARE ENIX. This system could control the motivation to keep a rally of more than 80% of players and also realize “Harmonization” in teams of bringing out the players’ maximum capability and promoting their growth.

1. まえがき

我々は、オムロンの創業者である立石一真の掲げた理念「機械にできることは機械に任せ、人間はより創造的な分野での活動を楽しむべきである」の下、人と機械の関係性について検討してきた。社会や技術の変化と連動して変化していく人と機械の関係性について、「代替」「協働」「融和」の順に変化していくと考えている。かつての人の作業を機械に担わせる状態が「代替」であり、機械が人の目的に合わせて共に作業を行う状態が「協働」である。そして、機械が人の意図を理解し人がより創造的な活動を行う

ように支援する状態が「融和」である。

我々は、オムロンの考える人と機械の未来の関係「融和」を訴求するために、人とラリーを継続する卓球ロボット「フォルフェウス」を開発している^{1,2,3}。2013年から開発が行われ、一般公開の展示としては2014年 CEATEC JAPANに初代の卓球ロボットを出展して以来、毎年新機能の搭載、性能向上に向け開発を行い、進化を遂げてきた。

我々は「人と機械の融和」を具現化した卓球ロボットの実現に向け、下記の2つの技術が必要であると考えている。

Contact : NAKAYAMA Masamune masamune.nakayama@omron.com

- (1) ロボットが卓球タスクを実現する技術
例：高速高精度なピン球の計測技術
高速高精度なロボット制御技術など
- (2) 人を理解し、人に介入する技術
例：動作解析技術
感情推定技術
ヒューマンマシンインタラクション技術など

(1)は、コンピュータビジョンやロボティクスの研究題材として古くから研究されている。(2)に関しては、コンピュータビジョン、認知心理学、及びエンターテインメント等の広い分野で研究が進められている。特に、人の行動変容にはモチベーションを引きだすことが重要であると考えられており、その実現手法として、ゲーミフィケーションが注目されている。

我々は、人が最大限のパフォーマンスを発揮し、成長を加速させるには、モチベーションを高く維持させることが必要であると考えた。従来の卓球ロボットは、(1)に注力して技術開発が進められており、初心者から上級者まで幅広い技能の方と卓球ラリーを行うことができていた。2016年に人の動作から技能を判定し、それに合わせてラリーを行う機能が搭載された。しかし、その結果単調なラリーが続くことが多く、人のモチベーションが下がることが多かった。

スクウェア・エニックスでは、メタ AI という技術をゲームに実装することで、プレイヤーの感情に応じて敵キャラクターの行動を変化させるようなゲームの楽しさを提供している^{4,5)}。例えば、FINAL FANTASY® XV に搭載されたメタ AI は、プレイヤーと各仲間の状態を監視して、プレイヤーがピンチの場合、近くにいて戦闘中でないような、支援に最適な仲間が駆けつけることを実現している⁶⁾。このように、メタ AI は、ゲーム全体の状況を認識し、変化させ、プレイヤーの感情を揺さぶる。その結果プレイヤーを飽きさせずにモチベーションを維持することができる。

我々は卓球ロボットにメタ AI を導入することで、卓球ラリーをしている人のモチベーションコントロール (Moti-Ctrl) を実現できるのではないかと検討した。メタ AI は、ゲームという外部ノイズの小さい理想的な環境下で構築されたアルゴリズムである。一方、卓球をしている人の動きは激しく外乱が大きいため、メタ AI をそのまま導入するのは困難であった。

我々は、メタ AI を導入することにより Moti-Ctrl 機能を実現させるために⁷⁾、人の動作から技能を詳細に判定する技術と非接触で人の生体情報を取得し感情を推定する技術を開発した。本稿ではこの内容について報告する。

以下、第2章で卓球ロボットの構成について述べ、第3章では本機能を実機検証にて評価する。最後に、第4章で

まとめと今後の展望について述べる。

2. 卓球ラリーを実現する技術

自社製品や技術の訴求のために、卓球ロボットは産業用ロボットやカメラ等の汎用機器で構成されている (図1)。

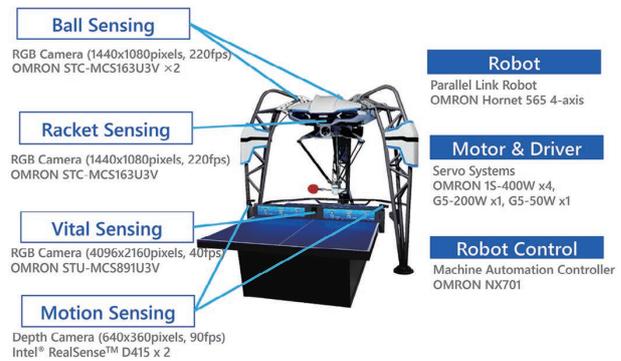


図1 卓球ロボットの構成

以下、卓球ロボットが卓球を実現する技術として、ピンポン球 (以下、ピン球)、人動作、及びラケットを計測する技術、ピン球の将来の軌跡を予測する技術、及びロボットの返球に関する動作生成技術について述べる。

2.1 ピン球、人動作、ラケットの計測

ピン球の位置計測には、解像度1440×1080pixels, 220fpsの産業用RGBカメラ (STC-MCS163U3V, OMRON) を2台使用している。カメラはロボットの頭部左右に設置されており、視野が卓球台全域を含むようになっている。2台のカメラで取得されたそれぞれのRGB画像に対して、照明変動に頑健なHSV色空間に変換し、二値化処理、ノイズ除去を行う。その後、事前に取得されたカメラ内部パラメータを用いて、レンズ歪みの補正処理を行う。続いて、被写体を異なる位置から撮影した画像の同一点に成立する関係であるエピポーラ拘束により左右画像のピン球候補点の絞り込みを行い、重心抽出を行う。最後に、カメラ外部パラメータを用いたステレオ法により、ピン球の3次元位置を算出する⁸⁾。

人の動作計測には、解像度640×360pixels, 90fpsのデプスカメラ (Realsense D415, Intel) を2台使用している。卓球時の人の動作は大きいため、1台のカメラでは自分の身体の一部が他の身体の一部を隠してしまう自己オクルージョンが発生しやすい。そのため、卓球台ネットの両端にカメラを設置し、卓球を行う人の上半身を2方面から撮像するようにしている。2台のカメラで取得されたそれぞれの深度画像に対して、骨格推定ミドルウェア (Nuitrack, 3DiVi) を用いることで、上半身骨格12点の3次元位置と信頼性を取得する⁹⁾。続いて、各骨格の信頼性に基づき人のダイナミクスモデルの制約を加えることで、高精度な骨

格位置を算出する¹⁰⁾。

人の持つラケットの位置姿勢計測には、解像度 1440×1080pixels, 220fps の産業用 RGB カメラ (STC-MCS163U3V, OMRON) を 1 台使用している。カメラはロボットの頭部中央に設置されており、人の斜め上から撮像する。ラケットには 9 個のマーカースीलが貼付されており、ピン球計測と同等の手法で重心位置を算出している。マーカースीलの数が少ない場合、平面の姿勢推定には曖昧性が伴うため、ラケット面の法線周りの回転成分を除去し、自由度を削減した Perspective-n-Point (PnP) 問題を解くことで、ラケットの位置姿勢を一意に求める¹¹⁾。

2.2 ピン球の軌跡予測

卓球は、ピン球の移動が非常に高速であるため、ピン球の移動に合わせてロボットを制御すると間に合わない。そのため、ピン球の位置計測後にピン球の将来の軌跡を求め、想定打点位置にロボットを移動させておく必要がある。ラリー中のピン球の運動は、空気中を移動する球体周りに作用する空力モデルで近似することができる。以前の我々の開発した手法により、計測されたピン球の時系列の位置変化から、ピン球の速度と回転速度を算出する。また、ピン球と卓球台の衝突を記述する衝突モデルを用いることで、衝突後のピン球の軌跡予測を行う³⁾。

2.3 ロボットの返球動作計画

ピン球の将来の軌跡から、ロボットの可動域を考慮した打点を決定する。事前に設定した人側の卓球台の目標返球位置、速度、及び回転速度に対し、2.2 で用いた空力モデルを用いて時間を逆時間発展させることで、ロボットが打球直後のピン球の満たすべき速度と回転速度を求める。続いて、これらの情報と打球直前のピン球の速度と回転速度を用いて、ピン球とラケットの衝突モデルにより、打球時のラケットの速度と姿勢を算出する³⁾。

3. Moti-Ctrl を実現する技術

人を心地よくし集中力を高めさせるインタラクションにより、人がラリーを継続するためのモチベーションを維持することを目指し、Moti-Ctrl 機能を開発した。まず、ピン球と骨格情報から人の技能の推定を行う。フォアハンドとバックハンドそれぞれで返球が可能な限界速度を算出する。また、ピン球と顔の動画像から取得できる生体情報から感情推定を行う。ラッセルの円環モデル¹⁵⁾に基づき、快/不快指数と覚醒/鎮静指数を算出する。最後に、技能推定と感情推定で算出された値を用いて、メタ AI の概念に基づき卓球ロボットの返球位置と返球速度を決定する (図 2)。

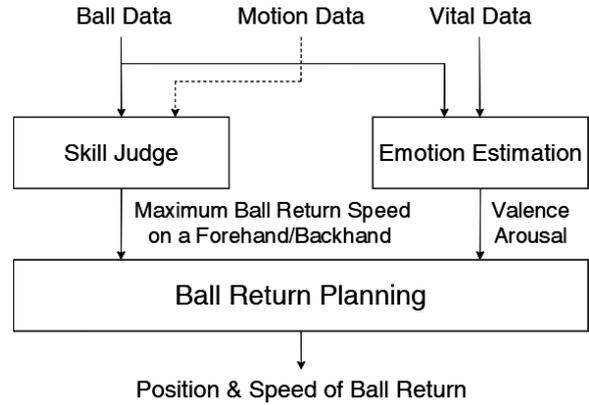


図 2 Moti-Ctrl 機能のシステムフロー

以下、Moti-Ctrl 機能を実現する技術として、人の卓球技能を推定する技術、人の生体情報を非接触で取得する技術、人の感情を推定する技術、及び人のモチベーションを維持するような返球計画を策定する技術について述べる。

3.1 技能推定

人が卓球のラリーを継続するモチベーションを高めるためには、まずロボットが体験者の卓球技能に合わせてラリーの難易度 (球速・コース・回転・ランダムさなど) を迅速に調節する必要がある。2016 年にはディープレニングによるラリーレベル調整機能が卓球ロボットに実装された。しかし、この機能はアノテーションが設計者の主観によって行われており、体験者にとって不適切なラリー難易度を与えてしまう課題がある。したがって今回開発する技能推定では、体験者がぎりぎり返球可能なロボットの返球難易度を客観的な指標と定め、これを少数の卓球ラリーから推定することを目指す。今回は体験者の多くが初心者であることを踏まえ、基本的な難易度の要素である返球速度と返球コースに注目し、体験者が一定の確率以上で返球可能なロボットの最大返球速度をフォアハンド・バックハンドごとに推定する。

展示会でデモンストレーションは体験時間が短いため、少数の卓球ラリーから技能推定を行う必要がある。そこで動作情報、特に 2.1 で得られる骨格情報に注目して事前の学習的手法によってこれを実現することを試みる。技能推定の処理フローを図 3 に示す。まず体験者のスイング動作を切り出し、動作分類手法によってフォアハンド/バックハンドを判定する。そのあと、スイング分類ごとに学習的手法により最大返球速度を推定する。

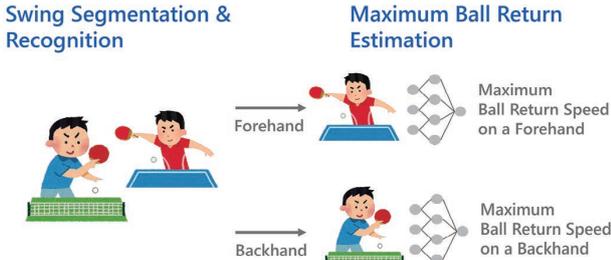


図3 技能推定のシステムフロー

スイング動作の切り出しは2.1で得られるボール位置時系列情報を用いる。ロボットが返球して、ピン球が人側の卓球台に到達した時刻から、人が返球してピン球がロボット側の卓球台に到達した時刻までを1スイングと定義し、一連の人の骨格位置情報を抽出する。動作分類では過去の実績¹²⁾と今後の開発における拡張性から隠れマルコフモデル(以下HMM)による学習的手法を用いる。今回はスイング動作の切り出しで得られた骨格データのうち、ラリー中に主要な動きが現れる腰から肩、腰から肘、及び腰から手首に向けた3つの3次元位置ベクトルの時系列情報 x に注目する。事前に様々な体験者のフォアハンド・バックハンドの骨格情報を取得しておき、スイングごとにHMMを保持しておく (M_{Fore} , M_{Back} とする)。HMMとしては一方向に変化する時系列情報の認識に有効な left-to-right 型のHMMを用いる。今、新しい体験者のスイング時系列骨格情報 x が得られたとき、以下の式によってフォアハンド・バックハンドを判定する。なおここで、 $s = \{Fore, Back\}$ である。

$$Swing = \arg \max_{i \in s} P(x|M_i) \quad (1)$$

次にフォアハンド・バックハンドごとに体験者が台上に一定の確率以上で返球可能なロボットの最大返球速度の推定を行う。まず最大返球速度の定義を行う。いま、ある体験者がいろいろな速度・コースで飛来するロボットの返球に対して相手側の台中心のターゲットを狙って卓球ラリーを行った時のデータを図4に示す。この時のロボットの返球速度に対するターゲットと着弾位置間の誤差の関係から最大返球速度を算出する。具体的には図4のようにターゲットからの誤差0.75mを閾値として返球できたか否かを判定し、ロボットの各返球速度における体験者の返球確率を0.5m/sec.ごとにその近傍のおよそ20点のデータから算出し図5のような返球率のグラフを得る。そして返球率が85%を下回る時の最大のロボット返球速度を最大返球速度とする(図5)。

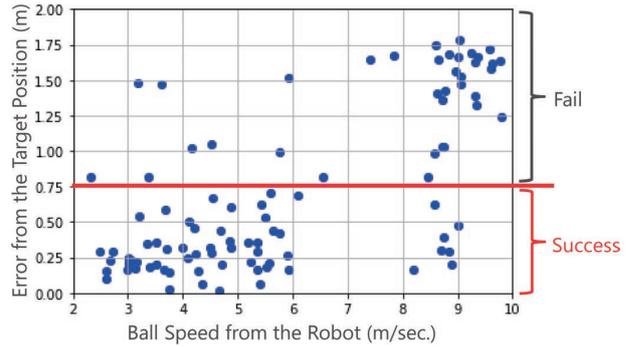


図4 データ取得結果と返球可否判定

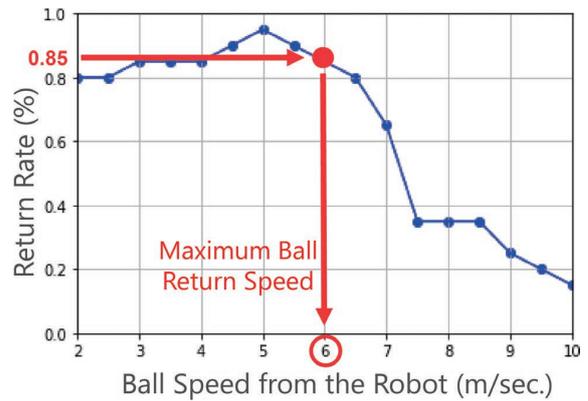


図5 最大返球速度の算出方法

このように最大返球速度は多数の様々な速度の球に対するラリー結果が実際に得られなければ正しく定めることができない。しかしながら展示会ではそのような多数の球を打つ時間は想定できない。したがって今回は、一回のスイング動作と最大返球速度の関係を事前に学習しておくことで、多数の球を新規体験者に打たせることなく一回のスイング動作からその最大返球速度を推定することを目指す。

事前学習は以下の手続きで行う。まずは多数の被験者に対するデータ取得を行う。今回は18~50才までの健康な30名(うち女性5名)に対して事前データ取得を行った。卓球技能レベルの内訳は、卓球部に現役所属している超上級者レベルの被験者が5名、過去に卓球部に所属していた上級者レベルの被験者が5名、卓球部に所属していないが趣味等で卓球を行っている中級者レベルの被験者が12名、ほとんど卓球を行ったことがない初級者レベルの被験者が8名である。各被験者に対して様々な速度・コースで飛来するロボットの返球に対して相手側の台中心のターゲットを狙って卓球ラリーを行う課題を実施し、その際のボールデータ、骨格データを取得する。次に、体験者の各スイングの時系列骨格情報を入力データとして最大返球速度を出力する回帰学習モデルをニューラルネットワークによりフォアハンド・バックハンドごとに構築する。入力データとしては時系列骨格情報のうち技能レベルをより反映する

と考えられる、肩から肘・肘から手首に向けた3次元時系列位置情報と、肩・肘の時系列関節角度情報を用いる。また、これらのデータに対してノイズ除去のためのローパスフィルタ処理、体験者ごとの体格差をなくすための骨格正規化処理、ロボットの返球位置の違いによるスイング差の影響をなくすための標準化処理、ニューラルネットワークを入力するための時間正規化処理を施す。データ取得中での最大返球速度の変化は無いと仮定し、個人内での複数の入力データに対する出力データは全て等しくなるようにラベル付けした(表1)。この入出力データを用いることで回帰モデルを事前学習する。

表1 入力データと出力データの関係

Person	A			B			...
Data Pair	1	...	10	11	...	20	...
Ball Speed from the Robot	3.0m/sec.	...	8.5m/sec.	4.5m/sec.	...	7.0m/sec.	...
Swing Skeleton	Swing A	...	Swing J	Swing K	...	Swing T	...
Maximum Ball Return Speed	8.0m/sec.			3.0m/sec.			...

ニューラルネットワークとしては、30名の被験者という少ないデータセットを用いることからパラメータ数の少ないノード数16、3層程度の全結合モデルを用い、入力層は時系列データをすべて並列に入力する形、出力層は最大返球速度回帰結果として1つの値のみが出力される形で実現する。実際の推定の際には、切り出される時系列骨格情報を入力として1ラリーごとに最大返球速度を出力する。そして直近10ラリー分の出力値の平均値をフォアハンド・バックハンドごとに算出することで最大返球速度の推定値とする。また、本機能は「体験者が卓球台の中心を狙って打ち返す」ときのデータを基にして最大返球速度の推定を行っているため、むやみにスマッシュを打ち込んだり、台のコーナーを意図的に狙って打ち返したりというような体験者には適用できないことに留意されたい。

3.2 非接触生体情報計測

生体情報計測には、解像度4096×2160pixels, 40fpsの産業用RGBカメラ(STC-MCS891U3V, OMRON)を1台使用している。カメラは、卓球台ネットの中央に設置されており、人の顔を正面から撮像する。人の顔動画像から表情、瞬目、脈拍を非接触で取得する。全体のフローを図6に示す。

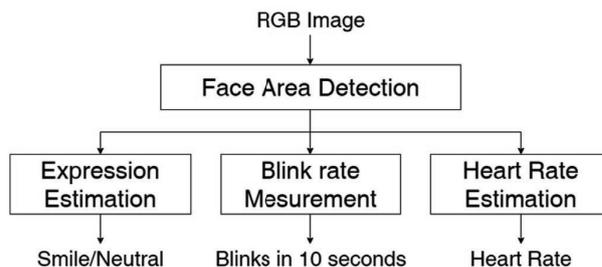
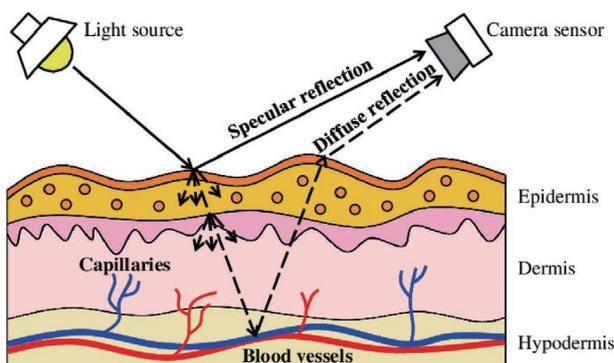


図6 生体情報計測のシステムフロー

画像から顔認識を行うOKAO Vision¹³⁾のミドルウェアを使用し、顔の領域、笑顔度、真顔度、及び左右の瞬目度を取得する。一定時間の左右の瞬目度の平均値の極値が事前に設定した閾値を超えた回数を瞬目数とする。

また、顔の皮膚領域の画像からremote-Photoplethysmography (rPPG)により、脈拍推定を行う。血中に含まれるヘモグロビンは500-600nmの波長に吸光ピークを持っているため、この波長に関わる輝度の変化を解析することで、脈拍を推定することができる。本研究では、脈拍推定を行う際に図7の皮膚拡散モデルを考える¹⁴⁾。



出典：参考文献14)

図7 皮膚拡散モデル¹⁴⁾

人の皮膚は、外側から表皮と真皮の2層で構成されている。また、真皮の内側の皮下組織内に血管が張り巡らされており、一部の毛細血管が真皮に到達している。光が表皮に到達すると、一部は内部に透過し、一部は反射される。内部に透過された光は真皮も透過し、皮下組織内の血管まで達する。そこで反射された光は、真皮と表皮を透過し、表皮外で拡散される。表皮で反射した光と表皮から拡散された光の2種類の光がカメラで取得される。よって取得された情報から後者のみを抽出することで脈拍依存の輝度変化を取得することができる。脈拍推定のフローを図8に示す。

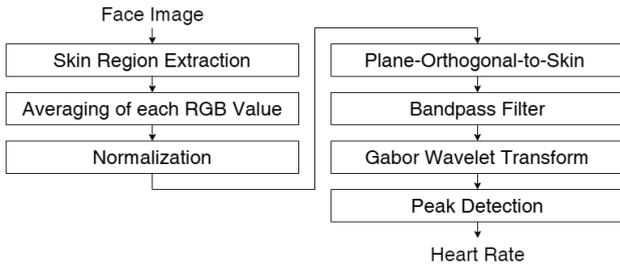


図8 脈拍推定のシステムフロー

OKAO Visionによりトリミングされた顔領域に対し、照明変動に頑健かつ皮膚判定に広く使われている YCrCb 色相空間に閾値を設けることで皮膚領域を抽出する。続いて、皮膚領域内の RGB それぞれの値を平均化し、一定時間の時系列データに対して、正規化処理を行うことで、データに含まれるトレンドを除去する。卓球という動作の激しい状況を対象にしているため、被写体の動きに頑健な Plate-Orthogonal-to-Skin (POS) アルゴリズムにより、時系列データから脈拍依存の信号を抽出する¹⁴⁾。その後、正常時の心拍の範囲である 60~180bpm に対応する 1~3Hz に関するバンドパスフィルタを適応し、パルス信号からノイズを除去する。続いて、信号の時間領域の情報を失わずに周波数解析を行うために、ガウス関数を窓関数としたガボールウェーブレット変換によりスペクトログラムを算出する。最後に 1~3Hz 内に存在する極値のうち、最大値を示すところを脈拍の周波数として抽出する。

3.3 感情推定

人の感情推定に関する研究は、ヒューマンマシンインタラクションの分野で広く行われている。手法は大きく2つに分類することができ、表情や瞳孔変化などの表層情報から推定する手法と心拍数や脳波などの深層情報から推定する手法に分類することができる。また、スポーツにおいては、パフォーマンスと感情に強い相関があると考えられる。よって本研究では、表層情報、深層情報、及び卓球のパフォーマンスの情報を組み合わせることで高精度に感情を推定することを試みる。感情モデルとしては、快/不快の指標と覚醒/鎮静の指標の2つで表現されるラッセルの円環モデルを採用する¹⁵⁾。2.1節で取得されるラリーの継続回数c、人の打球速度vと3.2節で取得される人の笑顔度s、真顔度n、脈拍変動値h、及び瞬目数bを用いて快/不快の指標xと覚醒/鎮静の指標yを算出する。今回は、実装が容易であり、リアルタイム性を担保するために、単に入力情報と出力情報の関係は線形であると仮定し、式(2)のように表現する。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = A[s \quad n \quad h \quad b \quad c \quad v]^T \quad (2)$$

Aは2×6の行列であり、式(3)のような成分を有する。

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & a_3 & 0 & a_5 & a_6 \\ 0 & a_8 & 0 & a_{10} & a_{11} & a_{12} \end{bmatrix} \quad (3)$$

笑顔度と脈拍変動が快/不快との相関が強く、覚醒/鎮静に与える影響が小さいことと、真顔度と瞬目数が覚醒/鎮静に強い相関を持ち、快/不快に大きな影響を与えないと知られているので¹⁶⁾、影響が小さい成分を0に設定している。続いて残りの各成分の求め方を述べる。卓球初心者13名に卓球ロボットと5分程度ラリーをして頂き、ラリー情報と生体情報を取得する。卓球ロボットは被験者の技能レベルに関わらずランダムな速度とコースで返球するように設定する。ラリーが途切れた直後にアンケートを行い、ラリー毎の快/不快と覚醒/鎮静の値の変化を記録する。感情に関する絶対的な評価を行うのは困難であるため、1ラリー前との相対的な評価を実施する。ラリー情報と生体情報が変化した際の快/不快と覚醒/鎮静の変化値の期待値を算出し、それをAの成分とする。その結果、 a_1, a_3, a_8 は正の値であり、 a_{10} は負の値である。これは先行研究での報告¹⁶⁾と定性的に等しい結果である。

3.4 返球計画策定技術

2.3のロボットの返球動作を決定する際に、事前に人側の卓球台の目標返球位置、速度、及び回転速度を設定する必要がある。今回は回転速度を一定にし、返球位置と速度を変化させることで人がラリーを継続するためのモチベーションを向上させることを試みる。人の感情を常時観察して、それを揺さぶるメタAI⁴⁾の設計を参考にし、人の感情の推移によって、ロボットの返球計画を変化させるようにする。返球速度は3.3で出力された値を初期値とし感情推移により変動させていく。本機能のアルゴリズムを図9に示す。

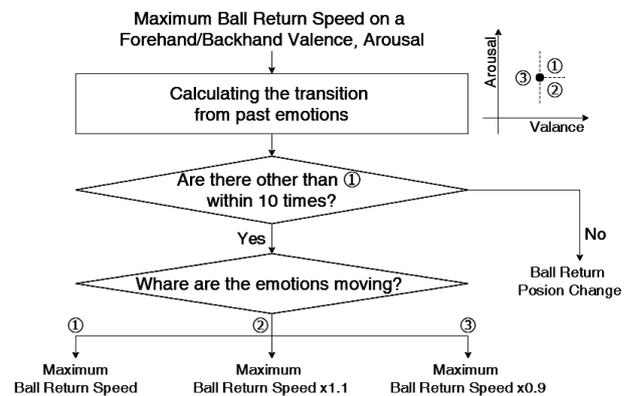


図9 返球計画のシステムフロー

1スイング前からの感情の推移と大きく3パターンに分類する。

- (1) 快指数と覚醒指数がともに増加する
- (2) 快指数が増加し、覚醒指数が減少する
- (3) 快指数が減少する

(1)は現状の返球計画が人にとってちょうど良く、ラリー継続に対するモチベーションが向上している状態であるため、返球計画を変えずに継続していく。(2)は現状の返球計画を簡単に感じており、退屈になっている状態であるので、返球速度を増加させる。一方、(3)は現状のタスクを困難であると感じており、不安を感じている状態であるため、返球速度を減少させる。また、一定回数(2)あるいは(3)が継続する場合は、返球コースを切り替えることで、継続してラリーを行うためのモチベーションの向上を試みる。

4. 実証実験

本章では、提案した Moti-Ctrl 機能の有効性評価について述べる。

4.1 実験手法

卓球初心者 27 名に、Moti-Ctrl 機能ありと、Moti-Ctrl 機能なし（目標返球位置、速度は固定）の場合それぞれ 5 分間ラリーして頂き、その後下記の 3 項目に関してアンケートを取得した。

- (1) どちらが気持ちよくラリーできたか
- (2) どちらが集中してラリーできたか
- (3) どちらともう一度ラリーしたいか

(1)は快/不快の指標に関わり、(2)は覚醒/鎮静の指標に関わるものである。(3)はラリーに対するモチベーションに関わる質問として設定した。卓球の慣れによるアンケート結果への影響を除くために、実験前に十分に被験者にはラリーをして頂いた。また、被験者には、事前に Moti-Ctrl 機能の内容は伝えず、機能有無の順番はランダムに実験を行った。

4.2 実験結果と考察

3 項目のアンケート結果を図 10 に示す。

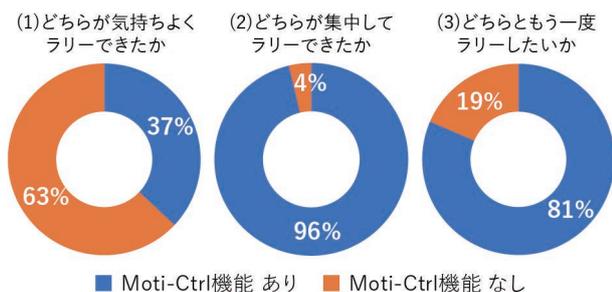


図 10 機能有無のアンケート結果

Moti-Ctrl 機能が無い方が気持ちよくラリーできる傾向があり (63%)、Moti-Ctrl 機能がある方が集中してラリーでき (96%)、ラリー継続のモチベーションが高い傾向がみられた (81%)。

Moti-Ctrl 機能がある際に気持ちよくラリーできる傾向が見られなかった理由として、返球計画への反映に問題があったと考えられる。本機能があるラリーのリズムが一定でなくなるため、ラリーを継続させることが困難であったことが考えられる。その結果、気持ちよくラリーできる割合が低下する可能性がある。また、卓球ロボットとのラリーをする時の被験者の意図が 1 種類でないことが考えられ (勝ちたい、ラリーを継続したい、ロボットの様子を伺いたい等)、その結果、快/不快の指標とラリーを継続するためのモチベーションの関係が薄くなってしまった可能性が考えられる。今後、さらに幅広い人のモチベーションを向上させるためには、下記 3 点が必要だと考えられる。

- (1) 人の意図を理解する機能
- (2) 取得情報の高精度化
- (3) 返球計画以外のインタラクション手法

(1)に関しては、人の動作やラリーパターンの時系列情報から人の意図を推定することができると考えられる。その意図をロボットが汲み取ることで、意図に応じたモチベーション維持に寄与することができると期待される。(2)に関しては、接触型デバイスによる生体情報計測の精度向上、新たなセンサにより呼吸や発汗を取得、及び時系列の取得情報から感情を推定することで、より高精度な感情推定が期待できる。また、技能推定に関しては、ボールの情報とプレイヤーの動作だけでなく、プレイヤーの視線や筋活動のような生体情報も取得して考慮することで精度向上を見込むことができる。(3)に関しては、ロボットの返球動作だけでなく、ラリーや人の状況に合わせて、視/聴/触覚を用いた新たなインタラクションを検討していく。

5. むすび

本研究では、人の卓球ラリーを継続することに対するモチベーションを向上させるインタラクション機能の開発を行った。非接触で取得された人の動作や生体情報から、技能と感情を推定し、メタ AI に基づく返球動作を実装した。その結果、8 割以上の体験者のモチベーションを向上させることができた。

今後は、4.2 での課題を克服し、より幅広い人のモチベーションを向上させることを目指す。また、「人と機械の融和」の更なる訴求に向け、「人と人」、「人と機械」の関係性に着目し、ラリーを通じてその関係性をよりよくするインタラクションを開発していく。

参考文献

- 1) 山田圭佑. 卓球ラリーロボット一人と機械の融和を目指して一. 電気学会誌. 2017, Vol.137, No.2, p.81-84.
- 2) 仁科有貴, 諏訪正樹, 川出雅人. 卓球ロボットにおける画像センシング技術・AI技術活用. O plus E. 2017, Vol.39, No.12, p.1195-1200.
- 3) 浅井恭平, 中山雅宗, 八瀬哲志. ピン球の回転速度を考慮することで高精度な返球が可能な卓球ロボットシステムの開発. OMRON TECHNICS. 2018, Vol.50, No.1, p.174-179.
- 4) 三宅陽一郎, 水野勇太. “人工知能 (メタ AI) を用いたゲームデザインの変革”. Computer Entertainment Developers Conference. 2017. https://cedil.cesa.or.jp/cedil_sessions/view/1757, (参照 2021-1-28).
- 5) Satoi, D.; Mizuno, Y. “Changing the Game: Measuring and Influencing Player Emotions Through Meta AI”. Game Developers Conference. 2019. <https://schedule2019.gdconf.com/session/changing-the-game-measuring-and-influencing-player-emotions-through-meta-ai/861775>, (参照 2021-1-28).
- 6) 株式会社スクウェア・エニックス「FFXV」AIチーム. FINAL FANTASY® XV の人工知能—ゲーム AI から見える未来—, p.116-117.
- 7) 三宅陽一郎, 中山雅宗, 藤田健介, 水野勇太. “卓球ロボット「フォルフェウス」におけるゲームAI技術の応用”. Computer Entertainment Developers Conference. 2020. <https://cedec.cesa.or.jp/2020/session/detail/s5e83300d562e1>, (参照 2021-1-28).
- 8) 中山雅宗. オムロンのコア技術 “Sensing&Control+THINK” の集大成 卓球ロボット FORPHEUS—「人と機械の融和」の実現に向けて一. O plus E. 2019, Vol.469. <https://www.adcom-media.co.jp/report-iss/2019/09/25/32422/>, (参照 2021-1-28).
- 9) NUITRACK. “Nuitrack Full Body Skeletal Tracking Software”. <https://nuitrack.com/>, (参照 2020-12-21).
- 10) Yeung, K.; Kwok, T.; Wang, C. Improved Skeleton Tracking by Duplex Kinects: A Practical Approach for Real-Time Applications. Journal of Computing and Information Science in Engineering. 2013, Vol.13, No.4, p.041107.
- 11) Schweighofer, G.; Pinz, A. Robust Pose Estimation from a Planar Target. TR-EMT. 2005, Vol.28, No.12, p.2024-2030.
- 12) Yamato, J.; Ohya, J.; Ishii, K. “Recognizing human action in time-sequential images using hidden Markov model”. Proceedings 1992 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Champaign, IL, USA, 1992, p.379-385.
- 13) OMRON. “OKAO Vition”. <https://plus-sensing.omron.co.jp/technology/>, (参照 2020-12-21).
- 14) Wang, W.; Brinker, D.; Sander, S.; Gerard, D. Algorithmic Principles of Remote PPG. IEEE. Transactions on Biomedical Engineering. 2017, Vol.64, No.7, p.1479-1491.
- 15) Russell, J. A Circumplex Model of Affect. Journal of Personality and Social Psychology. 1980, Vol.39, No.6, p.1161-1178.
- 16) Ikeda, Y.; Sugaya, M. Estimate Emotion Method to Use Biological Symbolic Information Preliminary Experiment. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2016, Vol.9743, p.332-340.

執筆者紹介



中山 雅宗 NAKAYAMA Masamune

技術・知財本部 研究開発センタ
 専門：画像処理、機械工学、生体工学



栗栖 崇紀 KURISU Takanori

技術・知財本部 研究開発センタ
 専門：動作解析、技能拡張



水野 勇太 MIZUNO Yuta

株式会社スクウェア・エニックス
 テクノロジー推進部 AI Unit
 専門：メタ AI



三宅 陽一郎 MIYAKE Youichiro

株式会社スクウェア・エニックス
 テクノロジー推進部 AI Unit
 専門：デジタルゲームにおける人工知能



八瀬 哲志 YASE Satoshi

技術・知財本部
 テクノロジープロデュースセンタ
 専門：電気電子工学

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

3D TOF センサモジュールへの誤差補正及び 3次元座標変換の組み込み

田中 宏行, 石井 昭宏

近年、工場で使用される自律走行ロボット、介護ロボットなど様々なサービスロボットにおいて、広い視野角で3次元(3D)の情報を取得できる3D TOFセンサに注目が集まっている。3D TOFセンサは空間の情報を取得できることから、これまで使用されてきた変位センサや2次元カメラからの代替が期待されている。TOF方式とは光の飛行時間から距離を計測する方式であり、TOFセンサは一般的なCMOSイメージセンサと同様に撮像した情報を電圧出力として読み出し、この出力データから距離を計算する。計算後の距離はセンサ毎に様々な要因の誤差を含むので、高い精度を得る為にはセンサ毎に適切な補正処理を行う必要がある。また、センサから直接得られるのは一次元の距離情報のみである為、距離情報と角度情報を合わせた3次元座標への変換処理も必要となる。これらの距離計算、補正や変換といった後処理をユーザ側のシステムで作り込むことは、ユーザ側の開発に大きな負担を生じさせる。

我々は、これらの処理をセンサ内で実現する為に、処理に必要な演算式は各センサ共通に組み込み、演算に必要なパラメータは出荷時に個体毎に最適なものを書き込む仕組みを搭載した3D TOFセンサモジュールを開発し、1コマンドで3次元情報が高精度に取得できる機能を実現した。

Incorporating Error Correction and 3D Coordinate Conversion in 3D TOF Sensor Module

TANAKA Hiroyuki and ISHII Akihiro

In recent years, 3D TOF sensors that can acquire three-dimensional information with a wide viewing angle have been attracting attention in various service robots such as autonomous driving robots used in factories and nursing care robots. Since the 3D TOF sensor can acquire spatial information, it is expected to replace the displacement sensors and 2D cameras that have been used so far. In TOF method, distance is measured from the flight time of light. TOF sensor reads the imaged information as a voltage output and calculates the distance from this output data, as in a general CMOS image sensor. Since the calculated distance data includes errors due to various factors for each sensor, it is necessary to perform appropriate correction processing for each sensor in order to obtain high accuracy. Further, since the distance data directly obtained from the sensor is one-dimensional information, it is necessary to convert the distance information and angle information into three-dimensional coordinates. Incorporating post-processing such as distance calculation, correction and conversion in the user's system creates a heavy burden on the user's development.

In order to execute these processes in the sensor, we have developed a 3D TOF sensor module equipped with a mechanism that incorporates common arithmetic expressions required for the processes and sets the optimum parameters for each sensor at the time of shipment. As a result, we have realized a function that can acquire 3D information with high accuracy with a single command.

Contact : TANAKA Hiroyuki hiroyuki.tanaka@omron.com

1. まえがき

近年少子高齢化の進行による労働力人口の不足から、工場で使用される自律走行ロボット、介護ロボットといった様々なサービスロボットが広がりを見せており、広い視野角で 3 次元の情報を取得できる 3D TOF センサに注目が集まっている。3D TOF センサは空間の情報を取得できることからこれまで使用されてきた変位センサや 2 次元カメラからの代替が期待されている¹⁾。

TOFとはTime of Flight（飛行時間）の略で、光源から放射された光が対象物に反射して返ってくるまでの時間をもとに距離を計測する方式である。TOF センサは、一般的な CMOS イメージセンサと同様に撮像した情報を電圧出力として読み出し、この出力データから距離を計算する。この距離データを用いて 3 次元情報に変換することになる。一般的にはこれらの演算を行うためのソフトウェア開発キット（SDK）が提供されているが、検出距離の高精度化を実現するには画素毎の誤差・レンズ組立の誤差・温度による誤差を個体毎に補正する必要があり、これらはユーザで開発していくことになり負担を生じている。

我々はこの負担を省くために、距離計算、補正や変換に必要な数式はセンサ内部に組み込み、これらの処理に必要なパラメータは個体毎に最適なものを使用できる仕組みとすることでセンサ内での処理を可能とし、高精度を実現できる技術を開発した。

2. TOF の検出原理

2.1 TOF とは

TOFでは、光源から発せられた光が検出器に到達する時間を計測することで距離を算出する。

距離 d は、飛行時間 t_{TOF} 、光の速度 c により式(1)から算出できる。

$$d = \frac{c}{2} t_{TOF} \tag{1}$$

この飛行時間を計測する手法は、直接法と間接法の 2 つに大きく分類される。

直接法では、光源から発せられた光が対象物にあたり、その反射光が検出器に到達するまでの時間を計測することで、光の飛行時間から距離を算出する。

間接法では、光を周期的に点滅させた発射光と対象物に反射して戻ってくる反射光の位相差から距離を算出する²⁾。

2.2 位相差方式

本 TOF センサでは間接法（位相差方式）を採用している。図 1 は位相差方式の原理を示している。投光部から放射された赤外光（投光波）は対象物に当たって反射し、戻ってきた赤外光（受光波）は受光部で検出される。対象

物までの距離は投光波と受光波の位相差 pd をもとに計算できる。投光波を放射するタイミング及び受光波を検出するタイミングは、制御回路から投光部、受光部に入力される信号により制御される。投光波に対して、0 度、90 度、180 度、270 度の位相遅延のタイミングで受光波を検出すれば、各タイミングにおける受光量と位相差 pd との関係は、図 2 のようになる。ここで、ベクトル x は位相遅延 0 度の受光量と位相遅延 180 度の受光量の差分ベクトル、ベクトル y は位相遅延 90 度の受光量と位相遅延 270 度の受光量の差分ベクトルであり、位相差 pd は、ベクトル x とベクトル y の合成ベクトル $x + y$ が X 軸となす角度に相当する。また、合成ベクトル $x + y$ の大きさは、受光強度（振幅値）に相当する。

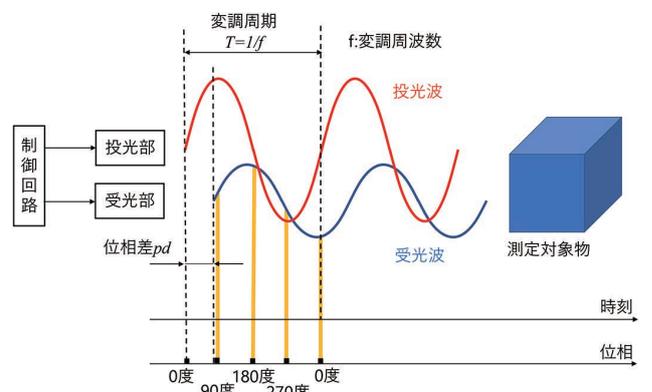
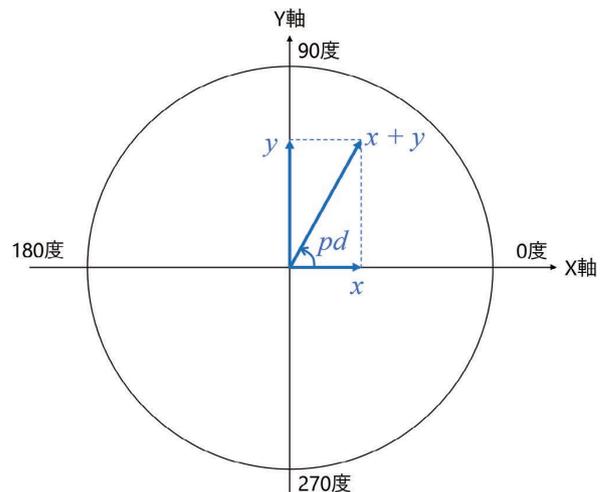


図 1 TOF 検出原理



x : 0 度の受光量と 180 度の受光量の差分ベクトル
 y : 90 度の受光量と 270 度の受光量の差分ベクトル

図 2 受光量と位相差 pd の関係

受光は、光により受光部内の素子で発生した電荷を蓄積することで得られる。図 3 に電荷蓄積の仕組みを模式的に説明する。

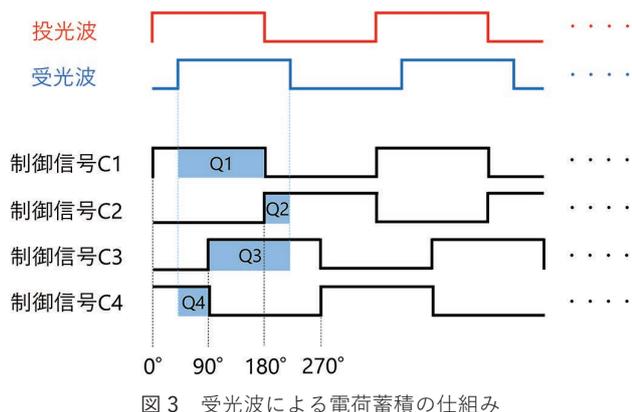


図3 受光波による電荷蓄積の仕組み

制御信号 C1 は投光波に対し位相遅延なしで生成される。電荷量 Q1 は、C1 の立ち上がりから立ち下がりまでの期間において受光した光に相当する。同様に、電荷量 Q2、Q3、Q4 は、それぞれ C2、C3、C4 の立ち上がりから立ち下がりまでの期間において受光した光に相当する。

C1 と C3、C3 と C2、C2 と C4 の間には互いに 90 度の位相遅延の関係がある。したがって、受光は蓄積された電荷量に対応すること、位相差 pd と受光の間に図2の関係があることから位相差 pd は、得られた4つの電荷量 Q1、Q2、Q3、Q4 を用いて、式(2)から算出できる。

$$pd = \arctan\left(\frac{Q3 - Q4}{Q1 - Q2}\right) \quad (2)$$

測定できる最大距離は投光波1波長の半分となり $c/2f$ で表すことができる。ここで、 c は光の速度、 f は投光波の周波数である。位相差 pd に相当する距離 d は、式(3)に示すように最大距離に $pd/2\pi$ を乗じることで算出できる³⁾。

$$d = \frac{c}{2f} \frac{pd}{2\pi} \quad (3)$$

受光により得られた電荷量の大きさは、合成ベクトル $x + y$ の大きさである受光強度（振幅値）Amp に相当し、式(4)から算出できる。

$$Amp = \frac{\sqrt{(Q2 - Q1)^2 + (Q4 - Q3)^2}}{2} \quad (4)$$

この Amp 値が大きいくほど反射光が十分であるといえ、距離算出はより正確になる。

3. 技術的課題

TOF センサの用途として想定される自律走行ロボットでは、距離精度が低いと対象物との距離が正確でなく、衝突に繋がる恐れがある。また、人や物の判別、状態を検知するようなアプリケーションでは誤検出されることが想定される。このような事象を防ぐためには高い距離精度が求められる。

2章の検出原理より、距離は式(2)(3)から算出されるこ

とから、電荷量が正確であることが必要である。

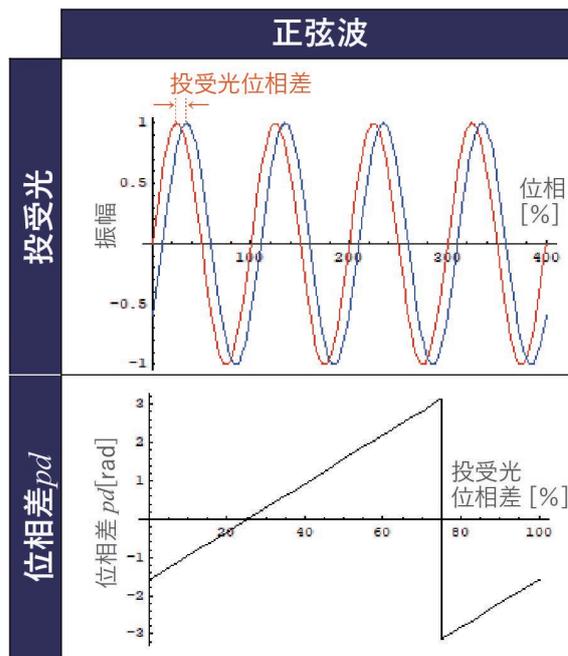
電荷量は受光部のイメージセンサや集光するレンズ、投光部の発光回路に依存している。これらは、それぞれにロット、個体毎に固有のばらつき・誤差要因を有しており、ハードウェア的に完全に抑え込むことが難しく、個体毎に補正処理を行う必要がある。

しかし個体毎の補正処理をユーザが実施することは誤差要因の特定と対策が必要であるため負担となる。補正処理に関するユーザへの負担を軽減しつつ補正効果を最大化する為には、必要となる各種補正を個体毎に行う仕組みをセンサに組込む必要がある。また、蓄積される電荷量は対象物の距離や反射率にも依存するので、測定可能な距離を広げることや様々な対象物を測定する上での課題もある。

以下、補正処理が必要となる各種誤差についての課題を述べる。

3.1 距離の直線性に対する課題

式(2)を用いて求めた位相差 pd は、投光した赤外光が理想的な正弦波のときには、投受光の位相差の変化に対して直線的に変化する。一方、投光した赤外光が矩形波のときには、投受光の位相差の変化に対して波打って変化する。図4は投受光が正弦波/矩形波のそれぞれの場合で、投受光位相差に対して式(2)を用いて位相差 pd を計算したシミュレーション結果を示したグラフであり、投受光が矩形波の場合、位相差 pd は波打った変化となっていることがわかる。位相差 pd が波打った変化となる為、式(3)を用いて pd から求めた距離 d も同様に波打った変化となる。



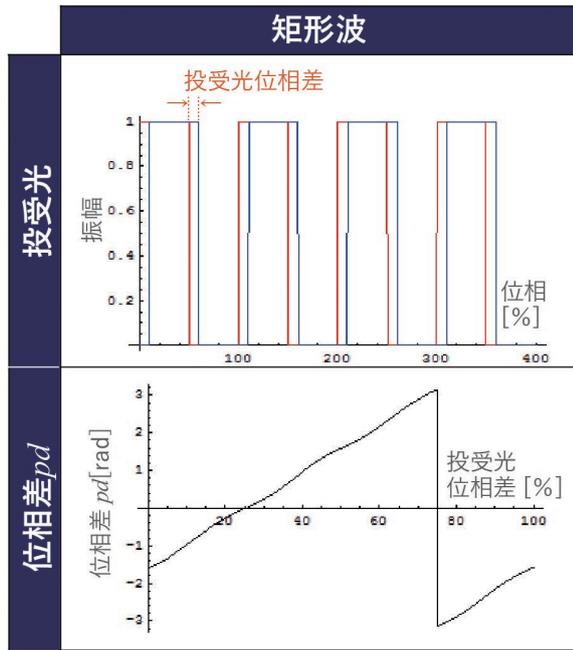


図4 投受光波形の違いによる位相差 pd の計算結果

図5は、実距離に対する出力距離を示したグラフである。横軸が実距離、縦軸が出力距離であり、矩形波投光を行った際の出力距離を青色でプロットしている。グラフから、実際の出力距離は赤の直線で示す理想的な出力距離に対して歪んでいることがわかる。これは、計測する対象物の位置によって距離値が実際よりも近く出力されてしまうことや、遠く出力されてしまうことを意味しており、安定した距離計測を行うためには距離の直線性を得ることが課題となる。

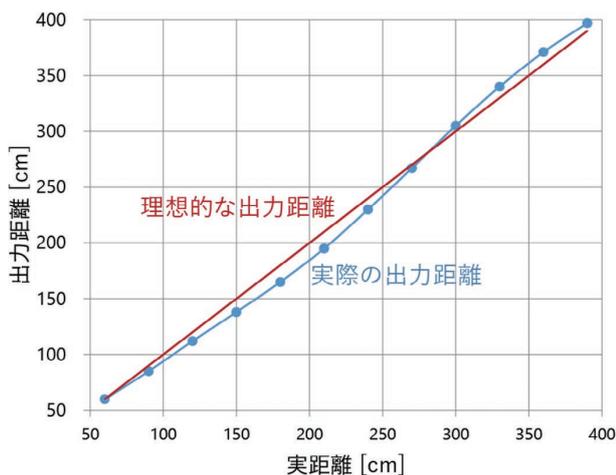


図5 出力距離の歪

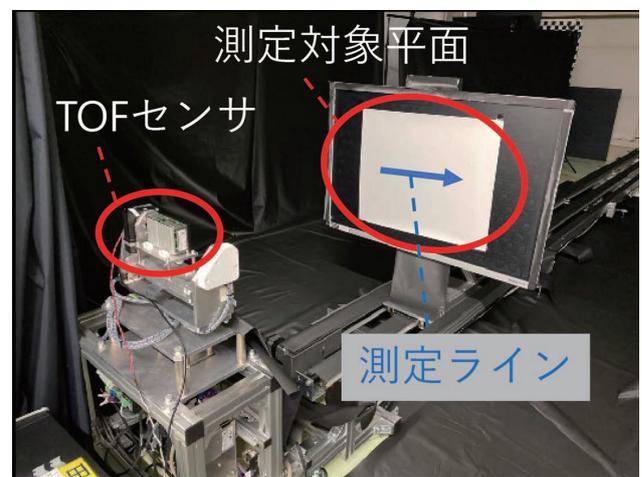
3.2 距離の画素間ばらつきに対する課題

画素毎の直線性が得られたとしても、画素間における距離の出力にはばらつきがあり、平面上の同じ距離に対して均一な距離が出力されない。図6は平面を測定した際の出力距離

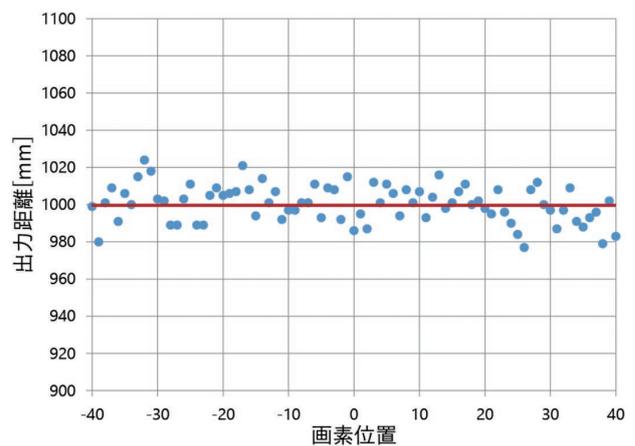
離のばらつきを示したものである。図6 (a) は測定環境を示しており、TOF センサから 1m 離して測定対象平面を設置している。図6 (b) の青色のプロット点は、図6 (a) の測定対象平面の青線で示す中央の 1 ラインに相当するイメージセンサ上の各画素位置にて画素が出力する距離値を示している。線上の中心から ± 40 画素分の各画素の位置を横軸、各画素の出力距離を縦軸にとる。一様な平面を測定した場合、理想的には赤線に示すような距離出力が得られるが、実際には赤線に対してばらついた距離値となっていることがわかる。

ばらつきは主に次のような要因で生じる。

- ・画素の光電変換の感度
- ・画素の電荷を AD 変換する誤差



(a) 測定環境



(b) 画素位置と出力距離

図6 平面を測定した際の距離ばらつき

3.3 温度変化による距離変動に対する課題

図7は対象物の位置が一定のもので、温度を変化させた場合の出力距離を示したグラフである。横軸が温度、縦軸が出力距離であり、各温度における出力距離を青色でプ

ロットしている。図7中に赤の直線で示すように温度変化に依存せず一定の距離値を出力することが理想であるが、実際には温度上昇に伴って“遠い”距離を出力するようになっていることがわかる。このような温度変化に伴う距離の変動を抑制し、温度変化に対して安定な距離計測を行うことが課題となる。

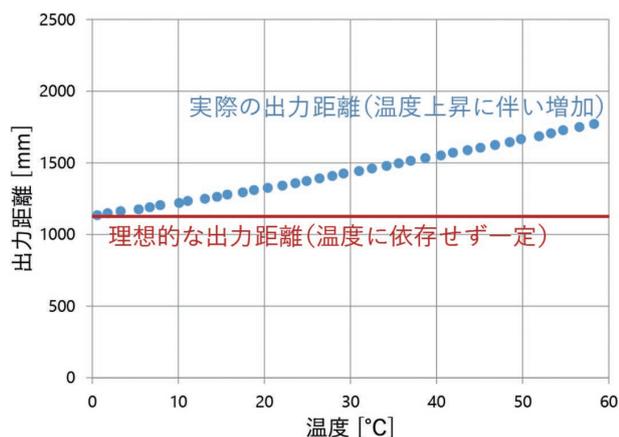


図7 出力距離の温度変動

温度変化による距離の変動は主に次のような要因で生じる。

- ・制御回路から投光させるタイミングの遅延
- ・制御回路から受光させるタイミングの遅延
- ・画素の光電変換の感度

3.4 測距レンジ及び対象物反射率に対する課題

2.2節で述べたように測定できる最大距離値は投光波の周波数により決まるが、測定するには十分な電荷量を蓄積する必要がある。そのため、実際に測定できる距離はイメージセンサで電荷を蓄積する時間によって決まり、蓄積される電荷量は受光する光量に依存する。式(4)で示したように電荷量は受光強度(振幅値) Amp にて表すことができ、Amp 値は 0-255 に規格化されて算出される。Amp 値は対象物の距離が遠い場合や反射率が低い場合に小さくなり、対象物の距離が近い場合や反射率が高い場合に高くなる。その為、遠い対象物や反射率の低い対象物を測定する為には電荷を蓄積する時間を長くすることで十分な受光量を確保する必要がある。

一方、近い対象物や反射率の高い対象物を測定する為には電荷を蓄積する時間を短くする必要がある。これは、イメージセンサの画素が蓄積できる電荷量に上限がある為で、電荷を蓄積する時間が長いと電荷量が飽和して、距離が正しく計算できなくなる。

図8に蓄積時間による測距レンジの違いを測定した環境を示す。TOF センサからの距離 1m、2m、4m の各位置に反射率 56.3% の白紙と反射率 5.5% の黒紙を張り付けた

ボードを設置し測定している。図9に蓄積時間による測距レンジの違いを示す。図9(a)に蓄積時間 3200 μ s の測定結果、図9(b)に蓄積時間 200 μ s の測定結果を示す。図9(a)(b)では、近距離～遠距離までを赤～青の色の変化で表しており、Amp 値が 255 を超えるときは電荷の飽和を意味し紫色、Amp 値が 0 のときは受光量不足により距離が正しく計算できないことを意味し黒色で示している。図9(a)では 4m の距離の対象物が測定できているが、1m、2m の距離では黒紙より反射率が高い白紙は、電荷が飽和し距離を正しく測定できていない。一方、図9(b)では電荷の飽和は見られないが、1m、2m、4m の距離で白紙より反射率の低い黒紙の距離が正しく測定できていない。

つまり、測定したい対象物までの距離や反射率に応じて蓄積時間を設定する必要がある、このことは距離の近い対象物と距離の遠い対象物、反射率の低い対象物と反射率の高い対象物を同時に測定できないことを意味し、測距レンジ・対象物反射率レンジを広げることが課題となる。

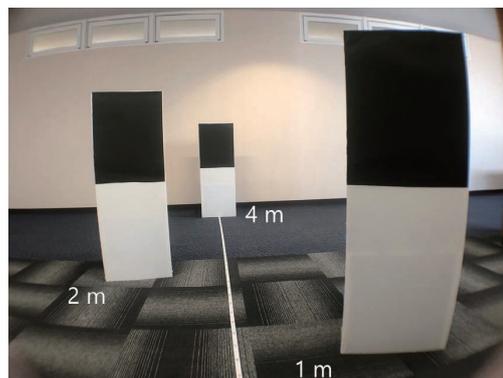


図8 測距レンジ測定環境

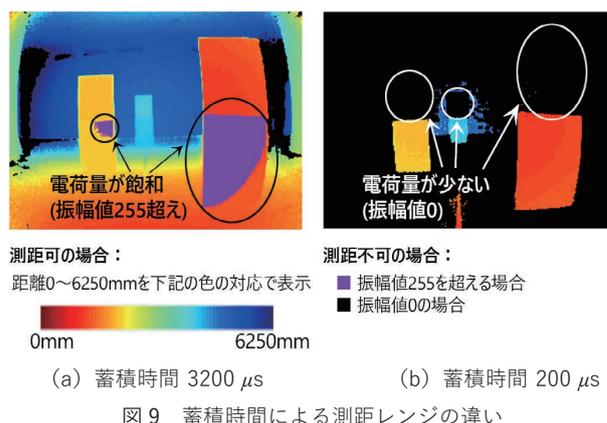


図9 蓄積時間による測距レンジの違い

3.5 3次元変換に対する課題

3D TOF センサは一般的な CMOS イメージセンサのように撮像範囲内の距離情報を取得できるが、これは各画素から対象物までの 1次元の距離情報を取得しているのみである。対象物の大きさや形、または対象物間の距離を測る用

途においては、3次元座標情報の取得が必要となる。

1次元の距離情報を3次元座標情報に変換する為には、イメージセンサから得られる各画素の距離情報に加えて、各画素がレンズを通して見通す角度の情報が必要になる。図10に1次元の距離と3次元座標の対応を示す。図10のXYZ空間上の原点にレンズが組み付けられたイメージセンサが位置しており、レンズの光軸中心はZ軸と一致しているものとする。 r の大きさはイメージセンサから得られる距離値に相当する。 r の向きはイメージセンサ上の各画素がレンズを通して見通す向きであり、画素毎に θ と φ によって一意に決まる。

θ 及び φ の値はレンズを組み付ける際に個体毎に存在する軸ずれや歪みによる角度誤差を含む。図11にX軸方向に20画素軸ずれさせた θ 、 φ の値を用いて求めた出力座標Zを示す。測定環境は図6(a)と同様に平面を測定し、青線で示す中央の1ラインに着目する。図11のグラフは、この線上の中心から±20画素分の各画素の位置を横軸、出力座標Zを縦軸にとり、各画素位置における出力座標Zを青点でプロットしている。出力座標Zは図11中に赤の直線で示すように画素の位置に依存せず一定の座標値を出力することが理想であるが、軸ずれによる角度誤差の影響で画素位置に依存して変化してしまっていることがわかる。このような角度誤差の影響を考慮して3次元座標への変換を行うことが課題となる。

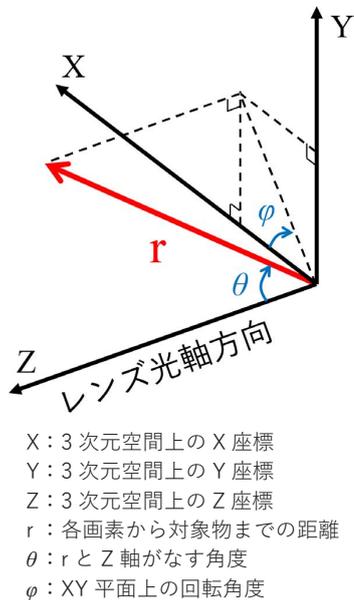


図10 1次元の距離情報と3次元座標の対応

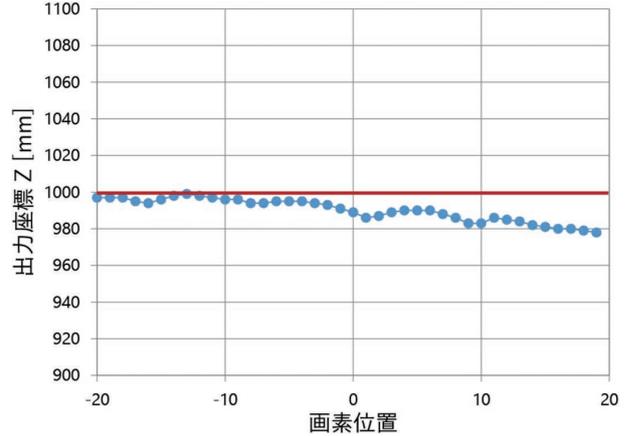


図11 軸ずれによる出力座標Zの変動

4. 補正方法及びその効果

3章で述べた通り、距離出力結果は各要因による誤差が含まれ、これらの誤差は個体毎に固有な物であることから、個体に合わせた補正を行う仕組みが必要である。従来はこれらの補正を共通のPCソフトで行っており個体毎に最適な補正とはなっていなかった。

我々のTOFセンサに搭載されている演算ブロックは、図12に示す通り、SoC、外部メモリ、内蔵ROMから構成されている。補正や変換などの演算式はSoC内部に組み込まれている。演算に必要な個体毎の固有パラメータ情報については、出荷時に最適なものをテーブル化して内蔵ROMに書き込んでいる。ユーザがTOFセンサを起動すると、テーブルデータを内蔵ROMから外部メモリに読み出し、イメージセンサから取得した位相データを用いてSoCにて距離演算及び補正、座標変換の演算を行う。

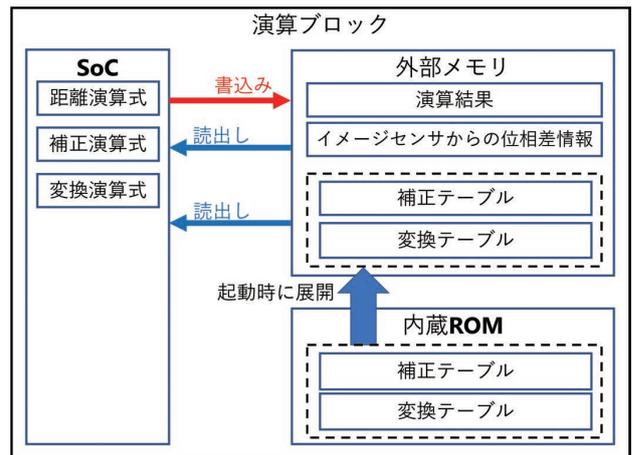


図12 演算ブロックの構成

以降、3章で述べた距離精度を得る為の個別の課題に対する解決策及びその効果について述べる。

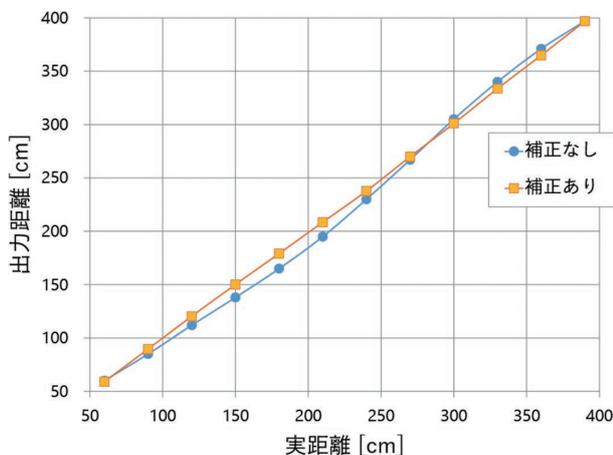
4.1 距離の直線性の補正

補正前の距離値は3.1節の図5に示すように、理想的な直線に対する歪みを有している。

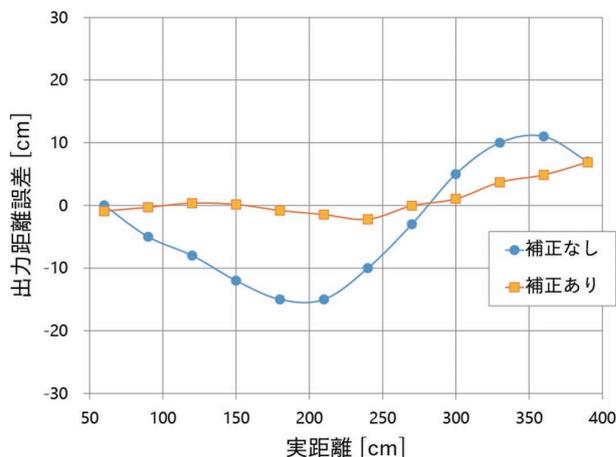
理想的な直線に近づける為に、投光波が矩形波から正弦波になるような駆動回路を実装した。しかしながら、現実には理想的な正弦波を得ることは困難であり、得られた距離値に対する補正も必要となる。

補正を行う為に必要となる、歪み量を計算する為のパラメータは個体毎に求めておき、出荷時にテーブル化してセンサ内部に格納する。歪み量の計算には、各センサ共通に独自の式を設定し組み込んでいる。センサ使用時には、個体毎に固有のテーブルを用いて歪み量を求める為、各センサで最適な補正済み距離を出力することが可能となる。

図13(a)は、実距離と出力距離の関係を示したグラフであり、横軸にイメージセンサから対象物までの実際の距離値、縦軸にイメージセンサが出力する距離値を示している。図5で示したグラフと同様の補正無しのを青色でプロットし、本補正を実施して得られた補正ありのものを橙色でプロットしている。図13(b)は、図13(a)における出力距離の真値からの誤差を縦軸として取りなおして示している。図13(a)(b)の補正ありのものと補正なしのものを比較すると、補正ありのものは補正なしのものと比較して距離の直線性が向上しており、距離の誤差も減少している。



(a) 実距離と出力距離



(b) 実距離と出力距離誤差

図13 直線性補正の結果

4.2 距離の画素間ばらつき補正

画素毎の距離の直線性が得られた上で、画素間のばらつきを抑える為に空間フィルタを用いた画素間の距離値の平滑化を合わせて行う。図14にフィルタ有りとフィルタ無しによる画素間の出力距離のばらつき比較を示す。測定環境は図6(a)と同様に平面を測定し、青線で示す中央の1ラインに着目する。図14のグラフは、このライン上の中心から±40画素分の各画素の位置を横軸にとり、各画素の出力距離を縦軸にとったものである。青色で示すプロット点がフィルタ無しの場合であり、橙色で示すプロット点がフィルタ有りの場合である。このグラフより、フィルタリングを実施した後ではフィルタリングを実施する前に比べて、画素間のばらつきが軽減されている。

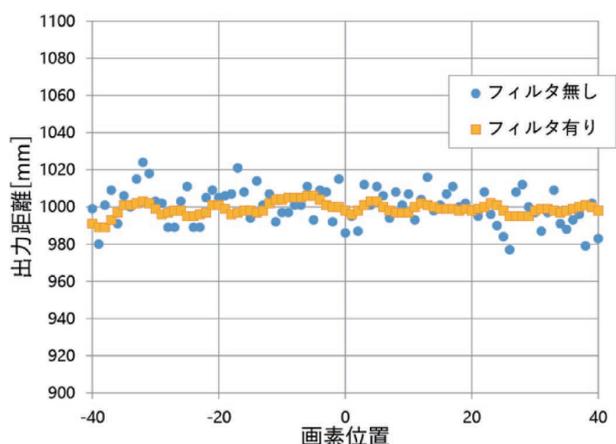


図14 画素間ばらつき補正の効果

4.3 温度変化による距離変動の補正

3.3節で述べた通り、温度変化に伴う投光/受光タイミングの遅延は距離値の変動を生じさせる。我々のTOFセンサでは、投光部の温度を取得する温度センサと受光部(イ

メージセンサ) の温度を取得する温度センサをそれぞれ搭載している。

温度による距離値の変動量は、投光部、受光部それぞれの回路のばらつきに依存して変化する。

補正を行う為に必要となる、投光部の温度に依存する距離変動量を計算する為のパラメータと受光部の温度に依存する距離変動量を計算する為のパラメータは個体毎に求めておき、出荷時にセンサ内部に格納する。距離変動量の計算には、各センサ共通に独自の式を設定し組み込んでいる。センサ使用時には、個体毎に固有のパラメータと、使用時の投光部及び受光部の温度を用いて距離変動量を求める為、各センサで最適な補正済み距離を出力することが可能となる。

図 15 は、温度と出力距離の関係を示したグラフであり、横軸にイメージセンサの温度、縦軸に出力距離を示している。図 7 で示したグラフと同様に補正前距離を青色でプロットし、この値に対して本補正による補正計算を実施した結果を補正後距離として橙色でプロットしている。補正前距離と補正後距離を比較すると、補正後距離は補正前距離に対して温度に対して安定な距離値が得られている。

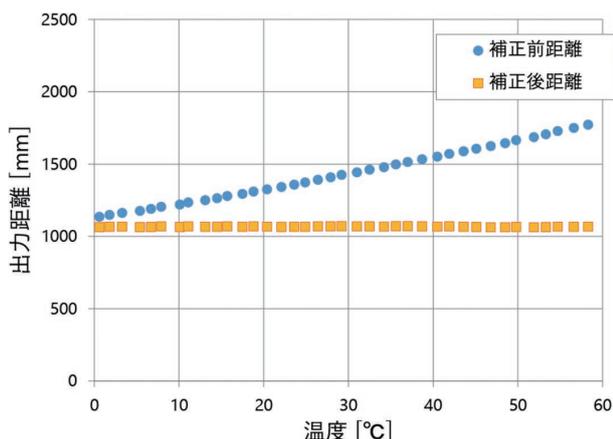


図 15 温度補正の効果

4.4 距離・反射率レンジを広げる HDR 処理

3.4 節で述べた通り、近い対象物と遠い対象物、反射率の低い対象物と高い対象物は同時に測定できない為、近い対象物や反射率の高い対象物用に蓄光時間を短くして撮像した距離画像と遠い対象物や反射率の低い対象物用に蓄光時間を長くして撮像した距離画像を合成する。

測距可能な距離や反射率のレンジを広げる HDR (High Dynamic Range) の処理の概要は、2 枚の画像を画素毎に比較し、いずれかが飽和している場合は飽和していない方を採用し、両者とも飽和していない場合は受光量の大きな方を採用するというものである。

図 16 に HDR による効果を示す。3.4 節の図 9 においては、遠い対象物と近い対象物、反射率の高い対象物と低い対象物を同時に測定することができなかったが、近い対象

物、遠い対象物、反射率の高い対象物、反射率の低い対象物が全て測定できており、幅広い距離・反射率のダイナミックレンジが得られている。

実環境においては、任意の位置に様々な反射率の対象物が存在する状況が想定される為、本 HDR 処理の実現で、TOF センサ使用上の環境的な制約条件の緩和に繋がる。

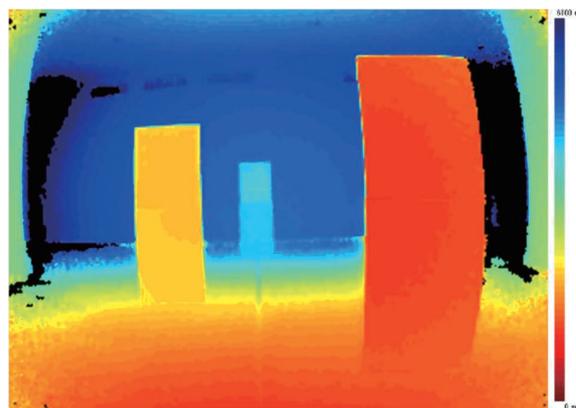


図 16 HDR 処理の効果

4.5 3次元変換

3.5 節で述べた通り、1 次元の距離情報を 3 次元座標に変換する際には、角度誤差の影響を考慮する必要がある。図 10 で示した 3 次元座標 X、Y、Z を計算する為の θ 、 φ は個体毎に求めておき、出荷時にテーブル化してセンサ内部に格納する。X、Y、Z の演算には、各センサ共通に独自の式を組み込んでいる。センサ使用時には、個体毎に固有の θ 、 φ テーブルを用いて X、Y、Z を求める為、各センサで最適な補正済み距離を出力することが可能となる。

図 17 にレンズの軸ずれを考慮した軸ずれ無しの場合の θ 、 φ テーブルを用いて変換した出力座標 Z と、図 11 で示した軸ずれ有りの θ 、 φ テーブルを用いて変換した出力座標 Z の比較を示す。グラフより、軸ずれ無しの場合では出力座標 Z は画素位置に依存せず一定値となっており、理想的な出力となっている。

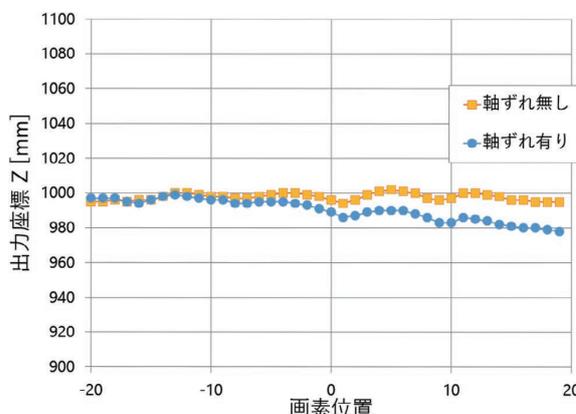


図 17 3D 変換後の出力座標 Z

4.6 補正効果のまとめ

4.1 節、4.2 節、4.3 節、4.5 節で述べた各種補正について、補正前後の距離誤差の比較結果を表 1 に示す。距離誤差の値は、真値に対する誤差の比率を百分率で表現しており、いずれの補正においても距離誤差 2% 以下の高精度な距離出力を実現できていることがわかる。

表 1 各種補正による距離誤差改善効果まとめ

補正各種	距離誤差 (補正前) [%]	距離誤差 (補正後) [%]
距離直線性補正	8.3	1.8
画素間ばらつき補正	2.4 (標準偏差 : 0.98)	0.6 (標準偏差 : 0.33)
温度補正 (0 ~ 60°C)	67.8	0.11
3次元変換	2.2	0.6

また、4.4 節で述べた HDR について、表 2 に示す HDR 有り・無しそれぞれにおける距離・反射率の比較結果から、距離 1m~4m、反射率 5.5%~56.3% の広範囲にわたって測距可能となったことがわかる。

表 2 HDR による距離・反射率レンジ改善効果まとめ

測距対象		HDR 無し		HDR 有り
距離 [m]	反射率 [%]	蓄積時間 3200 μs	蓄積時間 200 μs	
1.0	5.5	○	×	○
	56.3	×	○	
2.0	5.5	○	×	○
	56.3	×	○	
4.0	5.5	○	×	○
	56.3	○	○	

○ : 測距可能、 × : 測距不可

5. むすび

3D TOF センサモジュールには個体毎に固有のばらつき・誤差要因があり、高精度を求めるアプリケーションではユーザ側のシステムで補正処理を行う必要があった。

本開発はこれらの課題を解決する、個体毎に最適なパラメータを書き込める仕組みと演算処理を搭載することで、1 コマンドで 3 次元情報が高精度に取得できる機能を実現した。

3次元センサは、労働力人口の不足やコロナ禍での 3密回避による省人化ニーズの高まりにより、工場や物流倉庫内の搬送などの産業用途のみならず、公共施設や病院、

駅、商業施設での高度な作業領域での活躍も期待されている¹⁾。今回の開発はそのような社会ニーズに対して一つのソリューションを与えるものとなった。

今後は更なる顧客ニーズにこたえるため、検出できる距離、画角、反射率の範囲を広げる検討を進めていきたい。

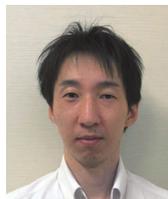
参考文献

- 1) オムロン株式会社. “人や物との距離を 3次元でリアルタイムに測定する組み込み型 TOF センサモジュール「B5L シリーズ」を発売”. <https://www.omron.co.jp/press/2020/09/c0901.html>, (参照 2020-09-01).
- 2) 安富啓太, 川人祥二. Time-of-Flight カメラ. 映像情報メディア学会誌. 2016, Vol.70, p.880-882.
- 3) Hansard, M.; Lee, S.; Choi, O.; Horaud, R. Time of Flight Cameras: Principles, Methods, and Applications. Springer, 2012, p.8-10.

執筆者紹介



田中 宏行 TANAKA Hiroyuki
 エレクトロニック & メカニカルコンポーネンツ
 ビジネスカンパニー 事業統轄本部
 商品開発統括部 モジュール開発部
 専門 : 電子情報工学



石井 昭宏 ISHII Akihiro
 エレクトロニック & メカニカルコンポーネンツ
 ビジネスカンパニー 事業統轄本部
 商品開発統括部 モジュール開発部
 専門 : 電気電子工学

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

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 —



生産条件の最適化における精度と効率を 両立する転移学習技術

太田 雄也, 服部 玲子, 宮本 真実, 藤井 徹

ものづくりにおいては、実験計画法に代表される統計的手法を用いて生産条件の最適化を行うことが重視されている。しかし、先見知識の活用などにより実験数を削減する機会が多いため、生産条件から製品品質を予測する応答曲面モデルに十分な精度が得られない場合がある。本稿では、他の領域で収集した情報を活用することで効率的な学習を実現する手法である転移学習に着目し、少数の実験しか実施しない場合にも、過去の実験データを学習に取込むことで、より精度の高い応答曲面モデルの構築手法を提案する。また、実験用包装機を対象に効果検証を実施した。その結果、十分な実験回数を実施し構築した応答曲面モデルの予測精度 (RMSE=12.0) と比較して、提案手法を用いることで、実験回数を約 1/3 に制限した場合でも予測精度を約 25%向上させることができた。

Transfer Learning Technique for Identifying Optimal Production Conditions with Accuracy and Efficiency

OTA Yuya, HATTORI Reiko, MIYAMOTO Mami and FUJII Toru

In the manufacturing industry, it is important to identify the optimal production conditions using statistical methods such as design of experiments. However, the number of experiments is often reduced through the use of knowledge and other means, which leads to lack of accuracy in the response surface model (RSM) for predicting product quality. In this paper, we adopt transfer learning, which is a technique of efficient learning by utilizing knowledge gained in other domains, to propose a method for constructing RSMs with higher accuracy by introducing past experimental data into the learning process, even when only a few experimental data are available. In addition, we have conducted an experiment on a packaging machine to verify its effectiveness. As a result, compared with the RSM constructed on a sufficient number of experiments, the proposed method has managed to improve prediction accuracy by about 25%, even when the number of experiments is limited to 1/3.

1. まえがき

ものづくりの現場において人手不足がますます深刻化している状況下でも、高いレベルでの品質保証と生産性の向上が求められている。この要求に対応するため、ものづくりプロセスの上流から下流にわたってデータを活用した品質管理が進められている。企画・設計段階では、様々な条件で実験が行われ、生産条件と品質の関係を把握し、設計・製造に反映することで安定して良品を生産する製造ラインを目指している。しかし、サプライヤーの変更や生産拠点の移転に伴う環境の変化、生産設備の置き換えなど、設計段階では想定が困難な事象が発生する場合があります。品質への影響が懸念される。また近年では、米中貿易摩擦や新型コロナウイルス感染症の拡大を背景に、設備投資先送

りに伴う老朽化設備の継続使用も品質への影響が懸念される¹⁾。このような事象などによって品質に影響がある場合にも、生産条件の見直しや設計変更を見据えた実験が行われる場合がある。

このとき、実験の目標の一つは、得られたデータから生産条件と品質の関係をモデル化することである。この目標に対して、効率的かつ精度よくモデル化するための実験方法および解析手法として実験計画法が知られている。しかし、実験計画法を用いたとしても推奨される実験回数が多い²⁾ため、先見知識などによって実験回数を削減することが多い²⁾。そのため、考慮されなかった因子の影響や、実験範囲が適切でないなどの理由でモデルの精度が出ず、追加で実験が必要となる場合は少なくない³⁾。したがって、製造現場では、より少ない実験回数で精度の良いモデルを構築することが求められている。

Contact : OTA Yuya yuya.ota@omron.com

実験回数を削減した場合でも、精度の良いモデルを構築する方法はいくつか提案されており、先見知識やシミュレーションを活用する方法⁴⁾と、対象の製造現場と類似するデータを活用する方法⁵⁾に分類できる。製造現場では先見知識が定式化されていない場合が多いため前者の方法は実施が困難である。一方、設備劣化や製造ラインの移転などの事象が発生しても製品が同じであれば、生産条件と品質の関係は類似した数式で表現されることが考えられる。我々はこの考えのもと後者の方法において、品質に影響のある事象が発生した状態で取得したデータに、過去に同製品の製造ラインを立上げた時に取得したデータを反映させてモデル構築する手法を検討した。本稿では、特に製造現場で想定されるモデルの複雑さに対応しつつ、可能な限りシンプルな方法を提案する。

2. 提案手法

2.1 提案手法の概要

新しい製品に対する設計からライン立上げ完了までを「立上げ時」、設備劣化や製造ラインの移転など品質に影響のある事象が発生し、品質の調整が必要になった場面を「品質調整時」とする。提案手法として、各場面におけるデータ取得とモデル構築の概要を図1に示す。

立上げ時：

- ① 実験計画法に基づいて、すべての調整項目を対象に十分なデータ取得を行う
- ② ①の取得データに対する回帰分析により応答曲面モデルを構築し、最適な生産条件を特定する

品質調整時：

- ③ 先見知識を活用し実験計画法の考え方に基づいて、実験回数を制限したデータ取得を行う
- ④ 転移学習により、③の取得データに対する回帰分析に①の取得データを活用して応答曲面モデルを構築し、最適な生産条件に修正する

ここで、応答曲面モデルとは生産条件と品質の関係をモデル化したものである。生産条件を決定する調整項目を説明変数 x 、品質を定量的に表す品質指標を応答変数 y とすると、応答曲面モデルは関数 $f(x)$ を使って式(1)で表される。

$$y = f(x) + \varepsilon \quad (1)$$

ここで、 ε はノイズである。応答曲面モデルは品質調整時の生産条件の最適化の他、生産速度に応じた生産条件の変更によるタクトタイムの短縮や、製造メカニズムの追究など様々な用途に役立てられる。

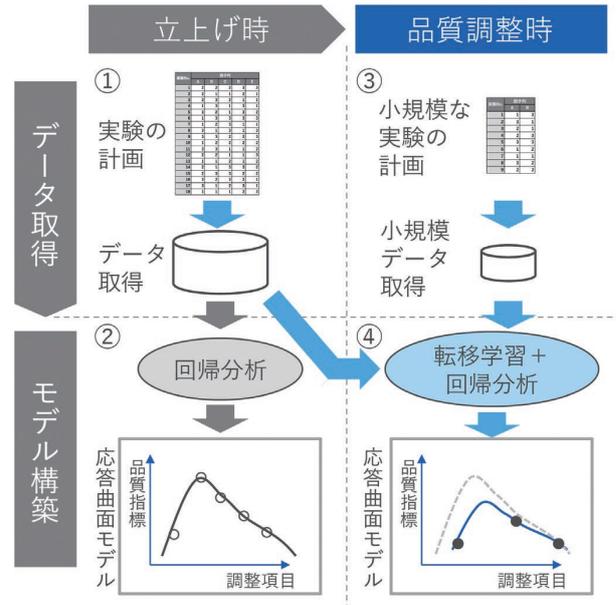


図1 提案手法の概念図

本提案手法の狙いは、実験計画法により取得データの質を担保した上で、転移学習と回帰分析を組み合わせることで、立上げ時のデータの特徴を考慮した応答曲面モデルを構築することである。これにより、小規模なデータしか取得しない場合でも、精度の良い応答曲面モデルの構築を図る。

次節以降では、提案手法における各要素技術（実験計画法、転移学習、回帰分析）について、技術概要と提案手法における適用方法について述べる。

2.2 実験計画法 (Design of Experiments)

実験計画法とは因子（調整項目）が特性（品質指標）にどのような影響を与えるのかを精度よくかつ効率的に把握するための、実験方法および実験データの解析方法に関する統計手法の総称である。特に、すべての因子とすべての水準の組み合わせに対して実験を実施する計画を要因配置計画といい、因子が多数の場合に、要因配置計画の実験回数を直交性などの統計的観点から削減した計画を一部実施計画という。また、実験数を削減しつつ応答曲面モデル構築に必要なデータの質とのバランスを考慮した中心複合計画や、実験回数の制限のもとで最適な計画を提供する最適計画など、目的に応じて多種の手法が存在する。

いずれの手法においても、一般に実験回数と実験データから得られる応答曲面モデルの予測精度にはトレードオフの関係がある。実験回数が少ない場合には、高次の効果や因子間の交互作用などが考慮されず、予測精度低下のリスクは大きくなる。

2.3 転移学習 (Transfer Learning)

目的とする領域 (目標ドメイン、Target Domain) で得られたデータから学習する際に、別の領域 (元ドメイン、Source Domain) で得られたデータや特徴を取り込むことで、目標ドメインでの学習の効率化や、より予測精度の高いモデルの構築を実現する手法である。

転移学習では元ドメインと目標ドメインがどのような観点で類似しているのかを仮定する。類似性がほとんどない場合や、類似性の観点に対して転移学習手法が適切でない場合は、元ドメインの情報がうまく転移されず効果が期待できない。このような場合、転移の効果が得られないばかりか、性能が悪化する場合もあり、負の転移と呼ばれる⁶⁾。

本稿では、立上げ時と品質調整時における製造ラインの状態を、それぞれ元ドメイン、目標ドメインとして扱う。品質調整時の応答曲面モデルは立上げ時から変化していると考えられるため、単純に立上げ時と品質調整時の取得データを結合するだけでは精度のよい応答曲面モデルを構築できない場合が多い。一方、製造する製品や製造方法に違いはないため、立上げ時と品質調整時の応答曲面モデルは似た数式で表現でき、転移学習における類似性として仮定することで、転移の効果が期待できる。

このような類似性の仮説と、2.1 節で述べた状況設定より、転移学習手法の要件として以下を設定した。

- 回帰分析手法に適用可能であること
- 学習データ数は数 10 ～ 数 100 程度 (学習データ数 = 実験条件数 × サンプル数であり、実験計画法における実験条件数は 30 程度までが多いため)

転移学習の研究事例の多くは分類問題 (画像識別など) であり、回帰分析への適用事例においても、ビッグデータを前提とした深層学習を対象とした事例がほとんどである。

上記の要件を満たす手法としては CORAL (Correlation Alignment)⁷⁾、FEDA (Frustratingly Easy Domain Adaptation)⁸⁾ がある。CORAL は元ドメインの分散共分散行列が目標ドメインに適合するように変換する手法のため、学習データの非線形性には対応できない。従って本稿では、FEDA を採用した。FEDA は図 2 に示すように、元ドメインのデータと目標ドメインのデータに対して 0 ベクトルを連結し列方向に 3 倍のデータ拡張を行ったうえで、任意の学習アルゴリズムの学習データとして扱う手法である。

	応答変数 (品質指標)		説明変数 (調整項目)	
	Common	Source	Common	Target
元ドメイン	y^S	x^S	x^S	0
目標ドメイン	y^T	x^T	0	x^T

図 2 FEDA におけるデータ拡張

そのため、モデリング手法に制限がない。データ拡張により、学習時に目標ドメインと元ドメインで共通する特徴、目標ドメインまたは元ドメインのみの特徴を自然に使い分けて学習することができる。これにより、元ドメインから取り込む特徴をコントロールできるため、負の転移が起きにくいことが期待される。

具体的な処理内容について述べる。元ドメインおよび目標ドメインの学習データをそれぞれ式(2)で表す。

$$\begin{aligned} (y^S, x^S) &= \{(y_i^S, x_i^S)\} (i=1, \dots, N_S) \\ (y^T, x^T) &= \{(y_j^T, x_j^T)\} (j=1, \dots, N_T) \end{aligned} \tag{2}$$

ここで、 y^S, y^T と x^S, x^T は各ドメインの応答変数および説明変数であり、 N_S, N_T は各ドメインの学習データ数である ($N_S + N_T = N$)。元ドメインの学習データ (y^S, x^S) を $(y^S, \langle x^S, x^S, 0 \rangle)$ に、目標ドメインの学習データ (y^T, x^T) を $(y^T, \langle x^T, 0, x^T \rangle)$ にそれぞれ拡張する。それぞれ拡張したデータを行方向に結合したうえで、通常の方法で学習する。

さらに、2.4 節に述べるカーネル法を用いたモデリング手法に適用する場合、高次元空間への写像による特徴量 $\phi(x)$ に対してデータ拡張を行うことが可能である。元ドメインと目標ドメインの説明変数 x^S, x^T の特徴量 $\phi(x^S), \phi(x^T)$ は、それぞれ $\langle \phi(x^S), \phi(x^S), 0 \rangle, \langle \phi(x^T), 0, \phi(x^T) \rangle$ に拡張される。 x, x' を元ドメインまたは目標ドメインのデータとする。拡張された特徴量に対するカーネル関数 $\tilde{K}(x, x')$ は、 x と x' のドメインが同じ場合と異なる場合で分けて計算すると、元のカーネル関数 $K(x, x') = (\phi(x), \phi(x'))$ を使って、式(3)で表すことができる。

$$\begin{aligned} \tilde{K}(x, x') &= \begin{cases} (\langle \phi(x), \phi(x), 0 \rangle, \langle \phi(x'), \phi(x'), 0 \rangle) & \text{same domain} \\ (\langle \phi(x), \phi(x), 0 \rangle, \langle \phi(x'), 0, \phi(x') \rangle) & \text{diff. domain} \end{cases} \\ &= \begin{cases} 2K(x, x') & \text{same domain} \\ K(x, x') & \text{diff. domain} \end{cases} \end{aligned} \tag{3}$$

式(3)は構築した応答曲面モデルを用いて目標ドメインの未知のデータに対して予測を行う場合には、目標ドメインから学習した重みが元ドメインの 2 倍で計算されることを意味する。したがって、元ドメインからの情報を取り込みつつ目標ドメインの予測を行うことが可能になる⁸⁾。

本稿では、前者のデータ拡張後に通常の方法で学習する方式を Simple-FEDA (s-FEDA)、後者のカーネル法に対応した手法を Kernelized-FEDA (k-FEDA) と呼ぶこととする。

2.4 回帰分析 (Regression Analysis)

応答曲面モデルを構築するための回帰分析手法に制限はないが、実験計画法においては2次多項式回帰がよく用いられる。しかし、2次多項式回帰の場合、モデルの構造が単純で解釈がしやすい一方、因子と応答の関係が複雑な場合には精度が期待できない。そのため、因子と応答に多項式では表現できない複雑な関係が想定される場合には、非線形回帰が有効である。

主な非線形回帰手法としてニューラルネットワーク回帰 (Neural Network, NN)⁹⁾、ガウス過程回帰 (Gaussian Process Regression, GPR)¹⁰⁾、サポートベクトル回帰 (Support Vector Regression, SVR)¹¹⁾ が挙げられる。NN は調整すべきハイパーパラメータが多いため学習が難しく、学習にかかる時間も長い。また、GPR はパラメータ調整が容易であるものの、全てのデータを使ってモデル構築するため計算量が多く複雑なモデルになりやすい。一方、SVR はパラメータ調整が容易であり、一部の重要なデータのみを使ってモデル構築するためシンプルなモデルが得やすい。以上より本稿では回帰分析手法として SVR を採用した。

SVR はカーネル法を用いた非線形回帰手法である。カーネル法はデータをそのまま学習するのではなく、高次元空間に写像してから学習することで、非線形性の学習を可能にする方法である。さらに、前述の FEDA との組み合わせる意義として、

- カーネル法を用いているため、k-FEDA によるモデル構築ができる (式(3))
- FEDA と 2次多項式回帰を組合せた場合、元ドメインと目標ドメインを個別にモデルリングすることと同義になり、転移の効果が得られない

という点が挙げられる。

SVR におけるモデル式は高次元空間への写像 ϕ を使って、

$$f(x) = b + \phi(x)w \quad (4)$$

と表される。 ε 許容誤差 (ε -insensitive error) を導入し、最適化問題 (式(5)(6))

$$\text{minimize } \frac{1}{2} \|w\|^2 + c \sum_{i=1}^N \xi(y_i - f(x_i)) \quad (5)$$

$$\xi(y_i - f(x_i)) = \max(0, |y_i - f(x_i)| - \varepsilon) \quad (6)$$

を Lagrange の未定乗数法で解くことによってモデル式(7)が得られる。

$$f(x) = b + \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x) \quad (7)$$

ここで、 α_i, α_i^* は Lagrange 定数、 C と ε はハイパーパラメータである。 C は予測誤差と正則化のバランスを調整し、 ε は許容誤差の幅を制御する。正則化と許容誤差の効果により、モデルの表現に有効な学習データのみ抽出される。これより、データ x に対する予測は、一部の学習データ x_i に対応するカーネル関数の値の線形結合によって行われる。

また、カーネル関数 $K(x, x')$ はガウシアンカーネル (radial basis function, RBF)、多項式カーネル、シグモイドカーネルなどが使用される。カーネル関数の形状を規定するハイパーパラメータも存在し、一般的にはグリッドサーチによってクロスバリデーション後の予測精度が最も良くなるハイパーパラメータを採用する。

3. 机上実験

提案手法の原理検証のため人工の学習データを対象とした机上実験を実施した。

3.1 実験概要

人工的に生成した学習データの内訳を表1に示す。実際のユースケースを想定し、元ドメインと目標ドメインに対応する2つの真のモデル $F(x)$ を設定する。入力 x_i ($i=1, 2, \dots, N_{train}$) に対する出力 y_i を

$$y_i = F(x_i) + \varepsilon_i \quad (8)$$

によって、元ドメインと目標ドメインをそれぞれ生成した。ここで、 $\varepsilon_i \sim N(0,1)$ はノイズである。また、学習データ数 N_{train} は、目標ドメインでは少数であることを想定し、元ドメインと目標ドメインで 10:1 となるようにした。

表1 学習データ生成条件

Domain	$F(x)$	N_{train} $-5 \leq x \leq 5$	N_{test} $-10 \leq x \leq 10$
Source	$0.2x^2 - 0.2x + 3$	100	
Target	$0.2x^2 - 0.3x + 0.5$	10	100

適用する提案手法の構成として、転移学習手法には FEDA (s-FEDA, k-FEDA)、回帰分析手法は SVR を対象とする。SVR のカーネル関数は後述の高速化手法が利用可能な RBF を採用した。RBF は式(9)で表される。

$$K(x, x') = \exp(-\gamma \|x - x'\|^2) \quad (9)$$

γ は関数の形状を規定するハイパーパラメータである。SVR のハイパーパラメータ C, ε, γ 調整には先行研究で提案されている高速化手法を用いた¹²⁾。

生成した学習データに対して転移学習の有無を含む各手法 (SVR, SVR+s-FEDA, SVR+k-FEDA) を適用し、応答曲面モデルを構築した。

3.2 実験結果

各手法で構築した応答曲面モデルを用いて目標ドメインの真値を予測し、各手法の性能を比較する。外挿に対する汎化性能を確認するため、学習データよりも広い x の範囲に対する真値 $F(x_i)$ ($i=1, \dots, N_{test}$) を予測し誤差を評価した。予測誤差は RMSE (Root Mean Square Error) (式(10)) で評価した。ここで、 \hat{y}_i ($i=1, \dots, N_{test}$) は予測値である。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N_{test}} \sum_{i=1}^{N_{test}} (F(x_i) - \hat{y}_i)^2} \quad (10)$$

評価結果として各手法で構築した応答曲面を図3、RMSEを図4に示す。図3においてグレーの領域は学習データの範囲、データ点は目標ドメインの学習データを示す。

提案手法を用いない場合 (SVR) は学習データが少ないため予測誤差が大きいのが、提案手法を用いた場合 (SVR+s-FEDA, SVR+k-FEDA) は、学習データが豊富な元ドメインのモデル形状に近づき、結果として予測精度が向上している。特に SVR+k-FEDA の方が元ドメインのモデル形状からの乖離が小さく、汎化性能が良いことが確認できた。これは、SVR+k-FEDA では式(3)に示した通りドメインの違いは単純な係数で表現されるが、SVR+s-FEDA ではデータ拡張後に高次元空間への写像を適用するため、ドメインの違いが複雑な表現になることが理由として考えられる。

以上より、SVR+k-FEDA を適用することで元ドメインの応答曲面モデルの形状を考慮した目標ドメインの応答曲面モデルが得られることが期待できる。よって、次章の実機での効果検証では、SVR+k-FEDA を採用した。

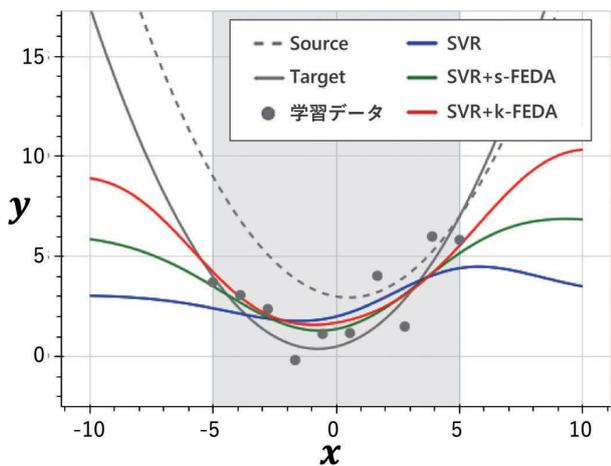


図3 机上実験結果

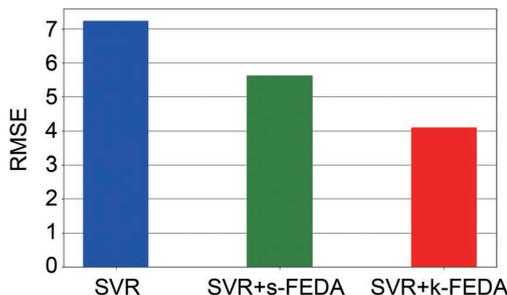


図4 机上実験結果 (RMSE)

4. 実機での効果検証

本章では、3章で検証した提案手法を実験用の横型ピロー包装機に適用し、有効性を検証した結果を述べる。

4.1 検証概要

効果検証の対象となる横型ピロー包装機の構成を図5に示す。

包装機に搬入されたワークは、センターシールヒータにより筒状に成形されたフィルムに包まれつつプレスローラにより搬送される。そして、トップシール工程でワーク前後のフィルムを溶着しつつロータリカッターで切り離されることで枕状に包装され、製品となる。プログラマブル・ロジック・コントローラ (PLC) による温度や速度などの厳密な制御の他、設備状態や製品仕様に応じた機械的な調整によって、目的の製品の製造を実現している¹³⁾。

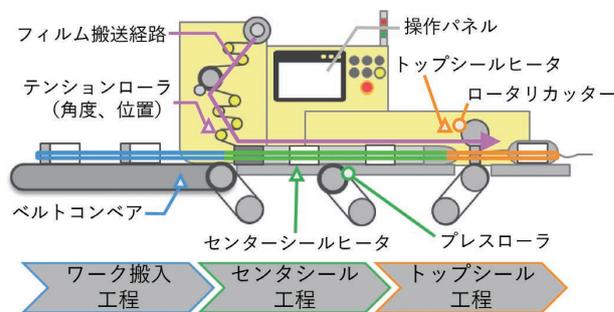


図5 包装機の構成

本稿では、包装機において設備劣化により品質異常が発生した場合に、実験計画法に基づいて応答曲面モデルを構築し、最適な生産条件を特定して生産を再開するというユースケースを想定し、有効性を検証する。

具体的な設備劣化としては、センターシール工程でフィルムを挟み込んで送り出すための部品であるプレスローラが磨耗することでセンターシールが溶着不良となる「プレスローラ磨耗」を対象とした。実際の検証では磨耗した部品を用意することが困難なため、プレスローラの調整ネジを緩めて、フィルムの挟み込みのギャップ幅を広げることで設備劣化を再現した。

プレスローラ磨耗により発生する品質異常に紐づく品質

指標は「センターシール強度」とした。図6にセンターシール強度の計測方法を示す。JIS Z0238に準拠した機材および測定方法でセンターシール部の引張強度を計測し、溶着面の強さ（引張エネルギー）として算出した指標である¹⁴⁾。具体的にはサンプルから切り取った試験片を引張試験にかけ、負荷のかかり始めから溶着面が完全に離れるまで（1ストローク分）の強度 [N] の波形を取得しPCに時系列波形として取り込む。そして、1ストローク分の時系列波形の積分値を品質指標であるセンターシール強度として算出した。

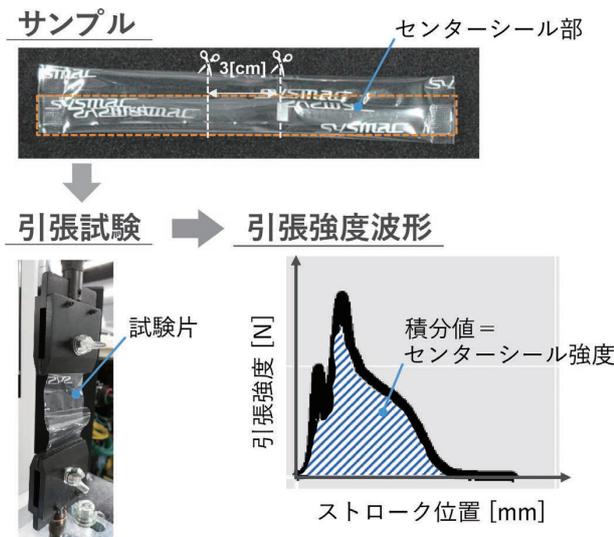


図6 品質指標の計測方法

そして、品質指標に影響を与える可能性があり、調整可能な調整項目として包装速度 [CPM]、センターシール温度 [°C]、トップシール温度 [°C]、ローラ角度 [°]、ローラ位置 [cm] の5つを選定した。包装速度、センターシール温度、トップシール温度は操作パネルを用いて調整した。ローラ角度、ローラ位置はフィルムがセンターシール工程と合流する際の侵入角度と位置を決める機械的な調整項目である。

4.2 検証用データの取得

転移学習における元ドメインと目標ドメインとなる「立上げ時」「劣化（小規模）」、効果検証のリファレンスとなる「劣化時（大規模）」の3つのドメイン（状態）でデータ取得を行った。

「立上げ時」は包装機の新規立上げ時の設備劣化が起こる前の状態であり、前述の5つの調整項目すべてについて実験を行った場合である。「劣化時（大規模）」は設備劣化が発生した状態で、実験回数を制限せず5つの調整項目について実験を行った場合である。「劣化時（小規模）」も設備劣化の状態であるが、先見知識よりセンターシール強度への影響が大きい2つの調整項目（包装速度、センター

シール温度）に限定して実験を行った場合である。各ドメインの学習データの内訳を表2に、実験計画の概要を表3に示す。実験計画手法には、少ない実験数で比較的高いモデル精度が確保できる中心複合計画を採用した。

表2 取得データ内訳

項目	調整項目数	ドメイン		
		立上げ時	劣化時 (大規模)	劣化時 (小規模)
学習データ	調整項目数	5	5	2
	実験条件数	31	28	10
	データ数	358	273	112
テストデータ	調整項目数	/	2	
	実験条件数		5	
	データ数		60	

表3 実験条件（各調整項目の範囲）

調整項目	ドメイン		
	立上げ時	劣化時 (大規模)	劣化時 (小規模)
包装速度 [CPM]	12 ~ 108	5 ~ 80	12 ~ 68
センターシール温度 [°C]	135 ~ 200	140 ~ 200	152 ~ 200
トップシール温度 [°C]	130 ~ 200	130 ~ 200	130
ローラ角度 [°]	150 ~ 158	150 ~ 158	154
ローラ位置 [cm]	9.8 ~ 14.6	9.8 ~ 14.6	12.2

各調整項目の水準は、包装機固有の先見知識や事前の試行結果、構造上・仕様上設定可能な範囲に基づいて、調整範囲内に多くの良品が含まれるよう設定した。実際には、各調整項目の水準は3水準から5水準とした。なお、劣化時（小規模）では、実験対象外の3つの調整項目（トップシール温度、ローラ角度、ローラ位置）は、過去に良品生産の実績がある標準条件（トップシール温度=130 [°C]、ローラ角度=154 [°]、ローラ位置=12.2 [cm]）で一定値とした。このとき、立上げ時と劣化時（大規模）のトップシール温度の水準は、標準条件（130 [°C]）を下限値とする調整範囲で設定している。これはトップシール温度が130 [°C] を下回ると溶着されず未包装のサンプルが頻発するためである。

各実験条件において、ワークを投入せずに包装機を稼働させて100個以上のサンプルを製造し、製造したサンプルから12個無作為抽出し、センターシール強度を計測した。なお、実験条件によってはセンターシール部が溶着され

ず、品質指標が欠損するため、学習データ数が少なく 12 の倍数にはならない。

4.3 検証結果

製造方法および原理に変更はないため立上げ時と劣化時で真のモデルは類似していると想定する。この想定のもと、前節で述べた学習データに各手法を適用することで応答曲面モデルを構築し、テストデータに対する予測誤差として RMSE を算出し、各モデルの性能を比較した。

構築した応答曲面モデルは、リファレンスとなる劣化時（大規模）に SVR を適用したモデル（Ref, reference）、劣化時（小規模）のみに SVR を適用したモデル（OT, only target）、立上げ時と劣化時（小規模）に提案手法を用いて構築したモデル（TL, transfer learning）の 3 つである。性能評価に使用したテストデータを表 2 に示す。各モデルのテストデータは共通している。テストデータの実験条件は学習データとは異なる実験条件とし、学習データ取得時と同様の方法でデータを取得した。なお、包装速度とセンターシール温度以外の調整項目は品質指標への影響が小さいことから、標準条件で一定値とした。

各モデルのテストデータに対する RMSE を図 7 に示す。Ref と比べて、実験数を制限した OT の精度が 22% 低下している。しかし、劣化時（小規模）に対して提案手法を用いた TL では、Ref を 25% 上回る精度に向上している。

なお、各モデルの構築に要した時間は Ref, OT が約 1.5 秒、TL が約 20 秒であった。TL は他のモデルと比較して学習データ数が多く、式(3)に基づくカーネル関数の再計算を行っていることが影響していると考えられる。

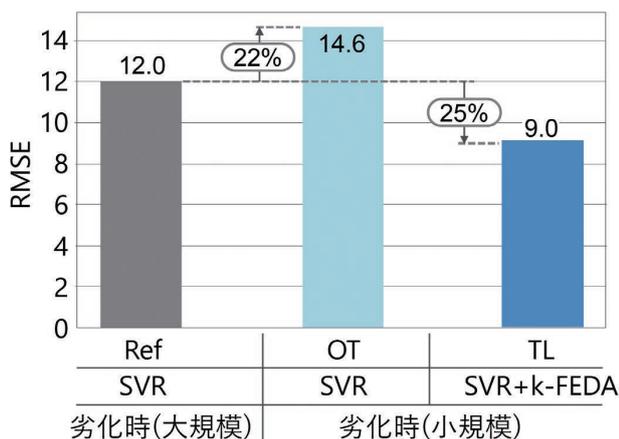


図 7 評価結果 (RMSE)

4.4 考察

学習データにおいては、立上げ時が他のドメインと比べて実験条件数が多く、最も密に水準が設定されている。また、劣化時と立上げ時の真のモデルの類似性を想定していた。転移学習により、劣化時（小規模）または劣化時（大規模）の実験データでは表現できない水準間の中間の状態が表現できるようになった結果、精度が向上したと考えられる。したがって、提案手法による効果を得るには、元ドメインの学習データが網羅的に取得されており、元ドメインと目標ドメインの真のモデルが類似することが重要であると考えられる。

規模）の実験データでは表現できない水準間の中間の状態が表現できるようになった結果、精度が向上したと考えられる。したがって、提案手法による効果を得るには、元ドメインの学習データが網羅的に取得されており、元ドメインと目標ドメインの真のモデルが類似することが重要であると考えられる。

表 2 に示した通り、劣化時（小規模）の実験条件数は劣化時（大規模）の約 1/3 (=10/28) である。すなわち、製造現場において実験数を 1/3 に削減したとしても、精度よく品質予測が行えることを意味している。これは、今回の検証環境と同様の製造現場において、品質調整にかかる工数を 2 日間短縮可能であると言える。

また、TL に基づいて推定した最適な生産条件に設定し、製造したサンプルの品質指標を確認した。推定した生産条件における品質指標の平均値 (44.4 [N*mm]) は、学習時に安定して良品生産できた実験条件での品質指標の平均値 (31.5 ~ 50.6 [N*mm]) と同程度であることが確認できた。センターシール強度はある程度の温度以上ではほとんど変化しない¹⁵⁾。したがって、本検証におけるセンターシール強度の最適な生産条件も広い領域に存在すると考えられ、推定した生産条件は最適な生産条件の一つであると考えられる。

以上より、提案手法により、品質調整時に大規模な実験を行わず主要な調整項目に絞った実験を行うだけで、高精度に最適な生産条件を特定できることが期待できる。

4.5 今後の課題

本提案手法では、2.4 節で述べた負の転移が起こりにくい手法を選定しているものの、可能性をゼロにすることは不可能である。実際には、応答曲面モデルを構築し、推定した生産条件で試行することでしか、負の転移の発生を確認することができない。

しかし、実際の製造現場での使用性を考えると、推定した生産条件での試行以前に負の転移の有無をユーザが判断できることが望ましい。使用性の向上には、元ドメインと目標ドメインの学習データの統計的な類似性を事前に判断し、その判断結果に応じて学習手法を使い分けることが有効と考えられる¹⁶⁾。

5. むすび

本稿では、自動化された製造ラインにおいて様々な変動要因によって品質異常が発生した場面对象に、少ない実験回数でも精度の良い応答曲面モデルを構築することを目的として、SVR と FEDA を組み合わせた解析手法を提案した。さらに、実験用包装機を対象とした効果検証を実施し、様々な生産条件が試行される立上げ時のデータを活用することで、品質調整時の応答曲面モデルの精度向上が期待できることを示した。

今後の展望としては、能動学習 (Active Learning) との組み合わせにより効率的な手法の開発や、品質指標のばらつきまで考慮した多応答の最適化への展開など、多種多様な製造現場のニーズに対応できる技術に進化させていきたい。

参考文献

- 1) 経済産業省. “2020年度版ものづくり白書”. <https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2020/index.html>, (参照 2020-10-30).
- 2) 一般社団法人日本品質管理学会中部支部 産学連携研究会. 開発・設計に必要な統計的品質管理 トヨタグループの実践事例を中心に. 平文社, 2015, 305p.
- 3) 森田 浩. 実験計画法の基本と仕組み. 秀和システム, 2010, 278p.
- 4) 武藤 和夫, 小野寺 誠. 事前知識を利用した応答曲面作成方法に関する検討とピンフィンヒートシンクへの適用. 日本機械学会論文誌. 2019, Vol.85, No.880, p.19-00194.
- 5) Min, A. T. W. et al. Knowledge Transfer Through Machine Learning in Aircraft Design. IEEE Computational Intelligence Magazine. 2017, Vol.12, Issue 4, p.48-60.
- 6) 神嶋 敏弘. 転移学習. 人工知能学会誌. 2010, Vol.25, No.4, p.1-9.
- 7) Sun, B.; Feng, J.; Saenko, K. Return of Frustratingly Easy Domain Adaptation. Proceedings of 30th AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2016, p.2058-2065.
- 8) Daume, H. III. Frustratingly Easy Domain Adaptation. 45th Annual Meeting of the Association of Computational Linguistics. 2007, p. 256-263.
- 9) ビショップ, C.M. パターン認識と機械学習 上. シュプリンガー・ジャパン, 2012, 349p.
- 10) 持橋 大地, 大羽 成征, 杉山 将. ガウス過程と機械学習. 講談社. 2019.
- 11) ビショップ, C.M. パターン認識と機械学習 下. シュプリンガー・ジャパン, 2012, 433p.
- 12) Kaneko, H.; Funatsu, K. Fast Optimization of Hyperparameters for Support Vector Regression Models with Highly Predictive Ability. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 2015, Vol.142, p.64-69.
- 13) 鶴田浩輔, 峯本俊文, 広橋佑紀. マシンコントローラに搭載可能なAI技術の開発 (1). OMRON TECHNICS. 2018, Vol.50, No.1, p. 6-11.
- 14) 菱沼 一夫. ヒートシールの基礎と実際—溶着面温度測定法: MTMSの活用—. 幸書房, 2007, 197p.
- 15) 公益社団法人日本包装技術協会. 包装技術便覧. 2019.
- 16) メガチップス, 西行 健太, 藤吉 弘巨. クラスタリング装置及び機械学習装置, 6516531号. 2016-11-10.

執筆者紹介



太田 雄也 OTA Yuya
技術・知財本部 研究開発センタ
専門: 情報工学



服部 玲子 HATTORI Reiko
技術・知財本部 研究開発センタ
専門: 物性物理学
所属学会: 応用物理学会



宮本 真実 MIYAMOTO Mami
技術・知財本部 研究開発センタ
専門: 情報工学



藤井 徹 FUJII Toru
技術・知財本部 研究開発センタ
専門: 情報工学、データ解析
所属学会: 電子情報通信学会

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

生産現場の情報化で予防保全効果を向上する セーフティライトカーテンシステム

橋本 実

生産現場において通信経路の高速化、ストレージの低価格化および大容量化といった情報化システム構築の環境がそろいつつある。オムロンは未来工場として、これらの技術とオープンネットワークである IO-Link を活用したセンサレベルまでカバーする情報化システムを実現していく。そして今回、オムロンはこの未来工場コンセプト実現に向けた IO-Link 対応セーフティライトカーテン（侵入検知センサ）システムをリリースした。

これまで有用な保全情報を提供できるものの専用ツールが必須であり大規模システムにおいては他機器と連携しづらかった。これをシステム構成と通信制御の考案により従来の機能を維持しつつ解決した。これにより高機能な製品が小型かつ低コストで実現でき、情報化価値を顧客により届けやすくすることができた。今後この手法を別のセーフティコンポーネントにも展開していくことで、上記コンセプトのさらなる実現を通し、顧客の生産設備稼働率向上へ貢献することができる。

Safety Light Curtain System That Improves Preventive Maintenance Effects by Realizing Information-Driven Production Sites

HASHIMOTO Minoru

The environment for constructing information systems such as faster network, lower cost and larger storage capacity is becoming available at the production site. With these technologies, OMRON realizes an information system that covers the sensor level using the open network IO-Link as a future factory. And the IO-Link compatible safety light curtain (active opt-electronic protective devices) system has been released to support the realization of this future factory concept.

In the existing products, a dedicated tool is required although useful maintenance information can be provided, and it is difficult to link with other devices in a large-scale system. This problem is solved by designing the system configuration and communication control with maintaining the existing function. As a result, we have achieved products that are high-performance, small, and low in cost. We can make it easier to deliver the value of information-driven system to customers.

By expanding this method to other safety components in the future, it is possible to contribute to the improvement of the customer's production equipment operating rate through the realization of the above future factory concept.

1. まえがき

製造現場において、生産システムの構成要素である Input-Logic-Output を担う各コンポーネントの様々な情報を、ネットワークを介して収集し、特に予防保全に役立たいという市場要望はかねてより顕在化していた。オムロ

ンを含め FA 業界では、その市場要望に応えるべくこれまでも多くの商品を各企業が開発してきた。しかしながら、これまでは主に Logic カテゴリのコンポーネント、具体的には PLC のリモート I/O ユニットの留まっているケースが多く、結果として情報化による予防保全の効果は限定的であった。その背景として、生産システムの構成要素として最も数の多い Input カテゴリのコンポーネントのネット

Contact : *HASHIMOTO Minoru* minoru.hashimoto@omron.com

ワーク対応が難しく、情報のカバレッジが低かったことがあげられる。予防保全をより効果的に実行するには予防保全対象のすべてのコンポーネントのネットワーク対応が必要である。そのためには、Input コンポーネントには、より低コストで情報化対応できることと、それでも小型を維持することが、顧客の重要な選択基準になっている。これは、Input コンポーネントが数量や種類が多く、ラインコストや設置における影響を受けやすいからである。一方ネットワーク対応すると専用回路の実装などによりコストやサイズが高価で大きくなってしまふ。その結果として、情報化対応が進まず対応機種が増えなかった。また、現在ほど顧客の情報化への顕在ニーズも高くはなかった。このような環境のそろわない限定的な範囲での情報化による予防保全で得られる価値は、コンポーネント自体やシステム構築のための設計工数を含む追加コストと比較して採用には不十分とみなされていた。

しかし近年、ネットワーク専用電子部品の低価格化、小型化が進み、対応機器も種類が増えてきた。また情報を集める経路であるネットワークの高速化だけでなく、データを保存するクラウドやデータベースの大容量化および低価格化、そしてそれらを分析し有効活用する AI の発達といった情報化システムのためのデバイスや技術が次々と発表、商品化され、かねてからの市場要望を実現しやすい環境が整備されつつある。

オムロンも「人の想いが設備と一致する未来工場」の実現を目指している。製造現場のあらゆるモノとモノ、モノとヒトが IoT でつながることで、設備が止まる前に予兆を捉え、設備が自律的に対応し不良品の発生要因を解明する、といったことが可能になる¹⁾。多くの製造現場では、EtherNet/IP や EtherCAT などによりマシン制御層 (図1) やその上位層の IoT 化が進んでおり、オムロンでは上記コンセプトの下、さらにその下位層であるセンサレベルのオープンネットワークである IO-Link に対応した機器をいち早く取り揃え、センサレベルまで含めた情報化システムの構築を推進している。本論で紹介するセーフティライトカーテン (形 F3SG-SR/PG シリーズ) とそのアクセサリであるインテリジェントタップ (形 F39-SGIT-IL3) は、オムロンのセーフティコンポーネントで初めてセンサレベルでの情報化に対応した機器であり、これにより、汎用コンポーネントだけでなく、セーフティコンポーネントの情報も集約できるようになった。これにより情報化対応するカバレッジを広げ、顧客へ提供できる情報量を増やせる。

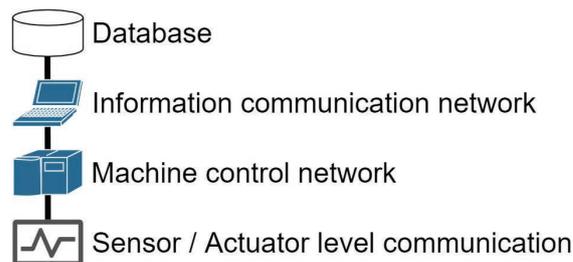


図1 FA ネットワーク階層概念図²⁾

今回対象とするセーフティライトカーテンとは、複数の光軸をもつ光電センサであり、主に安全エリアから危険エリアへのヒトの侵入を検知するためのセンサである。すべての光軸に入光が確認されているときに出力を ON し、その出力 ON を必要条件として危険エリアにある機械、たとえば工作機やプレス機など装置が稼働するように生産システムが構築される。つまり、ヒトによりセーフティライトカーテンのいずれかの光軸が遮光されるとその出力が OFF しそれにより装置が停止し、ヒトがケガをすることを防止することができる。逆にいうと、セーフティライトカーテンの出力が OFF になると装置は稼働できない。例えばひとつの受光部が製品表面の汚れにより遮光と判断されればヒトが危険領域に侵入しようとしてなくとも装置は停止してしまい、不要に顧客の生産システムの稼働率を下げることになる。このような時、光軸の受光量データを常時モニタできる仕組みがあれば徐々に受光量が低下していることを検知でき、セーフティライトカーテンが停止するまえに清掃などメンテナンスをすることで顧客の生産設備の稼働率を維持することができる。

2. システム構成

2.1 全体構成

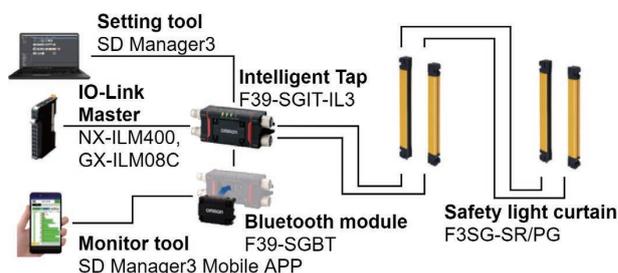


図2 システム構成

セーフティライトカーテンは、一対の投光器と受光器のセットが最小単位であり、図2のように連結して光軸数を拡張し1セットのセーフティライトカーテンのように使用することもできる。今回の情報化用途として使用する場合は、形 F3SG-SR/PG のアクセサリであるインテリジェントタップ形 F39-SGIT-IL3 を通して、セーフティライトカー

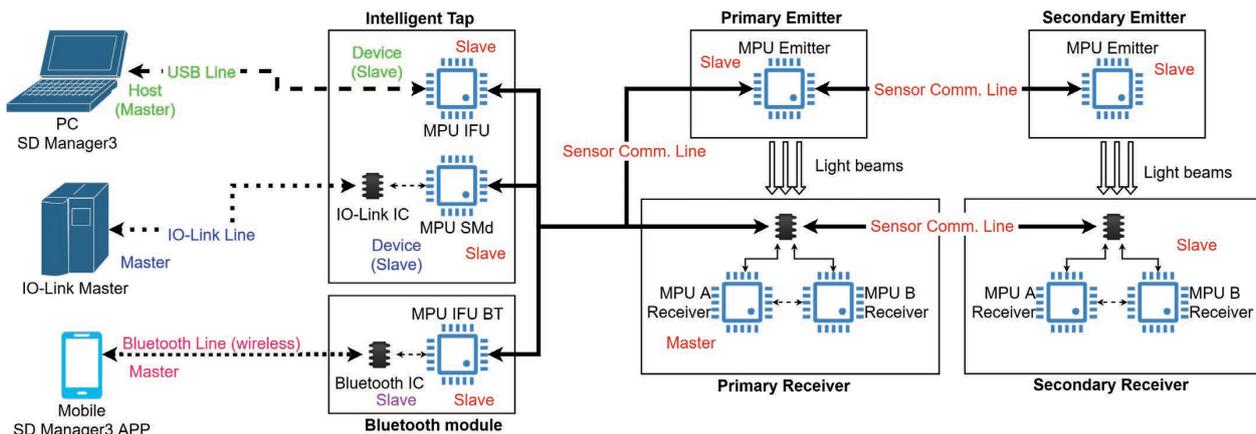


図3 通信観点でのシステム構成

テンの情報を IO-Link プロトコルに変換する。そして IO-Link マスタ形 NX-ILM400/形GX-ILM08C を経由して Sys-mac³⁾ 統合プラットフォームと連携することができる。なお、PC やモバイルへ、セーフティライトカーテン専用ツール SD Manager シリーズを介して情報を通知する機能は、既存のセーフティライトカーテンシリーズから提供されていた機能であり、今回はその既存機能に加え、IO-Link を併用可能としている。

2.2 インテリジェントタップ

情報化システムを実現するキーとなるコンポーネントはインテリジェントタップであり、複数の通信プロトコルに対応する Gateway 機能を実現している。このシステム構成ではその機能をセーフティライトカーテンとは別コンポーネントで実現している。この構成をとることで、従来同様セーフティコンポーネントとしての機能だけを必要とする顧客にはそれだけを最適な状態で提供し、情報化価値も併せて必要とする顧客にはインテリジェントタップを追加した構成でシステム実現を提供することができる。

上記の構成に基づき、主に通信プロトコルやそのマスタ/スレーブ関係に注目した構成図を図3に示す。

3. 技術課題

3.1 小型および低コスト

セーフティライトカーテンはかつてヒトの安全を守るという生産目的とは異なる特別な価値提供をしてきたものの、近年は安全実現意識が市場へ浸透しており、セーフティライトカーテンを用いた安全確保方策は生産設備設計の要件として常識化してきている。このため汎用コンポーネント同様に小型および低コスト要求の重要度が高くなっている。インテリジェントタップにおいてもアルミプロファイルへの取り付けを想定したサイズ要求や、市場全体からみてまだ要求度が低いセーフティコンポーネント

の情報化実現に対して、まずは顧客に使ってもらえる価格帯を実現するために、セーフティライトカーテン同様に小型と低コストは必須の要件であった。

またインテリジェントタップはセーフティライトカーテン同様セーフティコンポーネントとしてのアーキテクチャが求められる。しかしこれはサイズおよびコスト実現とトレードオフの関係がある。具体的には、故障時であっても安全を確保するための回路冗長化など安全レベルに応じた追加の内部構成が求められるからである。また盤外機器として封止性能など高い耐環境要求、さらに電源系統が独立している複数の通信マスタからの接続を実現するための複数の絶縁要求があり、技術検討時はサイズやコストが要求に対して乖離があり抜本的な対策が必要だった。

3.2 多機能を実現するソフトウェア

セーフティライトカーテンは、全光軸で入光が確認できないときは出力を OFF する、という基本機能以外にも多種多様な機能を有し、それらを主にソフトウェアにより実現している。インテリジェントタップも情報化実現のための内部通信バス、IO-Link、USB、Bluetooth といった各種通信プロトコルの Gateway 機能のほか、ディップスイッチやタクトイルスイッチを備え、それらを介した顧客によるセーフティライトカーテンの簡易設定インタフェース、外部入出力のインタフェースを実現することが要求されている。これら多数の機能やその性能実現を前節の要件と共に両立させるため、低価格な MPU やその周辺回路で実現しなくてはならない。

本論は中でも特にこの情報化機能実現に寄与している通信観点に着目して記載する。図3に示すようにシステム内には、表1のマスタ/スレーブ通信が共存しており、それらを同時に実現することが求められる。具体的には

- 1) プライマリ受光器をマスタとした各スレーブに対する情報伝達制御

2) SMd (表 1 参照) における複数プロトコル (センサ間通信と IO-Link 通信) のスレーブ機能の両立

である。

競合製品でも Gateway 機能を提供するアクセサリは存在するが、その対応プロトコル数はひとつでありインテリジェントタップのように 1 台で 3 つ (USB/ Bluetooth/ IO-Link) のプロトコルに対応できるコンポーネントは確認できない。さらに、USB または Bluetooth のいずれかひとつと IO-Link とを同時使用できることも新規要素である。なお、プロトコルを IO-Link のみに限定しなかった理由は二つある。ひとつは情報の種類に応じてプロトコルを使い分けるためである。通常時は IO-Link 経由で汎用ネットワークに通知する常時監視用の簡易情報を取得して予防保全を実行し、トラブル発生時など非定常時は USB/Bluetooth 経由で専用ツールと詳細情報で効率的なトラブルシュートを実行する。このようにして最適なネットワークによるシステムコストの低減を実現している。また、もうひとつはネットワークを用いずセーフティライトカーテン単体に専用ツールを接続して使用する既存顧客を考慮したためである。IO-Link を使うには PLC など多くの周辺機器が必要になるため、これまでの専用ツールでモニタする使用法で十分な顧客にとってはその変更は PLC など機材やシステム構成変更に伴う開発コストが必要になる。また操作方法も変化することでその装置の使用者にも操作手順の変更を強いることになり顧客にとって不利益になると考えた。

表 1 システム内通信プロトコル一覧

プロトコル	マスタ/ ホスト	スレーブ/デバイス
センサ間通信 (独自バス)	プライマリ 受光器	セカンダリ受光器 (連結された受光器) 投光器すべて スマートモジュール (SMd) (*1) インタフェースユニット (IFU) (*1) インタフェースユニット Bluetooth モジュール (IFU BT)
IO-Link 通信	IO-Link Master	SMd
USB 通信	PC	IFU (*2)
Bluetooth 通信	Mobile device	IFU BT (*2)

(*1) インテリジェントタップ内機能名称。SMd は通信のほかインテリジェントタップの制御全般を実行。IFU、IFU BT はそれぞれのプロトコル通信を専任実行。

(*2) 互いに排他。同時には通信されない

既存のオムロン製セーフティライトカーテンでは、IFU/IFUBT (表 1 参照) 相当の機器を中継した USB または Bluetooth のいずれか一方のみの対応だったものを、上述のように対応プロトコルの追加とその同時使用可能という新たな機能を実現する。これにより顧客へさらなる有用な情報化手段およびその選択肢を提供することができる。

上記センサ間通信プロトコルにおいて、プライマリ受光器を通信マスタとして、以下の情報通知および交換がそれぞれの応答性能とともに要求される。

1) 対 SMd

- インテリジェントタップへの外部入力情報 (*1)
- センサ制御用の内部データ
- データリクエスト確認 (*2)
- 外部機器用データ送信
(IO-Link マスタ用データ) (*a)

2) 対 IFU および IFU BT

- データリクエスト確認 (*2)
- 外部機器用データ送信 (PC/モバイル用データ) (*a)

3) 対セカンダリ受光器および投光器センサ

- 外部機器用データ送信指示 (*b)
- 制御用内部データ
(制御フラグ、内部ステータス) (*3)

(*1) 本論内の図では図示されていない

(*2) センサ外部機器 (SMd、IFU、IFU BT) が各通信マスタからの情報要求の有無を確認する。これによりプライマリ受光器は、外部の通信マスタのデータ送信リクエストを認識する。これによりプライマリ受光器は (*a) にて、他の受光器や投光器は (*b) の指示をうけてそれぞれ外部機器に対して情報を送信する。

(*3) 投受光機能や診断機能の実現用で主に同期制御に使われる。

4. システム実現のための対策

4.1 小型、低コスト実現

要求仕様との乖離があるインテリジェントタップにおいて、安全実現のアーキテクチャの見直しを行った。国際安全規格の要求を規格記載の標準的な手法で実現すると、セーフティライトカーテンの動作設定インタフェースのディップスイッチや、製品動作を制御する MPU は冗長構成が必要になる。しかしこの構成では実装面積やコストを圧迫し製品の要求仕様を満足できない。そこでそれぞれ単一系を維持したまま安全要求を実現できるようアーキテクチャおよびソフトウェアロジックを構築した。単一系でのシステム実現により、顧客による設定の操作性を維持したまま、部品そのものと周辺回路の実装面積およびコスト削

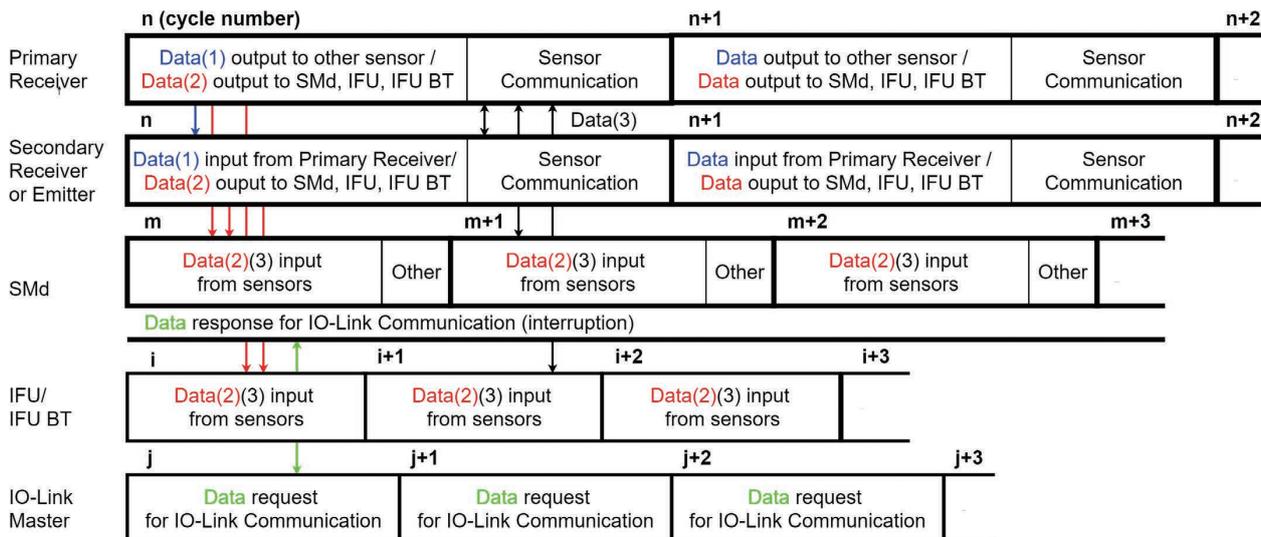


図4 通信観点での1サイクル処理内イメージ

減を実現し、実装面積は10%、コストは対象部の30%を削減できた。新たに構築したロジックと組み合わせ、安全の実現レベルを判定する単位時間あたりの危険側発生確率について対策前の約1/100を達成した。これにより、上記発生確率を冗長系アーキテクチャを採用した場合と同等値とできた。

第三者認証機関からの承認も得てFA機器として、またセーフティライトカーテンとして国際安全規格に基づいて最高レベルの安全レベルを達成した。30年で1回しか危険側故障が発生しないレベルが基準のひとつであるが、本製品は200年に1回の頻度まで下げられている⁴⁾⁵⁾⁶⁾。なお、競合のセーフティライトカーテンにおけるIO-Link対応アクセサリと比較したとき、インテリジェントタップの容積はその1/2以下で実現しつつ、さらにIO-Link以外のプロトコル対応や動作設定入力などの追加機能も実現できている。

4.2 プライマリ受光器によるシステム内情報制御

4.2.1 全体イメージ

通信処理に着目したとき、受光器および投光器は、1サイクルにおいて、単方向の情報通知処理と双方向の情報交換処理を実行し、受光器および投光器からみて外部機器にあたるインテリジェントタップ内のSMdおよびIFU、IFU BTは受信処理を連続実施しており、イメージとしては図4のように図示できる。

セーフティライトカーテンは、多光軸の投受光処理を高速かつ正確に実現するために、受光器と投光器間のもとより、連結された受光器-受光器間、投光器-投光器間も含めてμsオーダーの精度での同期が必要になる。この制御に必要な情報交換およびタイミング制御が、図4のセンサ間通

信(Sensor Communication)にて実現される。

それ以外の情報通知処理では、センサの表示処理などの内部処理のほか、IO-Link マスタやPC、モバイルといった通信マスタからの要求により、受光器および投光器から各通信マスタへの情報通知処理を実行する。ただし、例えば、IO-Link マスタからエラーログの情報要求が、PCから受光量の情報要求が重複して発生した場合でも、その両方へ異なる情報を個別に通知できる仕組みが必要になる。

4.2.2 プライマリ受光器における通信実現方法

システムを成立させるため、前述の通信要件をすべて、それぞれ衝突なくかつ各通信の性能要件を満たす頻度で実行する必要がある。実現する通信は

- 1) SMdやIFU/IFU BTへ各投光器および受光器から情報を通知する単方向通信(図4内Data(1)(2))
- 2) プライマリ受光器をマスタとし、システム内各スレーブと情報交換する双方向通信(図4内Data(3))

に分類される。これらを実現するための仕組みとして、投光器および受光器は1サイクルの中で、図4に図示されるように、前半でデータ出力(Data output to XX)処理、後半でセンサ間通信(Sensor Communication)を実行している。センサ間通信でプライマリ受光器はシステムに接続された機器から情報Data(3)を集め、外部の通信マスタからの要求に応じ、データ出力の時間帯に、どのデータをどの受光器または投光器からどの通信マスタへ送信するかを指示する。その指示に基づいて次サイクルの単方向通信にて情報Data(2)が出力される。

具体的な実現手段としてセンサ間通信については、通信コマンドテーブルによる制御サイクル毎の逐次実行を採用

する。図3で示した構成は、形F3SG-SR/PGの取りうる形態のひとつであり、例えば、センサ3連結構成や、受光器と投光器が電氣的に接続されない構成も許容しておりその構成に応じて必要な通信が変化する。よって起動時に、そのときのセーフティライトカーテンシステムの構成を自動認識し、それにあわせて、必要な通信先や通信頻度から最適な通信コマンドテーブルを選択し、通常処理内で実行することで機能実現する。

その実行の過程で外部機器の情報リクエスト要求を認識し、複数の異なる通信マスタから異なる情報を要求されてもデータ出力時間をそれぞれ割り当てるために通信テーブル内のコマンド順番を考慮する必要がある。今回のシステムにおいて外部からの情報要求は、IFU/IFU BT から、もしくはSMdからの2パターンの同時実行が想定される。なお、IFUとIFU BTは表1の補足にあるように、それぞれが排他であるため3パターンの同時処理は考慮しない。具体的な通信コマンドテーブルの例を表2に示す。この例では通信テーブルの要素数は10としている。

表2 センサ間通信コマンドテーブルイメージ

No	処理	宛先
1	外部情報リクエスト確認	IFU
2	外部情報リクエスト確認	IFU BT
3	内部ステータス交換	セカンダリ受光器
⋮	⋮	⋮
6	外部情報リクエスト確認	SMd
7	内部ステータス交換	プライマリ投光器
⋮	⋮	⋮
10	内部ステータス交換	SMd

この例が示すように、情報交換と情報通知を両立させるため、通信コマンドテーブルを1-5、6-10の前後半にわけ、それぞれの先頭にIFU/IFU BTへのリクエスト確認(表2 No.1, 2) およびSMdへのリクエスト確認(表2 No.6)を実行する。前半にIFUとIFU BTをまとめているのは、IFUとIFU BTは前述のように排他であり、同時にリクエストが発生しないという制約があるためである。例えば、IFU BTからプライマリ受光器へステータス情報のリクエスト、SMdからセカンダリセンサへ受光量情報のリクエストがきた場合、通信テーブルの前半を実行するサイクルのデータ出力の時間には、プライマリ受光器からIFU BTへステータス情報が、通信テーブル後半ではセカンダリ受光器からSMdへ受光量情報がそれぞれ通知されることでその要求に対応する。通信テーブルが一周し再度No.1からの実行する際は、要求の変化を確認し不変ならばそのまま、変化があればその情報をIFU、IFU BTまたは

SMdへ通知し続けることで処理が継続実行される。

4.3 SMdにおける通信実現方法

SMdのソフトウェア処理は、大きく、

- 1) センサ(受光器または投光器)からの通信応答処理
- 2) IO-Link マスタからの通信バッファリング
- 3) IO-Link マスタとの通信処理およびその他処理

の3つの機能を実現する。図4のSMdにおいて、1)はセンサからのデータ入力(Data input from sensors)、2)はIO-Link通信データ応答(Data response for IO-Link Communication)、3)はOtherがそれにあたる。

対センサ通信および対IO-Link通信はいずれも同期通信のため、取りこぼしが発生するといずれもエラーになる。特にセーフティライトカーテンはそれを異常として出力をOFFするため、生産設備を止めてしまう。これを回避するため、SMdソフトウェアの通常処理では図4に示すように1)と3)を交互に実行し、IO-Link通信処理は、2)の割り込み処理と3)内の組み合わせで実施する。さらに詳しいイメージを図5に示す。

Data input via Sensor Comm. では、センサ間通信の受信処理が実行される。この通信で、IO-Link マスタへの送信データになる、センサの内部ステータスやログ情報の受信およびプライマリ受光器への外部入力情報の送信が実行される。この処理中にIO-Link通信のリクエストがきた場合は、その通信データの取得のみ割り込み処理で実行し、センサ間通信を優先する。Otherでは、外部入力の処理や表示灯の制御などとともに、IO-Link通信処理を実行する。

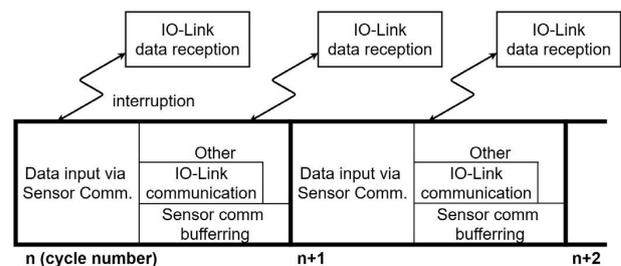


図5 SMdの1サイクル処理

この処理中にセンサ間通信リクエストがきた場合は、通信データを一時退避させ、次のData input via Sensor Comm.でデータ処理および返信処理を実行する。それぞれのデータ通信量や頻度、受信バッファサイズを考慮してそれぞれの処理時間を定義しそのタイムテーブルに基づいて処理することで、複数プロトコルの通信マスタとの遅滞ない通信を実現している。

前述のセンサ間通信を含め、システム全体として、ノイズや温度などの耐環境性能や通信負荷評価など、製品仕様や安全規格を包含する社内評価基準での評価および社外第三者評価に合格できている。

5. むすび

これまでセーフティライトカーテンはその出力の ON/OFF 情報で生産システムとつながっていて、メンテナンス情報においては専用ツールを介するために直接の連携が難しかった。本論の技術にて従来の手段も残しつつ、インテリジェントタップという商品を通して、これまでのセーフティコンポーネントでは対応できていない汎用ネットワークとオープンプロトコル通信を経由して連携ができるようになった。

ただセーフティコンポーネントにも Input-Logic-Output の各カテゴリがある。セーフティライトカーテンは Input の一要素であり、本論の技術の展開先として、セーフティライトカーテン同様に小型、低コストが要求される他セーフティコンポーネントに対して同様の効果が期待される。例えばセーフティドアスイッチへ展開することで情報化対応機器のカバレッジをさらに向上させることができる。

また今回はセーフティコンポーネント内のデータを非安全情報に変換して汎用ネットワークへ通知するひとつの方法を確立した。汎用ネットワークを選択したのは、市場で安全ネットワークの情報化要望が不明確であったことに起因する。今後、安全ネットワークへの情報化の活用方法を本論の技術の横展開とあわせて検討していく。そして安全ネットワークと連携することで実現できる新たな情報化の価値を創出し、顧客の生産稼働率のさらなる向上へ貢献していきたい。

参考文献

- 1) オムロン株式会社. “未来工場”. <https://www.fa.omron.co.jp/product/special/sysmac/overview/iot-future-factory.html>. (参照 2020-06-26).
- 2) オムロン株式会社. “Sysmac 入門 IoT 編”. <https://www.fa.omron.co.jp/product/special/sysmac/introduction-to-sysmac/visualization.html>. (参照 2020/06/26).
- 3) オムロン株式会社. “Sysmac コンセプト”. <https://www.fa.omron.co.jp/product/special/sysmac/concept/>. (参照 2020/06/26).
- 4) 国際標準化機構. ISO 13849-1:2015, 機械類の安全性－制御システムの安全関連部－第 1 部：設計のための一般原則.
- 5) 国際電気標準会議. IEC 61508-1 Ed. 2.0:2010, (b) 電気・電子・プログラマブル電子安全関連系の機能安全－第 1 部：一般要求事項.
- 6) 国際電気標準会議. IEC 61496-1 Ed. 3.0:2012, (b) 機械の安全性－電気感光性保護機器－第 1 部：一般要求事項及び試験.

執筆者紹介



橋本 実 HASHIMOTO 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 セーフティ事業部 開発部
専門：ソフトウェア工学

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

照明シミュレーション技術による外観検査におけるマルチチャンネル照明最適化

成瀬 洋介, 大西 康裕, 栗田 真嗣, 長谷川 友紀

複数の照明の光度を調整できるマルチ CH 照明を持つ撮像系において、外観検査における照明条件とカメラの撮像条件を、容易に短時間で設定できるようにする問題を取り扱う。提案手法では、環境光、センサノイズ、暗電流オフセット、光度の量子化などのハードウェア特性の補正処理を構築することで、画像合成により、任意の照明条件におけるワークピース（検査対象の被写体）の撮影画像を精度良くシミュレーションする技術を確立した。これによって、最適化に必要な撮影数を、評価パターン数の対数オーダーに削減し、全ての発光パターンから1～2秒で（39CHの場合）最適解を探索完了できるようになった。また、従来技術では、照明装置の構成に依存して最適化アルゴリズムの修正が必要であったが、提案手法は、任意の配置構成のマルチCH照明装置で汎用的に動作する。構築した照明シミュレーション技術は、ティーチング作業の自動化並びにオフサイト化を実現可能な基礎技術となる。

Optimization of Multi-Channel Lighting by Lighting Simulation for Visual Inspection

NARUSE Yosuke, OHNISHI Yasuhiro, KURITA Masashi and HASEGAWA Yuki

In an imaging system with multi-CH lighting, this paper addresses the issue of optimizing the lighting conditions and the imaging conditions of the camera so that they are suitable for visual inspection. The proposed method establishes a technique for accurately simulating an image of a workpiece (subject to be inspected) under arbitrary lighting conditions by image synthesis, by correcting hardware characteristics such as ambient light, sensor noise, dark current offset, and quantization of light intensity. By this technique, the number of photographs required for optimization was reduced to the logarithmic order of the number of patterns to be evaluated, and the search for the optimal solution could be completed in 1-2 seconds (for 39 CHs) from all the lighting patterns. In addition, the proposed method works universally with multi-CH lighting devices of arbitrary configuration, while the conventional technique requires modification of the optimization algorithm depending on the configuration of the lighting device. The proposed lighting simulation is a fundamental technology for automating the teaching process and making it off-site.

1. まえがき

1.1 背景

製造現場における製品の外観検査は、機械による人員の置き換えが最も進んでいない分野の1つであり、将来の労働人口減少に向けて取り組まなければならない自動化の重要課題である。近年、ディープラーニングに代表される人工知能・機械学習技術の発展によって、検査の自動化技術は飛躍的に向上しつつある。しかしながら、外観検査並びにマシンビジョン一般において、検査システム構築で手間

がかかる作業は、照明条件の最適化を含む撮像系の設計であり、この分野の自動化はあまり進んでいない。難易度が高い事例において人が手作業でこの作業を行う場合、ワークピースの個体ばらつきに対応しつつ欠陥を確実に見えるようにするために、対象となるワークピースを1つ1つ交換しつつ、照明を手作業で調整することと、検査アルゴリズムを検討・検証することを交互に繰り返す必要があり、所望の検出性能を得るために大変多くの工数を必要としてしまう問題があった。

この照明の最適化問題を取り扱う際の難点は、どのように照明を点灯させるとどのような撮像画像が得られるのかが分かっていない場合、実際に撮影ステージで多数のワー

Contact : NARUSE Yosuke yosuke.naruse@omron.com

クピースを載せ替えつつ撮影を繰り返す以外に、照明の点灯状態を探索する方法がない点である。このようなハードウェア的な制約があると、最適解を求めるための試行回数が十分に確保できず、作業工数内で最適解を得ることができない。

本稿では、この問題を解決するために、照明シミュレーション技術をベースとしたマルチ CH 照明最適化技術を提案する。本稿で言う照明シミュレーションとは、配光制御が可能な照明を含む撮像システム全体のシミュレーションを意味し、照明条件やカメラ設定が与えられた際に、推定された撮影画像を出力する、所謂、順方向の問題を扱うものである。このシミュレーションが可能であれば、撮像画像を評価して、最も検査に適切な照明条件を探索することが可能となる。照明シミュレーション技術によって実現される価値としては以下のものが挙げられる。

- (1) 撮像系ハードウェアを伴う最適化問題が、PC 上の数値計算の問題へと置き換えられ、検査アルゴリズムにとって良い照明、照明条件にとって良いアルゴリズムの同時最適化を、既存の数値最適化の手法によって解決することができる。
- (2) 実際に撮影された多数のワークピースの個体／搬送ばらつきに対して直接最適化されるため、人手で最適化を行うのに比べてより多くのサンプルを俯瞰して、より良い設定を探すことができる。
- (3) 照明条件や検査アルゴリズムの最適設定は、初回の撮影以降はオフサイトの (PC 上に閉じた) 作業となるため、最適化の作業において、検査装置やサンプルのワークピースのリソースを占有しない。
- (4) ワークピースの新しい個体ばらつきモードが発生し、検査を再調整する必要が生じた場合に、既にこれまでに撮影してきた多数のワークピースで、再撮影を伴う再検証をするという手間のかかる作業が必要なくなる。

配光制御が可能な照明装置としては様々なものが考えられるが、マルチ CH 照明と可動照明に大別される。前者は、複数の照明の光度を個別に調整できるものであり、角度分解能を上げるとチャンネル数が膨大になってしまうという問題があるが、可動部が存在しないため耐久性が高い。欠陥の見えやすい照射角から光を当てたり、同時に多くの角度から照射することで、検査に不必要なテクスチャを抑えたりすることができる。一方、後者の可動照明とは、照明の配置を変えることで配光を変化させるタイプであり、手作業で設置場所を最適化するケースも含まれる。こちらの場合においては、数理的な最適化問題に持ち込むためにパラメトリックに自動で配光を制御させようとする場合にはメカ機構が必須になってしまう。

本稿では、これらのうちマルチ CH 照明を扱う。理由は、照明シミュレーションを画像の加減算による重ね合わせ合成という非常に単純な演算で精度良く実現できるためである。他方、可動照明の場合には、精度の高い照明シミュレーションを実現するのは難易度が高いため、検討の優先度を下げ本稿では取り扱わない。本稿で取り扱う照明シミュレーション技術は、マルチ CH 照明であれば適用可能であり、特定の装置に依存してはいないが、実験では 39CH (方位 13、色 3) を持つ FH シリーズ向けの照明装置 FL-MD180MC (図 1)、FL-MD90MC を利用した。



図 1 マルチ CH 照明の例 (FL-MD180MC)

1.2 関連研究

この問題に対する既存技術として、照明パターンを様々な振って実際に撮影を繰り返し、判別分析による評価指標が最も高いものを選択する手法¹⁾が報告されている。評価指標としては本稿でも判別分析を用いているが、提案手法は以下の 2 つの点で優位性がある。

1 つは、最適化の所要時間である。照明 CH 数を K 、光度の量子化レベル数を T 、露出の取りうる数を E とすると、照明条件の場合の数は $E * T^K$ となり、CH 数に対し指数関数的に増加してしまうため、CH 数が多いと全ての撮影条件で撮影して調べあげるだけでも膨大な時間がかかってしまう問題がある。本稿はこの問題を鑑みて検討されたものであり、提案手法によれば、必要な撮影の数をおおよそ K の定数倍へ削減させることが可能となる。また、既存技術では、撮影数が膨大となる問題を粗密探索アルゴリズム¹⁾によって効率的に探索することを提案しているが、照明 CH の配置情報を基に人が経験に基づき探索アルゴリズムを毎回設計する必要が生じてしまう。本稿の提案手法は、照明 CH の具体的な配置に依存しないように最適化アルゴリズムを設計でき、任意のマルチ CH 照明装置に対して汎用的に利用できるアルゴリズムを構築できる。

もう 1 つの違いは評価関数の作りやすさである。一般に外観検査においては、ワークピースの統計的ばらつきを取り扱うため、1 つのサンプルというより複数のサンプルに対する評価関数を用いた最適化が求められる。提案手法では全てのサンプル画像を同時に用いた任意の評価関数で照明最適化を行うことが可能となる。加えて、照明設計の問題設定が、複数の検査要件のバランスをとって成立させる

ような、目的関数を事前に一意に書き下すことのできない多目的最適化問題であった場合には、目的関数を修正しつつ対話的に解を更新してゆく必要があるが、提案手法では目的関数を変更しても再撮影の必要はないためレスポンスが早く、優れた操作性を実現できる。

本稿と同様に、撮像シミュレータを用いた撮像系の最適化としては、機械学習的な手法によって撮像系の振る舞いを近似させる Proxy Modeling²⁾ も検討されている。

1.3 記号

ボールドの小文字はベクトルを示し、ボールドの大文字は行列を示す。それ以外はスカラーである。 $\|\cdot\|$ はベクトルに対するL2ノルムを示し、 $[X]_{ij}$ は行列Xのi行j列の要素を示すものとする。

2. 画像合成による照明シミュレーション

制御自由度のある照明・撮像系の最適化問題を扱ううえで、撮像系シミュレータが精度良く構築できることは重要である。本稿では、マルチCH照明の場合には撮像シミュレータが簡単な画像合成（画像の重ね合わせ）で実現することに注目し、実際のデバイス特性を補正することによって高い推定精度を実現できる。

2.1 基底発光パターンによるワークピース評価画像の取得

画像の重ね合わせによる照明シミュレーションのため、撮像システムにおけるセンサのリニアリティ（輝度と画素値の間のリニアリティ）が成立していると仮定する。これはつまり、カラーフィルタのデモザイキングなどの信号処理を含め十分にリニアであると見なすことができ、暗電流オフセット補正によって輝度ゼロにおいて画素値がゼロとなっており、画素飽和による非線形を避けるために、HDR（High dynamic range）合成を含んだ撮影処理がされているという意味である。そのようにして撮影された画像を輝度画像と呼ぶことにする。検査時において、K個のマルチCH照明で照らしたワークピースを撮影する状況を考え、各照明CHの相対光度（光度の定数倍となる量）を以下の相対光度ベクトルとして表記する。

$$\boldsymbol{\varphi} = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_K)^T, \quad \varphi_k \geq 0 \quad (1)$$

ティーチングにおいて、1つのワークピースについて照明発光パターンをN回変化させて撮影し、最適な検査時の照明条件 $\boldsymbol{\varphi}$ を決定することを考える。 n ($1 \leq n \leq N$) 枚目の撮影における相対光度ベクトルを次のように定義する。

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_n &= (h_{1,n}, h_{2,n}, \dots, h_{K,n})^T, \quad h_{i,n} \geq 0 \\ \mathbf{H} &= [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_N] \end{aligned} \quad (2)$$

これらの発光パターンによってワークピースを撮影することで、任意の発光パターンで照らした場合のワークピー

スの撮影画像を再構成することが可能となる。これはLT（Light Transport）行列³⁾の推定を行っていることと等価となる。一般にLT行列の全ての自由度を取得するためには、 $\text{rank } \mathbf{H} = \min(N, K)$ つまり線形独立となるように発光パターンを決定することが望ましい。K個の照明の自由度を全て余すことなく活用させるためには、少なくとも $N = K$ であり、その際に \mathbf{H} はフルランクとなっている必要がある。

一方、 $N < K$ だと照明個数の自由度を十分に活用できないが、ワークピースの撮影時間を短縮させることができる。この状況は、プロジェクター照明など制御自由度Kの非常に大きい問題設定で発生する。代表的なものとしてCompressed Sensingを用いたLT行列推定³⁾を行う手法が挙げられる。

また、 $N > K$ とするケースも考えられ、これは照明の自由度を十分に活用させるという意味では必要以上であり無駄な撮影枚数となるが、SN比やダイナミックレンジを稼ぐなどの別目的で選択されうる⁴⁾。

発光パターン \mathbf{h}_n で撮影された輝度画像を基底画像と呼ぶことにする。基底画像をコラムベクトルとして並べたものを \mathbf{f}_i として、これらをN枚分横に並べた行列 $\mathbf{F} = [\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_N]$ を用いて、検査時の相対光度ベクトル $\boldsymbol{\varphi}$ と実際の輝度画像 \mathbf{g} は以下のように表現される。

$$\boldsymbol{\varphi} = \mathbf{H}\mathbf{x}, \quad \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T \quad (3)$$

$$\mathbf{g} = \sum_{i=1}^N x_i \mathbf{f}_i = \mathbf{F}\mathbf{x} \quad (4)$$

ここで、 x_i は各発光パターンの混合比を示すベクトルである。各照明CHの光度レベル値（量子化された光度階調のレベル値）はこれを元に算出されるが、この値そのものではない。これは一般に負の値をとることも許されるが、照明の発光パターンは必ず非負でなければならないため、以下の条件が課せられる。

$$\mathbf{H}\mathbf{x} \geq \mathbf{0} \quad (5)$$

ここで、ベクトルや行列に対する不等号は、全ての要素についての不等号であるとする。 $\mathbf{H} = \mathbf{I}$ つまり、照明を1つずつ点灯させて $K (=N)$ 枚撮影した場合には、 $\boldsymbol{\varphi}$ と \mathbf{x} は等価となる。以下では、最適な画像合成重み \mathbf{x} を求めることによって、その際の最適照明 $\boldsymbol{\varphi}$ を求める問題を扱う。

2.2 センサモデルと画像合成の評価式

露出時間 τ で撮影された画像ベクトル \mathbf{f}'_c を、露出 τ' における画像ベクトル \mathbf{g}'_c に変換するモデルは、画素飽和を考慮しない場合、次式のようにオフセットつき線形モデルで示される。

$$\mathbf{g}'_c = \frac{\tau'}{\tau} (\mathbf{f}'_c - d_c) + d_c \quad (6)$$

ここで、 c ($1 \leq c \leq C$) はカメラのカラーフィルタ色インデックス、

d_c は暗電流オフセット値でありキャリブレーションによって予め求めておくものとする。センサがこのモデルに従う場合、マルチ CH 照明の画像合成による照明シミュレーションは次式で表現される。

$$\mathbf{g}'_c = \sum_{n=1}^N w_{n,c} (\mathbf{f}'_{n,c} - d_{n,c}) + d_c \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{f}'_{n,c}$ は撮影された基底画像のコラムベクトルである。基底画像はそれぞれが AEC (Automatic Exposure Control) または HDR 撮影されているため、基底のインデックス n ($1 \leq n \leq N$) ごとにそれぞれ異なる露出やゲインで撮影されている。 \mathbf{g}'_c は露出 τ' における合成された撮影画像ベクトルである。 $w_{n,c}$ は画像合成ウエイトであり、照明 CH への光度レベル値と露出設定から最良なものが一意に決定される。

3. 検査に最適な照明条件の決定

3.1 評価基準 クロスエントロピー vs. SN

外観検査における照明設計の目的は、良品と不良品が正しく判別されるようにすることである。いま、判定基準として既定の判別アルゴリズムが与えられた場合、照明最適化問題は、良品/不良品の判別を正解と一致させる「クロスエントロピー最小化問題」として定式化される。もし判別器が機械学習器であった場合、照明最適化と判別器の学習を同時に行い、お互いにとって最も性能を発揮するように同時最適化させても良い。

しかしながら、クロスエントロピー最小化を行わせようとする場合に大きな問題となるのが、良品/不良品ラベルの付加されたサンプルが大量に必要であるという点である。これは、多くのサンプルが得られない立ち上げ時には利用方法として大きな課題となる。特に大きな自由度を持つ照明装置を最適化させようとする場合、少数の良品/不良品ラベルを判別させるだけという基準では、最適な照明はいかようにもできてしまう（一意に決められない）という問題が生じてしまう。

この問題を解決するために、本稿ではユーザーが指定した前景と背景を乖離させるという意味での SN 比の最大化を採用する。これは、画像自体の評価基準（コントラスト、明るさ、近さ）をベースとして照明を最適化する手法である。このように考えた場合、外観検査における照明設計に求められる要件としては、主に以下2つが挙げられる。

- (1) 良品と不良品の判別がしやすい特徴を見えやすくすること（つまり欠陥を見えやすくすること）
- (2) 良品ばらつきを見えにくくすること

両者は一般に相反する性質であるため、それらのバランスの取れた照明を設計することが最適化の難課題となる。

3.2 2次形式による評価関数の高速化

2.2 で述べたように、基底画像は階調を高い精度で測定するために、異なる露出時間で撮影されている。そのため、画像合成ウエイト w は露出の違いも含めたものとして定義されており、求めるべき照明 CH の相対光度そのものではない。 τ_0 を任意に定めた基準露出、 τ_i ($1 \leq i \leq N$) は各基底画像の露出であるとする、求めるべき照明 CH の光度の比を示すベクトル \mathbf{x} は次のように表現できる。

$$\mathbf{x} = \mathbf{D}^{-1} \mathbf{w}, \quad \mathbf{D} = \text{diag} \left[\frac{\tau_0}{\tau_1}, \frac{\tau_0}{\tau_2}, \dots, \frac{\tau_0}{\tau_N} \right] \quad (8)$$

本稿では画像の評価基準を高速に評価するため、評価関数を2次式に限定させるというアプローチをとる。式(4)より、合成画像は $\mathbf{g} = \mathbf{F}\mathbf{x}$ として表現できる。ここで \mathbf{F} は以下で定義される基準露出における基底画像を並べた行列である。

$$\mathbf{F} = [\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_N] \\ = \left[\frac{\tau_0}{\tau_1} (\mathbf{f}'_1 - d_{1,c}), \frac{\tau_0}{\tau_2} (\mathbf{f}'_2 - d_{2,c}), \dots, \frac{\tau_0}{\tau_N} (\mathbf{f}'_N - d_{N,c}) \right] \quad (9)$$

これを用いて、コントラストは Toeplitz 行列 \mathbf{B} をハイパスフィルタとして $\|\mathbf{B}\mathbf{F}\mathbf{x}\|^2$ 、明るさは \mathbf{B} を画素平均として $\|\mathbf{B}\mathbf{F}\mathbf{x}\|^2$ 、画像の一致は $\|\mathbf{F}_1\mathbf{x} - \mathbf{F}_2\mathbf{x}\|^2$ として表現できるため、行列 \mathbf{Q} を $N \times N$ の半正定値行列として、これらは全て $\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x}$ のような2次形式として表現される。画像の分散や線形部分空間への射影誤差についても同様に2次形式となる。一方、別の評価関数として、予め指定した画像 $\tilde{\mathbf{g}}$ と一致させる場合は $\|\mathbf{F}\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{g}}\|^2$ 、指定した明るさや色 \mathbf{y} にするならば \mathbf{B} を画素平均として $\|\mathbf{B}\mathbf{F}\mathbf{x} - \mathbf{y}\|^2$ 、特定部分の発光パターンを固定して残りを最適化する場合には $\|\mathbf{B}\mathbf{F}(\mathbf{x}_0 + \mathbf{x})\|^2$ となり、これらは全て2次式 $\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{c}^T \mathbf{x}$ となる。

このように2次式の係数で表現することによって、画像のピクセル数に依存せず、高速に評価可能な評価関数を表現できる。注意すべきは、これらの表現は画素飽和が生じてしまうと不正となってしまう点である。それゆえ、画素飽和させない範囲での最適化とし、飽和を含める際には行列による簡略化は使用せず、画像を毎回生成して飽和によるクリッピングをした後で、直接 L2 ノルムを計算する。

3.3 Fisher 線形判別による照明設計

Fisher 線形判別とは、「クラス内分散を最小化」かつ「クラス間分散を最大化」する射影ベクトルを求めることができる手法である。この手法では、特徴ベクトル生成のための演算は単なる内積であるため、非線形な演算を取り入れた手法と比較すると効果は非常に限定されている。しかしながら、本稿で取り扱う照明条件の最適化においては、マルチ CH 照明による撮像を演算と見なすと数学的には単なる内積演算および線形射影そのものであるため、最適な線形射影を求めることができる Fisher 線形判別を用いること

は適している。以下では、画像のL2距離による近さ（類似度）に注目して、クラス内分散とクラス間分散を定義し、それによって Fisher 線形判別を実現するマルチ CH 照明発光パターンを算出する問題を定式化する。

いま、一般にワークピースを V 個のカテゴリに判別する問題を考える。例えば良品と不良品に判別する場合には $V=2$ となる。カテゴリのインデックスは $1 \leq v \leq V$ とする。また、画像の関心領域（Region of Interest: ROI）間の比較対象として $P (\geq 1)$ 個のグループを持つものとする。照明の最適化基準は、これらの同一グループに属する画像群のばらつき大きさによって定義される。ROI 比較対象グループのインデックスは $1 \leq p \leq P$ とする。ユーザーの指示により各 v と p の組み合わせについて、ワークピース画像から ROI を抜き出した画像集合 $S_p^{(v)}$ が与えられているものとする。

ティーチングに用いるワークピース画像 $F \in S_p^{(v)}$ は、マルチ CH の個々を既定の（評価用）発光パターン h_n に従って点灯させて撮影されているものとする。これらを用いて、クラス内距離（良品ばらつき）の期待値 D_{within} と、クラス間距離（欠陥の見やすさ）の期待値 D_{between} を次のように L2 距離として定義する。

$$D_{\text{within}} = \mathbb{E}_{v,p} \text{Var}(S_p^{(v)}, M_p^{(v)}) \quad (10)$$

$$D_{\text{between}} = \mathbb{E}_p \text{Var}\left(\left\{M_p^{(v)}\right\}_v, \mathbb{E}_v M_p^{(v)}\right) \quad (11)$$

$$\text{where } M_p^{(v)} = \mathbb{E}_{F \in S_p^{(v)}} F$$

$\text{Var}(S, M)$ はマルチ CH 画像の集合 S と平均 M から算出される分散であり、以下の定義である。これは、照明ベクトル x の 2 次形式として表現でき、このときの係数行列を Q と表記する。

$$\begin{aligned} \text{Var}(S, M) &= \mathbb{E}_{F \in S} \|Fx - Mx\|^2 = \mathbb{E}_{F \in S} \|(x^T \otimes I) \text{vec}(F - M)\|^2 \\ &= \text{tr}(x^T \otimes I) R (x \otimes I) = x^T Q x \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 \otimes は Kronecker 積、 $\text{vec}A = [a_1^T, a_2^T, \dots, a_N^T]^T$ であり、行列 R と Q は以下のように表現される。

$$\begin{aligned} R &= \mathbb{E}_{F \in S} \text{vec}(F - M) [\text{vec}(F - M)]^T \\ &= \mathbb{E}_{F \in S} \sum_{i,j} e_i e_j^T \otimes (f_i - m_i)(f_j - m_j)^T \end{aligned} \quad (13)$$

$$[Q]_{i,j} = \mathbb{E}_{F \in S} (f_i - m_j)^T (f_i - m_i) \quad (14)$$

ここで、 f_i, m_i はそれぞれ、行列 F, M の i 番目のコラムベクトルである。 $D_{\text{within}}, D_{\text{between}}$ の 2 次形式の係数行列をそれぞれ $Q_{\text{win}}, Q_{\text{bwn}}$ とすると、Fisher 線形判別では、クラス間分散の最大化とクラス内分散の最小化を同時に実現するために、以下の評価式を最大化させる。この式の意味するところは、背景ばらつきに対して前景がどれだけ乖離しているかという SN 比を最大化していると思えることができる。ここで、2 次形式でさえ表現されていれば、3.2 で述べ

られている任意の評価式を用いてもよい。この式を最大化させる x が求めるべき画像合成重み、すなわち最適照明条件となる。

$$\text{maximize } \frac{x^T Q_{\text{bwn}} x}{x^T Q_{\text{win}} x}, \text{ subject to: } \|x\|^2 = 1 \quad (15)$$

x のノルムを制約する意味は、評価関数のみでは不定とになってしまうためである（ x を定数倍しても評価値が変わらないため明るさが決まらない）。Fisher 線形判別の最適射影方向は、Lagrange 未定乗数法により一般化固有値問題における最大固有値に対応する固有ベクトルとして求めることができる。しかしながら、照明最適化においては固有ベクトルが負値を持ちうるのが問題となる。つまり、固有ベクトルに沿う方向で照明強度ベクトルを設定すればよいのであるが、負の照明強度は実現できないという問題が生じる。これに対する解決策は大きく 2 つ考えられる。

最初の解決策は、照明強度ベクトルに対し非負条件を入れて最適化問題を解くものである。本稿では、限定されたケースであれば数理計画法が適用可能であることを示す。

次の解決策は、正值のみと負値のみで 2 つの組に分け、負値のものは絶対値をとりそれぞれの組について撮影し、後段の画像処理上にてそれらの撮影画像の差を取ることによって、疑似的に負の照明強度を実現するものである。これによって、元の正值と負値が混在する固有ベクトルで直接撮影したのと同等の効果を得られるが、最低 2 回の照明条件を変えた撮影が必要になってしまう。本稿はこのようなマルチショット検査を検討に含めない。

3.3.1 半正定値計画法による解法

ここでは、最大化すべき SN 比を定義する前景と背景のペアが 1 つである場合においては、次式で示される Fisher 線形判別の最適化問題は、数理計画法によって非負条件で照明最適解を高速に算出できることを述べる。

$$\begin{aligned} \text{maximize: } & \frac{x^T Q_{\text{bwn}} x}{x^T Q_{\text{win}} x}, \\ \text{subject to: } & \|x\|^2 = 1, \quad Hx \geq 0 \end{aligned} \quad (16)$$

ここで、 $Hx \geq 0$ という表記は、ベクトル Hx のすべての要素が非負であるという意味である。この問題は、一般性を失うことなく以下のように変形できる。

$$\begin{aligned} \text{maximize: } & x^T Q_{\text{win}} x, \\ \text{subject to: } & x^T Q_{\text{bwn}} x = 1, \quad Hx \geq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

これは、Nonconvex-QCQP (Quadratic Constrained Quadratic Programming) 問題として知られ、一般に NP 困難であるが、このケースでは半正定値緩和⁵⁾を行うことができ、SDP (Semidefinite Programming: 半正定値計画問題) で解くことが可能である。具体的には、 xx^T を半正定値行列 X

であるとして置き換えてしまい、次のような最適化問題へ変形する。

$$\begin{aligned} & \text{maximize: } \langle X^T, Q_{\text{win}} \rangle_F, \\ & \text{subject to: } \langle X, Q_{\text{bwn}} \rangle_F = 1, \quad HXH^T \geq 0, \\ & \quad X \geq 0, \quad X^T = X \end{aligned} \quad (18)$$

ここで、 $\langle A, B \rangle_F = \text{tr} AB^T$ は行列の Frobenius 内積を意味し、 $HXH^T \geq 0$ は行列の全要素が非負であること、 $X \geq 0$ は行列 X が半正定値であること、 $X^T = X$ は対称行列であることを意味する。この問題は SDP ソルバーによって高速に最適解 X を求めることができる。解 X は SDP の拘束条件の数より、ほぼランクが 1 となることが知られており⁵⁾、その場合 $X = xx^T$ と近似できるため、 $HXH^T = Hxx^T H^T = \phi\phi^T$ を固有値分解して固有値最大に対応する固有ベクトルを求めることで最適解となる相対光度ベクトル ϕ を得る。Perron-Frobenius の定理より、 $HXH^T \geq 0$ のときは $\phi \geq 0$ となることが保証されているため、最適解はすべて非負の照明設定値としてそのまま利用できる。

3.3.2 多目的最適化による解法

前述した SDP による解法では、1 つの前景と背景のペアからなる SN 比の最大化しか取り扱うことができないうえ、明るさの最適化など、1 次項まで含まれる 2 次式を含む最適化問題を取り扱うことができなかった。もし、複数の前景と背景のペアからなる複数の SN 比を同時に最大化させようとしたり、明るさやコントラストを所望の値に近づけようとしたりすると、複数の目的関数のバランスをとって最大化させる多目的最適化問題を解く必要がある。この問題を扱うために本稿では、個々の目的関数の重みづけ和を最大化させ、多数の試行によって重みづけを調整して適切なバランスを実現させる加重和法⁶⁾を採用する。最適化には逐次二次計画法 (Sequential Least Squares Programming: SLSQP) を利用した。

4. 評価実験

4.1 システム構成

評価実験で用いたシステム構成は、オムロンの画像処理システムである FH シリーズをベースとしている。マルチ CH 照明は FL-MD180MC, FL-MD90MC を、カメラは FH-SCX12, FH-SMX12, FH-SCX05, FH-SMX05 を用いた。また、基底画像撮影の際に環境光が入らないように、撮影ステージを暗室内に設置した。基底画像を撮影するための AEC, HDR による撮影アルゴリズムや、暗電流オフセット補正、光度レベル値-輝度 LUT 補正のキャリブレーション機能は、FH 内の処理ユニットとして実装した。それ以外の最適化アルゴリズムや UI は、FH と LAN 接続された PC 内で動作する。

4.2 UI

作成した照明最適化のティーチング UI を図 2 に示す。①で基底発光パターンと AEC, HDR などの撮影方式を選択してワークピースを撮影する。②で撮影されたワークピースを選択し③で評価基準と多目的最適化の荷重ウェイトを入力する。評価基準の入力においては、複数のワークピースを同時に参照できるようになっている。最適化を実行すると解のリストが④に表示され、③において複数の目的関数の評価値を確認しながら解を比較検討できる。解が選択されると光度レベル値が⑤に表示される。問題の設定によっては明るさの 1 軸は決定しないため、⑥によってスケールを調整できるようになっている。撮影条件が決まると⑦によってシミュレーション画像と実写を切り替えながら、⑧に表示されるワークピース画像の比較ができる。



図 2 作成した照明最適化デモシステムの UI

4.3 ソフトウェア実装と実行時間

数値計算は Python で実装した。行列計算は Numpy を用いているが、式(14)の内積演算に最も時間がかかるためマルチスレッドや画像縮小の前処理を用いている。式(18)の SDP による最小化には、CvxOpt⁷⁾ の実装を利用した。N = 39 の場合の最適化の平均的な所要時間は 1~2 秒程度である。多目的最適化には、SciPy⁸⁾ に実装されている SLSQP を利用した。局所解を回避するために、初期値を N 回振って複数回最適化を実行し、最も良い解を選択するようにした。初期値を N 回振って最適化しても所要時間は 1 秒程度である。

4.4 環境光の漏れ込み対策

画像センサに照明機器以外からの環境光が混入してしま

うと実写とシミュレーションの画像差異の要因となる。

対策として、基底画像の撮影において環境光の影響を相対的に小さくするために、照明の光度を常に最大として撮影し、カメラの露出を調整して飽和を回避させる撮影方法を導入した。(AEC 撮影)

更なる環境光の対策方法として、環境光はマルチ CH 照明において常に点灯している照明が 1 つ存在していることに相当するため、ワークの基底画像の撮影時に照明機器を全消灯させて、環境光画像を 1 枚撮影すれば補正処理を構築できる。この手法によって、室内環境において問題ないレベルの環境光補正ができることを確認している。本稿では、環境光の影響がない状態でシミュレーション性能を検証するために、ワークピースを暗室内で撮影した場合の結果を掲載している。

4.5 実写とシミュレーションの画像比較

様々なワークピースと発光パターンにおける、画像合成シミュレーションと実写の比較を図 3 に示す。

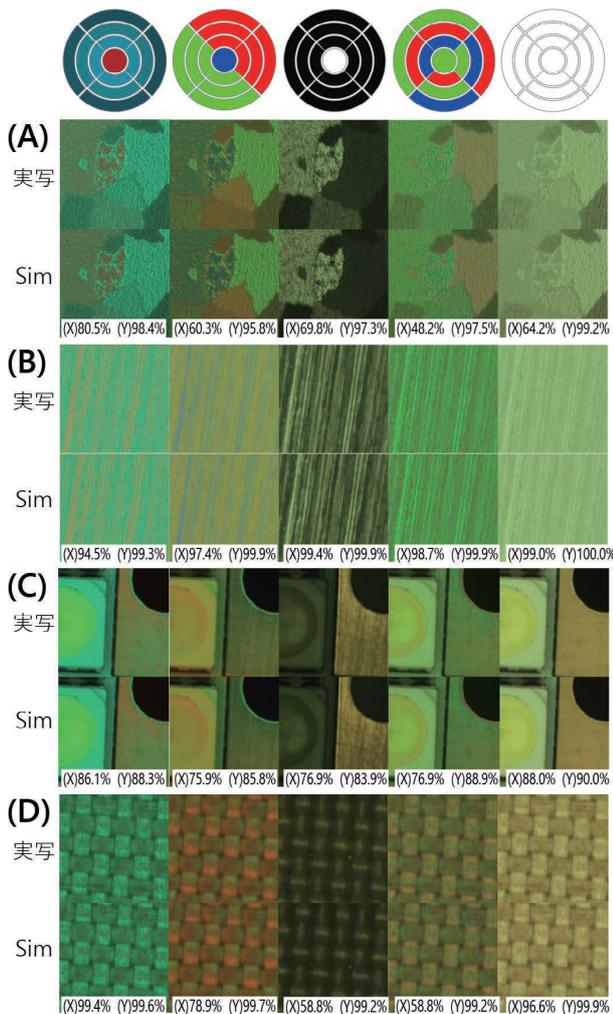
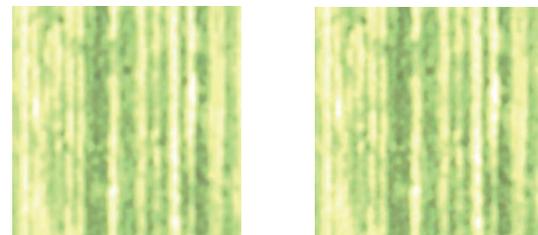


図 3 実写と画像のシミュレーションの比較

並べて見比べると違いが分かりにくいですが、最大で±0.1 倍程度の明るさのずれと色回り（色 CH ごとの明るさずれ）が生じている。明るさのずれは電源の特性が原因であり、色回りは暗電流オフセット値の推定ずれが AEC 撮影の露出交換で強調されて起きていると考えられる。補正による改善は可能であると考えられるが、照明最適化の用途では現状の性能で十分であると判断し検討していない。

図中の (X) は、明るさのずれが理想的に補正された場合において、シミュレーション画像の画素値が、実写画像 20 回におけるショットノイズの 3σ の範囲内である画素数の割合を示しており、同様に (Y) は、色回りまで理想的に補正された場合のそれを示している。これらを補正できれば、ほぼショットノイズの範囲内に推定可能であることが分かる。ワークピース (C) において (X) (Y) の割合が低いのは、明暗のダイナミックレンジが広い暗部分のノイズの影響を受けているためである。

その他の特記すべき不一致として、図 4 に示すように、飽和付近の白にじみの程度が若干異なることが挙げられる。センサが画素飽和すると非線形な特性が生じて階調の情報が失われてしまう。そのため、飽和した画素との間でデモザイキングによる補間処理がされると画像合成と実写の不一致の要因となる。この現象は、飽和領域付近の白にじみの強さの不一致として現れるが、原理的なものであり補正処理による対策はできていない。



(a) 実写 (b) 画像合成 Sim (飽和付近のコントラスト強い)

図 4 画像合成シミュレーションにおける画素飽和付近のコントラスト不一致

4.6 SN を振った最適化

前景と背景の SN 比を式(10)(11)(15)によって定義し、 D_{within} として複数の背景の分散、 $D_{between}$ としてキズと背景の距離とする。SN 比をいろいろな強さに振って最適化ができるように、背景消しの強さを示すパラメータ α を導入し、 $D_{within} = x^T [\alpha Q_{win} + (1-\alpha)I] x$ のように再定義した。金属ヘアラインのワークピースについて α を 10 段階に振って SDP によって最適化した結果を図 5 に示す。背景消しの強さに従って SN 比 ($D_{between}/D_{within}$) が変化しているのが分かる。前景背景ともに、最もコントラストが強いのは $\alpha = 0$ であるが、前景と背景の強さの比 (SN 比) が最も大きいのは $\alpha = 1.0$ であり、背景と背景の判別性が向上している。

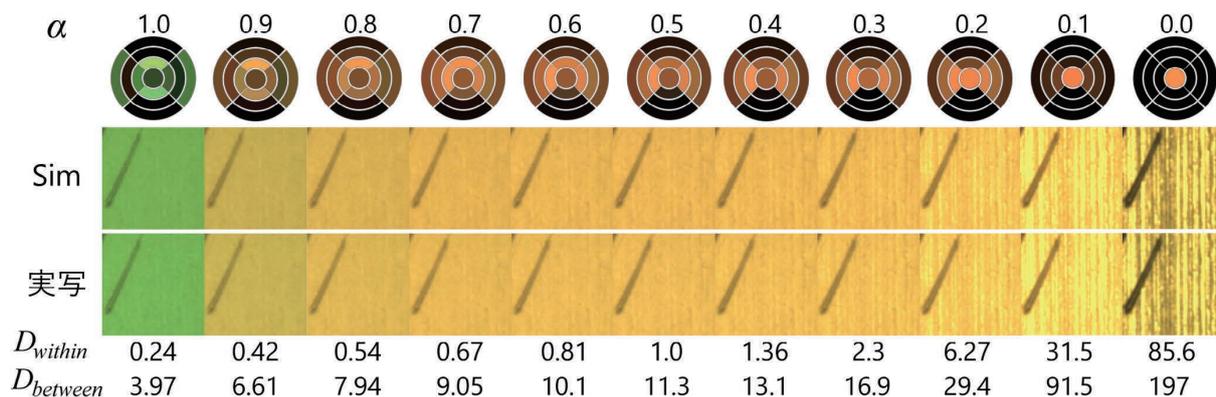


図5 背景消しの強さを变化させた金属ヘアライン上の傷の強調結果 (Simと実写)

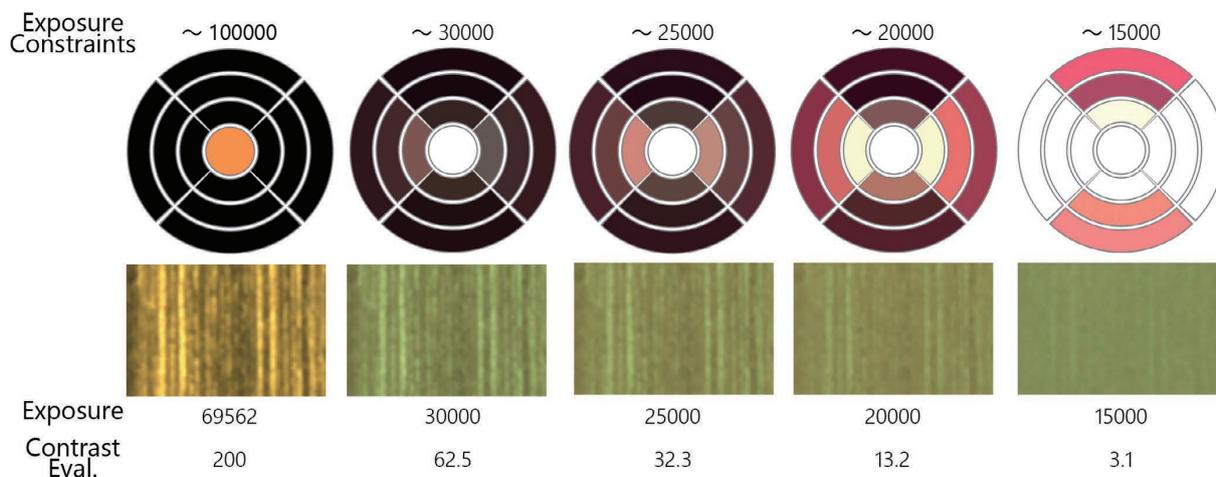


図6 露出範囲を振って平均画素値を一定としつつコントラスト最大化を行った結果

$\alpha = 1.0$ で照明色が変化しているのは、画像の色チャンネルを含んでの12距離の意味で背景をフラットにするために、少しでも有利な色が選ばれるためである。

このワークピースでは、ヘアラインのコントラストは同軸照明（中心部）とリング照明（周辺部）の強度比バランスによってほぼ決定される。コントラストを出そうとすると同軸照明だけが選択されるようになり、逆に弱くしようとすると同軸とリングの同時点灯となる。 α の値が大きくなると照明パターンが複雑になっているが、この場合においては、これらとほぼ同程度の性能の、より単純な照明パターンを見つけることは可能である。理由は、行列 F がランク落ちに近くなっており、同じ性能を達成する照明パターンが一意に決定しない現象のためである。これはいわゆる過学習の状態であり、これを回避するにはワークピースのサンプル数を増やすか、画素値（明るさ）などの拘束条件の数を増やすか、基底発光パターン H を適切なものを選ぶとよい。事実、 $\alpha = 1.0$ の照明パターンではワークピースを90度回転させるとヘアラインが見えてしまうが、基底発光パターンを回転対象なもので最適化することによって回転にロバストな照明パターンを得ることができる。

4.7 画素値（明るさ）を含めた最適化

図6では、多目的最適化によって、画素値（明るさ）を指定しつつ、コントラストを最大化するように最適化した例を示す。金属ヘアラインで最もコントラストが高くなるのは同軸照明であるため、露出の制約が最も緩い左側の例では、同軸照明のみが選ばれている。一方、右側は徐々に露出時間の制約を厳しくしたものであるが、それにつれ同軸照明だけでは照度が不足してしまい、指定された画素値を実現させることができなくなってしまう。そのため、複数の照明を同時に点灯させて明るさを稼ぐように最適化されており、その結果コントラストが犠牲になったことが確認できる。これは、指定された明るさを出せる範囲内で最もコントラストを最大化するように照明が最適化されたことを示している。このように、露出とコントラストのトレードオフ問題を、多目的最適化によって数値計算のみで俯瞰できることは、画像合成による照明最適化手法の大きなメリットである。

5. むすび

本稿では、外観検査向けのマルチCH照明の最適化問題

に、画像合成による照明シミュレーション技術を用いることを提案した。精度の高い照明シミュレーションが可能であり、最適化に必要な撮影数を、評価パターン数の対数オーダーまで大幅に削減できることを示した。提案技術は、検査パラメータ設定を含めたティーチング作業の自動化やオフサイト化を実現可能な基礎技術である。

今後の展開としては、マルチショット検査や後段の検査も含めた同時最適化への拡張、多目的最適化の操作性向上、ワークピースばらつきシミュレーションを用いた照明最適化によるサンプル範囲外のばらつき対応が考えられる。

参考文献

- 1) 林 信吾. 外観検査における照明パラメータ高速自動決定技術, OMRON TECHNICS. 2020, Vol.52, No.1, p.30-34.
- 2) Tseng, E.; Yu, F.; Yang, Y.; Mannan, F.; Arnaud, K.S.; Nowrouzezahrai, D.; Lalonde, J. F.; Heide, F. Hyperparameter Optimization in Black-box Image Processing using Differentiable Proxies. ACM Transactions on Graphics (TOG). 2019, Vol.38, No.4.
- 3) Chiba, N.; Hashimoto, K. "Sparse Estimation of Light Transport Matrix under Saturated Condition". The 29th British Machine Vision Conference (BMVC2018). 2018.
- 4) Schechner, Y. Y.; Nayar, S. K.; Belhumeur, P. N. Multiplexing for Optimal Lighting. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2007, Vol.29, No.8, p.1339-1354.
- 5) Luo, Z.; Ma, W.; So, A. M.; Ye, Y.; Zhang, S. Semidefinite Relaxation of Quadratic Optimization Problems. IEEE Signal Processing Magazine. 2010, Vol.27, No.3, p.20-34.
- 6) Miettinen, K. Nonlinear Multiobjective Optimization. Kluwer Academic Publishers, 1999, p.78-84.
- 7) Andersen, M. S.; Dahl, J.; Liu, Z.; Vandenberghe, L. "Interior-point methods for large-scale cone programming". Optimization for Machine Learning. Sra, S., Nowozin, S., and Wright, S. J. eds. MIT Press, 2012, p.55-83.
- 8) Jones, E.; Oliphant, T.; Peterson, P. et al. SciPy: Open source scientific tools for Python. 2001. <http://www.scipy.org/>. (参照 2020-2-1).

執筆者紹介



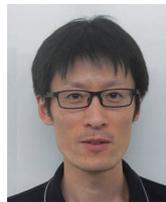
成瀬 洋介 NARUSE Yosuke

技術・知財本部 センシング研究開発センタ
 専門：画像処理
 所属学会：情報処理学会
 博士（工学）



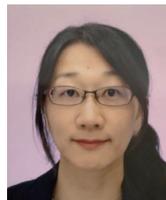
大西 康裕 OHNISHI Yasuhiro

技術・知財本部 センシング研究開発センタ
 専門：画像処理



栗田 真嗣 KURITA Masashi

技術・知財本部 センシング研究開発センタ
 専門：画像処理



長谷川 友紀 HASEGAWA Yuki

技術・知財本部 センシング研究開発センタ
 専門：画像処理
 所属学会：精密工学会

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標として場合があります。

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 —



ヘルスケアに関する事業やプロジェクトの社会的価値を評価するためのロジックモデルのひな形となるドラフトモデルの作成

押野 沙紀, 伊藤 泰久, 川合 朋音

近年、多様な社会的課題が顕在化し、それらを解決するための様々な事業やプロジェクトが行われている。しかし、これらが実際に社会的課題を解決できているかの評価までは行われていない場合も多い。このような状況において、社会的インパクト評価が事業やプロジェクトの社会的な価値を可視化する方法として注目されている。社会的インパクト・マネジメント・イニシアチブでは、社会的インパクト評価を広く社会に定着させ、社会的課題の解決を促進する活動を行っている。

本研究ではこの活動の一環として、ヘルスケア分野を対象としたロジックモデルのひな形となるドラフトモデルを作成した。ロジックモデルは、事業やプロジェクトのインプットからアウトプット、アウトカムまでの各要素間の因果関係を図示するものであり、社会的インパクト評価を行う際に必要となる。本論では、特に個人の健康に関する行動変容に着目して、健康行動理論やモデルを基に、ドラフトモデルを作成した。本モデルは、ヘルスケアに関する様々な事業やサービス、アプリ、健康機器などのロジックモデルを作成する際に用いられることが期待される。

Developing a Draft Model to be Utilized as a Framework for a Logic Model to Evaluate the Social Values of Programs and Projects in the Field of Healthcare

OSHINO Saki, ITO Yasuhisa and KAWAI Tomone

As a variety of social issues have been noticed in recent years, various programs and projects are now conducted to solve the issues. In many cases however, whether or not these programs and projects have been effective is actually not evaluated. Under this circumstance, Social Impact Measurement is attracting attention as a method to visualize the benefit of programs and projects. Social Impact Management Initiative permeates Social Impact Measurement widely in society and promotes solutions for social issues.

In this study, we developed a draft model as part of the activities, which is to be utilized as a framework for a logic model in the healthcare field. Such a logic model illustrates causes and effects between individual elements from the input to the outcome in the programs and projects, which is to be needed for Social Impact Measurement. Based on health behavior theories and models, a draft model has been developed in this study, specifically focusing on one's behavior change. The draft model is expected to be utilized to develop a logic model for healthcare-related programs and projects, applications, and healthcare devices.

1. まえがき

1.1 背景

近年、多様な社会的課題が顕在化し、それらを解決するための様々な事業やプロジェクトが行われている。しかし、これらの取り組みが実際に社会的課題を解決できているかどうかまでの評価は行われていない場合も多い。このような状況において、社会的インパクト評価が事業やプロジェクトの社会的な価値を可視化する方法として注目されている。

本研究では、社会的インパクト評価を行うためのツールとなるロジックモデルに着目し、ヘルスケアに関するプログラム（事業やプロジェクト）のロジックモデルを作成する際に、ひな形として用いることができるドラフトモデルを作成した。ただし、本研究で対象とするのは、本論で定義するヘルスケアの範囲に限定し、例えば介護予防などの分野は含まれない。また本研究では、ヘルスケアプログラムが、その提供を受ける個人にとってより効果的なものとなることを重視する。そのため、健康行動理論の観点で個人の行動変容を中心に議論し、組織に対する利益等については直接的には扱わない。これらの対象範囲および前提条件については後述する。

1.1.1 社会的インパクト評価について

社会的インパクト評価とは、事業やプロジェクトによって短期・長期的に生じた「社会的・環境的な変化、便益、学び、その他効果」を定量的・定性的に把握し、事業やプロジェクトについて価値判断を加えることである¹⁾。「評価」は「監査」、「査定」ではなく、「価値を引き出すこと」であり、組織の成長や事業・プロジェクトの改善等様々なメリットをもたらすものである²⁾。

社会的インパクト評価は、大きく4つの段階（計画、実行、分析、報告・活用）に分かれている。計画段階は4つのステップ（1. 実践に向けた準備、2. ロジックモデルの作成、3. 評価するアウトカムの選定、4. 指標・測定方法の決定）で構成される。実行段階では、計画段階で決定した指標を用いてデータの収集を行う。分析段階では、収集したデータを基に、期待した成果や課題、阻害要因等の分析を行う。報告・活用段階では、分析結果を基に事業やプロジェクトの改善を行う¹⁾。

社会的インパクト・マネジメント・イニシアチブ（以下、SIMI）は、日本において事業者、資金提供者・仲介者、行政、中間支援組織・シンクタンク、評価者・研究者など多様なメンバーが連携して、日本全体として「社会的インパクト・マネジメント」を普及させるためのマルチセクター・イニシアチブである。SIMIは、本ドラフトモデルを作成していた当時、2020年までに社会的インパクト評価を広く社会に定着させ、社会的課題の解決を促進する

ことをビジョンに掲げて活動していた³⁾。著者らは、2018年度の公募により決定された「ヘルスケア分野のアウトカム・指標ワーキンググループ」の活動に参画した。この活動において、社会的インパクト評価の計画段階をサポートするためのツールを作成した。本論では、前述の「ステップ2. ロジックモデルの作成」に該当する内容を述べる。ロジックモデルは、社会的インパクト評価を行うためのツールとなるものであり、その作成は社会的インパクト評価の導入部分にあたる。

1.1.2 ロジックモデルについて

ロジックモデルは、プログラムにおける各要素間の因果連鎖を、プログラムが社会的状況を改善するまでの一連の流れの中で示すものである⁴⁾。ここで言うプログラムとは、ある社会的効果を生み出すための取り組み全体を指し、事業やプロジェクトなどが含まれる⁵⁾。これらは、ロジックモデルにおいて、「インプット」、「活動」、「アウトプット」、「アウトカム」で構成される。「インプット」は、プログラムにおいて諸活動を行うために使う資源である。ここで言う諸活動は、製品やサービスなどを提供するために行われ、これらを「活動」と呼ぶ。そして、この「活動」により提供する製品やサービスなどが「アウトプット」である。「アウトプット」によって生み出される変化・効果が「アウトカム」であり、事業や組織はこの変化・効果を生み出すことを目的としている⁶⁾。一般的に、アウトカムはアウトプットに近位なものから順に「直接アウトカム」、「中間アウトカム」、「最終アウトカム」の3段階で設定する¹⁾。

ロジックモデルを活用することで、プログラムの計画から実施、その効果の評価という一連の流れにおいて、プログラムの効果を高めるために必要な要素を論理的に整理し、改善することができる⁷⁾。

1.2 ヘルスケア分野におけるプログラムのロジックモデルのドラフトモデルを作成することの意義

健康管理や疾病予防といったヘルスケアの分野でロジックモデルを活用している事例としては、一般社団法人りぶらすによる体操教室プログラム⁸⁾や、神奈川県のアнтиコロモ教室⁹⁾などがある。医療の分野でも、救急医療や小児医療、がんや脳卒中の施策^{10,11)}などにおいて活用されている。ロジックモデルの作成手順^{1,6,7)}が様々な組織によって示されており、ロジックモデル作成のワークショップ¹²⁾も開催されている。しかし、一般的にロジックモデルの作成には、同モデル作成に関する知識や経験が必要であり、多くの時間と労力を要する。よって、これらの点がロジックモデルを用いた社会的インパクト評価の取り組みを阻害する一因となっていることが懸念される。

本研究では、ヘルスケア分野におけるロジックモデル作

成時の作業負担を軽減するために、ロジックモデルのドラフトモデルを作成した。本モデルを構成する要素と、その根拠となる健康行動に関する理論やモデルを示すことで、プログラムの内容に応じて要素を加減、修正したロジックモデルの作成が容易となることを意図している。本ドラフトモデルを用いることでヘルスケアに関するプログラムのロジックモデルを作成するための工程が簡略化され、ゼロからモデルを作成する場合に比べて負担が軽減されると考えられる。またその結果、ヘルスケアに関する様々な事業やサービス、アプリ、健康機器などの社会的インパクト評価の取り組みが促進されることが期待される。

1.3 本研究の対象範囲

本研究は、以下で示す対象範囲における評価の視点からロジックモデルのドラフトモデルを作成した。

1.3.1 ロジックモデルのドラフトモデルの前提条件

本研究で対象とするプログラムは、「ヘルスケアに関する製品・サービスによって健康増進や生活習慣病予防を目的とするプログラム」とした。医療サービス及び医薬品・医療機器は対象外とし、個別の疾患の治療は扱わない。ヘルスケアの定義は次項で述べる。

プログラムの受益者（支援を受ける対象者）は、対象プログラムの参加者（個人）とし、対象プログラムの最終アウトカムは、「健康寿命の延伸」と定めた。近年、健康増進・生活習慣病予防サービスへの期待が高まり、健康寿命の延伸への取り組みも行われている^{13,14} ことから、このアウトカムの設定は妥当であると言える。

本モデルの活用が想定されるのは、対象プログラムに関する計画立案者、実施者、評価者等である。評価者は、内部評価を行う担当者だけでなく、外部評価を行う第三者も想定している。

1.3.2 本研究におけるヘルスケアの定義

前項で述べた前提条件を考慮し、本研究におけるヘルスケアの範囲を定めた（図 1）。

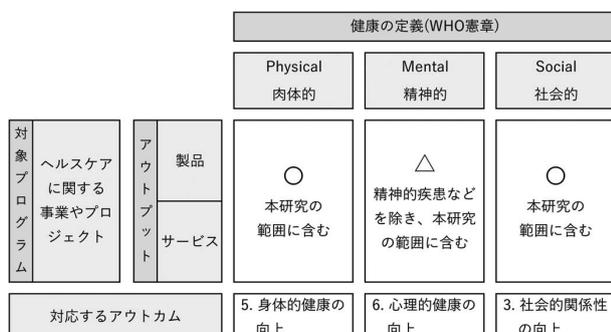


図 1 本研究の対象範囲

WHO 憲章における健康の定義では、「健康とは、病気でないとか、弱っていないということではなく、肉体的にも、精神的にも、そして社会的にも、すべてが満たされた状態にあること」¹⁵⁾ とされている。これを踏まえ本研究で定義するヘルスケアにおいては、肉体的、精神的、社会的な範囲の健康を対象とした。ただし、「精神的」の範囲に含まれる精神疾患などについては、治療等の専門性が求められる分野であるため、対象外とした。また、その他の個別の疾患についても、専門的な医療行為が求められる領域であることから本研究では扱わないこととした。

さらに、生活習慣病をはじめとする多くの疾患の発症予防や悪化予防、治療には健康的な行動を継続して行うことが必要であるとされている^{16,17)}。このことから本研究では、健康に関する行動変容を含む健康行動理論の観点に着目したドラフトモデルを作成した。健康行動理論については第 2.2 節で述べる。

2. ロジックモデルのドラフトモデルの作成方法

2.1 作成手順

プログラムにおける各要素間の因果関係の連鎖には、その一つ一つに説得力がなければならない。そして、それらの連鎖が実際に生じることを示す理論によって、この説得力はもたらされる⁴⁾。このことから、本研究では、健康行動に関する理論やモデルを幅広く調査した。これらの理論やモデルを根拠にアウトカムとロジックを検討することで、論理的で説得力のあるドラフトモデルを作成できると考えた。調査の詳細は次節で述べる。

2.2 健康行動に関する理論及びモデルの調査

「健康行動 (health behavior)」は、健康に良い行動と悪い行動の両方を指す¹⁶⁾。本研究では、健康増進や生活習慣病予防を目的とするプログラムを対象とすることから、「健康行動」を健康増進や生活習慣病予防のための行動を指すものとして扱う。また本論では基本的に、健康分野の行動変容における行動について述べるため、「行動」の文言を「健康行動」の意味で用いる場合がある。

本研究では、健康行動の様々な理論及びモデルの中から、以下で示す 4 つの理論及びモデルを取り入れた。「社会的認知理論 (SCT)」と「トランスセオレティカルモデル (TTM)」、「健康信念モデル (HBM)」は健康行動の研究と実践においてもっともよく使われ、「生態学的モデル」は「社会的認知理論 (SCT)」の不足点を補うことができ¹⁶⁾ とされている。これらの調査結果を以下で述べる。

2.2.1 社会的認知理論 (SCT)

社会的認知理論 (Social Cognitive Theory: SCT) では、3 つの要因 (行動要因、認知要因、環境要因) を変えること

によって健康行動を変え、病気や死亡を予防しようとする。行動要因は、行動をうまく実施する能力や、行動を変えようとする気持ち、行動に伴う報奨や罰を含む。認知要因は、行動に関する知識、行動の結果に対する期待や不安、行動する自信などである。環境要因は、他の人の行動からの学びや、自身の行動への周囲の反応に対する思い、周りからの支援、社会的・物理的な環境による影響などを指す¹⁶⁾。

この理論は基本的には個人レベルでの行動変容を扱い、環境要因の影響は十分に配慮されない傾向がある¹⁶⁾。そこで、生態学的モデルと組み合わせることによって、行動変容における環境要因も考慮する。

2.2.2 生態学的モデル

生態学的モデル (ecological model) によると、健康行動は、個人内部、個人間、組織、コミュニティ、公共政策などマルチレベルの要因の影響を受ける。環境や政策が健康な行動を妨げている場合には、個人の行動変容へのモチベーションやスキルを高めても効果はないとされる¹⁶⁾。例えば、肥満のダイアグラム¹⁸⁾においても食事や身体だけでなく、教育やメディアなどの多様な要素が複雑に影響している。

2.2.3 トランスセオレティカルモデル (TTM)

トランスセオレティカルモデル (Transtheoretical Model: TTM) は、精神分析理論から発展したモデルで、人々が行動変容に至る過程を説明しようとするものである。行動変容は、「無関心期」「関心期」「準備期」「実行期」「維持期」「完結期」のステージを通過して進む。ただし、必ずしも順調に一方に変化していくとは限らず後戻りすることもある¹⁶⁾。

2.2.4 健康信念モデル (HBM)

健康信念モデル (Health Belief Model: HBM) には、人々が病気の予防、発見、コントロールに必要な行動を行うかどうか、なぜ行うのかを予測するために役立つ要素が含まれている。主な要素は、「罹患可能性」、「深刻感」、「利益感」、「障害感」、「行動のきっかけ」、「自己効力感」である。それぞれ、病気や不健康状態に陥る可能性についての認識、放置した場合の深刻さについての認識、行動から得られる利益についての認識、行動を起こすことの妨げとなるものや生じ得る悪い結果についての認識、行動の引き金となり得るもの、健康行動をうまく実行できる自信、といった内容である¹⁶⁾。

2.3 アウトカム及びロジックの検討

前述した前提条件と調査結果に基づき、ドラフトモデルを構成するアウトカムとそれらをつなぐロジックの検討を行った。

アウトカムとロジックを検討する際には、主に次の2点に留意した。1点目は、アウトカムを最終アウトカムから遡って決定することである⁶⁾。最終アウトカムを達成するためのアウトカムとロジックに飛躍のないようにした。2点目は、理論やモデル、前提条件に基づいてアウトカム及びロジックを構成することである¹⁶⁾。

アウトカムは、抽象度の高い括りの「アウトカムカテゴリ」と、その中に含まれるより詳細な項目の「詳細アウトカム」で構成する。「アウトカムカテゴリ」は主に、ドラフトモデルの作成に当たって設定した前提条件と、調査によって収集した理論やモデルの組み合わせにより決定した。「詳細アウトカム」は、理論やモデルの構成要素に加えて、実際のプログラムを想定した項目を取り入れた。ただし、説明時にこれらの階層の区別が不要な場合にはどちらも「アウトカム」と呼び説明する。

3. ロジックモデルのドラフトモデルの作成結果

第1.3節で述べた対象範囲において、調査結果を基にドラフトモデルを作成した。「ヘルスケアに関する製品・サービスによって健康増進や生活習慣病予防を目的とするプログラム」が、「プログラム参加者 (個人)」の「健康寿命の延伸」に寄与するアウトカムおよびロジックを整理したものである。アウトカムの構成要素は3.1節で、その中に含まれるアウトカムの詳細は3.2節で述べる。

3.1 アウトカムを構成する要素の概要

まずは、先に述べた前提条件と調査結果から、ドラフトモデルに取り入れるべき観点を確認した。そして、本研究におけるヘルスケアの定義と健康行動の理論やモデルに基づく以下の4つの観点から、アウトカムを構成する要素を大まかに設定した。最終的に作成したモデルと対応する配置で、アウトカムを構成する要素の概要を図2に示す。

本モデルに取り入れた1つ目の観点は、「健康」についてである。本研究において定義したヘルスケアの内容に沿って、「5. 身体的健康」、「6. 心理的健康」、「3. 社会的関係性」の3つをアウトカムの要素とした。

2つ目の観点は、健康に関する行動変容の軸である。これは、トランスセオレティカルモデル (TTM) と健康信念モデル (HBM) に基づく。健康寿命を延伸させる上で、健康的な行動を継続して行うことが必要であり、変容にはステージがある。このことから、健康行動についての「4. 行動の変容」を本モデルの中心に据えた。そして、健康信念を醸成させながら行動変容のステージを進み、その結果として健康向上が見込まれる構成とした。

3つ目の観点は、行動に影響を与えるレベルである。これは、生態学的モデルに基づく。環境レベルとして「3. 社会的関係性」が、個人レベルとして「5. 身体的健康」、「6. 心理的健康」、「1. 知識」が行動に影響を与えるもの

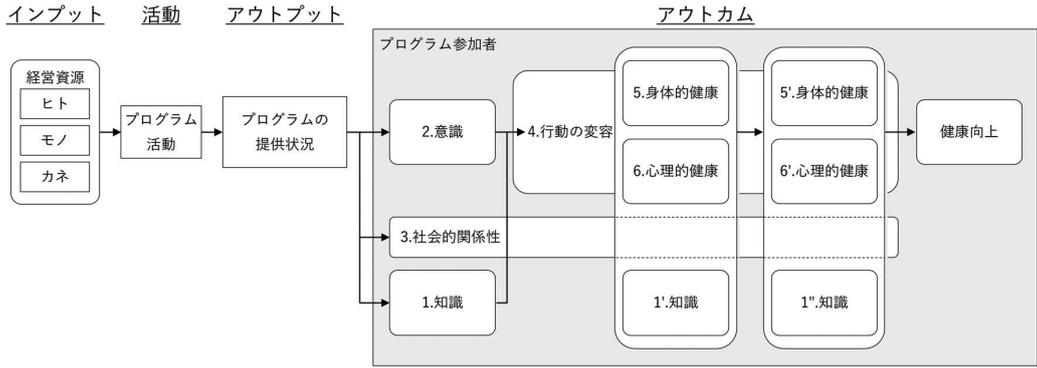


図2 ドラフトモデルを構成する要素

とした。

4つ目の観点、行動に影響を与える要因についてである。これは社会的認知理論 (SCT) と健康信念モデル (HBM) に基づく。行動に影響を与える要素には、行動要因、認知要因、環境要因、行動信念があることを考慮する観点である。このことから、「4. 行動の変容」に影響を与える要素として、「1. 知識」、「2. 意識」、「3. 社会的関係性」、「5. 身体的健康」、「6. 心理的健康」を設定した。また、この観点は詳細なアウトカムを検討する際にも留意した。

3.2 各アウトカムとそれらを結ぶロジックの決定

前節 3.1 で述べたアウトカムの構成要素を踏まえ、ロジックとあわせてアウトカムの詳細を決定した。この結果を図3に示す。ただし図3では、ロジックモデルの構成要素のうちアウトカムのみを抜粋して示す。以下で、1～10のアウトカムカテゴリを、そこに含まれる詳細アウトカムとあわせてそれぞれ説明する。ただし、アウトカム名を説明内容に応じて一部省略、変更して表記している。

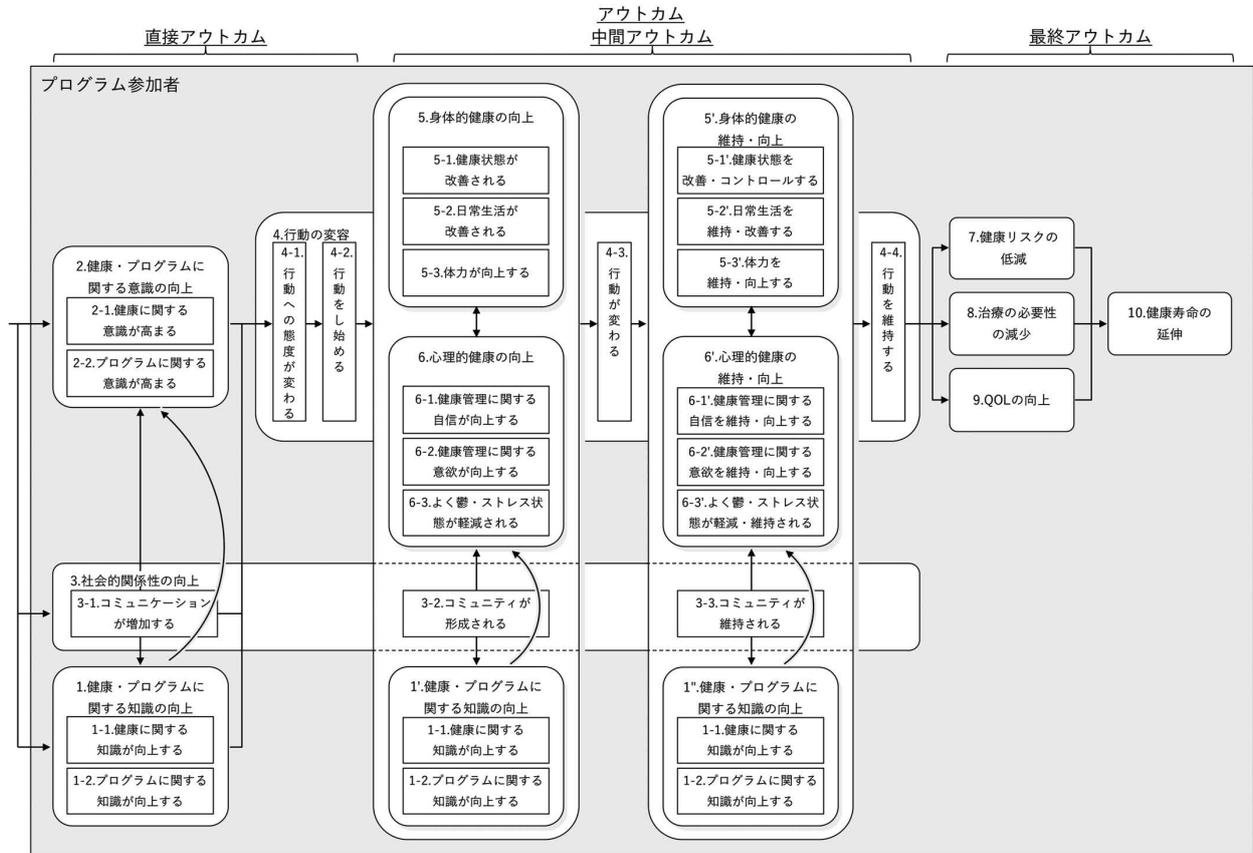


図3 ドラフトモデルのアウトカムを構成する要素

(1) 健康・プログラムに関する知識の向上

プログラムの提供により、直接的に生じるアウトカムの1つが「1. 健康・プログラムに関する知識の向上」である。このカテゴリに含まれる詳細アウトカムは、「1-1. 健康に関する知識が向上する」、「1-2. プログラムに関する知識が向上する」である。

これらのアウトカムは、プログラムによる情報が提供される、もしくは自身で情報を収集することによって生じる。これは「4. 行動の変容」の段階に応じて発現し、行動変容を促進させる。本モデルにおいては、行動変容の段階ごとにアウトカムの番号を「1」「1'」「1''」としている。

プログラムの情報が提供されることで、「1-2. プログラムに関する知識が向上」する。これにより、プログラムへの理解が深まり、「4. 行動の変容」へとつながる。同時に、健康に関する情報が提供されることで、「1-1. 健康に関する知識が向上」する。プログラムだけでなく、健康に関する知識が向上することで、日常生活における行動にも影響を与える。情報の例としては、プログラムの効果や、不健康な状態にいることのリスク、自身の行動がコミュニティに受け入れられる程度などが挙げられる。「1. 知識の向上」は、「2. 意識の向上」にもつながる。また、「3. 社会的関係性の向上」によりコミュニティから情報を得ることも「1. 知識の向上」に結び付く。

(2) 健康・プログラムに関する意識の向上

プログラムの提供により、直接的に生じるもうひとつのアウトカムが、「2. 健康・プログラムに関する意識の向上」である。詳細アウトカムは、「2-1. 健康に関する意識が高まる」、「2-2. プログラムに関する意識が高まる」である。

プログラムが提供されることで、プログラムとそれに関わる健康に意識を向けることになる。この「2. 意識の向上」は、プログラムに参加することで直接生じるだけでなく、「1. 知識の向上」や「3. 社会的関係性の向上」によって影響を受けることもある。

(3) 社会的関係性の向上

プログラムの提供により生じ、環境レベルで行動に影響を与えるアウトカムが、「3. 社会的関係性の向上」である。詳細アウトカムは、「3-1. コミュニケーションが増加する」、「3-2. コミュニティが形成される」、「3-3. コミュニティが維持される」である。

これらのアウトカムは、プログラムの提供とともに発現が期待される。そして、時間経過と行動の変容に伴い醸成されていく。関わる人や交流の場が増え、他者の持つ情報や価値観に触れることで、自身の「1. 知識」や「2. 意識」が向上することが想定される。また、コミュニティに属することは、健康行動を行うためのサポートを得られるだ

けでなく、行動を続ける動機にもなり得る。

このように「3. 社会的関係性の向上」は、環境が整うことで直接的に「4. 行動の変容」に影響を与えるだけでなく、個人の「1. 知識」や「2. 意識」、「6-2. 意欲」に影響を与えることで間接的に行動を変容させる。

(4) 行動の変容

「1. 知識の向上」や「2. 意識の向上」、あるいは「3. 社会的関係性の向上」を経て発現するアウトカムが、「4. 行動の変容」である。詳細アウトカムは、「4-1. 行動への態度が変わる」、「4-2. 行動をし始める」、「4-3. 行動が変わる」、「4-4. 行動を維持する」である。

まず行動をし始めるためには、前段階として行動への態度が変わる必要がある。ある行動への態度がポジティブに変わる、つまり行動をすることが自分にとって価値のある結果をもたらすと思うことで、行動をし始める。そして、自身の健康に関わる個人的または環境的な変化を伴うことで習慣としての行動が変わる。その結果さらに自身の健康に変化が現れ、さらに行動を維持するステージへと変容していく。ただし、行動変容は順調に進むとは限らず、場合によっては後戻りすることもあることに留意が必要である。

(5) 身体的健康の向上、身体的健康の維持・向上

このアウトカムは、「4-3. 行動が変わる」の前後で「向上」から「維持・向上」に変化する。「4-3. 行動が変わる」とは、習慣としての行動が変わることを意味し、一時的に行動をし始めただけでは身体的な健康が維持されるとは考えにくい。よって、行動が変わる前は「5. 身体的健康の向上」、行動が変わった後は「5'. 身体的健康の維持・向上」へと推移する。

詳細アウトカムの内容も行動が変わる前後で変化する。行動が変わる前は、「5-1. 健康状態が改善される」、「5-2. 日常生活が改善される」、「5-3. 体力が向上する」である。行動が変わった後は、「5-1'. 健康状態を改善・コントロールする」、「5-2'. 日常生活を維持・改善する」、「5-3'. 体力を維持・向上する」となる。ここで言う「5-1. 健康状態」は、身体の痛みや調子といった主観的な感覚を含むものである。「5-2. 日常生活」は、普段生活する中での動作や作業についてである。「5-3. 体力」は、活動できる時間や移動できる距離に直結する項目である。

行動によって身体に現れる「5-1. 健康状態」の変化、その状態に応じて変わる「5-2. 日常生活」と「5-3. 体力」の3つの観点で構成している。「5. 身体的健康」は、後述する「6. 心理的健康」と相互に影響する。「5. 身体的な健康の向上」により「6. 心理的な健康が向上すること」、「6. 心理的健康の向上」により「5. 身体的健康が向上すること」のどちらも想定される。これらの相互作用

は「4. 行動の変容」を促進する。

(6) 心理的健康の向上、心理的健康の維持・向上

このアウトカムは「5. 身体的な健康」と同様に、「4-3. 行動が変わる」の前後で「向上」から「維持・向上」に変化する。習慣としての行動が変わることで、心理的な健康を維持しさらに向上させることができる。

行動が変わる前の詳細アウトカムは、「6-1. 健康管理に関する自信が向上する」、「6-2. 健康管理に関する意欲が向上する」、「6-3. よく鬱・ストレス状態が軽減される」である。行動が変わった後の詳細アウトカムは、「6-1'. 健康管理に関する自信を維持・向上する」、「6-2'. 健康間管理に関する意欲を維持・向上する」、「6-3'. よく鬱・ストレス状態が軽減・維持される」である。

健康管理に関する「6-1. 自信」と「6-2. 意欲」は、行動する意図に関わる。自分自身で健康のための行動を実施できる、行動することで健康になりたいと思うことが行動につながる。「6-3. よく鬱・ストレス状態」は、心理的な健康状態を示すものである。

「6. 心理的な健康」は、目標を共にするコミュニティすなわち「3. 社会的関係性」や、「1. 知識」によって影響を受ける。また、「5. 身体的な健康」と相互に影響する。

(7) 健康リスクの低減

「7. 健康リスクの低減」は、健康的な「4-4. 行動を維持する」ことで生じ、「10. 健康寿命の延伸」につながるアウトカムの1つである。「5. 身体的」・「6. 心理的」な健康や、「3. 社会的関係性」、「1. 知識」が向上し、そのための「4-4. 行動を維持する」ことで病気などの健康に関する問題が生じる可能性が減る。

身体的な「5-1. 健康状態」や、「6-3. よく鬱・ストレス状態」は「7. 健康リスク」の決定要因である。そして、「5-2. 日常生活の改善」や「5-3. 体力の向上」、「6-1. 自信」や「6-2. 意欲」の向上、「3. 社会的関係性の向上」、「1. 知識の向上」により「4-4. 行動を維持する」ことで「7. 健康リスクが低減」する。

(8) 治療の必要性の減少

「8. 治療の必要性の減少」は、「4-4. 行動の維持」によって生じ、「10. 健康寿命の延伸」につながる2つ目のアウトカムである。

「5. 身体的健康」・「6. 心理的健康」が改善されることで、治療の頻度や回数が減る。それに伴い医療費も削減される。健康行動を続けることで治療自体が不要になることも見込まれる。

(9) QOL の向上

「9. QOL の向上」は、「4-4. 行動の維持」によって生

じ、「10. 健康寿命の延伸」につながる3つ目のアウトカムである。QOL (Quality of life) とは、生活の質のことである。健康状態に異常がないだけでなく、活気ある生活を送ることがQOLの高い状態と言える。

「5-1. 健康状態」に問題がなく、「6-3. よく鬱・ストレス状態」にないことに加えて、「5-2. 日常生活」や「5-3. 体力」、「6-1. 自信」や「6-2. 意欲」、「3. 社会的関係性」を良好に保つよう、「4-4. 行動を維持する」ことが「9. QOL の向上」につながる。

(10) 健康寿命の延伸

本モデルの最終的なアウトカムが「10. 健康寿命の延伸」である。

プログラムによって、「5. 身体的」・「6. 心理的」・「3. 社会的」に健康になること、そのための「4-4. 行動を維持する」ことが「7. 健康リスク」や「8. 治療の必要性」を抑え、「9. QOL を向上」させる。そしてそれらの先にあるアウトカムが「10. 健康寿命の延伸」である。「10. 健康寿命の延伸」は短期的に生じるものではないが、「4-4. 行動を維持する」ことで延伸が期待されるものである。

3.3 既存調査に基づくドラフトモデルの信頼性

作成したドラフトモデルの信頼性を、ヘルスケアプログラムに関する既存調査と比較することで確認した。ただし、健康行動の理論を基に導出したアウトカムやロジックが、現実の事象において発現し得ることを確かめることを目的とし、発現頻度・相対頻度の検証は目的としない。具体的には、低周波治療器とオンラインダイエットプログラムの2つの事例において、プログラムの提供から利用を通じての一連の調査結果と本モデルのアウトカムやロジックが矛盾しないことを確認した。詳細を以下に示す。ただし、対応するアウトカムの番号を括弧に入れて記述する。

3.3.1 低周波治療器の調査事例

著者ら(オムロンエキスパートリンク株式会社)が2016年に実施した家庭用の低周波治療器に関する調査事例¹⁹⁾と本ドラフトモデルの比較を行った。低周波治療器とは、肩や腰の「こり」や「痛み」を電気治療により緩和することができる電気治療器である。この調査では、低周波治療器に関する購入意欲が高い一般ユーザ10名(男性4名、女性6名、30代~60代)に、低周波治療器を無償提供し、日記法及び回顧的インタビューを用いた長期モニタリングを実施した。本論では、被験者の意識変容・行動変容、治療効果などの発現を、本ドラフトモデルと対応させて検証した。発現が確認されたアウトカムを以下に示す。

被験者は、当該治療器に関する知識を商品情報や取扱説明書などから獲得し(1-2)、自身のこり・痛みの状況も鑑

み、治療への態度が前向きなものに変わり（4-1）、治療器を使い始める（4-2）。使い始めたきっかけは調査に協力した（2-2）ことではあるが、被験者は治療効果を実感し（5-1、6-1）、治療器による治療への意欲が増すことで（6-2）、継続的に治療器を使うようになった（4-3）。継続的に治療器を使用することにより、こり・痛みのレベルが徐々に減少する効果もみられた（5-1'）。これらの結果、日常生活が活発になり（5-2'）、外出頻度が増え、健康状態がよりよい状態になる（5-1'、5-3'）などの好循環が生まれるケースもみられた。

また、こり・痛みのレベルの減少により、日常生活が活発化し家族と一緒に遊ぶ機会が増え、家族との関係性が向上する（3-3）ケースもみられた。このことは、治療器を使って活動の幅を広げられるという自信（6-1'）や、より健康になりたいという思い（6-2'）にもつながり、治療器の継続使用につながった（4-4）。さらに、治療のための通院頻度が減少（8）するケースもみられた。

3.3.2 オンラインダイエットプログラムの調査事例

あるオンラインダイエットプログラムに関する既存の事例研究²⁰⁾において、本研究のモデルに当てはまる結果を確認できた。この事例研究では、3名（20代女性、40代男性、50代男性）のプログラム利用者に対して、90日間のオンラインダイエットプログラムを実施した結果を報告している。これは、ウェアラブルデバイスを用いた体重・体脂肪率・活動量・睡眠時間と深さの計測記録や食事、ケトン体のチェックシート、チャットにおける言動を基に調査結果を示すものである。このプログラムは、理学療法士・作業療法士と1日に3回のチャットを通して、各利用者の食事・運動・睡眠状況の記録を個別に共有しながら行われ、3名とも体重と体脂肪率の減少が見られた。各プログラム利用者のチャット履歴に基づく検証の結果から行動変容につながるとされた文脈や言動と、本研究のドラフトモデルとの対応を以下に示す。

プログラム利用者は、食事における糖質の知識を得ること（1-1、1-2）で、自身の食生活へ意識を向けたこと（2-1、2-2）が確認された。これにより、自身のダイエットにおける課題を見つけて取り組む様子が見られた（4-1、4-2）。また、短期間の食事の改善（4-2）による体重の減少を実感したこと（5-1）で、活動量と食事のバランスを見直す（4-3）ようになる状況も見られた。そして90日間のプログラムを通して、自分自身の体重の増減と運動や食事の関係を理解すること（5-1'、5-2'、1''）で、継続して体重を管理できる自信をもつ（6-1'）様子も観察された。また、理学療法士・作業療法士とのチャットのやり取りにより、食事のとり方に関する知識を得たり（1、1'、1''）、それを実践に移してみたりする（6-2、6-2'）状況も確認できた。

4. むすび

本研究では、健康行動に関する様々な理論やモデルに基づき、「ヘルスケアに関する製品・サービスによって健康増進や生活習慣病予防を目的とするプログラム」が「プログラム参加者（個人）」の「健康寿命の延伸」に寄与するためのロジックモデルのドラフトモデルを作成した。これを、ヘルスケアに関するプログラムのロジックモデルを作成する際のひな形として活用することで、作業負担を軽減できると考えられる。また、本モデルは、実際のプログラムにおける活用及び改善を通して、ヘルスケアプログラムによる社会的課題の解決に寄与することが期待される。このように本研究は、社会的課題の解決を目指す、オムロンを含む企業や組織の取り組みを支援する形で、社会的課題の解決に貢献できると考える。

なお、本モデルの簡略版をアウトカムの測定指標例と共に「社会的インパクト評価ツールセットヘルスケア」²⁰⁾として公開した。これは、SIMIにより公開され、NPOや社会的企業に広く利用されることを目的とするものである。

本モデルの有用性については、作成したモデルと既存調査の比較による検証にとどまっておらず、実際の活用を通してさらなる検証と改善が必要である。今後は、本モデルが他の事例にも当てはまることと、実際のプログラムに適用できることの検証を通してモデルを改善していく。

また今後、ロジックモデルのドラフトモデルを改善していく上で、対象範囲の拡張も視野に入れる。WHOの健康の定義について、「spiritual」の字句を追加する提案が1998年になされたが、採択は見送られている。「spiritual」は、精神（的）の、もしくは、霊的な、などと訳される単語²¹⁾、人間の尊厳の確保や生活の質を考えるために必要で本質的なものだという観点から提案がなされた²²⁾。本研究では「spiritual」に当たる範囲は対象としていない。しかし社会では将来、心の満足や個人の生き方を重視する価値観が高まり、知性や感性など人間に関わる科学技術の発展が求められることがSINIC理論において示されている²³⁾。近い将来、そのような成熟した社会に対応し、ヘルスケアプログラムによる社会的課題の解決に寄与するロジックモデルが必要となると考えられる。このことから、「spiritual」を含めた健康についてのドラフトモデルを作成することが今後の課題である。また、本研究では金銭やポイントの付与と言った意味での「インセンティブ」には触れていない。しかし、これも健康行動の変容に影響を与える要因の1つであると考えられる。よって、これらの点も考慮した上で本モデルを拡張していく。

参考文献

- 1) GSG 国内諮問委員会社会的インパクト評価ワーキング・グループ. 社会的インパクト評価ツールセット実践マニュアル. Ver.2.0, 社会的インパクト・マネジメント・イニシアチブ, 2017, 39p. http://www.impactmeasurement.jp/pdf/NAB_manual_ver2.pdf, (参照 2019-12-20).
- 2) 社会的インパクト評価検討ワーキング・グループ. 社会的インパクト評価の推進に向けて—社会的課題解決に向けた社会的インパクト評価の基本的概念と今後の対応策について. 内閣府, 2016, 42p. <https://www.npo-homepage.go.jp/uploads/social-impact-hyouka-houkoku.pdf>, (参照 2019-12-20).
- 3) 社会的インパクト・マネジメント・イニシアチブ共同事務局. “SIMI 社会的インパクト・マネジメント・イニシアチブ”. SIMI I 社会的インパクト・マネジメント・イニシアチブ. <http://www.impactmeasurement.jp/>, (参照 2019-12-20).
- 4) ロッシ, P. H.; リプセイ, M. W.; フリーマン, H. E. プログラム評価の理論と方法 システムティックな対人サービス・政策評価の実践ガイド. 日本評論社, 2005, 418p.
- 5) 源由理子. 政策の質的改善と評価—プログラム評価の理論を適用して—. 政策評価に関する統一研修 (中央研修) の概要. 総務省, 2017, 36p. https://www.soumu.go.jp/main_content/000474081.pdf, (参照 2019-12-20).
- 6) 日本財団. ロジックモデル作成ガイド. 日本財団ソーシャルイノベーションアワード2019運営事務局, 10p. https://www.nippon-foundation.or.jp/app/uploads/2018/12/wha_pro_sif_rec_02.docx, (参照 2019-12-20).
- 7) (財) 農林水産奨励会農林水産政策情報センター. ロジックモデル策定ガイド. 農林水産研究所, 2003, 82p. https://www.maff.go.jp/primaff/about/center/hokoku/attach/pdf/200308_hk066.pdf, (参照 2019-12-24).
- 8) PwC あらた有限責任監査法人. 評価の高かった事例. 内閣府, 2017, 43p. <https://www.npo-homepage.go.jp/uploads/h28-social-impact-sokushin-chousa-04.pdf>, (参照 2019-12-25).
- 9) ケイスリー株式会社. 神奈川県 SDGs 社会的インパクト評価実証事業実証事業の結果 (評価ワークシート集). 神奈川県, 2019, 71p. <http://www.pref.kanagawa.jp/docs/bs5/documents/3.pdf>, (参照 2019-12-25).
- 10) 佐賀県. 第7次佐賀県保健医療計画. 佐賀県, 2018. https://www.pref.saga.lg.jp/kiji00361067/3_61067_94107_up_esm7csie.pdf, (参照 2020-01-09).
- 11) 沖縄県. 第7次沖縄県医療計画. 沖縄県, 2018. <https://www.pref.okinawa.jp/site/hoken/iryoseisaku/kikaku/documents/dai5.pdf>, (参照 2020-01-09).
- 12) 文部科学省 科学技術・学術政策局 企画評価課 評価・研究開発法人支援室 研究開発評価推進検討会. ロジック・モデルの作成ワークショップ. 文部科学省, 2018, 14p. https://www.mext.go.jp/component/a_menu/science/detail/_icsFiles/fieldfile/2018/12/11/1411585_02.pdf, (参照 2019-12-25).
- 13) 次世代ヘルスケア産業協議会事務局 (経済産業省). 次世代ヘルスケア産業協議会の今後の方向性について. 経済産業省, 2018, 27p. http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11169867/www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/shoujo/jisedai_healthcare/pdf/007_02_00.pdf, (参照 2019-12-25).
- 14) 厚生労働省. 2040 年を展望し、誰もがより長く元気に活躍できる社会の実現に向けて (2040 年を展望した医療提供体制改革、データヘルス改革の推進、就職氷河期世代の方々の活躍の場を更に広げるための支援). 内閣府, 2019, 10p. https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/minutes/2019r/0531r/shiryu_02.pdf, (参照 2019-12-25).
- 15) 公益社団法人 日本 WHO 協会. “健康の定義について”. 公益社団法人 日本 WHO 協会. <https://www.japan-who.or.jp/commodity/kenko.html>, (参照 2019-12-25).
- 16) グランツ, カレン; ライマー, バーバラ, K. 健康行動学 その理論, 研究, 実践の最新動向. メディカル・サイエンス・インターナショナル, 2018, 427p.
- 17) 松本千明. 医療・保健スタッフのための健康行動理論の基礎 生活習慣病を中心に. 医歯薬出版, 2002, 100p.
- 18) Government Office for Science. Tackling Obesities: Future Choices –Project Report. 2nd ed., GOV. UK, 2007, 161p. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/287937/07-1184x-tackling-obesities-future-choices-report.pdf, (参照 2019-12-25).
- 19) 社会的インパクト・マネジメント・イニシアチブアウトカム・指標ワーキング・グループ. 社会的インパクト評価ツールセットヘルスケア. Ver. 1.0, SIMI 社会的インパクト・マネジメント・イニシアチブ, 2019, 40p. http://www.impactmeasurement.jp/wp/wp-content/uploads/NAB_healthcare_ver1.pdf, (参照 2019-12-27).
- 20) 吉田頌平, 森本義朗, 青木晃, 江口康二. オンラインダイエットプログラムを通じた生活習慣変容の多様性. 総合リハビリテーション. 2019, Vol. 1, p. 39-45.
- 21) 三省堂. “spiritual”. 三省堂ウェブディクショナリー. <https://www.sanseido.biz/User/Dic/Index.aspx?TWords=spiritual&st=0&DORDER=&DailyJJ=checkbox&DailyEJ=checkbox&DailyJE=checkbox>, (参照 2020-01-10).
- 22) 厚生省大臣官房国際課. “WHO 憲章における「健康」の定義の改正案について”. 厚生労働省. https://www.mhlw.go.jp/www1/houdou/1103/h0319-1_6.html, (参照 2019-12-25).
- 23) オムロン株式会社. 統合レポート2016. OMRON Japan, 2016, p.56-57. <https://www.omron.co.jp/ir/irlib/pdfs/ar16j/ar2016j.pdf>, (参照 2019-12-25).

執筆者紹介



押野 沙紀 OSHINO Saki
オムロン エキスパートリンク株式会社
人財ソリューションセンター 人財サービス営業部
リサーチサポートセンター
専門：人間中心設計、人間工学
所属学会：日本評価学会



伊藤 泰久 ITO Yasuhisa
オムロン エキスパートリンク株式会社
人財ソリューションセンター 人財サービス営業部
リサーチサポートセンター
専門：人間中心設計、UX デザイン、評価学
所属学会：人間中心設計推進機構、日本評価
学会、日本ファンドレイジング協会



川合 朋音 KAWAI Tomone
認定 NPO 法人 日本ファンドレイジング協会
インパクトセンター フェロー

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

— 3. ソーシャルソリューション —



画像合成による物体検出モデルの効率的な環境適応技術

山本 健生, 平井 佐和, 濱走 秀人, 岡本 大和

第三次 AI ブームにおける技術の飛躍的進化に伴い、従来は人が担っていた業務を AI によって自動化し、労働力不足の課題を解決する期待が高まっている。例えば社会領域では安心安全のために防犯カメラ等の映像を人手で確認するモニタリング業務の自動化が期待され、これは機械学習手法によって検出したい対象をラベル付けした大量の画像データをモデルに学習させることで実現できる。

しかしながら、機械学習モデルには学習データと異なる環境に対して性能低下するという問題がある。環境ごとに学習データを準備して追加学習させることで性能を改善できるが、学習用の画像収集と人手で正解ラベルを付与する作業には膨大なコストがかかる。特に社会領域では撮影地点やカメラ設置条件など多種多様な環境相違が想定されるため、環境ごとに追加学習を行うのは現実的ではない。

本稿では、機械学習モデルを様々な環境へ効率的に導入するため、学習用の画像と正解ラベルを画像合成により自動生成する手法を提案する。実験は高速道路や交差点における車両検出を対象に行った。自動生成した画像では従来の学習データを準備して追加学習した場合の約 8 割の性能改善効果を、5.5%の作業コストで得られた。これによりモニタリングの自動化のさらなる推進が期待できる。

Efficient Scene Adaptation Technology for Object Detection Using Auto Image Synthesis

YAMAMOTO Yoshiki, HIRAI Sawa, HAMABASHIRI Hideto and OKAMOTO Yamato

Recently, because of the growing need for automation of monitoring, machine learning is widely used in the social systems domain. However, the problem of machine learning is that the pre-learned model will work in poor performance when the environment changes. Especially in social systems domain, there are various environmental changes such as place, camera angle, etc., and additional learning through scene adaptation is essential to achieve the required accuracy.

Therefore, we tried to develop a method to make more efficient scene adaptation. Until now, it took a lot of cost to collect images of the new scene and enter the ground truth. In this paper, we investigate a method to automatically generate images and ground truth labels for training by image synthesis. The experiment was conducted for vehicle detection at highways and intersections. As a result, we were able to generate the training dataset with less cost while achieving accuracy close to that of manual input. This method can be expected to further automation.

1. まえがき

社会領域では労働力不足解決のため、モニタリングの自動化のニーズが高まっている。特に、白杖検知・車いす検知・線路転落検知や、車番認証・交通量調査・逆走検知などの自動化ニーズが顕在化している¹⁾。モニタリングには様々なシーン・用途が考えられ、求められる機能も物体検

出、行動追跡、イベント検知など様々である。本稿では主流である固定カメラを想定して、モニタリングの最も主要な機能である、物体検出の実現をターゲットとする。

物体検出は検出したい対象をラベル付けした大量のデータをモデルに学習させることで実現が期待できるが、一般的に、機械学習により構築したモデルは、学習データと異なる環境で取得したデータに対して性能低下する問題が知られている。これは、環境の相違によってデータ分布が異

Contact : YAMAMOTO Yoshiki yoshiki.yamamoto@omron.com

なることに起因するとされている²⁾。例えば、本稿が扱う固定カメラによる物体検出モデルでは、撮影地点やカメラ設置条件が学習データと異なる場合に検出精度が落ちる問題がある。このとき、モデルを導入する環境ごとに学習データを準備し、追加学習させることで性能を改善できる。しかし、物体検出モデルにおける正解ラベル入力、人手で画像中の物体領域を1つずつ確認して座標入力するため膨大なコストがかかる。特に撮影地点やカメラ設置条件など多種多様な環境相違が想定される社会領域では環境ごとに追加学習を行うのは現実的ではない。よって、効率的に追加学習をしてモデルを環境に適応させる手法が求められる。

2. 関連研究

モデルを効率的に環境適応させるために、前景と背景をそれぞれ準備して、組み合わせて学習データを生成する手法が提案されている。T. Hodan らは実画像データの様々な背景に対して、CGで作成した3Dモデルオブジェクトを光の当たり方・重なり方を考慮して貼りつける手法³⁾を提案した。G. Georgakis らは自律走行するロボットに搭載したカメラを対象に、様々な場所で撮影した物体を前景、モデルを適応させたい環境で撮影した画像を背景として、背景の奥行き情報を考慮しながら貼り付ける手法⁴⁾を提案した。

これらの手法は、モデルを適応させたい環境とは異なる環境からの前景取得を暗に前提としている。そして、前景と背景を異なる環境から取得する想定のため、貼りつけ境界や陰影など違和感なく貼りつけるための大量の計算処理を必要とする。例えば、T. Hodan らの手法は400ノードのCPUクラスタを利用し、640×480画素の画像と正解ラベルの生成に1枚平均120秒を要する。

そこでわれわれは背景と前景の両方を同一の環境、すなわち、モデルを適応したい環境から取得する前提で、前景を貼り付ける座標とサイズを指定するだけの簡単な処理で高速に画像と正解ラベルを生成する手法を提案する。これにより人手による正解ラベル入力を行うことなく、かつ大量の計算処理も必要もせずに学習データを生成し、環境ごとに適応したモデルを追加学習させることができる。

3. 提案手法について

提案手法は大きく分けて3つの処理で構成される。最初に、モデルを適応させたい現場の画像から背景と前景をそれぞれ抽出し、データベースに保存する。次に、そのデータベースの背景と前景を様々なパターンで組み合わせて大量の合成画像と正解ラベルを生成する。最後に、生成した合成画像と正解ラベルを用いて物体検出モデルを追加学習させる。(処理フローについて図1参照)

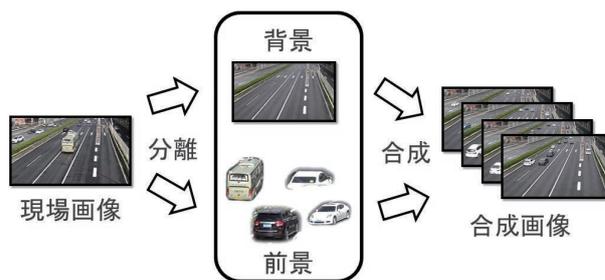


図1 提案手法の処理フロー

3.1 物体検出のアルゴリズム

物体検出のアルゴリズムには、Faster R-CNN⁵⁾ や SSD⁶⁾、YOLO⁷⁾ など様々な手法が提案されている。この中でも、SSDは他の手法に比べて処理が軽量かつ高速である特徴が挙げられる。社会領域では移動速度が速い自動車や不規則に進行方向が変化する人を検出するため、高いフレームレートでの処理が求められる。また、通信環境が整備されていない状況やロボットなど即時性が求められるアプリでは、サーバーと通信せずに現場のエッジ端末など限られた計算リソースで処理できるように、モデルの軽量化が求められている。以上の観点から、社会領域の利用に適したSSDを物体検出アルゴリズムに採用して、提案手法を検証する。

3.2 背景・前景の抽出方法

背景と前景の抽出方法には人手で切り出す、背景差分法によって抽出する、学習済みの機械学習モデルで抽出するなど、様々な方法が考えられる。

本稿では、撮影画像の平均画像を生成して、これを背景画像とする。前景は効率化と正確性の観点から、インスタンスセグメンテーションに広く用いられるMask-RCNN⁸⁾を用いて抽出する。Mask-RCNNは、どの環境にも特化させていない一般公開されている標準モデルを用いて、前景領域と判定された部分を抽出する。なお、前景を貼りつける際に背景との境界部分の親和性を考え、境界部分の透過処理とスムージング処理を施す。

4. 前景の貼り付け方の検証

4.1. 実験データ・評価方法

既設の防犯カメラを想定して、高速道路の上方から固定カメラで撮影した画像に対し、物体検出モデルによって車両を検出する実験を行う。なお、実験で利用する画像は道路管理者に許可を得たうえで撮影し、社内規定に則り利用・管理を行った。(画像管理番号: G190035-000)



図2 実験現場の撮影映像 (高速道路)

図2の地点で30分間の映像を撮影し、これを学習データ生成用の素材とする。そして、一定時間経過後に再び30分撮影し、1秒ごとに切り出した1800枚を評価用データとする。

合成用の背景を取得するために、30分の映像を1秒ごとに切り出した1800枚から平均画像を50枚生成して、データベースに保存する。これは、1枚のみ生成すると、生成した1枚に前景が含まれてしまうなどのリスクを避けるためである。また、前景は1秒ごとに抽出すると同じ車両が何回も登場するため、映像から4秒ごとに切り出した450枚からMask-RCNNで抽出された前景すべてをデータベースに保存する。その後、データベースに含まれている背景と前景を組み合わせて、1800枚の画像と正解ラベルを生成し、これを約350回ずつモデルに学習させて性能評価を行う。

性能評価にはAP (Average Precision) を用いる。これは、物体検出で広く用いられるPASCAL VOC⁹⁾ やMS COCO¹⁰⁾ データセットでも用いられる指標で、0から1の間の値を取り、1に近いほど誤検出や見逃しが少ないことを意味する。IoUと呼ばれる正解判定の閾値を本実験では0.5に固定し、101pointの補間APで計算されるAP_{0.5}を使用した。これは再現率 (Recall) が0, 0.01, ..., 0.99, 1.0のときの適合率 (Precision) の平均である。

$$AP_{0.5} = \frac{1}{101} (Pre.(0) + Pre.(0.01) + \dots + Pre.(1.00))$$

なお、本実験で扱う道路画像は、物体検出したい領域を捉えられるよう撮影したが、目的外の領域も映り込んでいる。例えば、今回は図2中央の高速道路エリアで性能評価を行う予定であったが、両脇の一般道が映りこんでいる。本実験では、このような目的外領域は物体検出の対象外として、領域を制限してAPを算出する。(これを、AP (Mask) と表記する)

4.2 前景を貼りつけるときの制約

機械学習における一般論として、学習データの分布はモデルを導入する現場で実際に観測されるデータに近いことが望ましい。現場で観測されるデータに比べて学習データ

のバリエーションが少ない場合は、未学習のパターンが出現したときに正しく検出できない。一方で、実際に現場で観測しえないデータ、例えば空を飛ぶ車両や実在しない巨大サイズの車両が学習データに含まれていると、誤検出が増え性能劣化を引き起こす。以上を踏まえて、提案手法では生成した合成画像が実際に現場で観測されるデータの分布へと近づくよう、現場知見に基づく3つの制約を画像生成時に設けた。

- 制約 1. 車両のサイズと貼りつける領域を制限する
- 制約 2. 画像1枚の前景の平均数を、合成画像と現場のデータで一致させる
- 制約 3. 重なった車両を一定確率で発生させる

表1にそれぞれの制約の有効性を網羅的に検証した結果をまとめる。なお、実験1-4,2-3,3-1は同じ条件である。✓は適用していること、×は制約を適用していないことを示す。

表1 貼りつけ時の制約と、合成画像学習モデルの精度

実験番号	サイズの制約	位置の制約	貼りつけ平均台数 (範囲)	重なり平均台数	AP (Mask) %
1-1	×	×	10 (1 ~ 19)	0	65.82
1-2	×	✓	10 (1 ~ 19)	0	66.37
1-3	✓	×	10 (1 ~ 19)	0	67.86
1-4	✓	✓	10 (1 ~ 19)	0	<u>69.60</u>
2-1	✓	✓	1 (1 ~ 1)	0	58.90
2-2	✓	✓	5 (1 ~ 9)	0	65.87
2-3	✓	✓	10 (1 ~ 19)	0	<u>69.60</u>
2-4	✓	✓	20 (11 ~ 29)	0	68.58
3-1	✓	✓	10 (1 ~ 19)	0%	69.60
3-2	✓	✓	10 (1 ~ 19)	20%	85.40
3-3	✓	✓	10 (1 ~ 19)	40%	87.52
3-4	✓	✓	10 (1 ~ 19)	60%	<u>89.24</u>

次節から3つの制約について仮説を述べ、検証結果を示す。

4.3 位置・サイズの制約【実験1】

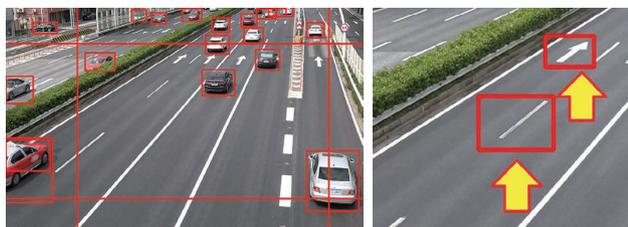
前景を背景に貼りつけるときの位置とサイズの制約を考える。前景を抽出時と同じ位置に貼りつけるだけでは、合成画像のバリエーションが少なくなってしまう。そこで、前景を抽出時と異なる位置にも貼りつけ、様々なパターンでの合成画像を生成する。このとき、実際の現場では、壁や分離帯上には車両が出現しないことから、車両の出現位置

に環境特有の制約がある。SSDは原理上、前景が出現しやすい位置を学習する傾向があるため、道路上のみに貼りつけるような位置の制約は有効に働くと期待できる。

また、カメラ画像では遠近法により手前の車両は大きく、奥の車両は小さく映るため、抽出時と異なる座標に前景を貼りつける際にはサイズ比率を計算して、手前に貼りつける場合は拡大し、奥に貼りつける場合は縮小する。これにより、いっそう合成画像が実際に観測される画像に近づくと期待できる。ただし、極端に拡大縮小すると前景画像が歪むため、拡大率と縮小率に上限と下限を設け、その範囲内で収まる位置にのみ前景を貼りつける。

これらの制約の有効性を検証するため、サイズの制約と位置の制約がある場合とない場合を4つのパターンで比較検証した。座標の制約がない場合は前景をランダムに貼り付け、制約がある場合は事前指定した道路領域内の座標にだけ貼り付ける。サイズの制約がない場合は異なる位置に貼りつけてもサイズを変更せず、制約ありの場合は75%~133%の範囲内で貼りつけられる範囲にのみ貼りつけ、その際サイズを変更した。

実験結果より、両方の制約を採用した場合が最も学習後の検出精度が高かった。サイズの制約がない実験1-1の結果(図3(a))では画面全体に検出枠を出してしまうことがある。これは、貼りつける際に大きさの変化を考慮せず貼りつけることで、その結果、極端に大きい車が発生してしまい、それを学習するためである。逆に実験1-4(図3(b))では白線を誤検出している傾向にある。



(a) 実験 1-1

(b) 実験 1-4

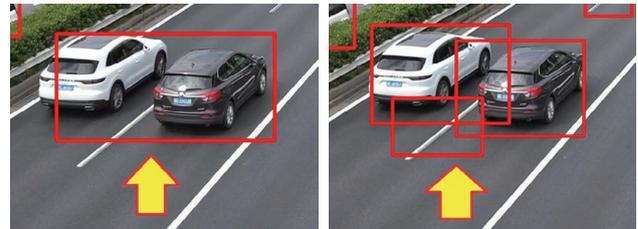
図3 実験1の結果

4.4 貼りつける台数【実験2】

画像には車両が1台だけのときもあれば複数台同時に映り込む場合もある。合成画像の前景数が極端に少ない画像や多い画像ばかりに偏ると、現場のデータと乖離する可能性がある。そこで、1枚の画像に貼りつける前景数の平均を現場画像の前景数の平均にすることで、合成画像を実際に観測される画像に類似すると期待できる。前景数を調整することの有効性を確認するために、実験データの台数平均である10台/枚の場合、極端に少ない場合として1台/枚の場合、5台/枚の場合、そして極端に多い例として20台/枚の場合の計4パターンで学習後の性能を比較した。なお4つのパターンとも、実験1で効果が認められた「サイズ

の変更」及び「貼りつけ位置の制約」を採用している。

実験結果としては、1台の場合が極端に追加学習後の性能が低く、最も性能が高いのは10台の場合であった。1台の場合は近接している複数の車両をまとめて1台として検出する傾向にある。一方で、20台の場合は背景の誤検出や、1台の車両に対して複数の検出枠がつくなど、過剰に検出をする傾向がある。



(a) 実験 2-1

(b) 実験 2-4

図4 実験2の結果

4.5 重なった車両の生成【実験3】

物体検出では物体の一部が隠れて観測できない場合に、うまく検出できないという課題がある。例えば、物体同士が重なった場合は、手前の物体は検出できていても、奥の物体は欠けて見えるため検出できなかったり、まとめて1つの物体として検出したりする。そこで、この隠れの課題に対処するために、合成する際に重なった車両をあえて生成し、学習させる。これにより、隠れた車両へのロバスト性が向上できると期待できる。重なった車両の生成方針は、4.3章の方針に従って、拡大縮小しながら座標指定して車両を貼り付けるときに、一定数の車両を他の車両と重なる座標に貼り付けることで実現する。このとき、カメラから手前の車両が奥の車両を隠すようにする(図5)。

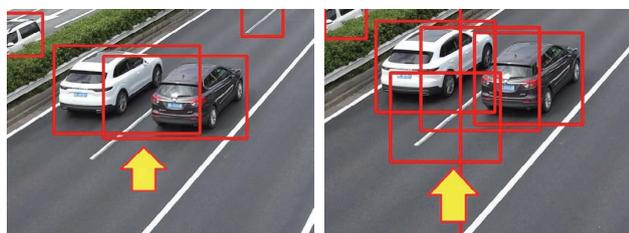


図5 拡大縮小・移動して重ねた車両

重なった車両を生成する有効性を確認するために、車両を重ねて貼りつける割合を0%、20%、40%、60%の4パターン設定し、それぞれの学習後の性能を比較した。このとき、1枚の画像に貼りつける車両の台数は4.4章の結果より最も高性能だった平均10台とする。

実験の結果、60%の車両を重ねたときが最も学習後の性能が高く、その次に性能が高いのは40%に設定したときだった。検出結果を確認したところ、重なる台数が少ないと重なっていない車両は検出できるが、重なった車両の

検出精度が低下する傾向にあった。一方で、重ねる台数が多すぎると重なっている車両は検出できるが、重なっていない車両に対して複数の検出枠を出してしまい、重なっていない車両の精度が低下する傾向にあった。



(a) 実験 3-1 (b) 実験 3-4

図 6 実験 3 の結果

また、最も性能が高かったのは 60% の場合だが、重ねて貼りつけられる前景ペアを探索するのに時間がかかり、前景を重ねる数が増えるほど探索に時間がかかる。重なりなしのとき、1 枚の画像を生成するのに平均 2.4 秒かかるが、40% の時は平均 6.4 秒、60% の時は平均 14.7 秒と大きな差がある。特に、40% の時と 60% の時では性能はあまり差がない一方、生成時間には 2.3 倍の差がある。

5. 性能評価

5.1 性能評価の条件設定

合成画像による学習の有効性を確認するために、「人手で正解ラベルを入力した追加学習」、「人が素材を確認した後、画像合成で画像・正解ラベルを生成した追加学習（提案手法：素材確認あり）」、「人が素材を確認せず、画像合成で画像・正解ラベルを生成した追加学習（提案手法：素材確認なし）」、「追加学習を行わなかった場合」の 4 つを比較する。

実験には、2 つのシーン（1. 高速道路、2. 交差点）で撮影されたデータを用いる。1 の高速道路は 4 章と同一の地点である。2 の交差点を図 7 に示す。



図 7 実験現場の撮影映像（交差点）

物体検出モデルや学習手順は 4 章と同様とする。提案手法

で前景を貼り付けるときには、4 章の実験結果から最も有効だった方針、つまり、座標の制約を課し、貼りつけ時にサイズの変更を行い、前景の同時出現数の平均を現場と合わせて、重なった車両を生成する方針とする。ただし、重なった車両を生成する割合は、生成時間も考慮して 40% とする。

また、Mask-RCNN で車両を抽出したときに、誤って白線や矢印を前景素材として抽出してしまうことがある。例えば図 8 のように車両の端や舗装を抽出してしまい、これを車両として学習してしまうと性能低下の原因となる。誤った前景を学習したときの影響を調査するため、Mask-RCNN で取り出した前景を手手でチェックし、不良な素材を排除した場合（素材確認あり）と、しない場合（素材確認なし）の 2 つを比較する実験を行う。



図 8 車両以外を抽出してしまった例

5.2 結果と考察

2 つのシーンでの実験結果を表 2.3 にそれぞれ記す。いずれのシーンでも、合成画像によって学習した場合の性能は追加学習を行わなかった場合の性能を大きく上回り、合成画像による学習の有効性を確認できた。具体的には、従来の 35 point の改善に比べ 27 point の改善ができた。すなわち、素材確認ありの高速道路では従来の 5.5% の作業コストで、従来の 77% の性能改善を図ることができた。

表 2 実験の結果（高速道路）

手法	AP (Mask) %	必要工数 (時間)
人手入力	97.52	144
画像合成 (素材確認あり)	89.72	8
画像合成 (素材確認なし)	89.56	4
追加学習なし	62.46	0

表 3 実験の結果（交差点）

手法	AP (Mask) %	必要工数 (時間)
人手入力	96.49	144
画像合成 (素材確認あり)	85.50	8
画像合成 (素材確認なし)	84.95	4
追加学習なし	80.90	0

一方、交差点では 16 point に対して 5 point の改善に留まった。

検出結果を確認すると、追加学習を行わなかった場合は検出できなかったパターンが、合成画像を学習した場合には検出できていることがわかる。例えば図9の場合、追加学習なしでは中央分離帯に隠れている車が検出できていないが、合成画像で追加学習すると検出できるようになっている。(黄矢印) また、素材確認なしでは矢印舗装を車両として誤検出しているが、素材確認を行い除外すると検出しなくなっている。(青矢印)

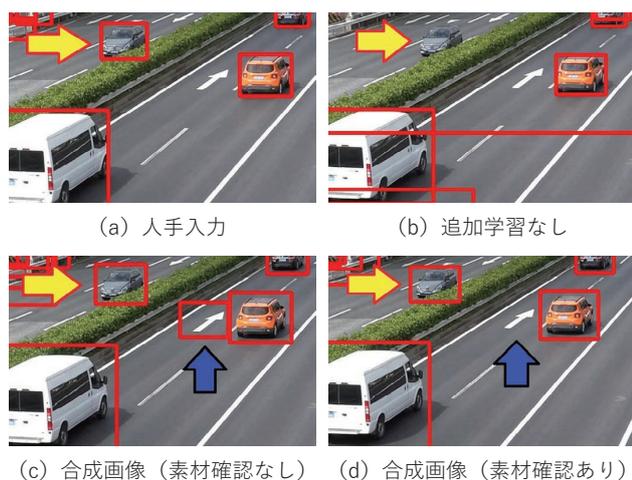


図9 検出結果の比較

合成画像による追加学習では、人手で真値入力したデータを学習した場合の性能には到達できなかったが、コスト面で優位性を示した。例えば、本実験で使用した 1800 枚の画像に人手で正解ラベルを入力するには延べ 144 時間を要した。一方、画像合成の場合は生成画像を確認しながら、パラメーターを調整するのみで済むため、素材を確認しない場合は約 4 人時、確認する場合は約 8 人時で画像と正解ラベルが生成できた。

さらに、合成画像を扱う従来研究と比べて計算処理時間を大幅に削減できた。T. Hodan らの手法では、 640×480 画素の画像の生成に 1 枚平均 120 秒を要したが、提案手法では 1600×900 画素の画像生成を 1 枚平均 6.4 秒で達成した。

残課題としてはこの作業コストを維持しつつ、さらに実際の映像に近づくための貼り付け方の検討する必要がある。欠けた前景や車両以外を除外しても、人手で入力した際の精度には及ばなかった。これは、自動で貼りつけた際の画像の分布が実際の画像の分布と異なっているからと考えられる。貼りつけた際の陰影処理や、重なった車の生成方法の再検討などが必要と考えられる。

6. むすび

本研究では車両検出のタスクに対して、自動化されたツールで高速に画像と正解ラベルを生成し、追加学習を行

う手法を研究・開発し、その有効性を確認できた。

具体的には、現場で撮影した画像から車両と背景を分離し、背景に対して車両を様々に貼りつけることで自動的に画像と正解ラベルを生成した。また、貼り付け方を工夫することにより、自動生成された画像と実画像の分布をできるだけ近づけ、見逃しや誤検出を減らすことができた。その結果、人手で入力した正解ラベルに比べて 5.5% の工数で精度を向上させ、環境適応することができた。

今後の課題としては、この作業コストの少なさを維持しつつ、人手で正解ラベルを入力した場合との性能の差をどのようにして埋めていくか、という点が挙げられる。この差は貼りつけ方がまだ実際の画像と異なっていると考えられる。今後、この課題に対して自然な貼り付け方を模索して改善を進めていき、固定カメラの車両のみならず、人・動物の検出や、移動カメラなど様々なフィールドへ技術展開していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 公益社団法人日本防犯設備協会. “画像解析に関する調査研究報告書”. https://www.ssaj.or.jp/jssa/pdf/gazou_kaiseki.pdf, (参照 2020-5-13).
- 2) A. Torralba; A. A. Efros. “Unbiased look at dataset bias”. In IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2011, p.1521-1528.
- 3) T. Hodan; V. Vineet; R. Gal; E. Shalev; J. Hanzelka; T. Connell; P. Urbina; S. N. Sinha; B. K. Guenter. Photorealistic image synthesis for object instance detection. arXiv preprint arXiv:1902.03334, 2019, (参照 2020-5-13).
- 4) G. Georgakis; A. Mousavian; A. C. Berg; J. Kosecka. Synthesizing training data for object detection in indoor scenes. arXiv preprint arXiv:1702.07836, 2017, (参照 2020-5-13).
- 5) S. Ren; K. He; R. Girshick; J. Sun. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2017, Vol.39, No.6, p.1137-1149.
- 6) Liu. Wei; D. Anguelov; D. Erhan; C. Szegedy; S. E. Reed; C. Y. Fu, et al. “SSD: Single Shot MultiBox Detector”. Computer Vision – ECCV 2016. Lecture Notes in Computer Science, Vol.9905, Springer, Cham. 2016, p.21-37.
- 7) J. Redmon; S. Divvala; R. Girshick; A. Farhadi. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, 2016, p.779-788.
- 8) K. He; G. Gkioxari; P. Dollár; R. Girshick. “Mask R-CNN”. IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). 2017, p.2980-2988.
- 9) M. Everingham; L. V. Gool; C.K. I. Williams; J. Winn; A. Zisserman. The PASCAL Visual Object Classes (VOC) Challenge. International Journal of Computer Vision. 2010, Vol.88, No.2, p.303-338.

- 10) Lin, T.Y. et al. "Microsoft COCO: Common Objects in Context"
Computer Vision –ECCV 2014. Lecture Notes in Computer Science. Vol.8693, Springer, Cham. 2015, p.740-755.

執筆者紹介



山本 健生 YAMAMOTO Yoshiki
オムロン ソーシャルソリューションズ
株式会社
技術創造センタ 先端技術研究所
専門：数学（微分幾何学）



平井 佐和 HIRAI Sawa
オムロン ソーシャルソリューションズ
株式会社
技術創造センタ 先端技術研究所
専門：情報工学



濱走 秀人 HAMABASHIRI Hideto
オムロン ソーシャルソリューションズ
株式会社
技術創造センタ 先端技術研究所
専門：画像処理
所属学会：電子情報通信学会



岡本 大和 OKAMOTO Yamato
オムロン ソーシャルソリューションズ
株式会社
技術創造センタ 先端技術研究所
専門：知能情報学
所属学会：人工知能学会

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

高効率・低ノイズ化を実現する GaN デバイス駆動技術

野坂 紀元, 岡田 亘, 上松 武

近年、電力変換器の高電力密度化実現のために GaN GIT (窒化ガリウム、ゲート注入トランジスタ) を使用した高速スイッチング回路が注目されている。GaN GIT は超高速スイッチング性能を備えているが、閾値電圧が低いために誤点弧を引き起こす可能性がある。誤点弧現象を防ぐために、従来は RC 型ゲート駆動法が使用されている。ただし、ターンオフ期間中に過大なスパイクゲート電圧が発生するため、ターンオフのスピードを遅くする必要があり、GaN 本来の高速性を活かし切れていなかった。この問題を解決するために、本稿では 2 段階ターンオフ方式を使用した GaN GIT 向けゲート駆動回路を提案する。低スパイクゲート電圧と高速ターンオフスイッチングの相反する性能を同時に満たすことが可能である。この回路は、GaN GIT を使用してボードに実装され、同期整流型 DC/DC コンバータに適用し、実験的に有用性を確認出来た。

Novel GaN Device Gate Driving Technique For High Efficiency and Noise Reduction

NOSAKA Noriyuki, OKADA Wataru and UEMATSU Takeshi

Recently, high-speed switching circuits using GaN GIT have attracted attention for higher power density. Especially, GaN GIT devices have an ultra-fast speed capability but tend to cause false turn-on due to a lower threshold voltage. A simple RC-type gate drive method is usually used to prevent the false turn-on phenomenon. However, during the turn-off period, the spike gate voltage will exceed the rated voltage, it is necessary to slow down the turn-off switching speed, the high-speed switching characteristics of GaN GIT could not be fully utilized. To solve this problem, we propose that the novel GaN GIT gate driving technique using a two-step turn-off fashion. It is possible to simultaneously satisfy the conflicting performance of low spike voltage and high-speed turn-off switching. This circuit was implemented on the board using the GaN GIT device and applied to a synchronous rectification type boost converter. It is confirmed experimentally that this driving technique is verified to be useful.

1. まえがき

近年、電力変換器の高電力密度、高効率化実現に向けて、シリコン (Si) に代わる新しい半導体デバイスの材料として、ワイドギャップ半導体が注目されている¹⁾。電力変換器は冷却部品 (ヒートシンク)、受動部品 (コンデンサ、リアクトル) が大きな割合を占めており、高効率化・高周波化によりこれらの小型化・低コスト化を実現出来る。オムロンの製品群である電力変換器 (パワーコンディショナ、汎用電源、サーボドライブ) は数百 W~数 kW 程度であり、図 1 に示すように特に窒化ガリウム (GaN) の

適用を検討している。Si デバイスは大きな入力、及び出力容量を持ち、またボディダイオードの逆回復動作が悪いのに対し、GaN デバイスはこれらの容量がはるかに小さく、逆回復特性が優れている。従って、GaN デバイスを使用することで高効率を実現できる。GaN デバイスの物性特性を限界まで引き出すために、垂直型構造²⁾、横型構造³⁾ など、様々な内部構造を持つ GaN デバイスが開発されている。デプレッションモード⁴⁾ GaN はノーマリーオンデバイスであり、エンハンスメントモード (E-M)⁵⁾ GaN は扱いやすいノーマリーオフを実現している。また MOSFET を使用したハイブリッドモード (H-M)⁶⁾ 構造も開発されている。表 1 に入手可能な代表的なデバイスのパラメータ比較

Contact : NOSAKA Noriyuki noriyuki.nosaka@omron.com

を示す。なお青字は利点、赤字は欠点を示す。GaN GIT (ゲート注入トランジスタ)⁷⁾ は、ノーマリーオフ動作と表 1 の通り容量 C 、電荷量 Q が小さく高速駆動を実現できるデバイスとして注目されている。

本論文では、GaN GITに焦点を絞って説明する。このデバイスの閾値電圧 V_{th} は、表 1 の通り Si デバイスよりもはるかに低く、オフ状態の維持は GaN GIT にとって非常に重要である。GaN GIT はノイズに敏感であり、負のゲート電圧は、ミラー電流による GaN GIT の誤点弧防止に必要である。負のゲート電圧がないために、誤点弧が発生した場合、アーム短絡現象が発生し、壊滅的な障害につながる可能性がある。負のゲート電圧は通常、バイポーラ電源で実装される。GaN GIT のスイッチング性能を引き出すためには RC 型ゲート駆動法^{8,9,10,11)} が提案されている。この方法により、GaN GIT のゲートをより高い電圧で駆動できるため、スイッチングが高速にできる。ただし、ターンオフの高速性故に大きな負のスパイクゲート電圧が発生する。

これらの問題を解決するために、低ノイズと高速ターンオフスイッチングの相反する性能を同時に実現可能な GaN GIT ゲート駆動法「2段階ターンオフ方式」を提案する。2 章、3 章では従来のゲート駆動回路、及び提案するゲート駆動回路の動作原理について説明する。4 章では、提案するゲート駆動回路を同期整流型 DC/DC コンバータに適用し、有効性を実験により確認した。

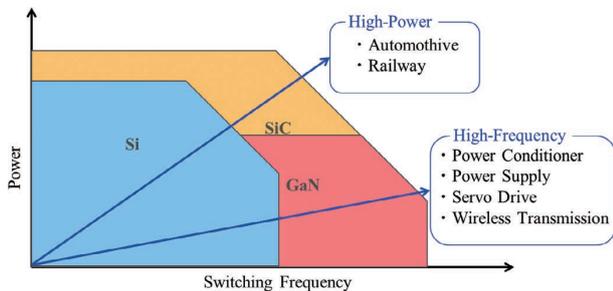


図 1 パワーデバイスとアプリケーション

表 1 デバイスパラメータ比較

	Si	SiC	GaN H-M	GaN E-M	GaN GIT
V_{ds} [V]	600	650	650	650	600
I_d [A] Max.	35	39	34	30	31
R_{dson} [m Ω] Typ.	52	48	50	50	55
C_{iss} [pF] Typ.	2850	1118	1000	242	380
C_o (tr) [pF] Typ.	1050	194	310	160	102
Q_g [nC] Typ.	68	33	16	6.1	5.8
Q_{oss} [nC] Typ.	—	78	126	64	41
Q_{rr} [nC] Typ.	6000	125	126	0	0
V_{th} [V] Typ.	3.5	4.5	4	1.7	1.2

2. 従来のゲート駆動回路

2.1 回路構成

図 2 に従来の RC 型ゲート駆動回路構成を示す。この回路はシンプル、かつ長年の実績があるが図 3 (赤い丸で囲んだ部分) に示すように、より速いターンオフ中に大きな負のスパイクゲート電圧を引き起こす可能性がある。従って、高周波スイッチングを阻害してしまう。

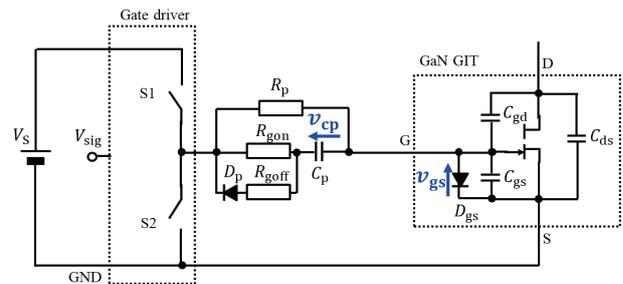


図 2 従来のゲート駆動回路

2.2 動作原理

図 3 に動作シーケンスを示す。図 4 に、従来の RC 型ゲート駆動回路の各期間での等価回路を示す。図 3 に関して、 R_{gon} と R_{goff} は非常に小さいため、無視して動作原理を説明する。

TERM I [$T_0 \leq t \leq T_1$]:

T_0 でスイッチ S1 がオンになると、GaN GIT の入力容量 ($C_{iss} = C_{gs} + C_{gd}$) は容量 C_p を介して充電を開始する。同時に、GaN GIT のゲートとソースの間に形成された寄生ダイオード D_{gs} に電流が流れ始める。

TERM II [$T_1 \leq t \leq T_2$]:

ターンオンが完了すると、ゲート電流は常に R_p を通ってゲートとソースの間の寄生ダイオードに流れ、ターンオン状態を維持する。 v_{gs} は、寄生ダイオードの順方向電圧 (V_F) でクランプされる。これは、GaN GIT のバンドギャップによって決まる。 R_p は、一般に寄生ダイオードの V_F が約 3.5 V になるように設計される。期間 II の $v_{gs, II}$ および $V_{CP, II}$ 電圧は、式(1)および式(2)で与えられる。ここで、 V_S はゲート供給電圧である。

$$V_{gs, II} = V_F \tag{1}$$

$$V_{CP, II} = V_S - V_F \tag{2}$$

TERM III [$T_2 \leq t \leq T_3$]:

T_2 でスイッチ S2 がオンになると、 C_{iss} は C_p を介して放電を開始する。 v_{gs} はそれに応じて減少する。負電圧 V_N は、一般的な MOSFET の式(3)¹²⁾ を使用して計算可能である。

ここで、 Q_g は 0 V から V_F までの総ゲート電荷量である。スイッチング速度は R_{goff} によって調整可能である。ゲート電圧が急峻に負電圧に変化するため、 V_N に追加で大きなスパイクゲート電圧が発生する。

$$V_N = \frac{Q_g - C_p \cdot V_{CP_II}}{C_{iss} + C_p} \quad (3)$$

TERM IV [$T_3 \leq t \leq T_4$]:

C_{iss} と C_p は、 R_p を介して放電される。ゲート電圧 v_{gs} は、上記の RC 時定数で 0 V に近づく。期間 IV 中の v_{gs_IV} 電圧は式(4)で与えられる。

$$v_{gs_IV}(t) = V_N \cdot \exp\left[\frac{-(t-T_3)}{R_p(C_p + C_{iss})}\right] \quad (4)$$

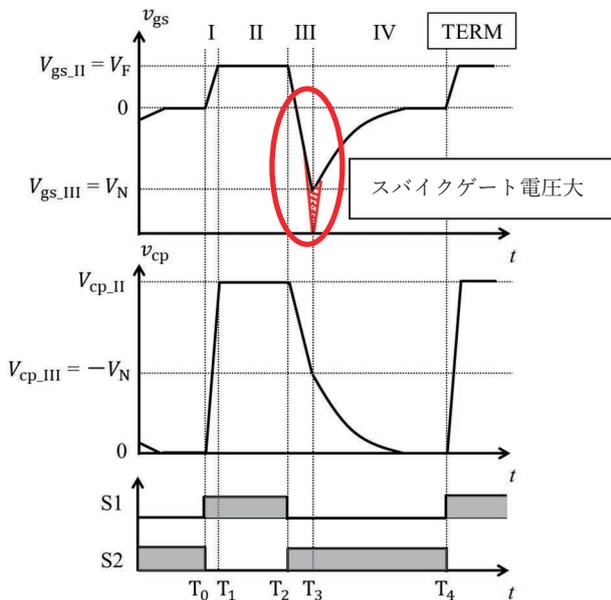


図3 従来のゲート駆動回路の動作シーケンス

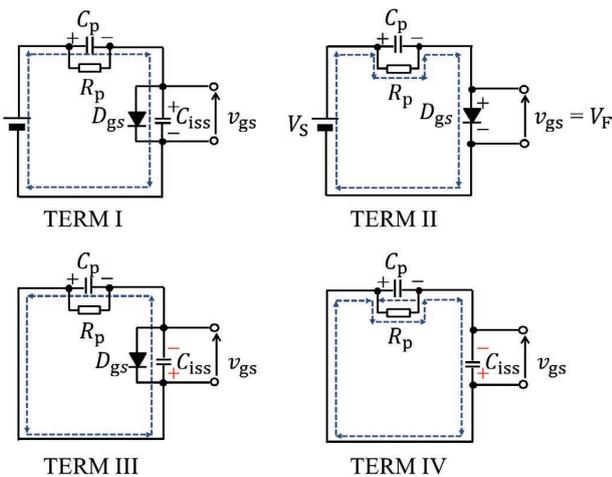


図4 従来のゲート駆動回路の等価回路

3. 提案のゲート駆動回路

3.1 回路構成

図5に、 Q_s 、 R_s 、 C_s (赤い破線部分) で構成される「2段階ターンオフ」のゲート駆動回路を示す。ミラー電流によって引き起こされるパワートランジスタの誤ったターンオンを防ぐために使用されるアクティブミラークランプ MOSFET Q_s は、市販のゲートドライバで実装されている。ミラークランプ機能を使用すると、パワートランジスタのゲート電圧は通常、オフ状態のときに約 2 V 未満でクランプされる。提案したゲート駆動回路は、図6 (赤い丸で囲んだ部分) に示すように、ターンオフ中のスパイクゲート電圧を低減可能である。

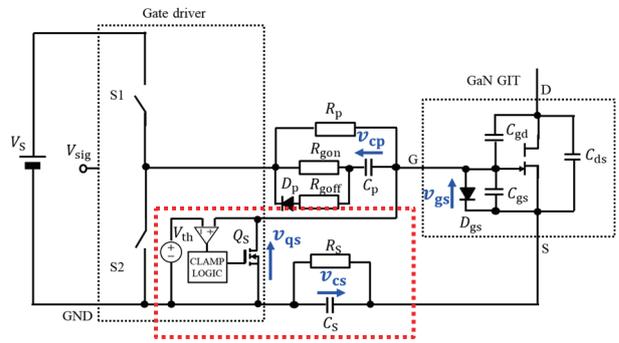


図5 提案のゲート駆動回路

3.2 動作原理

図6に動作シーケンスを示す。図7に、提案したゲート駆動回路の各期間で等価回路を示す。図7に関して、 R_{gon} 、 R_{goff} 、および MOSFET Q_s の静電容量は C_p および C_s より非常に小さいため無視する。

TERM I [$T_0 \leq t \leq T_1$]:

T_0 でスイッチ S1 がオンになると、GaN GIT の入力容量 (C_{iss}) は、 C_p および C_s を介して充電を開始する。期間 I の終了時の V_{gs_I} 、 V_{CP_I} 、および V_{CS_I} 電圧は、式(5)、式(6)、および式(7)に示される。

$$V_{gs_I} = V_F \quad (5)$$

$$V_{CP_I} = (V_S - V_F) \frac{C_s}{C_p + C_s} \quad (6)$$

$$V_{CS_I} = (V_S - V_F) \frac{C_p}{C_p + C_s} \quad (7)$$

TERM II [$T_1 \leq t \leq T_2$]:

T_1 でターンオンが完了すると、 v_{gs} は寄生ダイオード D_{gs} の順方向電圧 (V_F) でクランプされる。 C_p と C_s は、 R_p と R_s を介して放電および充電される。期間 II の終了時の V_{CP_II} および V_{CS_II} 電圧は、MOSFET の一般式¹²⁾ により式(8)、式(9)で表される。

$$V_{CP_II} = V_{CP_I} \left(1 - \frac{C_p + C_s}{C_s} \frac{R_p}{R_p + R_s} \right) \cdot \exp \left[\frac{-(T_2 - T_1)}{\left(\frac{R_p \cdot R_s}{R_p + R_s} \right) (C_p + C_s)} \right] + (V_s - V_F) \frac{R_p}{R_p + R_s} \quad (8)$$

$$V_{CS_II} = V_{CS_I} \left(\frac{C_p + C_s}{C_p} \frac{R_s}{R_p + R_s} - 1 \right) \left[1 - \exp \left[\frac{-(T_2 - T_1)}{\left(\frac{R_p \cdot R_s}{R_p + R_s} \right) (C_p + C_s)} \right] \right] + V_{CS_I} \quad (9)$$

TERM III [$T_2 \leq t \leq T_3$]:

T_2 でスイッチ S2 がオンになると、GaN GIT の C_{iss} は、 C_p および C_s を介して放電を開始する。各々のコンデンサの電荷が均衡すると、放電は終了する。期間 III の終了時の V_{gs_III} 、 V_{cp_III} 、 V_{cs_III} 、および V_{qs} 電圧は、式(10)から式(13)に示す。これらは、電荷保存則を適用して導出される。2段階ターンオフを実現するには、 V_{qs_III} をスレッシュホールド電圧 (V_{th}) より高い値でクランプする必要がある。その結果、スパイクゲート電圧は従来の RC 型回路に比べて低減する (図 6)。

$$V_{gs_III} = \frac{C_p [Q_g - V_{CS_II} \cdot C_s] + C_s [Q_g - V_{CP_II} \cdot C_p]}{(C_p \cdot C_s + C_s \cdot C_{iss} + C_{iss} \cdot C_p)} \quad (10)$$

$$V_{CP_III} = \frac{C_s [V_{CP_II} \cdot C_p - Q_g] + C_{iss} [V_{CP_II} \cdot C_p - V_{CS_II} \cdot C_s]}{(C_p \cdot C_s + C_s \cdot C_{iss} + C_{iss} \cdot C_p)} \quad (11)$$

$$V_{CS_III} = \frac{C_p [V_{CS_II} \cdot C_s - Q_g] + C_{iss} [V_{CS_II} \cdot C_s - V_{CP_II} \cdot C_p]}{(C_p \cdot C_s + C_s \cdot C_{iss} + C_{iss} \cdot C_p)} \quad (12)$$

$$V_{qs_III} = V_{gs_III} + V_{CS_III} \quad (13)$$

TERM IV [$T_3 \leq t \leq T_4$]:

C_{iss} 、 C_p 、および C_s は、 R_p および R_s を介して放電される。

TERM V [$T_4 \leq t \leq T_5$]:

ゲート端子とゲート電源 GND 端子間の電圧 v_{gs} がスレッシュホールド電圧 (V_{th}) より低くなると、MOSFET Q_s が ON する。同時に、 C_{iss} 、 C_p 、および C_s は、MOSFET Q_s の経路で瞬時に放電される。

TERM VI [$T_5 \leq t \leq T_6$]:

C_{iss} と C_s は、 R_s を介して放電される。ゲート電圧 v_{gs} は、上記の RC 時定数で 0 V に近づく。

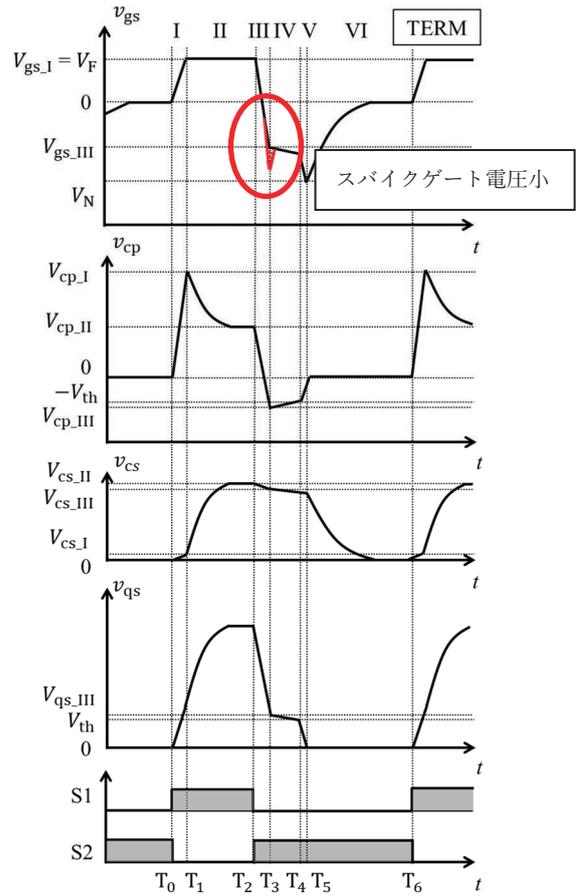


図 6 提案のゲート駆動回路の動作シーケンス

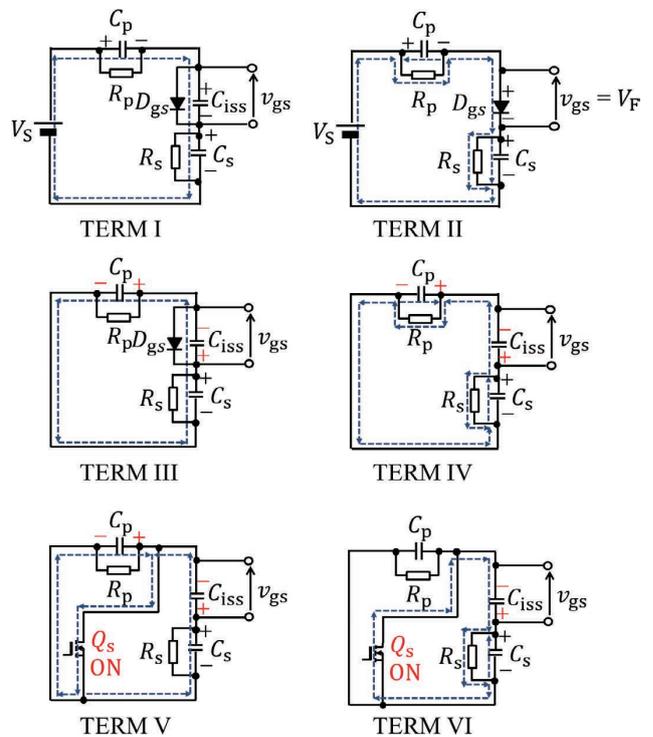


図 7 提案のゲート駆動回路の等価回路

4. 実験結果

図8と図9に、使用した評価ボードと同期整流型DC/DCコンバータのブロック図を示す。従来回路と提案回路をゲート駆動回路 (GD1、GD2) に適用し、GaN GITはIGOT60R070D1 (Infineon)¹³⁾を使用した。デバイスの定格動作領域を考慮し $V_{in}=150\text{ V}$ 、 $V_{out}=300\text{ V}$ 、 $P_{out}=0.25\text{--}1\text{ kW}$ 、 $f_{sw}=20\text{ kHz}$ の昇圧動作条件で評価を行った。表2に、使用したパラメータを示す。 C_p は、ミラー電流によって引き起こされる GaN GIT の誤ったターンオンを防ぐために、約 $V_N=-5.0\text{ V}$ に調整した。

図10に効率測定結果を示す。従来回路と提案回路で効率に差がないことがわかる。図11に、 $P_{out}=1\text{ kW}$ 条件における従来のゲート駆動回路波形 (図11(a))と提案したゲート駆動回路波形 (図11(b))を示す。左欄は Q_2 デバイスがターンオフ時、右欄は Q_1 デバイスがターンオフ時の波形である。電圧信号 v_{gs} および v_{ds} は、光アイソレーション差動プローブ (TIVM1、TIVH08 : Tektronix 社製) によって検出した。デバイス Q_1 のターンオフ時のスパイクゲート電圧は、従来回路では -12.8 V 、提案回路では -7.2 V である。提案回路は、従来のものと比較して、スパイクゲート電圧を 5.6 V 改善した。同様に、デバイス Q_2 のターンオフ時のスパイクゲート電圧は、従来回路では -12.4 V 、提案回路では -4.0 V である。提案回路は、従来のものと比較して、スパイクゲート電圧を 8.4 V 改善した。提案駆動回路は、デバイス Q_1 、 Q_2 のターンオフ時において、ともに2段階ターンオフスイッチングを実現できているため、スパイクゲート電圧の発生を抑制している。従って、 -10 V の定格ゲート-ソース間電圧に対して十分なマージンを確保できる。また、従来の回路との間で、 Q_1 と Q_2 のターンオフ時のドレイン-ソース間電圧のスイッチング速度に大きな相違はない。さらに提案回路は、スイッチング期間中にゲート電圧に重畳されるミラーノイズが低減可能であり、スイッチング期間中にミラーランプ MOSFET Q_s によりゲート回路の低インピーダンスを実現できると考えられる。これらの結果から、2段階ターンオフ回路を適用することにより、低スパイクゲート電圧と高速ターンオフスイッチングの相反する性能を同時に満たすことが実験により確認出来た。

表2 評価条件

構成部品	定数	
	従来回路	提案回路
R_p	330 Ω	130 Ω
R_s	—	200 Ω
R_{gon}	22 Ω	22 Ω
R_{goff}	0 Ω	0 Ω
C_p	3.2 nF	1.0 nF
C_s	—	22 nF

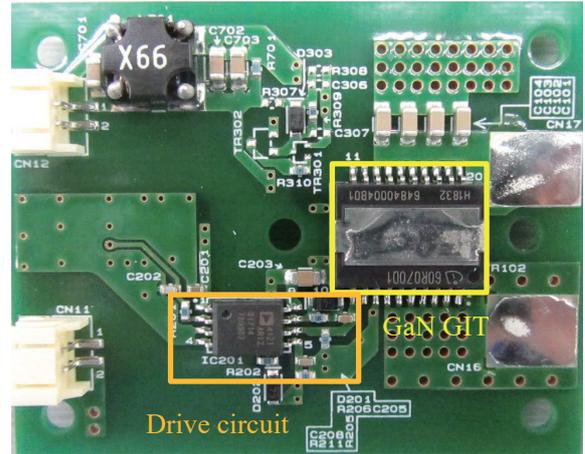


図8 評価ボード

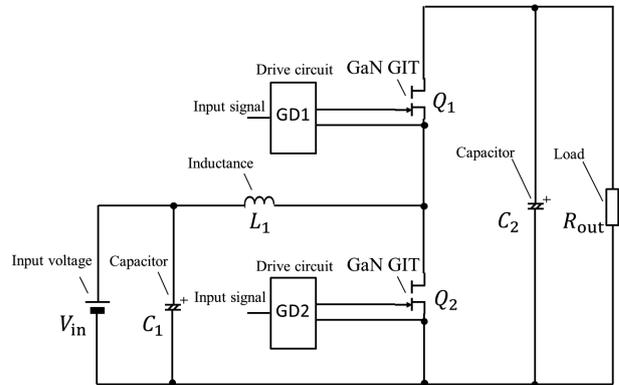


図9 同期整流型 DC/DC コンバータ

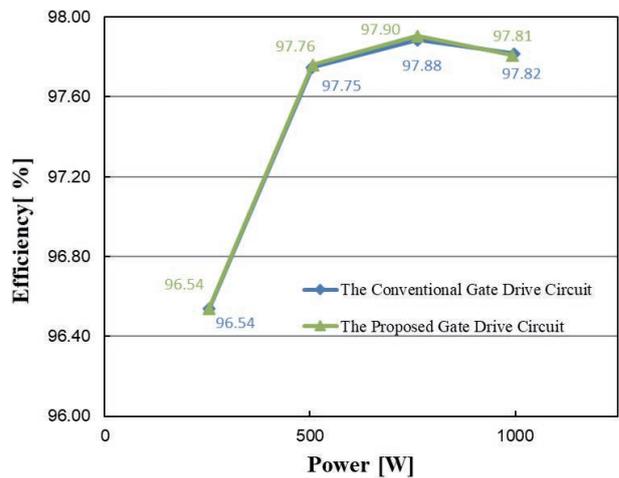


図10 効率測定評価結果

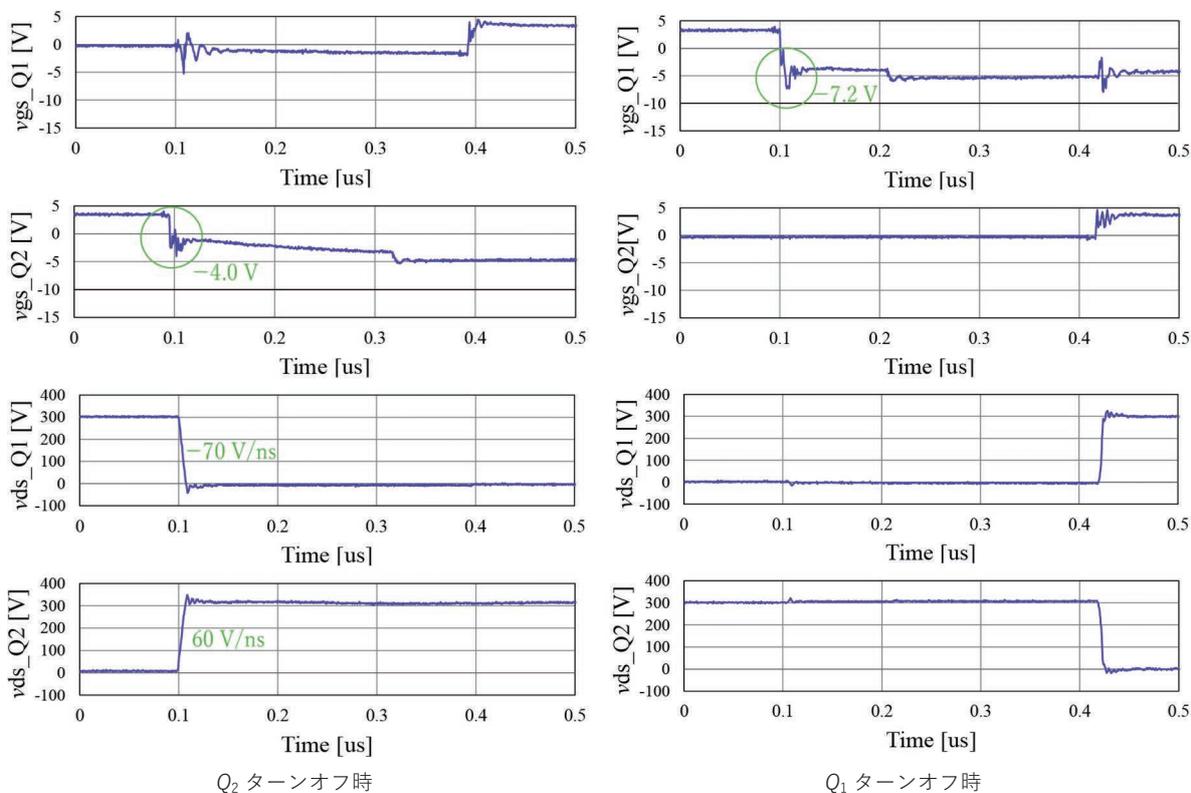
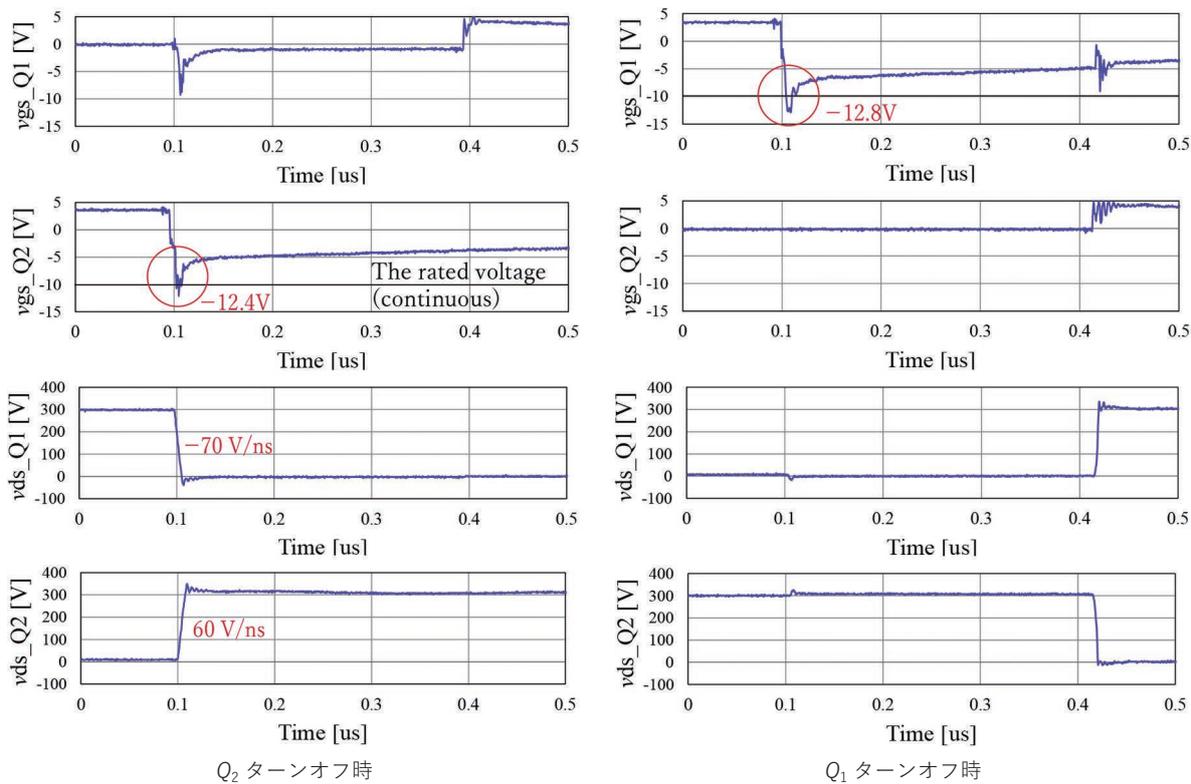


図 11 波形測定評価結果

5. むすび

従来のゲート駆動回路では、スイッチング時に大きなスパイクゲート電圧が発生し、高速スイッチング・高効率化を阻害する課題があった。そこで本論文では、低ノイズと高速ターンオフスイッチングの相反する性能を同時に実現できる、GaN GIT ゲート駆動のための「2 段階ターンオフ方式」を提案した。提案したゲート駆動回路を用いて同期整流型 DC/DC コンバータに実装し、実機評価した。高速ターンオフスイッチング特性、及び効率を損なうことなく、スパイクゲート電圧が最大 8.4 V 低下することが確認され、-10 V の定格ゲート-ソース間電圧に対して十分なマージンを確保でき、本方式の有効性を示した。

今後は、駆動条件に合わせた回路定数の最適化を検討していく。

参考文献

- 1) Jones, E. A.; Wang, F. F.; Costinett, D. Review of Commercial GaN Power Devices and GaN-Based Converter Design Challenges. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. September 2016, Vol.4, Issue 3, p.707-719.
- 2) Oka, T.; Ina, T.; Ueno, Y.; Nishii, J. Over 10 A Operation with Switching Characteristics of 1.2 kV-Class Vertical GaN Trench MOSFETs on a Bulk GaN Substrate. Proc. 28th Int. Symp. Power Semiconductor Devices and IC's. July 2016, p.459-462.
- 3) Hilt, O.; Treidel, E.; Wolf, M.; Kuring, C.; Tetzner, K.; Yazdani, H.; Wentzel, A.; Würfl, J. Lateral and vertical power transistors in GaN and Ga2O3. IET Power Electron. December 2019, Vol.12 Issue 15, p.3919-3927.
- 4) Hahn, H.; Reuters, B.; Pooth, A.; Holländer, B.; Heuken, M.; Kalisch, H.; Vescan, A. p-Channel Enhancement and Depletion Mode GaN-Based HFETs With Quaternary Backbarriers. IEEE Transactions on Electron Devices. October 2013, Vol.60, No.10, p.3005-3011.
- 5) Cai, Y.; Zhou, Y.; Chen, K.; Lau, K. High-Performance Enhancement-Mode AlGaIn/GaN HEMTs Using Fluoride-Based Plasma Treatment". IEEE Electron Device Letters. July 2005, Vol.26, No.7, p.435-437.
- 6) Huang, X.; Liu, Z.; Li, Q.; Lee, F. C. Evaluation and Application of 600 V GaN HEMT in Cascode Structure. IEEE Transactions Power Electron. May 2014, Vol.29, No.5, p.2453-2461.
- 7) Uemoto, Y.; Hikita, M.; Ueno, H.; Matsuo, H.; Ishida, H.; Yanagihara, M.; Ueda, T.; Tanaka, T.; Ueda, D. Gate Injection Transistor (GIT) - A Normally-Off AlGaIn/GaN Power Transistor Using Conductivity Modulation. IEEE Transactions Electron Devices. November 2007, Vol.54, No.12, p.3393-3399.
- 8) Morita, T.; Handa, H.; Ujita, S.; Ishida, M.; Ueda, T. 99.3% Efficiency of Boost-Up Converter for Totem-Pole Bridgeless PFC Using GaN Gate Injection Transistor. Proceedings of the International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, PCIM

Europe. May 2014, p.325-329.

- 9) Li, H.; Han, C.; Brothers, J.; Zhang, X.; Wang, J. Evaluation of 600 V GaN based gate injection transistors for high temperature and high efficiency applications. 2015 IEEE 3rd Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA). November 2015, p.85-91.
- 10) Abdullah, Y.; Li, H.; Wang, J. Evaluation of 600 V Direct-Drive GaN HEMT and a Comparison to GaN GIT. IEEE 5th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA). November 2017, p.273-276.
- 11) Bortis, D.; Knecht, O.; Neumayr, D.; Kolar, J. W. Comprehensive Evaluation of GaN GIT in Low- and High-Frequency Bridge Leg Applications. 2016 IEEE 8th international Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia). May 2016, p.21-30.
- 12) Zojer, B. 600 V CoolGaN™ high electron mobility transistors. AN_201702_PL52_012, Infineon Technologies AG, 2018.
- 13) Infineon Technologies AG. "IGOT60R070D1, 600V CoolGaN™ enhancement-mode power transistor". datasheet, 2020.

執筆者紹介



野坂 紀元 NOSAKA Noriyuki

技術・知財本部 研究開発センタ

専門：電気工学

所属学会：電気学会



岡田 亘 OKADA Wataru

技術・知財本部 研究開発センタ

専門：電気工学



上松 武 UEMATSU Takeshi

技術・知財本部 研究開発センタ

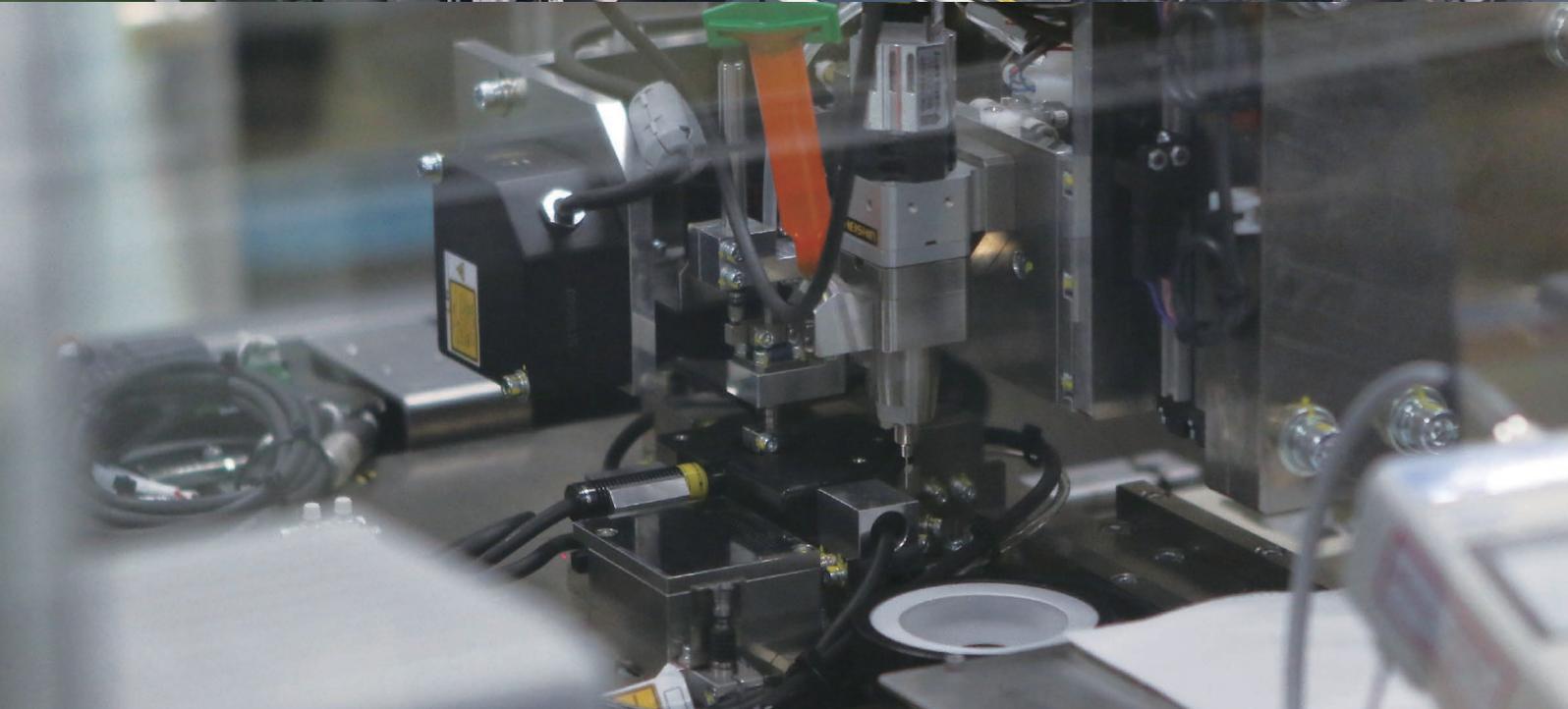
専門：電気工学、制御工学

所属学会：電気学会、電子情報通信学会
博士（工学）

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



基板検査システム開発におけるシステム安全性解析手法 (STAMP/STPA) 導入の試み

吉田 邦雄

従来、基板検査システムのシステム設計ではアクティビティ図やシーケンス図を作成してシステムの振る舞いを表現してきた。しかしながら、これらで表現できるのは一般的な振る舞いに留まっているのが現状であり、システムが高機能化・複雑化する中で設計段階において異常系の振る舞いを精緻に特定して不具合の混入を防ぐことは難しい。

筆者らは基板検査システムの開発においてシステム安全性解析手法の1つである STAMP/STPA の適用を試みた。その結果、従来からあるシステム設計手法では抽出しづらかったであろう不具合発生要因を設計初期段階にて導出することができ、今後、更にシステムが高機能化・複雑化したとしても、信頼性を保ち続けることができる手応えを得た。

本稿では、基板検査システムの開発に STAMP/STPA に適用した分析事例を述べると共に、本取り組みを通じて得られた分析作業の効率化手段を提案する。

Introduction of System Safety Analysis Method (STAMP/STPA) in the PCB Inspection System Development

YOSHIDA Kunio

Traditionally, system behavior has been expressed by creating activity and sequence diagrams in the system design of the PCB Inspection System. However, it is difficult to specify the abnormal behavior of the systems in the design phase to prevent the inclusion of defects, as the system becomes highly functional and complicated.

The authors have tried to apply STAMP/STPA which is one of the system safety analysis methods in the development of the PCB Inspection System. As a result, it has been able to acquire the cause of failure that would have been difficult to extract with existing system design methods, and it helps to maintain high reliability of the system even if it becomes more sophisticated and complex in the future.

This paper describes an analysis case applied to STAMP/STPA for the development of the PCB Inspection System and proposes a method for improving the efficiency of analysis work obtained through this approach.

1. まえがき

近年、自動運転技術の発展を支える ADAS (Advanced Driver-Assistance Systems、先進運転支援システム) や、5G を代表とする通信技術の発展に伴い、SMT (Surface mount technology、基板実装技術) は高密度化、微細部品化が進んでいる。また、社会インフラを支える電子機器の製品安全を実現するために SMT には高い信頼性と安定性が求められている。SMT の最終工程において、部品が正しく実装されているか、基板と部品が正しくハンダ付けされているか

検査を行う基板検査システムは重要な役目を担っている。

基板検査システムに求められる機能も近年、多機能化かつ高機能化している。多様な機能を実現するために、多くのシステムホスト間、アプリケーション間のコミュニケーションが発生することで、システム構成は複雑化の一途を辿っている。加えて、ビッグデータや AI 向けに画像データの重要性は高まっており、工場内ネットワークにおいて大量・大容量の画像データが高頻度で送受信や読み書きが行われる環境下でも、安定動作し続ける高い信頼性が求められる。

従来、システム設計ではアクティビティ図やシーケンス

Contact : YOSHIDA Kunio kunio.yoshida@omron.com

図を作成してシステムの振る舞いを表現してきた。しかしながら、これらで表現するのは一般的な正常系と、代表的な異常系の振る舞いに留まっているのが現状であり、設計段階で異常系の振る舞いを精緻に特定して不具合の混入を防ぐことは難しく、社内のテスト環境では再現できない問題が、特定の顧客環境で発覚するような不具合が発生していた。

「ZERO DEFECT ～不良を作らない～」生産ラインの構築を目指すオムロンの基板検査システムに求められる高機能性と高信頼性の両方を両立するための設計分析手法として、システム思考に基づく新しい安全性解析手法 STAMP/STPA の適用を試みた。STAMP/STPA は複雑なシステムにおいても以前は運用でしか発見できなかった「想定外の想定外 (Unknown unknowns)」が、開発プロセスの初期に識別され、除去または低減することができるとされている¹⁾。

本稿では基板検査システムの開発に STAMP/STPA に適用した分析事例を述べると共に、本取り組みを通じて得られた分析作業の効率化手段を提案する。

2. STAMP/STPA

2.1 STAMP/STPA とは

STAMP/STPA (Systems-Theoretic Accident Mode and Processes/Systems-Theoretic Process Analysis) はマサチューセッツ工科大学の Nancy G Leveson 教授が提唱している、システムの構成要素間の相互作用によって発生する問題を分析する手法である^{1,2)}。航空宇宙分野での適用³⁾のみならず、社会インフラ領域への適用が広がっている⁴⁾。

従来から存在する分析手法 FTA (Fault Tree Analysis) や FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) は機器や組織の単一故障を分析する手法として 1960 年代から存在している。これらの分析手法は現代において進化し続ける複雑なシステムにおいては限界がある。なぜならば、複雑なシステムにおいては単一コンポーネントの故障のみならず、コンポーネント間のコミュニケーション・ミスマッチが事故を引き起こすと考えられるためである。Nancy G Leveson 教授が提唱している STAMP/STPA はトップダウンプロセスをとり、システム内の各コンポーネントが直接的、間接的に発生する相互作用を俯瞰的に捉えて偶発的に発生する創発特性を制御して事故を防止する考え方に基づく。

2.2 STAMP/STPA 分析手順

STAMP/STPA 分析の手順を以下に示す。

Step0 : (準備1) アクシデント、ハザード、安全制約の識別

対象システムにおいて分析対象となるアクシデント、ハザードを定義する。アクシデントは利害関係者にとって受け入れられない何らかの価値が喪失するという広い意味で

定義される。ハザードとはアクシデント一步手前の、放置してはいけない状態である。最後にハザードを制御するためのシステム上の安全制約を識別する。

Step0 : (準備2) コントロールストラクチャの構築

システムにおいて、安全制約の実現に関係するコンポーネント (サブシステム、機器、組織等)、及び、コンポーネント間の相互作用を分析し、コントロールストラクチャを構築する。図1に一般的なコントロールストラクチャを示す。

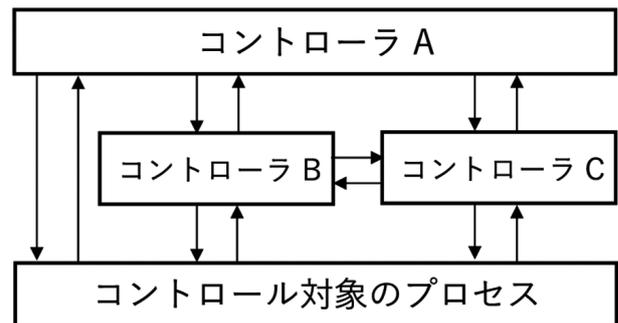


図1 一般的なコントロールストラクチャ

Step1 : 非安全なコントロールアクション (UCA) の抽出
安全制約の実行に必要なコントローラによるコンポーネント間の指示 (Control Action) を識別して、識別された指示の中から UCA (Unsafe Control Action、非安全制御動作) を抽出する。UCA を抽出する際のヒントとして4つのガイドワードがある。

- Not Providing : 与えられないとハザード
安全のために必要とされるコントロールアクションが与えられないことがハザードにつながる。
- Providing causes hazard : 与えられるとハザード
ハザードにつながる非安全なコントロールアクションが与えられる。
- Too early/too late, wrong order causes hazard : 早過ぎ、遅すぎ、誤順序でハザード
安全のためのものであり得るコントロールアクションが、早すぎて、遅すぎて、または順序通りに与えられないことでハザードにつながる。
- Stopping too soon/applying too long causes hazard : 早過ぎる停止、長過ぎる適用でハザード
安全のためのコントロールアクションの停止が早過ぎる、もしくは適用が長過ぎることがハザードにつながる。

Step2 : ハザード要因 (HCF) の特定

Step1 で抽出した UCA 毎に、関係するコントローラと制御対象プロセスを識別してコントロールループ図を作成し、

因果関係シナリオ生成の抽象モデルを参照しながら HCF (Hazard Causal Factor、ハザード誘発要因) を特定する。

コントロールループ図とは、着目したUCAに関係するコンポーネントのみを抜き出した図であり、複数のコンポーネント間の相互作用を同時に考えるのではなく、二つのコンポーネントに絞って考えるためのものである。

因果関係シナリオ生成の抽象モデルとは、HCFの特定を支援するモデルであり、HCFの一般的発生理由が記載されている。

3. 基板検査システム開発への導入

3.1 事前準備

本取り組みは図2に示す検査システム事業部の開発プロセスのうち、赤い囲み線で示した概念設計からシステム設計フェーズの間にかけて実施した。

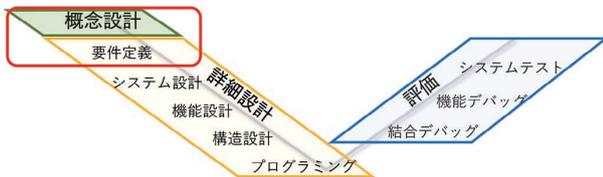


図2 開発プロセスと STAMP/STPA 分析の実施タイミング

分析に際し、事前準備として図3に示すシステム全体の概略図を作成し、システムに対する理解を分析者の間で共有できるようにした。システム構成要素の役割について説明する。

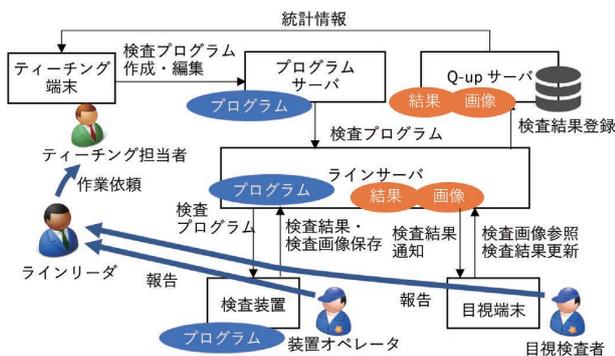


図3 システム概略図

- ・ティーチング端末：基板検査に必要な検査プログラムの作成、編集を行う。
- ・プログラムサーバ：検査プログラムを保存する。
- ・ラインサーバ：いくつかの生産ライン毎に設置し、検査プログラムのレプリカサーバとしての役割と、検査結果および検査結果画像の一次保存場所となる。
- ・Q-upサーバ⁵⁾：Database Systemを搭載して検査結果の分析を実施する。

- ・検査装置：基板の良否判定を実施する。
- ・目視端末：検査装置が不良品判定した基板に対し、目視検査作業者の目視検査によって良否の最終判定を実施する。

3.2 Step0 (準備1)：アクシデント、ハザード、安全制約の識別

システムのアクシデント、ハザード、安全制約は以下のように定義した。

アクシデント：

- ・オムロンが提供する検査システムアプリケーションが原因で生産ラインが停止する

ハザード：

- ・検査装置の起動に時間がかかり検査を開始できない状態
- ・検査機で検査プログラムの読み込みができず、検査機種切り替えができない状態
- ・目視端末で、目視検査対象の基板が端末内に到着しているのにも関わらず目視検査が実施できない状態
- ・検査プログラムの内容に不整合が生じ、検査機が異常を検知して停止する状態
- ・基板が装置手前に到着して装置内に基板が無いのにも関わらず、基板を搬入しない状態
- ・検査が完了して下流装置が搬入可能状態にも関わらず、基板を搬出しない状態

安全制約 (ハザードの裏返し)：

- ・生産開始のタイミングまでに検査が実施できる状態でないといけない
- ・検査機で検査プログラムが正常に読み込めて、段取りが実施できないといけない
- ・目視端末に基板が到着した時点で目視検査を開始できないといけない
- ・検査プログラムの不整合によって検査機が異常停止してはならない
- ・基板が到着し、装置内に基板が無いのであれば基板を搬入して検査を開始しなければならない
- ・検査を完了して下流装置が搬入可能状態ならば速やかに基板を搬出しなければならない

3.3 Step0 (準備2)：コントロールストラクチャの構築

本ステップで構築したコントロールストラクチャを図4に示す。この図が示すように、システムの大まかな構成要素が決まる概念設計の段階から適用できるのが、STAMP/STPAの特徴でもある。

図3に示した概略図とはシステム構成要素に変化がある。これは、設計の過程において変更が発生したことを表している。

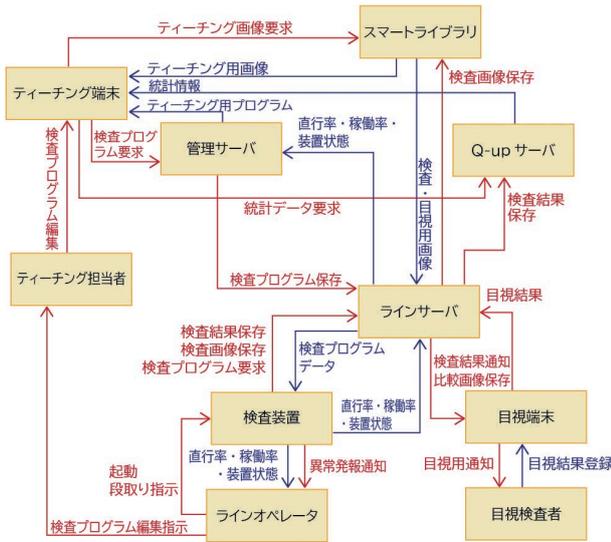


図4 コントロールストラクチャ

3.4 Step1：非安全なコントロールアクション (UCA) の抽出

総計 51 個のUCA を抽出した。抽出したUCA の例を示す (表 1)。

表 1 抽出したUCA の例

CA	検査プログラム要求
From	検査装置
To	ラインサーバ
Not Providing	・検査プログラムの取得が必要にも関わらず段取りに必要な検査プログラムを要求しない。
Providing causes hazard	・間違った検査プログラムを要求する。 ・検査プログラムの保存に失敗する。
Too early/too late, Wrong order causes hazard	・ラインサーバの負荷が高くなり、他の検査機に対する処理が実施できなくなる。 ・検査プログラムの要求開始が遅れ、生産開始時に検査プログラムが利用できない。
Stopping too soon/applying too long causes hazard	・検査プログラムの保存に時間が掛かり過ぎて生産時に検査プログラムが利用できない。

UCA の抽出においては、文脈にコンテキスト (状況) を含めることが重要である。コンテキストを含んだUCA の表現がしにくい場合に遭遇した際には「～にも関わらず、～だ」という表現を用いるよう心掛けた。例えば「検査結果の出力が遅れる」というUCAがあった場合に、「次の検査対象基板到着するまでに検査結果の出力が完了しな

ければならないのにも関わらず、検査結果の出力が完了しない」という表現にする。

3.5 Step2：ハザード要因 (HCF) の特定

本取り組みでは総計 85 個のHCF を抽出した。抽出したHCF の例を示す (表 2)。

表 2 抽出したHCF の例

HCF	HCF シナリオ
管理ファイルと実体ファイルの乖離	新しいプログラムがサーバ上にあるのにも関わらず、検査装置が新しいレビジョンのデータを認識していない。
管理サーバの排他処理誤り	複数のティーチング端末で同時に検査プログラムの更新が行われたときに、検査プログラムまたは検査プログラムの管理情報が正しく保存されない。
ラインサーバの負荷	ラインサーバの負荷が高くなり、検査装置が検査プログラムを要求してもレスポンスが無い、または遅れる。
不正なりトライ	検査プログラムの保存に失敗したので繰り返し要求処理を行う。

問題を単純に扱えるようにHCF の抽出において、以下の点に留意した。

風が吹けば桶屋が儲かるということわざがある。一見すると全く関係がないと思われる場所・物事に影響が及ぶことの喩えであり、因果関係を深く追っていくと、何もかもが問題の要因となり得る事を示唆している。本取り組みでは問題をシンプルに取り扱うために、因果関係は1次までにとどめるようにした。風が吹くと桶屋が儲かるの例で例えると、突風で砂ぼこりが立つ、その結果、砂ぼこりが目に入り視力を失う人が増える、までに留める。HCFの表現にならうと「突風により砂ぼこりが立つ」とし、その対策として「風が強い日は水を撒いて砂ぼこりが舞わないようにする」といった具合である。

図4で示したように、基板検査システムは複数のコンポーネントがネットワークで接続された構成をしている。STAMP/STPA の手順ではコンポーネント間の指示に着目し、コンポーネント間の相互作用によって発生する問題を抽出するため、同じようなHCF が複数のホスト間で重複して抽出された。対策を検討するにあたりHCF 個々に対策を立てるのではなく、HCF を集約し、集約されたHCF ごとに対策を検討するようにした。結果としてHCF のばらつきや抽出の漏れを炙り出すとともに、対策検討をしやすくする効果があった。集約したHCF とHCF 抽出シナリオの例を示す (表 3)。

表 3 集約した HCF の例

集約 HCF	HCF シナリオ
サーバ負荷が高くなりデータを受領しない/返却しない	<ul style="list-style-type: none"> 複数のティーチング端末が同時に検査プログラムの更新作業を開始して、検査プログラムの保存の要求が同時多発的に発生する。 検査プログラムの連続保存操作によってディスク負荷が高くなる。 検査プログラムの保存に失敗したので繰り返し要求処理を行う。 ラインサーバにつながる装置で同時多発的に大きなサイズの検査画像の保存が行われた。
管理情報と実態の間に矛盾が発生する	<ul style="list-style-type: none"> 新しいプログラムがサーバ上にあるのにも関わらず、管理情報の更新直前に検査装置が古いレビジョンのデータを要求する。 検査プログラムの実体ファイルの保存が未完のうち、管理ファイルのみ更新され、そのタイミングで検査プログラムを利用しようとして、矛盾が発生する（またはその逆）。 管理情報上では存在するはずの画像がストレージ上に存在しない。
破損した・データ整合性の取れていないファイルの保存、データ	<ul style="list-style-type: none"> ファイル保存中にキャンセルを実行して、ごみデータが残る。 保存処理中に例外が発生して、中途半端なデータが残る。 複数のトランザクションからなる処理で、最後のステップでネットワーク切断が発生した結果、冒頭を実施したトランザクションの結果をクリアしていない。

3.6 HCF 対策の立案

STAMP/STPA で定義された手順は HCF の特定までであるが、基板検査システム開発プロセスの中で抽出された各 HCF を排除するための方策を検討し、システム仕様あるいは、各アプリケーションの機能仕様にフィードバックする。

4. 考察

STAMP/STPA のプロセスを実施することで新たに抽出できた UCA としては以下のような内容があった (表 4)。

表 4 STAMP/STPA のプロセスにて抽出できた UCA 例

CA	検査プログラム保存
From	管理サーバ
To	ラインサーバ
Too early/too late, wrong order causes hazard	連続的に検査プログラムの更新作業を実施して検査機にプログラム本体が行き渡る前に管理データが更新されて、データの整合が取れなくなる。

CA	検査結果保存
From	ラインサーバ
To	Q-up サーバ
Stopping too soon/applying too long causes hazard	Q-up サーバへの検査結果保存処理に時間がかかって、ラインサーバが待ち状態となり、その間検査機からの検査結果を保存できない。

コントロールストラクチャをベースに検討することで、システム全体を俯瞰でき、本来の目的を意識したうえで、構造上不足している点を見つけることができた。

一見するとよくある不具合のように見受けられるが、これらアクティビティ図やシーケンス図では振る舞いを表現しづらく、処理タイミングによっては問題が発生する可能性があるようなリスクを抽出できている。これらのリスクに対し、開発終盤のテスト段階もしくは顧客環境にて実際に問題が発覚してから個別に対処するのではなく、開発プロセスの初期から問題を把握し、分析を通して得られた図表を介して開発メンバー間で共有した上で本質的な対応を取れることは、開発プロジェクトに QCD の観点で貢献するものと考えられる。

STAMP/STPA の導入における分析作業は、Step1 : UCA の抽出件数ごとに、Step2 : HCF 特定を繰り返すため、分析作業量が多くなる。本手法の活用を広めるためには STAMP/STPA が持つ創発特性の制御能力を維持しつつ、分析作業の効率化が必要であると考えられる。本取り組みでは、HCF 対策検討時に個別に抽出した HCF の集約を行い検討立案の効率化を図った。更なる効率化の手段として、Step1 : UCA の抽出までを実施した後で、同じようなコンテキストで発生する UCA の集約を行い、集約された UCA に対して HCF を検討する方法が考えられる。特に、基板検査システムのような分散システムにおいては、ホスト間のネットワーク接続に起因する HCF は集約して検討できるため有効である。

5. むすび

今後、求められる要求の多機能化・高機能化が予測される中でも高品質なシステム開発の実現に向けて、基板検査

システムの設計に STAMP/STPA を適用し、オムロンが提供する検査システムアプリケーションが原因で生産ラインが停止することをアクシデントと定義して STAMP/STPA による安全性解析を試みた。

システム全体をコントロールストラクチャで表現して俯瞰しながら、ガイドワードを照らし合わせてコンポーネント間の指示によって発生し得る問題を抽出することで、アクティビティ図やシーケンス図の作成だけでは抽出できないような異常系の振る舞いに対するリスク項目を導き出すことができた。

STAMP/STPA 分析の過程でシステム全体を可視化して問題とその問題に至るまでのコンテキストおよび、対策のトレーサビリティを残せることでドメイン知識の形式化に寄与すると共に、今後、更にシステムが高機能化・複雑化したとしても信頼性を保ち続けることができる手応えを得た。

一方で、分析作業には根気と労力を要する。開発プロジェクトにおける STAMP/STPA の適用障壁を下げて、活用機会を増やすためには、分析作業の効率化が不可欠だと考える。本取り組みでは、個別に抽出した HCF を集約し、対策検討の効率化を図った。また、同じようなコンテキストを有する UCA の集約による、HCF 抽出の効率化を提案した。

今後もこの STAMP/STPA を活用し、システム製品の信頼性向上に貢献していくと共に、分析時に工夫した点や基板検査システムならではの肝所を蓄積し、より設計に適用しやすくなるよう努めていく所存である。

執筆者紹介



吉田 邦雄 YOSHIDA Kunio

インダストリアルオートメーションビジネスカンパニー
検査システム事業部 開発部
専門：ソフトウェア工学

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

参考文献

- 1) Leveson, Nancy G.; Thomas, John P. "STPA Handbook". http://psas.scripts.mit.edu/home/get_file2.php?name=STPA_handbook_japanese.pdf, (参照 2020-8-4).
- 2) 情報処理推進機構. "はじめての STAMP/STPA ～システム思考に基づく新しい安全性解析手法～". 情報処理推進機構. <https://www.ipa.go.jp/files/000051829.pdf>, (参照 2020-8-4)
- 3) 氏家 亮. JAXA コウノトリプロジェクトへの STAMP/STPA 適用例. 計測と制御. 2016, Vol. 55, No. 5, p. 405-409.
- 4) 北村 知. JR 東日本における STAMP 活用の取り組み. SEC journal. 2018, Vol. 13, No. 4, p. 30-37.
- 5) オムロン株式会社. "「品質起点」の生産性向上支援ソフトウェア Q-up System". https://www.fa.omron.co.jp/data_pdf/cat/q-upnavi_scwb-046a-1.pdf?id=1463, (参照 2020-10-20).

多様なドメインの組込機器製品における費用対効果に優れた脅威分析手法の検討

芹川 正孝, 丹羽 徹, 吉岡 幸恵, 原田 真太郎

IoT時代の到来により、あらゆる機器がインターネットに接続されるようになり、増大するIoTのセキュリティ脅威¹⁾は現実のものとなっている。安心してユーザが使用できる製品を提供するためにはセキュリティの脅威分析を行い、サイバー攻撃を受けても重大なインシデントに至らない対策を実施する必要がある。

従来の脅威分析手法は情報システムを対象としており、情報の機密性が重視されているが、安定した稼働を重視する組込機器では可用性をより重視する必要がある。加えて、発生確率の低い脅威も含めた網羅的な分析には膨大な工数がかかり、開発費の肥大化をまねく。

これらの課題に対して、効果的かつ効率的に組込機器製品のセキュリティ脅威を分析するための手法について検討し、重要な脅威を漏れなく抽出し、それらの抽出した脅威の対策を行いつつ、脅威分析に必要となる工数の大幅な削減の可能性を得た。

Study of Cost-effective Threat Analysis Methods for Embedded Devices in Various Domains

SERIKAWA Masataka, NIWA Toru, YOSHIOKA Sachie and HARADA Shintaro

By the arrival of the IoT era, embedded devices that connect to the Internet being exposed cyberattacks¹⁾. In order to provide products that users can use with reassurance, it is necessary to analyze security threats and take countermeasures to avoid important cyberattacks. OMRON had a problem that there was no threat analysis method that focuses on availability for embedded devices, and there was no efficient and effective threat analysis method.

To address these issues, we studied a method for effectively and efficiently analyzing security threats to embedded equipment products and found that it has the potential to significantly reduce the number of man-hours required for threat analysis while extracting all important threats and implementing countermeasures against those extracted threats.

1. まえがき

1.1 サイバーセキュリティリスクの高まり

IoT時代の到来により、あらゆる機器がインターネットに接続されるようになり、さまざまな分野で新しいサービスの提供や利便性の向上が図られている。一方で、機器がインターネットに接続されることで、組込機器を対象にしたサイバー攻撃が現実のものとなっており、サイバーセキュリティインシデントの防止が事業課題の一つとなっている。

オムロンの製品・サービスについてもサイバーセキュリティのリスクの高まりは同様であり、オムロンでは、公共システムや健康、製造システムといった幅広い分野で活用

される製品、サービスを提供していること、人の安全に関わる製品や個人情報はじめとした機密情報の取り扱いも多いことから、社会に与える影響も大きくなることが考えられる。多様な事業ドメイン、異なる特性の製品を持つオムロンにおいては、個々の事業に合ったセキュリティ対策が必要となった。これまで、オムロンでは製品のセキュリティ対策として多様な事業ドメインに対し体系立ったものではなく、開発者のスキルに依存した対応となっていた。未然にセキュリティインシデントを防ぐためには、開発工程の中で効率よくセキュリティ脅威を分析し、適切な対策を実施することが求められていた。

1.2 オムロンでのセキュリティ対策の課題

情報システムでは標準的な機器やOSが利用され、ミド

Contact : SERIKAWA Masataka masataka.serikawa@omron.com

ルウェアなども共通のものが使用されることが多く、セキュリティに対する知見は数多くあって、脅威となるリスクと対策が体系化されている。しかし、組込機器についてはドメインごとに異なる技術、異なるリスクがあり、種々の対策を模索している状況で、世の中に公表されている知見は少ない。そのため、組込機器においては、製品や利用環境におけるセキュリティ脅威を分析し、その結果に応じた対策が必要となっている。しかしながら、昨今の組込機器に搭載されるソフトウェアの規模の増大やオープンソースソフトウェアの活用などを考慮すると、製品や利用環境ごとに脅威分析を網羅的に実施し、対策を実施することは現実的ではない。また、オムロンでは多種多様な製品を持つことに加え、新規商品開発や新規ビジネスを展開する場合に、後戻りをなくするため、商品開発の上流で、効果的、効率的な脅威分析を行い、優先的に対策すべきリスクを抽出する必要があった。

オムロンの主力製品である組込機器のセキュリティ確保のために、脅威分析に求められる要件として、

- ・多様な事業ドメインに適用可能であること
- ・企画段階で重要なリスクを抽出できること
- ・効率的（低コスト、短期間）に実施が可能であること

を設定し、セキュリティリスクの低減と市場競争力の維持・強化を目的とする脅威分析手法を構築することに着目した。

2. 製品のセキュリティ対策の着目点

製品のセキュリティ対策とは、様々なセキュリティ脅威から製品の機密性、完全性、可用性を確保するための取り組みで、最近では、特にモノがつながる世界においてサイバー攻撃の脅威に重点を置いたセキュリティの対策を行うことを指す。

製品に対するセキュリティ脅威は、製品の企画から廃棄に至る各フェーズで存在しているため、ライフサイクル全体を通じて製品に合った適切なセキュリティ対策を行う必要がある。ここでは、企画、開発、運用、廃棄の4つのフェーズにおける一般的なセキュリティ対策について以下に示す。

・企画フェーズ

製品が属するシステム全体の脅威分析を行い、製品を取り巻くセキュリティ脅威を把握し、リスクを評価する。リスクの評価結果に基づいて、リスクへの対応を加味した開発期間や予算について検討し、セキュリティ要件を策定する。これにより、セキュリティに対する取り組みレベルを決定し、システム要件から来る脆弱性の対策を実施する。

・開発フェーズ

企画フェーズで策定したセキュリティ要件に基づき、セ

キュリティ対策について設計し、実装する。また、プログラムのコーディングなどの実装方法から来る脆弱性の混入を防止する。さらに、開発フェーズでは、セキュリティ要件に基づく脆弱性の検証を実施する。これらによって、実装時に混入する脆弱性への対策を実施する。

・運用フェーズ

運用フェーズとは、市場で製品が利用されている状態を指す。このフェーズの中で、新たに発見される製品の脆弱性や、製品に使用しているOSやミドルウェアの脆弱性の情報を収集し、パッチの提供や緩和策など、適切な対策を迅速に実施し、セキュリティインシデントの発生を予防する。また、インシデントが発生した場合も、その影響を最小限にするための同様の対策を実施することが必要となる。

・廃棄フェーズ

製品は買い替えや利用停止、故障などにより廃棄されることがあるため、製品内にある機密情報の漏洩防止を目的として、確実なデータの消去や製品の回収のための仕組みをセキュリティ対策として作っておくことが必要である。

このように、セキュリティ対策は各フェーズで様々なものがあるが、いずれにしても脅威分析を行い、製品ライフサイクル全体のセキュリティ脅威を把握しておくことが、重要なリスクを漏れなく抽出するために必要となる。そのため、企画段階から実施可能で各製品に適した脅威分析の手法に着目した。

2.1 一般的なセキュリティ脅威分析手法

一般的な脅威分析手法には、主に以下（表1）のような手法がある。

表1 脅威分析手法比較³⁾

分析手法		工数	リスク抽出精度	
ベースラインアプローチ		小	中	対策起点のリスク抽出であるため適合性が低い
非形式的アプローチ		小	不明	属人的で経験に依存
詳細リスク分析	資産ベース	中	中	構成要素の脅威を網羅的に抽出
	攻撃ツリー解析 (ATA)	大	中	攻撃の入口から網羅的にリスク抽出
	フォルトツリー解析 (FTA)	大	中	想定される最終被害から網羅的にリスク抽出
組み合わせアプローチ		中	中～高	精度は組み合わせにより向上

・ベースラインアプローチ

既存の標準や基準をもとに、想定する典型的なシステムに対して、予め一定の確保すべきセキュリティレベルを設定し、それを達成するためのセキュリティ要件を定め、分析対象となるシステムの対策の適合性等をチェックする。

・非形式的アプローチ

組織や担当者の経験や判断に基づき、リスク分析を実施する。

・詳細リスク分析

分析対象のシステム自体に対して、そのシステムもしくはそれにより実現されている事業について、「重要度」（あるいは損なわれた場合の被害レベル）「脅威」「脆弱性」の評価指標の下で、攻撃ツリー解析（ATA）などの手法²⁾を用いてリスク分析を実施する。

・組み合わせアプローチ

複数の手法の長所を取り込み、短所の改善をすることで、作業の効率化、異なった評価視点の活用によって、分析精度の向上と、作業工数増大の回避を図る。ただし、どう組み合わせるのか、それぞれのシステムや事業による差異にどのように対処するかの指針は示されていない。

これらの一般的な脅威分析手法は、手法ごとに分析のアプローチが異なるため、分析対象に合わせて分析者が適切な手法を選択する必要がある。手法によっては、網羅的な分析が可能である一方、分析対象の規模によっては多くの分析工数が必要となる。

2.2 脅威分析をオムロン製品に適用する際の課題

前述した「詳細リスク分析」の手法では、様々な情報資産、機能資産に対するセキュリティ脅威を攻撃ツリー解析（ATA）などの手法を用いて分析するが、すべての資産と種々の攻撃パターンを乗じた数百件から数千件に及ぶ脅威が特定される。オムロン製品でこのような網羅的手法を採用した場合、製品の主要な要件を設計、開発する以上の工数がセキュリティ対策にかかる恐れがあった。また、「組み合わせアプローチ」を採用した場合、オムロンでは、ファクトリーオートメーション（以降、FA）、ヘルスケア、モビリティ、エネルギーマネジメントを中心とする事業ドメインで製品・サービスを展開しており、取り扱っている情報・機能も様々で、リスクの種別や影響度合いも異なるため、事業ドメインの特性に応じた対処の指針が不足していた。

情報システムの領域では、これまでの世の中の取り組みの成果で確立された対策があるが、組込機器の領域では、対象となる機器や取り扱う情報が多種多様で、共通的な脅

威分析の手法も確立されていなかった。そのため、各事業ドメインや製品ごとに異なる脅威分析手法を用い、セキュリティ対策を行うことになって、知見の蓄積や人材育成、仕組み、体制の構築等において、事業ドメインごとの負担が大きくなることが想定された。これらのことから、「多様な事業ドメインに適用可能な脅威分析手法」と「効率的（低コスト、短期間）に実施が可能」というところに着目して、オムロンの主力製品である組込機器に適した脅威分析手法を構築することとした。

3. 提案する脅威分析手法

企画フェーズにおける低コストの脅威分析手法として、特定のアーキテクチャ特徴を持つシステムで脅威頻出箇所表を作成し、類似するアーキテクチャを持つシステムの脅威分析コストの低減を提案している手法⁴⁾があるが、アーキテクチャごとに脅威頻出箇所表を作成する必要があるため、製品の種類が多いオムロンでは効果を得にくい。

ここで提案する脅威分析手法では、次の2点を特徴とする。

- (1) 保護資産と保護資産へのアクセス経路に着目し、脅威をフィルタリングし、さらに脅威の分類をガイドワードとして用い、分析が発散することをコントロールする
- (2) 事業ドメイン、システム特性に応じた評価基準を設定することで製品に適した判断基準で分析する

これらにより、リスクを抽出し、優先付けを行って、優先順位の高いものから対策を行うことにより、重要なリスクの対策漏れを防止しつつ、効率的に分析を行うことを狙いとしている。

また、守りたい資産を起点として分析するため、製品の企画、構想段階から分析を行うことが可能となり、分析結果を開発計画に反映することが可能となる。

3.1 事業ドメインを反映した設定

事業ドメインやシステムの特徴を反映させるため、取り上げるセキュリティ脅威を効率よく絞り込むためのフィルタリング条件と、特定した脅威に対するリスクの評価基準を設定する。

3.1.1 脅威フィルタリング条件の設定

分析対象の製品に対するセキュリティ脅威について、事業ドメインごとに保護資産、アクセス経路、脅威種別の洗い出しを行う。実際にサイバー攻撃で発生しうる脅威には、攻撃の目的となる保護資産とその保護資産へのアクセス経路が必ず存在するため、保護資産とアクセス経路の組み合わせで対象の分析を実施する。このとき、脅威をフィ

ルタリングする条件として、保護資産のレベル（表2）やアクセス経路のレベル（表3）を脅威分析の前提条件として設定する。保護資産のレベルは、安全の観点（死亡、重傷、軽傷）、影響範囲の観点（社会、企業、個人）、事業損失の観点（被害金額）を加味し、事業ドメインの特性を考慮して、設定する。アクセス経路のレベルについては、物理的障壁の有無（入退室管理など）、もしくはその障壁の高さ（ファイアウォールの強度など）をシステムの特성에合わせて、設定する。公共システムや工場の製造ラインなどではシステムの安定稼働が求められることが多いため、オムロンの製品は可用性が重要視される。一般的な情報システムでは、機密性、完全性、可用性の順にリスクを考えるが、オムロンの製品では、可用性、完全性、機密性の順序を念頭に置いて、保護資産のレベル設定を行うことが重要である。例えば、FA 制御機器の脅威分析では、保護資産レベル「中」以上、アクセス経路レベル「中」以上を対象とする。

また、発生しうる脅威をガイドワードとして分類（表4）しておき、保護資産、アクセス経路の組み合わせに脅威の分類が当てはまるかどうかを分析することで脅威を抽出していく。

表2 保護資産のレベル設定の例（FA 制御機器）

レベル	保護資産（情報）	保護資産（機能）
高	制御システムを動作させるためのプログラムやレジビデータ	機器の動作制御機能、プログラム、パラメータの変更機能
中	品質管理データ	アクセス管理機能（認証）
低	機器の死活監視情報	ラダープログラムデバッグ機能

保護資産には、情報資産と機能資産がある。

表3 アクセス経路レベル設定の例（FA 制御機器）

レベル	アクセス経路
遠隔（高）	インターネットから直接アクセス可能な通信手段がある。もしくは、無線通信手段がある。
隣接（中）	ファイアウォールやVPNにより、隔離されたイントラネットに接続されている。
ローカル（低）	インターネットへの接続経路がなく、機器の直接操作が必要。

表4 ガイドワードの例（STRIDE⁵⁾

脅威種別	備考
なりすまし（Spoofing）	他人へのなりすまし
改ざん（Tampering）	情報の改ざん
否認（Repudiation）	攻撃の否認
情報漏洩（Information Disclosure）	外部への個人情報や機密情報の漏洩
サービス拒否（Denial of Service）	サービスを停止させる
特権の昇格（Elevation of Privileges）	管理者等の権限を奪取し悪用

3.1.2 リスク評価基準の設定

抽出された脅威のリスク評価を行うために、事業ドメインに合ったリスクの発生確率と影響度による評価基準を設定しておく（表5）。ミッションクリティカルな製品やサービスでは、発生確率が（低）であってもリスク対策が求められる。製品を取り巻く状況に応じて、リスク評価の基準を設定する。表6では、「アクセス経路、専門知識の要否、攻撃者の手間」の条件の組み合わせを元に発生確率を設定している。なお攻撃者の手間とは、攻撃成功までに物理的な時間や設備が必要であることや複数の手続きが必要となることを指す。

また、表7ではリスク評価基準の安全、評判、事業損失の観点から影響度を設定している。製品の特性を考慮し、これらの項目に適切なものを選択することで、多様な事業ドメインに適応させる。

表5 リスク評価基準設定の例

リスク	影響小	影響中	影響大
発生確率（高）	B	A	A
発生確率（中）	C	B	A
発生確率（低）	C	C	B
発生確率（無）	C	C	C

A：リスク評価値高、B：リスク評価値中、C：リスク評価値低

表 6 発生確率設定の例

発生確率	アクセス経路	専門知識の 要否	攻撃者の 手間
高	遠隔 (高)	不要	小
中	遠隔 (高)	不要	大
中	遠隔 (高)	要	小
中	隣接 (中)	不要	小
低	遠隔 (高)	要	大
低	隣接 (中)	不要	大
低	隣接 (中)	要	小
無	隣接 (中)	要	大
無	ローカル (低)	考慮せず	考慮せず

アクセス経路がローカル (低) の場合、専門知識の要否、攻撃者の手間を考慮せず、発生確率を無とした。

表 7 影響度設定の例

影響度	安全	評判	事業損失
大	死亡、重症、 火災	企業ブランドの 風評被害	1 日以上製造 ライン停止
中	通院加療、 製品発火	製品の風評被害	1 日未満の製造 ライン停止
小	軽傷、発煙	—	—

3.2 脅威分析手順

提案する脅威分析の手順は、前述した「資産ベース」での詳細リスク分析の手法と大まかには共通しており、具体的には以下のようなフロー (図 1) で分析を進める。製品の事業ドメインに適合させるための仕組みは、各工程の詳細な作業を実施する際の手順として、以降の章で詳細に説明する。

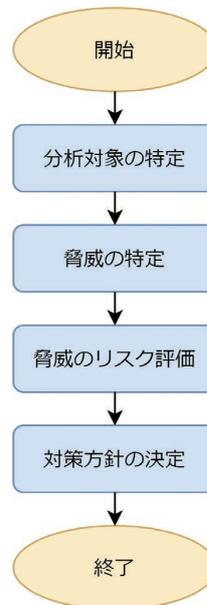


図 1 脅威分析フロー

3.2.1 分析対象の特定

システム要件などの入力文書から網羅的に資産を抽出すると分析対象が広くなり、莫大な工数がかかることとなる。分析対象の製品と利用環境を明確にすることで、保護すべき資産とその資産へのアクセス経路を明らかにする。そのために想定される利用環境をイメージし、システムの全体構成図を作成する。分析対象の製品については、保護すべき資産とそのアクセス経路についても記載し、その製品の事業ドメインで事前に定義した重要度を判断する保護資産のレベル表とアクセス経路のレベル表を用いることで、重要度の低い情報や機能、アクセス経路のフィルタリングを可能にした。図 2 の例では、機能資産であるラダープログラムデバッグ機能は表 2 のレベルで「低」、接点 I/O などのアクセス経路からのサイバー攻撃のリスクは、表 3 のレベルで「ローカル (低)」にあたると考え、対象外としている。このようにして分析対象となる保護資産とアクセス経路を洗い出す。

この場合は、デバッグ機能以外の機能と情報が分析対象の保護資産としている。また、アクセス経路としては、「LAN1」、「LAN2」、「SD カード」を分析対象としている。

3.2.2 脅威の特定

分析対象を明確にしたシステム構成図 (図 2) をもとにして、それぞれの保護資産に対して、接続されるアクセス経路に着目し、表 4 のガイドワードを参考にして想定される脅威を特定する。これにより、必要最小限の組み合わせで脅威を洗い出すことができるため、分析工数を抑えて、漏れなく脅威の抽出を行うことが可能となる。

一例として、保護資産として「ファームウェア」に着目

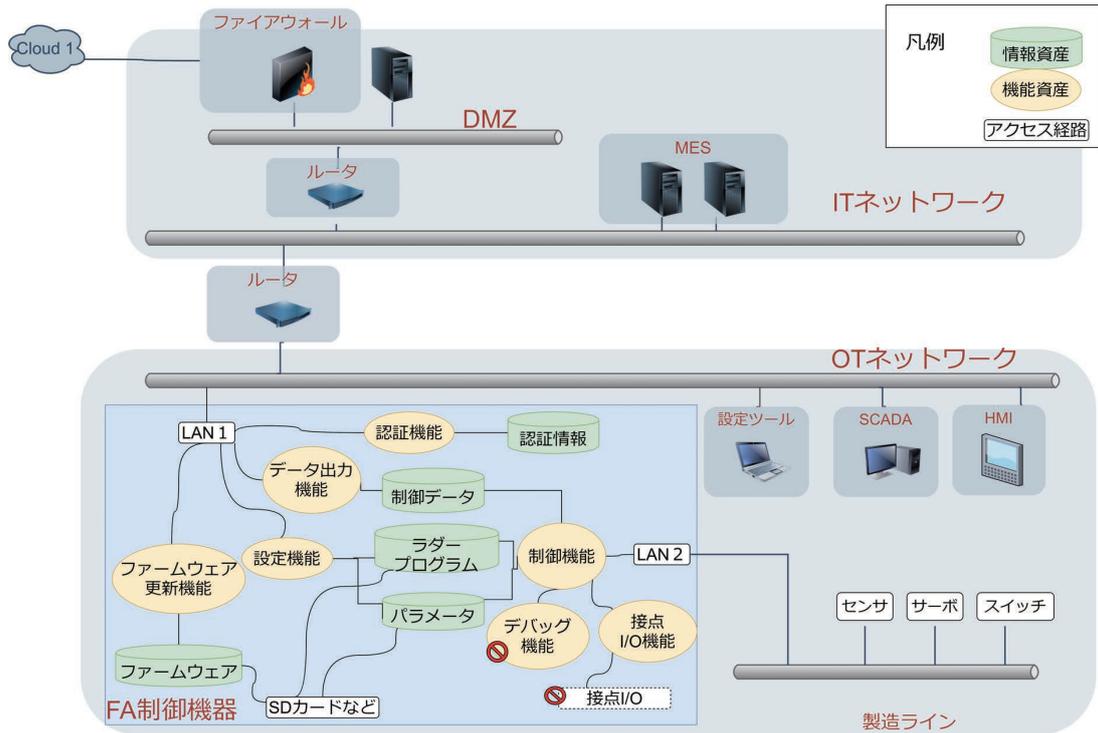


図2 システム構成図の例 (FA 制御機器の場合)

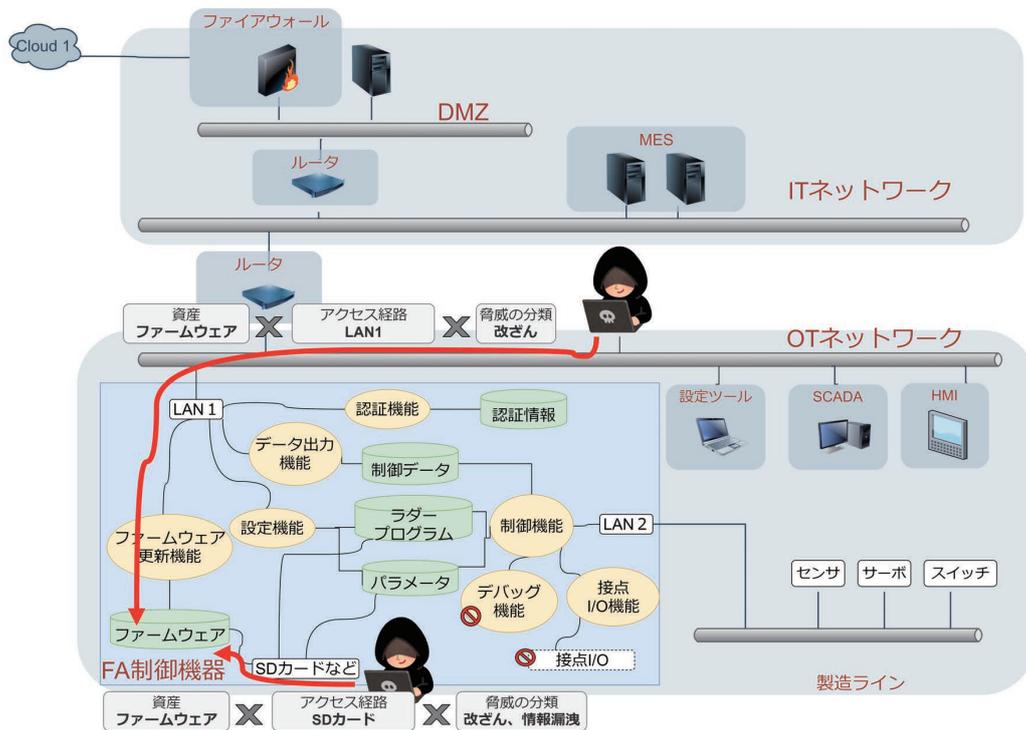


図3 ファームウェアに着目した脅威の抽出

した場合の分析例 (図3) を示す。この例では、「ファームウェア」へのアクセス可能な経路として、「LAN1」と「SDカード」がある。それぞれのアクセス経路について、ガイドワードから発生しうる脅威を記載していく。このよ

うにして、すべての分析対象の資産に対して脅威を抽出し、脅威一覧 (表8) を作成する。

特定した脅威の検証として、「2. 製品のセキュリティ対策の着目点」で挙げた4つのフェーズのユースケースシナ

リオを用意し、シナリオに沿った脅威検証を行うことで、脅威の抽出漏れを確認できる。

表 8 脅威一覧の例

No.	対象資産	アクセス経路	脅威種別	脅威
1	ファームウェア	LAN1	改ざん	悪意のある第三者に、設定ツールでファームウェアを書き換えられる。
2	ファームウェア	SD カード	情報漏洩	悪意のある第三者に、SD カード経由でファームウェアを抽出される。
3	ファームウェア	SD カード	改ざん	悪意のある第三者に、SD カード経由でファームウェアを書き換えられる。
4	ラダープログラム	LAN1	改ざん	悪意のある第三者に、設定ツールでラダープログラムを書き換えられる。
5	ラダープログラム	LAN1	情報漏洩	悪意のある第三者に、設定ツールでラダープログラムを搾取される。
6	ラダープログラム	LAN1	情報漏洩	悪意のある第三者に、パケットキャプチャによりラダープログラムを搾取される。

3.2.3 脅威のリスク評価

抽出した脅威ごとに、その脅威がもたらす問題事象を列挙していく。次に、その問題事象について影響度と発生確率を表5～表7の設定に照らして、リスクを評価していく(表9)。

表 9 リスク評価の例

No.	対象資産	脅威がもたらす問題事象	影響度	発生確率の要素			発生確率	リスク評価
				アクセス経路の観点	攻撃者の専門知識の観点	攻撃者の手間の観点		
1	ファームウェア	製造ラインの長時間停止、製造品質の低下	大：事業損失	高	中	高	高	A
2	ファームウェア	PLC の設計機密の漏洩	中：事業損失	低	中	中	中	B
3	ファームウェア	製造ラインの長時間停止、製造品質の低下	大：事業損失	低	中	中	中	A
4	ラダープログラム	製造ラインの長時間停止、製造品質の低下	大：事業損失	高	中	高	高	A
5	ラダープログラム	顧客の製造データの流出	中：風評被害	高	中	高	高	A
6	ラダープログラム	顧客の製造データの流出	中：風評被害	中	低	高	中	B

3.2.4 対策方針の決定

リスク評価の結果に基づき、対策の要否を決定する。対策の要否決定は、費用対効果、対策後の残リスクをもとに判断する。そのためには、レベルの高い重要なリスクから順に対策の概要を想定していく。各リスクの対策を検討する中で、レベルの高いリスクの対策を実行することによって、他のいくつかのリスクは、個別に対策する必要がなくなる場合がある。共通の対策が有効となる脅威については、対策の検討を省略する(表10)。これにより、対策の検討と実施の時間を節約し、効率化できる。レベルの低い保護資産については、潜在的な脆弱性とその脆弱性を突いて攻撃されるリスクのすべてを抽出、対策できる訳ではないが、これらについては発生確率と影響度を鑑みた事業リスクは低いと考えて受容し、インシデント発生時に対処を行うことにする。最終的に、実施する対策の実現性や対策後の残リスクを評価したうえで、リスク対策をまとめ、セキュリティ要件とする。

表 10 リスク対策と残リスクの例

No.	対象資産	発生確率の要素			発生確率	リスク評価	対策の要否	対策方針	残リスク
		アクセス経路の観点	専門知識の要否の観点	攻撃者の手間の観点					
1	ファームウェア	高	中	高	高	A	要	・通信暗号化 ・ユーザー認証機能	なし
2	ファームウェア	低	中	中	中	B	要	・ファームウェア暗号化	なし
3	ファームウェア	低	中	中	中	A	要	No. 2 で対策済	なし
4	ラダープログラム	高	中	高	高	A	要	No. 1 で対策済	なし
5	ラダープログラム	高	中	高	高	A	要	No. 1 で対策済	なし
6	ラダープログラム	中	低	高	中	B	要	No. 1 で対策済	なし

4. 成果・効果検証

本提案手法と資産ベースの「詳細リスク分析」のような総当りで脅威を分析しなければならない手法について、表11の製品について、分析が必要になる脅威パターン数を比較した(図4)。

この図の通り、本提案手法を用いることで、保護資産の優先順位付けを行ったうえで分析を行うことで分析パターンの発散がコントロールされ、分析に必要な脅威のパターン数は、概ね10分の1以下に削減されている。

製品Dのケースについて結果の詳細を表12に示す。具体的手順は以下のとおりである。製品の機密上一部詳細の記載は省略している。

表 11 検証製品の保護資産数と経路数

製品	情報資産数	機能資産数	経路数
製品 A	17	18	2
製品 B	5	1	4
製品 C	14	1	7
製品 D	7	7	5
製品 E	8	11	8
製品 F	27	1	7
製品 G	20	16	7

脅威分析手法の比較

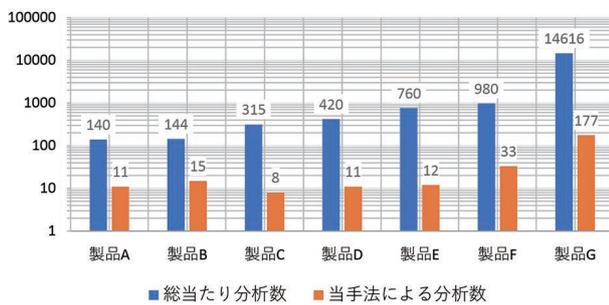


図 4 分析対象となる脅威のパターン数の比較

表 12 製品 D の脅威分析結果比較

脅威のレベル	総当たり時の脅威数	資産・経路による削減数	重複や提案手法による削減数	抽出した脅威数
高	60	0	58	2
中	240	0	143	7
低	120	120	-	2

資産レベル「低」の 2 件の脅威数は、検証により発生確率を考慮し、後工程で追加。

- (1) 製品 D の 14 の資産のうち、インシデントの影響度が受容可能なレベル「低」とした 4 つの資産を分析対象外とした (表 13)。
- (2) 製品 D の 5 のアクセス経路のうち、製品の設置環境の特性から困難である「機器の直接操作」と可能な攻撃のレベルが低い「シリアル通信、USB 通信」の 3 つのアクセス経路を分析の対象外とした (表 14)。
- (3) 上記により、残った 20 (10×2) の組み合わせに対して STRIDE の 6 つのガイドワード (表 4) により、120 (20×6) パターンから攻撃手法が同じもの、資産が接続されていないアクセス経路の組み合わせを除外し、9 の脅威に絞り込んだ。
- (4) 9 の脅威に対して、具体的な脅威と引き起こされる可能性のあるリスクを分析し、抽出した脅威の製

品ライフサイクルにおける影響シナリオから、資産とアクセス経路の絞り込みを再度検証し、新たな脅威を 2 件追加。

- (5) 最終的に抽出された 11 件の分析された脅威について、表 5 のリスク評価基準に基づいて評価を実施し、優先順位をつけて対応を行った。

表 13 製品 D の資産

影響度	資産の数	レベルの定義
高	2	死亡、重傷、個人情報の漏洩につながる可能性のある資産
中	8	ユーザや自社の金銭的な損害に繋がる可能性のある資産
低	4	軽微な情報の漏洩や誤動作の可能性のある資産

表 14 製品 D のアクセス経路

レベル	アクセス経路の数	レベルの定義
遠隔 (高)	2	LAN 上で動作する通信プロトコル
隣接 (中)	1	機器の直接操作
ローカル (低)	2	シリアル通信、USB 通信

上記の手順で脅威分析を行うことで、重要な資産について優先的に脅威を抽出するとともに、分析にかかる工数を削減でき、効率的な分析を可能なものになっている。

また、図 4 のグラフのデータは、FA、ヘルスケア、ソーシャルソリューション、デバイス・モジュールの製品など複数のドメインの製品の結果であり、本提案手法をこれらに適用した結果いずれも効果がみられ、多様なドメインに適用可能と考えられる。

5. むすび

本提案手法は、組込機器に適し、効率的な脅威分析手法がないという課題について、多様なドメインに適用でき、効果的な脅威分析組込機器に適した脅威分析手法として、効率面で一定の成果を上げることができた。ただ、実際のインシデントの発生は、悪意のある攻撃者の意思によって発生する確率が変化する。改善策としては、攻撃者の動機を加味した発生確率を設定することで、より具体性のある脅威の抽出につながれると考える。

一方、本提案手法での脅威分析の手順を従来の開発手順に組み込み、製品品質の確保と製品セキュリティの確保を両立できるように、脅威分析の実施そのものを開発プロセスの一環として位置付けていく必要がある。現状は、脅威分析は一部の製品での実施となっているため、今後は、実

施の対象部門、対象製品の拡大が必要となる。また、開発プロセスの中に取り込んでいくために、開発者に対する啓蒙活動や教育も含めた展開を行っていく。

加えて、サイバー攻撃の技術やサイバー攻撃を防ぐ技術は日々進化しており、効果的、効率的な脅威分析を継続するためには、新たな技術に精通するとともに、脅威分析手法の在り方についても改善していくことが必要である。

参考文献

- 1) 独立行政法人情報処理推進機構 (IPA). 情報セキュリティ白書 2019. 独立行政法人情報処理推進機構. P163.
- 2) Vineet Saini, Qiang Duan, Vamsi Paruchuri. "Threat Modeling Using Attack Trees". 2008, https://www.researchgate.net/publication/234738557_Threat_Modeling_Using_Attack_Trees, (2020-3-1).
- 3) 独立行政法人情報処理推進機構 (IPA) 技術本部セキュリティセンター. 制御システムのセキュリティリスク分析ガイド第2版. 2017, <https://www.ipa.go.jp/files/000069436.pdf>, (2020-3-1).
- 4) 中野 学, 堀部 千壽, 小林 鉄平, 松木 隆宏. システムに対する脅威分析におけるコスト及び属人性低減に向けた手法の提案. SCIS. 2018, No. 1C2-5, 8p.
- 5) Microsoft Corporation. "The STRIDE Threat Model". [https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/commerce-server/ee823878\(v=cs.20\)](https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/commerce-server/ee823878(v=cs.20)). (accessed 2020-2-27)

執筆者紹介



芹川 正孝 SERIKAWA Masataka
グローバルものづくり革新本部
開発プロセス革新センタ SPILIT 推進部
専門：ソフトウェア工学



丹羽 徹 NIWA Toru
グローバルものづくり革新本部
開発プロセス革新センタ
専門：ソフトウェア工学
所属学会：電子情報通信学会



吉岡 幸恵 YOSHIOKA Sachie
グローバルものづくり革新本部
開発プロセス革新センタ SPILIT 推進部
専門：ソフトウェア工学



原田 真太郎 HARADA Shintaro
オムロンソフトウェア株式会社
IST ソリューション事業部
プロセスエンジニアリング部
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。

感震センサ検証の精度向上と時間削減を実現する再現ソフトの開発

成宮 章紀, 栗山 真司, 宇野 裕

阪神・淡路大震災・東日本大震災で建物倒壊・火災等による大規模被害が発生した際、早期復旧のためには建物被害状況を細かく把握する必要性が認識され、その新たな手法が求められている¹⁾。オムロンでは長年にわたり地震を検知する鋼球式感震器²⁾を提供してきたが、この新たなニーズに対応するため、振動解析により建物にどの程度被害が生じるかを数値化するアルゴリズムを搭載し、地震検知精度を向上しつつ取り付け方向に自由度を持たせた感震センサを開発した³⁾。この感震センサは加速度センサにより振動を取得し演算するため、地震を正確に再現した検証や、地震以外の振動を再現した検証が商品の地震検知精度向上のための最重要ポイントとなる。

地震波形は発生した震源地、エネルギー、そして観測地の条件ごとに違った波形となる。その再現には一般的に大型の加振台装置を使用するが、地震波形すべてに対して再現性の高い振動試験を実施することは時間的・費用的にも容易ではない。そこで、加振台での検証ではなく、感震センサに搭載している組み込みプログラムをコンピュータ上で再現し、かつ仮想的な地震動を与えることのできる再現ソフトを開発した。この開発により従来に比べ、短時間で効率良く感震センサの地震検知精度の検証が可能となった。

Development of the Vibrate Reproduction Software for Vibration Sensors

NARUMIYA Akinori, KURIYAMA Shinji and UNO Yutaka

The Great Hanshin-Awaji Earthquake of 1995 and the Great East Japan Earthquake of 2011 had caused large-scale disaster to building collapses and fires. Therefore, it is recognized that the grasp of building damages is important for early reconstruction of the region and infrastructures¹⁾, and the method is required. OMRON has been providing the vibration sensors made by steel balls²⁾ that detect earthquakes for many years, but in order to meet this need, we have released the vibration sensor equipped with an algorithm for analyzes vibrations and quantifies building damage levels, it also be improved earthquake detections and realize free mounting direction³⁾. This vibration sensor analyzes vibrations with an accelerometer, and an accelerometer produces continuous digital data from its vibration. So, the most important point for evaluating the accuracy of vibration sensors is accurately reproduction of vibrations and various vibrations easier.

The earthquake vibration waveform will be different from depending on the epicenter, energy, and observation site conditions and its unpredictable. vibration sensors are tested with various waveforms for its unpredictability. Reproduction of these vibrations and waveforms are produced by vibration tests systems with large size actuators generally. But it is not easy in terms of time and cost to reproduce accurate vibrations of many earthquake waveforms for its various and complexity.

Therefore, instead of verification on the vibration test systems, we have developed the software that can reproduce the vibrations of waveforms and reproduce our vibration sensors embedded software in the software simultaneously. This made it possible to shorter time and more efficient for verification of our vibration sensors with various vibration waveforms include earthquake.

Contact : NARUMIYA Akinori akinori.narumiya@omron.com

1. まえがき

近年多発する大地震によって大規模な建物・構造物の被害が発生しているが、地域社会の早期復旧において被害状況をきめ細かく把握することが非常に重要となっている。災害発生個所をきめ細かく把握することで、復旧が必要な個所を早期かつ的確に判断することが可能となる。そのために、従来の気象庁各拠点における集中的な地震計による地域ごとの震度・被害把握に加えて、各家庭に地震計を設置することにより、建物ごと、家庭ごとの被害把握が可能となる。

オムロンでは、長年地震を検知する鋼球式感震器を提供してきた。メカ式のため消費電力が低く電池消費が抑えられるが、一定の大きな地震を検知するだけであった。また加速度で地震判断するが、加速度と震度の相関は低く動作精度が高くないため、大地震でも地震検知できない場合もあった。地域ごとの震度だけでなく、各家庭でも地震の大きさをそれぞれ取得したいという要求の中で、さらなる地震解析精度の向上を目指し、マイコン (MCU: Micro Controller Unit) で地震の振動を解析し建物被害状況を数値化するアルゴリズムを搭載した感震センサの開発を行ってきた。

開発した地震判定アルゴリズムを検証するためには、加振台と呼ばれる振動を再現する装置で様々な検証を行う必要がある。1つ目は過去に発生した地震を加振台で再現し、感震センサから出力される地震規模を検証する。2つ目は生活環境での振動を再現し、感震センサでの地震誤判断防止を検証する。加振台で地震波形の振動を再現するためには、一般的に大型の加振台装置を使用する。その地震波形は、地震の起こる地域の地盤や地震発生場所との距離など各地域で様々である。このような地域固有の地震波形を高い再現性かつ、あらゆる地域の地震波形に対して実施することは時間的・費用的にも容易ではない。また生活振動は衝撃、すなわち急峻な振動であり、周期的な振動を再現する加振台では再現できず、また安定して再現させるには、目的の振動ごとに特徴を持った専用の治具を準備する必要があり、多様な振動を再現するのは容易ではない。

そのため、今回、感震センサの動作をシミュレートする再現ソフトを開発した。この再現ソフトは製品の組み込みプログラムを変更することなくシミュレートすることが可

能となっており、これは業界として初めての取り組みである。また、大型の加振装置で実施していた試験と、再現ソフトによるシミュレート計算を比較評価する。

2. 感震センサとその仕組み

オムロンで開発した感震センサは、図1のように3軸加速度センサと独自のSI (Spectral Intensity) 値演算アルゴリズムを搭載したMCUで構成している。SI値とはアメリカのハウスナー (G.W. Housner) によって提唱され、地震動による建物被害を数値化した量であり、地震波形の応答速度スペクトルにおいて、周期0.1sから2.5sの範囲におけるスペクトル値の平均として、式(1)で定義される (単位は、kine (cm/s))。また地震の大きさを表す震度階級とも高い相関性を示すことがわかっている^{4) 5)}。感震センサは、3軸加速度センサにより地震等による振動・揺れをデジタル化し、その振動データを独自のSI値演算アルゴリズムで処理、SI値を出力する。また、SI値がある一定の大きな出力を超える場合、顧客の機器動作を遮断するための出力 (遮断信号) を持つ。一般的なSI値は数式で表現されており、高機能な演算処理ができるCPU (Central Processing Unit) なら演算可能である。一方、比較的小規模なMCUを用いる場合は処理能力が足りない。我々の感震センサは、地震計算処理を少なくするアルゴリズムを用いることで比較的小規模なMCUでの処理を可能とした。加えて、地震以外の衝撃・生活振動による振動を検知する独自のアルゴリズムも搭載し、その場合には地震として取り扱わない誤検知の防止も実現している。

上記機能があり、その上で表面実装が可能な小型モジュール形状と低消費電力動作を実現しながら、従来の鋼球式感震器と同等の動作を行う遮断出力端子を装備し、鋼球式感震器との互換性を確保しつつも、地震検出再現性をより高い精度で実現している。

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} Sv(T, h) dT \tag{1}$$

- SI: Spectral Intensity 値
- Sv: 速度応答スペクトル
- T: 周期
- h: 減衰定数

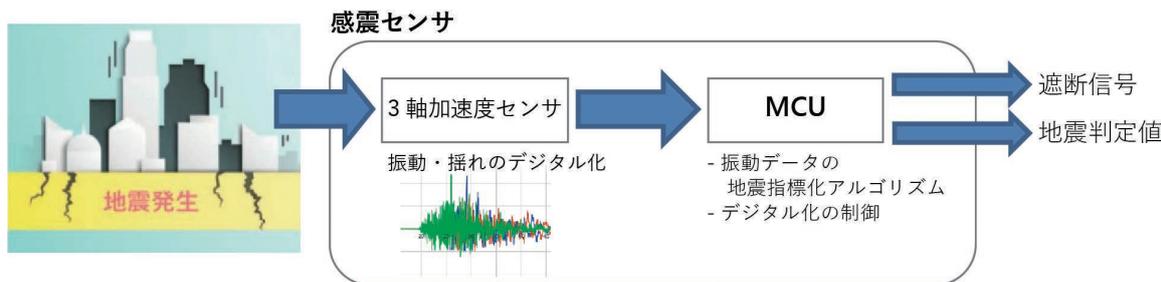


図1 感震センサの基本構成

3. 従来の検証方法と課題

3.1 加振台による検証方法

感震センサにおけるSI値精度検証は、加振台で過去に発生した地震波形や生活環境での振動波形を忠実に再現し、その地震や振動を受けた感震センサがセンサ内部でSI値を算出する。感震センサ内部で算出したSI値と式(1)で算出される理論値との一致性について検証している。

加振台は各種存在し、CM等で有名な家を揺らすような大型なもの、小型サーボモーターを用いた簡易なもの、1軸に限定し揺れのエネルギーを抑えて正確に振動を印可するものがある。従来の感震センサ開発では、コスト・検証スピードのバランスを鑑み、3軸の小型サーボモーターを用いた簡易検証台、1軸の精度が高い加振台による検証を中心に実施し、大型の加振台(図2)は要所で使うなどの適切な評価を実施してきた。



図2 加振台の写真

加振台を駆動する信号には、図3のように過去に発生した実際の地震を観測したデータを用いる。このデータには気象庁等の官公庁が全国各地に設置している振動計で観測したものがよく用いられる。

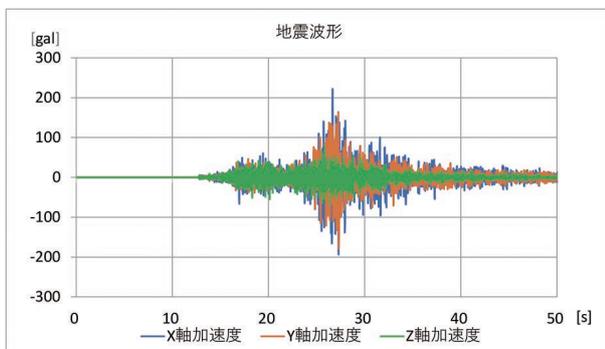


図3 地震波形の例(2005年福岡県西方沖地震)

図4に加振台実験装置を示す。地震データを加振台制御機器に地震波形として入力し、モーターを駆動させて加振台に振動を発生させる。振動を受けた感震センサは、搭載している加速度センサが振動を検知し、MCUでSI値を計算する。振動終了後、感震センサが出力するSI値を確認する。

なお加振台装置に入力した地震波形が正確に加振台で振動したか確認するため、基準となる加速度計を設置し加速度をモニターする。

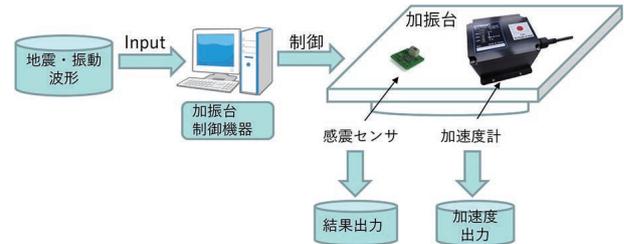


図4 加振台実験装置

3.2 加振台による検証の課題

加振台検証では主に2つの課題がある。一つ目は、地震波形や生活振動などの振動波形を正確に再現できるかである。地震波形は一般に予測不可能であり、論理的な波形よりも実際の地震波形による検証を重視され、多数の波形による検証が要求される。地震は直下型・プレート型で周期・振幅が異なりかつ、地震の大きさも震度3~7と幅広い。また生活振動等の検証をする場合は、ドアの開閉や車の振動等の場合、周期波形に一瞬のパルス要素も加わりさらに複雑な振動波形となる。以上のように、加振台で再現すべき振動は多岐にわたる。そのため、加振台装置の許容動作範囲での地震および振動波形の再現可能性を、あらかじめ検討することが必要である。

二つ目は、検証対象となる感震センサの設置方法である。実使用に合わせて設置し十分振動が伝わるのが前提となるため、設置影響を排除する必要がある。

上記理由から、試験環境の正確な構築が検証の精度にとって非常に重要である。そのため、試験環境構築・事前検討・結果確認に多くの時間を要する加振台での検証は費用対効果が非常に悪い検証である。ただし、加速度センサの実装傾きの影響やユーザーの取り付け位置を考慮した環境で試験を行う場合、より現実に近い加振台での検証は重視されている。このため、加振台による検証は最小限にとどめつつ、効率的に検証できる手法が求められる。

3.3 モデルシミュレーションによる検証方法

前述のような加振台による検証方法を効率化する手段として、感震センサと同じ動作をコンピュータ内にモデル化し、シミュレーションをする手段が考えられる。感震セン

サ内部での SI 値計算と地震判定アルゴリズムをモデル化し、コンピュータ上で検証を行えば、加振台のように試験環境に左右されずに正確に振動を再現し計算・アルゴリズムの検証を行うことができる。ただし、感震センサ用の市販シミュレータは存在しないため、汎用の数値解析シミュレータを使用することとなる。

3.4 モデルシミュレーションによる検証の課題

汎用の数値解析シミュレータを使用する場合、シミュレータで構築したアルゴリズムと実際の組み込みソフト⁶⁾との相互変換ができない課題がある。

この課題への対策としては、2つの対応方法が存在する。1つ目はシミュレータ上でアルゴリズム開発を行い、自動変換機能⁷⁾を用いて出力されたコードを実機のプログラムとしてそのまま使用する手法である。自動変換機能は、自動でシミュレーションプログラムを組み込みプログラムに変換する。この場合、計算結果の誤差が保証されない、処理時間が考慮されない、プログラムサイズの肥大化といった問題がある。プログラムサイズの肥大化や処理速度不足の場合、MCU 変更が必要となり製品コストが上がる等の問題も発生する。また、感震センサでは低消費電力を達成するための MCU パワーマネジメントや加速度センサの詳細な制御、およびそれとの協調動作を行っているため、これらの機能をシミュレータ上で再現することは難しく、仮に再現できたとしてもそれらを含めて自動変換することはプログラムサイズの肥大化を助長して先述のコスト上昇の問題が発生するため採用できない。

2つ目の対応方法は、シミュレータで計算を構築・検証した後、手作業で変換し製品ソフトウェアを構築する手法である。この場合、一つ一つの手順を人手によって変換していく必要があり、加えてアルゴリズム変更の度に検討・変換する必要がある。このために作業に時間がかかり、これも製品コスト向上の要因となる。また、変換時に人為的なミスが入り込む余地があるため、組み込みソフトとシミュレータ上の動作が完全に一致しているか検証も必要となってくる。そのためシミュレーションを導入しても、再度加振台による実験をする必要が発生してしまう。

このように従来のシミュレーション構築では、十分な費

用対効果が得られないため、組込プログラムを変更することなくシミュレーションが実行できるソフトを開発した。

4. 再現ソフトを用いた感震センサ検証

4.1 全体構成

今回提案する再現ソフトの全体構成を図5に示す。加振台試験と同じく地震波形を準備し、感震センサプログラムを取り込んだ再現ソフトに入力しシミュレーションを実施する。再現ソフトは取り込んだ感震センサプログラム上で SI 値を計算し出力する。

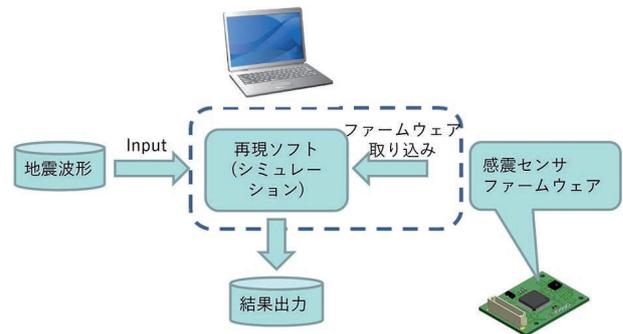


図5 全体構成

4.2 再現ソフトの実現方法

感震センサは図6のように、振動を検知するための加速度センサと、地震演算するための MCU から構成される。感震センサは加速度センサで取得した加速度を SPI 通信でマイコンに取り込み、マイコンの組み込みプログラムで地震精度を処理している。組み込みプログラムには様々な要素があり、振動検証に必要な計算機能以外に、加速度センサとの通信インタフェース機能を再現する必要もある。また加速度センサの挙動も再現する必要がある。これらをコンピュータ上に仮想加速度センサと仮想マイコンとして構築し、業界として初めて感震センサ全体をシミュレーションできる環境を構築した。

また実際の感震センサの加速度センサと MCU は協調して動作している。この協調動作を PC 上で再現するために非同期処理を行うスレッド機能を利用する。MCU と加速

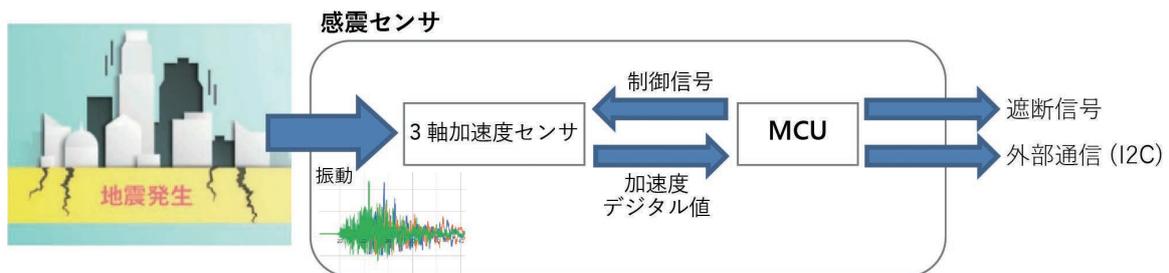


図6 感震センサ

度センサをそれぞれ別スレッドで実現し非同期に動作させ、独立した挙動とした。MCU と加速度センサとのインタフェース部分は、スレッド間通信として表現することで実際のデジタル回路と同様の非同期な通信となり、現実の通信動作と同様の動きが再現できた。これらにより上層のアプリケーション部を変更することなく PC 上で実行可能な機構として実現した。

4.3 仮想加速度センサ

再現ソフトを作成する上で、加速度センサが振動を検知する仕組みをコンピュータ上で再現する必要がある。そのためには図7のように3つの動きを再現する必要がある。1つ目は、加速度センサが振動をサンプリングしつづける動きである。2つ目は、加速度センサのデジタル回路を模擬して、振動を加速度センサの出力に変換する動きである。3つ目は加速度センサに一定以上の振動が加わった後、MCU を起動する動きである。これら3つの動作を、実際の加速度センサと同じ形式・タイミングで出力する仮想加速度センサを作成する必要がある。

4.4 仮想マイコン

図8に実際の感震センサと再現ソフトの構成比較図を示す。プログラムは、上層のプログラム言語で記述された感震計算や加速度センサを操作するアプリケーション部、中間層のプログラム言語で記述された計算補助や外部入出力のインタフェース機能などを含むミドルウェア部、低層の機械語で記述されたデバイスドライバ部で構成される。これらの全体をPCに取り込むときは、プログラムに一切の変更を加えない場合はエミュレーション技術を用いることがある。通常、感震センサのような小型・低消費電力のMCUと、PCに使用されるCPUでは機械語に互換性がないため、エミュレーション技術でMCU側の機械語をハイパワーなPCでリアルタイムに解析・解釈し実行する。ただし、市場ではエミュレーション技術はハイエンドのCPUにしか提供されておらず、小型なMCUには存在しないことが多い。また小型とはいえMCUには100種類を超える機械語が存在しているほか、MCUはラインナップごとに周辺回路も異なるため商品開発の都度、エミュレーターを構築するのはコストが高い。

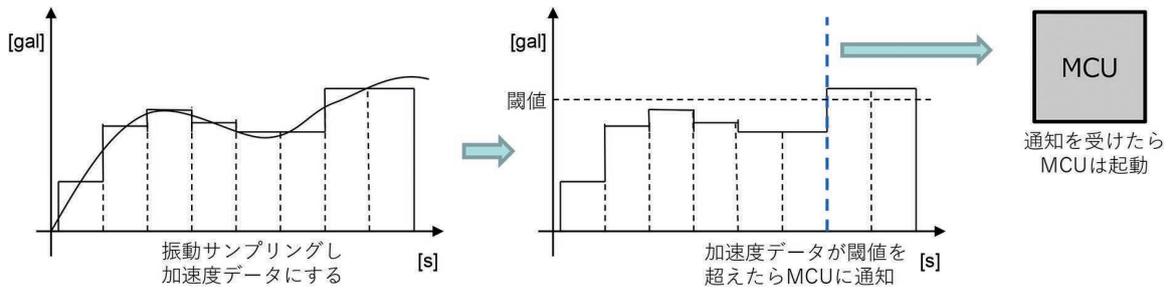


図7 仮想加速度センサの機能

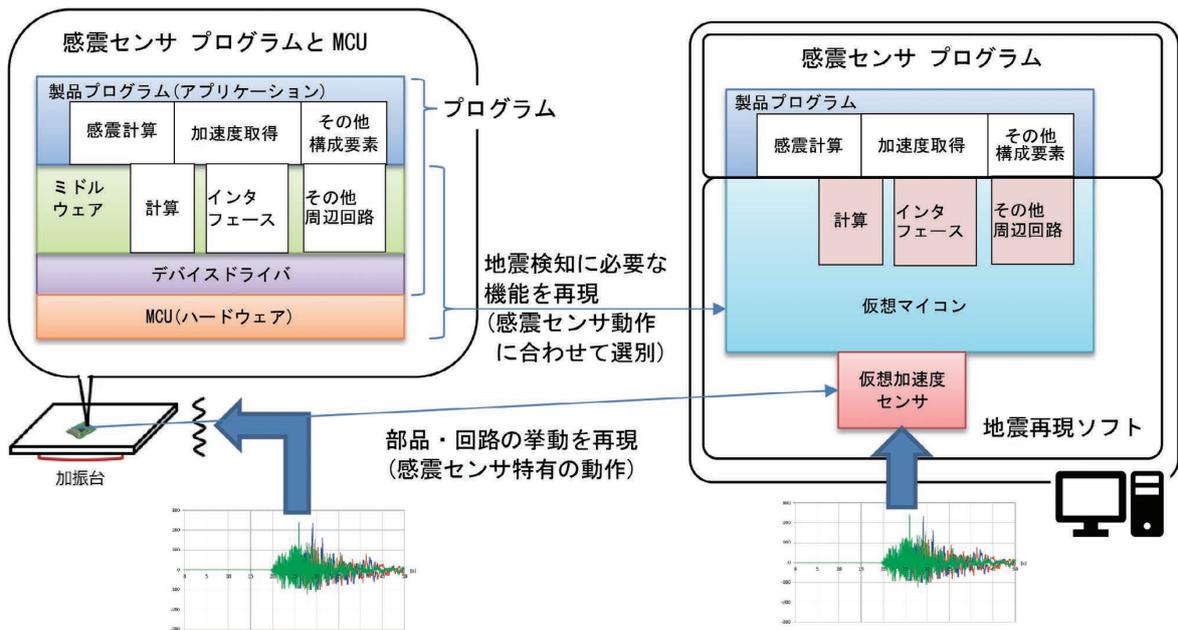


図8 実際の感震センサと再現ソフトの構成比較図

一方でプログラム言語は MCU/CPU に依存しない形式となっている。上層・中間層はプログラム言語で記述されているため、そのまま別の CPU で実行できる可能性がある。特に上層をそのまま利用することで、PC 上と MCU で同じプログラムがそのまま実行できるようにする。中間層は上層が MCU や周辺回路へ依存を低くするために用いられる。そのためこの中間層を変更し、上層から見れば PC で実行しても MCU の周辺回路が存在するかのよう振る舞いを実現した。その際に、感震センサの地震検知機能に必要な加速度センサへの通信機能等、最低限の MCU 内部回路に限定して再現を行い、エミュレーター構築に比べて短時間で再現ソフトを作成した。また商品特有の低消費電力化に必要な、計算とパワーマネジメント機能の同時実行を再現し、状態遷移を含めて上層のソフトウェアは改変せずに利用できるようにした。

5. 結果

5.1 地震検証結果比較

加振台による振動によって感震センサが出力する地震規模の結果、再現ソフトのシミュレーションで得られる地震規模の結果、および各地震規模の SI 値を表 1 に示す。理論値は式 (1) で計算する。また加振台による検証 (旧検証) は振動再現のバラつきがあるため 10 回の平均値としている。感震センサの SI 値仕様は $\pm 5\text{kine}$ となっているが、再現ソフトは理論値と比較して地震判定アルゴリズムの誤差は発生するものの誤差 $\pm 0.5\text{kine}$ 以下であり検証精度は十分である。ただし、加振台による検証 (旧検証) の場合も $\pm 1.5\text{kine}$ 以下となり検証精度は十分であることがわかる。

表 1 地震検証結果

条件	SI 値 理論値	加振台による検証 (旧検証)		再現ソフトによる 検証	
		SI 値	理論値との 誤差	SI 値	理論値との 誤差
地震 A	44.1	42.6	-1.5	43.6	-0.5
地震 B	33.5	32.4	-1.1	33.6	+0.1
地震 C	33.0	31.9	-1.1	33.0	0.0
地震 D	27.5	26.6	-0.9	27.1	-0.4

単位 [kine: cm/sec]

なお加振台で再現困難だった生活振動は、再現ソフトで振動波形を取り込むことによって容易に検証が可能になり、これまで繰り返し必要だった振動検証の時間短縮となった。

5.2 所要時間

加振台で実施した場合の実験所要時間は、

- ・1 波につき、実験時間約 3 分
- ・加振台装置準備時間 約 5 ~ 10 分 (安全確認等装置によって異なる)

となり、1 波形につき約 8 ~ 13 分必要となる。

一方、再現ソフトの場合、1 波形につき約 1 分で検証可能である。公的な地震波形データベースには、数万波を超える地震波形のデータが登録されている。地震の検証としては多数のパターンで検証して確認を行うため数百の波形を用いて検証を行うことが求められる。仮に地震 1000 波検証した場合、加振台に $10\text{分} \times 1000\text{波} = 10000\text{分} / 60\text{分} = \text{約} 167\text{時間}$ 必要となる。これに対して再現ソフトの場合は、1 波約 1 分で検証が可能であり、 $1\text{分} \times 1000\text{波} = 1000\text{分} = \text{約} 16.7\text{時間}$ となる。結果、約 90% 削減可能となった。

5.3 詳細な解析結果

加振台による検証では、振動後に感震センサに保存されている地震データを確認するだけであった。一方再現ソフトによるシミュレーションでは、図 9 や図 10 のように刻一刻と変化する振動に対して、感震センサが検知した SI 値等の地震データを時刻ごとに表示することが可能になった。これは従来ならセンサが計算中で出力ができなかった内部データも、コンピュータプログラム上に仮想マイコンを再現したことでモニタリングすることが可能になったためである。SI 値以外にも、様々な MCU 内部情報をモニタリングすることができるようになったため、感震センサプログラムの解析と調整がより容易に実施することができ、開発の効率がさらに高まった。

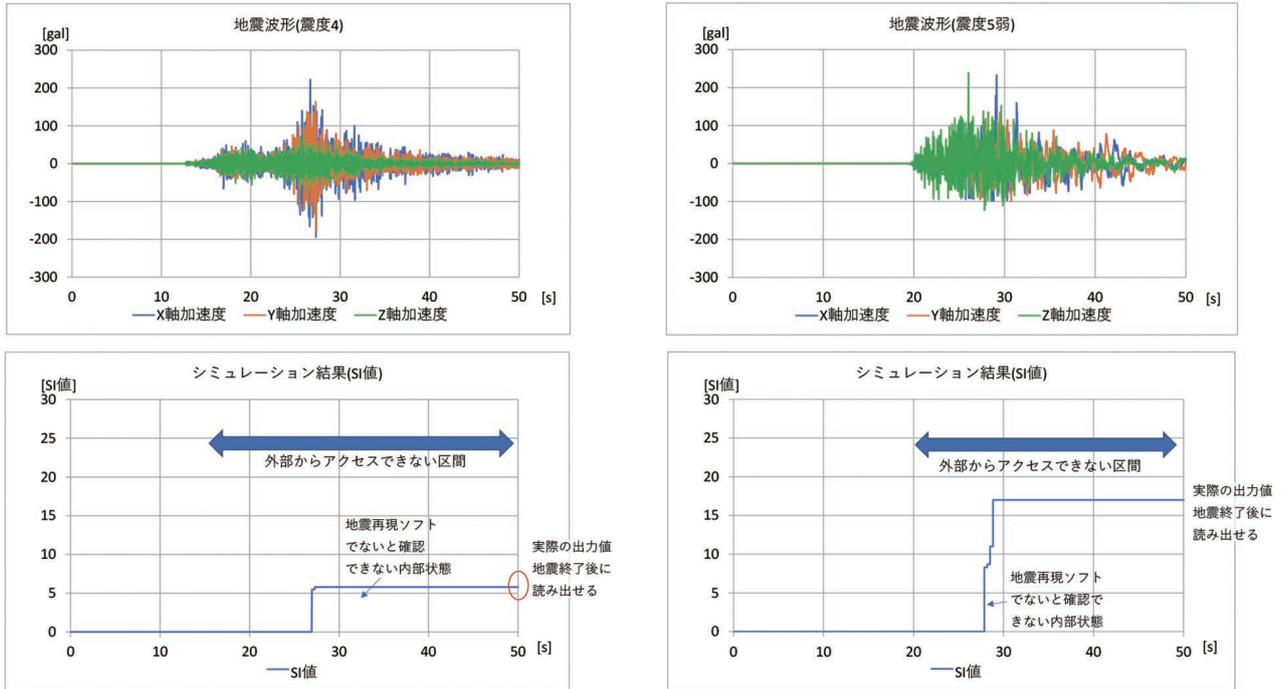


図9 入力した地震波形とシミュレーション結果

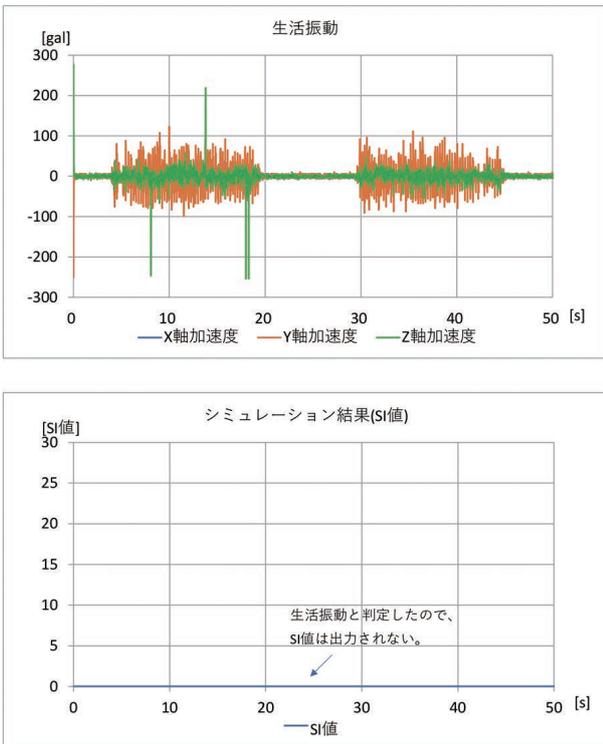


図10 入力した生活振動波形とシミュレーション結果

6. むすび

地震波形や生活振動などの振動波形を加振台や治具で正確に再現し検証することは困難で時間を要するが、今回の提案で感震センサの組み込みプログラムを取り込んだ再現ソフトを実現し、加振台で実施した場合と同等以上の精度で検証が可能になり、かつ大幅な時間削減が可能になった。今後の商品開発ではこれまで時間の制約により実施できなかった数々の振動データも含めて、振動検証を実施していく。

一方で、感震センサの機能は地震検知機能だけでなく、各種データの顧客との送受信や、点検動作等も重要な機能である。また、それらの動作が地震と同時に発生した場合や、一部故障が発生した場合の挙動など、商品開発において発売前に実施しておくべき検証は地震検知以外にも多数ある。これらに対して、現在の再現ソフトでは地震検知アルゴリズムに必要な機能以外は省いているため、従来通り実機を用いた検証もあり再現が難しい現象もある。今後は、それらの感震機能以外の部分も再現・検証できる手法を開発し、さらに精度・効率を高めて感震センサを開発していく。

参考文献

- 1) 境有紀. 地震動の性質と建物被害の関係境. 日本地震工学会誌. 2009, No.9, p.12.
- 2) オムロン株式会社. “感震装置 D7H”. OMRON 制御機器. <https://www.fa.omron.co.jp/products/family/559/>, (参照 2020-12-01).
- 3) オムロン株式会社. “形 D7S 感震センサ”. OMRON 電子部品. <https://www.omron.co.jp/ecb/product-detail?partNumber=D7S>, (参照 2020-12-01).
- 4) 佐藤暢彦, 片山恒雄, 大保直人, 川崎勝幸. 新しい制御用地震センサーの開発と試作. 第18回地震工学研究発表会. 1985, p.105-108.
- 5) 星幸江, 丸山喜久, 山崎文雄. 数値解析に基づく地震動 SI 値と木造建物被害の関係の分析. 土木学会論文 A1 (構造・地震工学). 2009, Vol.65, No.1 (地震工学論文集第 30 巻), p.606-613.
- 6) 藤広哲也. よくわかる最新組み込みシステムの基本と仕組み. 秀和システム, 2015.
- 7) 黒木裕太, 田村雅成, 神山達哉, 兪明連, 横山孝典. 状態遷移を含む制御モデルを対象とした Simulink・UML モデル変換ツール. 情報科学技術フォーラム講演文集. 2014, Vol.13, No.1, p.193-194.

執筆者紹介



成宮 章紀 NARUMIYA Akinori
事業開発本部 MEMS 開発生産センター
技術開発部



栗山 真司 KURIYAMA Shinji
事業開発本部 MEMS 開発生産センター
技術開発部



宇野 裕 UNO Yutaka
事業開発本部 MEMS 開発生産センター
技術開発部

Microsoft および Excel は、米国 Microsoft Corporation の米国およびその他の国における登録商標または商標です。
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。

磁性体の増分透磁率測定手段とそれを利用した 直流重畳特性推定フローの構築

福田 雅也, 山田 隆志

DC/DC コンバータなど大電流を扱う電源回路で利用されているフェライト等の磁性材料は、直流電流成分が増えるに従い発生する磁束の影響で直流重畳特性と呼ばれる急激なインダクタンスの低下現象が現れる。この現象は電気エネルギーの変換効率に悪影響を及ぼすため、設計前に電流の限界値を見極める特性予測技術が求められてきた。

この現象を正確に表すことのできる数学モデルとして、プレイモデルが知られている¹⁾。しかし、モデルの入手性の悪さ、モデル作成のための実測の難しさ、大きい計算負荷が、現実には解析を実行しようとする際のネックとなっている。

今回、それに代わり増分透磁率と呼ぶマイナーループの傾きを利用する方法を検討した。この手法は重畳電流が正弦波に制限されるが、計算負荷が軽い特徴を持っており、トロイダルコアを使った実測と解析の組み合わせを使って材料定数を導くことで、プレイモデルの手法より迅速に精度よく評価できる。このメリットにより、実用化の検討を実施した。

その結果、計算負荷は数十分程度と軽く、かつ推定誤差が5%以下と期待通りの結果を得る事ができ、実用化に向けた目途を立てる事ができた。本論では具体的な事例を通じてその実用性について報告する。

Method for Measuring Incremental Magnetic Permeability of Magnetic Materials and Construction of a DC Superposition Estimation Flow by Using It

FUKUDA Masaya and YAMADA Takashi

Magnetic materials like ferrite, which is used in power supply circuits that handle high currents such as DC/DC converters, exhibit a rapid decrease in inductance due to the influence of the magnetic flux generated as the DC current component increases. This phenomenon is called DC superposition, and it adversely has a negative impact on the efficiency of electrical energy conversion, there has been a need for a property prediction technique to determine the current limit value prior to design.

The Play Model is well known as a mathematical model that can accurately represent this phenomenon¹⁾. However, the poor availability of the model, the difficulty of making actual measurements for the model, and the large computational load have become bottlenecks when trying to perform the analysis in reality.

In this study, we investigated an alternative method that uses the slope of the minor loop, called incremental permeability. Although this method limits the superimposed current to a sinusoidal wave, it has a feature of light computational load, and by deriving the material constants using a combination of actual measurement and analysis using a toroidal core, it can be evaluated more quickly and accurately than the play model method. Due to this advantage, a practical application study was conducted.

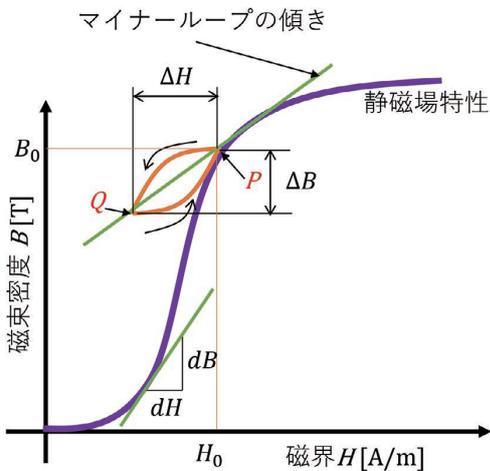
As a result, we were able to obtain the expected results with a light computational load of only a few tens of minutes and an estimation error of less than 5%, and we were able to make a prospect for practical application. In this paper, we report on the practicality of the method through a concrete example.

Contact : FUKUDA Masaya masaya.fukuda@omron.com

1. まえがき

近年、大電流化する電気エネルギーの効率的な運用のため、パワーエレクトロニクス技術の進化は必須のものとなっており、電源の小型化、低損失化の要求はますます大きくなっている。そのためにスイッチングの高周波化は必然の流れであるが、電源の重要な構成要素である磁気デバイスが、それに含まれる磁性体特有の磁気飽和特性のため、最大電流を制限することが大きな課題となっている。磁気飽和が影響する主要な特性の一つが直流重畳特性であり、直流電流によって作られた磁束により磁性体が磁気飽和に近づくと、急激にインダクタンスが低下する現象が発生する。こうなると電源動作時のリップル電流や負荷応答特性に悪影響を及ぼし、動作異常を引き起こすため、直流電流の限界値を正確に推定できる技術が重要になってくる。

電源を設計する際に直流重畳特性を磁場解析で推定する試みは実施されてきているが、良く用いられている透磁率 $\mu = B_0/H_0$ (B_0 は図 1 の点 P での磁束密度 B 、 H_0 は点 P での磁界 H を表す) や微分透磁率 $\mu_d = dB/dH$ を用いると原理的に誤差が発生する事が知られている²⁾。この誤差要因を解消するためには、図 1 のマイナーループの発生要因でもある、ヒステリシス特性を解析に取り入れる必要がある。



$\mu_{\Delta} = \Delta B/\Delta H$: 増分透磁率
 $\mu = B_0/H_0$: 透磁率
 $\mu_d = dB/dH$: 微分透磁率
 P, Q: マイナーloopの分岐点

図 1 磁性体の B-H 特性のマイナーループ

任意のヒステリシス特性を表現するモデルとして、プレイモデルが提案されている¹⁾。これは、磁気特性を図 2 のような複数の対称ループ群の集合として表現する数学モデルであり、式(1)で表現される。

$$H = P(B) = \sum_m f_m(P_{\zeta_m}(B), B) \quad (1)$$

ここで P_{ζ_m} は、ヒステロンと呼ばれるヒステリシスの動き

を表す関数で、 f_m がヒステリシスループの形状を表す関数、それが振幅の異なる m 個の集合体として構成されている。

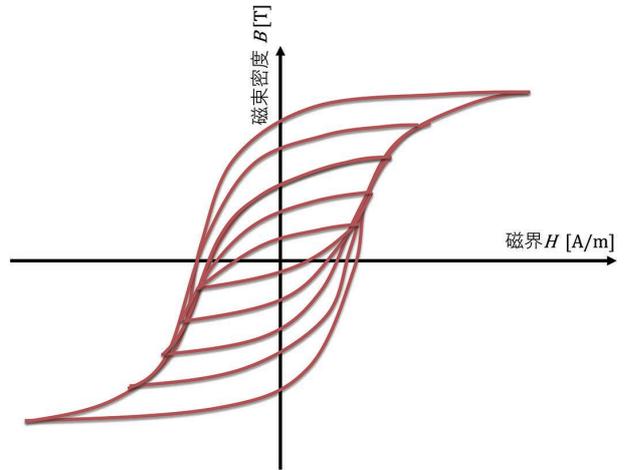


図 2 プレイモデルの例

しかし、実際にプレイモデルを活用する場合、以下のような難しさがあるため、容易に使う事はできない。

- ① 材料定数が入手困難であるため、実測等により定数を確定する必要がある。
- ② 周波数が高く飽和領域に近いヒステリシスループの測定は、特殊な装置や測定技術が要求される。
- ③ 磁気特性をループとして取り扱う関係上、重畳される交流の周波数が高くなるほど計算負荷が増大する。

この課題を解決するために、重畳される交流電流を振幅一定の正弦波に限定する方法が提案された³⁾⁴⁾。この方法は図 1 のマイナーループについて、静特性 B_0 に対して ΔB 、 ΔH が一意に決定され、その比である μ_{Δ} のみで特性を表現するものであり、特に式(2)で定義される μ_{Δ} を増分透磁率と呼ぶ。

$$\mu_{\Delta}(B) = \Delta B/\Delta H \quad (2)$$

ただし、 μ_{Δ} もプレイモデルと同様に一般に公開されていない材料特性に含まれないため自ら実測で取得する必要がある。ただし、特に飽和領域に近い磁束密度でかつ周波数が高い場合、プレイモデルのように高周波の大電流を駆動させる必要がなく、直流電流に小振幅の電流を重ねさせるだけなので、比較的測定を実施しやすい利点がある。

そこで本論文では、増分透磁率を精度よく容易に測定できる方法と、この測定法を利用して構築した直流重畳特性推定フローを示し、その方法による計算負荷が十分に軽く、かつ実測と推定値で実用的な一致が得られたので報告する。

2. シミュレーションの原理

2.1 マイナーループとは

図1に示した静磁場特性で示される一般的な磁性体のB-H特性は、通常の直流、交流のシミュレーションで材料定数として使用される。今回はパワーインダクタ等でのインダクタンスの変動原因を想定して、直流電流がバイアス電流として常時印加されており、さらにある高周波電流が重畳されている状態を考える。この時、磁性体内では直流電流が作る静磁界により磁性体の中で磁化が生じることで磁束が発生するといった変化が起きている(図1の点P)。さらにその周りに図1の曲線P→Q、Q→Pで示す、高周波電流が作る小さな磁界の振動が生じる。この振動は、静磁界のB-H曲線に沿うのではなく、それとは異なる傾きの微小ループを形成する。これをマイナーループと呼ぶ。このマイナーループの傾きである増分透磁率 μ_{Δ} が直流重畳状態のインダクタンス値に反映されるため、これを捉えてシミュレーションに取り込む仕組みを作る必要がある。

2.2 B-H 特性によるシミュレーションの誤差原因

図3は、直流電流に100 kHzの高周波電流を重畳させた状態でのインダクタンス特性について、静特性であるB-H曲線の微分透磁率を使ってシミュレーションした結果と実測とを比較したものであり、直流電流で約2Aの無視できない誤差が生じている。この原因は、マイナーループの傾きが重畳される電流の周波数や静磁場に影響を受けるため、B-H曲線の傾きとマイナーループの傾き μ_{Δ} との差が無視できなくなったためと考えられる。

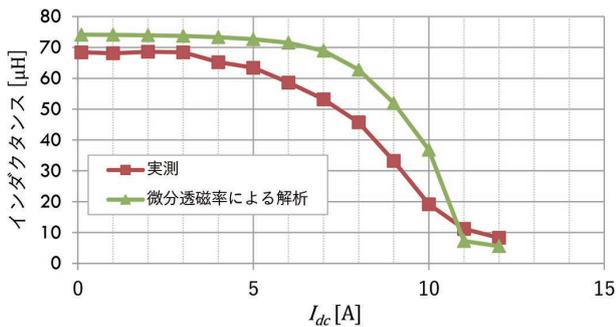


図3 微分透磁率を使った場合の実測との比較

これに対する対処方法は、シミュレーションにおいて材料特性(μ_{Δ})を反映させた磁束計算を行うことが重要であり、これにより精度の高い推定結果が得られ、材料のインダクタンスの変化を正確に定めることができるようになる。次節以降、 μ_{Δ} を重要な定数とみなし、実測による値の確定からシミュレーションへの取り込みまでの詳細手順を記述する。

2.3 CAE による推定手段

解析の流れは、以下のとおりである。

- ① B-H 特性を使った直流電流による静磁界分布の導出
- ② B- μ_{Δ} 特性を使った静磁界分布を増分透磁率分布へ変換
- ③ 増分透磁率分布により高周波電流による磁界のインダクタンスの導出

今回、磁場解析ツールとして、JSOL社のJMAG-Designerを使用した。このツールは、磁気特性として一定値の比透磁率 μ_r 、非線形B-H特性などの他に、磁束密度Bに対する比透磁率 μ_r の関係を定義する機能を持っている。比透磁率を増分透磁率 μ_{Δ} と定義し、B-H特性に併せてB- μ_{Δ} の材料データを使うことで一連の流れを使った推定を実現した。

2.4 実測による材料定数の特定

ここで、予測する上で鍵となる μ_{Δ} の特性を測定する手段を考える。

μ_{Δ} は一般的に式(3)で示すように、高周波電流の周波数 f 、高周波磁場の振幅 ΔB 、静磁場Bの関数であるが、重畳する高周波電流を周波数一定の正弦波とすることで、 $f, \Delta B$ を変数から除外した。これにより、限定した条件内ではあるが解析負荷が軽くかつ精度が担保できる方法を追求した。

$$\mu_{\Delta} = \mu_{\Delta}(f, \Delta B, B) \Rightarrow \mu_{\Delta}(B) \tag{3}$$

実測に関しては、 μ_{Δ} を測定するための専用の磁性部品を準備することで、自ら増分透磁率 μ_{Δ} を算出するための測定実施が容易になった。

3. 実測とシミュレーションを組み合わせた μ_{Δ} の算出方法

3.1 直流重畳解析の全体フロー

図4は、今回実施した平滑コイルなど一般的な磁気部品に対する、直流重畳特性解析の全体のフローを示している。この中で、「材料定数 B- μ_{Δ} の導出」が磁性材の材料定数を確定する流れを示す。

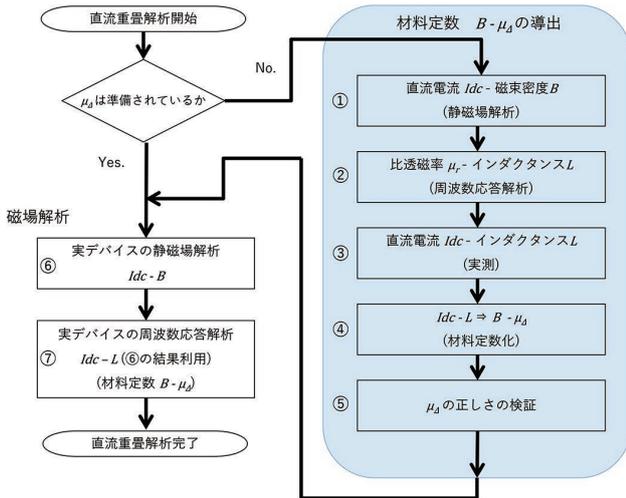


図4 直流重畳特性解析の全体フロー

図5は、材料定数 $B-\mu_{\Delta}$ の導出部分を関係図化したものである。次項より、各々の検討項目を図5に示した流れに沿って詳細に説明する。

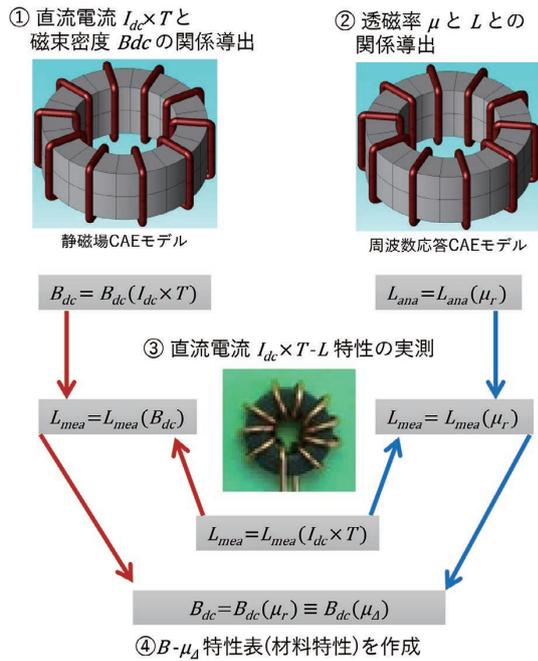


図5 $B-\mu_{\Delta}$ 特性導出の関係図

3.2 直流電流 I_{dc} と平均磁束密度 B の関係導出 (図5の①)

トロイダルコイルのコア内部の磁束は、磁気飽和領域まで考慮する必要がある場合も近似式で概算を求める事は可能である。それには、非線形磁気特性まで考慮するために $B-H$ 特性を非線形関数で近似する方法が用いられている⁵⁾。

今回は、断面の磁束密度の内外径間の不均一性やコアの磁気特性の飽和領域付近の特性に高い精度を求めるために、シミュレーションを活用した。

まず、飽和特性を確認するためにトロイダルコアに直流電流を流すモデルを考える。図5の①は、③で実測に使用するトロイダルコイルをモデル化したものである。これに材料の $B-H$ 磁気特性を適用して、静磁場解析でコイル電流 $I_{dc} \times T$ と平均磁束密度 B_{dc} の関係をシミュレーションで求める (図6)。ここで、 I_{dc} は直流電流、 T はコイルのターン数を示す。 B_{dc} はトロイダルコイルの断面の磁束密度を平均化した値である。ここで、まず静特性として磁気飽和特性が得られていることが確認できる。

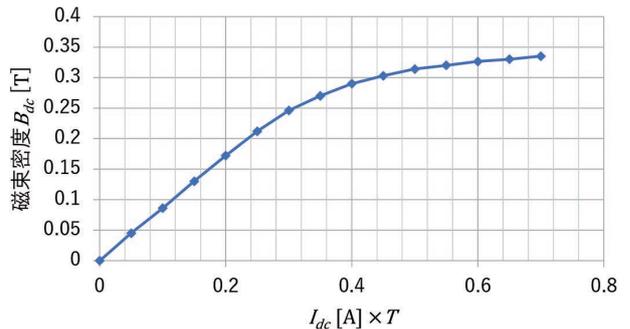


図6 コイル電流と平均磁束密度の関係

図7は図5の②に示すフローで、同じトロイダルコアのモデルを使い比透磁率 μ_r とインダクタンス L の関係を周波数応答解析で求めたグラフである。

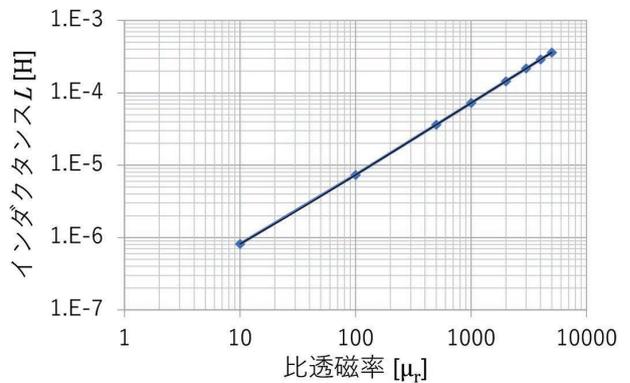


図7 比透磁率とインダクタンスの関係

3.3 トロイダルコイルによる $AT-L$ 特性の実測 (図5の③)

図8は、実際に使用した測定装置の外観を示す。LCRメータと直流源装置の組み合わせで構成されており、温度特性も含めた直流重畳特性を測定することが可能になっている。



恒温槽 直流重畳試験器 自動測定用PC

図8 直流重畳特性を測定する装置群

図9は、図8で示した装置を使用して図5-③で示すような実際のトロイダルコイルを使って直流電流 $I_{dc} \times T$ とインダクタンス L との関係を実測で求めたグラフである。直流電流に重畳させる高周波電流のスペックは、実際に評価したい磁気部品の高周波電流と同等に設定することで、 μ_{Δ} 特性が一致するように設定している。

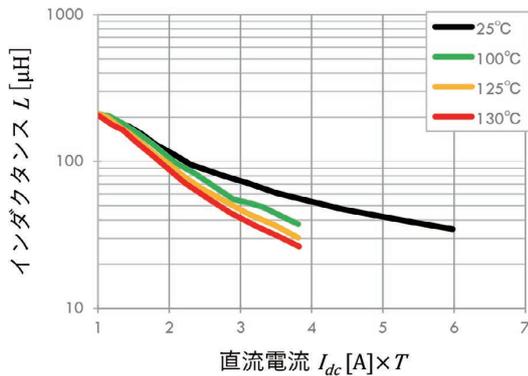


図9 コイル電流とインダクタンスの実測例

3.4 $B-\mu_{\Delta}$ 特性の材料定数化 (図5の④)

3.2項、3.3項より、シミュレーションから $B_{dc} = B_{dc}(I_{dc} \times T)$ 、 $L_{ana} = L_{ana}(\mu_r)$ 、実測から、 $L_{mea} = L_{mea}(I_{dc} \times T)$ と表せる各々の関係が求められた。ここで L_{ana} はシミュレーションから求めたインダクタンス値、 L_{mea} は実測から求めたインダクタンス値を示す。次に、 L_{mea} 、 $I_{dc} \times T$ をシミュレーションの結果得られた2つの関係式を使って B_{dc} と μ_r に変換すると、 $\mu_r = \mu_r(B_{dc})$ の関係が求められる (図10)。

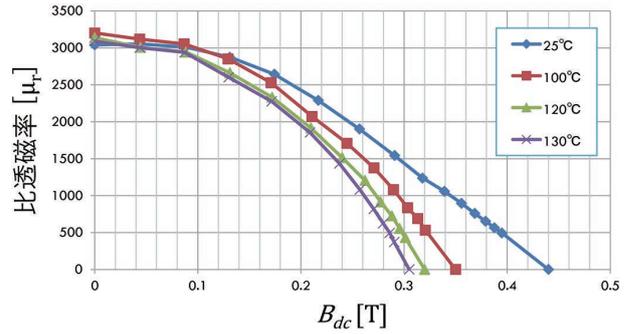


図10 $B_{dc}-\mu_r$ の関係 (増分透磁率 μ_{Δ})

この μ_r は、直流が作る磁束密度の影響で、重畳する交流電流が受ける比透磁率が低下することを表し、図1で示したマイナーループの傾きを表している。これら一連のプロセスにより、 μ_r を改めて μ_{Δ} (増分透磁率) と定義できるため、 $B_{dc}-\mu_{\Delta}$ の関係が得られたことになる。

3.5 再解析による μ_{Δ} の検証 (図4の⑤)

3.4項で求められた、 $B-\mu_{\Delta}$ の特性を検証するために、得られた $B-\mu_{\Delta}$ をモデルに適用し、 $I_{dc} \times T$ と L の関係をシミュレーションで再現できるかを検証した。

図11は、100°Cの条件に設定した実測値とシミュレーション値を比較したグラフである。誤差5%以内であり十分高い精度で再現できていることがわかる。これより、これまでの増分透磁率 μ_{Δ} の導出方法と、それを使ったシミュレーション方法が有効であることが確かめられた。

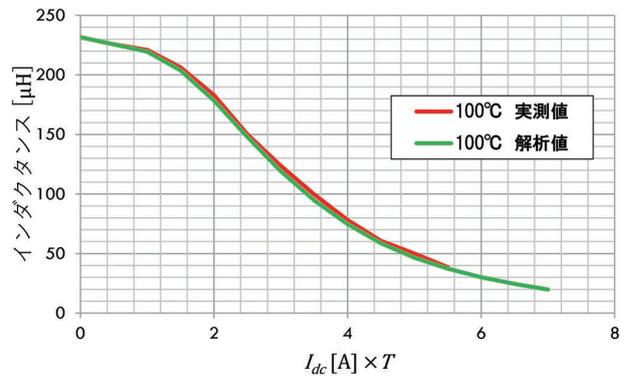


図11 トロイダルコイルによる直流重畳特性の再現性検証

4. 平滑コイルの直流重畳特性解析事例

4.1 平滑コイルのコア材による $B-\mu_{\Delta}$ 特性の導出

3章で述べたトロイダルコアによる実測とシミュレーション方法を使って、DCDCコンバータを構成する磁気部品である平滑コイルの直流重畳特性解析に適用した事例を述べる。図12は平滑コイルと同じコア材料を使ってトロイダルコアを製作し、その直流重畳特性の実測結果とシミュレーションを組み合わせて算出した $B-\mu_{\Delta}$ 特性である。

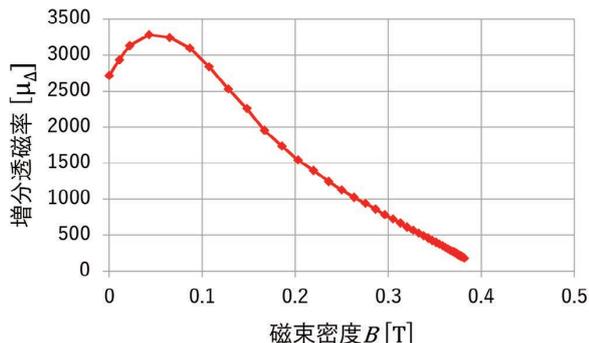


図 12 トロイダルコアにより確定した $B-\mu_{\Delta}$ 特性

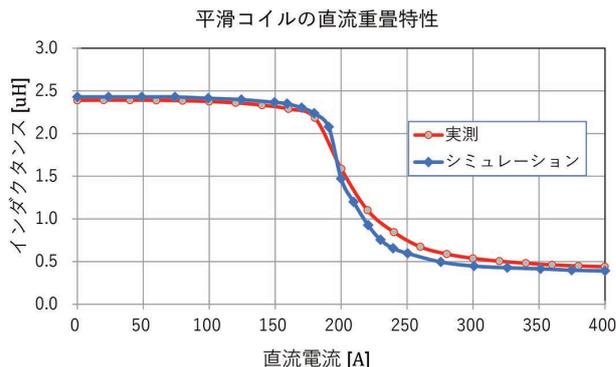
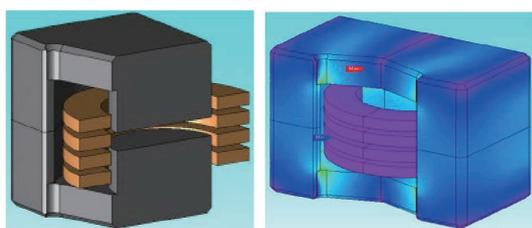


図 14 磁気デバイスの直流重畳特性 実測 -SIM 比較

4.2 平滑コイルの解析フロー

図 13 は平滑コイルの磁場解析モデルと、その周波数応答解析結果の磁束密度コンター図を示す。このモデルに対して、直流重畳解析を次の順に進めた。

- ① 平滑コイルのモデルに対して、コア材料にフェライトコアの $B-H$ 非線形静特性を適用して、直流電流による静磁場解析を行う。(図 4 の⑥)
- ② 同じモデルを利用して、①で得られた解析結果であるコア内の磁束密度分布データを新しいモデルの初期磁束分布に設定し、直流通電状態の磁束分布を作る。コアの磁気特性を項 4.1 で得られた $B-\mu_{\Delta}$ 特性に変更し、周波数応答解析を使って平滑コイル稼働時に重畳される高周波電流を流し、 $B-\mu_{\Delta}$ 特性から得られるインダクタンス L を求める。(図 4 の⑦)
- ③ ①の直流電流を 0~Max 電流までスイープさせた結果を準備して、②の解析をそれぞれ適用し、直流重畳特性を求める。



平滑コイル解析モデル 平滑コイル磁束密度コンター図

図 13 磁気デバイスの磁場解析モデルと磁束密度コンター図

4.3 平滑コイルの直流重畳解析結果と実測比較

図 14 に、直流重畳特性の実測とシミュレーション結果を示す。実測は図 8 で示した測定装置を使って平滑コイルの直流重畳特性を求めたものである。インダクタンスの変曲点としてインダクタンス $1.5 \mu\text{H}$ の点を確認すると、直流電流値 200 A に対して誤差 5% 以内で一致しており十分実用的であることがわかる。

5. むすび

大電流化、高周波化する磁気部品の直流重畳特性を容易に精度良く推定したいという要求に対して、1つの解決手段としてマイナーループの傾きを利用して材料定数化する手段が確立でき、それを利用して平滑コイルの特性を予測すると、計算負荷が軽かつ十分な精度で直流重畳特性が得られることが確認できた。

今回これを実現するために、一般に公開されていない増分透磁率を精度よく材料定数化するための測定方法、更に、それを使った2種類の解析の組み合わせることにより、直流重畳特性の推定手段を構築した。

今後この技術は、パワーエレクトロニクスを利用する電源設計などの商品に展開するとともに、直流重畳特性が重要な商品に対しては標準設計プロセスに組み込んでいくことを提案する。また、更なる大振幅、かつ高周波の重畳電流に対応するために、材料定数 $B_{dc}-\mu_{\Delta}$ を振幅や周波数などの多変数関数化する技術の構築を進める。

参考文献

- 1) Matsuo, T.; Shimasaki, M. An Identification Method of Play Model With Input-Dependent Shape Function. IEEE Trans Magn. 2005, Vol 41, No.10, p.3112-3114.
- 2) 樋口真伍, 高橋康人, 藤原耕二, 山田直人, 西田信博, 高井恭平. “磁気ヒステリシスを考慮したパワーコンディショナ用リアクトルの直流重畳特性解析”. 電気学会研究会資料. 2014.1.23, p.19-24.
- 3) 橋本和茂, 高橋康人, 藤原耕二, 他. リアクトル用磁性材料の磁気特性測定法に関する検討. 信学技報. 2012, Vol.111, No.400, p.91-96.
- 4) 上田幸平. “リアクトルの直流重畳特性の実測と解析の比較検討”. JMAG User Conference. 2011.
- 5) 電気学会マグネティックス委員会編. 改訂 磁気工学の基礎と応用. コロナ社, 2013, 272p.

執筆者紹介



福田 雅也 FUKUDA Masaya
インダストリアルオートメーション
ビジネスカンパニー
技術開発本部 第3技術部
専門：磁気 CAE



山田 隆志 YAMDA Takashi
日本電産モビリティ株式会社
パワーエレクトロニクス事業部
開発2部開発4課
専門：磁気 CAE

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。

閉空間における直流アーク遮断のための アーク長算出式の導出

川口 直樹, 箕輪 亮太, 大塚 航平

近年、環境問題への対策として利用が高まっている太陽光発電等に代表される再生可能エネルギーにおいてシステムの高効率化が推進されている。これらのシステムは直流高電圧システムで構成されており、安全遮断装置として組み込まれている直流リレーにおいても、さらなる高電圧対応が求められている。直流リレーにおいて高電圧領域の負荷を安全に遮断するためには接点开離時に発生するアーク放電現象を制御する技術が必要である。

本検討ではリレーのような閉空間においてアークが樹脂に当接された際のアーク長とアーク電圧との関係式構築を試みた。追加したパラメータは、アークを駆動させる磁束密度とアークを樹脂に当接させる際の壁までの距離である。今回導出した式を用いることで、負荷電圧800Vまでの閉空間におけるアーク遮断に必要なアーク長の算出でき、適切なアーク長での遮断性能設計を実現することが可能となった。

Derivation of Arc Length Calculation for DC High Voltage Arc Interruption in Closed Space

KAWAGUCHI Naoki, MINOWA Ryota and OTSUKA Kohei

In recent years, higher efficiency of systems has been promoted in renewable energy represented by photovoltaic power generation, which is increasingly used as a countermeasure against environmental problems. These systems consist of high voltage DC systems. The DC relays built into these systems for safety breakers must support higher voltages. In order to cut off a high-voltage arc with a DC relay, we need technology to control the arc generated when the arc is interruption.

In this study, we tried to construct a relational expression between the arc length and the arc voltage when the arc is in contact with the resin in a closed space such as a relay. The added parameters are the magnetic flux density that drives the arc and the distance that the arc abuts against the wall. By using the formula derived this time, it is possible to calculate the arc length required for arc interruption in a closed space with a load voltage of 800 V, and it is possible to realize interruption performance design with an appropriate arc length.

1. まえがき

地球温暖化などの環境問題に対する意識の高まりから、太陽光発電等を用いた再生可能エネルギーや電気自動車の市場が拡大している。それらに用いられるエネルギーマネージメント機器やバッテリー制御回路は直流高電圧システムとなっており、システム不具合発生時における緊急遮断用の安全装置として直流リレー（以下、リレーと呼ぶ）が使用されている。

リレーでは、接点开離時に接点間で形成された熔融金属のブリッジが気化することで接点間の絶縁破壊が起こり、

アーク放電（以下、アークと呼ぶ）が発生する。アークとは空気などの気体が数千度以上の高温となり、気体分子が電離及び解離することで気体の電気伝導率が増加し、気体中に電流が流れる現象である。このとき電流によるジュール発熱でアーク伝導経路の温度が維持されることによりアークが継続する。アークが継続するとアーク周辺の空気が高温状態となり筐体内部の焼損や接点の消耗が起こる¹⁾ため、アークは速やかに遮断する必要がある。

近年では、送電ロスを低減させる目的からシステムの高電圧化を行う傾向があり、従来にも増して安全かつ確実にアークを遮断できることが重要になっている。

一般的に直流負荷電圧で発生するアークを遮断するため

Contact : KAWAGUCHI Naoki naoki.kawaguchi@omron.com

には、アーク抵抗を大きくしアーク電圧を負荷電圧まで増加させる必要がある²⁾。アーク抵抗はアーク長と正の相関があり、アーク長が長くなるほどアーク抵抗は大きくなる。そのため高電圧になるほど長いアーク長を確保する必要があり遮断が難しくなる。

遮断に必要なアーク長と負荷電圧の関係については、実験的に求められた式(1)が広く知られている³⁾。

$$L = K(E - E_m - \frac{E}{I} I_m)^a I^b \quad (1)$$

L : アーク長 (mm) E : 負荷電圧 (V) I : 負荷電流 (A)

E_m : 最小アーク電圧 (V) I_m : 最小アーク電流 (A)

K : 1.5×10^{-3} a : $3/2$ b : $1/2$

式(1)に示したように負荷電圧・電流が大きくなると遮断に必要なアーク長は長くなる。また、式(1)の適用範囲は負荷電圧 110 V、負荷電流 50 A までであり、大気中のような解放された空間（以下、開空間と呼ぶ）において外部磁界を利用せずに接点間隔のみでアークを引き延ばした時に適用可能な関係式である。

先ほど述べたように近年ではシステムの高容量化に伴う高電圧化が進んでおり、リレーのように樹脂で閉ざされたような空間（以下、閉空間と呼ぶ）においてはリレーの制約上接点間隔を大きく確保できないため、外部磁界を利用して閉空間内でアークを駆動してアークを引き延ばすことで数百ボルトの負荷電圧を遮断する必要がある。これらを踏まえ高電圧領域のリレー設計におけるアーク長の算出には、式(1)が適用外となる以下条件に対応した関係式の構築が必要となる。

- ①高電圧領域（100V 以上）への拡張
- ②外部磁界印加の影響
- ③閉空間内でのアーク駆動の影響

そこで今回高電圧領域までを検討対象とし、かつ閉空間においてアークを外部磁界により駆動させることでアークを樹脂に当接させた時のアーク長とアーク電圧の関係式の導出に取り組んだ。

本稿では、その取り組みについて、以下の構成で述べる。

第 2 章では、アーク長とアーク電圧との関係を確認するための供試リレー及び実験方法について述べる。

第 3 章では、過渡現象中のアーク長とアーク電圧の関係について検討し、高電圧領域でのアーク長と負荷電圧・電流の関係式(1)と比較しながら検討する。その後、外部磁界による影響について考察し、最後に閉空間においてアークを樹脂に当接させた際のアーク遮断に必要なアーク長算出式の導出過程を述べる。

第 4 章では、本検討結果の振り返り成果と残課題及び今後の展望について述べる。

2. 供試リレー及び実験方法

負荷に応じたアーク長とアーク電圧との関係を得るために用いた供試リレーの概略図を図 1 に示す。

実験に用いたリレーは 2 つの可動接点と 2 つの固定接点で構成されたダブルブレイク接点構造で、その接点材料は銀 (Ag)、導電部材料は銅 (Cu) とし、接点の動作方向は図 1 に示した向きとした。図示しないが、外部磁界の影響を評価する際には永久磁石によってリレー全体に外部磁界を紙面垂直方向に加える。外部磁界が加えられた場合、遮断時に発生したアークは永久磁石により図の左右方向へ引き延ばされて筐体内側に接触する。筐体を構成する壁面のうちアークが接触する部分をアーク当接面と呼ぶ。また、アークが樹脂に当たることによるアーク長とアーク電圧の関係性への影響を確認するため、端子と壁との距離（以下、壁間距離と呼ぶ）を変更できる構造とした。

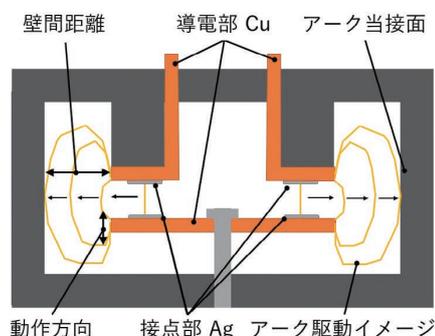


図 1 供試リレーの概略図

アーク長は高速度カメラを用いて撮影した負荷遮断時の実際のアーク画像から求めた。図 2 に負荷遮断時の高速度カメラ画像の例を示す。

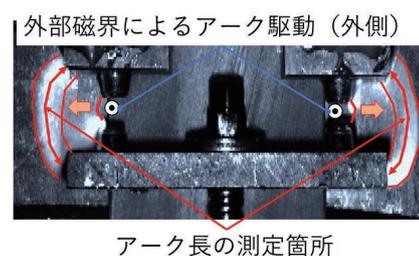


図 2 負荷遮断時の高速度カメラ画像

画像上のアーク発光部の中心の経路長をアーク長とした。また、同時に接点間電圧の経時変化を電圧波形として記録した。図 3 に負荷遮断時のアーク電圧経時変化例を示す。

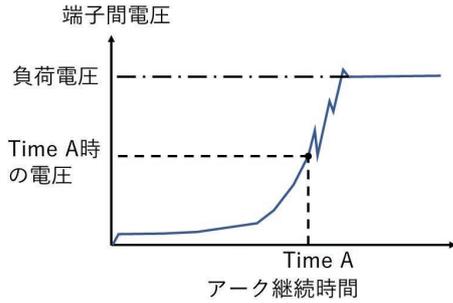


図3 負荷遮断時のアーク電圧経時変化例

画像を撮影した時点 (Time A) のアーク電圧は図3に示すようにアーク電圧波形より求めた。式(1)は負荷電圧・電流と負荷遮断時のアーク長との関係性を示しているが、本実験では負荷遮断の過渡現象中におけるアーク長とアーク電圧の関係を測定した。

本実験は図4に示した直流抵抗回路にて実施し、負荷電流は供試リレーに通電される電流を、アーク電圧は供試リレー端子間の電圧を測定した。

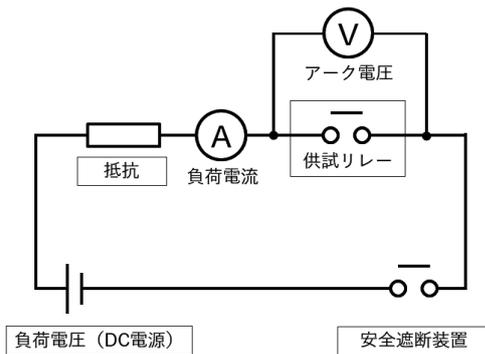


図4 直流抵抗回路

3. 実験結果

3.1 過渡現象中のアーク長とアーク電圧の関係

同一負荷電流においてアークに外部磁界を加えない状態で負荷電圧を変更した際の過渡現象中のアーク長とアーク電圧の関係を図5に示す。

負荷電圧は3条件とし、それぞれ同アーク電圧時におけるアーク長を測定した。実験結果から過渡現象中のアーク挙動は負荷電圧に寄らず一定であった。また、アーク電圧で求まるアーク長と負荷電圧で求まるアーク長がほぼ同じであることが確認された。従って負荷電圧の代わりに過渡現象中のアーク長とアーク電圧の関係を確認することで、負荷電流及びアーク長と負荷電圧に関する実験式を見出すことができる。次節以降では過渡現象中のアーク長とアーク電圧を測定することで高電圧領域への拡張性について確認し外部磁界印加の影響及び閉空間内でのアーク駆動の影響について対応した新たな関係式の構築を図る。

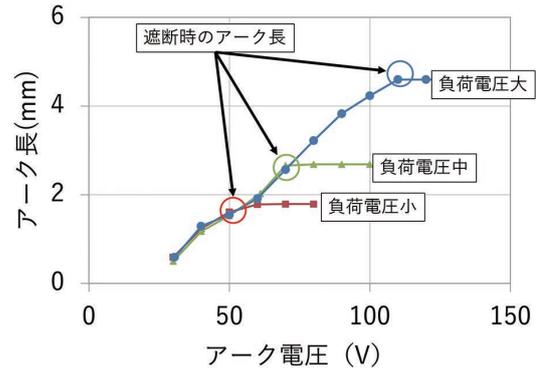


図5 過渡現象中のアーク長とアーク電圧の関係

3.2 高電圧領域拡張時のアーク長とアーク電圧の関係

高電圧化に伴う負荷電流とアーク長、アーク電圧との関係を検討する。実験は図1に示したリレーを用いて永久磁石による外部磁界を加えない条件で行い、負荷電流を大小の2水準で変えて100V超の電圧遮断時のアーク過渡現象を計測した。実験結果より得られたアーク長とアーク電圧との関係を図6に示す。図6中の点線は式(1)の計算値である。

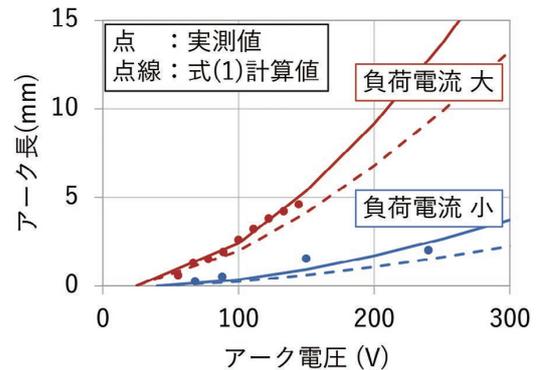


図6 100V超の電圧遮断におけるアーク長とアーク電圧との関係

図6よりアーク電圧が100Vを上回ると式(1)によるアーク長の算出結果と実測値の乖離することが確認され、式(1)は100Vを超える範囲では適用できないことが今回の実験からも示された。一方で、式(1)と同様に電流が大きくなると遮断に必要なアーク長が長くなることが確認された。今回の実測結果のアーク長とアーク電圧の関係は負荷電流が一定であれば式(2)で表すことができる。

$$L = \beta E_{arc}^{\alpha} \quad (2)$$

L : アーク長 (mm) E_{arc} : アーク電圧 (V) α, β : 係数

また、負荷電流を変化させた際の係数 α, β の関係を図7に示す。図7は実験時の負荷電流最小値を1、その時の各係数値を1として正規化したグラフとなる。図7に示した

ように係数 α は負荷電流の変化に寄らず一定、係数 β は負荷電流の増加と共に上昇していることから負荷電流の関数であると考えることができる。

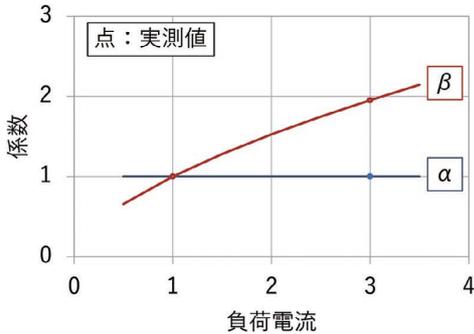


図7 負荷電流を変化させた際の係数 α 、 β の関係

ここで係数 β を式(1)と同様に式(3)に示す負荷電流の関数と定義した。

$$\beta = KI^b \quad (3)$$

式(2)に式(3)を代入することで負荷電流の変化を考慮した式(4)が導出される。

$$L = K E_{arc}^\alpha I^b \quad (4)$$

I : 負荷電流 (A) K, α, b : 係数

式(4)に示したように高電圧領域まで拡張した場合においても式(1)と同様の形で表すことができるが、係数値が異なっていることが確認された。次節以降は式(4)を基準とし、アークに外部磁界を作用させた際の影響及びアークを壁に当接させた際の各係数に与える影響を確認し定式化を行う。

3.3 外部磁界を加えた際のアーク長とアーク電圧の関係

負荷電圧・電流を一定とし、永久磁石を外部に配置した時に発生する磁界によりアークを引き延ばして遮断した際のアーク過渡現象を計測した。外部磁界を加えた際のアーク長とアーク電圧との関係を図8に示す。

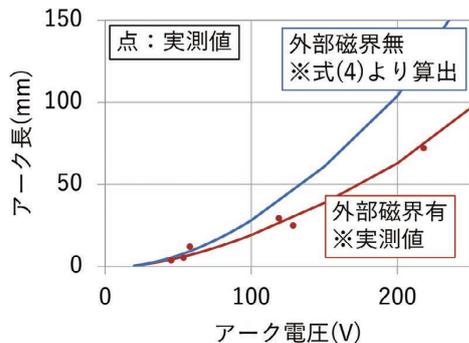


図8 外部磁界を加えた際のアーク長とアーク電圧との関係

外部磁界有は供試リレーでの実験結果、外部磁界無は式(4)の計算結果をプロットしている。なお、印加した外部磁界と負荷電流は一定とした。図8に示したように外部磁界を加えることで磁界を加えない条件よりも同アーク電圧時におけるアーク長が短くなることが確認された。

また、外部磁界を変化させた際の係数 K 、 α の傾向を図9に示す。図9は実験時の磁束密度最大値を1、外部磁界無時の各係数値を1として正規化したグラフとなる。

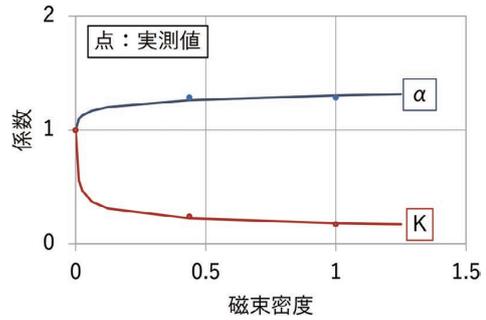


図9 外部磁界を変化させた際の係数 K 、 α の傾向

図9に示したように、磁束密度が大きくなると係数 K は減少、係数 α は増加することから、それぞれ式(5)、式(6)で表すことができる。

$$K = eB^f + K_0 \quad (5)$$

$$\alpha = gB^h + \alpha_0 \quad (6)$$

B : 磁束密度 (mT) e, f, g, h : 係数

K_0, α_0 : $B=0$ 時の初期値

式(5)及び式(6)を式(4)に代入すると式(7)となり、負荷電流の変化に加えて磁束密度の影響を考慮したアーク長とアーク電圧との関係式が導出される。

$$L = (eB^f + K_0) E_{arc}^{(gB^h + \alpha_0)} I^b \quad (7)$$

3.4 樹脂を利用した際のアーク長とアーク電圧の関係

負荷電圧・電流を一定とし、永久磁石を外部に配置することで発生する外部磁界によりアークを引き延ばし壁に当接させた際の遮断時のアーク長とアーク電圧との関係を検討する。実験は壁間距離を3条件で変化させた時のアーク過渡現象を計測した。アークを壁に当接させた際のアーク長とアーク電圧の関係を図10に示す。壁なしの測定結果は各壁間距離の設定においてアークが壁に当接されるまでのアーク長とアーク電圧を測定した際の実験結果となる。図10に示したようにアークを壁に当接させることで、壁なし時に比べて短いアーク長でアーク電圧を確保できることが確認された。また、壁間距離を小さくしていくことで、より短いアーク長でアーク電圧を確保できることが確認された。

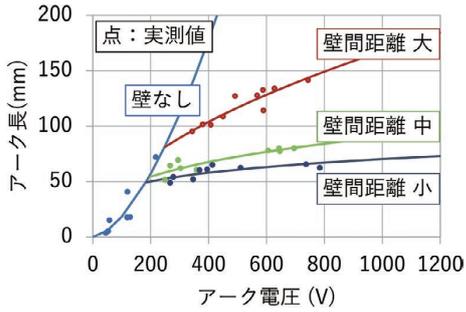


図10 アークを壁に当接させた際のアーク長とアーク電圧の関係

図11に壁間距離を変化させた際の係数 g 、 e の傾向を示す。図11は実験時の壁間距離最小値を1、その時の各係数値を1として正規化したグラフとなる。

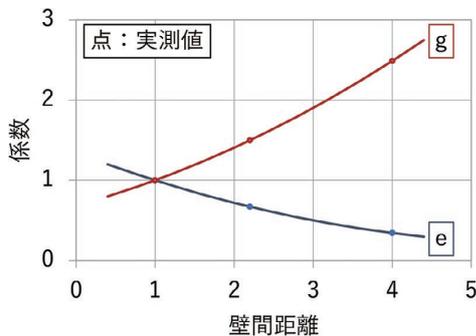


図11 壁間距離を変化させた際の係数 g 、 e の傾向

図11に示したように、壁間距離が大きくなるにつれて係数 e は減少、係数 g は増大していくことから、係数 e 、 g はそれぞれ式(8)、式(9)で表すことができる。

$$e = jd^2 + md + n \quad ※ d > 0 \quad (8)$$

$$g = od^2 + pd + q \quad ※ d > 0 \quad (9)$$

d : 壁間距離 (mm) j, k, m, n, o, p : 係数

式(8)及び式(9)を式(5)、式(6)に代入するとそれぞれ式(10)、式(11)で表される。外部磁界を加えアークを壁に当接させた際のアーク長とアーク電圧との関係は式(4)、式(10)及び式(11)により算出される。

$$K = (jd^2 + md + n)B^f + K_0 \quad (10)$$

$$\alpha = (od^2 + pd + q)B^h + \alpha_0 \quad (11)$$

また、表1に各係数の意味合いを示す。

表1 各係数の意味合い

係数	意味
K	負荷電流がアーク長に与える感度を示す係数
j	係数 K を構成する係数 壁間距離 (d) 及び磁束密度 (B) の感度を表す
m	
n	
f	
α	負荷電圧がアーク長に与える影響を示す係数
o	係数 α を構成する係数 壁間距離 (d) 及び磁束密度 (B) の感度を表す
p	
q	
h	
b	負荷電流がアーク長に与える影響を示す係数

同一負荷時において、式(4)、式(10)及び式(11)の磁束密度を一定とし、壁間距離を変更した際の係数 K 、 α の例を表2に示す。

表2 壁間距離を変更させた際の係数 K 、 α の例

磁束密度	一定値			
壁間距離 ※1	①	②	③	壁なし
K	0.9	0.6	0.3	1.4×10^{-3}
α	0.2	0.3	0.5	1.6

※1 壁間距離の大きさは、①<②<③である。

表2に示したように壁を使用することで、係数 K は壁なし時の値より大きくなり、係数 α は小さくなっている。

これは、閉空間においてアークが壁に当接される際の遮断に必要なアーク長は、アーク電圧の影響が小さくなり負荷電流の影響度が大きくなることを示している。

図10にも示したように、壁間距離を近づけると同アーク長に対するアーク電圧が上昇していることから、閉空間においてアークを樹脂壁に当接させる状態においては、壁間距離の設計が重要であることが確認された。

4. むすび

近年システム高電圧化に伴い負荷電圧 110 V までの実験結果より算出された実験式(1)を用いて遮断に必要なアーク長を算出することが難しくなっていた。そこで本検討では直流電圧を対象に実験式(1)を①高電圧領域まで拡張し、②外部磁界を作用させた際の影響を考慮し③閉空間においてアークを壁に当接させた際のアーク長とアーク電圧との関係式構築を試みた。追加したパラメータは、アークを駆動させる磁束密度とアークを樹脂に当接させる際の壁

間距離となる。負荷電圧の適用範囲はアークを壁に当接させない際は 200 V、壁に当接させる際は 800 V までとなる。今回導出した式を用いることで、閉空間におけるアーク遮断に必要なアーク長の算出ができ、適切なアーク長での遮断性能設計を実現することが可能となった。

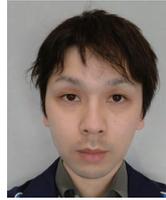
本稿では、アークが当接される壁材料を 1 種類に限定して検討を行ったが、アークが当接させる壁材料により消弧性能が変わることは参考文献でも示されている⁴⁾⁵⁾ ことから、今後は壁材料を変更した際のアーク長とアーク電圧との関係性についても定式化を進め、リレーサイズの最適化まで含めた設計を行えるように取り組んでいく。

これらの取り組みを進めていき、高電圧領域におけるアークを安全かつ安定して遮断するために最適化されたリレー商品開発を行えるようすることで、再生可能エネルギー社会の実現に向けて貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 森地高大, 濱開, 井戸田修一, 田代真一, 田中学, Anthony Bruce MURPHY. アーク遮断現象を定量化するシミュレーション技術. OMRON TECHNICS. 2019, Vol. 52, p.99-104.
- 2) 森口裕亮, 榎本英樹, 山本律, 福田純久, 尾崎良介, 池田陽司. EV・HEV 用大電流メインリレーの小型化技. Panasonic Technical Journal. May 2015, Vol.61, No.1, p.72-76.
- 3) 佐藤充典, 土方政行, 森本一郎. 電気接点の大気中における開離アークについて. 日本金属学会誌. 1972, Vol.36, p.238-247.
- 4) 恩地俊行, 田中康規, 上杉喜彦. 高分子材料から発生するアプレーションガスが電流減衰過程のアーク特性に与える影響. 電気学会論文誌 B. Vol.131, No.7, p.609-620.
- 5) 岡崎大甫, 野田将之. アーク磁気吹き消し機構における消弧性樹脂材料の性能評価. 信学技報. 2017, Vol.116, p.59-63.

執筆者紹介



川口 直樹 KAWAGUCHI Naoki
 エレクトロニック & メカニカルコンポーネンツ
 ビジネス カンパニー
 事業統括本部 商品開発統括部 HT-PJ
 専門: 制御工学
 所属学会: 電気学会



箕輪 亮太 MINOWA Ryota
 エレクトロニック & メカニカルコンポーネンツ
 ビジネス カンパニー
 事業統括本部 商品開発統括部 HT-PJ
 専門: 機械工学



大塚 航平 OTSUKA Kohei
 エレクトロニック & メカニカルコンポーネンツ
 ビジネス カンパニー
 事業統括本部 商品開発統括部 HT-PJ
 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。

最近発表した主な論文

※所属は発表時の情報です。

論文名・執筆者(所属)・掲載誌	抄 録
<p>自己学習による卓球ロボットの返球精度向上 Improvement of ball-return accuracy of ping-pong robot by self-learning 劉曉俊(技術・知財本部 研究開発センタ)、中山雅宗(技術・知財本部 研究開発センタ) 第38回日本ロボット学会学術公聴会予稿集、2020年、日本ロボット学会、No.2H3-03、日本語</p>	<p>ロボットが卓球というタスクを行うには、ボールを計測する技術、ボールの軌跡を予測する技術、ボールを打ち返す動作計画技術、及び計画通りにロボットを動作させる制御技術が要求され、幅広い分野で昔から研究されている。従来の卓球ロボットは、ボールの計測で生じるノイズや軌跡予測で生じるモデル誤差が原因で、ロボットの返球精度が悪化することがあった。また、ボールとラケットの衝突現象は、ラケットのラバー表面の状態に大きく影響を受ける。そのためラバーの劣化や補修などによるラバー表面状態の変化がロボットの返球精度に及ぼす影響も大きい。</p> <p>そこで我々は、ロボットの返球精度を向上させることを目的とし、自立的な学習機能を開発した。ロボットの返球目標位置と実際の返球位置の差に基づき、ロボットの動作計画に補正を加えることで、返球精度の向上を試みた。</p>
<p>二段階ターンオフスイッチングを用いた GaN GIT デバイス駆動技術 Novel GaN GIT Gate Driving Technique Using Two-Step Turn-Off Fashion 野坂紀元(技術・知財本部 研究開発センタ)、岡田 亘(技術・知財本部 研究開発センタ)、上松武(技術・知財本部 研究開発センタ) IEEE Conference Proceedings、2020年、IEEE、No.2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)、p.3131-3138、英語</p>	<p>Recently, high-speed switching circuits using GaN devices have attracted attention for higher power density. Especially, GaN GIT devices have an ultra-fast speed capability but tend to cause false turn-on due to a lower threshold voltage. A simple negative gate bias method is usually used to prevent the false turn-on phenomenon. However, during the turn-off period, the spike gate voltage will exceed the rated voltage, which leads to fatal damage to GaN GIT devices. To solve this problem, we propose that the novel GaN GIT gate driving technique using a two-step turn-off fashion. It is possible to simultaneously satisfy the conflicting performance of low spike voltage and high-speed turn-off switching. This circuit was implemented on the board using the GaN GIT device and applied to a synchronous rectification type boost converter. It is confirmed experimentally that this driving technique is verified to be effective and useful.</p> <p>Copyright 2020 The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved.</p>
<p>電子回路を樹脂成形品に埋設する技術 The Technology for Embed an Electronic Components into the Plastic Molded Product 川井若浩(イノベーション推進本部 CTO室) エレクトロニクス実装学会誌、2020年、一般社団法人 エレクトロニクス実装学会、Vol.23、No.6、p.465-470、日本語</p>	<p>電子機器における薄型、小型、軽量化要求への対応、および需要に合わせたオンデマンド生産、あるいは趣味、趣向の変化に合わせた生産を可能にするマスカスタマイゼーションの実現を意図して、電子回路を樹脂成形品内に埋設することで、従来の電子機器で必須部品になっているプリント回路板を無くす技術の開発を行った。</p> <p>本技術によって、従来にない小型、軽量の電子機器や、立体回路、柔軟な電子回路を応用した新しいコンセプト、デザインの商品が創出され则认为している。さらに、化学薬品の使用や廃液の排出、あるいは、はんだ付け等の高温の熱処理によるエネルギー消費がなく、環境にやさしい製造工程の実現にも寄与できる。</p> <p>Copyright (c) 2020 一般社団法人エレクトロニクス実装学会</p>

論文名・執筆者(所属)・掲載誌	抄 録
<p>ウェアラブルデバイスによる深部体温計測技術 Core Temperature Measurement by Wearable Device 中川慎也(事業開発本部 MEMS 開発生産センタ技術開発部) エレクトロニクス実装学会誌、2020年、一般社団法人エレクトロニクス実装学会、Vol.23、No.5、p.342-346、日本語</p>	<p>健康管理の重要な指標の一つに深部体温がある。深部体温を頻繁に測定できれば、熱中症や乳幼児の突然死などに繋がる体温の異変を早期に発見し死亡・重篤化のリスクを減らせると言える。しかし、深部体温測定は温度計を体内に挿入したり、腋に保持する手法が一般的であり被測定者の負担が大きく、この手法での測定は頻繁には行えない。負担の少ない方法としては皮膚表面に体温計を装着して測定する方式、すなわちウェアラブル体温計が好適である。本稿では、小型化に有利なMEMS熱流束センサを使ったウェアラブル深部体温計の開発について紹介し、人体計測での課題、ウェアラブル深部体温計測技術の展望について解説する。 Copyright (c) 2020 一般社団法人エレクトロニクス実装学会</p>
<p>物理的柔らかさと環境制約を活用した低次元システムにおけるロボット組立作業の学習 Learning Robotic Assembly Tasks with Lower Dimensional Systems by Leveraging Physical Softness and Environmental Constraints 濱屋政志(オムロン サイニックエックス株式会社)、Robert Lee(Queensland University of Technology)、田中一敏(オムロン サイニックエックス株式会社)、Felix von Drigalski(オムロン サイニックエックス株式会社)、中島千智(技術・知財本部 研究開発センタ)、柴田義也(技術・知財本部 研究開発センタ)、井尻善久(オムロン サイニックエックス株式会社、技術・知財本部 研究開発センタ) IEEE Conference Proceedings、2020年、IEEE、Vol.2020、No.ICRA、p.7747-7753、英語</p>	<p>In this study, we present a novel control framework for assembly tasks with a soft robot. Typically, existing hard robots require high frequency controllers and precise force/torque sensors for assembly tasks. The resulting robot system is complex, entailing large amounts of engineering and maintenance. Physical softness allows the robot to interact with the environment easily. We expect soft robots to perform assembly tasks without the need for high frequency force/torque controllers and sensors. However, specific data-driven approaches are needed to deal with complex models involving nonlinearity and hysteresis. If we were to apply these approaches directly, we would be required to collect very large amounts of training data. To solve this problem, we argue that by leveraging softness and environmental constraints, a robot can complete tasks in lower dimensional state and action spaces, which could greatly facilitate the exploration of appropriate assembly skills. Then, we apply a highly efficient model-based reinforcement learning method to lower dimensional systems. To verify our method, we perform a simulation for peg-in-hole tasks. The results show that our method learns the appropriate skills faster than an approach that does not consider lower dimensional systems. Moreover, we demonstrate that our method works on a real robot equipped with a compliant module on the wrist. Copyright 2020 The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved.</p>
<p>Bayes状態推定と粒子フィルタを用いた接触状態に基づくインハンド姿勢推定 Contact-based in-hand pose estimation using Bayesian state estimation and particle filtering Felix von Drigalski(オムロン サイニックエックス株式会社)、谷口尚平(東京大学)、Robert Lee(Queensland University of Technology)、松原崇充(奈良先端科学技術大学院大学)、濱屋政志(オムロン サイニックエックス株式会社)、田中一敏(オムロン サイニックエックス株式会社)、井尻善久(オムロン サイニックエックス株式会社、技術・知財本部 研究開発センタ) IEEE Conference Proceedings、2020年、IEEE、Vol.2020、No.ICRA、p.7747-7753、英語</p>	<p>In industrial assembly tasks, the position of an object grasped by the robot has to be known with high precision in order to insert or place it. In real applications, this problem is commonly solved by jigs that are specially produced for each part. However, they significantly limit flexibility and are prohibitive when the target parts change often, so a flexible method to localize parts with high accuracy after grasping is desired. To solve this problem, we propose a method that can estimate the position of an object in the robot's hand to sub-millimeter precision, and can improve its estimate incrementally, using only minimal calibration and a force sensor. Our method is applicable to any robotic gripper and any rigid object that the gripper can hold, and requires only a force sensor. We demonstrate that the method can determine the position of an object to a precision of under 1 mm without using any part-specific jigs or equipment. Copyright 2020 The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved.</p>

論文名・執筆者(所属)・掲載誌	抄 録
<p>吸着パッドにおける触覚を実現する新しい近接センサ</p> <p>Novel Proximity Sensor for Realizing Tactile Sense in Suction Cups</p> <p>土肥小也香(技術・知財本部 研究開発センタ)、古賀寛規(技術・知財本部 研究開発センタ)、奥野雄太郎(技術・知財本部 研究開発センタ)</p> <p>IEEE Conference Proceedings、2020年、IEEE、Vol.2020、No.ICRA、p.638-643、英語</p>	<p>We propose a new capacitive proximity sensor that detects deformations of a suction cup as a tactile sense. We confirmed that one sensor module provides three applications for reliable picking and a simplified setup. The first application is the picking height decision. The second one is the placing height decision for detecting whether the grasped object is placed on the placement surface. These two applications are achieved by detecting the push-in stroke of the suction cup. The final application is detection of whether the suction cup is in partial contact or full contact with the object. This function can correct the picking posture as well as detect whether picking is possible before the pull-up motion. We also demonstrate that the partial contact position can be estimated in real time.</p> <p>Copyright 2020 The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved.</p>
<p>WPT用共振DABコンバータの強制発振回路を用いた2次側制御方式の検討</p> <p>Study on Secondary-side-only control using Forced-oscillation circuit of resonant DAB converter for wireless Power Transfer</p> <p>上松武(技術・知財本部 研究開発センタ)、三島大地(技術・知財本部 研究開発センタ)、伊藤勇輝(技術・知財本部 研究開発センタ)</p> <p>電子情報通信学会 技術研究報告、2020年、一般社団法人 電子情報通信学会、Vol.120、No.92 (EE2020-8)、p.19-24、日本語</p>	<p>本稿では、無線電力給電回路の出力制御において、強制発振回路を用いることにより、2次側のみの情報で実現する方式を提案する。本方式の特徴は、2次側に接続した強制発振回路により、1次側の動作周波数を電流から信号抽出し、それを基準信号に2次側ブリッジの駆動信号の位相を調整し、1次側との位相差により出力を制御することである。有効性の検証は、1次と2次側が直列共振の複合共振DABコンバータを用いてシミュレーションで行った。その結果、トランスの結合係数が変化しても、制御可能であることを確認した。</p> <p>Copyright (c) 2020 IEICE</p>
<p>工場内マイクロ波無線給電における人体上の電力密度推定</p> <p>Estimation Surface Power Density on Human Body for Microwave Wireless Power Transmission in Factory Environment</p> <p>グエン マインタイ(技術・知財本部 研究開発センタ)、村井彬人(技術・知財本部 研究開発センタ)、山田寛喜(新潟大学大学院 自然科学研究科)</p> <p>電子情報通信学会総合大会講演論文集、2020年、電子情報通信学会、p.B-1-16、日本語</p>	<p>マイクロ波無線給電は長距離給電が可能であり様々な分野への適用を目指して研究が行われている。その中で、工場で使用されるセンサへの応用がセンサの断線防止、省配線の観点で期待される。一方、人体に影響を及ぼさないように電波防護指針を満たす必要があり、実用化に向けての課題の一つである。給電時に人体が存在する空間上の電力密度(以下、人体上の電力密度)が防護基準値を超えないように給電側で人体上の電力密度を把握し、その値に応じて送信電力を制御する必要がある。本稿ではマルチパスが多い工場内でも実装が容易で比較的精度が高い人体上の電力密度推定方法を提案し、シミュレーションにてその効果を確認した。</p> <p>Copyright (c) 2020 IEICE</p>

論文名・執筆者(所属)・掲載誌	抄 録
<p>サーボドライブ DC 給電システムのインピーダンス法による安定性解析</p> <p>Impedance-based Stability Analysis of Servo Drive DC Bus Systems</p> <p>桐淵岳 (インダストリアルオートメーションビジネスカンパニー 商品事業本部 ドライブ事業部 開発部)、財津俊行 (技術・知財本部 研究開発センタ)、土井昌志 (技術・知財本部 研究開発センタ)、日下佳祐 (長岡技術科学大学)、伊東淳一 (長岡技術科学大学)</p> <p>電気学会論文誌D (産業応用部門誌)、2020年、一般社団法人 電気学会、Vol.140、No.3、p.184-193、日本語</p>	<p>近年、サーボドライブシステムは、トルク、速度、および位置制御の高性能化により、産業市場で多数採用されている。サーボドライブのスイッチングにより発生するノイズや、動力線の配線作業増加が工場での問題となっている。また、モータの回生エネルギー利用も要求されている。サーボドライブDCバスシステムの提案は、これらの問題や要求の解決方法となる。しかし、サーボドライブDCバスシステムは、DCバスとサーボドライブ間の干渉により、システムが不安定となるリスクがある。本論文では、入力と出力のインピーダンス特性を使用し、安定度の判別が可能なインピーダンススペースの安定性解析方法を提案する。</p>
<p>セル生産ラインにおける作業員の標準外動作検知システムの開発</p> <p>Development of Worker's Nonstandard Motion Detection System in Cell Production Line</p> <p>西田一貴 (技術・知財本部 研究開発センタ)、音田浩臣 (技術・知財本部 研究開発センタ)</p> <p>システム制御情報学会論文誌、2020年、Vol.33、No.5、p.149-155、日本語</p>	<p>少子高齢化の影響で労働力不足が懸念されているモノづくり現場では、生産性向上のための現場改善活動が盛んに行われている。この改善活動では、まず初めに作業員の作業内容を観察し、標準外動作を発見する必要があるが、これには膨大な時間と手間がかかることが問題であった。そこで本論文では、セル生産ラインにおける作業員の標準外動作を自動で検知する手法を提案する。我々の提案手法では、作業員の動作を時系列データとしてセンシングし、このデータにDTWを用いたアルゴリズムを適用し、各動作の所要時間を計測する。このようにして得られた所要時間を分析し、標準以上に時間がかかっている動作シーンを検出する。本手法を草津工場のセル生産ラインに適用したところ、従来では10時間かかった標準外動作の検知作業が、2.5時間に短縮できることが確認できた。</p>
<p>補助共振を用いた非接触給電回路のスイッチング損失低減検討</p> <p>Switching loss reduction with Auxiliary Resonance Circuit for Wireless Power Transfer</p> <p>中尾悟朗 (エレクトロニクス&メカニカルコンポーネンツビジネスカンパニー 事業統括本部 センシング&モジュールアプリ事業部 商品開発部)、上松武 (技術・知財本部 研究開発センタ)、財津俊行 (技術・知財本部 研究開発センタ)</p> <p>電子情報通信学会 技術研究報告、2020年、一般社団法人 電子情報通信学会、Vol.119、No.364 (EE2019 49-74)、p.49-53、日本語</p>	<p>本論文では、非接触給電回路 (N-S) においてスイッチング損失を低減する手法を提案する。本手法の特徴は、給電回路とは異なる共振周波数を有する補助共振回路を送電コイルに並列接続し、その回路電流をスイッチ素子に注入することである。また、ZCS を実現するための設計条件を求め、シミュレーションと実験により検証し、有効性を示す。</p> <p>Copyright (c) 2020 IEICE</p>

論文名・執筆者(所属)・掲載誌	抄 録
<p>負荷非依存性を用いた非接触給電回路の設計法検討</p> <p>Study on Design Method of Wireless Power Transfer Circuit using Load Independence</p> <p>上松武(技術・知財本部 研究開発センタ)、伊藤勇輝(技術・知財本部 研究開発センタ)、三島大地(技術・知財本部 研究開発センタ)</p> <p>電子情報通信学会 技術研究報告、2019年、一般社団法人 電子情報通信学会、Vol.119、No.364 (EE2019-49)、p.1-6、日本語</p>	<p>本稿では、非接触給電回路が有する負荷非依存性に着目し、CV/CC充電動作が容易に行える回路設計を検討した。検討した回路は1次側と2次側がともに直列共振である複合共振回路である。CV/CC充電の動作周波数範囲を79-90kHzとする設計方法を検討し、結合係数が0.298以下でないと実現できないことを明らかにした。また、負荷非依存のメカニズムを検討し、入力有効電力の変化が寄与していること、CC充電では入力力率は常に1となることが分かった。</p> <p>Copyright (c) 2019 IEICE</p>
<p>世界ロボットサミット2018におけるチームO2AS:汎用グリッパとツールを用いたロボットのキッティング・組立作業へのアプローチ</p> <p>Team O2AS at the world robot summit 2018: an approach to robotic kitting and assembly tasks using general purpose grippers and tools</p> <p>Felix von Drigalski(オムロン サイニックエックス株式会社)、中島千智(技術・知財本部 研究開発センタ)、柴田義也(技術・知財本部 研究開発センタ)、小西嘉典(技術・知財本部 研究開発センタ)、Joshua Christanto Triyonoputro(大阪大学)、Nie Kaidi(大阪大学)、Petit Damien(大阪大学)、植芝俊夫(国立研究開発法人産業技術総合研究所)、高瀬竜一(国立研究開発法人産業技術総合研究所)、堂前幸康(国立研究開発法人産業技術総合研究所)、吉岡琢(株式会社センスタイムジャパン、株式会社 Laboro.AI)、井尻善久(オムロン サイニックエックス株式会社)、Ramirez-Alpizar Ixchel Georgina(国立研究開発法人産業技術総合研究所、大阪大学)、万偉偉(大阪大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所)、原田研介(大阪大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所)</p> <p>Advanced Robotics、2020年、日本ロボット学会、Vol.34、No.NOS.7-8、p.514-530、英語</p>	<p>In this article, we propose a versatile robotic system for kitting and assembly tasks which uses no jigs or commercial tool changers. Instead of specialized end effectors, it uses its two-finger grippers to grasp and hold tools to perform subtasks such as screwing and suctioning. A third gripper is used as a precision picking and centering tool, and uses in-built passive compliance to compensate for small position errors and uncertainty. A novel grasp point detection for bin picking is described for the kitting task, using a single depth map. Using the proposed system we competed in the Assembly Challenge of the Industrial Robotics Category of the World Robot Challenge at the World Robot Summit 2018, obtaining 4th place and the SICE award for lean design and versatile tool use. We show the effectiveness of our approach through experiments performed during the competition.</p>

本誌掲載の論文及びバックナンバーの論文は
OMRON TECHNICS web サイトよりご覧いただけます



<https://www.omron.com/jp/ja/technology/omrontechnics/>

The English version of the papers and back
issues in this journal are available on the
OMRON TECHNICS Global Website.



<https://www.omron.com/global/en/technology/omrontechnics/>

オムロンの最新技術は Twitter でも発信しています
 @Tech_OMRON



OMRON TECHNICS
推進委員会

推進委員長	大平 真琴			
推進委員	赤木 哲也	井上 匡志	岡部 浩史	坂瀬 忠之
	澤野井 幸哉	篠原 正幸	高木 徳生	浪江 正樹
	西尾 英俊	馬淵 雅夫	山崎 琢也	(50音順)
事務局	荻野 裕貴	行衛 満智子		
編集協力	オムロン エキスパートリンク株式会社 三宅 慶幸			

OMRON TECHNICS 非売品

第53巻 第1号
通巻164号(年1回発行)
(禁無断転載)
ISSN 0474-1315

編集兼発行人 宮田 喜一郎
発行 オムロン株式会社 技術・知財本部
〒619-0283 京都府木津川市木津川台9-1
電話 0774-74-2000 (代)

2021年5月10日 発行

Published by OMRON Corporation
9-1, Kizugawadai, Kizugawa-city,
Kyoto, 619-0283 Japan
TEL 0774-74-2000

OMRON

