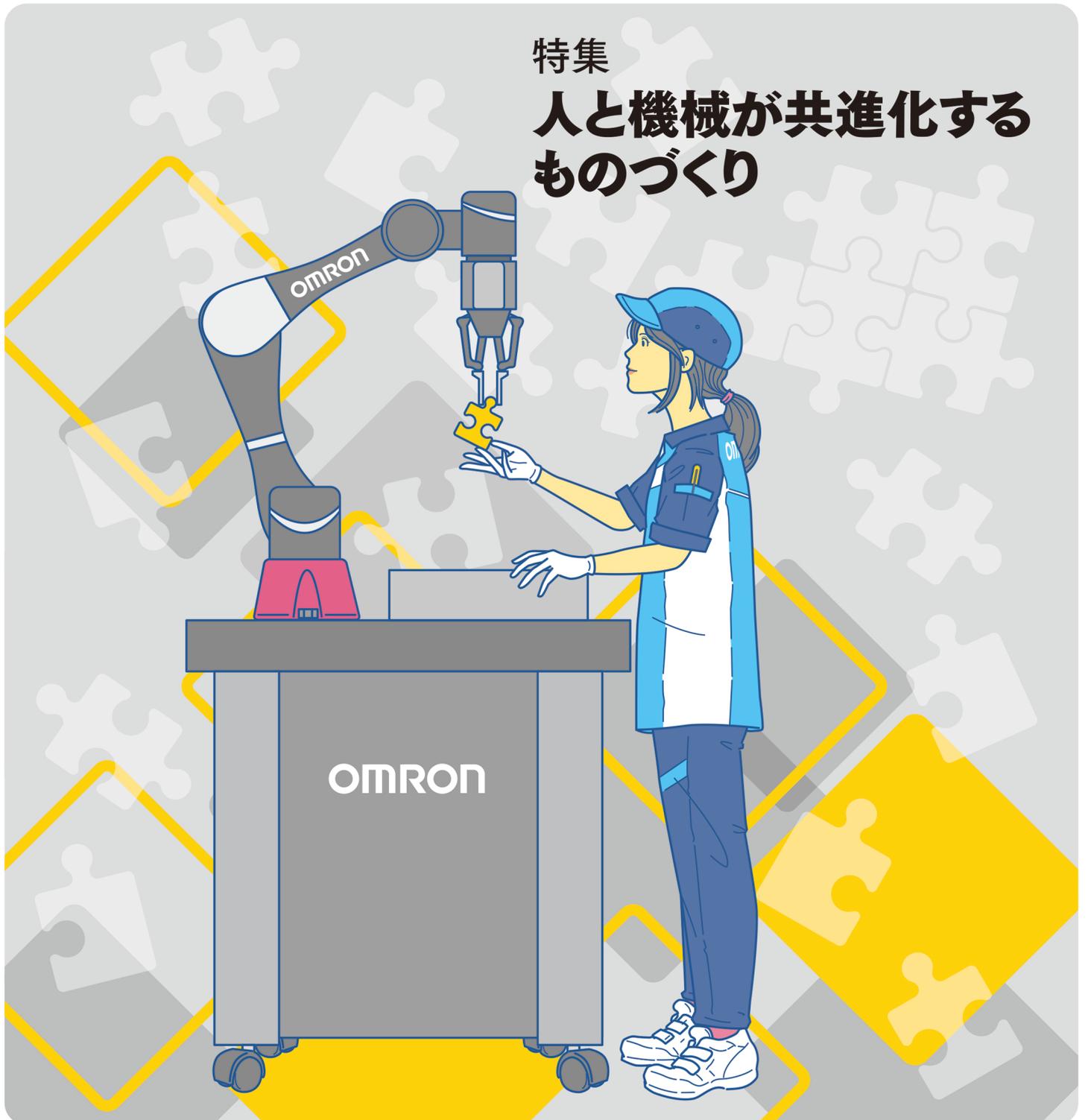


OMRON 166 Vol.54 No.1 2022 TECHNICS®

オムロングループ技術論文誌

特集

人と機械が共進化する
ものづくり

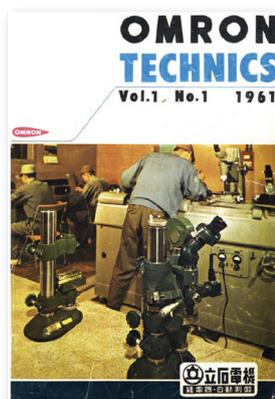


OMRON TECHNICS

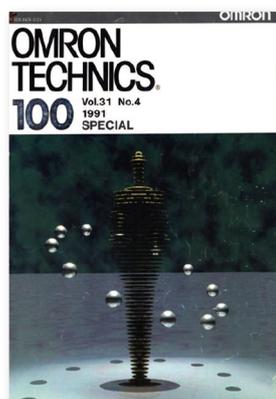
のご紹介

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。

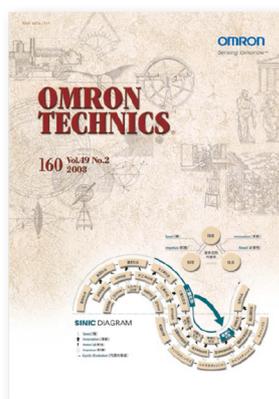
創刊よりこれまで通巻165号発行し、約1,780編以上の論文を公開しております。



1961年5月 創刊号



1991年 100号



2008年 160号



2018年 161号



2019年 162号



2020年 163号



2021年 164号



2021年 165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い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

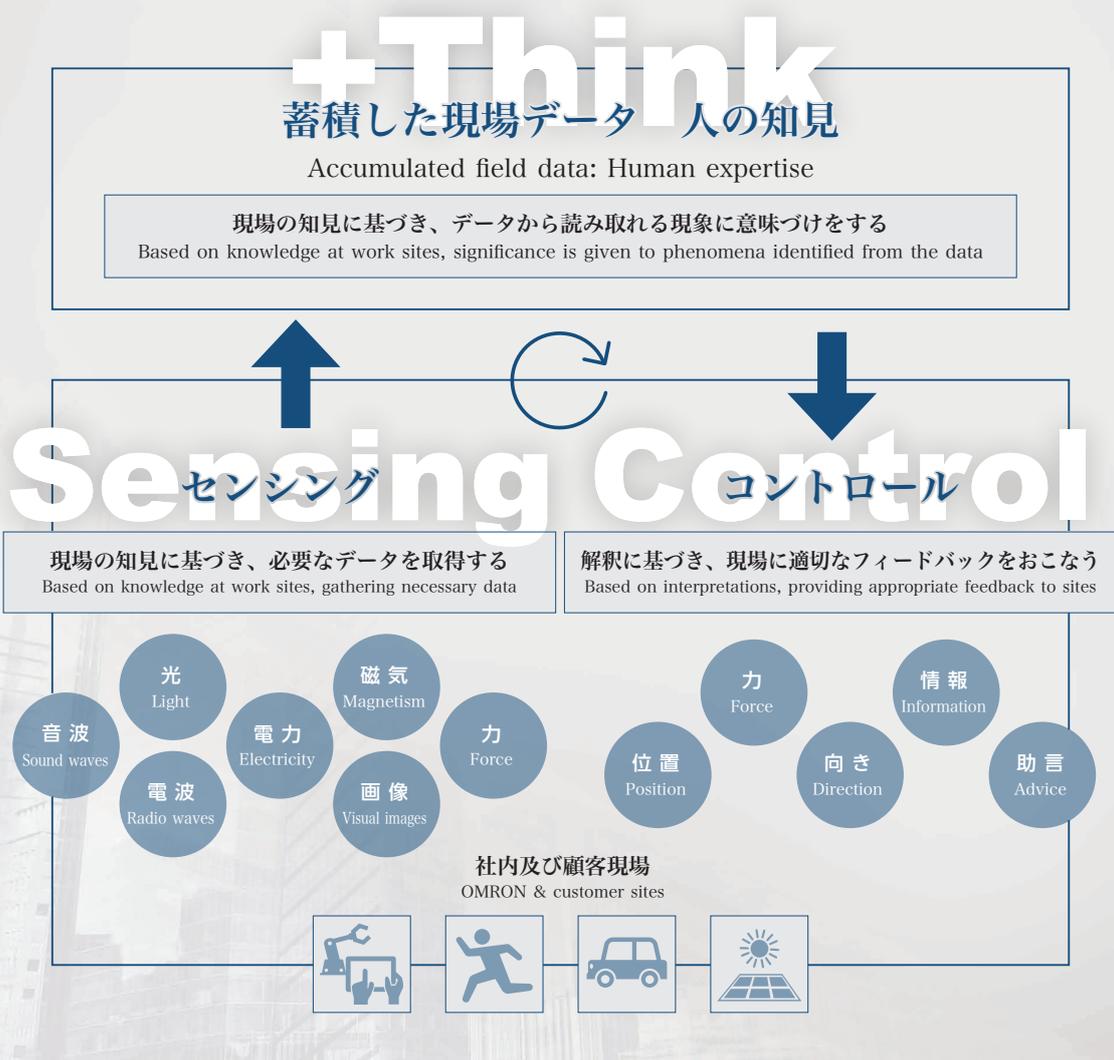
オムロンは創業以来、時代に先駆けた価値を生み出すために、独自のコア技術を進化させてきました。「Sensing & Control + Think」はオムロンが誇る全社共通のコア技術です。

「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。

2011年からこの「Sensing & Control」に「人の知恵」を表す「+ Think」を加えました。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。

オムロンは「カーボンニュートラルの実現」「デジタル化社会の実現」「健康寿命の延伸」を解決すべき社会的課題と捉え、4つのドメイン「インダストリアルオートメーション」「ヘルスケアソリューション」「ソーシャルソリューション」「デバイス&モジュールソリューション」を注力する事業領域として、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



オムロンのコア技術「Sensing & Control +Think」	1 (1)
目次	2 (2)
巻頭言：新しいカタチのモノづくり現場が導くサステナブルな未来 オムロン株式会社 執行役員 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 商品事業本部長 山西 基裕	4 (4)
技術展望：人とロボットが近づく未来を目指して オムロン株式会社 技術・知財本部 副本部長 兼 ロボティクスR&Dセンタ長 関根 淳一	7 (7)
寄稿文：FaaSによるファクトリートランスフォーメーション (FX) 一般社団法人 インダストリアル・バリューチェーン・イニシアティブ 理事長 兼 法政大学デザイン工学部 教授 西岡 靖之	9 (9)

特集：人と機械が共進化するものづくり

歩行軌道のAI予測技術を適用した製造現場でのロボット衝突回避技術 寧 霄光	12 (12)
ソフトウェア耐性を強化した高信頼性安全システムの開発 樋口 敏之	21 (21)
機械学習を用いた外乱補正による加工精度向上の検討 長林 洋輔, 藤井 高史, 山本 紳太郎	28 (28)
データ抽象化を用いた制御アルゴリズム単純化によるロボットの多種ワーク高速ハンドリングの実現 阿部 将佳, 川上 真司, 金井 聡庸, 齊藤 ゆみ	35 (35)
方位点灯撮像方式と検査基準自動最適化による基板外観検査の精度向上への取組み 藤井 心平, 田中 貴茂	46 (46)
バラ積みピッキングのための高速3次元物体位置姿勢認識技術の確立 服部 宏祐	53 (53)
小型・軽量かつ耐環境性を備えたロボットハンド搭載型3Dセンサの開発 太田 潤, 中塚 均, 猪田 岳司, 松本 慎也	60 (60)
制御機器に同居したITアプリケーション環境の提案 西垣 弘二, 荒井 航	66 (66)
良品生産性向上のためのQ-upSystemを支えるデータ収集・分析基盤の開発 中西 功	75 (75)

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. ヘルスケア	
低コスト・短納期での通信対応体温計開発を実現する音波通信技術 平田 英宇	84 (84)
2. ソーシャルソリューション	
アレー拡張処理を用いたミリ波レーダによる屋外人物の3Dイメージング 大橋 卓, 谷本 雄大, 齋藤 啓介	92 (92)
機械学習を用いた電力変換機器の最適化設計プロセスの実証 佐藤 一樹, 小田 博章, 上松 武	101 (101)
施工性向上を実現した蓄電システムの開発 山田 潤一郎, 大内 祐介, 衛藤 郡	107 (107)

2. 新たな成長領域を生み出す技術

シースルー構造を持つ薄型押しボタンの実現 工藤 卓也, 鷲見 昌昭, 阿形 剛宏, 鬼塚 浩之	118 (118)
低接触抵抗と高容量開閉を両立するリレー開閉機構の開発 高橋 慶, 田尻 さやか, 野田 将之	129 (129)

最近発表した主な論文	137 (137)
------------	-----------

OMRON's Core Technology "Sensing & Control +Think"	1 (1)
Table of Contents	2 (2)
Introduction; Production Floor with New Paradigm of Manufacturing Conducting Sustainable Future YAMANISHI Motohiro, Executive Officer Senior General Manager, Product Business Division HQ. Industrial Automation Company	4 (4)
Technology Trend; Toward a Future of Closer Human-Robot Distance SEKINE Junichi, Deputy Senior General Manager, Technology and Intellectual Property H.Q. & General Manager, Robotics R&D Center	7 (7)
Contribution; Factory Transformation (FX) by Means of Factory as a Service NISHIOKA Yasuyuki, President, Industrial Value Chain Initiative & Professor, Dr-Eng, Faculty of Engineering and Design, Hosei University.....	9 (9)

Special issue: Manufacturing in which Humans and Machines Co-Evolve

Robot Collision Avoidance Technology at Manufacturing Sites that Applies AI Prediction Technology for Walking Trajectories NING Xiaoguang	12 (12)
Development of Highly Reliable Safety System with Enhanced Tolerance against Soft-Error HIGUCHI Toshiyuki	21 (21)
Consideration of Improve the Machining Accuracy by Disturbance Correction Using Machine Learning NAGABAYASHI Yosuke, FUJII Takashi and YAMAMOTO Shintaro	28 (28)
Realization of the High-Speed Robot Manipulation for Variety Parts by Data Abstraction and Simplified Control ABE Masayoshi, KAWAKAMI Shinji, KANAI Akinobu and SAITOH Yumi	35 (35)
Efforts to Improve the Accuracy of Board Appearance Inspection by Using a Multi Direction Imaging Method and Automatic Optimization of Inspection Criteria FUJII Shimpei and TANAKA Takashige	46 (46)
Fast 3D Object Position and Posture Recognition for Bin Picking HATTORI Kosuke	53 (53)
A Small and Light 3D Vision Sensor for Robot Arms with Robustness in Factory Automation OTA Jun, NAKATSUKA Hitoshi, INODA Takeshi and MATSUMOTO Shinya	60 (60)
Proposing an IT Application Platform in Controller NISHIGAKI Koji and ARAI Wataru	66 (66)
Development of Data Collection/Analysis Platform that Supports Q-upSystem for Improving Non-defective Product Productivity NAKANISHI Isao	75 (75)

1. Innovative Technology in OMRON's Growth Area

1. Healthcare Acoustic Communication Technology for Quick Development of Low Cost Connected Thermometers HIRATA Hideie	84 (84)
2. Social Solutions 3D Imaging of Outdoor Human with Millimeter Wave Radar using Extended Array Processing OHASHI Suguru, TANIMOTO Yudai and SAITO Keisuke	92 (92)
Feasibility Study About Design Process of Power Electronics Converters by Optimization Method Applied Machine Learning SATO Kazuki, OTA Hiroaki and UEMATSU Takeshi	101 (101)
Development of Power Storage System with Improved Workability YAMADA Junichiro, OUCHI Yusuke and ETO Gun	107 (107)

2. Technology Developing a New Growth Area

Realization of Thin Push Button with Large Transparent Section Structure KUDO Takuya, SUMI Masaaki, AGATA Takehiro and ONITSUKA Hiroyuki	118 (118)
Development of Relay Switching Mechanism that Achieves both Low Contact Resistance and High-capacity Switching TAKAHASHI Kei, TAJIRI Sayaka and NODA Masayuki	129 (129)

New Publications	137 (137)
------------------------	-----------

新しいカタチのモノづくり現場が 導くサステナブルな未来



平素より、皆様には多大なご高配をいただき感謝申し上げます。

オムロンはオートメーションでモノづくりを革新し、モノの普及によって人々の豊かさに貢献してきました。2016年には、自動化設備を構成する機器を幅広くラインアップするユニークさを起点に、モノづくり革新コンセプト“i-Automation!”を掲げました。“i-Automation!”は3つの“i”で構成されています。人にしかできない匠の技を、革新的な制御で高度に自動化する、integrated。また価値あるデータが現場を網羅して、インテリジェントなモノづくり現場を創出するintelligent。そしてロボットがモノづくり現場を縦横無尽に動き、人とロボットが協調しているinteractive。これら高度なオートメーションを、制御アプリケーションとして提供することで、今では世界中の製造現場で新たな工法の創出や課題解決に寄与しています。

モノづくりは現在100年に一度と言っても過言ではない、大転換期にあります。元々底堅いニーズだった生産人財不足が、コロナによる移動制限等で深刻化しています。そして今、かつてない需給逼迫のプレッシャーを、世界のモノづくりが経験しています。これらが相まって、複雑な作業や多品種対応などの「柔軟性」を、特定の生産人財に頼ることで担保してきたことが、モノづくりのレジリエンスにおける更なるリスク要因になると考えています。

また、三現主義が原理原則のモノづくり現場でさえ、デジタル化の待ったなしのニーズにさらされ、エンジニアリングのリモート化やロボットの実用化といった、高度なモノづくりの現場実装が、いたる所で開始されています。そして前述の需給逼迫のプレッシャーは、この高度なモノづくりに対して、短期間で人の習熟度向上といった新たな課題を浮き彫りにしていくと考えています。加えて、高度な自動化生産が進めば、環境に関するモノづくりへの社会要請も待ったなしで強くなります。

一方でオートメーションを普及させながらも、必ず残る労働集約領域に目を移すと、生産性追求と同時に、従業員の人間性尊重への配慮といった社会的要請を起点に、人の可能性に寄り添った企業市民としての姿勢もモノづくり現場を通して表出することが求められます。

これらをまとめると「資本生産性と柔軟性の両立」、「経済合理性と環境還元の両立」、「技術進化と人の習熟の両立」、「労働生産性と人の尊厳の両立」の4つのジレンマがモノづくり現場で益々顕在化し、これら乗り越える葛藤が、今後本格化すると考えています。

このモノづくり環境の変化を踏まえ、i-Automation!の次なる進化を、モノづくりを牽引しながら地球環境との共存と働きがいを実現するサステナビリティに向けたオートメーションと定義し、i-Automation!-Nextとしました。今までのi-Automation!が主に経済的価値を提供してきたのに対し、i-Automation!-Nextは経済的価値に加え社会的価値の提供を掲げています。

i-Automation!-Nextは、前述の3つの“i”の継続進化をコアにした、「人を超越する自動化」、「人と機械の高度協調」、「デジタルエンジニアリング革新」の3つの近未来モノづくりコンセプトで構成されています。

「人を超越する自動化」は、現場における人への過度な依存を低減し、重労働から解放することで、人が安心して創造的な業務に集中でき、継続的なモノの供給と生産性向上の実現を目指します。

そして生産性とエネルギー効率を両立する自動化で、良いものを環境に優しく生産し続ける新たなモノづくりを実現させ、前述の資本生産性と柔軟性、そして経済合理性と環境還元、これらジレンマをオートメーションで乗り越えます。実現させるスコープは、3点あります。

1点目は、人に頼り過ぎていた生産に関する“器用な手作業”の柔軟な自動化です。特に人の視覚、聴覚、触覚にあたるセンシング技術とインテリジェント組立制御技術を進化させ、人の感性まで取込み、「匠の技と感性の再現」まで高めていきます。2点目は、4M変動に関する、あらゆる“業務”の自動化です。特に設備監視技術を高め、人の長年の経験・コツで担保されてきた監視業務を自動化し、「変化を察知する自律設備」に進化させます。3点目は、これらの自動化に、エネルギーを効率良く使える最適な制御を擦り合わせる自動化です。エネルギー制御技術で、エネルギーの高効率運用に加え、再エネ、省エネを上手く組み合わせ、生産性を革新しながら顧客のカーボンニュートラルを実現する「エネルギー制御と融合し進化する生産ライン」を目指します。

「人と機械の高度協調」は、労働集約型の新たなモノづくりを実現し、前述の労働生産性と人の尊厳、そして技術進化と人の習熟、これらジレンマを乗り越えるオートメーションです。生産現場における人を中心にして、実現させるものを3点定めています。1点目は、今まで人に強いていた、体力的、精神的な負荷を、ロボットなどの機械が臨機応変に代替、支援することで解放させ、同時に労働生産性も高める、「人と機械のシームレス連結」です。2点目は、人が感じてきた、作業の難しさ、マンネリ、そもそもの成長意欲が持

ちにくいといった心理的負担を、IE改善士が保有するノウハウや知識をモデル化しフィードバックすることで、人の習熟度向上を実現する、「知能化され人を支援する現場」です。

3点目は、需要変動に対し、人それぞれの習熟度、またその時の機械の状態に応じて、人と機械の最適な配置と作業分担を実行し生産する、「自在に協調する現場」まで高めていきます。

前述の2つを下支えするのが「デジタルエンジニアリング革新」です。エンジニアリングチェーンにおける、設計・立上、そして保全にまつわる人の業務にフォーカスし、オムロンユニークなセンシング&コントロール+Thinkの技術をベースに製造現場や設備をデジタル空間で再現することで、業務プロセスの革新に貢献していきます。実現ポイントは3点です。

1点目は、生産設備の設計、立上げにおいて、生産設備のデジタルツインを実現しリアルな現場業務をバーチャルで再現し、組織・企業を超えた協業を可能とする設計環境を提供することで、調整期間の大幅短縮を実現する「現場と融合したバーチャル設備設計」です。

2点目は、作るモノの品質や設備の健康状態をデジタル空間で見える化し、今まで見えなかった設備の潜在リスクを顕在化させ、先回りした保全を可能にすることで永続的なモノの安定供給を実現させる、「匠を超えたデジタル保全」です。

3点目は現場全体のエネルギーを含めた全てが、有機的に意味ある形で繋がり合い、発生する物事の因果を繋ぐプラットフォームとなる「現場全体が繋がり合うスマート製造管理」で、最適な再エネも組み合わせたエネルギーマネジメントの在り方の提供を目指します。

これら経済的価値と社会的価値が融合したシステムを、皆様へお届けすることがオムロンの使命と考えております。しかし、より一層複雑化するモノづくり課題の解決には、オムロン1社だけでは限界があります。皆様と共に i-Automation!-Next を創造させていただきたいと考えており、お力添えいただけますと幸いに存じます。

オムロン株式会社
執行役員
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 商品事業本部長

山西 基裕

人とロボットが近づく 未来を目指して

オムロン株式会社 技術・知財本部 副本部長
兼 ロボティクス R&D センタ長

関根 淳一



ロボットは、人々の暮らしを支える製品製造の裏方から、人々に直接サービスを提供する領域にも進展する時代になってきたので目にする機会も増えましたが、まだまだ身近にその姿を多く見かける状態ではありません。

ロボットの歴史には諸説ありますが、古くは12世紀頃のフランスのパリを中心に「オートマタ」という機械仕掛けで動く人形が作られた時期までさかのぼり、800年以上の歴史になります。産業用ロボットは、1961年に開発されたアメリカのユニメーション社の「ユニメート」、同じくアメリカのAMF社の「バーサトラン」が世界で初めて実用化された産業ロボットとされており、その歴史は半世紀以上になります⁽¹⁾。

誕生から、既に多くの時間が経過した過程で、様々な研究によってロボットを構成する機構、アクチュエータ、制御装置、安全のためのセンシング、音声認識、画像認識、自己位置推定などの技術は進化を続け、性能や機能面は大きく進化したと言えます。

ロボットが作業する際の“人とロボットの距離”に着目してみると、黎明期のロボットは柵によって隔てられた位置に存在し、意思疎通、すなわち相互関係の成り立ちが無いところで稼働する存在でしたが、近年はロボットとの距離を縮める研究が盛んになされており、人と共存 (coexistence) する、人と協調 (collaborate) する事を目指す多くの技術が開発されています。共存は、ロボットと人が同じモノを作るために作業を分担で行うイメージで、モノには別々に触れる距離感になります。協調は、同じモノと一緒に触れて互いに協力し合って何かを作るイメージで、既に協調ロボットと言われる、人に対する安全性を高めたロボットが製造現場で稼働する事例が見られるようになりました。

しかし、まだ人と人の中に入り込んで活用されている度合いは限られており、活用したいと望むところに気軽に入り込めていない状況と言えます。オムロンの企業哲学であ

る、『機械にできることは機械にまかせ、人間はより創造的な分野での活動を楽しむべきである』の状態にはなっておらず、ロボットをもっと人に近づけるためにはロボットを受け入れるための敷居を下げなければなりません。

我々、オムロンのロボット開発チームは、より理想に踏み込んで「人とロボットがお互いに共進化 (coevolution) することを実現する」という目標を追っています。

共進化の意味は、生物が他の生物に適応していく過程で、両方の生物がお互いに進化しあうことです。お互いに進化し合うには、相互作用が必要で、人とロボットの間においては、ロボットは人の役に立つ機能・性能だけでなく、人との心理的距離を近づけ、ロボットを異物と感じさせないエモーションの繋がりが必須になると思います。

そのために世の中での進化が著しい技術で知られる人工知能 (AI)、高速データ処理、高速通信 (5G など) の技術に、我々の蓄積したセンシング (人を観察する) 技術とコントロール (動くモノを制御する) 技術を掛け合わせ、機能・性能向上はもちろん、エモーションも相互理解し合う状態の実現を目指します。

いろいろな電子機器の性能が向上し、AIが発達して人にとって代わる仕事が増えてくると言われますが、人の心を動かしたり心を整えたりする事に関係する仕事、例えばソーシャルワーカー、訓練士 (視覚など)、医師、看護師、振付師、小学校の教師、心理カウンセラー、聖職者、経営者などはロボットや機械で置き換わる事が難しいと言われています。人の気持ちや心に繋がる仕事を担うには、“心”が必要です。ロボットに心を持たせるのは高いハードルですが、人の心に接する心遣い出来るロボットを創造するチャレンジをしたいと考えています。効率重視で稼働する、無骨で脅威を受ける姿や、何をしようとしているかわからない状態のロボットと働くより、気の置けない心遣い

が出来るロボットの方が、人に受け入れてもらえるはずだ
と思うからです。

「心遣い」には「思いやり」と「配慮」のニュアンスが
含まれます。心遣いが出来るためには相手となる人を良く
見て理解（センシング×AI）する事が基本で、その情報か
ら行動（Control）するためには人の意図にシンクロし、や
わらかく動く必要があります。単に法制上の安全担保だけ
ではなく、人が恐怖を感じないロボットにしなければなり
ません。

世界的に、日本人の心遣いやおもてなしは非常に有名で
す。茶道に由来する「一期一会」の考えに基づくおもてな
しのエピソードは多数あります。身近なちょっとした心遣
いの例ですが、狭い通路で雨傘を差して人とすれ違う時
には相手を見て傘を傾げ、それを見た相手も反対に傘を傾
げスムーズに通れるようにする仕草を自然に見かけます。モ
ノの運搬などで自ら移動するロボットには、このような心

遣いの動作を導入したいと考えています。

もう一つロボットに重要なエッセンスとして、ロボット
への動作教示方法の研究を重視しています。パーソナルコ
ンピュータの言語やロボット専用言語で動作するプログラ
ムを作る事から脱却し、友達に用事を頼む感覚で、特別な
変換の必要ない教示方法をとることができるようにするこ
とが、気軽に接するには必須と考えるからです。

我々は、オムロンの持つ「Sensing & Control + Think」
技術を生かして、「人が中心」をコンセプトに気の置けな
いロボットを開発して世の中にもっとロボットが受け入れ
られ、人と共進化する状態を実現したいと望んで研究を加
速していきます。

(1) 出典：産業用ロボット技術発展の系統化調査 - kahaku.go.jp

FaaS によるファクトリートランスフォーメーション (FX)

一般社団法人 インダストリアル・バリューチェーン・イニシアティブ 理事長
兼 法政大学デザイン工学部 教授



西岡 靖之

産業革命当初、Factory Automation (FA) は、人間の作業の置き換えからスタートした。その後、エレクトロニクスの進展により、FA は人よりも高速でかつ高品質になる。近年はもはや FA なしには製品は作れない。

ただし、数多くのエンジニアリングがひとつの生産ラインに投入されるため、一般に FA は高価である。生産ラインを立ち上げた後も、高速で高品質を維持するためのエンジニアリングは欠かせない。旧来はこの問題を、ボリュームで解決した。数多く作ることで一個当たりの費用を抑える。しかし VUCA 時代といわれる不確実性の高まりの中で、こうした方法にも限界がでてきた。

デバイス、自動機、そして生産ラインという階層で考えた場合、一般に生産ラインは、生産するモノが分からなければ設計できない。ならば、生産するモノが分かっているから、設計し設置し安定稼働するまでの期間を短縮し、同時に費用を抑えればよい。さまざまなエンジニアリングをユニット化しパッケージ化しておき、必要に応じてブロックのように組み替えるというアプローチである。

ここで、人と機械の共生、共進化がクローズアップされる。なぜなら、変化が見通せない環境においては、結局のところ“人”が、現場目線で総合的に状況を判断し、その都度それぞれの状況に対応してブロックを組み替える必要があるからである。

ただし、こうした汎用化、フレキシブル化とは異なるアプローチ、すなわち逆に専門に特化し密結合した生産技術のアプローチも同じくらい重要である。前者はマーケットに生産ラインを適合させるのに対して、後者は生産ラインにマーケットを同期させる。

これは、いわゆるプロダクトアウトの発想ではなく、シェアリングの発想として位置付けることができる。すなわち、生産ラインをひとつの企業が占有するのではなく、複数の企業がもつマーケットの変動に応じて時分割的に共同利用するという考え方である。今風に言えば、工場を

サービスとして提供する FaaS (Factory as a Service) となるだろうか。

もちろん、生産技術の専門家からは、そんな生易しい問題ではない、とお叱りを受けるだろう。また、都合よく次の借主が現れる保証はなく、グローバル規模のファクトリーマーケットの整備も必要となるだろう。しかし、視点を 30 年後に移せば、そのようなハードルはなくなっているはずだ。製造業のサービス化といわれる流れの中で、むしろ FaaS になっていない理由をさがすことのほうが難しい。

200 社以上の企業が所属するインダストリアル・バリューチェーン・イニシアティブ (IVI) では、“つながるものづくり”を基本コンセプトとして、FA 技術の新たな展開について議論するとともに、毎年 15～20 件の実証実験を、企業の垣根を越えたメンバーによって実施している。そこであらためて感じるのは、競争と協調のバランスの大きなトレンド変化である。

いうまでもなく、競争は技術を進歩させ人々の暮らしを豊かにしてきた。しかし近年、格差の拡大やカーボンニュートラルへの対応など、競争という軸だけでは解決できない課題が増えている。国連が提唱する持続可能な開発目標 (SDGs) は、競争によって解決するテーマもあるが、むしろ過度な競争による弊害を喚起する内容でもある。

FaaS の前提となっているシェアリングの発想は、こうした観点からも、あらたな時代の流れであるといってもよい。そこでは競争と協調のバランスを保ちつつ、健全で持続可能な成長と進化を可能とする具体的な方法論や行動指針が求められる。FA はこうした新たな時代の要請にどう向き合うべきなのか。

まずは、FA を必要とする地域は地球上にあらゆるところに存在するという現実からスタートしたい。そうした地域のさまざまなニーズに答えるインクルーシブでユニバーサルなデザインとする必要がある。そして、さまざまな国や地域の FA の現場が自律的に機能するために、あらゆる

ステークホルダーを巻き込んだプラットフォームが必要となる。そして、そうした事業がしっかりとした収益につながるようなビジネスモデルとエコシステムのデザインが欠かせない。

シェアリング可能なFAは、必然的に継続的なモニタリングが必要となり、世代を超えたハードウェア、ソフトウェアのデリバリー体制が求められる。これを社会インフラとして協調的なしくみのなかで構築し、FA企業がシェアリングサービスとしてFXを仕掛けるというのが、まず

は2030年へ向けたひとつのシナリオだろう。

すでに自動車では、CASEすなわちコネクテッド（つながる化）、オートノマス（自律化）、シェアリング（共有化）、そしてエレクトリック（電動化）が猛烈な勢いで現実のものとなっている。電動化を、カーボンニュートラルに置き換えれば、そのまま自動車を“工場”に置き換えることができるのだ。FAを起点とするファクトリートランスフォーメーション（FX）によるわくわくする未来の始まりである。

特集

人と機械が共進化する ものづくり



歩行軌道の AI 予測技術を適用した製造現場でのロボット衝突回避技術

寧 霄光

近年、製造現場において人とロボットが同じ空間で作業することを実現するために、人との衝突を安全に回避するロボットの軌道計画技術開発が複数の研究機関や製造業等で進んでいる。しかし従来の技術は、ロボットが回避動作を実施する前に作業動作を一旦停止しなければならないため、人と密接する際にロボットが頻繁に停止し、生産性が著しく低下する問題がある。

本研究では、この問題を解決するために必要な技術の1つとして、製造現場における人の数秒先の体幹位置の予測技術に取り組んでいる。

今回、従来の AI による歩行軌道の予測技術を製造現場での人体幹位置予測に適用する手法を考案し、製造現場の1事例を用いて性能評価を行った。その結果、4s先の体幹位置の予測を0.4msの処理時間で実現でき、現段階の技術課題も判明した。また、比較評価実験により、本手法はオーソドックスな時系列解析手法より予測精度が優れており、処理速度が10倍以上速いことが分かった。

Robot Collision Avoidance Technology at Manufacturing Sites that Applies AI Prediction Technology for Walking Trajectories

NING Xiaoguang

In order to enable humans and robots to work in the same shared space at manufacturing site, robot trajectory planning technologies have been developed for robots to avoid collisions with humans during operation. However, by the conventional technologies, since the operation must be temporarily stopped before the robot performs the collision avoidance, the robot frequently stops when it comes into close contact with a person, and the productivity is significantly reduced.

In this research, as one of the technologies necessary to solve the above problem, we are working on an innovative technology for predicting the position of the human body in a few seconds ahead at the manufacturing site.

This time, a novel method has been proposed by applying an AI-based human walking trajectory prediction technology to the prediction of the human body position at the manufacturing site, and evaluated the performance using one case at the manufacturing site. As a result, the proposed method is able to predict the body position 4 seconds ahead in a processing time of 0.4ms, and a technical issue has also been identified. In addition, comparative evaluation experiments revealed that this method has better prediction accuracy and a processing speed of 10 times or more faster than the orthodox time series analysis method.

1. まえがき

近年、製造業において技能人材確保が深刻になってきた¹⁾。この課題を解決するために、人手作業の製造現場の一部をロボットで置き換え、従来の人とロボットを隔離し

ていた安全柵を撤廃し、人とロボットが共存しながら作業を行う生産方式が注目されている。

産業用ロボットを導入する際の安全確保の手段としては、一般的に安全柵や安全センサを用いて人とロボットを隔離する手段と、人と衝突しても人に怪我をさせない PFL (Power and Force Limiting) 協働ロボットを採用するとい

Contact : NING Xiaoguang xiaoguang.ning@omron.com

う二つの手段がある²⁾。前者は、柵や安全設備でロボット専用の作業スペースを確保するため、スペース効率が低下したり、フレキシブルなレイアウト変更が困難となったりする課題がある。後者は、柵レスで人と共存できるが、ロボットの速度と動力が常に制限され、稼働中に人との衝突によりロボットの動作停止が頻繁に発生するなど、産業ロボットの本来の生産性が発揮できない課題がある。

上記課題を解決するために、近年は、センサにより人の動きを検出し、ロボットが人の動きに合わせて、人と衝突しないように動作軌道計画を行う技術が注目されている^{3) 4)}。これにより、柵レスで人と共存する際に、衝突によるロボットの停止が低減できると考えられている。

この技術に関するほとんどの研究は、人の動きをリアルタイムに検出し、その情報に基づいて人とロボットの位置関係を監視する手段をとっている。この手段によると、人とロボットは事前に設定された、人の安全確保に必要な距離以上に近づく場合、つまり、過接近の場合、ロボットの動作を停止させて、必要な距離を確保できる新軌道を生成してロボットの動作を再開する。

一方、この方策においては、人とロボットの過接近が検知された時に、新軌道がまだ決まっていないため、ロボットが衝突防止のために実行中の動作を停止しなければならない。従って、狭い作業空間にロボットが人と密接して作業する場合、過接近が頻繁に発生するため、ロボットの作業が頻繁に中断されるという問題がある。

上記の問題を解決するための必要な技術の1つとして、製造現場における人の動きを予測する技術に取り組んだ。この技術により、直近将来の人位置情報の取得ができ、人とロボットの相対位置関係の予測が可能になる。そのため、過接近が実際に発生する前に新軌道生成を完了することが可能になり、ロボットが停止せずに新軌道に切り替わるようになる。これにより、従来の衝突回避動作の停止問題が低減され、ロボットがスムーズに人との衝突を回避することが実現できる。

なお、本研究では、製造現場においてロボット近傍で作業を行う人の動きを、①各作業場所間での体幹の移動と、②止まって手作業する際の手の動きの2つのステップに分ける。現段階は、上述①の人の体幹位置の予測に取り組んでいる。

人の歩行による体幹位置の変化、つまり歩行軌道は、環境や個人差など多くの影響を受け、理論計算で導くことが非常に難しいため、近年は人工知能 (AI) を用いた予測技術の開発が進んでいる。

従来技術は、混雑した空間における複数人の歩行軌道を、画像データを用いて予測するといった用途で使用されており、数秒後の人位置の予測が実現できている^{5) 6)}。ニューラルネットワークを使ったアルゴリズムにより、大量な学習データを用いるため、予測の処理時間が数秒か

かっており、また、予測距離誤差が約 1m である。

一方、これらの技術は、自動車の自動運転用途など、オープンな空間での歩行軌道予測のために適用されているが、製造現場の閉鎖的な空間への適用に関する研究はまだ進んでいない。また、予測処理に時間がかかりすぎるため、ロボットの動作に合わせたリアルタイムな処理ができない課題がある。

本研究は、前述したスムーズな衝突回避を実現するために、従来の AI による歩行軌道の予測技術を製造現場での人体幹位置予測に適用する手法とその効果を検討した。検討に際しては、まず必要な予測性能指標と目標値を定義し、それらを達成するために、従来技術を製造現場に適用するためのアプローチを考案し、それをベースに具体的な適用手法を提案した。また、製造現場の1事例を用いて適用手法の効果と課題を検証した。これらの内容について、本論文で紹介する。

人とロボットが協働作業するための技術なので、安全化設計も重要なポイントとなるが、本論文では、AI による予測技術に焦点を当てているため、安全化の仕組みについての説明は割愛する。実際には、安全関連部と AI による人予測アルゴリズムを別系統で構成することにより安全性は実現できていることのみ、ここでは述べておく。

2. 予測性能指標と目標値

前述の人と密接する際にロボットの作業が頻繁に中断される問題を解決するための、人の位置予測によりスムーズに衝突回避を行う概念を、図1に具体化した。このフローにおいて、数秒後の人位置を予測し (a)、その情報を用いて将来の人とロボットの位置関係を計算し、過接近が発生しそうかを判断する (b)。YES の場合に衝突を回避するようにロボットを制御する (c と d)。

稼働中に人の安全を確保するために過接近の判断を常に行わなければならないため、a と b は短周期で連続的に実行される必要がある。また、スムーズな衝突回避を実現するために、過接近が実際に発生する前に、つまり、人体幹位置予測 (a) の予測時間内に a ~ d の処理が全部終わることが重要なポイントである。

従って、このフローを実現する上で、図1の処理フローの (a) 人体幹位置予測の性能が重要となる。この性能を表す指標として、「予測処理時間」「予測可能時間」「予測距離誤差」を定め、それぞれの目標値を以下のように定義した。

・予測処理時間

1 回の予測処理の所要時間である。前述の短周期で連続的に実行することのために、この指標を極力短縮させる必要がある。

本研究では、オムロン製レーザスキャナ (形 OS32C)

により、予測に必要なデータを 40ms 周期で取得する (2.3 節で詳細を説明する)。それと連動して予測処理を連続的に行うために、予測処理の処理時間目標を 40ms 以下と設定した。

・予測可能時間

予測処理により予測が可能な直近将来の時間である。前述のように、この指標の目標値は、図 1 の a～d の処理の所要時間により設定すべきである。

本研究では、システムの構成により、a～d の処理時間を表 1 に記載するように見積もった。これらの値は、実装ハードウェアの性能により変動する可能性があるが、研究段階は厳密な評価を省略し、厳しめに設定した。

これらの所要時間の合計にデータ伝送などのバッファ時間を加えて、予測可能時間の目標を 1.2s に設定した。

・予測距離誤差

人体幹位置の予測値と真値の距離である (図 2)。体幹位置は、体幹中心点の位置で示す。これについて 3 章で説明する。この指標は、予測結果の正しさを示し、前記フローの b で予測結果を用いて過接近を判断する際に、予測アルゴリズムによる誤差として考慮されるべきである。

本研究では、事前机上計算により、“密接”とみられており、ロボット第 1 関節回転軸を中心とした 2メートル半径の円柱領域内に人が作業する場合、スムーズな衝突回避を実現するために 100mm 以下の予測距離誤差内であれば効果が得られるという結果を得ている。このため、目標値を 100mm 以下と設定した。

表 1 実験用の歩行軌道の設定

図 1 での番号	処理時間 [ms]	処理時間の決め方
a	40	予測処理時間の目標値 (2 章) により設定した
b	10	汎用 PC で過接近判断処理のプログラムを実行した際の実績数値を参考に設定した
c	100	専用処理ハードウェアで Probabilistic roadmap 法による 6 関節ロボットの軌道計画処理 ³⁾ の所要時間実績数値を参考に設定した
d	800	オムロン製協働ロボット (TM5 シリーズ) の加減速性能により設定した

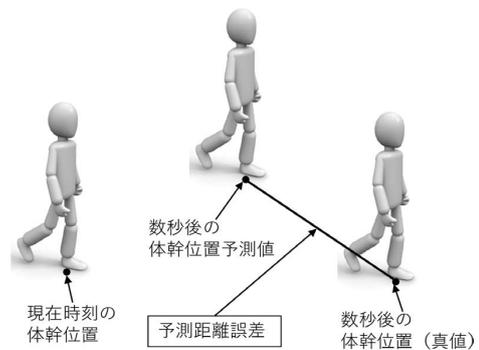


図 2 予測距離誤差の定義

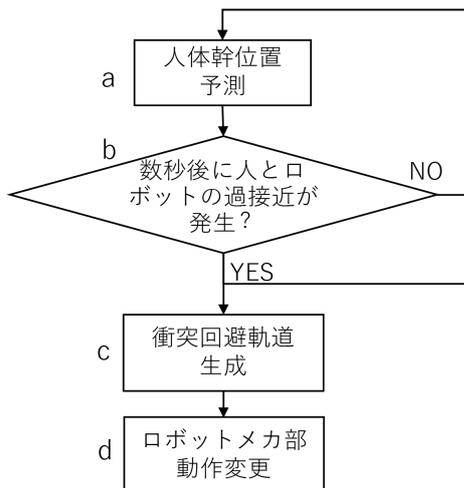


図 1 スムーズな衝突回避処理フロー

3. 製造現場適用のためのアプローチ

AI を歩行軌道の予測技術に使用する際に、一般的な使い方としては、歩行軌道の変化に影響する個人・環境因子を特徴量とし、それらが含まれる学習データを使って、特徴量による歩行軌道の変化に関する法則性を学習器に学習させる。学習済の学習器を用いて、同様な特徴量が含まれる予測のための入力データを解析することにより、歩行軌道の変化を算出する。

従来の AI による歩行軌道の予測技術は、複雑な環境における複数の歩行軌道に着目し、正確な予測結果を得るために、障害物の位置や同行する人数など多くの特徴量を考慮する。予測時に、それらが含まれる大量の入力データを解析するため、数秒の予測処理時間がかかる。このため、前章で定義した予測処理時間の目標値である 40ms に対しては大きなギャップがあり、そのままのアルゴリズムでは適用できない。

この問題に対して、本研究では、特徴量の数を最小限にすることにより、予測処理時間を短縮させるようにした。

具体的には、本研究の予測対象となる製造現場における人は、ほとんどの場合は平らな地面上で歩行し、高さ方向上

の位置変化が微小のため、体幹の位置は体幹中心点の投影、つまり、体幹中心点の座標値 (x, y) により表すことが可能となる（図3）。従って、体幹中心座標 (x, y) を歩行軌道の予測に最低限必要な特徴量として使用することにした。手作業の時間のばらつきなどの因子を特徴量に加えたら歩行軌道の予測精度がさらに良くなる可能性があるが、予測処理時間とはトレードオフの関係になるため、予測処理時間優先で今回は考慮から外した。今後、さらなる改善にこの特徴量が必要であれば、次のステップにおいて検討する予定である。

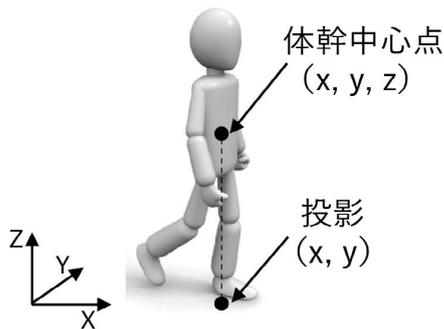


図3 体幹中心座標

4. 予測手法の詳細

4.1 概要

前述した学習特徴量の数を最小限にするアプローチをベースに、AIによる歩行軌道の予測技術を製造現場における人の体幹位置予測に応用する手法を提案した。手法の概要を下記観点で説明する。

・特徴量

3章で記載するように、人の体幹中心座標の x と y を特徴量とする。

・学習データ

体幹中心座標の時系列データを学習データとする。これらにより学習器に体幹中心座標変化の法則性を学習させる。

・学習器

力学系学習木手法⁷⁾に基づく Deep Binary Tree (DBT) 学習器（株式会社エイシング製の機械学習パッケージ）を学習処理部として採用した。

DBTは、少量データによる高速な学習処理が得意であり、計算量が小さく組み込みシステム上でも利用しやすいことなどの特徴がある。本研究においても学習データは少ないので、最終的にロボットシステムに組み込みやすく、かつ高速処理が可能な DBT を採用した。

・予測アルゴリズム

製造工程を繰り返す人の体幹中心座標の時系列データをリアルタイムに取得し、それを上記学習データにより事前に学習済の学習機に入力することで、直近将来の体幹中心座標値を出力データとして取得する。

また、教師ありの AI 技術の特徴として、予測用の入力データが有効であるほど正確な予測が可能のため、学習器事前学習の段階で、入力データの形式に関するパラメータのチューニングを行い、予測距離誤差の改善を図る。

・システム構成

図4に示すように、本研究では、3台のレーザスキャナ（形OS32C）が人の腰と同じ高さに配置され、腰周りの体幹輪郭点群の座標値を 40ms 周期で連続的に検出する。検出データが周期ごとに予測アルゴリズムが実装された予測処理用 PC に送信され、点群の中心点の座標値 x と y 計算し、それを点群が検出された時刻の体幹中心座標値とする。この方法で取得された体幹中心座標値の時系列データが学習・予測データ蓄積部に蓄積されて、処理部で解析される。

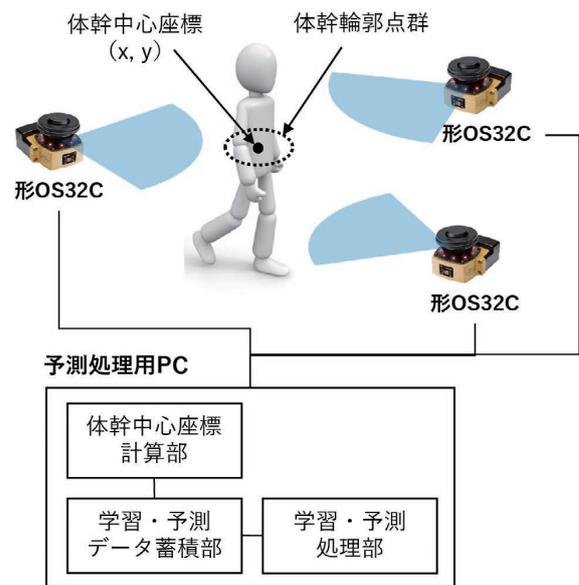


図4 体幹位置予測システム構成図

4.2 詳細アルゴリズム

本研究で提案した適用手法のアルゴリズムに関して、処理フローを用いて詳細を説明する。図5に示すように、本手法の処理フローはA～Cの三つのセクションで構成される。

セクション A（人体幹中心座標検出）

本セクションは、前述（4.1節）のシステム構成で記載したように、体幹中心座標値 (x, y) を取得し、蓄積する。

セクション B (学習器の学習)

本セクションは、セクション A で蓄積された人体幹中心座標データにより、DBT 学習器を体幹中心座標変化の法則性、つまり過去体幹位置と将来体幹位置との関連性を学習させる。また、より正確な予測結果を得るように入力データの形式に関するパラメータをチューニングする。

本セクションの処理は、図 6 を用いて説明する。図の体幹中心座標値 (x, y) の記号はその座標値が取得される時刻を示す。例えば、 (x_n, y_n) は時刻 n で取得された体幹中心座標値を表す。

まず、学習器に過去体幹位置と将来体幹位置との関連性を学習させる。具体的には、図 6 の B-1 に示すように、セクション A で蓄積されたデータの一部を学習用のデータとして取得する。データ取得された時刻 (図の例は時刻 p) ごとに、以前に取得されたデータを学習入力データとし、以降に取得されたデータを学習出力データとして抽出し、データペアを作成する。これらの学習データペアを学習器に学習させる。ここでは、入力データの形式は、データの数 (k) とデータ間の時間間隔 (a) で決められ、後述するようにチューニングされる。出力データの数 (l) と時間間隔 (b) はチューニングせず、予測要件に応じて設定する。

次に、図 6 の B-2 部分に示すように、セクション A で蓄積されたデータの一部を誤差評価用データとして取得し、B-1 で学習済の学習器により体幹位置を予測する場合の予測距離誤差を評価する。評価方法に関しては 5.2 節で説明する。

また、入力データ形式パラメータの k と a に対して一定の範囲内でグリッドサーチを行い、図 6 の学習 (B-1) と評価 (B-2) を繰り返すことで、最小の予測距離誤差を得られる k と a の値を見つける。

セクション C (人体幹中心座標予測)

本セクションは、セクション B により取得した学習済の学習器と、 k と a の値を用いて、直近将来の人体幹中心座標を予測する。

以下に、処理の詳細を図 7 により説明する。

セクション A から現在時刻 (図の例は時刻 t) までの体幹中心座標の時系列データを取得し、セクション B で決められた k と a の値を用いて予測用の入力データを作成する。これを学習済の学習器に入力し、直近将来 (図の例は、 $l \times b$ 秒先) の体幹中心座標を取得する。

この予測結果を用いて、直近将来のロボット位置情報を加えたら、前述の回避処理フロー (図 1) のブロック b で人とロボットの直近将来の位置関係が推測でき、過接近が発生するか判断が可能になる。

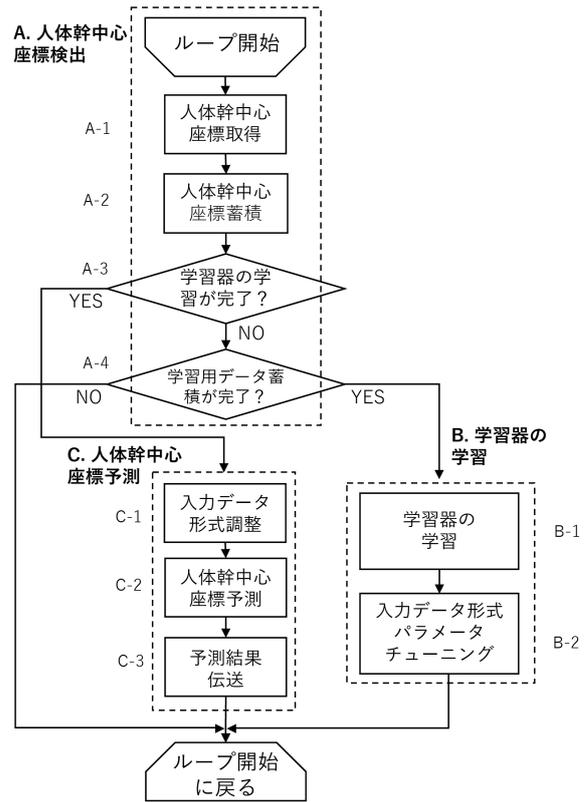


図 5 予測技術適用手法の処理フロー

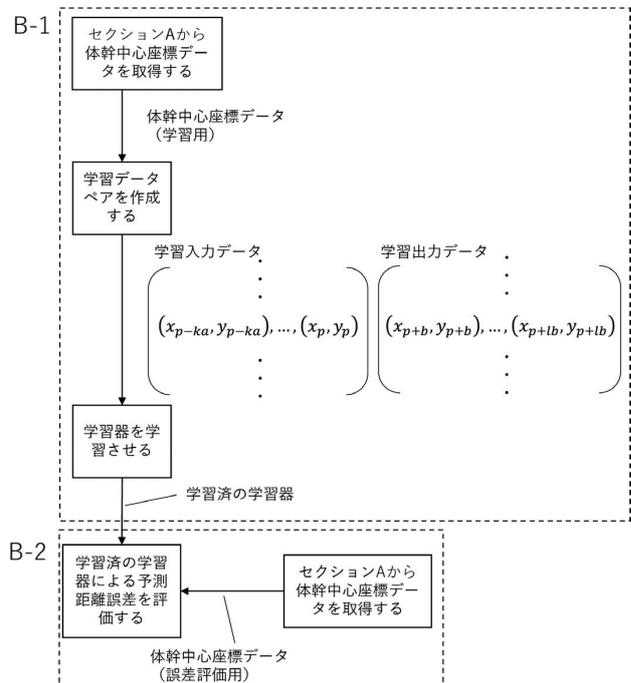


図 6 セクション B での処理の詳細

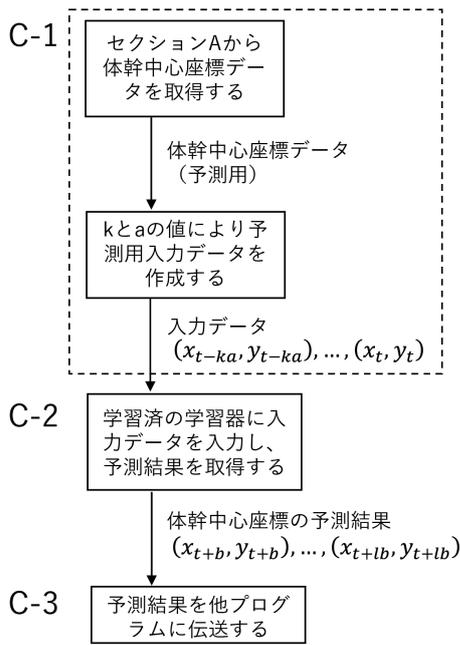


図7 セクションCでの予測処理の詳細

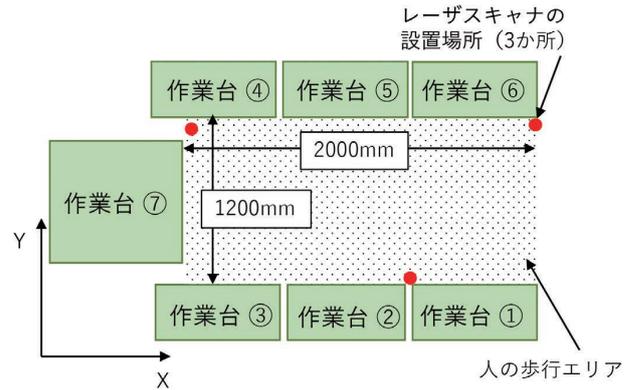


図8 実験環境レイアウト鳥瞰図

5. 性能評価

本章では、製造現場の1事例としてU字型製造ラインを模擬した実験環境において、前述のAIによる歩行軌道予測技術の適用手法を予測可能時間、予測処理時間、予測距離誤差の観点で評価した結果を説明する。

5.1節で実験の条件、5.2節で評価方法、5.3節で実験の結果と考察を説明する。

5.1 実験条件

実験環境セットアップ

当社工場の小型電子部品組立用のU字型製造ラインを参考にして実験環境のレイアウトを設計した。図8にこのレイアウトの鳥瞰図を示す。図8に示すように、U字型に設置される作業台により囲まれ、ドットで示してあるエリアにおいて、人が作業のために歩行で移動する。

歩行エリアを全部カバーできるように、体幹輪郭検出用のレーザスキャナが3か所に設置される。

人体幹中心の座標系については、作業台①～③の並び方向をX軸、その垂直方向をY軸と設定した。

実験用の歩行軌道

当社工場のU字型製造ラインにおいて、小型電子部品組立作業を行う作業員の歩行軌道に基づき、以下の4つの実験用歩行軌道の構成インデックスを抽出した。また、複数の作業工程を調査した結果により、それぞれの代表的な値を決めた。

- ・軌道形状

歩行軌道の形状である。本実験では、1直線、Z字型、通路交差の3つの形状を定義した(図9～図11)。図の中の、矢印線は人の移動を示し、丸点が始点、矢印が終点である。線の番号は移動の順番を示す。

- ・速度

人移動時の歩行速度である。本実験では、低速(約1000mm/s)と高速(1600mm/s)の2段に設定した。高速の速度値は、人ロボット協調安全規格(ISO10218-1/TS15066)で指定された値を使用した。

- ・移動距離

移動の距離、つまり図9～図11の矢印線の長さである。本実験では、600mmと1200mmの2種類に設定した。

- ・停止時間

作業台で手作業のために、移動の停止時間、つまり図9～図11の矢印線の間の停止時間である。本実験では、2sと10sの2種類に設定した。

上記インデックスの組み合わせで、6種類の歩行軌道を設定した(表2)。現場で一番多く見受けられる#1を標準パターンとし、#2～#6は#1をベースとしながら、1つだけのインデックスを変化させるように設定した。この設定によって、個別の軌道インデックスと予測結果の関連性を評価できると考えた。

一直線

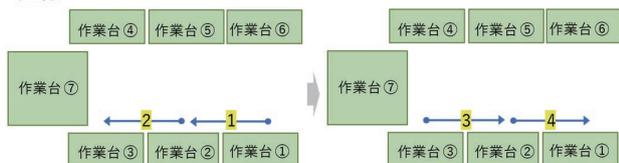


図9 1直線の軌道形状

Z字型

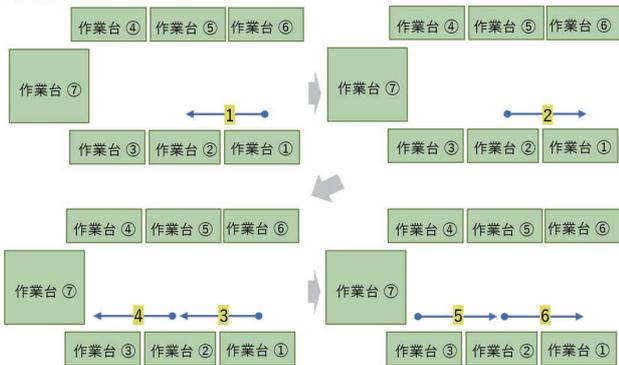


図10 Z字型の軌道形状

通路交差

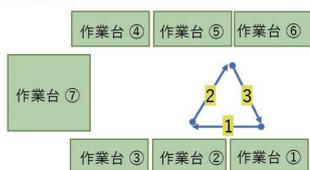


図11 通路交差の軌道形状

表2 実験用の歩行軌道の設定

#	軌道形状	速度 [mm/s]	移動距離 [mm]	停止時間 [s]	学習用データ数	評価用データ数
1	1直線	約1000	600	2	9102	4551
2	Z字型	約1000	600	2	8663	4332
3	通路交差	約1000	600	2	9207	4603
4	1直線	約1600	600	2	6332	3166
5	1直線	約1000	1200	2	4477	2239
6	1直線	約1000	600	10	9637	4818

予測処理に関するパラメータの設定

- ・入力データ形式に関するパラメータ (k と a) のチューニング範囲
本実験では、 k は $[1, 100]$ の範囲に1刻みで、 a は $[0.04s, 4s]$ の範囲に0.04s刻みでチューニングした。
- ・出力データの形式 (l と b) の設定
本実験では、予測出力データの数 (l) を30、50、100の3パターンに、データ間の時間間隔 (b) を0.04sに設定した。 l と b の組合せにより、予測可能時間 ($l \times b$) を1.2s、2s、4sとした。

5.2 評価方法

前記の実験環境において、1人の作業員が前記の実験用歩行軌道に沿って、各軌道の移動を30回繰り返す。その間に、前述の予測システム(図4)により、作業員の体幹中心座標値データを取得し、30回の内の20回のデータを学習用データとして使い、学習器を学習させる。残りの10回のデータを評価用データとして用いて、各軌道に対して、1.2s、2s、4s先の体幹中心座標値を予測し、以下の方法で、予測性能指標を評価した。各軌道の学習・評価用データの数は表2に示す。

・予測処理時間の評価方法

実験する際に、本技術の予測処理の部分(図5のセクションC)の所要時間をループごとに計測する。この時間の最大値を予測処理時間とする。

・予測距離誤差の評価方法

各軌道に対して、体幹中心座標が取得される時刻ごとに、実測座標値と予測座標値の相対距離を算出し、最大値を予測距離誤差とする。本実験では、距離分布の「平均値+3 σ 」を最大値とする。
レーザスキャナの計測距離ばらつきによる影響が大きく、センサの計測ばらつきを扱うのに一般的に3 σ で評価することから、「予測距離誤差」に関しては3 σ で評価している。

5.3 実験結果

3.1節、3.2節に記載した方法に従い、評価実験を行った結果を表3にまとめる。

表3 DBT手法の評価結果

予測時間 [s]	軌道 #1		軌道 #2		軌道 #3		軌道 #4		軌道 #5		軌道 #6	
	距離誤差 [mm]	処理時間 [ms]										
1.2	132	0.1	304	0.2	131	0.2	150	0.2	110	0.1	279	0.2
2	130	0.2	416	0.3	113	0.3	153	0.2	112	0.1	303	0.1
4	151	0.3	544	0.2	123	0.2	184	0.2	109	0.2	345	0.4

予測距離誤差について、予測時間が長いほど誤差が大きくなる場合が多く、1.2s 先予測の場合の最大誤差が 304mm となり、本研究の目標値に対しては乖離がある。4s 先まで予測する場合の最大誤差が 544mm となり、軌道 #2 で発生したことを確認できた。

予測処理時間について、全ての実験ケースでの処理時間が 1ms 以下になり、最大値が 0.4ms であることを確認できた。目標の 40ms をクリアし、本研究の予測システム構成で 40ms 周期の連続予測処理が可能であることが分かった。

今後の改善のために、実験データを用いて誤差に対する影響因子を追究した。表 4 に各軌道の 1 サイクルあたりの停止回数と合計停止時間を示す。比較的大きな誤差が現れる軌道として、軌道 #2 は 1 サイクルあたりの停止回数が多く、#6 は 1 サイクルあたりの停止時間が長いことが分かった。これにより、予測対象軌道の 1 サイクルあたりの停止回数・停止時間が予測距離誤差に影響を与えている可能性があることが分かった。

表 4 歩行軌道 1 サイクルあたりの停止回数と時間

軌道 #	停止回数	合計停止時間 [s]
1	4	8
2	6	12
3	3	6
4	4	8
5	2	4
6	4	40

5.4 従来手法との比較

DBT を用いた本研究の予測手法の予測結果と比較するために、5.1 の実験条件で取得した 6 つの軌道の体幹中心座標

の時系列データを用いて、5.2 の評価方法に従って、オーソドックスな時系列解析手法を用いた予測と評価を行った。

オーソドックスな手法として、ARIMA モデルと LSTM を採用した。

ARIMA モデルは、自己回帰和分移動平均モデルの略で、統計学で時系列解析に用いられる代表的な手法である⁸⁾。今回は Python の Darts ライブラリを使用した。単変量解析が可能のため、体幹中心座標 X と Y の学習器を別個に作成し、予測を行った。

LSTM は Long short-term memory の略で、RNN の一種でより長期系列に対応できるようにしたのが特徴である⁹⁾。今回は Python の Darts ライブラリを使用した。多変量の予測が可能であるため、DBT と同様に体幹中心座標 X と Y を 1 つの学習器で同時に予測した。

3 つの手法 (ARIMA モデル、LSTM、DBT) により、6 つの軌道に対する予測距離誤差と処理時間の評価結果を表 5 に示す。

距離誤差に関しては、ほぼ DBT < LSTM < ARIMA であることが確認できた。軌道 #4 においては DBT の距離誤差が LSTM より著しく低く、他の軌道においては LSTM と同等或いはやや低いことが分かった。

処理時間に関しては、DBT < LSTM < ARIMA であることが全軌道で確認でき、DBT の予測処理は LSTM より 10 倍以上速いことが分かった。

6. むすび

本研究では、スムーズな人ロボット衝突回避を実現するために、人体幹位置予測技術の性能指標と目標値を定義し、体幹中心座標を特徴量とすることをベースに、AI による歩行軌道の予測技術を製造現場の人体幹位置予測に応用する手法を提案した。

表 5 3 つの予測手法の評価結果

予測時間 [s]	学習器	軌道 #1		軌道 #2		軌道 #3		軌道 #4		軌道 #5		軌道 #6	
		距離誤差 [mm]	処理時間 [ms]										
1.2	ARIMA	620	54.1	612	41.3	296	42.7	232	30	178	51.2	432	40.3
	LSTM	135	9.3	309	8.9	131	8.9	253	7.9	126	7.9	278	7.9
	DBT	132	0.1	304	0.2	131	0.2	150	0.2	110	0.1	279	0.2
2	ARIMA	781	62	787	42.8	355	100.2	219	25	218	51.9	595	52.0
	LSTM	137	13	436	12.8	99	12.8	278	11.3	128	11.3	312	11.2
	DBT	130	0.2	416	0.3	113	0.3	153	0.2	112	0.1	303	0.1
4	ARIMA	901	48.5	900	42.7	366	43.7	224	40.2	148	42.9	770	32.8
	LSTM	145	22.9	589	22.8	104	22.9	350	20.3	118	20.2	369	20.2
	DBT	151	0.3	544	0.2	123	0.2	184	0.2	109	0.2	345	0.4

U字型製造ラインの模擬環境によりその手法の効果を評価した。結果として、0.4msの処理時間で4s先の人体幹位置が予測可能であり、最大の予測距離誤差が544mmであることが分かった。また、比較評価実験により、本手法はオーソドックスな時系列解析手法より予測精度が優れており、処理速度が10倍以上速いことが分かった。

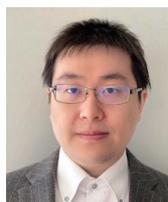
本手法の予測距離誤差に関して、目標を達成することができない、改善が必要であることが判明した。これについては、予測対象軌道の停止回数・停止時間が長いことに起因しており、次の行動予測が難しくなっている。対策として、例えば作業員の視線の追跡や停止時の手作業状態の監視など、次のアクションが推測できる情報を予測処理に加えることによってAIの判断精度を向上し、予測距離誤差が改善できないかと考えている。

今後は、予測距離誤差を改善し、製造現場事例を増やして評価することにより、本手法の実用性と汎用性を向上する。さらに複数人対応や手の動きの予測などの技術獲得を目指して研究を進め、最終的に、人の動き予測技術によりスムーズなロボット衝突回避を実現し、安全性と生産性が高度に両立するロボット協働生産環境の実用化に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 経済産業省. ものづくり白書2019版. 経済産業調査会, 2019, p.195-216.
- 2) 中央労働災害防止協会. 機能安全活用実践マニュアル産業用ロボットシステム編. 中央労働災害防止協会, 2017, p.8-42.
- 3) Murray, S.; Floyd-Jones, W.; Qi, Y. "The Microarchitecture of a Real-Time Robot Motion Planning Accelerator". 2016 49th Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture (MICRO). 2016, p.1-12.
- 4) Henrik Schumann-Olsen; Marianne Bakken; Øystein Hov Holhjem. Parallel Dynamic Roadmaps for Real-Time Motion Planning in Complex Dynamic Scenes. 3rd Workshop on Robots in Clutter, IEEE. 2014
- 5) Pellegrini, S.; Ess, A.; Schindler, K.; Van Gool, L. "You' ll never walk alone: Modeling social behavior for multi-target tracking". 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision. 2009, p.261-268.
- 6) Alahi, A.; Goel, K.; Ramanathan, V. "Social LSTM: Human Trajectory Prediction in Crowded Spaces". 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016, p.961-971.
- 7) 金天海. "鍛造モデルによる機械特性学習". 第23回ロボティクスシンポジウム予稿集, 2018, 4C4.
- 8) Box, G.; Jenkins, G. Time Series Analysis: Forecasting and Control. San Francisco, Holden-Day, 1970, p.88-97.
- 9) Hochreiter, S.; Schmidhuber, J. Long Short-Term Memory. Neural Computation. 1997, vol.9, no.8, p.1735-1780.

執筆者紹介



寧 霄光 NING Xiaoguang

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 第一技術部

専門: 機械工学

博士 (工学)

DBTは、株式会社エイシングの日本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。

ソフトウェア耐性を強化した高信頼性安全システムの開発

樋口 敏之

ソフトウェア起因でのシステム異常により設備が緊急停止することなく、安全機能を維持しながら設備が稼働し続ける信頼性の高い安全システムを開発したので報告する。

半導体デバイスの高集積化および微細化に伴い、メモリにおける一過性のビットエラー（ソフトウェア）が問題となっている。ソフトウェアにより半導体メモリに保存されているデータが一時的に書き換わることで、システムの一時的な停止やシステムダウンを引き起こす恐れがある。半導体製造工場のように24時間稼働して高価な材料を取り扱う設備においては、そのような一時的なシステム停止でも過大な利益損失が発生する。

一方で、半導体製造装置などに多く使用されている安全PLC（Programmable logic controller）は、安全制御に関連するすべての半導体集積回路やメモリ回路に対して自己診断を行い、異常な動作を検出した場合は直ちに装置を停止するように制御する。そのため、ソフトウェアに対してもデータ化けが発生すると、安全PLCは装置を停止させてしまうことから、安全機能は維持しつつ不要な停止を抑え生産性を継続する対策が求められている。

この課題に対して、安全性を損なうランダムハードウェア故障を検出して安全状態を維持する機能の実現だけでなく、ソフトウェアによるデータ化けを検出して、さらにデータの修復を行う機能も実現する技術を開発した。

本論文は、そのソフトウェアによるデータ化けを検出してデータの修復を行う機能の具体的な方策と、その効果の検証結果についてまとめる。

Development of Highly Reliable Safety System with Enhanced Tolerance against Soft-Error

HIGUCHI Toshiyuki

We report on the development of a highly reliable safety system that ensures that the equipment continues to operate while maintaining the safety function without making an emergency stop due to the system error caused by the soft error.

As semiconductor devices become more highly integrated and miniaturized, transient bit errors (soft errors) in memories are a problem. If data stored in the semiconductor memory is temporarily modified due to a soft error, a short time breakdown or a system down may occur. In equipment that operates 24 hours a day and handles expensive materials in a semiconductor manufacturing factory, temporary stoppage can cause excessive profit loss.

On the other hand, Safety PLCs (Programmable logic controller), which are often used in semiconductor manufacturing equipment, perform self-diagnosis on all semiconductor integrated circuits and memory circuits related to safety control, and immediately stop the equipment when abnormal operation is detected. Even if data is garbled due to a soft error, the safety PLC will stop the equipment. Therefore, there is a need for measures to maintain productivity while maintaining safety functions and suppressing unnecessary outages.

In response to this issue, we have realized the technique not only the function of detecting random hardware failures that impair safety and maintaining the safety state, but also the function of detecting data corruption due to soft errors and recovering data.

This paper describes the specific measures for the function of recovering data by detecting data corruption due to the soft error, and the verification results of the effect.

Contact : HIGUCHI Toshiyuki toshiyuki.higuchi@omron.com

1. まえがき

工場内における機械設備からの人体保護を目的とした安全システムの構築において、各種の安全 PLC (Programable logic controller) が採用されている。安全 PLC とは、IEC 61508¹⁾ を代表とする国際安全規格の認証を取得した安全制御のためのコントロールユニットである。作業者の安全を確保するために安全 PLC が利用されることから、機械設備の危険な状態を安全 PLC 自体の故障により検知できず、安全だと判断して機械の稼働を許可させるように動作してはならない。そのため、ハードウェアおよびソフトウェアに冗長性と多様性をもたせ、安全制御に関連する部品を常時自己診断し、安全性を損なうランダムハードウェア故障を検出した場合には機械設備を安全側に停止するような機能が安全 PLC には施されている。これにより、一般の PLC に対して安全性と信頼性を格段に高めている。

安全 PLC は、安全回路のソフトウェア化や安全ネットワークによる省配線により、大規模で複雑なアプリケーションにおいてより柔軟な安全システムを実現することを可能としている。そのため、大容量のプログラムを高速に処理する半導体デバイスが安全 PLC には実装されている。安全 PLC は、安全制御に関連するすべての半導体集積回路やメモリ回路に対して自己診断を行い、異常な動作を検出した場合は直ちに装置を停止するように制御する。

近年の半導体デバイスの高集積化および微細化に伴い、メモリにおける一過性のビットエラー (ソフトエラー) が注目されている。ソフトエラーは、例えば α 粒子や宇宙線中性子の衝突によって生じる。また、微細な異物によるデータ化けや、外部との入出力制御装置などから単発的に飛び込むノイズによるデータ化けも同様に問題となってきた。これらのソフトエラーにより、半導体メモリに保存されているデータが一時的に書き換わることで、システムの一時的な誤動作やシステムダウンを引き起こす恐れがある。半導体製造工場のように 24 時間稼働して高価な材料を取り扱う設備においては、そのような一時的なシステム停止でも過大な利益損失を発生させるため、その対策が求められている。

ソフトエラーによるビット反転を検出する診断、およびビット反転の発生したデータの修復については、Error Correction Code (以下、“ECC” という) を利用することにより実現できることが一般的に知られている。しかし、そのような ECC 機能による対策を安全 PLC に適用するためには、ECC を生成・チェックする特別なハードウェアが搭載されたメモリや MPU に変更しなければならないためコスト高となる。また、デバイスの変更により安全 PLC の故障分析と安全性評価を再度実施しなければならない、機種毎にそのハードウェア開発と評価が別途必要となる。

そこで、ソフトウェアによる対策だけでソフトエラー耐性強化をはかる安全 PLC の開発に取り組んだ。ソフト

ウェアによる対策を施すことは、追加のハードウェア回路を必要としないためコストアップとならないことや、既存の安全 PLC やその他の安全コンポーネントにも展開できる、という利点がある。

2. ソフトウェアによる対策の課題

安全 PLC を含む多くの既存の安全コンポーネントは MPU を冗長化している。データ化けを検出する方策として、図 1 に示すように MPU 間でデータをチェックする方法を採用している。これは、データの比較によりデータ化けを含む MPU の異常状態の検出が可能であるが、データ化けの修復までは行ってはいないことが現状である。

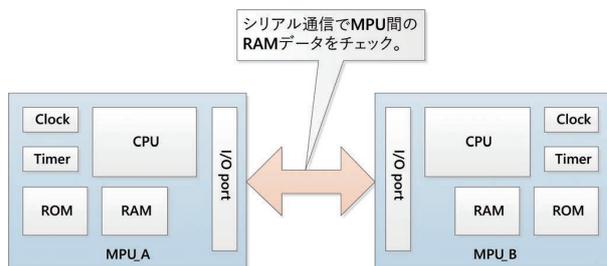


図 1 MPU 間でのデータチェック

そこで、従来技術として各 MPU で変数データを 3 重化してチェックする方法が挙げられる。3 重化によるチェックは、データ化けを検出して、さらにデータの修復を行う方策として高い効果が見込まれる。しかし、3 重化による変数データのチェックは、予めプログラム上で変数データが定義されている必要があり、スタック領域といった一時的にしか使われないデータに対しては保護できないリスクがある。また、3 重化によるチェックは変数データの読み書き時に行われるため、使用頻度の低い変数データに対してはチェック間隔が長くなり、複数の変数データでデータ化けが発生し修復されない可能性がある。

3. 対策

前述の課題に対して、各 MPU にてデータ化けを検出してデータの修復を行う機能の実現のため、以下の 3 つのソフトウェアによる対策の検討を行った。

- ① 変数データの 3 重化
- ② スタック領域の保護
- ③ 周期検査によるエラー累積予防

3.1 変数データの 3 重化

プログラムのソースコードにて、メモリで扱うデータを読み書きする記憶域として変数が定義される。代表的なプログラム言語としては C 言語があるが、今回の開発では C++ 言語を使用した。その C++ 言語で変数として宣言され

る Static 変数および Auto 変数に対して、プログラム上で冗長化された変数として扱うように宣言することとした。そして、対象となる変数を演算処理で使用する前に多数決判定を行う。これにより、変数のデータ化けを検出し、データの修復を行うことができる。図2に 変数データの3重化処理の詳細を示す。

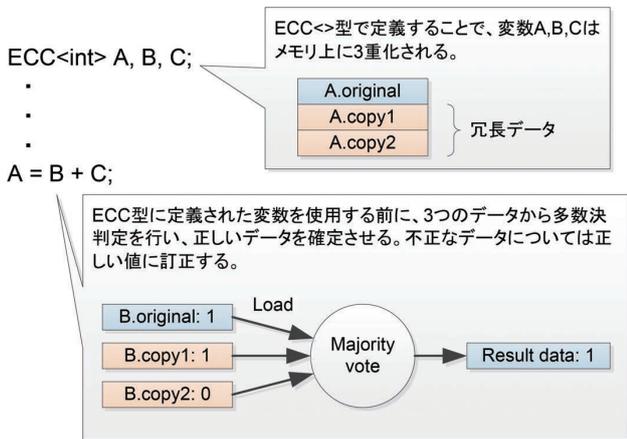


図2 変数データの3重化処理

3つのデータのうち、いずれのデータも一致しない場合はエラーとする。図3に多数決処理の詳細を示す。

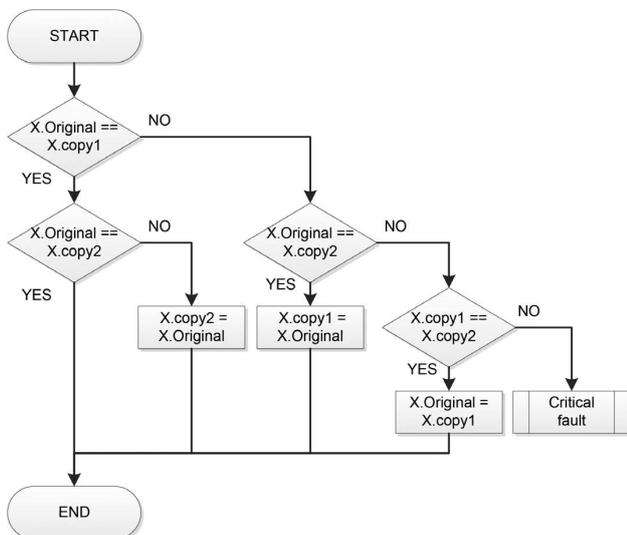


図3 変数データの3重化処理

3.2 スタック領域の保護

メモリを用いて演算処理を実行するプロセッサは、レジスタを内蔵する。レジスタは、計算やメモリの特定アドレスを指すポインタ用途などに使用される。メモリ上にはそのレジスタのデータを一時的に保存するスタック領域がある。プログラムのメインルーチンを実行中に関数処理（サブルーチン）が発生すると、メインルーチンを中断させる

ためにスタック操作が行われる。スタック操作には以下の2つの処理がある。

- (1) サブルーチン処理開始時に、プロセッサに内蔵されているレジスタに保持されたデータをRAM（Random Access Memory）のスタック領域に一時退避させる操作（Push 操作）。
- (2) サブルーチン処理終了時に、スタック領域に退避させたデータをレジスタに復帰させる操作（Pop 操作）。

スタック操作によってデータが一時退避されるスタック領域についてもソフトウェアが起り得る。しかしながら、サブルーチン処理に伴うスタック操作のコードは、コンパイラによって自動生成される。そのため、汎用のコンパイラを用いる場合、スタック操作に対して3.1項に記載の変数データの3重化処理を適用することができない。

そのため、サブルーチン処理の先頭でスタック領域に退避させたデータの複製をRAM上に作成することで冗長化し、サブルーチン処理終了時に冗長化されたデータをチェックすることとした。

図4、5にスタック領域の3重化処理の詳細を示す。なお、3重化されたデータをチェックする多数決処理は図4に示す方法と同様である。

- funcY の functionEntry 処理において、funcY 呼び出し前のスタックポインタ (=prevSP) と funcY 呼び出し後のスタックポインタ (=nowSP) を比較し、増加したデータのコピーをRAM上に作成する。
- funcYの実行を終了する直前に functionExit 処理にて増加したデータとコピーしたデータとを用いて多数決判定を行う。

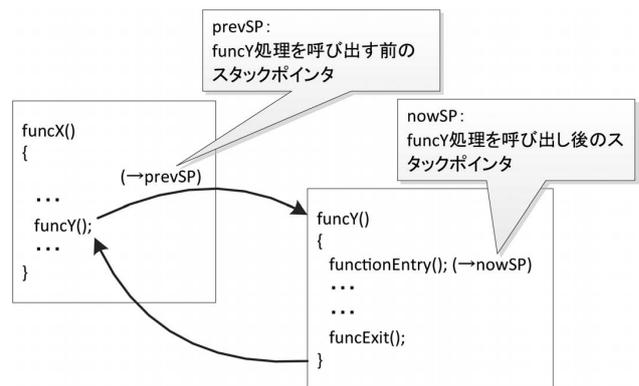


図4 スタックポインタの読み出し

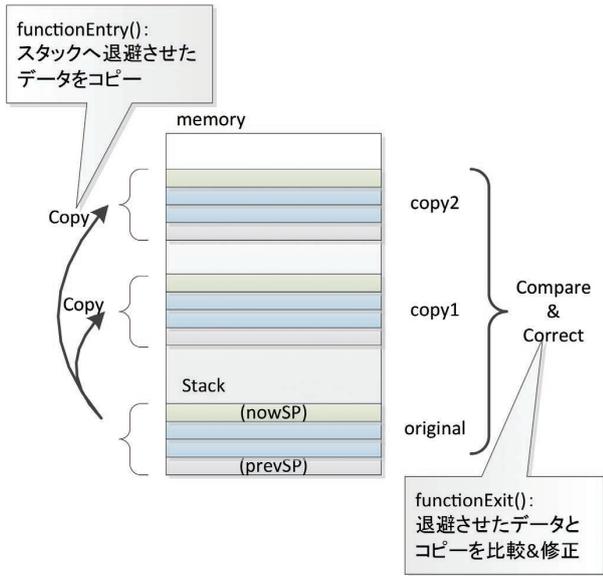


図5 スタックの3重化

3.3 周期検査によるエラー累積予防

3.1 項に記載の変数データの3重化処理は、プログラムの実行によって変数を読み出す際に、その読み出しに該当するアドレスのデータは修復される。ただし、各変数を読み出される頻度は、プログラムに依存する。読み出される頻度の高い変数については、データの修復される機会が多くなる。しかし、読み出される頻度の低い変数については、データの修復される機会が少なくなり、エラーが累積することでRAM上の3重化された変数のアドレスのうち複数のアドレスに対してソフトウェアが起こり得る。

そのため、メインルーチンおよびサブルーチン処理で実施される演算処理などのタスクの実行とは別に、ダミーの処理部を設け、予め定められた周期毎に変数を読み出すダミー処理を実行することとした。

図6にタスク実行部とダミー処理部と書込読出処理部を示す。書込読出処理部の第1～第3アドレスはメインメモリのアドレスを示し、第1アドレスはオリジナルの変数データ、第2と第3アドレスはコピーの変数データを示す。

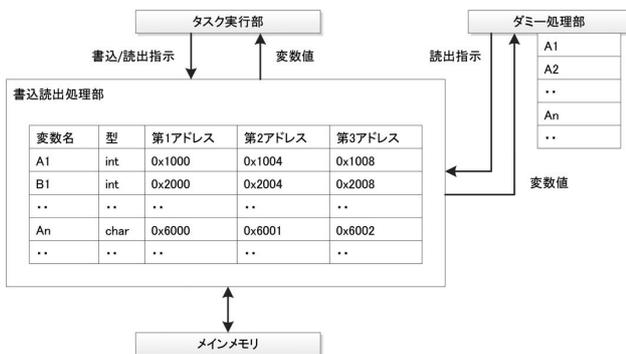


図6 タスク実行部とダミー処理部と書込読出処理部

図7にダミー処理部によるデータ化け修復の例を示す。変数A1が使用されるタスクの発生頻度は低い、一定周期毎にダミー処理が実行される。そのため、変数A1が使用される次のタスクまでにデータ化けが発生してもデータは修復され、エラーの累積予防が可能となる。

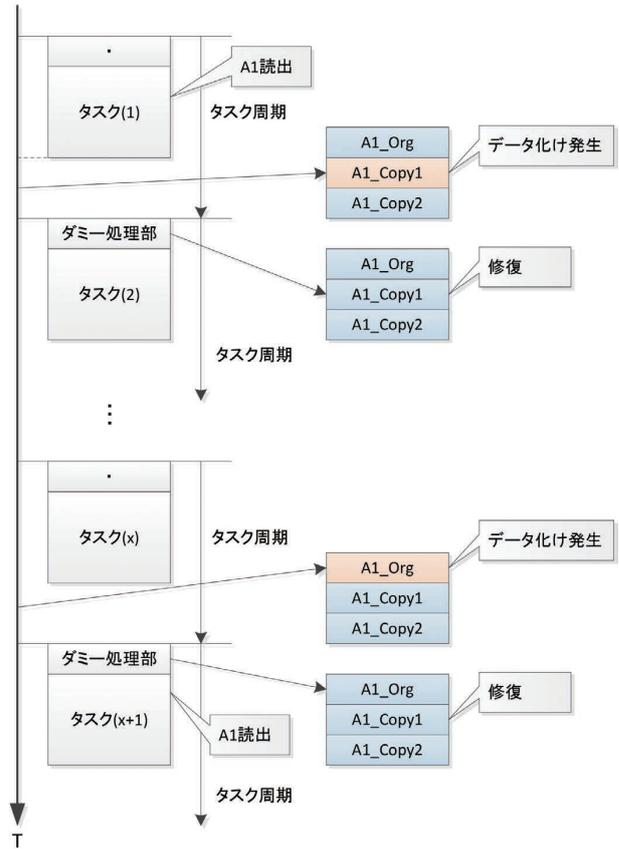


図7 ダミー処理部によるデータ化け修復

4. 検証

前述した「変数データの3重化」「スタック領域の保護」「周期検査によるエラー累積予防」の3つの方策によるデータ化け対策の効果を検証するためには、ソフトウェアを発生させてデータ化けが発生したメモリの修復度合いとシステム異常の発生頻度を計測する必要がある。そこで、以下の2つの方法により確認を行った。これらにより、短時間で加速的にソフトウェア評価を行うことができる。

- 疑似ソフトウェア処理による評価
- α 線照射試験による評価

4.1 疑似ソフトウェア処理による評価

疑似ソフトウェア処理による評価は、擬似的にビット化けを発生させるソフトウェアバッチ処理をプログラムに実装して行う評価である。RAMエリア全体に対して網羅的にビット化けを発生させ、システム異常発生時のビット化

けが発生した箇所を特定することができるよう、その評価方法と構成の検討を行った。

図8に疑似ソフトウェア処理による評価構成を示す。以下の手順により、ビット化けの位置情報と異常情報とが対応付けられてデータベースに蓄積することができる。

- ① パーソナルコンピュータにて安全 PLC の内のメインメモリ内のビット化けを発生させる 1 ビットの位置を指定する。
- ② 安全 PLC 内のソフトウェアバッチ処理にてメインメモリの指定された位置の 1 ビットのデータを反転させる。1 ビットのデータを反転させた後の所定時間内に発生した異常に関する異常情報を収集する。
- ③ パーソナルコンピュータは、安全 PLC から異常情報を取得する。
- ④ パーソナルコンピュータは、①において指定した位置に関する位置情報と③において取得した異常情報とを対応付けてデータベースに登録する。

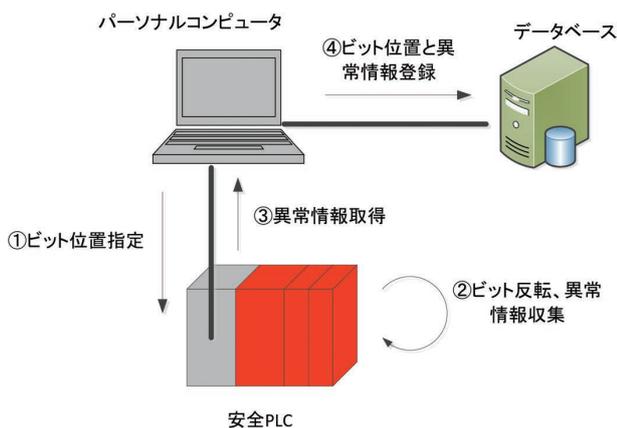


図8 疑似ソフトウェア処理による評価構成

表1は、データベースに登録された位置情報と異常情報の一覧の例である。データベースを参照することで、システム異常発生時の原因分析とソフトウェアが発生したときの影響を容易に確認することができる。

表1 位置情報と異常情報のデータベース

No.	アドレス	bit 位置	変数名	異常 ID	ソースコード (ファイル名、行番号)
1	0x200010AC	1	val_A	30	file_A.c, 867
2	0x20006000	7	val_B	57	file_B.c, 620
3	0x20007032	3	val_C	42	file_C.c, 500
4	0x20009A00	4	stuck	30	file_B.c, 827
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
N	0x20002000	5	val_X	77	file_A.c, 712

表2に疑似ソフトウェア処理による評価結果を示す。同一のハードウェアを用いて、ソフトウェア対策を実装する前のソフトウェアと対策後のソフトウェアとのそれぞれに擬似的にビット化けを発生させるソフトウェアバッチ処理を実装してランニング試験を行った。結果、対策前のユニットに対するソフトウェア対策を実装したユニットのシステム異常発生率比は0.00082となった。

表2 システム異常発生回数

	対策前のユニット	ソフトウェア対策後のユニット
a. ビット化けを発生させた回数	77,465 回	289,636 回
b. システム異常の発生回数	1,630 回	5 回
c. システム異常の発生割合 (b/a)	0.021041	0.000017
d. 対策前後のシステム異常発生率	1	0.00082

4.2 α 線照射試験による評価

JEDEC JESD89²⁾には、以下の3つのソフトウェア評価試験が規定されている。

JESD89-1：フィールドテスト

JESD89-2：放射性物質を用いた α 線照射試験

JESD89-3：加速器を用いた中性子線照射試験

フィールドテストは、多数のサンプルを長期間かけて評価を行うため、コスト高で時間もかかる。加速器を用いた中性子線照射試験は、中性子線照射が可能な施設が限られており、容易には行うことができない。一方で、放射性物質を用いた α 線照射試験は、線源があれば短時間で実施することが可能である。今回は、実際にソフトウェアを発生させてソフトウェアによる対策効果を早期に確認するため、簡易的に加速試験が行える α 線照射試験を参考にした。

図9、10に試験構成を示す。メモリが搭載されているMPUに対して α 線源を直接照射し、製品の動作を観測する。

- 製品にMPUが実装された状態で、MPUのパッケージ表面を開封して内部のICチップを露出させる。
- ICチップ上面に α 線源である²⁴¹Am（アメリシウム）を配置する。
- 製品を動作させ、挙動を観測する。システム異常が発生した回数と時間を計測する。

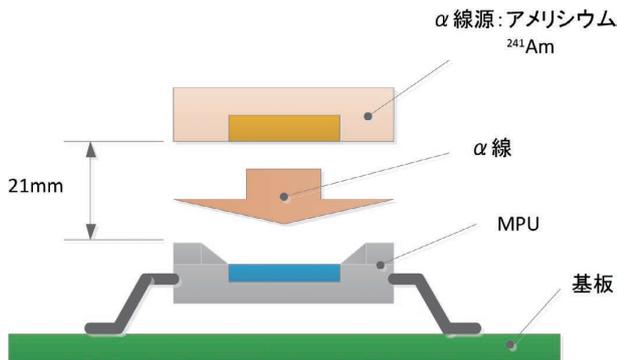
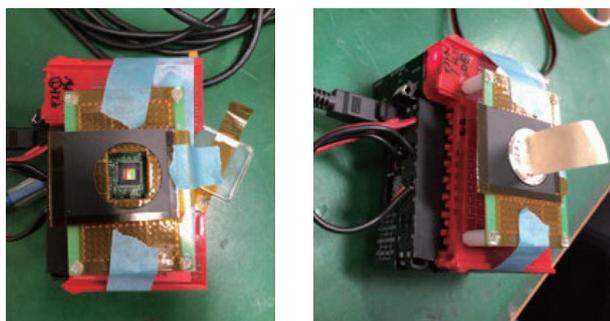


図9 α線照射試験構成



α線の配置前

α線の配置後

図10 疑似ソフトウェア処理による評価構成

表3に既存のユニットとソフトウェア対策を実装したユニットのα線照射試験結果を示す。結果、既存のユニットに対するソフトウェア対策を実装したユニットのシステム異常発生率比は0.0012となった。

表3 システム異常発生回数 (α線源との距離: 21mm)

	既存のユニット	ソフトウェア対策後のユニット
a. 累積照射時間	76分	13,000分
b. システム異常の発生回数	5回	1回
c. システム異常の発生間隔 (b/a)	15.2分/回	13,000分/回
d. 対策前後のシステム異常発生率	1	0.0012

なお、疑似ソフトウェア処理による評価とα線照射試験による評価とで、システム異常発生率比が異なっている。これは、ソフトウェアを実装して動作するユニットのMPUのパッケージ表面を開封して試験を行うため、試験に用いたユニットを同一のハードウェアで比較試験ができていないことが挙げられる。また、アメリシウムから放射されるα線の流速量(α粒子の数)がアメリシウムとMPUとの距離によって変化するため、α線の流速量はα線源を

固定する治具の精度に依存する。今回は簡易的な固定方法で試験を行ったため、同一のα線の流速量で比較できていない可能性がある。これらは今後のソフトウェア評価を行う上での課題である。

5. むすび

今回はハードウェアの追加をせずにソフトウェアの変更だけでソフトウェアの耐性強化をはかる安全PLCの開発に取り組んだ。

「変数データの3重化」「スタック領域の保護」「周期検査によるエラー累積予防」の3つのソフトウェアによるソフトウェア対策は、メモリに対して網羅的にソフトウェアを発生させる疑似ソフトウェア評価により、対策前のシステム異常発生率に対して0.0009以下に低減できることを確認した。また、α線照射試験により、実際の放射線が発生する環境においても、ビット化けを修復して動作し続けることが確認できた。本技術を用いることで、ソフトウェアによるシステムダウンの発生頻度を約1/1,000に改善できる効果が見込める。

今回は安全PLCを対象としたが、ソフトウェアによる方策を用いていることから他の安全コンポーネントへの展開と応用が容易である。国際安全規格で要求される安全性を損なうランダムハードウェア故障を検出して安全状態を維持するといった安全コンポーネントとしての機能の実現だけでなく、この技術を用いることで、ソフトウェアによるデータ化けを検出して、さらにデータの修復を行う機能もソフトウェアにより実現できる。そして、ビット化けによるシステム異常が発生することなく動作し続ける信頼性の高い安全システムの構築が可能となる。

今後の課題としては、データ化けの監視および修復を行う処理時間の短縮と高速化である。この技術は、ソフトウェアによる影響が懸念される大容量のメモリを扱うネットワーク機器を扱ったアプリケーションに対しても同様の効果が期待できる。ネットワークを含めた安全システム全体の応答時間の高速化と合わせて検討していく。そして、安全機能を維持しながら設備が稼働し続ける高信頼性安全システムの更なる創出により、生産性の向上に貢献していきたい。

参考文献

- 1) IEC61508:2010. Functional safety of electrical / electronic / programmable electronic safety-related systems.
- 2) JEDEC JESD89:2006. Measurement and reporting of alpha particle and terrestrial cosmic-ray-induced soft errors in semiconductor devices.

執筆者紹介



樋口 敏之 HIGUCHI Toshiyuki
インダストリアルオートメーション
ビジネスカンパニー
商品事業本部 セーフティ事業部 開発部
専門：安全工学、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。

機械学習を用いた外乱補正による加工精度向上の検討

長林 洋輔, 藤井 高史, 山本 紳太郎

製造現場では生産性を維持・向上しながら加工精度を向上することが要求されている。それに伴い近年では、製造現場での材料や機械のばらつき・変動が無視できなくなっている。

製造現場では、このような外乱影響を抑制するために様々な制御手法の工夫や、現場作業による生産装置の調整を行うことで加工精度の悪化防止に取り組んでいる。

一般に外乱影響の抑制にはフィードバック・フィードフォワード制御が用いられているが、フィードバック制御は外乱による影響が現れてから補正を行うため、効果が不十分となる場合がある。また、数式モデルを用いた外乱補正を行うフィードフォワード制御の場合、使用環境に依存するような制御対象では予測誤差が大きくなり、加工精度が悪化するという問題がある。

そこで、本論文では機械学習を活用した外乱補正による加工精度の向上手法について提案する。提案手法をサーボプレス機の下死点補正制御に用い、従来手法に対して MSE (平均二乗誤差) が 1/6 となる加工精度の向上を確認した。

Consideration of Improve the Machining Accuracy by Disturbance Correction Using Machine Learning

NAGABAYASHI Yosuke, FUJII Takashi and YAMAMOTO Shintaro

At the manufacturing site, it is required to improve the processing accuracy while maintaining and improving the productivity. As a result, in recent years, variations and fluctuations in materials and machines at manufacturing sites cannot be ignored.

At the manufacturing site, in order to suppress such disturbance effects, various control methods are devised and production equipment is adjusted by field workers to prevent deterioration of processing accuracy.

Generally, feedback / feedforward control is used to suppress the influence of disturbance, but the effect of feedback control may be insufficient because the correction is performed after the influence of disturbance appears. Further, in the case of feedforward control that performs disturbance correction using a mathematical model, there is a problem that the prediction error becomes large and the machining accuracy deteriorates in the controlled object that depends on the usage environment.

Therefore, in this paper, we propose a method for improving processing accuracy by disturbance correction using machine learning. Using the proposed method of bottom dead center correction control of the servo press, it was confirmed that the machining accuracy was improved so that the MSE (Mean Squared Error) was 1/6 of the conventional method.

1. まえがき

製造現場では生産性を維持・向上しながら加工精度を向上することが要求されている。それに伴い近年では、製造現場での材料や機械のばらつき・変動（以降、2M 変動）のような外乱の影響が無視できなくなっている。例えば、

プレス加工では加工精度が品質特性として特に重要視されている。プレス加工における加工精度は主に材料板厚のばらつきや製造装置の状態変化が影響し、加工精度が悪化した際には、製造装置の調整を行うことで加工精度の改善を行っている¹⁾。

一般に外乱影響の抑制には、フィードバック・フィードフォワード制御が用いられる。しかし、フィードバック制

Contact : NAGABAYASHI Yosuke yosuke.nagabayashi@omron.com

御は与えた操作量の結果から補正を行うという原理上、外乱による影響が現れてからしか補正を行うことが出来ないため、不良品の発生に繋がる。また、フィードフォワード制御は外乱による影響が現れる前に、影響を抑えるように補正を行うための適切な補正量が必要となる。しかし、外乱補正に数式モデルを用いる場合、2M 変動のような使用環境に依存する制御対象への適用は、予測誤差が大きくなり加工精度の悪化に繋がる。

このような背景から反復学習制御により、外乱影響を抑制する補正を行い、製品の加工精度悪化を防止する手法が検討されている²⁾。反復学習制御は、同様の条件が繰り返される場合において試行を繰り返すことで性能を向上可能な手法である。しかし、装置劣化や加工による温度上昇等のような経時変化する外乱に対しては原理上学習が進まず、外乱補正は困難となる。

そこで本稿では、従来手法の課題を克服した、機械学習を活用した外乱補正手法を提案する。本提案手法により、経時変化する外乱を含む、2M 変動による製品の加工精度の悪化を事前に防ぐことができる。

本実験では、提案手法を弊社製 AI 搭載マシンオートメーションコントローラ³⁾ (以降、AI コントローラ) に実装して効果を確認した。AI コントローラはマシンオートメーションコントローラに製造装置の制御と AI 技術が共存し、時系列データの収集、特徴量算出、外れ値検知機能を持つ。

2. 課題

2M 変動の複数外乱 d が加工部のツール・ワークに印加

されるフィードバック制御系を図 1 に示す。本稿での外乱は従来手法では対応できない経時変化するものも含む。品質特性基準値 qr から加工機の設定値 s を生成し、品質特性値 q をフィードバックし、目標値生成から目標値 o を出力する。制御器は目標値 o と制御量 y から操作量 u を出力してメカを制御し、ツールを通じてワークの加工を行う。フィードバック制御系の場合、品質特性値 q を用いて自動または手で目標値の調整を行い、品質特性値 q のばらつきが小さくなる制御を実現する。しかし、フィードバック制御系では外乱の影響が品質特性値 q に現れてから設定値 s の補正が行われる。そのため、加工材の個体差や気候や季節、日時のような同一条件とすることが困難な使用環境の差によっては、即座に適切な補正が行われず、良好な品質特性値 q が得られない。

このため本稿では図 2 のようにツール・ワークに印加される 2M 変動の外乱 d を入力、補正量 c を出力とする補正器を用い、設定値 s を補正するフィードフォワード制御系を考える。

補正器には製造時に起こりうる 2M 変動の外乱 d に応じた、品質特性値 q のばらつきが小さくなる適切な補正量 c を出力することが求められる。しかし、2M 変動の外乱 d は使用環境に大きく依存し、経時変化するため、一般的な数式モデルを用いた外乱補正を行うフィードフォワード制御や反復学習制御は適用できない。

そこで、フィードフォワード制御において困難となる補正器の設計を、機械学習を用いて容易に設計する手法について以降で説明する。

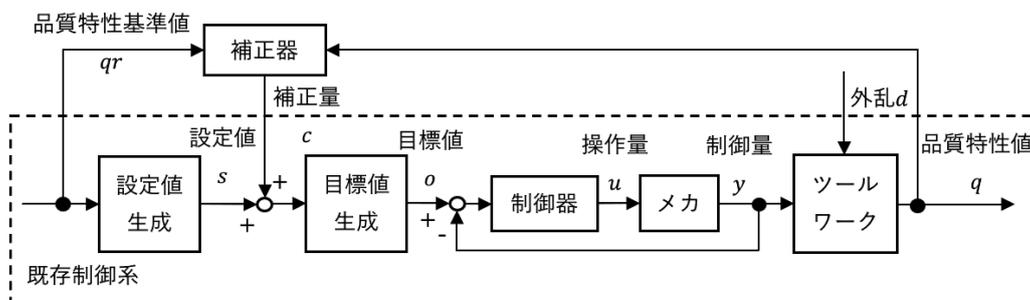


図 1 フィードバック制御系

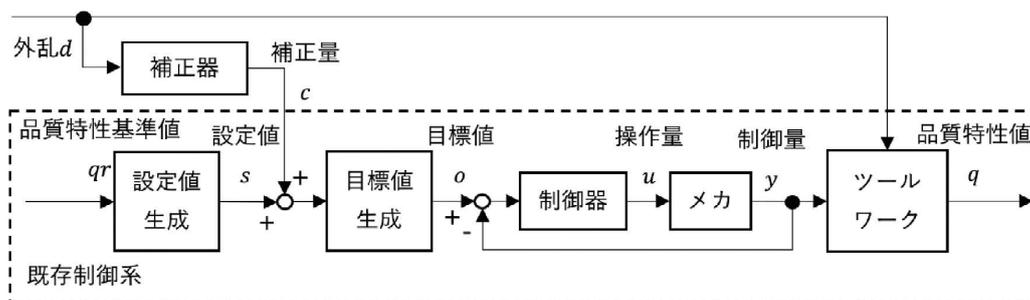


図 2 フィードフォワード制御系

なお、外乱は十分に小さければ品質に影響は無く、極めて大きいと制御系での補正は不可能となることは自明である。そこで、本稿では 2M 変動の外乱 d は、不良品を発生しうる大きさがあり、かつ、制御系の設計で想定されている範囲は越えないものと想定する。

3. 提案手法

3.1 補正器の構成

図 3 に提案手法となる補正器の構成を示す。補正器は特徴量演算部と予測器からなり、計測した 2M 変動の外乱 d から適切な補正量 c を予測する構成とする。

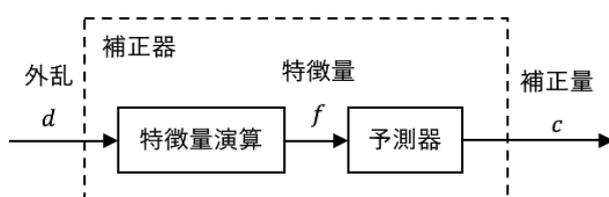


図 3 補正器の構成

特徴量演算部は、品質特性値に影響を与える 2M 変動の外乱 d をセンサで計測し、平均値、最大値等の特徴量化を行う。予測器は教師あり学習アルゴリズムを用いた予測モデルにより特徴量 f に応じて補正量 c を出力する。

3.2 補正器の構築手順

補正器の構築ではまず、従来手法（熟練者による設定やフィードバック制御等）による生産データ（補正量 c 、センサで計測した 2M 変動の外乱 d 、および品質特性値 q ）の収集を行う。なお、品質特性値 q を制御に用いないにもかかわらず、収集する理由について補足する。収集したデータは、従来手法に基づくため必ずしも良品ではなく、不良品のデータも含まれる場合がある。また、良品であっても品質特性値にはばらつきがあり、規格上下限に近いデータも含まれている。そのため、収集したデータ全てを学習データとして用いると品質特性値 q が大きくばらつく補正量 c を出力する予測モデルとなり、加工精度の向上は見込めない。そこで、データ前処理で、収集したデータの中から品質特性値 q のばらつきが小さいデータセットを選別して学習を行う。なお、予測器の学習はオフラインにて行い、生成した予測モデルおよびデータ前処理で選択した特徴量 f の演算を制御装置に実装する。

(1) データ収集

従来手法で製造した際の品質特性基準値 qr 、品質特性値 q 、センサで計測した外乱 d 、および従来手法により決定した補正量 c を含む生産データを収集する。

(2) データ前処理

本稿では、生産設備の繰り返し動作区間をフレームと呼ぶ。収集したデータは時系列データのため、フレームの特定区間毎に平均値、最大値等の統計的な特徴量を算出し、対応する補正量 c と紐付けてデータセットとする。特徴量演算部で用いる特徴量 f の選択には、因果分析や重要度解析等を使用することができる。データセットの中から品質特性値 q が品質特性基準値 qr から大きく外れているデータを削除し学習/評価データに分割する。なお、品質特性基準値 qr 、品質特性値 q は以降の処理に使用しないためデータセットからは削除する。

(3) 予測器の学習

特徴量 f から補正量 c を予測する回帰モデルを学習する。回帰には様々な手法があるが、本稿では高速に予測処理を実行可能な機械学習アルゴリズムである力学系学習木 (Dynamics Learning Tree, DLT)⁴⁾ を用いた。

(4) 評価

評価データを用いて予測精度の評価を行い、予測モデルの性能評価を実施する。

以上の手順で構築した補正器を、図 2 のフィードフォワード制御系に用いることにより、外乱 d の影響を打ち消す補正値 c が適切に決定され外乱抑制制御が可能となる。

4. 実験

4.1 実験対象

本実験では、AI コントローラ上に本手法を実装し、放電精密加工研究所製サーボプレス機「ZENFormer nano」に接続して下死点位置制御によるプレス加工を行った。

「ZENFormer nano」は増力機構にボールねじを採用した 4 軸直動式サーボプレスとなっており、スライドを面でコントロールし、 μm 単位での制御が可能となっている。図 4 に金型レイアウトを示す。サーボプレス機には、金型温度、製品厚等の各種状態を測定するセンサを取り付けている。順送加工により材料は左から右へと流れる。なお材料厚はロール交換時に事前に測定されているものとする。

板厚 1.00 ± 0.05 [mm]、幅 32.0 ± 0.20 [mm] の一般的な冷間圧延鋼板である SPCC-SD を使用して図 5 のフランジを製造し、中央のくぼみの厚さを 0.6 ± 0.01 [mm] となるようにプレス加工する。

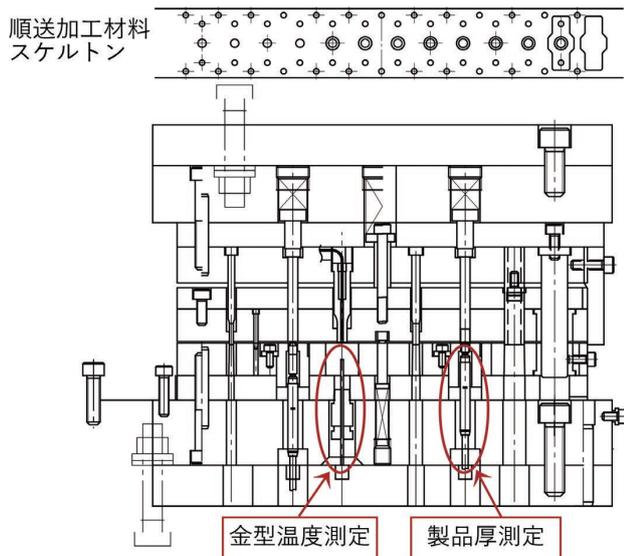


図4 金型レイアウト

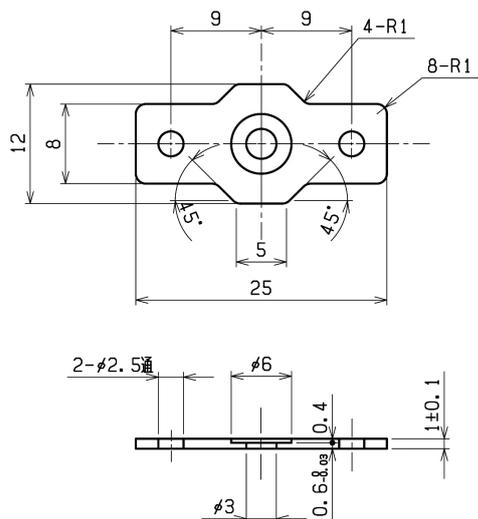


図5 製造物

また、図1、2に示した制御系との対応および本実験において共通となる条件・設定値を表1に示す。

表1 実験条件

項目	対象	条件・設定値
品質特性基準値 qr	目標製品厚	0.6 ± 0.01 [mm]
品質特性値 q	製品厚	—
設定値 s	下死点設定値	84.200 [mm]
補正量 c	下死点補正量	—
制御量 y	スライダ位置	—
外乱 d	金型温度、材料厚	—
—	成形速度	30 [mm/s]
—	下死点停止時間	500 [ms]
—	実験開始時の周囲温度	$20 \sim 20.9$ [°C]

4.2 補正量算出

本実験では図1の補正器の役割を人が担う (a) 手動補正、(b) 参考文献1) の手法を用いた自動補正、(c) 提案手法を用いた自動補正による加工精度や誤差を比較する。

(a) 手動補正 (従来手法)

定期的に取り、4箇所をマイクロメータで計測し、4箇所の平均製品厚が 0.6 ± 0.003 [mm] を超えた際に、作業者が下死点補正量を現在の補正量 ± 0.003 [mm] に手動で設定する。

(b) 自動補正 (従来手法)

プログラムにより、連続する100ショットの製品厚の平均値と目標値の差分が ± 0.003 [mm] を超えた際に、下死点補正量を現在の補正量 ± 0.003 [mm] に自動で設定する。

(c) 提案手法

金型温度と材料厚から特徴量 f を演算し、予測器により下死点補正量を毎ショット算出する。なお金型温度は制御中の測定のためショット毎に変動するが、材料厚はロール毎の事前測定のためショット毎には変わらないものとする。

4.3 提案手法の補正器の構築

3.2補正器の構築手順に従い、(b)自動補正による生産データを収集し、補正器の構築を行う。本実験では収集した生産データのうち、製品厚が 0.6 ± 0.003 [mm] 以内のデータを学習データとして用いる。特徴量演算は外乱 d の

平均値を用いる。なお、補正器構築のための生産データは、実験結果に示すデータ以外にも複数の材料ロールで収集を行っている。学習データの範囲を表2に示す。

表2 学習データ範囲

項目	学習データ
材料厚 [mm]	0.9940 ~ 1.0182
金型温度 [°C]	19.2 ~ 26.5

4.4 実験結果

(a) 手動補正、(b) 自動補正、(c) 提案手法をそれぞれ4000ショット行った実験結果について述べる。

(1) 外乱傾向

各手法実験時の平均材料厚を表3に示す。材料ロールの厚さの規格は 1.00 ± 0.05 [mm]である。各手法での実験毎に使用した材料ロールは異なるため平均材料厚も異なっている。

表3 平均材料厚

項目	(a) 手動補正	(b) 自動補正	(c) 提案手法
平均材料厚 [mm]	0.9996	0.9968	1.0061

図6に各手法実験時の金型温度の変化を示す。いずれも時間が経つにつれて温度が上昇する傾向がみられるが、実験日時の違い等の影響もあり、実験開始時の金型温度や温度上昇の仕方に違いがある。

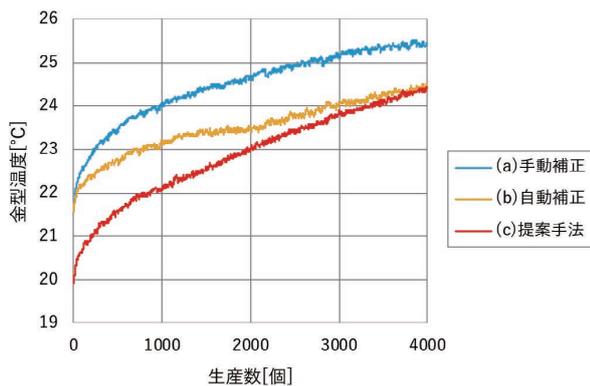


図6 生産数による金型温度の変化

(2) 補正結果

各補正手法を実行した結果の補正量を図7に示す。(a) 手動補正、(b) 自動補正に比べ、(c) 提案手法では補正量が金型温度の変動に細かく追従できていることが分かる。各手法の下死点補正量の初期段階の違い

いは材料厚と金型温度が反映されている。(a)、(b)の従来手法ではフィードバックによる遅れのため、初期値は0であり適切な補正量に達するのに(c)提案手法よりも時間がかかっている。

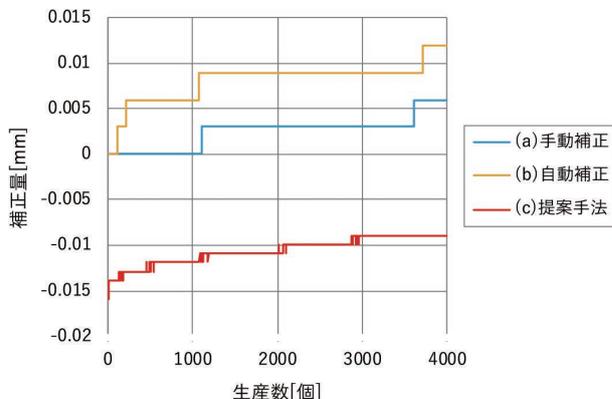


図7 生産数による下死点補正量の変化

(3) 品質特性値の比較

それぞれの下死点補正手法を適用し、品質特性値である製品厚を測定した結果を表4および図8に示し、以下で性能を比較考察する。

表4 製品厚

項目	(a) 手動補正	(b) 自動補正	(c) 提案手法
平均 [mm]	0.5966	0.5978	0.6005
標準偏差 [mm]	0.0012	0.0010	0.0008
MSE [mm ²]	1.272×10^{-5}	0.585×10^{-5}	0.096×10^{-5}
工程能力指数 (Cpk)	1.89	2.56	3.75

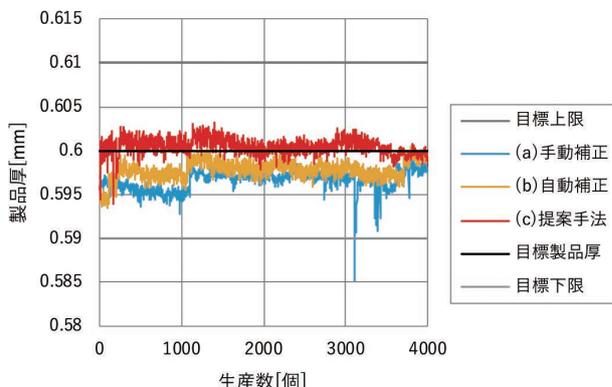


図8 生産数による製品厚の変化

(a) 手動補正

工程能力指数は1.89と工程能力としては十分であるが、生産初期の製品厚が目標下限側にあり、少ない頻度での抜き取りによる補正のため、目標製品厚から偏った製品厚となった。目標下限値を超える突発的な製品厚の変動は材料厚や金型温度に極端に大きな変化がないことから、一時的なゴミの噛み込みや潤滑状態による影響が考えられる。

(b) 自動補正

図9に実験開始時付近の製品厚を示す。(a)手動補正に比べ加工精度は高いが、同様に偏った製品厚となった。目標製品厚への収束に時間が掛かっているのは、補正に製品厚100ショットの平均値を用いた補正量とする手法のためと考えられる。

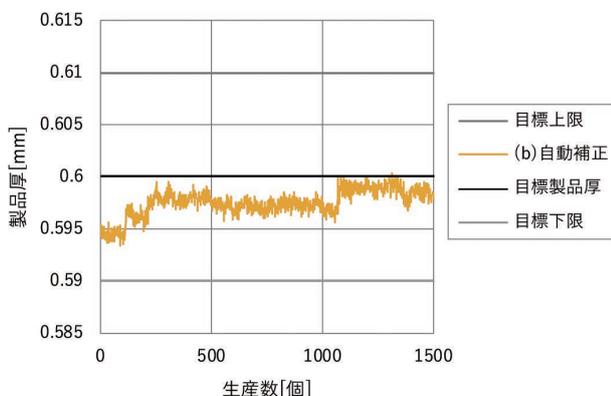


図9 製品厚 (自動補正)

(c) 提案手法

(b)自動補正に比べ、平均製品厚は0.0017 [mm]、製品厚のばらつきを示す標準偏差は0.0002 [mm]改善している。また、生産開始時から目標製品厚中心に分布する結果となっており、金型温度や材料ロールの変更による影響を補正量に適切に反映していると考えられる。その結果、より目標製品厚0.6 [mm]に近い製品厚とり、(b)自動補正に対しMSEは1/6に改善した。

5. むすび

本稿では、従来手法では十分に抑制できない外乱に対して、機械学習による補正量予測を用いた外乱補正手法を提案した。本手法をサーボプレス機下死点位置制御によるプレス加工に適用し、従来の自動補正に対してMSEが1/6となる加工精度の向上を確認した。

本手法では、機械学習を用いて使用環境により異なる2M変動の傾向に対しても適切な補正量を予測し、従来手法よりも高い精度で制御できることを示した。本実験では従来手法においても工程能力は十分であったが、本手法を

適用することで、工程能力の不足している工程の改善効果が得られる。また、従来よりも寸法許容差の小さい高精度な製品を製造できるようになると考えられる。

本実験では材料厚と金型温度の2つの外乱のみを考慮したが、機械学習では一般に、変数が多くなると必要な学習データ量が増加することや、次元の呪いの問題等があり、予測モデルの構築が困難となる課題がある。そのため、今後はより多くの変動要因を持つ対象での実験も必要と考えられる。また、本手法の汎用性、安定性、安全性についても今後、シミュレーションや別の対象への実装による評価を通じて検証を行っていく。

謝辞

実験にご協力頂いた、株式会社 放電精密加工研究所 産業機械事業部の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 村田力, プレスおよび金型におけるセンシング技術—サーボプレス・金型から見えるプレス加工のメカニズム—. 素形材, 2017, Vol.58, No.9, p.17-23.
- 2) 藤井高史, 上山勇樹, 阿部泰明, 反復学習制御によるサーボプレス機の下死点補正の一検討. 平成30年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 2018-08-28, p.19-22.
- 3) 見置孝昌, 出来仁太郎. AI搭載マシンオートメーションコントローラの開発 (1). OMRON TECHNICS, 2019, Vol.51, No.1, p.39-44.
- 4) 沼倉彬雄, 加藤成将, 佐藤和幸, 富沢武弥, 三好扶, 明石卓也, 金天海. 力学系学習木—連続力学系の階層型学習. 情報処理学会第77回全国大会, Vol.2015, No.1, p.993-994.

執筆者紹介



長林 洋輔 NAGABAYASHI Yosuke
インダストリアルオートメーションビジネス
カンパニー
技術開発本部 第1技術部
専門：データ工学



藤井 高史 FUJII Takashi
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：制御工学
所属学会：電気学会、計測自動制御学会



山本 紳太郎 YAMAMOTO 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
技術開発本部 第1技術部
専門：ソフトウェア工学

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

データ抽象化を用いた制御アルゴリズム単純化によるロボットの多種ワーク高速ハンドリングの実現

阿部 将佳, 川上 真司, 金井 聡庸, 齊藤 ゆみ

近年、日本をはじめとする製造業からサービス業へのシフトが進んだ国において、質の高い労働者の人件費が高騰しており、人手が中心となっていた中品種中量生産現場におけるロボットの自動化ニーズが高まっている。そこで我々は、中品種中量生産の組立前工程で必須となるキッティング工程に着目し、生産性を落とさず人の置き換えが可能となるよう、(1) 人同等以上の速度で、(2) 位置姿勢を合わせながら、(3) 多様な部品を決められた場所に並べられるロボット技術の実現性を検討した。

既存技術で課題となる多様な部品への対応のうち、ハードウェア面の課題は我々の既存ハンドを改良することで対応した。本稿では、部品の品種毎に対応が必要となりプログラム工数が増大するソフトウェア課題に対して、ロボットのタスク実行に必要な抽象化データと、ロボットが取得するセンサデータを自動で抽象化データに変換し制御に用いるアーキテクチャを定義し、プログラム工数の増大なくタスクを完遂できるロボットによる高速ハンドリング手法を紹介する。また、本手法を用いてキッティングの実システムを構築し、(1)~(3) を達成したことも報告する。

Realization of the High-Speed Robot Manipulation for Variety Parts by Data Abstraction and Simplified Control

ABE Masayoshi, KAWAKAMI Shinji, KANAI Akinobu and SAITOH Yumi

In recent years, the labor cost of high-quality workers has been rising in Japan and other countries that have shifted from manufacturing to services, and there is a growing need to automate robots in medium- to low-volume production, which has been done mainly by hand. Therefore, we focused on the kitting process, which is essential in the pre-assembly process of medium- and low-volume production, and examined the feasibility of a robot technology that can (1) perform at a speed equivalent to or faster than that of a human, (2) adjust its position and orientation, and (3) arrange various parts in a predetermined location, so that it can replace human workers without reducing productivity.

Among the issues with the existing technology, the hardware issues were addressed by improving our existing hand. In this paper, we define the abstract data required for robot task execution and an architecture that automatically converts the sensor data acquired by the robot into abstract data for control, in order to solve the software problem that requires support for various parts and increases the manpower required for programming. This paper introduces a high-speed handling method using a robot that can complete tasks without increasing the programming effort. We also report the construction of an actual kitting system using our method and the achievement of (1) to (3).

1. まえがき

従来、産業ロボットは、自動車業界の塗装や溶接など、精度と効率を要求される繰り返し作業を中心に活用されて

きた。一方、様々な種類の物を扱い、位置誤差の補正など環境に合わせて作業することが要求される現場では人が主に従事してきた。近年、日本をはじめとする製造業からサービス業へのシフトが進んだ国においては、質の高い労働者の人件費が高騰しており、出荷現場における完成品の

Contact : ABE Masayoshi masayoshi.abe@omron.com

箱詰めや食品工場における食品の整列など、形状が似た製品を扱う少品種多量生産現場の工程で産業ロボットの導入が進み始めている。今後は、ロボットの中品種中量生産現場への適用が期待されている。そこで、本研究では中品種中量生産のデジタル機器の組立工程の前工程として必須となるキッティングに着目し、自動化を検討した。人からロボットに置き換えて、生産性を維持するためには、(1) 人同等以上の速度で、(2) (部品の) 位置姿勢を合わせながら、(3) 多様な部品を決められた場所 (以後、「プレイス場所」と呼ぶ) に並べられる能力がロボットに求められる。

従来、部品 (ワーク) を人同等以上の速度でハンドリングするために、ワークに応じた治具の設計で対応してきた¹⁾。また、ロボットが作業に応じて自律的に位置姿勢を合わせる (補正する) ために、センサを用いたフィードバック制御が検討されてきた²⁾。しかし、いずれの方法でも、人同等以上の速度による位置姿勢誤差の補正という (1) (2) を両立したワークのハンドリングができていない。これに対し、環境との接触を積極的に活用するソフトロボティクスという研究領域があり、この領域における、環境との接触を活用して位置姿勢誤差を推定および補正する手法を利用すると、人同等以上の速度で組立タスクを実行できることを Karako らが実証している³⁾。しかし、この手法はリング状のワークのシャフト挿入タスクのみに対応しており、ワークやプレイス方法の多様性には対応出来ない。

本研究では、人同等以上の速度で位置姿勢誤差を推定し補正する Karako らの研究³⁾ を先行研究とし、多種ワーク対応性の向上を本研究の目的とする。多種ワーク対応において課題となるのは、(a) 多種ワークに対応したハードウェアの実現と、(b) ワーク個別に制御プログラムを実装することに伴い増加する人的コストの削減であるが、(a) の課題に対しては、先行研究³⁾ で開発したハンドを多種ワーク対応向けに改良して対応した。(b) の課題に対しては、キッティング中に得られるセンサデータを階層化し、キッティングタスクに共通で、かつ、ワークや姿勢に依存しない抽象度の高いデータを出力するアーキテクチャを定義し、このワークや姿勢に依存しない抽象データからアーム・ハンドへの指令データを生成することで対応した。また、(a)、(b) の解決手法を用いたキッティングシステムを構築し、人同等以上の速度で、位置姿勢を合わせながら、多様な部品を決められた場所に置くことも確認した。

本稿は、課題 (b) の解決手法を中心に報告する。2章で多種ワークに対応して人同等以上の速度で位置姿勢ずれを自律的に補正する制御系を実現するセンサデータの抽象化手法と、この抽象化したデータを用いた制御系について記述する。3章でキッティングシステムを構築するにあつ

て前提としたハードウェアと動作戦略、そして、実際に実装した抽象化したデータと、システムについて記述した後、4章で構築したシステムによるキッティング作業の評価結果を示す。そして5章でまとめと今後の展望について述べる。

2. 提案する手法

本研究では、キッティングの要件である人同等以上の速度で位置姿勢誤差を補正するために、Karako らの環境を活用して位置姿勢誤差を推定し補正する手法³⁾を採用し、残る課題となる多種ワーク対応性向上の課題に取り組む。様々なワークを扱う課題は、様々なワークを把持可能なハードウェア面の課題と、ワークやプレイス場所ごとに制御プログラムを実装し調整するソフトウェア面の課題に分けられるが、前者のハードウェアに対しては、開発済みのハンドに機能追加したハンドを用意して対応した (詳細は3章を参照)。本章では、後者の制御ソフトウェアの実装と調整について記述する。

2.1 方針

先行研究³⁾ においてワークやプレイス場所ごとに制御プログラムを実装することになる原因は、ワークやプレイス場所に依存したデータを用いているためである。そこで我々は、ワークやプレイス場所が変わっても同じ制御プログラムでキッティング作業を実行できるように、ロボットに装着した様々なセンサデータや、アームやハンドのモータの角度データといった未加工データを直接扱わず、キッティングの自動実行に必要で、かつ、ワーク依存性・作業依存性の無い抽象データに変換し、この抽象データで制御することにする。

2.2 抽象データの要件定義

2.1 節の方針で重要となる抽象データの要件を、キッティングの自動化に求められる以下の要件から定義する。

- 要件 1. アームは、ワークやプレイス場所に合わせて自律的に位置姿勢を補正すること
- 要件 2. ハンドは、早い作業でもワークを落とさないように安定して把持すること
- 要件 3. 人同等の時間でキッティングすること

2.2.1 要件 1 から導く抽象データ

図 1 に示すように、(a) ピック時において、上位システムから与えられたハンド把持位置 (必ずしもハンドの中心に一致しない) でワークを把持できるように、「ハンド把持位置とワーク想定把持位置」の位置姿勢を合わせるようにアームを制御する。プレイス時においては、「ワークを把持した状態のハンドを、ワークを含めて一体的なハンド

とみなし、把持したワークの面や辺、角あるいは重心」と「プレイス場所のガイドや印」の位置姿勢を合わせるようにアームを制御する。このように制御することで、ピック時とプレイス時のそれぞれで個別のプログラムを作成することなく、同じ制御で位置姿勢誤差を補正できるようになる。また、(b) 指を動かした際に指の高さが変わるため、アームはその高さの変化に追従する必要がある。

(a) のピックとプレイス時における位置姿勢を合わせるために、上位システムやセンサから得られる位置姿勢に関する情報を利用する。センサは、「2対象間の位置姿勢誤差相当値 $\Delta x (\in R^6)$ 」を測定可能なセンサ（たとえばビジョンセンサ）や「ハンドが受ける外力相当値 $f^{hnd} (\in R^6)$ 」を測定可能なセンサ（例えば力覚センサ）を利用する。ハンドが受ける外力を測定するセンサは、ワークにハンドが接触したことや、把持したワークがガイドに接触したことを感知することで位置姿勢を合わせる用途で利用する。位置姿勢誤差を推定し補正する場合、 Δx は最終的に誤差量が0になるよう制御するので、数十%のスケール誤差が含まれていても問題なく機能する。また、 f^{hnd} は、接触していない時は0で、接触力に合わせて増減すれば良いので、数十%のスケール誤差が含まれていても問題なく機能する。このため、これらセンサには、厳密なキャリブレーションは不要である。これら2つの「2対象間の位置姿勢誤差相当値 Δx 」と「ハンドが受ける外力相当値 f^{hnd} 」は、ワークや作業に依存しないため、それぞれ抽象データの1つとする。

次に (b) の指の動きに合わせてアームの高さを追従するために、「指の角度情報 q_i^{act} 」を利用する。この角度情報はワークや作業に依存しないため、抽象データの1つとする。

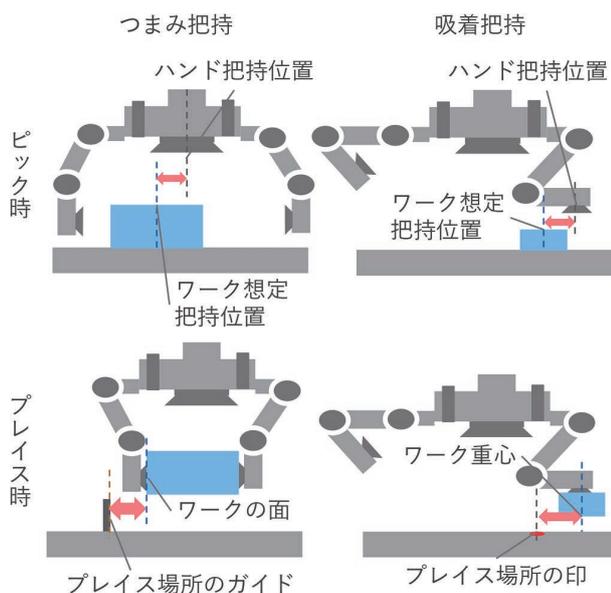


図1 各把持方法におけるピック・プレイス時の位置誤差

2.2.2 要件2から導く抽象データ

ワークを複数の指で把持する場合は、指がワークから受ける外力が、その接触点/面において法線方向に生じている状態が、その指配置における最も安定性の高い状態として必要である⁴⁾。また、吸着など指単独で把持する場合は、「上位システムから指定された把持位置でワークの想定把持位置を吸着把持している状態」が安定した把持状態である。どちらの場合も、安定して把持できていないと、指に対してワークが傾き、各指について指の面の部位（例えば、指先と指根本）によって受ける力に偏りが出る。

このため、ハンドがワークを想定通りに把持できているかどうかを把握するため、「指 i の指の面における力の偏り」を観測する。この値は偏りがなときは0となり、偏りがあるときはその偏りの大きさに応じて増加する値である。この「指 i の指の面における力の偏り相当値 Δf_i^{fns} 」は、ワークや作業に依存しないため、抽象データの1つとする。

本節の最初に記載したように、複数の指で把持する場合は、「それぞれの指に一定以上の力がかかっていること」を感知する必要がある。この「指 i が受ける外力」は、指が受ける外力に応じて増減し、外力がないときは0になる値であればよい。また、0を少し超えた値を保つように制御するので、推定している力に数十%のスケール誤差を含んでも機能し、センサの厳密なキャリブレーションは不要である。この「指 i が受ける外力相当値 Δf_i^{fns} 」は、ワークや作業に依存しないため、抽象データの1つとする。

2.2.3 要件3から導く抽象データ

人は、腕を動かしながら独立して指を動かし、作業によっては腕と指を連携して動かすことで、効率的に作業する。本システムも、同様の仕組みを採用する。このため、アームとハンドには、独立に動作できるように指令値を個別に入力する。また、必要に応じてお互いの作業の達成を待ってから、連携して次の作業を実行開始できるように、それぞれの「作業の達成度合い」を出力する。アームもハンドも、現在値が制御の目標値に近づくと速度を落とすことに着目し、「作業の達成度合い」として、作業依存性のない「アーム速度の絶対値 $|v^{arm}|$ 」と「ハンド各指の角速度の絶対値の平均 $|q^{act}|$ 」を抽象データの1つとして採用する。

2.3 提案方針に基づく制御系の構成

2.3.1 タスクの実現

2.2節に記載の要件1、要件2の抽象データを用いてフィードバック制御をおこなう。この制御はワークや作業に依存せず、目標状態に達するとアームとハンドの動きが

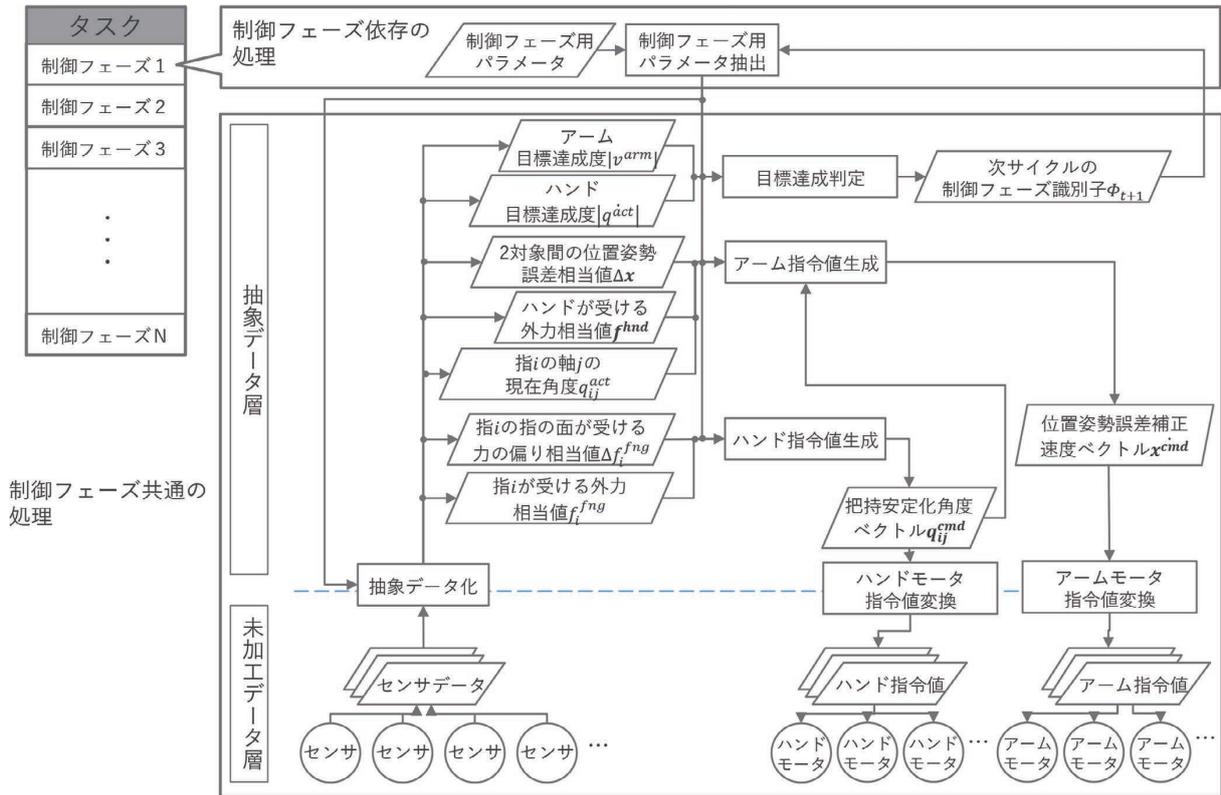


図2 提案方針に基づく制御系の構成

止まる。この動きが止まることは、要件3の抽象データが「0」となることに等しいため、目標状態に達したことの判定は、要件3の抽象データにより行う。この制御により、たとえば「ワークの場所にアームを移動する」、「ワークを把持する」といった、キッキングを構成する1つ1つの動作が実現できる。この1つ1つの動作を本稿では「制御フェーズ」と呼ぶ。この「制御フェーズ」を複数用意し、順に実行することで、キッキングなどの「タスク」を実現する。(図2の左側)

図2の右側に示すように、各制御フェーズの処理は、その制御フェーズに依存するパラメータ(2.3.4節で詳述)を、すべての制御フェーズで共通の処理に代入することで実現する。制御フェーズ共通の処理では、2.1節の方針に基づき、センサが出力する未加工データ層のデータを一旦、抽象データ層のデータに変換し、抽象データ層で指令値を生成して、再び、アームおよびハンドのモータへの未加工データ層の指令値に変換する構成となっている。「未加工データ層」はセンサや、アームおよびハンドのモータが扱うデータを処理し、「抽象データ層」はワークや作業に依存しないデータを処理する。

2.3.2 指令値の生成

「制御フェーズ」では、センサが出力する未加工のセンサデータは、「抽象データ化」機能により、2.2節に記載の

要件を満たす抽象データに変換する。「抽象データ化」機能には、センサデータから2.2節に記載の要件を満たす抽象データを算出する式を定義している(本研究で作成したキッキングシステムにおける抽象データの定義は3.3節を参照)。

アームへの指令値である「位置姿勢誤差補正速度ベクトル x^{cmd} 」は、「アーム指令値生成」機能で、抽象データ f^{hnd} 、 Δx 、 q_i^{act} を用いて以下のように生成する。

$$x^{cmd} = r_{\Phi}^d + K_{\Phi}^{fh} f^{hnd} + K_{\Phi}^{xa} \Delta x - is_{\Phi}^{hv} \text{ave}_{i=1..n_f} (J(q_i^{act}) q_i^{cmd}) \quad (1)$$

ここで、 r_{Φ}^d はフェーズごとに設定するアームの目標速度、 K_{Φ}^{fh} と K_{Φ}^{xa} はフェーズごとに設定する単位換算行列 ($\in R^{6 \times 6}$)、と is_{Φ}^{hv} はその項を実行するか否かのフラグ(実行する場合は1、実行しない場合は0)、 n_f はハンドの指の数、 $\text{ave}()$ は引数となるベクトルの要素ごとに平均値を計算する関数、すなわち、 a_i を任意のベクトルとしたときに以下の式で定義される関数である。

$$\text{ave}_{i=1..n_f} (a_i) = 1/n_f \sum_{i=1}^{n_f} a_i \quad (2)$$

q_i^{act} は指 i の各軸 j の角度 q_{ij}^{act} からなる角度のベクトル、 $J(q_i^{act})$ は指 i のハンド各軸の角速度からハンド各指の先端速度への対応を表すヤコビ行列、 q_i^{cmd} は指 i の各軸 j の指令角速度 q_{ij}^{cmd} からなる角速度のベクトルである。

\mathbf{x}^{cmd} の生成式は、先行研究³⁾におけるアーム指令値を定義した以下の式の $\mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta})$ にかかる括弧内の式を多種ワーク対応のキッキング用に拡張したものである。

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_c = \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) \cdot (\dot{\mathbf{r}}_d + \mathbf{G}\Delta\hat{\mathbf{p}} - \mathbf{V}_c\hat{\mathbf{e}}_0) \quad (3)$$

我々が提案する \mathbf{x}^{cmd} の生成式において、位置姿勢誤差を認識できている場合は $\dot{\mathbf{r}}_d = \mathbf{0}$ 、 $\mathbf{K}_\Phi^h = \mathbf{0}$ とし、 $\mathbf{K}_\Phi^a\Delta\mathbf{x}$ の項で誤差補正を行うための指令値を生成する。また $ave()$ の項は各指 i の指先速度の平均値を表しており、指による摘まみ上げ動作による位置変化に追従することで指先の位置を一定に保つための項である。指先を動かしたときに位置を一定に保つ必要がない場合は $is_\Phi^{hv} = 0$ とする。

次に、ハンドの各軸への指令値である「把持安定化角度ベクトル \mathbf{q}_i^{cmd} 」は、「ハンド指令値生成」機能で、抽象データ Δf_i^{fng} 、 f_i^{fng} を用いて以下のように生成する。

$$q_{ij}^{cmd} = q_{ij\Phi}^d - k_{ij\Phi}^{f\Delta} \int_0^t \Delta f_i^{fng} dt + k_{ij\Phi}^{ff} \int_0^t f_i^{fng} dt \quad (4)$$

ここで、 $q_{ij\Phi}^d$ は指 i の軸 j のフェーズごとの目標角度、 $k_{ij\Phi}^{f\Delta}$ と $k_{ij\Phi}^{ff}$ はフェーズごとに設定する単位換算係数である。

q_{ij}^{cmd} の生成式は、先行研究の手法³⁾におけるハンドの目標角度 q_{dj} の算出に相当する。 $q_{ij\Phi}^d$ の位置に指を動かした後、複数の指で把持する場合は項 $k_{ij\Phi}^{f\Delta} \int_0^t \Delta f_i^{fng} dt$ で片側の指が押し勝たない位置になるよう調整し、項 $k_{ij\Phi}^{ff} \int_0^t f_i^{fng} dt$ で一定の力で把持するように角度を調整している。吸着など単独の指で把持する場合は $k_{ij\Phi}^{f\Delta} = k_{ij\Phi}^{ff} = 0$ とする。

アームやハンドの各軸モータを動作させるために必要な指令値の単位には、これらの指令値ベクトルから実際に使用しているモータドライブのインタフェースに合わせて変換する。

2.3.3 アームとハンドの連携実行の実現

アームとハンドを独立して動かすことが求められるため、アームとハンドへの指令値は同時に出力する。一方で、必要ときにはアームとハンドが連携して次の動作を同時に開始できるように、「抽象データ化」機能は、アームとハンドそれぞれの「作業の達成度合い」である「アーム目標達成度 $|v^{arm}|$ 」、「ハンド目標達成度 $|q^{act}|$ 」を出力している。「目標達成判定」機能が、これらの目標達成度と「許容誤差 $\boldsymbol{\varepsilon}_\Phi^{arm}$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}_\Phi^{hnd}$ 」を参照して、次の「制御フェーズ」に進めるかどうかを決める。アームとハンドを同じタイミングで動作させたい制御フェーズにおいて、アームとハンドの目標達成度のどちらか一方が「許容誤差 $\boldsymbol{\varepsilon}_\Phi^{arm}$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}_\Phi^{hnd}$ 」を超えている場合、「目標達成判定」機能は、現在の「制御フェーズ」の識別子を出力し、両方の目標達成度が目標を達成する場合、次の「制御フェーズ」の識別子を出力し、制御全体は次の「制御フェーズ」に移行する。

2.3.4 制御フェーズごとのパラメータ

「制御フェーズ」を、「ワークの場所にアームを移動する」、「ワークを把持する」といった動作を実行できるものに特徴づけるデータが「制御フェーズ用パラメータ」である。本手法において、ユーザもしくは上位系が設定するのはこのパラメータのみである。このパラメータには、前述の目標達成を判断するための「目標値 r_Φ^d 、 $q_{ij\Phi}^d$ 」や「許容誤差 $\boldsymbol{\varepsilon}_\Phi^{arm}$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}_\Phi^{hnd}$ 」と、2.2節に記載の要件を満たす抽象データから指令値を生成する際の単位変換係数 \mathbf{K}_Φ^h 、 \mathbf{K}_Φ^a 、 is_Φ^{hv} 、 $k_{ij\Phi}^{f\Delta}$ 、 $k_{ij\Phi}^{ff}$ が存在し、「制御フェーズ」ごとに固有の値を設定する。「制御フェーズ」が実現する動作は、基本的な動作になるため、こうしたパラメータは、一度設定すれば様々なタスクで流用できる。

「制御フェーズパラメータ抽出」機能が、現在の「制御フェーズ」に基づき、該当する「制御フェーズ用パラメータ」を、「抽象データ化」や「目標達成判定」などの各機能に出力する。

3. システムの実現

本研究では、2章で提案した制御系を実装し、人同等速度で動作するキッキングシステムを構築した。本章ではこのシステムについて記述する。

3.1 前提としたハードウェア

本節では、システム実現のために利用した機器について記述する。

3.1.1 吸着機構と複数センサを備えた柔軟ハンド

人同等速度で動作するキッキングシステムを構築するにあたり、先行研究³⁾で開発したハンドに対し、以下の機能要件を追加した改良ハンドを作成した。

1. 1つのハンドで、対象とする様々なワークを把持できること
2. 2.2節の要件を満たす抽象データを算出できるように、把持/非把持の各状態で、ハンドに対するワークの相対的な位置姿勢誤差を認識できること

まず1つ目の要件に対応するため、各指に大小の吸着パッドによる吸着機構を取り付け、4種類の把持方法で図3に示す範囲のワークを把持できるようにした。

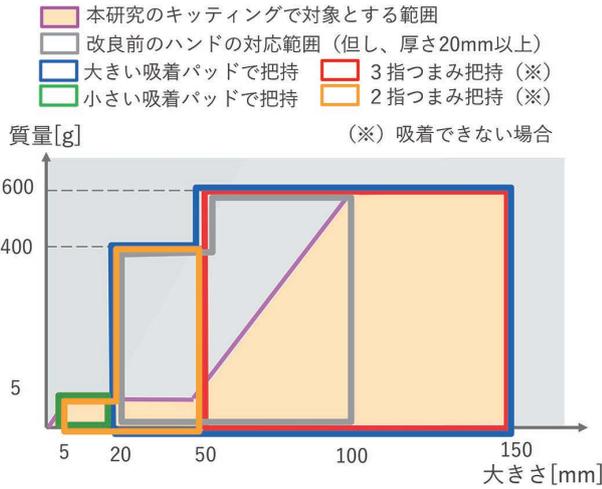


図3 対象ワークの把持方法

次に、2つ目の要件を満たすように、掌の中心にビジョンセンサ用カメラを、各指の吸着パッドに、その押込量1軸、姿勢2軸の合計3自由度の変形量を静電容量変化により取得可能な吸着パッドセンサ⁵⁾を取り付けた(図4)。これにより、非把持状態、把持状態のそれぞれでワークとの位置姿勢誤差を取得できるようにした。

3.1.2 ms オーダーで処理可能なシステム構成

先行研究³⁾が提案する手法では、システムの高速度性を確保するため、制御周期を1msとしている。我々が今回作成するシステムも、この方針に倣い、制御周期の目標値をms オーダーとした。構築したシステムを図5に示す。

このシステムの特徴は以下の3点である。

1. ビジョンセンサ用カメラからの画像データはデータ量が多いので、一旦、USB3.0で接続した専用PCで処理して必要な特徴量だけを1ms以内で抽出し、その特徴量のみをリアルタイムコントローラに送信し、トータルでレイテンシー含め2ms以内で処理

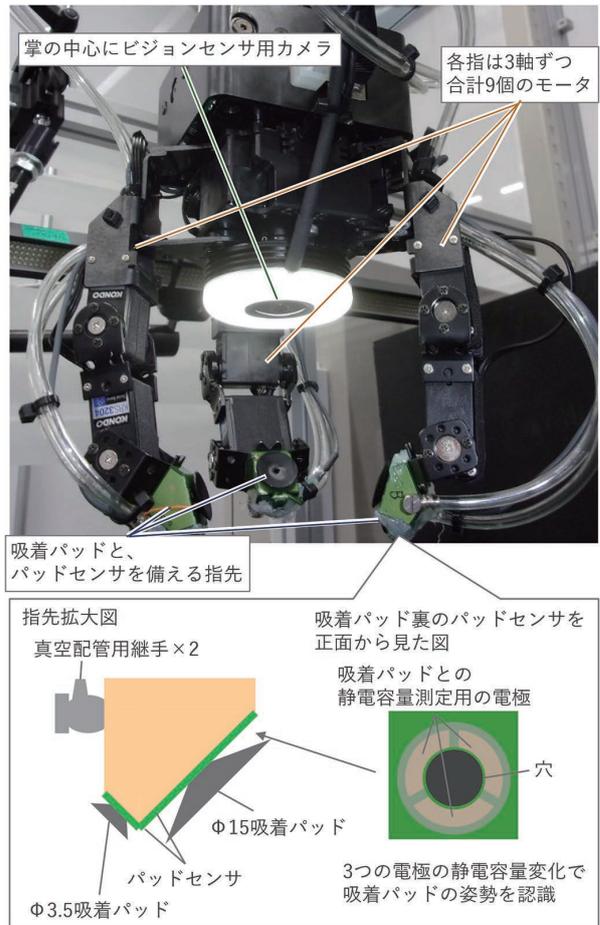


図4 本研究で用いたハンド

2. コントローラやマイコン間は100BASE-TのEthernetで接続し、各プロセスが最大のスループットを發揮できるようにデータ送受信時のトランスポート層のプロトコルをコネクションレス型のUDPにする
3. ハンドマイコンの処理を可能な限り早くするために、モータへの指令値出力後のモータ内処理とセンサからのデータ受信によるハンドマイコン処理を並

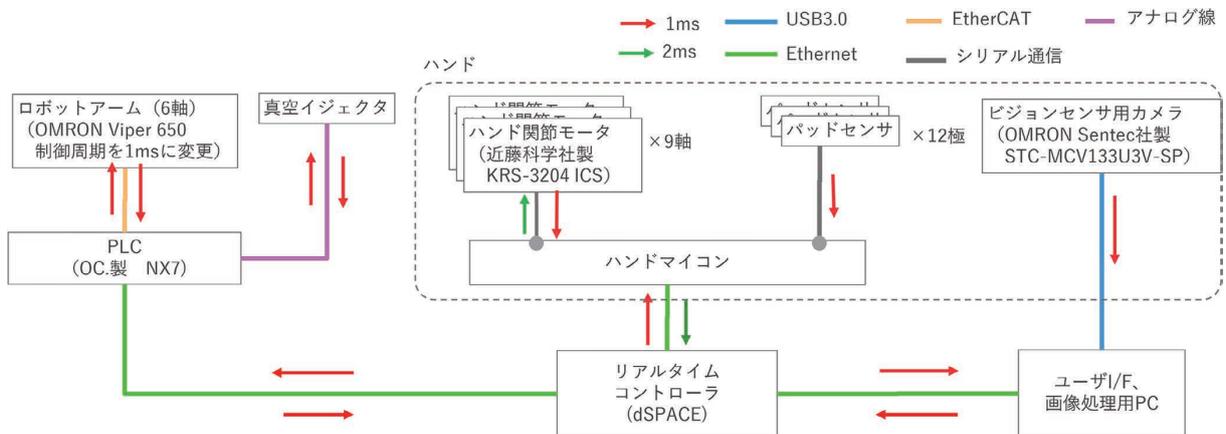


図5 本研究で構築したシステムの構成図

列に処理できるようにピンアサイン。またセンサデータを必要な精度に落とすことで処理を高速化。以上により、1 サイクル 2ms 周期での処理を担保

3.2 キッキング制御プログラムの作成と動作戦略

図2の「タスク」における、各「制御フェーズ」は、例えば、「ワークの上へ移動しながらワークに当たるまでアームを下ろす」や「吸着パッドによりワークを吸着保持する」といった、1つの目標を達成する動作である。こうした動作を実現できる「制御フェーズ用パラメータ」を設定し、「制御フェーズ」の実行順序をタスクに設定することで、キッキングを実行できる制御プログラムを作成した。

この「制御フェーズ」の実行順序を設定することは、ロボットの動作戦略を策定することにあたる。今回、この動作戦略の策定にあたり、先行研究³⁾による環境を活用して位置姿勢誤差を推定し高速に補正する考え方を採用する。すなわち、①「ロボット側に受動変形要素を持たせることによる、指先とワーク、ワークと環境との高速接触時の衝撃緩和」と、②「ワークと環境の幾何学的拘束と受動要素との力のつり合いによって現れる受動要素の、変形量観測に基づくワークと環境間の幾何学的関係性の推定」と、③「①②を活用した高速位置姿勢合わせ制御」を行う。今回のハンドでは、受動要素は吸着パッドであり、受動要素の変形量計測は吸着パッドセンサで行う。

これらを利用すると、ワークの高さ情報が不確実な中で把持も、吸着パッドの受動変形に頼ることで高速にハンドをワークに接触させることが可能となる。また、把持したワークをガイドに合わせて置く際も、高速にワークをガイドに接触させることが可能となり、事前にわかっているワークとガイドの幾何学情報を用いることで、ワークとガイド間の相対的な位置姿勢ズレ関係の推定や、それに基づくズレ解消制御が可能となる。

3.3 抽象データの定義

本節では今回作成したキッキングシステムにおける各抽象データの定義を示す。

3.3.1 2対象間の位置姿勢誤差相当値 Δx

2対象間の位置姿勢誤差相当値 Δx は、以下のように定義し、6次元ベクトルである。

$$\Delta x = (1 - i_{\Phi}^{VFB}) \Delta X + i_{\Phi}^{VFB} K^{CAM} R^{arm} \Delta cam \quad (5)$$

ここで、 i_{Φ}^{VFB} は実行中のフェーズにおいてカメラによる位置姿勢誤差補正 (Visual feedback) を実行するか否かのフラグ (実行する場合は1、実行しない場合は0)、 $\Delta X (\in R^6)$ はそのフェーズにおける目標位置姿勢と現在位置姿勢の差分、 $K^{cam} (\in R^{6 \times 6})$ はセンサに対する単位変換行

列、 $R^{cam} (\in R^6)$ はロボットの姿勢に応じて決まり、カメラの座標系をロボットの座標系に合わせる回転行列、 Δcam はカメラによる Visual feedback 実行時のセンサ値であり、ピック時は「ハンド把持位置とワークの想定把持位置」、プレイス時は「把持したワークの重心とプレイス場所の印」に関する、カメラ上の画素における2点間の距離誤差と把持姿勢に対する対象の姿勢誤差 (水平方向2軸と鉛直軸回りの回転方向の3自由度のセンサ値を含み、残る3自由度の値は0) である。

3.3.2 ハンドが受ける外力相当値 f^{hnd}

ハンドが受ける外力相当値 $f^{hnd} (\in R^6)$ は、以下のように定義したベクトルである。

$$f^{hnd} = \text{ave}_{i=1..n_f} (k^p n_i^p p_i) \quad (6)$$

ここで、 k^p は吸着パッドの変形量から力に単位変換するための係数、 $n_i^p (\in R^6)$ は指 i の吸着パッドの面に対する法線単位ベクトル (把持安定化ベクトル計算の都合4-6要素目を0にした6次元ベクトル)、 p_i は指 i の吸着パッドセンサが測定した吸着パッドの変形量である。

3.3.3 指 i の指の面が受ける力の偏り相当値 Δf_i^{fng}

指 i の指の面が受ける外力の偏り相当値 Δf_i^{fng} はスカラー量であり、以下のように定義する。

$$\Delta f_i^{fng} = k^{hnd} h_i \cdot \Delta x_i^{hnd} | \text{ave}_{i=1..n_f} (\Delta p_i) | \quad (7)$$

ここで、 k^{hnd} は吸着パッドの変形量から力に単位変換する係数、 $h_i (\in R^2)$ は指 i の可動面における水平方向のみの単位ベクトル、 $\Delta x_i^{hnd} (\in R^2)$ は指 i の可動面における目標位置と実際の指先の位置の誤差ベクトル、 Δp_i は指 i のパッドセンサの指先の値と、指の根本の値の差分、 \cdot はベクトルの内積演算である。

複数の指で把持する場合で、押し勝っている指があると、その指が目標位置よりもより内側に入り込み、位置誤差 Δx_i^{hnd} とパッドの歪み Δp_i となって表れる。この指 i の方向成分だけ取り出したものを外力の偏り相当値として定義した。

3.3.4 その他の抽象データ

- ・指 i が受ける外力相当値 f_i^{fng} : スカラー量。吸着パッドセンサが測定した吸着パッドの変形量 p_i を用いる
- ・各指の現在角度 q_{ij}^{act} : スカラー量。ハンドの各軸モータのエンコーダから取得する
- ・アーム目標達成度 $|v^{arm}|$: スカラー量。アームの手先速度であり、アームのヤコビ行列から算出する
- ・ハンド目標達成度 $|q^{act}|$: スカラー量。ハンド各軸の角速度の絶対値の平均値であり、モータから取得した角速度から算出する

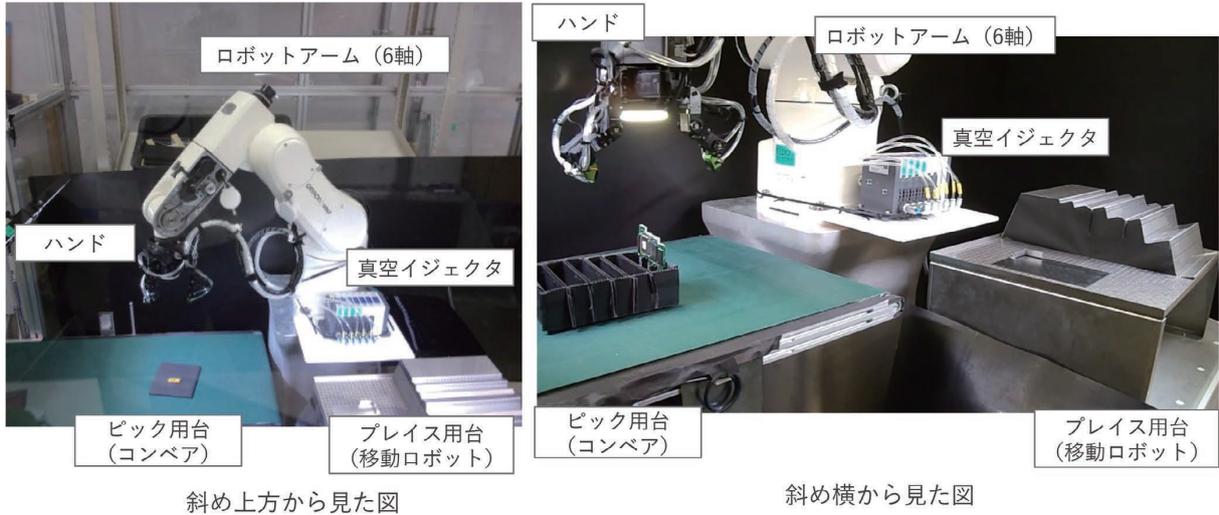


図6 提案手法により構築したキッティングシステム

3.4 構築したキッティングシステム

本研究では、3.3節で定義した抽象データ算出の式を、図2の「抽象データ化」機能に実装し、3.2節で作成した制御プログラムを3.1.2節に記載のシステムのリアルタイムコントローラで実行できるようにし、3.1.1節に記載のハンドを使用したキッティングシステムを構築した。そしてこのシステムの周りに、ピックするワークを配置するコンベアとブレイス先となるワーク置場を備えた移動ロボットを配置した(図6)。

4. 評価

本章では3章で構築したシステムに対して実施した評価実験について記述する。評価実験では、キッティング工程の要件として設定していた、(1) 人同等以上の速度で、(2) 位置姿勢を合わせながら、(3) 多様な部品をブレイス場所に、並べる事ができることを確認する。評価で用いるワークは、社内の生産現場での活用を想定して、オムロン製品であるPLC(Programmable Logic Controller)とサーボドライバを構成する部品とした。評価における目標値を表1に示す。位置姿勢誤差の対応性の目標値である±10mmは、本システム外に設けられた部品検出用のカメラから先見的に与えられる部品位置と真の部品位置の最大誤差として設定し、1.5deg.は、水平方向に20cm移動した際に高さが5mm変わるような傾斜であり、アルミフレームなどで作業台を作成した場合に生じる最大の角度誤差として設定した。位置誤差補正の目標値は、次の組立工程で問題にならないと想定される1mm以内とした。高速性に関する目標値は、著者が同じ環境で実際に実行した時の時間が平均3.8秒、最大4.6秒であったので、同等程度として4秒を設定した。

表1 評価項目に対する評価実験の目標値

評価項目	目標
1. 高速性	1 ワークあたり 4 秒以内でキッティングできること
2. 位置姿勢誤差対応性	ワークとブレイス場所として与えられた位置姿勢情報と真の情報に誤差(±10mm、±1.5deg.)があっても、誤差を自律的に1mm以内に補正し、キッティングできること
3. 多種ワーク対応性	図7の赤枠内のワークに対応

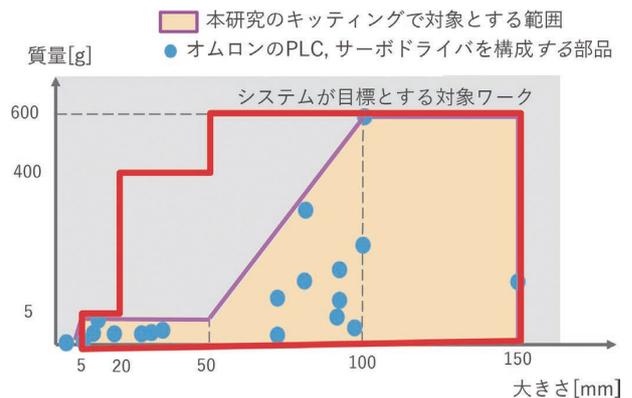


図7 構築したキッティングシステムの目標対象ワーク

本研究では、各評価項目を確認するため、以下の2つの評価実験を実施した。

実験1. 形状が異なるが、把持方法が同じであるワークを、1つの制御プログラムで把持できることを確認する実験

実験2. 異なる把持方法のワークに対して、先見的に与えられた位置姿勢情報に $\pm 10\text{mm}$ 、 $\pm 1.5\text{deg}$.の誤差があっても自動的に位置姿勢を補正して4秒以内の時間でキッキングできることを確認する実験

4.1 実験1

今回のハンドでは4種類の把持方法がある。このうち吸着による把持方法の2種類は実験2で評価する。また、図8に示すワークで、2つの指でつまんで把持するワークは存在しない。このため、実験1では、3つの指によるつまみ把持で1つの制御プログラムでの把持可否について評価する。

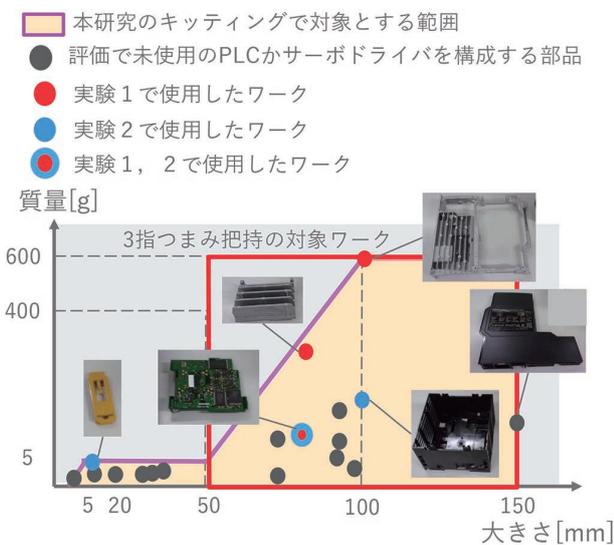


図8 実験1, 2で用いたワーク

評価で用いるワークとして、最も重くかつ重心が偏っているものと、密度が大きかつ質量が大きいものと、薄く凸凹した形状のもので最も重いものという、安定把持が難しい3つのワークを選定した(図8)。これら3つを把持できれば、他は同様の大きさで、より軽いものになるため、いずれも把持できると想定している。なお、図8には赤枠の境界に、今回選定していない150mmの大きさのワークが存在しているが、これはつまみ把持では把持困難な薄いワークであり、吸着により把持するものであるため、対象としていない。

実験の結果、図9のように、3つのワークすべてで把持できることを確認した。

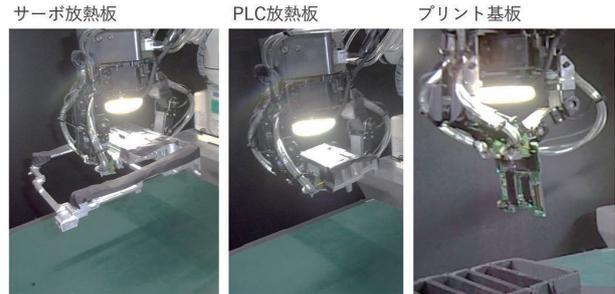


図9 実験1の実行結果

4.2 実験2

今回用意したワークの中に2指つまみ把持により把持するワークが存在しないため、2指つまみ把持を除く3種類の把持方法でキッキングの評価実験を実行した。各把持方法で特に把持が難しいと想定されるワークでキッキングが成功すれば、他のワークでもキッキングが成功すると考え、図10のワークを選定した。「10cmの樹脂ケース」は大きいパッドで吸着により把持するが、嵩高いため、吸着部が慣性による影響を受けやすく、把持安定性が悪い。「幅1cmの樹脂部品」は、吸着できる部位が重心からずれているため、吸着部位に重力によるモーメントがかかり、把持安定性が悪い。「プリント基板」は、表面実装部品により吸着面が存在しないため、つまみ把持しかできず、また、2つの指を平行にして残る1つの指と対峙する形に配置してつまみ把持するため、2本の指の方が押し勝ち、力の制御が必要になり、ロボストに安定して把持する難易度が高い。図10に示すように、各ワークは実際のキッキングを想定したピック位置に置き、プレイス時も次の組立工程を想定して、ガイドに沿って配置する。このキッキングを実行する際、ピック位置とプレイス位置の目標座標について、誤差補正量が最大となるように、実際にワークが置かれている位置と実際にガイドが存在している位置からピック位置の目標座標について $+10\text{mm}$ 、 $+1.5\text{deg}$.、プレイス位置の目標座標について -10mm 、 -1.5deg .の誤差がある情報を与えた。この条件下において、各ワークで5回ずつピック&プレイスを実行し、プレイス位置に対する誤差の絶対量と、ピックからプレイスまでの実行時間を計測した。

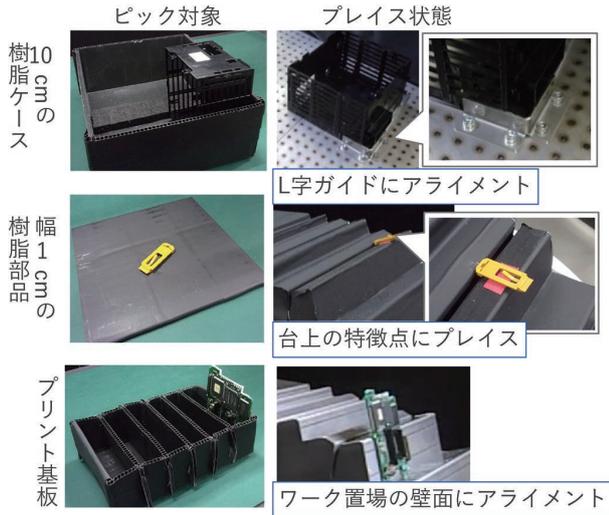


図 10 評価で実施した各ワークに対するキッキング

図 11、図 12 にプリント基板に対する実験 2 の様子を載せる。図 11 に示したように、ピック時は実行前に与えていた位置と姿勢の誤差をハンドに装着したビジョンセンサにより自律的に補正してワークを把持している。また図 12 に示したように、ブレイス時は基板がガイドの下面に接したことを検知するまでアームを下ろし、その後、ガイドの側面に接したことを検知するまでアームを手前に引くことで、ガイドの位置と姿勢の誤差を自律的に補正している。またガイドは 1.5deg. の角度をつけて置いていたが、基板がガイドの面に接すると、ハンドの指先のやわらかさにより、そのガイド面と基板の面が接するように姿勢の誤差が補正され、意図した場所に意図した姿勢でブレイスされる。

「10cm の樹脂ケース」、「幅 1cm の樹脂部品」もピック時はカメラにより位置姿勢の誤差を補正して、ワークを把持した。ブレイス時は、「10cm の樹脂ケース」は基板同様、ガイドに接したことを検知するまでアームを引くことで位置姿勢の誤差を補正してブレイスした。「幅 1cm の樹脂部品」はブレイスしながらハンドに装着したビジョンセンサでガイド上の特徴点に合わせることで位置姿勢を補正した。

この評価実験の結果を表 2 に示す。実験により、「10cm の樹脂ケース」では実行時間を 4 秒以内に収めることができたが、位置誤差は目標である 1mm 以内に収めることができなかった。そのほかのワークではすべてのワークで実行時間を 4 秒以内に収め、かつ、誤差を 1mm 以内に補正して、キッキングタスクを実行できることを確認できた。

目標を達成できなかった「10cm の樹脂ケース」においては、ブレイス時の速度や許容値のパラメータを変更して、実行時間が最大 4.2 秒程度かかるような値にすることで位置誤差の最大を 1mm にすることができている。このことから、おおよそ人同等の性能を達成していると考えられる。

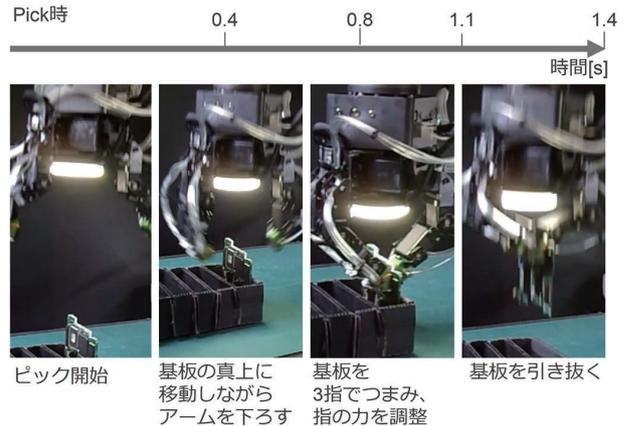


図 11 プリント基板に対する実験 2 のピック時

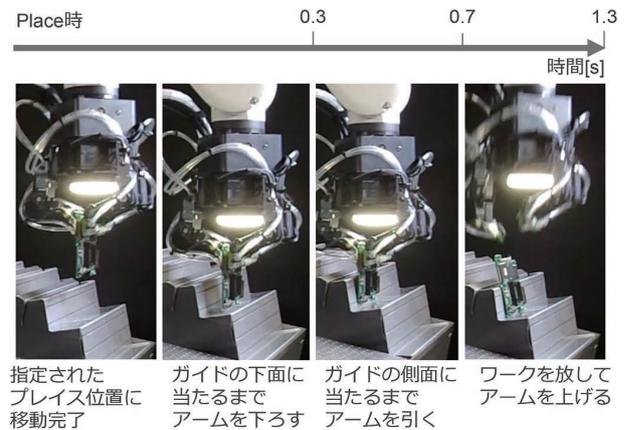


図 12 プリント基板に対する実験 2 のブレイス時

表 2 キッキング評価の結果

ワーク	評価観点	実行結果
10cm の樹脂ケース	位置誤差平均	2.9 mm
	位置誤差最大	4.0 mm
	実行時間平均	3.8 秒
	実行時間最大	4.0 秒
幅 1cm の樹脂部品	位置誤差平均	1.0 mm
	位置誤差最大	1.0 mm
	実行時間平均	3.6 秒
	実行時間最大	3.7 秒
プリント基板	位置誤差平均	0.0 mm
	位置誤差最大	0.0 mm
	実行時間平均	3.6 秒
	実行時間最大	3.9 秒

5. むすび

キッティング工程の自動化において、既存技術で課題となる部品毎に発生するプログラム工数が増大するという課題を解決するため、本稿では、センサデータをロボットが自動でワークや作業に依存しない抽象化データに変換し、制御に用いるアーキテクチャを提案した。このアーキテクチャを元に作成したキッティングシステムにより、ワークが変わってもプログラムの変更や調整が不要で、かつ、人同等の速度で位置姿勢ずれを補正してキッティングを自動実行するシステムを実現した。本稿では、キッティング工程の自動化を対象としたが、本研究の手法は、組立工程における嵌合作業の自動化にも容易に応用できると考える。

ただし実用化に向けては、自律化とハンドの品質の面で課題を残している。特に自律化においては、「環境への接触を活用する動作戦略」の自動生成や「制御フェーズ用パラメータ」内の各パラメータの自動設定が課題である。また、位置姿勢誤差対応性や高速性はトレードオフの関係にあるため、これらをバランスさせる場合にはパラメータ調整が必要となる。その調整の単純化も今後の課題である。今後、こうした課題解決に取り組み、実用化を目指していきたい。

なお、この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP16007）の結果得られたものである。

参考文献

- 1) 原田研介. 産業用ロボットによる組み立て作業の自動化に関する研究動向. 精密工学会誌. 2018, Vol.84, No.4, p.299-302.
- 2) 小山佳祐, 鈴木陽介, 明愛国, 下条誠. 指先に近接覚センサを備えたロボットハンドによるブリグラスブ制御. 日本ロボット学会誌. 2015, Vol.33, No.9, p.712-722.
- 3) Karako, Y.; Kawakami, S.; Koyama, K.; Shimojo, M.; Senoo, T.; Ishikawa, M. "High-Speed Ring Insertion by Dynamic Observable Contact Hand". IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2019, p.2744-2750.
- 4) 辻徳生, 原田研介, 金子健二. 摩擦円すいの楕円体近似を用いた把持安定性の拘束評価. 日本ロボット学会誌. 2011, Vol.29, No.3, p.278-287.
- 5) Doi, S.; Koga, H.; Seki, T.; Okuno, Y. "Novel Proximity Sensor for Realizing Tactile Sense in Suction Cups". 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2020, p.638-643.

執筆者紹介



阿部 将佳 ABE Masayoshi
技術・知財本部 コアテクノロジーセンタ
専門：ソフトウェア工学



川上 真司 KAWAKAMI Shinji
技術・知財本部 テクノロジープロデュースセンタ
専門：制御、ロボティクス
所属学会：システム制御情報学会



金井 聡庸 KANAI Akinobu
技術・知財本部 コアテクノロジーセンタ
専門：電気電子工学



齊藤 ゆみ SAITOH Yumi
技術・知財本部 コアテクノロジーセンタ
専門：制御工学
所属学会：システム制御情報学会、電子情報通信学会、電気学会

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

方位点灯撮像方式と検査基準自動最適化による 基板外観検査の精度向上への取り組み

藤井 心平, 田中 貴茂

基板の外観検査において、部品に対するはんだの濡れ検査は最も重要である。しかしながら、はんだは電極やパッド／ランドの形状等により多様な形状を形成し、さらに基板設計や周囲の様々な部品による影や二次反射といった現象により、正しくはんだ形状を計測するのは困難となる。また、正しくはんだ形状を捉えられたとしても、多様な形状となるはんだに対して、良品と不良品を決定する検査基準の設定には、様々な箇所を計測した計測値を組み合わせる必要がある。本論文では、はんだの濡れ性を精度良く捉え、かつ二次反射や影といった設計制約の影響を排除した照明およびカメラの撮像系ハードウェア構造と、組み合わせ最適化手法により検査基準を自動的に求める方法を提案する。また、検査基準の自動化の効果検証を実施した結果、提案手法を用いることで、従来方法と比べて良品正解率を 4.9%、不良品正解率を 3.4% 向上させることができた。

Efforts to Improve the Accuracy of Board Appearance Inspection by Using a Multi Direction Imaging Method and Automatic Optimization of Inspection Criteria

FUJII Shimpei and TANAKA Takashige

The wetting inspection of solder on components is the most important part of the board appearance inspection. However, solder forms various shapes due to the shape of electrodes, pads, and lands, etc. In addition, it is difficult to correctly measure the solder shape due to phenomena such as shadows and secondary reflections caused by the board design and various surrounding components. In addition, even if the solder shape can be captured correctly, it is necessary to combine the measured values at various points in order to set the inspection criteria for determining good and bad solder. In this paper, we propose a method for automatically determining the inspection criteria by using a hardware structure for the lighting and camera imaging systems that accurately captures the solder wettability and eliminates the effects of design constraints such as secondary reflections and shadows, and a combinatorial optimization method. As a result of verifying the effectiveness of the proposed method, it was found that the proposed method improved the correctness of the inspection criteria by 4.9% and the incorrectness of the inspection criteria by 3.4% compared to the conventional method.

1. まえがき

検査システム事業部では基板実装工程の AOI（自動外観検査装置）事業を中心に、顧客の品質課題にも対応したソリューション事業を展開している。AOI の検査構成は、メカ、エレキ、光学、検査アルゴリズム等の装置技術と、ティーチングと呼ばれる対象の良・不良を見分ける判定条件の設定により成り立っている。中でもカラーハイライト照明という光学系のコア技術と、近年主流となっている位

相シフト法による 3D 検査技術の組み合わせにより、部品の姿勢、位置やはんだの形状をこれまでより正確に検査できるようになった。しかしながら、現状は部品の実装位置などの基板設計起因による他部品の影や対向する部品からの二次反射などの影響により、正しく計測できない状態が少なからず存在する（例えば、光情報がそもそもない、または信頼できないケース）。そのような場合、2D 検査等で代替しているが、設定項目が増えることでティーチングの作業が増え、それに加えて検査画像に対する知識や調整スキルを必要とするため、設備コスト以上に導入後のコスト

Contact : FUJII Shimpei shimpei.fujii@omron.com

が大きな課題となっている（例えば、はんだ濡れ角度により良・不良を判断するティーチングロジックは一部のはんだの光情報ではなく特徴のある周辺はんだ情報と組み合わせることが必要）。

さらにティーチング作業者の定着が難しく、それにより検査プログラムの品質を担保できず、検査装置の性能を十分に引き出せず、見過ぎ（良品にもかかわらず、装置が不良品と誤判定してしまうこと）や見逃し（不良品にもかかわらず、装置が良品と誤判定してしまうこと）といったことが問題になっている。

本論文では、検査対象部品に対する照明の構造改善と検査基準決定ロジックの改善を提案する。

2. 従来技術

プリント基板に実装された部品のはんだ接合状態を検査する技術分野等において、カラーハイライト方式¹⁾による三次元形状の計測方法が知られている。この方式はオムロンが発明した技術であり、現在のAOIの色検査におけるデファクトスタンダード方法である。

図1にカラーハイライトの構造と原理を模式図で示す。カラーハイライト照明は、上段・中段・下段の3段の仰角を有しており、上段から赤、中段から緑、下段から青の光を照射する構造を持つ。また照明の中央部に撮像部（カメラ）を配置している。各段から照射された赤、緑、青光は、はんだの各位置における角度法線に対して反射され、色特徴（カメラから見て正反射方向にある光源の色）が現れるようにした状態で撮像を行うことにより、はんだ表面の三次元形状を二次元の色情報として捉える方法である。

はんだ表面の傾斜の計測精度は、二次元の色相情報としてある程度の精度で計測可能である。しかし、照明が全方位点灯している場合、角度法線に対して切り分けが出来ないため、同じ角度になる場合判断ができない。具体的には、はんだ表面の傾斜が電極に対して積み上がっている（いわゆる濡れ上がっている）のか、あるいは電極に対して低くなっている（いわゆる不濡れの状態）かの判断が困難となる。つまり「方位」は、360度から光を照射する限り、二次元の色相情報から判別できないという問題がある。

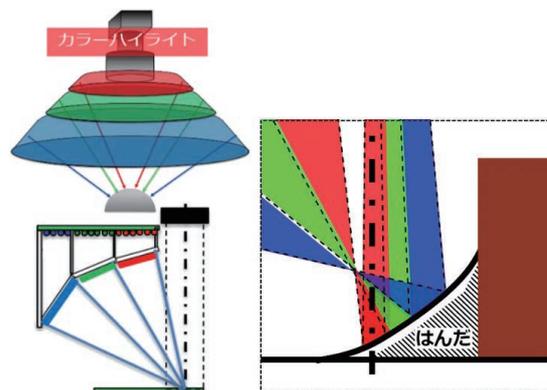


図1 カラーハイライトの原理（左：構造 右：反射原理）

そこで、オムロンのAOI（VT-Sシリーズ）では、図2で示すように上記カラーハイライト方式による鏡面物体の三次元形状計測とは別に位相シフト法による拡散物体の三次元形状計測を組み合わせ、より正確に高さを計測することで、はんだ形状の復元および計測を実現している²⁾。

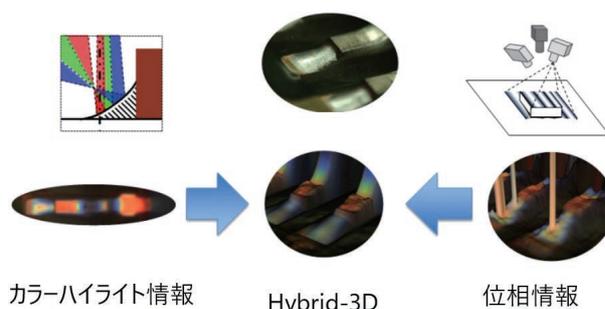


図2 Hybrid-3D技術

なお、位相シフト法とは、パターン光を物体表面に投影したときのパターンの歪みを解析することにより物体表面の三次元形状を復元する手法の一つである。これにより、それぞれの方式の課題を補完することで、はんだ表面の光沢や形状の変動に対応できるようになった。

しかしながら、上記位相シフト法においても電極近傍においては、電極端面からの二次反射により、本来得られるはずの位相がずれて、正しい計測が困難であったり、鏡面性の高いはんだ面においては、投影縞がカメラに返ってこず、原理的に計測できないといった課題がある。

また、良品と不良品を検査するためには、はんだのどの部分がどういう形なら良品かあるいは不良品かという検査基準を設定する必要がある。そのため、はんだ形状が正しく復元できたとしても、正しい設定をしなければ、見過ぎか見逃しが発生することになる。

3. 解決策

ここでは、①はんだの向きの特定、②影／二次反射の排

除、③検査基準設定のスキルレス化の3つの課題を解消するためにハードウェア構造の抜本的な見直しと組み合わせ最適化手法による検査基準の自動化を実施した。

3.1 方位点灯 (MDMC 点灯)

図3で示すような不濡れ状態のはんだをカラーハイライト方式で撮像する場合、図4の画像が取得できる。はんだの傾斜が緩い箇所は赤、急な箇所は青という状態を表現することが可能である。しかしながら、赤の領域に着目すると、はんだの法線角度は同程度であるが濡れ上がり、濡れ下がりどちらも同じ赤として表現されるため、はんだの方向特定は困難である。これは全方位 (360 度) から光を照射することによって、例えば0度方向からの照射光か、180度方向からの照射光かを特定することができないためである。

そのため、光情報を分解しティーチングするには周囲のはんだの色の特徴や位置の考慮が必要となる。

そこで光情報を後で分解するのではなく、撮像時に予め分割しておくことで、信頼性の高い光情報を取得する構成を実現した。



図3 不濡れはんだ形状 (外観)



図4 不濡れはんだ形状 (カラーハイライト表示)

これまでのカラーハイライト照明の点灯を360度全周点灯から図5に示すように第一象限から第4象限にかけて分割し、90度毎の4方位個別点灯ができる照明構造 (MDMC: Multi Direction Multi Color) とした。

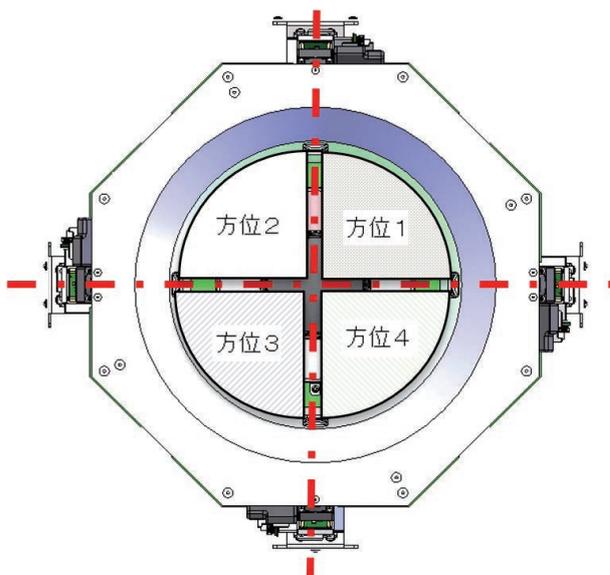


図5 MDMC 照明構造図

次に、図6に方位点灯させた場合の画像を示す。それぞれ、電極先端に対して正面方向から照射した場合と、背面方向から照射した場合であるが、照射方向に傾いている面が明るくなる。

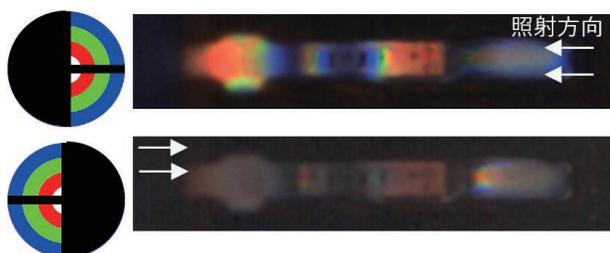


図6 方位点灯画像 (カラーハイライト表示)

図7に図6で得られた2枚の方位点灯画像を用いた差分画像を示す。この画像では輝度の高い箇所が背面からの光が強く当たっていることを示しており、はんだが濡れ下がっている可能性が高いことを意味している。

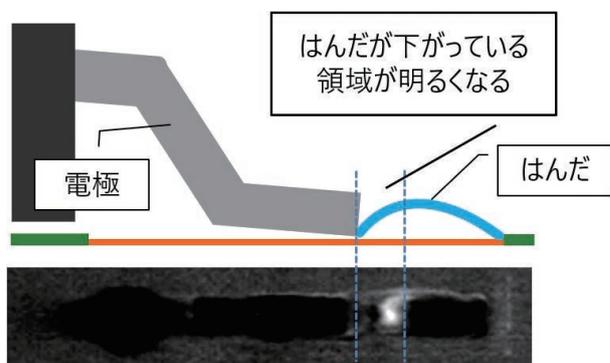


図7 方位点灯画像 (差分画像表示)

3.2 4 投光プロジェクタ

位相シフト法は特定の縞パターンを投影した光情報を用いたアルゴリズムであるが、一方向からの光の場合必ず影が発生するため、対向する方向からの光情報も必要になる。また投影した光が部品の側面に反射し、その光がノイズ要因となることもあるため、対向する前後左右の4方向から光を投影する構造とすることで信頼性の高い光情報の取得を可能とした。

3.3 検査基準最適化

はんだ検査で代表的な検査項目として、電極に対するぬれ高さやぬれ角度、ランドに対するぬれ長さやぬれ角度がある。図8に計測する部位と良不良を判定する検査基準の設定画面を示す。

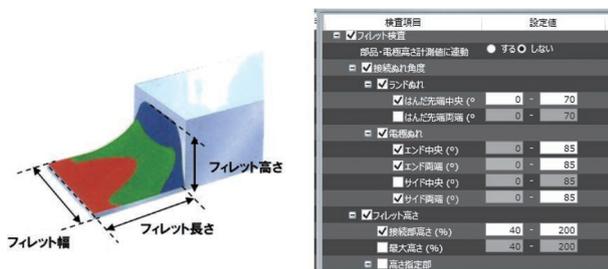


図8 検査項目と検査基準設定画面

これら1つの検査項目に対して、上下限の検査基準を設定する必要がある。また、1つの検査項目の検査基準を決定するのは比較的容易だが、実際には1つの検査項目だけで判定だけでなく、複数の検査項目を組み合わせ、論理和、論理積を使用することで総合的に判定する必要がある(図9)。これは検査対象となるはんだの形状が電極の形状やランド設計、はんだの材質など様々な変動要素により多様な形状となるためである。

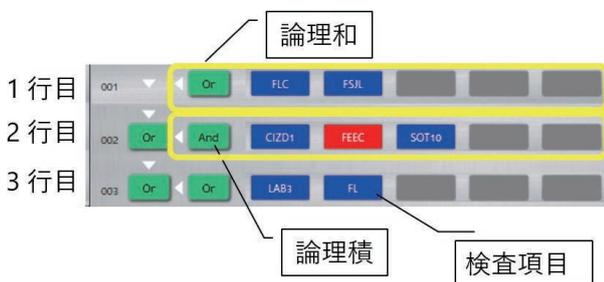


図9 論理式設定画面

しかしながら、複数の検査項目とその組み合わせに対して、最適な検査基準を決定するのは組み合わせが膨大になり、人が最適な設定をするのは、多くの時間を要し、経験も必要となるため、非常に困難である。ここでは、検査基準の最適化を検討する。

以下に、検査基準決定までの流れを示す。

- ① 計測値の出力
- ② クラスタリング
- ③ 論理式作成
- ④ 評価値算出
- ⑤ 検査基準値選択

①では各検査項目が出力する計測値を取得する。この時、不良品の計測値には不良のラベルが手動でつけられているものとする。

次に②では浮きや不濡れ、はんだ過少、はんだ過多など様々な不良形状の計測値に対して、クラスタリングする。クラスタリングには、k-means+法³⁾を用いる。これにより、ある程度形状の近いものを1つ不良群としてまとめる(図10)。

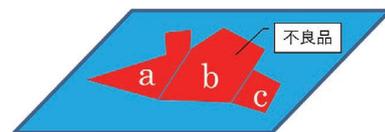


図10 不良のクラスタリング

次に③では各不良群を検出するのに最も効率が良い検査項目および論理式を決定する。ここでいう効率とは例えばクラスタ a をすべて不良判定させたとき、最も見過ぎ数が少なくなるロジック(以下、第一ロジック)とする。

まず、図11のようにそれぞれのクラスタに対して、もっとも効率の良い第一ロジックを決定する。

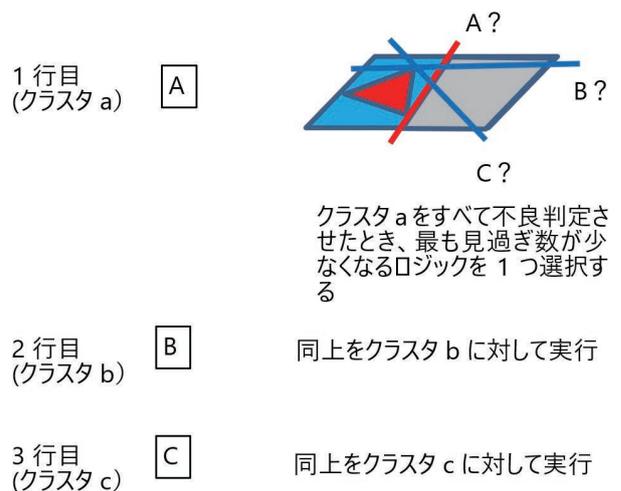
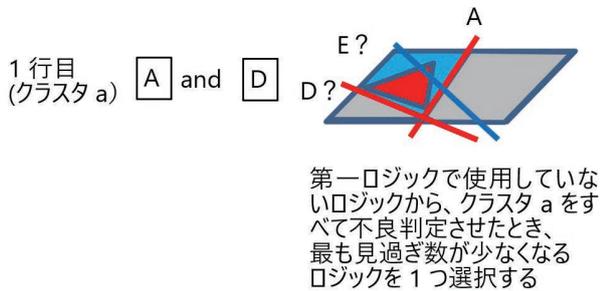


図11 第一ロジックの決定

次に第一ロジックに選択されなかった残りのロジックを各クラスタのいずれかの第一ロジックと論理積を組み合わせる。このとき、見逃しが起きない範囲に検査基準を設定した場合

に、見過ぎが最も少なくなるクラスタに第二ロジックとして、論理積として設定する (図 12)。それを残るロジックすべてで繰り返して、論理式を構築する。



2 行目 (クラスタ b) [B] and [E] 同上をクラスタ b に対して実行

3 行目 (クラスタ c) [C] and [F] 同上をクラスタ c に対して実行

図 12 第二ロジックの決定

④では、論理式の行ごとに検査基準として設定できる値を 20 分割 (例えば 0 ~ 100% の幅の中で設定できる場合は、0、5、10...95、100 の 5% 刻みで設定) し、その時の各検査基準での見過ぎ/見逃し数を算出する。

次に評価値を以下のように定める。

$$\text{適合率 (良品)} = \frac{N_{Good}}{N_{Good} + M_N} \quad (1)$$

$$\text{適合率 (不良品)} = \frac{N_{Bad}}{N_{Bad} + M_P} \quad (2)$$

$$\text{再現率} = \frac{N_{Good}}{N_{Good} + M_P} \quad (3)$$

$$\text{特異度} = \frac{N_{Bad}}{N_{Bad} + M_N} \quad (4)$$

$$F \text{ 値 (良品)} = \frac{2 \times \text{再現率} \times \text{適合率 (良品)}}{\text{再現率} + \text{適合率 (良品)}} \quad (5)$$

$$F \text{ 値 (不良)} = \frac{2 \times \text{特異度} \times \text{適合率 (不良)}}{\text{特異度} + \text{適合率 (不良)}} \quad (6)$$

$$\text{評価値} = \frac{2 \times F \text{ 値 (良品)} \times F \text{ 値 (不良)}}{F \text{ 値 (良品)} + F \text{ 値 (不良)}} \quad (7)$$

N_{Good} : OK と判定した回数 N_{Bad} : NG と判定した回数

M_N : 見逃し数 M_P : 見過ぎ数

次に各論理式毎に評価値の高い検査基準の組み合わせ上位 50 位をランキングする。

⑤の検査基準値選択では、ランキング算出で得られた中から、以下のルールで論理式を決定する。

- ・その行でしか検出できない不良があれば、その候補を採用する。
 - ・ある不良に対して複数の候補で検出できる場合は評価値の高いものを選ぶ。
 - ・途中ですべての不良が検出できるようになった場合は、それ以降の行では見過ぎ数の最も少ない候補を選択する。
- ※見過ぎ数が同一の場合は、それらの中で余裕値 (内側) が最も大きい候補を採用する。

これにより、見過ぎが少ないかつ、見逃しが起きない組み合わせが選択できるようになる。

4. 実証結果

4.1 方位点灯

電極に対するはんだの濡れ角を徐々に変化させた 0.5mm ピッチ QFP (Quad Flat Package) サンプルではんだ法線 (向き) の特定精度について検証した (図 13)。

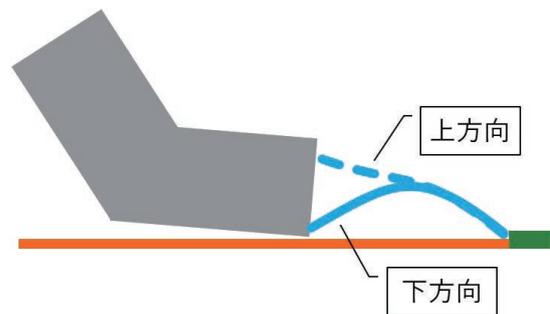


図 13 はんだ法線 (向き)

検証部品の外観とカラーハイライト画像を図 14 に示す。また、表 1 に評価サンプル数を示す。なお、良品と不良品の分類はデジタル顕微鏡を用いて、熟練者が判断した。

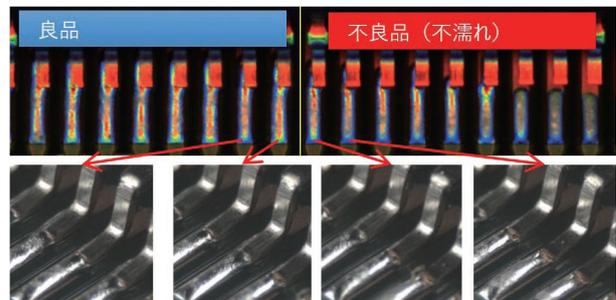


図 14 検証部品

表1 評価サンプル数（部品種：QFP）

	サンプル数
良品	464 ピン
不良品	832 ピン

表2 に良品と不良品の改善前後での正答率の結果を示す。

表2 正答率の比較

結果	良品正答率	不良品正答率
改善前	87.3%	94.8%
改善後	97.2%	100%

従来のカラーハイライト画像を用いたはんだ法線（向き）の特定精度は、良品の正答率は87.3%だったのに対して、方位点灯画像を用いた方は97.2%まで改善した。不良の正答率も94.8%から100%に改善し、良品／不良品共に大きな改善効果を確認できた。

4.2 4 投光プロジェクタ

隣接する部品により影が発生する部品において、改善効果を確認した。図15にその代表例の部品配置図と図16に改善前後の鳥観図を示す。2投光ではプロジェクタ光が隣接する部品に遮られ、部品に投影されず、不正な形状となっている。一方、4投光ではプロジェクタ光が正しく部品面に投影されることで、正確な形状を復元できている。

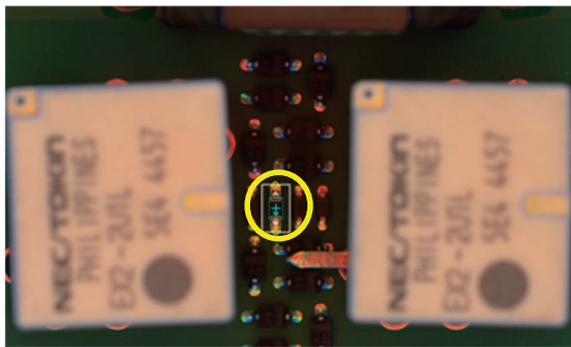


図15 評価対象部品の部品配置図

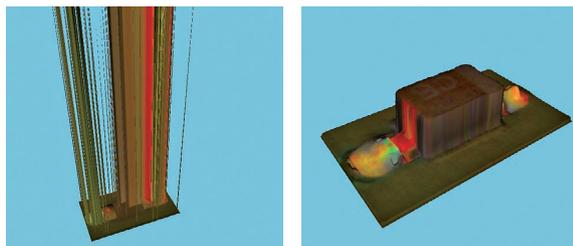


図16 鳥観図（左2投光、右4投光）

4.3 検査基準最適化

代表的な部品種である、チップ部品、ダイオード部品、IC部品の3種において、従来手法と本提案の手法で良品／不良品の正答率を比較する。評価ピン数を表3に示す。ここでいう従来手法とは、熟練した作業者が経験に基づき手動で設定したものである。また、評価の対象不良は濡れ不良としている。良品か不良品かどうかはあらかじめ熟練者により、ラベル付けがされており、良品を検査機が良品と判断した場合、もしくは不良品を検査機が不良品と判断した場合は正解とする。

表3 評価ピン数

	良品ピン数	不良ピン数
チップ部品	3233	218
ダイオード部品	43916	229
IC部品	478216	1707

図17に正答率の結果を示す。いずれの部品種においても、良品正答率、不良品正答率共に改善できている。全部品種の平均において、従来方法と比べて良品正答率を4.9%、不良品正答率を3.4%向上させることができた。

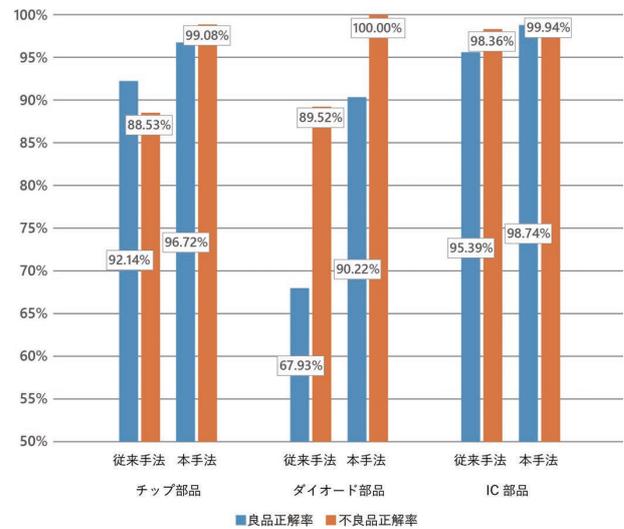


図17 正答率比較

5. むすび

これまで課題であった、はんだの濡れ判定精度において、はんだの向きを直接観測できる撮像系を開発し、はんだの形状の再現精度を向上することができた。次に、4投光プロジェクタにより、影や二次反射の発生確率を大幅に削減でき、ノイズの少ないより実際の形状に近い状態で検査ができるようになった。

また、これまでティーチングの熟練者でないと困難であったはんだのどの部分がどういう形なら良品か不良品か

という検査基準の設定を検査基準最適化により自動化し、スキルレスに実現できるようになった。

今後、はんだ形状を定量的に測定することで、単に良品／不良品判別をするだけでなく、実装工程能力を定量的に把握できるようにする。それにより実装工程の問題を素早く把握でき、実装工程改善、さらには基板設計改善にもつなげることで、検査コストだけでなく、品質コスト全体の低減という新たな付加価値を提供し顧客満足の最大化を図る。

参考文献

- 1) 特公平 6-1173 公報
- 2) Raschka, S.; Mirjalili, V. Python 機械学習プログラミング 達人データサイエンティストによる理論と実践. 福島真太郎監訳. 第 2 版, インプレス, 2018, p.336-337.
- 3) 杉山俊幸, 岸本真由子, 藤井心平, 杉田信治. SJI (Solder-Joint-Inspection) 30 年と 3D 技術で解決すること. エレクトロニクス実装学会第 31 回春季講演大会. 2017, p.70-73.

執筆者紹介



藤井 心平 FUJII Shimpei

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：画像処理



田中 貴茂 TANAKA Takashige

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：機械工学

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。

バラ積みピッキングのための高速3次元物体位置姿勢認識技術の確立

服部 宏祐

製品の組立工程には、コンテナ内に無造作に積まれた部品を自動機へ供給する作業がある。これはバラ積みピッキングと呼ばれる。近年の製造現場での人手不足や人件費高騰の深刻化を受け、同作業の自動化が求められている。3Dセンサーと産業用ロボットを用いてバラ積みピッキングを実現することにより、同一システムで多品種の生産に対応でき、生産ライン立ち上げのコストと工数の削減が可能となる。このとき、人と同等の速度を実現するためには、3次元空間上での部品の位置姿勢を高速かつ高精度に認識できる技術が重要となる。本研究では、粗密探索と詳細位置合わせからなる3次元物体位置姿勢認識技術を提案する。粗密探索ではPCOF-MOD特徴量と平衡姿勢探索木を用いて、物体の大まかな位置姿勢を高速に推定する。詳細位置合わせではデプス画像とRGB画像を用いて、3次元空間と2次元空間の最適化を行うことにより、高精度な位置姿勢推定を実現する。提案手法を評価したところ、従来手法と比較し位置姿勢の推定精度が約2倍向上していることを確認した。また、提案手法を用いた認識時間はIntel® Core i7-7700@3.60GHzのCPUを搭載した計算機で平均146.2msであり、速度と精度が両立できていることを確認した。

Fast 3D Object Position and Posture Recognition for Bin Picking

HATTORI Kosuke

In the product assembly process, there is the work of supplying parts randomly stacked in a container to an automated machine. This is called bin picking. In response to the recent shortage of labor at manufacturing sites and the increase in labor costs, automation of this work is required. By realizing bin picking using 3D sensors and industrial robots, it is possible to manufacture a wide variety of products by the same system, and it is possible to reduce the cost and time of the start-up of the production line. At this time, in order to realize the same speed as a human, it is important to have a technology that can recognize the position and posture of a part in a three-dimensional space with high speed and high accuracy. In this paper, we propose a three-dimensional object position and posture recognition technology consisting of coarse search and fine alignment. In the coarse search, the rough position and posture of the object is estimated at high speed using PCOF-MOD feature and equilibrium posture search tree. In the fine alignment, high-precision positional and posture estimation is realized by optimizing the three-dimensional space and the two-dimensional space using depth image and RGB image. When the proposed method was evaluated, it was confirmed that the estimation accuracy of the position and posture was improved by about twice compared with the conventional method. In addition, it was confirmed that the recognition time using the proposed method was 146.2 ms on average on a computer equipped with a CPU of Intel® Core i7-7700@3.60 GHz, and both speed and accuracy were compatible.

1. まえがき

近年、製造現場での人手不足や人件費の高騰が深刻化し、人に依存している組立・検査・搬送工程などの自動化

が急務となっている。製品の組立時の部品供給工程においては、部品供給を自動化する方法の一つとして、パーツフィーダーと呼ばれる部品を供給するための専用の装置を使用する方法がある。しかし、パーツフィーダーは部品毎で専用設計される特注品であるため、品種数に応じて設

Contact : HATTORI Kosuke kosuke.hattori@omron.com

計が必要となり生産ライン立ち上げのコストや工数が増加する課題がある。また、大きな部品や傷つきやすい部品には対応できず扱える部品に限られるという課題もある。そこで、コンテナ内に無造作に積まれた様々な形状の部品を自動機へ供給する、いわゆるバラ積みピッキング作業の自動化が求められている。3D センサと産業用ロボットを用いてバラ積みピッキングが実現できれば、これらの課題を解決できる。

バラ積みピッキングを実現するための一般的な処理の流れは、①3D センサで部品の RGB-D 画像を取得し、②同画像に部品の 3 次元 CAD から生成したモデルをマッチングさせることで部品の位置姿勢を認識し、③その認識結果に合わせて部品を安全に把持できるロボットハンド位置を算出し、④算出した位置にロボットを動作させ部品を把持する、という流れである。これらの処理のうち 3D センサや画像処理コントローラが担う処理は①～③である。製造現場で人と同等な性能でバラ積みピッキングを実現するためには、②の物体の位置姿勢認識が特に重要であり、本研究では高速かつ高精度な 3 次元物体位置姿勢認識技術を提案する。

2. 関連研究

3 次元物体位置姿勢認識とは、3D センサから見た部品の 3 次元空間上での位置姿勢（並進 T_x 、 T_y 、 T_z 及び回転 R_x 、 R_y 、 R_z の 6 パラメータ）を推定する技術である（図 1）。

これまで提案されてきた 3 次元物体位置姿勢認識手法は大きく二つに分類することができる。一つは 3 次元点群に基づく手法^{1)–5)}、もう一つは 2 次元投影画像に基づく手法^{6)–14)} である。

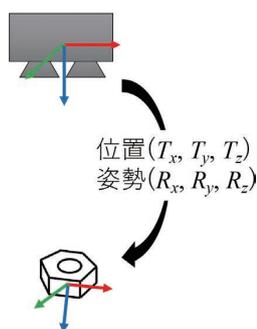


図 1 3 次元物体位置姿勢認識で算出するパラメータ

2.1 3 次元点群に基づく手法

3 次元点群に基づく手法は、3 次元 CAD などから生成した部品のモデルと入力データの照合に基づき、モデルと入力データの整合性が高い位置姿勢を探索する手法である。モデルを生成する手法としては周辺点群との位置関係を記述した spin image¹⁾ やキーポイント周辺点群の法線方向ヒストグラムを利用した FPFH²⁾ や SHOT³⁾、2 点間の関係性

を記述した PPF⁴⁾⁵⁾ と言った手法が知られている。これらの手法は処理速度が遅く、また物体の背景が複雑な場合に頑健性が低いことが指摘されている⁶⁾。

2.2 2 次元投影画像に基づく手法

2 次元投影画像に基づく手法では、様々な視点から物体を見たときの RGB 画像とデプス画像を用いて特徴量を抽出したテンプレートを予め作成しておき、新規に計測した画像をそれらと照合することで位置姿勢を推定する。手法としては、局所テンプレート照合と一般化ハフ変換を組み合わせた手法^{7)–9)} や、部品全体のテンプレートを用いて画像内を走査する手法⁶⁾¹⁰⁾¹¹⁾ がある。前者は、6 次元の投票空間から最頻値を探索する処理に時間が掛かる課題がある。後者は、姿勢の変化による物体のあらゆる見え方についてテンプレートを作成し走査する必要があるため、物体の種類や画像解像度が増加した場合に処理時間が線形的に増加するという課題があった。それに対して、量子化した特徴量である LINEMOD¹²⁾ や PCOF¹³⁾ や PCOF-MOD¹⁴⁾ を用いることで、位置姿勢を高速に認識出来ることが示されている。特に PCOF-MOD は部品の輪郭と表面の二つの情報を用いた特徴量であり、他の手法に比べて認識率が高いことが示されている¹⁴⁾。

また、物体と背景を識別する 2 クラス識別器を学習させることで背景が複雑な場合に対する頑健性を高める研究もされてきたが¹⁵⁾¹⁶⁾、背景データを対象物体や撮像環境毎に集めるのは非常に煩雑であるため、物体の 3 次元 CAD のみから認識に必要なテンプレートなどを含むモデルを作成することが望ましい。

これらを踏まえ本研究では、製造現場の実アプリケーションに適用可能な使い勝手と速度・精度を備えた 3 次元物体位置姿勢認識手法として、テンプレートマッチングに基づく手法を用いる。

3. 3 次元物体位置姿勢認識手法

速度と精度を両立した 3 次元物体位置姿勢を実現するために、物体の大まかな位置を高速に探索する粗密探索と、推定精度向上のための詳細位置合わせからなる手法を検討する。粗密探索では高速性と認識率の観点から PCOF-MOD 特徴量と平衡姿勢探索木を用いた手法を採用する。詳細位置合わせでは、製造現場に存在する単純形状の部品に対しても高い位置姿勢推定精度を実現するために、デプス画像と RGB 画像を併用した位置合わせ手法を提案する。

3.1 粗密探索

粗密探索では PCOF-MOD 特徴量を用いたテンプレートに対して、平衡姿勢探索木¹⁴⁾ を用いた照合処理を行うことで物体の大まかな位置姿勢を高速に算出する。

PCOF-MOD (Perspectively Cumulated Orientation Feature

Multimodal) は物体の姿勢変化による見え方の変化に対し、許容できる物体の見え方のバリエーションと複雑背景に対する頑健性を両立させた特徴量である。テンプレート作成では物体の姿勢を変化させた複数枚のデプス画像を用いて、物体の輪郭特徴を表すデプス勾配ベクトルと、物体の表面特徴を表す法線方向ベクトルを抽出する。そして、画素毎に勾配方向ヒストグラム及び法線方向ヒストグラムを作成し、各画素のヒストグラムに対して頻度閾値以上の方向のみ選択し対応するビットを1にした8桁の二進数をPCOF-MOD 特徴量として抽出する(図2)。

平衡姿勢探索木は解像度の異なるテンプレート階層で構成された探索木であり、各テンプレートの探索効率が均一になるように階層の深さや親ノードに連結する子ノードのテンプレート数ができるだけ均一になるように構成されている。照合処理では画像ピラミッドの最も低解像度の階層に対して、平衡姿勢探索木の親ノードのテンプレートを用いて画像上を走査し候補を検出する。さらに候補が見つかった座標に対しては画像ピラミッドの解像度を上げ子ノードのテンプレートを用いて詳細な照合を繰り返すことにより、画像上での物体の位置を高速に算出する(図3)。最後に物体の3次元CAD上の3次元座標と入力画像上の2次元座標との対応関係を用いてPnP問題を解く¹⁷⁾ことにより物体の大まかな位置姿勢が推定できる。

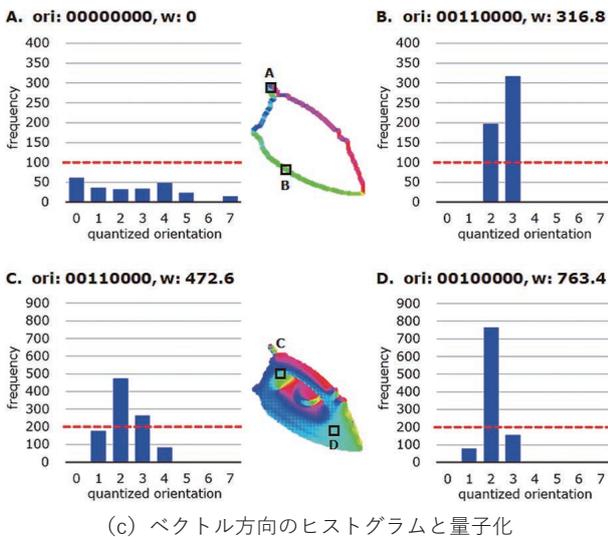
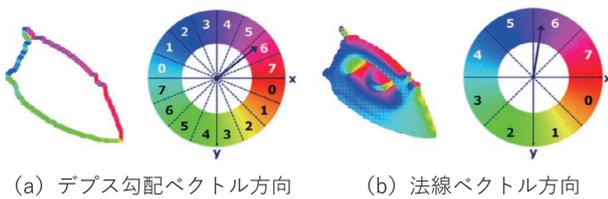


図2 PCOF-MOD 特徴量抽出

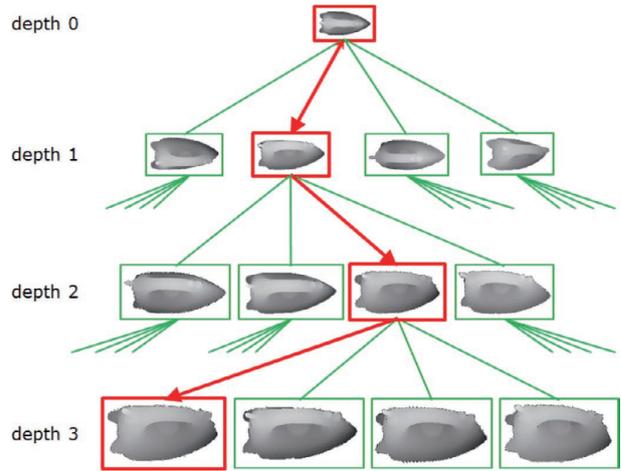


図3 平衡姿勢探索木を用いた探索

3.2 詳細位置合わせ

粗密探索で推定した位置姿勢は2次元の投影画像に基づいているため、画像平面での変化に現れにくい奥行方向の位置 (T_z) と傾き (R_x, R_y) に対しては精度が低い。そこで、位置姿勢推定精度向上のための詳細位置合わせを行う。

3次元空間上での位置合わせ方法としては、3次元CADから生成した点群とデプス画像から得た計測点群にICP (Iterative Closest Point) アルゴリズム¹⁸⁾を適用して行う方法が一般的である。しかし、デプス画像のみを使ったICPでは、複数の平面で構成されているような単純形状の部品(図7のホルダーなど)が無造作に積まれたことで一部の平面しか見えないような姿勢において画像平面上での変化に相当する並進 (T_x, T_y) と回転 (R_z) の推定が困難であり、位置姿勢の推定精度が低下する課題がある。製造現場ではこのホルダーのように、主に平面で構成される単純形状の部品も多く存在する。そこで、平面しか見えない場合でも高い位置姿勢の推定精度が得られる詳細位置合わせ手法を提案する。

RGB-D画像を用いた位置合わせを行う際の特徴として、RGB画像は画像平面での位置 (T_x, T_y) と回転 (R_x) の推定精度が高く、デプス画像は奥行方向の位置 (T_z) と傾き (R_x, R_y) の推定精度が高い。そのため、提案手法では両者を相補的に用いることで位置姿勢推定精度の向上を図る。

デプス画像とRGB画像を使った詳細位置合わせの処理の流れは図4の通りであり、3次元空間上での位置合わせと2次元空間上での位置合わせをそれぞれ実施し、最後に互いの推定結果を統合する流れである。まず、粗密探索で得られた位置姿勢と、テンプレート作成時に予め生成した3次元CAD上の点群と、デプス画像の計測点群を入力としてICPによる3次元空間上での位置合わせを行う。次に、3次元空間上でのICPで算出した位置姿勢を用いて3次元

CAD を画像平面に投影したシルエット画像を作成し、その画像に対して Sobel フィルタを用いたエッジ抽出により輪郭上の特徴点を算出する (図 5)。次に、RGB 画像に対して同様の方法でエッジ抽出した画像とシルエット画像の特徴点を重ね合わせ、特徴点の近くにある RGB 画像のエッジ特徴を探索することにより、特徴点の対応関係を算出する。この対応関係から、2次元空間上での ICP を行うことで画像平面上での並進 t_x 、 t_y と回転 θ を推定し、PnP 問題を解くことにより画像平面で最適化した T_x 、 T_y 、 R_z を算出する。最後に、3次元空間上での ICP で算出した位置姿勢の T_x 、 T_y 、 R_z をこれらで置き換えることにより、3次元空間と2次元空間で最適化した位置姿勢を得ることができる。

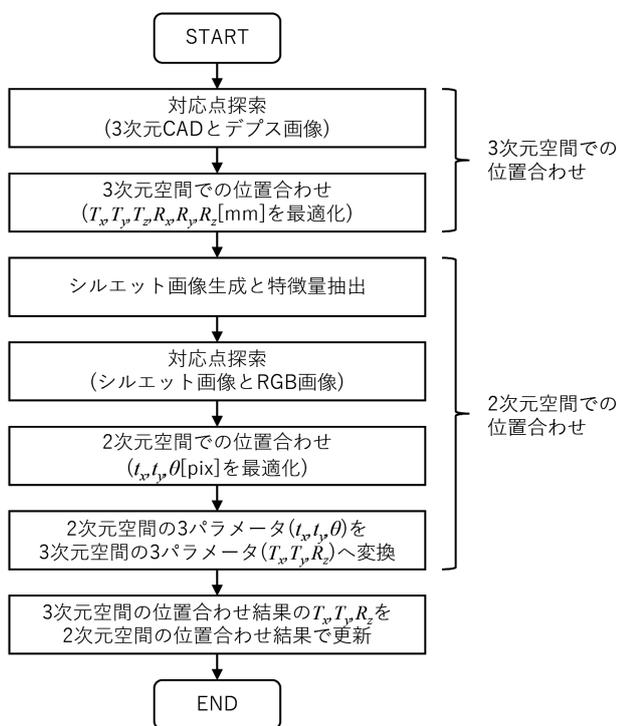
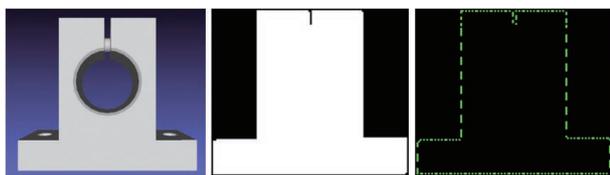


図 4 詳細位置合わせのフローチャート



(a) 3次元 CAD (b) シルエット画像 (c) 輪郭上の特徴点

図 5 2次元空間の ICP 用の特徴点抽出

4. 評価実験

製造現場における産業用ロボットの把持タスクを想定し、リニアリティ評価データセットを用いた位置姿勢の推定精度の評価 (実験 1) とバラ積み部品データセットを用いた認識率と処理時間の評価 (実験 2) を行うことによ

り、提案手法の有効性を検証する。データセットの撮影には自社で開発した 3D センサである形 FH-SMDA-GS050B (図 6) のプロトタイプ機を使用し、グレースケール画像とデプス画像を撮像した。処理時間は Intel(R)Core i7-7700@3.60GHz の CPU を搭載した計算機で計測した。



図 6 3D ビジョンセンサ 形 FH-SMDA-GS050B

4.1 実験 1 位置姿勢推定精度評価

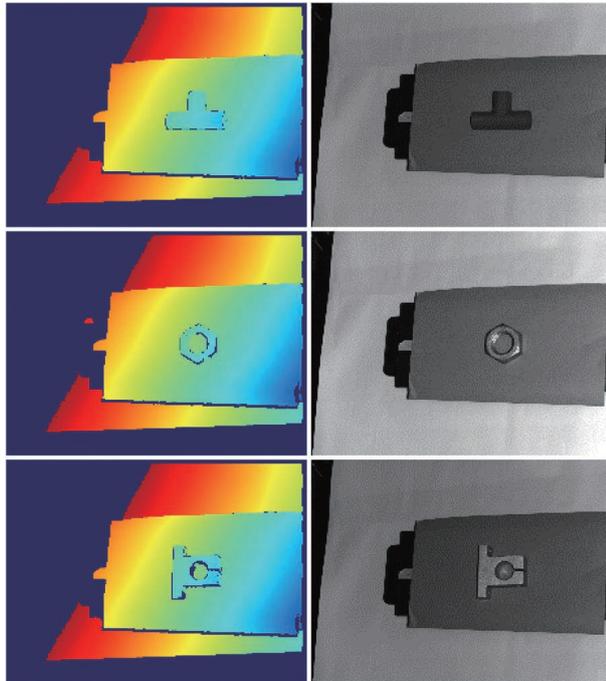
実験 1 では位置姿勢の推定精度に対する提案手法の有効性を評価するために、静止繰り返し精度とリニアリティ精度を評価した。

静止繰り返し評価では、平面や曲面で構成された 3 種類の部品 (図 7) と 3D センサの位置関係を固定し、3D センサと部品が正対している姿勢を基準として 3 通り (傾き無し、Y 軸のみ傾きあり、X 軸と Y 軸に傾きあり) の姿勢にて、50 枚の計測データを連続撮像したデータセットを用いる。推定した位置姿勢の 6 パラメータに対して、標準偏差を算出することで部品の位置姿勢が変動していないかを評価した。

リニアリティ評価では部品を X ステージに乗せて計測の度に既定の距離だけ移動させる撮影方法にて、3D センサの姿勢を 3 通り、部品の移動方向を 2 通り (画像上で横方向移動、画像上で斜め方向移動) にて、移動量の刻みは 2 mm で撮像の度に部品の位置を移動させながら 100 枚の計測データを取得したデータセットを用いる。リニアリティ評価では、推定された位置姿勢より、3D センサ原点から部品の外接立方体の 8 個の頂点までの距離を算出し、各データ間での 8 点の移動量とステージの移動量の差分値を算出することで位置姿勢の推定結果に線形性があるかを評価した。

PCOF-MOD 特徴量と平衡姿勢探索木を用いた粗密探索後にデプス画像のみによる詳細位置合わせを行う従来手法¹⁴⁾ と提案手法の性能を比較した。静止繰り返し評価の結果を表 1、表 2、リニアリティ評価の結果を表 3 にそれぞれ示す。従来手法と提案手法の認識結果画像例を図 8 に示す。評価より従来手法と比較し平均で約 2 倍の位置合わせ精度の向上が確認できた。特にナットやホルダーなど特

定の視点から見ると平面部分しか見えないような3次元的な形状特徴が少ない部品に対して提案手法を用いた場合の改善効果が高く、図8の位置合わせ結果画像からも従来手法では画像平面方向に並進ずれや回転ずれを起こしているのに対して、提案手法では改善されていることが確認できる。



(a) デプス画像 (b) RGB 画像
上からパイプ、ナット、ホルダー

図7 実験1の画像例

表1 静止繰り返しデータセットの位置標準偏差 [mm]

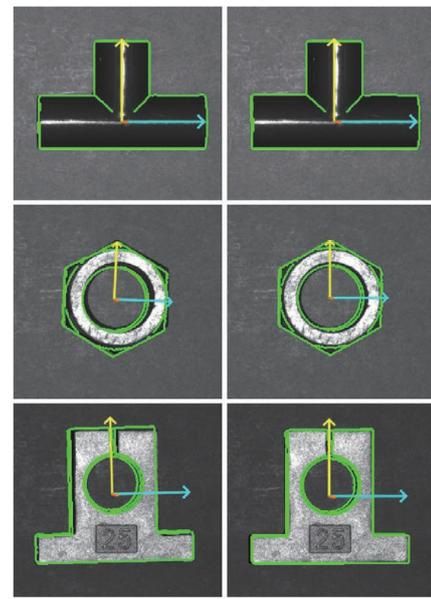
部品	従来手法	提案手法
パイプ	0.028	0.023
ナット	0.207	0.065
ホルダー	0.116	0.064
平均	0.117	0.051

表2 静止繰り返しデータセットの姿勢標準偏差 [deg]

部品	従来手法	提案手法
パイプ	0.027	0.036
ナット	0.386	0.239
ホルダー	0.101	0.067
平均	0.171	0.114

表3 リニアリティデータセットの差分平均 [mm]

部品	従来手法	提案手法
パイプ	0.054	0.074
ナット	0.687	0.164
ホルダー	0.712	0.250
平均	0.485	0.162



(a) 従来手法 (b) 提案手法
上からパイプ、ナット、ホルダー

図8 詳細位置合わせ結果

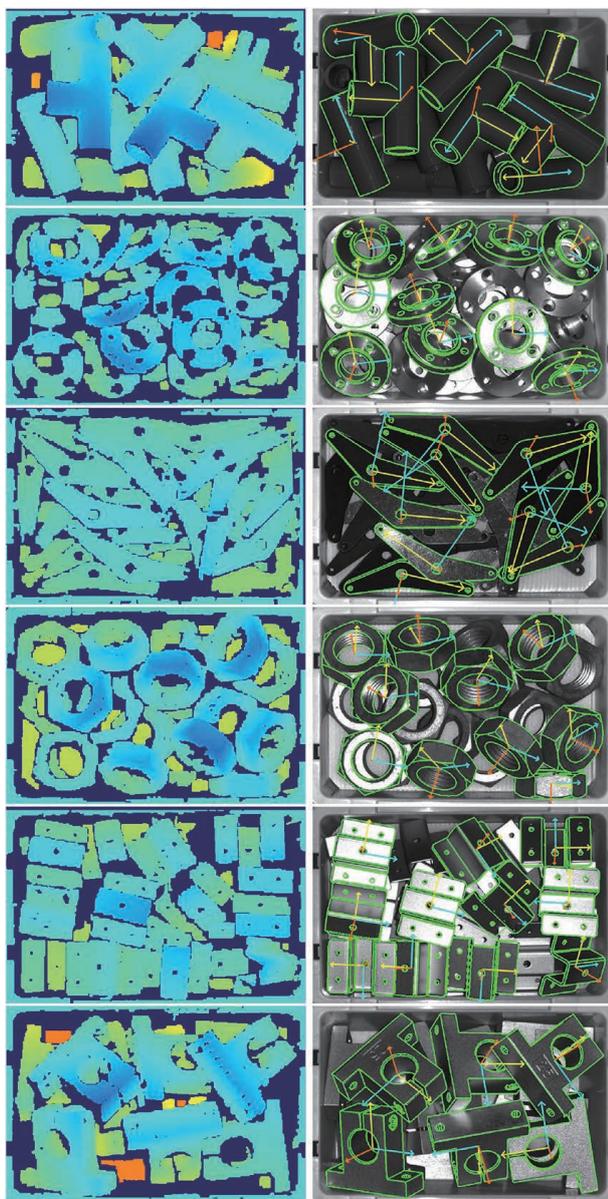
4.2 実験2 認識性能評価

実験2では提案手法の詳細位置合わせにより認識率と処理速度の大幅な低下がないことを確認するために、コンテナの中にバラ積みされた平面や曲面を含む6種類の部品データセット(図9)を作成し認識率と処理時間を評価した。データセットは各部品についてバラ積みパターンを変更した20枚の計測データを取得した。各バラ積みデータの上部に露出している部品に対して、目視による初期位置姿勢の入力とICPによる位置合わせを組み合わせることでデータセットに対する位置姿勢の正解値を算出した。1枚あたり5~10個の部品が上部に露出しており、部品の隠れた領域の表面積が部品全体の15%以下ものを認識対象とし、部品あたりの評価母数は100~200個程であった。

PCOF-MOD特徴量と平衡姿勢探索木を用いた粗密探索後にデプス画像のみによる詳細位置合わせを行う従来手法¹⁴⁾と、提案手法と同じく3次元CADのみを用いて認識に必要なモデルデータを作成可能な手法としてPPF(Point-Pair Feature)と一般化ハフ変換に基づく手法⁴⁾と、提案手法との比較をした。PPFの実装として商用マシンビジョンライブラリであるHALCON13の関数「Surface-based Matching」を

用いた。なお認識対象範囲はコンテナの内部のみ（画像上で700×400画素程度）とした。認識性能評価には、推定された位置姿勢と正解値との誤差絶対値に基づいて Precision、Recall、F 値を算出した。バラ積みデータセットの正解値を手入力していることも考慮し、認識成功の基準閾値は並進が5 mm 以内、回転角度が7.5°以内とした。部品毎及び全体の平均 F 値を表4に平均処理時間を表5にそれぞれ示す。

評価結果から提案手法と従来手法の認識率は同等であることが確認できた。また、処理時間は提案手法と比較して18 ms 程度遅くなっているが、バラ積みピッキングのアプリケーション自体が数十 ms を争うものではないため、実用上問題のない範囲であると考えられる。



(a) デプス画像 (b) RGB 画像と提案手法認識結果
上からパイプ、リング、リンク、ナット、金属シート、ホルダー
図9 実験2の画像例

表4 バラ積みデータセットにおける認識率 [F 値]

部品	PPF	従来手法	提案手法
パイプ	0.825	0.942	0.946
リング	0.754	0.977	0.967
リンク	0.355	0.915	0.908
ナット	0.819	0.981	0.981
金属シート	0.572	0.888	0.879
ホルダー	0.908	0.989	0.989
平均	0.706	0.949	0.945

表5 バラ積みデータセットにおける処理時間 [ms]

部品	PPF	従来手法	提案手法
パイプ	1423.9	92.1	112.2
リング	1736.2	106.0	129.1
リンク	1066.2	186.6	204.2
ナット	1883.4	118.1	134.9
金属シート	2376.7	171.0	192.1
ホルダー	591.8	97.5	104.7
平均	1513.0	128.5	146.2

5. むすび

本研究では、製造現場の部品供給の自動化を実現するために、多種多様な部品に対して高速かつ高精度に3次元空間上での位置姿勢を推定できる手法を提案した。

粗密探索では PCOF-MOD 特徴量と平衡姿勢探索木を用いて、物体の大まかな位置姿勢を高速に推定した。詳細位置合わせではデプス画像と RGB 画像を併用することで高精度な推定を実現した。評価用データセットを構築し性能を評価した結果、既存手法と比較して位置姿勢の推定精度が約2倍向上できていることを確認した。

位置姿勢認識の今後の課題としては、外形は似ているが部品の一部分だけ形状が微小に異なるような類似部品が混在するバラ積み状態に対しても部品の識別を含めたピッキングをできるようにするため、特徴量の追加などの改善が挙げられる。

参考文献

- 1) Johnson, A.; Hebert, M. Using Spin Images for Efficient Object Recognition in Cluttered 3D Scenes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1999, Vol.21, p.433-449.
- 2) Rusu, R.B.; Blodow, N.; Beets, M. "Fast Point Feature Histograms (FPFH) for 3D Registration". IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2009, p.1848-1853.

- 3) Tombari, F.; Salti, S.; Stefanob, L. D.; “Unique Signatures of Histograms for Local Surface Description”. European Conference on Computer Vision. 2010, p.356-369.
- 4) Drost, B.; Ulrich, M.; Navab, N.; Ilic, S. “Model Globally, Match Locally: Efficient and Robust 3D Object Recognition”. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2010, p.998-1005.
- 5) Hinterstoisser, S.; Lepetit, V.; Rajkumar, N.; Konolige, K. “Going Further with Point Pair Features”. European Conference on Computer Vision. 2016, p.834-848.
- 6) Hinterstoisser, S.; Lepetit, V.; Ilic, S.; Holzer, S.; Bradski, G.; Konolige, K.; Navab, N. “Model Based Training, Detection and Pose Estimation of Texture-Less 3D Objects in Heavily Cluttered Scenes”. Asian Conference on Computer Vision. 2012, p.548-562.
- 7) Brachmann, E.; Krull, A.; Michel, F.; Gumhold, S.; Shotton, J.; Rother, C. “Learning 6D Object Pose Estimation using 3D Object Coordinates”. European Conference on Computer Vision. 2014, p.536.
- 8) Tejani, A.; Tang, D.; Kouskouridas, R.; Kim, T.K. “Latent-Class Hough Forests for 3D Object Detection and Pose Estimation”. European Conference on Computer Vision. 2014, p.462-477.
- 9) Kehl, W.; Milletari, F.; Tombari, F.; Ilic, S.; Navab, N. “Deep Learning of Local RGB-D Patches for 3D Object Detection and 6D Pose Estimation”. European Conference on Computer Vision. 2016, p.205-220.
- 10) Kehl, W.; Tombari, F.; Navab, N.; Ilic, S.; Lepetit, V. “Hashmod: A Hashing Method for Scalable 3D Object Detection”. British Machine Vision Conference. 2015, p.36.1-36.12.
- 11) Hodan, T.; Zabulis, X.; Lourakis, M.; Obdrzalek, S.; Matas, J. “Detection and Fine 3D Pose Estimation of Texture-Less Objects in RGB-D images”. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2015, p.4421-4428.
- 12) Hinterstoisser, S.; Cagniart, C.; Ilic, S.; Sturm, P.; Navab, N.; Fua, P.; Lepetit, V. “Gradient Response Maps for Real-Time Detection of Textureless Objects”. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2012, Vol.34, p.876-888.
- 13) Konishi, Y.; Hanzawa, Y.; Kawade, M.; Hashimoto, M. “Fast 6D Pose Estimation from a Monocular Image Using Hierarchical Pose Tree”. European Conference on Computer Vision. 2016, p.398-413.
- 14) Konishi, Y.; Hattori, K.; Hashimoto, M. “Real-Time 6D Object Pose Estimation on CPU”. International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2019, p.3451-3458.
- 15) Brachmann, E.; Michel, F.; Krull, A.; Yang, M.Y.; Gumhold, S.; Rother, C. “Uncertainty-Driven 6D Pose Estimation of Objects and Scenes from a Single RGB Image”. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2016, p.3364-3372.
- 16) Rios-Cabrera, R.; Tuytelaars, T. “Discriminatively trained templates for 3D object detection: A real time scalable approach”. IEEE International Conference on Computer Vision. 2013, p.2048-2055.
- 17) Hartley, R.I.; Zisserman, A. Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press. 2004.
- 18) Rusinkiewicz, S.; Levoy, M.; “Efficient Variants of the ICP Algorithm”. Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling. 2001, p.145-152.

執筆者紹介



服部 宏祐 HATTORI Kosuke
 インダストリアルオートメーションビジネス
 カンパニー
 商品事業本部 センサ事業部
 第2開発部
 専門：画像処理、画像認識

Intel® Core は、Intel Corporation の米国およびその他の国における登録商標です。

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

小型・軽量かつ耐環境性を備えたロボットハンド搭載型 3D センサの開発

太田 潤, 中塚 均, 猪田 岳司, 松本 慎也

製造業において、人手不足や人件費の高騰により製造の自動化、とりわけロボットの導入が積極的に行われているが、設置スペース、立ち上げ工数、作業の柔軟性などが課題である。特にニーズがあるバラ積みされた部品をピッキングするアプリケーションでは、部品の正確な位置・姿勢を認識するために 3D センサが必要不可欠であり、課題解決のためにロボットハンド搭載型 3D センサが求められている。ロボットハンドにセンサを搭載する要件として小型・軽量であることが挙げられるが、従来の 3D センサはその計測手法に起因して大型で重量が重いものが多かった。そこで、我々は最適な計測手法とシンプルな光学系の開発により高さ 53mm×幅 110mm×奥行 77mm で質量約 570g のロボットハンド搭載型 3D センサを開発した。また、製造現場での温度変化による計測誤差を低減するため、ヒーターにより光学系の温度を一定に制御する手法を採用し、実験により 0°C～40°C の温度変化における距離値の計測誤差が 1mm 以内であることを確認した。

A Small and Light 3D Vision Sensor for Robot Arms with Robustness in Factory Automation

OTA Jun, NAKATSUKA Hitoshi, INODA Takeshi and MATSUMOTO Shinya

In the manufacturing industry, automation of manufacturing, especially the introduction of robots, is being actively promoted due to labor shortages and rising labor costs, but installation space, start-up person-hours, and flexibility at work are issues to be addressed. In particular, a 3D sensor is essential to estimate the position and orientation of parts accurately in bin picking applications, and a robot hand-mounted 3D sensor is required to solve the problems. One of the requirements for a sensor mounted on a robot hand is that it be small and light, but the most conventional 3D sensors are large and heavy due to their measurement methods. Therefore, we have developed a robot hand-mounted 3D sensor with a height of 53 mm × width 110 mm × depth 77 mm and a weight of 570 g by developing an optimal measurement method and a simple optical system. Furthermore, to reduce measurement errors caused by ambient temperature changes at the manufacturing site, we employed a method to control the temperature of the optical system at a constant level using heaters. Experiments confirmed that the measurement error of the distance value in the temperature change from 0°C to 40°C was within 1 mm.

1. まえがき

近年、製造業の人手不足や人件費の高騰が深刻化する中、人の経験や感覚を必須とし、人に依存している組立、検査、搬送工程の自動化が急務となっている。また、製造現場では人の作業を機械（ロボット）に置き換えることで、生産性を向上することがますます求められている。例えば、これまで人が行ってきたバラ積みされた部品をピッキングする工程にロボットを導入するには、部品を正確に

計測・認識できる 3D ビジョンセンサ（以下、3D センサ）が必要不可欠である。2D カメラでは平面的な画像から縦横の 2 次元の情報しか得られないのに対し、3D センサでは縦横の情報に加え、距離情報が得られるので、部品の 3 次元位置・姿勢を認識することができる。

また、製造現場へのロボットの導入においては、設置スペース、立ち上げ工数、作業の柔軟性を考慮する必要がある導入の障壁となっている。人が作業しているスペースにロボットを導入するには設置スペースが限られる。立ち上げ工数はロボットやセンサを設置・調整するのにかかる時

Contact : OTA Jun jun.ota@omron.com

間であり、削減が望まれている。また、段取り替えや様々な位置に置かれた多品種の部品に対応するため、作業の柔軟性が求められている。製造現場で用いられる 3D センサには固定型とロボットハンド搭載型（以下、ハンド搭載型）がある。固定型はセンサの設置に専用の大掛かりな取り付け設備が必要である。さらに設置位置・姿勢により計測領域が固定されるためセンサ取り付け位置の調整に時間がかかり、段取り替え等の工程の変化に柔軟に対応できない。一方、ハンド搭載型は簡易な取り付けジグでロボットに設置でき、ロボットハンドを動かしてセンサの位置・姿勢を自由に変えることができるという特長をもつ。このため、ハンド搭載型は上記のロボット導入の際の 3 つの障壁を解決する形態として期待を集めている。図 1 に人が行っていた作業の例、図 2 にロボットによる自動化の様子を示す。我々は生産現場へのロボットの導入によりお客様の生産性を向上することを目指し、ロボットハンドに搭載可能な 3D センサを開発した。

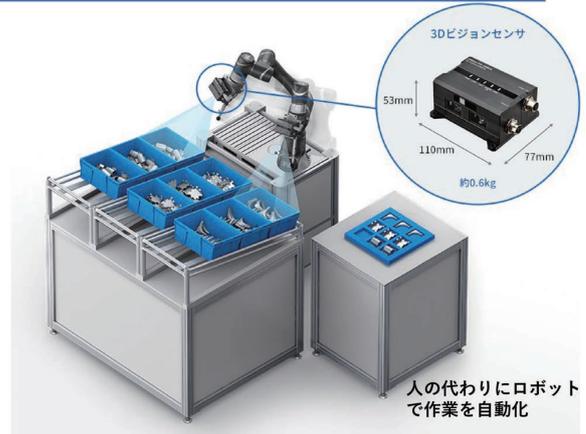
人が行っていた作業



- ・人の作業スペースのみ
- ・様々な場所から部品の取り出し

図 1 人が行っていたピッキング作業

ハンド搭載 3D センサ + ロボットによる自動化



- ・人の作業スペースにロボットを導入可能
- ・人同様にロボットが柔軟に作業可能

立ち上げ工数の削減とロボットの適用範囲の拡大が可能

図 2 ハンド搭載型 3D センサ + ロボットによる自動化

2. 3次元計測原理と製造現場で活用されている 3D センサ

2.1 3次元計測原理の比較

3次元計測には様々な手法がある¹⁾。図3に3次元計測原理を整理した図を示す。

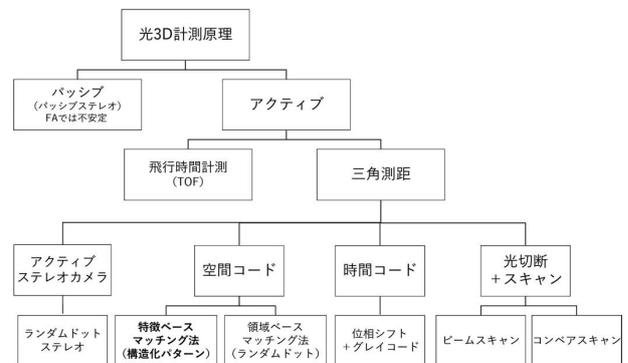


図 3 3次元計測原理の体系的整理

3次元計測の原理として、まずは計測光を投射して計測するアクティブ方式と計測光を必要としないパッシブ方式に大きく分けられる。パッシブ方式は計測光を使わずに環境光をもとに得られる画像から3次元計測を行う。そのため、環境光の影響を受けて計測できなくなりやすい、計測誤差が大きくなりやすいという欠点がある。アクティブ方式は飛行時間計測法（Time of Flight法：以降TOF法）と三角測距法に分けられる。TOF法は投光した光が計測対象物で反射して撮像素子で受光するまでの時間から距離値を算出するが、バラ積みされた部品の場合、計測光が部品間で

反射を繰り返す（相互反射）ことで、誤計測が起りやすい。また、非常に高速な光の飛行時間を計測するため、近距離では計測精度が悪くなるという欠点がある。一方、三角測距法は原理的に近距離ほど計測精度がよくなるため比較的近距离（約 1m 以内）でセンサが使用されるロボットピッキング環境において高精度に計測できる。以上より、ロボットピッキング向けの 3D センサには三角測距方式が適している。

2.2 製造現場で使用されてきた従来の 3D センサ

三角測距法の中で、光切断法は計測できる領域がライン状のため、3次元計測を行うには投光部にスキャン機能を持たせるか、対象物を動かす機構が必要となる。投光部にスキャン機能をもたせるには可動部が必要となり、信頼性に課題がある。また、コンベア等でバラ積みされた対象物を動かすと対象物の位置がずれてしまい、正しく計測できないという課題がある。空間コード法は対象物に投影したパターンが歪むことにより計測誤差が生じるという課題がある。このため、製造現場では主に位相シフト法に代表される時間コード法やアクティブステレオカメラの 3D センサが使われてきた。

3. ハンド搭載型 3D センサ実現への課題

3.1 ハンド搭載型 3D センサに求められる要件

ロボットハンドに 3D センサを搭載する際、搭載するロボットハンドによって視野が遮られることを避けるために比較的ハンドの先端側に取り付けることが多い。そのため、センサのサイズが大きい場合、部品のピッキング時に部品の入ったコンテナに干渉する可能性が高くなる。また、特に協調ロボットに代表される小型ロボットは可搬重量が小さいものが多い。そのため、センサが重い場合、可搬重量を超えてしまいセンサをロボットハンドに搭載できない、センサの重量+部品の重量が可搬重量を超えてしまい部品をピックできない可能性がある。以上より、ロボットハンドに搭載する 3D センサには小型・軽量であることが求められる。また、製造現場によっては半屋外や加工装置の近くのような温度変化が大きい環境でロボットが使われる場合がある。3D センサにはそのような環境であっても正確に部品をピッキングするために計測誤差が数 mm 以内という高精度な計測を行い、生産性に影響を与えないように耐環境性が求められる。

3.2 従来の 3D センサの問題点

従来の 3D センサで採用されてきた時間コード法は計測に投影するパターンが異なる複数の画像が必要なため、センサに搭載されるプロジェクタにはパターンを切り替える機能が求められ、複雑な光学系が必要となる。アクティブ

ステレオカメラは少なくとも 2 台のカメラと 1 台のプロジェクタが必要である。以上より、時間コード法やアクティブステレオカメラは構成部品が多く、センサが大きく重くなりやすかった。また、上記の方式の計測原理はともに三角測距法であるため、センサの温度変化により部材寸法の変化や光学パラメータの変動があった場合、計測精度を保つためにお客様が製造現場で工程を止めてキャリブレーションを実施する必要があり、生産性が低下していた。以上の課題により、従来の計測方式ではハンド搭載型 3D センサを実現することが難しかった。

4. 課題を解決する技術

上記の課題をうけ、以下の 2 点について検討を行った。

4.1 小型・軽量の構造を実現する計測原理

小型・軽量の構造を実現するためには、光学系をシンプルにする必要がある。そのためには投影するパターンを切り替える必要のない 3次元計測方式が適している。そこで、我々は 3次元計測方式に単一の投影パターンで計測できる空間コード方式を採用した。

空間コード法はパターンを対象物に投影して画像を取得し、解析することによりプロジェクタとカメラの対応関係（プロジェクタのどの画素がカメラのどの画素に対応して結像しているか）を特定し、三角測距を行うことで距離値を算出する方式である。プロジェクタとカメラの対応関係を特定する手法として、領域ベースマッチング法（テンプレートマッチング法）と特徴ベースマッチング法がある。領域ベースマッチング法ではランダムパターンを使用し、特徴ベースマッチング法では対応関係を特定するために、特徴点を埋め込んだパターンを使用する。我々は比較的コントラストの低下や画像の歪みに強いという性質を持つ特徴ベースマッチング法を採用した。パターンの構成を図 4 に示す。4 種の最小単位パターンの組み合わせにより、パターンを構成した。最小単位パターンは中央の小さな矩形 S1 と大きな矩形 S2 で構成される。

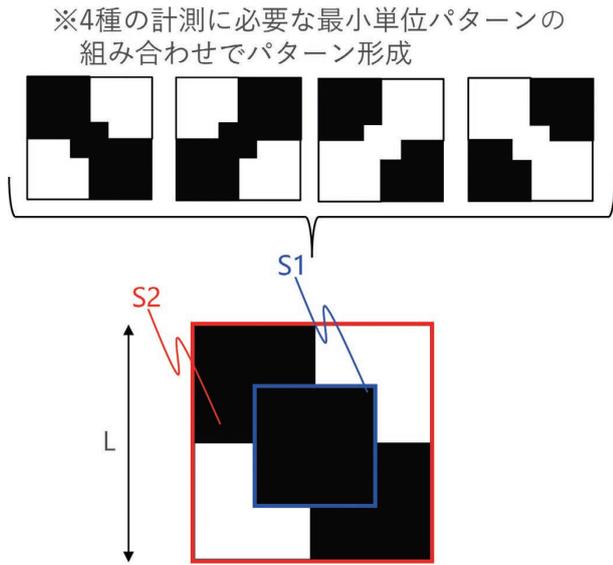


図5に検討したパターンの例を示す。最小単位パターン内の領域S1と領域S2のサイズの比S1/S2と、最小パターンサイズLを設計パラメータとした。これらのパターンについてワークに投影されたときに発生するコントラストの低下やパターンの歪みを計算機上でシミュレーションし、空間分解能と計測安定性が両立されるように、パラメータを最適化した。

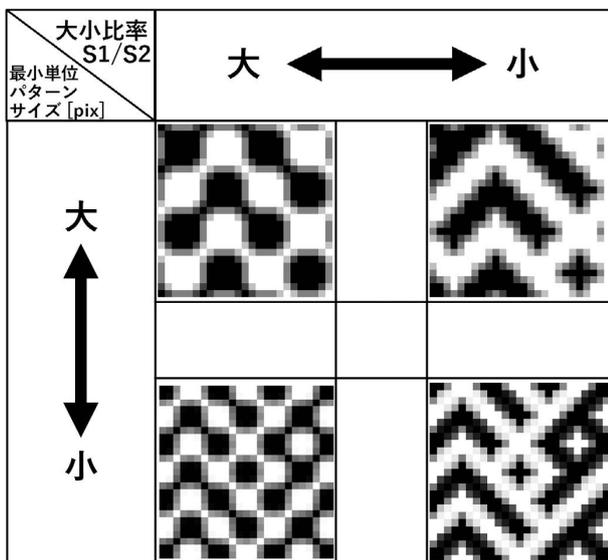


図5 検討したパターンの例

図6に作成したパターンを示す。

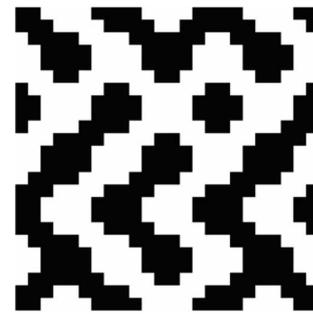


図6 作成したパターン

4.2 環境温度が変わっても安定計測を実現する構造

三角測距法において、距離値（計測値Z）は式(1)で表される。

$$Z = \frac{b \times f}{D} \quad (1)$$

ここでbは基線長（カメラとプロジェクト間の距離）、fはレンズの焦点距離、Dはカメラ/プロジェクト間の視差である。基線長、特にレンズの焦点距離は温度変化により変動するパラメータであるため、計測値Zは温度により変化する。また、温度変化により光学系の幾何配置がずれるため、視差Dも温度変化により変動する。以上から、光学系まわりの温度を一定にすれば、温度変化による計測誤差を抑えられることがわかる。そこで、我々は光学系、特にレンズの温度を一定に制御するための構造を検討した。図7にカメラの構造を示す。

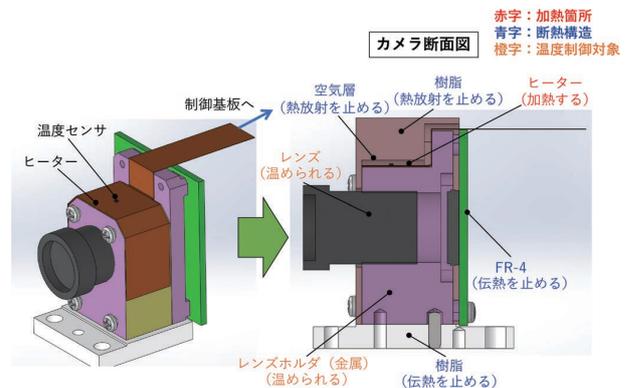


図7 レンズ温度を一定に制御するカメラ構造

レンズを保持するレンズホルダを加熱するために小型・軽量という観点でフィルムヒーターを採用し、温度のモニタのためにヒーター上に温度センサを搭載した。これらにより、レンズの温度が一定となるように環境温度の変化に応じてヒーターの発熱量を制御した。レンズホルダを加熱しても筐体を通して放熱されるため、特に環境温度が低いとき、ヒーターの発熱量が足りなくなってしまう。ヒーターの出力を大きくするためにはさらに電力が必要となる

ため電源回路の規模が大きくなり、基板サイズが大きくなる、コストがかかるといった問題がある。そこで、レンズホルダから熱が逃げないように、伝熱と熱放射を止め、レンズホルダからの放熱経路を遮断する断熱構造とした。

以上により、ハンド搭載可能なレベルのサイズ・重量に抑えつつ、製造現場の環境でも安定計測できる3Dセンサを実現した。図8にセンサの構造を示す。筐体のサイズは高さ53mm×幅110mm×奥行77mm、質量は約570gである。

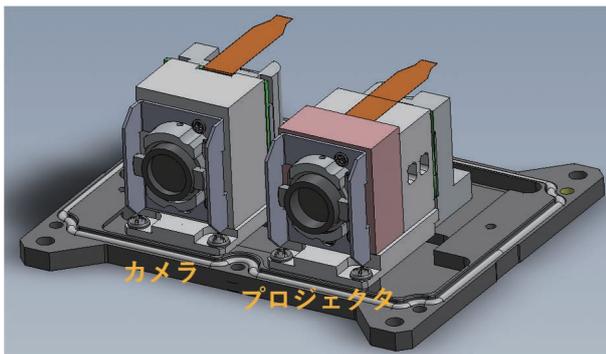
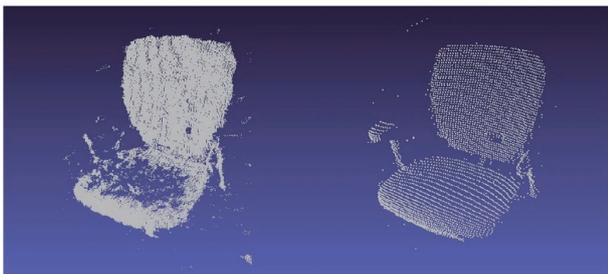


図8 3Dセンサの構造

5. 評価実験

5.1 空間コード法での3次元計測評価

図9に作成したパターンを採用した3Dセンサ（特徴ベースマッチング法）で計測した点群の表示結果を示す。比較のため、ランダムドットパターンを使用したセンサ（領域ベースマッチング法）の3次元点群の表示結果を示す。対象物はオフィスチェアである。



左：領域ベースマッチング法 右：特徴ベースマッチング法

図9 3次元点群表示結果の比較

結果より、領域ベースマッチング法では対象物の座面で計測できていない領域があることがわかる。これは、ランダムドットパターンが対象物の座面の細かい凹凸により歪んでしまい、計測に失敗しているためである。また、対象物がないところでも計測値を出力し、誤計測している。一方、特徴ベースマッチング法では、比較的、パターンの歪みに対して強いため、正しく計測できている。

以上より、本開発で採用した特徴ベースマッチングの方が高い精度で安定計測できることがわかった。図10に開発した3Dセンサで各種部品を計測したときの距離画像表示結果を示す。バラ積みされた様々な部品に対して、距離画像を取得でき、部品の位置・姿勢がわかる。

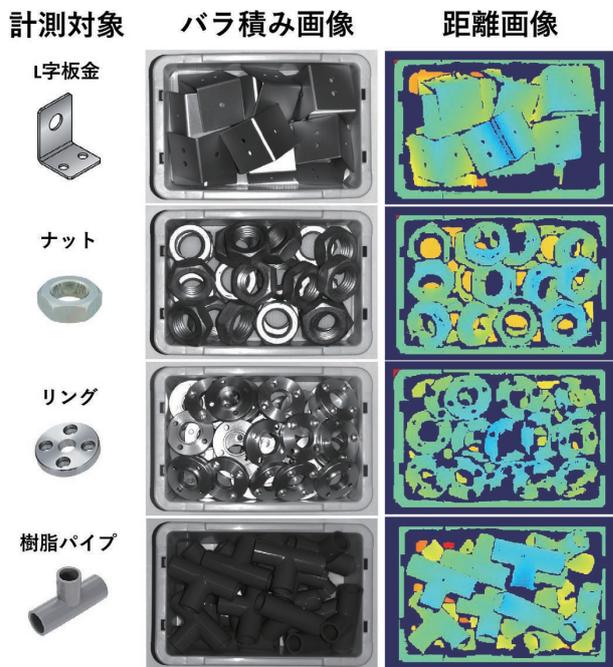


図10 各種部品の距離画像表示結果

5.2 温度変化による計測誤差評価

開発した3Dセンサのプロトタイプ機をプレート表面の温度を制御できる装置（日伸理化社製クールプレート NCP-2215：仕様温度範囲-5℃～80℃）に設置し、プレートの温度を0℃、20℃、40℃に設定した時の計測誤差を評価した。図11に評価系を示す。

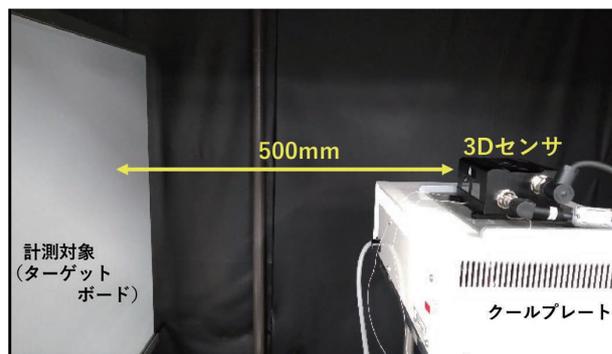


図11 センサの温度特性の評価系

評価はヒーター制御を行う場合と行わない場合のそれぞれで実施し、ヒーター制御の効果を確認した。最も計測誤差が大きくなる計測視野の端の100×100点の距離値の平

均を記録し、環境温度 0°C の距離値を基準として距離値の誤差を算出した。図 12 に評価結果を示す。

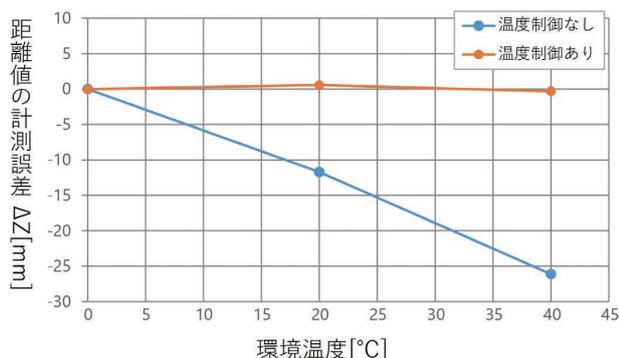


図 12 センサの温度特性の評価結果

温度制御なしの場合は、環境温度 0°C ~ 40°C で距離値の計測誤差 ΔZ が 20mm を超えるのに対し、温度制御ありの場合は誤差を 1mm 以内に抑えられることを確認した。

以上より、レンズ温度を一定に制御することで大幅に計測誤差を低減できることを確認した。

6. むすび

製造現場へのロボット導入の障壁となっていた 3D センサの設置スペース、立ち上げ工数、作業の柔軟性の課題に対し、ロボットハンドに搭載できる小型・軽量の 3D センサを開発した。最適な計測原理の選択とシンプルな光学系のプロジェクタの設計により高さ 53mm × 幅 110mm × 奥行 77mm で質量約 570g という小型・軽量の構造を実現した。また、製造現場の温度変化の影響に対しては、光学系の温度制御により環境温度が 40 度変化したときの距離の計測誤差を 1mm 以内に抑えられることをプロトタイプ機で確認した。本技術を搭載した 3D センサ形 FH-SMDA-GS050 を 2021 年 3 月に商品リリースした。図 13 に 3D センサの外観を示す。



図 13 3D ビジョンセンサ 形 FH-SMDA-GS050

今後も引き続き、高速・高精度を維持した上でさらなる小型・軽量化を実現する技術を開発し、お客様の製造現場の生産性向上に貢献したい。

参考文献

- 1) Geng, J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. *Advances in Optics and Photonics*. 2011, Vol.3, Issue 2, p.128-160.

執筆者紹介



太田 潤 OTA Jun
 インダストリアルオートメーションビジネス
 カンパニー
 商品事業本部 センサ事業部
 第 2 開発部
 専門：光学、センサ工学



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



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



松本 慎也 MATSUMOTO Shinya
 技術・知財本部 コアテクノロジーセンタ
 専門：光学、光情報工学
 所属学会：応用物理学会

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。

制御機器に同居した IT アプリケーション環境の提案

西垣 弘二, 荒井 航

近年、生産現場では、制御機器の生み出すデータを活用し、情報処理技術を活かした生産性や歩留りの向上、生産立ち上げ期間の短縮といったニーズが増えてきている。

そのニーズは多様化しており、また、情報処理技術は向上し続けることから、現場のニーズに素早く対応し、かつ最新の情報処理技術を用いたアプリケーションを導入できる環境が求められている。

さらに、従来の手段では、一度情報処理層にデータを持ち出すことで IT 技術者の手によるデータ解析などが行われており、生産現場でのタイムリーなデータ活用が困難であった。

そこで我々は、コントローラ内部に制御と同居した情報処理のためのアプリケーションプラットフォームを組み込み、さらに生産現場で柔軟にかつ強力なアプリケーションを開発するためのアプリケーションフレームワークを提案する事で、制御によって生み出される質の良い高精度データを生産現場において収集・活用できるようにした。

Proposing an IT Application Platform in Controller

NISHIGAKI Koji and ARAI Wataru

In recent years, there has been an increasing need for production to improve by utilizing information processing technology by utilizing the data generated by control equipment at production sites.

Since the needs are diversifying and the improvement of information processing technology does not stop, there is a need for an environment where applications that can quickly respond to the needs of the field and introduce applications using the latest information processing technology are required.

Furthermore, in the conventional means, data analysis by IT engineers is performed by taking out data to the information processing layer once, and it is difficult to utilize data to demonstrate the strengths of the site at the production site.

Therefore, we incorporated an application platform for information processing that coexisted with control inside the Controller and proposed an application framework for developing flexible and powerful applications at the production site, so that high-speed and high-precision data generated by control can be collected and utilized at the production site.

1. まえがき

従来、ファクトリーオートメーション（以下、FA）では、データベース接続や FA 分野におけるデータ交換方法の国際標準規格である OPC UA などを用い、制御機器が生成するデータを情報処理層に取り込み、情報処理技術（以下、IT）を活用して生産改善に活かしてきた。しかしながら、近年、装置を制御するコントローラが高速・高精度化し、データ更新周期の短縮による同期したデータへのアクセス可能時間の減少や単位時間当たりのデータ量の増大による通信負荷の増大、およびデータアクセス負荷の増大による制御周期への影響など、制御周期に同期したデータを漏れなく情

報処理層に取り込むことは困難になって来ている。

また、この様な高速・定周期でサンプリングされた質の良い高精度データ（以下、質の良い高精度データ）の活用には高度な IT スキルが必要であることが生産現場における改善活動でのデータ活用の妨げになっており、生産現場における継続的改善といった現場の強みを十分に活用できていない。

一方、オムロンが開発した AI 搭載マシンオートメーションコントローラ（以下、AI コントローラ）では、コントローラに時系列データベース（以下、TSDB）と呼ばれる高速に高精度なデータを収集・蓄積するデータベースを搭載しており、蓄積したデータを解析し、解析結果から生成した AI 機械学習モデルによって外れ値を検知することに

Contact : NISHIGAKI Koji koji.nishigaki@omron.com

より予知保全などのアプリケーションを実現している¹⁾。

しかし、第四次産業革命²⁾を目指す取り組みが加速する中、生産現場でのデータ活用の取り組みは、AI コントローラが実現している AI を使ったアプリケーションにとどまらず、様々なアプリケーションが構想・提案されている。

オムロンも、現場データ活用サービス「i-BELT」を立ち上げ、生産現場におけるデータ活用の取り組みを加速させている³⁾。また、知能化セルライン (Cell Line Control system 以下、CLCS) では、人の判断や作業を支援するために、様々なデータの連携が必要とされている⁴⁾。さらに、オムロンが進めている様々な共創において、お客様独自のアプリケーション (データ活用手段) を実現するためにコントローラが生み出す質の良い高精度データとデータを扱うための情報処理環境が必要とされている。

本稿では、生産現場でのデータの活用を目的とし、従来制御を主としてきたコントローラに、質の良い高精度データを収集し IT を使って活用するための能力を付与するための設計と、現場で時系列データを活用するアプリケーションを創り出す活動 (以下、アプリ創造活動) を支えるアプリケーションフレームワークについて述べる。

アプリケーションフレームワークは、既存のオムロンのコントローラの一つであるデータベース接続 CPU ユニット (以下、DB モデル) を拡張し、プロセス間通信を用いた変数アクセス API と Java 実行環境を利用する事で、コントローラ内で動作する様々な IT アプリケーションを開発・実行するための仕組みを構築、制御への影響を抑えながら、コントローラの制御周期と同期した質の良い高精度データを利用した様々なアプリケーションを実行可能とすることを旨とする。

また、データ処理に特化したアプリケーションを作成するためのパイプラインアプリケーションフレームワークを提案し、機能毎に用意された Node と呼ばれるソフトウェア部品を選択し、そのつながりを定義することで、IT スキルの高くない現場作業員が、データの取得・処理・フィードバックを行えるアプリケーションを容易に実現できるようにした。

2. 課題

2.1 情報処理との共存による制御への影響

製造現場で用いられるコントローラは、あらかじめ定められた順序に従い制御を行うシーケンス制御やモータの位置制御を行うモーション制御などを行う制御機器である。オムロンのコントローラの場合、その制御周期は 0.125 ms から数 ms であり、高速・高精度制御をリアルタイムに実行している。

コントローラ内で情報処理を実行する場合、情報処理による影響で制御プロセスの実行時間にばらつきが生じる

と、制御が正しく行われなくなる。そのため、コントローラ内で情報処理を実行するにあたっては、制御周期を乱さないことが必須の要件となる。

一方、AI に代表される高度なデータ解析には、コントローラの高速な制御周期と同期した高精度な時系列データが必要であるが、従来の手段では収集間隔が数 ms 程度にとどまり、かつ収集間隔のゆらぎが存在したため、要件を満たすことができなかった。

2.2 IT の FA 現場への適用

生産現場では、IT に習熟した要員が常に存在するわけでは無い。そのため、生産現場の日々の改善活動において、IT を使ってコントローラが生み出すデータを活用するためには、IT に不慣れた現場作業員でも容易に IT を活用できるような仕組みを用意する必要がある。

例えば AI コントローラでは、解析用データを収集し、AI 機械学習モデルを作成、AI による外れ値検知を高速に行い、装置の故障を予測することなどが可能であるが、現場に適用するには収集対象データの選択や AI 機械学習モデルの作成などに高度な IT 知識が必要である (図 1、2 参照)¹⁾。

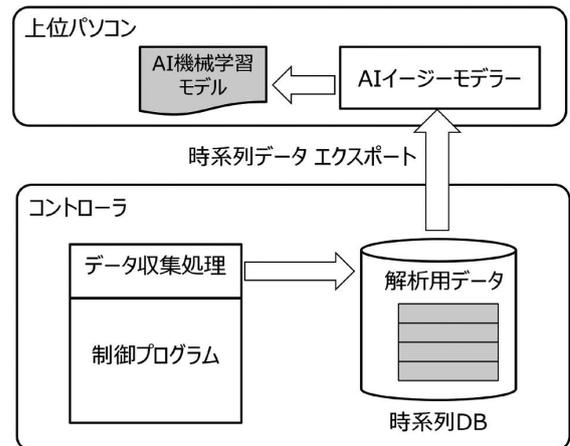


図 1 AI コントローラにおける分析フェーズの処理フロー

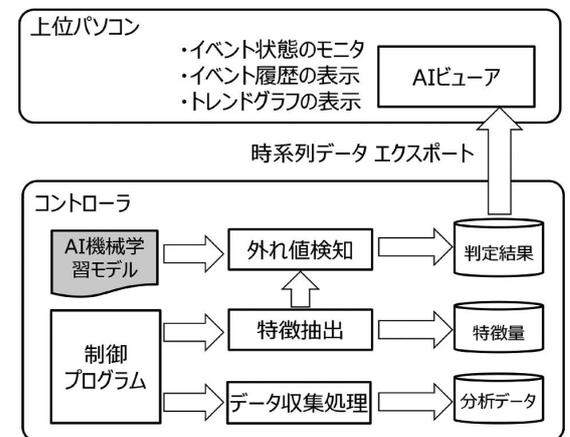


図 2 AI コントローラにおける活用フェーズの処理フロー

一方、FA に不慣れな IT 技術者には、FA に特有の知識を有していなくても IT を FA に適用できる仕組みが必要となる。

3. 技術内容

3.1 アプリケーションプラットフォーム

本稿では、制御を専門とする従来のコントローラに対し、制御周期に影響を与えることなくコントローラ内での情報処理アプリを実現する手段を提案する。

従来のコントローラでは、PLC Engine によるリアルタイム制御を実現し、その中の DB モデルでは、Java VM 上で動作する DB Connection Application を搭載してリレーショナルデータベース（以下、DB）接続機能を実現している（図3参照）。

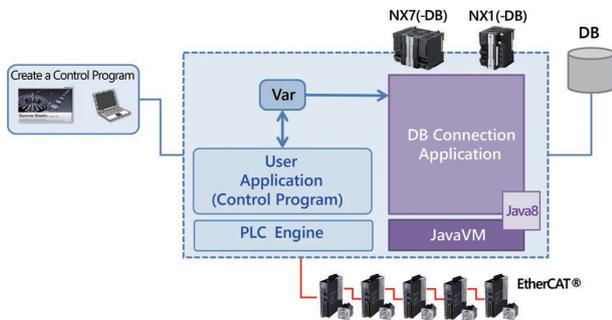


図3 DBモデルシステム構成

DB モデルでは、プロセス間通信を用いた変数アクセス API と Java 実行環境を活用することで、非同期プロセスを Java に集約し、Java の実行優先度を低くすることで制御に与える影響を抑えながら、コントローラから DB へのデータ入力や、ストアドプロシージャを使用した DB 操作を行うアプリケーションを実現している。

本稿で提案する手段の適応例として、DB モデルを拡張し、制御と同居しながら IT 処理を実行しつつコントローラが実現している高速・高精度な制御に影響を与えることなく、コントローラ上で動作するアプリケーションを実現するための Sysmac Java Application Platform（以下、アプリケーションプラットフォーム）を開発した。アプリケーションプラットフォームは、DB モデルの既存の Java 実行環境を活用し、Java ベースのアプリケーションプラットフォームとして Java 実行環境上に構築した。アプリケーションプラットフォームでは、Pipeline Application Framework（以下、パイプラインアプリケーションフレームワーク。詳細は 3.2 章で説明）を含む、Java で実装された様々なアプリケーションを実行・管理できる（図4参照）。

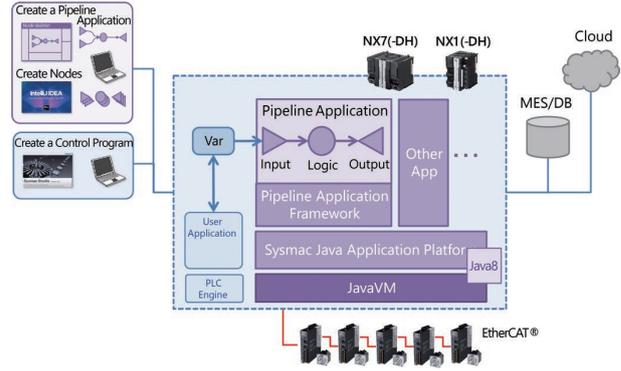


図4 アプリケーションプラットフォーム

アプリケーションプラットフォームは、オープンソースソフトウェア（以下、OSS）の Vert.x⁵⁾ を利用し、コントローラが起動しアプリケーションプラットフォームが起動した後はコントローラの状態やモードに関係なく独立してアプリケーションを実行できる（図5、6参照）。

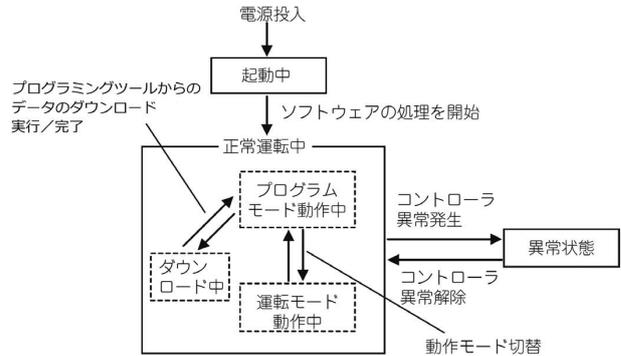


図5 コントローラの状態・モード⁶⁾

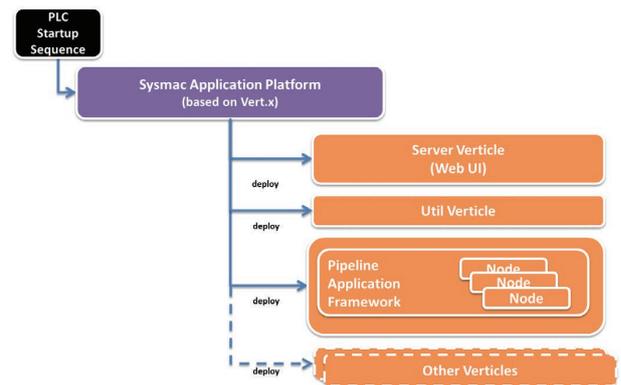


図6 アプリケーションプラットフォームの起動シーケンス

アプリケーションは、Vert.x 上で動作する Verticle（Vert.x で管理されるアプリケーションの実行単位）として実装する事で、コントローラ内で Java アプリケーションとして動作する。よって、OSS を含めた様々な Java ライブラリを利用したアプリケーションをコントローラ上で実現することができる（Java プログラムからネイティブライブラリに

アクセスするための手段である JNA/JNI を使う事で C 言語などを用いて実装されたライブラリも利用可能)。

アプリケーションプラットフォームは、制御に影響を与えないようするために、制御を実行するプロセスよりも優先順位の低いプロセスとして実行される。アプリケーションはアプリケーションプラットフォーム上で動作するため、制御を実行するプロセスの空き時間で非リアルタイムに実行され、制御プロセスの実行を妨げない。

また、アプリケーションプラットフォームでは、コントローラ内部の制御リソースへのアクセス制限を行うことで、アプリケーションが制御プロセスのリソースアクセスを妨げないようにした。

さらに、既存の変数アクセス API を拡張し、かつ制御プロセスで実行されるプログラムと連携する仕組みを取り入れる事で、アプリケーションからより高速に制御周期と同期したデータを収集できるようにした。変数アクセスの際、コントローラが提供している API では、プロセス間通信のコマンドレスポンスのプロトコルが用いられており、1 変数アクセス毎のオーバーヘッドが大きい。そこで、収集対象の変数を制御プロセスで実行されるプログラムで一時的に配列に保存し、収集対象を配列にすることで、実質的な 1 変数当たりのオーバーヘッドを小さくした。この時、コントローラ内部での通信であることから、大量の変数データを受信した場合に要する時間は十分小さく、全体の時間を削減できる (図 7、8 参照)。

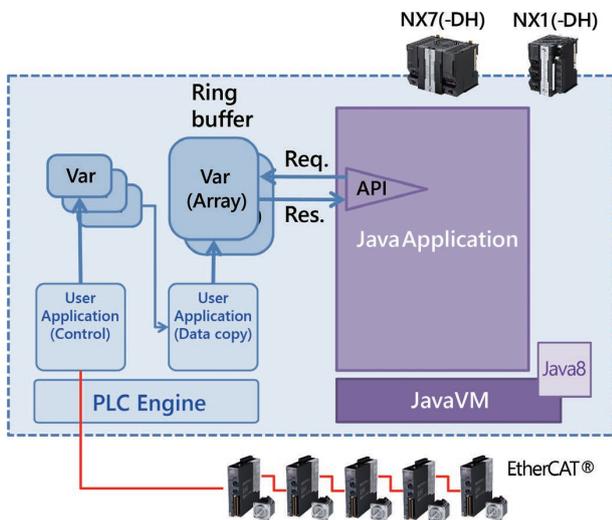


図 7 制御プログラムと連携した変数アクセス

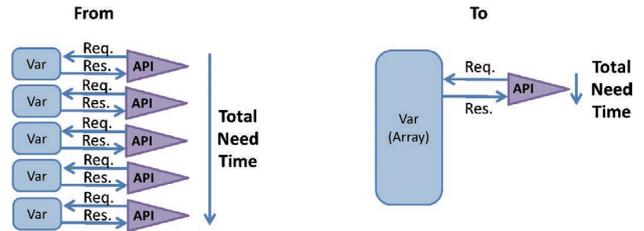


図 8 変数アクセスに必要な処理数と時間

3.2 パイプラインアプリケーションフレームワーク

本稿で提案する手段の適応例として、高度な IT スキルを持たない FA 技術者が、必要な機能の組み合わせとパラメータの設定のみで必要なデータの収集・処理・出力を行うパイプラインアプリケーションフレームワークを開発した。

パイプラインアプリケーションフレームワークでは、データを入力し、入力したデータを加工・処理し、加工・処理した結果を出力できるパイプラインアプリケーションを実現できる。

また、パイプラインアプリケーションフレームワークでは、データ入力 (Input : 図 9 の右向き△)・データ処理 (Logic : 図 9 の○)・データ出力 (Output : 図 9 の左向き△) の 3 種類の機能を、それぞれ Input Node、Logic Node、Output Node といった Node という形でソフトウェア部品化し、GUI ツールを使用して Node の定義と Node 間の関係の定義を行う事で、入力したデータをメッセージ (Message : 図 9 の□) として受け渡し、処理した上で出力するアプリケーションを簡単に実現・変更できる (図 9、10 参照)。

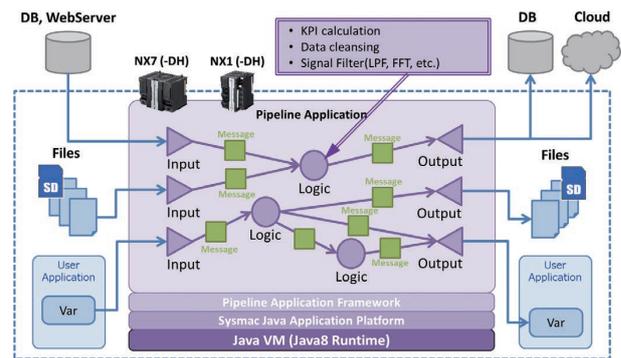


図 9 パイプラインアプリケーションフレームワーク

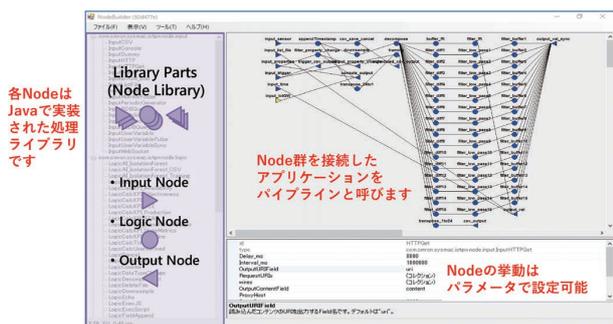


図 10 GUI ツール

さらに、FA 現場技術者が活用したい IT を IT 技術者が Node という形で開発することで、新しい機能をアプリケーションとして容易に FA 現場に導入することができる (IT 技術者と FA 現場技術者の橋渡しを実現)。

アプリケーションプラットフォームとパイプラインアプリを活用することで、様々な用途のアプリケーションを実現することができた。実現したアプリケーションの詳細は 5. 章に記述する。

4. 検証 (制御性能への影響と性能)

4.1 制御性能への影響の検証

制御性能への影響を検証するために、オムロンのコントローラである NX102 および NX701 において、本稿の技術を搭載した NX102/NX701 データベース接続 CPU ユニットの時系列データ収集システム搭載商品 (以下、TSDC モデル) でデータ収集を実行した場合のタスク実行時間への影響を検証した。

TSDC モデルでデータ収集を実行しなかった場合とデータ収集を実行した場合のベンチマーク用の制御プログラムにおけるタスク実行時間 (最大/最小/平均/標準偏差) を測定し、比較した。NX701 では制御周期を 1ms として 4008 サイクル実行、NX102 では制御周期を 2ms として 9855 サイクル実行し測定を行った。測定結果は下表の通りである (表 1、2 参照)。

表 1 NX102 の結果 (単位 μs)

	データ収集 非実行時	データ収集 実行時	差
最大	1060.205	1097.815	37.61
最小	698.495	699.665	1.17
平均	789.339	866.413	77.074
標準偏差	53.448	65.081	11.633

表 2 NX701 の結果 (単位 μs)

	データ収集 非実行時	データ収集 実行時	差
最大	622.05	702.664	80.614
最小	584.47	586.075	1.605
平均	598.50	602.995	4.495
標準偏差	5.85	8.444	2.594

測定結果から、データ収集実行時はデータ収集非実行時と比較して、タスク実行時間の最大/最小/平均/標準偏差が少し大きくなることが確認できた。

一方、NX シリーズ CPU ユニットの、タスク実行時間の最大値の目安の計算式は、コントローラのマニュアルから、

$$([\text{タスク実行時間の平均値}] + ([\text{タスク実行時間の平均値}] - [\text{タスク実行時間の最小値}])) \times 1.2 + 25 \mu\text{s}$$

と定義されている⁶⁾。

そこで、TSDC モデルでデータ収集を実行した場合のタスク実行時間の最大値の目安を計算し、計算結果が制御周期を超えないことと測定した最大値が計算結果を超えないことを確認した。

計算式にそれぞれのデータ収集実行時の測定結果を代入すると、NX102 では、

$$(866 \mu\text{s} + (866 \mu\text{s} - 699 \mu\text{s})) \times 1.2 + 25 \mu\text{s} = 1264 \mu\text{s}$$

となり、制御周期の $2000 \mu\text{s}$ を下回り、かつデータ収集実行時の最大値 $1097 \mu\text{s}$ はこれを下回っている。

また、NX701 では、

$$(602 \mu\text{s} + (602 \mu\text{s} - 586 \mu\text{s})) \times 1.2 + 25 \mu\text{s} = 766 \mu\text{s}$$

となり、制御周期の $1000 \mu\text{s}$ を下回り、かつデータ収集実行時の最大値 $702 \mu\text{s}$ はこれを下回っている。

このことから、データ収集の影響で制御実行時間とばらつきが増大するものの、制御周期のリアルタイム性を損なうものではないことを確認できた。

4.2 データ収集性能の評価

3. 章で説明した技術を用いた TSDC モデルでは、制御周期に影響を与えることなく制御周期に同期したデータ収集を実現できた。TSDC モデルの詳細は 5.1 章で記述する。既存の商品である DB モデルと TSDC モデルの収集性能を (表 3) に示す。

今回開発した技術では、時系列データの収集を制御プログラムで配列としてバッファリングし、バッファリングされたデータを制御の空き時間を用いてアプリケーションに一括で取り込むことで、質の良い高精度データを制御に影響を与えることなく取得・活用することを実現できた。

表 3 DB モデルとの収集性能の比較

	収集性能	
	TSDC モデル	DB モデル
NX701	4 KB/ms	2 KB/ms
NX102	0.4 KB/ms	0.25KB/ms

TSDC モデルでは、コントローラに NAS を接続し、コントローラで収集した時系列データを CSV ファイルとして NAS に保存する（図 11 参照）。



図 11 時系列データ収集システム

5. 効果（アプリ創造活動）

5.1 アプリ創造活動からの商品化サイクル

制御性能に影響を与えることなく、コントローラで時系列データの収集・活用が可能になったことで、本稿で提案する技術を使ったアプリケーションが、様々な製造現場のデータ活用の共創に用いられた。

その一つとなる自動車業界顧客における共創では、本稿で提案した技術を使用する事で、高速制御と同時に高速制御で生じる質の良い高精度データを、制御周期に影響を与えることなく収集し、コントローラから直接 NAS に保存、顧客アプリで解析し、その結果を制御にフィードバックするシステムを実現できた。その結果、一つのコントローラでのコストダウンと立ち上げ効率・保守性向上を実現した。

本共創の結果、アプリケーションの有用性が確認できたことから、用途限定商品としてデータベース接続 CPU ユニット 時系列データ収集システム搭載商品（TSDC モデル）の商品化を行った。

この様に、TSDC モデルの商品化では、共創・アプリ創造活動を通じて既に顧客現場でその有用性が証明されていることから、通常の商品開発における工程の一部を省略することができたため、比較的短期間でリリースを行い、複数顧客へ展開することができた。

さらに、継続して行われている共創では、TSDC モデルを拡張した新たなアプリケーションを開発し、新しい顧客への展開を実現するというアプリ創造活動からの商品化サイクルを実現できた。

5.2 現場データ活用サービス（i-BELT）

オムロンでは、オムロンのユニークなデータ活用サービス「i-BELT」を提供している。「i-BELT」は、生産現場にあるデータを活用し、その収集から見える化・分析・制御をお客様の課題に寄り添い、共に解決する共創サービスである（図 12 参照）。

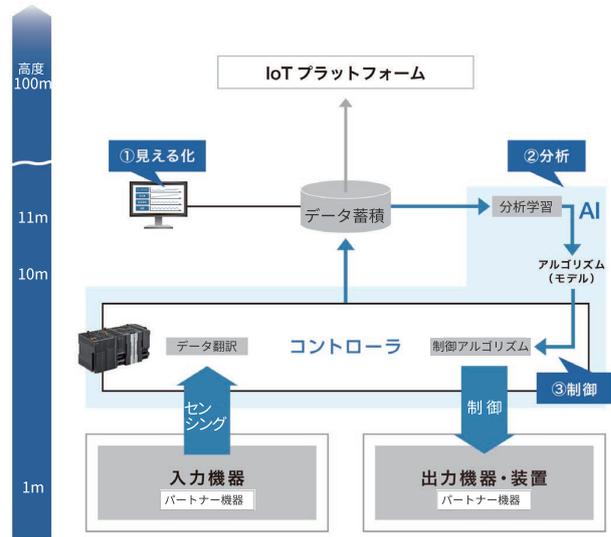


図 12 i-BELT

本稿で提案した技術を用いることで、収集された制御データは、一つのコントローラ内の利用にとどまらず、他のコントローラの制御データや情報データと結びつけて、より広範囲なデータ解析が可能になる。

5.3 データを活用した歩留り改善（社内共創）

社内共創の例では、本稿の技術を用いることで、歩留り改善のためのデータ解析に必要な、上位システムのデータなどの様々な関連するデータの紐づけ（トレース・結合・演算）を容易に実現することができた。その結果、識別コードを付与した生産条件、検査結果情報に加えて、製品一つ一つに紐づいた ILO（Input-Logic-Output）データを記録しトレースを行う事で、データ分析に基づく因果特定と結果のコントロールが可能となり、検査工程での不良排除ではなく、生産工程における前工程での不良排除が実現できた。また、部品の寸法のばらつきに応じて良品となる組み合わせを、再帰的に求めることができた。

本稿で提案した技術を用いることで、前工程での不良品排除を達成するために必要な、工程の増減に柔軟に対応し、かつ複数工程間トレース可能なデータを一元化するシステムを実現できた。コントローラに情報処理機能があることで、部材情報、検査結果、上位システム、工程データ、PC データからなるデータ構造（図 13 参照）を一元管理できるようになった。

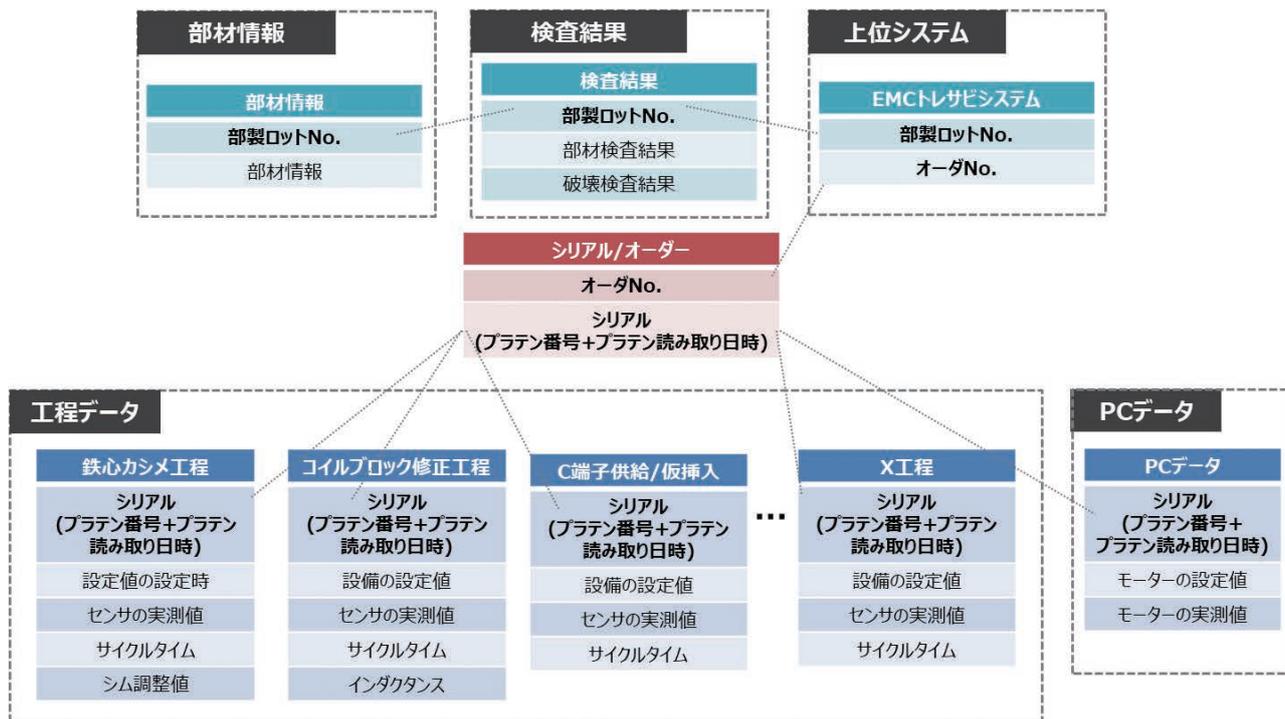


図 13 システム全体でのデータ構造図

5.4 Cell Line Control System (CLCS)

市場ニーズの多様化や需要変動の拡大など、難易度を増していくモノづくりに対し、熟練作業者は不足している。また、収益構造の見直しに伴う生産移管も加速し、作業者の早期育成や工程管理の徹底といった、4M 変動管理が複雑化している。このような変種変量生産に対応するには、作業者に多くの判断が求められ、人手だけに頼ったままでは、作業習熟度のばらつきにより、品質担保に限界がある。リスク管理においても、不良品を流出させてしまった場合の影響範囲の特定や、良品を証明できる情報がすぐに出せるよう、対策が必要となる。

オムロンが提供する CLCS では、工程管理トレーサビリティの導入と、デジタル作業指示による判断レス化で製品・作業の品質管理と、非熟練者でもミスのない作業を実現する。

本稿で提案する技術を用いることで、製品トレース情報と工程・作業トレース情報の一元化による工程品質管理を容易に実現することができた。また、工程や作業者の状態などの製造情報を製品に紐づけて一元管理し、カン・コツに頼らない品質ばらつき要因分析による工程改善を実現できた (図 14 参照)。

5.5 クラウド環境への拡張と業界標準プロトコルへの拡張

本稿の技術を用いることで、NX コントローラに容易にクラウド接続性を付与することができた。

Azure では、Azure 接続に必要なライブラリを公開して

いるが、本稿の技術を用い、公開ライブラリを取り込んで Node を開発することで、短期間で Azure 接続アプリを実現し、Azure 認証⁷⁾ を取得することができた (カタログには非掲載)。

同様に、AWS IoT⁸⁾ や MindSphere⁹⁾ といったクラウドへの接続機能や Hermes Standard¹⁰⁾ の様な FA で用いられる標準通信プロトコルを容易にコントローラ上に搭載することができた。

6. むすび

近年、生産現場では、制御機器の生み出すデータを活用し、情報処理技術を活かした生産性や歩留りの向上、生産立ち上げ期間の短縮といったニーズが増えてきており、現場のニーズに素早く対応し、かつ最新の情報処理技術を用いたアプリケーションを導入できる環境が求められている。

さらに、従来手段では、高度な IT スキルが必要であり、生産現場でタイムリーにデータ活用できる手段が求められていた。

本稿での取り組みにより、コントローラの本来の機能である制御周期に影響を与えることなく、コントローラ自身が生成する質の良い高精度データを活用した生産現場の改善に寄与できる環境をコントローラの内部に実現することができた。

また、このような環境を活用したアプリ創造活動を通じて、コントローラ自身に情報処理機能を持たせるというア

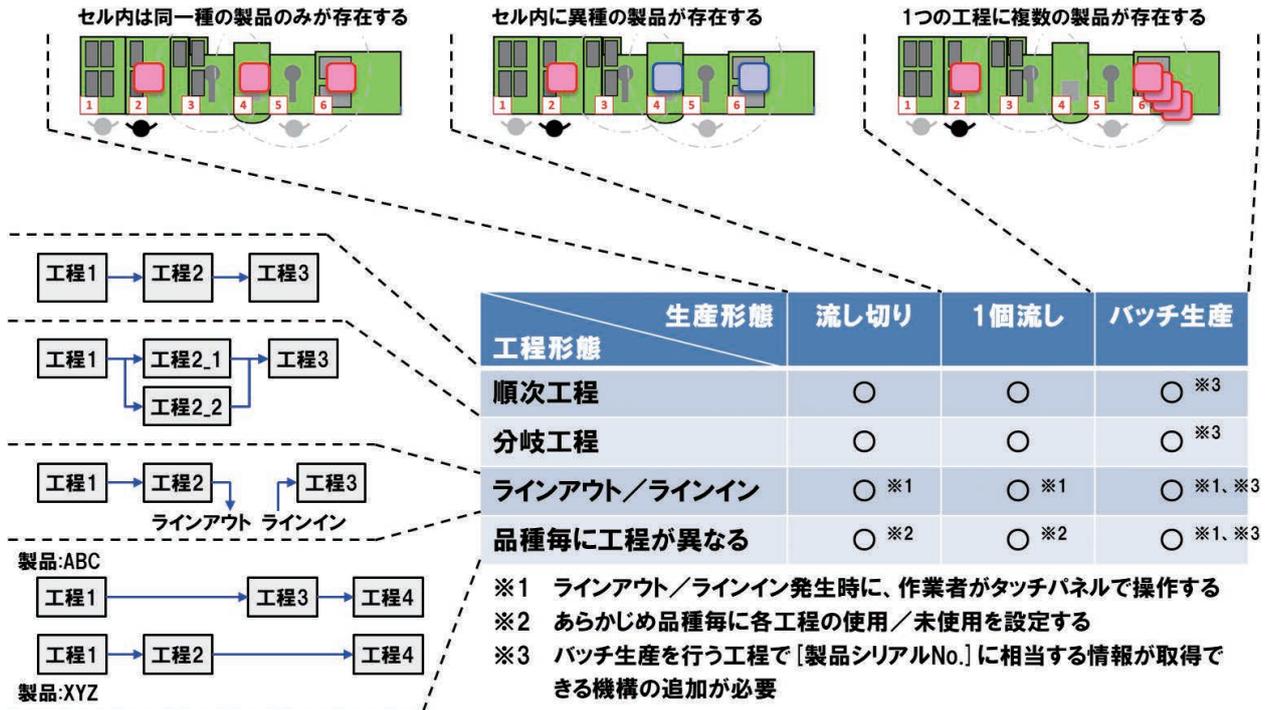


図 14 CLCS における一元管理

アイデアの実現性と有効性を実証できた。

今後も、アプリケーションプラットフォームとしての機能強化や、Node による機能拡張だけでなくパイプラインアプリケーション以外のアプリケーションを開発するための開発環境を追加する事で、より高度で高性能なアプリケーションを実現できることを目指したい。

また、TSDB の移植を含めた変数アクセスの高速化に取り組むと考えている。

本技術を活用することで、共創を通じたアプリ創造活動、販売先を限定する用途限定商品化と複数顧客への展開、汎用商品化と汎用展開のサイクルの内、アプリ創造活動から用途限定商品化と複数顧客への展開、さらなるアプリ創造活動のサイクルを実現できた。今後は、汎用商品化につながるサイクルを実現したい。

参考文献

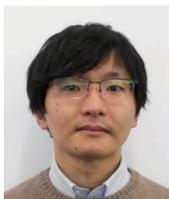
- 1) 太田政則, 西山佳秀. AI搭載マシンオートメーションコントローラの開発 (2). OMRON TECHNICS. 2019, vol.51 No.1, p.45-51.
- 2) 総務省, 厚生労働省, 文部科学省. 2018年版ものづくり白書. 経済産業調査会, 2018, 325p.
- 3) オムロン株式会社. “現場データ活用サービス i-BELT”. オムロン制御機器. <https://www.fa.omron.co.jp/solution/i-belt/>, (参照 2022-01-11).
- 4) オムロン株式会社. “トレーサビリティで実現する変種変量生産の品質管理”. オムロン制御機器. https://www.fa.omron.co.jp/solution/proposal/app_006/, (参照 2022-01-11).

- 5) Eclipse. Vert.x. <https://vertx.io/>, (参照 2022-01-11).
- 6) オムロン株式会社. NJ/NX シリーズ CPU ユニットユーザーズマニュアル ソフトウェア編. 2021, 838p.
- 7) Microsoft Corporation. “Azure Certified Device プログラムの概要”. <https://docs.microsoft.com/ja-jp/azure/certification/overview>, (参照 2022-01-11).
- 8) Amazon.com Inc. “IoT (モノのインターネット) - ユースケース別クラウドソリューション”. <https://aws.amazon.com/jp/iot/>, (参照 2022-01-11).
- 9) Siemens AG. “MindSphere”. <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ja/products/mindsphere/>, (参照 2022-01-11).
- 10) The Hermes Standard Initiative. IPC-HERMES-9852, (2019).

執筆者紹介



西垣 弘二 NISHIGAKI Koji
インダストリアルオートメーションビジネス
カンパニー
技術開発本部 第1技術部
専門：情報科学
博士（工学）



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

Microsoft および Azure 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。

Vert.x は、Eclipse Foundation, Inc. の米国およびその他の国における商標もしくは登録商標です。

Java は、Oracle Corporation およびその子会社、関連会社の米国およびその他の国における登録商標または商標です。

EtherCAT は、ドイツ Beckhoff Automation GmbH によりライセンスされた特許取得済み技術であり登録商標です。

AWS 商標は、Amazon.com, Inc. またはその関連会社の米国およびその他の国における商標です。

MindSphere は、Siemens AG の商標または登録商標です。

その他、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。

良品生産性向上のための Q-upSystem を支える データ収集・分析基盤の開発

中西 功

検査システム事業部では、従来からプリント実装基板を 3D 計測し、定量化された品質基準に従って検査を行う AOI (Automated Optical Inspection)、3D-CT 方式ではんだの形状の検査を行う AXI (Automated X-ray Inspection)、各工程検査装置からの品質データや生産情報を分析する Q-upNavi、不良を作らない生産作りに貢献するためにマウンタと連携する Q-upAuto を開発しており、多くの生産現場で、不良流出防止や品質維持改善に貢献している。

Q-upAuto と Q-upNavi で構成する Q-upSystem は、扱うデータや処理を追加しながら開発を進めており、段階的な機能拡張を生産現場に適用するためには、高速なサーバを使用せずに機能を実現する基盤が必要となる。

今回、ビックデータのようなデータ分析基盤の構築方法を元に、製造データと品質データの紐づけ・蓄積・分析の知見を加えた Q-upSystem のデータ収集・分析基盤を開発した。最終工程の品質データを起点に前工程の検査基準を最適化する機能用のデータ検索・取得の性能評価を行い、高速なサーバを導入することなく十分な高速性を得られた。

Development of Data Collection/Analysis Platform that Supports Q-upSystem for Improving Non-defective Product Productivity

NAKANISHI Isao

Inspection System Division has traditionally performed 3D measurement of printed mounting boards and inspected according to quantified quality standards. AOI (Automated Optical Inspection) and AXI (3D-CT method) to inspect the shape of solder. Automated X-ray Inspection, Q-upNavi that analyzes quality data and production information from each process inspection device, and Q-upAuto that cooperates with a mounter to contribute to production that does not create defects, and many At the production site, it contributes to the prevention of defective outflow and the maintenance and improvement of quality.

The Q-upSystem, which consists of Q-upAuto and Q-upNavi, is being developed while adding data and processing, and in order to apply step-by-step function expansion to the production site, use a high-speed server. You need a foundation to realize the function without.

In this paper, we have developed a Q-upSystem data collection/analysis platform that adds knowledge of linking/accumulating/analyzing manufacturing data and quality data based on the method of constructing a data analysis platform such as big data. Based on the quality data of the final process, we evaluated the performance of data search / acquisition for the function that optimizes the inspection criteria of the previous process, and obtained sufficient high speed without introducing a high-speed server.

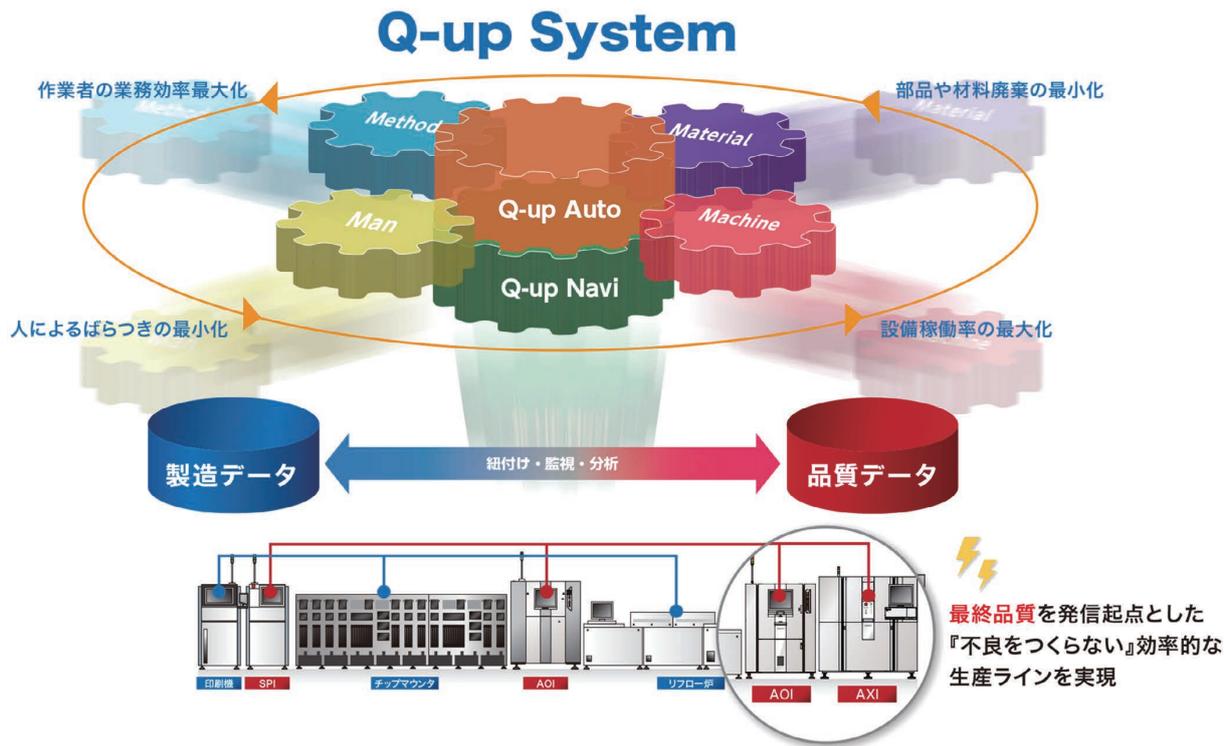


図1 Q-upSystemの全体像

1. まえがき

近年、自動車の安全設備やハイブリッド車の普及が急速に進み、自動車に搭載される電子部品基板が急速に増加しており、将来の自動運転に向けて、より高度化される見込みである。自動車に搭載される部品には高い品質が求められるため、プリント実装基板の実装ラインは不良を流出させないだけでなく、手直して良品とすることも禁じられる場合があり、不良を作らないことが必要になっている。

また、豊富な経験と知識を持つ熟練した実装ライン担当者、製造技術者の高齢化が進み、高い品質を達成し維持する人材がこの10年に渡り減少し続けている。そういった人材が確保できている現場においても、コスト競争力が求められるため、改善に多くの工数を使うことができない。また業界のグローバル化が進み、高い品質を達成し維持する人材がいない拠点でも、高い品質を達成することが求められている。

従来より、検査システム事業部では変動する生産の4M「Man（作業者）」「Machine（機械設備）」「Material（原材料）」「Method（作業方法）」に対応し、良品を作り続けるために検査装置の品質データを起点に、各設備データの紐づけ⇒収集⇒監視⇒改善を自動で実行するQ-upSystem（図1）を開発し、顧客の品質改善・維持とコスト競争力への貢献を目指している。Q-upSystemは、検査装置の品質データと生産設備（印刷機・マウンタなど）の製造データを紐づけし、リアルタイムに異常を警告する

Q-upAuto¹⁾、各工程検査装置からの品質データや生産情報を分析するQ-upNaviで構成される。

Q-upSystemは、品質改善の機能を提供するアプリケーション部と検査装置の品質データ、生産設備の製造データを収集しアプリケーションに提供するデータ収集・分析基盤で構成される。アプリケーションは、リアルタイムに品質の変動を捉えて品質改善を行うために、大量のデータを基にした自動分析を行う必要があり、データ収集・分析基盤は、高速なデータの紐づけとアプリケーションから指定された条件のデータを紐づけた状態で高速に収集することが必要となる。

実装基板の実装工程では、生産ライン数は最大で100ライン程度であり、サイクルタイム（10秒～1分程度）毎に製造データ、品質データが生成される。現在のQ-upAutoでは、マウンタの製造データと検査装置からの製造データを基板1枚毎に収集して、基板1枚毎のファイルとして保存し、基板1枚毎に紐づけを行っている。品質データには、大量の計測値があるため、1ライン分のマウンタの製造データと品質データは1日に1GB程度であり、90%以上は計測値の数値データとなる。現在、1台のサーバで3ライン分のデータ収集と紐づけは可能であるが、ファイルの入出力が多いために4ライン以上の処理が難しく、4ライン以上の顧客への適用ができないため、データの格納方法を改善する必要がある。また、現在のQ-upNaviでは、複数の検査工程の検査結果・計測値を取得できるが、計測

値を基板 1 枚毎のファイルとして保存しているため、複数の基板の計測値を取得する場合に時間がかかるため、リアルタイムな自動分析機能の開発に利用できない問題がある。

近年のビックデータのようなデータ分析基盤はデータウェアハウス²⁾を含む表 1 に示す三層のデータレイヤーで構成し、BI (Business Intelligence) で意思決定を支援することが多い。これらはリレーショナルデータベースや NoSQL データベースを用い、オンプレミスの高価なサーバ上、または、クラウド上で構築することが多い。これらの技術は様々な分野で適用されているが、先に述べたように実装基板の実装工程では、製造データと品質データの紐づけ・蓄積・分析の知見が必要なこと、および、ネットワークをクラウドに接続することや高価なサーバを用いることが難しいため、適用されている事例はない。

本稿では、大量のデータの収集と紐づけ、および、自動検知、分析のために品質データを高速に検索・取得する Q-upSystem を支えるデータ収集・分析基盤の構築方法について紹介する。実装基板の実装工程のデータの特性と自動分析に適したデータ設計について述べ、構築したデータ収集・分析基盤の基本性能について述べる。

表 1 一般的なデータレイヤー

データリポジトリ	説明
データレイク	データソースとなるシステムやデータベースから収集してきたデータをそのままの形で保存するもの。データソースから分離することで、再収集が必要な場合にデータソースへの影響をなくすことができる。
データウェアハウス	データソースやデータレイクから収集したデータを分析のために、目的別に編成され、統合された時系列で、削除や更新しないデータの集合体。
データマート	データウェアハウスの中から特定の目的に合わせた部分を取り出し、活用に適した形に加工したデータを保持する。

2. データ収集・分析基盤の課題

2.1 プリント実装基板の実装工程のデータ

プリント実装基板の実装工程は、次のように構成される。先頭から、はんだ印刷機、SPI、マウンタ、マウント後 AOI、リフロ炉、リフロ後 AOI、AXI が並ぶ。それらの装置は図 2 の上部のように一直線で配置され、上流から下流（この図の場合左から右）にプリント配線板（以降基板

と呼ぶ）を流しながら実装を行う。はんだ印刷機は基板にステンシル状の金属板を介してはんだを印刷し、SPI は印刷されたはんだの印刷状態を検査する。マウンタはそのはんだの上に電子部品を搭載し、マウント後 AOI はその部品の搭載状態を検査する。リフロ炉は部品を実装した基板を加熱してはんだを溶融させ、基板を冷却させることではんだを硬化させて電子部品を基板に固定する。リフロ後 AOI と AXI は、このようにして実装された完成品を検査する。

基板には図 3 のようにトレーサビリティ用に基板 ID が刻印されており、一つまたは複数の個片基板がある。個片内の回路番号の場所に電子部品が搭載され、電子部品のピンははんだにより基板に固定されている。図 2 に示すように、生産・検査後に各データが生成される。検査装置で NG 判定された場合のみ、目視検査を行い、NG 判定した回路の部品、ピンの目視検査結果データが生成される。

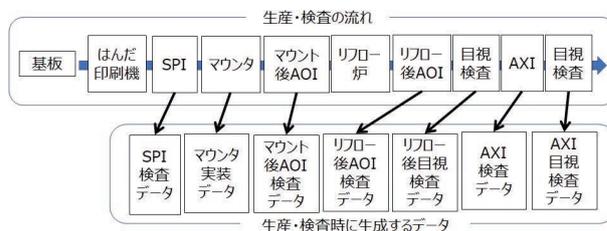


図 2 生産・検査の流れと生成するデータ

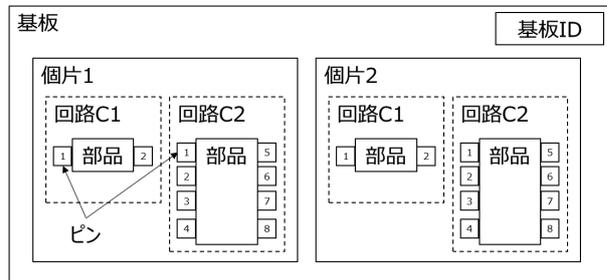


図 3 基板の構造

表 2 に基板サイズ 236 mm×154 mm、総部品数が 938 個、総ピン数が 2,692 個の基板 1 枚当たりの品質データ量を示す。検査結果の数は、総部品数と総ピン数と同数であり、計測値の数は SPI が 29,612 個、マウント後 AOI が 132,122 個、リフロ後 AOI が 157,464 個となる。

表 2 基板 1 枚当たりの品質データ量

項目	SPI	マウント後 AOI	リフロ後 AOI
検査結果数 (部品)	—	938	
検査結果数 (ピン)	2,692		
計測値数	29,612	132,122	157,464

2.2 データ収集・分析基盤の課題

Q-upSystem のアプリケーションは、機能毎にリアルタイムや1日に1～24回などの周期、または、ユーザによるトリガでデータ収集・分析・監視を行い、条件を満たした場合に、追加のデータ収集・分析や、改善の処理を実行する。Q-upSystem の特徴は、品質データを起点に上記の処理を行うことであり、データ収集・分析基盤に対する課題は下記になる。

課題 1：

製造データ、品質データをプリント実装基板の実装ラインのサイクルタイム内（10秒～1分程度）で紐づけること。

課題 2：

品質データを高速に検索・取得できるようにデータを格納し、アプリケーションが利用しやすい形に変換すること。

課題 3：

生産ライン数（最大 100 ライン程度）に対応できるスケーラビリティがあり、工場内のオンプレミスのシステムとして、高価なサーバを使用せずにシステムを構築できること。

課題 1 は基板 1 枚毎の製造データと品質データの紐づけ処理性能面の課題である。例として、表 3 に Q-upAuto の不良通知機能を示す。表 3 のデータ収集・分析基盤機能では、表 2 の基板をサイクルタイム 30 秒で生産する場合、938 個の部品を搭載した製造データと 3 つの検査工程の検査結果を 30 秒以内に紐づける必要がある。

表 3 Q-upAuto 不良通知機能

項目	内容
アプリ機能	発生した実不良を実装したマウンタデバイス ID を UI に表示する。
データ収集・分析基盤機能	発生した実不良を実装したマウンタデバイス ID をリアルタイムに集計する。

課題 2 は品質データの検索性能に関する課題である。格納している大量の品質データの中から、効率的に検索・取得できる必要がある。例として、表 4 に Q-upOpti（2021 年販売）の検査基準最適化機能を示す。課題 2 は、表 4 のレスポンス確保のために必要なものである。表 4 の前工程の検査基準の最適化の計算のためには、計算に必要なサンプル数となる 10～200 枚程度の基板、部品の検査結果と計測値、および、検査基準が必要になる。検査基準の最適化計算では、同一の基板・部品の複数工程の検査結果・計測値と現在の検査基準を考慮するため、図 4 に示す入力データ構造が必要となる。例えば、10 日分の 1 ラインの製造データと品質データ

（約 10GB）の中から、リフト後の部品の検査結果に関連する品質データ（約 10MB）を抽出し、同一部品のデータとして紐づけた形に 10 秒以内に変換することである。

表 4 Q-upOpti 検査基準最適化機能

項目	内容
アプリ機能	リフト後検査で実不良を検知した際、前工程の検査（SPI またはマウント後 AOI）で検知すべき不良の場合に、計測値を元に前工程の検査基準の最適値を計算し、検査基準を変更する。
データ収集・分析基盤機能	アプリから指定された実不良の部品品番と同じリフト後の検査基準の計算に必要な数の良品と不良の計測値と検査基準、および同じ基板の前工程の部品の計測値と検査基準を返す。

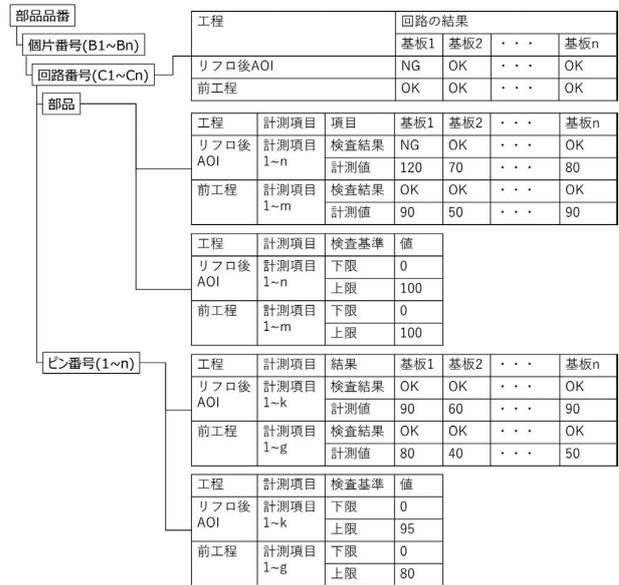


図 4 検査基準最適化計算の入力データ構造

課題 3 は、適切なコストで Q-upSystem を導入するために必要な課題である。顧客毎に生産ライン数やネットワーク構成も異なるため、多様な構成に対応できる必要がある。

次節では、これらの課題に対する解決方法について述べる。

3. データ収集・分析基盤の設計

2.2 節の課題 1 の解決のために、同一テーブルへのデータの同時書込みによる不整合を回避するためのロック待ちによるレスポンス低下を避けることが必要である。そこで複数の実装ラインの装置からのデータの入力に対して、データテーブルを装置毎に分割し、データをロックする範囲は装置毎に限定する。データの紐づけ処理は、装置毎に保存されたデータを入力として、実装ライン毎に独立して

行うことでレスポンスを確保する。

2.2 節の課題 2 の解決のために、データの検索・取得時に、サーバのディスク I/O を減らすようにアクセスするデータの範囲を局所化することが必要である。そこでデータのアクセスパターンとデータ量に応じて、データテーブルの種類と期間の分割を適切に設計する。品質データの基本取得パターンは、「期間と品質の条件を指定して検索し、検索結果に基づき、関連するデータや詳細データを取得する」となる。基本パターンの例として、表 4 の検査基準最適化機能のための検査基準最適化計算の入力データの取得シーケンスを図 5 に示す。図 5 は前工程がマウント後 AOI の場合を表している。アプリケーションは、「[A1] 期間を指定して実不良の回路一覧を検索」した後、「[A2] 実不良の回路、前工程、サンプルの基板数を指定してデータを取得」する。この時、アプリケーションが取得するデータ量の 90% 以上は「計測値」であるため、「[B1] [B2] 検査結果・計測値を抽出し図 4 の構造に設定」の中の計測値の抽出と設定に最も時間がかかる。この基本パターンを元に、検査結果のテーブルを「検査結果(基板)」「検査結果(回路・部品・ピン)」「計測値」とし、利用頻度とデータ量を考慮して、1 テーブル内の期間をそれぞれ、1 日、1 時間、10 分とする。また、「計測値」は部品品番毎に取得・分析するため、部品品番毎に分割する。上記の分割をすることで、検索・取得時のアクセスするデータの範囲を局所化でき、高いレスポンスが期待できる。

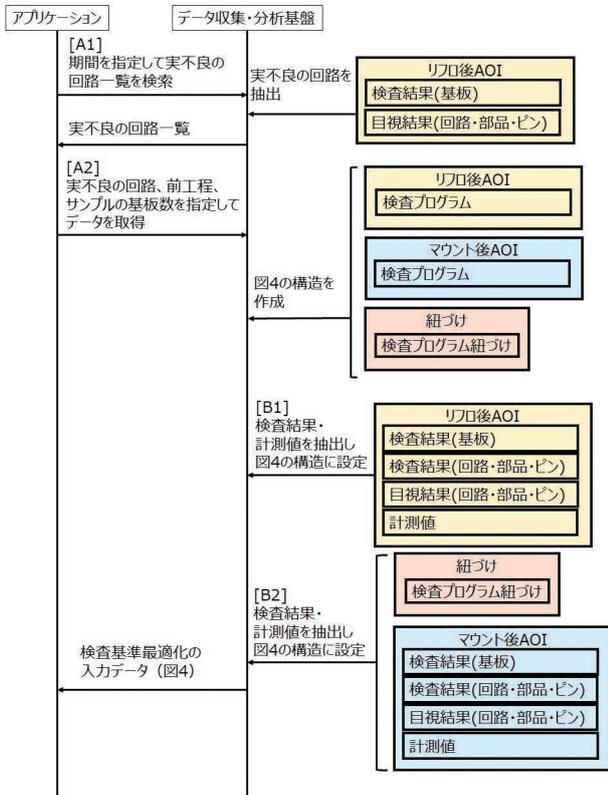


図 5 検査基準最適化計算の入力データの取得シーケンス

2.2 節の課題 3 に関しては、データを検査装置、期間で分割することにより、データの分散配置が可能となり、スケールアウト（コンピュータの台数を増やすことでシステム全体の性能を向上させること）が容易になる。これにより生産ラインを段階的な置き換えや増設時に段階的に安価なサーバを増やすことや、システム規模に応じたサーバ選定が可能となる。

以上を考慮して、表 1 のデータレイヤーを適用したデータ収集・分析基盤の構成を図 6 に示す。図内の矢印はデータの流れを表している。データレイクには、アプリケーションが必要とした検査画像を検査装置から取得した後に配置し、検査装置からの複数回の取得を回避する。データウェアハウスには、検査装置（SPI、マウント後 AOI、リフロ後 AOI、AXI）の品質データ（検査結果、検査プログラム）と生産設備（マウンタ）の実装データと各工程の紐づけデータを配置する。データマートには、アプリケーションが表 3 の不良通知機能でそのまま利用できる実不良の部品を実装したマウンタデバイス ID のリスト「実不良実装データ」を配置する。

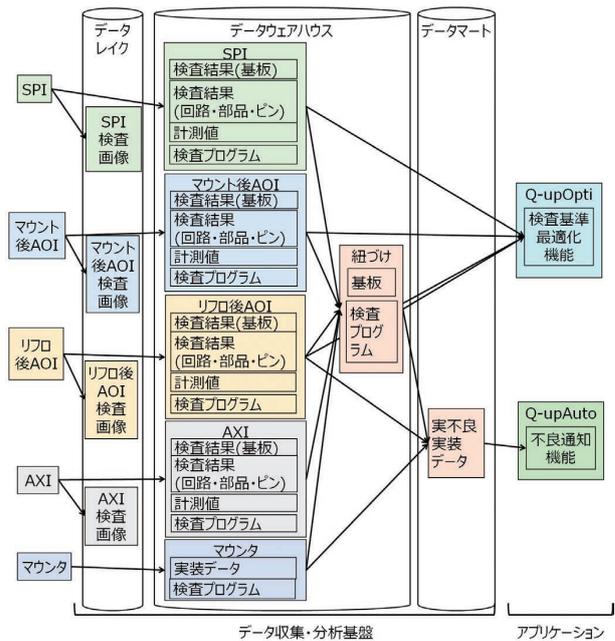


図 6 データ収集・分析基盤の構成

4. 性能評価

4.1 性能評価 1

本節では、データ量が多く高速化の難易度が高い 2.2 節の課題の検証のために、高価でないサーバでファイルベースのシステムを C# で実装し、課題 1 を対象とした紐づけ速度の性能評価（以降性能評価 1 と呼ぶ）を行った結果を述べる。性能評価 1 では、弊社工場の 5 時間分の生産デー

タの中から、マウンタと検査装置 2 台分のデータに対して、検査不良データの紐づけ時間の評価を行う。

性能評価 1 の結果を表 5 に示す。表 5 より、1 基板あたりの紐づけ時間は 13.3 ms となり、実装ラインのサイクルタイム (10 秒～1 分程度) より、十分小さい時間となった。これは、「検査結果 (回路・部品・ピン)」のテーブルを 1 時間単位にすることで、データの紐付け時の I/O を局所化していることが大きな要因である。

表 5 性能評価 1 の結果

ケース	紐づけ部品数 (検査不良部品)	検査枚数	紐づけ時間 [ms]
1	116	148	1559
2	188	163	1873
3	206	191	1927
4	191	96	2274
5	72	41	839
合計	773	639	8,472
1 部品あたりの紐付け時間 [ms]			11.0
1 基板あたりの紐付け時間 [ms]			13.3

4.2 性能評価 2, 3

本節では、表 4 の検査基準最適化機能を対象としたデータの取得速度の性能評価 (以降性能評価 2 と呼ぶ) を行った結果を述べる。また、性能評価 2 の比較のために従来の Q-upNavi で計測値の取得速度の性能評価 (以降性能評価 3 と呼ぶ) を行う。性能評価 2 では、2 つの工程の計測値を取得するが、Q-upNavi には、複数工程の計測値を紐づけて取得する機能はないため、2 つの工程の計測値の取得時間を、1 つの工程の計測値の取得時間を 2 倍して性能比較を行う。

性能評価 2、3 では、938 個の部品を搭載した基板のデータを用いた。性能評価 2 では、表 6 のデータに対して、基板 10、20、50、100、200 枚のリフロ後 AOI とマウンタ後 AOI のデータを取得し、図 4 の構造に変換するまでの時間を計測した。性能評価 3 では、表 6 のデータに対して、基板 10、20、50、100、200 枚のリフロ後 AOI の計測値のデータを取得し、2 倍の時間を 2 工程分のデータ取得時間とした。性能評価 1、2 に使用した PC のスペックは、OS : Windows 10、CPU : Intel® Core i7-6600U@2.60GHz、メモリ : 16GB、ストレージ : SSD のノート PC であり、性能評価 3 では商品の標準スペックのサーバ (OS : Windows Server 2016、CPU : Intel® Xeon® E5-2630 v4@2.40GHz、メモリ : 16GB、ストレージ : SAS 10,000RPM) を使用した。

性能評価 2 の結果を図 7 と表 7、性能評価 3 の結果を図

8 と表 8 に示す。性能評価 2 と性能評価 3 の速度比較を表 9 に示す。表 9 より、性能評価 2 の時間は、性能評価 3 の時間より基板枚数 10 枚で 19.7 倍以上短縮され、基板枚数が増えるにつれ高速化の効果が大きくなるなど、従来と比べ大幅な高速化ができた。これは、計測値のテーブルを部品品番と期間で分割することにより、データ取得時の I/O を局所化していることが大きな要因となったためである。従来のシステムは計測値を除くデータを検査装置毎に分割せずに、リレーショナルデータベースのテーブルに格納し、計測値のデータは、基板 1 枚毎のファイルに格納していたため、複数の基板の計測値を取得する場合に I/O が多くなり、時間がかかっていた。

表 6 性能評価 2、3 のデータの条件

名称	部品種	ピン数	基板上の部品数
部品品番 A	チップ抵抗	2	40
部品品番 B	SOP	8	4
部品品番 C	QFP	208	2

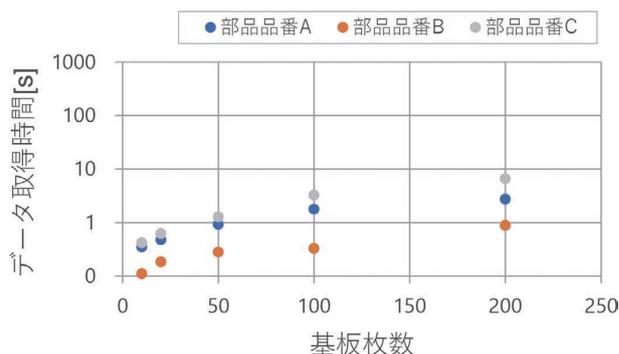


図 7 性能評価 2 の結果 (2 工程のデータ取得時間)

表 7 性能評価 2 の結果 (2 工程のデータ取得時間)

基板枚数	取得時間 [s]		
	部品品番 A	部品品番 B	部品品番 C
10	0.35	0.11	0.42
20	0.48	0.18	0.63
50	0.92	0.28	1.28
100	1.79	0.33	3.26
200	2.75	0.88	6.59

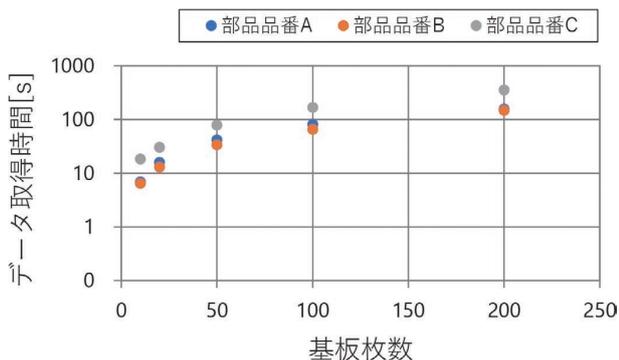


図 8 性能評価 3 の結果 (2 工程のデータ取得時間)

表 8 性能評価 3 の結果 (2 工程のデータ取得時間)

基板枚数	取得時間 [s]		
	部品品番 A	部品品番 B	部品品番 C
10	6.94	6.49	18.5
20	15.93	13.1	30.3
50	41.72	33.69	78.89
100	81.12	65.66	168.97
200	156.96	148.93	356.79

表 9 性能評価 2 と 3 の速度比較結果

基板枚数	取得時間の比率 (性能評価 2 の時間 / 性能評価 3 の時間)		
	部品品番 A	部品品番 B	部品品番 C
10	19.7	58.7	44.0
20	33.3	71.2	48.4
50	45.1	119.7	61.4
100	45.4	200.2	51.9
200	57.2	169.3	54.2

5. むすび

製造データ、品質データのリアルタイムの紐づけと高速な検索取得を高価なサーバを使用せずに実現する課題に対して、データのアクセスパターンとデータ量に応じたデータテーブルの種類と期間の分割を適切に設計したデータ収集・分析基盤を開発した。最終工程の品質データを起点に前工程の検査基準を最適化する機能に向けた性能評価を行い、高速なサーバを導入することなく十分な高速性を得られた。本基盤は、2021 年に販売した Q-upOpti を支える基盤となっている。

今後は、現在の Q-upAuto の対応ライン数の拡張のために、2.2 節の課題 1 の解決方法の適用や、より高い品質を実現するシステムに向けて進化する Q-upSystem や AOI/

AXI を支えるデータ収集・分析基盤として、データや処理を追加し、システム進化を加速させる予定である。

最後に、今回の開発に多大なご協力をいただいた検査システム事業部の方々に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 森弘之, 岸本真由子. AOI とマウンタの連携による故障予知システム Q-upAuto. OMRON TECHNICS 162. 2019, Vol.51, No.1, p.105-111.
- 2) Inmon, W. H. Building the Data Warehouse. 1992, 272p.

執筆者紹介



中西 功 NAKANISHI Isao
 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、データ工学
 博士（工学）

Windows は、米国 Microsoft Corporation の米国およびその他の国における登録商標です。

Intel® Core、Intel® Xeon® は、Intel Corporation の米国およびその他の国における登録商標です。

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

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. ヘルスケア —



低コスト・短納期での通信対応体温計開発を実現する音波通信技術

平田 英宇

コロナ禍において体温測定とその記録の需要が高まる中、市場には測定した体温をスマートフォンなどに転送できる通信対応体温計が、ほとんど存在していなかった。体温記録需要の急速な高まりに応えるため、通信対応体温計の開発が急務となったが、一般的な Bluetooth 通信の場合、ハードウェアの新規設計、生産ラインの新規立ち上げが必要で、コロナ禍での需要にスピーディに応えることができない。そこで、従来の体温計モデルがすでに搭載している、測定完了を報知するためのブザーに着目した。このブザーを用いて、測定データを乗せて変調した音波を送信し、スマートフォンのマイクを用いて受信した音波から測定データを復調する音波通信方式を採用することで、従来体温計モデルからファームウェアの変更のみで通信を実現できることに着目した。本手法の採用により、低コストかつ短納期で通信対応体温計を市場に届けることができ、また Bluetooth 通信が必要とされるペアリングが不要で簡便に通信できるユーザビリティが実現できた。音波通信技術は、低コストかつ簡便なユーザビリティが求められる新興国向け機器への活用が期待できる。

Acoustic Communication Technology for Quick Development of Low Cost Connected Thermometers

HIRATA Hideie

With the rising demand for body temperature measurement and recording under COVID-19 circumstances, there had not been a variety of choices for smartphone-connected thermometers. To respond to the significant leap of needs for body temperature recording, we faced the urgent task of developing a connected thermometer in a minimal time frame. Moreover, we found we would not be able to meet the timeline if we choose the Bluetooth connectivity, since it requires a new hardware design and a new production line. In this situation, instead of Bluetooth communication, we considered acoustic communication taking advantage of notification buzzers already installed in our traditional thermometers. We focused that our thermometer could communicate by sonic wave transmitted by the buzzer just by changing its firmware. Our thermometer sends sound waves that modulates the measurement data using the buzzer in acoustic communication, and smartphones receives sound waves using its microphone. It demodulates sound waves to measurement data. We have quickly delivered a connected thermometer to the markets at a low cost by selecting this method. Also, it enabled better usability by eliminating the Bluetooth pairing process. We can extend this method to connected products for developing countries where low costs and simple usability are the key factors.

1. まえがき

オムロンヘルスケア株式会社では、2021年1月には欧州向けに音波通信対応実測式体温計 MC-280B¹⁾ を、2021年3月には日本向けに音波通信対応予測式体温計 MC-6800B²⁾ を発売しており、市場からは好意的に評価されて

いる（2022年1月28日現在、Amazonでのレビュー評価は5点満点中の4.4。レビュー件数は993件）。

2019年末に始まったコロナ禍は、全世界に体温測定の習慣化と体温計需要の急速な増加を招くと同時に、体温の記録という新たな社会課題をもたらした³⁾。測定した体温をスマートフォンに転送し記録することが、個人の健康管理や検温報告の利便性を高め、この社会課題の解決の一助

Contact : HIRATA Hideie hideie.hirata@omron.com

になると考えたオムロンヘルスケア株式会社では、コロナ禍において通信対応体温計の開発が喫緊の課題となった。社会課題に迅速に応えるべく、短納期で通信対応体温計を市場に供給するために、社内で以前より研究を進めていた音波通信技術を採用することとなった。

電波通信が電磁波を用いた通信であることに対して、音波通信は音波を用いた通信である。近年、音波通信技術を用いた実証実験や製品化などが進んできており、身近なところにも音波通信技術が使われるようになってきている。例えば、Google社が2014年に発売したChromecastでは、テレビとスマートフォンのペアリングに音波通信技術を使用している⁴⁾。

体温計には、もともと測定完了を報知するための圧電ブザーを備えている。このブザーを用いて、音波通信が実現できれば、体温計ファームウェアの実装のみで最速に製品化できると考え、音波通信体温計の開発がスタートした。とはいえ、従来体温計モデルのハードウェアの制約が大きい中、安定した音波通信を実現するには、受信側となるスマートフォンの復調アルゴリズムが特に重要となってくる。

本稿では、音波通信体温計が採用した音波通信技術について、説明する。

2. 音波通信技術の概要と変調方式

音波通信は音波を用いた通信だが、その通信原理は電磁波通信と相違なく、データを電磁波に変調するか音波に変調するかの違いに過ぎない。そのため、変調技術も従来の技術を使用するが、前提として体温計ファームウェアのみで実現可能な変調技術を採用する必要がある。体温計はCPUのサウンドジェネレータ機能を用いて、CPUが生成する矩形波出力をブザーに印加することで、ブザーを鳴動している。変調においてもこのサウンドジェネレータ機能を用いるが、周波数およびDuty比のみが制御可能かつ位相は制御できないという制約を考慮した結果、変調方式には位相を変調要素に持たないASK⁵⁾とFSK⁶⁾を候補とした。

FSKの場合は変調に周波数の変化を用いるが、体温計における周波数の鳴動誤差が大きかったため採用せず、振幅を変調のキーとするASKを採用した。

ASKは一般的にノイズの影響を受けやすく、長距離の無線通信で利用されることはほとんどないが、今回は通信時に体温計をスマートフォンのマイクに近づける近接通信を前提とした(図1)ため、ASKでも十分な通信精度を実現できた。次章では、この通信所作の策定にあたる検討過程を紹介する。



図1 音波通信イメージ

3. ユーザビリティ

音波通信体温計を製品化するにあたっては、利用者が無理なく通信可能な通信所作の検討が必要である。

ASKを用いた音波通信の場合、振幅の変化が音圧の変化となるため、体温計から発する音圧が通信に十分なレベルであることを確認する必要がある。そのために、まず体温計からの音波の分布を調査し、最も音波通信に適した体温計からの方向(指向性)を調査した(図2)。

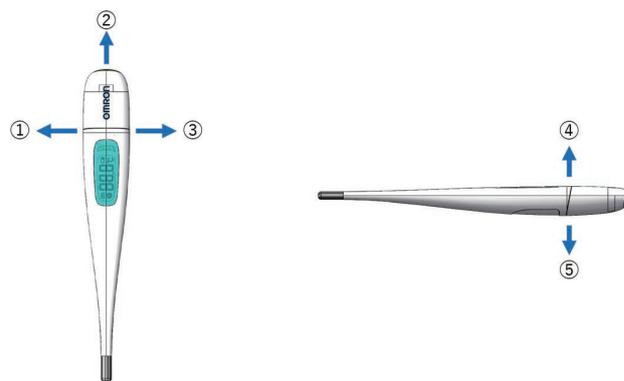


図2 体温計の音波指向性測定

①～⑤の方角における音圧とSN比を測定(個体のバラつきを考慮して25サンプルで測定)した結果が図3である。

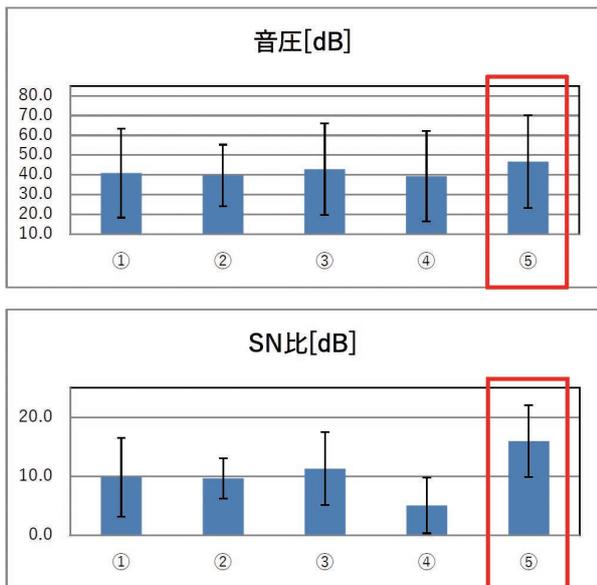


図3 音圧と SN 比の測定結果

この検証の結果、⑤の方向（体温計の背面）が最も音圧と SN 比が良好であり、この部位を図 1 のようにスマートフォンのマイク部分に押し当てる所作を、標準の通信所作として定義した。

ペンシル型で軽量の体温計ならではの通信所作であり、ユーザビリティ試験にて利用者が問題なく通信できることを確認した。

4. スマートフォンでの音波復調

音波通信体温計から測定データを受信するスマートフォンアプリ（OMRON connect⁷⁾）は、Android と iOS に対応しており、音波通信の復調処理も Android と iOS 向けに実装している。

4.1 復調処理

図 4 はスマートフォンにおける復調処理のフローを示したものである。

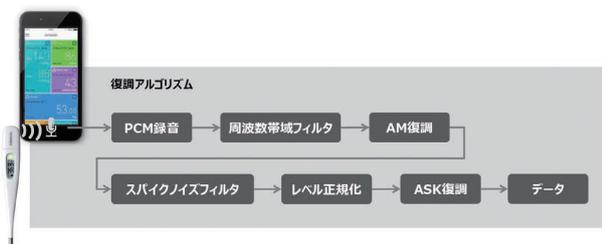


図4 復調処理

4.1.1 PCM 録音

スマートフォンのマイクを用いて、音響信号をキャプチャし、PCM データ列を得る。これは、Android、iOS の

機能を利用している。Android の場合、マイク録音のためのオーディオソースパラメータが複数あり、音波通信に適した（OS バージョンやスマートフォン機種に幅広く適合する）パラメータの選定は特に苦慮した点である。パラメータ選定のために、Android Compatibility Definition Document (CDD)⁸⁾ の記載内容から仮説を立て、仮説に基づき多岐に渡るスマートフォンでの網羅検証を実施することで、音波通信に最適なオーディオソースパラメータを選定することができた。

4.1.2 周波数帯域フィルタ

ASK なので搬送波となる周波数を中心に、体温計の鳴動周波数誤差を踏まえたバンドパスフィルタ（IIR フィルタ）を構築し、搬送波周波数帯以外の周波数成分を除去している。搬送波には超音波に近い高周波帯を使用しているため、環境ノイズの影響は受けにくい。

4.1.3 AM 復調

ASK 復調の前段階として、PCM データから時系列の振幅値への変換を行っている（図 5）。振幅値へ変換後の点線は PCM データピークの包絡線であり、すなわちこの処理はアナログの AM⁹⁾ 復調処理に相当する。

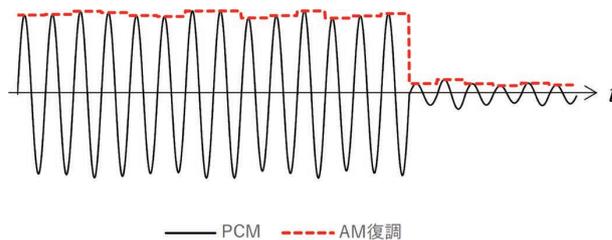


図5 AM 復調

4.1.4 スパイクノイズフィルタ

AM 復調した直後の信号は、図 6 に示す通り、信号の立ち上がり立ち下りに大きなスパイクノイズを含んでいる。

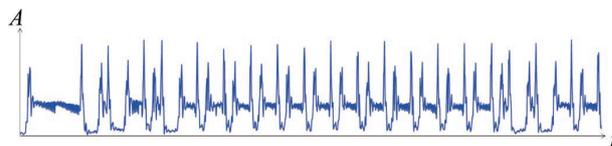


図6 AM 復調直後の信号

これは、体温計のハードウェア設計ならびにブザーの性能が、もともと音波通信を前提としたものではなく、体温計から発する音波が通信には理想的な音響信号となっていないことに起因している。このままでは、後述のレベル正規化に影響を及ぼし、通信精度の低下を招いてしまう結果となりかねない。

ハードウェア設計の変更なしに通信を実現することが本製品の目標であるため、スマートフォン側でこのスパイクノイズを除去し、復調性能を担保する方針とした。

ここでは、複数個の一般的なフィルタアルゴリズムを組み合わせ、最適なチューニングを行ったスパイクノイズフィルタによって、スパイクノイズの軽減に成功している。図7は、図6の信号をスパイクノイズフィルタに通した後の信号波形である。

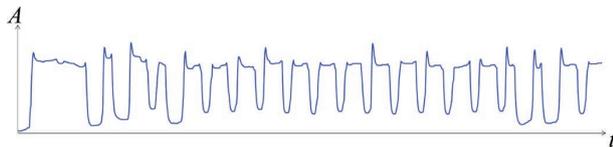


図7 スパイクノイズフィルタ後の信号

4.1.5 レベル正規化

体温計から発せられた音響信号が、スマートフォンでサンプリングされるまでは、空間伝搬による減衰、スマートフォン内部のアンプやゲインコントロールなど、スマートフォン機種固有のものを含む様々な変動要因が存在しており、サンプリングされた信号レベルの水準は一定しない。また、スマートフォンの機種によってはAGC (Auto Gain Control)¹⁰ 機能によりゲインが自動的に変動して、信号レベルが時間経過で変動することがある。振幅の大きさを以て復調を行うASKにおいては、信号レベルの水準が一定しない場合、High/Low判定のしきい値を一意に定めることができない。

この問題を解決するには、信号レベル値を一定のレベルに正規化する必要がある。図8は、あるスマートフォン機種でのAM復調信号であり、AGCによって信号レベルが時間とともに徐々に増加していることが分かる。

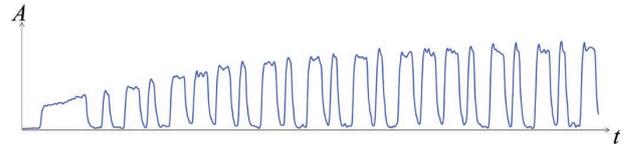


図8 AGC搭載スマートフォンでのAM復調信号

これを一定の時間窓で、最大値を1にする正規化を行うことで、図9のような信号波形に変換できる。AGCによる信号増大が平準化され、信号の最大値が1に正規化されていることが分かる。

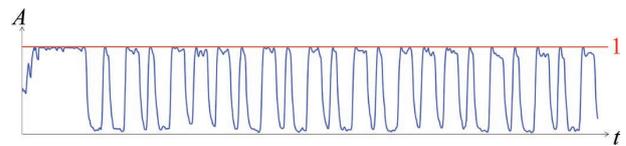


図9 正規化後のAM復調信号

4.1.6 ASK復調

レベル正規化によって、振幅値は最大値1に正規化されるので、ここでは0.5をしきい値としてそれを上回っていればHigh、以下であればLowに復調する(図10)。あとはこのデジタル波形をデータに復調するのみである。

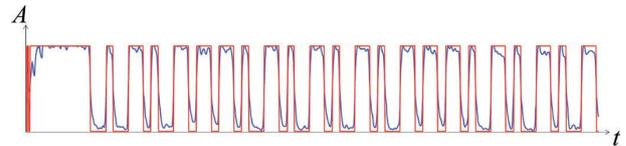


図10 ASK復調の対象とする信号

4.2 音波復調処理のソフトウェアアーキテクチャ

図11は、スマートフォンにおける音波復調処理のソフトウェアアーキテクチャである。音波通信コアエンジンは、AndroidおよびiOSで共通実装となっている。

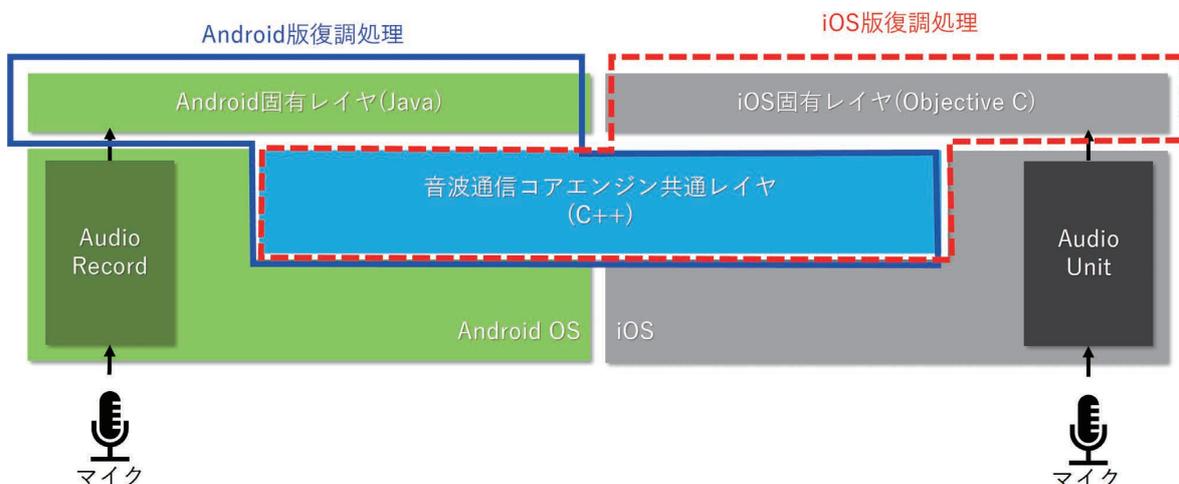


図11 ソフトウェアアーキテクチャ

表 1 は、各ソフトウェアブロックの説明である。

表 1 ソフトウェアブロック説明

ブロック	実装に用いた言語	説明
Android 固有ブロック	Java	AudioRecord 機能を用いてキャプチャした PCM データを音波通信コアエンジン共通レイヤに引き渡す。
iOS 固有ブロック	Objective C	AudioUnit 機能を用いてキャプチャした PCM データを音波通信コアエンジン共通レイヤに引き渡す。
共通ブロック	C++	音波通信コアエンジンである。C++ 言語で実装しており、共通のコードベースで Android/iOS 両方でのコンパイルを可能としている。

特記すべきは、音波通信コアエンジンを C++ 言語で実装したところである。C++ 言語によって、Android/iOS を含め OS に依存しないクロスプラットフォームを実現しており、音波通信の復調処理では大量の演算処理が必要だが、C++ 言語のネイティブコードにより、特に Android の Java 言語では実現できない高速実行を実現している。

また、音波通信コアエンジンは、音波通信体温計の出荷検査装置にも流用しており、ここでもクロスプラットフォームの恩恵を得ている。

5. 音波通信の精度

スマートフォン機種は多岐に渡り、搭載しているマイクロフォンの性能や、録音処理アルゴリズムの相違もあるため、多くのスマートフォン機種で問題なく通信できることを確認するべく、スマートフォン網羅検証を実施した。

検証方法は、図 12 の通り 1 機種あたり、3×2=6 通りのパターンで検証を行った。

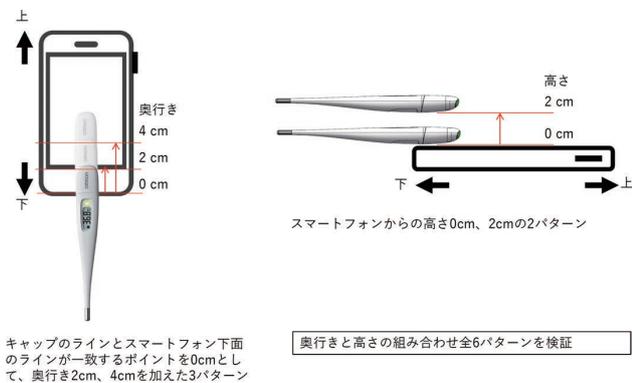


図 12 網羅検証パターン

スマートフォン全 197 機種 (2020 年 10 月時点の日本国内および海外向けスマートフォン) にて、体温計からの 40 パケットのうち正常に復調できたパケット数の割合を通信成功率とし、通信成功率 35% 以上を目標として評価を実施した。

通信成功率 35% 以上を目標とした理由は、以下の通りである。

- 1 パケットの通信時間は約 0.7 秒であり、5 秒間で 7 パケットの通信が可能である。
- 通信成功率 35% はすなわち失敗率 65% であり、7 パケット連続で通信失敗する確率は、 $0.65^7 = 0.05$ 、すなわち 5% である。
- このことから、通信成功率が 35% 以上であれば、5 秒以内に 95% 以上の確率で通信が完了すると考えられる。

表 2 網羅検証成績

		奥行						
		0cm		2cm		4cm		
		通信成功率 (%)	機種数	割合 (%)	機種数	割合 (%)	機種数	割合 (%)
高さ	0cm	~ 100%	193	98%	192	97%	186	94%
		~ 80%	0	0%	1	1%	1	1%
		~ 60%	0	0%	1	1%	2	1%
		~ 35%	4	2%	3	2%	8	4%
	2cm	~ 100%	187	95%	186	94%	185	94%
		~ 80%	2	1%	0	0%	3	2%
		~ 60%	2	1%	2	1%	1	1%
		~ 35%	6	3%	9	9%	8	4%

表 2 は、各測定ポイント (奥行×3、高さ×2) における、通信成功率の分布をまとめたものである。目標とする通信成功率を達成できなかった機種は 2~5% 程度あるが、94% 以上の機種で通信成功率 80% 以上という高い通信精度を達成している。

この検証では、一度スマートフォンで採取した PCM データを wav ファイルに保存しておき、復調アルゴリズムをチューニング→wav ファイルを用いて復調アルゴリズムの検証を繰り返すことで、復調アルゴリズムおよび各種パラメータのブラッシュアップにも寄与している。

6. むすび

音波通信体温計 MC-6800B は音波通信を搭載した民生製品として、日本国内で異例のヒット商品¹¹⁾ となっており、音波通信の可能性に一石を投じた。音波通信は音波を発するデバイス（今回は圧電ブザー）と、マイクロフォン（スマートフォンには搭載されている）があれば通信できる低コストな通信手段である。そのため、従来の通信対応体温計と比べて、本製品は安価かつ小型化を実現している。今回考案した音波通信方式は変調方式が単純であり、特別なハードウェアを必要とせず変調が可能である。また復調アルゴリズムは、特にスマートフォンで安定した音波通信を実現したものであり、今後は低コストかつ簡便な通信ユーザビリティが求められる新興国向け機器への活用が期待できる。

現時点では通信レートが低く大量データの転送には向かないが、機器ハードウェアの性能向上によって通信速度向上の余地はあるため、今後は大量データの転送に耐える通信プロトコルに改善していきたい。

参考文献

- 1) OMRON HEALTHCARE EUROPE B.V. “Eco Temp Intelli IT MC-280B”. OMRON Healthcare Europe. https://www.omron-healthcare.com/eu/thermometers/Eco_Temp_Intelli_IT.html, (参照 2022-01-06).
- 2) オムロンヘルスケア株式会社. “音波通信体温計 MC-6800B けんおんくん”. オムロンヘルスケア. <https://www.healthcare.omron.co.jp/product/mc/mc-6800b.html>, (参照 2022-01-06).
- 3) 飛天ジャパン株式会社. “新型コロナ対策、企業や学校で検温義務化の動き”. 飛天ジャパン株式会社 ブログ. <https://ftsafe.co.jp/blog/temperature-measurement-mandatory/>, (参照 2022-01-28).
- 4) スタイル株式会社 WirelessWire News 編集部. “グーグルの「Chromecast」、超音波を利用したモバイル端末と連携が可能に”. WirelessWire News. <https://wirelesswire.jp/2014/06/16578/>, (参照 2022-02-09).
- 5) 株式会社インセプト. “ASK（振幅偏移変調）とは”. IT用語辞典 e-Words. <https://e-words.jp/w/ASK.html>, (参照 2022-01-06).
- 6) 株式会社インセプト. “FSK（周波数偏移変調）とは”. IT用語辞典 e-Words. <https://e-words.jp/w/FSK.html>, (参照 2022-01-06).
- 7) オムロンヘルスケア株式会社. “OMRON connect Official Site”. オムロンヘルスケア. https://www.omronconnect.com/jp/ja_def/, (参照 2022-01-06).
- 8) Android オープンソースプロジェクト. “Android Compatibility Definition Document”. Android オープンソースプロジェクト. <https://source.android.com/compatibility/cdd?hl=ja>, (参照 2022-01-06).
- 9) アイティメディア株式会社. “AM 変調”. EDN Japan. <https://edn.itmedia.co.jp/edn/articles/1411/26/news015.html>, (参照 2022-

01-06).

- 10) ジャパンメディアシステム株式会社. “オートゲインコントロール (AGC)”. LiveOn. <https://www.liveon.ne.jp/glossary/wk/agg.html>, (参照 2022-01-06).
- 11) 株式会社スマート・ソリューション・テクノロジー. “『オムロン 音波通信体温計』が 30 万台の大ヒット！企画開発者と技術者に聞いた「音波通信」採用の意外な理由”. SMART SOUND LAB. <https://smartsoundlab.com/2022/01/000078.html>, (参照 2022-01-28).

執筆者紹介



平田 英宇 HIRATA Hideie

オムロンヘルスケア株式会社
開発統轄本部 データシステム事業部
グローバルアプリ開発部
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。

Android は、米国 Google LLC の日本およびその他の国における登録商標です。iOS は、米国 Cisco Systems, Inc. の日本およびその他の国における登録商標であり、米国 Apple, Inc. が米国 Cisco Systems, Inc. の承諾を得て使用しています。Java は、米国 Oracle Corporation の日本およびその他の国における登録商標です。

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. ソーシャルソリューション —



アレー拡張処理を用いたミリ波レーダによる 屋外人物の 3D イメージング

大橋 卓, 谷本 雄大, 齋藤 啓介

安全で円滑な道路交通社会の実現に向けて、車両に搭載されたセンサからの情報に加えて道路交通インフラに設けたセンサからの情報を活用する路車協調システムに関する研究開発が推進されている。ミリ波レーダは雨・霧などの天候の影響を受けにくく、昼夜を問わず物標検出が可能なことから次世代のインフラセンサとして注目されている。人や車両が行き交う交差点などの環境において、ミリ波レーダを用いて様々な物標を分離検出し識別するには狭ビームによる 3D イメージングが有効である。3D イメージングを行うには多数の受信アンテナから成る平面アレーアンテナが必要だが、単一の IC チップではアンテナ数が不足し狭ビーム化が実現困難であった。また、複数の IC チップを用いた場合、ハードウェアの複雑化やレーダ大型化の問題が生じる。

著者らは 1 チップのミリ波レーダに対してアレー拡張処理を用いることで仮想平面アレーの垂直・水平方向のアンテナ素子数を増加させ、狭ビーム化を実現した。屋外人物の 3D イメージングを行った結果、人物概形の検出が可能であることを確認し、物標識別性の向上を示した。

3D Imaging of Outdoor Human with Millimeter Wave Radar using Extended Array Processing

OHASHI Suguru, TANIMOTO Yudai and SAITO Keisuke

Research and development on cooperative vehicle infrastructure systems are being promoted for realizing a safe and smooth transportation society. Information from sensors installed in road infrastructure is used for this system. Millimeter-wave radar is attracting much attention as a next-generation infrastructure sensor that is less affected by the weather such as rain and dense fog and can detect targets day and night. 3D imaging with narrower beam is effective for millimeter-wave radar to separate and identify various targets in an environment such as intersections. A planar array consisting of a large number of receiving antennas is required for 3D imaging, but it was difficult to achieve a narrow beam because the number of antennas is insufficient with one IC chip. On the other hand, using multiple IC chips causes problems such as hardware complexity and radar size increase.

To overcome these problems, we applied extended array processing to one chip millimeter-wave radar and tried to realize a narrow beam by a virtual planar array with an increased number of virtual antenna elements in vertical and horizontal directions. As a result of 3D imaging of outdoor human, we confirmed the detection of human outlines and showed improvement in target distinction.

1. まえがき

近年の交通事故死者数は減少傾向にあり、警察庁によると 2020 年における 24 時間死者数（交通事故発生から 24 時間以内に亡くなった死者数）は 3,000 人以下にまで減少した¹⁾。しかし、政府が第 10 次交通安全基本計画に掲げ

た、2020 年までに 24 時間死者数を 2,500 人以下にする目標値には届いておらず、多くの人命が交通事故により失われている。より安全な道路交通の実現を目指し 2021 年に定められた第 11 次交通安全基本計画では、2025 年までに 24 時間死者数を 2,000 人以下にすることを目標としている²⁾。また、政府の定める官民 ITS 構想・ロードマップ 2020 では、2030 年までに「世界一安全で円滑な道路交通

Contact : OHASHI Suguru suguru.ohashi@omron.com

社会」の構築を目標に掲げており、安全だけでなく交通渋滞を緩和し円滑な道路交通を実現することで環境負荷の低減にも貢献する社会の構築が望まれている³⁾。この目標達成に向けて路車協調システムを用いた自動運転に関する研究開発が推進されている。路車協調システムは、車両に搭載されたセンサからの情報に加えて、道路交通インフラからの情報を活用する。道路交通インフラに求められる要件として、車両から認識できない周辺車両や歩行者情報の取得が挙げられており、これらの情報を車両、及び運転手へ提供するセンサがインフラ側に必要とされている。

目標に電波を照射し、反射波から物標までの距離や速度を検出するミリ波レーダは、その性能が雨や霧などの影響を受けづらく、太陽光などの照明条件に左右されない特徴がある。そのため、上記の安全運転支援と円滑な交通を実現し得る次世代のインフラセンサとして注目されている。

著者らは交通状況の監視・制御を行うインフラセンサとしてミリ波レーダの開発を進めており、これまでに距離・速度・方位角情報から車両の位置を検出する2Dイメージングレーダに関する検討を行ってきた⁴⁾。さらに、開発を進める中でレーダによる物標検出をより高精度に行うため距離・速度情報と方位角・仰角情報を用いた物標の3Dイメージングに関する検討を行い⁵⁾、車両検出を目的とした道路監視だけでなく人や車両が混在する環境下での利用を考えている。本稿では、ミリ波レーダを用いた屋外人物の3Dイメージングの詳細について述べる。

2. ミリ波レーダの測定原理

2.1 距離・速度の測定

レーダ方式には様々な種類が存在するが、ここでは今回採用した Frequency Modulation Continuous Wave (FMCW) 方式のレーダによる距離、速度の測定原理について説明する。FMCWレーダは図1に示すようなチャープ信号と呼ばれる周波数変調された信号を送信し、物標によって反射された受信信号と送信信号をミキシングすることで得られた差周波成分をもつビート信号を用いて物標までの距離 R を測定する。受信信号はチャープ信号に対して、レーダと物標間の往復伝搬距離に応じて遅延して受信されるため、ビート信号の周波数 Δf は遅延時間 $\tau=2R/c_0$ 、すなわち物標との距離に比例し、次の関係が成り立つ。

$$\Delta f = \frac{B}{T} \tau = \frac{2B}{Tc_0} R \quad (1)$$

ここで、 B は掃引周波数帯幅、 T は周波数掃引時間、 c_0 は光速を表す。ビート信号をフーリエ変換し、周波数スペクトラムから物標応答に相当するピーク情報を読み取ることでレーダと物標間の距離を算出できる。また、物標が移動している場合、ドップラ効果によりレーダと物標の相対速度に応じた周波数成分（ドップラ周波数 f_d ）が受信信号に

重畳する。ドップラ周波数と相対速度 v は次の関係が成り立つ。

$$f_d = \frac{2f_0}{c_0} v = \frac{2}{\lambda_0} v \quad (2)$$

ここで、 f_0 はFMCWレーダで使用する中心周波数、 λ_0 は中心周波数に対応する波長を表す。ドップラ周波数はチャープ信号の送受信を複数回行うことで得られる受信信号をフーリエ変換し、周波数スペクトラムのピーク情報を読み取ることで求めることができる。なお、検出可能な最大ドップラ周波数は送信周期 T_r に依存し、送信周期が短いほど高いドップラ周波数を検出できる。サンプリング定理から一意に決定できる検出可能な最大ドップラ周波数は $1/(2T_r)$ であり、対応する速度は(2)式のドップラ周波数と相対速度の変換時に生じる係数を適用した $\lambda_0/(4T_r)$ である。

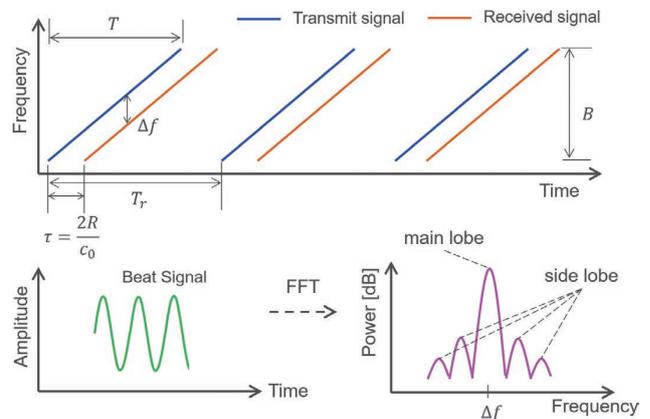


図1 FMCWレーダによる測定原理

2.2 角度の測定

レーダが複数のアンテナからなるアレーアンテナで構成され、物標とレーダ間の距離がアレー開口よりも十分に大きい場合、レーダへの物標からの入射波は平面波とみなすことができる。このとき、レーダに対する物標からの反射信号は、受信アンテナごとにレーダと物標の相対角に基づいた経路長差をもって入射する。そのため、各受信アンテナにおける受信信号の間には、経路長差による遅延量の違い、すなわち位相差が生じる。この位相差をもとに、レーダの視線方向を基準とした際の物標の角度を算出することができる。角度の算出はアレーアンテナから得られた受信信号をフーリエ変換し、得られる周波数スペクトラムのピーク情報を読み取ることで得られる。図2に受信 N 素子の等間隔リニアアレー (Uniform Linear Array, ULA) における各受信アンテナの経路長差を示す。

$$l = d \sin \theta$$

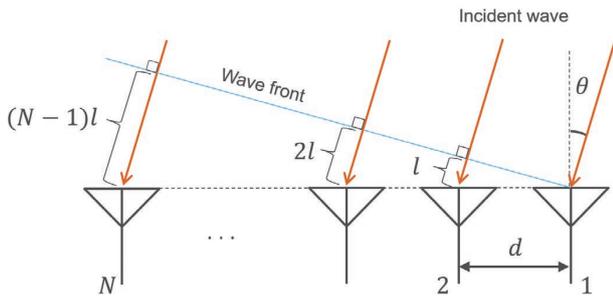


図2 平面波到来時における各受信アンテナの経路長差

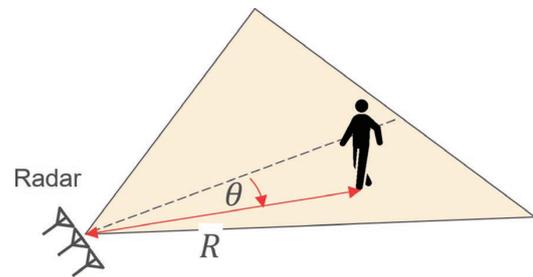
なお、ULA を水平方向に配置した場合は方位角を測定可能であり、垂直方向に配置する場合、仰角の測定が可能となる。方位角・仰角を同時に検出する場合はアンテナを平面上に配置した平面アレーアンテナを利用する。

3. 物標検出の高精度化に必要な機能

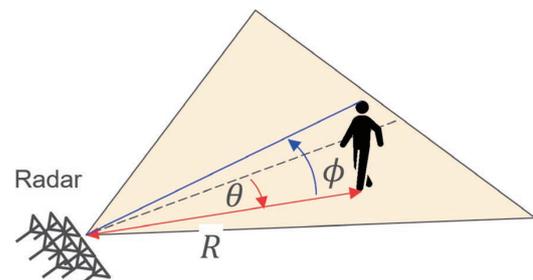
図3a) に示すように、距離・速度・方位角情報から物標位置を検出する 2D イメージングレーダでは水平方向に並ぶ受信アレーアンテナを有するレーダが使用される。ここで、 R はレーダと物標間の距離、 θ はレーダ視線方向と物標の成す角（方位角）を表している。また、距離・速度・方位角・仰角情報から物標位置を検出する 3D イメージングレーダでは図3b) のように受信アンテナに平面アレーアンテナを利用することにより 2D イメージングレーダで検出可能な距離・速度・方位角情報に加えて仰角 ϕ を検出する。レーダを用いて交差点や車道の監視を行う際には、人物だけでなく車両や建造物・看板や標識など様々な物標からの反射波が受信される。従来の水平方向にアレーアンテナを備えたレーダによる距離・速度と方位角情報を用いた 2D イメージングでは、図4 a) のようにアレーアンテナの配置と同一の水平面内の物標位置・速度を検出する。しかし、物標の高度情報はこの平面上に射影されてしまい高度の異なる物標が同一平面内に検出される。そのため、垂直方向に広がりをもつ物標は形状の識別が困難になる。また、速度情報はインフラセンサにおいて車両接近による危険度や逆走の判断、速度超過の検出へ使用されると考えられるが、2D イメージングレーダで検出可能な速度は同一平面内の値として検出される。レーダを高所に取り付けて地表の物標を観測する場合など、レーダの視線方向に対して物標の移動方向が異なるときは物標速度情報の測定精度が低下する。一方、3D イメージングでは水平・垂直方向にアレーアンテナを備えたレーダを用いて、方位角だけでなく仰角を加えた到来角情報を測定する。距離・速度・方位角に加えて仰角情報を用いることで図4 b) のように物標の 3次元空間分布情報（3D イメージング）が取得可能になり、高度の異なる物標を分離して検出できるほか、レーダから見た 3次元空間上の物標形状が把握可能になる

ため、物標識別や状態（人物の姿勢等）の判断が行いやすくなると考えられる。

また、方位角に加え仰角情報を利用することで物標の速度情報を 3次元空間に分解することが可能になるため、2D イメージングレーダで問題であったレーダを高所に設置し地表の物標を観測するような場合に、より正確な物標速度の検出が可能になる。インフラセンサは車両側に搭載されたセンサでは検出が困難な物標の検出を行うため、高所に取り付けて地表を観測することが想定される。その際には、人物や車両等の反射波だけでなく周辺の標識や看板といった高さの異なる物標からの反射波を受信しやすいと考えられる。そのため、3D イメージングによる高さでの分離、および方位角・仰角情報によって物標移動速度を分解し、より正確な情報を提供することが必要になる。

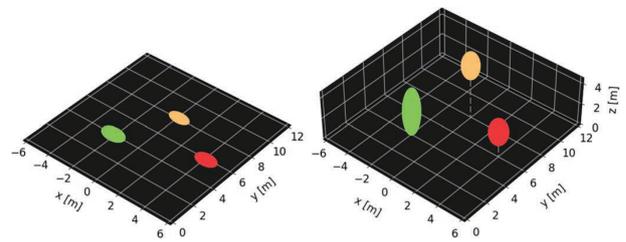


a) 2D imaging radar



b) 3D imaging radar

図3 2D/3D イメージングレーダによる物標検出



a) 2D imaging

b) 3D imaging

図4 2D/3D イメージング結果概念図

また、レーダの観測空間内に複数物標が存在する状況では、個々の物標位置を分離検出できるような狭ビーム化の実現、すなわち分解能の向上が必要になる。電波の反射から物標情報を検出するレーダは距離や速度を検出しやす

く、距離分解能は周波数帯幅、速度分解能は観測時間を増加することで高めることができる。しかし、レーダから見た複数物標が近接して並走する場合において、距離や速度における分離は困難になる。中でも人物は車両よりも電波を反射しづらいため、図5のように複数人が近接すると距離や速度での分離検出が困難になる。したがって、人物や車両などの近接する複数物標を分離検出するには角度方向での狭ビーム化が必要になる。

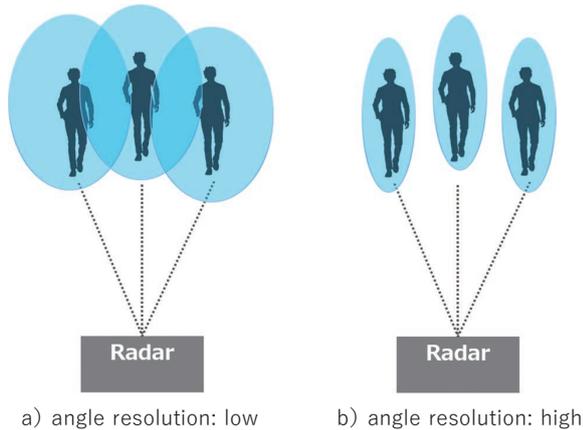


図5 狭ビームによる近接人物の角度分離

以上のことから、レーダにより観測した物標を分離検出するには、距離・速度だけでなく角度方向の狭ビーム化が必要であり、高度の異なる物標を区別し、物標の形状や状態を識別するには3Dイメージングが有効であると考えられる。狭ビームによる3Dイメージングを行うには多数の受信アンテナ数を有する平面アレーアンテナが必要になる。しかし、現在のミリ波レーダのICチップは主に1チップあたり3つの送信アンテナと4つの受信アンテナで構成されるのが一般的であり、1チップではアンテナ数が不足し、狭ビームでの3Dイメージングが困難である。複数のチップを用いることでアンテナ数の不足を改善できるが、ハードウェア構成が複雑になる他、多数のアレーアンテナを用いることによりレーダシステムの大型化につながる。著者らはこの問題に対し、1チップのミリ波レーダにおいて次章で述べる狭ビーム化技術を適用して平面アレーアンテナを構成し物標の3Dイメージングを試みた。

4. 狭ビーム化技術

角度方向の狭ビーム化を実現するにはアレー開口長の拡大、すなわち受信アレーアンテナを構成するアンテナ素子数の増加が必要になる。しかし、アンテナ素子数の増加はレーダICチップによるアンテナ数の制約が存在するため、マルチチップ利用に伴うハードウェアの複雑化やレーダの大型化につながるといった問題がある。アレー信号処理には限られたアンテナ素子数で、受信アンテナ数を増やすこ

となくアレー開口長を拡大する様々な手法が提案されている。本章では狭ビーム化を実現する手法について説明する。

4.1 最小冗長アレー

最小冗長アレー (Minimum Redundancy Array, MRA) はアレー素子を不等間隔に配置するスパースアレーの一種である⁶⁾。MRAでは素子間距離の冗長度を最小にすることで同一素子数において最大の開口長を実現することができる。

4.2 Khatri-Rao 積拡張アレー処理

Khatri-Rao (KR) 積拡張アレー処理はアレー開口長を仮想的に増加する手法の1つである⁷⁾。この手法はアレーデータの2次統計量である相関行列を利用しており、相関行列から非重複要素を抽出したものを仮想アレーデータとして使用する。平面波到来時において、アレーデータから算出する相関行列は2つのアンテナ素子間の距離差に対応する位相差が要素として現れる。一般に、平面波到来時の N 素子ULAに対してKR積拡張アレー処理を適用すると、 $2N-1$ 素子の仮想アレーが得られることが知られている。また、この手法は等間隔アレーに適用するよりも、不等間隔アレーと組み合わせることで効率的に仮想アレー数を増加させることができる⁸⁾。これは不等間隔アレーにおける相関行列の非重複要素数がULAの場合よりも多くなるためである。不等間隔アレーとKR積拡張アレー処理の併用効果を計算機シミュレーションにより確認する。図6に計算機シミュレーションにおけるアレー配置を示す。ここで、 Δd は最小受信素子間隔であり、本シミュレーションでは $\Delta d=3.79\text{mm}$ とした。これは79GHzを中心周波数とするミリ波レーダにおける半波長に対応する。はじめに 0° からの1波到来時における受信アレーアンテナが7素子ULA、4素子MRA、および4素子MRAにKR積拡張アレー処理を適用した際の角度スペクトラムを図7に示す。4素子MRAの角度スペクトラムはサイドローブレベルが高いものの、メインローブ幅は7素子ULA相当となることが確認できる。また、4素子MRAにKR積拡張アレー処理を適用した場合、13素子ULAと同等の仮想アレーが得られるため、7素子ULAよりも狭ビーム化が実現可能となる。



図6 計算機シミュレーションにおけるアレー配置

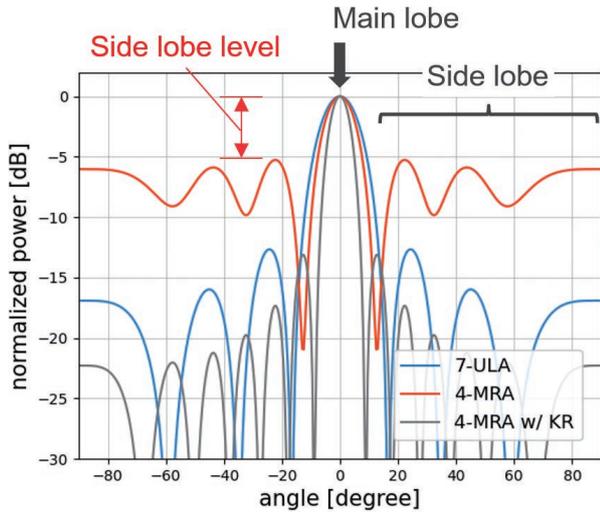


図7 0°からの1波到来時における角度スペクトラム

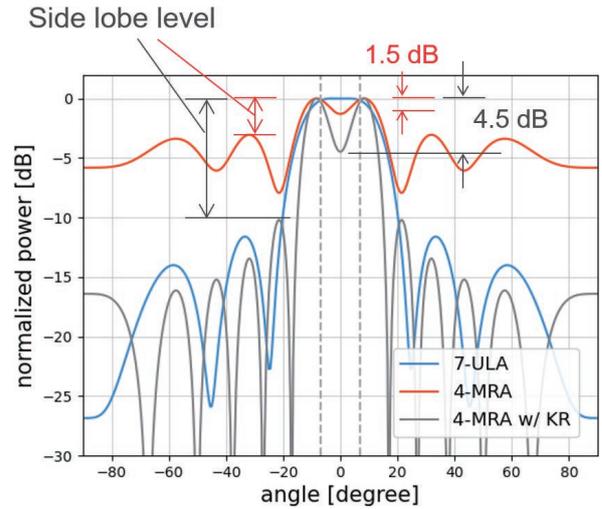


図8 2波到来時の角度スペクトラム (±7°)

また、2波到来時の1例として±7°からの到来波における角度スペクトラムを図8に示す。ここで、到来波は等距離に位置する2物標からの同一振幅を持つ2波を仮定している。7素子ULAでは2波を分離できておらず、4素子MRAではKR積拡張アレー処理の有無にかかわらず2波を分離できている。しかし、KR積拡張アレー処理の有無により、2波のピーク間の落ち込みに違いが現れている。KR積拡張アレー処理を施さない場合は1.5dB、適用した場合は4.5dBである。実際のレーダによる測定ではアレーアンテナを構成するアンテナ素子のばらつきや到来波のSNRにより角度スペクトラムの形状が変化し、1~2dBのレベル差では分離できないことがある。これらのばらつきを加味し、角度の検出条件を最大ピーク値から3dB以上の落ち込みを有するピーク角度を検出すると考えたとき、KR積拡張アレー処理を適用したほうが2波を分離しやすくなる。また、サイドローブレベルに関しても4素子MRA (3dB)とKR積拡張アレー処理を適用した場合 (10dB)で違いが現れており、上記の変動要因の存在を考慮すると4素子MRAではサイドローブを誤検出しやすいが、KR積拡張アレー処理を適用したほうがサイドローブとのレベル差は大きいのでサイドローブの誤検出を防ぐための閾値の設定が容易になる。

4.3 Multiple Input Multiple Output (MIMO) レーダ

狭ビーム化は受信アレーアンテナのアンテナ素子数を増加することで実現できるが、多くの受信アンテナ数を必要とする。これは単一の送信アンテナに対し受信側をアレーアンテナとするSingle Input Multiple Output (SIMO) レーダ構成と呼ばれている。これに対して、送信アンテナのアレー化も行ったものがMIMOレーダ⁹⁾である。MIMOレーダにおいて受信アレーアンテナが受信する信号は複数の送信アンテナによる信号が重畳して受信される。受信アンテナ側ではこの信号を各送信アンテナによる信号ごとに分離し、結合することで仮想アレーを形成する。1例として、 L 個の送信素子と M 個の受信素子から構成されるMIMOレーダを用いた場合、最大で $L \times M$ 個の仮想素子が得られ、送信1個、受信 $L \times M$ 個のSIMOレーダと等価な仮想アレーを実現できることが知られている (図9は $L=3$ 、 $M=4$ の場合)。MIMOレーダを用いることで効率的にアレー素子数の増加 (アレー開口長の拡大) が可能となり、角度分解能を向上できる。

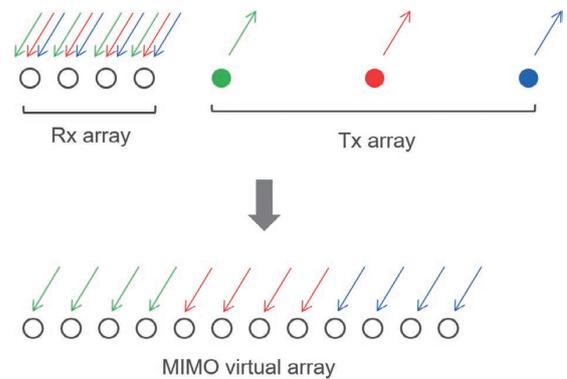


図9 MIMOレーダによる仮想アレーの概念図

これら最小冗長アレー、KR積拡張アレー処理及びMIMO化処理を併用することで、複数のチップを用いずに1チップの少ない実アンテナ素子数で効率的な大開口アレーを実現できる。また、使用するチップ数が少なく済むことにより、ハードウェアの複雑化をせずに平面アレーを実現できる。従来におけるこれらの仮想アレー技術の適用先は主に直線アレーであった。著者らはこれらの仮想アレー技術を直線アレーではなく平面アレーに適用することで、垂直・水平方向の仮想素子数を増加させ大開口平面アレーの実現を試みた。次章では仮想アレー技術をミリ波レーダに実装し、物標の3Dイメージングを行った実験結果について説明する。

5. 原理検証実験

4章で述べた狭ビーム化技術を実装したミリ波レーダを用いて3Dイメージングの原理検証実験を行った。本章では屋外人物の3Dイメージング結果について述べる。

5.1 ミリ波レーダのアレー素子配置

実験に用いたミリ波レーダの諸元を表1に示す。使用するミリ波レーダは送信3、受信4の1チップのFMCWレーダであり、時分割送信を行うことでMIMO仮想アレーを形成する（Time Division Multiplexing-MIMO, TDM-MIMO）。送信アレーと受信アレーは図10 a)のように互いに直交する最小冗長アレーとなるよう配置されている。この送受信アレー配置によるMIMO仮想アレーは図10 b)のように、計12素子からなる不等間隔平面アレーとなる。形成された仮想アレーは垂直・水平方向に対しそれぞれMRA配置となる。本稿では、この不等間隔平面アレーに対しKR積拡張アレー処理を適用し、垂直・水平方向の仮想素子数の増加を試みた。KR積拡張アレー処理は直線アレー（1次元データ）への適用を想定した処理であるが、平面アレーデータのように水平・垂直方向の2次元アレーデータを拡張するために水平・垂直方向それぞれに対して順番に適用することはできない点に注意されたい（直線アレーデータを用いて相関行列を計算すると他方の次元の位相情報が消えるため）。本稿では、平面アレーデータを一次元化して相関行列を計算し、非重複要素となる拡張アレーデータを抽出した後、再び平面アレーデータとして形成することで垂直・水平方向の位相情報を残したまま拡張平面アレーデータを得られるようにした。KR積拡張アレー処理を水平・垂直方向のアレーデータに適用することで、仮想アレー素子数は垂直7素子、水平13素子からなる計91素子の等間隔平面アレーが形成される。これらの仮想アレー技術の利用により、マルチチップによるハードウェアの複雑化を行わずに、IC1チップで仮想91素子から構成される平面アレーを構成可能となり、同受信アンテナ素子数の平面アレーアンテナ利用時に比べて約1/4の大きさで実現できる。

表1 レーダ諸元

項目	仕様
レーダ方式	FMCW TDM-MIMO
送受信ポート数	送信 3、受信 4
中心周波数 f_0	79GHz
掃引周波数帯幅	2.5GHz
空中線電力	10dBm
最小素子間隔 Δd	3.79mm
最大検知速度	$\pm 32\text{km/h}$

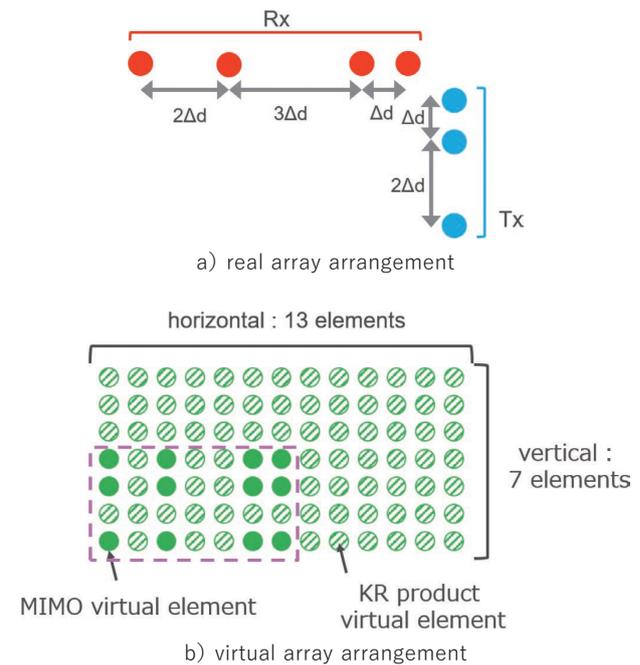


図10 実アレー／仮想アレー素子配置

5.2 実験条件

図11に示すような、幅約13m、奥行約15mほどの開けた屋外環境で歩行者の測定を行った。ミリ波レーダによる3Dイメージングの原理検証として、本実験では人物からの主な反射が胴体部からであると想定し、レーダは地上から約1.2mの高さに設置した。また、歩行者はレーダから約8m以上離れた領域を自由に動き回るものとした。なお、車両用信号機（法令で4.5m以上の高さに設置することが定められている）近傍に地表を見下ろすような角度（俯角45°）でインフラセンサを設置すると考えたとき、少なくとも地表に位置する物標とは約6.4m以上の距離が存在する。本実験ではミリ波レーダの設置高は異なるものの、レーダ・人物間の距離は高所に取り付けた場合と類似の信号が得られるものと想定しデータを取得した。

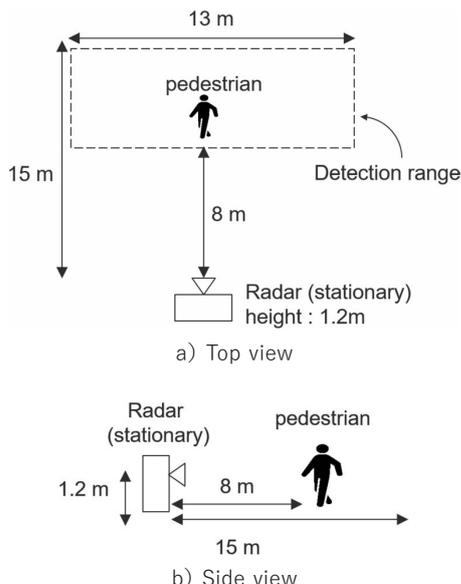


図 11 測定環境概略図

また、ミリ波レーダによる物標検出はレーダ受信信号を周波数領域に変換した周波数スペクトラムからピーク近傍の距離・速度・角度情報を点群として抽出することで位置情報を求める。図 12 に点群抽出フローを示す。はじめにレーダ受信信号に対してレンジ・ドップラ推定によりレーダ受信信号を周波数領域に変換し、周波数スペクトラムの強度情報をもとに物標の距離、速度に応じたアレーアンテナデータを抽出する。次に、抽出したアレーデータに対し、TDM-MIMO 化処理に伴う位相補正を行う。この処理では、時分割送信における物標移動により生じるドップラ周波数を補正する。その後、KR 積拡張アレー処理を適用し、到来方向推定を行うことで仰角・方位角情報を点群として抽出する。この点群情報から物標の 3 次元空間分布を得る。

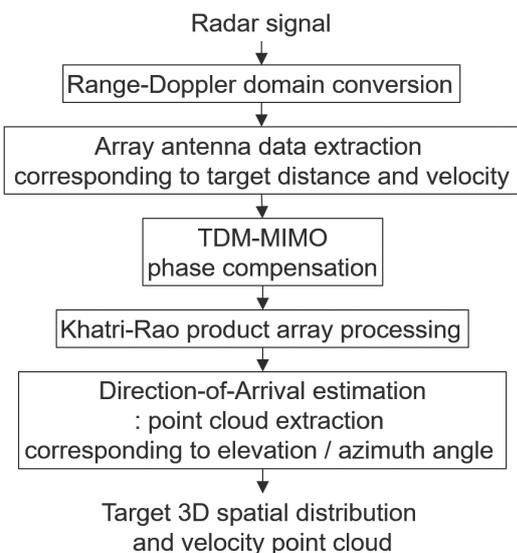


図 12 点群抽出フロー

5.3 人物 1 名のイメージング結果

ここでは従来の距離と方位角による 2D イメージングと、距離・方位角・仰角による 3D イメージングの比較結果を示す。測定対象は、レーダ正面方向から約 8~10m 離れた距離に位置する歩行者 1 名とした。送信 1 素子、受信 4 素子を用いた際の 2D イメージングによる点群出力結果を図 13 に示す。レーダから約 9m 離れた地点に人物に相当する点群を検出できている。しかし、2D イメージングでは人物位置を特定できるものの、高さに関する情報はレーダ視線方向上の平面内に重畳して検出されていることが分かる。

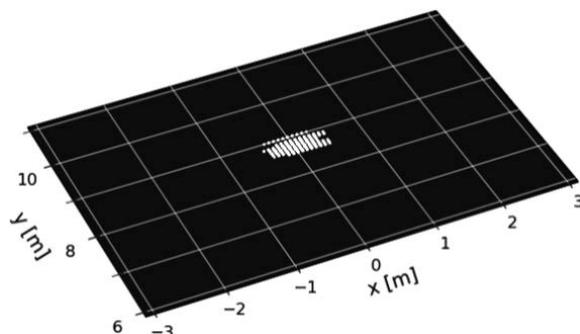


図 13 人物 1 名の点群出力結果 (2D イメージング)

次に KR 積拡張アレー処理を適用した 3D イメージングによる点群出力結果を図 14 に示す。3D イメージングでは約 1.5m の高さを有する点群が検出されている。これは主に人物の胴体部位に対応する点群検出が行われたと考えられる。一方で、手足の識別はできない結果となった。この理由として、手足は胴体に比べて反射が小さいため、胴体の反射と混合して検出されたと考えられる。したがって、本レーダでは手足などの上肢・下肢の検出は難しいが人体の概形は検出可能であることを確認した。

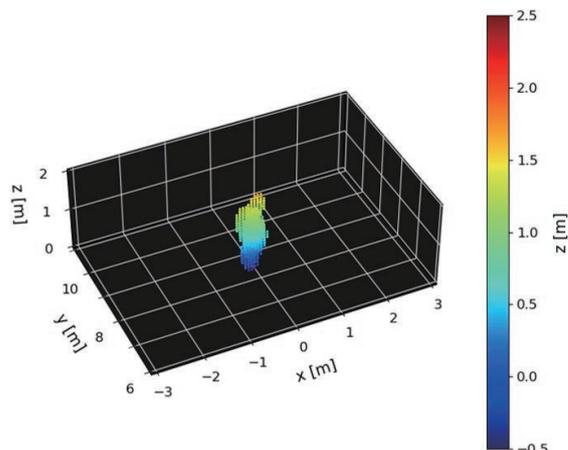


図 14 人物 1 名の点群出力結果 (3D イメージング)

また、点群を検出した距離のレーダ正面（仰角 0° ）における方位角方向の角度スペクトラムを図15に示す。なお、図中には図7の4素子MRA及びKR積拡張アレー処理を適用した計算機シミュレーション結果（4-MRA sim、4-MRA w/ KR sim）も共に示している。4.2節で述べたように、KR積拡張アレー処理によって仮想的にアレー開口長が拡大されたことで狭ビーム化が実現されていることが分かる。なお、実際の測定結果ではアンテナばらつきや到来波のSNRの違いにより計算機シミュレーション結果とは角度スペクトラムの落ち込み（ヌル点）や一部のサイドローブに関して差が存在するが、点群検出で重要となる人物位置の 0° 近傍のスペクトラム形状（メインローブ）は計算機シミュレーション結果と0.3dB以下の差となっており、同等の結果が得られた。

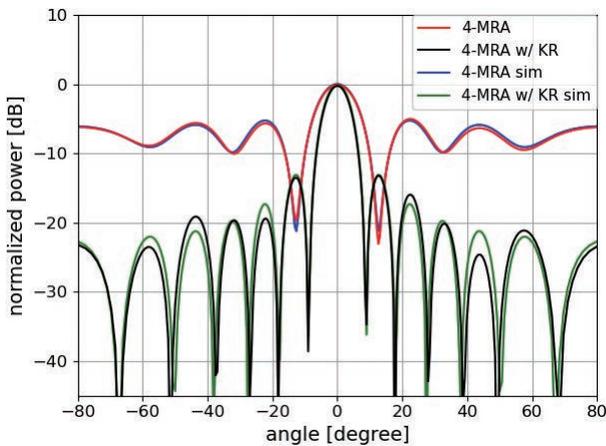


図15 方位角方向の角度スペクトラム（仰角 0° ）

5.4 複数人物のイメージング結果

前節において1名時の3Dイメージング結果から提案技術による角度測定における狭ビーム化効果を確認した。インフラセンサ応用では複数の人物が観測シーンに含まれることが想定される。本節では、複数人物の観測シーンの1条件として歩行者3名を対象とした3Dイメージング結果について述べる。人物1名測定時と同様に、レーダは高さ1.2mの位置に固定し、レーダ正面方向から8~10m離れた位置で任意の方向に移動する歩行者3名を測定した。図16にKR積拡張アレー処理を適用した3Dイメージングによる点群出力結果を示す。

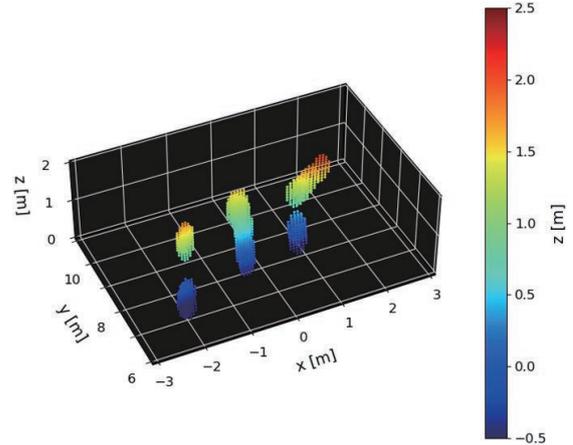


図16 人物3名の点群出力結果

結果より、約1.5m間隔の3人の位置に対応した点群が分離検出されており、それぞれ胴体部からの反射成分を主とした人体概形を検出していることが分かる。ここで、点群の形状に違いが見られるのは測定シーンにおいて、レーダから見た3人の体の向きによるレーダ散乱断面積（RCS）の違いが一因として考えられる。また、図17に点群位置情報を速度情報と紐づけた結果を示す。ここで、色付けはレーダへ近づく方向の速度をマイナス、遠ざかる方向の速度をプラスとしている。結果よりレーダから見た視線方向の速度として2人が遠ざかる方向、1人が近づく方向の速度で移動していたことが分かる。

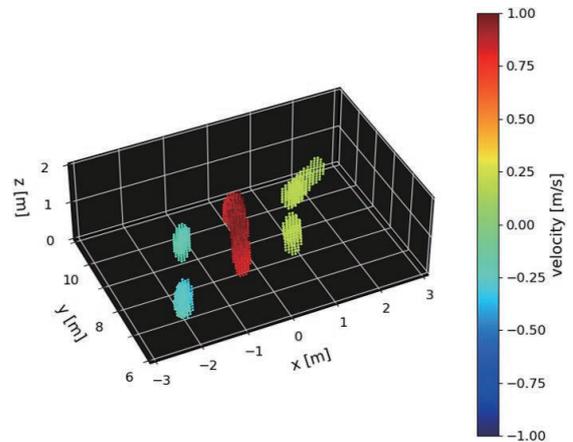


図17 人物3名の点群出力結果（色づけ：速度）

したがって、ミリ波レーダによる3Dイメージングから得られた点群位置・速度情報より、高さ約1.6m相当の3物標が秒速1m（時速約3.6km）以下の速度で移動している状態を観測しており、この物標が人物で歩行している状態であると推察することができる。これら3次元空間分布の位置情報（高さや幅）、移動速度、時間変化による点群変化を観測することで検出物標の識別、及び物標の状態（歩く・走る等の歩行状態や転倒による変化など）を識別

可能になると考えられる。なお、本検討では 3D イメージングによる人物の点群検出を確認するための基礎検証として、ミリ波レーダは人物からの反射が得やすいと想定される胴体部の高さに合わせた 1.2m に設置して測定を行った。インフラセンサとしての使用が想定される高所に設置し、複数人が様々な速度（駆け足や低速歩行、自転車乗車時など）で観測シーンに含まれる場合や、人物だけでなく車両や建造物が混在する状況下での 3D イメージングについては今後の検討内容としたい。

6. むすび

本稿では、ミリ波レーダをインフラセンサとして利用することを想定し 1 チップの制約下で実現可能な平面アレーアンテナを構成し、屋外人物の 3D イメージングに関する検証実験を行った。1 チップ利用による 3 送信、4 受信の少ないアンテナ数であっても、最小冗長配置や MIMO 化処理、KR 積拡張アレー処理を利用することで大開口の仮想平面アレーを実現し、3D イメージングにより手足などの識別は難しいものの、人体概形に対応する点群が得られることを確認した。この結果から 3D イメージングは従来の 2D イメージングに対して点群の高度情報を利用することで物標判別の向上が可能であることを示した。また、複数人の観測シーンの 1 例として歩行者 3 名の 3D イメージングを行い、8 ~ 10m の距離に位置する各人物（約 1.5m 間隔）の概形を点群として検出可能であることを確認し、点群の速度情報から状態識別の可能性を示した。

今後の検討課題として、路上であり得る様々な速度（駆け足や低速歩行、自転車乗車時など）で移動する複数人物の観測シーンや車両や建造物が人物の近傍に位置する際の観測シーンなど、RCS の異なる物標が存在する状況で高所にレーダを取り付けて観測し、性能評価を実施する。また、物標追尾に関する検討を行い、点群の形状や動線情報などの時間変化を組み合わせることで各物標の状態識別性の向上に関する検討を行い、ミリ波レーダの物標測位・識別性能を高めていく。

参考文献

- 1) 交通局交通企画課. “令和 2 年中の交通事故死者数について”. 警察庁. 2021-01-04. https://www8.cao.go.jp/koutu/kihon/keikaku11/senmon/k_4/pdf/s2.pdf, (参照 2021-03-12).
- 2) 中央交通安全対策会議. “交通安全基本計画”. 内閣府. 2021-03-29. https://www8.cao.go.jp/koutu/kihon/keikaku11/pdf/kihon_keikaku.pdf, (参照 2021-04-02).
- 3) 官民データ活用推進戦略会議. “官民 ITS 構想・ロードマップ 2020”. 内閣府. 2020-07-15. https://cio.go.jp/sites/default/files/uploads/documents/its_roadmap_2020.pdf, (参照 2021-03-16).
- 4) 谷本雄大, 上野大, 齋藤啓介. 広角度分離分解能を有する到来方向推定を導入した交通監視用ミリ波レーダ. OMRON

TECHNICS. 2020, Vol.52, p.41-46.

- 5) 谷本雄大, 大橋卓, 齋藤啓介. “ミリ波最小冗長 MIMO レーダによる屋外人物検出”. 2020 年電子情報通信学会ソサイエティ大会. 2020, p.137, B-1-137.
- 6) Moffet, A. T. Minimum-Redundancy Linear Arrays. IEEE Trans. 1968, Vol.AP-16, No.2, p.172-175.
- 7) Ma, W. K.; Hsieh, T. H.; Chi, C. Y. DOA Estimation of Quasi-Stationary Signals With Less Sensors Than Sources and Unknown Spatial Noise Covariance: A Khatri-Rao subspace Approach. IEEE Trans. 2010, Vol.SP-58, No.4, p.2168-2180.
- 8) 山田寛喜. ミリ波レーダによる高分解能イメージング技術. 電子情報通信学会論文誌 B. 2021, Vol. J104-B, No.2, p.66-82.
- 9) Li, J.; Stoica, P. MIMO Radar Signal Processing. John Wiley & Sons, 2009, p.235-242.

執筆者紹介



大橋 卓 OHASHI Suguru

技術・知財本部 研究開発センタ
専門：電気・電子工学
所属学会：電子情報通信学会



谷本 雄大 TANIMOTO Yudai

技術・知財本部 研究開発センタ
専門：電気・電子工学
所属学会：IEEE, 電子情報通信学会



齋藤 啓介 SAITO Keisuke

技術・知財本部 研究開発センタ
専門：電気・電子工学
所属学会：IEEE, 電子情報通信学会

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

機械学習を用いた電力変換機器の最適化設計プロセスの実証

佐藤 一樹, 小田 博章, 上松 武

近年、製品設計を最適化問題として定義し、数値解析により結果を得る最適化技術が普及しつつある。この技術により設計の効率化が実現でき、電力変換機器においても応用が検討されている。応用できる設計内容は、回路のパラメータ、部品の寸法、部品の配置の3種類に大別することができる。そして、それぞれに対応した最適化問題が研究されており、これらを組合せて一連の設計プロセスを構築する。しかし、そのまま順番に適用すると完全に独立な問題ではないため、製造面で実現性の低い解が導出される可能性がある。そこで実現性の高い解を得るために、最適化問題を繰り返す必要が生じ非効率なプロセスとなる。

本論文では繰り返しの削減を目的に、3種類のうち回路のパラメータと部品寸法の2種類を同時に検討する設計プロセスを提案する。加えて、本案によりこの求解の過程で用いるシミュレーション時間が長くなる問題には、部品寸法を機械学習モデルで代替し算出することにより時間を短縮して対策する。これら提案したプロセスをワイヤレス給電システムに適用し、その実現性を確認した。その結果、機械学習モデルを用いることで求解の実行時間を70%低減し、探索範囲を1.5倍に拡大することができた。

Feasibility Study About Design Process of Power Electronics Converters by Optimization Method Applied Machine Learning

SATO Kazuki, OTA Hiroaki and UEMATSU Takeshi

Applying the optimization methods to design for products as optimization problems are increasingly spreading. Since these methods can make design processes more efficient, we should also use them when designing power electronics converters. Design processes of power electronics converters are roughly classified into electrical circuit parameters, geometric properties of parts and alignment of parts. These processes are studied as optimization problems individually and are combined into a series of design process. However, since they are not strictly independent, solutions with low manufacturability may be derived. Therefore, the design process becomes inefficient because of the iterative calculations to get manufacturable solutions.

In this paper, to reduce the iterative calculations, we propose the design process that simultaneously solves two of above three optimization problems, electrical circuit parameters and geometric properties of parts. On the other hand, calculation time for simulations becomes longer, we substitute machine learning model for simulation. The feasibility of the proposed process was validated through the design for wireless power transfer system. Because of machine learning model, calculation time was reduced by 70% and the range of design could be expanded by 1.5 times.

1. まえがき

SDGsの目標7の地球環境問題を重要視する気運が世界的に高まっており¹⁾、目標達成に向けて電力変換機ではエ

ネルギー変換時の損失を抑える必要がある。日本政府もこれをアクションプランの一つとして位置づけており²⁾、当社では、FA電源、サーボドライバ、パワーコンディショナなどのエネルギー関連製品を通して取組んでいる。またIoTやスマートグリッドに代表される社会情勢の変化³⁾か

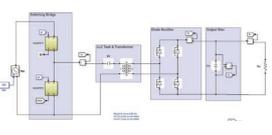
Contact : SATO Kazuki kazuki.sato@omron.com

ら、多種多様な電気機器が登場し、それらを動作させるために必要な電力変換機器の需要も増加していく。そのため、電力変換機器の小型高効率化が今後も強く求められる。

近年、製品の設計開発を最適化問題として定義し、数値解析により結果を得る技術が普及しつつある⁴⁾。最適化問題とは、ある実数空間上で定義された関数または条件を満たす値の集合から、最小あるいは最大となる状態を求めることである。これを工学の設計分野に応用し、任意の性能が最大となる設計値を求める。本論文ではこれを最適化プロセスと呼ぶ。メリットは、設計の効率化が可能になる点である。設計では非常に多くの変数があり、特性間で複雑なトレードオフ関係を有している。そのため、目標の特性を得られるような設計は容易ではなく、最適化プロセスにより効率化が見込まれる⁵⁾。

電力変換機器の設計において、最適化プロセスを適用するシーンは、表1に示す3種類に大別できる。1つ目に理想的な特性値の検討で、電気回路や等価回路のLCRなど回路パラメータを求める⁶⁾。2つ目に各部品の実現性検討で、目標の特性を示すように磁気部品や放熱機構部品などの部品の寸法を決定する⁷⁾。3つ目にアセンブリの検討で部品や基板、ア트워크などの配置を設計する⁸⁾。これらは、それぞれ最適化問題として研究事例で報告されている。そして、3種類の問題を組合わせて一連の設計プロセスを構築する。しかし、各問題は独立ではないため、そのまま順番に実行するフローでは製造面で実現性の低い解が導出される可能性がある。そこで実現性を高めるため、問題を繰り返し求解する現象（ループ）が生じ、非効率となる。

表1 電力変換機器の設計における最適化問題^{9,10)}

決定変数	最適化問題の概要	適用事例のイメージ
回路パラメータ	電気回路の損失を最小化する回路パラメータを求解する	
部品の寸法	電磁気や熱など所望の特性を実現できる部品の寸法を求解する	
部品の配置	熱、電磁界、幾何学制約を考慮し全体のサイズを最小化する部品の配置を求解する	

本論文ではループの削減を目的に、3種類のうち回路パラメータと部品寸法の2つを同時に検討するプロセスを提案する。3つ目の部品配置もループ発生原因のひとつのた

め、まとめることが望ましい。しかし、この段階で部品同士の熱や電磁界といった相互干渉を評価できる適切なモデルを設定するのは技術的な難易度が高い。またパラメータの増加に伴い設計空間が広がるため、求解の収束性に課題が生じる。そこでまずは、前者2つを同時設計するプロセスの検討を行う。一方、それにより求解の過程で用いるシミュレーションの演算時間が長くなるため、機械学習モデルを活用することで時間の増加を抑制する。これら提案した設計プロセスの実現性を検証するため、電力変換機器のひとつであるワイヤレス給電システム（WPT）を事例に適用した。

2. 提案する2ステージ型の設計プロセス

2.1 最適化プロセスのフローチャート

電力変換機器の設計プロセスを、複数の最適化プロセスを組合わせて構築する。ここではまずベースになる最適化プロセスについて説明する。図1にそのフローチャートを示す。数値解析により求解するため、設計目的とその変数を基に問題定式化を最初に行う。設計変数は特性に対する寄与度の大きさや変数間の相関関係から取捨選択され、決定変数として定義される。この決定変数に異なる値を設定することで、様々なデザインが生成される。そして、各デザインを評価するため、その物理的な特性値を導出する。電力変換機器の場合、対象になる物理特性は回路、制御、磁気、熱、ノイズ（電磁界）である。求めた特性値を基に評価値が算出され、最適化アルゴリズムにより変数の値とデザインの更新が繰り返される。

この最適化プロセスが、表1に示す通り3種類あり次節ではこれらを組み合わせて、電力変換機器の設計プロセスを検討する。

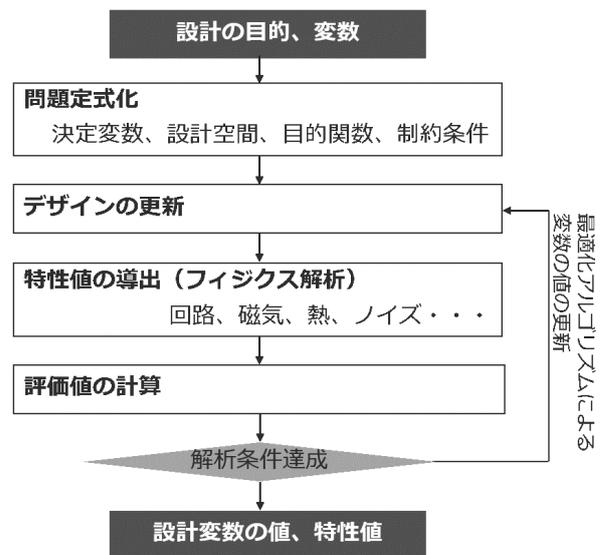


図1 最適化プロセスのフローチャート

2.2 3 ステージ型の設計プロセスとループの課題

3種類の最適化プロセスを組合わせて設計プロセスを構築する際、順番に実行するのがシンプルな方法である。このときの設計プロセスを図2に示す。プロセス全体の決定変数は、回路パラメータ、部品の寸法、そして部品の配置である。これらをステージ1、2、3の順番に最適化プロセスを用いて求解する。各ステージの問題は完全に独立ではなく、前ステージで求めた情報の一部が次で活用される。出力はステージ1で回路の損失、ステージ2から部品サイズ、ステージ3より全体のサイズが得られる。これらを総合して、デザインの小型高効率度合いを評価する。

このプロセスには2か所の分岐点(図2中赤)がある。本論文で削減の対象とするのは、分岐1によるループである。これはステージ2の結果から目標の特性を満足する部品製造の実現性が困難と判明した場合、ステージ1に戻る。ステージ1で最適化問題を再定義して求解し、改めてステージ2を実行する。このループを防ぐには、ステージ1の段階で実現見込みのある特性値を設計空間で設定する必要がある。過去の知見が活かせる範囲であれば予測が可能だが、新規部品やカスタム部品はそれが困難である。

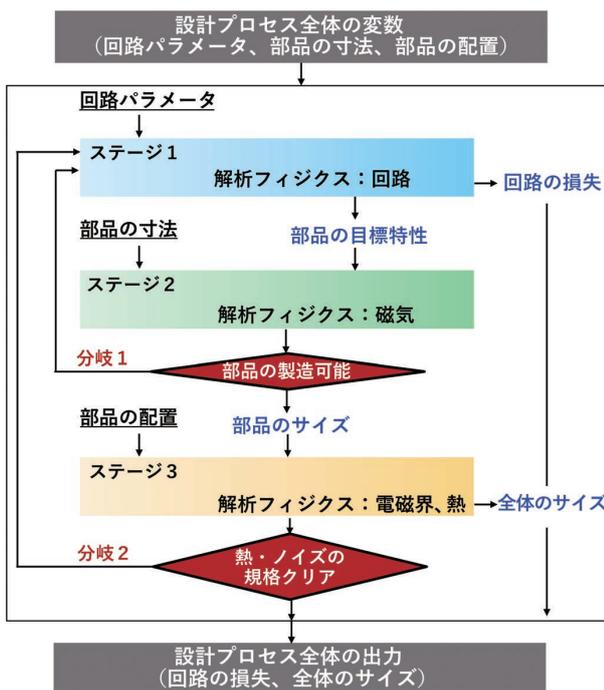


図2 順番に実行する3ステージ型の設計プロセス

2.3 分岐1のない2ステージ型の設計プロセス

分岐1に起因したループを削減した2ステージ型の最適化プロセスを図3に示す。3ステージ型との最大の違いは、ステージ1の中にステージ2の内容を包含する点である。具体的にはステージ1の決定変数に、回路パラメータと部品の寸法の2種類を設定する。部品の形状に大きく依存する回路パラメータは、設計空間から除外され、その変わり

に部品の寸法として設定される。そして、回路解析を行う前に部品の寸法から磁界解析などにより特性(回路パラメータ)を求める。これらを用いて、回路パラメータの最適化プロセスを実施する。詳細なフローは3.3節にて述べる。この場合、ステージ1の結果で回路特性や回路パラメータと同時にそれを実現する部品の寸法も得られる。これを「部品寸法を考慮した回路パラメータの最適化プロセス」とし、ステージ1'と呼ぶ。以降のフローは3ステージ型と同様であるため、上記の箇所に限定して論じる。

一方、ステージ1'では回路解析に加えて磁界解析のシミュレーションを行う。このため、最適化プロセス中の演算時間が増大してしまう。そこで機械学習のニューラルネットワーク(NN)¹¹⁾で代替して時間を短縮する。

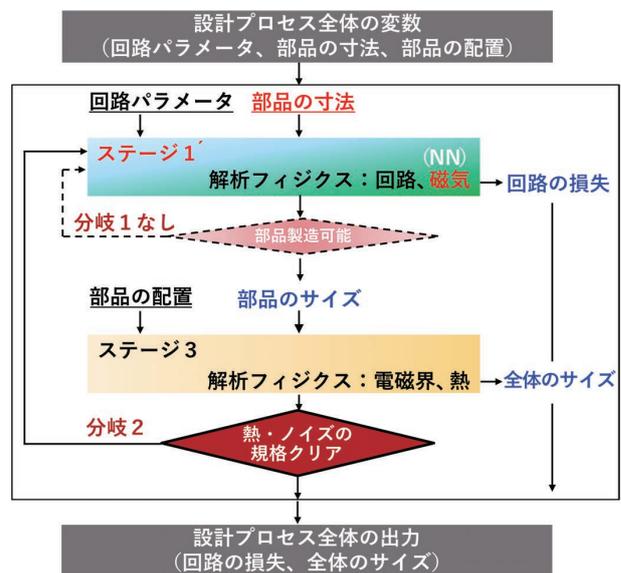


図3 分岐1をなくした2ステージ型の設計プロセス

2.4 シミュレーションの代替のNN

最適化プロセスの演算時間を短縮するため、シミュレーションをNNで代替する。NNの入力層に部品の寸法を、出力層に特性を定義することで回帰モデルを作成する。教師データのデータセットは、シミュレーションで準備する。この手法については先行事例があり、データ収集コストを下げるための効率的なサンプリング方法などが近年研究されている¹²⁾。

NNを使ったプロセスは2点のメリットがある。1点目に、設計検討の幅が広がることである。電力変換機器の構想設計の段階では、回路トポロジがひとつに決まらず、複数の候補が残る場合がある。しかし、適用できる部品の仕様は、トポロジに関わらず共通であることが多い。そこで共通部品の特性予測ではNNを使うことにより最適化問題の求解にかかる1回あたりの時間を短縮する。これは1種類の回路トポロジの最適化プロセスを短時間で実行できることを意味している。従ってシミュレーションを用いた場

合と比較し、同一時間内で検討できる回路トポロジの数を増やすことができる。トポロジの検討は電力変換機器性能を左右するため、検討の幅を広げることにより性能改善に繋がる可能性が生じる。

2点目は、学習したモデルを技術資産として他の設計においても活用し効率化が図れることである。例えば磁気部品や放熱機構部品では、汎用品を用いることがあり学習モデルの展開性が高い。またシミュレーション自体に時間を要する場合、特に生産性向上に寄与する。

3. WPT の設計を通じた提案プロセスの実証

3.1 適用事例の背景と目的

WPT は電力変換機器のひとつであり、非接触で電力を授受する。ユーザ利便性の観点から電力伝送空間の広範囲化がアプリの付加価値となる。そのため、小型高効率化に加えて広範囲化が求められる。しかし、高効率化と広範囲化はトレードオフの関係にある。そこで本事例では、範囲を制約条件とし効率を最大化する最適化問題に置き換えて設計を行う。

上記の検討に3ステージ型を適用した場合、磁気部品の設計自由度が高いため、ステージ1で製造性を考慮した適切な設計空間を設定することは困難である。そこで回路パラメータと磁気部品の寸法の2種類の設計変数を対象に、2ステージ型のステージ1'である「部品寸法を考慮した回路パラメータの最適化プロセス」の実現性を検証した。

3.2 定式化した最適化問題

S_1 を回路パラメータ、 S_2 を磁気部品の寸法の集合とおき、決定変数 X, Y を式(1)で定義する。式(2)で X, Y は設計変数を要素としたベクトルとした。式(3)は目的関数で、 $F(X, Y)$ を最大化する単目的最適化(望大特性)とした。式(4)は評価関数であり、回路の損失(エネルギー変換効率) $\eta(X, Y)$ と後述のペナルティ関数 $p(X, Y)$ で構成した。各項の値は、回路シミュレーションにより得られた回路特性から算出される。低損失(変換効率が高い)かつ制約条件をクリアしたデザインほど評価値が高くなる。式(5)はペナルティ関数で、制約条件の満足度を定量化するために用いた。制約内容は、ZVS、出力の電気レギュレーション、デバイスの印加電流の3種類で個別に関数 $p_i(X, Y)$ を設定した。全ての制約条件を満足した場合のみ、ペナルティ値は最大の1となる。不満足なデザインは、その度合いに応じてペナルティ値が減少し評価値が下がる。

最適解の探索アルゴリズムは、部品の製造制約から設計空間が離散的であること、また解空間の多峰性を想定し、遺伝的アルゴリズム (GA)¹³⁾ を使用する。

$$X \in S_1, Y \in S_2 \tag{1}$$

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\text{Max } F(X, Y) \tag{3}$$

$$F(X, Y) = \eta(X, Y) * p(X, Y) \tag{4}$$

$$p(X, Y) = \prod_{i=1}^3 p_i(X, Y) \tag{5}$$

$$\begin{cases} 0 < F(X, Y) < 1 \\ 0 < \eta(X, Y) < 1 \\ 0 < p_i(X, Y) < 1 \end{cases} \tag{6}$$

3.3 部品寸法を考慮した回路パラメータ最適化プロセスのフローチャート

ステージ1'の詳細フローを図4に示す。決定変数の X と Y は、最終的にどちらも回路パラメータとしてデザインに設定される。しかし、それらは図4に示す通り異なるフローを経る。 X と Y は、部品製造の実現可能性の高低で分かれ、不確実なものは決定変数に部品寸法の Y を用いる。 Y (黄) は寸法として値が更新された後、磁気解析により寸法から特性へと変換される。この際、効率化を図るため磁気解析をシミュレーションではなく NN で代替する。この変換された値をデザインの回路パラメータとして採用する。 X (青) は、直接値が更新されそのままデザインに設定される。これらを用いて回路解析から、回路特性と評価値を得る。その後、最適化アルゴリズムにより、決定変数の更新が繰り返される。本事例では表2に示す商用ソフトを活用しこのフローを構成した。

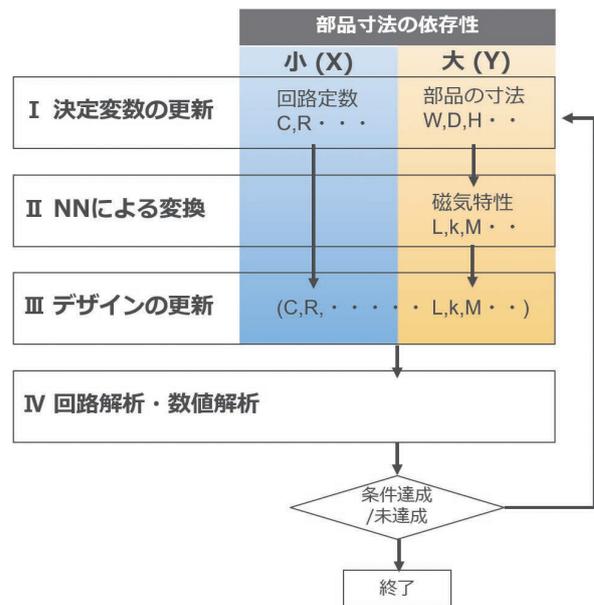


図4 部品寸法を考慮した回路パラメータの最適化プロセスのフローチャート

表2 適用した商用ソフト

ソフト名	メーカー	用途
modeFrontier	ESTECO	・ワークフローの構築 ・最適化アルゴリズムの実行 ・NNの作成
Mathcad	PTC	回路特性の計算
JMAG	JSOL	磁気特性の教師データ作成

3.4 最適化の実行結果

解の探索過程を図5に示す。探索初期 (a)、中期 (b)、後期 (c) における1000デザインごとの評価値 $F(X, Y)$ のヒストグラムを表している。初期 (a) では評価値の最も低いクラスに分布が偏っている。探索が進み (b) で徐々に評価値の高いデザインが発見され、なだらかな分布に変化している。そして (c) から評価値の高いクラスに最も分布が集まり、収束していることがわかる。これらの推移からGAにより解の探索が正しく実行できていることが確認できた。

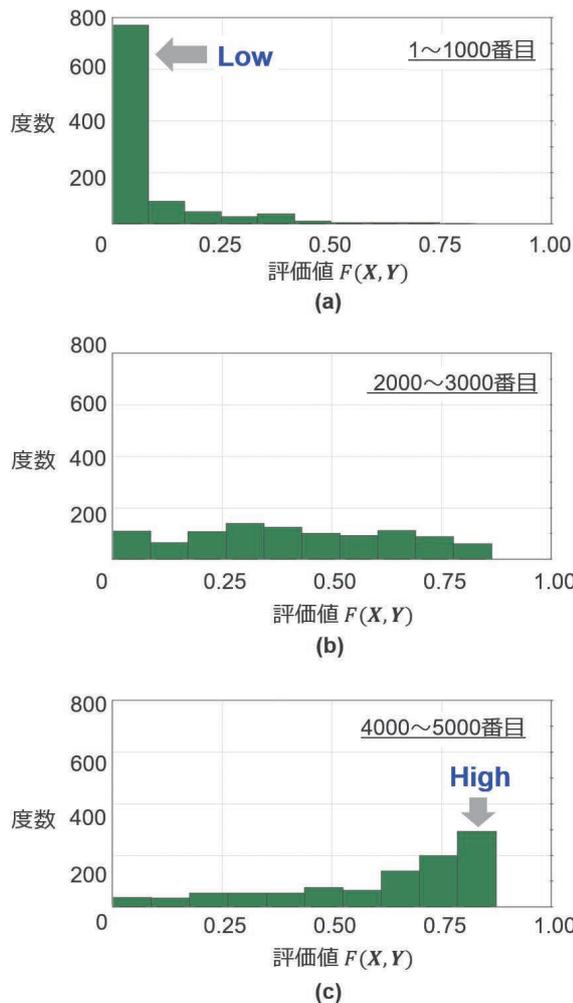


図5 探索初期 (a)、中期 (b)、後期 (c) の評価値のヒストグラム

3.5 2ステージ型設計プロセスの実証結果と効果

WPTを事例に提案したプロセスのステージ1'を適用し、その実現性を検証した。部品の製造性を考慮するため、回路パラメータと部品の寸法の2種類の決定変数を用いて最適化問題を定式化した。これを求解するためのフローチャートを検討し、商用ソフトを組み合わせることで環境を構築した。そして、探索の結果、低損失かつ制約条件を満足する解が導出できた。得られた解をもって、回路の特性と同時にその特性を示す部品の寸法は明らかになっており、ループを削減した効率の良いプロセスの実現性を検証できた。なお、この解から試作機を作製し、実測においても同等の動作実現を確認できた (図6)。

次にこのプロセスによる効果を2点述べる。1点目に、NNを適用したことによる設計検討の幅の拡大である。ステージ1'で、磁気部品の特性導出にシミュレーションとNNを用いた場合の検討可能な回路トポロジの数の比較を表3に示す。NNから予測することで、回路トポロジ1つあたりの実行時間を約70%短縮した。さらに、磁気部品は共通仕様のため、学習モデルが複数の回路トポロジにおいても展開可能であった。これを利用し異なる6種類を効率よく検討することができた。シミュレーションを用いた場合と比較して、同一期間内で探索範囲は1.5倍となった。

2点目に、間接的に性能向上に寄与できたことである。最適化プロセスを使用せずに検討した場合と比較して、回路損失は65%低減できた。これはトレードオフ関係にある広範囲化と高効率化に対して、広範囲化を制約条件とし、それを満足しながらより高効率化を実現できる解が発見できたからと考えられる。そこに至った背景には提案した最適化プロセスにより、製造性を考慮しながら効率的に試行回数を増やすことができたことが寄与している。

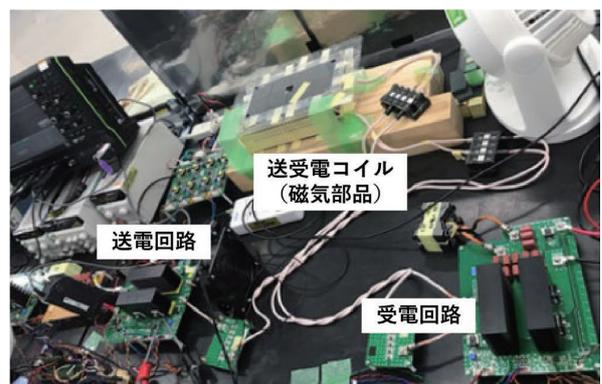


図6 実機作製したWPTの概観

表 3 NN による時間短縮と検討回数の増加

比較項目	磁気特性の解析手法	
	シミュレーション	NN
検討期間 (同一)	26 日	26 日
教師データの作成時間	—	14 日
1 回路トポロジあたりの最適化プロセス実行時間	6.6 日	2 日
検討できる回路トポロジの数	4	6

4. むすび

本論文では最適化技術を使った電力変換機器の設計プロセスの効率化を目指し、回路パラメータと部品の寸法を同時に検討する 2 ステージ型のプロセスを提案した。また機械学習のニューラルネットワークを適用することで、プロセスで費やすシミュレーションの時間を短縮した。この 2 ステージ型プロセスの前段部をワイヤレス給電システムに適用し、その実現性を確認した。今後は部品配置も含めた設計プロセスの構築を行い、生産性向上を達成する。

参考文献

- 1) 日経 BP/東京書籍. “エネルギーをみんなにそしてクリーンに”. Edu Town SDGs. <https://sdgs.edutown.jp/info/goals/goals-7.html>, (参照 2022-02-16).
- 2) SDGs 推進本部. “SDGs アクションプラン 2022”. https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/pdf/SDGs_Action_Plan_2022.pdf, (参照 2022-02-16).
- 3) 新エネルギー・産業技術総合開発機構. “イノベーションの先に目指すべき「豊かな未来」”. NEDO. 2021-06-30. <https://www.nedo.go.jp/content/100934288.pdf>, (参照 2022-02-16).
- 4) 尼崎太郎. “新型新幹線「N700 系」の「顔」を生んだ「遺伝的アルゴリズム」の秘密”. 日経 XTECH. 2007-07-06. <https://xtech.nikkei.com/it/article/COLUMN/20070705/276691/>, (参照 2022-01-07).
- 5) 池田正哲. 商品開発における技術要素間のトレードオフを解消するバランス設計手法の革新. OMRON TECHNICS. 2020, Vol.52, p.105-110.
- 6) Zou, S.; Lu, J.; Mallik, A.; Khaligh, A. Modeling and Optimization of an Integrated Transformer for Electric Vehicle On-Board Charger Applications. IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2018, Vol.4, No.2, p.355-363. doi:10.1109/TTE.2018.2804328.
- 7) 上松武, 中尾悟朗, 三島大地, 佐藤一樹, 長岡真吾. 応答曲面法を用いたワイヤレス給電用コアの最適構造の検討. 電子情報通信学会. 2019, Vol.119, No.217, p.13-18.
- 8) Berzoy, A.; Mohamed, A. A. S.; Mohammed, O. A. “Optimum positioning of inductive components on PCB designs for EMI reduction using a 3D finite elements and genetic algorithms”. 2015 31st International Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics (ACES). 2015, p.1-2.
- 9) Choi, H. Half-Bridge LLC Resonant Converter Design Using FSFR-Series Fairchild Power Switch. Fairchild Semiconductors Application Note. 2007. <https://www.onsemi.jp/pub/collateral/an-4151jp.pdf>, (参照 2022-01-07).
- 10) オムロン株式会社. “S8EX”. 2019-10-15. <https://www.fa.omron.co.jp/products/family/3088/>, (参照 2022-01-07).
- 11) Goodfellow, I.; Bengio, Y.; Courville, A. Deep Learning, MIT Press, 2016
- 12) 峯田龍志, 岩田剛治, 若松栄史, 松本侑哉, 川村俊貴. シミュレーションと機械学習の組み合わせによる高速近似解析手法構築の能動学習を用いた効率化に関する研究. 日本機械学会誌. 2021, Vol.2021, p. 79-80.
- 13) 山村雅幸, 小林重信. 遺伝的アルゴリズムの工学的応用. 人工知能学会誌. 1994, Vol.9, No.4, p.506-511.

執筆者紹介



佐藤 一樹 SATO Kazuki
 技術・知財本部 エンジニアリングセンタ
 専門：電気工学



小田 博章 OTA Hiroaki
 技術・知財本部 コアテクノロジーセンタ
 専門：電気工学



上松 武 UEMATSU Takeshi
 技術・知財本部 コアテクノロジーセンタ
 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)

施工性向上を実現した蓄電システムの開発

山田 潤一郎, 大内 祐介, 衛藤 郡

再生可能エネルギーは、エネルギー安全保障にも寄与できる重要な低炭素エネルギー源である。再生可能エネルギーの普及促進のため、2009年に余剰電力買取制度が開始された。その後、買取価格は低下している一方で、電気料金は上昇している。そのため、太陽光発電の電気を売らずに貯めておいて、必要な際に使う自家消費の観点で、蓄電システムへの注目が高まっている。また、台風や地震などの自然災害による停電時の備えとしても、蓄電システムへの注目が高まっている。今回、施工性向上による初期導入費用の低減を目指したマルチ蓄電パワーコンディショナ KPBP-A シリーズを開発した。その際、蓄電システムに用いられるパワーコンディショナに関して、従来機種よりも小型となる筐体の適用と出力容量の増加から、発熱が課題となった。そこで、非絶縁型双方向 DC/DC コンバータへの SiC-MOSFET の適用とインバータのスイッチングパターンの最適化により、電力変換器の高効率化を図った。その結果、小型筐体を適用することができ、施工性向上を実現できた。

Development of Power Storage System with Improved Workability

YAMADA Junichiro, OUCHI Yusuke and ETO Gun

Renewable energy is an important low-carbon energy source that can contribute to energy security. A surplus electricity purchase system was started in 2009 to promote the spread of renewable energy. Since then, the purchase price has fallen, while the electricity price has risen. Therefore, the power storage system is attracting attention from the viewpoint of self-consumption, in which photovoltaic power generation electricity is stored instead of being sold and used when needed. Moreover, attention is being paid to power storage systems in preparation for power outages caused by natural disasters such as typhoons and earthquakes. This time, we have developed the power storage system (KPBP-A) aiming at reducing the initial introduction cost by improving workability. For the power conditioner used in the power storage system, we applied a housing that is smaller than the conventional model. Due to the effects of miniaturization and increased output capacity, heat generation has become an issue. We aimed to improve efficiency by applying SiC-MOSFET to non-isolated bidirectional DC/DC converter and optimizing the switching pattern of inverters. As a result, a small housing could be applied and workability could be improved.

1. まえがき

再生可能エネルギーは、温室効果ガスを排出せず、エネルギー安全保障にも寄与できる重要な低炭素の国産エネルギー源として注目されている¹⁾。再生可能エネルギーの普及促進策として、2009年に太陽光発電の余剰電力買取制度が開始された。余剰電力買取制度とは、太陽光発電設備で発電した電力の内、自宅で消費しきれない余剰電力を電力会社が買い取る制度である²⁾。余剰電力買取制度にて電力会社が買い取りに要する費用は、再生可能エネルギー発

電促進賦課金（再エネ賦課金）によってまかなわれている³⁾。電力会社が買い取った再生可能エネルギーで発電された電気は、日々使う電気の一部として供給されている。そのため、再エネ賦課金は、電気の利用者から広く集められ、毎月の電気料金の中で徴収されている。再エネ賦課金は年々上昇しており、今後も上昇していく見込みである。一方で、発電した電気の買取価格は年々低下している。余剰電力買取制度の開始当初、住宅用の買取価格は48円/kWhであったが、2021年には19円/kWhとなり、半額以下に低下している⁴⁾。また、余剰電力買取制度は、太陽光発電設備の設置後一定期間は固定価格で買い取る制度のた

Contact : YAMADA Junichiro junichiro.yamada@omron.com

め、2019 年から買取期間が順次終了しており、終了の対象は2023年までに約165万件に達する⁵⁾。買取期間終了後の余剰電力は、電力会社や電気事業者への売電が可能であるが、買取期間中の買取価格より安価になる。

電気料金の上昇と買取価格の低下の背景から、自宅に蓄電システムを導入して、余剰電力を蓄電池に充電して必要な際に自宅の負荷に放電して消費する自家消費に関心が寄せられている⁶⁾。

また、台風や地震による数十万戸以上の規模での停電は、全国各地で毎年のように発生している。2016年の熊本地震では約48万戸、2018年の台風21号では約240万戸、北海道胆振地震では約295万戸、2019年の台風15号では約93万戸の停電発生があり、その中には停電の期間が数日続くケースも見られた。これらの災害による停電発生の際には、多くの蓄電システムが被災者の方々の生活を支えた記録が報告されている⁷⁾。災害時での停電への備えの観点として、蓄電システムが注目されている。

以上の背景から、蓄電システムの出荷量は年々増加しており、普及は着実に進んでいる。

しかし、蓄電システムが公的支援を得られなくとも自立的に普及するためにはコストが課題である。経済産業省による定置用蓄電システム普及拡大検討会では、家庭用蓄電システムの自立的な普及に向けて、目標価格の検討をしている。家庭用蓄電システムにおいて、蓄電池を含む蓄電システム価格と工事費を合わせた費用の中で、工事費が占める割合は25%程度となることが示されている。工事費低減等に対するメカ等の創意工夫が期待されるとして、目標価格に工事費を含める提案がされている⁸⁾。例えば、重量やサイズが大きい場合、一人での運搬が困難なため、複数人での運搬が必要となる。また、人力での運搬が困難であれば、クレーンなどの重機の使用も必要になってくる。これらは施工費が増加することに繋がる。

当社は、蓄電システムの普及拡大を推し進めるために、住・産共用フレキシブル蓄電システム KPAC-A/B シリーズを開発し、商品化してきた。これらのシリーズは、すでに太陽光発電システムを導入済みの住宅に対して、蓄電池を後付けで設置可能なシステムであり、導入済みの太陽光発電システムからの発電電力を活用し、日中の発電余剰電力を充電することで自家消費を実現できる蓄電システムである。

今回、施工性向上を実現したマルチ蓄電プラットフォーム KPBP-A シリーズを開発し、商品化した。エンドユーザーの要望や予算に合わせ、最適な機器構成での実現を目的として、一つのプラットフォームで9種類のシステム構成に対応できる。また、運搬の容易性、設置制約の解消を目的として、分割構造による運搬を可能とする小型の蓄電池構造を採用した。さらに、一人施工による施工工数の削減を目的として、パワーコンディショナの小型・軽量化を実現

した。KPBP-A シリーズは、パワーコンディショナに関して、KPAC-A/B シリーズよりも小型である筐体を適用し、さらに、高い出力容量としている。本論文では、パワーコンディショナの小型・軽量化に対する技術課題と適用技術について、報告する。

2. マルチ蓄電プラットフォームの特徴

施工性向上を実現した KPBP-A シリーズの主なコンセプトは、以下のとおりである。

- ・自在に選べる
- ・自由に設置できる
- ・自動で使える

2.1 自在に選べる

KPBP-A シリーズは、一つのプラットフォームで、9種類のシステム構成に対応することが可能であることを特徴とする。図1に、9種類のシステム構成の選択肢を示す。

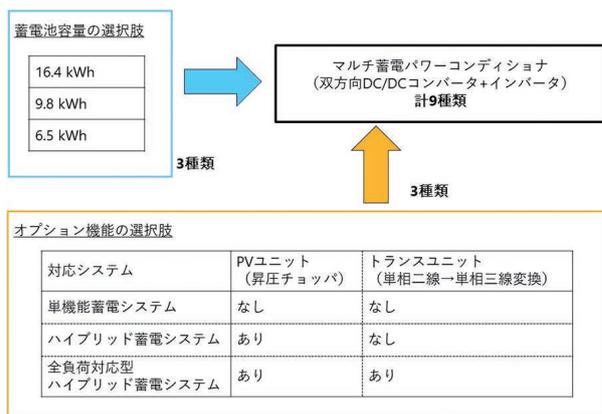


図1 システム構成の選択肢

蓄電池との充放電を行う双方向 DC/DC コンバータ、及び、系統電源（以下、系統）との電力変換を行うインバータで構成されるマルチ蓄電パワーコンディショナを一つのプラットフォームとして、オプション機能追加の選択肢の内容に応じて、単機能蓄電システム、ハイブリッド蓄電システム、全負荷対応型ハイブリッド蓄電システムの3種類のシステムへの対応が可能であり、各々に対して、さらに3種類の蓄電池容量から選択可能である。そのため、用途に応じた9種類のシステム構成に対応できる。

単機能蓄電システムは、蓄電池ユニットとマルチ蓄電パワーコンディショナで構成される。停電時は、蓄電池からの放電電力を、あらかじめ決めておいた特定の家電負荷に給電することが可能である。

ハイブリッド蓄電システムは、単機能蓄電システムから、さらにPVユニットを追加して構成される。PVユニットは、マルチ蓄電パワーコンディショナに太陽電池の発電

電力を出力する機能を持つ。停電時は、太陽光発電と蓄電池からの放電電力を、あらかじめ決めておいた特定の家電負荷に給電することが可能である。

全負荷対応型ハイブリッド蓄電システムは、ハイブリッド蓄電システムから、さらにトランスユニットを追加して構成される。トランスユニットは停電時において、マルチ蓄電パワーコンディショナからの単相二線 200 V 出力を、単相三線 200/100 V 出力に変換して、家庭内の全ての家電負荷への電力供給を可能にする機能をもつ。

その時々ニーズに合わせて機器を段階的に導入することが可能で、例えば、既設の太陽光発電システムがあるユーザに対しては、後付けで単機能蓄電システムを設置することが可能である。また、既設の太陽光発電システムが故障した後は、PV ユニットの追加して、既設のシステムを置き換えることでハイブリッド蓄電システムの構成になり、さらにトランスユニットを追加することで、全負荷対応型ハイブリッド蓄電システムの構成に拡張することが可能である。

2.2 自由に設置できる

KPBP-A シリーズの蓄電池ユニットは、小型かつ屋内・屋外設置対応で、設置場所を柔軟に選択可能であることを特徴とする。16.4 kWh と 9.8 kWh の蓄電池ユニットは、分割構造で設置・施工時の制約が緩和できることを特徴とする。構成機器が最も多い全負荷対応型ハイブリッド蓄電システム（16.4 kWh）であっても軽バンに積載可能なサイズであり、分割して運搬できる構造のため、大容量でもクレーン車無しで運搬可能であり、施工費の低コスト化が可能である。

2.3 自動で使える

KPBP-A シリーズは、停電・復電時の電力供給の切替えが自動で行われること、及び、夜間の充電量を AI で自動制御可能であることを特徴とする。停電が発生した場合、ユーザの操作を要することなく、家庭内負荷に自動で電力が供給される。

3. パワーコンディショナの構成と仕様

図 2 に KPBP-A シリーズのマルチ蓄電パワーコンディショナの外観、図 3 にマルチ蓄電パワーコンディショナ、PV ユニット、トランスユニット、及び、系統と接続する分電盤との回路構成を示す。

マルチ蓄電パワーコンディショナは、電力変換器である非絶縁双方向 DC/DC コンバータやインバータ、各種保護機能や電力変換器の制御を行う制御回路部、及び、連系時と停電時の電力供給時（以下、自立時）での出力を切り替えるリレー部から構成される。蓄電池ユニットとの CAN 通信情報や、系統の受電点電力の計測内容に応じて、非絶

縁双方向 DC/DC コンバータにて蓄電池の充放電制御を行う。また、非絶縁双方向 DC/DC コンバータと昇圧チョップパからの直流電力は、インバータにて交流電力に逆変換される。また、インバータは、交流電力の直流電力への順変換や、系統の電圧や周波数などの状態に合わせた系統連系制御も行う。制御回路部には、双方向 DC/DC コンバータ制御、系統連系制御、単独運転検出機能の AICOT[®]、異常検出などの各種保護機能を搭載している。



図 2 マルチ蓄電パワーコンディショナの外観

PV ユニットは、開閉器や逆流防止ダイオードなどで構成される接続箱機能部、電力変換器である昇圧チョップパ、及び、各種保護機能や電力変換器の制御を行う制御回路部から構成される。制御回路部には、太陽電池の発電電力を最大化する最大電力点追従制御（MPPT : Maximum Power Point Tracking control）や昇圧チョップパ制御、異常検出などの各種保護機能を搭載している。

トランスユニットは、単相二線 200 V を単相三線 200/100 V に変換する非絶縁トランスから構成される。

ユーザの目的に応じて、全負荷対応と特定負荷対応のいずれも選択が可能である。図 3 の結線は全負荷対応を示しているが、点線赤枠の全負荷対応と特定負荷対応を入れ替えることで、特定負荷対応を示す結線になる。

表 1 に KPBP-A シリーズのマルチ蓄電パワーコンディショナ部と従来機種である KPAC-A/B シリーズとの主な仕様の比較を示す。KPBP-A シリーズは、KPAC-A/B シリーズよりも、小型・軽量である。また、通常運転時（以下、連系時）と自立時の交流出力は、KPAC-A/B シリーズよりも高出力である。

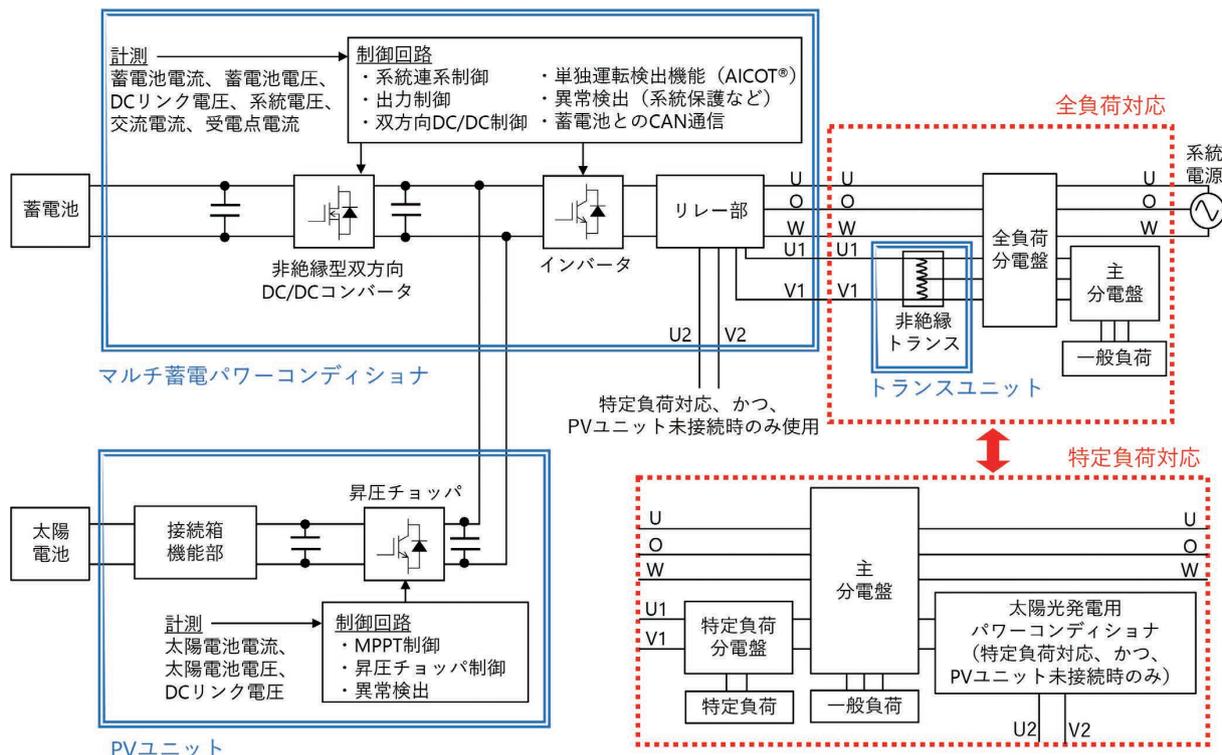


図3 KPBP-Aシリーズの回路構成

表1 主な仕様比較

項目		KPBP-Aシリーズ			KPAC-Aシリーズ (従来)		KPAC-Bシリーズ (従来)
蓄電池	電力量	16.4 kWh	9.8 kWh	6.5 kWh	9.8 kWh	6.5 kWh	4.2 kWh
交流出力	連系 (単機能) (力率 1.0)	5.9 kW	4.0 kW	2.5 kW	4.0 kW	2.5 kW	2.5 kW
	連系 (ハイブリッド) (力率 0.95)	5.6 kW			非対応		非対応
	自立 (特定負荷)	2.0 kVA (100 V)			2.0 kVA (100 V)		2.0 kVA (100 V)
	自立 (全負荷)	4.0 kVA (200 V)			非対応		非対応
電力変換効率	充電	95.5%	95.5%	95.0%	94.0%	93.0%	95.0%
	放電	96.0%	95.5%	95.0%	94.0%	93.0%	95.0%
外形寸法 (幅×高さ×奥行)		450×562×232 mm			650×493×222 mm		650×493×222 mm
重量 (本体)		約 21 kg			約 29 kg		約 29 kg

4. 技術課題と解決方針

4.1 小型筐体の検討

KPBP-Aシリーズの開発にあたり、従来機種である単相用屋外設置型太陽光発電システム用パワーコンディショナ KPVPシリーズ、KPR-Aシリーズ、及び、KPW-Aシリーズ (以下、KPW-A など) と同じ筐体を適用することを目標と

した。KPW-Aなどの筐体サイズは、従来機種であるKPAC-A/Bシリーズよりも小型である。本筐体を採用するメリットとして、下記の2点が挙げられる。

一点目として、施工性の向上が挙げられる。従来機種であるKPAC-A/Bシリーズの筐体よりも小型・軽量化することで、一人施工が可能である重量を実現した。

二点目として、後述する半導体デバイス採用に対するコ

スト増加の抑制が挙げられる。小型筐体を実現するために、内部実装部品（半導体デバイス）のコスト増加が懸念されるが、KPW-A などの筐体の共用化をすることで、低コスト化が期待できる。

4.2 課題

KPW-A などと同じ筐体を適用するにあたっての課題は発熱である。KPW-A などの筐体は KPAC-A/B よりも体積比で 82% になる小型筐体である。KPAC-A/B シリーズに対して、回路などの構成要素は同じである一方で、外形のサイズが小型になるため、筐体内には、より熱がこもる状態となる。さらに、KPBP-A シリーズでは KPAC-A/B よりも連系時の出力、及び、自立時の出力容量が増加しており、より発熱が厳しい条件になる。つまり、パワーコンディショナ内部の空間体積の減少に加え、出力容量の増加で内気を暖める熱量が増えることになり、パワーコンディショナの内部温度の上昇が顕著となる。

パワーコンディショナの内部には、各種プリント配線板とそのプリント配線板上に実装された複数の部品が搭載されている。これらの部品の中には寿命を有する部品があり、パワーコンディショナの信頼性と設計期待寿命を満足するためには、部品毎の温度仕様を満足すると共に、部品寿命がパワーコンディショナの設計期待寿命を満足する必要がある。部品温度は、部品の自己温度発熱とプリント配線板温度からの熱伝導、部品の周囲温度から決まり、全ての実装部品に対して影響を及ぼすのがパワーコンディショナの内部温度である。そのため、パワーコンディショナの内部温度上昇を如何に抑制するかが、部品毎の温度仕様と、部品寿命を満足するために重要となる。

パワーコンディショナの内部温度に最も大きく影響を及ぼすのが、スイッチング素子の損失である。スイッチング素子の損失は、パワーコンディショナの全体損失の約 5～6 割を占めている。スイッチング素子の損失の熱量はヒートシンクを通じてパワーコンディショナ外部に逃されるが、全ての熱量は放熱されず、一部の熱量はパワーコンディショナの内部温度を上昇させることになる。そのため、パワーコンディショナの内部温度上昇の抑制にはスイッチング素子の損失の低減が必要である。

4.3 課題解決の方針

非絶縁型双方向 DC/DC コンバータとインバータのスイッチング素子として、導通損失とスイッチング損失の低減に効果のある SiC-MOSFET の適用を、電力損失シミュレーションと熱流体解析シミュレーションを用いて検討した。その結果、スイッチング素子の損失低減にはインバータよりも、非絶縁型双方向 DC/DC コンバータのみに SiC-MOSFET を適用することで、最もコストと性能のバランスが良いことが分かった。また、非絶縁型双方向 DC/DC

コンバータのスイッチング素子の損失低減に加え、スイッチング素子以外の発熱部品の損失低減、リレーや制御電源などの発熱部品の内部板金やパワーコンディショナ筐体への放熱などを実施することで、連系時においては、小型筐体の適用が可能であることが分かった。一方の自立時においては、家庭内の家電負荷に高調波歪みが少ない電力を供給可能なスイッチングパターンを採用している。そのため、連系時の発熱対策に加え、インバータを構成するリアクトルのさらなる損失低減が必要となり、インバータのスイッチングパターンの工夫によるリアクトル損失の低減を図った。

4.4 非絶縁型双方向 DC/DC コンバータへの SiC-MOSFET の適用化技術

従来機種である KPAC-A/B シリーズの非絶縁型双方向 DC/DC コンバータには Si-IGBT を採用していた。Si-IGBT と比較すると、SiC-MOSFET は高い絶縁破壊電界強度特性を持つことから低オン抵抗特性が得られ、低導通損失を実現できる。さらに、スイッチング時のテール電流が原理的に発生せず、高速動作が可能である。そのため、Si-IGBT よりも低スイッチング損失を実現できる。図 4 に非絶縁型双方向 DC/DC コンバータの回路図と Nch 型 SiC-MOSFET の Gate、Source、Drain の配置を示す。KPBP-A シリーズでは、Nch 型 SiC-MOSFET を適用しており、図 4 の非絶縁型双方向 DC/DC コンバータの右側はインバータの直流側に接続され、左側は蓄電池に接続される。

様々な半導体メーカから、SiC-MOSFET が商品化されているが、製品性能には各メーカで違いがある。今回、電力損失シミュレーションや熱流体解析シミュレーションで得られたスイッチング素子の損失低減の設計目標を実現するために、半導体メーカの各種商品ライナップの中でも所望の低オン抵抗特性が得られる SiC-MOSFET を選定した。また、SiC-MOSFET の高速動作を極力制限しないことを目的として、寄生インダクタンスの低減とゲート電圧保護回路の付与による低スイッチング損失の実現と、スイッチングパターン設計による SiC-MOSFET のボディダイオード損失の低減を図った。

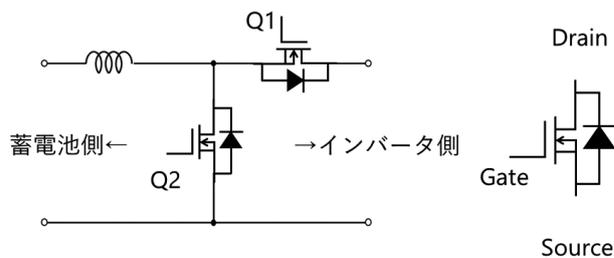


図 4 非絶縁型双方向 DC/DC コンバータと SiC-MOSFET

4.4.1 寄生インダクタンスの低減

SiC-MOSFET のスイッチング損失の最小化を実現するためには、SiC-MOSFET のスイッチング動作をゲート抵抗などで極力制限せずに、素早いスイッチング動作を実現する必要があります。しかしながら、素早いスイッチング動作を実現しようとする、Drain-Source 間電圧 V_{ds} と Gate-Source 間電圧 V_{gs} で、サージ電圧の発生可能性があります。このサージ電圧の発生により、SiC-MOSFET の過電圧破壊、ノイズの増大による誤動作、及び、国内規格の逸脱の懸念があります。

主回路とゲート回路のサージ電圧を抑制するためには、SiC-MOSFET とプリント配線板に実装される周辺部品で形成される電流ループ面積の最小化が必要である。そこで、電流ループ面積の最小化を期待できる SiC-MOSFET モジュールを採用した。主回路における電流ループ面積の最小化においては、スナバ回路を SiC-MOSFET モジュールの直近に配置したことに加え、SiC-MOSFET モジュール内のチップ配置やピン配置を最適化し、寄生インダクタンスの低減を図った。ゲート回路については、プリント配線板に実装されるゲート抵抗やゲートドライバ部品を SiC-MOSFET モジュールの直近に配置したことに加え、SiC-MOSFET モジュール内のチップ配置や SiC-MOSFET モジュールのピン配置を最適化し、寄生インダクタンスの低減を図った。また、電流が流れるループ配線自体の低寄生インダクタンス化も有効な手段となる。そこで、プリント配線板においては、広い配線パターン幅の確保に加え、電流の流れる方向が異なる配線パターンを近接させ、各々の電流によって発生する磁界を互いに相殺することで、寄生インダクタンスの低減を図っている。SiC-MOSFET モジュールにおいては、ワイヤボンディングやピンの複数化によって寄生インダクタンスの低減を図った。

プリント配線板や SiC-MOSFET の低寄生インダクタンス化の検討には、電磁界解析シミュレーションを用いて、寄生インダクタンスを算出することで、最適化を図った。

4.4.2 ゲート電圧保護回路

SiC-MOSFET の Gate-Source 間電圧 V_{gs} は、ゲート酸化膜界面に存在するトラップの影響によってゲート閾値電圧が敏感に反応することが知られている。そのため、Si-IGBT よりも Gate-Source 間電圧 V_{gs} の推奨使用範囲は狭く、特に負側の下限電圧が顕著となる。負側のサージ電圧の発生は、下記の 2 つの現象が主な要因である。なお、図 4 のハイサイドスイッチング素子 Q1 の動作を中心に説明する。

- ① 図 4 の Q1 のターンオフ時におけるゲート回路の寄生インダクタンスによる Q1 ゲート電圧のリンギング
- ② Q2 のターンオフによる Q1 のボディダイオード電流

時に、Q1 の出力容量の放電電流が Q1 のゲート回路を介して流れることで発生する Q1 ゲート電圧の変動

上記①のリンギング現象に対しては、前述した寄生インダクタンスの低減による対策を図った。一方で、上記②のゲート電圧変動に対しては、寄生インダクタンスの低減による対策に加え、ゲート電圧保護回路をゲート回路に付与することで、負側のサージ電圧の抑制を図った。

図 5 にゲート電圧保護回路の動作と回路構成を示す。

Q2 がターンオフすると、図 4 のリアクトルに蓄積されたエネルギーと蓄電池のエネルギーが Q1 のボディダイオードを通じてインバータ側に流れ、Q1 のボディダイオードのオン時に Q1 の出力容量 (Drain-Source 間の寄生容量) の放電電流が Q1 の入力容量 (Gate-Source 間の寄生容量と Gate-Drain 間の寄生容量) とゲート回路を介して図 5 (a) の経路で流れる。入力容量によってゲート電圧変動が抑制されるものの、ゲートドライバ回路とゲート抵抗で発生する電圧変動によって、負側に Q1 のゲート電圧が振られる。

このため、図 5 (b) に示すゲート電圧保護回路を付与し、ゲートドライバ回路とゲート抵抗に流れる電流を抑制することで、負側のゲート電圧変動の低減を図った。

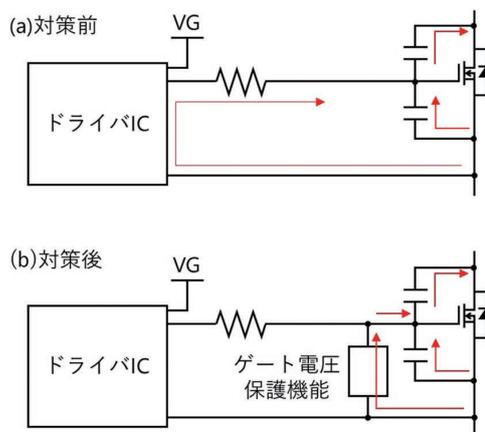


図 5 ゲート電圧保護機能

図 6 に Q2 ターンオフ時の Q1 ゲート電圧波形を示す。Q2 がターンオフし、Q1 のボディダイオードが通流するタイミングにおいて、Q1 の負側にゲート電圧が振られる現象の波形である。ゲート電圧保護回路の適用によって、負側のゲート電圧変動を低減したことで、SiC-MOSFET のゲート推奨電圧仕様を満足することができた。

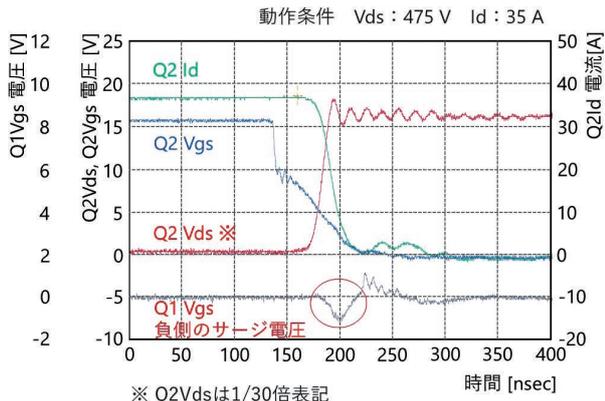


図6 ゲート電圧波形

4.4.3 スイッチングパターン

SiC-MOSFETはバンドギャップが広いこと、ボディダイオードの順方向特性はSi-IGBTに並列接続される還流ダイオードと比較して順方向電圧Vfが大きくなる。この影響によってボディダイオードの導通損失が大きく悪化する。このため、ボディダイオードに流れる電流の流通期間を最小化し、低オン抵抗特性を持つSiC-MOSFETの流通期間を増やせる同期整流を採用することで、ボディダイオード損失の低減を図った。具体的には、Q1とQ2のボディダイオードに電流が流れる期間にSiC-MOSFETをオンすることで、Q1とQ2に流れる電流をSiC-MOSFET側に流すスイッチングパターン方式である。

図7にSi-IGBTの損失を基準としたSiC-MOSFETにおける同期整流の効果を示す。出力5.9kW、キャリア周波数20kHzでの損失シミュレーションである。Si-IGBT、SiC-MOSFET（同期整流なし）、SiC-MOSFET（同期整流あり）の3種類で損失を求めた。同期整流を適用せずに、SiC-MOSFETを適用すると、ダイオード部の導通損失によって、Si-IGBTよりも損失が悪化することが分かる。一方、同期整流を適用した場合は、ダイオード部の導通損失を大きく低減することができるため、スイッチ部とダイオード部の損失を合わせたトータル損失は、Si-IGBTを適用した場合よりも大きく低減することができた。

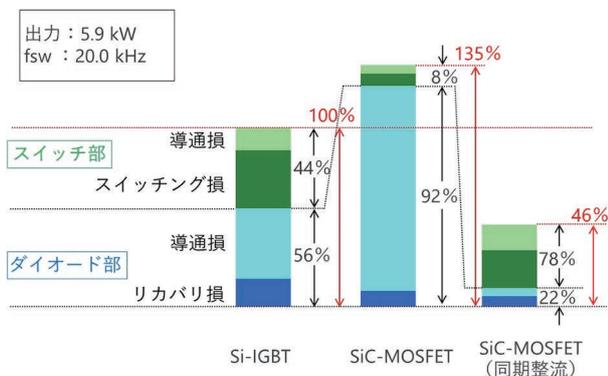


図7 同期整流の効果

4.5 インバータのスイッチングパターンの最適化技術

自立時の出力定格電圧は、KPAC-A/Bシリーズでは100V/2kVAである。一方で、全負荷対応時のKPBP-Aシリーズでは200V/4kVAである。自立時においては、システムが停電中に、パワーコンディショナから高調波歪みを発生するコンデンサ入力型整流負荷やサイリスタ、トライアックなどの位相制御を搭載した非線形の家電負荷に電力供給すると、パワーコンディショナからの出力電圧が歪み、安定的に電力供給できない懸念があるため、出力電圧の正側と負側でスイッチングパターンを切り替えないバイポーラ方式のスイッチングパターンを採用している。このため、電力の安定供給の観点で、連系時と自立時とは、インバータ出力のスイッチングパターンを変えている。図8にインバータ部の回路構成を示す。UH、WH、UL、WL、US、WSはスイッチング素子を示す。本インバータ回路は、直流電力を交流電力に変換するフルブリッジインバータ部(UH、WH、UL、WL)と短絡部(US、WS)、リアクトルから構成される⁹⁾。

インバータの交流出力電圧は、インバータに入力される直流電圧を元に生成しているため、インバータの出力電圧仕様が100Vから200Vへと大きくなると、インバータに入力される直流電圧も出力電圧仕様の増加に合わせて高圧化する必要がある。

インバータに入力される直流電圧を高電圧化すると、インバータから出力されるパルス出力電圧の振幅が増加する。そのため、従来機種のKPAC-A/Bシリーズで採用しているパルスパターンをそのままKPBP-Aシリーズで採用すると、リアクトルに印加されるパルス出力電圧も増加するため、リアクトルの鉄損の悪化によるリアクトルの温度仕様の逸脱が懸念された。そこで、リアクトルに印加されるパルス出力電圧を低減可能な自立スイッチングパターンを生成し、リアクトルに印加されるインバータの損失低減を図った。

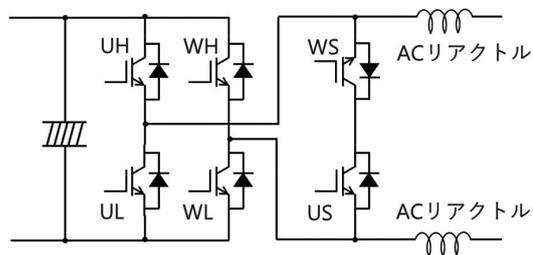


図8 インバータ部の回路構成

図9に、従来機種であるKPAC-A/Bシリーズにおける自立時のスイッチングパターンを示す。アーム短絡を防止するデッドタイムを設けた上で、UH/WLとUL/WHを排他で動作させる一方で、短絡部は動作をさせない方式となっている。本スイッチングパターンでは、リアクトルに印加さ

れるパルス出力電圧がインバータに入力される直流電圧 DDV を振幅として、+DDV と -DDV となる 2 レベル方式のスイッチングパターンを採用していた。

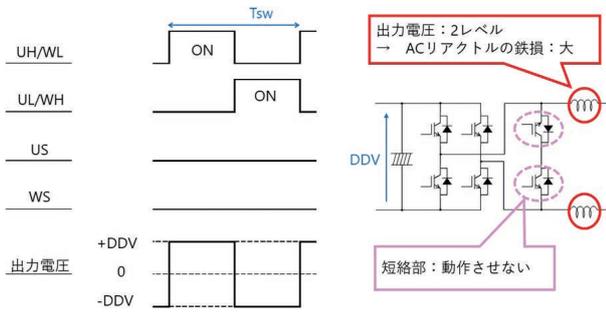


図 9 従来方式

図 10 に、KPBP-A シリーズに適用し、損失低減のために検討したスイッチングパターンを示す。アーム短絡を防止するデッドタイムを設けた上で、UH/WL と UL/WH を排他で動作させる一方で、短絡部 WS/US を動作させ、この WS/US で交流電流を還流させる方式とした。本スイッチングパターンでは、リアクトルに印加されるパルス出力電圧がインバータに入力される直流電圧 DDV を振幅として、+DDV と -DDV とゼロボルトとなる 3 レベル方式のスイッチングパターンを採用した。

リアクトルの鉄損は印可される電圧に影響されたため、KPBP-A シリーズでは、リアクトルに印加されるパルス出力電圧が 3 レベル方式のスイッチングパターンを採用したことで、リアクトルの鉄損を低減し、温度仕様を満足することができた。

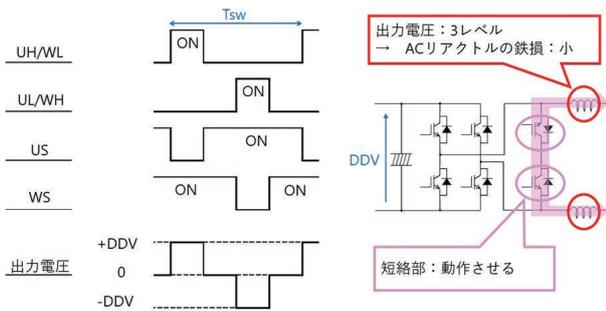


図 10 損失低減のために考案した方式

5. 開発成果

表 2 に非絶縁型双方向 DC/DC コンバータのスイッチング素子の違いによる実機での効率測定の結果を示す。

表 2 スwitching素子の違いによる効率比較

出力電力 [W]	効率 [%]	
	SiC-MOSFET	IGBT
2500 W (6.5kWh タイプ定格出力)	97.32%	96.48%
4000 W (9.8kWh タイプ定格出力)	97.96%	97.36%
6000 W (16.4kWh タイプ定格出力)	98.93%	98.55%

KPBP-A シリーズのマルチ蓄電パワーコンディショナにおいて、蓄電池からの入力電力と、非絶縁型双方向 DC/DC コンバータからの出力電力から、変換効率を実測した。PV ユニットが接続されない単機能蓄電システムにおいて、6.5 kWh、9.8 kWh、16.4 kWh の各蓄電池が接続された場合での交流側の最大出力電力と蓄電池側の公称電圧と同等になるように、出力電力 2500 W/入力電圧 100 V、出力電力 4000 W/入力電圧 150 V、出力電力 6000 W/入力電圧 200 V にて、実測での比較を行った。いずれの条件であっても、SiC-MOSFET の適用により、損失低減の効果があり、設計目標通りであることを確認した。

表 3 に自立時のインバータのスイッチングパターンの違いによる効率測定の結果を示す。

表 3 スwitchingパターンの違いによる効率比較

方式	効率 [%]
従来方式	93.16 %
損失低減のために検討した方式	93.47 %

KPBP-A シリーズのマルチ蓄電パワーコンディショナにおいて、蓄電池からの入力電力と、トランスユニットへの出力電力から、規格の測定方法に則り、変換効率を実測した。表 3 で示す通り、従来方式と比較して、本方式は効率が約 0.3% 向上することを確認した。この結果、パワーコンディショナの内部温度を約 5°C 低減することができた。

以上のとおり、電力損失を低減することで、パワーコンディショナの内部温度上昇を抑制し、部品毎の温度仕様と部品寿命を満足することができたため、従来機種である KPW-A などと同じ筐体の適用を実現した。この結果、KPBP-A シリーズの外形寸法は 450×562×232 mm となり、従来機種の KPAC-A/B シリーズでの 650×493×222 mm と比較して、体積比で約 82% になる小型化を実現した。また、KPBP-A シリーズの重量は約 21 kg となり、従来機種の KPAC-A/B シリーズでの約 29 kg と比較して、重量比で約 72% になる軽量化となり、一人施工を実現した。

6. むすび

本稿では、従来機種である KPW-A などと同じ筐体の共用化を実現したマルチ蓄電プラットフォーム KPBP-A シリーズについて述べた。

KPBP-A シリーズは、筐体の小型化と出力容量の増加から、発熱が課題となった。しかし、非絶縁型双方向 DC/DC コンバータへの SiC-MOSFET の適用化技術とインバータの自立時のスイッチングパターンの最適化技術によって、電力損失を低減して高効率化することで、小型筐体の適用を実現した。これらの高効率化技術によって、従来機種である KPAC-A/B シリーズと比較して、サイズは約 82% になる小型化、重量は約 72% になる軽量化を実現した。KPBP-A シリーズは、従来機種の小型筐体の共用化を実現したことによって、施工性向上による工事費用の削減が図られるため、ユーザの蓄電システムの導入コストの低減に寄与し、更なる蓄電システムの普及拡大への貢献が期待できる。

今後は、将来のアプリケーションを考慮したプラットフォーム開発への展開を検討したい。例えば、絶縁型双方向 DC/DC コンバータへの対応や、外部機器との通信系を含めたシステム全体構成を考えると、プラットフォームとしては改善の余地がある。再生可能エネルギーの発展と更なる社会的ニーズに応えられるパワーコンディショナの開発を行い、持続可能な社会の実現に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁. “再生エネルギーとは、政策について”. https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/renewable/outline/index.html, (参照 2022-3-2).
- 2) 東京電力ホールディングス. “太陽光発電の余剰電力買取制度について. 電気料金・省エネ・各種手続き：個人のお客さま”. <https://www.tepco.co.jp/e-rates/individual/shin-ene/taiyoukou/fukakin-j.html>, (参照 2022-3-2).
- 3) 資源エネルギー庁. “制度の概要. 政策について”. https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/surcharge.html (参照 2022-3-2).
- 4) 資源エネルギー庁. “固定価格買取制度. 政策について”. https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/fit_kakaku.html, (参照 2022-2-25).
- 5) 経済産業省. “住宅用太陽光発電設備の FIT 買取期間終了に向けた対応”. 第 8 回 総合資源エネルギー調査会. https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/008_03_00.pdf, (参照 2022-3-2).
- 6) 資源エネルギー庁. “電力の地産地消が今後のトレンドに. 政策について”. https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/solar-2019after/reason/home_use.html, (参照 2022-2-25).
- 7) 日本電機工業会. “JEMA 蓄電システムビジョン (Ver. 6)”.

JEMA 刊行物コーナー. 2021年4月. [https://www.jema-net.or.jp/jema/data/S7216\(20210527\).pdf](https://www.jema-net.or.jp/jema/data/S7216(20210527).pdf), (参照 2021-11-15).

- 8) 経済産業省. “第 3 回 定置用蓄電システム普及拡大検討会”. 審議会・研究会. 2021-2-12. https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/storage_system/pdf/003_04_00.pdf, (参照 2022-3-2).
- 9) 馬淵雅夫, 小林健二, 平島正裕. インバータ装置, パワーコンディショナ, 発電システム及び, インバータ装置の制御方法, 特開 2015-77061. 2015.4.20.

執筆者紹介



山田 潤一郎 YAMADA Junichiro

オムロン ソーシャルソリューションズ株式会社
エネルギーソリューション事業本部 商品開発部
専門：電気工学、制御工学



大内 祐介 OUCHI Yusuke

オムロン ソーシャルソリューションズ株式会社
エネルギーソリューション事業本部 商品開発部
専門：電気工学、制御工学



衛藤 郡 ETO Gun

オムロン ソーシャルソリューションズ株式会社
エネルギーソリューション事業本部 商品開発部
専門：電気工学、制御工学

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

2

新たな成長領域を 生み出す技術



シースルー構造を持つ薄型押しボタンの実現

工藤 卓也, 鷺見 昌昭, 阿形 剛宏, 鬼塚 浩之

人々の余暇創造および娯楽であり、エンターテインメントを提供する観光産業でもあるカジノ業界で、近年、カジノマシンの進化が激しくなっており、カジノフロアにいる人々を惹きつけ、プレイ中の人々に没入感を与えるカジノマシンの電飾をはじめとする演出内容も年々進化している。このような業界トレンドにもかかわらず、カジノマシンでゲームを開始する重要な役割を持つ SPIN ボタンは、押し感触が求められることから物理的な押しボタンのままである。

我々は、次世代のカジノマシンに向けた SPIN ボタンをカジノマシンメーカー各社に提案、提供すべく、これまでに日本のアミューズメント業界で経験・蓄積してきた耐衝撃構造や電飾機能といった技術を組み合わせ、液晶ディスプレイ (LCD) 上に配置できるほど薄型でありながら、押し感触が得られ、従来ボタンよりも耐久性に優れ、防水機能も有する物理的な押しボタンを実現した。この実現により、カジノマシンメーカー各社はボタン下部に配置している LCD を活用することでボタン上の絵柄デザインを、コンテンツ毎に簡単に変更することが可能となる。ここで、コンテンツとは例えば映画やテレビ番組の著作権とのタイアップ作品などを指す。また押しボタン外側の LCD 表示と連続した絵柄デザインの表示やアニメーションの表示も可能となり、未来感あるカジノマシンの実現に向けた一歩となる商品である。

Realization of Thin Push Button with Large Transparent Section Structure

KUDO Takuya, SUMI Masaaki, AGATA Takehiro and ONITSUKA Hiroyuki

In the casino industry, which is a tourism industry that provides entertainment as well as leisure time creation and amusement for people, the direction which attracting player, of casino machines have been evolving rapidly in recent years, and the visual area has been expanding year by year. However, the SPIN button, which is an important button to start a game, remains a conventional physical push button because it needs to feel realistic.

We have realized a physical push button that is thin enough to be installed on the liquid crystal display (LCD), yet provides a realistic push feeling, better switch durability than conventional buttons, and a water resistance function to providing SPIN button for new generation casino machine to casino machine industry by combining technologies that have been experienced and accumulated in the Japanese amusement industry. This SPIN button allows casino machine manufacturers to change the display of button surface easily using LCD installed underneath the button for each gaming contents. In addition, it is possible to create a continuous LCD performance with the LCD display on the outside of the push button switch, which is a step toward the realization of a futuristic casino machine.

1. まえがき

今日、駅の券売機や ATM のように LCD とタッチパネルを組み合わせ、表示と操作を可能にする機器を当たり前のように多く見ることができる。カジノマシン (スロットマシン) においては、かつては機械式のリールと物理的な

押しボタンを組み合わせた機器であったが、近年はその様子が大きく変化している。なおリールとは、カジノマシンの中で回転し、絵柄や数字が印刷されている筒状の部品であり、プレーヤーが SPIN ボタンを押下すると回転し、再度押下すると停止する。また、リール停止時の絵柄や数字などの揃い方により当選金額が決定される。このような機械式リールは大型の LCD に取って代わり、LCD 上でリー

Contact : KUDO Takuya takuya.kudo@omron.com

ルの動きを表現している。また操作ボタンは物理的な押しボタンから LCD とタッチパネルを組み合わせた構成となっている。図 1 に機械式リールタイプのカジノマシンと大型 LCD タイプのカジノマシンの概略図を示す。

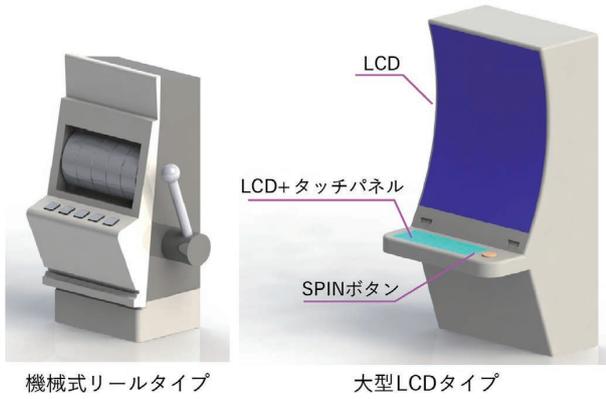
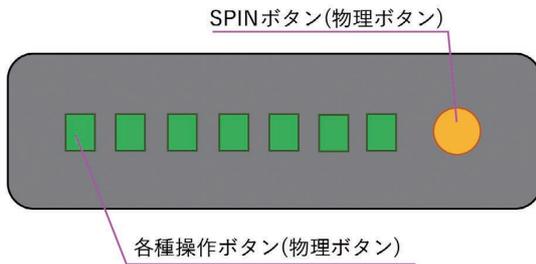


図 1 カジノマシン概略図

また図 2 にそれぞれのタイプの操作ボタン部の上面からの概略比較図を示す。

機械式リールタイプのカジノマシン操作ボタン部



大型LCDタイプのカジノマシン操作ボタン部

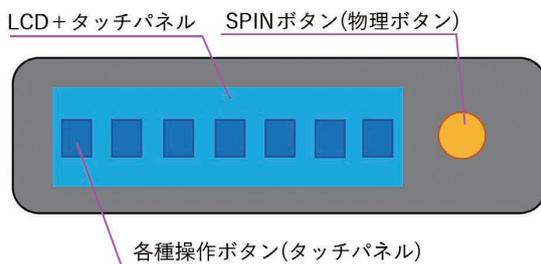


図 2 操作ボタン部の概略比較図

カジノマシンや操作部ボタン部が上記のように変化しているのは、プレイヤーの没入感を向上させ、カジノマシンの稼働率向上を目指したためである。カジノマシンの各所に設けた LCD が演出領域を拡大し、プレイヤーの没入感向上に一役買っている。

このようなカジノマシン業界のトレンドにも関わらず、

ゲームを開始する操作（リールを回し始める操作）はタッチパネルとは別に用意された物理ボタンである SPIN ボタンを押すことで実施している。SPIN ボタンを押すことは、お金を消費してゲームをスタートさせることを意味する。よって、プレイヤーが意図せず押してしまうことを防止するため、SPIN ボタンは操作感触のある物理ボタンとして残っている。

また、従来の SPIN ボタンは、操作感触のある押しボタンでカジノマシンへの取り付けが簡単な構造になっているものが多い。これは SPIN ボタンが壊れたらすぐに交換できるようにするためである。図 3 に従来の SPIN ボタンの概略断面図を示す。

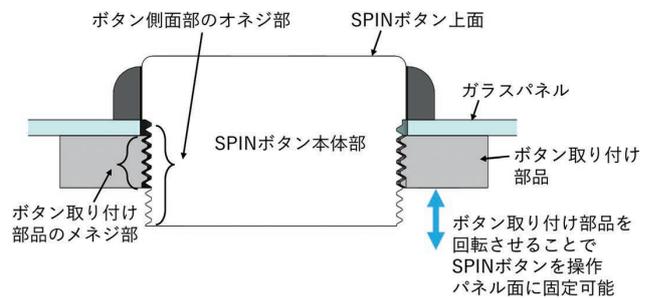


図 3 従来の SPIN ボタンの概略断面図

SPIN ボタン本体部とボタン取り付け部品にそれぞれオネジ部/メネジ部を設け、ボタン取り付け部品を回転することで SPIN ボタンをガラスパネル面に固定することができる。これによりドライバーなど工具を用いずに SPIN ボタンの脱着作業を完結することができる。

このような SPIN ボタンは「壊れたらすぐ交換する」という特徴のため、SPIN ボタン自体は簡素でコストを抑えた作りになっている。カジノマシンとしては大型 LCD 化やタッチパネル操作が主流となり、未来感のある進化が見て取れるが、SPIN ボタンはこのトレンドから遅れをとっている。

表 1 に従来の SPIN ボタンのメリット、デメリットをまとめた内容を示す。

表 1 従来の SPIN ボタンのメリット/デメリット

メリット	デメリット
製品単価が安価	製品外観に高級感がない
交換性に優れている	スイッチ操作の耐久性が低い／防水機能がない
マイクロスイッチによるフィーリングの良いスイッチ操作感触	表示機能が乏しい（領域狭く、内容も固定）

先述のとおりコスト重視の作りとなっており、例えば SPIN ボタン上面のデザインはボタン上面部品の表面への印刷やボタン上面部品裏側に印刷シートを挿入する手法を取られてきた。このような構成では製品コストは抑えられる反面、デザインを変更したい場合、ボタン上面部品の取り換えや印刷シートの取り換えがカジノマシンのコンテンツ毎に必要なデメリットがある。

カジノマシンの近年のトレンドから遅れをとっている SPIN ボタンに対して、我々はこれまで日本のアミューズメント業界で経験・蓄積してきた耐衝撃構造や電飾機能といった様々な技術を盛り込むことによって、未来感のあるカジノマシンの実現に向けた、薄型で高級感があり、SPIN ボタン上面の表示は図 2 で示した LCD を活用することで様々な絵柄デザインを表示できるシースルー構造を持つ SPIN ボタンを実現した。

2. カジノマシン業界のニーズ

LCD と物理的な SPIN ボタンという組み合わせがトレンドとなっているカジノマシンであるが、いかにしてプレイヤーを惹きつけられるか？という課題が常に存在することを把握してきた。この課題を解決するため、1 章で述べたとおり各カジノマシンメーカーは演出に拘ろうとしており、例えば操作パネルの LCD 表示領域を拡大し、よりプレイヤーを惹きつける映像を表示している。

操作ボタンがタッチパネル式であればシート状のタッチセンサをガラスパネルと LCD の間に配置し、LCD 表示領域を拡大できる。しかし物理的な押しボタンである SPIN ボタンはボタン自体に厚みがあり、ボタン下部に LCD を配置することはできない。プレイヤーを惹きつける方法の一つとして、LCD を活用し SPIN ボタン上面のデザイン内容を簡単に変更可能にするには、① SPIN ボタン上面に LCD を配置する、② SPIN ボタンを薄型化かつシースルー構造としボタン下部に LCD を配置する、の 2 案が考えられる。図 4 に案①および案②の概略図を示す。

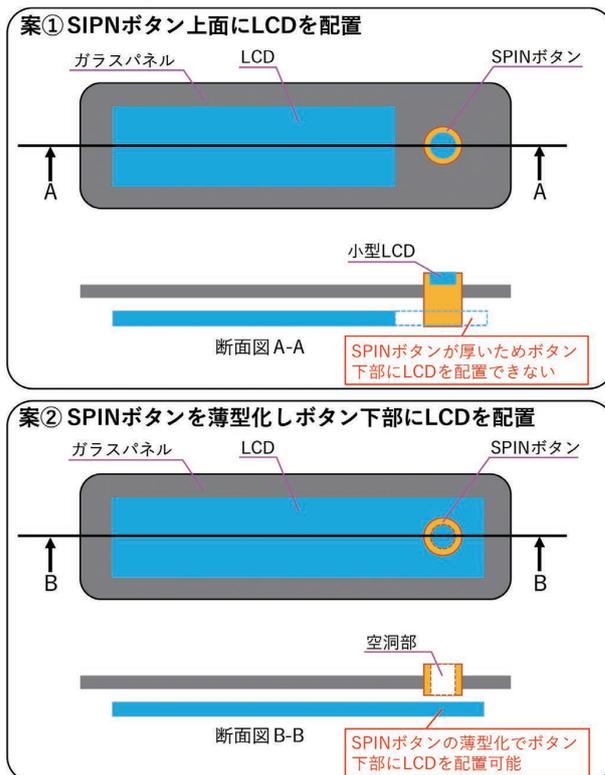


図 4 SPIN ボタン表示部拡大化 (2 案) の概略図

案①については、ボタンに収まる小型LCD分のコストが追加となり、また表示制御もボタン用に作りこむ必要があるというデメリットがある。一方、案②ではボタン自体に LCD を搭載する必要がなく、表示制御も操作パネル LCD の延長で実施することができ、ボタン専用の制御を必要としない。また案②では、操作パネルと SPIN ボタンの LCD を共有していることから、SPIN ボタン外形よりすぐ外側から LCD 表示ができ、操作パネルと SPIN ボタンの表示に連続性を持たせることができる。図 5 は案②をベースとした、将来のカジノマシンの提案用コンセプトを示す。

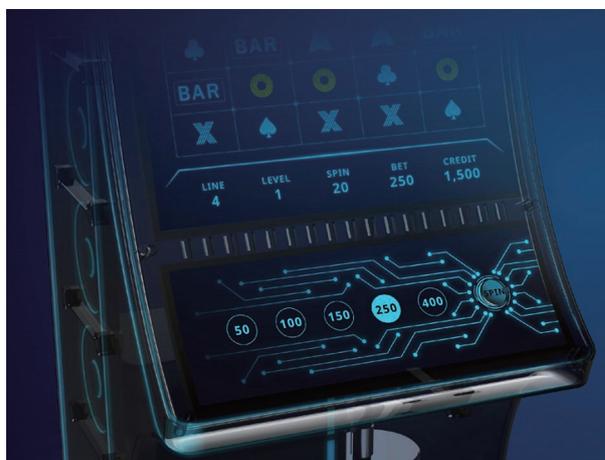


図 5 未来のカジノマシンの提案用コンセプト

SPIN ボタンの内と外の LCD 表示に連続性を持たせることで、演出性の高い操作デッキの実現が可能となる。

以上より LCD 表示領域拡大のためには案②が効果的である。しかし、案②の SPIN ボタン構造は薄型化かつボタン下部にある LCD 表示を透過させる必要があり、スイッチの機能を納めるスペースが小さくなる。このような制約にも関わらず、SPIN ボタンとしての基本的な機能は維持または向上させる必要がある。表 2 に SPIN ボタンの基本機能一覧を示す。

表 2 SPIN ボタンの基本機能一覧

機能	市場要求
スイッチ操作の耐久性	30N/400 万回以上の条件で破壊なきこと
衝撃耐性	300N/1 万回以上の条件で破壊なきこと
静電気耐性	接触放電 ±10kV および気中放電 ±27kV の条件で破壊なきこと
脱着性能	工具なしで SPIN ボタンの脱着ができること

表 2 に示す市場要求の項目は、これまでの弊社から各カジノメーカーへの提案活動や商談で得た情報をもとにしている。

また、ただ小さいスペースの中に SPIN ボタンの基本機能を盛り込むだけでなく、高級感を醸し出すデザインにする必要もある。そのための方法として、SPIN ボタンの縁取りを可能な限り狭める、縁取り部品は光沢感のある材料を選択する、などが挙げられる。さらに一步踏み込んで未来感を醸し出すため、図 4 の案②で示すように SPIN ボタンを LCD 上に配置可能とすることが求められている。

3. 技術的課題

2 章で述べたように、図 4 案②で示したシースルー構造を持ち LCD 表示を透過できる SPIN ボタン（以降、「LCD 表示透過型 SPIN ボタン」と称する）を実現するには、限られたスペースで従来のようなスイッチとして機能する構造を盛り込み、かつデザイン性に優れた外観にする必要がある。図 6 に SPIN ボタンの従来構造と透過型の構造の断面比較図を示す。以下、図 6 に示す様々な機構/構造を限られたスペースに収めるための課題を述べる。

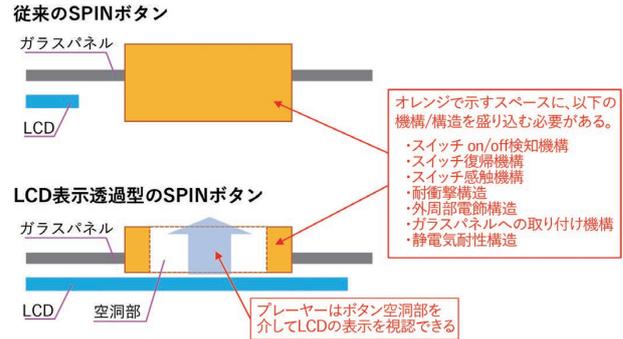


図 6 従来構造と透過型構造の断面比較

3.1 スイッチ機能に関わる構造の課題

従来の SPIN ボタンのサイズは、ボタン上面の絵柄デザインが視認でき、かつボタンを操作するプレーヤーの手の大きさに合わせて直径 70mm から直径 90mm 程度であることが多く、ボタンの高さは 80mm ほどある。ボタンの下部にマイクロスイッチ¹⁾を配置しており、マイクロスイッチより上の部分で SPIN ボタンの摺動動作をしている。また SPIN ボタンの入力検出 (on/off 検出) にマイクロスイッチを活用することで、SPIN ボタンの製品コストを抑えることができる。

しかし、LCD 表示透過型 SPIN ボタンの実現にこのマイクロスイッチを採用することは以下の理由により非常に困難である。まずはサイズの問題がある。図 4 案②で示したボタン構造の場合、そのボタン高さは 15mm 程度にする必要があるが、マイクロスイッチは小さいサイズでも高さが 7mm 程度あり大きくスペースを消費してしまう。また LCD 表示透過型 SPIN ボタンでは、従来ボタンのようにボタン中央部に摺動構造を持つことができないため、ボタンを端押しするとボタンが傾いてしまう。ボタンが傾いた場合でもマイクロスイッチで入力検出しようとする、マイクロスイッチの複数配置が必要となる。マイクロスイッチを複数配置するとさらにスペースを消費してしまうため、現実的ではない。さらにマイクロスイッチの複数使いは製品コストを跳ね上げてしまう問題もある。

このような小さいサイズのマイクロスイッチはスイッチの on/off 検出に必要なストロークが短いため、マイクロスイッチに大きな負荷が印加される前に構造的にストロークを止めることが困難であるため耐衝撃性能は低い。またマイクロスイッチ単体のスイッチ操作耐久性も低く、表 2 で示した基本機能の市場要求を満たすことができない。

以上のように、LCD 表示透過型 SPIN ボタンの実現にはマイクロスイッチ以外のスイッチ検出機構が必要である。スイッチ検出機構としては、薄く、耐久性や耐衝撃性に優れていることが求められる。

3.2 防水機能に関わる構造の課題

従来の SPIN ボタンには防水機能を持ったものはほとんどないが、カジノホールでは飲食をしながらプレイすることもあり、飲食物によりボタンが破損した場合は、新品と取り換える対応をとっていた。ボタンが安価ではあるが、取り換える手間によるコストが膨らむため、ボタン上部から SPIN ボタン内や操作パネル内への液体侵入を防ぐことは市場から求められる機能である。物理的な押しボタンには可動部品と固定部品が摺動する部分があり、この部分にはクリアランスが設けられている。このクリアランスから液体は SPIN ボタン内部へと容易に侵入できてしまうため、このクリアランスを埋める必要がある。可動部品と固定部品が摺動動作でき、かつクリアランスを埋める方法としては、可動部品と固定部品を弾性部材で繋ぐことが方法の一つとして挙げられる。

しかし、繋ぎである弾性部材はスイッチ操作の繰り返し動作で破損しないことが求められる。破損しないために弾性部材の厚みを増やすと、弾性部材にコシがでるためスイッチ操作が重くなる傾向になる。このトレードオフを解決するため、弾性部材の形状や厚みのコントロールが必要とされる。また 3.1 節で先述した通り、狭いスペースの中でどのようにして弾性部材を設置するかも課題となる。

3.3 静電気耐性確保に関わる構造の課題

カジノマシンはホテル内などの空調の良く効いた乾燥した環境、かつカーペット敷きの上に設置されることがよくある。このため、強力な静電気に対して耐性を持たせることが重要である。一般的には、SPIN ボタン上面から SPIN ボタン内部の基板までの沿面距離を取り、SPIN ボタン内部への静電気侵入を防いでいる。沿面距離の設定の目安としては、気中放電 1kV 当たり沿面距離 1mm である。表 2 より気中放電 27kV では沿面距離は約 30mm 必要となる。3.1 節で先述したように、従来の SPIN ボタンは高さが 80mm ほどあり、30mm の沿面距離を確保することができたが、LCD 表示透過型 SPIN ボタンは高さが 15mm 程度にする必要があり、30mm の沿面距離は確保できない。

以上より、沿面距離を十分に取れない中で静電気耐性をどうやって確保するかが課題となる。

3.4 製品外観の課題

2章で述べたとおり、SPIN ボタンには高級感や未来感を感じさせる製品外観が求められる。近年、スマートフォンやノートパソコンなど、LCD を搭載している製品の挟縁(ベゼルレス)化が進んでいる。製品の軽量化、小型化、表示領域の拡大化が主目的ではあるが、無駄なものが削ぎ落された洗練されたデザインとなり高級感や未来感を提供する。これに倣い、LCD 表示透過型 SPIN ボタンも可能な限りベゼルレス化を狙い、LCD 表示領域をできるだけ広

くとれるように 3.1 節から 3.3 節で述べた構造を盛り込む必要がある。

また SPIN ボタンの LCD 表示部は高さに関しても課題がある。SPIN ボタンよりも低い位置に LCD が配置されるため、SPIN ボタン上面と LCD 間に大きな距離があると、SPIN ボタンの表示がボタン上面に対して沈んだように見え、違和感を生んでしまう可能性がある。そのため、LCD 表示をボタン上面に浮かび上がらせるような工夫が必要となる。

以上の他に高級感を生む要素としては電飾がある。大人しい色合いかつ均一な発光であるほど高級感が生まれる。また電飾は高級感の提供だけでなく、プレーヤー以外の目を惹きつけ、プレイしてもらおうきっかけとなる。しかし、限られたスペースの中で発光部分を設け、その発光が均一となり、かつその発光で SPIN ボタン中央部の LCD 表示を阻害しないようにする必要がある。

また、SPIN ボタンはスイッチ on/off 検出用の入出力信号および電飾用の電力はカジノマシンとのハーネス接続により供給される。LCD 上に SPIN ボタンを配置すると、このハーネスがガラスパネルと LCD の間に必ず配線されることになり、プレーヤーから不格好に見えてしまう。ハーネスは必須ではあるが、存在を目立たせなくする工夫が必要となる。

4. 技術内容

LCD 表示透過型 SPIN ボタンの実現のため、3章で述べた各課題に対する解決策を以下に説明する。

4.1 スイッチ機能に関わる構造の実現

ここでは薄型でスイッチの on/off を検出できる方式の選定、スイッチの端押し操作への対応、耐荷重への対策が課題であった。

まずはスイッチ検出方式および端押し操作への対応について述べていく。スイッチ検出方式としては、様々な方式があるが、例えばフォトセンサを利用して光軸を遮光/投光で on/off 検知する方法、ドームコンタクトを利用して電圧の high/low で on/off 検知する方法、圧力センサを利用して閾値より高い/低いで on/off 検知する方法などがある。このような方式のうち、ドームコンタクト式や圧力センサ式は薄いシート状にすることが可能である。さらにこの 2 方式の中ではピエゾ抵抗効果を活用した圧力センサが繰り返しスイッチ操作の高い耐久性を保有している。以上より、本製品におけるスイッチ検出方式は圧力センサ式を採用した。図 7 に本製品で使用している圧力センサの上面図を示す。

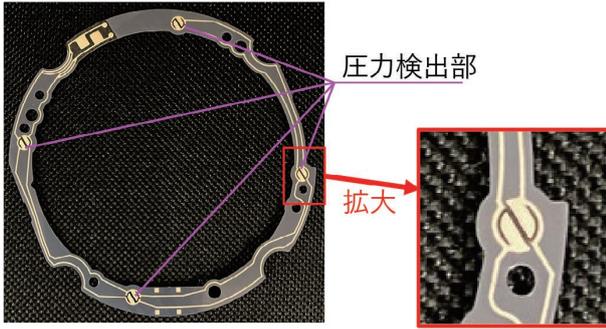


図7 圧力センサの上面図

本製品では外形形状を丸型としており、圧力センサはリング型の外形としている。この圧力センサはフィルム形状で厚みは0.2mmであり、圧力検出部を複数設けることが可能である。図7に示すように、圧力センサには4つの圧力検出部を設けており、ボタンを端押しされても4つのうち1つ以上が圧力を受けるようにしている。なお、この4つの圧力検出部は並列回路となっており、1つでも圧力が印加されれば製品としてスイッチ信号を出力できるようになっている。

続いて耐荷重への対策内容について述べていく。始めに圧力検出部の耐荷重は50Nであり、本製品を強く押し込まれても、圧力検出部は50N未満の負荷となるような構造が必要であった。方法としては、構造的にストッパーで過剰な負荷を受け止める構造とした。図8に圧力センサを押下する箇所の断面詳細図を示す。

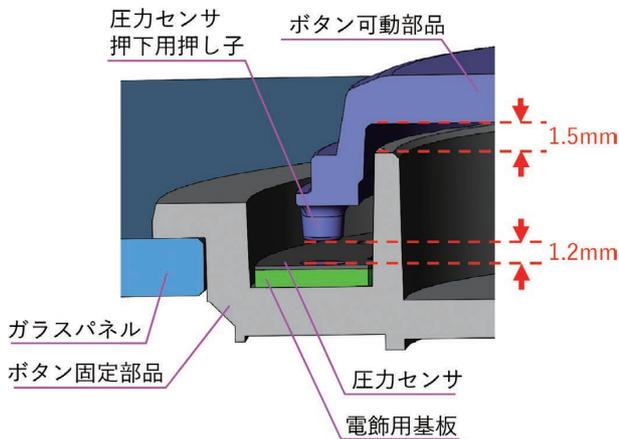


図8 圧力センサ押下部の詳細断面図

ボタン可動部品を下向きに動かすことで圧力センサ押下の押し子が圧力センサに接触し、スイッチ信号を出力する。ボタンを押し始めてから押し子が圧力センサに接触するまでの距離は、従来のSPINボタンのストロークを参考に1.2mmと設定した。一方、ボタン可動部品はボタン固定部品に接触するまで1.5mmの距離を設けている。これは、組立ばらつきを考慮した上でボタン可動部品が押し下

がれば必ず圧力センサに荷重を与えるためである。つまりボタン可動部品を最下点まで押し下げた場合、押し子と圧力センサは0.3mm干渉することになる。そのため、押し子は弾性を持つ材質とし、0.3mm押し子が圧縮されても50N未満の負荷となるようにした。材質については、防水機能と関連性があるため4.2節で後述する。

次にボタン固定部品の耐荷重性能について述べていく。図9にボタン可動部品がボタン押下状態での詳細断面図を示す。

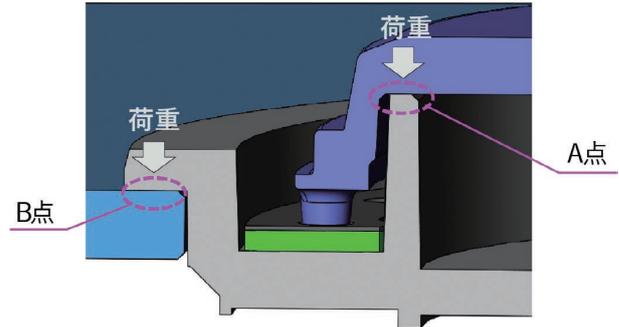


図9 ボタン押下状態での詳細断面図

図9に示すように、ボタン固定部品はボタン可動部品からA点で荷重を受ける。そして受けた荷重はガラスパネルと接触しているB点にて支える構造となっている。そのためボタン固定部品の材質選定と肉厚が重要となってくる。材料としては耐衝撃に強いポリカーボネートを選定し、図10に示すような応力解析や実験にて、各部位に必要な肉厚を決定した。その結果、ボタン固定部品の外周壁や底面の肉厚は2.2mm以上に設定した。

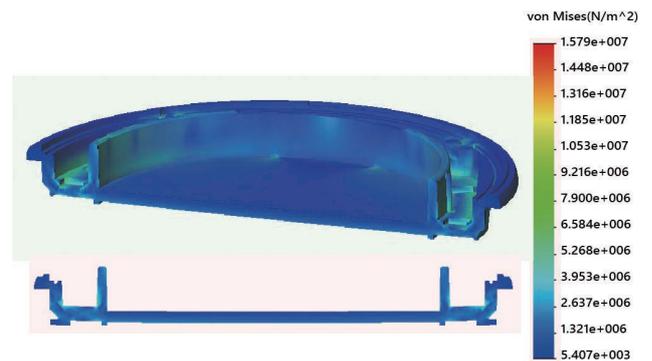


図10 ボタン固定部品の応力解析結果

4.2 防水機能に関わる構造の実現

ここでは限られたスペースの中で防水構造を設けること、その構造がスイッチ操作の繰り返し動作に耐えるようにすることが課題であった。まず防水構造について述べていく。

4.1節で述べたように、圧力センサの押し子には弾性部

材が必要であったことから、これを延長して防水用のパッキンの役割を果たす形状ができないか検討を行った。ただし、ボタン中央部の視認領域確保やスムーズな摺動動作のため、ボタン可動部品全体を弾性部材にすることはできない。そこで、ポリカーボネートとエラストマーの二色成形でボタン可動部品を形成することを考え、ボタン可動部品の中央部は視認性確保のため透明のポリカーボネートを配置し、外周部は押し子とパッキンを形成するエラストマーという配置とした。図 11 に本製品の断面図とボタン可動部品の二色成形構造の詳細断面図を示す。

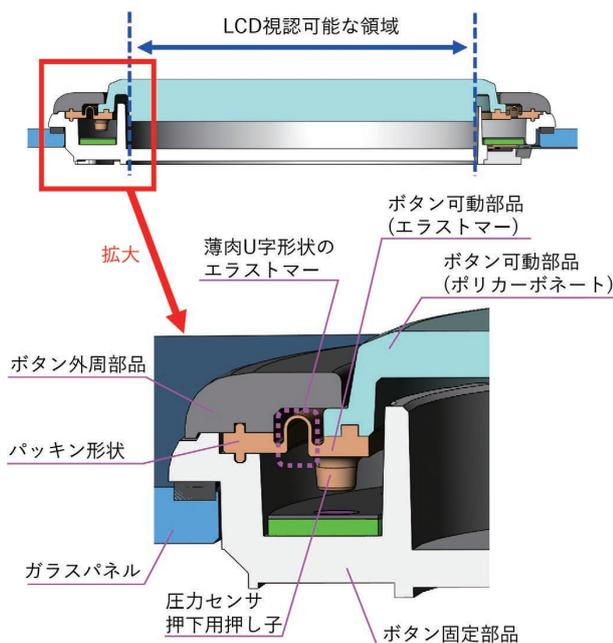


図 11 本製品の断面図および可動部品の二色成形構造

図 11 に示すように、ボタン可動部は外観上プレーヤーから見える範囲は透明のポリカーボネートで構成し、それ以外はエラストマーで構成している。押し子より製品外側方向に延長するようにパッキン形状を設け、ボタン外周部とボタン固定部品で挟んでいる。これにより製品内部への液体侵入を防いでいる。

続いてスイッチ操作の繰り返し動作への対策について述べていく。図 11 に示すように、ボタン可動部品のエラストマー部分にて、パッキン部と押し子の間に薄肉の U 形状を設けている。これにより、ボタン可動部品のエラストマー部で上下可動する箇所と固定させる箇所を分けることができる。この U 形状は上下動の耐久性を考慮すると薄い方が良いが、薄すぎると成形できなくなる可能性があった。これについては流動解析や過去製品実績より厚み 0.2mm を採用し、その結果この構造でスイッチ操作の耐久試験（押下力 30N で 400 万回以上）を実施した上で、エラストマー部分が破損しないことを確認できている。

4.3 静電気耐性に関わる構造の実現

本製品では沿面距離を十分にとった静電気耐性の確保ができないことが課題であった。静電気耐性を確保する考え方としては二通りある。一つ目は製品内に静電気が侵入しないように封止すること。二つ目は静電気を積極的に受ける部分を設け、製品のグラウンド (GND) に接続することである。4.2 節で述べたように、パッキン部分を設けて防水構造を作りこんでいるため、静電気は製品内に侵入しないと思われたが、固定部品とパッキンであるエラストマーには液体は通さないが僅かな隙間は存在しており、この隙間から静電気は製品内に侵入することが分かった。これにより、考え方としては製品内に静電気を積極的に受ける構造を検討した。

静電気が製品内に侵入した場合、最も破壊しやすいのが電飾用基板である。ボタン可動部品とボタン固定部品の隙間を通して電飾基板に到達する前に静電気を受ける箇所を設ける必要がある。そこで、圧力センサの上部に厚み 0.1mm の静電気受電用板金を設け、この板金を導電性のテープを利用して電飾基板の GND と電氣的に接続した。図 12 にボタン可動部品とボタン外周部を非表示とし静電気受電用板金の配置を示した上面図を示す。板金部品の下にある圧力センサ、電飾用基板を覆うように板金は設置しており、図 12 の赤丸で示す箇所では板金部品と電飾用基板 GND を電氣的に接続している。

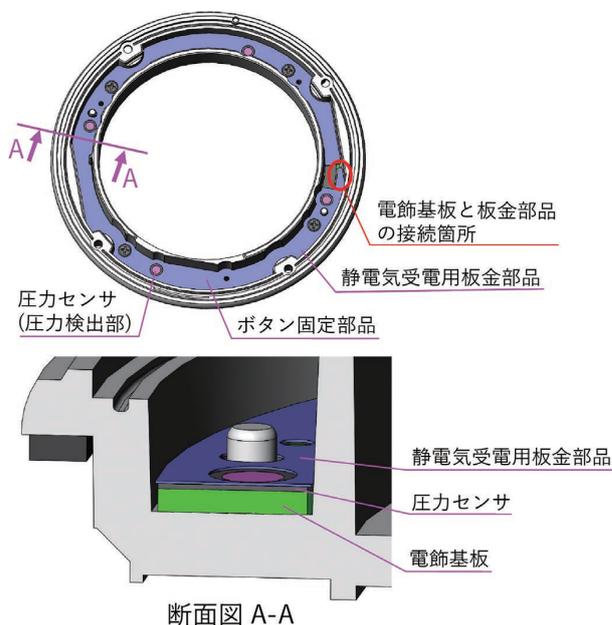


図 12 静電気受電用板金部品の配置図

図 12 に示すような製品構造にすることで、表 2 で示した製品として必要な静電気耐性が確保できていることを ±10kV の接触放電試験と ±27kV の気中放電試験で確認できている。図 13 に製品内部に侵入した静電気が静電気受電用板金に至るまでの経路を示す。

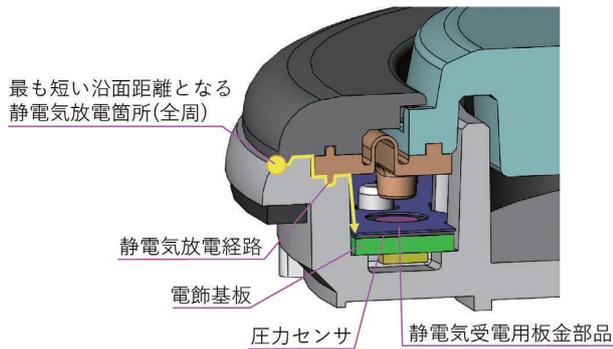


図 13 静電気の放電経路

4.4 製品外観の実現

ここではLCD表示部の領域を可能な限り広げること、LCD表示をボタン上面に浮かび上がらせること、均一発光する電飾機能、およびハーネスを目立たせないことが課題であった。

まずLCD表示部の領域拡大については、4.1節~4.3節で述べた構造に大きく依存している。結果として、製品外形が直径84mmに対し、LCD表示部は直径58mmとなった。図14に本製品を上面から見た図を示す。

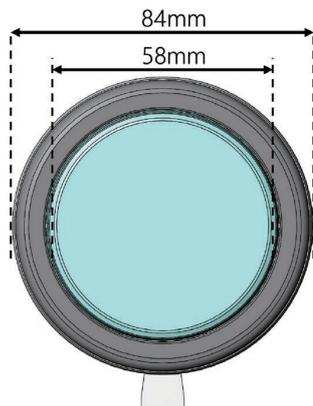


図 14 本製品の上面図

次にLCD表示をボタン上面に浮かび上がらせる方法であるが、ボタン可動部の透明ポリカーボネートを厚肉とし、空気中と透明ポリカーボネートの屈折率の差を利用することでLCD表示を浮かび上がらせることができた。しかし、4.2節でも述べたがボタン可動部品は二色成形を実施するため、ポリカーボネートの成形時とエラストマーの成形時で大きく型温度を変化させられないことや冷却時間を同じにする必要があるなど、材料単品で成形するよりも成形条件に制約がある。そのような制約の中、ポリカーボネートの厚みを調整できる入れ駒型を製作し、量産性のある成形条件で見いだせた厚みが7.0mmである。7.0mmよりも薄い場合、例えば厚み4.0mmでの成形試作では、ポリカーボネートの成形は厚み7.0mm時よりも約半分の冷

却時間で変形なく成形可能であるが、エラストマーにとっては冷却時間が短く形状が大きく変形し、バリも多く発生した。よって本製品では厚み7.0mmを採用した。図15に7.0mmの厚肉成形を実施したボタン可動部品により表示が浮き上がっている様子を示す。



図 15 ボタン可動部の透明ポリカーボネート

次に均一発光する電飾機能について述べていく。図8で示したように、電飾用基板の上には圧力センサを配置しており、さらにこれより上の空間はボタン可動部品がボタン押下により下がってくるため、電飾用に構造を設けることができない。そこで、実装面に対して垂直方向に発光するトップ型LED(Light Emitting Diode)を電飾基板下側に配置し、ボタン固定部品の肉厚の中に光を通すことを検討した。図16にボタン固定部品の肉厚の中を通る光路を示す。LEDから出てきた光はボタン固定部品の肉厚に入るが、ボタン固定部品のあらゆる場所で拡散、反射、透過が発生する。一方で、発光させたい電飾発光面は図16のオレンジで示したようにLED光源から遠い場所にある。そのため、ボタン固定部品の肉厚内ではできるだけ光の減衰をさせないように図16に示すように反射シートを配置した。このような光の通し方をするすることで、電飾発光面に到達するまでに十分に拡散し、電飾発光面では均一な発光を得ることができた。

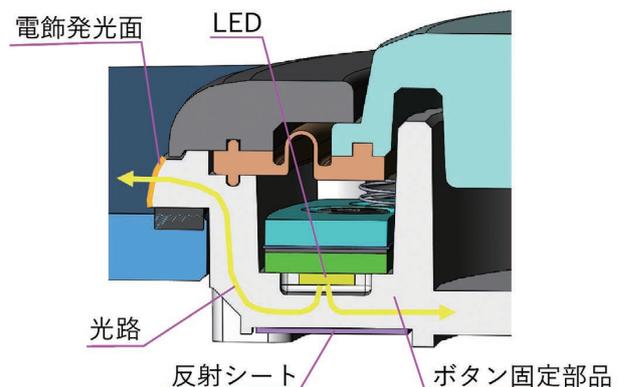


図 16 ボタン固定部品内の光路

なお、実装面に対して水平方向に発光するサイド型LEDを使用した場合、反射シートで反射する光が少なくなるためボタン固定部品の肉厚内の拡散が弱く、電飾発光

面の発光が不均一となった。そのため、サイド型 LED は不採用とした。

このようにトップ型 LED と発光面の向かい側に配置した反射シートの組み合わせで、電飾発光面の均一な発光を得ることができたが、LED からの光はボタン固定部品の内側にも進み、LCD 表示部に LED からの光が見えてしまう。そこで、ボタン可動部品と同様に、ボタン固定部品も二色成形とし部分的に黒色樹脂にすることで LED からの光を遮断することとした。図 17 に二色成形のボタン固定部品の肉厚の中を通る光路を示す。

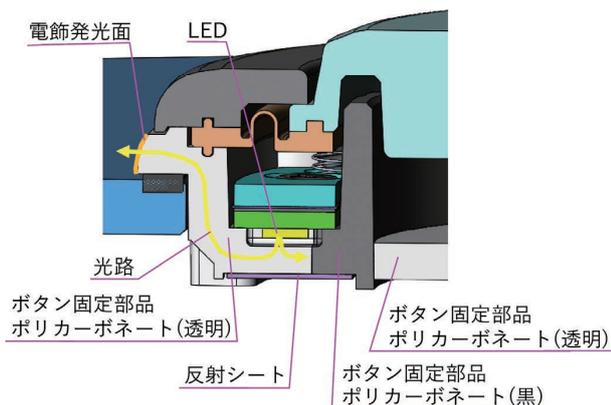


図 17 二色成形タイプのボタン固定部品内の光路

ボタン固定部品は 4.1 節で述べたように耐衝撃性からポリカーボネートを選択していた。二色成形の材料としてはグレードの異なるポリカーボネートとした。一つは透明色のポリカーボネート。もう一つは黒色かつ摺動グレードのポリカーボネートを選択した。黒色の部分はボタン可動部品のストッパー役かつ摺動させる箇所でもあるため、摺動グレードとしている。このようなボタン固定部品の構造にすることで、一部品で電飾機能と摺動構造の両立ができた。図 18 に実際の電飾発光時の写真を示す。

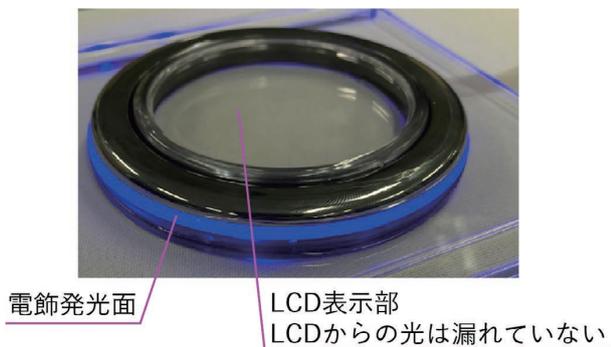


図 18 実際の電飾発光時の写真

本節の最後に、ハーネスを目立たせなくする方法について述べていく。ハーネスでは電飾用の電源および信号ライ

ン、そして圧力センサの電源および信号ラインが必要となる。圧力センサはシート状のため、図 7 で示した圧力センサにハーネス部分を追加することができる。しかし、圧力センサの基材は透明化可能であるが、太い配線部は透明化できず目立ってしまう。図 19 に基材を透明化した圧力センサを LCD 上に置いたときの写真を示す。

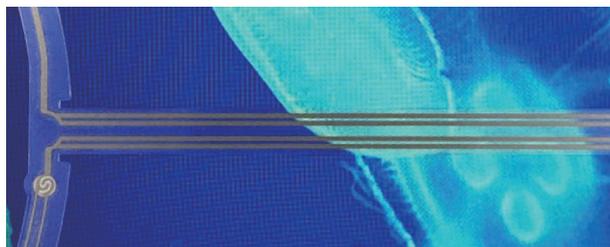


図 19 LCD 上に置いた透明圧力センサの写真

この写真より、配線の存在が大きいことが分かる。一方、電飾基板は FPC (Flexible Printed Circuits) 用コネクタを搭載し透明ポリイミド基材の透明 FPC を活用することができる。図 20 に LCD 上に置いた透明 FPC の写真を示す。



図 20 LCD 上に置いた透明 FPC の写真

図 19 の透明圧力センサより配線は目立っていないことがわかる。ここで、配線を波模様にはしているのは、LCD の画素とのモアレを抑制するためである。以上から本製品のハーネスとしては透明 FPC1 本として、ハーネスの存在を目立たせないようにすることを検討した。

しかし、ハーネスを透明 FPC のみにするためには製品内部で圧力センサと電飾用基板を電氣的に接続する必要がある。このような電氣的接続は通常であれば FPC コネクタを用いる方法が一般的である。しかし、これまでも述べてきたように本製品はスペースが非常に限られており、FPC コネクタを設けることはできなかった。そこで、シート状の圧力センサと電飾用基板を ACF (Anisotropic Conductive Film) 圧着という、LCD など多極の接続によく使用される手法を用いた。図 21 に実際の ACF 圧着後の写真を示す。

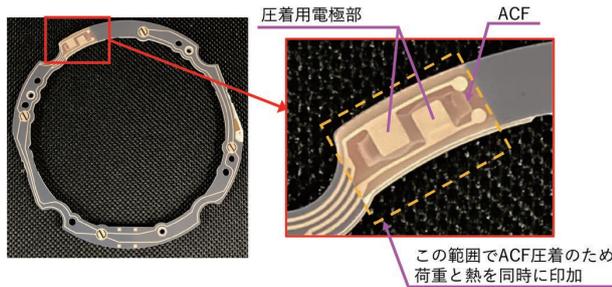


図 21 実際の ACF 圧着後の写真

図 21 の圧着電極部に示すように、圧力センサは信号線が 2 極しかないため、電極サイズは約 3mm x 3mm としている。先述のとおり、ACF 圧着は LCD など 0.5mm 程度の狭ピッチかつ多極の接続でよく利用されるため、本製品で使用している圧着用電極サイズは非常に大きい部類になる。このように電極サイズを大きくすることで、ACF 圧着の密着性を確保し、本製品に大きな衝撃や振動が加わっても圧着部分が剥がれないようにしている。以上より、ACF 圧着によって製品内に無理なく圧力センサと電飾基板の電気的接合を達成することができ、本製品のハーネスは透明 FPC のみとすることができた。

5. むすび

プレーヤーを惹きつける未来感のある近年のカジノマシンの進化に対して、SPIN ボタンはこのトレンドから遅れをとっていた。今回、プレーヤーを惹きつけるための方法の一つとして、これまでになかったようなカジノマシンの演出の実現に貢献できる、薄型でボタン下部の LCD 表示を透過可能な押しボタンを設計し、表 2 で示したボタンとしての基本機能を確認する試験や、防水試験などの多種製品試験項目を全てクリアすることを確認した上で、弊社の製品として上市した。図 22 に本製品の外観写真を示す。



図 22 透過型押しボタンの外観

製品サイズは直径 84mm、高さ 14.2mm で LCD 表示透過部サイズは直径 58mm である。なお、製品の取り付けは製品に付属する固定用リング部品を用い、工具不要で固定可能である。

また、図 23 は本製品紹介用に作製したカジノマシン操作ボタン部の試作品の外観写真である。

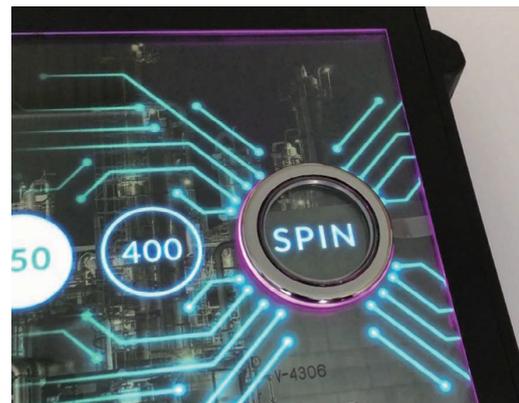


図 23 本製品を搭載した製品紹介用試作品の外観

これが図 4 案②を実現した写真である。このような本製品の実現または上市にあたっては、多くの課題が複雑に絡んでおり、それぞれの解決策も一部品二役、三役と言ったように複数の機能を持たせることで業界ニーズに合った製品を実現することができた。

本製品はカジノマシン業界をターゲットに開発を進めた汎用製品ではあるが、カジノマシン業界以外でもガラスパネルと LCD が重なった構造があれば本製品を取り付けることは可能である。例えば、近年駅や商業施設で見かけることが多くなったデジタルサイネージへの応用などが挙げられる。今後は上記のようにカジノマシン業界以外の業界にも対応できるよう、本製品の展開を進めていきたい。

また今後の技術的な展望としては、更なる未来感ある製品提供のため、ガラス面からのボタン高さの更なる削減やボタン縁取り（図 11 のボタン外周部品）の狭縁化の検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) オムロン株式会社. マイクロスイッチ参考資料. <https://www.fa.omron.co.jp/guide/technicalguide/29/326/index.html>. (参照 2021/04/12)

執筆者紹介



工藤 卓也 KUDO Takuya
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：機械工学



鷺見 昌昭 SUMI Masaaki
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：機械工学



阿形 剛宏 AGATA Takehiro
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



鬼塚 浩之 ONITSUKA 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：機械工学

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。

低接触抵抗と高容量開閉を両立する リレー開閉機構の開発

高橋 慶、田尻 さやか、野田 将之

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など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とメンテナンスフリー化が推進されている。高効率化のためにシステムの高電圧化が加速しており、また大電流通電時の発熱における種々の不具合抑制のため、系統連系部に使用されるリレーについても大電流通電時の発熱抑制および高電圧大電流の高容量開閉を両立するリレーが求められている。

本検討では、はじめに低接触抵抗を実現する接点材料・機構の選定を行った。次に、高容量開閉時に発生する接点溶着の引きはがしに適した構造およびその構造での引きはがし力の導出方法を検討した。高容量開閉を可能にするため、従来の設計で使用していた接点接触力や接点押込み量などに加え、引きはがす瞬間における運動量変化を、新たな設計パラメータとした。今回の検討により、低接触抵抗と高容量開閉を両立する開閉機構の技術を確立した。

Development of Relay Switching Mechanism that Achieves both Low Contact Resistance and High-capacity Switching

TAKAHASHI Kei, TAJIRI Sayaka and NODA Masayuki

In recent years, high efficiency and maintenance-free systems have been promoted in renewable energies such as photovoltaic power generation, which are increasingly used as countermeasures against environmental problems. The increase in voltage of the system is accelerating to improve efficiency, and in order to suppress various problems in heat generation when energized with a large current, the relay used for the grid linkage section also suppresses heat generation when energized with a large current. There is a demand for a relay that can switch a high capacity with a high voltage and a large current.

In this study, we first selected contact materials and mechanisms that achieve low contact resistance. Next, we investigated a structure suitable for peeling the contact welding generated during high-capacity switching, and the method for deriving the peeling force in that structure. In order to enable high-capacity switching, the change in momentum at the moment of peeling is set as a new design parameter in addition to the contact force and contact follow used in the conventional design. Through this study, we have established a technology for a switching mechanism that achieves both low contact resistance and high-capacity switching.

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市場が拡大している。太陽光で発電された直流電圧を、商用および家庭用で使える交流電圧に変換するための太陽光発電用インバータ（以下、PV インバータ）において、系統連系部にリレーが使用される。

系統連系部に使用されるリレーは、システムの安全用途として朝晩における定期的な開閉および緊急時の遮断に用いられ、また最大発電時には大電流の通電も必要となる。大電流通電時において、リレー接点 ON 時に生じる接触抵抗が大きい場合には発熱が大きくなり、PV インバータへの悪影響がある。そのため従来の家電・産業機械向けなどの汎用リレーと比較し低接触抵抗が求められる。今回の検討ではこの発熱課題を解決するため、初期接触抵抗 $0.2\text{m}\Omega$ 以下という業界トップクラスの低接触抵抗を目標値

Contact : TAKAHASHI Kei kei.takahashi.2@omron.com

とした。

ただし低接触抵抗を実現するためには導電率の良い接点材を使用する必要がある、そのような材料では電氣的な開閉時に、アーク放電による接点溶融が起こりやすく、接点 ON 状態で止まってしまう溶着故障が発生する可能性が高まる。

また、PV インバータの高効率化のための高電圧化トレンドに伴い部品自体の高絶縁性能が求められる。このため回路の直接的な遮断機能を担うリレーにおいては、限られたスペースの中で空間絶縁距離を大きく取る必要がある。その方策としては、一对の接点によるシングルブレイク構造よりも、二対の接点を直列に配置するダブルブレイク構造の方が、大きな空間絶縁距離を取ることができるため望ましい。ただし、ダブルブレイク構造では接触点が増えるため接触抵抗が増大する問題がある。

従来技術では、高容量遮断のためには添加剤入りの接点を使用しており、接触抵抗低減のためには大きな接点接触力が必要であった。一方で、添加剤入りの接点は接触抵抗のばらつきが大きく、異常発熱のリスクがある。また接点接触力の増大に伴いリレーの駆動コイルが大型化し、全体サイズが拡大する問題がある。

そこで我々は低接触抵抗と高容量開閉を両立するリレーを以下の構成で実現した。

- ・低い通電抵抗の実現のため純 Ag 系接点を使用
- ・接触抵抗低減のためリレー内部の通電路を並列化
- ・高電圧を安全に遮断するためダブルブレイク構造を採用
- ・電氣的開閉時の溶着事象を開離する構造仕様を運動量変化による力積で設定

また本稿では以下の構成で述べる。

第 2 章では低接触抵抗を実現するための理論式の構築、接点材質の選定、および実測値の比較評価から実現可能な構造を導いた結果を述べる。

第 3 章では溶着事象を引きはがす機構の選定、および設計仕様として開離機構の運動量変化から計算される力積に着目した検討結果を述べる。

第 4 章では第 2、3 章の検討結果に基づく開閉機構における力積の設計パラメータ検討結果を述べる。

第 5 章では本検討結果の振り返りと残課題及び今後の展望について述べる。

2. 低接触抵抗を実現する材料と構造の検討

2.1 初期接触抵抗の理論式構築

リレーの接点材質は、純 Ag 系接点と添加材入り Ag 接点に大別される。更に添加材入り Ag 接点は Ag+金属 (Me) および Ag+金属酸化物 (MeOx) のものが一般的である。

一般的に接触抵抗は純 Ag 系接点 < Ag+Me < Ag+MeOx であるが、耐溶着性は逆の傾向となる。従来の負荷開閉に利用されるリレーは、アークによる溶着に対して強い金属酸化物 (MeOx) の添加材入り接点材質を選定することで開閉性能を向上させつつ、接触抵抗については数十 mΩ まで許容されていた。PV インバータ向けリレーでは開閉性能と共に 1mΩ 以下の低接触抵抗も求められる。本検討では、目標とした初期接触抵抗 0.2mΩ 以下を実現するため、Ag+MeOx の接点材質は適さないと判断し、抵抗率の低い Ag 含有量 99% 以上の純 Ag 系接点：接点材質 A、および従来の汎用リレーに使われている Ag 含有量 90% 程度の Ag+Me 接点接点材質 B の二種類に絞り込み、理論式と実現可能な構造を検討した。

リレーの接触抵抗は、導電部の導体抵抗、接触部の集中抵抗、接触面の境界抵抗の 3 つに分類される。導体抵抗は導電部の材料の導電率と部品形状により算出でき、固定値となる。本章では、集中抵抗と境界抵抗の和の低減を検討の対象とした。そのため集中抵抗理論式から理想の接触抵抗を想定した上で、実測値における集中抵抗値+境界抵抗値を理論値に近づけるパラメータ値及び構造検討を行った。

接点接触部の集中抵抗の理論としては、ホルムの近似式が知られている^{1,2)}。

$$R_k = \frac{\rho}{2r} \tag{1}$$

R_k : 集中抵抗 [Ω]

ρ : 抵抗率 [Ω・m]

r : 接触半径 [m]

また、接触半径についてはヘルツの接触理論を用いる^{1,2)}。

$$r = \sqrt[3]{\frac{3P \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}} \tag{2}$$

P : 接触力 [N]

E : 縦弾性係数 [MPa]

ν : ポアソン比 [-]

R : 曲率半径 [m]

式(1)、(2)に示した理論式において、接点材質 A および B を用いて、接触力を変化させた時の集中抵抗の計算結果を図 1 に示す。また計算に使用した数値を表 1 に示す。

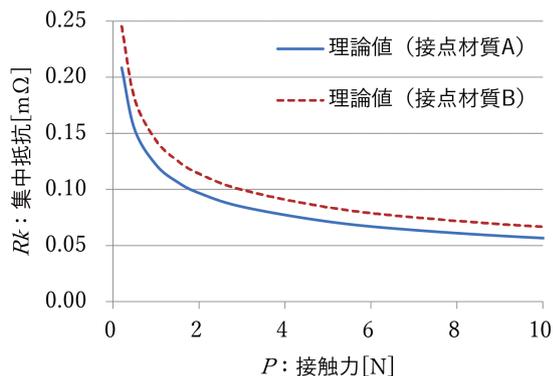


図1 Ag材料を用いた時の接触力に対する集中抵抗の理論値

表1 集中抵抗の理論計算値に使用した値

		接点材質 A	接点材質 B
抵抗率 [Ω]		1.63×10^{-8}	1.92×10^{-8}
縦弾性係数 [MPa]		90000	
ポアソン比 [-]		0.33	
曲率半径 [m]	可動接点	0.020	
	固定接点	平面 (∞)	

理論計算では、抵抗率の比15%がそのまま集中抵抗の違いとして表れた。

2.2 初期接触抵抗の実測結果

図2に示すプランジャ型リレー構造を用い、接点材質A、Bを接触力2N近傍で実測した比較を表2に示す。抵抗値は電圧降下法により測定した³⁾。実測においては導体抵抗も含まれているため、算出した導体抵抗を実測した値から除外した。また測定した構造において接点の接触部が二か所あるため、両接点の平均値を実測値とした。

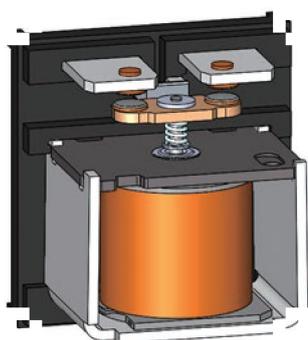


図2 検討に使用したプランジャ型リレー構造

表2 接触力2N近傍での接点材質A、Bの集中抵抗

	接点材質		
	A (n=7)	B (n=4)	B/A
理論値 [mΩ] (P: 2N 近傍)	0.091~0.095	0.110~0.117	118%
実測値 [mΩ] (平均値)	0.098~0.123 (0.111)	0.156~0.170 (0.166)	(149%)
実測値/理論値 (平均値)	107%~132% (119%)	142%~153% (147%)	

表2より以下のことが確認できた。

- 1) 理論値ではAとBの差は18%だが、実測値では平均値の比較で49%の差がある。この差異は、実測値の材料硬度のばらつきなどによる実接触部面積の違いや表面被膜などの影響を含んでいるためと推定した。
- 2) 接点材質Aは実測値/理論値が119%に対し、接点材質Bでは147%であり、理論値との差を生む要因の影響が大きい。

1)、2)より、低接触抵抗を安定して実現する目的から、これ以降は理論値と実測値の差異検討を接点材質Aに絞って実施した。

ここで、図2のプランジャ型リレーを用いて接点材質Aの接触力を変化させた時の接触抵抗値を実測した結果を図3に示す。ここで実線は集中抵抗の理論計算結果を表す。

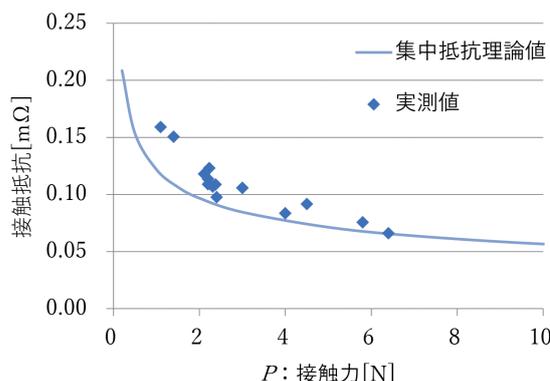


図3 接点材質Aの接触力と接触抵抗の実測値

接触力が低い領域では接触抵抗は理論値から上方にばらついているが、接触力が上がるにつれ理論値と概ね合致した。ここで接触力に対して接触抵抗の実測値/理論値の比率を図4に示す。

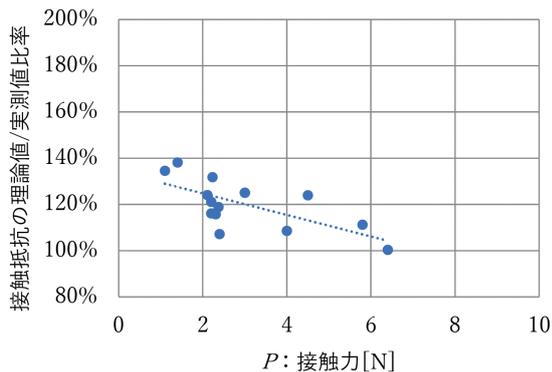


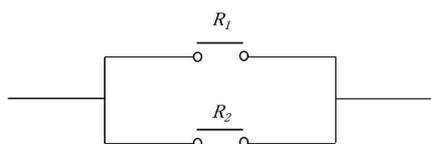
図4 接点材質 A の接触力と接触抵抗の実測値/理論値比率

純 Ag 系接点では 1N 程度の接触力で表面粗さの違いによる接触抵抗への影響は小さくなることが知られている⁴⁾。本検討でも接触力が高くなると実測値が理論値に近づいていくことより、理論式との差異の要因として推定した接触面積や表面皮膜の影響について、接触力を適切な設計値とすることで低減できることが確認できた。この実測値と理論値との差異を考慮し構造検討を実施する。

2.3 低接触抵抗を実現する構造の検討

第 1 章でも述べたように高容量の PV インバータにおいては高電圧仕様になるため、リレーの開閉構造はダブルブレイク構造を採用する。その場合、接点が二対あるため接点部の接触抵抗が二か所で発生する。導体抵抗を 0.05mΩ と仮定すると、目標の 0.2mΩ の達成には集中抵抗と境界抵抗を合わせた値を 0.15mΩ 以下に抑えなければならず、ダブルブレイク構造では一対の接点当たり 0.075mΩ に抑える必要がある。この時一対の接点に必要な接触力は、図 3 に示す集中抵抗理論値において約 4N であり、両側接触力で 8N 必要となる。この接触力を発生させるためには駆動力が大きくなってしまい、コイルブロックが大型化し、リレーの小型化に影響が出る。

この課題を解決するため、同じ接触力でも接触抵抗が小さくなるよう、通路となる可動端子が一つのシングル接点構造から、二つの可動端子を並列化するツイン接点構造を検討する。同じ駆動力において一つ一つの接点にかかる接触力は分散するため一か所の接点での接触抵抗は大きくなるが、図 5 のように並列化により全体の接触抵抗は小さくすることができる。



R_1 : 可動端子 1 の接触抵抗
 R_2 : 可動端子 2 の接触抵抗
 R_t : R_1 と R_2 の合成抵抗 ($R_t = (R_1 \times R_2) / (R_1 + R_2)$)

図5 ツイン接点構造の接触抵抗モデル

各接点にかかる接触力の和を P_{total} とし、 P_{total} とダブルブレイク構造でのシングル接点構造およびツイン接点構造での集中抵抗の理論値を図 6 に示す。

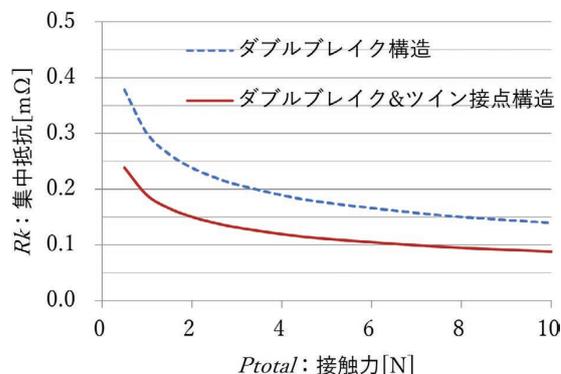


図6 接点構造と集中抵抗の理論値

先述の内容と同様に導体抵抗を 0.05mΩ と仮定した時、許容可能な集中抵抗は 0.15mΩ であり、シングル接点構造では理論値でも P_{total} は 8N 必要だったのに対し、ツイン接点構造では P_{total} が 2N で達成できることがわかる。またツイン接点構造では、各接触力がばらつき接触抵抗差がある場合でも合成抵抗差は小さくなり、接触抵抗を安定化させることがシングル接点構造に比べ容易なため、ダブルブレイク & ツイン接点構造を採用する。

3. 高容量開閉における開閉機構の運動量変化による溶着引きはがしの検討

3.1 純 Ag 系接点を用いた高容量開閉構造

低接触抵抗を実現するために、純 Ag 系接点を用い、かつダブルブレイク & ツイン接点構造を定めた。

ここで、リレーは電気的な開閉を行うことが必須機能であるが、純 Ag 系接点においては電気的開閉時の接点バウンスによる断続的な電流遮断時に発生するアーク放電により溶着故障を起こしやすい問題がある。

溶着故障を回避するためには、そもそも溶着が発生しないようにするか、溶着しても引きはがしできればよい。溶着が発生しないようにするには接点接触時のバウンスをなくすことで達成されるが、機械的挙動によるリレーにおいてそのような動きを簡単な機構で実現するのは困難である。そこでまずは単純なダブルブレイク構造で開閉機構の検討を行った。

3.2 運動量変化で計算される力積に着目した溶着引きはがしの検討

PV インバータ用途の一般的なリレーの開閉構造を図 7 に示す。本構造ではばねによる接点の開離時の運動のみで溶着を引きはがしており、引きはがし力上げるにはばね

定数を上げるか接点の押し込み量を大きくする必要があり、リレーが大型化する問題がある。一方、図8に示したプランジャ型リレー構造では、図9のように遮断時に可動鉄心と軸を介して接続されているストップが可動端子に衝突するタイミングで、大きな衝撃力が発生する。この衝撃力により強い溶着を引きはがすことを期待できる。図9において、(a)は接点が完全に押し込まれた状態、(b)はON状態からOFF状態に移る時に接点が開離する(ストップが可動端子に衝突する)瞬間、(c)は完全にOFFになった状態である。この(a)~(c)に至る遷移を、横軸に衝突体の動作距離、縦軸に衝突体の動作力(可動鉄心系を押し込んだ時の接点ばねおよび復帰ばねによる力)として図10に示す。なお、衝突体は可動鉄心および軸、ストップを含めた可動鉄心系全体で構成される。この衝撃力は衝突体の運動量変化によって発生するため、運動量変化で計算される力積に着目した引きはがし効果について検討を行った。

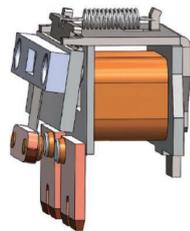


図7 PVインバータ用途の一般的リレー構造

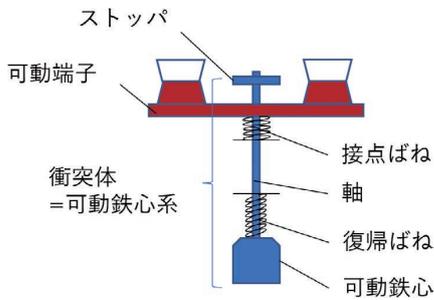


図8 プランジャ型リレー構造

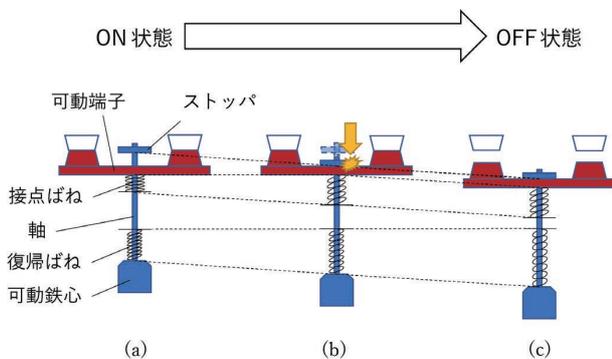


図9 プランジャ型リレーの溶着引きはがし機構

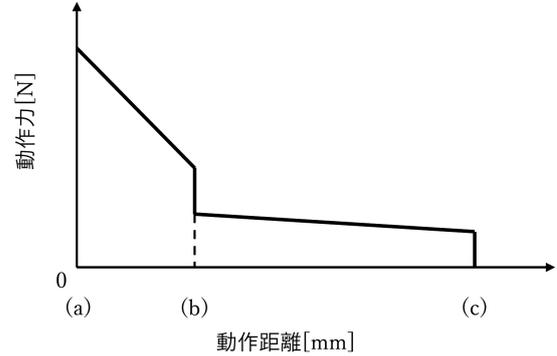


図10 リレーの動作距離と動作力の関係

衝撃力 F は衝突体の運動方程式より以下の式で計算できる⁵⁾。

$$F = ma = m \frac{v' - v}{\Delta t} \quad (3)$$

- m : 衝突体の質量 [kg]
- a : 衝突体の加速度 [m/s²]
- v : 衝突体の衝突直前速度 [m/s]
- v' : 衝突体の衝突後速度 [m/s]

式(3)に Δt をかけると、

$$F\Delta t = I = mv' - mv \quad (4)$$

となり、衝撃力 F は運動量の変化量で表される力積 I により代替可能である。

図11に示すように、衝突体の質量 m は可動鉄心および軸、ストップを含めた可動鉄心系全体の質量となる。

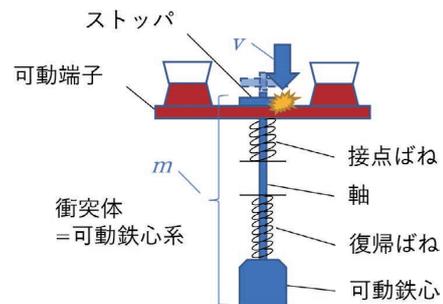


図11 衝突体の質量と速度測定部

衝突体の速度導出のため高速度カメラによりストップの変位を測定する。ストップが可動端子に当たった瞬間をより正確に判別するため、接点が開離するタイミングをオシロスコープにて電氣的に取得し、高速度カメラと同期させて測定した。

接点開離直前のストップの速度を変位より算出し、接点開離のタイミング直前における速度を v とした。この測定例を図12に示す。ここで横軸は変位測定の時間、縦軸はストップの変位および速度である。

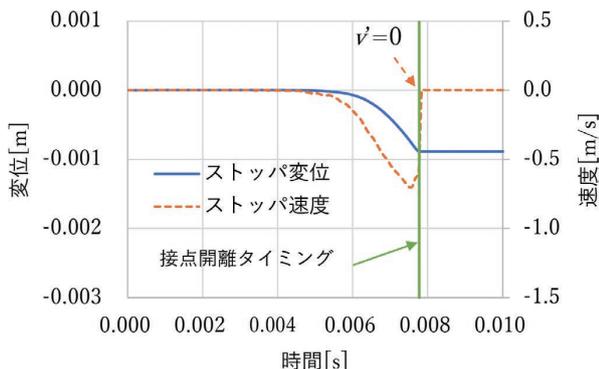


図 12 ストップ変位測定および速度算出結果

ここで接点が完全に溶着している状態を仮定し、ストップが速度 v で可動端子に当たり、速度 $v' = 0$ になるとした場合の力積 I を式 (4) を用いて算出し、電気的開閉試験による目標回数内での溶着故障の有無の関係について確認したところ、図 13 のように力積 I の大小で 2 分化された。ここで力積 I は目標回数に達した中で最も小さいものを 1 として比率で示した。目標回数を達成するための力積 I のしきい値が確認できた。

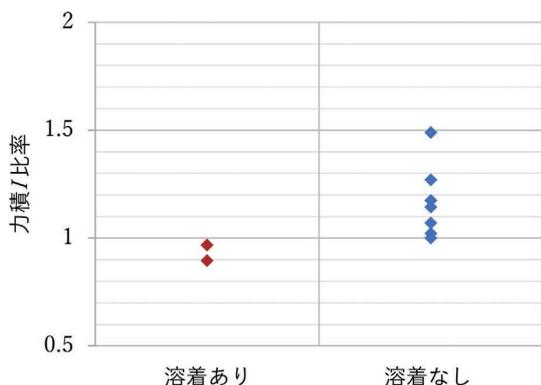


図 13 電気的開閉試験による目標回数内での溶着有無と力積 I の関係

ここで力積 I についてエネルギー保存の法則の観点より考察を行う。図 8 のようなプランジャ型リレーにおいて、(a) のリレー ON 状態では接点ばねおよび復帰ばねが圧縮されることで弾性エネルギーが蓄積されている。リレー ON 状態から OFF 状態に移る時に弾性エネルギーが衝突体の運動エネルギーに変換されることでストップが可動端子に衝突し、大きな運動量変化が発生する。ここでリレーが ON 状態から接点開離する瞬間までに消費されるばねの弾性エネルギー U [N・m] は、図 10 のリレー動作距離と動作力の関係より図 14 のハッチング部の面積で表される。

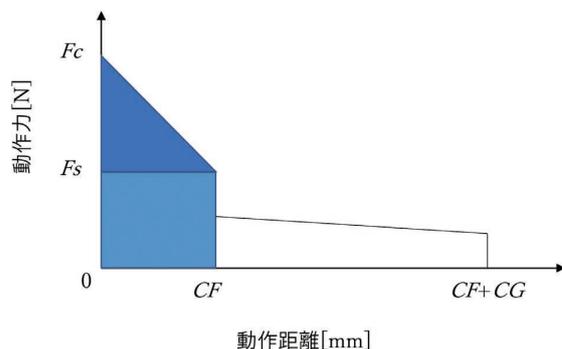


図 14 ON 状態から接点开離する瞬間までに消費されるばねの弾性エネルギー

$$U = \frac{1}{2} \{ (F_c - F_s) \times CF \} + F_s \times CF \quad (5)$$

- F_c : ON 状態の時の荷重 [N]
- F_s : 接点が開離する瞬間の荷重 [N]
- CF : ON 状態から接点が開離するまでの可動鉄心系の動作距離 [mm]
- CG : 接点が開離してから OFF 状態になるまでの可動鉄心系の動作距離 [mm]

ばねの弾性エネルギー U を横軸に、力積 I を縦軸に取ったグラフを図 15 に示す。なお、ある基準サンプルにおける F_c 、 F_s 、 CF の値で式 (5) を使用し算出したばねの弾性エネルギー U と、そのサンプルのストップ速度を高速カメラで測定し算出した力積 I をそれぞれ 1 とし、比率で示す。

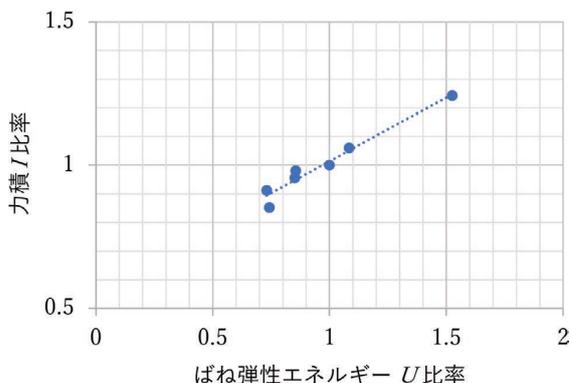


図 15 試作サンプルのばね弾性エネルギー U と力積 I の関係

図 15 よりばねの弾性エネルギー U が力積 I と線形の関係にあることがわかる。この結果より、機構の設計方法として、シャルピー衝撃試験などに代表される考え方と同様に、ばね弾性エネルギーで溶着部の引きはがし性能を設定できることを確認した。

4. ダブルブレイク & ツイン接点構造における溶着引きはがしの検討

これまでの検討結果より、低接触抵抗を実現しながら高容量開閉を行うために、図16に示すような、開閉部は図5と図8を合わせたダブルブレイク&ツイン接点構造とし、開閉機構はプランジャ型に定める。

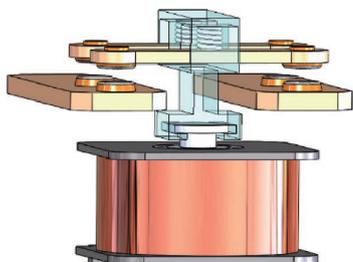


図16 ダブルブレイク&ツイン接点かつプランジャ型機構をもつ検討用リレー構造

このダブルブレイク & ツイン接点構造かつプランジャ型機構における開閉性能についても、第3章で述べた従来のダブルブレイクのプランジャ型機構での引きはがし検討結果の考え方が問題なく設計活用できるか検討した。

ダブルブレイク & ツイン接点構造では独立した可動端子が二つあるため、ばねによるリレーの動作力と動作距離の関係は図17のようになる。

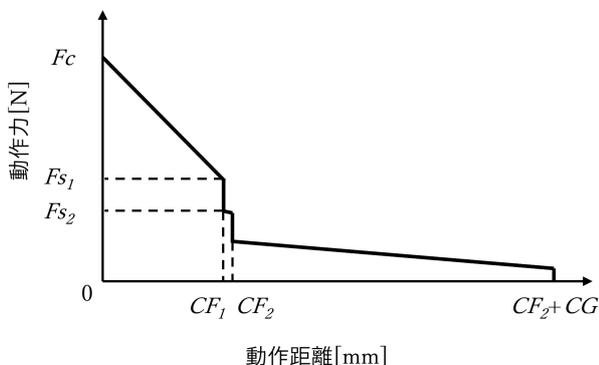


図17 可動端子が二つの場合の動作距離と動作力との関係

- F_c : ON 状態の時の荷重 [N]
- F_{s1} : 可動端子1が分離する瞬間の荷重 [N]
- F_{s2} : 可動端子2が分離する瞬間の荷重 [N]
- CF_1 : ON 状態から可動端子1 (CFが小さい側) が分離するまでの可動鉄心系の動作距離 [mm]
- CF_2 : ON 状態から可動端子2 (CFが大きい側) が分離するまでの可動鉄心系の動作距離 [mm]
- CG : 可動端子2が分離してから OFF 状態になるまでの可動鉄心系の動作距離 [mm]

ここで、二つの端子はそれぞれ開離するタイミングが異なるが、二つの端子のCFが小さい側を CF_1 と定義しており、開離のタイミングは CF_1 が早くなる。3.2項と同様に CF_1 側の端子および CF_2 側のそれぞれの接点开離のタイミング直前における速度 v_{1i} 、 v_{2i} を高速度カメラにより測定し、力積を算出した。

二つの可動端子について、 CF_1 のグラフを図18、 CF_2 のグラフを図19に示す。ここで横軸はCFの設計最小値からの CF_1 もしくは CF_2 の実測値の比率、縦軸はそのCFに対応した可動端子に与えられる力積 I について、3章で使用した数値で比率化したものである。また CF_1 と CF_2 の差を比差とし、その差を小・中・大と区別しプロットした。

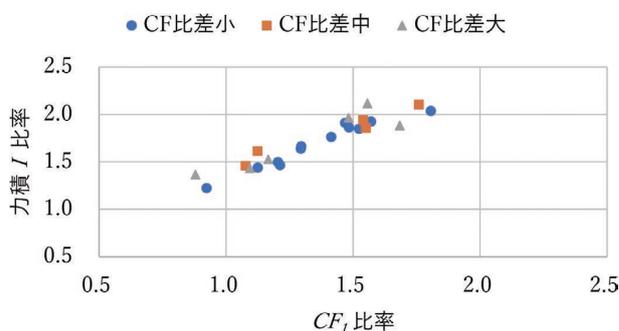


図18 CF_1 と力積 I の関係

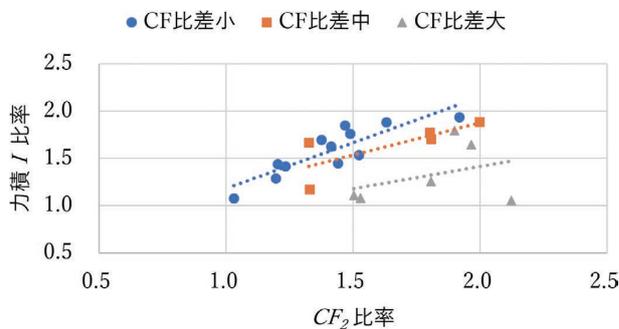


図19 CF_2 と力積 I の関係

図18より、 CF_1 と力積 I との間にはCF比差による影響は見られない。

一方で、図19より CF_2 側の端子はCF比差が大きい方が衝突体の力積が低下し、かつばらつきも増加する傾向にある。これは先に衝突する CF_1 側端子の衝突の影響を CF_2 側端子は受けるが、CF比差が大きいほど CF_1 側端子衝突後から CF_2 側端子衝突までの衝撃体の速度が減少し、力積が増加しないためと考えられる。

これらの結果から、ダブルブレイク&ツイン接点かつプランジャ型機構を持つリレーにおいては、以下を確認できた。

- ・3章で述べたばね弾性エネルギーに加えて、 CF_1 と CF_2 の差も力積の設計パラメータとして重要である。
- ・力積 I が小さくなる CF_2 側を、3章の検討結果における力積 I 比率が1以上となるように設計することで開閉性能が達成できる。

5. むすび

太陽光発電システムに用いられる PV インバータの大容量化と高効率化に伴い、使用されるリレーにおいても高電圧大電流の高容量開閉および大電流通電時の発熱抑制を両立していく必要がある。発熱抑制のために純 Ag 系接点を使用し、リレー内部の通電路を並列化することで低接触抵抗を実現した。さらに、純 Ag 系接点での電氣的開閉時の溶着事象を、運動量変化で計算される力積で設計可能な衝撃により引きはがす機構の妥当性を、実験から検証できた。これらの検討結果を用いた開閉機構により、高容量パワーリレー群の中でも低接触抵抗と高容量開閉を両立する PV インバータ向けリレーとして、形 G9KA を実用化した。

実使用条件においてはコイル駆動部の逆起電圧防止用のダイオードの有無や種類、リレー自体の取り付け方向性により開閉機構は影響を受けるが、今回の検討方法でしきい値を決定することで、それらを考慮した設計が可能となる。

今後はブランジャ型以外のリレーも考慮し、様々な溶着状態での複雑な開閉挙動における引きはがし力の算出に取り組み、再生可能エネルギーのより一層の普及に向け、安全かつ安定して通電・遮断のできるリレー商品開発を引き続き行う。

参考文献

- 1) 真野国夫. 接触部品の信頼性, 3 版, 総合電子出版社, 1981, P303, 3055-20133-2213.
- 2) 澤田滋, 清水佳織, 島田茂樹, 服部康弘, 錫及び銀めっき電気接点の接触抵抗予測. SEI テクニカルレビュー. 2010, No.177, 7月号, p.36-42.
- 3) 愛知久史, 松村年郎, 宮地巖. 銀、銅およびアルミ点接触子の直流 300A 通電時における接触抵抗特性. 電気学会論文. 1998, Vol. 118, No.7-8, p.825-830.
- 4) 浅井聡, 関川純哉. 銀接点对を用いた場合の接触抵抗一荷重特性の測定. [継電器・コンタクトテクノロジー] 研究会. 2017, No.203-2.
- 5) 小出昭一郎. 物理学. 35 版, 裳華房, 1990, p.378, 4-7853-2019-2.

執筆者紹介



高橋 慶 TAKAHASHI Kei

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
ファインメカ開発 1 部
専門: 化学工学



田尻 さやか TAJIRI Sayaka

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
ファインメカ開発 1 部
専門: 電気電子工学



野田 将之 NODA Masayuki

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
ファインメカ開発 1 部
専門: 機械工学
所属学会: 機械学会、電気学会

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。

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>改札機通過データを利用した列車混雑予測システムの開発</p> <p>System Development for Estimating Train Congestion Rate Using Data from Automatic Ticket Checking Machines</p> <p>廣田敦士(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 技術開発部)、幡山五郎(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 技術開発部)、岡部浩史(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 技術開発部)</p> <p>サイバネティクス、2021年、一般社団法人 日本鉄道技術協会特定部会日本鉄道サイバネティクス協議会、Vol.26、No.3、p.32-37、日本語</p> <p>2021年日本鉄道サイバネティクス協議会「論文賞」受賞</p>	<p>日本の鉄道における混雑は社会課題の一つである。特に、2021年現在流行しているCOVID-19対策のため列車混雑の緩和は喫緊の課題となっている。混雑対策の一つに、より空いている列車への乗車を促すための混雑情報提供が考えられる。そこで我々は、改札機の通過データからリアルタイムに各列車の混雑度を予測するシステムを開発した。本稿では、列車ごとの混雑度を予測するアルゴリズムを紹介し、その性能評価結果を報告する。評価の結果、6段階混雑度のRMSEは0.90であった。これは平均的に1段階未満の誤差であることを意味し、おおそ正しく予測できることが示された。</p> <p>Copyright (c) 2021 JREA</p>
<p>平均画像に対するVAE異常検知の適用による道路落下物検出</p> <p>Fallen Object Detection on Road by Using VAE Anomaly Detection with Average Image</p> <p>山本健生(オムロン ソーシャルソリューションズ株式会社 技術創造センタ 先端技術研究所)、橋本敦史(オムロン サイニクエックス株式会社)、岡本大和(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)</p> <p>人工知能学会全国大会論文集(第35回)、2021年、一般社団法人 人工知能学会、Vol.35、ROMBUN No.2F1-GS-10f-03、日本語</p>	<p>道路の安全・安心な環境づくりのため、監視カメラを用いた落下物の自動検出が有用である。従来、落下物検出には背景差分法が用いられていた。しかし、光の当たり方・影など、環境変化で誤検出する課題があった。そこで本研究では、VAE (Variational Auto-Encoder) による異常検知技術を道路の監視カメラによる落下物検出問題に適用した。実験の結果、OpenCVによる背景差分法と比較して、特に環境変化が多く含まれる画像において精度が向上した。落下物の検出精度は35%から75%に向上し、誤検出率は15.0%から2.4%に減少した。</p> <p>Copyright (c) 2021 JSAI</p>
<p>ロボット組立のための低精密センサを用いた正確なマルチモーダルインハンド姿勢推定</p> <p>Precise Multi-Modal In-Hand Pose Estimation using Low-Precision Sensors for Robotic Assembly</p> <p>Felix von Drigalski(オムロン サイニクエックス株式会社)、林剣之介(技術・知財本部 コアテクノロジーセンタ)、井尻善久(技術・知財本部 コアテクノロジーセンタ)</p> <p>Proceedings of International Conference on Robotics and Automation (ICRA)、2021年、IEEE、p.968-974、英語</p>	<p>In industrial assembly tasks, the in-hand pose of grasped objects needs to be known with high precision for subsequent manipulation tasks such as insertion. This problem (in-hand-pose estimation) has traditionally been addressed using visual recognition or tactile sensing. On the one hand, while visual recognition can provide efficient pose estimates, it tends to suffer from low precision due to noise, occlusions and calibration errors. On the other hand, tactile fingertip sensors can provide precise complementary information, but their low durability significantly limits their use in real-world applications. To get the best of both worlds, we propose an efficient method for in-hand pose estimation using off-the-shelf cameras and robot wrist force sensors, which requires no precise camera calibration. The key idea is to utilize visual and contact information adaptively to maximally reduce the uncertainty about the in-hand object pose in a Bayesian state estimation framework. As most of the uncertainty can be resolved from visual observations, our approach reduces the number of physical environment interactions while keeping a high pose estimation accuracy. Our experimental evaluation demonstrates that our approach can estimate object poses with sub-mm precision with an off-the-shelf camera and force-torque sensor.</p> <p>Copyright 2021 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>ロボットによるディアボロの学習と制御のための解析モデル</p> <p>An Analytical Diabolo Model for Robotic Learning and Control</p> <p>Felix von Drigalski (オムロン サイニックエクス株式会社)、Joshi Devwrat (オムロン サイニックエクス株式会社)、室岡貴之 (東京大学大学院情報理工学系研究科、オムロン サイニックエクス株式会社インターン)</p> <p>Proceedings of International Conference on Robotics and Automation (ICRA)、2021 年、IEEE、p.4055-4061、英語</p>	<p>In this paper, we present a diabolo model that can be used for training agents in simulation to play diabolo, as well as running it on a real dual robot arm system. We first derive an analytical model of the diabolo-string system and compare its accuracy using data recorded via motion capture, which we release as a public dataset of skilled play with diabolos of different dynamics. We show that our model outperforms a deep-learning-based predictor, both in terms of precision and physically consistent behavior. Next, we describe a method based on optimal control to generate robot trajectories that produce the desired diabolo trajectory, as well as a system to transform higher-level actions into robot motions. Finally, we test our method on a real robot system playing the diabolo, and throw it to and catch it from a human player.</p> <p>Copyright 2021 The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved.</p>
<p>ソフトロボットによる部品組立のためのダイナミクスモデル集約による転用学習</p> <p>TRANS-AM: Transfer Learning by Aggregating Dynamics Models for Soft Robotic Assembly</p> <p>田中一敏 (オムロン サイニックエクス株式会社)、米谷竜 (オムロン サイニックエクス株式会社)、濱屋政志 (オムロン サイニックエクス株式会社)</p> <p>Proceedings of International Conference on Robotics and Automation (ICRA)、2021 年、IEEE、p.4627-4633、英語</p>	<p>Practical industrial assembly scenarios often require robotic agents to adapt their skills to unseen tasks quickly. While transfer reinforcement learning (RL) could enable such quick adaptation, much prior work has to collect many samples from source environments to learn target tasks in a model-free fashion, which still lacks sample efficiency on a practical level. In this work, we develop a novel transfer RL method named TRANSfer learning by Aggregating dynamics Models (TRANS-AM). TRANS-AM is based on model-based RL (MBRL) for its high-level sample efficiency, and only requires dynamics models to be collected from source environments. Specifically, it learns to aggregate source dynamics models adaptively in an MBRL loop to better fit the state-transition dynamics of target environments and execute optimal actions there. As a case study to show the effectiveness of this proposed approach, we address a challenging contact-rich peg-in-hole task with variable hole orientations using a soft robot. Our evaluations with both simulation and real-robot experiments demonstrate that TRANS-AM enables the soft robot to accomplish target tasks with fewer episodes compared when learning the tasks from scratch.</p> <p>Copyright 2021 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>異種クライアントからの分散学習のための適応蒸留</p> <p>Adaptive Distillation for Decentralized Learning from Heterogeneous Clients</p> <p>Jiaxin Ma (オムロン サイニクエクス株式会社)、 米谷竜 (オムロン サイニクエクス株式会社)、 Zahid Iqbal (University Sains Malaysia)</p> <p>Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition、2021 年、IEEE、p.7486-7492、英語</p>	<p>This paper addresses the problem of decentralized learning to achieve a high-performance global model by asking a group of clients to share local models pre-trained with their own data resources. We are particularly interested in a specific case where both the client model architectures and data distributions are diverse, which makes it nontrivial to adopt conventional approaches such as Federated Learning and network co-distillation. To this end, we propose a new decentralized learning method called Decentralized Learning via Adaptive Distillation (DLAD). Given a collection of client models and a large number of unlabeled distillation samples, the proposed DLAD 1) aggregates the outputs of the client models while adaptively emphasizing those with higher confidence in given distillation samples and 2) trains the global model to imitate the aggregated outputs. Our extensive experimental evaluation on multiple public datasets (MNIST, CIFAR-10, and CINIC-10) demonstrates the effectiveness of the proposed method.</p> <p>Copyright 2021 The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved.</p>
<p>組立作業の自動化に向けた産業用ロボットの力覚センサ信号を入力とするリカレントニューラルネットワークを用いた作業完了状態の自動判定器の開発</p> <p>Completion Estimator for Robotic Assembly Manipulation Using Recurrent Neural Network with Wrist Force Sensor Signal</p> <p>沖賢太郎 (技術・知財本部 コアテクノロジーセンタ)、 的場俊亮 (技術・知財本部 コアテクノロジーセンタ)、 高西完治 (技術・知財本部 コアテクノロジーセンタ)</p> <p>システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集、2021年、一般社団法人 システム制御情報学会、Vol.65、ROMBUN No.TS09-01-2、日本語</p>	<p>昨今の製造現場では、労働人口減に伴う人手不足のため、工程の自動化により労働負荷を下げたいという要求が高まってきている。特に組立作業工程は、現在でもロボットによる自動化の取り組みが産学問わず行われているが、依然として実用化には至っていない。その理由の1つとして、ロボットが組立動作を実行した結果から得られる複雑なセンサデータから、作業完了を高精度に自動判定することが難しいことが挙げられる。本論文では、スナップフィット式コネクタの挿入作業を対象に、複数種類の時間幅のセンサデータを並列に入力可能なリカレントニューラルネットワークを用いた作業完了の自動判定器を提案する。産業用ロボット手首部の力覚センサデータを入力として45回分の挿入の動作データを用いて学習させたところ、93%の高い推定正答率を得た。</p> <p>Copyright (c) 2021 SCIE</p>
<p>高度なラリーをする卓球ロボット「フォルフェウス」</p> <p>FORPHEUS: The Ping Ping Robot for Advanced Rallies</p> <p>浅井恭平 (技術・知財本部 コアテクノロジーセンタ)、 古賀寛規 (技術・知財本部 コアテクノロジーセンタ)、 劉曉俊 (技術・知財本部 コアテクノロジーセンタ)</p> <p>システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集、2021年、一般社団法人 システム制御情報学会、Vol.65、ROMBUN No.T4-1、日本語</p>	<p>我々は、オムロンユニークな人と機械の関係性「融和」を訴求するため、7年間にわたり人の成長や可能性を引き出す卓球ロボット「フォルフェウス」を継続的に開発している。より高度な「融和」を実現するため、ピン球の過去軌跡から回転速度を高精度に推定する技術や、自身のミスからパラメータを学習的に調整する技術を開発しており、人のようなスピード感のある高精度なラリーを実現できるようになった。今回の講演では、卓球ロボットに搭載されているそれら技術や、CIE2020にて初出展した協調ロボットを活用したデモについて紹介する。</p> <p>Copyright (c) 2021 SCIE</p>

論文名・執筆者(所属)・掲載誌	抄 録
<p>ロボットセルシステムのための階層的最適化:レイアウト設計から動作計画まで</p> <p>Hierarchical Optimization for Robotic Cell Systems: From Layout Design to Robot Motion</p> <p>倉谷僚一(技術・知財本部 研究開発センタ)、小島岳史(技術・知財本部 研究開発センタ)、藤井春香(技術・知財本部 研究開発センタ)、的場俊亮(技術・知財本部 研究開発センタ)、高西完治(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研究発表講演会講演論文集、2021年、一般社団法人 システム制御情報学会、Vol.65、ROMBUN No.TS09-01-3、日本語</p>	<p>多様な作業を実行するロボットセルシステムで必要不可欠な、レイアウトやロボット動作の最適化は困難な課題である。従来研究では、ロボットの姿勢が明示的に考慮されていないため、配置最適化で得られたレイアウトに対して動作を最適化すると、解が得られない、あるいは動作時間が長くなる可能性がある。本研究では、ロボットの作業姿勢の重要性に着目し、配置最適化と動作最適化の間に新たに姿勢最適化を追加した階層的な最適化フレームワークを提案する。さらに、配置最適化を遺伝的アルゴリズムで解く際に、設計上の制約を考慮するための目的関数を考案し、提案手法の有効性をシミュレーション実験により確認した。</p> <p>Copyright (c) 2021 SCIE</p>
<p>ソフト手首を用いた助言と敵対的インタラクションからのロボット学習</p> <p>Robotic Learning From Advisory and Adversarial Interactions Using a Soft Wrist</p> <p>濱屋政志(オムロン サイニックエクス株式会社)、田中一敏(オムロン サイニックエクス株式会社)、Felix von Drigalski(オムロン サイニックエクス株式会社)</p> <p>IEEE Robotics and Automation Letters、2021年、IEEE、Vol.6、No.2、p.3878-3885、英語</p>	<p>In this letter, we developed a novel learning framework from physical human-robot interactions. Owing to human domain knowledge, such interactions can be useful for facilitation of learning. However, applying numerous interactions for training data might place a burden on human users, particularly in real-world applications. To address this problem, we propose formulating this as a model-based reinforcement learning problem to reduce errors during training and increase robustness. Our key idea is to develop 1) an advisory and adversarial interaction strategy and 2) a human-robot interaction model to predict each behavior. In the advisory and adversarial interactions, a human guides and disturbs the robot when it moves in the wrong and correct directions, respectively. Meanwhile, the robot tries to achieve its goal in conjunction with predicting the human's behaviors using the interaction model. To verify the proposed method, we conducted peg-in-hole experiments in a simulation and real-robot environment with human participants and a robot, which has an underactuated soft wrist module. The experimental results showed that our proposed method had smaller position errors during training and a higher number of successes than the baselines without any interactions and with random interactions.</p> <p>Copyright 2021 The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved.</p>
<p>明示・暗示ダイナミクス変数を用いた多様な環境下での動作学習</p> <p>Learning-based Manipulation with Explicit and Implicit Dynamics Parameters for Multiple Environments</p> <p>室岡貴之(東京大学大学院情報理工学系研究科、オムロン サイニックエクス株式会社インターン)、濱屋政志(オムロン サイニックエクス株式会社)、Felix von Drigalski(オムロン サイニックエクス株式会社)</p> <p>日本ロボット学会誌、2021年、一般社団法人 日本ロボット学会、Vol.39、No.2、p.177-180、日本語</p>	<p>近年のロボットマニピュレーション技術や機械学習の進展により、ロボットが複雑な作業を実現できるようになってきた。</p> <p>一方、学習制御で多様な環境に対していかに迅速に適応できるかについては、多くの課題が残されている。</p> <p>我々は、明示的・暗示的にダイナミクスを表現するパラメータを使用して、一般的な学習制御の枠組みを拡張することで多様な環境に迅速に適応する手法を提案した。</p> <p>また、提案手法を深層強化学習と深層モデル予測制御に適用し、提案手法が未知のダイナミクスを持つCartpoleや物体を押す作業を遂行できることを確認した。</p> <p>Copyright (c) 2021 RSJ</p>

論文名・執筆者(所属)・掲載誌	抄 録
<p>プリント配線板の層間接続構造を考慮したプレーナ型磁気部品の小型化検討</p> <p>Examination of Miniaturization of Planar Magnetic Components Considering the Interlayer</p> <p>大村英一(グローバル購買・品質本部 品質監査室)、博田知之(グローバル購買・品質本部 品質技術室)、石橋寛基(技術・知財本部 エンジニアリングセンタ)</p> <p>エレクトロニクス実装学会講演大会講演論文集、2021年、一般社団法人 エレクトロニクス実装学会、Vol.35、ROMBUN No.17A2-03、日本語</p>	<p>パワエレ機器に用いられる磁気部品の小型化手法として、プリント基板工法を利用したプレーナ型磁気部品が考案・実用化されている。さらなる小型化に向けてスイッチングの高周波化が進むと予想されるが、プリント基板の寄生成分の影響が問題となる。本研究では、ヘリカル形状の多層プリント基板コイルと磁性コアで構成される磁気部品において、基板の寄生成分と層間接続ビアで発生する磁束の影響によるインダクタンスの低下を最小化した最適構造を検討したので報告する。</p> <p>Copyright (c) 2021 JIEP</p>
<p>DC 給電されるサーボドライブシステムのインピーダンス法による回生時の安定性解析</p> <p>Impedance-based Stability Analysis of DC Bus Servo Drive Systems in Regenerative Mode</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)、徳崎裕幸(技術・知財本部 エンジニアリングセンタ)、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>電気学会全国大会講演論文集、2021年、一般社団法人 電気学会、Vol.WEB18-C4、ROMBUN No.4-118、日本語</p>	<p>PWM インバータを使用した電力変換器と電動機は、動力線のノイズ対策に工数が割かれ問題となっている。この問題に対し、DC リンク部で分割のインバータを電動機近傍へ配置し、DC 給電によりノイズ放射の軽減が期待できる。しかし、DC 給電は、DC 配線とインバータ・電動機間の干渉により、システムが不安定になる。そこで筆者らは、力行動作のインピーダンスでの安定解析方法を提案している。本論文では、回生動作のインピーダンスでの安定性解析方法を確証し報告する。</p> <p>Copyright (c) 2021 IEEJ</p>
<p>工場内マイクロ波電力伝送における人体上の電力密度推定方法の実機評価について</p> <p>Actual System Evaluation of Estimation Method of Surface Power Density on Human Body for Microwave Wireless Power Transmission in Factory Environment</p> <p>グエン マイintai(技術・知財本部 コアテクノロジーセンタ)、村井彬人(技術・知財本部 コアテクノロジーセンタ)、山田寛喜(新潟大学大学院 自然科学研究科)</p> <p>電子情報通信学会大会講演論文集、2021年、一般社団法人 電子情報通信学会、ROMBUN No.B-1-72、日本語</p>	<p>マイクロ波電力伝送技術を社会実装する場合、給電エリア近傍の人体に影響を及ぼさないように電波防護指針を遵守する必要がある。給電と人体防護を両立するためには、給電時に人体上の電力密度を把握しそれに基づき送信電力を調整し、人体上の電力密度を電波防護指針の基準値以下に保つ必要がある。そのため、著者らはマルチパスの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よって効果を検証した。本稿では、試作機に提案方法を実装し、工場の模擬環境下でその有用性を検証したので報告する。</p> <p>Copyright (c) 2021 IEICE</p>

論文名・執筆者(所属)・掲載誌	抄 録
<p>異なる粒度の作業分析のための動作系列 Sequence to Sequence モデル</p> <p>惠本序珠亜 (技術・知財本部 コアテクノロジーセンター)、西行健太 (技術・知財本部 コアテクノロジーセンター)、戎野聡一 (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)</p> <p>情報処理学会研究報告、2021年、一般社団法人 情報処理学会、Vol.2021-CVIM-224、No.2、p.1-5、日本語</p>	<p>工場の生産性向上には作業の分析が必要であるが、作業手順のミス検知、効率的な手順の探索など、作業分析の目的や対象により、認識したい作業の粒度は異なる。しかし、全ての粒度に対応するため、各粒度の動作をラベル付けした学習データを用意することは難しい。そこで、ある粒度の動作を認識する識別器を作成した後、少数データを用いて、それらの識別器の出力を粒度の粗い作業に変換する手法を提案する。その一例として、「把持」「運搬」「調整」などの粒度の細かい動作系列を「箱を台に固定する」「製品を箱に入れる」などの粒度の粗い作業系列に変換するモデルを開発した。提案手法は、42名の作業員から撮影した工場での作業を模した5つの工程の動画データで評価した。1名の作業員の動画データだけを用いて学習した結果、5工程中4工程において90%を超える精度を達成した。</p> <p>Copyright (c) 2021 IPSJ</p>
<p>正確な顔器官検出のための繰り返し自己蒸留法</p> <p>Iterative Self-distillation for Precise Facial Landmark Localization</p> <p>長江成典 (技術・知財本部 コアテクノロジーセンター)、竹内倭 (技術・知財本部 コアテクノロジーセンター)</p> <p>Computer Vision – ACCV 2020 Workshops、2021年、Springer International Publishing、Vol.12628、p.154-167、英語</p>	<p>In this paper, we propose a novel training method to improve the precision of facial landmark localization. When a facial landmark localization method is applied to a facial video, the detected landmarks occasionally jitter, whereas the face apparently does not move. We hypothesize that there are two causes that induce the unstable detection: (1) small changes in input images and (2) inconsistent annotations. Corresponding to the causes, we propose (1) two loss terms to make a model robust to changes in the input images and (2) self-distillation training to reduce the effect of the annotation noise. We show that our method can improve the precision of facial landmark localization by reducing the variance using public facial landmark datasets, 300-W and 300-VW. We also show that our method can reduce jitter of predicted landmarks when applied to a video.</p> <p>Copyright 2021 Springer Nature Switzerland AG. All rights reserved.</p>

OMRON TECHNICS
推進委員会

推進委員長	大平 真琴			
推進委員	岡部 浩史	河合 武宏	坂瀬 忠之	澤野井 幸哉
	高木 徳生	浪江 正樹	馬淵 雅夫	山崎 琢也 (50音順)
事務局	西崎 修	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54巻 第1号
通巻166号 (年1回発行)
(禁無断転載)
ISSN 0474-1315

2022年5月10日 発行

編集兼発行人 諏訪 正樹
発行 オムロン株式会社 技術・知財本部
〒619-0283 京都府木津川市木津川台9-1
電話 0774-74-2000 (代)

Published by OMRON Corporation
9-1, Kizugawadai, Kizugawa-city,
Kyoto, 619-0283 Japan
TEL 0774-74-2000

本誌に記載している会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標または登録商標です。

©OMRON Corporation 2022 All Rights Reserved.

OMRON