

# OMRON 161 Vol.50 No.1 2018 TECHNICS®

オムロングループ技術論文誌

社会的課題を解決する  
オムロンの技術

# OMRON TECHNICS とは？

オムロンでは、研究開発の成果を広く公開することで社会の発展に寄与することを目的に、技術論文誌「OMRON TECHNICS」を1961年（昭和36年）5月より発行してまいりました。

2008年（平成20年）の通巻160号までで掲載論文は約1700編にもものぼります。その後、一時公開を休止しておりましたが、近年の技術革新の加速と社会的課題が深刻化する中で技術による様々な課題解決が試みられていることから、創刊からの意思を受け継ぎ、社会的課題を解決するイノベーションの創造に寄与していくため弊社の技術論文の公開を再開することにいたしました。創刊からの『OMRON TECHNICS』の名称も継承し、161号として発刊いたします。

今後は、オムロンホームページ上で定期的に論文を発表し、その内容をまとめた冊子を1年に1号を目安に発行していく予定です。今後とも、WEB版及び冊子版の「OMRON TECHNICS」をご愛読いただきますようお願い申し上げます。

オムロン技術論文紹介ホームページ

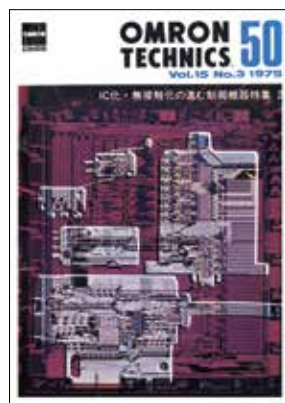
[https://www.omron.co.jp/technology/r\\_d/omrontechnics/](https://www.omron.co.jp/technology/r_d/omrontechnics/)



## ■ OMRON TECHNICSこれまでの変遷



1961年5月創刊号



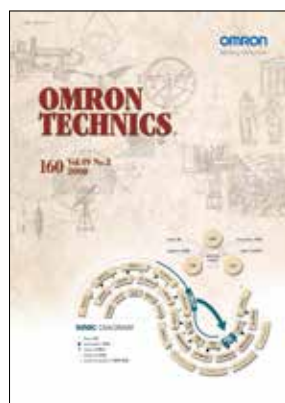
1975年50号



1991年100号



2004年150号



2008年160号



2018年161号

# 技術論文誌「OMRON TECHNICS」の

## 発行再開にあたって



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。

今回、オムロングループの技術論文誌「OMRON TECHNICS」の発行を再開し、皆様のお手元に届けられましたことをうれしく思います。

この「OMRON TECHNICS」の歴史を振り返ると、創刊は1961年、日本でオートメーション技術が進展して市場が拡大するとともに、機械による自動化・無人化が市民生活を便利に快適にしていく社会のありかたが見え始めてきた時期です。オムロンは、こうした時代の変化を「サイバネーション革命」と呼び、社会的課題を解決し、より良い社会を実現していくための挑戦を開始しました。当時の資本金の4倍もの資金を投入して、京都府長岡町（現長岡京市）に中央研究所を設立したのは、「OMRON TECHNICS」創刊の前年の1960年です。その後、自動券売機、電子自動信号機、自動改札機、現金自動支払機、卓上計算機、健康機器などを世に送り出し、社会的課題の解決を進めてきました。「ソーシャルニーズの創造」をめざす技術開発・研究開発は、現在でも我々オムロンの技術開発部門のDNAとして脈々と受け継がれています。

オムロンでは、2017年から新中期経営計画VG2.0を始動し、技術の進化を起点にイノベーションを起こし、事業を通じた社会的課題の解決に取り組んでおります。創業者 立石一真の企業哲学である「機械にできることは機械に任せ、人はより創造的な分野で活動を楽しむべきである」を目指し、具体的な近未来を描くことでソーシャルニーズを創造する技術開発に注力しています。

社会的課題を解決するイノベーションを起こしていくには、弊社のみでは難しく世界中のパートナー様とのオープンイノベーションが不可欠となってきています。それが「OMRON TECHNICS」の再開を決めた背景でもあります。

本号では、我々が注力する4つの事業領域の最新技術を中心にご紹介いたします。我々の技術を多くの方々にご覧いただき、皆様と「ソーシャルニーズの創造」による社会的課題の解決につながるものとなれば幸いです。

オムロン株式会社  
代表取締役 執行役員専務 CTO

宮田喜一郎

巻頭言：技術論文誌「OMRON TECHNICS」の発行再開にあたって

代表取締役 執行役員専務 CTO 宮田 喜一郎 ..... 1 (1)

目次 ..... 2 (2)

オムロンのコア技術「Sensing & Control +Think」 ..... 4 (4)

## 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

### 1-1. ファクトリーオートメーション

#### マシンコントローラに搭載可能なAI技術の開発 (1)

—装置制御用データを利用した生産ラインの異常検知手法について—

鶴田 浩輔・峯本 俊文・広橋 佑紀 ..... 6 (6)

#### マシンコントローラに搭載可能なAI技術の開発 (2)

—異常検知コントローラプロトタイプ開発における実証例について—

阿部 泰明・上山 勇樹・阪谷 信幸・藤井 高史 ..... 12 (12)

#### I/O (Input-Logic-Output) 摺り合わせ制御技術

—ものづくりの革新に貢献する制御技術について—

浪江 正樹 ..... 18 (18)

### 1-2. ヘルスケア

#### 連続血圧計測を実現するセンサ技術

—高精度マルチエレメントMEMS圧力センサの開発から実用化まで—

加藤 (中川) 雄樹・濱口 剛 ..... 26 (26)

### 1-3. モビリティ

#### 自動運転時代におけるドライバモニタリング技術

—時系列Deep Learningによるドライバ状態の推定について—

日向 匡史・木下 航一・西行 健太・長谷川 友紀 ..... 36 (36)

#### 車載脈拍センサの開発

—マイクロ波センサからの脈拍数推定手法について—

三谷 重知 ..... 42 (42)

#### 磁性体による磁場変動を利用したワイヤレス地磁気車両センサ

—車両特有の磁場変動を捉える停止車両検知アルゴリズムについて—

吉野 広太郎・渡邊 慎・神田 翔平 ..... 48 (48)

### 1-4. エネルギーマネジメント

#### パワーコンディショナにおける系統インピーダンスの影響を打ち消す制御方式の開発

鎌谷 祐貴・西川 武男・財津 俊行・上松 武 ..... 54 (54)

## 2. オムロンのモノづくりを支える技術

#### 超小型自律走行ロボットによる新生産システムの開発

—小量生産領域における自動化への挑戦について—

石川 裕一・松本 泰久 ..... 62 (62)

#### リレー高容量化を実現する動的挙動シミュレーション技術

—数値解析を活用したリレーの開閉性能設計手法について—

井戸田 修一・西田 剛 ..... 68 (68)

## 3. 新たな成長領域を生み出す技術

#### 空気清浄機向け微小粒子検出センサ開発

—光学技術と集塵構造による粒子検出精度の向上について—

河合 肇・宮本 寛之・広瀬 勇司・山村 聡 ..... 76 (76)

#### 小型音響センサの高精度化開発

—MEMSセンサの低ノイズ化を実現するダンピング制御技術、薄膜形成技術について—

井上 匡志・内田 雄喜・石本 浩一・堀本 恭弘 ..... 82 (82)

最近発表した主な論文 ..... 88 (88)

Introduction; Technical Journal OMRON TECHNICS Greetings from the CTO  
 Kiichiro Miyata, Representative Director CTO ..... 1 (1)

Table of Contents ..... 2 (2)

OMRON’s Core Technology “Sensing & Control +Think” ..... 4 (4)

**1. Innovative Technology in OMRON’s Growth Area**

**1-1. Factory Automation**

**Development of AI Technology for Machine Automation Controller (1)**  
 - Anomaly Detection Method for Manufacturing Equipment by Utilizing Machine Data -  
 Kosuke Tsuruta, Toshifumi Minemoto and Yuki Hirohashi ..... 6 (6)

**Development of AI Technology for Machine Automation Controller (2)**  
 - The Insight Gained Through Implementation of Anomaly Detection AIs to the Machine Controller -  
 Yasuaki Abe, Yuhki Ueyama, Nobuyuki Sakatani and Takashi Fujii ..... 12 (12)

**ILO integrated control technology**  
 - Control technology contributing to innovation in manufacturing -  
 Masaki Namie ..... 18 (18)

**1-2. Healthcare**

**Sensor Technology to Realize Continuous Blood Pressure Monitoring**  
 - Development and Practical Application of High-precision Multi-element MEMS Pressure Sensor -  
 Yuki Kato (Nakagawa) and Tsuyoshi Hamaguchi ..... 26 (26)

**1-3. Mobility**

**Driver Status Monitoring System in Autonomous Driving Era**  
 - Driver Status Estimation with Time-series Deep Learning -  
 Tadashi Hyuga, Koichi Kinoshita, Kenta Nishiyuki and Yuki Hasegawa ..... 36 (36)

**Development of the in-vehicle pulse sensor**  
 - About the pulse rate estimate technique from a microwave sensor -  
 Shigetomo Mitani ..... 42 (42)

**Parking Sensor based on geomagnetic variations of vehicle**  
 - Algorithm based on unique geomagnetic variations -  
 Kotaro Yoshino, Makoto Watanabe and Shohei Kanda ..... 48 (48)

**1-4. Energy Management**

**A Compensator that Negate the Influence of Grid Impedance based on Frequency Sweep Estimation Technique**  
 Yuhki Kamatani, Takeo Nishikawa, Toshiyuki Zaito and Takeshi Uematsu ..... 54 (54)

**2. Technology Supporting OMRON’s Manufacturing**

**Development of a new system using extraordinarily small self-controlled run robot**  
 - About a challenge to automation in small-lot production territory -  
 Yuichi Ishikawa and Yoshihisa Matsumoto ..... 62 (62)

**Dynamics simulation technology for high electrical durability relay**  
 - Electrical durability design by numerical analysis approach -  
 Shuichi Itoda and Takeshi Nishida ..... 68 (68)

**3. Technology Developing a New Growth Area**

**Development of air quality sensor for air purifier**  
 - Accuracy enhancement by optical system and dust collection structure -  
 Hajime Kawai, Hiroyuki Miyamoto, Yuji Hirose and Satoshi Yamamura ..... 76 (76)

**Study and development of low-noise MEMS acoustic sensors**  
 - Important considerations for air damping and process stability -  
 Tadashi Inoue, Yuki Uchida, Koichi Ishimoto and Yasuhiro Horimoto ..... 82 (82)

New Publications ..... 88 (88)

# オムロンのコア技術

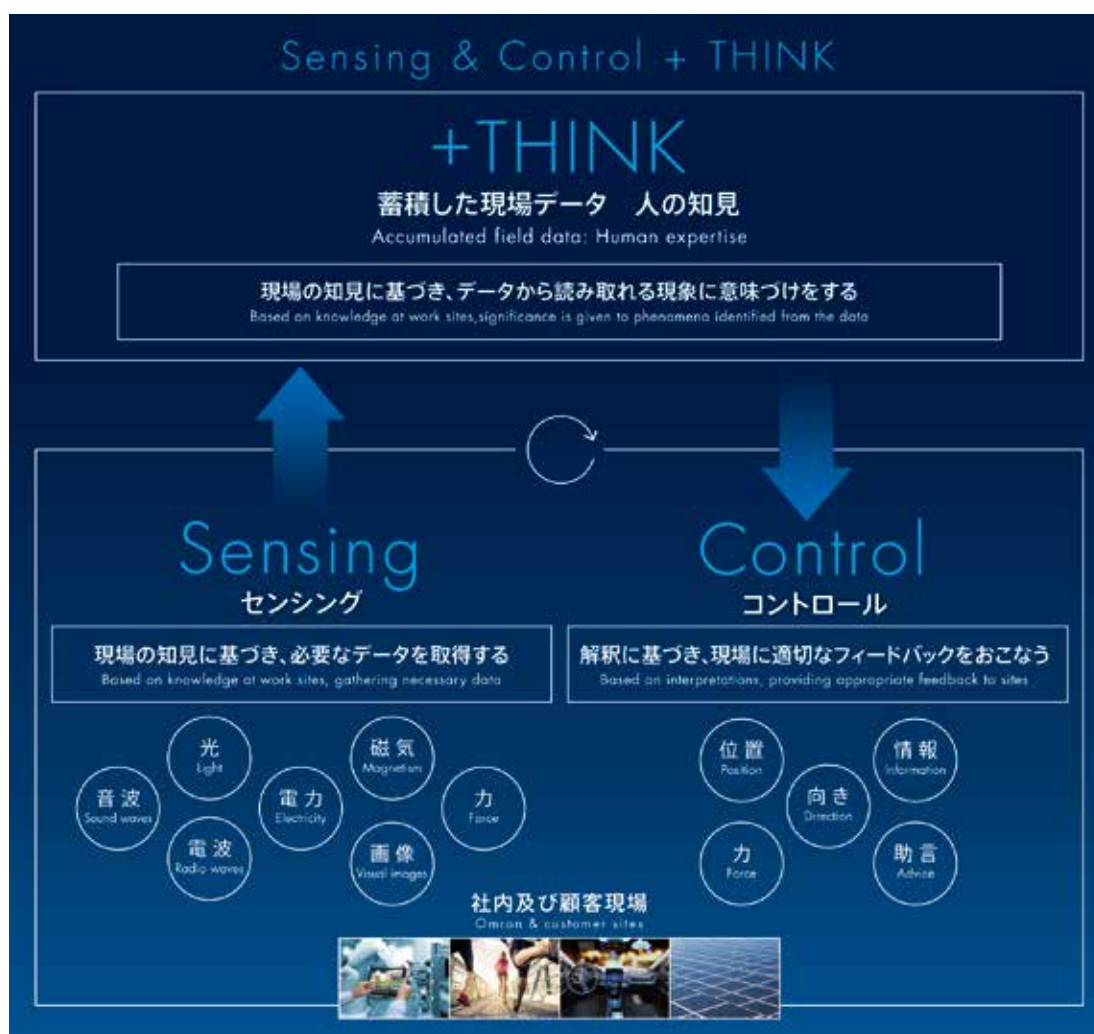
## Sensing & Control + Think

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

「Sensing」とは現場の知見に基づき、人やモノの状態・情報から必要なデータを取得することです。「Control」とは、「Sensing」によって得られた情報をもとに、現場に適切なソリューションを提供することです。

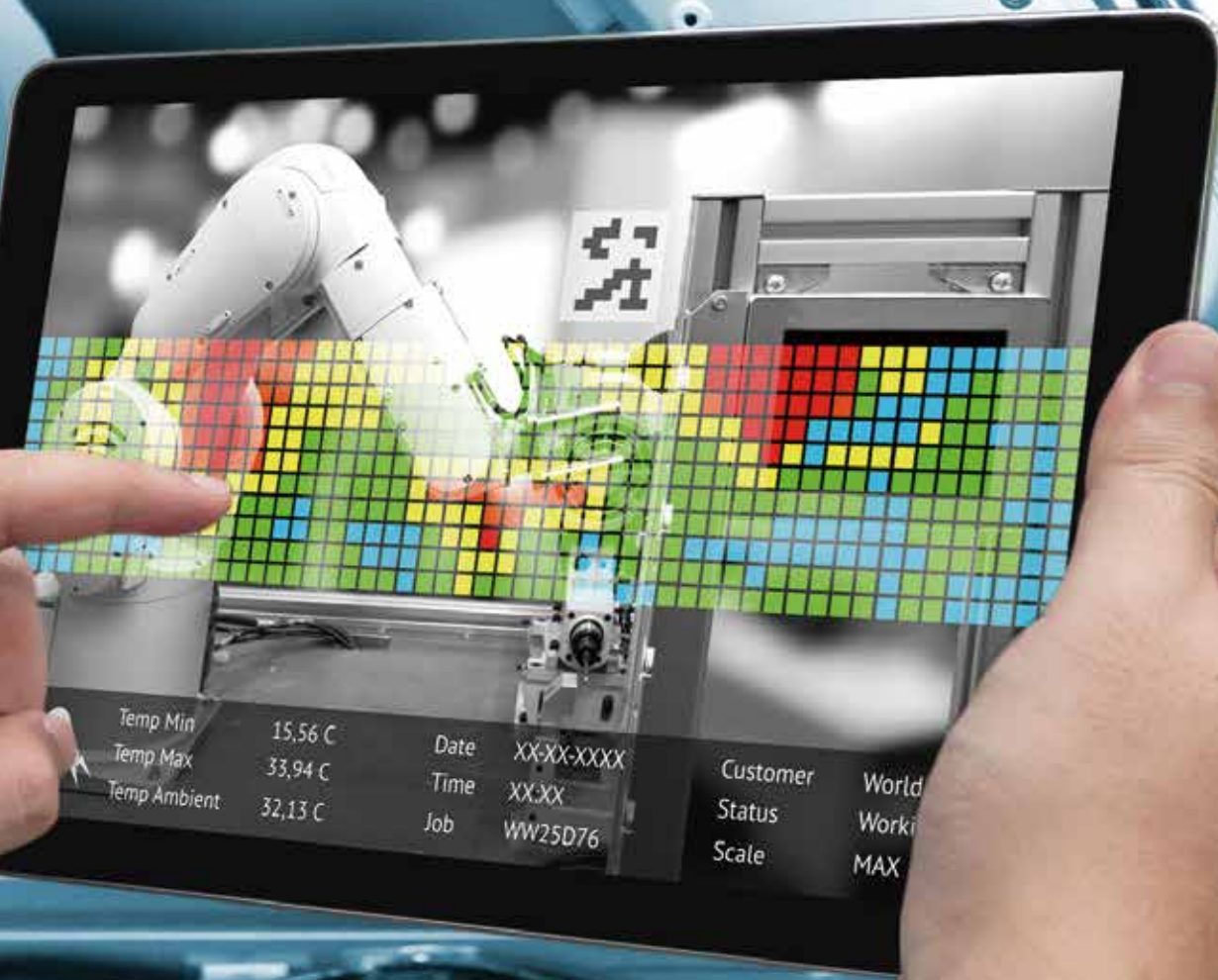
オムロンでは、この「Sensing & Control」に「人の知恵」を表す「+ Think」を新たに加えました。今後AI、IoTなどの技術革新が進む中で、より賢く価値に変換させる必要があるからです。

オムロンでは、「ファクトリーオートメーション」、「ヘルスケア」、「モビリティ」、「エネルギーマネジメント」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。



# 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

## 1-1 ファクトリーオートメーション



# マシンコントローラに搭載可能な AI 技術の開発 (1)

## 装置制御用データを利用した生産ラインの異常検知手法について

鶴田 浩輔・峯本 俊文・広橋 佑紀

AI・IoT・ビッグデータが、これまで人の経験・ノウハウに依存してきた製造現場の生産管理や設備保全を変えようとしている。熟練者は、現場の装置の挙動を五感で常に感じ取ることで生産設備の「いつもと異なる状態」を察知し、経験や知識をもとに速やかな対策を行っている。そのため、現場熟練者と同じような設備の目利きを可能にするためには、現場で高速に動作する装置の動きを十分に捉えることができる高頻度で計測されたデータの解析が必要になる。本稿では、装置を制御するコントローラから取得できる制御データを活用した生産設備の異常検知手法を提案する。また、提案手法によるデータ解析結果に基づいてコントローラがリアルタイムに異常を検知できることを、実験用包装機を用いて実証する。

# Development of AI Technology for Machine Automation Controller (1)

## Anomaly Detection Method for Manufacturing Equipment by Utilizing Machine Data

*Tsuruta Kosuke, Minemoto Toshifumi and Hirohashi Yuki*

The equipment maintenance and production management for manufacturing, which have been dependent on experience and knowledge of workers, are being improved by AI, IoT, and big data. It is necessary to collect and analyze high-time resolution data that is sufficient to describe the condition of the manufacturing equipment in order to automate maintenance tasks similar to experts. In this paper, we propose an anomaly detection method by utilizing machine data which can be acquired from industrial controllers installed in production lines. In addition, we show that a controller with the proposed method, which is installed in an automatic packaging machine, can detect anomalies in real time.

### 1. まえがき

少子高齢化の影響により、我が国における生産年齢人口の割合は年々減少を続けている。総務省の国勢調査によると、生産年齢人口比率は1995年をピークに減少に転じており、将来的な労働力不足が懸念される。ドイツなどの経済大国でもこの傾向は共通しており、今後、世界共通の課題になると予想される。また、世界の工場としての役割を担う中国やその他新興国の人件費も高騰が続いており、労働力の確保はますます難しくなっている。このような状況のもと、製造分野においては、AI (Artificial Intelligence) やIoT (Internet of Things) を活用した省人化の動きが加速しており、特に生産管理や設備保全などの業務に対して技術導入が盛んに検討されている<sup>1)・3)</sup>。

最新の製造現場においては、IoTによって膨大な量の制御データがクラウドに収集され、ビッグデータ分析による

生産性の改善を狙う商品・サービスが導入されはじめている。これらを活用することで、日次レベルの生産改善に対して有効な生産管理や設備保全が可能となり、生産ラインの稼働率向上が期待できる。一方で、保全ノウハウの多くは未だ現場に常駐する熟練者の勘や経験に強く依存している。熟練者は、現場の装置の挙動を常に五感で感じ取ることで生産設備の「いつもと異なる状態」を察知し、過去の経験や知識をもとにその異常現象の要因を推定することで速やかな対策立案・実行を行っている。そのため、データに基づいた保全の質のさらなる向上には、少なくとも現場で動作する設備の挙動を十分に捉えられるサンプリング周期 (例えば、ミリ秒周期) でデータを収集し、その解析結果を作業者にリアルタイムにフィードバックする必要があると考えられる。そこで我々は、生産設備の制御に用いられる産業用コントローラに着目し、非熟練者であっても熟練者と同様の設備の目利きを可能とすべく、設備の制御周

連絡先: 鶴田 浩輔 kosuke\_tsuruta@omron.co.jp



期で高速・高精度に収集される制御機器の入出力情報を活用した異常検知手法について検討を行った。

本稿では、周期的に繰り返し生産を行う製造装置を対象に、装置を制御するコントローラから取得できる制御データを活用した異常検知手法を提案する。また、提案手法によるデータ解析結果に基づいてプログラムされたコントローラがリアルタイムに異常を検知できることを、実験用に準備した包装機を用いて実証する。

## 2. 課題

製造現場において用いられる代表的なコントローラである PLC (Programmable Logic Controller) は、生産ラインの自動化に使われていた電磁リレーの置き換えのために誕生した。PLCはプログラムによって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を主に実行するが、最近はモーション制御やネットワーク通信の機能を備えるなど高機能化が進み、製造現場情報と上位の生産管理システムとのインタフェースとしての役割も果たしている。この種のコントローラは、リレー接点の ON/OFF やサーボモータのトルクなど生産設備を構成する様々な制御機器の入出力情報 (以後、制御データとよぶ) を数100  $\mu$ s から数ms のサイクルで収集できる。

コントローラで収集できる制御データを活用することで次のような利点が考えられる。

- 新たにセンサを設置せずとも制御に活用されているセンサ、サーボモータなどの機器の装置挙動の変化を捉えることが可能
- クラウドのサブシステムとしてコントローラをとらえたとき、データの解析方法 (前処理や装置異常の検知方法など) を事前にプログラミングしておけば、全てのデータを上位システムに送る必要がなくなり、通信負荷を軽減させることが可能

これらの価値を実現するために、我々は次の2つを解決すべき課題と置いた。

- 装置単位で異常を捉えるためのデータ解析
- コントローラ上でのデータ解析の実行

次章からはこの2つの課題を解決するための方法論について述べる。

## 3. 技術内容

### 3.1 包装機

3.2節以降の説明のため、はじめに実験用包装機について紹介する。本稿で取り扱う包装機は、樹脂製フィルムによって製品を枕状に包装する横型ピロー包装機である。図1に示すシステム構成のとおり、この包装機は4つのサーボモータと3つのファイバセンサから構成されており、これらを用いてコントローラが巧みな制御を行うことで包装を自動化している。本包装機では、ワーク搬入工程、センタシール工程、エンドシール工程の3工程を

経ることでワークを枕状に包装する。

4つサーボモータそれぞれのトルク・速度・位置と3つのファイバセンサの論理信号の計15個の信号は、包装機を制御するコントローラにフィールドバスを介して一定周期で収集される。収集されたデータの一例として、トップシール軸のトルク・速度・位置とワーク検知センサの論理信号を図2に示す。これらのデータの挙動を見ると、およそ1秒間隔の周期性をもつことが分かる。これは、包装機が毎秒1個の速度でワークを包装しているためである。

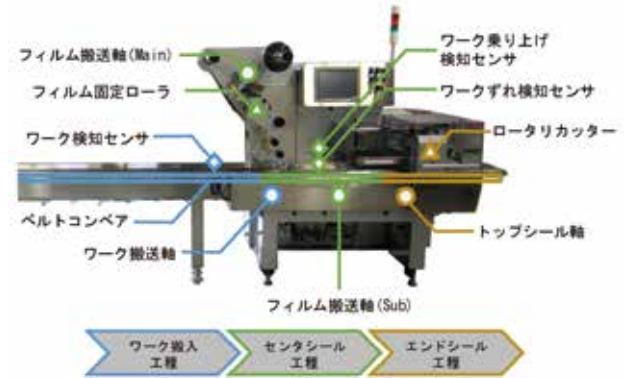


図1 包装機の構成

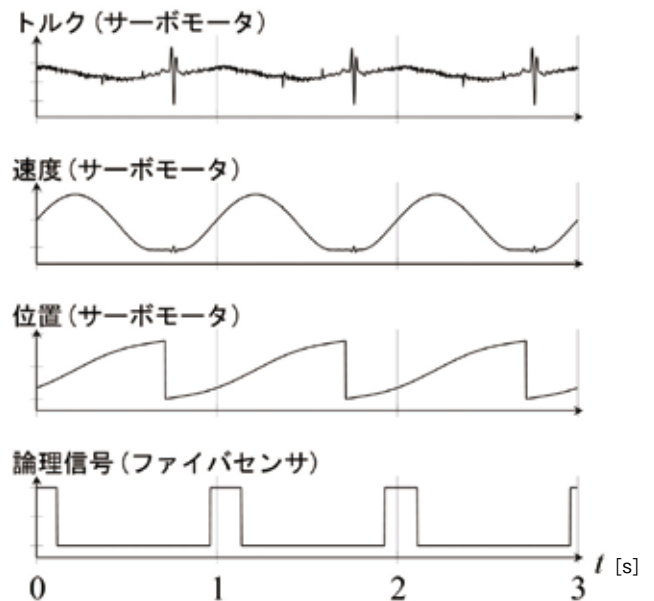


図2 包装機で得られるデータの一例

### 3.2 制御データを用いた生産設備の異常検知

2章で述べた2つの課題を解決するために、我々はコントローラへの機械学習アルゴリズムの導入を検討した。高い信頼性が要求される工場現場では、推定結果が得られた理由についての説明性の高さが重要となる。そこで本提案手法では、コントローラで異常検知を運用する前に、アルゴリズムで使用する特徴量をデータ解析で決定しておき、どの特徴を用いて異常検知が実行されるかを明確化することで推定結果の説明性を担保する。また、計算リソースの少ない既存

のコントローラでもリアルタイムに異常検知を実行可能にするため、運用時に計算コストが低い手法を外れ値検知アルゴリズムとして採用する。

提案手法の概念図を図3に示す。具体的には次のような手順で制御データを用いた異常検知を実現する。

- 制御データを収集し、特徴抽出・選択、外れ値検知を行うことによってオフラインで異常を検知(パラメータ算出)
- データ解析で得られた結果(見るべき特徴量と閾値)をコントローラにパラメータとして与え、コントローラでリアルタイム異常検知を運用

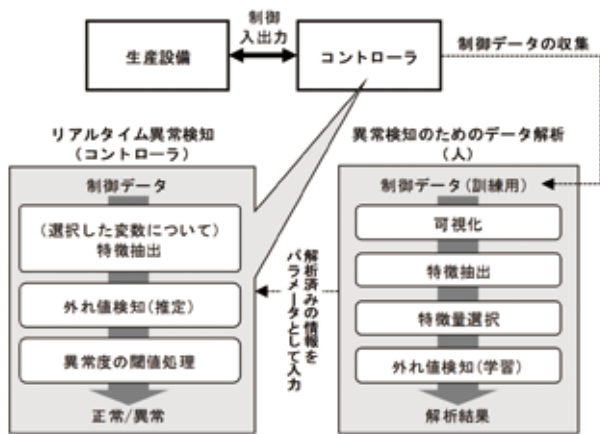


図3 提案手法の概念図

**3.3 可視化** 人が現状を把握するために、コントローラのデータを用いて最初に行うのは可視化である。正しくデータが取得できているか確認する。

**3.4 特徴抽出** 本稿では、生産設備の繰り返し動作の区間をフレームと呼ぶ。前述の包装機を例に挙げると、一つのワークが包装される1秒の区間が一つのフレームに相当する。本提案手法では、制御データをフレームごとに区切って特徴量を算出する。また、データが連続値をとる場合とONとOFFの二値の論理値をとる場合で、それぞれ別の特徴量を用いる。次にその特徴量について説明する。

ある制御データの  $i$  番目のフレームのデータを

$$\{x_n(i, 1), x_n(i, 2), \dots, x_n(i, N_i)\}$$

とおく。ここで、 $n$ はトルクや速度といった制御データの種別、 $N_i$ はフレーム  $i$  のデータ総数を意味する。なお、フレーム  $i$  の開始時刻を  $t_i$  とすると、フレーム  $i$  の  $j$  番目のデータ  $(i, j)$  が取得された時刻  $t_{i,j}$  は、

$$t_{i,j} = t_i + (j - 1) \cdot \delta t$$

と表すことができる。ここで、 $\delta t$ は制御データのサンプリング周期である。

$(i, j)$  が連続値をとる場合の特徴量算出の概念を図4に示す。この特徴量算出は、フレームごとの分布の変化を統計

的な特徴としてとらえるものである。以下に連続値についての特徴量の算出式を示す。

- 1) 平均値:  $\varphi_{n,1}(i) = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} x_n(i, j)$
- 2) 標準偏差:  $\varphi_{n,2}(i) = \sqrt{\frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} x_n^2(i, j) - \varphi_{n,1}^2(i)}$
- 3) 歪度:  $\varphi_{n,3}(i) = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} (x_n(i, j) - \varphi_{n,1}(i))^3}{N_i \varphi_{n,2}^3(i)}$
- 4) 尖度:  $\varphi_{n,4}(i) = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} (x_n(i, j) - \varphi_{n,1}(i))^4}{N_i \varphi_{n,2}^4(i)}$
- 5) 最大値:  $\varphi_{n,5}(i) = \max_{j \in \{1, \dots, N_i\}} \{x_n(i, j)\}$
- 6) 最小値:  $\varphi_{n,6}(i) = \min_{j \in \{1, \dots, N_i\}} \{x_n(i, j)\}$

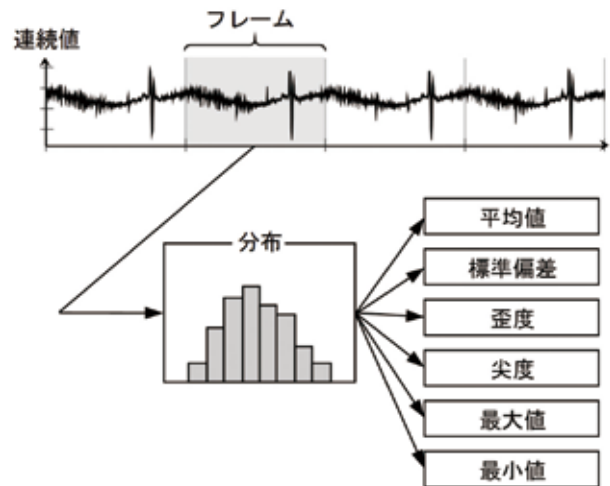


図4 連続値データの特徴抽出

$(i, j)$  が論理値をとる場合の特徴量算出の概念を図5に示す。この特徴量算出は、フレームごとの論理値が反転するタイミングの変化を時間幅の特徴でとらえるものである。以下に論理値についての特徴量の算出式を示す。

- 1) ON 時間:  $\tau_{n,1}(i) = \sum_{j=1}^{N_i} h_{on}(x_n(i, j)) \cdot \delta t$
- 2) OFF 時間:  $\tau_{n,2}(i) = \sum_{j=1}^{N_i} h_{off}(x_n(i, j)) \cdot \delta t$
- 3) ターン ON 時間:  $\tau_{n,3}(i) = \sum_{j=1}^{N_{on,i}} \delta t$
- 4) ターン OFF 時間:  $\tau_{n,4}(i) = \sum_{j=1}^{N_{off,i}} \delta t$
- 5) フレーム時間:  $\tau_{n,5}(i) = \sum_{j=1}^{N_i} \delta t$

ここで、 $h_{on}$ は入力がONのときに1、OFFのときに0を出力する関数、 $h_{off}$ は入力がOFFのときに1、ONのときに0を出力する関数である。また、 $N_{on,i}$ はフレーム  $i$  において論理値がOFFからONにはじめて切り替わるまでのデータ数、 $N_{off,i}$ はONからOFFにはじめて切り替わるまでのデータ数を意味する。

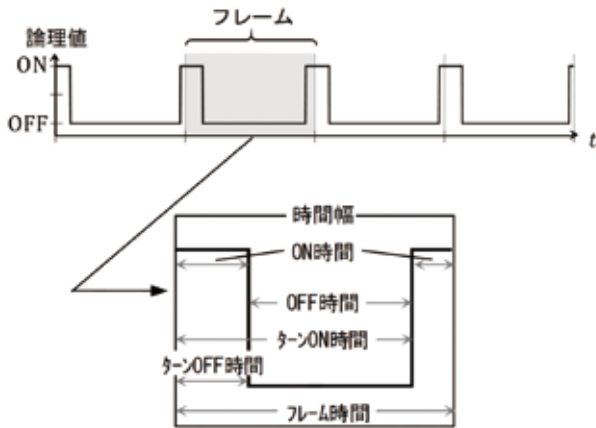


図5 論理値データの特徴抽出

**3.5 特徴量選択** 算出したすべての特徴量について、人がその意味をひとつずつ確認することは非常に煩わしい。また、すべての特徴量をコントローラで一様に監視させると、計算リソースが不足してしまう。そこで、何らかの方法で見べき変数を絞り込むことが必要となる。もちろん、対象の生産設備について詳細を知っており、見るべきポイントがわかっているならば、その変数を使ってしまうえばよい。しかし、生産設備について詳細を知る人間は極少数であることが多く、知見だけで見るべき変数を選択することは一般的には難しい。そのような場合は、データ解析によって異常検知に有用な変数の選択を行う。変数選択の手法としては、決定木<sup>5)</sup>やロジスティック回帰などの機械学習を用いる。具体的には、訓練データに付けられた正常・異常のラベルを目的変数、制御データの各フレームから算出した全ての特徴量を説明変数とおき、目的変数を説明するために最も適した説明変数を選択する。そのため、この変数選択には正常・異常のラベルがつけられた訓練データが必要になる。

データ解析によって異常検知に使用する特徴量を絞っておくことで、計算リソースが潤沢でないコントローラであっても、選択済みの特徴量に対してのみ処理を実行すればよい。そのため、リアルタイム性能を維持しやすくなる。

**3.6 外れ値検知** 外れ値検知は、特徴量を入力に、対象データの正常からの乖離を異常度として算出する。実用化されている外れ値検知手法として、対象データの分布に依存しないLocal Outlier Factor、One Class SVM (Support Vector Machine) などが挙げられる。外れ値検知手法には、様々な手法があるが、5章の実験では高速・軽量に処理が可能な Isolation Forest<sup>4)</sup> を採用した。

Isolation Forest は、データの疎密に基づいた木構造ベースの外れ値検知手法であり、ランダムに決定した座標軸に垂直な超平面によって訓練データを再帰的に分割することで2分木を生成し、複数生成した2分木のノードの深さ情報をもとに異常度を算出する手法である。データ解析時には訓練データを用いて2分木構造を生成し、外れ値検知を行うモデルの学習を行う必要がある。また、外れ値検知モデルが出力する異常度に対して任意の閾値を設定すること

によって、訓練データを基準とする外れ値の判別が可能となる。

#### 4. 概念実証実験

本章では、3.1節で述べた実験用包装機を制御するコントローラを用いて、提案手法の実用性について検証した結果を述べる。

**4.1 実験概要** 包装機で発生する包装不良の一つに「シール位置ずれ」がある。「シール位置ずれ」は、センタシール工程においてフィルムを溶着する際、何らかの原因によってフィルムが適切に供給されず、フィルムが左右にずれた状態で溶着されてしまう不良である。ずれた状態でフィルムが溶着されることで密封が不十分になるなど、重大な製品不具合につながる。図6は「シール位置ずれ」を結果とした場合の因果関係を示している。これは、「フィルム固定不足」、「革ベルト摩耗」、「不均一なフィルム巻き」、「ポリベルト伸び」が原因で生じた「フィルム蛇行」という現象が、最終的に「シール位置ずれ」を発生させたという関係を表している。

本実験では、異なる原因から生じる「フィルム蛇行」を「シール位置ずれ」が発生する予兆として異常検知することを試みる。「フィルム蛇行」を「シール位置ずれ」の予兆として検知できれば、「シール位置ずれ」が発生する前に対策をうつことが可能になるため、不良発生を未然防止できると考えられる。具体的には、3.1節で示したように4つのモータそれぞれのトルク・速度・位置と、3つのファイバセンサの論理値の合計15個の信号を計測し、これらのデータを入力として3.2節から3.6節で説明した手順を実行する。なお、実験時の包装機の稼働条件は表1のように設定した。



図6 「シール位置ずれ」の因果関係

表1 実験時の包装機の稼働条件

包装長	190 mm
包装速度	60袋/分
サンプリング周期	2 ms
ワーク	消しゴム (幅24 mm×奥行き65 mm×高さ13 mm)

**4.2 異常検知のためのデータ解析** 包装機が正常稼働しているときのワーク400個分と、「フィルム蛇行」が発

生しているときのワーク100個分の制御データを異常検知のための訓練データとして収集した。なお、「フィルム蛇行」は、図7に示すようにフィルム固定用のロッキングレバーを完全に緩めることで再現した。その後、収集した訓練データについて特徴量を算出し、異常検知に用いるための特徴量の選択、外れ値検知モデルの学習、正常と異常を判別するための閾値の決定を行った。

訓練データの一部を図8に示す。このデータを決定木によって解析した結果、表2に示す5つの特徴量が「フィルム蛇行」を検知するために有用な特徴量として選択された。

選択した特徴量を使用して外れ値検知モデルの学習を行い、訓練データを外れ値検知モデルに入力したときに出力される異常度の分布を図9に示す。詳細は後述するが、ここでは0.505を正常と異常を判別する閾値として採用した。



図7 フィルム蛇行の模倣

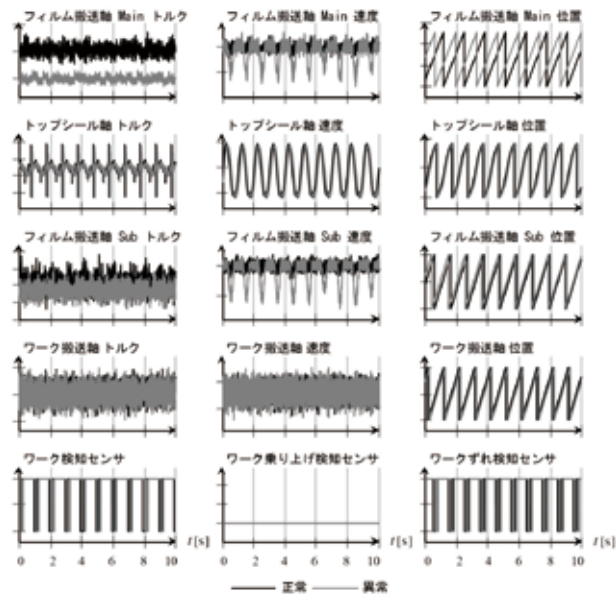


図8 訓練データの一部

表2 「フィルム蛇行」の検知に用いた特徴量

データ	特徴量
フィルム搬送軸Mainトルク	平均値
フィルム搬送軸Subトルク	平均値
フィルム搬送軸Mainトルク	最大値
フィルム搬送軸Mainトルク	最小値
フィルム搬送軸Mainトルク	標準偏差

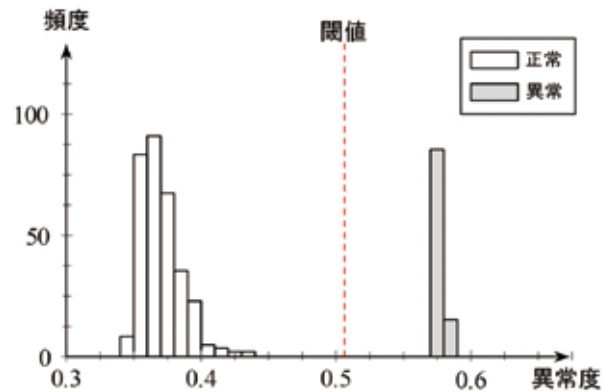


図9 訓練データの異常度の分布

**4.2 リアルタイム異常検知** 前節のデータ解析で選択した特徴量、学習した外れ値検知モデル、異常判別のための閾値を実際のコントローラに組み込み、「フィルム蛇行」の異常検知をリアルタイムに実行した。本実験では、次の①から④の手順で包装機を動作させた。

- ①包装機を通常稼働する
- ②10秒ごとにロッキングレバーの角度を5°ずつ段階的に緩め、「フィルム蛇行」発生させる
- ③包装機を非常停止させロッキングレバーを元の位置に戻し、復旧作業を実施する
- ④安全を確認して包装機を再稼働する

図10に外れ値検知モデルが出力した異常度の時間変化を示す。異常度は値が高いほど正常状態から乖離していることを意味する。なお、図中に示した①から④の番号は上述の実験手順と対応している。また、包装機停止中は異常度の算出を行っていないため、その区間のプロットは省略した。

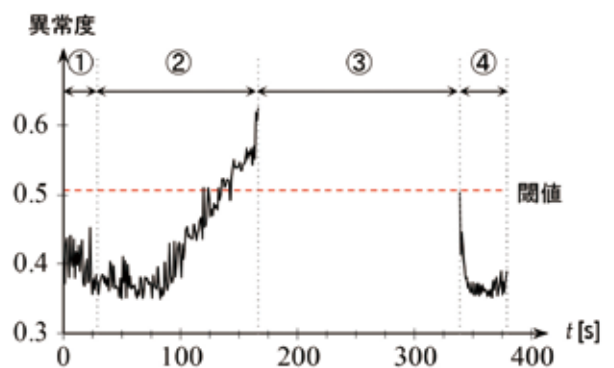


図10 「フィルム蛇行」のリアルタイム検知結果

**4.3 考察** 前節で示した図10の異常度の時間変化に示されるとおり、ステータス②では、ロッキングレバーを緩めることで発生した「フィルム蛇行」によって異常度が上昇しており、最終的に閾値を超えていることが確認できる。さらに、ステータス③で包装機の復旧作業を実施した後、再稼働を行ったステータス④では異常度が閾値以下に戻っていることも確認できる。なお、緩め始めて異常度に変化

が見られないのは、ロッキングレバーにあそびがあるためである。以上の結果から、模擬的に起こした「フィルム蛇行」が提案手法によって正しく検知できているといえる。また、「フィルム蛇行」の発生に応じて異常度が段階的に上昇していることから、異常度の傾向を監視することで、非熟練者であっても装置の「いつもと異なる状態」を知ることができると考えられる。例えば異常度に対して段階的な閾値を設けることで、適切なメンテナンスのタイミングを作業者に通知することも可能になる。

本実験では、図9に示したとおり、正常データから算出された異常度の最大値と異常データから算出された異常度の最小値の中間点を閾値として用いたが、この閾値は異常の誤検知と見逃しのトレードオフを決めるものであり、実際は検知対象とする異常の特性に応じて調整が必要である。さらに、設備の運用中に異常度の分布の特性が変化する場合も十分想定されるため、その特性に応じて閾値を更新する必要もある。

今回検知対象とした異常は「フィルム搬送軸Mainトルク」の生のデータに対して閾値を設定することでも検知可能であることが図8からわかる。しかし、特定の異常を検知するためにどの信号を監視すればよいかを人が判断するには、3.5節で述べたような煩雑な確認作業が必要となる。本提案手法を用いると、異常検知に有用な特徴量を一連のデータ解析によって自動的に決定できることに加え、機械学習に基づくアルゴリズムを採用したことで、複雑なルールを必要としない単純な閾値設定による異常判定の設定が可能となりうる。

本提案手法は、これまで熟練者の勘や経験に依存して判断していた装置の健康状態を一定のデータ解析の手順を踏むことによって客観的な数値としてとらえることができるため、装置の稼働率向上を実現する強力な手段となる。

## 5. むすび

本稿では、生産設備を制御するコントローラのデータを活用し、異常検知を行う方法を提案するとともに、実際の包装機への適用事例を示した。

今後は、社内外の検証や技術開発を通じて提案技術の適用事例の拡大を図るとともに、多種多様な製造業の改善ニーズに対応可能なAI機能の研究開発を継続し、様々な現場課題を解決できる技術へと進化させていきたい。なお、本稿で紹介した技術は、「AI搭載マシンオートメーションコントローラ」<sup>6)</sup>で採用されている。

最後に、今回の実験や検証にあたり、多大なご協力をいただいたコントローラの技術開発および商品開発に携わった方々に深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) オムロン株式会社. “オムロン草津工場事例: ビッグデータから見える製造現場”. <http://www.fa.omron.co.jp/solution/sysmac/technology/bigdata/index.html>, (参照 2018/03/01).
- 2) 日本アイ・ビー・エム株式会社. “予知保全 (PQM) 資産の障害を予知/予防し、稼働率や歩留まりの向上を実現”. <https://www-01.ibm.com/software/jp/info/predictive-maintenance/>, (参照2018/03/01) .
- 3) 日本電気株式会社. ““いつもと違う”を発見し、故障や異常を未然に防ぐ。インバリエント分析”. <http://jpn.nec.com/ai/analyze/invariant.html> (参照2018/03/01) .
- 4) John Ross Quinlan. Induction of decision trees. Machine learning, Vol. 1. Issue.1, pp.81-106, 1986.
- 5) Fei Tony Liu; Kai Ming Ting; Zhi-Hua Zhou. Isolation-based anomaly detection. ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data (TKDD) , Vol. 6, No. 1, p. 3, 2012.
- 6) オムロン株式会社. “マシン制御とAIをリアルタイムに融合「AI搭載マシンオートメーションコントローラ」を開発”. <http://www.omron.co.jp/press/2017/04/c0425.html>, (参照 2018/03/01) .

## 執筆者紹介



鶴田 浩輔 Kosuke Tsuruta  
技術・知財本部 知能システム研究開発センター  
専門: 情報工学



峯本 俊文 Toshifumi Minemoto  
技術・知財本部 知能システム研究開発センター  
専門: 情報工学



広橋 佑紀 Yuki Hirohashi  
技術・知財本部 知能システム研究開発センター  
専門: 機械工学

## マシンコントローラに搭載可能な AI 技術の開発 (2)

### 異常検知コントローラプロトモデル開発における実証例について

阿部 泰明・上山 勇樹・阪谷 信幸・藤井 高史

近年、生産現場では装置や製品品質を常時監視し、それらの異常や不良を予兆の段階から検知・対処する取り組みが進められている。従来は、監視用にセンサを設置し、そこから得られたデータをクラウドなどで解析していたが、コスト面などの理由で導入は限定的だった。そこで、装置制御を管理・実行しているマシンコントローラに AI (Artificial Intelligence) を搭載し、異常監視機能を低コストで生産現場に導入することが提案されている。

しかし AI には様々な機能があり、また同様の機能であっても数々のアルゴリズムが存在しているため、その中から、生産現場にとって受け入れやすく且つマシンコントローラへの搭載に向いている AI を適切に選定するのは難しい。さらに、その AI を装置制御に悪影響を与えないように実装しなくてはならず、AI を搭載したマシンコントローラの実現はハードルが高かった。

そこで、筆者らは装置の異常検知をターゲットとして、生産現場で特に求められる要件を「高速・軽量であること」、「学習データの必要量が少ないこと」、「判定結果に対する納得性が高いこと」と設定することで、異常検知用 AI から候補となる AI を選定し、さらにマシンコントローラのタスク優先度管理及びスケジューリング機能を利用して装置制御と AI が共存可能な「異常検知マシンコントローラプロトモデル」を開発することに成功した。

## Development of AI Technology for Machine Automation Controller (2)

### The Insight Gained Through Implementation of Anomaly Detection AIs to the Machine Controller.

*Yasuaki Abe, Yuhki Ueyama, Nobuyuki Sakatani, Takashi Fujii*

Recently, activities of productivity improvement have been attempted at production sites with predictive approaches. Cloud-based machine monitoring systems were once introduced but were not prevailing due to cost and others. As a countermeasure, it has been proposed to install an anomaly monitoring AI in the machine controller so as to introduce the feature to the production site at low cost. However, it is difficult to select an AI suitable for controller in implementation from various ones. Furthermore, it is difficult to implement the AI so as not to affect the machine control.

Therefore, the authors achieved to develop "Anomaly Detection AI equipped Machine Controller Prototype". This controller makes it possible to coexist with machine control process and AI process without interfering each other. In order to achieve that, they selected candidate AI programs from the anomaly detection AI programs and utilized task priority management and task scheduling functions of the machine controller.

#### 1. まえがき

近年、AI (Artificial Intelligence) 技術の発展が著しい。コンピュータの進化に伴い、これまでは扱えなかった多量のデータを処理できるようになり、データに内在する意味を抽出する手法が数多く提案されている。

AI 技術が発展する中、多量のデータを扱える IT システムの必要性が高まっており、その流れの中で、エッジコン

ピューティングというアプローチが構想されている<sup>1)</sup>。エッジコンピューティングとは、センサなどのデータソースデバイスに近い、システムの下位レイヤ (エッジ) ヘデータ処理機能を持たせ、分散処理させることで、クラウドなど上位レイヤでの処理負荷を軽減させるという考え方である。これは、単に上位レイヤのコンピュータやネットワークにかかる負荷を軽減させるだけでなく、高速な応答性が要求されるようなシステムにも必要な考え方として、自動運転

などのリアルタイムシステムにも適用が進められている。

ファクトリーオートメーション (FA) の分野でも、IT と OT (Operational Technology) の融合が志向される中、エッジコンピューティングの重要性が認識されてきている<sup>2)</sup>。

FA 分野でのエッジコンピューティングのメリットには通信負荷の軽減やセキュリティの向上、高速な応答性などが挙げられる。中でも高速な応答性は、ミリ秒単位で制御されている生産装置に活用するには不可欠な性能である。

エッジコンピューティングと AI を組み合わせて、実際に生産の高度化に活用しようという試みも始まっている。例えば、生産装置に取付けたマイクから取得したデータを、エッジ端末で収集・解析し、AI 技術によって装置の異常を早期に検知する取組みが行われている<sup>3)</sup>。ただし、多量のデータが存在する製造現場ではあるが、AI を十分に活用できた事例はまだ少なく、各社が競って技術開発を行っている状況である。

## 2. 開発方針

**2.1 生産現場での AI 活用** 近年、生産現場では、熟練者不足の影響で、これまで熟練者の経験や勘に頼ってきた装置異常や製品不良の予兆を早期に捉える技能が失われ、結果として、装置の故障や不良品の製造による生産性低下が深刻化している。

その中で、装置異常や製品不良を、装置に設置した多数のセンサから収集したデータを、AI 活用により常時監視・解析することで、早期の異常発見・対処を可能にし、更に異常の原因を人の知見により分析することで、ロスの無い開発・設計につなげようという取り組みなどが進められている<sup>4)</sup>。

**2.2 現状の問題点と本テーマの技術的目的** 一般的に、AI の搭載先は、処理能力の高いクラウドなどのサーバであることが多いが、装置異常の検知や制御へのフィードバックを考えた場合、全ての AI 処理をサーバ上で実行するのは、センサ設置費用や通信費などのコスト面や、応答性やセキュリティなどの技術面で限界がある。そこで、このような限界を回避するために、マシンコントローラに AI を搭載することが考えられており、オムロンでも「AI マシンオートメーションコントローラ」を開発している<sup>5)</sup>。

マシンコントローラに AI を搭載することのメリットとして、装置制御に使用する多くのセンサやアクチュエータと常時データ通信をしているため、装置制御に関する最新のデータを網羅的に取得できることがある。そこに AI 処理を組み込むことで、装置の最新の状態を的確に把握し、装置の状態に応じて即時に装置へフィードバックを行うような制御設計が可能になる。

しかし、AI には様々な用途があり、同様の用途であっても数々のアルゴリズムが存在しているため、それらの中から、生産現場で受け入れやすく且つマシンコントローラ

への搭載に適した AI を選定することは難しい。しかも、その AI を装置制御に悪影響を与えないように実装しなくてはならない。そのため、AI を搭載したマシンコントローラの実現はハードルが高かった。

そこで、筆者らは装置の異常検知をターゲットアプリケーションと設定し、「異常検知マシンコントローラプロトモデル」の開発を行い、その中で上記の課題を解決していくことを試みた。

**2.3 開発方針** 本論文では、装置の異常を検知するなどの用途を想定した「異常検知 AI」を対象に、コントローラ搭載に適したものを選定した際の実装内容を紹介する。

異常検知マシンコントローラプロトモデル開発において、代表的な異常検知 AI の中から、まず生産現場に導入する際に満たすべき要件により絞り込み、更にそれらをマシンコントローラ上に実装し実行性能を検証することで、マシンコントローラに搭載するのに最適な異常検知 AI を選定する。

また、制御処理と AI 処理をマシンコントローラ上で共存させるために、制御処理が確実に優先されるようにし、制御処理が AI 処理に阻害されないようにする方針とする。

## 3. 異常検知マシンコントローラプロトモデル開発

**3.1 開発概要** 本開発では、生産中に発生する装置の異常を瞬時に捉え、故障や不良品の発生を未然に防ぐような用途を想定し、オムロンのマシンコントローラに、異常検知 AI を搭載した異常検知マシンコントローラプロトモデルを開発した。

オムロンのマシンコントローラは、制御プログラムを制御周期と呼ぶ一定の時間間隔で実行する。制御周期は、最短 125  $\mu$ s が実現されており、センサ・アクチュエータとの主なデータ通信も、この周期に同期して実行される。このプロトモデルでは、このような制御データを監視し、異常検知結果を制御プログラムにフィードバックする仕組みをオムロンのマシンコントローラ上で実現した。

本開発では、主に異常検知 AI の選定と、マシンコントローラ上で制御と AI が共存するための設計・開発を行った。

異常検知 AI の選定においては、まず異常検知 AI の代表的なものを挙げ、それらを生産現場に導入する際に満たすべき要件により絞り込み、外れ値検知型と呼ばれる 2 種類の異常検知 AI をマシンコントローラ搭載の候補に挙げた。更にそれらを実際にマシンコントローラに実装し、処理時間などの実行性能を測定することで、ISF (Isolation Forest) というアルゴリズムを選定した。

制御と AI の共存設計に関しては本論文では詳細については触れないが、オムロンのマシンコントローラが備える厳格なタスク優先度管理機能とタスクスケジューリング機能を利用し、AI 処理実行時でも制御周期を確実に守るようにし、常に制御処理が優先されるようにすることで、制御と AI が共存できるようにした。

**3.2 異常検知AI** 異常検知機能とは、期待される正常な挙動とは異なる挙動を、正常な挙動から判別する機能を指す。このような異常検知機能を実現するAI（異常検知AI）を分類し、代表的なアルゴリズムを表1に示す。

表1 異常検知AIの分類

分類	ターゲットとなる異常	代表的アルゴリズム
外れ値検知型	分布の大勢から外れた値	OneClassSVM, k-NN, LOF, k-means, ISF
変化検知型	振る舞い・状態の変化	統計的検定 (t検定など), 隠れマルコフ
予測モデル型	学習したモデルによる予測値からの誤差が大きな値	教師あり学習の主な手法 (線形回帰モデル, ナイーブベイズ, SVM, ランダムフォレストなど)
系の異常検知型	系の構造・相互依存関係の崩れ	相関係数の差の検定

**3.3 生産現場への導入要件** 生産現場にAIを導入するという事は、そのAIは生産現場で実際に使用する人にとって、使いやすいものである必要がある。

筆者らは、生産現場で使用しやすいAIとは、主に下記の3つの条件を満たすものであると考える。

(1) 高速・軽量であること

生産を安定して行うには装置制御を確実に実行する必要がある。その上で装置制御とAI処理とを協調させるには、制御と共存しても十分高速に実行できる程度の高速性が必要になる。制御プログラムを圧迫するようなメモリ使用量のアルゴリズムは適していない。

(2) 学習データの必要量が少ないこと

生産現場では立ち上げやメンテナンスにかけられる時間が限られている。その中で発生頻度の低い異常時のデータを多量に収集することは困難であると想定される。そのため、異常データが少ない場合でも使用可能なアルゴリズムが適している。

(3) 判定結果に対する納得性が高いこと

生産現場は、品質保証に対する責任を負っているため、製品不良やそれにつながる装置異常が発生した場合、その原因を説明する必要がある。そのため、異常検知機能を導入するにあたって、「なぜそれを異常と判断したのか」という根拠が理解しやすいものが好まれる。

上記の観点を踏まえ、比較的高速なアルゴリズムである外れ値検知型で、教師なし学習で動作しカーネル関数など説明性の低いアルゴリズムを含まない点で、LOF (Local Outlier Factor) と、より高速・軽量に特化しておりコントローラ搭載の適性が高いと見込まれる ISF を選定した。

**3.4 LOF・ISF** 次に、これらのアルゴリズムについて説明する。

・LOF

LOF は、あらかじめ取得された学習データ点群と監視

対象データ点の乖離度を示す指標の一つである。LOF が大きいほど監視対象の異常度合が高く、値が1に近いほど異常度合が低いことを意味する。このLOF に対して閾値を設定することにより、正常・異常の判別が可能となる。

任意次元の空間における特徴点  $u$  のLOFは次式で定義される。

$$lof_k(u) = \frac{1}{k} \sum_{u' \in N_k(u)} \frac{dist_k(u)}{dist_k(u')}$$

ここで、 $N_k(u)$ は  $u$  の  $k$  近傍である。また、 $dist_k(u)$ は、 $u$  から  $u'$  への近傍有効距離  $l_k(u \rightarrow u')$  を  $N_k$  について平均をとったものであり、次のように定義される。

$$dist_k = \frac{1}{k} \sum_{u' \in N_k(u)} l_k(u \rightarrow u')$$

$$l_k(u \rightarrow u') \equiv \begin{cases} \epsilon_k(u') & u' \in N_k(u) \wedge u \in N_k(u') \\ d(u, u') & (otherwise) \end{cases}$$

なお、 $\epsilon_k(u)$ は  $N_k(u)$ をすべて含む  $u$  を中心とした最小の球の半径、 $d(u, u')$ はユークリッド距離などの距離関数である。

例として、 $k=1$ とした場合のLOFについて考えてみる。学習データの集合  $Q$  が与えられた場合、ある監視対象点  $p$  のLOFは次の手順で算出される。算出の概念図を図1に示す。

1. 監視対象点  $p$  の最近傍点  $q \in Q$  を探索する (図1 (a))
2.  $l_k(p \rightarrow q)$  を求め、 $dist_k(p)$  を算出する (図1 (b))
3.  $q$  の最近傍点  $r \in Q \cup \{p\}$  を探索する (図1 (c))
4.  $l_k(q \rightarrow r)$  を求め  $dist_k(q)$  を算出する (図1 (d))
5.  $dist_k(p)$  および  $dist_k(q)$  から  $lof_k(p)$  を算出する

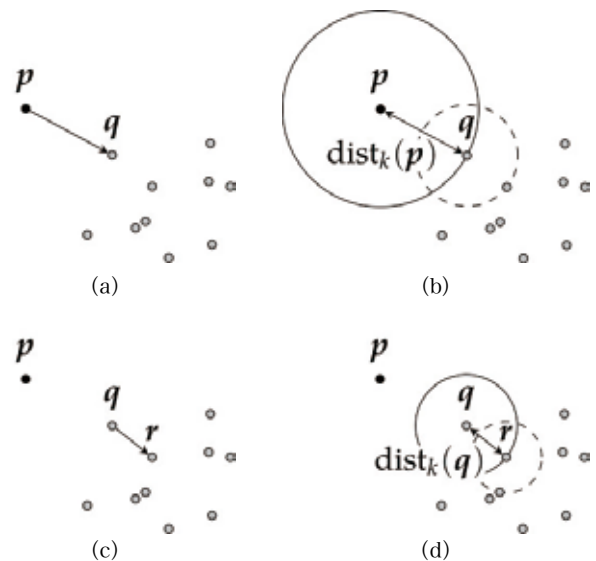


図1 訓練データの一部

以上からわかるように、LOF の算出においては監視対象点の近傍に加えて、比較対象となる点の近傍も考慮される。そのため、監視対象点の近傍のみを用いる  $k$  近傍法が苦手とするデータ分布に疎密があるような場合でも、LOF



を用いることにより自然な外れ値検知が期待できる。

・ ISF

ISFは、ランダムに決定した座標軸に垂直な超平面によって学習データを再帰的に分割することで2分木を生成し、その2分木のノードの深さ情報をもとに異常度合を算出する手法である。2次元の場合のデータ分割の例を図2に示す。同図に示されるように、疎な領域に属する点は比較的少ない分割によって分離できるが、密な領域に属する点を分離するにはより多くの分割が必要となる。つまり、2分木の深いノードには学習データによく出現するデータが、浅いノードには学習データではまれなデータが含まれている可能性が高い。

ISFによる外れ値検知の手順について詳述する。まず、 $n$ 点からなる学習データから $\psi$ 点のデータを $N_{tree}$ 回サブサンプリングする。次に、サブサンプリングした各データについて2分木を生成する。2分木は、ランダムに選んだ軸の最大値と最小値をそれぞれ上限と下限とするランダムな値によってデータを分割することで生成する、データの分割は図3に示すように、ノードに含まれるデータが1点以下となるか木の高さが $\log_2(\psi)$ となるまで再帰的に行う。あるデータ点 $x$ についての $t$ 個の2分木における木の深さの期待値を $E[h(x)]$ とすると、サンプリング数 $\psi$ における $x$ の異常度合 $s(x, \psi)$ は次式で定義される：

$$s(x, \psi) = 2^{-\frac{E[h(x)]}{c(\psi)}}$$

ここで、

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

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

であり、 $\gamma$ はオイラー定数 ( $\approx 0.57721$ ) である。異常度合 $s(x, \psi)$ は  $(0, 1]$  の範囲をとり、この異常度合に対して閾値を設定することによって、学習データを基準とした外れ値の判別が可能となる。

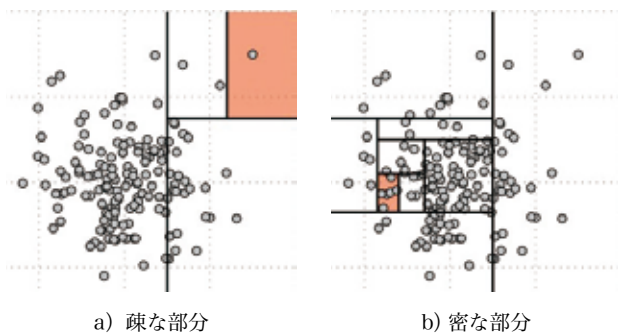


図2 2分木によるデータの分割

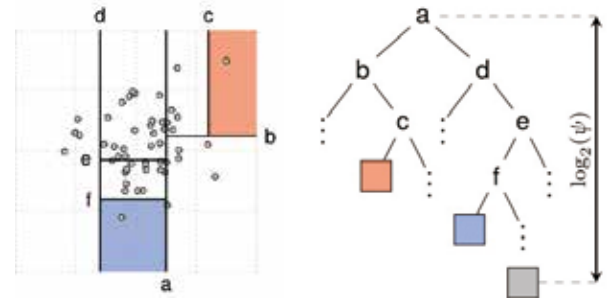


図3 2分木の生成

**3.5 性能検証内容** マシンコントローラへの搭載可否の評価において、異常検知処理の処理時間とメモリ使用量に関する性能検証が必要である。本論文では異常検知処理時間の性能検証について述べる。

制御処理と異常検知処理が1つのコントローラに共存するため、異常検知処理に割り当て可能な時間は制限を受ける。ユーザごとにこれらの条件は異なるため、一意に基準を設けることはできないが、様々な用途に対応できる点で、より高速であることが望ましく、本開発では制御処理下での性能が数ミリ秒程度であることを目安とした。

オムロンのコントローラでは図4に示すようなタスクスケジューリングモデルを取っているため、任意の制御タスク実行時間下での異常検知処理時間を測定できれば、制御処理内容に依らず、異常検知性能を推定することができる。

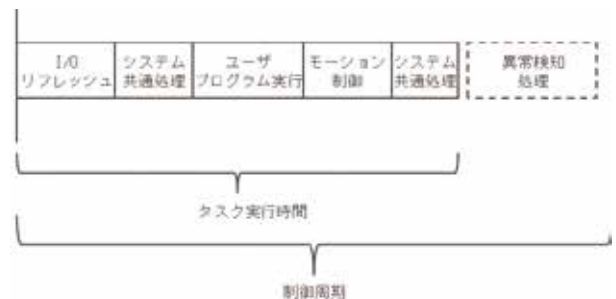


図4 タスクスケジューリングモデル

異常検知処理時間は、各アルゴリズムの性質から、主に学習データ点数・学習データ入出力次元数・内部パラメタといったアルゴリズムへの入出力に依存していると考えられる。そこで、異常検知アルゴリズムの入出力条件と異常検知AIの処理時間との関係を明らかにすることを目指し、異常検知コントローラプロトモデル上で実験を行った。

**3.6 性能検証環境** 検証環境を表2に示す。プロトモデルは、既存のマシンコントローラをベースに開発した。

表2 検証環境

要素	ターゲットとなる異常	詳細
処理環境	制御周期	1 ms
	タスク実行時間 (1制御周期に占めるタスク実行時間)	約100 μs

異常検知 アルゴリズム	手法名		-LOF -ISF
	学習 データ	次元数	6 / 8 / 10 / 12
		点数	100 / 1000 / 10000
	パラメタ (LOF)	k	15
	パラメタ (ISF)	Ntree	100 (推奨値)
$\psi$		256 (推奨値)	

**3.7 性能検証結果** 異常検知処理時間の最大値を表3に示す。ISFの処理時間は最大でも1 msに満たないが、LOFは学習データ点数が増加すると、極端に大きな結果となることが分かった。

表3 検証結果(最大実行時間)

最大実行時間 [ms]		次元数			
アルゴ名	データ点数	6	8	10	12
ISF	100	0.270	0.229	0.254	0.241
	1000	0.391	0.360	0.376	0.373
	10000	0.322	0.341	0.331	0.360
LOF	100	4.00	4.56	5.47	5.19
	1000	36.5	41.8	44.8	56.1
	10000	336	441	509	644

学習データ点数が100点の時の結果を、図5に示す。ISFの処理時間がLOFよりも極端に短い、これは、それぞれのアルゴリズムの特性に依るものと考えられる。ISFが学習時に予め異常判定用モデルを木構造で構築するため、監視データ入力時には木構造をたどる処理で済むのに対し、LOFは事前に異常判定用モデルを作ることはせず、監視データの入力時に都度学習データと監視データとの相対関係を計算するため、絶対的な処理数が多いことが主な原因として考えられる。また、ISFは木の深さの上限を $\log_2\psi$ と定義しているため、学習データが一定以上増えても処理時間が増えなくなっている。

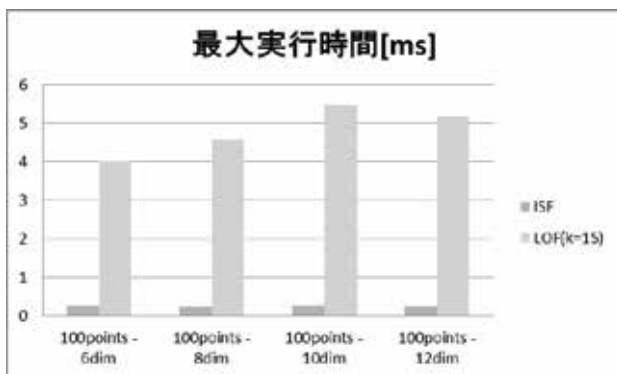


図5 最大実行時間(学習データ:100点)

以上の結果より、異常検知アルゴリズムの実行性能において、ISFが優れていることが分かった。本検証ではタスク実行時間割合が10%程度と制御処理の負荷が比較的小

さい条件であり、最大0.4 ms程度であった。これは、仮にタスク実行時間が900  $\mu$ sの高負荷下でも、図4で示したタスクスケジューリングモデルに基づく3.1 ms以内で処理が完了することになる。また、異常検知対象を1つだけでなく複数設定し、高速な異常検知を行うことも可能である。例えば、多数のワークが連続して投入されるような生産装置において、各ワークのそれぞれの生産に関する異常監視を並行して実施することも可能である。

**3.8 結論** 本章では、異常検知マシンコントローラプロトモデル開発において実施した、異常検知AIの選定と、マシンコントローラ上で制御とAIが共存するための設計について紹介し、異常検知AIの選定プロセスについて詳述した。

AIを生産現場に導入する際の要件として、「高速・軽量であること」「学習データの必要数が少ないこと」「説明性が高いこと」を挙げ、異常検知AIの中からその要件を満たすアルゴリズムとして、LOFとISFを選定した。更にそれらについてコントローラ上での実行性能を検証することで、LOFよりもISFの方がマシンコントローラへの搭載に適したアルゴリズムであることを導いた。

また、マシンコントローラ上で制御とAIを共存させるため、AI処理実行時でも制御周期を確実に守るようにし、常に制御処理が優先されるようにすることで、AIが制御に影響を与えないようにした点についても紹介した。

ここで挙げた生産現場への導入要件は、異常検知に限らずAIをマシンコントローラに搭載することを検討する上で、共通して評価すべき項目であると言える。

また、実行性能検証方法についても、LOFとISFという一部のアルゴリズムを対象にした検証ではあるが、LOFのように学習データと監視対象データとの距離に着目したアルゴリズムや、ISFのように2分木構造を有するアルゴリズムに対しては同様の評価方法が活用できる。

#### 4. まとめ

本論文では、装置の異常検知をターゲットとした、異常検知マシンコントローラプロトモデルの開発の実例を紹介し、AIをマシンコントローラに搭載する際の課題と、搭載の適否を検討するプロセスについて述べた。

今後は、異常検知に限らず生産現場でのAIの活用が進んでいくと想定されるため、本開発で得た知見を基に、今回対象としなかったAIについても搭載の検討を進めていく。

また、生産現場へのAIの導入要件についても、実際の生産現場にAIを搭載したマシンコントローラを試験導入し、その取り組みを通じてブラッシュアップしていく予定である。

最後に、今回の開発にあたり、多大なご協力をいただいたAI搭載マシンオートメーションコントローラの技術開発及び商品開発に携わった方々に深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 日本電信電話株式会社. “高レスポンスやビックデータ処理が要求される新たなアプリケーションの開拓を推進する「エッジコンピューティング構想」を策定”. <http://www.ntt.co.jp/news2014/1401/140123a.html>, (参照 2018-03-05)
- 2) 経済産業省.” 産業構造審議会情報経済小委員会 分散戦略WG ( 第 1 回 ) ”. [http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/shojo/johokeizai/bunsan\\_senryaku\\_wg/pdf/001\\_03\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/shojo/johokeizai/bunsan_senryaku_wg/pdf/001_03_00.pdf), (参照 2018-3-29)
- 3) 株式会社NTTデータ.” IoT & AI時代におけるエッジコンピューティングへの取り組み”. <http://www.nttdata.com/jp/ja/insights/blog/20170316.html>, (参照2018-03-29)
- 4) 経済産業省.” 2017年版ものづくり白書—第一部 ものづくり基盤技術の現状と課題”. [http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2017/honbun\\_pdf/pdf/honbun01\\_01\\_02.pdf](http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2017/honbun_pdf/pdf/honbun01_01_02.pdf), (参照 2018-4-10)
- 5) オムロン株式会社. “マシン制御とAIをリアルタイムに融合「AI搭載マシンオートメーションコントローラ」を開発”. <http://www.omron.co.jp/press/2017/04/c0425.html>, ( 参 照 2018-03-05 ) .
- 6) Markus M Breunig, Hans-Peter Kriegel, Raymond T Ng, and Jörg Sander. Lof: identifyingdensity-based local outliers. In ACM sigmodrecord, Vol. 29, pp. 93–104. ACM,2000.
- 7) Fei Tony Liu, Kai Ming Ting, and Zhi-Hua Zhou. Isolation-based anomaly detection. ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data (TKDD) , Vol. 6, No. 1, p. 3, 2012.

## 執筆者紹介



阿部 泰明 Yasuaki Abe  
技術・知財本部 組込システム研究開発センタ  
専門：情報工学



上山 勇樹 Yuhki Ueyama  
技術・知財本部 組込システム研究開発センタ  
専門：情報工学



阪谷 信幸 Nobuyuki Sakatani  
技術・知財本部 組込システム研究開発センタ  
専門：情報工学



藤井 高史 Takashi Fujii  
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

# ILO (Input-Logic-Output) 摺り合わせ制御技術

## ものづくりの革新に貢献する制御技術について

浪江 正樹

ものづくりの生産工程における様々な制御課題の解決に向けて、オムロンはILO (Input-Logic-Output) の高度な摺り合わせ制御技術を追求している。具体的には、高速高精度の計測と制御が可能なILO機器に加えて、制御理論の適用とILO機器の協調動作による制御アプリケーションのライブラリを提供している。

本稿では、制御理論適用の事例として、モデル予測制御 (MPC) による高精度指令追従性能を実現する位置制御方式の概要と効果例を報告する。XYステージによる円形の連続軌跡制御で、同一軌跡精度の実現に対して、従来制御方式の約4倍の動作速度が可能になった。制御対象モデルを自動作成する機能を備えており、簡単に使用できる特長も備える。また、ILO機器の協調動作事例として、ビジュアルフィードバック制御による高速アライメントの概要と効果例を報告する。本方式はワークを止めずに画像センサによる位置計測を繰り返しながら対象物の位置合わせを行うアライメント方式であり、ワークが停止してから撮像を行う従来方式に比べて、目標精度 $\pm 1 \mu\text{m}$ のアライメント時間を約1/4に短縮できた。アライメント時間の短縮効果に加えて、画像系と機械系の座標変換のキャリブレーションパラメータのずれに対するロバスト性が高いという特長も備える。

## ILO integrated control technology

### Control technology contributing to innovation in manufacturing

Masaki Namie

To solve various control problems in the manufacturing process, Omron pursues advanced integrated control technology of ILO (Input-Logic-Output). In addition to providing ILO devices capable of high-speed and high-precision measurement and control, we also provide libraries of control applications based on control theory and cooperative operation of ILO devices.

In this paper, as an example of application of control theory, we report the outline and effect of the position control method realizing high accuracy command following performance by MPC (Model Predictive Control). With the circular continuous trajectory control by X-Y stage, the operation speed of about 4 times that of the conventional control method has become possible for achieving the same locus precision. It has a function to automatically create a control target model, and it has features to be easily used as well. In addition, as an example of cooperative operation of ILO devices, we give an outline of high speed alignment by visual feedback control and an example of effect. In this method, the position of the object is aligned while repeating the position measurement by image sensors without stopping the workpiece, and compared with the conventional method in which the image is taken after the work is stopped, the alignment time with the target accuracy of  $\pm 1 \mu\text{m}$  could be shortened to about 1/4. It also has the feature of being robust to the deviation of the calibration parameters of the coordinate transformation of the image system and the mechanical system.

#### 1. まえがき

近年のものづくりは、スマートフォンに代表されるデジタル製品、電動化が進む自動車を中心として進化が速く、制御技術への期待が大きくなっている。本稿ではものづくりの内、設計工程を除き、製造工程における制御課題を対象にする。製造工程は加工、組み立て、搬送、検査などで

構成される。

デジタル製品では、構成部品である半導体や各種電子部品の微細化が進み、加工、組み立て、検査のすべてにおいて、生産性を維持しながら高精度化が求められている。また、部品の微細化に伴い、部品にダメージを与えないように、組み立て時の接触荷重を微小な値に抑制する要求が増えている。高精度化も微小な接触荷重も、加工組み立ての

連絡先：浪江 正樹 masaki\_namie@omron.co.jp

速度を下げることで対応できることがあり、その場合はタクトタイムとのトレードオフを如何に高いレベルで解決するかという課題になる。

従来、最先端の要求は装置メーカーが独自に開発する制御システムで対応されてきたが、産業用汎用コントローラの性能・機能両面の能力向上に伴い、PLC (Programmable Logic Controller) あるいはモーションコントローラの採用が検討される機会が増えている。この期待に応えるべく、センシング機器 (Input)、コントローラ (Logic)、ドライブ機器 (Output) の高度な摺り合わせに基づく制御技術について報告する。

## 2. ものづくりにおける制御課題

ものづくりの製造工程における制御課題は、製造品目と製造工程の組み合わせ毎に様々であるが、精度、生産性、コストに分類すると表1のようなになる。制御量により精度の表現は複数あるが、指令値あるいは目標値との偏差を小さくすることが基本である。これら3者間にはトレードオフの関係があり、いかに高いレベルで両立できるかが重要である。例えば軌跡制御では動作速度を下げれば軌跡精度の向上は可能であるが、それでは課題解決にはならない。通常は製造物によって目標精度は決まっているので、精度を確保できる範囲で動作速度をどこまで上げられるかを追求することになる。しかし、高額な計測制御機器を必要としたり、多大なチューニング工数が必要になるのでは、現実的な解決策にならないこともある。

表1 主な制御量と制御課題

制御量	精度	生産性	コスト
位置、距離	位置決め精度、軌跡精度、アライメント精度、振動抑制、多軸同期精度、オーバーシュート抑制	動作速度向上	調整工数低減
速度	安定性、多軸同期精度	整定時間短縮	コスト低減
荷重、テンション、温度	安定性、オーバーシュート抑制、多点均一性		

そして、制御課題を解決するためには、表2に示すような制御課題解決を難しくする要因を克服しなければならない。これがILO摺り合わせ制御技術の役割である。

表2 制御課題解決を難しくする要因

制御対象起因	外乱 (非定型、定型)、機械の低剛性、特性変化 (機差、経年変化)、負荷変動、ワーク公差、非線形特性 (摩擦、デッドゾーン、ヒステリシス含む)、むだ時間、干渉
制御システム起因	計測性能不足 (応答性、分解能)、演算性能不足 (制御周期)、ILO間非同期による入出力応答時間ばらつき、ILO間キャリブレーション誤差、通信時間や制御周期によるむだ時間

## 3. ILO (Input-Logic-Output) 摺り合わせ制御技術

オムロンは、画像センサFHおよび変位センサZW (Input)、マシンオートメーションコントローラNJ/NX/NY (Logic)、サーボドライバIS/G5 (Output)、などの高速高精度を追求する計測制御機器を揃えており、高精度同期を可能とするフィールドネットワークEtherCAT®での接続により、最速125 μs/8軸、軸間同期精度1 μsの制御システムを構築できる。さらに、多軸モーションコントローラPMAC (Logic) では、入出力機器をアナログ信号で接続することにより、最速16.6 μs/1軸、50 μs/8軸の超高速制御周期が可能となる。

しかし、ILO機器の高速高精度化は、表2の制御システム起因の要因の軽減には効くが、多くの場合で制御対象起因の要因には効かない。例えば応答遅れが大きい制御対象の位置制御で指令追従性を向上したい場合に、コントローラやサーボドライバの制御周期を高速化しても効果はない。また、軸間で応答遅れの差が大きい場合には、各軸の出力で同期精度を高めても、その先の機械動作における同期精度まで十分に向上できる保証はない。機械の特性を改善するのが最良の方法だが、制御の対応としては、機械の特性を考慮した適切な制御理論の適用が重要になる。PLCなどの汎用コントローラに搭載されている制御理論はPID制御に留まっていることが多い。その理由は、制御対象を特定できないため高度制御に必要な制御対象特性のモデル化が難しいことと、制御理論毎に異なる制御パラメータの調整が難しいことだと考えられる<sup>1)</sup>。特定装置向けの専用コントローラでは、機械の特性を完全に把握できるため、制御対象モデルに基づく高度な制御理論の適用が進んでいる<sup>2) 3)</sup>。なお、装置メーカーがPLCを使用して、ユーザプログラムで高度な制御理論を搭載することは珍しいことではない。

また、ILO各機器には制約があり、それをILOの協調により上手く回避することが重要になる。例えば、変位センサにおける計測精度と計測範囲はトレードオフの関係があるが、ここにならない制御を適用し、変位センサとワークの距離が計測範囲に収まるように、変位センサを移動させることにより、高精度計測の計測範囲を拡大できる。

これまでに開発を進めてきた主な制御技術と効果例を表3に示す。

表3 主な制御技術と効果例

制御技術	効果例
制振制御	搬送速度向上、液面の振動と傾き抑制
学習制御	軌跡精度向上、位置決め時間短縮
モデル予測制御 (MPC)	軌跡精度向上、位置決め時間短縮
スライディングモード制御	負荷変動に対する高ロバスト性
インピーダンス制御	接触荷重のオーバーシュート抑制
外力推定	ウェブの低テンション搬送

ビジュアルフィードバック制御	アライメント時間短縮、キャリブレーション誤差に対する高ロバスト性
スペクトル分解制御	応答速度が異なるアクチュエータの協調動作による加工精度・速度向上
予測同期制御	多軸の同期精度向上
ならい制御	変位計を用いる高精度2次元形状計測

本稿では、制御理論適用の事例としてモデル予測制御(MPC: Model Predictive Control)による高精度指令追従性能を実現する位置制御方式の概要と効果例を報告する。また、ILO機器の協調動作事例として、ビジュアルフィードバック制御による高速アライメントの概要と効果例を報告する。

#### 4. MPCの位置制御への適用

**4.1 MPCの概要** 制御技術を起点に加工のタクトタイム短縮に貢献する方法としては、指令値への追従性向上、振動の抑制、外乱影響の低減などが考えられるが、装置や工程によって必要性や重要度が異なる。本稿では、その中で最も基本的な性能である指令値への追従性向上に効果する、MPCの位置制御への適用について報告する。MPCはプロセス制御領域での適用実績は豊富であり普及している<sup>4)</sup>が、モーション制御領域での適用事例の報告はまだ多くない。その理由の一つは計算負荷の高さであるが、複数の方式があるMPCの中には今回採用するPFC (Predictive Functional Control)<sup>5) 6)</sup>のように計算負荷が低い方式もあり、プレス装置の力制御への適用事例<sup>7)</sup>が報告されている。別の理由として、MPCにおける予測が特に有効なのは、制御対象の特性に大きなむだ時間や遅れが含まれる場合であるが、モーション制御においてはむだ時間や遅れが小さいために、この点での期待が小さかったものとする。しかし、ILO間が通信で接続される構成では、機械の応答遅れに通信遅れ(むだ時間)が加わり、さらに指令追従性能の要求が高くなると、指令値を生成するコントローラからみた指令値に対するフィードバック値の追従遅れが問題になる。そこで、指令追従性能の向上を狙い、MPCをモーション制御領域の位置制御に適用した。良好な制御性能が得られるサーボ系の制御方式として、PID制御をベースとするモデル追従型2自由度制御<sup>8)</sup>が知られるが、むだ時間を明示的に考慮できる点と、未来の指令値を使用できる点を重視してMPCを採用した。

MPCは制御対象のモデルを使用して、予測ホライズンと呼ぶ有限区間の制御状態が最適になるように、将来の操作量パターンを決定し、最初の制御周期分の操作量だけを実際に出力するという処理を繰り返す。

図1にPFCにおける操作量計算の概念図を示す。操作量の将来の変化パターンを、数個の基本関数の組み合わせで表すことにより、計算負荷を低減するとともに、操作量を

不必要に動かさないという利点を持つ。基本関数は、ステップ関数を必須として、その他は目標値(指令値)の次数に応じて必要により増やせば良いが、制御性能と計算負荷のバランスを考慮して、ステップ関数+ランプ関数とする。基本関数の数だけ、予測ホライズンが必要なので、2つの予測ホライズンHおよびH2を設定して、この2点で目標値と制御量が一致するように、操作量のステップ高さ+ランプ傾きを決定する。この計算は毎制御周期実行するので、実際に出力するのはステップ高さ分のみである。なお、図1には描いていないが、現在の偏差を予測ホライズン後に完全にゼロにすることを狙うのではなく、ある時定数でゼロに向かわせるための参照軌道の設定が可能である。参照軌道時定数により応答性とロバスト性のトレードオフを調整することができる。

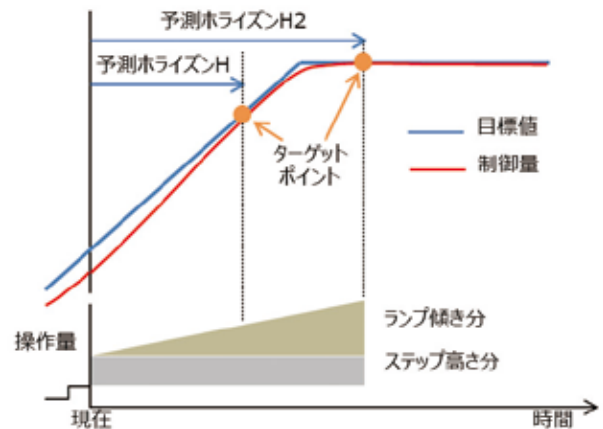


図1 PFCの操作量計算概念図

ところで、高度な制御方式の適用で制御性能が向上することが分っても、制御対象モデルの作成が難しいなどの導入障壁があると利用が広がらない<sup>1)</sup>。そこで、従来は高度なスキルを必要としたモデル作成の自動化にも取り組んだ。

**4.2 制御ループ構成** MPCを適用した位置制御ブロック図を図2に示す。制御対象モデルと将来の指令値を使用する高精度のフィードフォワード制御が特長であるが、フィードバック制御ループも有しており、モデル誤差や外乱の影響にある程度対応することができる。しかし、外乱への対応は高速フィードバックループを有するサーボドライバが主に担当する。このように、サーボドライバとコントローラ上のMPCが適切に役割を分担している。

MPCは非線形対象を扱う理論研究も進んでいる<sup>9)</sup>が、計算負荷の増大は避けられないため、ここでは制御対象を線形としている。そのため、非線形特性が強くなると、制御性能が悪化する。具体的には動摩擦(クーロン摩擦)が該当し、速度反転直後や停止状態から動き出すときの追従遅れが大きくなる<sup>10)</sup>。サーボドライバが持つ動摩擦補償機能は、一般にサーボドライバが受け取る位置指令値に基づいて速度方向を判定するため、コントローラ側で位置指令値をリアルタイムに補正する制御方式では適切に機能し

ない。そこで、補正前指令値に基づいて、コントローラ側で動摩擦補償を行う。

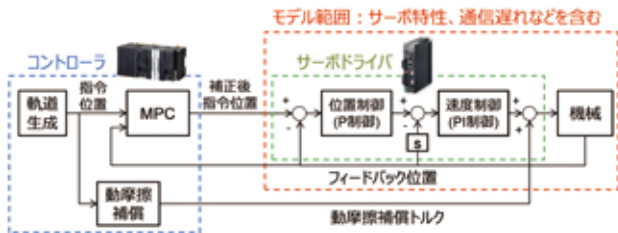


図2 MPC適用の位置制御ブロック図

**4.3 モデルの自動作成** 対象モデルは1軸単位の1入力1出力線形モデルとする。したがって非常にシンプルなモデルであるが、それでも機械の設計情報から得られる特性は質量またはイナーシャだけであり、摩擦や固有振動などの特性を知ることは難しいため、システム同定手法<sup>11)</sup>を採用する。動特性モデル形式は、モデル入力を指令位置、モデル出力を実位置とし、次の離散時間伝達関数とする。

$$G(z) = z^{-d} \frac{b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + b_3z^{-3} + b_4z^{-4}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3} + a_4z^{-4}} \quad (1)$$

モデル作成用の応答データ例を図3に示す。最初に動摩擦トルクを測定し、次に適切なステップ速度を調べるための準備動作を行い、最後にトルクピーク値が飽和しない範囲で十分大きな値になるようなステップ速度を与えて、位置のランプ応答データを1往復分取得する。

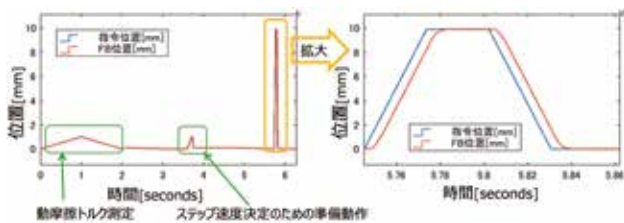


図3 モデル作成用の応答データ

図3右側のランプ応答データにフィットする(1)式のパラメータを最小2乗法により推定する。伝達関数の次数は、高い精度を確保しながらも過剰適合を回避するために、最大4次として複数のモデル候補を作成し、最良の1モデルを選択する。選択基準は(2)式で計算する応答データへの適合率<sup>12)</sup>の他に、モデルのインパルス応答をチェックし、逆応答など実際にはないはずの挙動を示すモデルを除外する。

$$FIT(\%) = \left\{ 1 - \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^N (y_h(k) - y(k))^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (y(k) - \bar{y})^2}} \right\} \times 100 \quad (2)$$

N: データ数、y: 出力データ、 $\bar{y}$ : 出力データの平均値、 $y_h$ : モデル出力データ

**4.4 実機検証結果** ボールねじ駆動のXYステージ(図4)で実験を行った。フィードバック位置(実位置)は、サーボドライバ、コントローラ共に、リニアスケールから取得する。自動作成結果のモデルパラメータと自動設定した制御パラメータを表4に示す。予測ホライズンと参照軌道時定数もモデル特性に基づき自動設定する。コントローラの制御周期は0.5 msである。図5~8の実験結果比較において、従来制御方式を補正なしと表記している。サーボパラメータはオートチューニング結果を基に、軌跡制御の補正なしの場合のみ、両軸の位置ループゲインを小さい方(本実験ではX軸)に合わせている。またMPCの場合は、サーボドライバの速度フィードフォワード機能を無効化している。指令値に基づくフィードフォワード機能はMPCが担うためである。

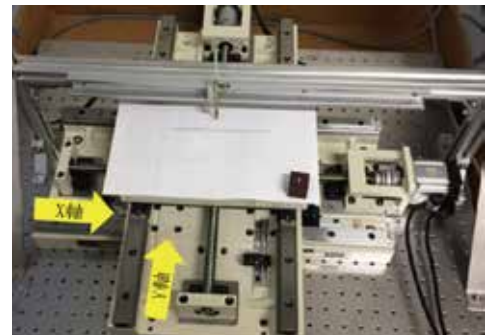


図4 実験に使用したXYステージ

表4 自動作成モデルパラメータ

パラメータ	X軸	Y軸
d	8	7
a1	-3.333485806286154	-2.977750772048949
a2	4.189151867233842	3.410571422347285
a3	-2.361822331916331	-1.822152401743346
a4	0.506442605663736	0.391218947429476
b1	0.050952081980545	0.043199305733160
b2	-0.089291431420474	-0.040339154707192
b3	0.038625743495712	-9.726898909130744e-04
b4	0	0
正方向動摩擦トルク [%]	12.42	9.52
負方向動摩擦トルク [%]	-11.12	-9.22
予測ホライズンH	2	2
予測ホライズンH2	4	4
参照軌道時定数 [s]	0.006	0.0055

徐々に速度を上げながら直径4 mmの円を連続描画する軌跡制御を行った。周速度約75 mm/sから最大周速度約126 mm/sの期間の補正なしとMPCの軌跡を図5に示す。補正なしでは速度が上がるに連れて、内回りの程度が拡大するために軌跡の線が太くなっているのに対して、MPCでは内回りの拡大を抑制できている。

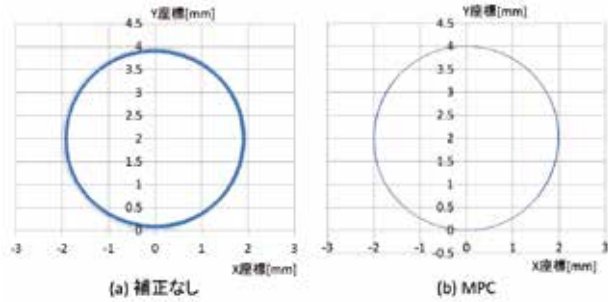


図5 指令速度が変化する場合の軌跡比較

図5では指令位置に対する時間軸上での遅れは見えないので、図6に最大周速時1周期分のX軸データを示す。MPCの補正後指令位置は補正前の指令位置に対して先行し、かつ振幅が大きくなっている。この期間の最大位置偏差は、補正なしの744  $\mu\text{m}$  に対して、MPCは17  $\mu\text{m}$  であり、指令追従性が向上している。

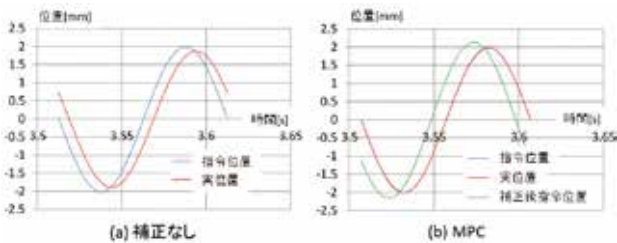


図6 軌跡制御でのX軸追従性比較

実際の加工では目標精度は決まっており、その精度をいかに短いタクトタイムで実現するかが期待効果になる。そこで、直径4 mmの円と長さ4 mmの直線を交互に等速で描く軌跡制御で、最大軌跡誤差が10  $\mu\text{m}$  以下に収まる限界の動作速度を比較した。補正なしが速度25.5 mm/sで最大軌跡誤差9.1  $\mu\text{m}$ 、MPCが速度100 mm/sで最大軌跡誤差8.8  $\mu\text{m}$  となり、MPCの適用により動作速度を約4倍に向上することができた。図7に同一時間に動作できた軌跡(反時計周りで左から右へ進む)を示す。

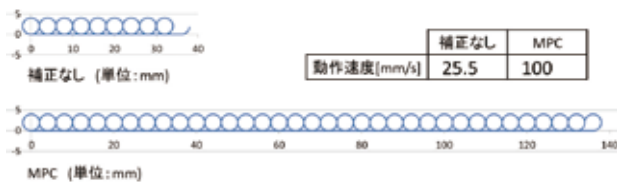


図7 同軌跡精度での動作速度比較

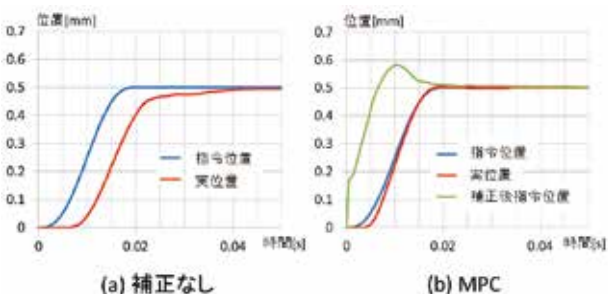


図8 位置決め動作の追従性比較

より多くの製造工程に適用可能な時間短縮例として、単軸ボールねじ(図4のX軸)の位置決め動作のデータを図8に示す。20 msで0.5 mmを移動する位置決めで、5次軌道とした。補正なしでは指令値に対して大きく遅れた状態のまま目標位置に到達するが、MPCでは目標位置に到達する前に指令値に追いついている。

## 5. ビジュアルフィードバック制御のアライメントへの適用

### 5.1 ビジュアルフィードバック制御の概要

画像センサを使用してワークの位置合わせを行うアライメントは多くの組み立て工程に存在しているが、位置合わせの目標精度は製造物によって千差万別である。目標精度が高くないアライメントでは、1回の撮像でアライメントが完了するため、アライメント時間の短縮余地はほとんどない。一方、半導体やFPD(フラットパネルディスプレイ)などの目標精度が $\mu\text{m}$ オーダーのアライメントの場合、画像系と機械系のキャリブレーション精度に依存するが、一般的には数回の撮像が必要であり、停止後の残留振動が収まるのを待って次の撮像を行うためアライメント時間が長く、時間短縮の余地が存在する。そこで、高精度アライメントを対象として、ビジュアルフィードバック制御によるアライメントの高速化に取り組んだ。

ビジュアルフィードバック制御は画像処理をフィードバック制御ループの中に組み込む制御手法であり、目標値の与え方により2種類に分類される<sup>13)</sup>。目標値を位置(または距離や姿勢)で与える位置ベース法<sup>14)</sup>と、画像の特徴量(例:領域の面積、線分の傾きなど)で与える特徴ベース法である。今回適用したのは位置ベース法である。なお、ビジュアルフィードバック制御はビジュアルサーボとも呼ばれる。

アライメント時間は、カメラ画像上の2つのアライメントマークが、開始時の離れた状態から目標精度の距離内に近づいて停止するまでに要する時間である。アライメントマークが2個の場合は両方が図9右側の状態になる必要がある。

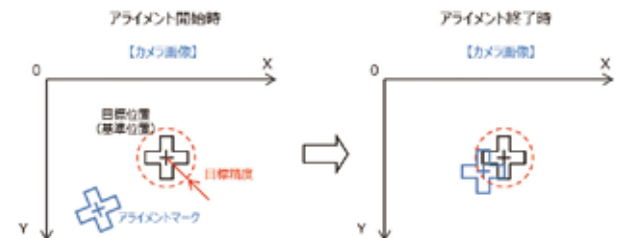


図9 アライメントの概要

従来のアライメント動作を繰り返す手法は、停止後の残留振動が減衰するのを一定時間待ってから次の撮像を開始する。2013年にオムロンが開発したコンティニュアスアライメント<sup>15)</sup>は、ワークを止めずに撮像を繰り返す方式で、停止に伴う残留振動の減衰待ち時間をなくすことでアライ



メントの高速化を実現した。軌道は検出距離が更新される度に新たに生成し旧軌道と接続するが、速度と加速度を指定する台形速度パターンを採用する点は従来方式と共通である。

ビジュアルフィードバック制御によるアライメントは、ワークを止めずに撮像を繰り返す点はコンティニューアアライメントと同じであるが、サーボドライバへの位置指令生成にフィードバック制御を適用する点が異なる。これにより、制御周期毎にその時点の位置偏差に基づく速度指令および位置指令が計算され、より滑らかなステージ移動が可能となる。

**5.2 制御ループ構成と技術内容** ビジュアルフィードバック制御適用アライメントの制御ブロック図を図10に示す。画像センサがアライメントマークの基準位置とのずれ量、すなわち距離と傾き角度を検出する。このずれ量に基づき、コントローラで各軸の必要移動距離を算出する。このとき、キャリブレーションパラメータを用いて、画像系座標から機械系座標への変換を行う。ここまでの処理は従来方式と同じである。

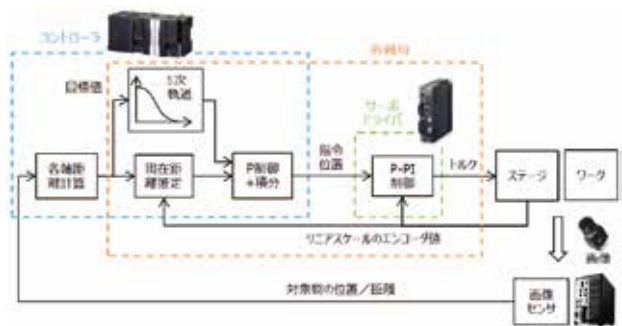


図10 ビジュアルフィードバック制御適用アライメントの制御ブロック図

このあと、ステージの移動と停止に伴う被写体ブレおよび振動の抑制を狙い、ステージを滑らかに動かすために、主に4つの手法を採用している。

- (1) 各軸サーボドライバへの指令速度（指令位置の微分値）がその時点の距離に応じて与えられるようP（比例）制御を採用する。比例ゲインはサーボドライバとステージのトータルの遅れ特性を測定して適切な値に設定する。
- (2) 上記（1）のために、制御周期（例えば1ms）毎に制御量が必要になるが、一般に画像センサの出力更新間隔は制御周期より長いので、検出距離が更新されない制御周期ではエンコーダ情報を使用して各軸の現在距離を推定する。
- (3) 画像センサが検出する距離から算出される各軸移動量に基づいて、P制御の目標値（目標距離）を滑らかにゼロに近づける5次軌道を生成し更新する。この際、指令速度（指令位置の微分値）の急激な変化を回避するように旧軌道と接続する。
- (4) 被写体ブレを抑制するため、ステージ速度が露光時

間と目標精度から算出する速度上限値以下になることを撮像開始の条件に加える。

各軸の必要移動距離が、X軸：0.6 mm、Y軸：0.3 mm、θ軸：0.6 mm (0.34°) の場合における、各軸の速度変化を図11に示す。グラフではX軸とθ軸の移動量が同じため、ほぼ重なっている。従来方式に対して、ビジュアルフィードバック制御の速度変化は滑らかである。このケースでの撮像回数は、従来方式が3回、ビジュアルフィードバック制御が9回である。

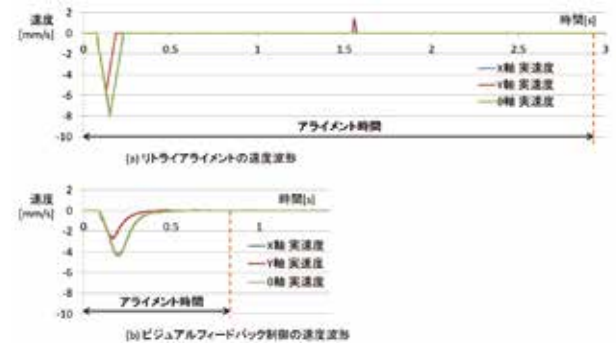


図11 ステージ各軸速度の比較

**5.3 実機検証結果** ステージ機構XYθ、2カメラ構成の図12に示すアライメント装置で、精度±1 μmのアライメント時間を従来方式と比較した。初期位置をX軸：±0.6 mm、Y軸：±0.3 mm、θ軸：±0.34°の範囲内で乱数により生成して1000回のアライメントを実行した結果を表5に示す。コントローラの制御周期は1ms、画像センサの露光時間は20ms、位置計測の平均時間間隔は約60msである。キャリブレーションパラメータはオートキャリブレーション機能で決定した値を使用した。

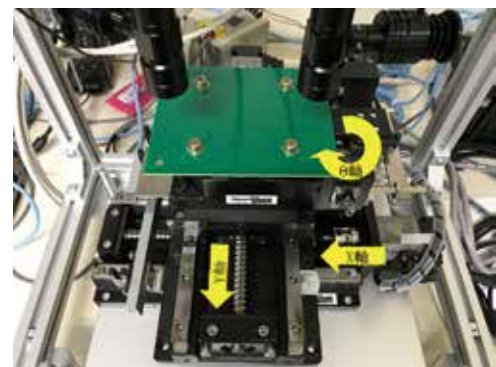


図12 実験に使用したアライメント装置

表5 アライメント時間(単位s)

方式	平均	+3σ	最大
従来方式	3.08	3.91	5.64
コンティニューアアライメント	2.14	3.59	3.58
ビジュアルフィードバック制御	0.75	1.00	1.14

ビジュアルフィードバック制御方式は、従来方式比で平

均値が約1/4.1に、コンティニューアスアライメント比で平均値が約1/2.9にアライメント時間を短縮している。図13はアライメント時間が正規分布に従うと仮定した分布(横軸の刻み:0.01 s)であり、キャリブレーションパラメータを並進方向(X方向、Y方向とも1 mm)と回転方向(5°)の両方向に意図的にずらした場合の分布も併せて示す。キャリブレーションパラメータをずらした場合のアライメント時間の伸びは、平均値で0.14 s、+3σが0.21 sに収まっている。このことは経年変化等によるキャリブレーションパラメータのずれに対してロバスト性が高いことを意味しており、安定したアライメント動作を長期間維持できる可能性がある。

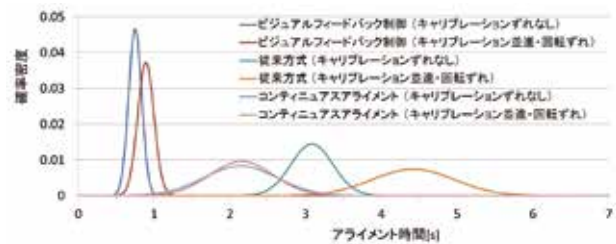


図13 アライメント時間の分布

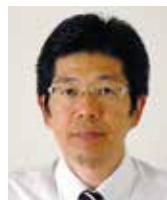
## 6. 結言

制御システムを構成するILOの摺り合わせ制御技術として、モデル予測制御の位置制御への適用例と、ビジュアルフィードバック制御のアライメントへの適用例を報告した。両事例で、ものづくりの製造工程においてタクトタイム短縮に貢献できる効果を確認できた。今後両制御技術の適用範囲の拡大とともに、新しいILO摺り合わせ制御技術の開発にも取り組み、引き続き、ものづくりの革新に貢献していく所存である。

## 参考文献

- 1) 鶴原吉郎, 岩澤尚俊. メカニカルシステムにおける制御技術動向. 計測と制御. 1999, Vol.38, No.1, p23-30.
- 2) 小黒龍一. ロボット・工作機における制御理論応用. 計測と制御. 1999, Vol.38, No.1, p42-46.
- 3) 稲葉肇. 実用化に向けての制御理論の新たな展開. 計測と制御. 1999, Vol.38, No.1, p4-9.
- 4) S. Joe, Qin; Thomas, A. Badgwell. A survey of industrial model predictive control technology. Control Engineering Practice. 2003, Vol.11, Issue7, p733-764.
- 5) Jacques, RICHALET. WHY PREDICTIVE CONTROL?. 計測と制御. 2004, Vol.43, No.9, p.654-664.
- 6) ジャック・リシャレ, 江口元, 小崎恭寿男(監修). モデル予測制御-PFCの原理と応用-. 日揮, 2007, 255p.
- 7) 藤田稷, 中村恵子, 鈴木俊太郎. モデル予測制御の機械制御への適用. IHI技法. 2011, Vol.51, No.2, p33-37.
- 8) 小山正人, 長野鉄明. 規範モデルを用いた電動機の2自由度位置制御. 電気学会論文誌D. 1994, Vol.114, No.2, p.137-143.
- 9) 大塚敏之. 非線形モデル予測制御の研究動向. システム/情報/制御. 2017, Vol.61, No.2, p42-50.
- 10) 松原厚. 精密位置決め・送り系設計のための制御工学. 森北出版, 2008, p185-198.
- 11) 足立修一. MATLABによる制御のためのシステム同定. 東京電機大学出版局, 1996, 202p.
- 12) 足立修一. MATLABによる制御のための上級システム同定. 東京電機大学出版局, 2004, p5-22.
- 13) 橋本浩一. ビジュアルサーボ-I -ビジュアルサーボとは. システム/情報/制御. 2009, Vol.53, No.9, p411-416.
- 14) 橋本浩一. ビジュアルサーボ-IV -位置ベースビジュアルサーボ. システム/情報/制御. 2010, Vol.54, No.3, p117-123.
- 15) オムロン. 制御システムおよび制御方法. 特許第6167622号. 2017-07-26.

## 執筆者紹介



浪江 正樹 Masaki Namie

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: 計測自動制御学会



**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**  
**1-2 ヘルスケア**

## 連続血圧計測を実現するセンサ技術

### 高精度マルチエレメント MEMS 圧力センサの開発から実用化まで

加藤(中川) 雄樹・濱口 剛

オムロンヘルスケア株式会社では、一拍毎に変動する血圧を連続して計測する技術の開発に取り組んでいる。一拍毎の連続血圧計測技術の実現によって、従来のオシロメトリック法による血圧計測では捉えることのできないリスクの高い血圧変動を検出し、脳・心血管疾患の発症リスクを事前に予測できることが期待されている。一拍毎の非侵襲血圧計測を可能とするトノメトリ法においては、圧力センサを皮膚に直接押圧する。したがって、圧力センサを樹脂封止する必要が生じるが、樹脂応力によってセンサ特性や実装歩留まりが悪化し、耐久性にも課題があった。筆者らは、46個もの圧力センサエレメントを有するASIC混載のMEMS圧力センサを開発し、樹脂封止しても全エレメントが高精度の圧力センサとして特性を担保できる、また実装歩留まりや耐久性を抜本的に改善する新しいパッケージ構造とその工法を開発することに成功した。

## Sensor Technology to Realize Continuous Blood Pressure Monitoring

### Development and Practical Application of High-precision Multi-element MEMS Pressure Sensor

Yuki Kato (Nakagawa) and Tsuyoshi Hamaguchi

Omron Healthcare Co. Ltd. is developing new technology to enable beat-by-beat blood pressure monitoring. The conventional oscillometric equipment was unable to measure blood pressure continuously and detect rapid blood pressure changes. Therefore, the prediction of cerebral and cardiovascular disease risks is expected to improve from the development of beat-by-beat blood pressure monitoring. The tonometry method is the beat-by-beat blood pressure measurement technology by which the pressure sensor is held to the skin directly. Accordingly, the pressure sensor must be sealed within potting resin to improve vibrational resistance. However, the sensor characteristics and the production yield were being deteriorated by the stress from the potting resin. To counter this, the authors developed a new MEMS pressure sensor consisting of 46 sensing elements with ASIC. Moreover, new packaging and assembly methods were developed to preserve the highest precision of the characteristics of 46 pressure sensor elements and improve their production yield.

#### 1. 序論

血圧は、病院だけでなく家庭でも計測することで高血圧の治療や管理、また予防に役立てる文化が現在では広く定着してきた。家庭での血圧計測の普及の背景には、使用者が血圧計測に関する特別な知識や手技が必要とならないオシロメトリック法の開発<sup>1) 2)</sup>、大迫研究を代表とした家庭で計測する血圧の重要性を示す研究が進められてきたこと<sup>3)</sup>、また機器の自動化や小型化、ユーザビリティの改善といった血圧計測器としての進歩などがある。

一方で、家庭血圧計が普及して高血圧診療が発展してきた現在においても、十分な降圧治療が行われていない症例

も未だあることが知られている<sup>4)</sup>。オシロメトリック法では、上腕あるいは手首にカフを巻いて圧迫し、一度血流を遮断することで血圧を計測するため、一回の測定に数十秒の時間を要する。しかしながら、実際には血圧は一拍毎に変動するため、オシロメトリック法で捉えることが出来ない脳・心血管疾患の発症リスクの高い血圧変動があると考えられる。そこで、オムロンヘルスケア株式会社では、一拍毎の血圧を連続して計測する機器の開発に取り組んでおり、現在の高血圧診療への更なる貢献を試みている<sup>5)</sup>。

非侵襲的に一拍毎で血圧を連続計測する機器として、トノメトリ法を利用したJENTOW<sup>6)</sup>と呼ばれる商品がある。トノメトリ法とは、圧力センサを皮膚に直接押圧すること

で圧脈波を計測し、圧脈波から血圧を算出する手法である。JENTOWは大型の据置型の機器であったが、現在オムロンヘルスケア株式会社で開発している連続血圧計測技術は手首装着型の機器を目指しており、計測可能な環境の拡大、ユーザビリティの改善、測定安定性の向上などに取り組んでいる。

本論文では、オムロンヘルスケア株式会社が保有する血圧計測のノウハウと、オムロン株式会社が保有するセンサ開発技術を基盤に、連続血圧計測技術を実現するために新規で開発したMEMS圧力センサと、そのパッケージ構造および工法について述べる。

## 2. 連続血圧計測技術とセンサ技術

**2.1 トノメトリ法** トノメトリ法の概要を図1に示す。上腕や手首に装着したカフで血管を圧迫するオシロメトリック法と異なり、トノメトリ法では皮膚に直接圧力センサを押圧することで圧脈波を計測し血圧を算出する。圧力センサを動脈上の皮膚から押圧すると、押圧面における力学的平衡は、ラプラスの法則に血管壁の厚みを考慮した式で表すことができる<sup>7)</sup>。

$$T = P_i r_i - P_o r_o \quad (1)$$

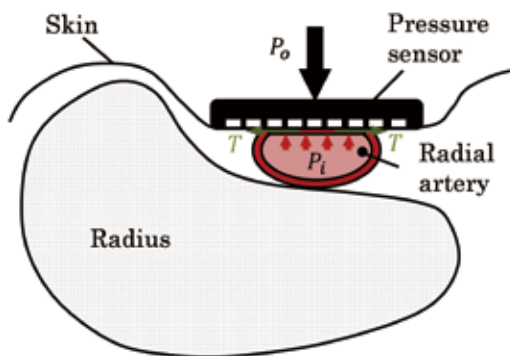


図1 トノメトリ法の概要

$T$  は血管壁における周方向の張力、 $P_i$  は血圧、 $P_o$  は外圧、 $r_i$  および  $r_o$  はそれぞれ血管内壁および血管外壁のセンサ押圧面

での曲率半径である。また、式 (1) は式 (2) のように変形できる。

$$P_i = \frac{r_o}{r_i} P_o + \frac{T}{r_i} \quad (2)$$

図1に示すように、センサ押圧面において血管が扁平に潰れていれば、 $r_i \approx r_o$ 、 $r_i \rightarrow \infty$  となり、式 (2) は式 (3) のように近似できる。

$$P_i \approx P_o \quad (3)$$

すなわち、血管を最適な押圧力で圧扁できれば、押圧力すなわち圧力センサで検出される圧力と血圧が同等となる。したがって、圧力センサを最適な押圧力で保持し続けられ

ば血流を遮断することなく連続して血圧を計測することが可能であり、血管にカテーテルを挿入して計測する血圧波形と同等の圧脈波波形が計測できる。また、式 (3) の条件が最も成立するのは血管直上に圧力検出素子が位置する場合である。したがって、トノメトリ法を用いる場合には、複数の圧力検出素子を有する圧力センサを採用することで、血管位置と押圧位置の関係を正しく知る必要がある。

**2.2 センサ技術への要求事項** 2.1節の通り、トノメトリ法では圧力センサを皮膚に直接押圧するという特徴から、オシロメトリック法による血圧計測とはセンサへの要求事項が根本的に異なる。

第一の要求として、圧力センサの数である。トノメトリ法では圧力センサを皮膚に直接押圧し、血管と圧力センサの位置を正しく把握して、血管中心直上の皮膚表面に伝達する圧脈波を検出する必要がある。したがって、手首の橈骨動脈の場合、数100  $\mu\text{m}$  ピッチで圧力センサエレメントを数十個並べる必要がある。また、オシロメトリック法を採用した血圧計ではカフ内圧を計測する圧力センサ一つの精度を担保すればよいが、トノメトリ法では狭ピッチで並べられた複数の圧力センサ全ての精度を保証できることが要求される。

第二の要求として、特殊なパッケージである。オシロメトリック法に用いられるセンサは主に半導体プロセスによって作製された圧力センサ (MEMS圧力センサ) で、空気を圧力伝達の媒体としてカフ内の圧力を計測している。一方で、トノメトリ法においてはMEMS圧力センサを皮膚に直接押圧するために、半導体のセンサチップを生体適合性の良い樹脂などで保護する必要があり、圧力を伝達する物質は空気ではなくその樹脂である。一般的な抵抗式半導体圧力センサでは、圧力によるセンサ部の機械的な変形を半導体ひずみゲージにより検出して電気信号に変換するため、検出すべき圧力以外の力がセンサに加わると全て誤差となる。そのため、パッケージングにおいてはセンサチップに応力を加える、あるいは応力を残留させる可能性のあるものはできる限り排除して実装する。しかしながら、トノメトリ法では、あえて特性を悪化させる可能性のある樹脂を圧力センサ表面に塗布する必要があるという、特殊なパッケージング技術が要求される。

**2.3 従来機器における課題** 従来のトノメトリ法による圧脈波あるいは血圧測定機器における課題をセンサ、センサの実装、システム全体の観点で大別して表1に示す。

表1 従来のトノメトリ機器の課題

No.	分類	課題
1	センサ	電極数が多く実装歩留まりが悪化する。雑音耐性が低い。
2	センサ実装	樹脂塗布によりセンサ特性が悪化する。樹脂塗布により歩留まりが悪化する。
3	システム	機器が大型で計測環境が限定される。

従来のマルチエレメントMEMS圧力センサは、ダイアフラム上にピエゾ抵抗素子が複数形成された単純な構成となっており、形成したエレメント数に応じた電極が必要となることから、工程においても電極数が多いことで実装歩留まりが悪化する原因となっていた。また、ピエゾ抵抗素子から直接配線を後段の回路基板まで引き出す必要があったため、センサ特性や雑音耐性の悪化などの原因となっていた。

また、実装面の観点では、圧力センサ表面に樹脂を塗布する必要があることから、樹脂の温度による膨張収縮、あるいは硬化時に樹脂が収縮を生じることでセンサに応力が加わり、センサの特性や実装歩留まりが悪化する課題があった。

さらに、従来の据置型の機器では計測環境が限られるなどの課題があり、手首装着型の機器として小型化が必要となる。デバイスが大型化する要因として、複数の圧力センサを処理するために回路規模が大きくなる、センサの雑音耐性が低いために後段の回路で対策が必要となるために回路規模が大きくなるなどがあり、センサを含むシステム全体として解決する必要のある課題も抱えていた。

以上を踏まえ、新たな連続血圧計の開発に際しては、センサに関わる前述の課題を解決するため、大別して以下二つの開発が必要となる。

- i . 良好なセンサ特性と雑音耐性を有し、実装歩留まり改善可能なマルチエレメントMEMS圧力センサの開発。
- ii . 上記マルチエレメントMEMS圧力センサの表面に樹脂を塗布しても良好な特性を保持可能で、安定して生産可能な新たなセンサパッケージ構造と工法開発。

### 3. センサチップ開発と工法開発

**3.1 センサチップ開発** 前述した連続血圧計のための圧力センサの特性や実装歩留まりの課題を抜本的に改善すべく、図2に示す新たなマルチエレメントMEMS圧力センサを開発した（以下、センサチップと記載する）。開発したセンサチップの形状は長さ11.5 mm、幅3.0 mm、厚み400 μmであり、中心に長さ9.5 mm、幅0.26 mm、厚み5 μmのダイアフラムを形成し、ダイアフラム上にピエゾ抵抗を形成している。ダイアフラムが圧力を受けて変形すると、変形量に応じた応力が発生し、この応力によってピエゾ抵抗における導電率すなわち抵抗率が変化する。このピエゾ抵抗でブリッジ回路を形成することで、圧力に応じた抵抗変化を電圧で検出している。開発した圧力センサは、ダイアフラム上にピエゾ抵抗のブリッジ回路を46個、200 μmの狭ピッチで構成し、温度センサもセンサチップ上に複数形成した。温度センサをセンサチップ上に複数構成することで、周辺温度ではなくセンサチップの温度を直接計測可能であるため、圧力換算式の温度補正に使用することができる。さらに、開発したセンサチップはASIC (Application Specific Integrated Circuit) 混載であり、マルチプレクサ、

オペアンプ、フィルタ回路がセンサチップ上に実装されている。従来の周辺回路をセンサチップ内に全て混載することで、以下のような利点がある。

- マルチプレクサの混載により電極数を削減でき、後工程の生産難易度を下げ、実装歩留まりを向上できる。
- オペアンプの混載により、各圧力センサエレメントの出力を短い配線長で増幅およびインピーダンス変換可能であり、雑音耐性が向上する。
- 後段での回路規模を縮小することが可能であり、システム全体の小型化を実現できる。

表2に従来センサと新センサの電極数の比較を示す。表2の従来センサはトノメトリ法を利用したCAP/FAPセンサという圧脈波測定機器である。新センサは従来センサと比較して、圧力および温度センサエレメントの数は増えているが、電極数は1/3以下に削減できていることがわかる。また、オペアンプやフィルタ回路混載によって雑音耐性を向上させているが、実際には図2に示すセンサチップのダイアフラム部以外をメタルシールドしており、雑音耐性はさらに向上している。図3に従来および新センサ単体でのEMS (Electro-Magnetic Susceptibility) 試験の結果を示す。試験は搬送波を80~1000 MHz、変調波2 Hz、電界強度3 V/mとした。図3の縦軸は電磁波照射の影響をどの程度受けているかを表しており、横軸は照射している搬送波の周波数である。新しいセンサでは、センサ単体での雑音耐性が改善していることがわかる。

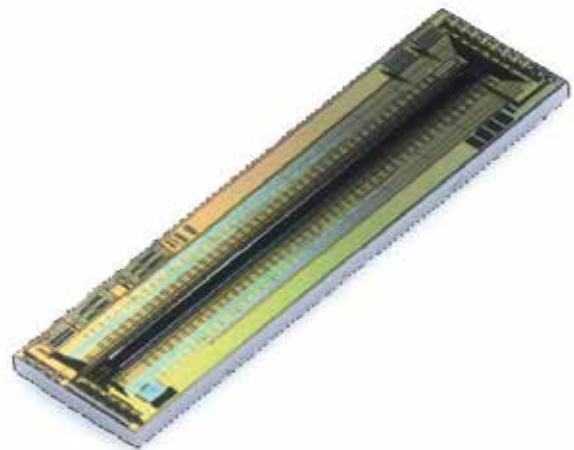


図2 ASIC混載マルチエレメントMEMS圧力センサ

表2 従来センサと新センサの電極数比較

機器	エレメント数	電極数
従来センサ	圧力30ch+温度4ch	72
新センサ	圧力46ch+温度2ch	22

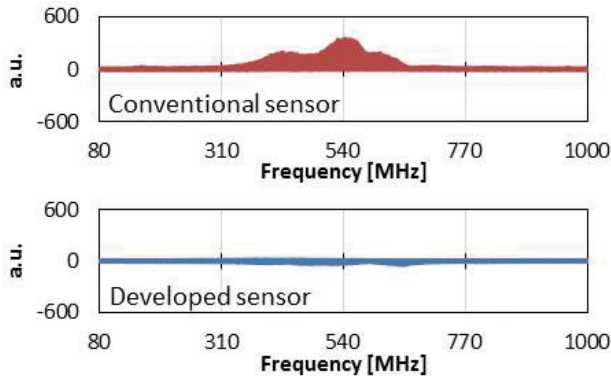


図3 従来センサと新センサの雑音耐性比較

**3.2 新パッケージ構造の提案** オシロメトリック法による血圧計測では、カフ内の圧力が空気を媒体として半導体の圧力センサに直接伝達されるが、トノメトリ法による連続血圧計測では圧力センサを皮膚に直接押圧する必要があることは前述の通りである。そのため、圧力センサを生体適合性の良い樹脂封止（以下、ポッティングと記載）する必要があるが、ポッティングする樹脂の弾性率が低すぎると変形量が大きくなり正しく圧力を伝達できないため、ある程度硬さのある樹脂を選択する必要がある。しかしながら、弾性率が高くなると、樹脂は硬化時にセンサチップに応力を残存させ、さらに樹脂は周辺温度の変化に伴い膨張収縮するために、圧力センサを樹脂でポッティングすると一般的には特性が著しく悪化してしまう。したがって、弾性率の高い樹脂でポッティングしたとしても特性を悪化させない、これまででないパッケージ構造や工法を新たに開発する必要がある。特に、46個もの圧力センサ全てが、均一かつ圧力計測の精度を確保できるようにパッケージングすることが重要である。

また、センサチップから信号を引き出すために、種々の工法の中からワイヤ・ボンディングを選択する。ワイヤ・ボンディングは、チップサイズの小型化に伴う電極端子の狭ピッチ化にも対応してきた背景があり、また一般的に低コストで生産性が高い利点がある<sup>8)</sup>。一方で、通常ワイヤ・ボンディングの場合には、ワイヤにストレスが加わらないようにパッケージングする必要があるが、前述したように連続血圧計測のために皮膚に直接押圧するため、ワイヤを保護するための樹脂も必要となる。纏めると、図4 (a) に示すように、ワイヤを保護するためのストレス強度の高い樹脂と、センサチップ全体を覆う生体適合性の良い樹脂でのポッティングが必要となる。すなわち異なる特性が要求される高弾性の樹脂を二重に塗布する必要がある。

前述したようにワイヤ保護樹脂は、ワイヤの断線を保護するために弾性率の高い樹脂を選定する必要がある。しかしながら、図4 (a) で示した構造では、ワイヤ保護樹脂がセンサチップの短辺方向への圧縮および引張応力を残存させ、46個の圧力センサの特性が不均一となる、また温度特性が著しく悪化することが事前評価で観測されている。

したがって、ワイヤ保護樹脂から受ける応力を最小化するような新たな構造や工法、樹脂の選定が必要となる。筆者らは、図4 (b) に示すように、ワイヤ保護樹脂の量を削減し、センサチップがワイヤ保護樹脂から受ける応力を最小化するために、バスタブ状のセラミック基板にセンサチップをダイボンドする構造を考案した。セラミック基板がキャビティを有しており、このキャビティにセンサチップを固定し、セラミック基板とセンサチップの隙間を応力の影響が殆ど出ない低い弾性率の樹脂（以下、フィル樹脂と記載）で埋めることで、弾性率の高いワイヤ保護樹脂の量を最小化できる。さらに、センサチップの表面にのみワイヤ保護樹脂が塗布されているために、ワイヤ保護樹脂による残留応力が発生しにくいと考えられる。次節では、バスタブ形状基板の最適化について、その詳細を記述する。

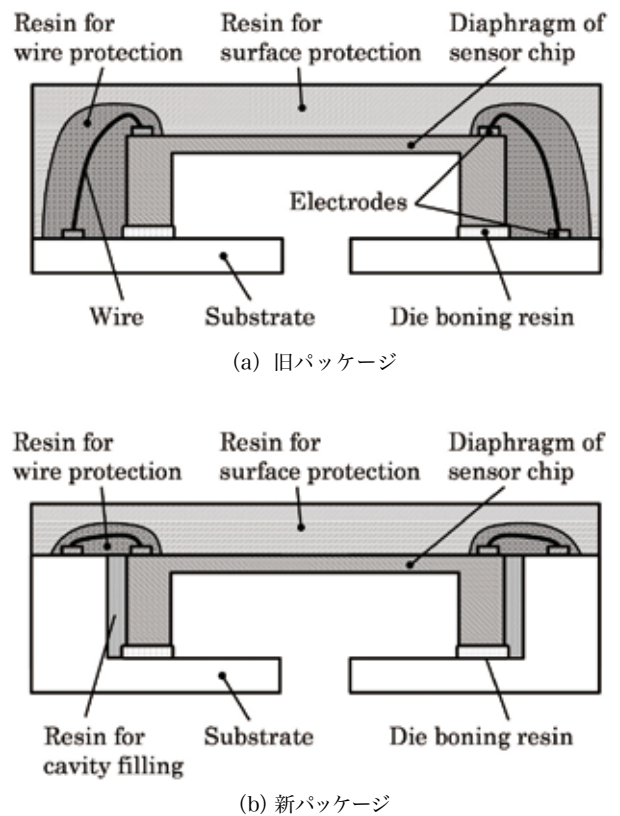


図4 パッケージ構造の新旧比較

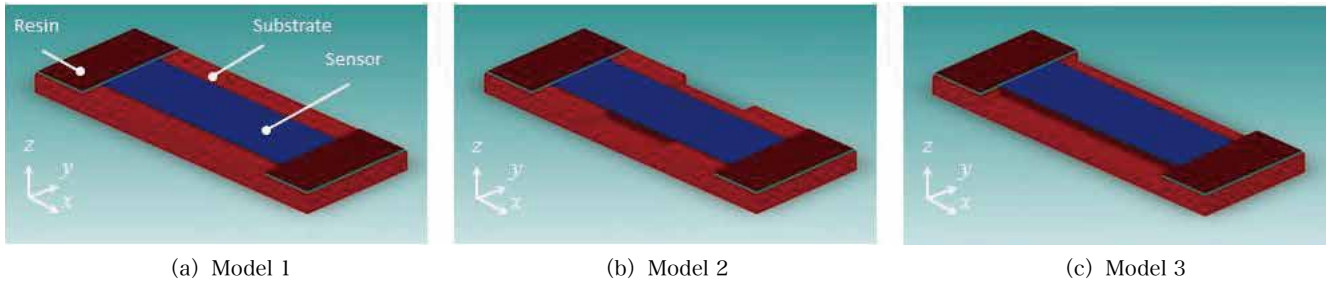


図5 応力分布シミュレーション

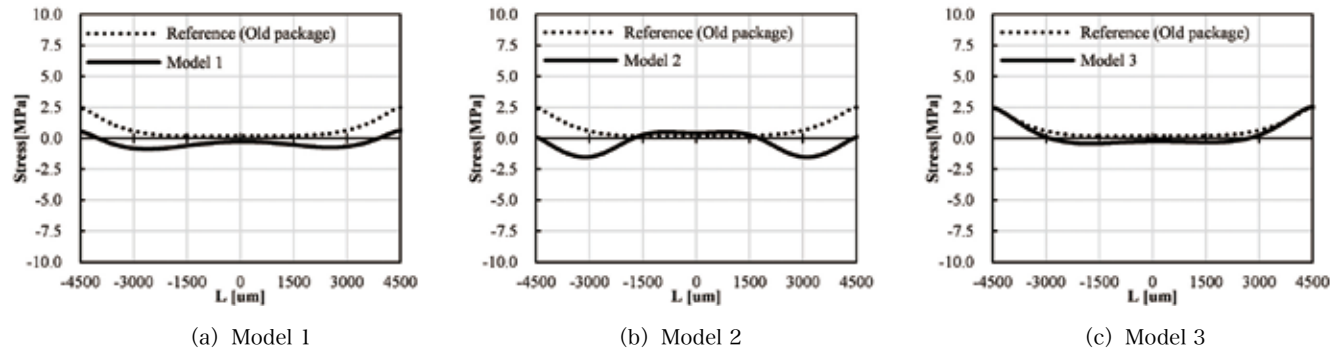


図6 応力分布シミュレーション結果

**3.3 応力シミュレーションによる構造最適化** 提案するバスタブ形状基板において、ワイヤ保護樹脂の膨張収縮による応力がセンサチップに最も影響を与えない形状を応力分布シミュレーションによって構造を最適化する。シミュレーションモデルは図5に示す3パターン用意した。Model 1は単純なバスタブ構造(図5(a))で、Model 2はバスタブの中央部分を削除した構造(図5(b))、Model 3はワイヤ保護樹脂部分のみバスタブ構造となっており中央部分は全く壁が無い構造(図5(c))とした。センサチップはシリコン半導体としての物性値を用い、バスタブ基板はセラミックの物性値を用いた。また、ワイヤ保護樹脂は弾性率470 MPa、熱膨張係数51 ppm/°Cとし、温度を50°C変化させた時センサチップにどのような応力分布が発生するかを解析した。

図6にModel 1~3のダイアフラム上に発生する応力分布のシミュレーション結果を示す。図6の横軸Lはダイアフラム中心からの距離であり、実際のセンサチップでは-4500 ~ 4500 μmまでに200 μmピッチで圧力センサが配置されている。図6の縦軸は、y軸方向への応力を示しており、正の値は圧縮応力、負の値は引張応力を意味する。また、図6の(a)、(b)、(c)にそれぞれModel 1~3の結果を示しているが、Reference (Old package)と記載してグラフ化しているのは、図5に示したシミュレーションモデルには記載がないが、図4(a)に示した旧パッケージの応力分布シミュレーション結果であり、参考として併記した。Model 1は旧パッケージと比較して応力の平均値が

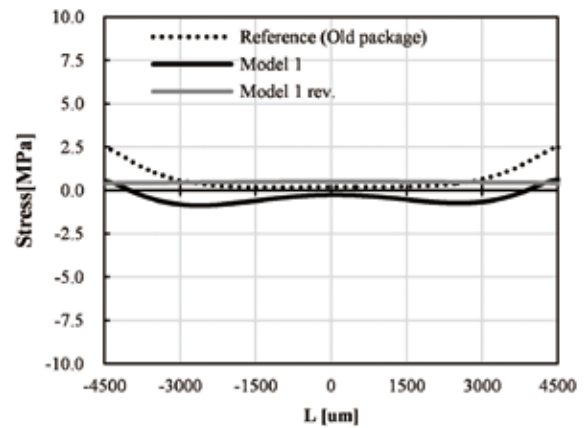


図7 構造パラメータ調整後の応力分布

0に近づいており、圧力センサエレメント間のばらつきが小さくなっている。Model 2はダイアフラムが受ける応力の平均値は0に近づいているが、圧力センサエレメント間のばらつきは旧パッケージと同等である。また、Model 3は旧パッケージと同等の応力分布であり、構造変更による効果が殆ど現れていない。以上より、センサチップの周辺が全て壁で囲まれているバスタブ形状が、ワイヤ保護樹脂による応力の影響を受けにくい構造であり、センサ特性を悪化させず各圧力センサエレメントの特性を均一に保つことができる構造であると考えられる。さらに、詳細は省略するが、Model 1における構造に関する種々のパラメータを微調整することによって、図7に示すように応力分布をよりフラットに近づけることが可能となる。



**3.4 ワイヤ保護樹脂の最適化** バスタブ形状のセラミック基板を用いて開発したセンサチップをパッケージングするが、前述してきたように数種類の樹脂を用途別に選定する必要がある。それぞれの樹脂について、名称と用途を表3に纏める。

表3 パッケージングに使用する樹脂一覧

名称	用途
ダイボンド樹脂	センサチップとセラミック基板を接着する
フィル樹脂	センサチップとセラミック基板の隙間を埋めワイヤ保護樹脂の侵入を防ぐ
ワイヤ保護樹脂	ワイヤを保護する
表面保護樹脂	センサチップの保護および人体接触部の生体適合性を担保し、圧力を伝達する

ダイボンド樹脂とフィル樹脂については、その用途から残留応力の影響が出ないよう弾性率の低い樹脂を選定する必要がある、表面保護樹脂については生体適合性の良い樹脂で、動脈の圧脈波を十分に計測可能な機械的特性を有する樹脂を選定する必要があるが、本論文では詳細な選定過程については省略する。本論文では、ワイヤ保護樹脂の選定過程について以下記述する。ワイヤ保護樹脂は、ワイヤを保護するために弾性率の高い樹脂を選定したい一方で、センサチップへの残留応力をできる限り低減したいため弾性率の低い樹脂を選定したいというトレードオフがある。また、弾性率の高い樹脂でワイヤを覆うことで、温度による膨張収縮がセンサチップだけでなくワイヤに応力を印可し、ワイヤ断線を引き起こす可能性もあり、これらはシミュレーションだけでは結論を出すことが難しい。したがって、実際にバスタブ状セラミック基板に実装し、その実力値を確認する必要がある。

筆者らは、開発したバスタブ状セラミック基板へセンサチップを実装し、センサ特性（オフセット、圧力感度、リニアリティ、および各項目の温度特性）と実装歩留まりについて評価を実施した。ワイヤ保護樹脂の条件としては、エポキシ系の高弾性率の樹脂と、シリコン系の低弾性率の樹脂の2パターンで評価サンプルの試作を行った。但し、シリコン系樹脂はエポキシ系と比較すると低弾性率の樹脂であるが、ワイヤ保護の観点からシリコン系の中では弾性率が高いものを選定した。センサ特性の詳細については本節では省略し、次章で最終品について記述するが、センサ特性としてはエポキシ系でもシリコン系でも差は無く良好な特性で、圧力センサエレメント毎のばらつきも小さかった。しかしながら、エポキシ系のワイヤ保護樹脂で実装した試作サンプルは、53% (8/15) のサンプルで断線が確認された。一方で、シリコン系のワイヤ保護樹脂では、断線したサンプルは確認されなかった。工程では、ワイヤ保護樹脂の塗布および硬化後、配線の引き出しのためにセラミック基板をFPC (Flexible printed circuits) 基板にリフロー (260°C) で実装するが、リフローでエポ

キシ系樹脂の試作サンプルは断線を引き起こしていることがわかった。エポキシ系樹脂の温度変化による膨張収縮が、その高弾性率からワイヤに対し大きなせん断力を発生し、断線を引き起こしていた。一方で、ワイヤ保護樹脂としてシリコン系を使用したサンプルでは、熱衝撃試験 (-20°C、60°Cを1サイクル60分の5回繰り返す) や半田耐熱温度サイクル試験 (ピーク温度260°Cを3回繰り返す) を行っても断線は確認されず、実際の使用圧力以上の耐圧試験 (500 mmHgを10回印可) においても断線は確認されなかった。したがって、選定したシリコン系のワイヤ保護樹脂によって、ワイヤ断線等による実装歩留まり悪化などで生産性の低下を引き起こすことなく、さらに実使用条件でもワイヤを保護できる十分な強度を有していることが示された。

## 4. センサモジュールの特性評価

センサチップをバスタブ状のセラミック基板に実装し、表面保護樹脂を塗布して人体に直接接触できる状態となったものを本論文ではセンサモジュールと呼ぶ。開発したセンサモジュールとしての特性評価は、大別して以下の二つがある。

- A) 圧力温度特性
- B) 圧脈波計測特性

圧力温度特性は、センサモジュール表面 (表面保護樹脂側) に温度条件を変更しながら圧力を印可する。圧脈波計測特性は、実際に人体にセンサモジュールを押圧して動脈内圧すなわち血圧波形を計測できるか否かを評価するが、我々は人体手首での経皮的血圧計測を模擬できるファントムを開発し、これを用いて評価を行った。

**4.1 圧力温度特性の評価** 温度条件5、15、25、35、45°Cで圧力を印可した時の、オフセット、センサ感度特性の代表値を図8に示す。オフセットとは大気解放時のセンサ出力を意味し、センサ感度は300 mmHg印可のセンサ出力を用いて計算しており、共にセンサチップの入力換算値である。また、図8の結果をオフセットの温度係数 (TCO : Temperature coefficient of offset) およびセンサ感度の温度係数 (TCS : Temperature coefficient of sensitivity) として換算した結果を図9に示す。TCOおよびTCSは、各温度の特性差が判別できるよう、5~15°C、15~25°C、25~35°C、35~45°Cでそれぞれ算出している。図8および図9における横軸は、圧力センサエレメントの番号を表している。

センサチップの設計仕様は、オフセットについては typ. -2.5 mV/V (-7.5~2.5 mV/V)、センサ感度については typ. 31  $\mu$ V/mmHg/V (23.2~38.8  $\mu$ V/mmHg/V) であるが、図8の結果から、全ての圧力センサエレメントが仕様範囲内であることがわかる。また、オフセットおよびセンサ感度ともに温度によって特性が著しく変化していない

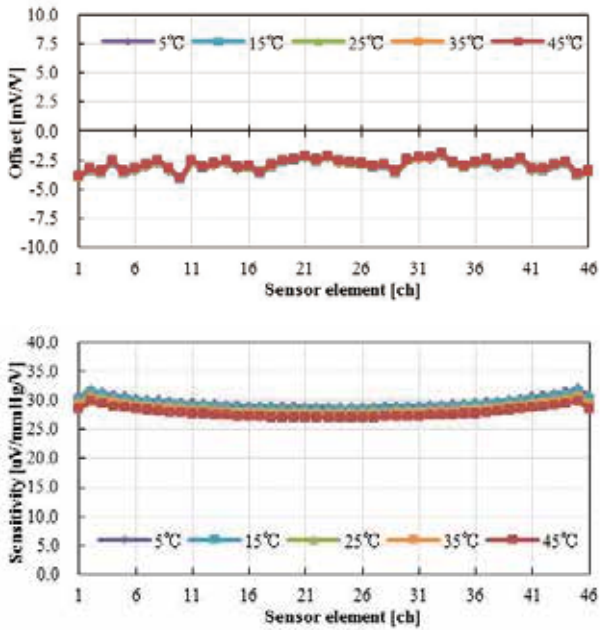


図8 センサモジュールの圧力温度特性

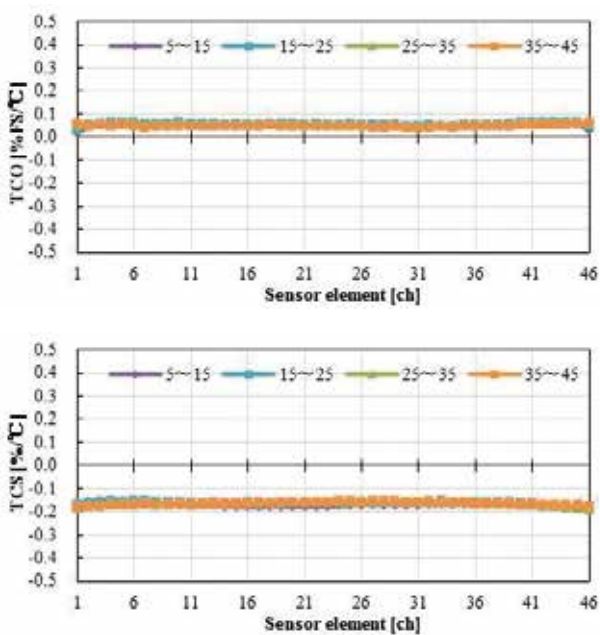
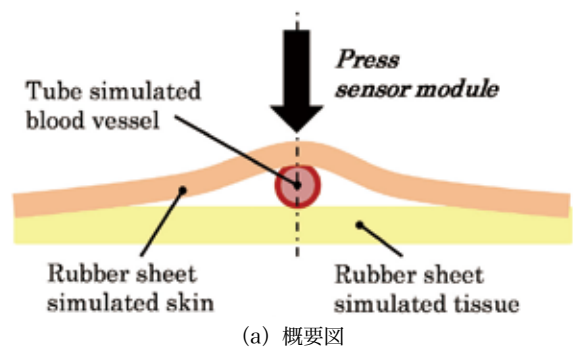


図9 オフセットとセンサ感度の温度係数

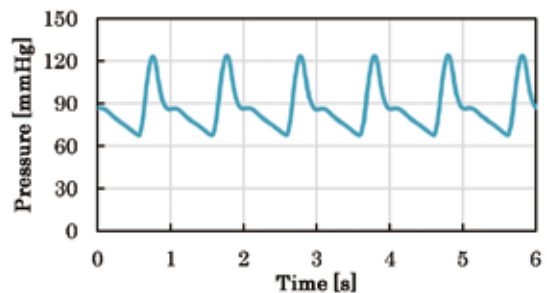
こともわかる。一方で、図8ではオフセットおよびセンサ感度共に、中央から端の圧力センサエレメントにかけて緩やかに特性が変化しているように見えるが、これは周辺樹脂の影響ではなく、センサチップのダイアフラム形状に依存する特性であり、実装前のセンサチップ単体での特性評価においても同様の傾向となるため、実装によって特性が悪化しているものではない。さらに、図9からTCOは約0.05%FS/°C、TCSは約0.2%/°Cで圧力センサエレメント毎に差が無く均一な特性となっている。これは、オフセットおよびセンサ感度の温度による影響が、各圧力センサエレメントで、あるいは低温側から高温側までの各温度において、温度係数が小さいかつ均一な特性であることを意味

する。また、TCOとTCSのセンサチップの設計仕様はそれぞれ、typ.0.036%FS/°C (-0.034~0.107%FS/°C) および typ. -0.203%/°C (-0.353~-0.107%/°C) であり、設計仕様範囲内であることがわかる。実装による特性悪化の影響を受けているとすれば、パッケージングで使用する樹脂の中で最も弾性率が高いワイヤ保護樹脂の影響が温度特性として現れるはずである。また、ワイヤ保護樹脂はセンサチップの両端にのみ塗布しているため、両端の圧力センサエレメントでその影響が顕著になるはずであるが、図9の結果からその傾向は見受けられない。したがって、応力分布シミュレーションの結果を元に提案した新たなパッケージ構造および工法によって、圧力センサエレメント46個全ての特性を良好に保ったまま、センサ周辺に種々の樹脂を塗布できることが示された。

**4.2 手首ファントムを用いた評価** 4.1節では、センサモジュールに圧力および温度を印可し、一般的な圧力センサとしての特性を評価したが、空気による圧力印可であること、また静的圧力であることから、人体に直接センサモジュールを押圧する状況とは異なる。そこで、我々は一般的な圧力センサとしての特性評価だけでなく、実条件に近く、さらに再現性の良い手首ファントムを開発し評価を実施した。開発した手首ファントムによるセンサ評価システムを図10に示す。手首ファントムは、図10 (a) に示すように、橈骨動脈を模擬する管、皮膚を模擬するゴムシート、組織を模擬するゴムシートで構成される。構成要素はそれぞれ、生体を機械的に模擬できる材料パラメータで予め選定されている。また、模擬血管内は水で満たされており、さらに図10 (b) に示すように人体の動脈の拍動を模擬し



(a) 概要図



(b) チューブ内圧波形

図10 手首ファントムによるセンサ評価システム

た圧力が外部から印可されている。本ファントムに開発したセンサモジュールを押圧することで、人体手首の橈骨動脈上皮膚にセンサモジュールを押圧している状況を模擬することができる。さらに、人体と異なり模擬血管の内圧は変動なく常に一定のリズムで拍動し続けるため再現性の高い評価が可能であり、かつ内圧波形を容易に計測できるため、開発したセンサモジュールで計測した波形と内圧波形の比較が容易となっている。

評価として、手首ファントムにセンサモジュールを一定の圧力で押圧した。この時の模擬血管の直上に位置する圧力センサエレメントの出力と、模擬血管内の圧力の関係を図11に示す。図11より、トノメトリ法に従って決定する最適な押圧状態においては、開発したセンサモジュールに

よって計測される波形と、模擬血管内の圧力波形が高い決定係数で相関することが示された。開発したセンサチップおよびセンサモジュールが、圧力センサとしての静的な圧力温度特性が良好であると共に、人体に直接押圧し経皮的に圧脈波を計測する用途において、動脈内の血圧波形を高い精度で再現できることを意味している。

## 5. 連続血圧計測への応用

オムロンヘルスケア株式会社では、2016年4月18日に手首だけで一拍毎の血圧値を連続で測定する技術を開発したとプレスリリースした<sup>5)</sup>。本技術で開発した連続血圧計プロトタイプは図12に示すデバイスであり、本技術に本論文で述べてきたセンサモジュールの試作サンプルが搭載されている。開発した新しいセンサチップおよびセンサモジュールを用いて、睡眠中の一拍毎の血圧波形を連続して計測する臨床研究がスタートしており、これまで計測できなかった全く新しい指標開発へ貢献している。例えば、夜間睡眠中に開発したセンサモジュールを皮膚に押圧し一拍毎の血圧を連続して計測することで、眠時無呼吸症候群による呼吸の停止が急激な血圧上昇を引き起こすことなどがわかっている<sup>9)</sup>。序章でも述べた通り、過去にJENTOW<sup>6)</sup>と呼ばれる連続血圧計測機器が開発され、非侵襲な連続血圧計測に関して研究が行われてきたが、機器が大型であるために計測環境に限られるといった課題や、またセンサモジュール作製に起因する生産工程における実装歩留まり悪化など課題があった。連続血圧計が小型化できたのは、ASIC混載によって周辺回路をセンサチップ内に取り込んだことによる後段回路の縮小、雑音耐性の向上によって後段での対策が不要となり回路規模が縮小できたことも、デバイスとして進化できた要因の一つとして貢献している。さらに、半導体センサのパッケージングにおいては実装コストが高くなるため、実装歩留まりが悪化すると、さらにコストが上昇しデバイスを広く提供するための障壁となり得る。その意味で、センサモジュールの特性や実装歩留まりを抜本的に改善できたことは、新たに開発するデバイスの低コスト化に貢献し、広くデバイスを普及し臨床研究を

加速させることに繋がると考えられる。

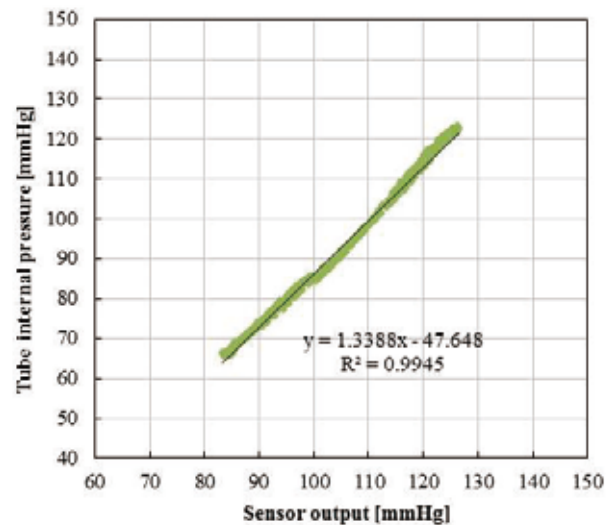


図11 内圧波形とセンサ出力の関係



図12 開発した連続血圧計プロトタイプ

## 6. 結論

トノメトリ法を利用した連続血圧計測では、圧力センサをアレイ上に配列した特殊なセンサが必要となる。従来のマルチエレメントMEMS圧力センサでは、信号引き出し用の電極が多く後工程の難易度が高く実装歩留まりが悪化する、雑音耐性に課題があり後段回路が大規模になることなどの課題があった。本課題に対し、新たに、ASIC混載のマルチエレメントMEMS圧力センサを開発し、上記課題を抜本的に改善することができた。また、一般的に圧力センサのパッケージングでは、樹脂など応力を発生し特性を悪化させるものは極力塗布しないように実装するが、トノメトリ法を利用した連続血圧計測では、圧力センサチップに樹脂を積極的に塗布する必要があった。そのため、樹脂塗布によるセンサ特性の悪化や実装歩留まりの悪化などが課題となっていた。そこで、樹脂を塗布してもセンサ特性が悪化しない新しいパッケージ構造およびその工法を開発した。新しいパッケージ構造として、センサチップを平坦な基板に実装するのではなく、キャビティを有するバス

タブ状のセラミック基板に実装することを提案した。新しいパッケージ構造の最適化のため、応力分布シミュレーションを駆使し、短時間かつ低コストで最適な構造を導き出した。応力分布シミュレーションで導き出した構造でサンプルを作製し、ワイヤ保護樹脂や本論文では詳細は省略したその他樹脂の選定を実施し、パッケージとして実装したセンサモジュールとしての圧力温度特性を46個全ての圧力センサエレメントで良好に保つことに成功した。さらに、圧力センサとしての静的な特性だけでなく、トノメトリ法による連続血圧計測における特有の条件である皮膚に直接センサを押圧するという状況で評価するために、手首ファントムの開発も行った。実際に、手首に走行する橈骨動脈上の皮膚から圧力センサを押圧するのと同等のファントムを構築することで、常に変化する人体とは異なり、再現性の良い環境下でセンサモジュールとしての評価を実施した。その結果、開発したセンサモジュールは、トノメトリ法で血圧波形を計測する用途において、良好な特性を示すことが確認できた。現在は、開発したセンサモジュールを安定して生産できるよう量産に向けた工法開発を進めており、引き続きデバイスと共に開発・評価を進める計画である。開発したセンサモジュールを連続血圧計のコア部分として組み込み、オムロンヘルスケアの新たなミッション「脳・心血管疾患の発症ゼロ」に向け挑戦を続ける。

#### 参考文献

- 1) H. Kubota. "History of blood pressure", The Japanese journal of medical instrumentation, Vol. 80, No. 6, pp. 615-621, 2010.
- 2) O. Shirasaki. "Roles and advancements of blood pressure monitors in cardiovascular medicine", The Japanese Journal of Medical Instrumentation, Vol. 80, No. 6, pp. 622-631, 2010.
- 3) 今井 潤, 大久保 孝義, 菊谷 晶浩, 橋本 潤一郎. "家庭血圧の臨床応用", 日本内科学会雑誌, Vol. 93, No. 9, pp. 202-209, 2004.
- 4) E. Rapsomaniki, A. Timmis, J. George, M. Rodriguez, A. Shah, S. Denaxas, I. White, M. Caulfeld, J. Deaneld, L. Smeeth, B. Williams, A. Hingorani, H. Hemingway. "Blood Pressure and Incidence of Twelve Cardiovascular Diseases: Lifetime Risks, Healthy Life-Years Lost, and Age-Specific Associations in 125 Million People", Lancet, Vol. 383, No. 9932, pp. 1899-1911, 2014.
- 5) オムロンヘルスケア株式会社. "世界初 手首だけで1拍ごとの血圧値を連続で測定する技術を開発", <https://www.healthcare.omron.co.jp/corp/news/2016/0418.html>. (参照2018年2月19日)
- 6) T. Sato, M. Nishinaga, A. Kawamoto, T. Ozawa, H. Takatsuji. "Accuracy of a continuous blood pressure monitor based on arterial tonometry", Hypertension, Vol. 21, No. 6, pp. 866-874, 1993.
- 7) 東健彦, 岡小天. "もっとも一般的な血管壁張力理論", 脈管

学, 講談社, pp. 390-392, 1982, 東京.

- 8) 春田 亮. "リードフレームを使用した半導体パッケージ". 表面技術, Vol. 60, No. 4, pp. 225-231, 2009.
- 9) K. Kario. "Evidence and Perspectives on the 24-hour Management of Hypertension: Hemodynamic Biomarker -Initiated 'Anticipation Medicine' for Zero Cardiovascular Event", Progress in Cardiovascular Diseases, Vol. 59, No. 3, pp. 262-281, 2016.

#### 執筆者紹介



加藤 (中川) 雄樹  
Yuki Kato (Nakagawa)

オムロンヘルスケア株式会社  
技術開発統轄部 要素技術開発部  
専門: 電気工学  
所属学会: 日本生体医工学会



濱口 剛 Tsuyoshi Hamaguchi

事業開発本部 MEMS開発生産センタ  
技術開発部  
専門: 半導体工学



20



## 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

### 1-3 モビリティ

53

30

DOLORSIT  
AMET //

LOREM  
IPSUM

01

02

03

NAVIGATION SYSTEMS  
OF LOREM IPSUM

>>01

>>01

LOREM IPSUM

01

02

03

04

05

06

07

08

09

54

# 自動運転時代におけるドライバモニタリング技術

## 時系列 Deep Learning によるドライバ状態の推定について

日向 匡史・木下 航一・西行 健太・長谷川 友紀

本稿ではドライバモニタリングシステムにおいて、自動運転時にドライバが起こしうる多様な挙動・状態を推定する技術を提案する。当面の間、自動運転時でもドライバは運転行動に対して責任があり、ドライバの状態を監視する技術が必要であると言われている。そこで我々は運転行動に基づいたドライバの状態を測る指標を定義し、逐次出力する技術を構築した。これにより、ドライバが適切な状態で運転状況を監視し続け、自動運転中の事故リスクを削減することが可能となる。我々はこれを実現する手段としてカメラから得られる画像列から、ドライバの顔の向きや視線といった局所的な情報と、姿勢や動きに関する大局的な情報を抽出した。これらを時系列 Deep Learning により学習されたニューラルネットワークに入力することで、ドライバ状態の推定を高精度に認識することが可能となる。

# Driver Status Monitoring System in Autonomous Driving Era

## Driver Status Estimation with Time-series Deep Learning

*Tadashi Hyuga, Koichi Kinoshita, Kenta Nishiyuki and Yuki Hasegawa*

We propose a novel driver's status estimation system based on driver's behavior in autonomous driving scene. In future years, drivers are expected to be responsible for driving and monitoring the surrounding environment even in autonomous driving. To monitor the driver status is very important to ensure that he/she stays proper condition during driving. We define new criteria to measure the adequateness level of the driver during autonomous driving, and realize real-time driver status monitoring based on the criteria. It will contribute to decrease the risk of traffic accidents.

To measure driver's status precisely, we utilize two features: 1st one is driver's facial information, i.e. face direction, gaze direction and eye open-close level, and 2nd one is driver's behavior taken by image sequence. These features are concatenated and fed into a pre-trained recurrent neural network. By using the state-of-the-art neural network technology, the driver's status can be estimated with high accuracy.

### 1. まえがき

自動運転の実用化へ向けた動きが本格化しており、2020年頃には高速道などの特定の環境下での自動運転が実現すると想定されている<sup>1)</sup>。しかし、完全な自動運転を実現するには及んでおらず、当面は表1に示す自動運転レベルの中でも、ドライバの責任下での部分的な自動運転をする「自動運転レベル2」が主流になると言われており、ドライバは自動運転中も運転行動が適切であるか監視する必要がある。この段階は当面続くとする調査結果もある<sup>2)</sup>。

そこで我々は、自動運転時におけるドライバの状態に着目し、ドライバが運転に集中している状態かを推定するドライバモニタリング技術を開発した。本稿では、ドライバ

の集中度合いを評価する指標として実際の運転行動に基づいた3指標を新たに定義し、ドライバを撮影した画像の時系列を入力とし3指標の評価結果を逐次出力する、ドライバ運転集中度センシング技術を提案する。

表1 米SAEが提唱する自動運転レベル

レベル0	自動化なし
レベル1	運転支援 (ADAS)
レベル2	部分的な運転自動化
レベル3	条件付き運転自動化
レベル4	高度な運転自動化
レベル5	完全運転自動化

## 2. 背景

**2.1 自動運転を巡る社会動向** 自動運転に向けた法改正の議論が現在も続いている。国連の自動操舵に関する国際基準（通称R79）の改正に向けた議論の中で、自動運転車は下記要求を満たすように制度化される見込みである<sup>3)</sup>。

- システムが機能限界に陥る4秒前にはドライバに警告
- ドライバが運転に集中しているか常時監視し、居眠りなどをしている場合には警告
- 警告に応じない場合は自動的に危険を最小化する制御を実行

以上からドライバの状態を監視することは将来的に必須の機能であり、その中でも警告に適切に応じることが可能かを自動運転システムは確認しておく必要がある。

**2.2 従来のドライバモニタリングシステム** 従来のドライバモニタリングは手動運転中のドライバが正常に運転できている状態かを検知するものであり、基本的に1指標でもって判断がなされるものが多い。たとえば、目の開閉に注目した居眠り検知や顔の向きに注目した脇見検知などがあり、実用化も進んでいる<sup>4)</sup>。しかし、これらは手動運転中にドライバが車両前方を注視しているかを判別するのみで、自動運転時に起こりうる多様な動作の検知は困難である。また最近では、耳に装着することで脈波を計測することにより眠気状態を検知するという技術が開発されており<sup>5)</sup>、これによりドライバが眠いかを判断することが可能となるが、覚醒時に起こりうる多様な危険に対応することが困難である。また、デバイスを装着することによって運転時のドライバの心理的負担となるため、センサとしては非接触のものが望ましい。

また、人の動作に対してラベルを付与し、画像の時系列からどのラベルに相当するかを認識する技術<sup>6) 7)</sup>があり、これをドライバモニタリングに適用することも考えられる。しかし、この手法は所定の動作を認識するものであり、自動運転時に起こりうる多様な動作を網羅するには識別性能の劣化が想定される。以上から、従来手法はドライバの多様な動作に対応できず、自動運転への適用は困難と考える。

**2.3 Deep Learning を活用した運転集中度の提案** 筆者ら<sup>8)</sup>は、自動運転モードから手動運転モードへの走行モード切替時にドライバの運転復帰の可能性を判断するドライバモニタリング技術を提案している。これは走行モード切り替え時にドライバがどのくらいの所要時間で運転復帰可能になるかを判断し、その所要時間に応じて円滑な走行モードの切り替えを実行できるよう車両の制御システムに情報を送信する。しかし、この技術においては想定されたモード切り替えには対応可能であるが、自動運転車の周辺環境の認識が不完全なことによって起こりうる緊急事態への対応を想定していない。このため、本稿で提案する技術では、緊急時の対応および想定される切り替えの双方に対応した新たな指標を提案しこれを実現することを目指した。

## 3. 自動運転時におけるドライバ状態の評価指標の提案

以上の観点から、我々は自動運転時における運転集中度センシングの指標として新たに3指標、Eyes-on/off、Readiness-high/mid/lowおよびSeated-on/offを定義する。これらは「認知」「判断」「操作」という実際の運転行動と密接に関係するものとしている。図1にその関係を示す。

**3.1 Eyes-on/off** この指標はドライバが常時走行を監視できているかを確認するためのものである。ドライバが進行方向を確認している状態、もしくは運転上必要となる短時間の確認動作、たとえば計器・ミラーの確認など、を行っている場合はEyes-on、それ以外のドライバの挙動、たとえばスマホや本、カーナビを注意する、目を閉じている、といった状態はEyes-offとなる。

**3.2 Readiness-high/mid/low** ドライバが運転の準備ができているかを3段階で出力する。覚醒して運転に無関係な動作をしていない場合はReadiness-high、運転に無関係な動作をしているが、システムからの警告を受けて軽い手順で運転に復帰できるような状態をReadiness-mid、寝ているなど運転が困難な状態をReadiness-lowと定義する。

**3.3 Seated-on/off** ドライバが運転席に着座しているかを指標として、運転行動がとれるかを判断する。ドライバが着座していればSeated-on、離席していればSeated-offとなる。手動運転時には想定できないが、自動運転がより高度になるに従いドライバの監視に対する意識が低くなり、運転行動の準備を怠る可能性があるため、これを定義する。

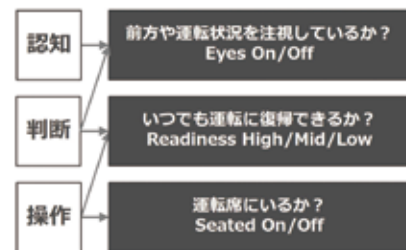


図1 運転集中度の3指標と運転行動との関係

## 4. 自動運転時における運転集中度センシング

本章では3指標を識別するための提案手法の処理の流れを記載する（図2）。識別器は大きく分けて3段階の構成となっており、近赤外線カメラから入力される画像列に対して、まず顔画像センシング技術を適用することにより顔の局所的な情報を取得する。同時に Convolutional Neural Network（以下CNN）<sup>9)</sup>を用いドライバの姿勢に相当する特徴を取得する。そしてこれらの出力を統合し、再帰型ニューラルネットワーク（以下RNN）の1種である、Long Short-Term Memory（以下LSTM）<sup>10)</sup>を用いて、時々刻々変化するドライバ状態の遷移を認識する。CNNと

RNNを組み合わせたネットワーク構成はよく研究されているが<sup>3)</sup>、我々は顔画像センシングを組み合わせることによって高精度化と高速化を実現している。以下に詳細を記載する。

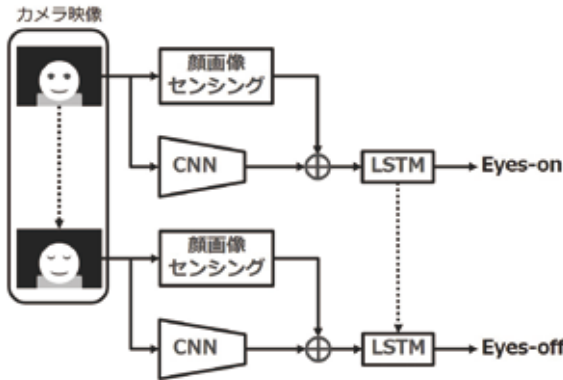


図2 運転集中度センシングのネットワーク概略図

**4.1 近赤外線カメラによる画像入力** 車両中のドライバーの画像を安定して取得するために、我々は近赤外線カメラを採用した。一般的なRGBカメラについては日照条件によっては活用可能ではあるが、昼間は直射日光の入射の影響が大きく、また夜間は照明が必要になる上、昼間の顔とパターンが変化してしまうため望ましくない。今回採用したカメラはカメラユニットに搭載された近赤外線LEDによって不可視領域ではあるが顔領域に常時照明が照射された状態となるため、昼夜問わず安定した顔パターンが取得可能である (図3)。



図3 近赤外線カメラによる人物の画像  
(同意書により画像利用許諾確認済)

**4.2 顔画像センシング** 画像から顔領域を検出し、顔に付随する様々な情報を出力する機能を指す。我々はオムロンが開発したOKAO Visionと呼ばれる技術をベースとして用いており、以下の機能を運転集中度センシングのために活用している。

- 顔検出
- 顔器官点検出
- 顔向き推定
- 目開閉識別
- 視線推定

これら個々の技術は従来RGBカメラでの顔のみに対応しているが、近赤外線カメラで得られた画像へ対応させる

ことで、高速高精度にドライバーの特徴を取得することが可能である。

**4.3 CNN** CNNは従来の全結合型のネットワークと異なり、学習により取得された小領域のフィルタと画像を畳み込み演算を実施する畳み込み層、および畳み込み層で得られた画像を所定のルールで圧縮するプーリング層を幾重にも重ねた構成を持ち、画像の変形に対するロバスト性を向上させたネットワークである。提案自体は古くより行われていたが、近年の汎化性能を向上させる学習方法の提案により、様々な画像認識系のベンチマークテストのState-of-the-Artを更新した、昨今のDeep Learningブームの火付け役である。

**4.4 LSTM** LSTM (図4) は入力として時系列データを用い、所定の1フレームの認識結果を得るために該当フレームの情報に加えて前フレームの中間出力を入力とする。また、セルと呼ばれる内部記憶を保持し、この値によって出力に対する該当フレームの入力の重みを計算する。この重みは事前学習によって挙動が設定されており、従来のRNNに比べてより長期の記憶が可能になることで知られている。

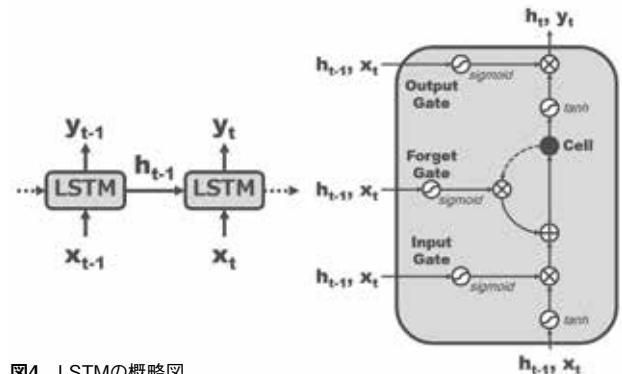


図4 LSTMの概略図

**4.5 学習データセットの構築** 図2に記載のネットワークに対して、各パラメータを時系列Deep Learningを用いて決定する。我々は自動運転中にドライバーが起こしうる動作を洗い出し、その中から代表的なパターンを選定し、学習に利用した。表2、表3および表4にそれぞれの指標に関する動作例を示す。

100人の被験者に対してそれぞれの動作を指示し。その様子を撮影した画像列を用いる。このうち50人分のデータを学習用のデータとし、残りを評価対象とした。評価に際しては1動画中1動作とし、認識に用いたフレーム毎の認識結果を集計し、多数決で決定した運転復帰可否レベルと正解レベルを比較する。カメラの画像サイズは720×480、画角約10度、フレームレートは30 fpsである。このカメラを運転席正面に設置しドライバーの動作を一定時間撮影し、計200万フレームのデータを収集した。なお、ニューラルネットワークの学習および評価にはPreferredNetworks社が提供する学習フレームワークであるChainer<sup>11)</sup>を用いた。



表2 Eyes-on/offの動作例

On	運転をする 正面を注視する 窓にもたれる
Off	脇見する スマホを操作する 居眠りをする

表3 Readiness-high/mid/lowの動作例

High	運転をする 正面を注視する 計器を一時的に確認する
Mid	飲食をする スマホを操作する 通話する
Low	居眠りをする 突っ伏す パニックになる
Low	居眠りをする 突っ伏す パニックになる

表4 Seated-on/offの動作例

On	上記のドライバ動作
Off	なし(運転席に搭乗しない)

4.6 評価 学習データとほぼ同数のデータを評価データとして用いる。このとき、各指標における正解率は表5のようになった。

表5 各指標の正解率

Eyes	95.4%
Readiness	94.8%
Seated	99.0%

## 5. 実用化に向けた検討

### 5.1 現場の課題を網羅した大規模データベースの構築

以上の技術を構築するにあたり、我々は学習および評価に必要なドライバの様々な挙動を撮影したデータベースを構築した。自動運転中のリアルなドライバの挙動データは現状取得が困難なので、①ドライブシミュレータの活用、②実車走行中の助手席での撮影、③手動運転中のドライバの撮影、など様々なシチュエーションでの撮影を実施し、データベースの構築を行った。

表2や表3に示したドライバの不適切な行為や異常な状態を撮影するには、走行中の車両で実際に演技をすると危険が伴うため、ドライブシミュレータにて撮影を行った(図5)。前方のモニタには運転中の風景を表示することで実際の走行中の環境に近づけたうえで、被験者に様々な演技を指示した。また、走行中の助手席に座った搭乗者は、運転状況の監視という点では自動運転中のドライバの挙動に近いが、実際には運転の責任を持たないため、自動運転中のドライバの運転集中度の推移に乖離がある可能性が高い。運転中のドライバは運転の責任があるため、もっとも運転集中度が高い状態を撮影可能であるが、集中度が低下したデータ

の取得が困難という短所がある。我々はこれらのデータを組み合わせて、多様なドライバ状態を網羅したもののみならず。



図5 ドライブシミュレータ  
(同意書により画像利用許諾確認済)

5.2 顔画像センシングの耐環境性向上 顔画像センシング技術において、画像中の顔の位置を推定する技術を顔検出と呼ぶが、一般的には顔に現れる固有の明暗パターンを学習し、画像中に現れる同様なパターンを顔として出力する。このとき横顔やマスク装着時の顔(以降マスク顔と呼ぶ)のようにパターンが大きく変化した顔画像の検出は困難となる。そこで我々は上記データベースから横顔やマスク顔のサンプルを抽出し、これらを従来の顔検出の学習サンプルと組み合わせることで、横顔やマスク顔を正面顔と同様に高精度に検出することができる。さらにマスク顔をマスク顔として識別することによって器官点検出などの後段の処理をマスク顔に対応した処理を実施することが可能となる。処理結果の例を図6および図7に示す。

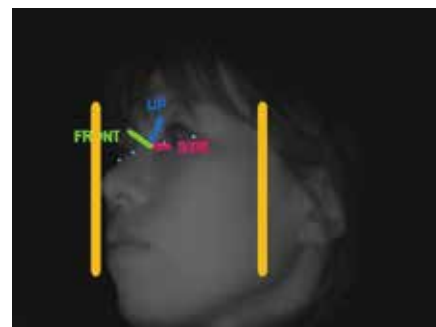


図6 横顔に対する顔検出結果  
(同意書により画像利用許諾確認済)



図7 マスク装着時の顔検出結果  
(同意書により画像利用許諾確認済)

**5.3 ネットワークの共有による出力の効率化** 実用化を考える上で、計算コストおよびメモリ消費量を考慮する必要がある。提案した3指標を出力する上で、それぞれ最適化されたニューラルネットワークを構築すると、処理時間として単純に1ネットワークの3倍の時間を要する。そこで、ネットワークの中間層までを共通化し、最終出力の段階で3出力を並列に出力する仕組みを導入する(図8)。ここで問題となるのが3出力を同時に学習することになり、正解情報と損失の計算に困難が生じるため、ラベルの修正が必要となる。具体的には「誰も座っていない画像(Seated-off)はEyes、Readinessでは損失を計算しない」といったルールを追加することになる。

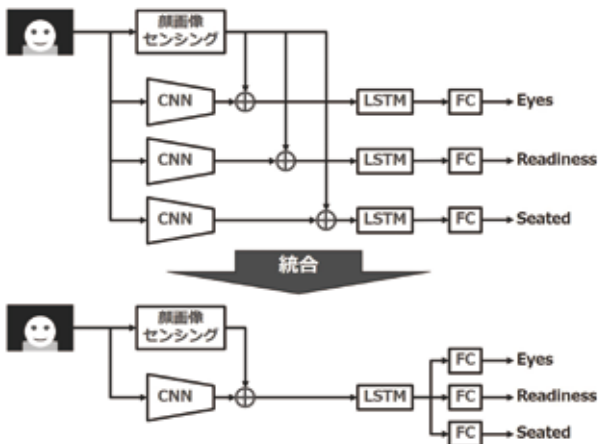


図8 ネットワークの共通化

ラベルが修正された正解情報をもとに学習を実施したところ、その前後で大きな性能変化は生じなかったことから、共通化したモデルを採用した。

**5.4 高速化の検討** 計算資源が潤沢でないシステムにて提案手法を構築する場合、大規模なNeural Networkをそのまま搭載することは計算コストおよびメモリ消費量双方の観点で困難を生じる。一般的には入力する画像を圧縮することで必要となるネットワークの要素数が大幅に削減できるため、上記課題を克服できる。しかし、単純に画像を圧縮すると写っているドライバーの顔の情報が損なわれる。居眠り検知や脇見検知といった技術が提案されたことから、顔をセンシングすることによってドライバーの状態推定に必要な情報が獲得できることを示している。

そこで、動き特徴についての解像度のみ下げ、顔画像センシングに利用する画像の解像度は元画像と同じとすることで、顔から推定できるドライバーの高次な情報を用いて低解像度画像でも高精度なレベルの推定が可能となる。また、低解像度化によりネットワークのパラメータ数の大幅な削減、処理の高速化が期待できる。筆者らが行った実験<sup>5)</sup>では、解像度を下げた状態での学習および評価を実施したところ、720×480から24×18まで解像度を下げても5 pt程度の劣化しか起こらないことが確認されているため、本稿の提案手法においても、解像度を24×18に圧縮としている。

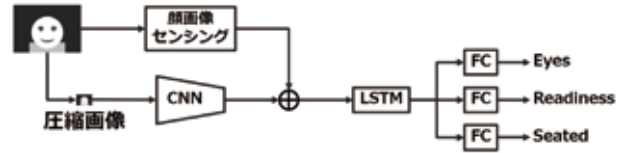


図9 圧縮画像を利用したネットワーク構成

## 6. 将来の展望

今後の展望としてはカメラから得られる画像と生体情報および周辺の交通情報を組み合わせることでより深くドライバ状態をセンシングすることを目指す。画像センシング技術は非接触での計測が可能のため、ドライバへの負担なくドライバの表情・動作等の表出する現象の認識は可能だが、内的な状態を計測することは困難である。たとえば、ドライバは正面を向いているが、考え事をしており走行環境の監視が不十分である場合でも、今回の運転集中度センシングではEyes-onという出力がなされる。また、右左折時や追い越し時の安全確認といった、画像からだけでは判別できない適切な運転行動を網羅できていない。

生体情報を利用することによってこれら運転上のリスクを大きく削減することが可能になると考える。たとえば脈拍の計測や表情推定を組み合わせることで眠気の予兆を検知することで、ドライバが実際に眠くなる前に警告を促し、運転の引継ぎを安全に実施可能となる。また、体調の変化などを検知し休憩を促すことで、よりドライバの負担を調整することが可能となる。

また近年開発が盛んな外界の周辺監視センサと融合することでドライバの視線の先にある対象を認識することが可能となる。これにより、運転行動が適切であるかの判断の確度を向上させることができるほか、走行中のドライバへの交通情報の提供など、より安全な運転を心がけたフィードバックが可能となる。

## 7. むすび

本稿では安全かつ円滑な自動運転の実現を目指して、画像列を入力とし、自動運転時におけるドライバーの状態に着目し、ドライバが運転に対して責任を負える状態かどうかを推定するドライバモニタリング技術を提案した。提案手法ではCNNとLSTMを組み合わせ、画像のみではなく顔画像センシング結果を使用することで高精度に識別できることが確認できた。今後は一層の性能向上とともに生体情報・周辺監視センサなどの情報を加味した、より深いドライバ状態の推定を開発していく。

## 参考文献

- 1) 内閣官房IT総合戦略室: 官民ITS構想・ロードマップ2017 <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/dai71/siryous3-2.pdf>
- 2) 矢野経済研究所: “2030年の自動車技術展望”(2017)

- 3) 国土交通省: “自動運転に係る国際基準の動向” (2016)
- 4) 株式会社デンソー: “ドライバーステータスマニター”, <http://www.denso.co.jp/ja/news/newsreleases/2014/140403-01.html>
- 5) 富士通株式会社: “FEELythm (フィーリズム)”, <http://www.fmworld.net/biz/uware/ve31/>
- 6) J. Donahue, L. A. Hendricks, S. Guadarrama, M. Rohrbach, S. Venugopalan, K. Saenko and T. Darrell: “Long-term recurrent convolutional networks for visual recognition and description”, CoRR, abs/1411.4389, (2014) .
- 7) A. Karpathy, G. Toderici, S. Shetty, T. Leung, R. Sukthankar and L. Fei-Fei: “Large-scale video classification with convolutional neural networks”, CVPR (2014) .
- 8) 日向、木下、青位、濱走、山下、藤吉、諏訪、川出: “時系列 Deep Learning を用いたドライバの運転復帰可否レベル推定”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU) (2017) .
- 9) Y. Lecun, L. Bottou, Y. Bengio and P. Haffner: “Gradient-based learning applied to document recognition”, Proceedings of the IEEE, 86, 11, pp. 2278-2324 (1998) .
- 10) S. Hochreiter and J. Schmidhuber: “Long short-term memory”, Neural Comput., 9, 8, pp. 1735-1780 (1997) .
- 11) Preferred Networks: “Chainer: A exible framework of neural networks”, <http://chainer.org/>.

### 執筆者紹介



日向 匡史 Tadashi Hyuga  
 技術・知財本部 センシング研究開発センタ  
 専門: 画像処理、パターン認識  
 所属学会: IEEE



木下 航一 Koichi Kinoshita  
 技術・知財本部 センシング研究開発センタ  
 専門: 画像処理  
 所属学会: 電子情報通信学会、情報処理学会



西行 健太 Kenta Nishiyuki  
 技術・知財本部 センシング研究開発センタ  
 専門: 画像処理、パターン認識



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

## 車載脈拍センサの開発

### マイクロ波センサからの脈拍数推定手法について

三谷 重知

近年、高齢化社会を迎え、ドライバの健康状態に起因する事故が増えつつある。運転中に体調が悪化した場合には、重大事故に発展することもあるので、その予防策が一層に求められている。

ドライバの健康状態を把握するための生体指標の1つとして脈拍数がある。これにより、ドライバのストレス状態などを把握することができると考えられている。そこで、マイクロ波をドライバの身体へ照射し、その反射波のドップラシグナルから脈動成分の抽出を行い、脈拍数を推定する車載脈拍センサを開発した。

この脈拍センサを運転席のシート内に設置し、運転中の外乱の大きな状態でもドライバの脈拍数を正確に推定できるようにするため、適応フィルタなどの信号処理技術を駆使した独自の脈拍数推定アルゴリズムの開発を行った。

本稿では、車載脈拍センサとして測定精度を維持するのに有効な信号処理アルゴリズムについて述べる。

## Development of the in-vehicle pulse sensor

### About the pulse rate estimate technique from a microwave sensor

*Shigetomo Mitani*

In late years accidents due to the health condition of the driver are increasing. The precaution is required all the more.

Therefore we developed the in-vehicle pulse sensor using the microwave sensor. We installed this pulse sensor in the driver's seat and succeeded in even a big state of the disturbance while driving allowing you to estimate the pulse rate of the driver exactly.

We speak effective signal processing algorithm to maintain measurement accuracy as an in-vehicle pulse sensor in this paper.

#### 1. まえがき

近年、高齢化や健康状態による運転への不安や飲酒・薬物の乱用、モバイル端末操作による危険運転などの社会的な課題に対する具体的な対策の開発が望まれている。

そこで、運転中のドライバの生体情報を取得することで、ドライバの状態を把握し、その状態に合った適切な支援を行うドライバモニタの領域が注目を浴びている。ドライバモニタでは、車室内で着座姿勢という限定された環境下で、運転中のある程度まとまった時間において生体情報を取得できるという、車載環境ならではのメリットを活かし、更に、将来的にIoTと絡めた様々なサービス提供と連携することで、今後において発展性の高い事業が期待されている。

ドライバの健康状態を把握するための生体指標の1つとして脈拍数がある。これにより、ドライバのストレス状態などを把握することができると考えられている。

そこで我々は、運転中のドライバの脈拍数を正確に推定することのできる車載脈拍センサの開発を行った。

これまでに、車両のシートに設置して、ドライバの脈拍数を測定するセンサの方式としては、次のタイプのものが考えられてきた。

- ①電極式（インピーダンス変動を計測）
- ②圧力センサ（圧電素子）
- ③エアチューブ式（空気圧）
- ④静電容量方式
- ⑤光学式（ヘモグロビン濃度による吸光率変動を利用）
- ⑥電波式

停車中の車両において、ドライバが安静にしている状態であれば、どの方式でも脈拍数を推定することは比較的容易であるが、運転中の外乱の大きな状態で脈拍数を正確に推定することは非常に困難となる。また、耐久性の面を考えると①から④の手法では少なからず課題が残る。⑤の光

学式では、着座の仕方によっては、脈拍を測定可能な部位が外れる場合が多く、正しく測定できない頻度が増すことになる。⑥の電波式の場合は、身体に広く照射することができ、比較的安定した測定が可能であり、また、非接触での測定が可能であるため、車載という過酷な環境下に耐え得る特性を持つ。電波式での従来研究<sup>1)</sup>では、実際に走行中の車両内において、運転動作を伴う場合には、正確な測定が困難であり、処理も大掛かりなものであった。そこで我々は、コンパクトに実装可能な独自の信号処理手法を開発し、運転中でもリアルタイムに脈拍を測定することを可能とした。

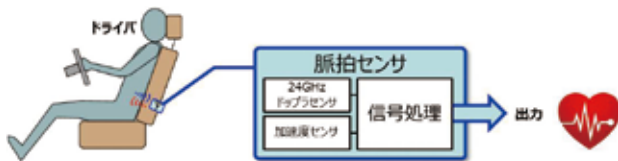


図1 電波式脈拍センサ開発イメージ

図1に示すように、脈拍センサを運転席シートに内蔵し、電波センサで検出した信号からデジタル信号処理により脈拍数を推定する。また、加速度センサで車両振動による衝撃を検出して判別することで、誤った脈拍数の出力を防止する。

## 2. 脈拍数測定原理

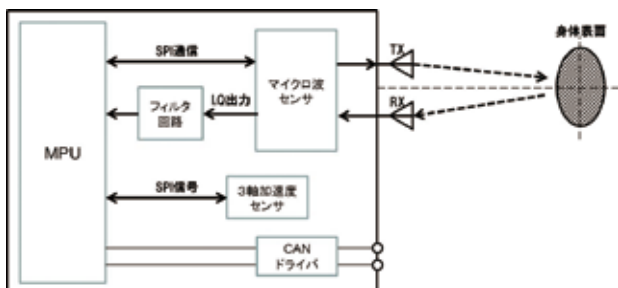


図2 脈拍センサシステム構成

図2に脈拍センサのシステム構成を示す。電波式の脈拍センサでは、送信アンテナTxから身体表面へ電磁波（マイクロ波）を照射し、その反射波を受信アンテナRxで受信する。マイクロ波センサでは、送信する送信波の発振を行い、また、送信波と受信波とをミキサした後のI、Q信号を出力する。MPUでは、フィルタを通した後のI、Qのアナログ信号をA/Dコンバータによってサンプリングを行い、デジタル信号処理を行ってI、Q信号から身体表面の微細な動きを検出し脈拍数の推定を行う。

送信波、受信波、ミキサ後の信号の理論式は、式 (1) ~ 式 (3) で表わされ、I、Q出力信号の理論式は、式 (3) から低周波数のドップラ角速度を含む項のみを残し、I出力に対してQ出力を  $\pi/2$ だけ位相を遅らせた式 (4)、式 (5) で与えられる。

- 送信波の理論式

$$x_s(t) = A_s \cos(\omega_s t) \tag{1}$$

- 受信波の理論式

$$x_r(t) = A_r \cos([\omega_s + \omega_d] t + \varphi) \tag{2}$$

- ミキサ後の理論式

$$\begin{aligned} x_s(t)x_r(t) &= A_s A_r \cos(\omega_s t) \cos([\omega_s + \omega_d] t + \varphi) \\ &= A_s A_r / 2 \{ \cos(\omega_d t + \varphi) + \cos([2\omega_s + \omega_d] t + \varphi) \} \end{aligned} \tag{3}$$

- I出力の理論式

$$I(t) = A_s A_r / 2 \cos(\omega_d t + \varphi) \tag{4}$$

- Q出力の理論式

$$Q(t) = A_s A_r / 2 \cos \omega_d t + \varphi - \pi/2 \tag{5}$$

$t$  : 時間

$x_s$  : 送信波

$\omega_s$  : 送信波角速度

$A_s$  : 送信波振幅

$x_r$  : 受信波

$\omega_d$  : ドップラ角速度

$A_r$  : 受信波振幅

$\varphi$  : ターゲットとの距離に依存する位相

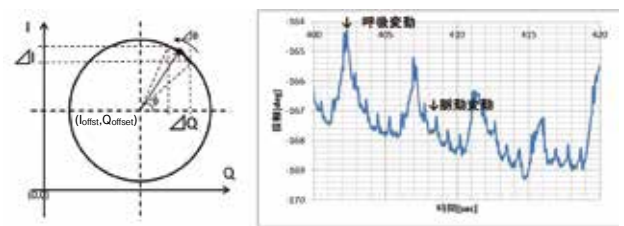


図3 I-Qリサージュ波形と身体表面の観察

身体表面の動きをI、Q出力に含まれるドップラ角速度  $\omega_d$  を推定することで検出する。このドップラ角速度  $\omega_d$  を求めるために、図3の左に示すようにI、Q出力信号で形成するI-Qリサージュ波形の位相  $\theta$  を定義すると、ドップラ角速度  $\omega_d$  は位相  $\theta$  を時間微分したものである。また、この位相  $\theta$  により同図右に示すように身体表面の微細な動きを観察することが可能となる。位相  $\theta$  の値を変位量に換算すると、呼吸による変動が  $50 \mu\text{m}$  に対し、脈動が  $10 \mu\text{m}$  の微細な変動で観測できている。しかし、この変動は、測定する部位や体表面の支持の仕方によって異なる。また、非安静状態では、様々な体の動きが外乱となるため、脈動を観測することが困難となる。

外乱に埋もれた状態から脈動の信号を抽出するため、本脈拍センサでは、デジタル信号処理手法を駆使している。また、位相  $\theta$  を直接計算する代わりに、ドップラ角速度  $\omega_d$  の近似式として、式 (6) を用いることで、演算の効率化を図り、小型のマイコンでも実装可能な処理を構成して、小型化に成功している。

● ドップラ角速度  $\omega_d$  の近似式

$$\omega_d \approx \frac{(I-I_{offset}) \times \Delta Q - (Q-Q_{offset}) \times \Delta I}{(I-I_{offset})^2 + (Q-Q_{offset})^2} \quad (6)$$

$\Delta I$  : I 出力の時間変動量

$\Delta Q$  : Q 出力の時間変動量

$I_{offset}$  : I-Q リサージュの中心点 (I 軸)

$Q_{offset}$  : I-Q リサージュの中心点 (Q 軸)

### 3. 開発目標



図4 脈拍センサ外観

表1 脈拍センサ主要仕様

項目	内容
動作温度	-20°C ~ +70 °C
サイズ	45×50×17 mm
消費電流	Max 150 mA以下
通信	C-CAN
Doppler Sensor周波数	24.05~24.25 GHz
Doppler Sensor出力強度	3 dBm
脈拍数検出範囲	50~160 BPM
脈拍数推定精度(RMS誤差)	±10 BPM (走行時)

今回開発した脈拍センサの外観を図4に示している。また、主要仕様を表1に示している。図2に示すように、SPI通信によってマイクロ波センサ及び加速度センサのレジスタ設定を行って制御し、加速度センサからは加速度のデータを取得する。加速度データは、センサへ加わる衝撃による外乱を検知するために利用される。今回開発した脈拍センサでは、CAN通信によって、外部ユニットと接続して利用することができる。この構成により小型化を達成し、シート内に内蔵可能なようになっている。また、脈拍数の検出範囲と推定精度は、表1に示す仕様を達成することを開発目標とした。

本脈拍センサにおける課題を示すために、図5左により、外乱の様子を示している。運転席のシート内にセンサを埋め込んだ場合、身体表面とセンサ間の距離変動や、周辺金属物とセンサ間の距離変動が大きな外乱要因となる。更に、身体表面は、観測したい脈動の他に、呼吸体動や手足頭の動きなどに伴う自発体動や走行時の車両振動を起因とする衝撃体動なども外乱要因となる。

図5の右には、走行時のドップラ角速度  $\omega_d$  の変動の様子を示している。停車時の状態に対して、100倍以上の外乱

が入り脈拍数の推定が困難となる。目標の達成のためには、車両振動や呼吸等の自発体動などの外乱の影響を抑えて、脈拍数を推定する技術の開発が必要となる。

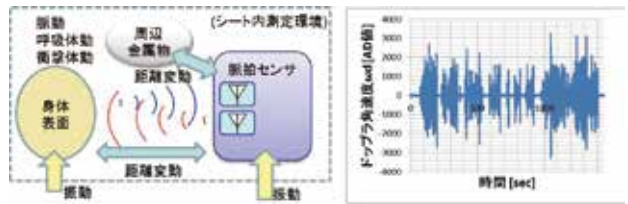


図5 車載脈拍センサにおける外乱

### 4. 技術内容

ここでは、上述の課題を解決するために開発した技術のなかから主要な次の3つの内容を示す。

- ① 周辺金属物との位置関係の変化に伴う I-Q リサージュのオフセットずれの補正
- ② 外乱に埋もれた脈動周期信号検出のための同期検波
- ③ 呼吸高調波等の周期性アーチファクトの除去

我々が開発した脈拍センサでは、電波センサが出力する I-Q リサージュの振る舞いを分析して、身体表面の動きを推定する技術をベースにしている。そのために、図6に示すような I-Q リサージュを観測できる分析ツールを準備して開発を行っている。評価の基準としては、リファレンスセンサとして、容積脈波を検出できるイクリップ型の脈拍センサを別途用いている。以降、マイクロ波ドップラセンサを用いた脈拍数推定値を MDS 値と呼び、リファレンスセンサによる脈拍数推定値をリファレンス (Ref.) 値と呼ぶことにする。そして、MDS 値とリファレンス値との RMS (Root Mean Square) 誤差を評価することで、脈拍数推定精度を示す。

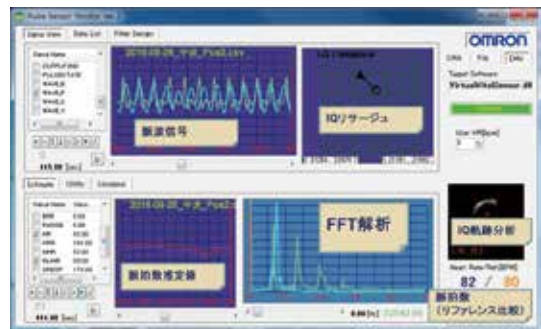


図6 脈拍センサ出力分析ツール

**4.1 I-Q リサージュのオフセット推定** I-Q リサージュの振る舞いを分析して、脈拍数を推定しているため、I-Q リサージュの円軌道の中心となる I-Q オフセット座標 ( $I_{offset}$ ,  $Q_{offset}$ ) が、脈拍数の推定精度に大きく影響する。そこで、I-Q 信号の軌跡から I-Q オフセットを推定する技術を開発した。I-Q オフセットは、脈拍センサと周辺金属物との位置関係が変化すると大きく変動する。シート内に脈拍センサを設置する場合、周辺金属物を取り除くことが

困難なため、精度を確保するためには、この技術が不可欠なものとなる。



図7 I-Qリサーチオフセット推定

図7に示すように、I-Qリサーチが描く軌跡を観測し、座標点ごとに通過した頻度を示す度数データを蓄える。

蓄えられた度数データに対して、微分フィルタ処理を施し、各軸方向の微分係数を求める。さらに、度数データの立ち上がり急峻となる点を繋いだエッジとなる輪郭線を求める。この輪郭線を構成する各点から、先に求めた、微分係数を使って法線方向を決定し、法線方向の各座標への投票を行う。投票結果により最大投票数を獲得した座標をI-Qリサーチの中心として推定する。

この手法により、測定環境の変化をI-Qリサーチが描く軌跡の度数分布の変化として検出し、I-Qリサーチのオフセット位置の補正を行うことで、電波式脈拍センサを周辺金属物の多いシート内へ内蔵することを可能にしている。

**4.2 脈動の同期検波** 外乱に埋もれた状態から脈動信号を取り出すために、独自の同期検波アルゴリズムを開発している。その概略を図8に示す。身体表面の動きを観測しているドップラ角速度信号から脈動の周期成分に同期した信号を抽出し脈動信号とし、更にその信号からパルス検知を行ってパルス数をカウントして1分間当たりの脈拍数(bpm)を推定する。我々が開発したアルゴリズムでは、逐次処理により実際の脈動信号に同期するように、脈拍数推定値のフィードバックをかけてモデル脈波信号を生成する。モデル脈波信号生成では、予め脈拍数毎に脈波の特徴を記憶したテーブルを参照して、モデル脈波信号を生成する。このモデル脈波信号と適応フィルタ処理後の脈動信号との差をとり、その二乗平均が最小となるような適応フィルタの係数更新を行う。この操作により、適応フィルタ処理後の脈動信号は、実際の脈動信号に同期していく。

図9の上には、適応フィルタ処理前の生データを示し、図9の下には、適応フィルタ処理後の同期検波処理信号を示している。リファレンスセンサの信号と比較すると同期検波処理後の信号は、実際の脈動の信号に同期して検出されていることがわかる。

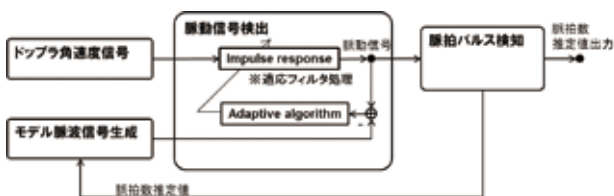


図8 脈動同期検波アルゴリズム

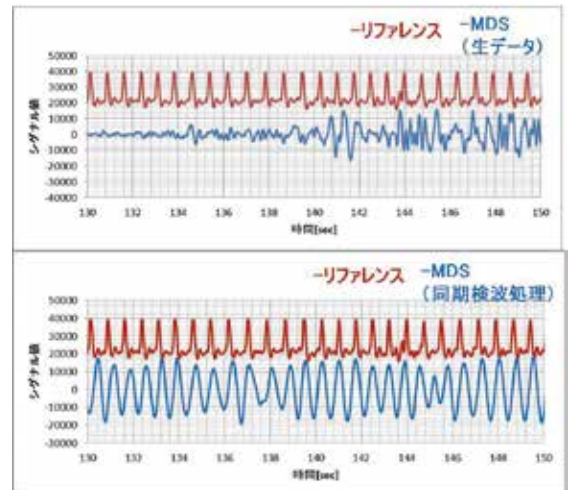


図9 同期検波処理の効果確認

**4.3 呼吸高調波のキャンセリング** 我々が開発したアルゴリズムでは、周期信号に同期させるため、誤って脈動以外の周期信号にも同期する場合があります。身体表面での周期信号としては呼吸体動がある。脈動と比較して低周波であるためバンドパスフィルタにより分離することができると想定していたが、脈動の変動が呼吸の変動に対して非常に微細であるため、呼吸周期の高調波成分でも脈動の検出に大きく影響を及ぼすため、この呼吸高調波成分を抑制することが必要となる。

図10に、呼吸高調波をキャンセルするアルゴリズムの概要を示す。同期検波手法と同様に適応フィルタにより処理を構成している。ドップラ角速度信号から呼吸成分を抽出しその高調波を推定する。適応フィルタへ通し、ドップラ角速度信号との差をとり、その二乗平均が最小となるように適応フィルタの係数を更新する。また、差をとった信号が呼吸高調波をキャンセルした信号として出力される。この操作により、ドップラ角速度信号からは、呼吸高調波成分が抑制されるため、呼吸高調波に誤同期することを防止できる。

図11に周波数解析して効果確認を行った様子を示している。図11の上では、リファレンス信号との比較により、脈動の周期と呼吸成分周期の関係を示している。事前にバンドパスフィルタ処理しているため、呼吸成分の大きさは小さく表示されている。ドップラ角速度信号の脈動成分が呼吸高調波成分に挟まれ、脈動成分に同期させることが困難な状況を示している。

図11の下は、呼吸高調波キャンセル後の解析結果である。呼吸高調波成分が抑制され、脈動成分に同期し易い状況に改善されている状況を示している。

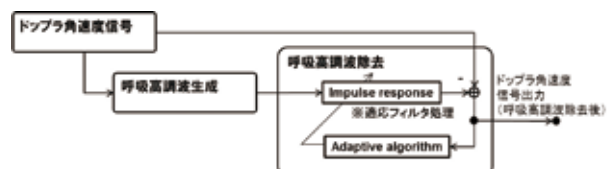


図10 呼吸高調波キャンセリング

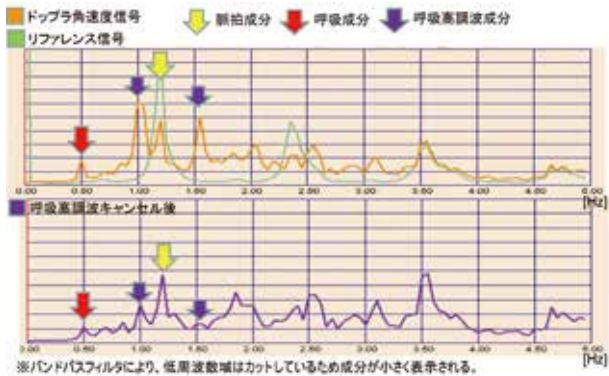


図11 周波数解析による呼吸高調波キャンセルの効果確認

## 5. 性能評価

先に示した我々が独自開発した技術によって、走行中でも精度よく脈拍数の推定を行うことが可能となった。

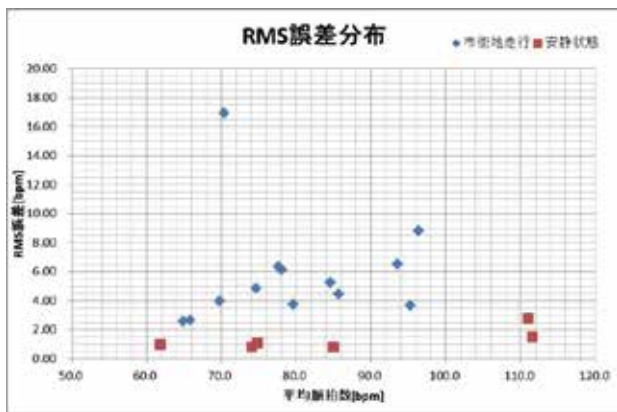


図12 脈拍数推定RMS誤差分布

図12に、安静状態6名と市街地走行13名の脈拍数推定値のRMS誤差分布を示している。

安静状態では、RMS誤差が5 bpm内に入っており、市街地走行では、概ね10 bpm内に入っている。市街地走行では、13名中、1名で10 bpmを大きく超えるRMS誤差となった。これは、着座姿勢によっては、測定部位の体表面が圧迫され、脈動成分の検出が困難となり、正しく測定できない状態となったと推測される。より安定的に測定できる環境を実現するためには、脈拍センサのシート内への設置方法を改善することが重要となる。

図13には、安静状態で2分間、リファレンスセンサと比較測定した3名分のデータを示している。安静状態であれば、比較的反差値に一致した測定ができている。

図14には、市街地走行で20分程度、リファレンスセンサと比較測定した3名分のデータを示している。走行時の外乱によって、誤差が拡大しているが、平均してリファレンス値と一致した結果が得られている。

脈拍センサの設置条件を工夫することによって、任意の着座姿勢でも安定して測定できるように改善する課題は残るが、脈拍センサ単体の性能としては、概ね開発目標を達成できたと言える。

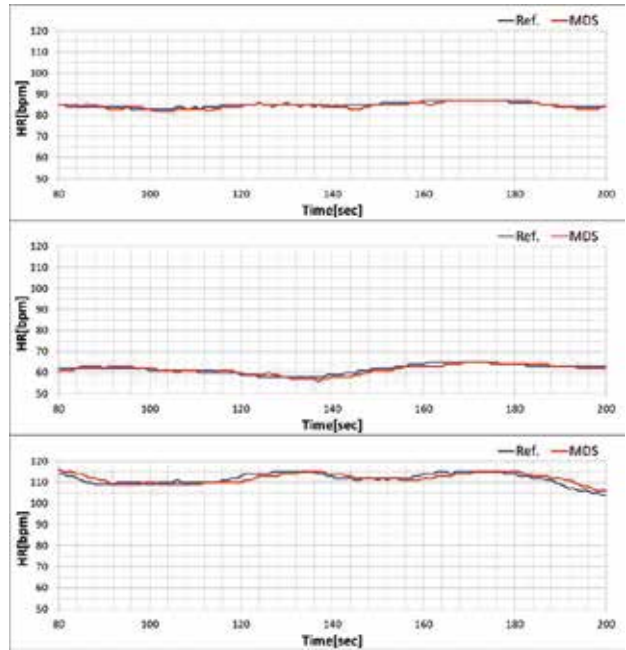


図13 安静状態での脈拍数推定精度

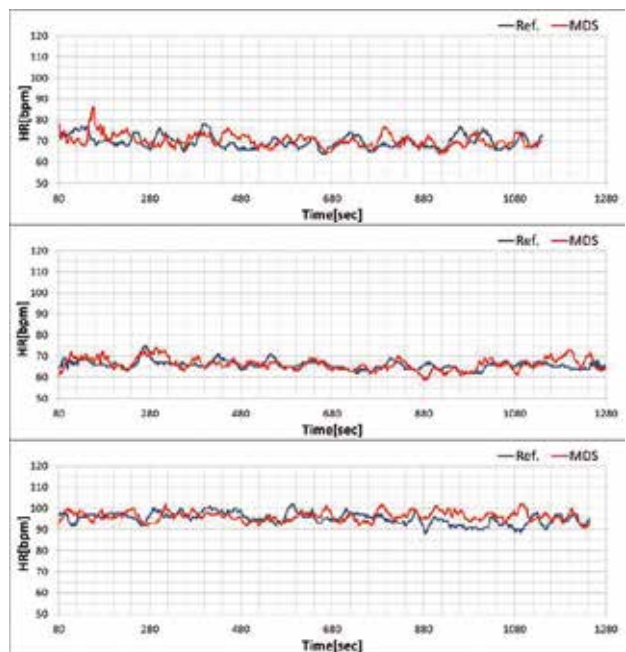


図14 市街地走行での脈拍数推定精度

## 6. むすび

車載脈拍センサによって、運転中の脈拍数を測定して通知することで、ドライバーへ健康管理の重要性を啓蒙することが大きな狙いの一つである。特に、運転は心身の負荷の大きなタスクであり、平常状態より脈拍数が高くなる傾向が強い。一般的に、脈拍数が高くなると心疾患リスクが高まると言われている。健康起因の事故を防止するためには、運転中に発病に至るまでに、日頃の健康管理によって予防することが重要である。運転中に脈拍数が高めになりやすいドライバーは、日常生活習慣を見直すことで、より健康



的な状態で運転できるよう促していく必要がある。

今回開発した脈拍センサでは、シートに内蔵するため、ドライバを煩わせることなく脈拍数を測定することが可能である。一方で、着座姿勢等によって、観測部位の体表面が圧迫されると正しく測定できない場合が有り得る。また、外乱が大きな状態では、急激な脈拍数の変動に追従することが困難となり、同期検波のための初期安定化時間も必要とするため、脈拍数変動を利用したeCallシステムや感情推定などのより高度なアプリケーション等に対応していくためには、応答性及び安定性を更に高めていく必要がある。我々は、今後、脈拍センサの性能を更に進化させて、社会的課題の解決に繋げていく。

#### 参考文献

- 1) 問瀬敦：「マイクロ波アクティブセンサを用いた生体計測とその応用」，計測自動制御学会誌「計測と制御」3 VOL.50 2011, pp. 233

#### 執筆者紹介



三谷 重知 Shigetomo Mitani  
オムロン オートモーティブエレクトロニクス  
株式会社  
開発統括室 技術開発部  
専門：機械システム工学  
所属学会：計測自動制御学会

# 磁性体による磁場変動を利用した ワイヤレス地磁気車両センサ

## 車両特有の磁場変動を捉える停止車両検知アルゴリズムについて

吉野 広太郎・渡邊 慎・神田 翔平

従来の車両検知センサである超音波式やループコイル式、画像式のセンサでは設置上の手間や設置条件の制約に課題があった。われわれはこれら課題を解決するため、ワイヤレス地磁気車両センサの開発に取り組んだ。

この開発の中では、内蔵電池だけで長期稼働を実現するための省電力設計と、限られた動作条件の中で精度を担保するために独自のアルゴリズムの開発を行った。このアルゴリズムは、車両のエンジン部分の影響による磁場変動と、その後の磁場変動を追従することで、車両を検知する仕組みとした。また、アルゴリズムを実装したセンサを用いて、フィールド試験を行った結果、100%という高い検知率が得られ、技術の有効性を確認することができた。

このセンサは、駐車ますの空き状況を高精度に捉え、駐車場利用者への「空きマス誘導」のサービスに加え、シェアサービスや自動運転社会への価値を提供することができる。さらに、今回の開発では車両に踏まれても壊れない耐荷重筐体の実装に取り組んだ。これらの成果はセンサのメンテナンス性を向上し、数多く設置するIoTセンサとしての活用が期待される。

## Parking Sensor based on geomagnetic variations of vehicle unique

### Algorithm based on unique geomagnetic variations

*Kotaro Yoshino, Makoto Watanabe and Shohei Kanda*

In this paper, we discuss about vehicle detection technique for the Parking Sensor. Previous technique like electromagnetic induction loop coil, Ultrasonic sensor and Image processing has a problem such as restriction on installation conditions, and taking time for installation.

Our sensor made it possible to solve these problems using geomagnetic sensor. We developed wireless sensor with low power design method, and original algorithm for high accuracy. This algorithm uses a features that vehicle's engine has a large effect on magnetic field, and uses a subsequent magnetic field variation. In result of experiment that tested 615 vehicles, we could get 100% accuracy.

It is possible to provide information on space availability in a parking lot. In additional, this sensor will be able to provide new value on autonomous driving or shared service.

### 1. まえがき

近年、ドライバーに道路の様々な情報を提供するシステム及び自動運転社会に向けて路車間で情報を提供するシステムの高度化が進んできている。その一つとして、駐車場利用者・利用車両に対して、リアルタイムに駐車場の混雑状況の提供や空きマスへの誘導を行うシステムがある。このシステムの対象となる駐車場は高速道路のサービスエリア・パーキングエリアや、市街地の駐車場（コインパーキング、マンションの駐車場）などである。このシステムは駐車場の混雑状況や空いている駐車ますをドライバーに提

供することで混雑の偏りを軽減するだけでなく、将来のパークシェアサービスや自動運転社会の加速につながる可能性がある。

このシステムを実現するためには、駐車場内の満空情報に加え、個別の駐車ますの空き状況を判別し、かつ設置容易性及びメンテナンス性が高いセンサが求められる。個別の駐車ますに停止する車両を検知するセンサとして、ループコイル方式<sup>1)</sup>、超音波方式、及び画像方式<sup>2)3)</sup>の3種類のセンサが挙げられる。ループコイル方式、超音波方式は車両検知精度が高く、上述の情報提供システムに親和性が高いが、路面の掘り起しやアームの取り付け等による設置、

連絡先：吉野 広太郎 kotaro\_yoshino@oss.omron.co.jp

配線を行う必要があり、設置性に欠ける。また、駐車ますの柔軟な変更に対応が難しい。画像方式では、一台のカメラで複数の駐車ますを検知することが可能であるが、設置時のパラメータ調整や耐環境性の乏しさによるメンテナンスが必要となるという課題があった。

一方近年、センサ素子、無線素子の小型化・省電力化、電池の小型化・長寿命化が進み、完全にワイヤレスな環境でセンシングを行うことが可能となってきた。これらの技術的進歩をふまえ、省電力な地磁気検出素子（MI素子）を活用したワイヤレス地磁気車両センサの開発に取り組んだ。

地磁気検出素子は、地球が持つ磁性及び周辺の磁場環境の変化を磁束密度で捉えるセンサであり、この特性を利用して周辺の磁性体を検知することが可能である。また、本開発で使用するMI素子（磁気インピーダンス素子）は、同じ磁束密度を計測できる他の素子（ホール素子やMR素子）に比べて感度が高く、道路の路面上に設置したセンサから車両の地上高の距離程度離れた位置の磁性体の移動を変化として捉えることが可能である。

本論文では、2章で本開発で実装したワイヤレス地磁気車両センサの構成を説明し、3章で地磁気検出素子の出力から単純な変動値の大きさで車両と判断する基本アルゴリズムとその問題点について述べる。4章では、この課題を解決するために構築した車両特有の磁場変動を捉えるアルゴリズムについて説明し、このアルゴリズムを実装したワイヤレス地磁気車両センサを用いたフィールド実験の結果を5章で報告する。

## 2. センサの構成

本章では、今回の開発で実装したワイヤレス地磁気車両センサの構成について述べる。

本センサは駐車ますの路面上に据え置くタイプとし、車両に踏まれても壊れない耐衝撃を加味した筐体設計を行った。厚さ40 mmで車両の衝撃に耐えるため、平面上300 mm四方の筐体として設計を行った。図1に外観を示す。



図1 センサ外観

また、図2にセンサ構成のブロック図を示す。本筐体内に地磁気検出素子、処理CPU、無線基板及び内蔵電池を配置した。なお、地磁気検出素子、処理CPU、無線基板はすべて内蔵電池で駆動する構成とした。これにより、完全ワイヤレス化、小型化を実現し、電源の供給やデータ取得のための配線をする必要がなく、設置容易性を高いセンサとした。さらに、本論文では触れないが、周辺の微小ノイズや地磁気の経年変化に追従する機能、無線でのリセット機能等を搭載し、メンテナンス性を向上する取り組みも実施した。

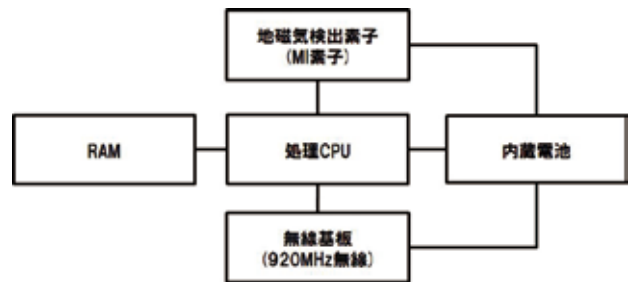


図2 ワイヤレス地磁気車両センサの構成

## 3. 基本アルゴリズムと課題

**3.1 基本アルゴリズム** 磁束密度はベクトル量であり、地磁気検出素子では3軸方向についてのスカラー量を個別の出力としている。本ワイヤレス地磁気車両センサでは、これら3軸の値からベクトルの絶対値を算出して使用する。基本アルゴリズムでは、車両が駐車ますにいない状態を基準 ( $|\vec{B}_0|$ ) として、計測時の地磁気の磁束密度 ( $|\vec{B}_t|$ ) との差分値、「磁場変動量 ( $|\Delta\vec{B}|$ )」の大きさが一定以上になれば車両として判断するものとした。ここで  $|\Delta\vec{B}|$  は

$$|\Delta\vec{B}| = \sqrt{(B_{tx} - B_{0x})^2 + (B_{ty} - B_{0y})^2 + (B_{tz} - B_{0z})^2}$$

である。

図3に基本アルゴリズムにおける、車両が駐車ますに駐車したときの「磁場変動量」の推移と判定結果を示す。任意の値に閾値を設け、閾値以上であれば「車両」を検知することとした。

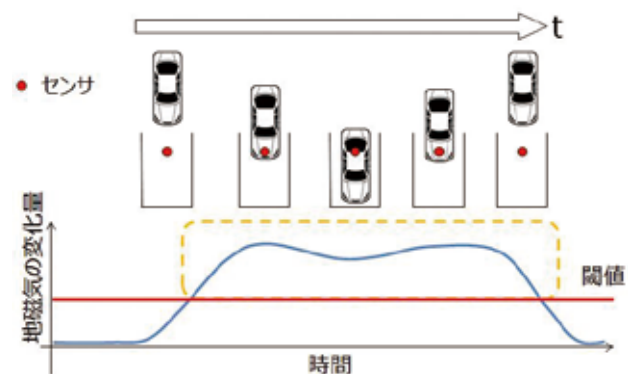


図3 基本アルゴリズムの動作

**3.2 基本アルゴリズムで発生する問題** 本開発の中で磁場変動量について、定量的に調査を行った結果の概略を図4に示す。

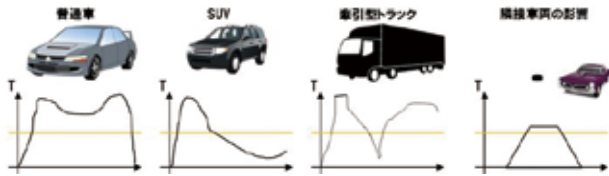


図4 車種毎の磁場変動量(概略)

基本アルゴリズムでは図4の最左に示す「普通車」のように車体のどの部分においても閾値を超える車両を想定していた。しかし、中央の「SUV」と「牽引型トラック」のように車体の一部に閾値を下回る磁場変動量しかないものがあつた。さらに、最右の「隣接車両の影響」のように検知したい駐車ますに車両がない状態においても外部からの影響で閾値を超えてしまうものが一部あつたため、本アルゴリズムにおいて検知できない車両があるという問題があつた。

**3.3 課題** 前項で述べた車体の一部が閾値を下回り車両を検知できない問題と、一部の車種が隣接駐車ますに駐車した際に誤って車両として検知してしまうという問題の2つを同時に解決することが求められる。

本開発では、エンジンやモータが磁性体である鉄を多く含んでいることから、エンジン部分ほどの車両でも地磁気に大きな影響を与える点に着目し、この大きな磁場変動量を捉えることに着目したアルゴリズムを採用した。また、その後の磁場変動量を追従することで、車両特有の磁場変動を認識し、検知したいセンサを設置した駐車ますに駐車した車両と検知したくない隣接駐車ますに駐車した車両を切り分けることを課題と設定し、課題解決に取り組んだ。

**4. 停止車両検知アルゴリズム**

**4.1 エンジン部分検出アルゴリズム** 前述の通り、車種、車両の部位によって「磁場変動量」は異なるが、エンジン部分では車種にかかわらず、隣接駐車ますに駐車した車両をはるかに超える「磁場変動量」を示す。なお、センサは駐車ますの前方より1/4の場所に設置することとする。

車両の入庫方法と磁場変動量の関係について、図5では「前進入庫」について、図6では「後進入庫」と「通り抜け入庫」について示す。図5に示すとおり、駐車ますに対して前進で入庫し、後進で出庫する「前進入庫」のパターンにおいては、入庫時にエンジン部分が通過してから車両を駐車し、出庫時にはもう一度エンジン部分が通過する。また、図6の上側図のように、駐車ますに対して後進で入庫し、前進で出庫する「後進入庫」、及び図6の下側図のように駐車ますに対して前進で入庫し、前進で出庫する「通り抜け入庫」の両パターンにおいては、駐車完了した際

にセンサ直上にエンジン部分が来ることとなる。このように、エンジン部分は駐車ますに駐車をする際に必ずセンサ上を通過するタイミングがある。この点に着目し、満閾値と空閾値の2つの閾値を持ち、エンジン部分の高い変化を検出するアルゴリズムを構築した。

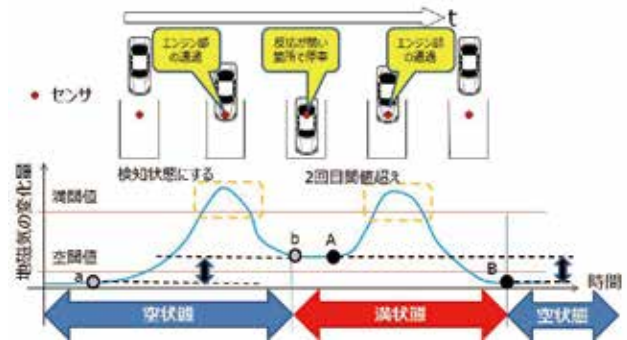


図5 エンジン部分検出アルゴリズム(前進入庫)

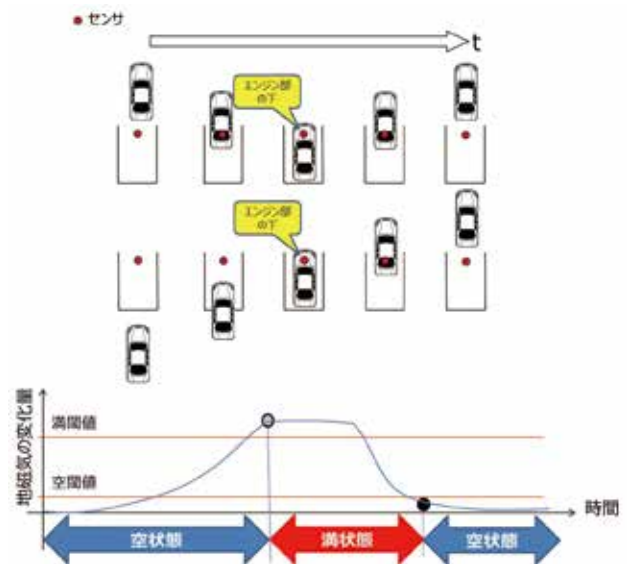


図6 エンジン部分検出アルゴリズム(後進入庫、通り抜け入庫)

「前進入庫」した場合、エンジン部分で満閾値を超える変化を示し、駐車中は初期状態からの磁場変動量が空閾値と満閾値の間の低い値Aとなる。本アルゴリズムでは、満閾値以上の変化後、一定以上の磁場変動量を示せば車両検知状態とする。出庫の際は再度エンジン部分の影響により、満閾値を超える変化を示し、完全に駐車した後に駐車中の値Aよりも小さい値Bとなる。本アルゴリズムでは、このBの値が空閾値を下回るか、車両検知状態から満閾値を超える値の変化があつた場合その前後 (A-B) に一定の変化があれば、車両検知状態を解除する。

また、車両が「後進入庫」または「通り抜け入庫」した場合、入庫後車両が出庫するまで常に満閾値を超えた状態となり、一定時間経過すると車両検知状態とする。また、同様に駐車時は空閾値を下回るため、車両検知状態を解除する。

**4.2 効果** 本アルゴリズムにより、3章で述べた2つの課題を同時に解決する。基本アルゴリズムでは「SUV」と「牽引型トラック」のように車体の一部に閾値を下回る磁場変動量しか示さない車両について、エンジン部分の大きい磁場変動量を検出することで、駐車した際の磁場変動量が小さくても出庫の際のエンジン部分検出までの間車両検知状態を継続させることが可能となった。また、基本アルゴリズムでは、検知したい駐車ますに車両がない状態でも影響の強い車両が駐車すると誤検知起こしてしまった。このような外部からの影響で閾値を超えてしまうものについては、エンジン部分の影響に比べると、反応が小さいため、本アルゴリズムでは排除が可能となった。

## 5. 実験結果

**5.1 実験条件** 駐車ますの車両検知で使用するためには、様々な駐車パターンを想定する必要がある。本ワイヤレス地磁気車両センサの実験で実施した駐車パターンは①前進駐車、②後進駐車、③通抜駐車の3パターンである。通り抜け駐車とは、サービスエリア・パーキングエリアなどの前後に区切りのない駐車場において、片方の駐車ますを通り抜けて駐車することを指す。対象車種は軽自動車、コンパクトカー、ミニバン、セダン、ワゴン車、SUV、1BOX、トラック、EV車、電気自動車の10車種とした。各車種の内訳を表1に示す。

表1 実験車両内訳

車種	車種数(車種)	試験回数(回)	前進駐車試験回数(回)	後進駐車試験回数(回)	通抜駐車試験回数(回)
電気自動車	3	3	1	0	2
コンパクトカー	15	98	43	20	35
ミニバン	14	109	49	30	30
セダン	21	122	53	35	34
ワゴン車	9	54	20	15	19
SUV	13	76	29	20	27
軽自動車	21	133	67	41	25
トラック	4	18	11	0	7
1BOX	1	4	1	0	3
計	101	617	274	161	182

**5.2 実験結果** 前項で述べた実験条件で実施した実験結果を表2に示す。実験結果から、本センサは駐車パターンや車種にかかわらず高精度で検知可能であることが分かる。検知率は100%であり、従来の他方式のセンサと同レベル以上の検知率である。

表2 実験結果

駐車パターン	試験台数(台)	検知台数(台)	検知率(%)
前進駐車	274	274	100
後進駐車	161	161	100
通抜駐車	182	182	100
計	617	617	100

## 6. まとめ

**6.1 考察** 本アルゴリズムは、多種多様な車種に対する実験結果から得られたデータを元に構築されており、車両が地磁気に与える特有の磁場変動を捉える仕組みとなっている。本アルゴリズムを実装したワイヤレス地磁気車両センサを用いることで、車両のエンジン部分を確実に捉え、高精度に車両を検知することが可能であり、このセンサを用いることで、適切な混雑状況の提供や空いている駐車ますへの誘導が可能となる。また、本開発では、完全ワイヤレスな据え置きセンサとして実装し、省電力設計を重視してすることで寿命10年を達成した。さらに、駐車場においてはあらゆる車両に踏まれる可能性があるため、耐荷重5tの筐体設計も実施した。これにより、駐車ますに据え置きで設置し、メンテナンスフリーで運用が可能である。

**6.2 今後の取組・展開** 完全な自動運転社会に向けた過渡期として必ず訪れる自動運転車両と非自動運転車両が共存する社会において、安心安全を担保するために非自動運転車をインフラ側から検知することが求められる。例えば、駐車場の出入り口付近で駐車場に駐車している車両を自動運転車両の自律走行機能が検知した場合、危険と判断し停車して動けなくなることが考えられる。このような場合に本センサを活用すると進行方向や駐車時間から適切に自動運転車両に駐車車両か走行車両を通知することが可能となる。

さらに、本センサの高い設置性を活かし、駐車場のみならず本線上に配置することで車両台数を計測する交通流計測や、2台のワイヤレス地磁気車両センサを並べ、検知の時間差により進行方向を推定すること、さらには本センサに加速度センサ等新たなセンサモジュールを追加することで、地磁気検出素子の結果をトリガに加速度センサの波形を用いて車種判別を行うことなど、多くの展開を考えていく。これにより、自動運転社会の到来に向けて、インフラ側から有益な情報を走行している車両に提供し、安全な交通社会の実現を目指す。

## 参考文献

- 1) R.Tyburski, "A review of road sensor technology for monitoring vehicle traffic", ITE journal, vol.59, no.8, p27 (1989).
- 2) Katsumi Ohashi: "Vehicle Recognition from Parking Images using a Stereo Camera" 4th World Congress on ITS in Berlin (1997).
- 3) Katsumi Ohashi, "Development of Silhouette Vision Technique for Vehicle Recognition in Parking Lots", OMRON TECHINICS Vol.38 No.4 (通巻128号) 1998.

執筆者紹介



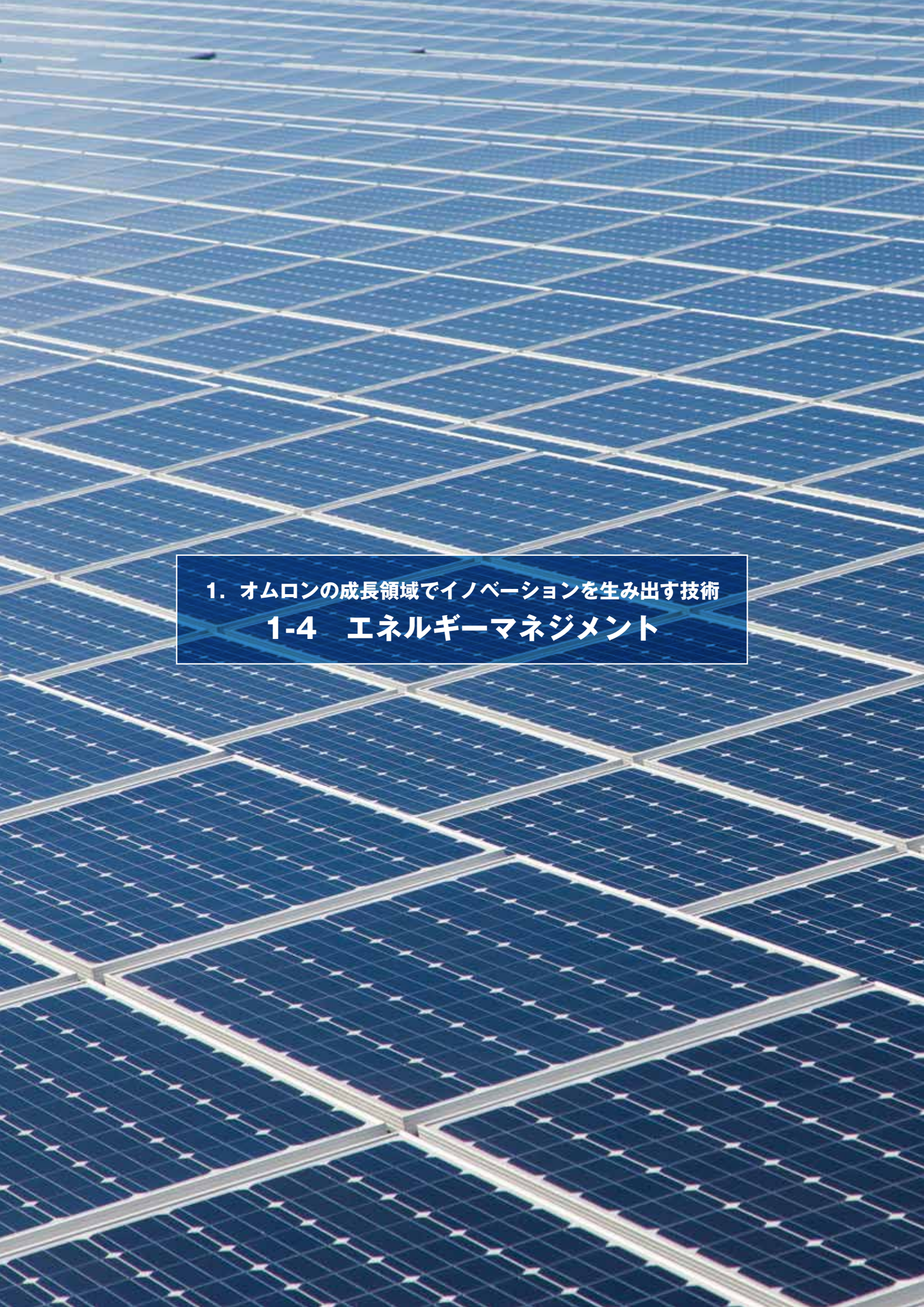
吉野 広太郎 Kotaro Yoshino  
オムロン ソーシャルソリューションズ株式会社  
技術創造センタ ソリューション技術部  
専門：情報工学



渡邊 慎 Makoto Watanabe  
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 ソリューション技術部  
専門：機械システム工学



神田 翔平 Shohei Kanda  
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 プロダクト技術部  
専門：電気工学



**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**  
**1-4 エネルギーマネジメント**

# パワーコンディショナにおける 系統インピーダンスの影響を打ち消す制御方式の開発

鎌谷 祐貴・西川 武男・財津 俊行・上松 武

PCS (Power Conditioning System) の体積とコストを低減させるために、インバータ出力を平滑する ACリアクトル (以下 ACL) の小型化が検討されている。しかし、PCS-系統間の導線が持つインピーダンス (系統インピーダンス) のリアクタンス成分に対して ACL インピーダンス値が小さくなると、制御安定性を損なうという問題が指摘されている。制御設計で安定性改善を試みる例も提案されているが、CPU 演算負荷が増加するという懸念がある。本論文では、演算負荷が少ない手法で系統インピーダンスを PCS 自身が推定し、最適な制御パラメータを設定する方式を提案する。本方式により PCS 設置後の系統インピーダンスに合わせて安定性を確保できるため、さらなる ACL の小型化が可能になる。その結果、PCS 全体の小型・ローコスト化に貢献できる。

## A Compensator that Negate the Influence of Grid Impedance based on Frequency Sweep Estimation Technique

*Yuhki Kamatani, Takeo Nishikawa, Toshiyuki Zaitso and Takeshi Uematsu.*

In order to reduce the volume and cost of the PCS (Power Conditioning System), miniaturization of AC reactors (ACL) of inverters has been studied. If the ACL impedance value becomes smaller than the Grid-impedance between PCS and Grid, it is pointed out that a controllability of PCS has a risk of unstable. However, trying to improve the stability of control design, there will be a concern that the CPU calculation amount will increase. In this paper, we propose a control method that PCS itself estimates Grid-impedance with a small amount of calculation, and set optimal control parameters as well. This control system is able to secure the stability according to the Grid-impedance after PCS installation, and further achieve a miniaturization of the ACL. As a result, it can contribute to downsizing and low cost of the entire PCS.

### 1. まえがき

**1.1 再生可能エネルギーを普及させる意義** エレクトロニクスが発展した私たちの社会において、電気エネルギーは様々な形で利用され、欠かすことのできないエネルギー源である。しかしながら、国際エネルギー機関 (IEA: International Energy Agency) の調査によると2015年の全世界発電量の81.4%が石炭、天然ガス、石油による発電となっており、世界規模で枯渇性資源に依存した発電構成となっている<sup>1)</sup>。この構成が今後も続くと、社会要求を満たす発電量を維持できなくなることが危惧されている。課題の解決手段として、再生可能エネルギーの利用が検討

されている。従来再生可能エネルギーは導入コストが多いことが普及の妨げになっていたが、電力変換器の高効率・小型化によって導入コスト低下が進み、普及が広がっている。持続可能な社会を実現するためには、今後さらなるローコスト化によって再生可能エネルギーの普及拡大が求められる。

**1.2 PCSの役割と課題** 当社では再生可能エネルギーとして太陽光発電に着目し、PCS (Power Conditioning System) を製品化している。PCSとは、太陽電池によって発電された電気エネルギーを系統電力網で使用されている交流電力に変換し、連系する装置である。図1に太陽光発電用PCSの外観を示す。

連絡先：鎌谷 祐貴 yuhki\_kamatani@omron.co.jp



KPK-A40



KPK-A55

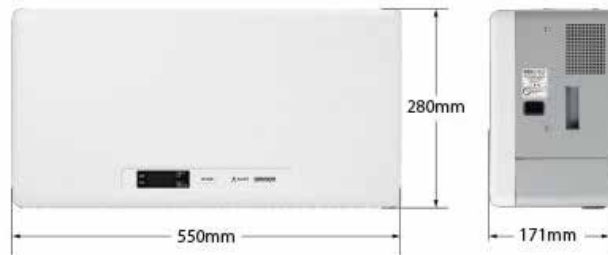


図1 PCSの外観

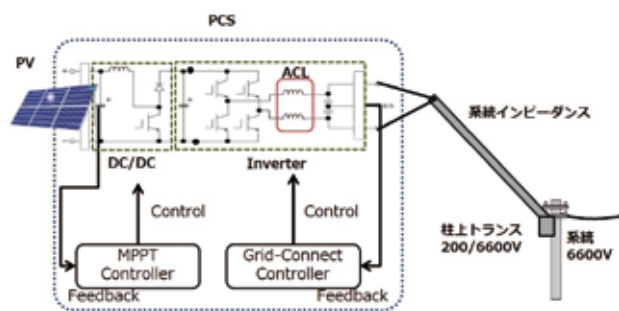


図2 PCS概略図

太陽電池を接続したPCS概略図を図2に示す。PCSは前段のDC/DCコンバータと後段のインバータという2つの電力変換器で構成されている。前段は太陽電池からの入力電力を最大電力追従制御 (Maximum Power Point Tracking Control) によって常に最大電力となるよう制御して、後段のインバータに送り込む。後段のインバータは直流電力を交流電力に変換し、系統連系制御 (Grid-Connect Control) により、系統の変動に追従しながら電力を系統網に送り込む。

これらの電力変換器を構成する部品のうち、コスト・体積をしめる割合が多いのがリアクトルである。特にインバータのLCフィルタに用いられるACリアクトル (以下ACL) を小型化することは、PCS全体の小型・ローコスト化につながる。

しかしながらACLが小さくなると、ACL、LCフィルタキャパシタ (以下ACC)、そして系統-PCS間の導線を持つインピーダンス (系統インピーダンス) のリアクタンス成分 (以下Lz) の電流共振により系統連系制御が不安定に陥るといった課題がある。この電流共振はACLインダクタンス値に対してLzが大きくなればなるほど、共振周波

数が低く、共振ゲインが大きくなる。Lzが十分小さいと共振周波数が制御周波数より十分高くなるため課題とならない。一方、Lzが大きいと位相が180 deg以上回っている周波数帯域で共振によりゲインが増加するため、ゲインマージン不足となり安定性悪化を引き起こす。従来はこれを懸念して想定されるLz値に対して十分大きなACLインダクタンス値を設定していたため、ACLの小型化が制限されていた。

**1.3 先行研究と本論文の位置づけ** ACLを小型化させるための方法として、制御ソフトウェアで共振を抑制させる方法が考えられる。

先行研究のうち系統インピーダンスを推定せず安定性を確保する手法として、文献<sup>2)-4)</sup>はH $\infty$ 制御や、LQG (Linear-Quadratic-Gaussian) コントローラといったロバスト制御を用いる例が報告されている。しかし、CPUの演算負荷がかなり大きいためPCSにとっては実用的ではない。

推定した系統インピーダンスを基に制御器を設計する手法も提案されている。文献<sup>5)</sup>は高調波を出力電圧に注入し、振幅変動をもとにインピーダンス絶対値の推定を試みる。しかし、この手法では精度向上のために演算負荷が高いSOGI (Second Order Generalized Integrators) を複数実装する必要がある。文献<sup>6)</sup>では有効・無効電力を変動させた際の出力電圧変動よりインピーダンスを推定する手法が提案されている。しかし、有効・無効電力を独立して操作するための制御系構築が必要であり、演算負荷が増加するという懸念がある。

本論文では、系統インピーダンスの影響を打ち消し、小さなACLでも安定となる手法を示す。補償器は先行研究よりも簡素な演算で実現した推定法による系統のインピーダンス推定値を元に、最適な補償器パラメータに調整するため、設置場所によって異なる系統インピーダンスに対して想定されるLz最大値で設計する必要がない。そのため、さらなるACLの小型化を実現できる。

第2章では従来の制御系構築を行った際の系統インピーダンスの影響と課題を示す。第3章では系統インピーダンスの推定方法と補償器設計方法を示す。第4章ではシミュレーションの結果によって提案手法の有効性を示す。第5章にて本論文のまとめを述べる。

## 2. 系統連系制御への系統インピーダンスの影響

**2.1 系統連系制御の構成** インバータの系統連系制御の全体像を図3に示す。系統連系制御は、系統連系点 (PCC: Point of Common Coupling) の交流電圧位相と同期した電流指令値を生成する指令値生成部と、出力電流を制御する電流制御器と、インバータ回路、系統インピーダンス、系統電圧からなる制御対象で構成されている。制御系はPWM信号duty幅によりインバータ変調率を操作し、出力電流を制御する。

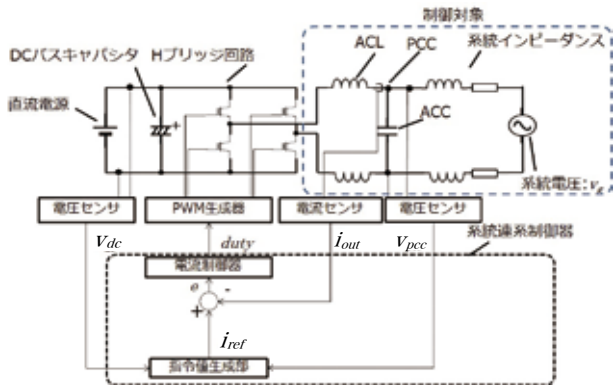


図3 システム連系制御 システム構成

### 2.2 システムインピーダンスが引き起こす電流制御不安定

電流制御系の安定判別をMatlab/Simulink上で実施するために、制御系と制御対象をモデル化した。図4にモデル化された電流制御系ブロック線図を示す。図5に電流制御系一巡伝達関数ボード線図を示す。各条件のパラメータは表1の通りである。

図5に実線で示されているグラフは $L_z = 46 \mu\text{H}$ ,  $R_z = 38 \text{ m}\Omega$ における一巡伝達関数を示す。制御系の安定度はゲイン余裕と位相余裕をもって評価される。ゲイン余裕は位相が180 deg回った地点での位相値である。 $L_z$ が十分に小さいので共振ピークは制御帯域 (PWMキャリア周波数の半分) より高い周波数に発生するため、安定性を損なうことはない。この例ではゲイン余裕5.49 dB、位相余裕42 degとなっており安定である。また帯域幅は1 kHzを超えており、商用周波数より十分高く応答性も十分であると考えられる。

図5に破線で示されているグラフは $L_z = 460 \mu\text{H}$ ,  $R_z = 380 \text{ m}\Omega$ の条件での一巡伝達関数を示す。 $L_z$ が大きくなったことで共振点がキャリア周波数より低くなったため、3 kHz付近で反共振が観測される。位相が-180 deg以下の領域でゲイン増加が起こっており制御不安定となる。ゲイン余裕は-7.98 dB、位相余裕は-21.5 degであった。これをPI制御のみで改善を行うと、帯域幅を減らさなければならず、高周波応答性が悪化し、出力波形が歪み、高調波規制を満たすことができなくなる可能性がある。

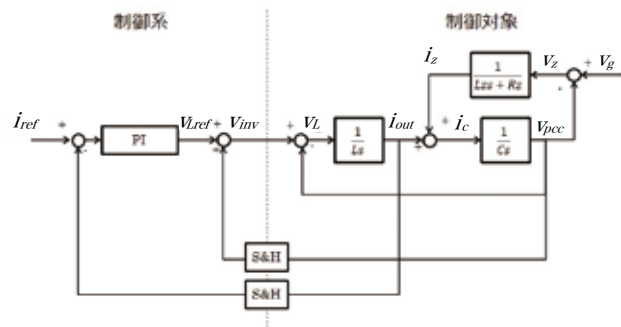


図4 電流制御系のブロック線図

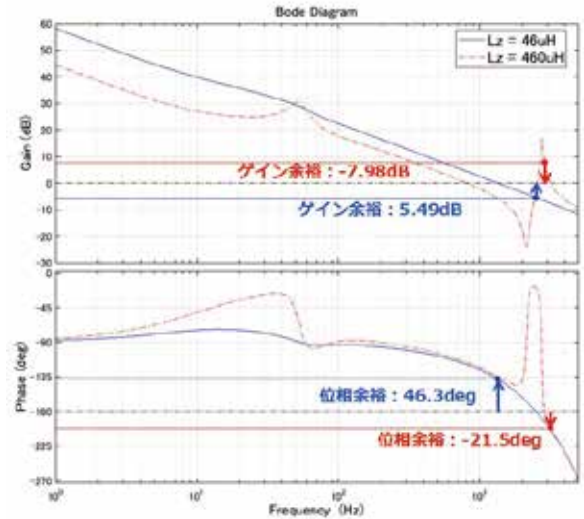


図5 電流制御系の一巡伝達関数ボード線図 ( $L_z = 46 \mu\text{H}$ ,  $460 \mu\text{H}$ )

表1 一巡伝達関数描画時のパラメータ

条件No.	1	2
系統電圧	202 Vrms	202 Vrms
系統電圧周波数	60 Hz	60 Hz
系統インピーダンス虚部: $L_z$	46 $\mu\text{H}$	460 $\mu\text{H}$
系統インピーダンス実部: $R_z$	38 m $\Omega$	380 m $\Omega$
ACリアクトル	720 $\mu\text{H}$	720 $\mu\text{H}$
ACキャパシタ	12 $\mu\text{H}$	12 $\mu\text{H}$
PWMキャリア周波数	10 kHz	10 kHz
PI制御器 Pゲイン	6.48	6.48
PI制御器 Iゲイン	454.4	454.4

## 3. 制御補償器の設計

**3.1 システムインピーダンス推定手法** 制御対象の等価回路を図6に示す。図6と後述する式ではACLのインダクタンス値を $L$ 、ACCのキャパシタンス値を $C$ と表記する。システムインピーダンスにおいては $L_z$ が支配的であると仮定し、 $R_z$ は省略する。

図6に示す系統連系点電圧 $V_{pcc}$ は式(1)で表される。

$$V_{pcc} = \frac{\left( \frac{V_{inv}}{j\omega_r L} + \frac{V_g}{j\omega_r L_z} \right) \frac{1}{j\omega_r C}}{1 + \left( \frac{1}{j\omega_r L} + \frac{1}{j\omega_r L_z} \right) \frac{1}{j\omega_r C}} \quad (1)$$

式(1)において、 $V_{pcc}$ が極大値となるのは、

$$0 = 1 + \left( \frac{1}{j\omega_r L} + \frac{1}{j\omega_r L_z} \right) \frac{1}{j\omega_r C} \quad (2)$$

を満たすときであり、そのとき、 $L_z$ は

$$L_z = \frac{L}{L \times C \times (2\pi f)^2 - 1} \quad (3)$$

である(ただし、 $2\pi f = \omega_r$ )。図7に式(3)をグラフ化した結果を示す。

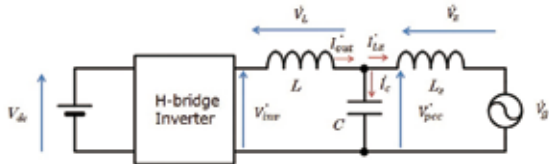


図6 制御対象 等価回路モデル

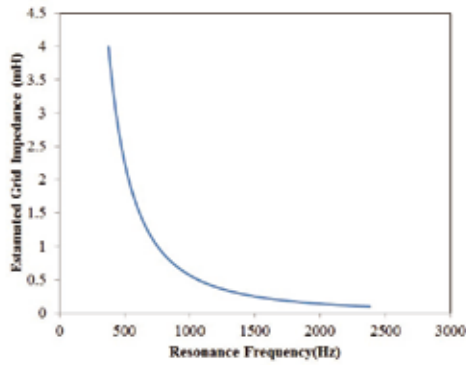


図7 推定Lz値vs. 共振周波数

式 (3) に示された変数のうち  $L, C$  は設計者が設定する値であるので既知である。そのため、何らかの方法で共振周波数  $f_c$  を推定し、式 (3) の  $f$  に代入すれば、未知のパラメータ  $L_z$  を推定することが可能となる。電流制御系の指令値に小信号外乱を注入すると  $V_{pcc}$  に式 (1) に示す形で応答が現れる。小信号外乱の周波数をスイープさせて  $V_{pcc}$  が最大となる条件を探索することで  $f_c$  は推定可能である。

また、今回はインバータの出力フィルタが LC フィルタの例を示すが、LCL フィルタの場合でも同様に  $L_z$  を導出可能である。式 (3) から得られる結果は LCL フィルタシステム側の ACL インダクタンス値  $L_2$  と  $L_z$  の和となるため、既知の  $L_2$  を引くことで同様に  $L_z$  を導出できる。

**3.2 提案システムの構成とアルゴリズム** 提案するシステム全体構成を図8に示す。これは図3に示した構成にインピーダンス推定部とインピーダンス抑制補償器部と構成切り替えスイッチを追加したものとなる。追加されたインピーダンス推定部の内部構成を図9に示す。

インピーダンス推定手順について述べる。PCSの制御系を動作させ、系統電圧と連系した電圧を出力する。この時、PCSが出力する電流は0で完全に系統と同期した電圧が出力される。次に、図9の外乱周波数生成部に重畳される外乱周波数  $f_{sweep}$  に初期値  $f_{sweep\_min}$  を代入する。これにより、正弦波外乱生成部より外乱信号が生成され、構成切り替え部をONにすることで指令値に外乱信号が重畳し  $V_{pcc}$  に外乱電圧が重畳する。この時、外乱が重畳した  $V_{pcc}$  の最大電圧  $V_{pcc\_max}$  と現在出力している  $f_{sweep}$  を組として記憶部に記憶し、外乱周波数に  $f_{step}$  を加えて更新する。これを外乱周波数が最大値  $f_{sweep\_max}$  になるまで繰り返す。

最後に構成切り替え部をOFFにし、外乱重畳を停止させる。記憶した  $V_{pcc\_max}$  のうち最大電圧をとった組をとりだし、その時の  $f_{sweep}$  を共振周波数  $f_c$  とする。この共振周波数  $f_c$  を式 (3) の  $f$  に代入すれば系統インピーダンスを得ることができる。

スイープ範囲である  $f_{c\_min}, f_{c\_max}$  は設計者が  $L, C$  の値を決定したのち、推定したい  $L_z$  の範囲を指定すれば式 (3) を用いることで決定できる。

一連の動作をフローチャートにしたものを図10に示す。

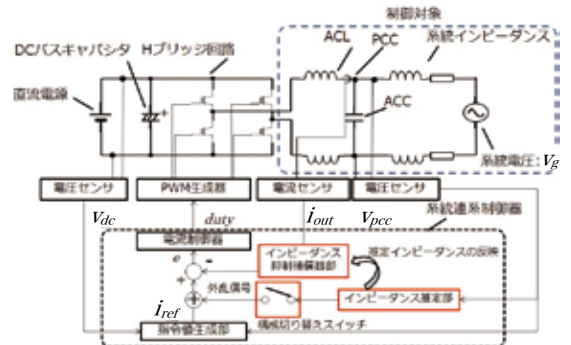


図8 提案システム構成図

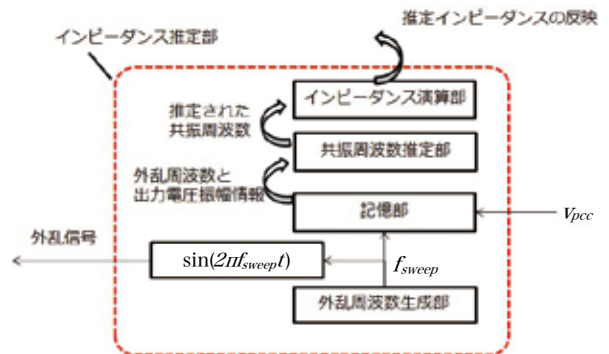


図9 インピーダンス推定部 内部構成図

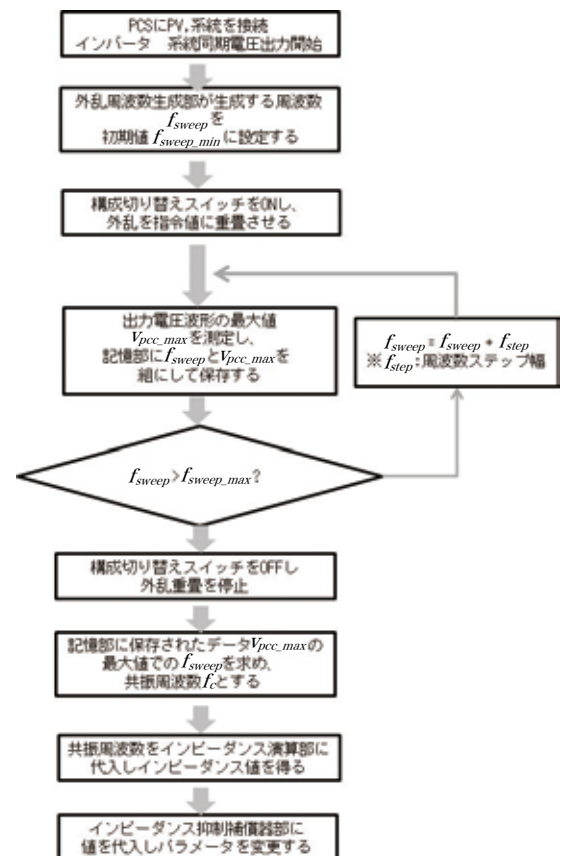


図10 インピーダンス推定シーケンス

**3.3 補償器の設計** 推定された系統インピーダンスから補償器を設計する。図6の等価回路モデルを元に電流の共振周波数  $f_{r_{current}}$  を求めると式 (4) のようになる。

$$f_{r_{current}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{L} + \frac{1}{L_z}}}{2\pi C} \quad (4)$$

この式より得た  $f_{r_{current}}$  に不安定要素を引き起こす共振ゲイン増加が発生することがわかる。よって、その帯域のゲインを抑制する補償器  $G_{add}(s)$  を追加実装する。補償器の伝達関数を式 (5) に示す。これは特定の周波数帯のゲインを低下させるノッチフィルタである。

$$G_{add}(s) = \frac{s^2 + (2\pi f_s)^2}{s^2 + 2\pi f_s \xi s + (2\pi f_s)^2} \quad (5)$$

### 4. シミュレーション結果

系統インピーダンスを推定するアルゴリズムを Matlab/Simulink 上で実装し、その精度を測定するために Simscape で実装した回路シミュレータと組み合わせてインピーダンス推定を行った。系統インピーダンス値  $L_z$  および  $R_z$  は表1の条件2の値をベースに、1倍、4倍、8倍にした3条件で推定を行った。シミュレーションの結果を図11に示す。各条件で真値に近い推定値が得られている。

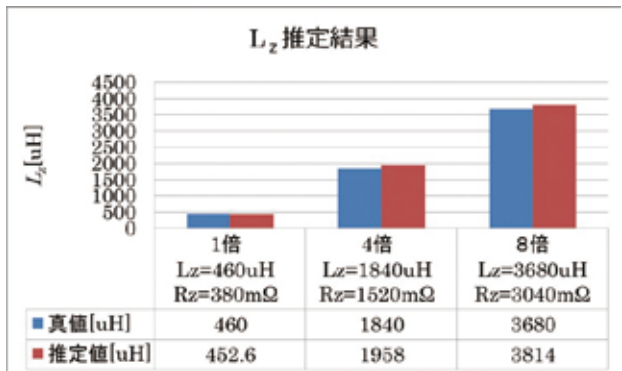


図11 シミュレーション上での  $L_z$  推定結果

次に、推定されたインピーダンスを元に補償器の設計を行い制御不安定が改善するかどうかを確認した。  $L$  および  $C$  は表1条件1のものを用いた。式 (5) に  $L_z=460 \mu\text{H}$   $R_z=380 \text{ m}\Omega$  での  $L_z$  推定結果を代入すると、

$$\frac{\sqrt{\frac{1}{720\mu} + \frac{1}{452.6\mu}}}{2\pi} \approx 2465.1\text{Hz} \quad (6)$$

となる。

電流制御系安定判別を実施するために、図12に示すブロック線図を Simulink で構築し、  $G_{add}(s)$  ブロックに式 (6) の結果を代入した。

図13に電流制御系の一巡伝達関数を示す。青の実線が

補償器  $G_{add}(s)$  を追加した条件、赤の破線が補償器なし (図5破線グラフと同一) 条件である。補償器を追加することで安定な制御系を達成していることが把握できる。ゲイン余裕は9.0 dB、位相余裕は46.3 deg、帯域幅は769 Hzであった。図5の  $L_z=46 \mu\text{H}$  条件より帯域幅は狭くなっているものの、商用周波数において20 dB以上のゲインが確保されており、波形歪みへの影響は少ないと考える。

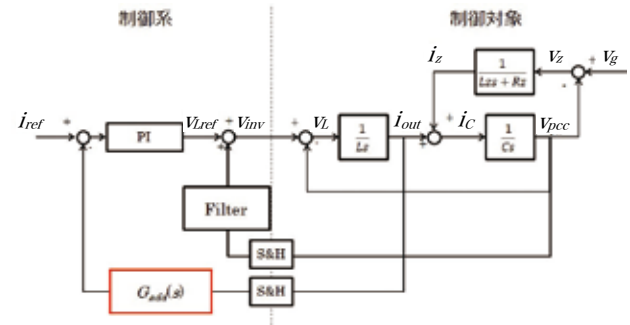


図12 補償器を追加した制御ブロック図

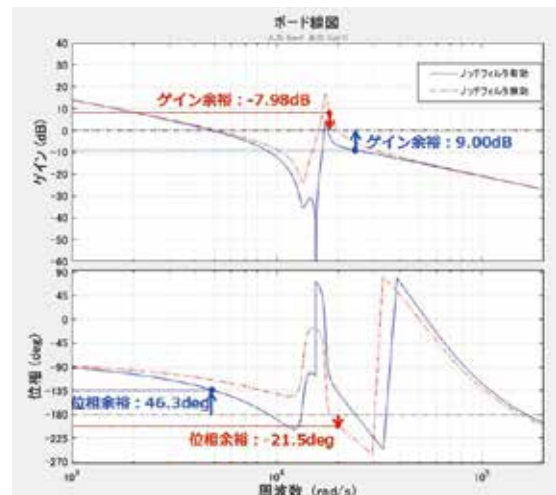


図13 ノッチフィルタを適用した一巡伝達関数 ( $L_z=460 \mu\text{H}$ )

### 5. まとめ

本論文ではPCSインバータの出力フィルタLCおよびLCLタイプに対して、周波数スイープ法を用いて系統インピーダンスを推定する手法とインピーダンスを元に補償器を設計した例を示した。PCS設置後の系統インピーダンスに合わせて補償器を設計することで安定性を損なうことなくACLを小型化することができる。

この手法はインピーダンス推定部とインピーダンス抑制補償器部と構成切り替えスイッチ、そして2次系の補償器1つを従来構成に追加するだけで制御系の安定性を向上させることができるため、CPU演算負荷を大きく増やすことなくACL小型化に対するデメリットに対応することができる。

今後は、演算負荷が少ない設計でありながらインピーダンスの推定速度と精度を向上させることを検討していく予定である。

## 参考文献

- 1) International Energy Agency “Key World Energy Statistics 2017.” <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf> (accessed:2018/02/19)
- 2) J. Chen, F. Yang and Q. Han. Model-Free Predictive  $H_{\infty}$  Control for Grid-Connected Solar Power Generation Systems. IEEE Transactions on Control Systems Technology. Sept. 2014, vol.22, Issue 5, pp.2039-2047.
- 3) V. P. Singh, S. R. Mohanty, N. Kishor and P. K. Ray, Robust H-infinity load frequency control in hybrid distributed generation system. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, March 2013, vol. 46, pp.294-305.
- 4) F. Huerta, D. Pizarro and S. Cobrecas, LQG Servo Controller for the Current Control of LCL Grid-Connected Voltage-Source Converters. IEEE Transactions on Industrial Electronics, December, 2011, vol.59, Issue 11, pp.4272-4284.
- 5) J. Moriano, V. Bermejo, E. Bueno, M.Rizo and A. Rodriguez. A Novel Approach to the Grid Inductance Estimation based on Second Order Generalized Integrators. ECCE Cincinnati, October, 2017, pp.1794-1801.
- 6) M. Ciobotaru, R. Teodorescu, P. Rodriguez, A. Timbus, and F. Blaabjerg, Online grid impedance estimation for single-phase grid-connected systems using PQ variations. Power Electronics Specialists Conference, Jun. 2007, pp.2306-2312.

## 執筆者紹介



鎌谷 祐貴 Yuhki Kamatani  
技術・知財本部 組込システム研究開発センタ  
専門：電気工学 情報工学



西川 武男 Takeo Nishikawa  
技術・知財本部 組込システム研究開発センタ  
専門：電気電子工学 応用物理学



財津 俊行 Toshiyuki Zaitzu  
技術・知財本部 組込システム研究開発センタ  
専門：電気工学、制御工学  
所属学会：電気学会、電子情報通信学会、  
パワーエレクトロニクス学会  
博士 (工学)



上松 武 Takeshi Uematsu  
技術・知財本部 組込システム研究開発センタ  
専門：電気工学、制御工学  
所属学会：電気学会、電子情報通信学会  
博士 (工学)





**2. オムロンのモノづくりを支える技術**



# 超小型自律走行ロボットによる新生産システムの開発

## 小量生産領域における自動化への挑戦について

石川 裕一・松本 泰久

近年、電子部品事業（エレクトロニック&メカニカル コンポーネツ 以下EMCと呼ぶ）を取り巻く環境において競争力を維持しながら、顧客価値を提供できるものづくりを実現する必要がある。この顧客価値には絶対的な品質の確保と顧客の事業に合わせた価格や納期での商品の提供が求められる。

従来のEMC商品の生産方式は自動機生産が主流となっていたが、月産10万個以下の小量領域での自動機生産は次の二つの問題が発生している。一つ目は小量領域では設備投資が難しく、人手に頼った組立により品質への影響が懸念される、二つ目は設備製作期間の長期化である。この課題を解決するための新しい生産システムを考案した。

2016年にスイッチの生産向けに立ち上げたラインでは、本システムを実用化し価値を生まない工程の投資を抑え品質に影響のある工程の自動化率を上げた。また、設備製作期間を1/2とすることで顧客へ価値を提供するものづくりを実現することができた。

本稿では超小型自律走行ロボットによる柔軟な搬送技術を主に新たな生産システムの開発とその成果、今後の展開について報告する。

# Development of a new system using extraordinarily small self-controlled run robot

## About a challenge to automation in small-lot production territory.

*Yuichi Ishikawa and Yoshihisa Matsumoto*

In recent years, in order to grow further while maintaining its competitiveness in the environment surrounding the electronic parts business (Electronic & Mechanical Components, hereinafter referred to EMC), it is necessary to realize manufacturing that meets various customer's demands.

Conventional EMC products have been produced almost by automatic machines. However there are two problems in production in automatic machines. First problem is that the investment is not suitable for the request which number are less than 100,000 pieces per month, and second problem is that the development period is long. In order to solve these two problems, we devised a new production system. This system reduced the investment of the process not to produce value and enabled the automation of an important process qualitatively.

In addition, a customer was able to realize manufacturing to provide value by assuming facilities production period 1/2.

In this paper, we report on the development of new production system using flexible conveyance technology by extraordinarily small self-controlled run robots, its results and future development.

### 1. まえがき

近年、顧客ニーズが変化・多様化する中、顧客ごとにカスタマイズした商品を提供することと開発期間の短縮が求められている。また、生産現場においては人件費の高騰や生産人員確保などの課題解決も必要である。あわせて新興国をはじめとする競合の成長も著しく、コスト面だけでなく品質面においても脅威となってきた。このような電

子部品事業（エレクトロニック メカニカル コンポーネツ 以下EMCと呼ぶ）を取り巻く環境において競争力を維持しながら、さらに成長していくためには、顧客のさまざまな要求に応えるものづくりを実現する必要がある。

ここでは、これらの課題を解決し、顧客満足と経営満足を両立するために開発した小量領域での新しい生産システムの取り組みについて報告する。

連絡先：石川 裕一 [yuichi\\_ishikawa@oes.omron.co.jp](mailto:yuichi_ishikawa@oes.omron.co.jp)



## 2. 新しい生産システムの必要性

従来のEMC商品の生産方式は自動機での生産が主流となっており、月産100万個以上の大量領域では生産タクトが速いため自動機生産方式は有効だが、小量領域の生産での自動機投資は以下の課題が残る。自動機では組立や検査精度に影響しないよう精度の高い部品で構成された治具部分や高速で次工程に送り、高精度で停止させるために高精度や高剛性の構造が必要なため、重厚かつ剛性の高い架台フレームを持った自動機の基礎部分が必要となる。

この基礎部分をベースマシンと呼ぶが、数量の少ないカスタマイズ商品で使用すると、償却費が大幅に上がり原価を圧迫する。また、自動機で生産するには将来の需要増を見越した売上計画をもとに投資を実施することとなり、すぐに必要でない性能（高速の搬送スピードや空き工程）を持った高額な投資が立ち上げ当初の数量が少ない時期から発生する。

この自動機におけるベースマシンを乗客を輸送する鉄道で例えると、新幹線が在来線の各駅に停車するようなものである。新幹線が走れる強靱な線路やホーム、乗客を運ぶエスカレータやエレベータを完備しても乗客はほとんどいない。将来、駅周辺の発展を予想してのことだが、だれもが今すべきではない投資だと判断できる。しかし実際の生産ラインではこのような投資となることも散見される。

商品ライフサイクルという成熟期を見越した生産能力を持った自動機を導入期で準備するのではなく、導入期は数量に見合った投資での立ち上げを行い、成長期は事業の拡大に比例した生産能力の増強を細かな単位で行う。衰退期には成長期で投資した部分を他機種に転用することで有効活用が可能となる。

**2.1 数量に見合った軽い立ち上げ** 顧客のさまざまな要求の一つである少ない数量の商談に応えるためには、少ない数量でも製造原価を抑えることが求められる。小量領域での自動機投資は難しく、自動機をベースにした投資削減は限界にきている。一方、人手による手組生産では人件費の高騰や人員の確保が非常に困難な状況となっている。現状の生産方式では人手による組立作業の自動化と投資削減を両立することは非常に困難である。

例としてEMC商品であるスイッチの新商品では80%以上が初年度の数量が月産10万個以下、その開発期間の短縮も求められている。月産100万個以上に適用する自動機生産方式では、製造原価が高くなり顧客の要求に応えられない。要求に応えられなければ採用に至らず他社に切り替えられて事業の機会をなくすことになる。

立ち上げ当初の数量が少ない商品ライフサイクルの導入期では実際の顧客要求数量に見合った軽い立ち上げ、すなわち数量に見合った設備投資で早く生産ラインを立ち上げることが顧客満足と経営満足を両立することに繋がる。

**2.2 数量の増加に追従した段階投資** 前述したように導入期では顧客の要求数量に見合った設備投資での立ち上

げを求められる一方、発売開始後は顧客の満足する供給を続けながら数量の増加に柔軟に対応することが求められる。これはEMC商品が搭載された顧客の商品の販売数の増加や他顧客への展開などにより、要求数量が刻々と変化するためである。

従来の自動機生産では成熟期を見越した生産能力を持った自動機を導入期で準備し対応してきたが、この理由は成長期における数量の増加に追従した生産能力の増強が従来の自動機生産では対応できないからである。

ただし、成熟期を見越した導入期での自動機投資は予測数量に達しない場合は生産ラインが停止することになる。すなわち生産をしない、利益を生まない自動機が工場に鎮座する。逆に他社での採用などで受注が大幅に増加する場合は、2ライン目を立ち上げることになるが、前述したのと同様のロスを生むことになる。この従来の自動機生産での問題を解決するためには、2.1項で説明した要求数量に見合った投資が可能となる新しい生産システムを作り、そのシステムで要求数量の増加に比例した生産能力を確保するための細かな段階投資をすることである。

**2.3 数量の減少に伴った他機種転用** 2.1項や2.2項で導入期における軽い立ち上げや要求数量の増加に比例した段階投資で顧客の要求に応えることが可能になる。ただし、成熟期を終え顧客要求数量の少なくなる衰退期では稼働しない自動機は負の遺産になる。

ここで要求数量に比例した段階投資ができる生産システムがあれば、その強みが有効に働く。なぜならば要求に比例した投資とは要求数量が増加するだけでなく減少する場合にも適用できるからである。方法としては段階投資で増やした部分を他のラインに転用するだけで数量の減少に対応でき、さらなるメリットとしては、そのユニットを他機種で使用できることだ。ROICで言う資産回転率の向上と他機種の開発期間の短縮に大きく寄与できる。

新しい生産システムの必要性を満足するためには従来の自動機生産とは全く違う考え方で検討を進めた。その考え方について以降に説明する。

## 3. 新しいシステムの考え方 (V=F/C)

投資をより有効活用するために、生産ラインのどの部分にどのくらいの投資が発生しているかを調査した結果、新しい生産システムを検討するうえでの考え方を決定した。機能別の投資分析から、ものを運ぶ（以下、搬送と呼ぶ）、部品や製品を供給（以下、供給と呼ぶ）するといった、ものづくりでは排除できないが、製品の形を変えするという付加価値を生まない（以下、非付加価値）工程、すなわち補助的な工程で多くの投資がかかっていることがわかった。またこの工程は商品群の違いに関係なくすべての生産において共通的な機能であることもわかった（図1）。

コスト項目	詳細機能	コスト比率 (%)	共通性	階位
供給機能	PF, PP, ロボット, フープ送り	10.5%	○	①
搬送機能	インデックステーブル, 送り機, ロボット コンベア, プラテン	11.6%	○	②
加工機能	組付, 圧入, カンメ, 塗布, 溶接, ハンダ	21.8%	×	-
調整・検査機能	特性, 接触形抗, 耐電圧, リーク, 画像	5.9%	△	-
梱包機能	エンボステーピング, パッケージング	3.0%	×	-
その他機能	安全カバー, 操作パネル, 設計費	14.8%	×	-
設計・立ち上げ費	設計費 (メカ/電気), 組立調整費 立ち上げ費	23.0%	×	-

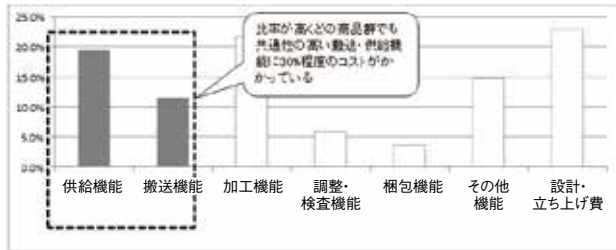


図1 機能別投資グラフ

さらにこれらの搬送や供給工程では市販ユニットを多用しているため生産に必要な以上の性能を持っている工程が多い。たとえば次の工程に1秒以下で移動する搬送装置や数kgのものを1秒以下で運べるロボットである。

顧客の要求数量に見合った生産システムの決定に当たってはこの搬送と供給をいかに柔軟にするかが大きなポイントとなる。数量の増加に追従した段階投資ができるようステーションや搬送装置を追加して工程を増やせるシステムとした。また従来だと1サイクルで一回の動作しかしない同期した搬送装置だが、今回は非同期の搬送装置 (個々の装置が自立走行するプラテン、以下自走プラテンと呼ぶ) とし、個々の動きやスピードを都度変えられる、機種によっては不要な工程は飛ばして搬送することも可能なシステムとした。これにより工程ごとにばらつきのあるサイクルタイムを平準化できる工程設計が可能になった。

早く立ち上げができ、段階投資も可能、また他機種への転用もできる投資の安い生産システムであることに加えて工程品質を確保することも大きな要求の一つである。投資削減と品質確保の二つを両立する生産システムを作り上げるために搬送と供給機能に対して品質機能展開 (QFD) を作成し、必要な機能と品質の関係を明確にした。

品質への影響が少ない工程には、その工程に見合った性能を満足する投資額を決定し実現する手段を考え抜いた。品質に影響を及ぼす可能性が高い工程には徹底した自動化を行う。もちろん品質第一の考え方は第一義としてあるため、削減した投資を品質向上のための投資として使うこともできる。

ここでは徹底した投資削減を行う上で用いた考え方について紹介する。それは  $V=F/C$  という価値工学の式による考え方である。Cはコストを表し、Fは工程での必要な機能となるが組み立てる、検査するといった必要な機能そのものは変えることができないため、機能はその商品の生産に見合った性能に置き換えた。またVはその工程の価値と

見做し、この式を  $C=F/V$  に変換してCを削減するために以下の二つの観点で検討を進めた (図2)。

$$\text{価値(V)工学の基本式} \\ \text{C} \downarrow \text{(設備償却費)} = \frac{\text{F} \downarrow \text{(必要な性能)}}{\text{V} \uparrow \text{(工程の価値)}}$$

図2 価値(V)、性能(F)、コスト(C)の関係式

(1) 工程としての価値Vを上げる

工程としての価値とは何か、部品を組立てる、半田付けする、圧入するなど様々な工程がある。従来のシステムでもこの価値を満足する工程となっていることは言うまでもない。一つの結論として価値を上げるとは一つの工程で複数の作業ができることとした。具体例で言うと組立、塗布、組立、塗布といった繰り返しの塗布作業を一つの工程に集約するといった考え方である。この考えは一つの工程の価値を上げるとともに、塗布装置が1台となるため品質を管理するといった観点からも有効な考え方である。

(2) EMC商品の生産に必要な性能Fに絞る

EMC商品を生産するうえで必要な性能とは何か、工程には供給、搬送、加工、調整検査などの機能を持った装置が設置されているが、多くの場合、市販の装置を使用した自動機の設計を行う。事例としては従来の搬送装置ではベースマシンやインデックスと呼ばれる市販の搬送装置を用いている。これらは大量生産領域である、タクトの早い生産では有効な搬送装置だが小量領域では必要ない。また供給においても市販の産業用ロボットなどを多用している。近年ロボット技術の高度化により低価格にはなってきたが、小量領域で使うにはまだまだ高価である。市場には高機能で高価格な装置は多くあるが、EMC商品のように電子部品の生産に必要な性能に見合った装置はない。逆にEMC商品の生産に見合った性能を持つ装置を特注すると装置自体が高価になる。そのため、投資削減と品質確保を両立する生産システムを自前で作ることとし、開発に着手した。

4. 開発の概要

新しい生産システムを構築するために開発した搬送と供給の二つのユニットについて紹介する。

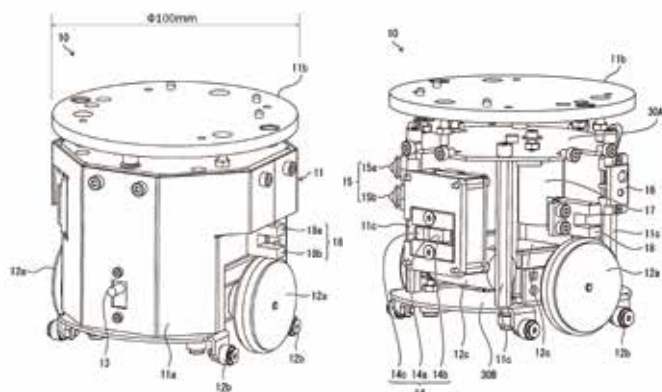
4.1 自走式搬送ロボット 各工程間をワーク積載して自律走行する自走式搬送ロボット (以下自走プラテンと呼ぶ、図3) で必要な性能は以下とした。

- ①積載荷重を500 g以下
- ②走行スピードは0.5 m/秒以上
- ③停止位置±2 mm (最終位置決めは位置決めピン)
- ④電池交換などで設備停止をさせないこと
- ⑤工程ごとに走行条件を都度通信できること

上記の必要な性能は品質機能展開などから決定したものである。①の積載荷重はEMC商品を対象とした場合にほ

とんどの商品の搬送が可能な荷重である。②の走行スピードについては月産10万個を生産するのに必要なサイクルタイムから算出した。③の停止位置は停止した自走プラテンを外部から位置決めするために必要な停止精度から割り出したものだが、①②③はトレードオフの関係にあり、すべての性能を満足するための取り組みとして、走行スピードと停止位置の関係について紹介する。

近年のバッテリー技術の進化はすさまじいが8時間以上連続して使用できる安価で小型のバッテリーは存在しない。モータを動かす駆動源はバッテリーであるという固定概念から脱し、8時間充電なしで走り続けるという性能ではなく、次の工程までワークを0.5 m/秒以上のスピードで搬送する性能を満足することができればよいという考え方からキャパシタでのモータ駆動という手段を選択した。また、キャパシタは電子部品のため充電時間も非常に短い。工程で組立や検査をしている時間内で充電することが可能となった。これにより④の電池交換などで設備停止をさせないこともクリアした。⑤の工程ごとに走行条件を都度通信できることについては自由な搬送を実現するためには、工程間の距離も工程ごとに違う。工程間毎に必要な時間で走りきる走行条件の送信や走行状態の受信が必要となる。この送受信はテレビリモコンなどで一般的に使用されている赤外線通信を採用した。素子自体も電子部品で安価なうえ入手性も高い。各工程での混信が発生しないよう配慮をしたうえ使用している。



【符号の説明】

- 10 自走プラテン (自走搬送車)
- 11 プラテン本体部
- 11b 載置板
- 12a 車輪
- 12b 従動輪
- 12c モータ (移動用モータ)
- 14 位置検出装置
- 14c 警報ブザー
- 15 LEDランプ
- 16 プラテン側赤外線モジュール (送信部)
- 17 キャパシタ
- 17a 制御電源用キャパシタ
- 17b モータ駆動用キャパシタ
- 18 停止位置決め装置
- 18a 赤外線発光部 (発光装置)
- 18b 赤外線受光部 (受光装置)
- 30A メイン基板

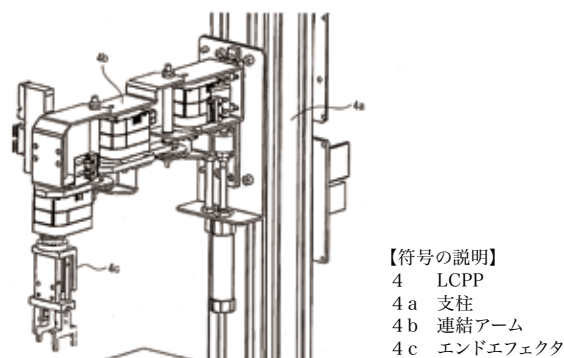
図3 自走プラテン

**4.2 ローコストピックアンドブレースロボット** 部品の供給やワークの移載を行う小型水平多関節型のローコストピックアンドブレースロボット (以下LCPP、図4) に必要な性能は以下とした。

- ①可搬重量 800 g以下
- ②移載スピード 3秒以下  
(上下30 mm左右300 mmのゲートモーション)
- ③停止精度  $\pm 0.015$  mm以下
- ④動作条件や停止位置の設定をパソコンで行う

自走プラテン同様①～③は重量、スピード、精度の面で、EMC商品の生産に必要な性能として決定した。④の動作条件や停止位置の設定も現場でのユーザビリティを考慮し安価でも必要な機能とした。

重たいものを早く運ぶ性能の高いFA用ロボットは数多くあるが、逆に可搬重量は軽く、スピードも遅い研究用や学習用のロボットも存在する。この研究用や学習用ロボットは停止精度のばらつきが大きいためEMC商品の生産では使えない。両者の良いところを合わせもった安い市販ロボットは無いため、自社製作を行った。



【符号の説明】

- 4 LCPP
- 4a 支柱
- 4b 連結アーム
- 4c エンドエフェクタ

図4 LCPP

軽いものをゆっくり運べることができればよいが、位置決め精度は市販ロボット並みの性能が必要となる。ここではホビーロボットで良く使用されるコマンドサーボを用い、外部に減速ギヤにより停止精度を高めた。ギヤ比を上げれば停止精度はよくなるが、スピードが遅くなるというトレードオフの関係にある。できるだけスピードが速く、剛性の高いコマンドサーボを選定し必要な性能を確保した安価な水平多関節ロボットを製作した。

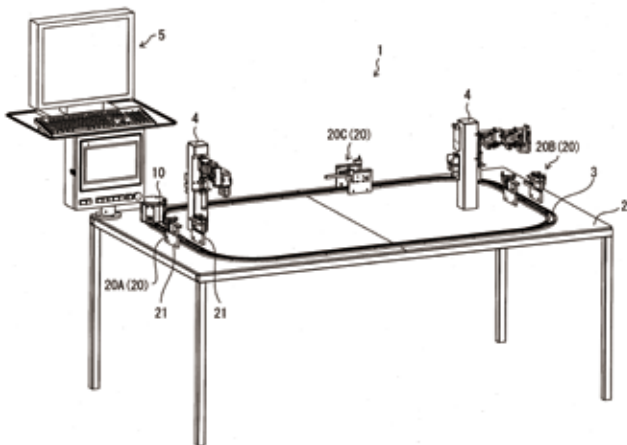
自走プラテン、LCPPともに民生用の部品を使用しているため寿命目標に対する評価も実施したうえで実際の量産ラインで使用している。

自走プラテンもLCPPも必要な性能に絞って安価な装置としたことで、交換部品も安く摩耗の多いタイヤはリングを使用し1年ごとの定期交換とした。交換部品が高価であれば問題が起きるまで使うが安価な部品であることで定期交換がしやすくなり安定した性能の状態で使用できることで生産ラインでのチョコ停などのトラブルも少なくなる。

### 4.3 自走プラテン・LCPDを組み合わせた搬送供給システム

自走プラテンとLCPDの開発については前述のとおりだが、自走プラテン自体が直進すること、カーブを曲がる機は持ち得ていない。寸分の違いなく直進やカーブができる機能を自走プラテン自体に持たせると高価になるためだ。自走プラテンの走行は“走って止まる”という単純な機能を持ち直進やカーブは玩具メーカーが販売している軟質プラスチック製のレールをガイドとして走行させることとした。

安価なレールの組み合わせで様々な経路で走らせることができるため設備架台上のエリアを有効に活用できるようになった。図5にその基本構成を示す。



【符号の説明】

- 1 無人搬送システム
- 2 作業台
- 3 搬送レール (軟質プラスチック)
- 4 LCPD
- 5 パーソナルコンピュータ [パソコン] (制御装置)
- 10 自走プラテン (自走搬送車)
- 20 充電ステーション (充電装置)
- 20A 第1通信/充電ステーション
- 20B 第2通信/充電ステーション
- 20C 第3通信/充電ステーション
- 21 立設板

図5 システム基本構成

## 5. 開発成果とその効果

**5.1 実用化事例** 本生産システムを実用化し、稼働開始したのは2016年。対象としたのは、“スイッチ”の組立である。

スイッチの組立工程の特徴として、動作部へのグリス塗布が欠かせない事がある。そして、塗布箇所が多岐にわたるため、部品組立とグリス塗布を繰り返す工程順となっている。また、生産能力を確保するため作業を分割する必要があり、従来の自動機ではグリス塗布の装置を複数設置し、工程順に配置していた。そのため、工程間をつなぐ搬送装置がその工程数分必要とし、搬送機能にかかる費用割合が高くなり、設備全体の架台も強固で大型のものが必要にならざるを得なかった。

これに対し、今回の実用化 (図6) では以下の効果が得られた。

- ・設備投資額 1/2
- ・設備製作期間 1/2 (10ヶ月→5ヶ月)
- ・設置スペース 2/3 (36 m<sup>2</sup>→24 m<sup>2</sup>)

以下に、設備投資額低減と、設備製作期間短縮の概要を説明する。

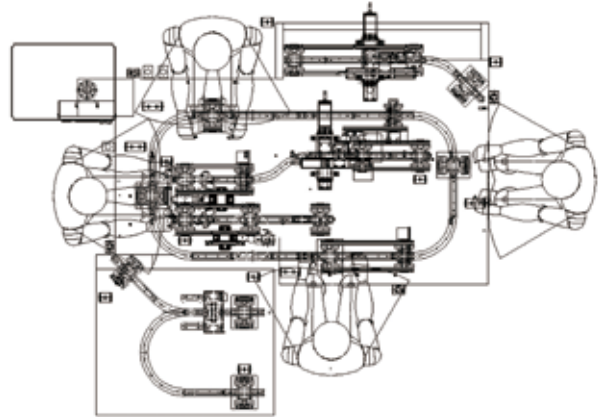


図6 スイッチ組立機 上面図

**5.2 設備投資額低減** 従来の自動機に用いられるベスマシンは、プラテンを連結して搬送させる方式であり、大型の駆動装置と専用の連結部品が必要となる。

これに対し、本システムでは、大型の専用加工品が一切不要となることと、非同期搬送を可能としたことで無駄なく必要最小限の自走プラテンを配置することができた。さらには、搬送経路の自由度を活用し、グリス塗布などの加工装置を集約させて工程を配置することも可能となった。これは、設備を構成する部品点数も少なくなり、コンパクト化につながった。これらにより、同一工程数で採用する条件で比較した場合、上述の低減効果を得られる事を算出できている。

**5.3 設備製作期間短縮** 従来の自動機に用いられるベスマシンは、大部分が専用設計となり設計期間を要する。そして最も時間を要するのは組立・調整であり、連結方式であるが故の全体調整が必要であることがその要因である。具体的には、ひとつ調整が必要な場合、それが全体に影響するため、作業が難航するケースが多い。

これに対し、本システムでは、専用設計するのは部品を保持する治具機構のみであり、設計期間が大幅に短い。また、連結ではなく、精度の必要な部分は工程毎に個別化しており、個別調整が可能であることと、調整箇所が必要最小限で済んだ。これらにより、同一工程数で採用する条件で比較した場合、上述の低減効果を得られる事を算出できている。

**5.4 品質力向上活用事例** 設備投資額低減ができ、非同期による自由度の高い搬送が可能のため、非付加価値の投資を必要最小限にすることで付加価値工程に費用を充てることができる。この費用は自動化による品質力向上に活用している。以下に事例を紹介する。

スイッチの生産は、自動機ラインはまだ一部であり、手

組ラインが主流である。手組ラインでは、横に作業者を配置する直線ラインとしていることもあり、グリズ塗布の装置を複数必要としていた。また、装置といっても一定量塗布するディスペンサ単体を準備するのが投資的に限界であり、作業は基本的に手作業。塗布量は装置で制御するものの塗布行為そのものの作業ミスにつながりかねない状態が課題視されていた。

ここで、設備の工程設計を考えると、自走プラテンの非同期搬送機能と柔軟なレイアウトが可能な事を活かした。自動装置を最大活用する“工程シェア”である。

複数にわたり手作業を必要とする塗布装置しか投資できなかったものを、完全自動塗布装置に集約することができた。具体的には、前半工程から搬送する部品と、後半工程から搬送する部品のそれぞれを自動塗布装置に順番に、それも一方向ではなく両方向から自走プラテンで搬送する。

そして、この工程シェアの活用方法は、必要な装置数を最小限にすることができる方法であるため、投資の集約のみならず、品質管理の集約になる。自動化促進による品質安定化に加え、品質バラツキの抑制にも効果がある品質向上の活用方法と言える。

**5.5 顧客の期待・価値向上** 本システムが顧客から期待を得て、強力なパートナーとしての関係継続に結び付いた事例を紹介する。

これまで、スイッチの顧客A社からは、従来の手組ライン起因による品質課題により、改善要求を受け続けていた。例えば、主力の機種は増産を繰り返しているものの、手組の人員増加で対応しており品質問題は変わらない状況が続いている。改善は続けているものの大きく状況を変えることができず、このまま問題を抱えたまま手組を続けるのであれば、“オムロン以外のメーカーを検討する”という打診を受けるところまで来ていた。そのような状況の中、顧客への説明会を実施した。説明会では、具体的に実用化設備を用いながら従来との比較で説明し、革新性を認めていただけることができた。そして自動化を進めることによる品質向上の期待から、今後の強固なパートナー関係の構築につながった。また、設備製作期間が短いという優位性も理解され、事業計画に反映されている。今後、要求にいかにか早く対応するかという“on demand”に価値が見出されている観点からも、本システムの優位性は大きい。

## 6. 今後の展開

**6.1 展開性** 今回、確かな効果が得られる事が実証できたことから、積極的に活用を促進していく計画である。

今回開発した搬送・供給システムは、専用加工装置などとは違い汎用性が高い。今回適用したスイッチ以外にも含めたオムロン商品全般の生産ラインを対象として活用する事を、各事業、各生産拠点から期待されている。具体的には、中国、インドネシアなどの海外拠点での活用を2018年度よりすすめる。そして、スイッチに限らずEMC関係の全

拠点へ展開、さらには、EMCの電子部品の生産のみならず、FA商品の組立ラインへの活用についても事業を超えて検討を始めている。FA商品の生産が得意としている手組セル生産の管理技術と本システムを融合し、更なる進化を模索している。

**6.2 混流生産** 今後は「数量に見合った軽い立上げ」を更に追求し、1台の設備で複数の商品を生産できる混流生産への活用に向けて、開発を継続している。

4項で架台上レイアウトに自由度があることを説明したが、経路変更を可能とすることで更に活用範囲が広がる。具体的には、自走プラテンの固有ID情報を利用し、搬送する部品と各工程の作業・加工内容を生産機種に応じてデータを一致させ動作させる。そして、各工程の作業・加工が終わり次工程に搬送する時に、プログラムで経路変更情報を書き込み、対象の工程まで搬送させる。この混流生産システムで狙う効果は、さらなる設備投資額削減、設備製作期間短縮である。

**6.3 最後に** 本システムは柔軟性が高く、まだ気づいていないものも含めて大きな可能性を秘めている。今回の取り組み成果を一つのきっかけとし、更に良いシステムへとステップアップさせていく。そして、オムロン全ての事業・カンパニーとの検討・議論を通じて、事業成果のみならず、全社員の挑戦意欲向上と成功体験による誇り・自信・行動につなげていきたい。

## 参考文献

- 1) 日本機械学会 生産システム部門 技術ロードマップWG 「生産システム部門 技術ロードマップ」(2016)

## 執筆者紹介



石川 裕一 Yuichi Ishikawa  
オムロン スイッチアンドデバイス株式会社  
生産技術部  
専門：制御システム工学



松本 泰久 Yoshihisa Matsumoto  
オムロン スイッチアンドデバイス株式会社  
生産技術部  
専門：機械設計工学  
所属学会：一般社団法人日本機械学会

# リレー高容量化を実現する 動的挙動シミュレーション技術

## 数値解析を活用したリレーの開閉性能設計手法について

井戸田 修一・西田 剛

近年、環境問題の取組みの一環として、電気機器のエネルギー効率化が推進されている。それに伴い、電子部品であるリレーにも小型化と高容量開閉性能の両立が求められるようになった。リレーの開閉性能を向上させるためには、金属接点の開閉動作および開閉時に発生するアーク放電現象、接点消耗過程を制御し、開閉性能を設計する必要がある。

そこで今回、シミュレーション技術で動的な金属接点開閉動作を制御設計することで開閉性能を向上させる取組みを行った。リレーの電気接点を駆動する電磁石の吸引力を電磁界解析により算出し、吸引力とばね弾性力から金属接点の動的な開閉動作を定量化した。今回の解析技術と実測評価を組み合わせることで、3倍の接点开離速度を実現し、開閉寿命を向上することができた。

# Dynamics simulation technology for high electrical durability relay

## Electrical durability design by numerical analysis approach

*Shuichi Itoda and Takeshi Nishida*

Recently energy efficiency of electrical equipment is promoted as environmental issues. This energy efficiency accelerates both downsizing and switching capability for mechanical relays. We need to control contact dynamics and erosion process from arc plasma triggered by contact switching, and design electrical durability of mechanical relays.

There in this time, we had numerical analysis approach to design contact switching dynamics and improve electrical durability of mechanical relays. We quantified contact switching dynamics by numerical coupled analysis between electromagnetism and dynamics of electronic magnet. We could improve contact velocity 3 times and electrical durability.

### 1. はじめに

近年のハイブリッドカーや太陽電池パネル等の環境エネルギーマネジメント機器ではバッテリーを利用するため直流が採用されている。また、これらの機器ではエネルギー効率化を追求するために機器の高電圧化、大電流化が進んでいる。これら環境エネルギーマネジメント機器には回路の開閉のためにメカニカルリレーが搭載されている。これら用途でのメカニカルリレーについては高電圧、大電流の直流を確実に遮断することが求められている。

一般的にメカニカルリレーやスイッチのように電気接点（以下、接点という）を用いて直流電流を遮断するには、接点开離時に発生するアーク放電の発生継続時間を短くすることが重要である。なぜならば、アーク放電はジュール

発熱により高温状態になるため<sup>1) 2)</sup>、接点表面を消耗させたり、接点周囲の部品変形を生じさせたりすることがあり、リレーやスイッチが故障する恐れがあるためである。そのため接点での直流遮断時は接点の開離速度を大きくし、短時間で接点間隔を確保することで、アーク放電の継続時間を短くすることが必要とされている<sup>3)</sup>。

リレーの基本形であるシングル・ステイブル形リレーは、電圧印加した電磁石吸引力で接点对を閉じて、電磁石から電圧を除去したときのばねの力（以下、ばね負荷という）で接点对を開く構造となっている。したがって、電磁石のストロークに対する電磁石の吸引力およびばね負荷のバランスがリレー設計の基礎である。図1に電磁石ストロークに対する吸引力とばね負荷の模式図を示す。図1の模式図は、磁気吸引力が全ストロークにわたってばね負荷カーブ

を超えるようなコイル電圧を印加すると電磁石が動作することを示している<sup>3)</sup>。吸引力カーブはコイル巻き線や磁性材で構成される電磁石の構造や材料、バネ負荷カーブは接点の動作範囲やバネ定数がそれぞれ設計要素になる。これらの要素を組み合わせることで動作設計を行い、開閉の機能を実現していた。この図1は電磁石とばねのつり合いを表したもので、静的な動作設計（以下、静的設計という）である。

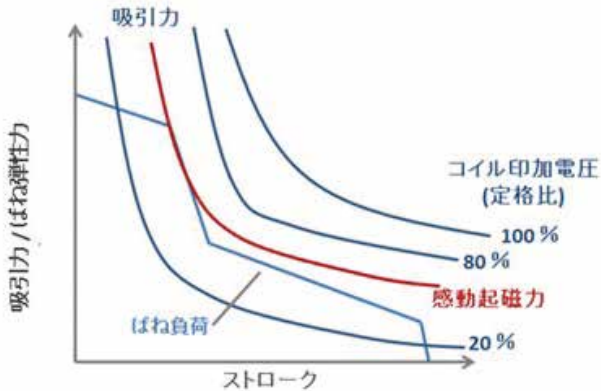


図1 吸引力-ばね負荷カーブ模式図

直流遮断に要求されるのは、素早い接点開離動作による短時間での接点間隔の確保である。すなわち、接点開離時の過渡的な挙動設計（以下、動的設計という）が必要である。しかしながら、動的設計は静的設計に比べ格段にパラメータが多いために理論的な手法確立が遅れていた。そのため従来の動的挙動設計は試作と実測検証を主体に行われていた。実測検証には試作評価が必要であり、開発リードタイムが長くなる問題がある。そこで今回CAEを活用して動的な接点開離動作の最適化を試みた。

## 2. テストサンプルと評価指標

**2.1 テストサンプル概要** CAEの実施を行う上で接点開離動作の設計目標を明らかにするためにリレー原理モデルを作製して、その電気的耐久性試験を行った。図2にリレー原理モデル模式図を示す。今回の検討で用いた原理モデルは、ばね負荷の評価が簡便なコイルばねのみで構成されたリレー構造である。また、ヒンジ型電磁石の可動部に直接可動接点接続され、電磁石の可動部と可動接点とが完全に連動する構造とした。

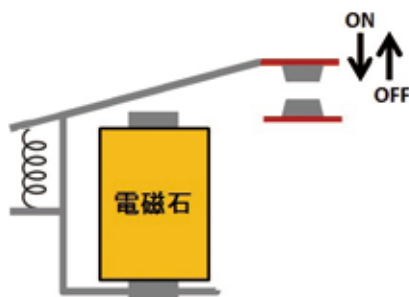


図2 リレー原理モデル模式図

**2.2 高容量化に伴う技術課題** 図2で示したリレー原理モデルにて440 V/60 Aの負荷条件において電気的耐久性試験を行った。電磁石コイルにサージ吸収用ダイオードを接続して2,000回、サージ吸収用ダイオードを接続せずに50,000回の開閉寿命だった。図3にコイル駆動回路の回路図を示す。

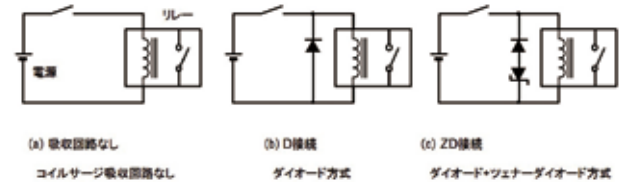


図3 コイル駆動回路 回路図

サージ吸収用ダイオードを電磁石コイルに並列に接続した図3の (b) の場合、スイッチオフ時に、コイル電流変化に伴う誘導起電力が発生する。これによりコイル-ダイオード間に誘導電流が流れ、吸引力が維持されることで接点開離速度が小さくなると考えた。そこで、ダイオード接続の有無による接点開離速度の差異と開閉性能の相関性に着目して、高速度カメラで測定した接点開離時の過渡的な接点動作をダイオード接続の有無で比較評価した。図4に接点開離時の過渡的な接点動作の実測評価結果を示す。図4の接点変位の傾きからも明らかなようにサージ吸収用ダイオードを接続した場合は接点開離時の接点速度が遅くなっていることが分かる。図4の接点変位が変位し始める接点開離タイミングから10 ms間の接点平均速度で比較すると、ダイオード接続した場合に比べ、ダイオード接続しない場合の方が約4倍大きい平均速度を持っていることが分かった。

これらのことから、過渡的なばね負荷と吸引力のバランスを定量化することで動的設計を行い、接点開離速度を最適化することが必要である。

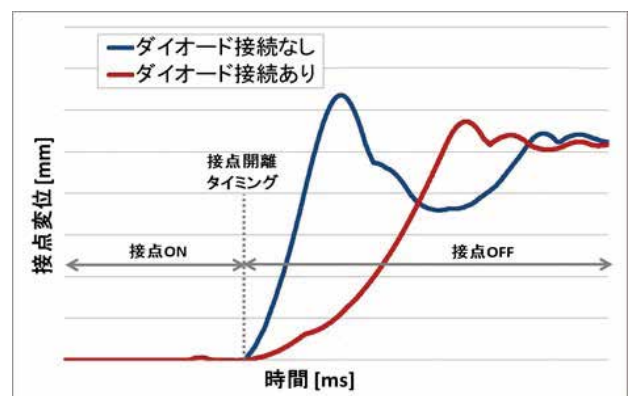


図4 リレー原理モデルの過渡的な接点変位

**2.3 溶着故障メカニズム仮説と評価指標** 2.2で述べた接点開離速度と電気的耐久性試験の開閉寿命の相関性を評価するために、サージ吸収用ダイオードの有無やツェナーダイオードの接続などにより、意図的に接点開離速度を調整したサンプルを複数準備し、各サンプルで電気的耐久性の開閉回数と接点開離速度を評価した。図5に接点開離速

度と電氣的耐久性試験の開閉回数との相関性を示す。

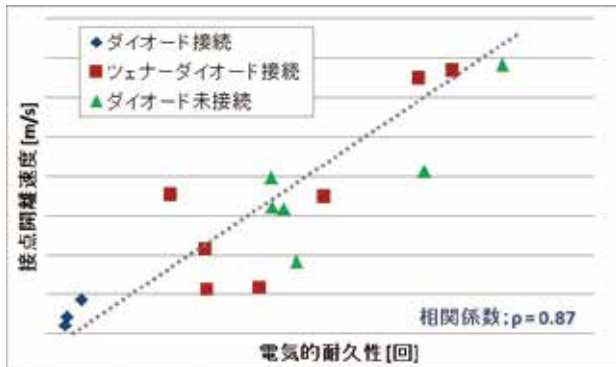


図5 接点開離速度と電氣的耐久性の相関性

図5のグラフから接点開離速度と電氣的耐久性試験の開閉回数は相関係数が0.87と非常に高い相関性を持っていることが分かる。図5で示した電氣的耐久性試験の開閉寿命は、接点開離時に発生するアーク放電による接点消耗が起因となる接点溶着によるものである。接点溶着とは、接点同士がアーク放電により溶融し、接触した状態で再凝固する現象である。接点開離速度が遅くなり、接点間隔の確保に時間がかかると、アーク放電の継続時間が長くなり、接点消耗や接点溶融が発生しやすくなることが考えられる。このことから、接点開離速度を大きくすることで、接点溶着の故障頻度が低減できると考えられる。

これらのことから、アーク継続時間を短くし、接点消耗を抑えるための評価指標として接点開離速度を導入し、CAEにより接点開離速度の最適化を行う。

### 3. 解析内容

**3.1 テストサンプル3次元CADモデル** 図6にリレー原理モデルで用いた電磁石の3次元CADモデルを示す。

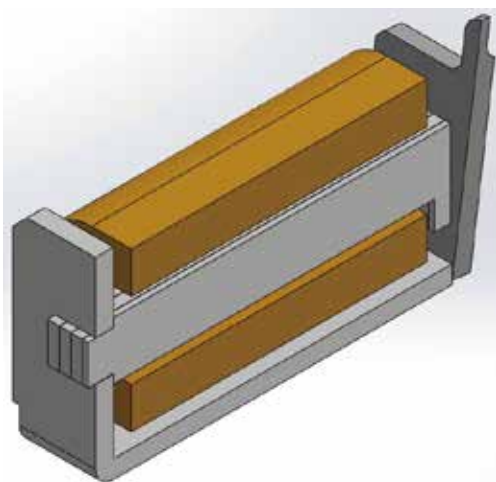


図6 リレー原理モデル電磁石の3次元CADモデル

本モデルは図2のリレー原理モデルで用いた電磁石を3次元CADソフト Solid Worksで作成したものである。今

回用いた電磁石モデルは対称構造のため、計算コスト低減を目的とし、対称面でカットしたハーフモデルとした。また、今回は電磁石と接点の挙動が連動した動きをするという前提に基づき、CAEにより算出した過渡的な電磁石挙動から接点開離速度を推定する手法を採用した。

### 3.2 電磁界解析による接点開離速度検討

**3.2.1 解析モデル** 図6で示した原理モデルの過渡的な挙動について電磁界解析をベースに計算を行った。図7に今回の電磁界解析モデルの計算フローを示す。今回の電磁界解析では、①電磁石駆動回路、②電磁石の吸引力、③電磁石可動部の過渡的挙動の連成解析を行い、電磁石挙動を算出している。

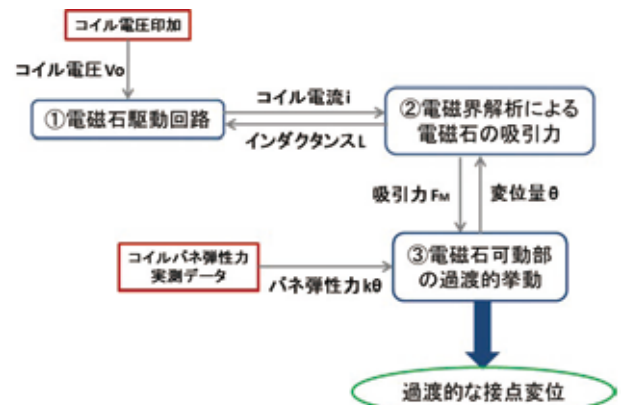


図7 電磁界解析の計算フロー

#### ① 電磁石駆動回路

電磁石の磁界解析から算出されたインダクタンスLを基に(1)式により電磁石コイルに流れる電流*i*を算出する。

$$V_0 = L \frac{di}{dt} + Ri \quad (1)$$

$V_0$  ; コイル電圧、 $L$  ; コイルインダクタンス  
 $i$  ; コイル電流、 $R$  ; コイル抵抗

#### ②電磁石の吸引力

(1)式で導出されたコイル電流*i*から、(2)式によりベクトルポテンシャルA、磁束密度B、電磁石可動部で発生する吸引力 $F_M$ を算出する。今回は過渡的に磁束密度変化が発生するため、過渡的な磁束密度変化を阻害する渦電流の発生を考慮した磁界解析を行っている<sup>4)</sup>。

$$F_M = \frac{1}{4\mu_0} \int \mathbf{B} dS = \frac{1}{4\mu_0} \int (\nabla \times \mathbf{A}) dS \quad (2)$$

$F_M$  ; 電磁石の吸引力、 $\mu_0$  ; 真空の透磁率  
 $B$  ; 磁束密度、 $A$  ; ベクトルポテンシャル

#### ③電磁石可動部の過渡的挙動

リレー原理モデルのヒンジ型電磁石可動部の挙動は回転運動と見なすことができるので、(2)式により計算された吸引力 $F_M$ を運動方程式(3)に挿入し各時刻の電磁石可動部の変位量 $\theta$ を算出する。(3)式で用いたバネ定数*k*に



ついては、事前に荷重測定器により測定したバネ弾性力と変位量の関係から算出している。

$$F_M = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} + k\theta \quad (3)$$

J; 慣性モーメント、 $\theta$ ; 電磁石鉄片の回転角  
B; 減衰定数、k; バネ定数

①～③の計算を各時刻で繰り返し行い、各時刻における電磁石可動部の変位を算出することで、接点の過渡的挙動の推定を行う。

**3.2.2 解析結果** 3.2.1で述べた解析モデルにて過渡的な電磁石可動部挙動を計算し、接点開離速度の推定を試みた。図8に電磁石挙動解析による電磁石可動部挙動のグラフ、および、代表的な変位での電磁石の磁束密度分布コンター図を示す。接点开離タイミングについては、電磁石可動部と金属接点が連動した挙動をするという前提で、解析的に算出した電磁石鉄片の変位開始位置と実際のリレー寸法から推定した。

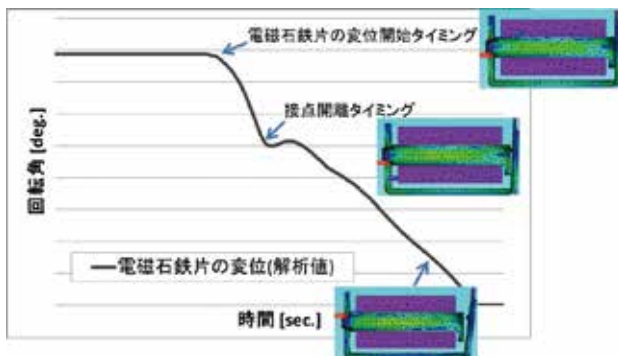


図8 電磁石可動部挙動解析 (コンター図;磁束密度分布)

**3.2.3 評価方法** 図8の電磁石可動部の過渡的挙動の解析結果から推定した接点开離タイミングを基準とし、その基準位置から10 ms間の平均速度を算出し接点开離速度とした。今回の検討では、電磁石の材質、形状の変更はせずに、ばね定数の大きさのみを変更することで、最も大きい接点开離速度が得られるばね負荷条件を解析的に検討した。接点の過渡的挙動は電磁石吸引力とばね弾性力の合力で決まるため、基本的にばね弾性力を大きくしていくことで、より大きな接点开離速度が得られると考え、より大きなばね定数を設定し、3.2.1で示した解析モデルを用い接点开離速度を算出する検討を行った。また接点开離速度とばね弾性力、電磁石吸引力との関係性の定量化を行った。

**3.3 実機との比較** 解析結果の精度評価を行うために、電磁石可動部の各変位における吸引力の大ききで実測値と解析値の比較を行った。図9に吸引力の実測値と解析値の比較結果を示す。実線が実験値、点列が解析値を表している。図8の点線枠で示した箇所が電磁石可動部と鉄心が完全吸着した位置を示しており、完全吸着位置のみ最大で

5%程度の解析誤差だったが、可動部が動き出してからは1%を十分下回る解析誤差の精度を確保した。これは完全吸着時では吸着面の微小磁気ギャップに対して、磁性部材同士の接合部などのその他微小磁気ギャップ寸法の実機とモデルとの差異が無視できなくなるためと考えられる。今回の接点开離速度の検討では、吸引力解析誤差が1%以下の領域における電磁石可動部の解析データを用いるため、十分な解析精度が得られていると考える。

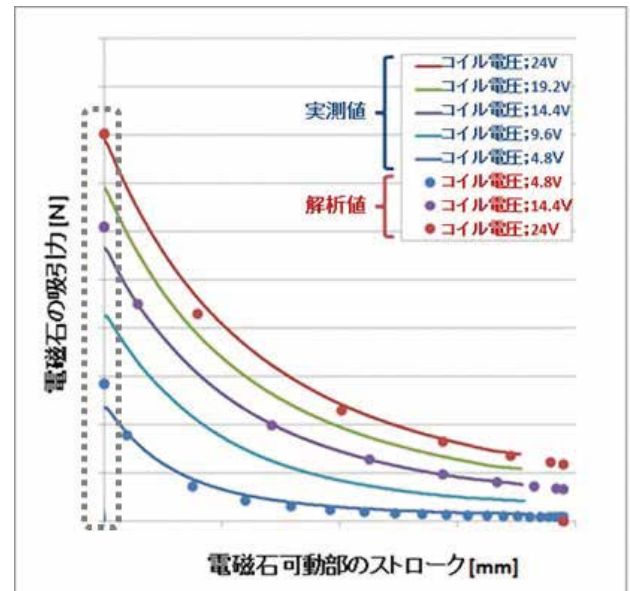


図9 電磁石吸引力の実測-解析比較

図10にコイル駆動回路に接続するサージ吸収素子、3種類のばね定数の各条件における接点开離速度の解析結果を示す。接点开離速度の解析値と実測値を棒グラフで示す。また接点开離時の吸引力、ばね弾性力を折れ線で示す。サージ吸収用ダイオード接続をした場合に比べ、ツェナーダイオードを接続した場合、ダイオードを接続しない場合の方が接点开離時の吸引力が小さくなっていることが分かる。

ダイオードを接続した場合、図3の (b) で示したように、リレー制御用スイッチ OFF時にコイルとダイオード間でショート回路が構成される。この時、ショート回路内で (4) 式に示したコイルの誘導起電力Vが発生し、コイルに一定時間誘導電流が印加される。これにより、吸引力が減少しにくくなり、接点开離時の吸引力が大きくなる。

$$V = L \frac{di}{dt} \quad (4)$$

(V; 誘導起電力、L; インダクタンス)

吸引力が大きくなると、(5) 式で表される接点开離力が小さくなり、接点开離速度の減少に繋がる。

$$F_{total} = F_S - F_M \quad (5)$$

( $F_{total}$ ; 接点开離力、 $F_S$ ; バネ弾性力、 $F_M$ ; 吸引力)

これらのことから、ダイオードを接続しない場合は、接

点開離速度を大きくすることができる。しかし、サージノイズによる電子機器保護の観点でダイオードは必要であるため、ダイオード接続条件において、接点开離速度の向上を検討する。

(5) 式からばね弾性を大きくすることで、接点开離力、および、接点开離速度の向上が期待できる。一般的にばね定数を大きくすることで、ばね弾性を大きくすることができるが、図10に示したように、ばね弾性が大きくなると同時に吸引力も大きくなること分かった。

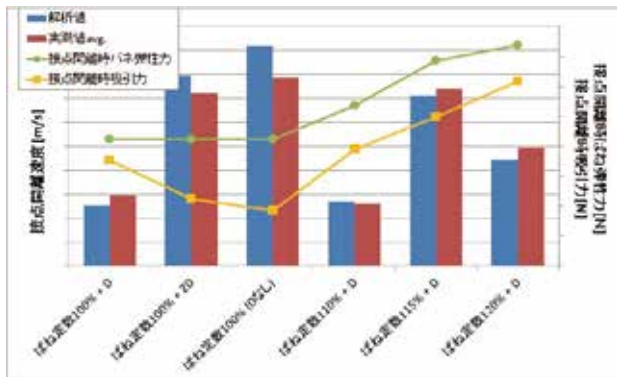


図10 接点开離速度解析結果  
(棒グラフ:接点开離速度、折れ線グラフ:吸引力、ばね弾性力)

図11に接点开離時のコイル電流解析結果を示す。図中の矢印は電磁石可動部が動き出すタイミングを表している。ばね定数を大きくし、ばね弾性を大きくすることで、電磁石可動部が動き出すタイミングが早くなる。これにより、電磁石可動部や接点が動き出すタイミングにおけるコイル電流が増大するため、接点开離時の吸引力も大きくなる。

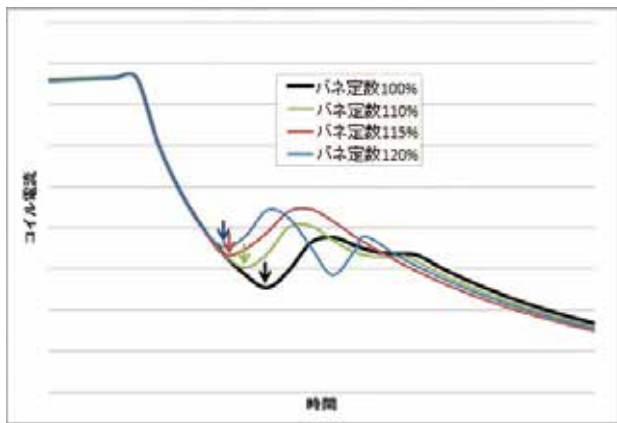


図11 接点开離時のコイル電流波形解析結果

これらのことから、ばね定数を大きくすることで、ばね弾性は大きくなるが、同時に電磁石吸引力も大きくなるため、図10で示したように接点开離速度は極大値を持つことが分かる。

#### 4. 試作品への活用

図10の接点开離速度の解析結果を参考に最も大きな接

点开離速度が得られるようにバネ定数を決定し、電氣的耐久性試験の開閉寿命向上を目的とした試作品を作製した。表1にリレー原理モデルと今回の接点开離速度改善品の開閉性能比較を示す。今回の試作品では、基準となる原理モデルに比べ、接点开離速度が3倍となり、440 V/60 Aの負荷条件においては電氣的耐久性試験の開閉寿命回数が約25倍となった。

表1 原理モデルと今回の試作品との開閉性能比較

	負荷条件	開離速度代表値 [m/s]	電氣的耐久性代表値 [回]
原理モデル	ダイオード接続	0.15	2,000
原理モデル	ダイオード未接続	0.48	50,000
試作品	ダイオード接続	0.45	50,000

今回の検討においては、接点の過渡的な挙動を制御するために、ばね弾性の増大を目的とし、ばね定数の最適化のみを行った。しかし、電磁石の磁気特性の最適化により、接点开離時の吸引力減少を実現できるため、電磁石の磁気特性も接点の過渡的な挙動を制御する因子になり得る。今回の電磁界解析と動的挙動解析を組合せた検討方法を用いると、電磁石の磁気特性の最適化も行うことができる。

#### 5. まとめ

直流リレーでは接点消耗、接点溶着を低減するために、アーク放電の継続時間を低減する必要がある。アーク放電継続時間の低減のため、接点开離速度を大きくし、短時間で接点間隔を確保することが重要である。

今回、接点开離速度向上のため、電磁界と運動の連成解析により、接点开離時の過渡的な挙動を定量化する試みを行った。リレー原理モデルのばね定数を大きくさせると、ばね弾性力および電磁石吸引力が共に大きくなること分かり、接点开離速度は極大値を持つことが分かった。

接点开離速度が最大となるバネ定数に変更した試作品にて、電氣的耐久性試験評価を行うと、基準となる原理モデルに対し、開閉寿命回数が約25倍となった。これは、接点开離速度向上による接点消耗、接点溶融が抑えられたことが要因だと考えられる。

今後の課題としては、より複雑な実際のリレー構造について、本検討で行ったCAEによる接点の過渡的な挙動の定量化手法を適用することである。本検討で用いたリレー原理モデルでは、電磁石可動部と接点が運動しているが、実際のリレーでは、電磁石可動部と接点が完全に運動することはない。これは、実際のリレーでは接点开離動作時に生じる接点可動部のたわみにより電磁石と接点の過渡的な挙動に差異が発生することに起因する。今回の解析モデルでは、モデル全体を剛体として運動を取り扱ったが、実際のリレーの過渡的な挙動を再現するには、接点可動部のたわみを考慮した計算モデルの構築が必要となる。たわみを考慮したり

レー全体の挙動解析技術を構築し、実際のリレーの開閉寿命向上に貢献する技術開発を行う所存である。

### 参考文献

- 1) 電気学会放電ハンドブック出版委員会. 放電ハンドブック. 電気学会, 2003, p.1945
- 2) Fei Yang et al., Low-voltage circuit breaker arcs – simulation and measurements, J. Phys. D:Appl. Phys., 2013, Vol.46
- 3) 槇野 國夫. リレーハンドブック. 森北出版株式会社, 1992, p.335
- 4) 河瀬順洋, 菊池春秀, 伊藤昭吉. 直流電磁石の過渡動作特性の三次元数値解析. 電学論 B, 1991, Vol.111, No.10, pp.1051-1056.

### 執筆者紹介



井戸田 修一 Shuichi Itoda  
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  
技術統括部 要素技術部  
専門：電気工学  
所属学会：電気学会



西田 剛 Takeshi Nishida  
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  
技術統括部 要素技術部  
専門：機械工学





### 3. 新たな成長領域を生み出す技術

## 空気清浄機向け微小粒子検出センサ開発

### 光学技術と集塵構造による粒子検出精度の向上について

河合 肇・宮本 寛之・広瀬 勇司・山村 聡

微小粒子状物質PM2.5による大気汚染が話題となり人々の関心が高まっている。PM2.5を検出するセンサは、我々の身近なところでは、空気清浄機に搭載され、我々の日常生活の中にも浸透しつつある。一方で、従来の粒子検出センサではPM2.5粒子を高精度に検出するには十分な性能に達していない。PM2.5粒子の検出精度を上げる為には、より微小な粒子に対して感度を高めること、また検出部に効率的に粒子を流入させることが重要である。

本開発では、独自の光学系及び集塵構造を伴う流路構造により、粒径0.5  $\mu\text{m}$ の微小粒子まで検出できる高精度な粒子検出センサを、光散乱方式を用いて実現させた。

## Development of air quality sensor for air purifier

### Accuracy enhancement by optical system and dust collection structure

*Hajime Kawai, Hiroyuki Miyamoto, Yuji Hirose and Satoshi Yamamura*

Air pollution by fine particulate matter PM2.5 is becoming a topic and people's interest is increasing. PM2.5 sensors are installed in air purifiers in our immediate vicinity and are also pervasive in our daily lives. On the other hand, conventional particle detection sensors have not reached sufficient performance to detect PM2.5 particles with high accuracy. In order to increase the detection accuracy of PM2.5 particles, it is important to increase the sensitivity to finer particles and to allow particles to flow into the detection area efficiently. In this development, we have realized highly accurate particle detection sensor which can detect micro particles with a particle diameter of 0.5  $\mu\text{m}$  by a flow path structure with dust collection structure and original optical system by using light scattering method.

#### 1. まえがき

近年、粒径2.5  $\mu\text{m}$ 以下の粒子を含む、微小な粒子状物質、いわゆるPM2.5による健康への影響が明らかにされ、注目を集めている。

PM2.5の発生源としては、工場のばい煙や自動車の排気ガス、火山灰等があるが、身近で代表的なものとしてはタバコ煙が挙げられる。タバコ煙に含まれる粒子は1  $\mu\text{m}$ 以下の微小粒子で、特に室内環境での微小粒子発生源として分かりやすいため、空気清浄機の集塵性能試験において、タバコを用いた試験が日本電機工業会の標準規格として定められている。

微小粒子の計測方法としては、大気を吸引してフィルタ上に粒子状物質をろ過捕集するフィルタ法、またその自動測定を目的としたフィルタ振動法、 $\beta$ 線吸収法、さらに簡易の測定方法として光散乱法等が挙げられる。

測定方法としては、フィルタ法が最も信頼性の高い測定

方法とされており、フィルタ振動法、 $\beta$ 線吸収法もそれに準ずる測定方法として、環境省大気汚染物質広域監視システム（通称：そらまめ君）にも採用されている<sup>1)</sup>。

一方でこれらの方法は非常に大型で高価であることから、小型ローコストでリアルタイム計測が可能な光散乱方式が、家庭用空気清浄機などに組み込まれ、身近な粒子検出センサとして普及している。

しかし、従来の粒子検出センサでは最小検出粒径が1  $\mu\text{m}$ 程度、とタバコ煙を含む微小粒子を検出するには十分とは言えず、また計測のバラつきも大きいため、空気清浄機での効率運転を促すうえでも、高精度な微小粒子検出センサへのニーズが高まってきている。

#### 2. 計測原理

本センサは、大気中の微小粒子を光散乱方式によって計測し、通過粒子の検出信号をパルスにて出力するセンサで

ある。

全体構成としては図1に示す通り、微小粒子を検出領域に到達させるための粒子導入部、検出領域に到達した粒子に対し光を照射し、照射した光が粒子に当たり散乱したときの散乱強度を検出する検出部、散乱光信号を処理する増幅回路と演算処理部、粒子を排出する粒子排出部に分かれる。

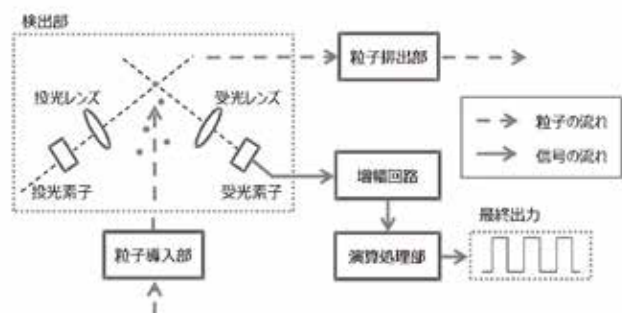


図1 全体構成ブロック図

以下に、光散乱方式のコアとなる、検出部と粒子導入部の機能について述べる。

**2.1 検出部** 光散乱方式の粒子検出センサでは、検出領域に到達した粒子に対し、投光素子から光を照射した際に生じる散乱光を検出することで粒子を検出する。投光素子と受光素子にはそれぞれ検出領域に対して集光光学系をとるよう非球面レンズを配置し、受光信号の強度を確保している。受光した信号は光電変換により、電気信号に変換され、後段の処理回路に伝達されることとなる。図2に粒子検出時の信号波形のイメージを示す。粒子通過に応じて散乱信号が出力されるため、一定の閾値を引くことにより粒子の通過を検出することができる。

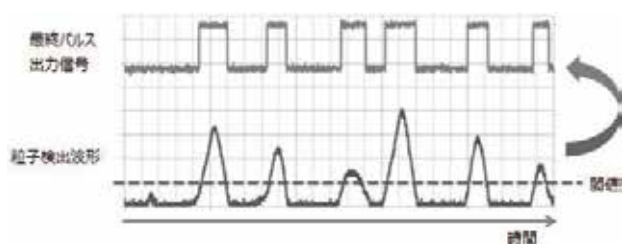


図2 粒子検出信号

この検出部でどれだけのS/N比が確保できるかで、最小検出粒子径が変わってくる。S/N比が低いと微小粒子からの受光信号がノイズに埋もれ、検出できなくなる為である。すなわちS/N比が高ければ高いほどより微小な粒子まで検出が可能となる。

**2.2 粒子導入部** もう一つの重要な構成要素が粒子導入部である。

粒子の検出原理は2.1項で述べた通りであるが、検出領域に粒子が到達しなければその機能を発揮することはできない。粒子をスムーズに検出領域に導くのが粒子導入部の役割である。

粒子導入の為には空気の流れを作り出す必要がある。その方法としては、攪拌ファンを用いて強力に外気を取り込む方法や、抵抗器加熱により大気に温度差を発生させることで生じる上昇気流を利用する方法がある。

その選択は、用途によって異なってくるが家庭用空気清浄機等に組み込まれる簡易的な粒子検出センサの場合は市場のコスト要求から抵抗器加熱方式を採用することが多い。本センサにおいてもこの抵抗器加熱方式を採用している。

この粒子導入部で流入量を確保し安定的な流れを作るとは、検出のバラつきや誤差の軽減につながる為、センサの精度に直結してくる。

### 3. 技術的課題

前述の通り、微小粒子の計測精度を高めるためには、

- ① S/N比を上げてより微小な粒子まで正確に検出する
- ② 流入量を増加させ検出バラつきを抑える。

ことが必要となってくる。

従来、家電組込系の小型センサにおいては、①②のいずれも十分な性能を確保できていない為、結果として検出精度が低くバラつきが大きい結果となっている。

図3は従来センサでタバコ煙を測定し、粉塵濃度計測装置との相関を測定したグラフである。バラつきが大きく相関性が低いことが分かる。

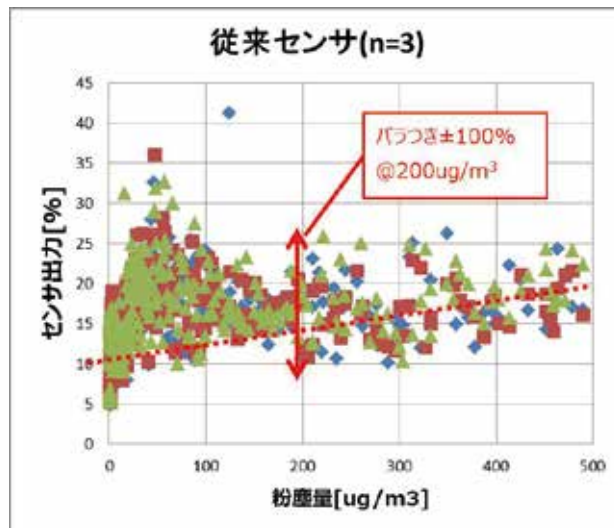


図3 従来センサ測定結果

以下に、①②それぞれに対する課題について述べる。

**3.1 S/N比確保に対する課題** 微小な粒子への検出性能を上げる為には、まず散乱信号の強度を上げる必要がある。信号強度を上げる為には、投受光の強度/感度を上げることや回路上のゲインを大きくすること等、一般的な方法で実現可能ではあるが、当然ノイズの影響も大きくなる。とりわけ粒子検出センサにおいては1 μmや0.5 μmといった微小な粒子からのわずかな散乱光を取り出す必要がある為、ノイズ信号をいかに低減できるかが大きな課題となる。

加えて、家電品に組み込む都合上、ケースを大きくすることができず、検出領域を通過した光は全てケース内を散乱することになる。この光が受光部に到達し定常的な出力が発生することになる。このような粒子からの信号光以外の予期せぬ光を”迷光”と呼ぶ。この迷光が大きなノイズ源となりS/N比向上の妨げとなる。

**3.2 流入量確保に対する課題** 光散乱方式の粒子検出センサは、検出領域を通過する粒子を確率的に捉え信号検出する検出手法である。そのため、粒子の流入量の確保は、検出機会を上げるという意味で、検出精度に大きく関わってくる要素である。

機器組込センサにおいては、コスト的な要求から安価なヒータ抵抗を用いて上昇気流を発生する抵抗器加熱式構造をとることが多い。この場合、上昇気流の空気の流れをいかに効率的に検出領域に誘導する構造とするかが重要となってくる。

一般的に物体の周りを粘性のある流体が流れる際、粘性の働きによって物体の表面付近に境界層が形成され流速が低減する。理論的には図4のようなモデルで表され、半径aの円管に流体が流入した場合、平均流速は円管半径の2乗に比例することが分かる<sup>2)</sup>。

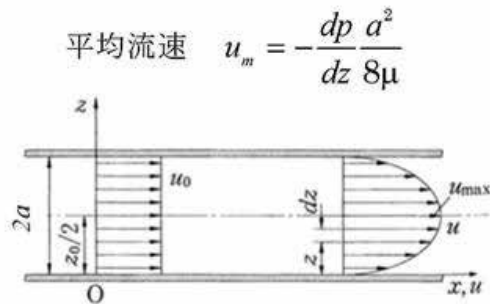


図4 流速モデル

流速と流入量は比例関係にある為、小型化によりケース壁面が流路に接近することは流速が低減し流入量の低下を招く。一方で、流入量を確保しようと空間を広げるとセンサケースが大型化してしまう、このトレードオフにより流入量を確保することが難しくなっている。

**4. 技術内容**

前述の課題に対しての取り組みと解決に導いた構成について以下に記す。

**4.1 ノイズ低減への取り組み** 本センサにおいては、まず0.5 μm粒子のからの微小な信号を検出するために、高感度フォトIC (PIC) を新たに開発し検出信号強度の増加を試みた。PICの構成はシンプルなもので、フォトダイオードと電流増幅回路をワンチップ内に納めたものである。したがって、PICの感度は、内部の電流増幅回路により決まり、かなりの自由度がある。

しかし、前述の通り、感度を上げすぎるとケース内の迷光の影響が大きく出力が飽和してしまう可能性がある。

迷光を除去する方法としては、迷光をセンサ外に放出することが最も効率が良い。しかし、光学系が開口部に向くことで外乱光が大量にセンサ部に入光する恐れがあるため、この構造をとることができず、従来センサでは十分な迷光低減ができていなかった。結果、信号強度の確保が難しく、微小粒子の検出が困難となっていた。

しかしながら、本センサでは、粒子排出口を、敢えて投光素子の対向方向に設けることで迷光の大部分をセンサ外部に捨てることを考えた。この際に、開口部を光路の延長線上とするのではなく、一定の角度を設けることにより筐体内の反射を促しながら、迷光をセンサ外へ誘導することに成功した(図5)。また逆に、当構造をとることで、外部から侵入する光に対しても容易に受光部へ到達しない外乱抑制の効果も同時に得ることができた(図6)。

これにより、迷光レベルを従来センサの1/5以下に抑えることができた。

次に、上記構造により取り出した光信号に対して、以下の通り電気ノイズの除去を行った。

電気的ノイズは高周波成分を多く含んでおり、粒子検出信号の周波数を鑑みて適正にフィルタリングする必要がある

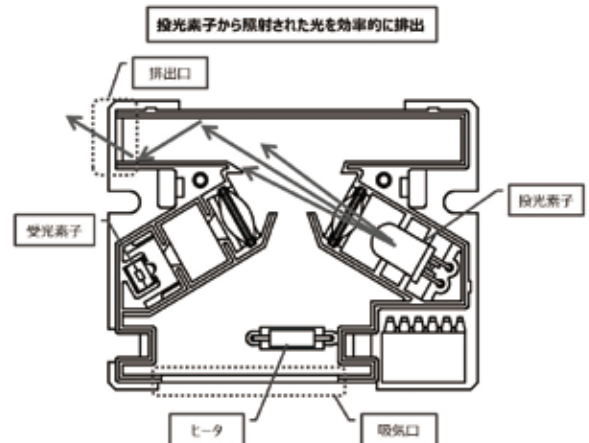


図5 迷光排出イメージ

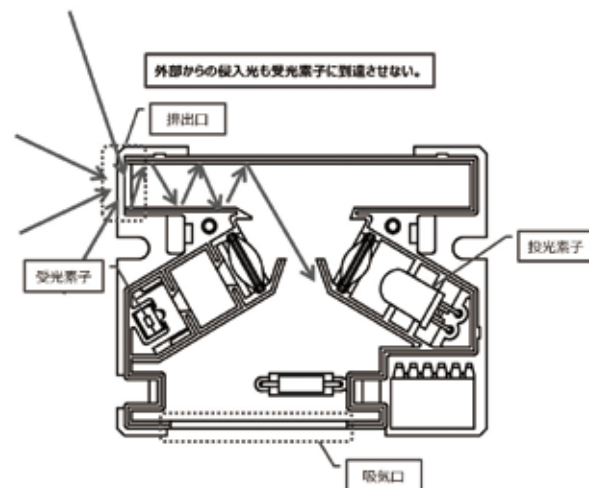


図6 外乱光侵入イメージ



る。本センサにおいては、抵抗加熱による上昇気流を利用している為、微小粒子の流入速度は遅く概ね100~500 Hz程度で検出領域を通過するため、1 kHz以上の信号はノイズとみなすことができる。高周波をフィルタリングし微小粒子の信号周波数を選択的に増幅することにより、従来センサでは検出困難であった0.5 μmの標準粒子に対して、十分なS/N比を得ることができた。高周波フィルタリング前の波形を図7に、信号処理によって高域の信号をカットした波形を図8に示す。

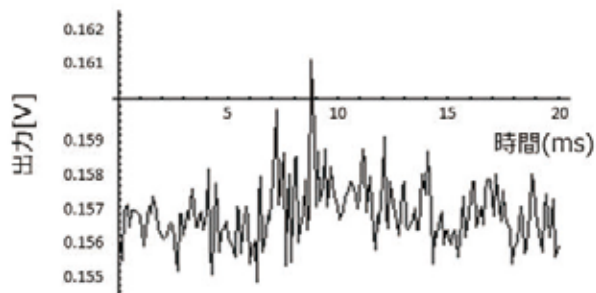


図7 0.5 μm粒子検出波形(フィルタリング前)

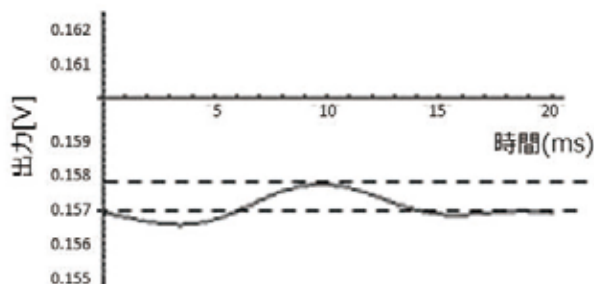


図8 0.5μm粒子検出波形(フィルタリング後)

**4.2 流入量に対する取り組み** 3.2項で述べた通り、流路に対して境界面が少ないほど流入量の損失は少なくなる。そのため、まずは流入量を確保するために小さな筐体の中でいかに空間を広げるか、という検討を進めた (図9)。

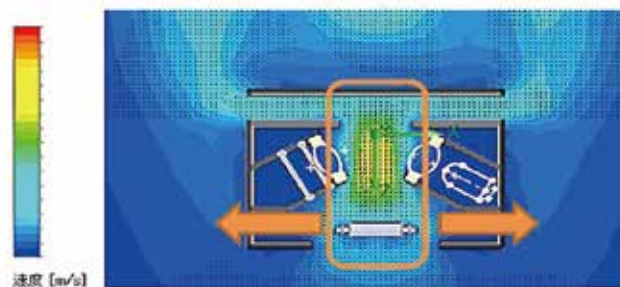


図9 流入量確保検討図(空間拡大)

確かに、筐体内の空間を広げることは流入量を上げる結果につながる。しかしながら、重要なことは流入量を単に増加させることではなく、検出領域内での粒子密度をいかに確保するかという点だという発想に至った。

そこで、検出領域に向かって流路を狭める構造をとることを考えた。これは検出領域に向かって粒子を効率的に収集することを目的としている (図10)。

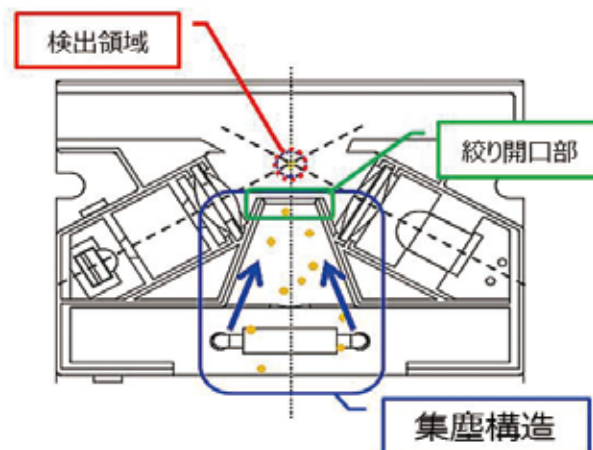


図10 集塵構造

但し、当然のことながら流路の絞りを小さくしすぎると流入量を著しく低下させてしまう (図11)。

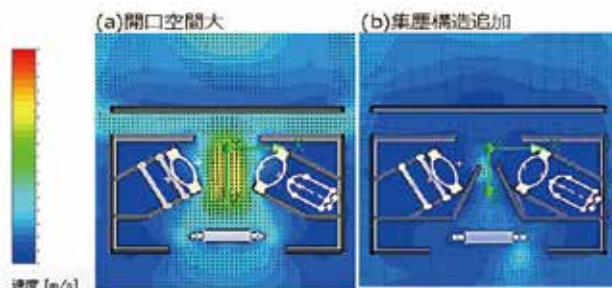


図11 開口面積による影響

従って、絞り開口部面積と流入量をパラメータとし最適な絞り形状を決定する必要がある。

集塵性能は、流入量と絞り部開口面積の比率で表すこととする。これは流入した微粒子がどの程度検出領域に収集されるか、という指標である。

複数のモデルで集塵性能指標を評価することにより最適な構造を導き出し、従来センサに対して6倍の検出効率を実現した (図12)。

表1:集塵性能検討

	model1	model2	model3	model4
絞り開口面積[mm <sup>2</sup> ]	140	50	20	5
流入量[a.u]	75	39	18	3.5
集塵性能[a.u.]	0.54	0.78	0.90	0.70

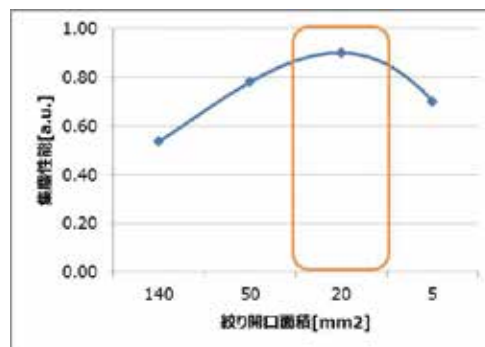


図12 集塵性能と開口面積

本構造は、吸気口付近は空間を広げ、流入量を確保しつつ、検出領域近傍から粒子を誘導する漏斗状の集塵構造を形成することで、“流入量の確保”と“集塵機能”を両立させたハイブリッド機構とも言うべき構造である (図13)。

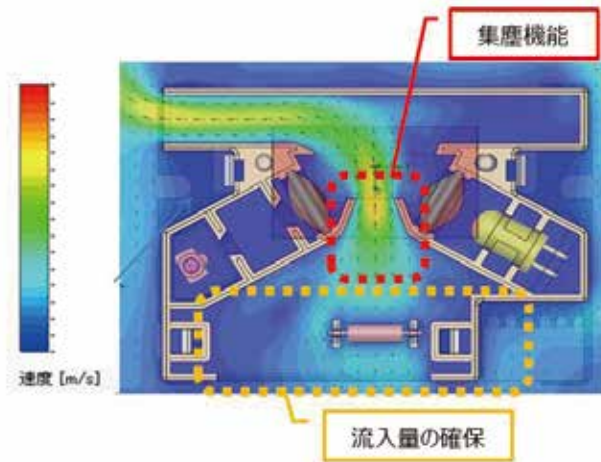


図13 最終形状流路シミュレーション

加えて、この集塵構造を、投受光の光学形状を利用して形成したことによって、光学形状と流路を一体化し小型化を同時に実現しているところを特徴としている。漏斗形状のテーパ角度を二段階で変化させることで、流体の流れを妨げる抵抗を下げると共に、光学的にも迷光を抑制する機能も実現し、流路・光学双方の機能を高める構造としている (図14)。

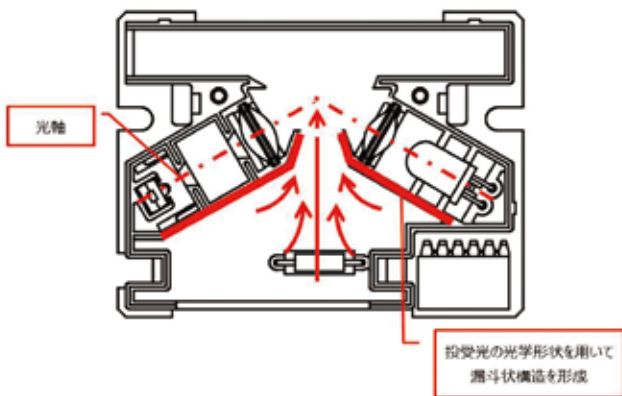


図14 光学形状の利用

本構造による検出機会増加の効果を確認するため、パーティクルカウンタを用いて粒子検出数の比較を行った。図15に示す通り、従来品に対して粒子検知数量が飛躍的に増加していることが分かる。

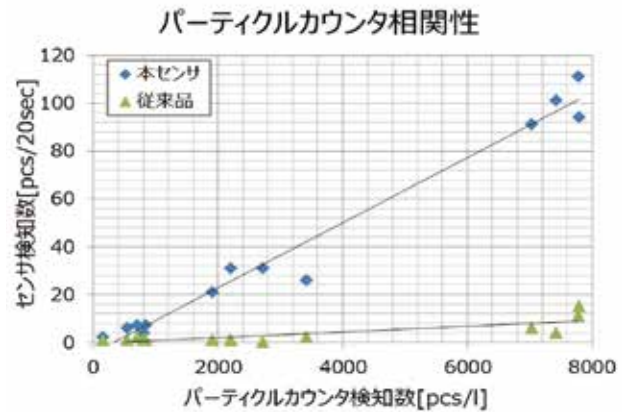


図15 粒子検知数比較

## 5. 効果

前述した2つの取り組みの効果を空気清浄機の規格 (GBT 18801-2015) に基づいて確認した結果を示す。

測定は上記規格に準じ、密閉された空間内において、たばこ煙濃度を変動させるという環境で実施し、その際の粉塵濃度計測装置に対するセンサ出力変動の相関を確認した (図16)。

その結果、タバコ煙環境下において粉塵量濃度計測装置に対するばらつきを、従来センサが $\pm 100\%$ に対して新センサは $\pm 15\%$ に低減した。

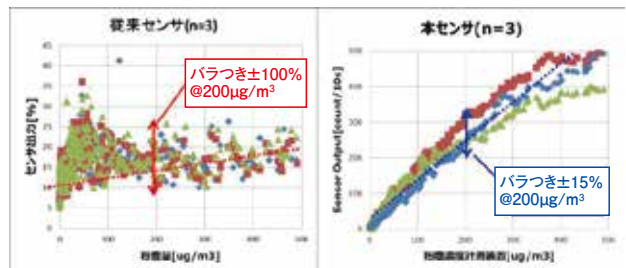


図16 タバコ検出性能比較

また、PM2.5が飛散している一般環境に対して本センサを適用した場合について確認を行った。

図17は各都道府県などが設置している大気汚染物質広域監視システム (そらまめ君) のPM2.5測定結果 (赤線) に対して、本センサの粒子検出数 (青線) の相関を確認したグラフであり、愛知県一宮市で8日間に渡って測定を行った。その結果、本センサの測定結果は赤線が示すPM2.5の増減に追従できており、相関係数0.79という相関を得ることができた。相関係数は一般的に0.6以上で相関があるとされており、十分な相関関係を示していることが分かる。

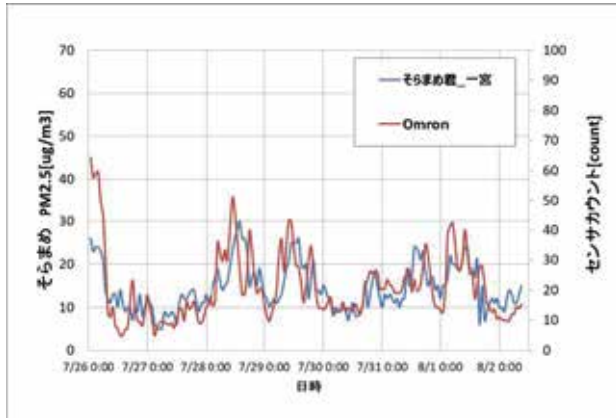


図17 そらまめ君相関検証

## 6. むすび

微小粒子検出センサとして、新たな光学形状と流路構造を組み合わせることにより、0.5  $\mu\text{m}$  までの微小粒子の検出が可能で、そして大気中測定でも従来センサに比べ非常に高い相関精度を持ったセンサを開発した。

粒子検出センサのニーズは、PM2.5への関心の高まりとともに、今回ターゲットとしている空気清浄機以外にも、エアコンや掃除機への搭載、また身近に常時モニタリングできる据え置き型端末、さらにはウェアラブル端末へと広がりを見せている。今回の開発はそのような社会ニーズに対して一つのソリューションを与えるものとなった。

今後は更なる顧客ニーズにこたえるため、上記のようにいたるところへ組込可能なさらなる小型化、また、ユーザに、より正確な情報を伝える、粉塵濃度出力機能タイプのセンサの展開を進めていきたい。

## 参考文献

- 1) 微小粒子状物質 (PM2.5) 測定法評価検討会:「大気中の微小粒子状物質 (PM2.5) の測定方法について」(2008)
- 2) 山田英巳ら:「流れ学 -流体力学と流体機械の基礎」森北出版株式会社 (2016)

## 執筆者紹介



河合 肇 Hajime Kawai

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  
センシング&モジュールアプリ事業部  
商品開発部  
専門:電気電子工学



宮本 寛之 Hiroyuki Miyamoto

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  
要素技術部  
専門:光学



広瀬 勇司 Yuji Hirose

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  
センシング&モジュールアプリ事業部  
商品開発部  
専門:光学



山村 聡 Satoshi Yamamura

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  
センシング&モジュールアプリ事業部  
商品開発部  
専門:流体力学

## 小型音響センサの高精度化開発

### MEMS センサの低ノイズ化を実現する ダンピング制御技、薄膜形成技術について

井上 匡志・内田 雄喜・石本 浩一・堀本 恭弘

音声認識やノイズキャンセリングといった音響センシングニーズが多様化するのに伴い、小型かつ高精度な音響センサが望まれている。半導体微細加工技術 (MEMS 技術) を用いたマイクロスケールの小型センサにおいては、マクロスケールでは問題にならない空気粘性に起因する自己ノイズが問題となる。このため、高精度な小型音響センサの実現には、自己ノイズ発生のメカニズム理解に基づく厳密なデバイス設計が必要であった。

今回我々は、等価回路解析によるノイズ源の特定と、ダンピング抵抗の制御設計に基づく独自構造により、センサの自己ノイズを従来比4分の1 (-6 dB相当) まで低減し、MEMS 音響センサとして世界最高レベルのSNR (Signal-to-Noise ratio) 特性となる 68 dB超を実現した。更に、プロセス安定化技術との融合により8インチウェハでの実用化に至ったので報告する。今回開発した音響センサは、小型・低ノイズ・広帯域という特徴を生かして様々な音響センシング用途への活用が期待できる。

## Study and development of low-noise MEMS acoustic sensors

### Important considerations for air damping and process stability

*Tadashi Inoue, Yuki Uchida, Koichi Ishimoto and Yasuhiro Horimoto*

Acoustic sensing technology like speech recognition or noise cancellation has attracted a lot of attention recently. These new application stimulates the demand for smaller and lower noise MEMS (micro electro-mechanical system) acoustic sensors. Micro-scale sensors are susceptible to self-noise caused by air damping. Therefore, understanding and controlling air damping is crucial for designing low noise sensors.

In this paper, we report a novel design of MEMS acoustic sensors that achieves SNR (signal-to-noise ratio) over 68 dB. We simulated dominant noise sources based on equivalent circuit analysis and introduced original structures that significantly reduce squeeze air film damping. This new design has been successfully commercialized due to matured process stability techniques of thin-film. The acoustic sensors we developed can be widely used in applications that require small-scale and precise acoustic sensing.

#### 1. はじめに

多様なセンサを多様な機器や生体に取り付けてデータを収集し、得られたデータを暮らしや産業に役立てようという機運が日に日に高まっている。その中で、小型かつ高精度なセンサデバイスへの期待は大きい。半導体プロセス技術を応用した微細加工技術である MEMS (micro electro-mechanical system) は、小型化、高精度化、低消費電力化を可能にする有効な方法であり、弊社はこれまで圧力センサやフローセンサなどを MEMS 技術で実用化してきた。センサを小型化すると一般に感度は低下しセンサ自身の

ノイズに埋もれやすくなる。 $\mu\text{m}$ スケールへ更に微細化した MEMS の場合は熱的な揺らぎの影響が大きく、いっそうノイズの影響が問題となる<sup>1)</sup>。つまり MEMS センサでは、いかに低ノイズに設計するかが重要なテーマである。

上記の事情はマイクロフォン (以下、「音響センサ」) でも同様である。近年、音声認識やノイズキャンセリングといった新たな用途へ音響センシングの活用ニーズが広がるのに伴い、音響センサにはこれまで以上に高精度化、即ち低ノイズ化が望まれている<sup>2)</sup>。

本研究では、我々は音響センサを題材として、系統的に MEMS センサの低ノイズ化に取り組んだ。センサの主要

なノイズ源を特定しその部位へ新規設計を行い、量産当初と比べて大幅にノイズを低減させることに成功した。本論文では、低ノイズ化に向けたシミュレーション、実デバイスの試作・評価によるノイズ低減効果の検証結果、およびプロセス安定化技術について報告する。

## 2. MEMS 音響センサの構成

**2.1 音響センサモジュール** 図1 にMEMS音響センサモジュールの構成を示す。音を検知するMEMSセンサチップと信号読み出し用のICチップを基板に実装し、蓋で閉じてある。図1 (a) は蓋を開封した外観写真、図1 (b) は断面模式図である。音響センサの場合、基板の音孔や蓋の内容積も音響特性を左右する重要な構成要素となる。ここでは評価用モジュール (2.95×3.76×1.25 mm) を示した。

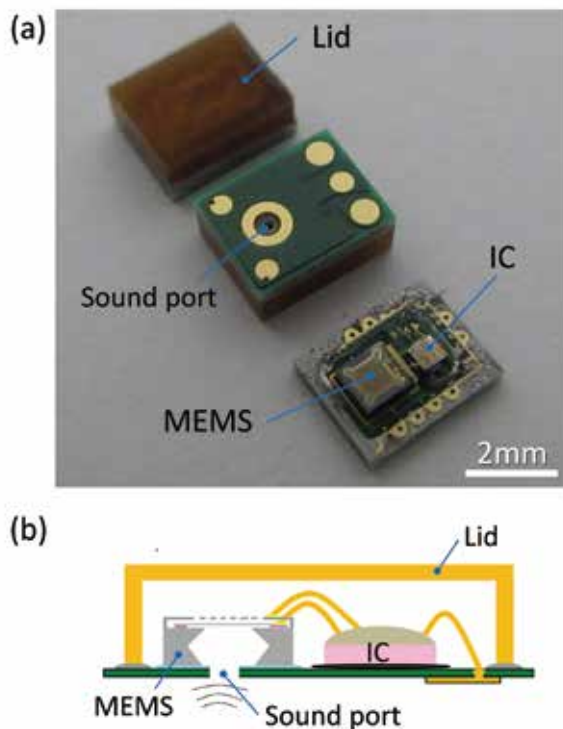


図1 (a) 音響センサモジュール外観 (b) 模式図

**2.2 MEMS 音響センサチップ** 図2 (a) に弊社従来型の静電容量型MEMS音響センサチップの構造を示す<sup>3)</sup>。多数の開口を有するバックプレート (窒化シリコン、厚さ3.5  $\mu\text{m}$ 、一辺750  $\mu\text{m}$ ) と四角形の薄いダイアフラム (ポリシリコン、厚さ0.8  $\mu\text{m}$ ) とが3–4  $\mu\text{m}$  のエアギャップを介して対向し、コンデンサを形成している。音圧によるダイアフラムの振動は、微小な容量変化として検出される。図2 (b) のSEM (scanning electron microscope) 像に示すように、MEMS技術を活用することでセンサ部は1 mm以内に収まり、メカ式的音響センサと比べて小型化が実現されている。

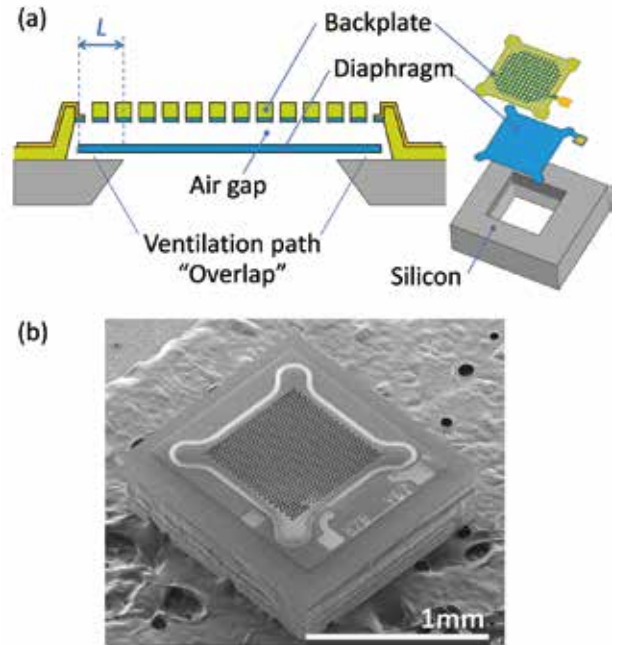


図2 (a) MEMS音響センサチップ概略図 (b) SEM像

図2 (a) の音響センサチップには、ダイアフラム外周とシリコン基板が重なる部分に、図中Lで示される狭い隙間部分がある (以下、「オーバーラップ部」と呼ぶ。高さ2.2  $\mu\text{m}$ 、 $L=60 \mu\text{m}$ )。これはダイアフラムの表側と裏側をつなぐ通気口であり、外気圧の変動による特性変化を防ぐのに必要な部位である。ただしこの隙間の開きが大きいと音の回り込みが起きて感度が低下してしまう。そのため、この隙間を空気が通過する際の音響抵抗は十分高くする必要がある。

## 3. 音響センサのノイズ源

**3.1 小型センサにおけるノイズ問題** 音響センサに限らず、外部からのあらゆる入力を遮断しても起動中のセンサモジュール内部から発せられる信号を自己ノイズと呼ぶ。自己ノイズは検知可能な最小限界を決めるため低いのが望ましい。センサが小さくなると、自己ノイズの大きさがますます問題となる。これは下記の3つの理由による。

- (1)  $\mu\text{m}$ スケール特有のノイズ機構の存在：次節参照。
- (2) 低感度によるICノイズとのバランス悪化：センシング面積が小さいと感度は下がり、IC起因の電氣的ノイズ (ジョンソン雑音やフリッカー雑音) に埋もれやすい。
- (3) 小容積起因のノイズ：音響センサの場合、パッケージ容積が小さくなるほど低音域のノイズが増す。

従って設計時はこれら各ノイズの影響を考慮する必要がある。3番目の容積は顧客要望から決まり、2番目はセンサ用の低ノイズICの開発が鍵を握る。本研究では、(1)のMEMSチップの自己ノイズ低減に取り組んだ。

**3.2  $\mu\text{m}$ スケール特有のノイズ源**  $\mu\text{m}$ スケールの構造体は、粘性の影響を受けて動きにくくなる<sup>4)</sup>。固定板に対

し数 $\mu\text{m}$ の狭い距離を隔てて面に垂直に振動する板には、振動を妨げる抵抗力が働く。この現象はスクイーズフィルムダンピングと呼ばれ、図3 (a) に示すように板に挟まれた薄い流体層が壁面に沿って板外・板内へ押し出される際の流体の粘性に起因する。この抵抗力は板間隔の3乗に反比例するため、 $\mu\text{m}$ スケールでは非常に大きくなる<sup>5)</sup>。このダンピング抵抗がMEMSデバイスの大きなノイズ源になる。なぜなら上記の抵抗力が熱雑音となってダイアフラムを揺らし自己ノイズとなるからである。熱雑音とは空気や構造体の熱的な揺らぎであり、揺らぎの大きさは抵抗力の平方根に比例する<sup>1)</sup>。図2のMEMS音響センサにも、上記のスクイーズフィルムダンピングを伴う部位がオーバーラップ部とエアギャップ部に存在する。

上記ダンピング抵抗を低減するには、図3 (b) のように固定板あるいは可動板に複数の貫通開口を設ける方策が一般的に用いられる<sup>5)</sup>。ただし過度に穴を開けると感度低下を引き起こすため、注意が必要である。

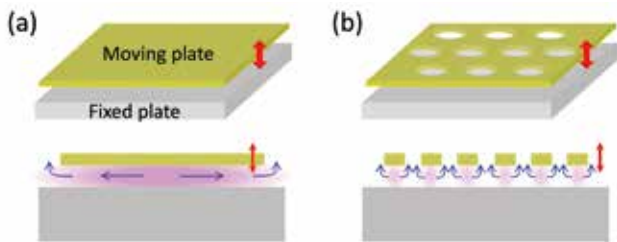


図3 スクイーズフィルムダンピング (a)穴無し (b)穴有り

**3.3 等価回路モデルを用いたノイズ解析** センサの特性設計には、等価回路モデルを用いた解析が有効なことが知られている<sup>6)</sup>。図4は、図1の音響センサモジュールを音響-電気等価回路で表現したものである。音孔から入った音圧が各MEMS構造に対応する素子とICを経て電気信号へ変換される様子を表している。2.2節で触れたオーバーラップ部は、2か所の抵抗素子  $R_d$ ,  $R_{vh}$  で表されている。この等価回路から、回路シミュレータを用いてIC起因のノイズとMEMSおよびパッケージ構造に起因するノイズの両方を加味してモジュール全体の自己ノイズを予測することができる。計算方法の詳細は以前の報告<sup>7)</sup>を参照されたい。

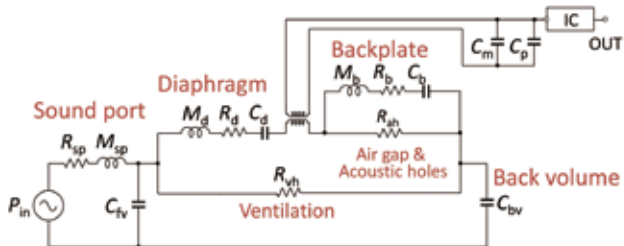


図4 音響-電気等価回路モデル

図5 (a) にシミュレーションで求めた弊社の従来型音響

センサのノイズ密度スペクトルを実験結果と共に示す。計算結果は実測のスペクトル形状をよく再現している。また聴感上重要な中音域 (100 Hz–10k Hz) では、IC起因のノイズよりMEMS起因のノイズが支配的なことがわかる。MEMSのノイズを更に等価回路中の抵抗成分ごとに分解した様子を図5 (b) に示す。図5 (b) はノイズのパワースペクトルで、人の聴感を反映した重み付け (A-weight) を施してある。各グラフの面積がノイズパワーに相当する。これより、モジュール全体のノイズのうち大半がMEMS起因で (ノイズ全体の92%)、そのうちオーバーラップ部のダンピング抵抗  $R_d$  の寄与が圧倒的に大きく (全体の80%)、次いでエアギャップ部のダンピング抵抗  $R_{ag}$  (全体の11%) が大きく、残りの寄与はほぼ無視できることがわかる。

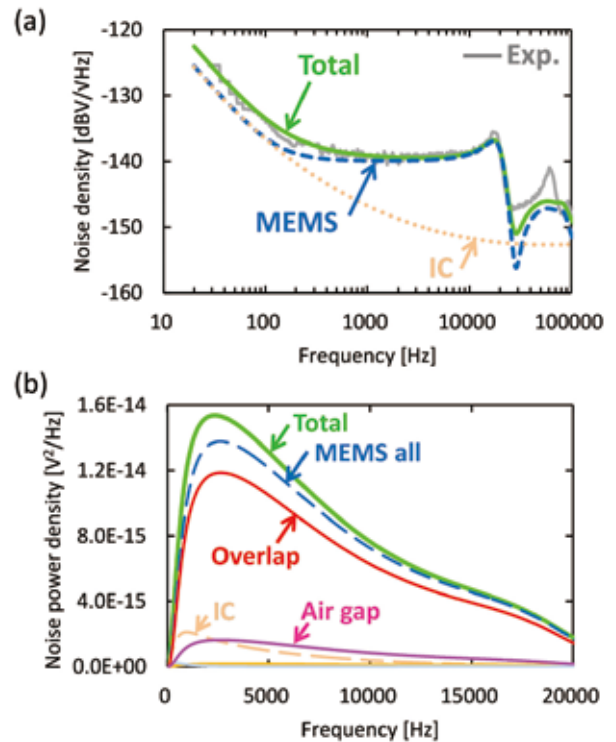


図5 ノイズ計算結果 (a)ノイズ密度 (b)パワースペクトル

**3.4 ノイズ低減の方針** ノイズ要因を分解したことで、どの部位から優先してノイズ低減に注力すれば良いかが明確になった。MEMS音響センサでは、狭い隙間部分のダンピング抵抗が自己ノイズの主要因であり、以下でその低減について述べる。まずオーバーラップ部のダンピング、次にエアギャップ部のダンピングの低減に取り組む。

**4. 低ノイズ新規構造の提案**

**4.1 スリットダイアフラム構造** 3.3節で述べたようにオーバーラップ部はノイズの主要発生源と考えられる。しかしオーバーラップ部は気圧変化の影響緩和に必要な構造であり容易に無くすることができない。そこで我々は図6 (a)

に示す新たなダイアフラムの構造を考案した<sup>7)</sup>。ダイアフラムの周囲が細いスリットで区切られ、スリットで囲まれた内側のダイアフラムのみが音圧を受けて振動する。本構造のメリットはまず、振動するダイアフラムに対向する位置にシリコン基板が無い場合、ダイアフラムと基板の間のダンピングを完全に取り除けることである（即ちRdがゼロ）。しかも、スリット部分がダイアフラムの表と裏をつなぐ通気口の役目を果たし、スリット幅を狭く設計すれば高い音響抵抗を保つことができる。

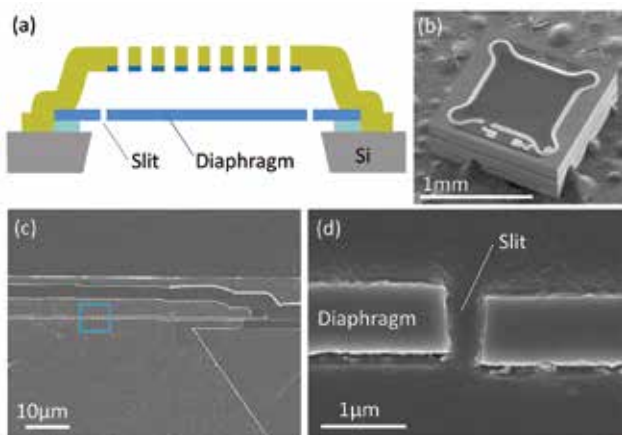


図6 (a)スリットダイアフラム構造の概念図  
(b)-(d) 試作したMEMSチップのSEM像

図6(b) - (d) に作製したスリットダイアフラム構造のSEM像を示す<sup>7)</sup>。断面像よりダイアフラムが幅 $0.5\ \mu\text{m}$ のスリットで区切られているのが確認できる。このスリット構造を実用化するには、ダイアフラムの反りの安定性が肝となる。一辺 $700\ \mu\text{m}$ のダイアフラムに対してスリットが上下に $1\ \mu\text{m}$ 以上ずれると、一気に通気口が広がり、低音域での感度が低下してしまうからである。従ってダイアフラムを形成するポリシリコン薄膜の精密な応力制御が求められる。ポリシリコン成膜温度、続くイオン打ち込み及びアニール温度等のキーパラメータを管理することで<sup>8)</sup>、8インチウェハ面内でダイアフラムの反りを $\pm 0.5\ \mu\text{m}$ 以内に安定して収めることに成功している。

**4.2 狭ピッチホール配置** 最大のノイズ源であるオーバーラップ部を除去した場合、次に支配的なのはエアギャップ部のダンピング抵抗である。図3(b)のようなハニカム状の規則的開口パターンを持つ穴あき板と固定板の間のダンピング抵抗は、近年よく研究されており幾つかの解析式が提案されている<sup>9) 10)</sup>。ここではVeijolaの理論式<sup>10)</sup>を用いて様々な直径 $d$ とピッチ $p$ の組み合わせについてダンピング抵抗を計算した。バックプレートの開口比率が高いほどダンピング抵抗は下がるが、過度に開口をあけるとセンシング面積が減って感度が落ち逆にSNR (Signal-to-Noise ratio, 信号対雑音比) が悪化する。そこで各径・ピッチについて、感度とダンピング抵抗の両方の変化を加味してモジュールSNRを計算したのが図7である<sup>11)</sup>。弊社従来品(径

$17\ \mu\text{m}$ , ピッチ $24\ \mu\text{m}$ ) より白点線領域の配置とすれば更にSNRを向上できることが分かった。

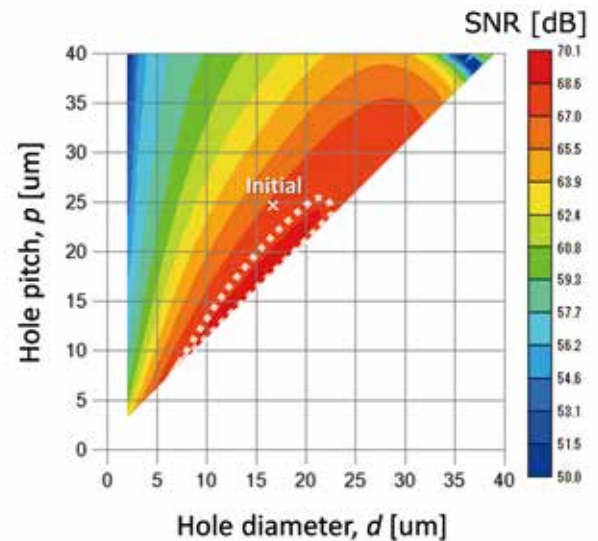


図7 モジュールSNR計算結果

そこでバックプレートの開口配置を図7の白点線領域の径・ピッチとしたセンサチップを作製した。表1に開口配置の一覧を示す。前節のスリットダイアフラム構造はいずれにも適用し、バックプレートの開口配置のみを変更した。作成したバックプレートを上から見た像を表1に示す<sup>11)</sup>。従来品と比べ、隣接する開口の間にバックプレートが残る幅 $p-d$ は狭い。このような狭ピッチの開口配置を実現するには、開口を形成するエッチングプロセスの安定化が肝となる。壁面の傾斜角が垂直に近づくようフォトリソグラフィとエッチングの条件を制御することで、残存幅が $3\ \mu\text{m}$ 以下の狭ピッチであっても8インチウェハ面内のばらつきを低く抑えられている。

表1 試作したバックプレートの開口配置一覧、顕微鏡・SEM像

Chip ID	Initial	A	B	C
Diameter, $d$ [ $\mu\text{m}$ ]	17	11.5	11.5	14.5
Pitch, $p$ [ $\mu\text{m}$ ]	24	15.5	14.5	16.5
$p-d$ [ $\mu\text{m}$ ]	7	4	3	2
Perforation ratio	0.46	0.50	0.57	0.70
Microscope image				
SEM image				

## 5. ノイズ低減効果の検証

**5.1 測定方法** 4章で述べた新構造を導入したMEMSチップを、弊社製ICと共に図1と同様の評価用モジュールに実装した。さらに防音箱内で $1\ \text{Pa}$ の音圧に対する感度、

および無音時のノイズ測定を行った。狭ピッチ開口の評価には図1 (a) よりも更に小型の外寸 2.65×3.50×0.98 mm のパッケージを用いた。計測にはオーディオアナライザ (Audio Precision, SYS2722) を用いた。またMEMS起因とIC起因のノイズの切り分けのため、MEMSと同容量のチップコンデンサにおき替えた場合のノイズも測定した。

**5.2 評価結果** 図8にスリットダイアフラム構造の効果を調べたノイズスペクトル測定結果を示す<sup>7)</sup>。従来品 (オーバーラップ長60 μm) と比べ、オーバーラップが短くなるにつれて1 k-10 kHz 付近のノイズフロアが下がり、スリット構造を適用すると更に低いノイズフロアとなった。これは中音域の主要ノイズ源がオーバーラップ部の抵抗であるとした3.3節のノイズ予測と合致する。スリット構造を適用することで自己ノイズが大幅に低減され、モジュールのSNRが従来品の62 dBから66 dB超へ向上することが確認できた。なお結果のみを述べるが、スリット幅を狭く取ったことで従来品より低音域 (<20 Hz) まで感度低下のない帯域が広がり、周波数特性の広帯域化にも有効なことが確認できた<sup>7)</sup>。

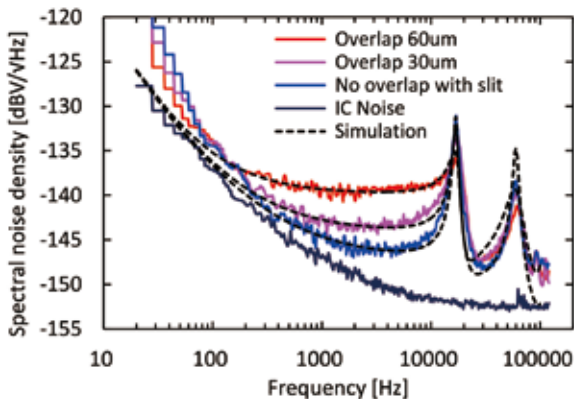


図8 スリット適用前後のノイズスペクトル測定結果

次に、4.2節で述べたバックプレートの開口配置を変更した音響センサのノイズスペクトルを図9に示す<sup>11)</sup>。従来配置と比べてA-Cのいずれにおいても1 kHz-10 kHz 付近のノイズフロアが低減し、しかも開口率が高いほどノイズが下がるのがわかる。これはオーバーラップ部を取り除いた後の主要なノイズ源はエアギャップ部であるという3.3節のノイズ分解の結果と合致する。図9の挿入図に示すように、エアギャップ部のダンピング抵抗は理論計算値と良い相関が得られた。表2に作製モジュールの感度・ノイズ・SNRの測定結果をまとめた。モジュールのSNRは、A-Cいずれにおいても従来の開口配置より1.0 dB以上向上し68.5 dB前後が得られた。バックプレートの開口比率を高めると感度が低下するが、A-Cではノイズ低減効果が優勢となりSNRの向上につながったと言える<sup>11)</sup>。なおバックプレートの機械強度との両立を鑑み、最終的にはBの開口配置を選択した。

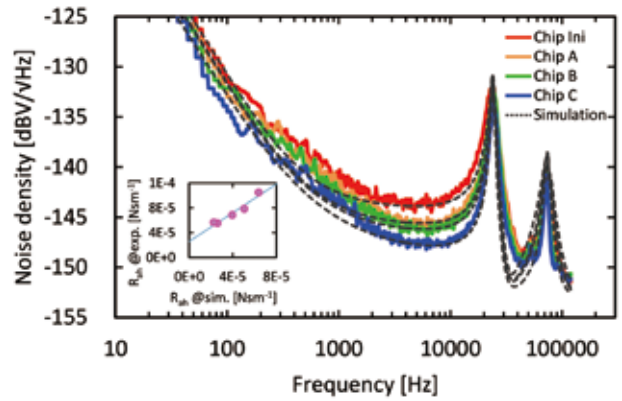


図9 開口パターン変更時のノイズスペクトル測定結果 (挿入図)エアギャップ部抵抗の計算値と実測値の比較

表2 開口配置を変更したモジュールの感度・ノイズ・SNR

Chip ID	Initial	A	B	C
Perforation ratio	0.46	0.50	0.57	0.70
Module sensitivity [dBV]	-34.8	-35.8	-36.1	-38.0
Module noise [dBV]	-102.1	-104.1	-104.6	-106.3
Module SNR [dB]	67.3	68.3	68.5	68.3

**5.3 ノイズ低減効果のまとめ** 前節に示したように、スリットダイアフラム構造を導入し、更にバックプレートの開口配置を最適化することによって、音響センサの自己ノイズを当初の1/4 (-6 dB相当) に低減させることができた。

## 6. 結論

MEMS音響センサの主要ノイズ源を抑制する新構造を導入し、小型で高性能な音響センサを実現した。センサの自己ノイズを従来品より6 dB低減し、MEMS音響センサとして2018年現在世界最高クラスのSNR 68 dBを達成した。ノイズが6 dB低いことは、センサと音源の距離を2倍に離しても信号品質を維持できることを意味し、明瞭な音響データを得たい場合に好都合である。今回開発した音響センサは、モバイル機器のみならず、小型・低ノイズ・広帯域という特徴を生かし、機器の異常検知や生体音検出といった新たな音響センシング用途への活用が期待される。

また等価回路モデルを用いてノイズ源を定量的に分解し、見通し良く低ノイズ化を進めていく手法は、音響センサ以外にも広く展開できる。特にエアダンピングの制御はμmオーダの駆動部を持つデバイスが共通して直面する課題であり、他のMEMS設計時の参考になると考える。

最後に、今回導入した新規構造 (スリットダイアフラム構造、狭ピッチ開口配置) の実用化は、ポリシリコン薄膜の応力制御やエッチングの面内安定性といった生産技術の成熟の賜物である。本開発の取り組みは、MEMSデバイスにおいて、いかに設計技術とプロセス技術との連携が重要かを示す好事例と言える。



## 謝辞

本開発は、ウェハ試作や工程改善にご協力頂いた太田貴文氏、梶川健太氏をはじめ野洲工場の皆様、パッケージ実装にご協力頂いた開発3課の淵本隆氏、形切拓哉氏、SEM観察にご協力頂いた品質保証部の皆様、そして日々有益な意見を下さったマイクロフォン開発メンバ等多くの方々のサポートを得て実施されました。皆様にこの場を借りて感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) T. B. Gabrielson: "Mechanical-thermal noise in micromachined acoustic and vibration sensors", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 40, pp. 903-909 (1993) .
- 2) M. Boustany and J. Bouchaud: "Adoption of high-quality microphones promises revenue growth", IHS technology's report (2014) .
- 3) T. Kasai, Y. Tsurukame, T. Takahashi, F. Sato, and S. Horiike: "Small silicon condenser microphone improved with a backchamber with concave lateral sides", in Digest Tech. Papers Transducers 2007 Conference, pp. 2613-2616 (2007) .
- 4) S. D. Senturia: Microsystem Design, Kluwer Academic Publishers (2001) .
- 5) Z. Škvor: "On the acoustical resistance due to viscous losses in air gap of electrostatic transducers", Acoustica, Vol. 19, pp. 295-299 (1967) .
- 6) S. C. Thompson, J. L. LoPresti, E. M. Ring, H. G. Nepomuceno, J. J. Beard, W. J. Ballad, and E. V. Carlson: "Noise in miniature microphones", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 111, pp. 861-866 (2002) .
- 7) 井上匡志, 村上歩, 堀本恭弘, 内田雄喜, 笠井隆: 「等価回路解析を利用した高SNR・広帯域マイクロフォンの設計」, 第8回集積化MEMSシンポジウム論文集, 26am1-D-1 (2016) .
- 8) Tomohiro Yoshimura: "Predictive Control by Whole Process PLS Model in MEMS Fabrication", AEC/APC Symposium Asia 2015, MC-O-23 (2015) .
- 9) M. Bao, H. Yang, Y. Sun, and P. J. French: "Modified Reynolds equation and analytical analysis of squeeze film air damping of perforated structures", J. Micromech. Microeng., Vol. 13, pp. 795-800 (2003) .
- 10) T. Veijola: "Analytic damping model for an MEM perforation cell", Microfluidics and Nanofluidics, Vol.2, pp. 249-260 (2006) .
- 11) 井上匡志, 内田雄喜, 石本浩一, 堀本恭弘: 「スクイーズフィルムダンピング抵抗の制御によるMEMSマイクロフォンの高SNR化」, 第34回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム論文集, 01am1-A-4 (2017) .

## 執筆者紹介



井上 匡志 Tadashi Inoue  
事業開発本部 MEMS開発生産センタ  
技術開発部  
専門: 半導体工学、MEMSデバイス設計  
所属学会: 電気学会、応用物理学会



内田 雄喜 Yuki Uchida  
事業開発本部 MEMS開発生産センタ  
技術開発部  
専門: 機械工学、MEMSデバイス設計  
所属学会: 応用物理学会



石本 浩一 Koichi Ishimoto  
事業開発本部 MEMS開発生産センタ  
技術開発部  
専門: 半導体工学、半導体プロセス技術



堀本 恭弘 Yasuhiro Horimoto  
事業開発本部 MEMS開発生産センタ  
技術開発部  
専門: 機械工学、MEMSデバイス設計

# 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><b>累積勾配方向特徴量を用いた テクスチャレス物体検出</b></p> <p>小西嘉典（技術・知財本部 センシング研究開発センタ 画像センシング研究室）、井尻善久（技術・知財本部 知能システム研究開発センタ）、川出雅人（技術・知財本部 センシング研究開発センタ）、橋本学（中京大学 工学部）</p> <p>電子情報通信学会論文誌 D (Web)、2016年、一般社団法人 電子情報通信学会、Vol.J99-D、No.8、p.689-698 (WEB ONLY)、邦文</p>	<p>テクスチャの少ない物体にも適用可能な物体検出手法として、輝度勾配方向特徴量を用いたテンプレートマッチングが提案されてきた。しかし勾配方向を照合条件として用いることで複雑背景下においても高精度な照合が可能である一方、対象物体自身の見えがわずかに変化した場合には照合スコアが大きく低下してしまうという課題があった。そこで本研究では、物体の姿勢変動による見えの変化を考慮した累積勾配方向特徴量を提案する。提案手法ではまず、一定範囲内でランダムに発生させた平行移動、回転角度、スケールパラメータを用い、1枚のモデル画像に対して幾何学的変換を適用して多数の画像を生成する。次に各画像において算出した量子化勾配方向特徴量を用いて画素ごとに勾配方向ヒストグラムを作成し、頻度の大きい勾配方向のみを用いて特徴量を抽出した。実際の画像に対して照合処理を行い、提案手法が対象物体と背景を識別する性能を維持したまま物体自身の見えの変動を許容できることを確認した。またテクスチャレス物体の公開画像データセットを用いた物体検出の実験を行い、提案手法が検出正確性及び処理速度において既存手法を上回ることを示した。</p>
<p><b>フィジカル・システムと連動した 生産設備シミュレーション (設備シミュレーションを構築するための コンポーネント標準化の提案)</b></p> <p>Manufacturing facility simulation linked with physical system (A proposal for standardization of components to construct facility simulation)</p> <p>森健一郎（インダストリアルオートメーションビジネスカンパニー 技術開発本部 第2技術部）</p> <p>日本機械学会論文集 (Web)、2016年、一般社団法人 日本機械学会、Vol.82、No.835、p.15-00476 (J-STAGE)、邦文</p>	<p>フィジカル・システムと連動した生産設備シミュレーションの構成とその効率的な実現のためにコンポーネント構造のモデル標準化を提案する。これまで設備シミュレーションによって、生産準備と工程実装での活動が改善されてきた。本論文で提案するモデルは、機構および制御のデジタルデータによるコンポーネントから構成される。フィジカル・システムのコントローラと設備・制御モデルを標準通信ネットワークによって連動する構成により、設備シミュレーションを実施する。自動車組立工程における適用事例において、設備シミュレーション連動は、事前検証による開発期間短縮やコスト削減などに効果があり有効な方法であることを示す。</p>
<p><b>IoTとヘルスケアデバイス (ウェアラブルデバイスと環境センサ)</b></p> <p>湯上勝行（エレクトロニクス&amp;メカニカルコンポーネントビジネスカンパニー 生産統轄本部 グローバル生産センタ センシング&amp;モジュール工場）、河野好映（事業開発本部 MEMS開発生産センタ）</p> <p>繊維機械学会誌、2017年、一般社団法人 日本繊維機械学会、Vol.70、No.1、p36-42、邦文</p>	<p>少子高齢化という社会変化の中において、その抜本策が十分に且つ具体的に打てていない現状では、人間が健康で長く働き続けるための策を打つことが中期的には非常に重要であり、そのためにはバイタル情報（血圧、体温、脈拍）を採取し、その状況に応じて医師に相談しながら対処していくことが必要と考えている。しかしながら、より正しい医療に繋げていくには、バイタル情報が得られたその時の周囲環境（環境センサの活用として）を関連させることや、人に負担感のない常時計測の早期実用化が急務と考える。本稿ではそれらの研究状況をいくつかの事例を示しながら述べた。</p>
<p><b>サーモパイル赤外線センサを用いた 人感センサ</b></p> <p>The human detection sensor using thermopile infrared sensor</p> <p>片岡朋宏（エレクトロニクス&amp;メカニカルコンポーネントビジネスカンパニー 事業統轄本部 センシング&amp;モジュールアプリ事業部 MEMSセンサ事業推進部 先行技術課）</p> <p>日本赤外線学会誌、2017年、一般社団法人 日本赤外線学会、Vol.26、No.2、p.27-31、邦文</p>	<p>快適性と省エネルギーを両立するオフィス環境の実現手段として、人感センサが期待されている。その人感センサには、高感度なセンサ性能に加えて、人検出アルゴリズムの搭載やネットワークシステムとの連携が求められる。本稿では、オフィス向け人感センサ技術の一例を通して、ネットワークシステム向けの赤外線センサに必要とされる機能や技術について述べる。</p>

論文名・執筆者(所属)・掲載誌	抄 録
<p><b>人と技術との新たな融和 ～新たなセンシング・インタフェースによる 心豊かな社会に向けて～卓球ラリーロボッ ト～人と機械の融和を目指して～</b> 山田圭佑(技術・知財本部 企画室 戦略推進課) 電気学会誌、2017年、一般社団法人 電気学会、 Vol.137、No.2、p81-84、邦文</p>	<p>オムロンが卓球ロボットの開発に取り組む理由や、卓球ロボット実現のために搭載している技術や機能などを紹介した。人と機械の関係性は、かつての人の作業を機械に担わせる「代替」から、機械が人の目的に合わせる「協調」に、さらに、機械が人の判断を支援することで人がより創造的な活動を行える「融和」へと進化すると考えている。これまで「人と機械の協働」、および「人と機械の融和」を表現した卓球ロボットの開発に取り組んできたが、これらは専用機器ではなく、汎用機器の組み合わせにより構成されていること、実現に必要な技術として、ボールの軌跡を予測する画像センシング技術や人の技能をレベル判定するAI技術を中心に解説した。</p>
<p><b>オムロンにおける920MHz帯無線通信 およびWi-SUNに関する取り組み</b> OMRON's Activity on 920MHz Wireless Communication and Wi-SUN 山田亮太(イノベーション推進本部 オープンイノベ ーション推進室) 電子情報通信学会技術研究報告、2017年、一般 社団法人 電子情報通信学会、Vol.116、No.481 (SRW2016 68-104)、邦文</p>	<p>920MHz帯無線通信は、センサネットワークでの利用を想定した場合、データレート/消費電力/通信範囲のバランスに優れている。本発表では、920MHz帯無線通信の応用事例として、FEMS (Factory Energy Management System)、橋梁モニタリング、そして、環境センサに関する取り組みについて、それぞれ紹介する。また、920MHz帯を含むSub-GHz帯を用いた無線通信規格Wi-SUNのうち、電池駆動のセンサなどを想定したWi-SUN RLMM (Resource Limited Monitoring and Management) 仕様に関する取り組みについても、併せて紹介する。</p>
<p><b>階層的姿勢探索木を用いた単眼カメラからの 高速3次元物体位置姿勢認識</b> 小西嘉典、半澤雄希(技術・知財本部 センシング 研究開発センタ 画像センシング研究室)、川出雅 人(技術・知財本部 センシング研究開発センタ)、 橋本学(中京大学 工学部) 電子情報通信学会論文誌 D (Web)、2017年、 一般社団法人 電子情報通信学会、 Vol.J100-D、No.8、邦文</p>	<p>単眼カメラ画像からテクスチャレス物体の3次元位置姿勢を高速に認識する手法として、テンプレートマッチングに基づく手法がこれまで多く提案されてきた。しかし認識対象となる3次元姿勢範囲が広い場合に、照合に用いるテンプレートの数が膨大になり処理速度が低下するという課題があった。この課題に対して本研究では、透視投影に基づく累積勾配方向特徴量(PCOF)と階層的姿勢探索木(HPT)の二つの手法を提案する。PCOFは対象物体の3次元CADを様々な視点から見た2次元投影画像を用いて特徴抽出を行っており、3次元姿勢変化による対象物体の見えの変化に対する許容性と複雑背景に対する頑健性とを兼ね備えている。HPTは各視点において作成された大量のテンプレートに対して、類似度に基づいたクラスタリングとテンプレートの低解像度化を行うことで構築されており、数万個の3次元姿勢候補の中から高速に絞り込み探索を行うことが可能である。9種類の金属部品を様々な方向から撮影したデータセットを用いて評価実験を行い、PCOFとHPTを組み合わせた提案手法が3次元物体位置姿勢認識の高速性・正確性両面において既存手法を上回ることを確認した。</p>
<p><b>FA現場の無線通信のための 電波干渉除去技術</b> Interference cancellation techniques for wireless communication in factory automation NGUYEN Manh Tai、上山勇樹、村井彬人(技術・ 知財本部 組込システム研究開発センタ 無線・組 込研究室)ほか、山田寛喜(新潟大学工学部) 電子情報通信学会技術研究報告、2017年、一般 社団法人 電子情報通信学会、Vol.117、No.181 (AP2017 68-87)、p.81-86、邦文</p>	<p>生産(Factory Automation, FA)現場向けの無線通信の信頼性向上のために、アダプティブアレイアンテナによる電波干渉除去手法を実機実装・評価を行った。本研究では、アンテナの素子数以上の干渉波数に対しても干渉除去効果が期待できる電力最小化法を用いた。干渉波のみが入力される状態でアレイ出力が最小になるように重みを生成しておき、干渉波と所望波が混在した入力にその重みを適用して干渉波を除去し、所望波抽出するように通信手順に干渉除去処理を組み込んだ。FA現場よりも厳しい反射条件を持つシールドルーム内での評価結果では、3アンテナを用いて干渉機3台からの干渉波を除去し、SIRを25dB以上に向上することを確認できた。</p>



本誌掲載の論文はインターネットでもご覧いただけます。

**OMRON TECHNICS web サイト**

[https://www.omron.co.jp/technology/r\\_d/omrontechnics/](https://www.omron.co.jp/technology/r_d/omrontechnics/)



## OMRON TECHNICS 非売品

第50巻 第1号  
通巻161号 (年1回発行)  
(禁無断転載)  
ISSN 0474-1315

編集兼発行人 宮田 喜一郎  
発行 オムロン株式会社 技術・知財本部  
〒619-0238 京都府木津川市木津川台9-1  
電話 0774-74-2000 (代)

2018年5月10日 発行

Published by OMRON Corporation  
9-1, Kizugawadai, Kizugawa-city,  
Kyoto, 619-0238 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 2018 All Rights Reserved.

R

OMRON

OMRON 161  
Vol.50 No.1  
2018  
TECHNICS®

