

技術功績

(1) ロボットシステムインテグレーションの  
技術と科学の研究



川村 貞夫\*

受賞者は、ロボットの機構（ハード）と制御（ソフト）の両方の特徴を考慮したシステムインテグレーション（SI）技術とその科学について以下の成果を得た。

制御では、対象物、環境、ロボットの情報が正確に計測される理想状態を仮定せず、不明な情報が存在する場合にもシステム全体として高性能性となる以下の2つのSI技術を開発した。

(1) 繰り返し運動に基づくフィードフォワード制御

環境やロボットの特性が未知でもロボットの繰り返し運動から高速で高精度な運動を生み出すフィードフォワード入力形成法を提案した。

(2) キャリブレーション不要のビジュアルフィードバック制御

従来の座標変換を繰り返すビジュアルフィードバック制御では、システム構築の手間が現場の負担であり、位置精度が一定以上に高められない欠点があった。受賞者は絶対（固定）座標系を利用せず、目標位置とロボット位置の相対誤差のみを利用する制御法を開発した。この方式の有用性を数理モデルに基づいて科学的に説明している。さらに、大学発スタートアップ(チトセロボティクス)が本技術の社会実装を進めている。

機構と制御の特徴を統合して高機能なシステムを開発した例は以下の2つに示される。

(1) 柔軟/軽量/高速/省エネロボットシステム構築

柔軟化/軽量化：空気圧駆動の高次非線形ダイナミクスに適したフィードバック制御法を提案し、有用性を数学的に証明した。プラスチックシートによるインフレータブル構造ロボットを開発し、500g自重の4自由度ロボットアームが1kgの対象物を可搬できることを示した。

高速化：パラレルワイヤ駆動によって、60W程度の小型モータによって、ハンド部に40Gを超える加速度を実現した。

(2) 水中でのハンドリングが可能なロボットシステム開発と実用

船底調査：浮心移動機構によりロボットの姿勢を変化させて、任意の姿勢で船底に接触する水中ロボットを開発し、船底の付着生物の分析などを実現した。

泥サンプル回収：完全密封の柱状採泥管を搭載した自律水中ロボットを開発して、琵琶湖の泥のサンプル回収を実現した。

水中考古学調査：琵琶湖葛籠尾崎遺跡に開発した水中ロボットを利用して、湖底水深70m付近から須恵器（奈良時代から平安時代と推定）などを発見した。

ダム点検：堤体への押し付け力増加のために、ベルヌーイ効果を利用する負圧効果板を有する水中ロボットを開発した。宮ヶ瀬ダムで有用性を実証した。

\* フェロー、立命館大学 立命館グローバル・イノベーション研究機構 (〒525-8577 草津市野路東1-1-1) (株)チトセロボティクス (〒112-0002 東京都文京区小石川2丁目1-1 ユニオン小石川第2ビル7階)

技術功績

(2) 群ロボットとロボットビジョン  
並びにサービスロボットの研究



倉爪 亮\*

受賞者は、群ロボット、ロボットビジョン、サービスロボット、介護福祉機器、XRシステムなどの幅広い分野で多くの研究実績を有する。

群ロボットに関しては、複数移動ロボットの相互観測を基本とする高精度位置同定手法「協調ポジショニング法」を世界で初めて提案し、その後、本手法をもとに複数ロボットによる位置同定Cooperative Localization分野が創成された。ロボットビジョンに関しては、3次元レーザ計測に基づく文化遺産の保存プロジェクトへの参画に始まり、レーザ計測の高精度化、画像や点群を用いた歩容認証、拡張現実技術を用いた認知症介護支援など、様々なビジョン関連技術の開発と実用化を推進した。特に拡張現実を用いた認知症ケア教育システム HEARTS (HumanitUE AR Training System) は、多くの介護系教育施設への導入実績があり、優しい認知症ケア技法として知られるユマニチュード®の普及に貢献した。サービスロボットに関しては、ロボット周囲の環境を分散センサシステムで高度化する環境情報構造化の概念を押し進め、ROS/ROS2-TMSやBig Sensor Boxなどのソフトウェア、ハードウェアプラットフォームの開発、公開を通して、情報構造化環境におけるロボットサービスの実現に大きく貢献した。近年では本概念を土木建設分野に拡張し、土工現場における環境情報構造化ソフトウェアプラットフォームROS2-TMS for Constructionを開発、公開するなど、土工の自動化に貢献した。

加えて、ロボットシステムの構築を容易にするロボット開発の世界標準フレームワークROS (Robot Operating System) にいち早く注目し、これまでに複数の解説書を発表した。このうち2015年に発表した「詳説 ROSロボットプログラミング—導入からSLAM・Gazebo・MoveItまで—」はWebで無償公開され、延べ18694回のダウンロード実績があった。また、2018年に発行した「ROSロボットプログラミングバイブル」は、これまでに6000部以上が販売され、我が国でのROSの普及に大きく貢献した。これらの功績により、2019年に日本機械学会教育賞を受賞した。

\* フェロー、九州大学大学院システム情報科学研究科情報理工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

技術功績

(3) 家庭用CO<sub>2</sub>冷媒ヒートポンプ給湯機  
エコキュートの開発と普及



齋川 路之\*

受賞者は、給湯分野の省エネルギーを目指し、ヒートポンプの研究開発に従事してきた。まず、高効率化を狙える2段圧縮式カスケード加熱給湯ヒートポンプを考案、メーカーなどと共同で機器開発を実施した。しかしながら、家庭用については、効率や価格面の課題から、業務用については、期待された効率は達成できなかったもののフロン問題から、商品化を断念した。当時、オゾン層を破壊するフロン系の冷媒は使えなくなる状況にあり、ヨーロッパでは、「化学合成品のフロン系ではなく、自然界にもともと存在し以前使われていた冷媒、自然冷媒を今の技術で見直すほうがよい」という考えが主流になっていた。そこで受賞者は、自然冷媒の中でも、毒性、可燃性もなくユニークな特徴をもつCO<sub>2</sub>に着目し、基礎実験ループを設置して研究を開始、その結果、CO<sub>2</sub>は冷媒として十分使えることが分かった。さらにCO<sub>2</sub>を超臨界圧状態で使用することで、温度上昇幅が大きい水の加熱において、熱交換温度差を小さくできるため、他の冷媒に比べて、理論的に最も高い成績係数（COP：熱出力／圧縮動力）が得られることを明らかにした。なお、前述の2段圧縮式は、圧縮を2段とすることで2つの凝縮圧力をつくり、それぞれの凝縮温度で水と熱交換を行うことで温度レベルに応じた加熱を実現できるため、CO<sub>2</sub>ほどではないが、COPは高くなる。

CO<sub>2</sub>が冷媒として使えそうなこと、給湯には有望であることがほぼ分かった1998年10月、家庭用の省エネ機器開発を探索していた東京電力、CO<sub>2</sub>冷媒カーエアコンの開発を進めていたデンソー、受賞者が所属していた電力中央研究所は、家庭用CO<sub>2</sub>冷媒ヒートポンプ給湯機の共同開発を開始した。課題であった給湯ヒートポンプの高効率運転制御方法に関しては、受賞者が2段圧縮式の開発過程で得た知見を活かし、3者共同で出願・登録した特許が、2010年7月、恩賜発明賞を受賞した。

2001年5月、家庭用CO<sub>2</sub>ヒートポンプ給湯機が商品化された。この商品化が契機となり各メーカーが市場に参入、エコキュートという共通の愛称も生まれた。国の補助金制度もあり、技術も進歩し、普及が進展、2025年3月末で、累積出荷台数1000万台を突破した。わが国の給湯分野の省エネに大きく貢献している。

\* フェロー、(一財)電力中央研究所

技術功績

(4) 自動車用ディーゼルエンジンの  
燃焼技術開発



橋詰 剛\*

カーボンニュートラル社会の実現に向け、内燃機関の熱効率向上は喫緊の課題である。

ディーゼルエンジンは高い熱効率を得られるものの、混合気形成が難しくNO<sub>x</sub>やスモークが発生しやすいという課題がある。受賞者はこの混合気形成に着目し、独創的な実験手法、可視化解析、CFDを組み合わせた多角的アプローチにより燃焼現象の理解を深め、新たな燃焼コンセプトを創出してきた。さらに、その成果を量産エンジンに展開することで、環境負荷低減に大きく貢献してきた。ここでは代表的な成果を紹介する。

・排気浄化技術

ディーゼルエンジンでは、予混合燃焼と拡散燃焼という異なる燃焼形態が連続して生じる。しかし従来方式では、1本の噴射弁から燃料が連続的に噴射されるため、各燃焼過程の個別最適化が困難であった。受賞者は、複数の燃料供給装置を搭載した独創的なエンジンを構築し、時間的・空間的に自由度の高い混合気形成を実現した。このアプローチにより、予混合燃焼を希薄化し、拡散燃焼を遅角化する「時間分割燃焼コンセプト」、および希薄混合気と過濃混合気を空間的に最適配置する「空間分割燃焼コンセプト」を提案し、NO<sub>x</sub>とスモークの同時低減を実証した。

これらの成果は、早期パイロット噴射や予混合化燃焼として現在の量産ディーゼルエンジンに広く採用されており、産業界に貢献している。また博士論文として体系化され、学術界においても高く評価されている。

・熱効率向上技術

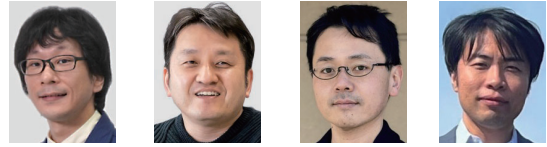
従来、良質な混合気を形成するには強い筒内流動が不可欠とされてきた。しかし燃焼室壁面付近での強い流動は熱効率を低下させる要因となる。受賞者はこの常識に対し、燃料噴射の多段化と燃焼室形状の最適化を組み合わせることで、燃料の空間配置を高度に制御する手法を確立した。その結果、弱い筒内流動環境においても高品質な混合気形成が可能である「低流動燃焼コンセプト」を提案し、熱効率の向上を実現した。

この独創的なコンセプトは高く評価され、欧州国際会議および自動車技術会において論文賞を受賞している。提案した燃焼室形状は小型乗用車から大型商用車に至る量産ディーゼルエンジンに採用され、産業界に貢献している。

近年はディーゼル燃焼にとどまらず、内燃機関全般の燃焼技術へと研究領域を拡張している。現在も学会活動や産学連携の場でリーダーシップを発揮し、若手研究者の育成にも積極的に取り組むなど、幅広い面での貢献が続いている。

\* フェロー、トヨタ自動車㈱ CIエンジン開発推進室（〒410-1193 裾野市御宿1200）

# (1) ロボットハンドに第六感を与える近接覚センサの開発



小山 佳祐\*1 藤本 弘道\*2 中野 基輝\*2 鶴浜 哲一\*2

## 1. 概要

近接覚センサは、ロボットハンド指部分に搭載するタイプの光学式センサである。赤外光の反射強度から、把持直前のラストワンインチ内において非接触での位置調整や接触検知を行う(図1上)。

非接触での位置調整では、ハンド指先表面に近接覚センサを搭載することで、物体に触れる前から物体表面を計測し、触らずに位置決めを行う。ハンド指先と物体面との位置関係を直接計測するため、対象物がデリケートな物体であっても、力を加えることなく正確に把持することが可能となる。

一方、接触検知では、バネで構成された柔軟構造を持つハンド指内部に近接覚センサを配置し、一種の接触・力センサ系を構成する。指内部の変形を近接覚センサで計測することで、物体と指先が接触した瞬間の検知や、把持力の調整を行うことが可能になる。

近接覚センサやセンシングベースド制御は、電気通信大学、東京大学、大阪大学で研究開発が進められてきたほか、2022年8月には、大学で培った近接覚センサの技術シーズを基に株式会社Thinkerを設立し、近接覚センサの製品化を実現した。

## 2. 技術の内容

近接覚センサは、距離20ミリメートル以内に存在する物体との距離や傾き角度を高速に計測する近赤外反射型センサである。計測周期は5ミリ秒以下と高速であり、従来の測距センサでは計測が困難であった距離10ミリメートル以下の領域を計測できる点が大きな特徴である。

センサのハードウェア構成は非常にシンプルであり、基板上に赤外線モジュール、すなわち投光素子と受光素子のペアを四つ配置した構造である(図1下)。これら四つの投光素子を順次発光させ、物体表面からの反射光強度を各受光部で計測する。

反射光強度の生データは、物体表面の材質や反射特性に依存して非線形に変化するため、このハードウェア構成のみでは、距離や位置情報を高精度に計測することは困難な問題がある。この問題を解決するために、近接覚センサ専用の軽量かつ高精度なAIモデルであるThinker AIを大学において研究開発してきた。研究の過程で、反射光情報に対して独自の前処理を施すことで、距離および位置情報を高精度に推定できることが明らかになった。この前処理により、学習モデルの汎化性能が大きく向上し、計測のロバスト性を高めること

が可能となった。

近接覚センサは、紙のような拡散反射物体との距離・位置計測を得意とするだけでなく、従来の光反射型センサでは計測が難しかった透明物体や鏡面物体にも対応している。

1) 非接触センシング応用：ハンド指先に近接覚センサを搭載し、物体との位置誤差を非接触で調整することは、最も基本的な応用例である。カメラによって物体位置を認識する際には、必ず一定の誤差が生じるが、近接覚センサを用いることで、つかむ直前にその誤差を確実に計測し、修正することが可能となる。これにより、把持の確実性を大きく高めることができる。また、非接触で位置決めを行うため、デリケートな対象物を潰すことなく、素早く把持できる点も利点である。

2) 接触センシング応用：従来は対象物を計測面としていたが、この方式では、指内部の変形を計測することで接触力を調整する。従来の力覚センサと比較して許容される変形量が十倍以上と大きく、接触時にインパルス応答的な衝撃力が発生しにくいという特徴がある。また、柔軟機構が複数のメカニカルなバネで構成されているため、耐久性にも優れている。さらに、近接覚センサに基づく非接触計測を用いることで、高い分解能を持つ手先位置制御が可能である。

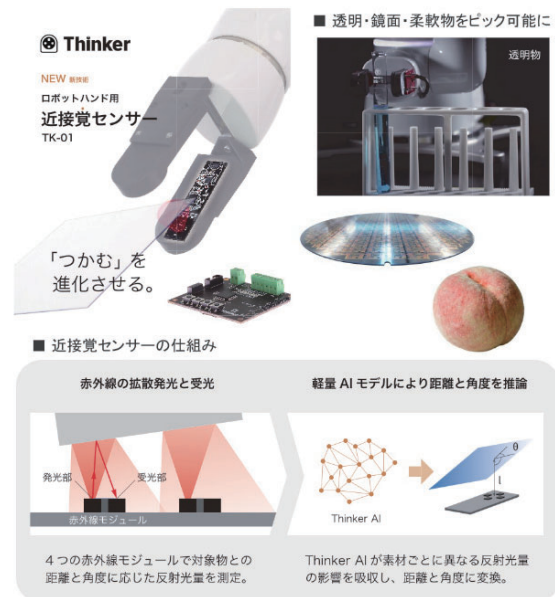


図1：(上) 近接覚センサの概観と(下) 計測・処理イメージ

\*1 正員、大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻(〒560-8531 豊中市待兼山町1-3)

\*2 株Thinker(〒631-0801 奈良市左京6丁目5-2)

(2) ステアバイワイヤシステム



柴田 憲治\*1 上前 肇\*2 工藤 佳夫\*1 並河 勲\*3 佐藤 孝文\*4

1. 概 要

近年、先進運転支援システム（ADAS）の普及と自動運転実用化に向けた動きの加速により、ステアリングシステムは、ADAS・自動運転への親和性及び手動運転時における快適性の両立が求められている。加えて、自動運転時における車室空間のレイアウト自由度向上のため、操舵と転舵が分離した構造を持つステアリングシステムが望まれている。これらのニーズの解決手段として、リンクレスステアバイワイヤシステム（SbW）を日本で初めて製品化。全ての構成要素を2系統化した冗長構成により安全性を確保した上で、手動運転時には次世代の操舵感覚（操舵角中心から左右200度の操作範囲、持ち替え不要）を実現し、異形ステアリングホイールの採用、革新的なコックピットの設計（図1、図2）を可能とした。



図1 LEXUS RZ 図2 TOYOTA e-Palett

2. 技術の内容

SbWは、図3に示す通り主にドライバーの操舵意図を検出し、操舵反力を与えるHand Wheel Actuator（HWA）、操舵意図に応じてタイヤを転舵するRoad Wheel Actuator（RWA）、それらをつなぐ電気通信と車両電源失陥時のためのSbW専用の補助電源（Backup power supply）で構成される。両ユニットとも一体型モータ・ECUを採用し、マイコン・モータ駆動部・各種センサや電源など全ての構成要素を2系統化した冗長構成を持ち、かつ各系統を独立に配置することで、部品故障時でも正常な系統で動作継続を可能とした。

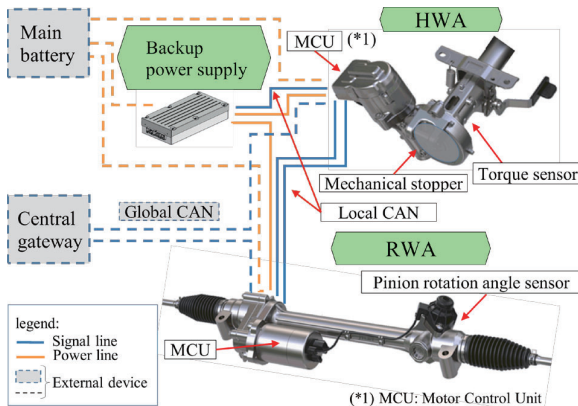


図3 System configuration

ドライバーの操舵意図と走行シーンに応じてステアリングギヤ比をシームレスに変化させることで、駐車操作や交差点走行時でもステアリングホイールの持ち替え操作を不要とし、高速走行時には従来の車両同等に安定した走行を可能とした。具体的には、ドライバーの操舵角と車両の走行速度に応じてステアリングギヤ比を可変する制御（図4）により、直進付近の領域（Ⅰ）では、ギヤ比が低速ほどクイック、高速ほどスローな特性とし、低速はノーマルステアリングよりもヨーレイトゲインを大幅に増大（図5）させることで操作量を低減、最大タイヤ切れ角を確保する目的で、操舵域の中央付近以降（Ⅱ/Ⅲ）では舵角の増加につれてギヤ比がクイックになる特性にした。一方、ステアリングギヤ比をクイックにした場合、低速域ではタイヤ緩和長の影響によりヨーレイトの共振現象が顕著になるため、特に20km/h以下にて速い操舵をした場合に乗員の体や頭が横方向へ揺すられる現象が発生し、乗り心地が悪化する傾向が見られた。横方向へ揺すられる特徴を鑑みて、横加速度とロールに着目しその動特性を改善するようなフィルタを施すことでそれらの共振を抑制し、小舵角でありながら穏やかな車両応答を実現した（図6）。

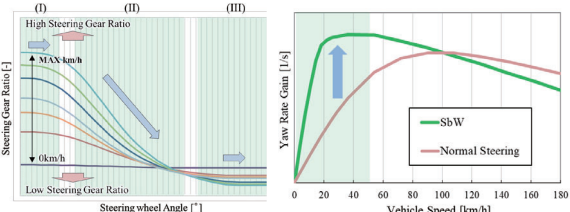


図4 Steering Gear Ratio

図5 Yaw Rate Gain

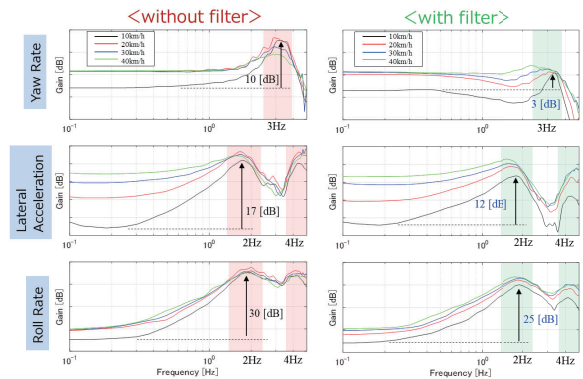
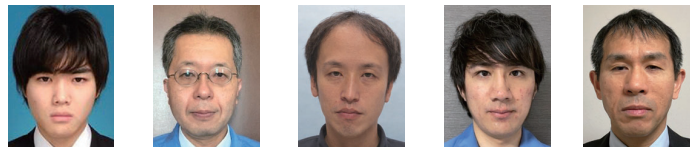


図6 Frequency Response

\*1 正員、トヨタ自動車株式会社（〒471-0826 豊田市トヨタ町1）  
 \*2 正員、トヨタ自動車株式会社（現）WA-KA TECアドバイザー  
 \*3 正員、株式会社ジェテクト（〒448-8652 刈谷市朝日町1-1）  
 \*4 株式会社デンソー（〒448-8661 刈谷市昭和町1-1）

### (3) CNの実現に向けたボイラ向けアンモニア専焼バーナの開発



高山 明正\*1 嶺 聡彦\*1 松尾 啓介\*2 富澤 直季\*2 山下 登敏\*3

#### 1. 概要

石炭火力発電所からのCO<sub>2</sub>削減の一環として、アンモニア燃料転換技術の開発が進められている。燃料アンモニアを用いる技術課題として、窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) の増加やアンモニアの不完全燃焼 (未燃アンモニアや温暖化係数の高い亜酸化窒素 (N<sub>2</sub>O) の排出) が挙げられる。それら課題に対し、基礎試験でNO<sub>x</sub>排出のメカニズムを明らかにし、ボイラでのNO<sub>x</sub>抑制方法を提案した。石炭とアンモニアを同時に燃焼するとNO<sub>x</sub>が発生しやすくなるのに対し、アンモニア専焼バーナを用いて、石炭とアンモニアをそれぞれのバーナで燃焼させ炉内で混合することで、NO<sub>x</sub>抑制を可能とした。

アンモニア専焼バーナは、発電事業者のニーズに鑑み、対向・旋回燃焼ボイラそれぞれの方式において、アンモニアをバーナへと液体で供給する液焚、気体で供給する気焚に対して、それぞれ実機規模のアンモニア燃焼試験でアンモニアの安定着火と完全燃焼を達成し、NO<sub>x</sub>の抑制に成功した。

#### 2. 技術の内容

燃料アンモニアを石炭焚きボイラに適用するにあたって、基礎試験で石炭とアンモニア燃焼時のNO<sub>x</sub>特性を調査し、石炭とアンモニアを予混合させた体系では、NO<sub>x</sub>が増大し、燃焼割合50%にて極大となることを明らかにした (図1)。一方、各々の専焼時は燃焼条件を適正化することでNO<sub>x</sub>の低減が可能であることから、ボイラでのNO<sub>x</sub>抑制方法として、石炭とアンモニア各々の専焼バーナを用いて、炉内で燃焼させる方式を採用し、小規模のバーナ燃焼試験によりアンモニア燃焼割合を増加させてもNO<sub>x</sub>の抑制が可能であることを見出した。

本コンセプトをもとに、NEDO (国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) のグリーンイノベーション基金事業において、実機ボイラへと適用可能なアンモニア専焼バーナを開発した。既設の石炭焚きボイラの脱炭素化を想定し、石炭専焼バーナをアンモニア専焼バーナに換装するのではなく、既設の石炭専焼バーナもしくは油バーナを改造して、石炭専焼とアンモニア専焼が両立可能なバーナとした。ボイラ火炉へのバーナ設置方式としては、旋回燃焼と対向燃焼の2つの主要な方式があり、両方式にそれぞれ適したバーナを開発した。また、バーナへのアンモニアの供給方式として、液体で供給する液焚、気体で供給する気焚の両方式について、それぞれ専焼バーナを開発した。バーナの燃焼性は、入熱：3.7MWth相当及び23MWth相当 (単一バーナとしては実機規

模) の燃焼試験設備で確認した。石炭とのアンモニア燃焼割合 55cal.%、ならびにアンモニア専焼における安定した着火保炎とアンモニアの完全燃焼を達成し、石炭専焼よりもNO<sub>x</sub>や灰中未燃分を同等以下に抑制できることを示した (図2, 3)。

#### 3. まとめ

本技術により、アンモニア高比率燃料転換とNO<sub>x</sub>抑制の両立が可能となる。今後、石炭焚きボイラのカーボンニュートラル (CN) 化に向けた燃料アンモニア利用拡大に向け、事業用・産業用ボイラにおける幅広いニーズに対応した取り組みを進めていく。

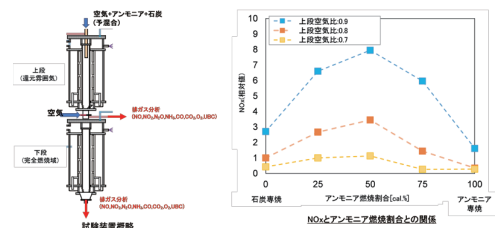


図1 二段電気炉試験での石炭 - アンモニア燃焼時 NO<sub>x</sub> 特性

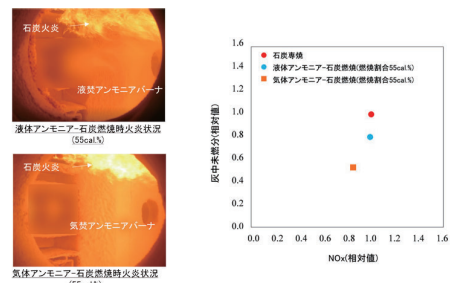


図2 石炭 - アンモニア燃焼割合 55cal.% 試験結果 (3.7MWth, 旋回燃焼炉向けバーナ)

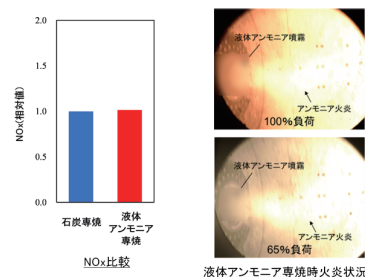


図3 液体アンモニア専焼試験結果 (23MWth, 対向燃焼炉向けバーナ)

\*1 正員、三菱重工業(株) 総合研究所 エナジー研究推進部 (〒851-0392 長崎市深堀町5-717-1)  
 \*2 正員、三菱重工業(株) 総合研究所 燃焼研究部 (〒851-0392 長崎市深堀町5-717-1)  
 \*3 正員、三菱重工業(株) エナジードメイン スチームパワー事業部 技術部 (〒850-8610 長崎市飽の浦町1-1)

## (4) 印刷型センサを用いたロボットグリッパーの高機能化技術



竹田 泰典\*1 吉田 綾子\*2 ワン イーフェイ\*3 時任 静士\*2 熊木 大介\*2

### 1. 概要

近年、少子高齢化や労働人口の減少を背景に、製造・物流・医療・農業分野でロボット導入が進んでいる。人と協働するロボットには、安全かつ繊細な把持を可能とする触覚機能の実装が求められるが、従来のグリッパーはモータ電流値や単一の力センサに依存しており、圧力分布や物体の柔らかさを定量評価することは困難であった。

本技術は、低温・常圧の印刷プロセスにより作製したフレキシブル薄膜触覚センサをロボットグリッパーへ実装し、圧力・振動・温度の三基底触覚情報を取得するとともに、把持変位との統合解析により対象物の柔らかさをリアルタイム推定可能としたものである。印刷法により大面積形成および低コスト化を実現し、環境負荷低減にも寄与する。

圧力センサには多孔質カーボン複合材料による抵抗変化型構造を採用し、高感度かつ再現性の高い特性を得た。取得データは独自開発ソフトウェアで解析され、圧力分布の可視化、安全な把持制御、把持角度認識を実現した。さらに、把持変位と圧力変化の関係から柔らかさ指標を算出し、既存の硬度計と高い相関を確認している。

本技術は、印刷エレクトロニクスとロボティクスを融合した触覚統合システムであり、協働ロボットの知能化に資する基盤技術である。

### 2. 技術の内容

#### (1) 印刷型触覚センサの製造技術

本技術では、低温・常圧で形成可能な印刷プロセスを用い、フレキシブル基板上に電極および感圧層を直接形成した。図1に製造プロセスを示す。銀ペースト電極形成後、低温焼

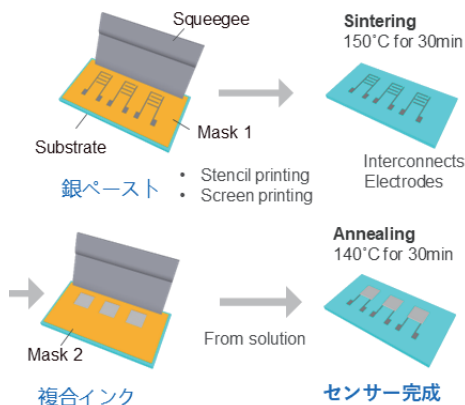


図1 印刷型触覚センサの製造プロセス

成により導電層を形成し、多孔質カーボン複合インクを印刷、アニールして感圧層を形成する。貼り合わせを不要とする単純構造により、工程短縮と材料利用効率の向上を実現した。

#### (2) 三基底触覚センサ構造

図2に三基底触覚センサの構造および外観を示す。圧力・振動・温度センサを積層した薄膜構造であり、厚さ約100μm以下で柔軟性を有する。圧力センサは多孔質カーボン複合材料による抵抗変化型構造とし、安定した抵抗変化特性を示す。柔軟基板によりグリッパーへの直接実装が可能である。

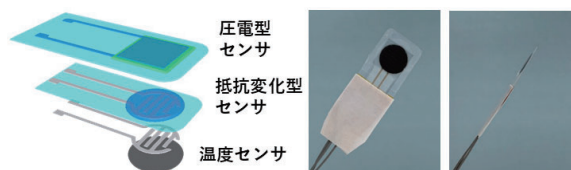


図2 三基底触覚センサの構造および外観

#### (3) 統合制御および実証

図3にロボットグリッパーへの実装および統合制御の構成を示す。センサ信号はマイクロコントローラで取得し、無線通信により制御PCへ送信する。ロボット動作情報と統合処理することで、安全な把持制御を実現した。

2次元圧力分布のリアルタイム表示、壊れやすい対象物の破損防止把持、把持角度識別を確認した。さらに、把持変位 $\Delta x$ と圧力変化 $\Delta P$ から柔らかさ指標を算出し、異なる弾性材料の識別が可能であることを実証した。

本技術は、材料設計から制御統合までを一体化した触覚システムであり、ロボットの高機能化に資する実用技術である。

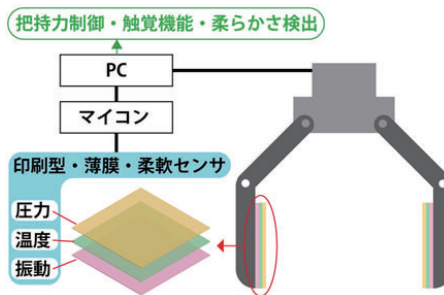


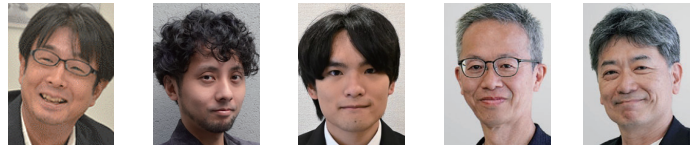
図3 ロボットグリッパーへの実装および統合制御の構成

\*1 正員 山形大学大学院有機材料システム研究科 (〒992-8510 米沢市城南4丁目3-16)

\*2 山形大学 有機エレクトロニクスイノベーションセンター (〒992-0119 米沢市アルカディア1丁目808番48)

\*3 (元) 山形大学 有機エレクトロニクスイノベーションセンター (〒992-0119 米沢市アルカディア1丁目808番48)

## (5) 蠕動運動型管内検査ロボットの開発



中村 太郎\*1 山田 泰之\*2 伊藤 文臣\*1 市橋 徹\*3 渡部 格生\*3

### 1. 概要

本技術は、産業プラント、半導体製造設備、上下水道、ガス管、空調ダクトなど、社会インフラおよび各種生産設備に広く存在する小径・長距離・多曲がり配管の内部を安全かつ確実に検査・清掃することを目的として開発された、ミミズの蠕動運動を規範とする管内検査ロボットに関するものである。これらの配管は流体や気体、薬液、粉体などを搬送する設備の基幹インフラであり、工場や都市機能の安定稼働を支える血管とも言える重要な役割を担っている。しかしその多くは内径が小さく、長距離にわたり3次的に複雑に屈曲した閉鎖空間で構成されるため、人手による点検や従来装置による検査が極めて困難であるという課題を抱えている。

近年、社会インフラの老朽化や設備の高度化・高密度化の進展に伴い、配管内部の腐食、閉塞、異物堆積、スケール付着、細菌繁殖などが深刻な事故や品質不良、さらには換気効率の低下や操業停止の直接的要因となっている。これらの問題を未然に防止するため、定期的かつ高精度な保守点検の重要性が一層高まっている。特に半導体や食品・医薬分野では微少な汚染が重大な損失につながるため、配管内部の可視化と清浄は喫緊の課題である。しかしながら、従来の押込み式内視鏡やワイヤ牽引式装置では、配線やチューブと管壁との摩擦抵抗が検査・清掃距離に比例して増大するため、複数の急曲管や長距離配管の奥深くまで到達できず、入口付近のみの限定的な検査に留まるという制約があった。このため、多くの現場では配管の分解清掃や熟練作業者による人手点検に依存せざるを得ず、安全性の低下、作業時間の増大、保守コストの増加といった深刻な負担が生じていた。

本技術はこれらの課題を抜本的に解決するため、狭小空間において高い推進力と柔軟性を同時に発揮できるミミズの蠕動運動に着目し、独自開発の軸方向繊維強化型空気圧人工筋肉を用いたソフトロボット型移動機構を採用した。波動的な伸縮運動によって管壁との広い接触面から安定した摩擦推進力を生成し、複雑な曲管や段差に対して受動的に追従しながら確実に移動できる点が最大の特徴である。内径25～100mm程度の細径配管に対応し、検査用カメラと清掃ブラシを搭載し、点検と清掃を一体化した効率的な保全作業を実現した。本技術は既に製品化され、半導体工場や化学プラント、各種インフラ現場において導入・実証が進んでおり、安全性向上、作業時間短縮、保守コスト削減、さらには保全品質の高度化に大きく貢献している。

### 2. 技術の内容

本技術は、図1に示すように、空気圧人工筋肉ユニット、関節機構、カメラ頭部、ブラシ機構、および配線・配管系から構成される多節直列構造を有する柔軟索状ロボットに関するものである。本ロボットは、管路の曲率変化や段差に対して受動的に適応できる高いコンプライアンスと追従性を備えている。中核となる軸方向繊維強化型人工筋肉は、流体圧印加によ

り径方向に膨張しつつ軸方向に収縮する特性を利用して大きな収縮力を発生する空気圧アクチュエータであり、ゴム材料の柔軟性と繊維補強構造を組み合わせることで、高出力と高柔軟性という従来は両立が困難であった性能を同時に実現している。このソフトアクチュエータ技術により、配管内壁へ均一に接触しながら安定した推進力を発揮できる点が本機構の核心である。

本ユニットを複数直列に連結し、各ユニットの収縮・伸長の位相を時間的にずらして順次駆動することで、頭部から尾部へ波が伝播する蠕動運動を生成する。これにより管壁との摩擦差を能動的に制御し、自律的な前進・後退を実現するとともに、複数の曲管やS字・U字配管を含む経路においても高い走破性を確保している。

実用化にあたっては、ゴム人工筋肉の耐久性向上が重要な技術課題であった。ゴムは大変形を繰り返すと疲労破壊を生じやすく、長期使用に耐える寿命の確保が難しい。そこで、材料配合の最適化や形状設計の改良に加え、マイクロレベルの材料特性変化まで解明・活用した構造改善を行い、耐磨耗性および強度を大幅に向上させた。その結果、実用化に耐えうる80万回以上の繰り返し駆動寿命を達成した。さらに、低摩擦樹脂ベアリングを備えたユニバーサルジョイントの採用により可動域を拡大するとともに摺動抵抗を低減し、急曲管やショートエルボの安定通過を可能とした。加えて、短尺化設計と高強度フレーム構造により屈曲追従性と耐荷重性を同時に高め、最大1300N以上の牽引力を発揮しながら、長距離配管の確実な走破性を確保している。

これらの人工筋肉技術、関節設計、耐久化技術および清掃機構を統合した結果、本ロボットは従来方式では到達不能であった細径・複雑・長距離配管内部に自律的に進入し、内部映像の取得と清掃を同時に実施できる世界初の実用的蠕動運動型管内検査システムとして完成した。これにより、配管保全の自動化・高度化と安全性向上を実現し、機械工学、ソフトロボティクス、インフラ維持管理分野に新たな技術的基盤を提供している。

\*1 正員、中央大学理工学部（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）・（株）ソラリス（〒174-0073 東京都板橋区東山町14-13）  
\*2 正員、法政大学デザイン工学部（〒102-8160 東京都千代田区富士見2-17-1）  
\*3 株）ソラリス（〒174-0073 東京都板橋区東山町14-13）



図1 受賞技術：蠕動運動型管内検査ロボット

## (6) 土壌挙動解析技術による世界の土壌に対応した農業機械の開発



松下 幸平\*1 上重 嘉史\*2 萩原 智恵\*2 長藤 圭介\*3 花本 忠幸\*3

### 1. 概要

図1に示すトラクタ・コンバインをはじめとした農業機械が水田や畑で走行しながら土の耕耘や、作物の植付け、作物の収穫を効率よく行えるかは機械と土の力学的な関係で決まり、世界中で活躍する農業機械は世界の多様な土壌に対応する必要がある。例えば、図2(a)のように欧州では日本に比べ粘土質の畑が多く、図2(b)のような東南アジアの深い湿田など、世界の土壌は多岐にわたり、気候、地域、シーズンによって常に土の状態は変化する。

気候、地域、シーズンに制限される実機による開発環境において、これらの制限を受けずに開発を行う技術を開発することで農業の機械化率を上げることができれば、結果的に食料生産性の向上を実現できる。本技術は、世界の多様な土を解析で表現する技術であり農業機械の土との相互作用に関する性能を予測可能とし、試行錯誤が必要な機械の性能向上を可能とする。そして実際にこの技術を適用することで世界の多様な土壌に対応した高性能な農業機械を開発することができた。



図1 トラクタ・コンバインをはじめとした農業機械



図2 世界の土壌と農業機械

### 2. 技術の内容

#### 2.1 本技術における開発の流れ

世界の多様な土壌に対応した農業機械の最適化・高性能化を数値解析によって可能とすることを本技術における目的としている。図3のように、まず、世界各地の畑や水田の耕耘結果から、土の塊具合（土塊）や機械性能には粒度分布が重要であると明らかにした。その後、土壌基礎試験（粒径分布や含水比など）と開発した耕耘台上装置から静的かつ動的な土壌特性を解明した。そして土塊を形成しつつ土壌挙動の表現が可能な数値解析技術を開発した。また、解析技術の適用により、様々な農業機械の高性能化を行うことができた。



図3 本技術における開発の流れ

本技術は、土と機械の力学（テラメカニクス）に関わる技術者から多くの関心を集め、多くの分野の学会において論文として認められた。

#### 2.2 世界の多様な土を解析で表現する技術

図4に示す耕耘台上試験により動的な土壌特性を、土壌基礎試験により静的な土壌特性を計測できるようにした。土壌の物理的噛み合いを表現できるように土の粒径分布のモデル化手法を確立して、数多く存在するDEM（Discrete Element Method；個別要素法）解析パラメータの同定手法を開発した。この手法によって世界の多様な土を表現できるようになった。

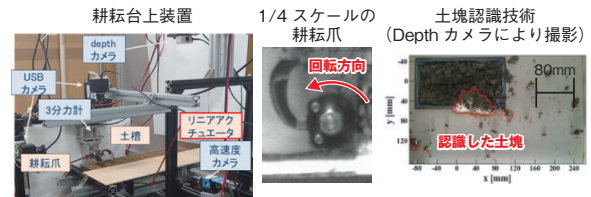


図4 耕耘台上試験

#### 2.3 解析技術適用によって高性能化した農業機械

図5に、解析技術の適用により高性能化した農業機械を示す。図5(a)に示したとおり、作物にとって生育環境が安定した土壌にするロータリ、図5(b)に示した業界内でも軽量かつ高速で牽引可能なトラクタ、図5(c)に示すような東南アジアの深い湿田においてもスタックしないコンバイン、図5(d)に示すような欧州の粘土質土壌においても燃費を大幅に改善したプラウを開発することができた。

これらの画期的な農業機械の開発は、農業機械の品質または性能の向上あるいは農業の生産性向上に寄与し、経済および社会的貢献の大きいものであり、本技術は、食糧問題・気候変動・カーボンニュートラルなどの社会課題の解決に貢献する。

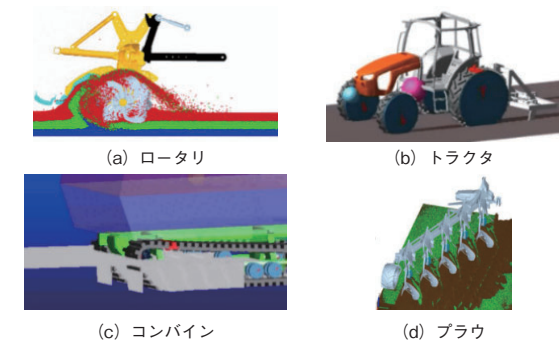


図5 農業機械への解析技術適用

\*1 正員、㈱クボタ（〒590-0908 堺市堺区匠町1番地11）

\*2 ㈱クボタ

\*3 正員、東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻（〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1）