

住友重機械 技報

SHI 

Sep.2022

No.208 ISSN 0387-1304

Sumitomo Heavy Industries Technical Review

ロボット・自動化特集

Special issue for Robotics and Automation technology

住友重機械技報

No. 208 2022

巻頭言

「ロボット・自動化特集号」に寄せて

千々岩敏彦

ロボット・自動化特集

論文・報告	協働ロボットSawyerによる自動化システム	岡田健志	1
	GUNDAM-CARRIER	山田和徳	5
	駅サービスロボット向け移動ベースのリスクアセスメントと安全設計	首藤和正	9
	鉄鋼壁面走行ロボットの開発	衛藤晴彦, 蔡 麗佳, 村野賢一, 坂井郁也	15
	ギヤボックスの塗装自動化開発	山下雄大, 山田祐一郎, 田畑 翔	21
	シェル&チューブ式熱交換器の管端溶接自動化開発	花田基洋, 岨 佑季	27
技術解説	曲面ワークにおけるベルト研磨自動化開発	向井郁弥, 笹田康弘, 濱野史暁, 田畑嵩奎	31
	外観検査装置KITOVの特長	坂元勝紀	35

Message for "Special Issue for Robotics and Automation Technology"

Toshihiko CHIJIWA

Special Issue for Robotics and Automation Technology

T/PAPERS	Automated System with Collaborative Robot Sawyer	Takeshi OKADA	1
	GUNDAM-CARRIER	Kazunori YAMADA	5
	Risk Assessment and Safety Design of Mobile Base for Station Service Robot	Kazumasa SHUDO	9
	Wall Climbing Robot for Steel Structures	Haruhiko ETO, Lijia CAI, Kenichi MURANO, Yuya SAKAI	15
	Development of Automated Coating for Gear-Box	Yudai YAMASHITA, Yuichiro YAMADA, Kakeru TABATA	21
	Development of Automated Tube End Welding for Shell & Tube Heat Exchanger	Motohiro HANADA, Yuuki SOWA	27
	Development of Automated System for Belt Grinding Process to Curved Work	Fumiya MUKAI, Yasuhiro SASADA, Fumiaki HAMANO, Takafumi TABATA	31
	Features of Visual Inspection Device KITOV	Katsunori SAKAMOTO	35

「ロボット・自動化特集号」に寄せて

取締役
専務執行役員

千々岩 敏彦



当社における今後の注力技術分野は、機械メーカーである当社のあるべき姿をSDGsから導き示した「環境・エネルギー」「自動化・デジタルイゼーション」であると考えています。今回の特集号では「自動化・デジタルイゼーション」に関する製品・技術を取り上げています。

「ロボット・自動化」という言葉を聞くと、これまで人手を介して行われていた製造方法を転換し、効率化・低コスト化する手段であるとネガティブに捉える方も多いかもしれません。勿論これも目的の一つです。しかし日本を含む先進国の労働人口の減少は、現実の姿となっており不可避の状況です。従来型の人手に頼る製造方法の継続では、いずれ生産の継続が困難になるでしょう。特に特殊技能を有した熟練技能者に頼った製造方法への対処は喫緊の課題です。ベテラン技能者の持つノウハウや動作を取り込んだ自動化を実現し、各種生産ラインへ投入していくことは、我々機械メーカーの責任・ミッションです。

また、高所作業や人体に切創を負わせる可能性のある危険作業、有機溶剤や粉塵など劣悪雰囲気での過酷な作業環境からの解放は我々企業の責務であり、早期に実現させなければなりません。

当社においてもSDGs 3番「すべての人に健康と福祉を」、8番「働きがいも経済成長も」、9番「産業と技術革新の基盤をつくろう」を実現し、上記課題を解決すべくロボット・自動化を進めています。

本特集号では、当社におけるこれらの取り組みによる一部を紹介させていただききます。本特集号の内容が少しでも皆様のお役に立つことができれば幸甚です。

協働ロボットSawyerによる自動化システム

Automated System with Collaborative Robot Sawyer

●岡田 健志*
Takeshi OKADA



協働ロボットSawyer
Collaborative Robot Sawyer

多関節ロボットを用いた自動化システムにおいて、法規制の変化により適切にリスクアセスメントを行うことで、安全柵を用いずとも本質的な設備の機能安全を確保できる協働ロボットという選択肢が増えた。当社は、2015年にRethink Robotics社と同社の協働ロボットSawyerの国内独占販売契約を締結し、コンポーネントの開発からトータルシステムの構築までを行ってきた実績を生かして自動化システムを提案してきた。その活動はプラスチック業界や自動車業界における工場の自動化にも及んでおり、省人化の効果が得られている。本報では、Sawyerの特性およびその特性を活用した自動化システム事例やリスク評価技術について報告する。

In automated system using articulated robots, appropriate risk management required by changing laws and regulations can make it possible, to apply collaborated robots in, which can keep safety of the equipment without safety fences. In 2015, we concluded an exclusive domestic distribution agreement with Rethink Robotics for their Collaborative Robot Sawyer and have been proposing automation systems based on our accumulated experience from component development to total system construction. The activities have been done for factory automation in the plastics and automotive industries, and effective in reducing manpower. This paper reports on the characteristics of Sawyer, the examples of automation system and risk assessment technologies that utilize its characteristics.

1 まえがき

産業用ロボットの安全要求事項であるISO10218-1が2011年に改正され、リスク評価次第では多関節ロボットが安全柵なしで利用できるようになった。また、ISO/TS15066が2016年に発行され、生物力学的限界を視野に入れた最大許容力をロボットシステムに反映させることが可能となる安全に関連するガイドラインも整いつつある。これら規格の変化に伴い労働安全衛生規則も見直され、協働ロボットが普及し始めてきた。

協働ロボットを活用した自動化システムを構築することで次のような効果が期待できる。

- ・安全柵なしの省スペースな自動化システムを実現できる。
- ・人とロボットで、単調作業と熟練者による作業を分担し、自動化難易度を簡易化できる。
- ・人とロボットで治具を共有することにより、ロボットの異常停止時には人が簡易にバックアップできる。

しかし、多くの協働ロボットは剛な構造であり、制御遅延などで人と接触したときに即時にロボットを停止することができない。したがって高速で動作させようと生物力学的

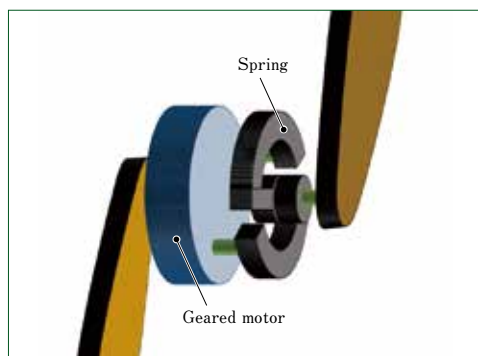


図1 SEA構造
Structure of SEA (Series Elastic Actuator)

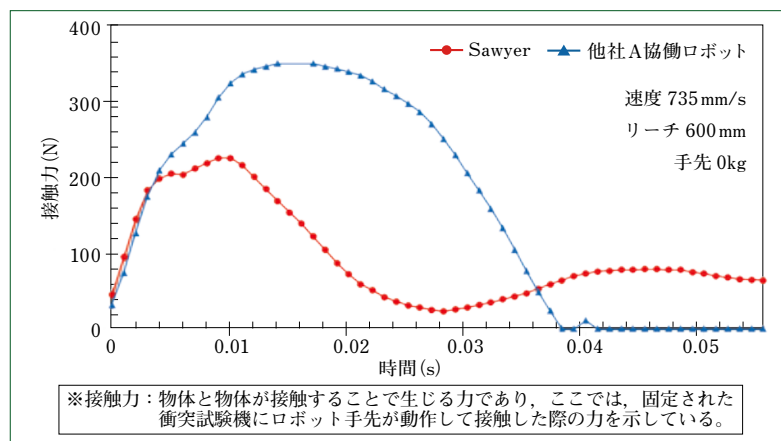


図2 衝突時の接触力の比較
Comparison of contact force at collision

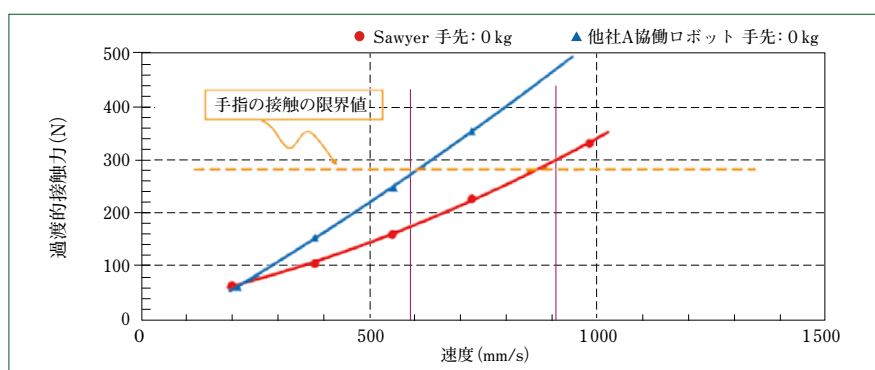


図3 衝突時の速度と過渡的接触力の関係
Relationship between speed at collision and transient contact force

限界を視野に入れた最大許容力を超える接触力が発生しやすい。このことから、協働ロボットを利用しながらもエリアセンサを設置し、ロボットの作業エリアに人が侵入した際にはロボットを停止あるいは減速する運用になっていた。このような運用方法では、ライン作業のような量産工程において、協働作業中にロボットの作業エリアに人が侵入してロボットが停止・減速するたびに、前後工程の作業が停止したり、遅延が発生するなどの弊害が生じる。その結果、協働ロボットを用いた自動化システムの多くは、実態として協働ロボットを利用しながらも協働作業を前提としない自動化システムとなってしまう、従来の産業用ロボットの自動化システムと大差ないシステムになりがちであった。さらに、そのロボットシステムのリスク評価はユーザに委ねられているものの、接触力をリスク評価に反映する具体的な手法は国際規格にも記述されておらず、ユーザ自身が模索せざるを得ない。この状況がリスク評価の難易度を上げており、協働ロボットを導入しながらも協働できない自動化システムになってしまうことに拍車を掛けていた。

また、部品の組付けをロボットシステムで自動化するという需要は非常に高く、嵌合作業を含むアプリケーションも非常に多い。しかしながら、嵌合作業においては部品を傷つけない繊細な力加減や微小な位置ズレへの対応が求められ、協働ロボットにおいても従来の産業ロボットと同様に課題が残る。

2 Sawyerを用いた自動化システムによる協働作業の可能性

Sawyerは、機械的に柔軟性を持たせた協働ロボットである。Sawyerの関節は直列弾性アクチュエータ（Series Elastic Actuator）と呼ばれる従来の堅硬なアクチュエータに機械パネを追加した構造（図1）であり、衝撃力をパッシブに吸収することができる。この構造を採用することで、不意に衝突が発生しても、制御遅延に影響されずに対象物との柔軟な接触を実現する。図2に、不意の接触をした際のSawyerおよび他社協働ロボットの接触力の比較を示す。他社協働ロボットは、従来の堅硬なアクチュエータを使用しており、人との接触時に即時にロボットを停止することができず衝突直後に大きな力が発生している。それに対してSawyerは柔軟な構造を持って接触しているので、衝突直後の力のピークを低減できている。

リスクアセスメントの際は、衝突直後の力のピークをISO/TS15066に規定される過渡的接触の最大許容力と対比してリスクの重篤度を評価する方法が標準的な考え方となる。もし衝突力が大きくリスクの重篤度が高い場合、ユーザはロボットの構造を変えることができないことから、ロボットの手先速度を低減させて接触部位における最大許容力を超えないか検討せざるを得ない。しかしながら逆説的に考えると、もしロボット製品として衝突直後の力のピークが構造的に



図4 縦型インサート成形における金型へのインサート部品挿入
Insertion of parts in mold

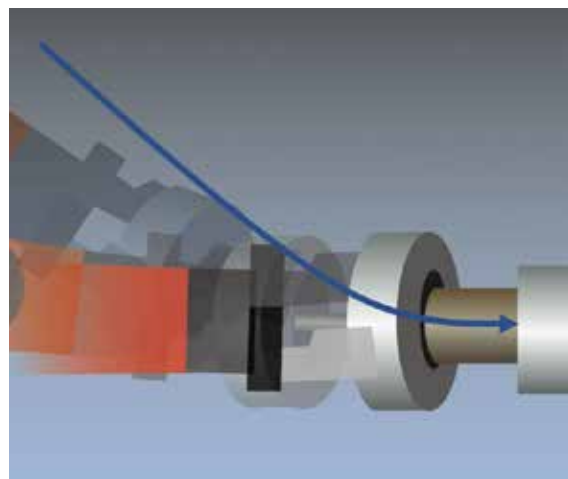


図5 シャフト端部への部品組付けイメージ
Image of assembling parts into end of shaft

低減されているのであれば、協働ロボットシステムの手先速度の向上に直結するといえる。図3に、Sawyer および他社協働ロボットの速度と衝突力の関係を示す。手指の過渡的接触における最大許容力である 280 N まで速度を出そうとすると、Sawyer は他社協働ロボットに対して約 55 % 増速させることができる。この速度差により、周辺機器の工夫次第で人と同等レベルの作業速度を実現し、実際に大手自動車メーカーやプラスチック成形品メーカーにおいて、Sawyer を用いた安全柵なしの自動化量産ラインが稼働している。

3 Sawyer を用いた自動化システムによる嵌合作業

Sawyerの機械的な柔軟性と、その構造による安全性を前述したが、機械的に柔軟性を持たせたことで対象に做った動作もできるようになる。従来のロボットにおいても、電気的な制御によって一定の力で押し付けたり、既定の方向に対する接触力を制限する動作を行うことはできるが、複数の方向に対して制御を行うと、動作が不安定になり調整が難しい。接触させる対象に微小な位置ズレなどがなく定位置に供給されるのであれば、制御する軸方向を最小限にとどめることで倣い動作自体は従来のロボットでも実現可能である。しかしながら、自動化する周辺設備の実態としては、設備の劣化や作業位置再現性の問題により、予期しない軸方向への微小な位置ズレが発生する確率が高い。よって、嵌合作業のようなすべての軸方向に対して正確な位置合わせが必要な作業となると、従来のロボットでは嵌合作業自体を失敗することもある。無理な嵌合による破損、変形、傷が生じることもある。Sawyerにおいては、7軸のアクチュエータすべてに対して機械的な柔軟性を持たせたことで、微小な位置ズレを吸収することができる。嵌合作業に適した機能を有するSawyerは、ほかのロボットでは不可能であった製造現場への適用が可能になってきている。

プラスチック業界では、図4のような金属などの部品をセットしてから成形するインサート成形へSawyerが活用されることがある。インサート成形においては、余計なところに樹脂が流れ込まないようにすべく、事前にセットする部品に

対して厳しめの嵌合作業が求められるが、Sawyerは前述の特長によりこの嵌合作業を実現しやすい。また、成形機によっては金型の開き幅が非常に狭いことがあるが、Sawyerは7軸の関節を有することで手先の向きの微小なコントロールや干渉物の回避がしやすく、教示の自由度が高いというメリットがある。

また、自動車業界では、図5のようなシャフト軸端への部品の組付けなどでSawyerが使用されている。部品の複雑な組立て作業の自動化が求められている自動車業界において嵌合作業を自動化するのは難題だった。これに対し、治具により定位置にワークを供給することに加え、Sawyerの柔軟性を生かして対象に沿わせるように挿入することで、ほかのロボットではできなかった作業を実現した。さらに、柔軟性を持たせている機械パネの変形量をセンサで検出することにより、外力や外力による手先位置の動きを正確に読み取ることができる。この機能によって、嵌合作業が成功したか否かを判定させることができる。

4 Sawyer を用いた自動化システムにおけるリスク評価の簡易化

協働ロボットシステムのリスク評価には、ISO/TS15066を参考にすることとなるが、この規格では具体的なリスク評価方法までは言及されていない。協働ロボットシステムを運用するうえで、現場で計測機器を利用し衝突力を確認してリスク評価することを求められるケースがあるが、衝突力の計測には非常に多くの工数が発生するという問題がある。

当社では、協働ロボットを自社で活用するうえで、衝突力に対するリスク評価の簡易化を図っている。具体的には手先重量および動作方向で条件分けを行い、リーチ速度—衝突力のマップを構築し、リスク評価に活用している。

図6に、速度—衝突力のマップを作成するうえで構築した試験装置を示す。既定の負荷を手先に取り付けて衝突試験機で衝突力を、ロボット内部センサもしくは姿勢センサで手先速度の計測を行っている。ここで使用した衝突試験機は、人体の柔らかさをパネおよび衝撃吸収エレメントで模擬した構成となっており、人体への接触に近い衝突力を発生させて計

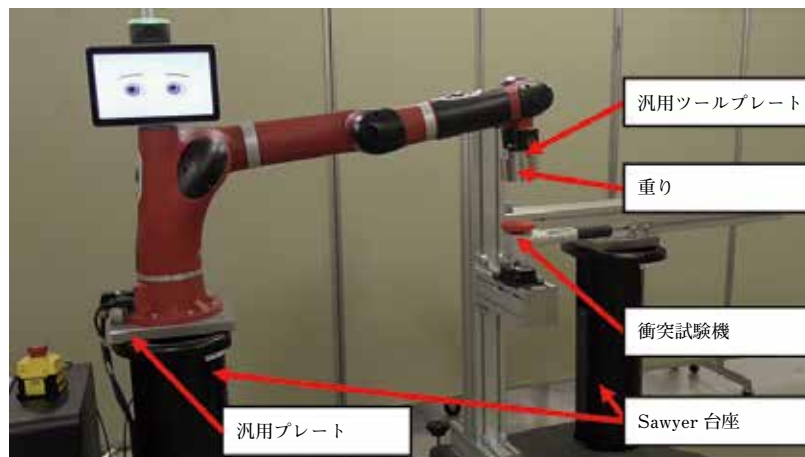


図6 衝突力計測の試験装置
Experimental device for measuring impact force

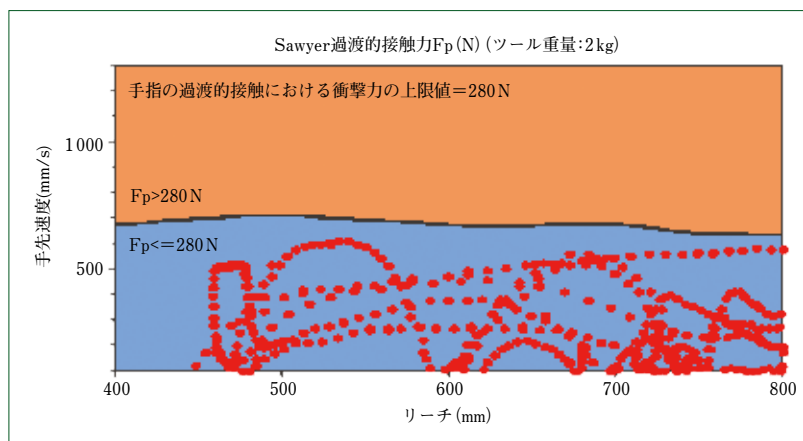


図7 Sawyerにおける横方向動作・手先重量2kgの条件におけるリーチー速度ー衝突力のマップとプロット例
Mapping of relationship reach, speed and impact force at vertical movement of Sawyer under condition with 2 kg weight on hand

測することができる。また、計測時の基準姿勢については「手先アームの向きをロボット接地面に対して鉛直にする」「肘部に相当する関節を上方方向に凸となる姿勢とする」などの拘束条件を決めている。このように拘束条件を規定して基準姿勢を定義することで7軸ロボットおよび6軸ロボットで同一のルールによって姿勢を規定することができる。これにより、別種ロボットの衝突性能を比較するベンチマークデータも取得できるようになり、他製品との定量的な比較が可能となる。

図7に、計測結果の活用例としてSawyerにおける横方向動作、手先重量2kgの条件におけるリーチー速度ー衝突力のマップを示す。図7では、手指の過渡的接触における最大許容力である280Nを境界線としており、それを下回る速度および手先位置の条件を簡易に模索し、リスク評価における重篤度を下げることが可能かを判断するのに役立てることができる。速度、手先位置および手先重量をロボットのデータ出力機能などで記録し、このマップ上でデータをプロットするとSawyerの衝突力を簡易に推測し、衝突力を考慮した手先の速度調整などがスムーズに行える。こうすることで、衝突力を考慮したSawyerの動作サイクルタイムの分析が簡易に

行えるというメリットが生まれる。

現状では、社内アプリケーションの開発向けにデータを提供しているが、将来的には顧客がSawyerを活用したロボットシステムをインテグレーションする際に、安全対策も含めサポートできるよう展開していく。

5 むすび

- (1) 協働ロボットSawyerを活用したロボットシステムにおいては、人との協働作業を前提とした安全柵なしの協働ロボットシステムの実現と、嵌合を含めた部品の組付け作業や金型への部品配膳の実現が利点として挙げられる。
- (2) 人との協働を前提としたロボットシステムを構築するうえで、安全規格を配慮したリスク評価を行う必要がある。そのリスク評価を実施しやすいように、接触力の評価方法を構築し、リーチー速度ー衝突力のマップ化を行った。

今後は、周辺機器も含めたインテグレーションパッケージを展開し、協働ロボットの自動化システムの構築がより簡易化できるよう貢献していく。

GUNDAM-CARRIER

GUNDAM-CARRIER

●山 田 和 徳*
Kazunori YAMADA



GUNDAM-CARRIER

人気アニメ『機動戦士ガンダム』の40周年プロジェクトとして横浜市山下ふ頭GUNDAM FACTORY YOKOHAMAに設置された「動くガンダム」を支持することを目的として、住友重機械搬送システム株式会社はGUNDAM-CARRIERを納入した。

その役割は、エンターテインメント業界で最大級となる約25tの「動くガンダム」の腰部を支持し、歩行やしゃがみ動作の前後・上下動作を担うことにある。

設計・製作には住友重機械搬送システムが保有する機種技術を応用し、本機を実現した。その過程でSDGsの価値観など社会が求める21世紀のものづくり技術と方向性を考える良い機会となった。今回のプロジェクト参入で学んだ多くの異業種の技術も参考にしながら、新たな機械の開発・実現に生かしていく。

GUNDAM FACTORY YOKOHAMA was built in Yamashita Pier as 40 anniversary of popular animated cartoons "Mobile Suit Gundam". And, Sumitomo Heavy Industries Material Handling Systems Co., Ltd. (SHI-MH) delivered "GUNDUM CARRIER". The functions are supporting the waist parts of "Moving GUNDAM" (The weight is about 25 tons : largest size in entertainment industry) and the move of both up-down and front-back with walking and crouching. The machine was designed and manufactured by SHI-MH, applying various crane technology accumulated for a long time. It was also a good opportunity to consider the values of SDGs such as manufacturing technology and directions required in the 21st century society. In this project, we obtained various knowledges from different industries. SHI-MH will develop and realize new material handling equipment from now on.

1 まえがき

GUNDAM-CARRIERは、神奈川県横浜市の山下ふ頭GUNDAM FACTORY YOKOHAMAに設置された「動くガン

ダム」の支持装置として住友重機械搬送システムが納入した搬送台車である。

本機は、エンターテインメント業界で最大級となる約25tの「動くガンダム」の腰部を支持し、歩行やしゃがみ動作の

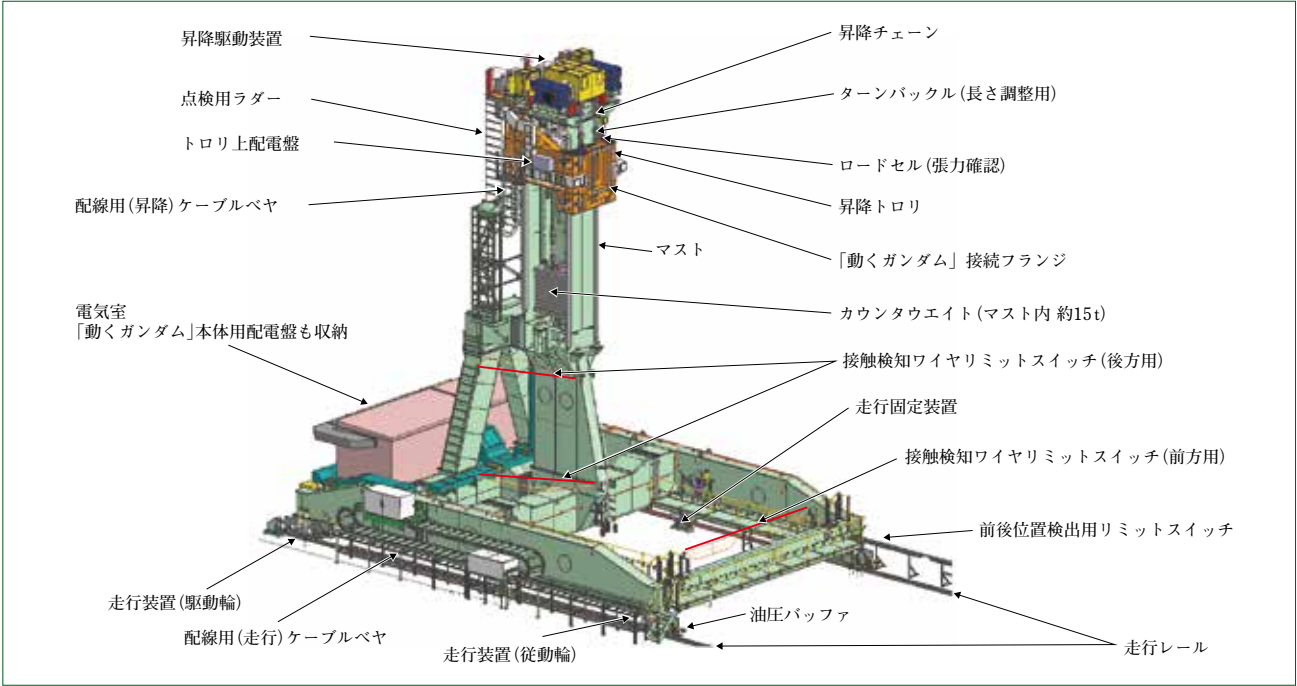


図1 GUNDAM-CARRIERの全容
GUNDAM-CARRIER

表1 主要仕様
Main specification

支持荷重	25.0t
昇降ストローク	4.95m
スパン	10.0m
ホイールベース	16.0m
昇降速度	0.3m/s
走行速度	0.5m/s
電源	三相交流 400V 50Hz

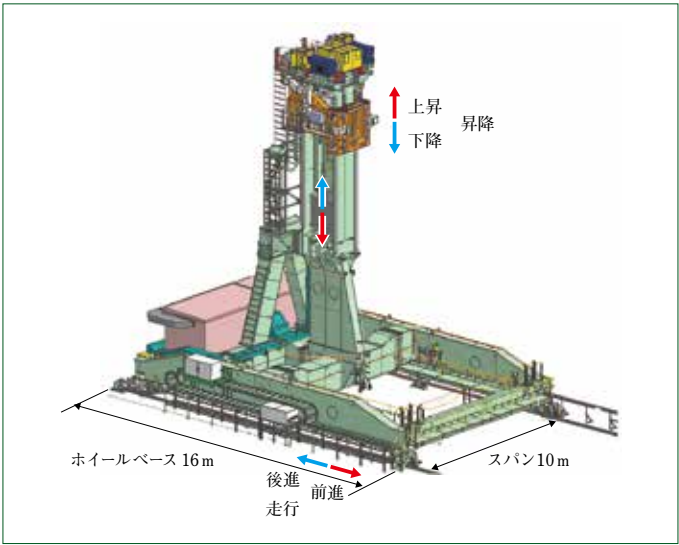


図2 主な運動
Movement

前後・上下動作を担うことを役割としている。クレーンなどの運搬荷役機械で培った技術が各所に応用され、遠隔制御室と「動くガンダム」の中間に位置する機械である。「動くガンダム」の制御盤、動力および制御ケーブルなど多くの機器を備えながらも、GUNDAM-DOCKと呼ばれる制約のある格納スペースに納めるべくコンパクト設計を実現し、「動くガンダム」と調和させている。

2 概要

図1に、GUNDAM-CARRIERの全容を示す。
本機は、「動くガンダム」を上下に動作させる昇降駆動装

置を最頂部に設置したマストガイド構造となっている。マスト内部にはカウンタウエイトを挿入し、昇降トロリとチェーンにより連結している。

前後動作は、GUNDAM-DOCK内に敷設されたレール上を駆動する走行装置によるもので、動力および制御信号は、レールの軌道と平行に設置されたケーブルベヤを介してGUNDAM-CARRIER後方の電気室に取り込んでいる。

ガンダム本体の動きと滑らかに連動する高剛性フレームとインバータ制御により、スムーズな起動・停止および微速運転が可能となっている。

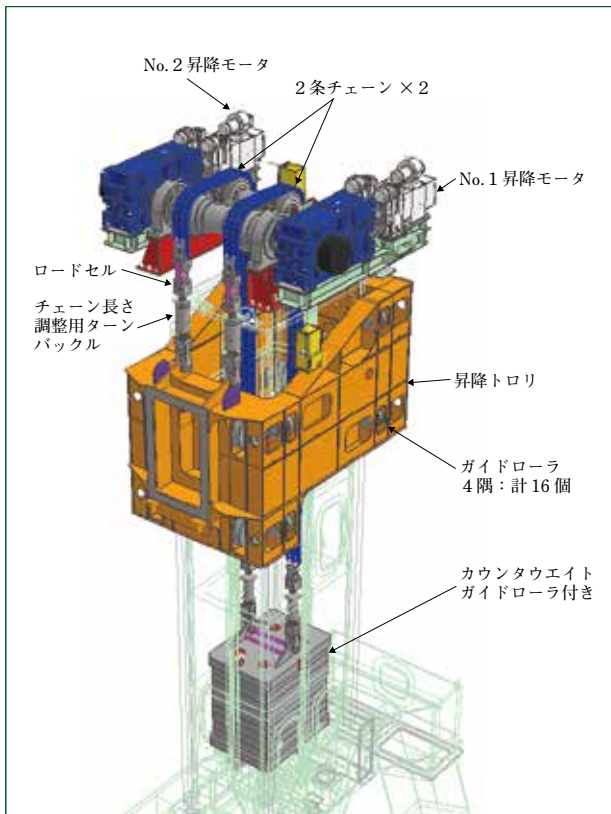


図3 昇降装置
Lifting machine

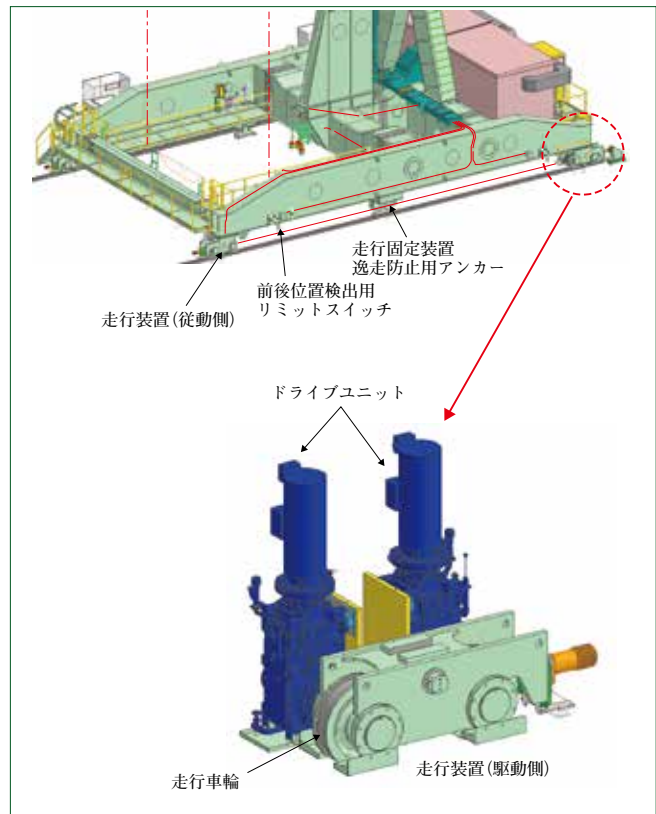


図4 走行装置
Travelling machine

3 主要仕様

表1に、本機の主要仕様を示す。

主な運動は図2に示すとおり「動くガンダム」を上昇・下降させる「昇降」、全体を前後に移動させる「走行」の2動作である。

4 特長

(1) カウンタウエイトを用いたチェーン昇降式

GUNDAM-CARRIERは「動くガンダム」の後方で黒子のように支えることを要求されており、GUNDAM-CARRIERの最頂点に位置する昇降装置をコンパクトにする必要があった。また、クレーンなどと比較すると昇降速度は0.3m/sと高い速度が求められた。

クレーンなどは、一般的に巻上げドラムとシープにワイヤロープを複数掛けしてロープ張力を小さくしモータをコンパクトにしているが、掛け数が多くなることから速度が遅くなり、シープなどを配置するスペースが必要となる。

そこで、吊りチェーンを用いて一方を昇降トロリ、もう一方をカウンタウエイトと接続することでモータの容量を抑えつつ要求された速度を実現した。

チェーンに対する安全率はクレーン構造規格に準じている。非常時に備え昇降チェーンを2本掛ける構造を採用しているため、一方のチェーンが切断されても支持可能となっている。モータは駆動軸に対して2系統とし、

片側のモータのみで退避運転を可能としている。

なお、チェーン端部にはバランス調整用のターンバックルとロードセルを設け、経年変化に対応している。

図3に、昇降装置を示す。

(2) 屋外クレーン同様の走行装置

走行装置は一般的なクレーンと同様の構造となっているが、設置場所がふ頭であることから強風を受けた際にも不意に動かないよう固定装置を設けている。また、各種リミットスイッチなどの電気機器は高潮対策としてグラウンドレベルより1m以上高い位置に設置している。

駆動装置の8車輪のうち後方4輪の車輪軸にドライブユニットを直結している。これによりスリップを低減させ、ブレーキ力を安定させている。

図4に、走行装置を示す。

(3) 「動くガンダム」とGUNDAM-CARRIER間の衝突回避

「動くガンダム」とGUNDAM-CARRIERは腰部で接続されており、「動くガンダム」の胴体や手足が動くとき、それに追従するようにGUNDAM-CARRIERも上下・前後に動作する。

複数の動作パターンが設定されており、GUNDAM-CARRIERは「動くガンダム」の動作に干渉しないようマストや台車フレームの形状が決められているが、際限なく動かせば各構造体と干渉してしまうことから、「動くガンダム」の外装を損傷させないように、位置検出による動作制限と、干渉の可能性がある箇所に対してはワイヤを用いたリミットスイッチを設けた。非接触式のリ

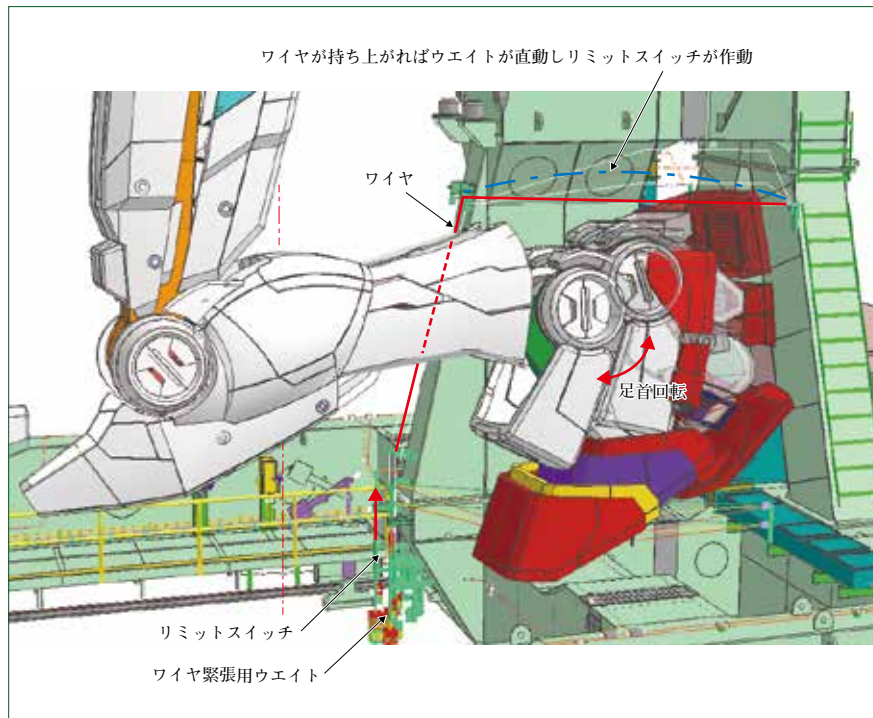


図5 ワイヤ式リミットスイッチの動作原理
Wire type limit switch

リミットスイッチも考えられたが、屋外に設置することから外的要因により不意に非常停止装置が働かないように配慮したものである。

図5に、ワイヤ式リミットスイッチを示す。

(4) 「動くガンダム」の安全システム

「動くガンダム」は、一般観覧者からは一定の距離を確保しているものの、安全性の確保に関する要求はかなり高い。このことから、システム全体でIEC/EN 61508, ISO/EN 13849-1, IEC/EN 62061といった安全規格を満たすシステムが構築されており、GUNDAM-CARRIERにおいても安全システムが導入されている。

(3)に記述した衝突回避を含め、各動作限界や各ドライブ装置過負荷などを監視し、安全システムへ組み込んでいる。

(5) GUNDAM-CARRIERの運転モード

GUNDAM-CARRIERの運転モードとして、専用のハンディテレコンによる動作を行う手動モードと、上位からの指令に基づき動作する自動モードが設けられている。

手動モードではGUNDAM-CARRIER単体で任意の動作が行え、メンテナンス時や単体での移動などに使用される。

自動モードについては、上位の指令(速度、時間、距離)どおりの動作が行え、クレーンでいうところの全自動運転と同等の仕様となっている。

ベクトルインバータ制御を採用しており、「動くガンダム」の姿勢や天候などによる負荷変動に対する影響を最小限とし、パルスジェネレータによる速度フィードバック、アブソリュートエンコーダによる位置フィードバックを行い高精度制御を実現している。

5 むすび

今回紹介した GUNDAM-CARRIER は、住友重機械搬送システムが保有する機種技術を応用することで達成した。

本機的设计・製作は、SDGsの価値観など社会が求める21世紀のものづくり技術と方向性を考える良い機会となった。今回学んだ多くの異業種の技術も参考にしながら、新たな機械の開発・実現に生かしていく。

本機は2020年12月より順調に稼働している。これほどの大きさの機械を間近で見ることができる機会を逃さないよう、是非多くの人に見ていただきたい。

駅サービスロボット向け移動ベースのリスクアセスメントと安全設計

Risk Assessment and Safety Design of Mobile Base for Station Service Robot

● 首 藤 和 正*
Kazumasa SHUDO



駅サービスロボット (SSR) (JR東日本提供)
Station Service Robot (SSR) (Provided by JR-EAST)

近年の人手不足を背景に各種サービスロボットが開発され、市場投入されている。当社は、東日本旅客鉄道株式会社JR東日本研究開発センターフロンティアサービス研究所 (JR東日本) と共同で、駅コンコース内で案内・警備・設備点検などの各種サービスを提供する自律移動ロボットの移動ベースを開発した。移動ベースの設計・製作は、住友重機械搬送システム株式会社 (SHI-MH) が担当した。開発においては旅客の安全確保を最重要項目と捉え、サービスロボットの国際安全規格 (ISO13482 : 2014) に基づくリスクアセスメントを実施し、考えられるすべてのリスクに対して低減策を策定することで許容可能なレベルまでリスクを低減させ、安全設計に反映させた。JR東日本が主導して開発した駅サービスロボットは、2020年度より高輪ゲートウェイ駅で実証実験を行い、歩行者空間における自律移動ロボットの旅客影響などを検証している。

Various service robots have been developed and put on the market due to the recent labor shortage. We, in collaboration with Frontier Service Development Laboratory, Research and Development Center of JR East Group, East Japan Railway Company (JR-EAST), developed a moving base for an autonomous mobile robot that provides various services such as information, security, and facility inspection in a station concourse. Sumitomo Heavy Industries Material Handling Systems Co., Ltd. (SHI-MH) was responsible for the design and fabrication of the mobile base. During development, we considered passenger safety to be the most important and conducted a risk assessment based on the international safety standards for service robots (ISO13482 : 2014). Measures had been developed for all possible risks, reducing the risk to an acceptable level and incorporated into the safety design. The station service robot developed under the initiative of JR-EAST has been tested at Takanawa Gateway Station from FY2020 to verify the impact of the autonomous mobile robot on passengers in the pedestrian space.

1 まえがき

近年、生産人口の減少に伴う労働力確保や業務効率化などのニーズによりサービスロボットの普及が進んでおり、労働力としてのロボットへの期待は今後ますます大きくなると予

想される。鉄道駅構内においても、移動を伴うさまざまなサービス業務が存在し、その合理化が求められている。

当社は、JR東日本と共同で、駅コンコース内で案内・警備・設備点検などの各種サービスを提供する駅サービスロボット (SSR : Station Service Robot) の移動ベースを開発した。

表1 要求仕様
Required specifications

移動ベース性能	走行速度 最大 4 km/h (JR東日本の試験では最大 3 km/h で運用) 寸法 ≤700 mm×1200 mm (車いす規格) バッテリ持続時間 ≥ 2 h その場旋回 ロボットコントローラからの速度指令に従い走行 下記使用環境内を走破
使用環境	営業時間帯に実駅コンコース内を走行 ・共存する対象 旅客、駅職員、車いす、ベビーカー、キャリーバック、ほかのロボット、手すり、コインロッカー、消火設備、自販機、ごみ箱、看板、工事用仮設物、催し物、ベンチ、階段、エスカレータ、エレベータ ・床面 警告(点状)ブロック、誘導ブロック、ガラス、養生ゴム、ケーブルダクト、エクステンションジョイント、雨水、砂、落とし物、スロープ (1/12)、段差 (10mm)

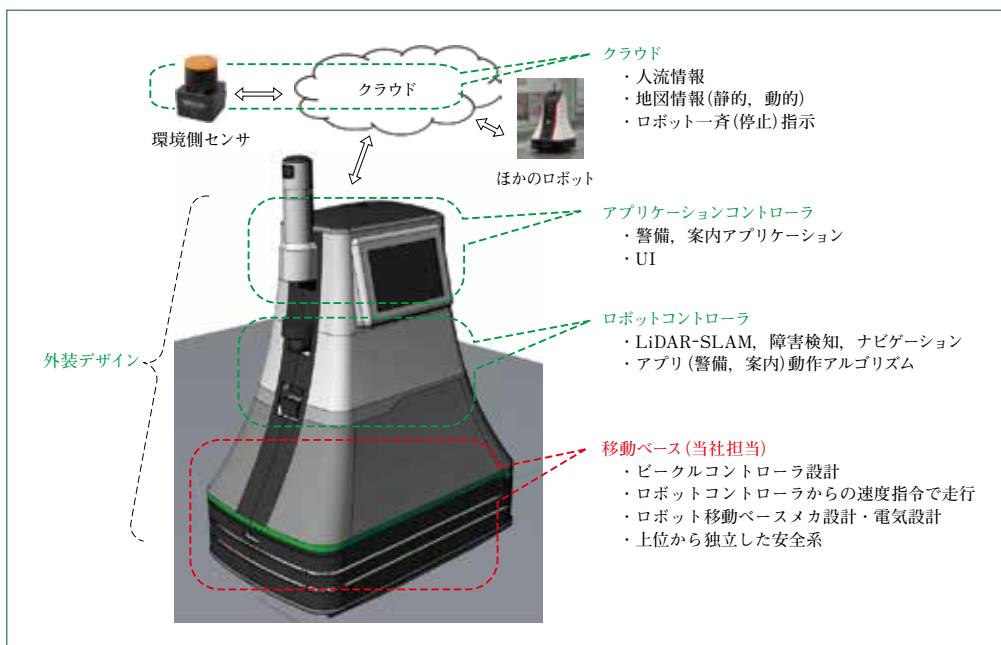


図1 SSRの構成
Configuration of SSR

このSSRを用いて、自律移動型サービスロボットを旅客が行き交う駅コンコース内で安全・円滑に運用することを目的に、2020年度より高輪ゲートウェイ駅で施設管理者やロボット製造業者が持つべき知見を収集する実証実験を行っている。移動ベースの設計および製作はSHI-MHが担当した。

本報ではSSRの要求仕様、基本構成、リスクアセスメントとリスク低減策、設計検証、実証実験について紹介する。

2 SSR

2.1 要求仕様

SSRはマンipュレータを備えていない自律移動型サービスロボットで、駅コンコース内で旅客に各種サービスを提供する。SSRに対しては、使用環境を安定して走破する走行性能、旅客や障害物を回避しながら目標位置へ移動するナビゲーション機能、混雑内でも「自己位置を見失わない」、「故障しない」などの信頼性が要求される(表1)。

安全性に関しては、SSRが走行時に旅客に危害を与えることは絶対に避ける必要がある。想定される危害には、

- ・SSRが旅客と直接接触や衝突することによる危害
- ・SSRが階段やエスカレータなどから転落すること起因する危害
- ・混雑時にSSRが旅客の流動を阻害するなどして発生する間接的な危害

などがあり、これらについてはSSRの設計前段階でリスクアセスメントを実施し、リスク低減策を策定して設計に織り込んだ。

2.2 SSRの基本構成

SSRは、サーボモータによる差動二輪駆動とキャスト従動



図2 SSRの自律移動
Autonomous moving of SSR



図3 SSR案内アプリケーション(JR東日本提供)
SSR Guidance Application (Provided by JR-EAST)

輪四輪の六輪構成で前後直線走行および旋回が可能であり、別途JR東日本が開発したロボットコントローラにより自律移動を行う。さらに、JR東日本が開発したサービス提供用のアプリケーションと操作用タッチパネルPCがSSRに実装され、クラウドと連携して駅コンコース内での各種タスクを実行する(図1)。

また、安全対策として、衝突を防止すべくSSRの前部および後部に2D-LiDARをそれぞれ設置し、2台の2D-LiDARの出力を合成して周囲360°の障害物を検知している。階段からの転落防止としては、2D-LiDARを斜め下方に向けて前後に設置することで段差の検知を可能とした。旅客とSSRの接触に伴う車輪への巻き込みや挟まれを防止すべくSSR下部全周にバンパセンサを配置し、接触を検知している。SSRの走行速度超過への対策としては、駆動輪の車軸にロータリエンコーダを設置し、走行速度を常時監視している。安全を確保するこれらセンサ類による制御と減速・停止に関する制御は、SSRの自律移動と同時に移動ベースのビークルコントローラにより行われ、上位ロボットコントローラに何らかの不具合が生じた場合でも、移動ベース側単独でSSRを安全に停止させることができる。

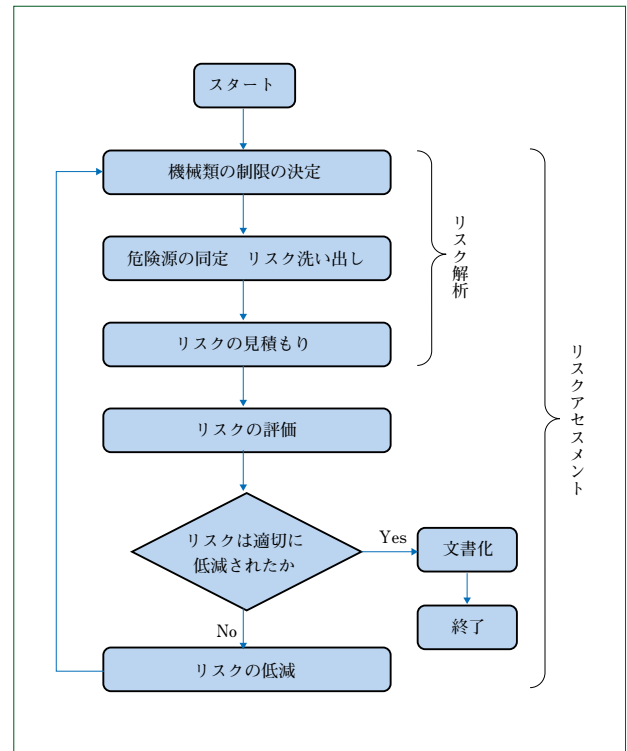


図4 リスクアセスメントフロー
Risk assessment flow

2.3 SSRの自律移動

SSRの自律移動は、前述のとおり JR 東日本が開発したロボットコントローラにより制御される。走行経路は、オペレータが設定する走行パターンや目標位置および駅環境情報を収集するクラウドからの駅混雑情報をもとに最適化される。SSRは、2D-LiDARで取得した点群情報とあらかじめ測定した地図を照合して自己位置を推定するSLAM (Simultaneous Localization And Mapping) 方式と、最短経路問題を解くグラフ理論のアルゴリズムであるダイクストラ法 (Dijkstra's algorithm) を採用し、生成した走行経路に沿ってウェイポイントまで自律移動を行う。走行経路上に障害物がある場合には、経路の再生成による回避動作を行う。回避動作が困難な場合はその場に停止するか、問題の発生したウェイポイントをスキップして次のウェイポイントに向かう経路を生成する(図2)。

2.4 SSRが提供するサービス

SSRは、自律移動技術を駅コンコース内で検証することを主目的として開発されたが、ロボットが実用化される将来に想定されるサービスアプリケーションを仮想的に実装している。アプリケーションはJR東日本が開発・実装し①案内、②

表2 リスク評価基準
Risk assessment criteria

さらされる頻度または時間：F		危険事象の発生確率：Ps		回避できる可能性：A	
連続的 / 常時	2	高い	8	困難	3
まれ / 瞬間的	1	起こり得る	6	可能	1
		起こり難い	4		
		低い(まれ)	2		

危害の発生確率：F + Ps + A											
危害のひどさ：S	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
回復に長期治療(1カ月以上)を要す	10	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
回復に医療措置を要す	6	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78
応急手当てで回復可能	4	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52
対処不要(一時的な痛みなど)	2	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26

リスク点数：R	評価	リスク低減の必要性
80以上	リスクが高く許容不可	必須 技術的方策が不可欠
44～79	条件付きで許容可能	必要 技術的方策が困難な場合は警告表示および管理的方策を講じる
43以下	リスクは十分低く許容可能	不要

警備、③設備点検の各機能を有する。旅客に対する提供サービスは、SSRに搭載したタッチパネルによる案内がメインであり、ディスプレイ上で行き先案内や駅周辺のイベント情報などを、AI駅員さんと旅客との音声認識による会話や、旅客自身のタッチパネル操作を通じて提供する(図3)。

3 SSR 移動ベースの設計

3.1 リスクアセスメント

SSR運用の駅コンコースにおける危険性を事前に抽出・評価し、除去・低減することを目的として、設計前の段階にリスクアセスメントを実施した。リスクアセスメントはISO12100(JIS B 9700)のすべての要求事項を適用した(図4)。

機械類の制限の決定では、SSRの意図した使用法として、旅客が利用する時間帯での運用を前提にSSRのタスク実行時の動作手順を明確化した。予測される誤使用は設備面(クラウドからの通信エラーなど)、対人面(いたづらや故意の揺さぶり、衝突など)、環境面(走行路面上の障害物など)から、SSRの運用で起こる可能性のあるトラブルをすべて列挙した。また、意図した空間・時間制限として、SSRが運用される実駅の環境(雨、風、温度、湿度、砂、雪)、対象となる旅客(大人、子供、高齢者、ベビーカー、車椅子、スーツケース)および制約条件(スロープ、床面、狭隘箇所、下り階段、エスカレータ)を定義した。

危険源の同定では、ISO13482(Robots and robotic devices-Safety requirements for personal care robots)およびJIS B 8445(ロボット及びロボティックデバイス-生活支援ロボット

の安全要求事項)、JIS B 8446-1(生活支援ロボットの安全要求事項-第1部：マニピュレータを備えない静的安定移動作業型ロボット)に記載される安全要求事項を適用して発生し得る危害を検討し、その結果はリスクアセスメントシートの危険源の項目欄に反映させた。

リスクの見積もりでは、起こり得る危害のひどさ：S、さらされる頻度または時間：F、危険事象の発生確率：Ps、回避できる可能性：Aとし、危険源の同定でリストアップされた項目すべてに対して数値評価を実施した。リスク点数：Rは、

$$R = S \times (F + P_s + A)$$

として算出し、「リスクが高く許容不可」「条件付きで許容可能」「リスクは十分低く許容可能」の3種類に分類した(表2)。その結果、リスクが高く許容不可となった危険事象を次に示す。

- ・階段やエスカレータからSSRが転落し旅客が怪我をする
- ・登坂能力や制動力が不足し旅客と衝突する
- ・SSRのセンサが機能せず旅客と衝突する
- ・SSRから出火し火災となる
- ・旅客がSSR内の高電圧部や高温部に触れて感電したり火傷を負う。

3.2 リスク低減策とSSR移動ベース設計

実施したリスクアセスメントにおいて、すべてのリスクを許容可能な状態まで低減させる低減策を策定し、SSR移動ベースの設計に反映させた。そのリスク低減策のうち、機能安全を採用した項目を次に示す。

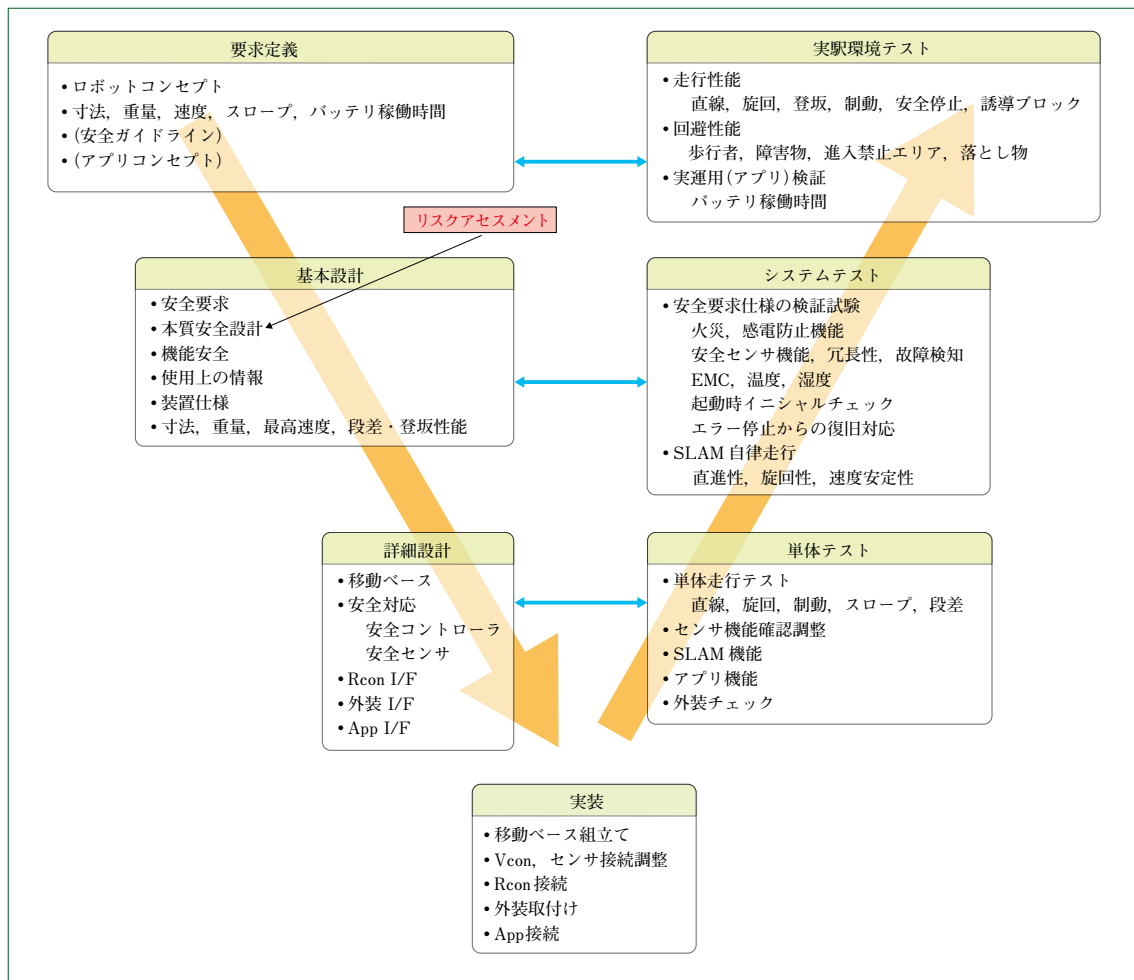


図5 開発V字モデル
Development V-model

- ・動力喪失時に自動的にメカブレーキをかける
- ・SSRが暴走しても速度超過を検知して停止する
- ・階段を検知して停止させる

これらの項目に対しては、ISO13849-1を適用し、要求パフォーマンスレベル(PLr)を達成する制御システムを設計した。本質安全と警告ラベルを用いたリスク低減策として、

- ・端子台カバーなどによる感電防止
- ・転倒しない低重心設計
- ・キースイッチによる誤操作防止
- ・JIS B 8446-1で定義される本質安全となる速度(運動エネルギー93J以下)での運用制限
- ・警告ラベルによる危険箇所表示

をそれぞれ策定し、設計に反映させた。

SSRは駅コンコース環境を走行することから、SSR移動ベースの走行性能に関して次の設計を実施した。

- ・段差やスロープ上り口, 誘導ブロック上などでのトラクション確保を目的とした駆動輪および従動輪の荷重配分の最適化
- ・段差や誘導ブロック走行時の車体挙動の安定化と、車輪の浮上がりによるトラクションロスを防止することを目的とした駆動輪への柔軟材料の採用および各車輪へのサスペンション取付け

3.3 SSR全体の安全設計

SSR開発において、当社は移動ベースの設計製作担当であるが、リスクアセスメントにおいては移動ベースの範囲を超えてSSR全体としてリスク低減策を策定する必要があった。当社の担当範囲外となるリスク低減策は、当社よりJR東日本へ実施協力を依頼し、JR東日本より開発担当各社へ展開された。開発担当各社が実施したリスク低減策のうち、主要な事例を次に示す。

- ・鋭利な部分やボルトの突出し、指など入れる隙間(IP 2 X 相当)のない外装
- ・内部電機品へのシールド設置や外装裏側に導電部材を塗布し、EMI試験でIEC61000-4/JIS C 61000-4規格に適合
- ・本質安全となる運動エネルギー93J以下での運用を目的としたSSR各コンポーネントの目標重量設定
- ・低重心設計による転倒の防止を目的とした各コンポーネントの目標重量設定
- ・押しつぶされ回避を目的としたSSRと壁との距離を500mm以上とする走行経路生成への制約

4 SSR 移動ベースの設計検証

SSR移動ベースの設計検証は、開発V字モデルにのっとり



図6 Design Verificationレポート表紙
Cover page of evaluation report of design verification

単体テスト(コントローラやセンサなどを実装したコンポーネントの詳細設計を検証する)、システムテスト(走行性能や安全性能などの基本設計を検証する)、実駅環境テスト(開発コンセプトを検証する)として実施した(図5)。単体テストとシステムテストの一部は移動ベース単体で当社で実施し、システムテストと実駅環境テストは、SSR完成品としてJR東日本および関係各社と協力して実施した。結果詳細は割愛するが、設計製作に問題ないことを確認している。

4.1 安全設計の検証

リスクアセスメントにより実施したリスク低減策が許容可能なレベルまで低減できているかの公正な評価を第三者機関である一般財団法人日本品質保証機構(JQA)に依頼した。その結果、一部条件付きとなったがリスク低減策が正しく実施できていることが検証された。さらにSHI-MHの設計管理体制と設計活動が適切に運用されていることも認められ、概念検討から製品試験までISO13482の安全要求事項に適合していることを証明するEvaluation Report of Design VerificationがJQAより発行された(図6)。

4.2 実駅環境での実証実験

SSRの実駅環境での実証実験は、まずJR東日本が所有するSmart Station実験棟にて安全性と走行性能を確認した。駅コンコース環境において旅客が近づく、通り過ぎる、立ち止まるなど人とロボットのインタラクションが生じる状況や誘導ブロックなどが存在する床面状況において、SSRの安全機能および走行性能に問題がないことを確認した。その後、高

輪ゲートウェイ駅の営業時間内に、案内アプリケーションの実証実験を行った。その結果、SSRの自律移動が旅客の安全に支障をきたすことはなく、旅客が行き交うコンコース内で自律移動型サービスロボットがどのような振舞いをすべきかについても有益な知見を蓄積することができた。

5 むすび

- (1) JR東日本が主導するSSR開発において、当社は移動ベースの設計製作担当としてプロジェクトに参画した。
- (2) リスクアセスメントに基づくリスク低減策と走行性能要求仕様を設計に織り込み、社内設計管理体制のもと、工業製品と同等の信頼性を持つ移動ベースを開発した。
- (3) 安全性と走行性能を確認後、高輪ゲートウェイ駅で旅客のいる営業時間内に実証実験を実施した。開発した移動ベースは、SSRの安全を確保しつつ走行移動機能への役割を果たしている。

鉄鋼壁面走行ロボットの開発

Wall Climbing Robot for Steel Structures

● 衛 藤 晴 彦* 蔡 麗 佳* 村 野 賢 一* 坂 井 郁 也*
Haruhiko ETO Lijia CAI Kenichi MURANO Yuya SAKAI



図 1 壁面走行ロボット原理実証機および活用イメージ
Proof-of-concept of wall climbing robot and application examples

本報では、曲面形状への適応性を有する磁気吸着型の鉄鋼壁面走行ロボットとその活用例について報告する。当社は、さまざまな曲面上での走行を実現すべく2つの回転軸によって回転可能な磁石を内蔵した球殻状の車輪を開発した。この機構により磁石は車輪内部で回転し、曲面形状に影響されず常に接地面に対して最大の磁気吸着力が作用するように自身の方向を自己調整する。さらにロボットは非弾性サスペンションを有し、曲面上での4輪接地および吸着が実現する。本ロボットによって点検、切断および溶接など、従来は人手によって行われていた大型鉄鋼構造物上の各種作業の自動化が期待される。

This article presents a wheeled wall-climbing robot with a shape-adaptive magnetic adhesion mechanism for large steel structures. To travel on various curved ferromagnetic surfaces, we developed an adaptive mechanism for each wheel in which the magnet rotates in two directions along the spherical inner surface of the wheel. This mechanism allows the magnet to keep the maximum magnetic adhesive force towards the contact surface. The robot also has a non-elastic suspension mechanism to find each contact point for four wheels on curved walls. The robot will provide novel automation solutions to hazardous manual processes on large steel structures, such as inspection, cutting, and welding. These application technologies have also been developed, and some examples are demonstrated here.

1 まえがき

当社は、船舶に代表される大型の鉄鋼構造物を製造しており、これら製品群の製造現場において、作業効率と安全性を高めることを目的とした改善に継続的に取り組んでいる。大型鉄鋼構造物の製造現場における特徴として、加工対象の部材一つ一つが巨大なことから、それらを組み上げていく過程で必然的に高所作業が発生することが挙げられる。このような環境では加工作業の対象となる領域に装置を設置することが容易ではない。加えて、溶接に代表される複雑で高度な職人技能を必要とする作業は自動化が困難とされ、いまだ人手に頼らざるを得ない箇所が数多く存在する。しかしながら少

子高齢化・人口減少に伴って労働人口は年々減少しており⁽¹⁾、大型構造物の製造現場においても産業一般の動向に従って自動化を推進するとともに、継続的に技能者人材を確保していく必要がある。たとえば造船分野においては、他産業との人材獲得の激化が想定されるなか、自動化技術やアシスト技術、ICT技術の活用によって作業者の負担が軽減された職場を実現することが確保可能な人材の裾野を拡大することにつながると考えられている⁽²⁾。

アーク溶接、ガウジング、切断、研磨、ブラスト、清掃および点検といった多様な作業を行える手軽な高所作業機械は現状では存在せず、職人が足場や部材の上で手作業により実行するほか手立てがない。たとえば多関節ロボットアームは

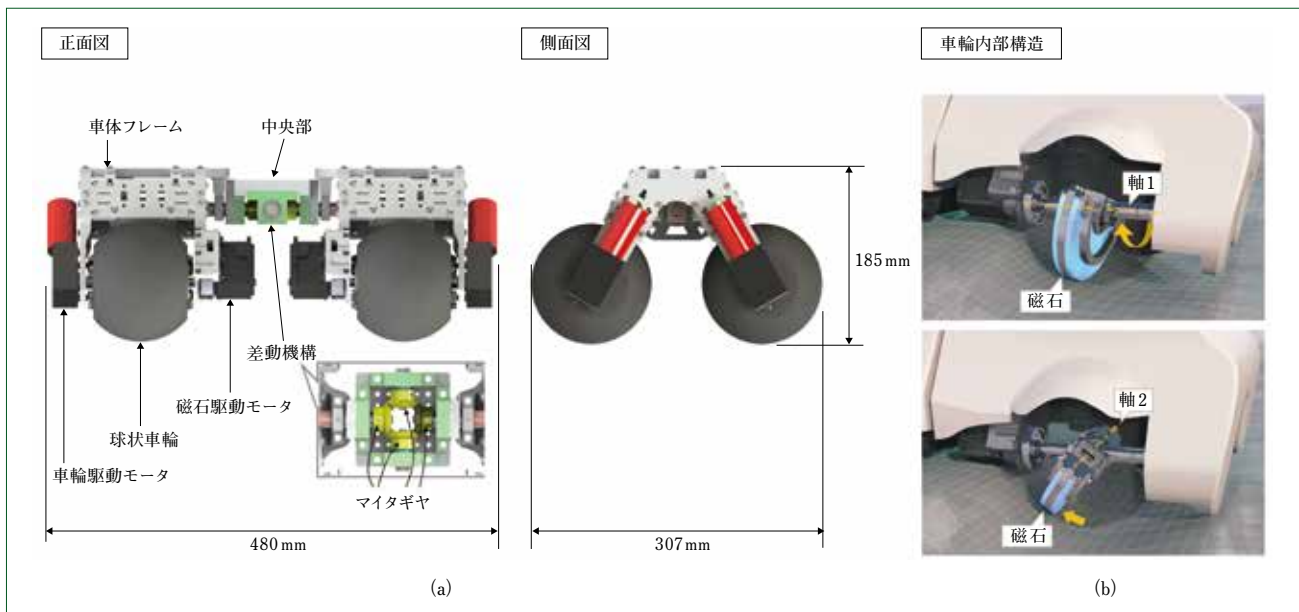


図2 原理実証機の構成
Structure of the proof-of-concept robot

一般的にさまざまな作業に適用し得るが、作業場所が高所でさらに曲面となると設置が困難となり、リーチや自重を考慮すると臨機応変に活用することは難しい。近年普及が進むマルチコプターは空撮などの高所点検作業には有効であるものの、対象からの反力を伴う加工作業を高い位置精度で行うには不適當である。その一方で、壁面での作業用に、何らかの方法で壁面に吸着して移動する機械がこれまでに数多く考案されてきた⁽³⁾。鉄鋼構造物に対しては、磁力を用いることで強力な吸着力を実現できることから、永久磁石または電磁石を有するさまざまな車輪ロボットが提案されている。しかしながら従来の磁気吸着型車輪ロボットは曲面への適応性を持たないか、特定の曲面形状に特化した構造であることから曲面での活用が限定的であった。たとえば、ロボットを小型にすれば走行領域はロボットサイズに対して相対的に平面であるとみなせるので、曲面上の走行は可能となるものの、小型ゆえに溶接トーチなどの作業ツールの搭載が困難となってしまう⁽⁴⁾⁽⁵⁾。また、車輪や車体腹部に単純に磁石を埋め込む従来の機構では、走行面の形状に応じて磁石と面との距離が変わり、吸着力の強弱が変動する。このことに加え、吸着力の方向が変更できないことから、床と天井といった2つの面の隅部を乗り越えることができない。さらに永久磁石を用いる場合は、吸着面から離脱させる方法に工夫が必要となる。車輪の代わりに脚を採用すれば、曲面や隅部への適応が可能となるが、制御の複雑さやエネルギー効率の悪さといった欠点がある⁽⁶⁾。

当社は、大型鉄鋼構造物の製造現場における作業の自動化を目的として、曲面適応性を含む優れた踏破能力を有する磁気吸着型車輪ロボットを開発した。本報では、従来ロボットの課題を克服した新たな機構とその原理実証を中心に、開発への取り組みについて紹介する。

2 鉄鋼面走行機構

2.1 構成と動作原理

図1にロボット原理実証機の外観を、図2に構成を示す。ロボットは4つの球殻状車輪と、走行方向に対して左右に分割されて互いにピッチング方向へ回動可能な車体から成る(図2(a))。車体の回動構造はロッカー機構と呼ばれ、非弾性的なサスペンションとしての役割を担う⁽⁷⁾⁽⁸⁾。壁面上の作業においてはロボットに作用する重力が作業姿勢によって変化し得ることから、弾性要素を用いたサスペンションでは予測できない車体の変形や振動が懸念される。この特性は溶接などの作業ツールの位置精度が要求されるアプリケーションに対して望ましくない。これに対して非弾性サスペンションであるロッカー機構であれば、変形時の車体各部の姿勢が運動学によって一意に定まり、弾性要素に起因する振動も生じない。ロッカー機構による車体の変形と球形の車輪により、任意の曲面において4輪接地が実現する点が、本ロボットの一つ目の特長である。

図2(b)に示すように、車輪内部は空洞となっており、ネオジウム磁石によって構成された磁石ユニットが内蔵されている。この磁石ユニットは、車輪の回転から独立して車軸(図2(b)の軸1)とそれに直交した軸(図2(b)の軸2)周りの2方向に受動回転できるようになっている。磁石ユニットの方向は、走行面との間に発生する磁力に引かれて走行面を向くように受動的に調整される。任意の曲面において、車輪表面の接触点の位置は各車輪で異なるが、車輪内部の磁石ユニットの方向が自己調整されることで、各車輪の接触面に対して同一の吸着力が発生することとなる。車軸方向の回転は、外部に取り付けられたサーボモータによって能動的に制御することもでき、必要に応じて磁石ユニットの方向を変更することが可能である。吸着状態にあるロボットを走行面から離

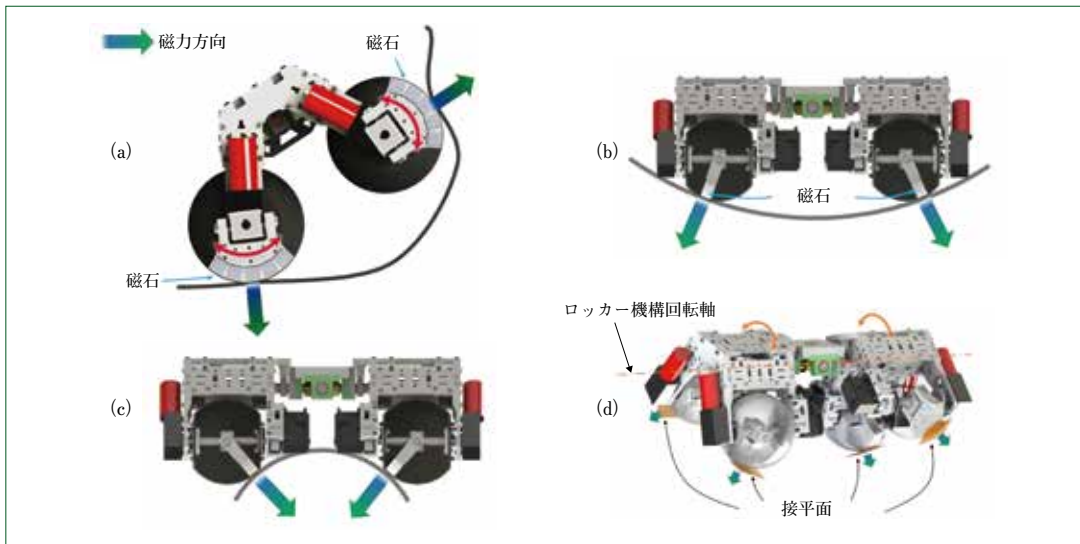


図3 壁面形状適応性
Wall shape adaptability

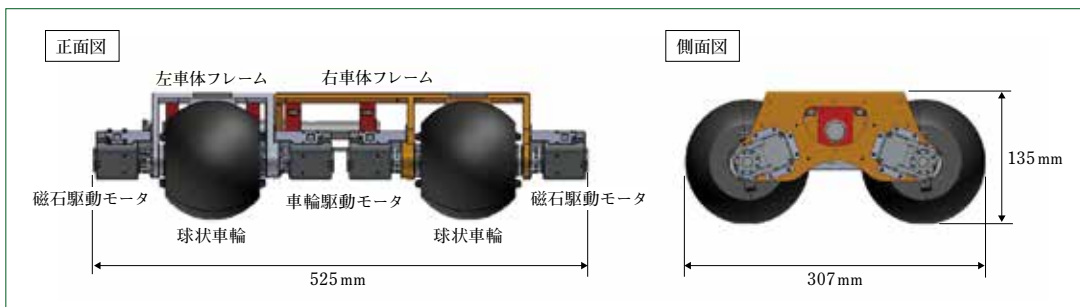


図4 アプリケーション開発機
Improved version for application development

脱させる場合、磁石ユニットをモータで強制的に回転させて走行面の反対方向に向けることで、吸着力を無効化できる。逆に吸着対象の面を向くように磁石ユニットを回転させれば、吸着状態が実現する。吸着後、磁石ユニットは磁力によって面の方向に固定されるので、モータの出力トルクをゼロとすれば、磁石ユニットの方向は磁力によって自己調整される。このように、磁石ユニットの方向を能動的にも受動的にも変更可能な点が二つ目の特長である。

これらの機構的特長によって、さまざまな面形状に適応した吸着が可能となる。図3 (a)に、進行方向の曲率がランダムに変化する例を示す。面に対する車体の姿勢角度は場所によって変化するが、磁石ユニットは常に面の方向に維持される。図3 (b)および図3 (c)は、それぞれ車体横方向の凹曲面と凸曲面に吸着する例を示している。図3 (d)は、自由曲面の例である。図示するように、車体の変形によって4輪とも曲面に接触し、各磁石ユニットはそれぞれの接平面の法線方向に沿ってすべて異なる方向を向いている。

本開発では、提案機構が成立することを検証すべく原理実証機(図1, 図2)を試作的に製作し、その後、具体的な作業への適用を検討することを目的としてアプリケーション開発機(図4)を製作した。アプリケーション開発機では、作業ツールの搭載を考慮して構造の単純化、左右車体サイズの非

対称化、車体の堅牢化、低重心化、磁気吸着力の増強といった各種の改良がなされている。アプリケーション開発機の重量は10kgであり、人手による運搬も容易な設計としている。

2.2 磁気吸着球状車輪

図5に、車輪の断面図を示す。車輪は外表面をEPDMゴムとした超々ジュラルミン製であり、外直径127mmの球殻形状をしている。車輪の左右両側にはそれぞれサーボモータが接続されている。片方は車輪駆動用のモータであり、車体に対して両持ち回転支持された車輪を駆動し、車体と接地面間の相対運動を生成する。もう片方は磁石駆動用のモータであり、車輪内に軸受を介して両持ち支持されたシャフトを車体に対して相対回転させる。この磁石駆動用シャフトは図2 (b)で示した軸1と同一であり、磁石ユニットと一体で回転するように連結されているが、軸受によって車輪からは独立して回転する。磁石ユニットはシャフトに直交したもう一つの自由回転軸を持ち、振り子状に揺動する。この自由回転軸は図2 (b)の軸2と同一である。

磁石ユニットは扇形のネオジウム磁石を複数組み合わせた半円形状となっている。走行面との間に強力な磁力を生じさせるべく、個々の磁石がHalbach配列⁽⁹⁾をなすように配置されている。原理実証機の吸着力は4輪全体で190.4Nであったが、アプリケーション開発機では磁場解析シミュレーションを活

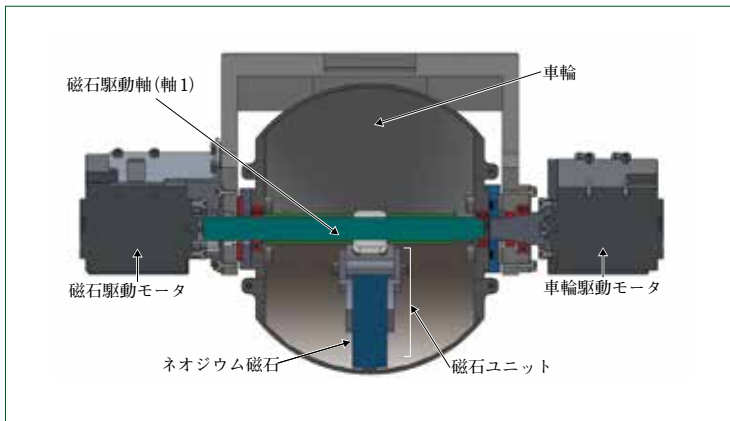


図5 球状車輪の断面図
Cross-sectional view of magnetic spherical wheel

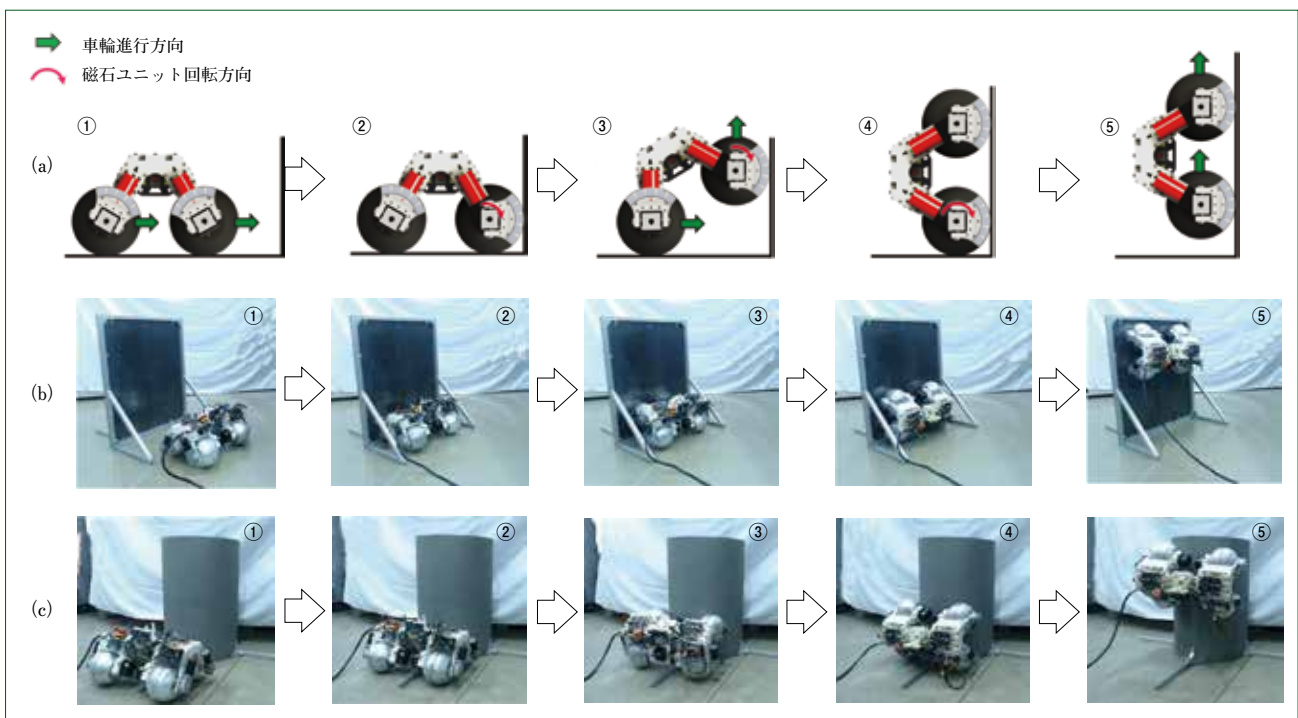


図6 床面と壁面間の昇降動作
Climbing between the ground and a vertical wall

用した磁石ユニットの設計改良によって、同径の車輪で843.4N(1車輪当たり210.8N)の吸着力を実現している。一般的な鋼材と車輪外皮との摩擦係数が0.8で、ロボット重量が10kgであることから、理想的な条件下では自重に加えて最大58.8kgの重量物を載せた状態で垂直面を昇降可能である。磁力の大きさは走行面から磁石ユニットまでの距離に影響を受けるので、この距離に相当する車輪球殻の肉厚はできる限り薄くすることが望ましい。肉厚の数値は、磁力と車輪強度を両立させるように磁場解析シミュレーションと構造解析シミュレーションを用いて決定した。

磁石駆動用のモータには、磁力によって発生するトルクに対してバックドライブであることと、吸着状態にある磁石ユニットを強制的に回転させるトルクを発揮できることが求められる。モータ減速機および磁石ユニットの回転摩擦トルクは1.7Nmであるが、吸着状態(走行面に対して磁石ユニット

が垂直である状態)から磁石ユニットが 8° 以上ずれると磁力によるトルクが摩擦トルクを上回る。したがって磁石ユニットに対して走行面の方向が変化する場合、磁力によるトルクで磁石ユニットは回転し走行面を追従する。一方、磁石ユニットの吸着状態からの角度ズレが 40° となるときに磁力起因のトルクは最大値5.8Nmに達する。この値以上のトルクを十分な余裕を持って出力可能なモータを磁石駆動用に選定した。これにより吸着状態にある磁石を強制的に回転させ、走行面から引き剥がすことができる。

3 動作試験

原理実証機を用いて、必要とされるロボットの諸動作が実現可能であることを確認した。

3.1 床と壁面間の昇降

図6(a)に、床面から垂直壁面に移行する際の動作順序を



図7 円筒面上の旋回動作
Turning on a cylindrical wall

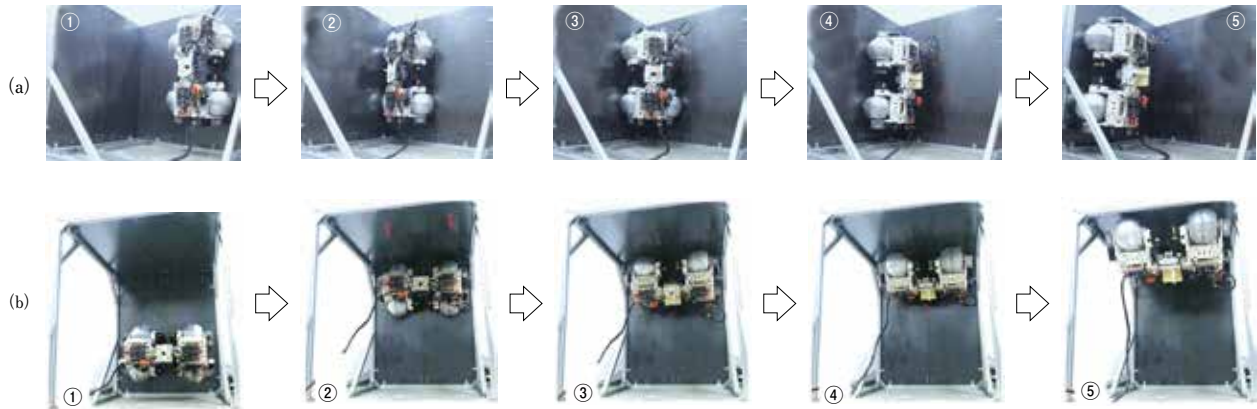


図8 面間の乗り移り動作
Climbing over a corner between two walls

示す。水平面上であれば走行面への吸着は不要なことから、磁石ユニットは車体側を向いている(図6(a)①)。車体が壁面に接近して前輪が壁面に接触すると、前輪の磁石ユニットを壁面に向けて吸着させる(図6(a)②)。その後、前輪は壁面上昇し、後輪は壁面に接近する(図6(a)③)。後輪が壁面に接触すると、後輪の磁石ユニットを壁面に向け(図6(a)④)、全車輪が吸着した状態で壁面を走行する(図6(a)⑤)。この動作順序を逆に実行すれば、壁面から床への降下が可能である。

図6(b)に床から垂直壁面への上昇動作を水平面に対して実施した場合を、図6(c)に円筒面に対して実施した場合を示す。磁石ユニットの能動的な方向変更による吸着状態の切替えと、受動的な方向の自己調整が有効に作用した結果、いずれの場合も上昇動作を実現している。特に円筒面に対しては、車軸に直交する軸の自由回転が生かされており、車輪内部で磁石ユニットが2方向に回転するという機構上の特長が発揮されている。図6では省略しているが、平面と円筒面のいずれの場合も逆の動作手順によって壁面から床へ降下し、磁石ユニットの回転により吸着を無効化して壁面から離脱することが可能である。

3.2 円筒面上の旋回

円筒面上の旋回動作は、車体が4輪である場合、サスペンションなしには達成し得ない。図7に、円筒面上における旋回動作の様子を示す。旋回中にロッカー機構によって左右の車体が互いに回転している様子が見取れる。球状車輪の吸着機構に加えて、車体の変形機構によって所望の動作を実現している。

3.3 面間の乗り移り

図8に、吸着方向を切り替えて面間を移行する様子を示す。壁面または天井において落下することなく異なる面に移り移っている点が、3.1で示した床と壁面との昇降動作と異なることに注意されたい。図8(a)では、垂直壁面から垂直壁面へ移動する様子を示している。移動先の面に前輪が接した際に、前輪の磁石ユニットの方向を左右同時に変更するのではなく、片方ずつ順番に磁石ユニットを回転させ、吸着対象を移動先の面に変更している(図8(a)②、③)。後輪も同様に磁石ユニットを制御することで乗り移り動作を実現している。磁力の方向を変更する際、磁石ユニットはそれまで吸着していた面から回転によって離脱することになるが、このとき最低3輪の吸着状態を維持しておくことで自重を支え、車体の落下を防いでいる。図8(b)に、垂直壁面から天井へ乗り移る動作を示す。壁面間の移行と同様の方法で各車輪の吸着対象の面を変更し、面間の移動を達成した。逆の手順によって、天井から壁面へ帰還することも可能である。

4 活用例

開発した機構により、多彩な走行動作が実現可能であることを3章までに示した。ロボットに各種作業ツールを搭載すれば、目的に応じた作業を実現できる。原理実証機の形態ではロボットにカメラが搭載されており、高所の映像撮影が行える。図1の高所点検イメージのように、センサを用いて走行面の表面状態の観察・計測などが行え、点検業務に活用できる。図9(a)には、プラズマ切断トーチを搭載して鋼管を

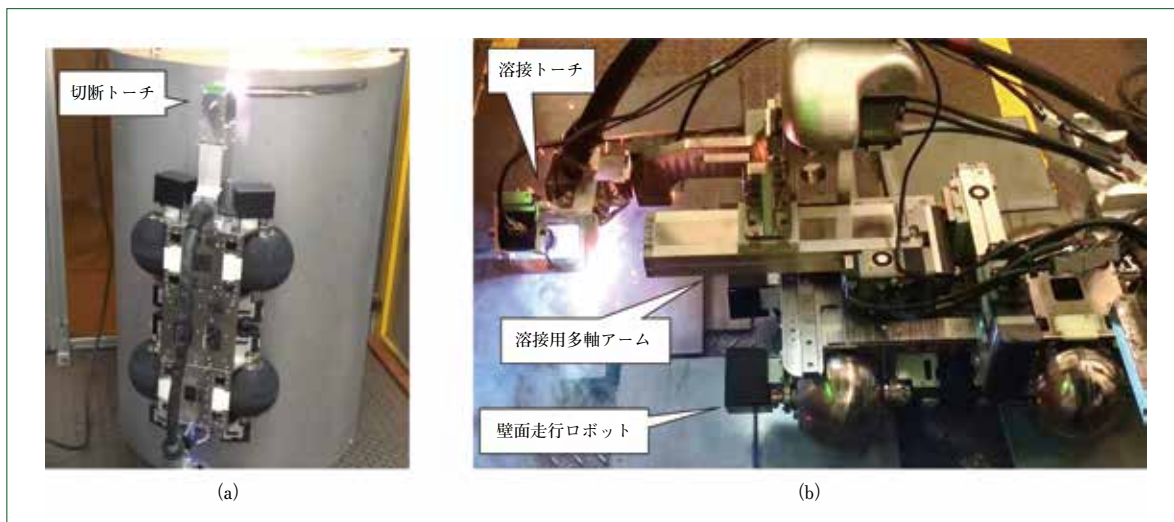


図9 加工ツール搭載例
Application examples

切断している様子を示しており、小型～大型構造物の切断加工および解体への活用が期待される。配管向けの台車型切断装置はガイドを必要とするものが一般的であるが、本ロボットを用いればその高い機動力を生かして、ガイドを用いることなく任意の線に沿った切断を行える。図9(b)に、溶接用途での形態例を示す。当社では、移動ロボットに搭載可能な多軸アームと、画像処理技術と深層学習技術を活用した溶接センシングおよび制御手法からなる自動溶接システムの開発に取り組んでおり、図1の溶接イメージのように、壁面走行ロボットと組み合わせた製造現場への適用を構想している。

5 むすび

- (1) 本報では、大型鉄鋼構造物の製造現場で必要とされる高所作業を念頭に、曲面形状の鋼板上を走行可能なロボット機構の開発について紹介した。
- (2) 本ロボットは、内蔵された永久磁石ユニットが自在に回転する球殻状車輪と、左右に分割された車体が自由にねじれる非弾性サスペンションという機構の特長によって、曲面形状に適応した吸着走行を行うとともに、面間の乗り越え動作も可能であることを確認した。
- (3) ロボットにさまざまな種類の作業ツールを搭載することで、目的に応じた作業が実行可能であることを事例とともに示した。

(参考文献)

- (1) 国立社会保障・人口問題研究所, 日本の将来推計人口(平成29年推計)報告書, 2017.
- (2) 国土交通省:造船業・海洋産業における人材確保・育成方策に関する検討会, 第5回検討会資料2-2 人材関係施策の取組み状況, 今後の計画, 2017.
- (3) M. F. Silva, J. A. T. Machado and J. K. Tar, A Survey of Technologies for Climbing Robots Adhesion to Surfaces, 2008 IEEE International Conference on Computational Cybernetics, 2008, pp. 127-132, doi: 10.1109/ICCCYB. 2008. 4721392.
- (4) F. Tâche et al., MagneBike: Compact magnetic wheeled robot for power plant inspection, 2010 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry, 2010, pp.1-2, doi: 10.1109/CARPI. 2010. 5624442.
- (5) M. Tavakoli, C. Viegas, L. Marques, J. N. Pires and A. T. de Almeida, Magnetic omnidirectional wheels for climbing robots, 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2013, pp.266-271, doi: 10.1109/IROS.2013.6696363.
- (6) M. Armada, P. G. De Santos, M. A. Jiménez, and M. Prieto, Application of CLAWAR machines, The International Journal of Robotics Research, vol.22, no.3-4, pp.251-264, 2003.
- (7) J. Purvis and P. Klarer. Ratler: Robotic all terrain lunar exploration rover. In Proceedings of the Sixth Annual Space Operations, Applications, and Research Symposium. Johnson Space Center, Houston TX, 1994.
- (8) D. Wettergreen, S. Moreland, K. Skonieczny, D. Jonak, D. Kohanbash, and J. Teza, Design and field experimentation of a prototype lunar prospector, The International Journal of Robotics Research, vol.29, no.12, pp.1550-1564, 2010.
- (9) K. Halbach, Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material, Nuclear Instruments and Methods, Volume 169, Issue 1, 1980.

ギヤボックスの塗装自動化開発

Development of Automated Coating for Gear-Box

●山下 雄大*
Yudai YAMASHITA

山田 祐一郎**
Yuichiro YAMADA

田畑 翔**
Kakeru TABATA



ギヤボックスと塗装装置
Gear-Box and coating machine



近年、塗装工程では、作業者の健康阻害対策および品質安定、生産性向上の観点から自動化が求められている。しかし、ギヤボックスのように多品種かつ凹凸がある複雑形状品では、塗装状態のコントロールが困難であることから作業者による手塗り塗装が主流となっている。塗装工程の自動化には、感覚的に行われている品質評価基準の定量化および適正なパラメータ設定が必要である。そこで、測定器を用いて塗装状態を測定し、官能評価結果と比較することで品質評価基準の定量化を実施した。また、塗装状態をシミュレーションし、多軸ロボットを用いた塗装検証結果から適正な塗装パラメータを決定した。さらに、そのパラメータを塗装軌道に適用することで、塗装品質要件を満たすことを検証した。この結果、ギヤボックスの塗装工程が自動化され、塗装時間は手塗り作業と比較して半分以下に大幅に短縮されることが分かった。

In the coating process, the automation of work is required, from the viewpoint of measures to health problems of workers, quality stability, and productivity improvement. However complex-shaped products (such as gearboxes, which has a wide variety and uneven parts) is difficult to control the coating state, that's why, manual coating has been the mainstream. In order to automate the coating process, it is necessary to quantify the quality evaluation criteria that are performed with sense, and to set appropriate parameters. At first the quality evaluation criteria had been quantified as the result of coating film condition measurement and comparing it with the sensory evaluation. Next the coating condition had been simulated, and the appropriate coating parameters had been determined with the application to a multi-axis robot. And, it verified that the coating quality requirements were satisfied by applying these parameters to the coating trajectory. As a result, automating the coating process for the gearbox can make the time reduced to less than half, compared with the hand coating.

1 まえがき

近年、環境保全や健康阻害リスク低減の観点から揮発性有機化合物(VOC: Volatile Organic Compounds)の排出削減の取組みが進められている。塗装はVOC排出量の占める割合が高い発生源の一つに挙げられており、自動化によるVOC環境下での人作業の削減と、作業効率の高い条件でのVOC自体の排出削減が求められている。しかし、ギヤボックスのような多品種で凹凸がある複雑形状品を産業用ロボットで自動塗装

を行う場合、品種ごとのティーチングが必要となり、工数が増大する。また、塗装品質を満たす塗装パラメータの把握が困難であることから人による手塗りが主流となっている。

塗装工程の自動化には、感覚的に行われている品質評価基準の定量化および適正なパラメータ設定が必要である。そこで、まずは測定器で塗装状態を測定し、塗装不良の発生領域を把握して塗装不良と測定値の紐づけを行った。次に、塗装不良に対してロバスト性と塗着効率を向上させる適正条件を選定すべく塗装パラメータを変化させて基礎実験を実施した。

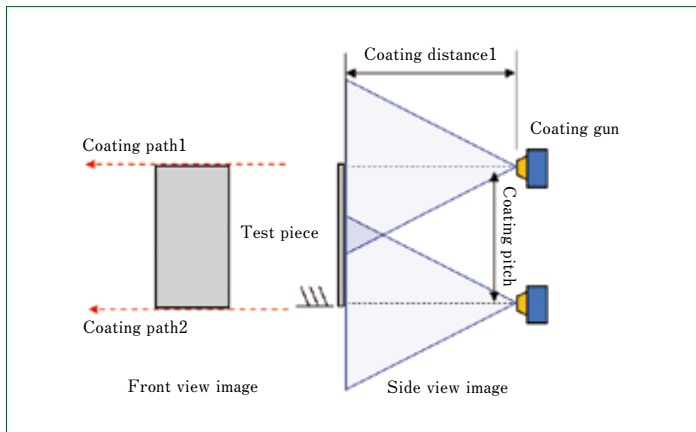


図1 塗装動作①
Coating operation①

表1 塗装条件(塗装動作①)
Coating conditions (coating operation①)

Test piece (mm)	SPCC (150 × 200 × 0.8)
Coating distance (mm)	200
Coating pitch (mm)	150
Number of coating	1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 11, 12, 13, 14, 15

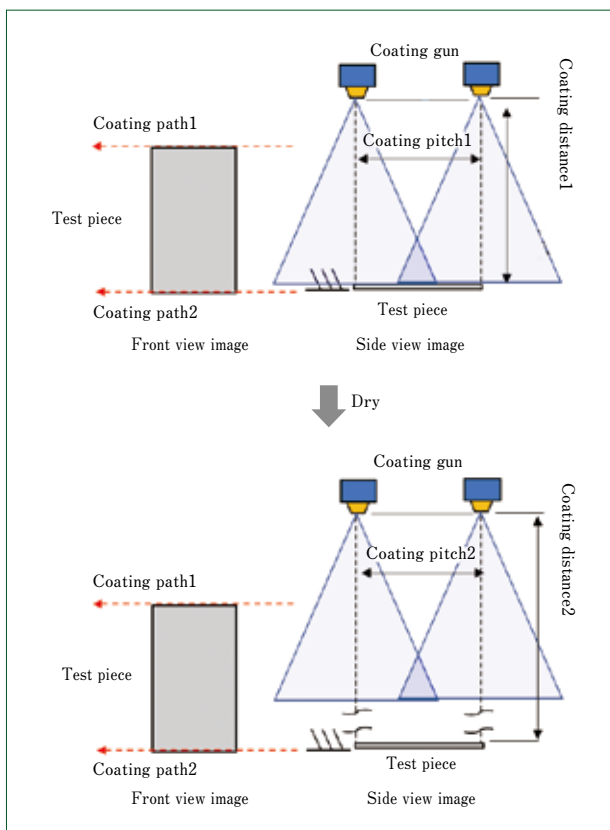


図2 塗装動作②
Coating operation②

表2 塗装条件(塗装動作②)
Coating conditions (coating operation②)

	Test piece (mm)	SPCC (150 × 200 × 0.8)
Pattern②-1	Coating distance1 (mm)	200
	Coating pitch1 (mm)	150
	Number of coating	6
	Dry time (s)	0, 15, 30, 60, 120, 180, 240, 300
Pattern②-2	Coating distance2 (mm)	450
	Coating pitch2 (mm)	150
	Number of coating	2

さらに、基礎実験で得られた測定値をもとに塗装状態の事前シミュレーションを行い、選定した条件を塗装軌道に適用して実機での塗装状態を確認検証した。

2 塗装不良と測定値の紐づけ

2.1 試験条件

図1に塗装動作①を、表1にその塗装条件を示す。塗装動作①では、塗装不良(地肌が見える「透け」や、塗料が垂れ落ちる「垂れ」の状態)が確認できるように地面と垂直に設置した試験材に150mm間隔のピッチ塗装を指定回数行った。

図2に塗装動作②を、表2にその塗装条件を示す。塗装動

作②では、塗装不良(塗面がゆずの皮のようにでこぼこになる「ゆず肌」の状態)が確認できるように地面と水平に設置した試験材に150mm間隔で4回ピッチ塗装をした後、指定時間乾燥させ、さらに塗装ガン距離を変更してピッチ塗装を行った。塗装後の状態は膜厚計LZ-990 (KETT製)と光沢計IG-320 (HORIBA製)を用いて塗装面を複数回測定し、定量評価を行った。また、膜厚の平均測定値から相関係数 R^2 を算出した。

2.2 試験結果

図3に、塗装動作①の塗装回数別での膜厚、光沢の箱ひげ図と目視検査の結果を示す。目視検査では、塗装回数が3回

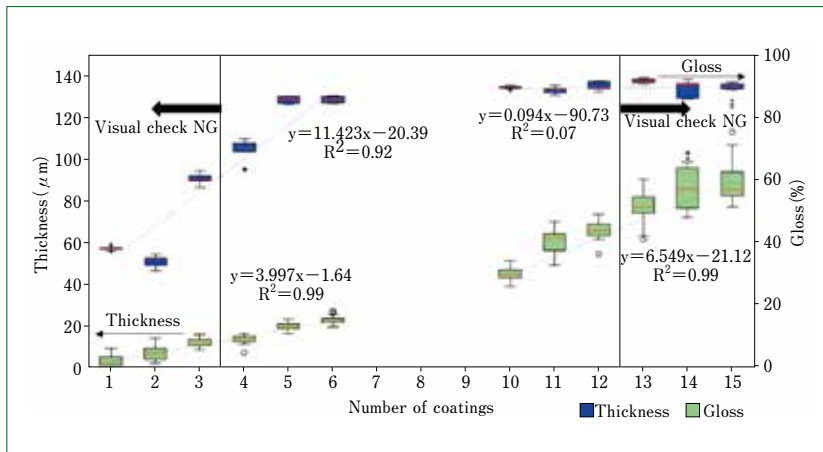


図3 膜厚・光沢測定結果(塗装動作①)
Thickness/gloss measurement results (Coating operation①)

表3 塗装条件(霧化圧およびパターン圧の影響)
Coating conditions (effect of atomization pressure and pattern pressure)

Test piece (mm)	SPCC (400×200×0.8)
Coating distance (mm)	200
Coating pitch (mm)	—
Number of coating	4
Atomize air pressure (MPa)	0.10, 0.15, 0.20
Pattern air pressure (MPa)	0.10, 0.15, 0.20

表4 塗装条件(霧化圧, パターン圧およびノズルの影響)
Coating conditions (effect of atomization pressure, pattern pressure and nozzle)

Test piece (mm)	SPCC (400 × 200 × 0.8)
Coating distance (mm)	200
Coating pitch (mm)	—
Number of coating	4
Atomize air pressure (MPa)	0.10, 0.15, 0.20
Pattern air pressure (MPa)	0.10, 0.15, 0.20
Nozzel diameter (mm)	1.1, 1.4, 1.6

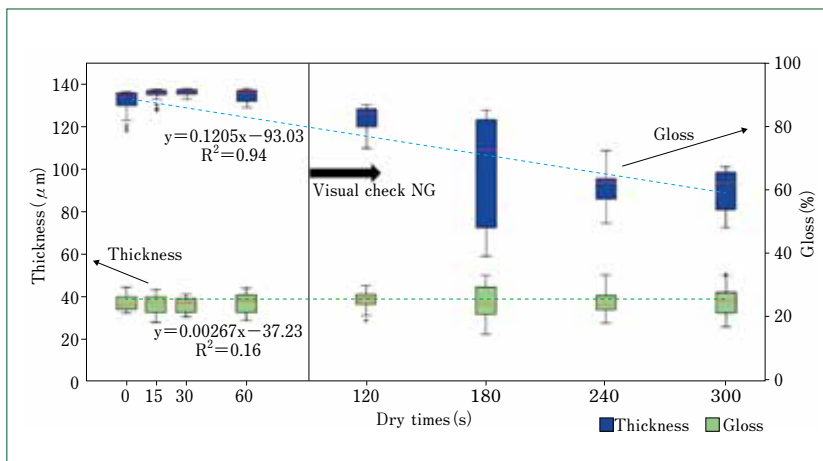


図4 膜厚・光沢測定結果(塗装動作②)
Thickness/gloss measurement results (Coating operation②)

以下の場合、試験材の下地状態が塗膜面で覆い隠せずには透けてしまう塗装不良「透け」判定となり、13回以上では塗膜面が波打ち、塗膜が局部的に厚くなり下方に垂れたことから塗装不良「垂れ」判定となった。図3から塗装回数が増すにつれて膜厚(Thickness)が上昇することが分かる。塗装回数と平均膜厚の相関係数 R^2 は1～6回、10～15回ともに0.99とかなり高い相関を持つ。光沢(Gloss)は6回程度までは塗装回数が増えるにつれて上昇し、その後飽和する。塗装回数と平均光沢の相関係数 R^2 は1～6回で0.92と高い相関を持つが、10～15回では0.09と相関がないことが分かる。このことから、塗装不良「透け」は膜厚と光沢による定量評価が可能であり、合格品のMIN値から膜厚 $17.2\mu\text{m}$ 、光沢60.8%以下で不良判定となることが分かった。また、塗装不良「垂れ」は膜厚によって定量評価でき、合格品のMAX値より $73.5\mu\text{m}$ 以上で不良と数値判定できる。

図4に、塗装動作②の乾燥時間別での膜厚、光沢の箱ひげ図と目視結果を示す。乾燥時間が120秒以上では、目視検査で塗装面の凹凸が分かり、表面がざらつく塗装不良「ゆず肌」となった。乾燥時間と平均膜厚の相関係数 R^2 は0.16で相関は

見られない。しかし、乾燥時間と平均光沢の相関係数 R^2 は0.94とかなり高い相関を持ち、乾燥時間が長くなるにつれ光沢が低下していくことが分かる。このことから「ゆず肌」は光沢により定量評価でき、合格品のMIN値から光沢79.0%以下で不良と数値判定できる。また「ゆず肌」は、Orchard⁽¹⁾により導出された式

$$a_t = a_0 \exp \left\{ - \frac{16\pi^4 h^3}{3\lambda_b^4} \int \frac{r}{\eta} dt \right\}$$

a_t : 時間 t における刷毛目の振幅
 a_0 : $t=0$ における刷毛目の振幅
 h : 平均膜厚
 λ_b : 刷毛の波長
 γ : 表面張力
 η : 粘度

で示され、膜厚が大きいほどレベリング(塗装後に塗料が流動して平らで滑らかな塗膜ができる状態)しやすく、「ゆず肌」が形成しにくいことが示されている。しかし、試験からは「ゆず肌」と平均膜厚の相関は見られない。「ゆず肌」は、

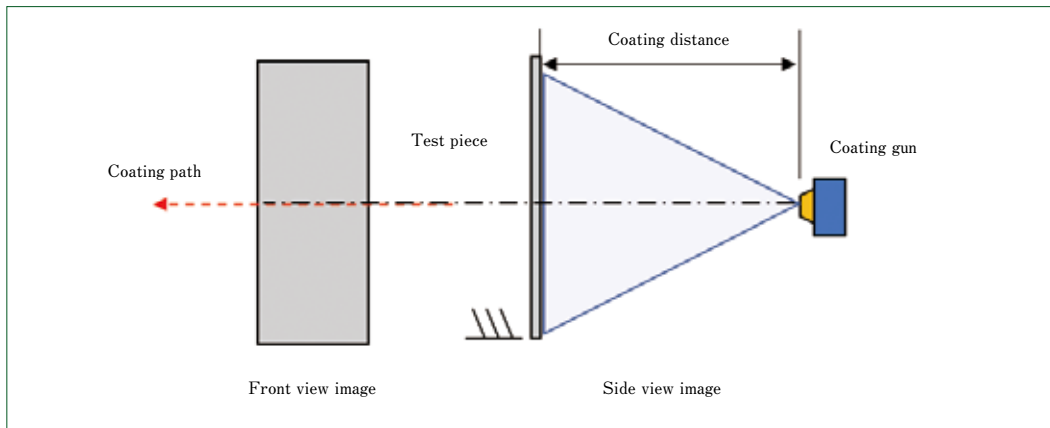


図5 塗装動作
Coating operation

表5 塗装結果(霧化圧およびパターン圧の影響)
Coating result (effect of atomization pressure and pattern pressure)

Atomizing air pressure (MPa)	0.10	←	←	0.15	←	←	0.20	←	←
Pattern air pressure (MPa)	0.10	0.15	0.20	0.10	0.15	0.20	0.10	0.15	0.20
Result	×	×	×	×	×	×	○	○	×
Coating efficiency (%)	16.4	11.9	11.0	16.8	15.5	12.6	19.5	17.3	15.9
Coating width (mm)	70	20	90	80	30	10	110	100	0

乾燥時間が短く塗膜が濡れていると予想される状態では発生しにくいことから、膜厚ではなく塗膜の乾燥状態に影響を受けると考えられる。また、乾燥状態においては「垂れ」とは背反条件となることが予想され「ゆず肌」を抑制するには塗り重ねのインターバル時間を短くし、塗膜が濡れた状態で塗装することが効果的であると考えられる。

3 塗装パラメータ選定

3.1 試験条件

VOC削減や塗装時間の短縮には、高い塗着効率と塗布幅を持つ塗装パラメータを設定する必要がある。そこで、噴霧状態に影響する霧化圧、パターン圧、ノズル径をパラメータとして試験を行った。噴霧状態が確認できるように地面と垂直に設置した試験材の中央を狙い塗装を行った。図5に塗装動作を、表3および表4に塗装条件を示す。塗装状態は、膜厚計LZ-990と光沢計IG-320を用いて塗装面を複数回測定した。塗布幅と塗着効率は次のように定義した。

塗布幅(mm)：塗装膜厚 $10\mu\text{m}$ 以上の幅

塗着効率(%)：(平均膜厚×塗装速度×試験材測定幅)/(単位時間吐出測定量)×100

判定結果から塗着効率と塗布幅の数値判定を×, ○, ◎の3段階で判定した。

×：塗着効率 $< 5\%$ or 塗布幅 $< 100\text{mm}$

○： $10\% > \text{塗着効率} \geq 5\%$ & $150\text{mm} > \text{塗布幅} \geq 100\text{mm}$

◎：塗着効率 $> 10\%$ & 塗布幅 $\geq 150\text{mm}$

3.2 試験結果

表5に、霧化圧とパターン圧を変化させた結果を示す。○判定は霧化圧0.20MPaでパターン圧0.10と0.15MPaのみで、その他の条件では×判定となっている。霧化圧・パターン圧を変化させた試験結果の傾向としては、次の2点が挙げられる。

- ① 霧化圧を上げると塗着効率が上昇する。
- ② パターン圧を上げ過ぎると塗布幅に上昇傾向は見られず、また塗着効率は減少する。

①の原因について考察する。これは、霧化圧を上げることによって噴出時に塗粒に与えられる運動エネルギーが大きくなり、試験材への塗着確率が高くなったと考えられる。よって、霧化圧は高いほど良いと考えられるが、工場設備の上限があることから使用推奨範囲を0.11～0.20MPaと設定した。工場設備の上限は0.20MPaであった。

②について考察する。エアスプレー塗装においては、パターン圧を上げると平均粒子径が減少することが確認されている⁽²⁾。また、霧化圧固定の場合、パターン圧を下げると塗着効率が上昇することからも、パターン圧が大きいと噴出される噴霧の幅が広くなり、塗粒の衝突確率および塗粒サイズが減少し、結果として塗粒の持つ運動エネルギーが低下して塗着効率が下がったと考えられる。したがって、塗布幅をパターン圧で制御するには、パターン圧により広がりを持った塗粒が被塗物まで到達できる運動エネルギーを持つ状態にすることが重要となる。

表6 塗装結果(ノズル径影響)
Coating result (effect of nozzle diameter)

Nozzel diameter (mm)	1.1	←	←	1.4	←	←	1.6	←	←
Pattern air pressure (MPa)	0.10	0.15	0.20	0.10	0.15	0.20	0.10	0.15	0.20
Result	○	○	×	○	○	◎	○	○	◎
Coating efficiency (%)	19.5	17.3	15.9	32.3	29.2	25.4	31.6	28.0	24.6
Coating width (mm)	110	100	0	110	140	160	110	140	160

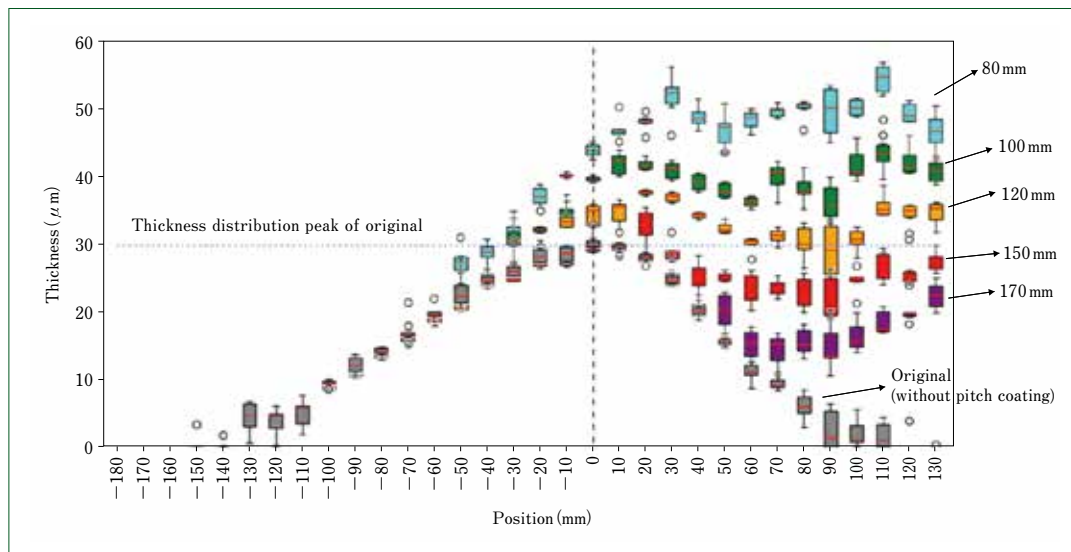


図6 塗装ピッチ影響シミュレーション結果
Coating pitch effect simulation result

ノズル径を今回使用した1.1mmから拡大し、塗料供給経路の圧損を低減することにより噴出時の吐出量が増加し、塗粒の衝突確率を上げることができると考えられることから、ノズル径を変更して塗装検証を実施した。

表6に、ノズル径を変更した塗装結果を示す。直径を拡大したノズルでパターン圧が上がると判定が良好しており、予想どおり塗着効率が上がっていることが分かる。ノズル径別の傾向として次の2点を挙げる。

- ① ノズル径を1.1mmから1.4mm、1.6mmに変更すると塗着効率が良好化する。
- ② ノズル径1.4mmと1.6mmではパターン圧が上がると塗布幅が上昇する。

①の原因について考察する。これには次の2つの要因が考えられる。

- a. 前述のようにノズル径を変更したことにより、ニードルとノズルの最小クリアランスが広がり吐出量が増え、噴出時の塗粒の衝突確率が上がったことで塗着効率が上がった。
- b. 吐出量の増加に対して霧化圧の変動はないので、そもそも微粒化サイズが大きく運動エネルギーが高いことから塗着効率が上がったと考えられる。ここで、ノズル径1.4mmと1.6mmの塗着効率にはほぼ差がない。この

原因を塗装ガンメーカーに確認したところ、ノズル径1.4mmと1.6mmの最小クリアランスがニードルとノズルの途中経路にあり、ほぼ同等であることが挙げられた。

②の原因について考察する。これは、塗着効率の違いによるものと考えられる。ノズル径1.1mmでは、パターン圧を上げ噴霧幅が広がると塗粒の質量が小さくなり、塗膜10μmの塗着を満たせないが、ノズル径1.4mmと1.6mmでは、噴霧幅が広がっても塗粒の質量が大きくなり、塗膜10μmの塗着が可能となる。パターン圧としては、塗着効率は若干下がるが、塗布幅が最も広く◎判定である0.20MPaを選定した。また、ノズル径については1.4mmと1.6mmでは結果にほぼ差はないが、塗料カスによる塗装ガン内の詰まりがより発生しにくいと考えられる1.6mmを選定した。塗布幅としては、0mmが発生したので比較し難いが、塗着効率としては、MIN:11.0%、MAX:32.3%と約3倍もの差となり、適正な条件設定がVOC削減および塗装時間短縮に非常に重要であることが分かる。

3.3 塗装状態シミュレーション

3.2で選定したノズル径1.6mm、霧化圧0.20MPa、パターン圧0.20MPaの膜厚分布を塗装ピッチ分ずらして重ねることにより、塗装ピッチの影響シミュレーションを実施した。図6に、シミュレーション結果を示す。塗装ピッチが比較的小さい

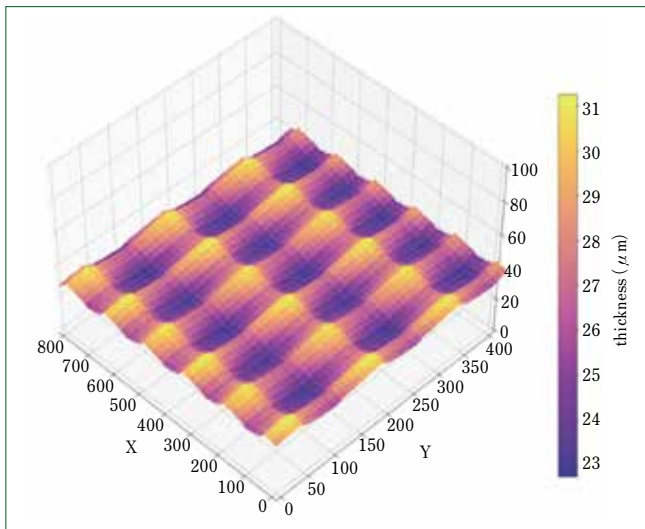


図7 塗り重ね状態シミュレーション結果
Overpainting state simulation result

80mmと100mmでは、Position：0mm付近の元の膜厚分布のピークよりも膜厚としては高くなり、Position：20～30mm以降飽和することが想定される。反対に、塗装ピッチが大きい170mmでは、ピーク後のPosition：60mmあたりで膜厚が低下し、膜厚分布が波打ち始める様子が想定される。

均一膜厚を得るには、飽和し安定した領域での塗布が望ましい。また、塗装対象以外への無駄な塗装を避け塗装時間を短縮するには、塗装ピッチはPosition：0mm付近で飽和し、塗り重ね間隔が大きい100～150mmで選定するべきと考えられる。

実際の塗装軌道での塗装状態を想定すべくX-Y平面の塗装面に対して、X方向に対して塗装ピッチ：150mm、Y方向に対して塗装ピッチ：150mmで進行方向に膜厚分布を積算し、塗装状態をシミュレーションした。図7に、その結果を示す。膜厚分布としては、膜厚MIN：23 μ m、膜厚ピークの重なり部分で膜厚MAX：31 μ mとなっており、全範囲で約20～30 μ mの範囲内に収まることが想定された。

4 実機検証

選定した塗装パラメータをロボットの塗装軌道に適用し、実機にて確認検証を実施した。ティーチング時の作業工数を削減することを目的として、塗装軌道作成にはオフラインティーチングソフトMotoSim(YASUKAWA製)を使用し、PC上で軌道を作成し、ロボットと設備・製品などとの干渉を確認のうえ、実機に軌道をインプットした。図8に、実機での自動塗装結果を示す。図中の表示数値は測定した平均膜厚(μ m)である。右下部分では41 μ mとシミュレーションよりも高い膜厚値となっているが、ほかの部分ではシミュレーション結果の23～31 μ mに対して実機での塗装結果は24～41 μ mとなり、狙いに近い膜厚となった。また、塗装時間も7分40秒と手作業での塗装時間(約20分)に対して大幅な削減となった。

5 むすび

(1) 塗装不良の「透け」「垂れ」「ゆず肌」を測定器により

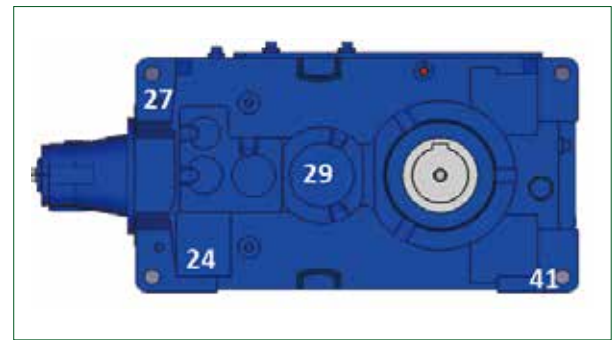


図8 実機塗装結果(表示数値は平均膜厚値(μ m))
Coating result with actual product (displayed value is average thickness value(μ m))

定量評価し、目視判定との相関ならびに発生領域を確認した。

- (2) 乾燥時間と「ゆず肌」の発生結果から、「ゆず肌」を抑制するには塗り重ねのインターバル時間を短くすることが効果的であることを確認した。
- (3) 塗装パラメータ試験から霧化圧、パターン圧、ノズル径の選定方法および適正な条件選定により塗着効率を大幅に改善できることを確認した。
- (4) 塗装ピッチのシミュレーション結果から塗装ピッチによる膜厚分布の傾向を確認し、選定範囲を確認した。
- (5) 実機への自動塗装結果から、自動塗装により狙いに近い膜厚にコントロールでき、手作業よりも塗装時間を大幅に短縮できることが確認できた。

(参考文献)

- (1) S.E.Orchard, J.Appl.Sci.Res., A11, 451, (1962).
- (2) 館和幸, スプレー塗装における塗膜の形成および性状に関する研究, (1997).

シェル&チューブ式熱交換器の管端溶接自動化開発

Development of Automated Tube End Welding for Shell & Tube Heat Exchanger

●花 田 基 洋* 嶋 佑 季**
Motohiro HANADA Yuuki SOWA



新規装置による管端溶接
Tube end welding with new automatic equipment

シェル&チューブ式熱交換器(熱交換器)の管端溶接工程では品質安定、生産性向上、作業負担の軽減などの観点から自動化が望まれており、過去には自動装置を導入していた。しかし頻発する動作停止やメンテナンス性の悪さから現在は使用していない。そこで、新規自動装置の導入を目標に、まず過去の自動装置によって溶接作業を行っていた生産現場に対し、故障原因の調査を行った。その結果、現場での粉塵や環境光の影響を受けやすい位置計測用の光学機器および性能の低い位置決め機構が主な故障原因であると分かった。こうした背景から、環境変動要因に強いタッチセンサと、手溶接で用いる溶接トーチを取り付けた産業用ロボットを組み合わせた新たな溶接自動装置を考案した。そして、本装置のロボット動作および円周溶接の品質を確認し、生産現場への導入に結びつけた。

From the viewpoints of quality stability, productivity improvement, and reduction of operator workload, automation of the tube end welding process for heat exchangers is desired. Although automated machines were introduced in the past, they are not currently in use due to frequent operation stopping and poor maintainability, and manual welding has been used instead. As aiming of introducing a renewed automated machine, we had investigated the cause of failure of the machine introduced in the past. As a result, it was found out that the main cause of failure was improper optical equipment for positional measurement, which was susceptible to dust and ambient light at the work site, and a positioning mechanism with low performance. Therefore, we devised a new automated robotic system that combines with a touch sensor, which is resistant to these environmental factors, and equips with a welding torch conventionally used for manual welding. After confirming the operation of the robotic system and the quality of circumferential welding parts, we introduced this automated welding system in the factory.

1 まえがき

株式会社イズミフードマシナリ(IFM)では、食品の「飲料」や「だし」の製造装置を製造している。この「飲料」や「だし」の製造プロセスは「抽出」「調合」「殺菌」の順に行われており、そのなかの「殺菌」の役割を担っているのが熱交換装置(図1)である。装置に使用されている熱交換器の特長として、連続運転時間が長いこと、洗浄性が高いこと、メンテナンス性が良いことが挙げられる(図2)。

熱交換器の製造において、チューブと管板の接合は古くから困難な問題とされてきた。装置稼働中の繰返し加熱、冷却や振動、腐食などで接合部分に緩みが生じ、長期的に気密性を維持するには拡張のみでは不十分であると認められるようになり、溶接も併せて実施するようになった⁽¹⁾。また、食品の殺菌向けの製造においても、液漏れにより重大な事故が発生する恐れがあることから、一般的には拡張に加えて漏れ止め溶接も行っている。

IFMで製造されている熱交換器のチューブと管板の円周溶



図1 熱交換装置
Heat exchange equipment



図2 熱交換器
Shell & tube heat exchanger

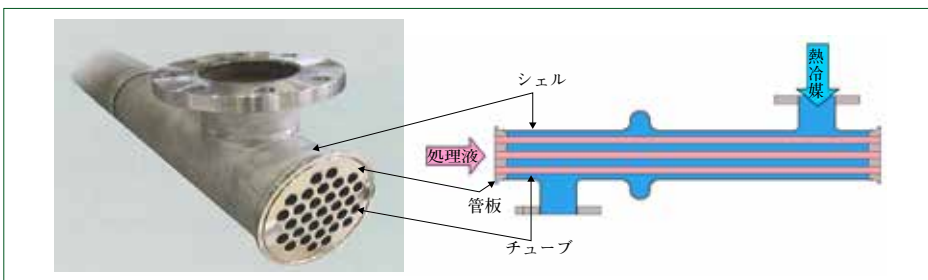


図3 熱交換器の構成
Configuration of Shell-and-tube heat exchanger

接は、 $\phi 12.7\text{ mm}$ もしくは $\phi 15.88\text{ mm}$ と小径であり、これを連続して溶接するには熟練の技術が必要とする。また、穴の個数も最大で100以上あることから作業時間が長くなり、集中力と忍耐力を必要とする。このことから、管端溶接の自動化による作業負担の軽減と品質の安定化が望まれている。

IFMでは過去に自動装置を導入したが、頻発する動作停止やメンテナンス性の悪さから現在は使用していない。本報では、過去の自動装置の問題点と新規装置について紹介する。

2 熱交換器の構成と管端円周溶接機

2.1 構成

図3に、代表的な構成部品を示す。その基本構成は「シェル(胴体部)」「管板」「チューブ(伝熱管)」からなる。シェルの両端に固定された管板には、一定の長さの多数のチューブが管束として拵管や溶接によって接合されている。処理液は送液ポンプにより圧送し、高温と低温の液体がチューブによる隔壁を隔てて別々に流れ、両流体間の隔壁を通して熱の移動が行われる。

2.2 管端溶接とは

熱交換器の管板とチューブを溶接する際に行う円周溶接を管端溶接といい、作業による手溶接か図4に示す溶接機を用いて行うのが一般的である。この管端円周溶接機は、先端部分をチューブに差し込み、爪の先端が管板面に当たるところで固定し、スイッチを押すことで溶接トーチが円周上に動きながら溶接を行う。

3 過去の自動装置概要

3.1 過去の自動装置の駆動部概要

図5に、過去に導入した自動装置の駆動部の概略図を示す。装置はインナーフレームとアウターフレームから構成されている。インナーフレームには直交座標系X-Yの2軸のマニピュレータがある。また、溶接で使用する自動管端円周溶接機と位置決めに使用するカメラなどの光学機器が取り付けられており、これらを自動で所定の位置に移動させる機構となっている。さらに、溶接機にもマニピュレータが取り付けられており、Z軸方向に移動することができる。アウターフレームはインナーフレームをRX-RY方向に手で回転させる機構を持ち、管板面の傾きに合わせてインナーフレームの傾きを調整する機構となっている。

3.2 過去の自動装置の溶接方法と問題点

過去の自動装置の位置決めと自動溶接の方法を説明する。過去の自動装置では、熱交換器設置後、円周溶接を行う際に必要となるチューブの中心位置の座標を取得することを目的として、光学機器であるカメラやオートコリメータ(レーザにより対象物の角度変位を測定する機器)、変位センサを使用している。また、溶接には専用の円周溶接機と溶接電源を使用していた。動作での問題点を次に示す。

- (1) 管板面の傾きに合わせて溶接トーチの傾きを補正すべく管板面の傾きを測定する。測定にはオートコリメータを使用するが、管板面を直接測定できないことから管板

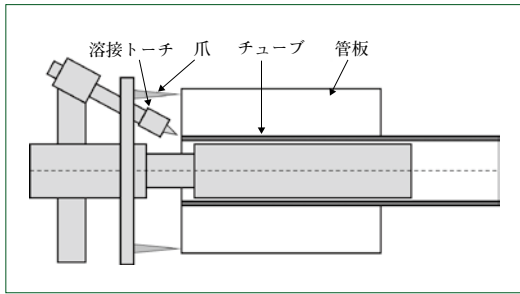


図4 管端円周溶接機
Circumferential welding machine

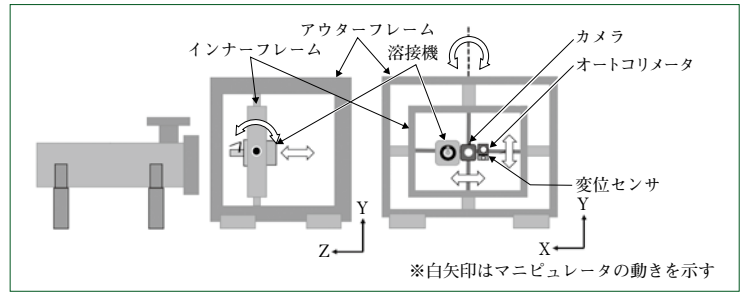


図5 過去の自動装置の駆動部の概略図
Schematic diagram of the drive unit of a past automatic equipment

面に専用のジャケットを装着しなければならず、手間がかかっていた。また、アウターフレームによる傾きの補正は手動で行う必要があり、その際の位置決めは繊細な操作が必要となり時間がかかるだけでなく、位置決めの精度も低いものとなっていた。

- (2) 溶接を行う際の溶接トーチ先端と管板面間の距離を決めるべく管板面との距離を測定する。測定には変位センサを使用するが、管板面は鏡面であることからレーザが正反射してしまい直接の測定が困難であった。反射への対策として、測定のたびに測定箇所レーザの反射防止用シールを貼り付ける必要があり、手間がかかっていた。
- (3) 溶接の際には溶接トーチを溶接位置に移動させるべくチューブの中心位置を測定する。測定にはカメラを使用するが、工場内の天窓や壁窓からの環境光の影響があり、時間帯によっては管板面が光を反射してしまい、位置決めが困難になるケースがあった。また、過去に溶接時のアーク光が、カメラのレンズに当たることによる故障を繰り返していたことから、溶接時はアーク光がレンズに当たらないように、シャッターを設けるなどの対策を講じたが、改善には至らなかった。
- (4) 専用の円周溶接機により円周溶接を行うが、熱交換器の種類によっては溶接機が干渉していた。そこで溶接機の一部を加工して対応していたが、一部では接触を回避しきれず、溶接できない状態となっていた。

3.3 新規自動装置への要求

新規自動装置を開発するに当たり、満足すべき項目を次に挙げる。

環境変動要因への対応については、

- (1) カメラなどの位置計測用のセンサは環境変動に強いセンサを使用する。これは、現場の粉塵、環境光、溶接時のアーク光などの環境変動要因の影響による位置決め精度の悪化や故障への対策としてである。
- (2) 複数のセンサの故障による設備停止が多かったことを考慮してセンサ数を極力少なくし、故障リスクを下げる。

作業性については、

- (1) 熟練作業者が使用している汎用の溶接機と溶接電源を使用する。これは、専用の円周溶接機は熱交換器との干渉問題があったうえ溶接電源の条件設定が難しく、熟練溶接作業者のカン・コツが自動機に反映できなかったことによる。

- (2) 位置決めの繰返し精度が保証されているマニピュレータを使用する。マニピュレータについては、インナーフレームは自動だがアウターフレームは手動での位置決めが必要になり、機構自体が複雑なうえ位置決め精度も悪かった。この問題への対策である。

4 新規装置構想

図6に、3.3の要求を考慮した新規装置の模式図を示す。

- (1) マニピュレータには汎用の多関節ロボットを採用し、ロボットアームの先端には、溶接トーチと位置決め用のタッチセンサを取り付けた。
- (2) タッチセンサは、粉塵に強く環境光や溶接時のアーク光の影響を受けない環境変動要因に強いものを採用した。今まで複数のセンサで行っていた管板面との距離や傾き、チューブ穴位置などの位置計測をタッチセンサのみで行う。
- (3) 管端溶接は専用の溶接機ではなく、溶接トーチを取り付けたロボットで行う。
- (4) 溶接機と溶接電源は、熟練作業者が普段使用しているものと同等品を採用し、溶接電源の条件設定項目も熟練作業者と同様とする。

5 実機検証

5.1 検証条件

タッチセンサによる位置決めと、ロボットによる円周溶接を採用した本装置による溶接試験を行った。試験サンプルは製品と同じ材質(SUS304)・形状の管板とチューブを準備した。溶接条件(ピーク電流、ベース電流、パルス幅、溶接速度、管板面とトーチ間の距離やトーチの角度など)は、熟練作業者の溶接条件と同様としている。試験は、熟練作業者の手溶接と同等の結果が得られたかを確認すべく、溶接後に熟練作業者による目視検査を行い、その後に溶接ビード幅、溶接ビード高さ、溶接後のチューブ内径と接合深さの測定を行った。

5.2 検証結果

図7に、検証結果を示す。

- (1) 溶接ビード幅については、その測定に電子ノギスCD-20CP(ミットヨ製)を使用した。要求値は、円周溶接時に隣の管板穴にビードがかからない幅としている。結果は要求値を満足し、手溶接と同等のビード幅が得られた。

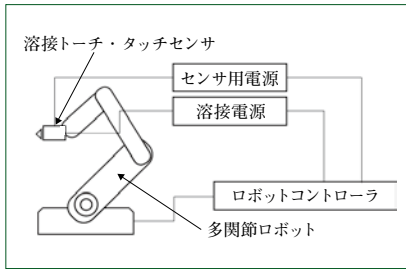


図6 新規装置の模式図
Schematic diagram of new equipment

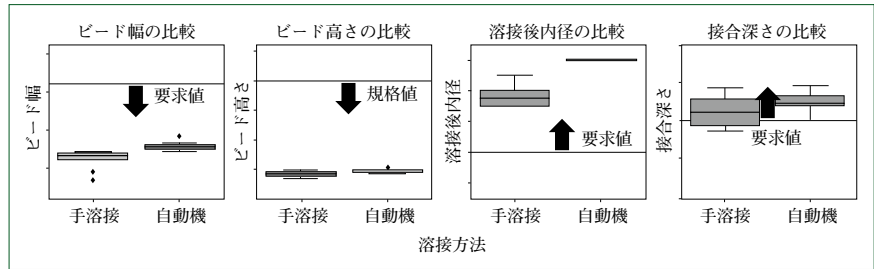


図7 新規装置による円周溶接評価結果
Circumferential welding evaluation results with new equipment

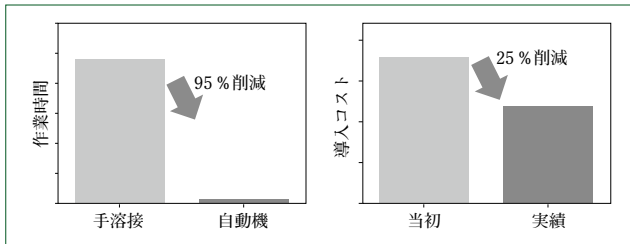


図8 新規装置の導入効果
Introduction effects of new equipment

また、幅のパラツキについては、手溶接よりも良好な結果を得た。これは、タッチセンサによるチューブ穴の中心位置の取得が正確に行われていることと、ロボットによる円周溶接の軌道が、今回の検証においては十分な精度を有していることによると考えられる。

- (2) 溶接ビード高さの測定には電子ノギスCD-20CPを使用した。結果は、規格値を満足し、手溶接と同等のビード高さが得られた。また、高さのパラツキについては、手溶接よりも良好な結果を得た。
- (3) 自動溶接後のチューブについては、後工程の拡管工程においてチューブエキスパンダーを差し込む必要性や、拡管後の研磨工程の作業軽減につながることから、内径が確保できているかを確認しておく必要がある。内径測定には、0.1mm刻みのピンAPSTM(ミスミ製)を用意した。測定は、まずチューブ内径と同じ外径のピンを差し込み、差し込めなかった場合はピンの外径を0.1mmずつ小さくしていき、スムーズに差し込むことができた外径を記録した。結果は、要求値(チューブエキスパンダーを差し込むのに必要な内径)を満足し、平均およびバラツキとも手溶接より優れていることが分かった。また、自動機はすべての溶接後の内径が同一であることから、ロボットの円周溶接の精度の高さが分かった。
- (4) 接合深さについては、測定の際に管板のチューブ穴の中心を通るように管板面に対して垂直に切断し、断面をマイクロスコープSKM-Z200C-PCD(斉藤光学製)を使用して観察した。接合深さは、管板面に対して垂直方向の管板とチューブの接合部の長さであり、チューブと管板の隙間から管板面までの長さとした。要求値は過去の手溶接の実績から算出した。その結果、要求値を満足し、手溶接よりも自動機の方が平均して溶接深さが深いこと

が分かった。要因としては、手溶接と自動機の溶接条件が同様であることから、ロボットの正確な円周溶接軌道により、管板とチューブのわずかな隙間に溶融部が上手く溶け込んでいることが考えられる。

6 導入効果

図8に、自動装置導入による作業者の作業時間と導入コストの削減効果を示す。

作業者の作業時間低減効果については、過去の自動装置の故障により手溶接で実施していた場合と比べ、新規自動装置の導入により溶接作業時間がなくなり、最大で約95%の削減となった。過去の自動装置との比較については、運転準備時間の詳細なデータがなく標準作業時間から推測した結果では、おおむね50%の削減となった。これは、以前は位置計測のたびに所定の作業を行う必要があったことにに対し、新規自動装置ではすべて自動で行えることによる。

導入コスト削減効果については、専用の溶接機や溶接電源、マニピュレータ、位置計測機器を汎用品に置き換えたことで、25%以上の設備費の削減効果が得られた。

7 むすび

- (1) IFMでは、複数のセンサや特殊な機構、専用機の使用で複雑になっていた装置に換えて、ロボットとセンサを用いたシンプルで使い勝手の良い自動装置を導入した。
- (2) 粉塵、環境光、溶接アーク光などの環境変動要因により、現場での長期の使用が難しく作業性が悪かった光学機器によるセンシングを、環境変動要因に強いタッチセンサのみに置き換えることで故障リスクを低減させ、作業性を向上させた。
- (3) 熟練作業者のカン・コツを自動機に織り込むべく専用のマニピュレータを汎用の多関節ロボットに、専用の管端円周溶接機と溶接電源を熟練作業者と同等品に置き換え、熟練作業者と同様の溶接条件を設定することで、手溶接と同等の溶接品質を確認できた。
- (4) 専用の溶接機や溶接電源、マニピュレータ、位置計測機器を汎用品に置き換えることで、導入コストを削減できた。
- (5) 新規自動機の導入により、最大で約95%の作業時間の削減を可能とした。

(参考文献)

- (1) 熱交換器の管と管板の溶接, PP.524-533, 溶接学会誌第30巻第8号, 1961年。

曲面ワークにおけるベルト研磨自動化開発

Development of Automated System for Belt Grinding Process to Curved Work

●向井 郁弥*
Fumiya MUKAI

笹田 康弘**
Yasuhiro SASADA

濱野 史暁**
Fumiaki HAMANO

田畑 嵩奎**
Takafumi TABATA



ベルト研磨自動化システム
Belt grinding automated system

当社の研磨加工現場では人による手作業が多く残っており、近年の労働人口減少問題などの背景から、少なからず自動化が望まれている。そこで、住重フォーGING株式会社が製造している航空機用エンジンブレードを対象としてベルト研磨自動化開発に取り組んだ。本開発では、人の手作業の工程分析をもとに自動化に必要な技術の抽出およびパラメータ化を実施し、基礎的な要素試験などによりベルト研磨自動化システムの現場適用要件について検討した。その結果、独自の押付け機構およびそれに対応した軌道生成アルゴリズムを適用したシステムの構築により、現場適用要件を満足することが分かった。本自動化開発では、最後にシステムの有用性を確認する試験を実施し、人による手作業と同じレベルの品質で研磨できることを示した。現在、生産適用に至っている。

There are still manual works remained at our grinding processing site, even automation of works is popular at many others. But under the background of decline in the labor force population, automation of the works must be desired. So, the automated system for belt grinding processing had been developed, which target was engine blades for aircraft manufactured by Sumijyu Precision Forging Co., Ltd. In this development, technologies required for automation had been selected after analysis of manual processing, the parameters defined and done basic experiments to specify application requirements at the site. As a result, the system which has a unique pressing mechanism and trajectory generation algorithm could be satisfied with the site demand. Finally, tests at the site had been done to confirm its usefulness, and it had been proved to grind as same quality as manual works. Now the system is working at the actual production site.

1 まえがき

近年の労働力人口減少に伴って、日本の製造業は「人手不足の深刻化」という問題に直面しており、その対策として、ロボットなどのデジタルツールを活用した自動化開発が行われている。当社においても、技能者不足および技能伝承などの問題が顕在化しつつあり、この問題解決手段として、6軸ロボットを含む自動化装置の導入がなされてきている。適用事例としては、機械加工装置への加工物のマテハンや溶接・

塗装工程などであるが、その導入の範囲は限定的である。当社が製造するのは、大型構造物・重量物製品、職人作業による精密機械をはじめとする精密かつ複雑形状部品およびそれを用いた装置などで、細やかなオプション対応と受注生産による充実した製品ラインナップを特長としているが、これらは製造装置自動化開発にとっては障壁になっている。対象ワークが大型構造物や重量物である場合、6軸ロボットをはじめとする自動機単体では可動範囲や可搬重量などの制約があるので、複数の装置で構成することや周辺機器なども検討す

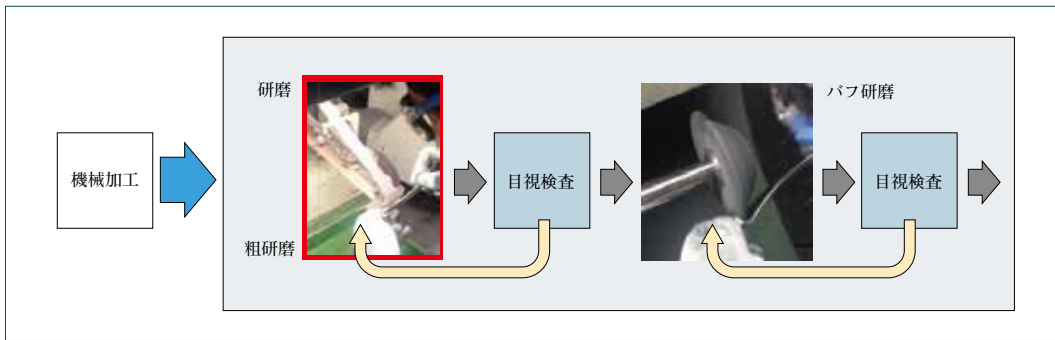


図1 対象としたベルト研磨プロセス
Development target, belt grinding process

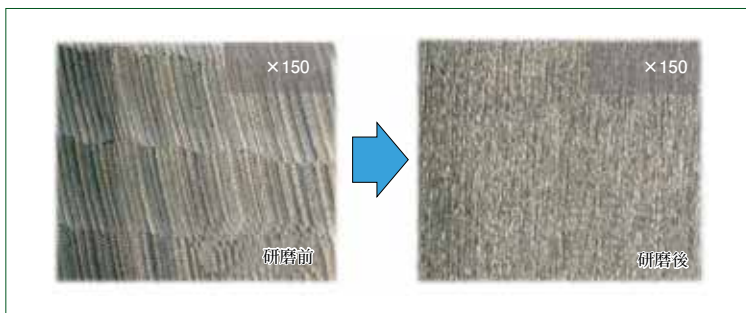


図2 ワークの表面形状の変化
Change of surface shape of sample work

る必要があり、製造装置として複雑なものになる。そのうえ、充実したラインナップへ対応するには、一つのラインで多品種に対応する必要も出てくる。しかし、多品種に対応するにはセンサやアクチュエータの追加が必要となり、装置コストの増大および自動化ライン対象機種限定といった投資対効果の問題により導入を断念せざるを得ない状況となっている。さらに、複雑形状部品を扱う製造現場では、職人による熟練した手法を伴う作業が行われており、人が感覚などを頼りに臨機応変な動作で実現しているため、ロボットなどを用いた自動機の単純な位置決め動作ではこの作業の再現は困難である。このような背景もあり、バリエーションが多く、多品種の製品が流れる混在ライン、大型・重量物を取り扱う現場、ワーク形状が複雑で熟練した手法を伴う現場などでは、人の手作業による製造がほとんどである。

そこで、当社における自動化適用範囲の拡張を目指し、熟練した手法を伴う工程の一つであるベルト研磨プロセスの自動化開発を開始した。当社では、形状を変化させる鍛造工程や機械加工工程などの後に面形状を整えることを目的とした研磨加工が多く現場で実施されている。研磨工程では、品種のバリエーションの多さや前工程の加工精度バラツキなどに対応する必要があるうえ、作業が毎回変動することもあり、人の臨機応変な対応に頼ることになる。このことから、研磨加工のほとんどが手作業で行われており、多くの人手がかかっているのが現状である。こうした背景を踏まえ、当社におけるベルト研磨自動化技術の保有を目的に、住重フォージングで製造している航空機用エンジンプレードのベルト研磨プロセスを対象として、曲面ワークに対応したベルト研磨自動化開発を実施した。

2 人の手作業の工程分析と実現方策の検討

本開発では、まず人の手作業によるベルト研磨プロセスを分析した。今回対象としたのは、機械加工後の自由曲面ワークに残っているツール目を取り除き、表面を滑らかにする研磨プロセスの一部である（図1）。

工程分析に際しては、文献などによるベルト研磨工程についての調査や作業手順書および工程表など現場で用いられている資料の確認に加え、実際に工場に赴いて職人による手作業の見学や作業内容に関してのインタビュー調査も行った。これにより、手順書などの資料には明文化されていないが職人にとっては当たり前のノウハウやコツについても把握することができた。職人作業では、滑らかな面形状を実現すべく手の感覚などをもとにベルト研磨機に対象ワークを押し付ける力や接触角度を調整し、ワークを素早くスウィングさせることで研削力が一部に集中するのを回避しており、研磨面を目視で確認しつつ作業することで所望の表面形状に仕上がっていることが分かった。職人にとっては簡単な作業であっても、未経験の人間では狙った部位に研磨機を当てることすら困難である。このことから、無意識の判断や調整が行われるとともに、さまざまな事象に対して臨機応変に対応していることが判明した。

これらのことから、手作業をそのまま自動機で実現しようとした場合、研磨状態や接触力など複数の項目に関する検出器や、それに伴うアクチュエータなどを導入することになるのでシステムとして煩雑なものとなり、実現へのハードルはかなり高いと考えられる。たとえ実現できたとしても、複数の検出機能を搭載するシステムは投入コストや運用時の複数

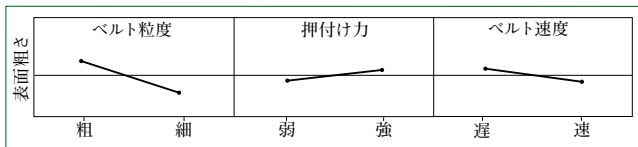


図3 表面粗さへの影響度
Influence to surface roughness

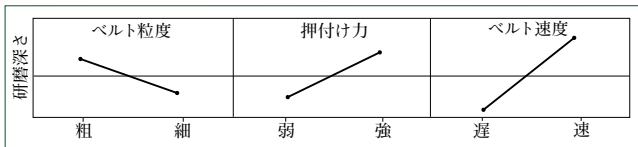


図4 研磨深さへの影響度
Influence to ground depth

のエラー対策なども必要となり、現場適用へのハードルも高い。

そこで、ベルト研磨プロセスに必要なパラメータの抽出と自動化適用への単純化を実施した。一般的に、ロボットをはじめとする自動機は、決められた動作を高精度で再現することは得意である。ロボットの長所である高精度な動作再現性を最大限に生かすことができれば、バラツキが少なく安定した研磨量で研磨されることから、人が目視確認をしながら面形状を微調整している部分を補完することができ、検出および補正動作の導出に用いる機能が不要となり、容易にコントロールできるシステムが実現すると考えられる。

本開発では、工程分析の結果をもとに基礎的な予備試験を行い、ベルト研磨プロセスの自動化に必要なパラメータの抽出と自動化適用への単純化を実施したうえで、メカ・ハード面および自動機をどう動かすかといったソフト面の構成について相互に検討した。

今回調査した研磨工程では、研磨対象部位に合うようにワークを操作し、手の感覚をもとに押付け力や接触角度を調整しながら研磨していた。つまり、自由曲面ワークに追従し、人の手作業のように柔らかに押し付ける動作を高精度で再現する必要がある。そこで、本開発では、導入コストや管理の手間の削減などを考慮し、メカ的に柔らかに一定力で押し付けることが可能な機構を導入した。また、予備試験の結果、自由曲面ワークに追従する機能については、少なくとも5軸で操作しなければツールであるベルトサンダーをうまく当てることができないことが判明した。これにより一般的な6軸垂直多関節ロボットを用いることとした。

3 ベルト研磨自動化要素技術の開発・検討

図2に、機械加工後および研磨後の面形状を示す。

既定の面形状を実現するには、機械加工により生成されるツール目の除去が可能で、形状を損なうような削れ過ぎが発生しない深さで研磨し、そのうえで表面粗さを規定値以内に収める必要がある。それに対応すべく、まず押付け機構について、良好な研磨量および表面粗さが得られるパラメータの組み合わせを抽出した。抽出したパラメータを管理し、得られる研磨量および表面粗さを適切にコントロールすることがで

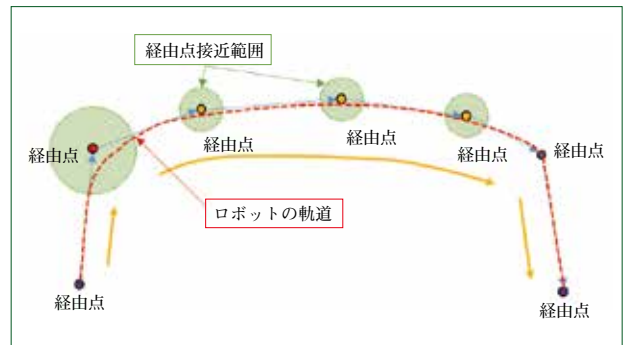


図5 経由点により生成されるロボット軌道
Robot trajectory through waypoints

ければ、自動機は動作再現性が高いことから研磨面の目視確認が不要となる。そこで、平板に対して垂直にベルト研磨機先端を押し付けて得られる研磨量および表面粗さを確認することを目的とした基礎試験を実施した。

平板での基礎試験の結果、図3に示すように表面粗さに対してはベルト粒度の影響度が高く、図4に示すように研磨深さに対してはツールを押し付ける力、ベルトの回転速度、ワークを走査させる速度の影響度が高いことが分かった。この結果により、ワーク表面に対して垂直にベルト研磨機先端を押し付けることで、任意の研磨深さおよび表面粗さを得られることを確認した。

次に、ロボットの操作手法について検討した。ロボットの軌道生成に際しては、自由曲面の表面にツールを垂直に当てるように接触角度を合わせることで、できるだけ一定速度で動作させること、確実に接触させることにポイントを置いた。まず、対象ワークの形状をもとに経由点を抽出した。6軸ロボットを動作させる場合、いくつかの経由点を指定し、その点を補完することで軌道を生成させることが一般的であり、経由点は細かくとればとるほど形状に沿った軌道を生成することが可能となるが、ロボットはその経由点を目標値として動作することから、経由点が多くなると走査速度を十分に上げることができなくなる。そこで、抽出する経由点を走査速度に応じて取捨選択し、できるだけ少ない経由点で滑らかに動作させる手法を検討した。

本来、ロボットは指定した点間を加減速し経由点で一旦停止する軌道を生成するが、図5に示すように、滑らかに動作させるべく経由点から特定の距離で経由点接近範囲を設け、その範囲内にロボットが移動すると次の経由点を目指すようにコントロールすることで、経由点付近で加減速せずほぼ一定の速度で動作させることが可能となっている。しかしながら、経由点近傍を通過する動作となることから、正確な位置決めが損なわれてしまい、対象ワークの曲率によってはワークからツール先端が離れたり、逆に押付け過ぎとなってしまう。この場合、最大で経由点接近範囲の半径に相当する位置ズレが発生することになる。

そこで、ロボットの走査速度に応じた経由点接近範囲を設定し、確実に接触するようなロボット軌道を生成するアルゴ

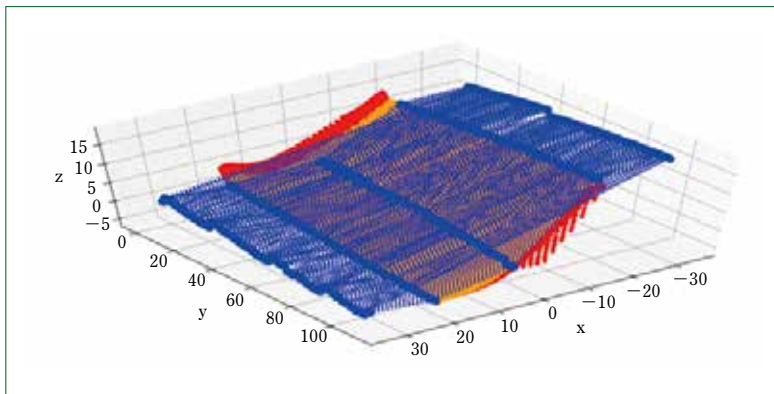


図6 生成したロボット軌道
Robot trajectory



図8 ロボット動作の様子
Motion of grinding robot



図7 ベルト研磨自動化システム外観
Overview of belt grinding automated system

リズムを構築した。それにより、位置ズレによる押付け力の変動の影響がない範囲で自由曲面ワークに沿いながら一定速度で動作する軌道を生成させた。さらに、押付け機構に対応可能となるように、対象ワーク形状をもとに抽出した経由点の点群データに補正を加えることで、自由曲面ワークに対応しつつ、人の手作業のように柔らかに押し付ける動作を実現するロボットの軌道を生成することができた。図6に、導入した手法を用いて生成したロボット軌道の一例を示す。

4 ベルト研磨自動化システム

独自の押付け機構およびそれに対応した軌道生成アルゴリズムを導入することで、自由曲面であるワークをベルト研磨機先端に滑らかに接触させつつ、人の手作業のように柔らかに押し付ける動作となることを確認した。検証した要素技術を盛り込み、自由曲面ワークに対応したベルト研磨自動化システムを実現した。このシステムは、複雑なコントロールを必要としないメカ的な押付け機構および一般的な6軸多関節ロボットによる単純な直線補間による動作の生成で実現したことから簡易な構成となっており、一般的な産業ロボット操作の延長線上で調整できるシステムとなっている。図7に、システムの外観を示す。

次にシステムの有用性を確認すべく、現場への適用を検証した。対象は、人の手作業の工程分析を実施した住重フォーミングで製造している航空機用エンジンプレードのベルト研磨プロセスとした。ブレードの形状情報をもとにロボット軌道の生成を行い、実際のブレードと同等のワークで検証した。その結果、研磨パラメータおよび軌道生成パラメータの調整により、人の手作業と同等レベルの品質を達成している

ことを確認し、構築したシステムが有用であることを示した。図8に、検証時のロボット動作の様子を示す。

5 生産適用について

本開発で構築したシステムを適用したベルト研磨自動化システムを住重フォーミングにて立ち上げ、現在生産に至っている。

6 むすび

- (1) ベルト研磨プロセスについて、人の手作業を分析し、その結果をもとに必要な機能の抽出およびパラメータ化を行い、自動化装置の実現方策について検討した。
- (2) 実現方策について基礎的な要素試験を実施し、独自の押付け機構およびそれに対応した軌道生成アルゴリズムを導入することで人の手作業のような動作が再現可能であることを確認した。
- (3) 住重フォーミングで製造している航空機用エンジンプレードのベルト研磨プロセスを対象に、検証した要素技術を用いたベルト研磨自動化システムを提案し、実際のブレードと同等のワークで検証することでシステムの有用性を示した。
- (4) 今後の展開として、得られたベルト研磨自動化の要素技術を水平展開し、自動化適用範囲を拡張させ、当社工場の生産性向上へ結びつけていく。

外観検査装置KITOVの特長

Features of Visual Inspection Device KITOV

●坂元 勝紀*
Katsunori SAKAMOTO



KITOV-COREシリーズ
KITOV-CORE series

1 はじめに

当社は、さまざまな製品を対象とした外観検査装置KITOV-ONEをリニューアルし、KITOV-COREシリーズの販売を開始した。本報では、その主な機能について解説する。

本装置は、3Dコンピュータビジョンアルゴリズムと機械学習や深層学習などの人工知能を利用して、人間の介入なしにさまざまな欠陥を確実に、かつ一貫して検出し、分類することが可能である。また、ロボットアームと高精度の回転テーブルを含む独自の設計に基づいている。この設計は人間が欠陥を探す方法を模倣し、さまざまな角度、位置および照明条件で撮影した検査箇所の画像収集を容易にする。

高度な3Dコンピュータビジョンアルゴリズムを搭載した本装置のソフトウェアは、人間が見逃しがちな欠陥をはじめほとんどの欠陥を効果的かつ確実に検出する。

2 KITOV-CORE シリーズのシステム構成

本装置は、ロボットアームと照明を使用して検査箇所を撮影する機器と、撮影された画像をもとに良否判定を行う画像処理ソフトウェアで構成されている。この画像処理ソフトウェアには、画像処理設定の最適化を行うオブティマイザ(optimizer)と検出結果をもとに検査結果の最適化を行うアビトリタータ(Arbitrator)の2種類の人工知能が搭載され、

最適な検査を実現している。

KITOV-COREシリーズには、6軸ロボットの先端部分にLED照明およびカメラを取り付けたKITOV-COREと、回転機構をプラスし検査対象物全体を回転させて検査するKITOV-CORE PLUSの2種類を用意している。

3 検査箇所の教示

KITOV-COREシリーズでは、画像処理ソフトウェア内のプランナーツール(Planner Tool)に検査対象物の3Dモデルを取り込み、3D空間上で検査箇所の教示および照明設定をオフラインで行うことが可能である。固定されたカメラとは異なり、撮像角度や照明などの調整を行うことで、従来の検査では見つけることが困難であったキズなども検出することができる。

安全機能についても、検査エリアおよび干渉防止エリアを設定することでセットアップが容易となった。また、検査箇所の設定終了後にメイクプランセーフ機能を実行し、検査箇所間の移動軌跡を考慮したバーチャルシールドを設けることで干渉事故などの防止を可能とした。

4 KITOV の検査判定方法

画像処理ソフトウェアのプロセスツール(Process Tool)を用いて、検査箇所での良品および不良品のワークを撮影し、不

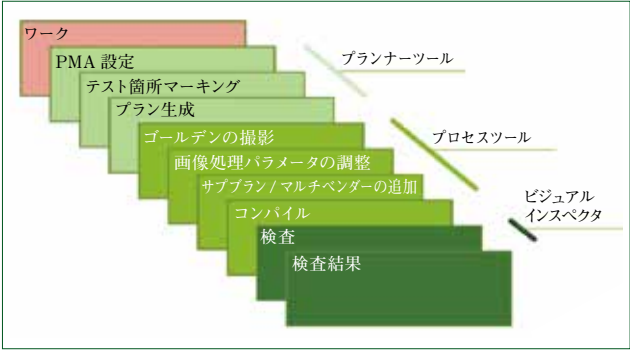


図1 フロー図
Flow diagram



図2 検査結果表示
Inspection result display

表1 ルールベースとディープラーニングの比較
Comparison of rule-based and deep learning

項目	ルールベース	ディープラーニング
検査の安定性	○ 人が設定した検査ルールに従う	△ 機械側の学習に依存
準備すべきサンプル数	○ 少 (パラメータ設定用サンプル準備)	× 多 (学習用サンプルの) 準備要
定義困難な欠陥検出 (例: テクスタ内のキズ)	× 定義できない欠陥の検出不可	○ ルールベースでは困難な欠陥検出も可能
検出ルールの微調整判定根拠の確認	○ 可能	× 不可能 (ブラックボックス)

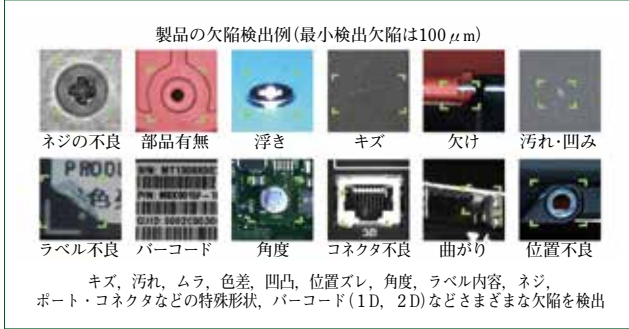


図3 検査対象
Inspection target

良を判断することができる。

図1に、プロセスツール適用のフローを示す。撮影した不良品画像内に欠陥箇所をマーキングをした後、最適化処理をかけることで、検出用の画像処理設定の最適化が自動で行われる。

この最適化処理結果は、各画像処理設定入力ボックス内に色を変えて表示され、最適化処理後に変更された設定が容易に確認できるよう配慮されている。一方、一般的な外観検査装置は、画像処理装置メーカーの決めた閾値により管理される場合が多く、ユーザは結果を確認することができない。この最適化処理はオフラインで実施可能で、別途ソフトウェアを使用することで机上での作業も可能である。最適化処理を行うことで、欠陥検出結果にて行うアービットレータ処理 (AI学習用) のデータを生成する。

5 検査の実行

作成した検査プログラムファイルをヴィジュアルインスペクター (Visual Inspector) で実行することで検査を行うことができる。また、本ソフトウェアで、AI 学習用データの整理も検査結果を確認しながら容易に行うことが可能である。図2に、検査結果を表示した画面を示す。

一般的な外観検査装置は、検査対象物専用設計されカメラは固定する場合が多いが、本装置はカメラ本体および照明を6軸ロボット先端に搭載し、撮像角度を変えて観測できる汎用性の高い構成となっている。このことから、検査対象物が変わっても、最小限の設備変更で検査を行うことが可能である。また検査のフレキシビリティでも大きな利点がある。

6 検査結果の学習

本装置の画像処理は「ルールベース」と「ディープラーニング」のハイブリッド方式で高い検出能力を実現している (表1)。

各検査位置で撮影した画像をもとに、画像処理システムに搭載されたAIを駆使し、人間が見逃していた欠陥を検出することが可能である。さらに、検出された過検出情報を蓄積しAI学習させることで、欠陥の見逃しがなく、過検出の少ない検査システムを構築することができる。

7 検査対象

図3に、検出することが可能な欠陥の事例を示す。

8 おわりに

手動による目視検査の最大の欠点は、人間が欠陥を見逃すことにある。疲れた労働者が検査工程で欠陥を見逃すことは不可避であり、見逃された欠陥は、多くの場合エンドユーザにより発見され表面化することから、対応には多くのコストがかかる。さらに、エンドユーザの不満にもつながり、最悪の場合は顧客のブランドイメージが毀損される。

目視検査の限界、一貫性のない検査結果、人件費の世界的な増加を克服することを目的としたスマートな自動化ソリューションが求められている。本報で紹介した検査装置を駆使して最適な検査工程を構築することで、不具合の流出を低く抑え、顧客の信頼を向上させることが可能となる。

住友重機械技報第208号発行に当たり

住友重機械技報第208号をお届け致します。

本誌は、当社が常々ご指導いただいている方々へ、最近の新製品、新技術をご紹介申し上げ、より一層のご理解とご協力をいただくよう編集したものです。

本誌の内容につきましては、さらに充実するよう努めたいと考えますが、なにとぞご意見賜りたく、今後ともよろしくご支援下さるよう、お願い申し上げます。

なお、貴組織名、ご担当部署などについては、変更がございましたら裏面の用紙にご記入のうえ、FAXでお知らせいただきたくお願い申し上げます。また、読後感や不備な点を簡単に裏面用紙にご記入願えれば幸いに存じます。

2022年9月

〒141-6025 東京都品川区大崎2丁目1番1号 (ThinkPark Tower)

住友重機械工業株式会社

技術本部 技報編集事務局

(宛先)	(発信元)
住友重機械工業(株) 技術本部 技報編集事務局 行 FAX 横須賀 046 - 869 - 2357	貴組織名 担当部署 氏 名 TEL No. FAX No.

住友重機械技報第208号の送付先の確認と読後感などの件		
送 付 先 変 更	(旧送付先)	(新送付先)
	送付番号 _____	送付番号 _____
	組織名称 _____	組織名称 _____
	担当部署 _____ ➡	担当部署 _____
	所在地 _____ 〒 _____	所在地 _____ 〒 _____
新 規 送 付 先	新しい部署ができた場合ご記入下さい。	
	組織名称 _____	
	担当部署 _____	
	所在地 _____ 〒 _____	
	必要部数 _____ 部	
本 号 の 読 後 感 に つ い て	1. 本号で、一番関心を持たれた記事は。	
	2. 本号を読まれたご感想をお知らせ下さい。(○印でご記入下さい。)	
	1 興味深かった 2 特に興味なし その理由をお聞かせ下さい。	

主要営業品目

変減速機，インバータ

●機械式減速機：[同心軸]サイクロ減速機，サイクロギヤモータ
アルタックス，精密制御用サイクロ減速機，コンパワー遊星歯車
減速機，[平行軸]パラマックス減速機，ヘリカルパディボックス，
プレストギヤモータ，[直交軸]パラマックス減速機，ハイボニック
減速機，アステロ直交ギヤヘッド，ベベルパディボックス，ラ
イタックス減速機，HEDCON ウォーム減速機，小形ウォーム減速
機 ●変速機：[機械式変速機]バイエル無段変速機，バイエル・
サイクロ可変減速機，[電気式変速機]インバータ，インバータ搭
載ギヤモータ，サーボドライブ，DCドライブ
サイクロ，アルタックス，コンパワー，パラマックス，パディボックス，プレスト，
ハイボニック減速機，アステロ，ライタックス，HEDCON，バイエルおよびバイエル・
サイクロは，住友重機械工業株式会社の登録商標です。

プラスチック加工機械

●プラスチック加工機械：射出成形機，射出吹込成形機，ディスク
成形機，セラミックス成形機 ●フィルム加工機：押出機，フィルム製
造装置，ラミネート装置 ●IC 封止プレス ●成形システム・金型：
射出成形用金型，PET システム，インジェクションブロー成形シス
テム，インモールドラベリング成形システム

レーザ加工システム

●レーザドリル装置 ●レーザアニール装置 ●YAG レーザと加
工システム

半導体・液晶関連機器

●イオン注入装置 ●成膜装置：(太陽電池，タッチパネル，有機EL
用)プラズマ薄膜形成システム ●精密位置決め装置 XY ステージ
●モーションコーポネント ●ライン駆動用制御システム ●マ
イクロマシン ●レーザアニール装置 ●ウエハ研削装置

環境施設

●環境・エネルギー関連プラント：循環流動層(CFB)ボイラ，ロー
タリーキルン式産業廃棄物処理施設 ●大気関連プラント：電気集
塵装置，灰処理装置 ●水関連プラント：上水処理施設，下水処理施
設，浸出水処理施設 ●産業廃水処理装置

加速器，医療機器，精密機器，極低温機器，超電導磁石

●イオン加速器：サイクロトロン，ライナック，シンクロトロン ●電
子線照射装置 ●医療機器：PET診断用サイクロトロン・CYPRIS，
標識化合物合成装置，陽子線治療システム ●冷凍機：パルス
チューブ冷凍機，4KGM 冷凍機，MRI 用冷凍機，クライオポンプ
●人工衛星搭載観測装置冷却システム ●超電導磁石：ヘリウム
フリー超電導マグネット

CYPRIS は，住友重機械工業株式会社の登録商標です。

物流・パーキングシステム

●自動倉庫システム ●FMS/FA システム ●無人搬送システム
●機械式駐車場

金属加工機械

●鍛圧機械：フォーミングプレス，油圧プレス，フォーミングロール，
超高压発生装置 ●工作機械，クーラント処理装置 ●SPS(放電プ
ラズマ焼結機)

運搬荷役機械

連続式アンローダ，港湾荷役クレーン（コンテナクレーン，タイヤマ
ウント式ジブクレーン，タイヤマウント式LLC），トランスファクレーン，
ジブクレーン，ゴライアスクレーン，天井クレーン，製鋼クレーン，
自動クレーン，コイル搬送台車，ヤード機器（スタッカ，リクレーマ，
スタッカ／リクレーマ），シップローダ，ベルトコンベアおよびコン
ベアシステム，リフティングマグネット装置，コークス炉移動機械

船舶海洋

●船舶：油槽船，石油製品運搬船

化学機械，プラント

●一般プラント：紙・パルプ製造装置，化学装置，原子力装置 ●圧
力容器：リアクタ，塔，槽，熱交換器 ●攪拌混合システム：マック
スブレンド攪拌槽，スーパーブレンド(同心2軸型攪拌槽)，バイ
ボラック（横型2軸反応装置）
マックスブレンドおよびバイボラックは，住友重機械プロセス機器株式会社の登録
商標です。

建設機械，フォークリフト

油圧式ショベル，杭打機，道路舗装機械，クローラクレーン，基礎機械，
フォークリフト

タービン，ポンプ

蒸気タービン，プロセスポンプ

その他

航空用機器，精密鍛造品，防衛装備品(各種機関銃，機関砲およびシス
テム)

※文章中のソフトウェア等の商標表示は，省略しております。

事業所

本社	〒141-6025	東京都品川区大崎2丁目1番1号(ThinkPark Tower)	技術研究所	〒237-8555	神奈川県横須賀市夏島町19番地
関西支社	〒530-0005	大阪市北区中之島2丁目3番33号(大阪三井物産ビル)	技術研究所	〒792-8588	愛媛県新居浜市惣開町5番2号
中部支社	〒461-0005	名古屋市東区東桜1丁目10番24号(栄大野ビル)			
九州支社	〒812-0025	福岡市博多区店屋町8番30号(博多フコク生命ビル)			
田無製造所	〒188-8585	東京都西東京市谷戸町2丁目1番1号			
千葉製造所	〒263-0001	千葉県稲毛区長沼原町731番1号			
横須賀製造所	〒237-8555	神奈川県横須賀市夏島町19番地			
名古屋製造所	〒474-8501	愛知県大府市朝日町6丁目1番地			
岡山製造所	〒713-8501	岡山県倉敷市玉島乙島8230番地			
愛媛製造所					
新居浜工場	〒792-8588	愛媛県新居浜市惣開町5番2号			
西条工場	〒799-1393	愛媛県西条市今在家1501番地			

本号に関するお問い合わせは，技術本部技報編集事務局(電話番号は
下記)宛お願い致します。

住友重機械工業株式会社のホームページ <https://www.shi.co.jp/>

技報編集委員

委 員	鈴木 哲史	委 員	阿部 昌博
	大西 良孝		白澤 克年
	井上 千晶		村澤 崇
	梶谷 純平		柴田 雅也
	長部 洋介		齋藤 正樹
	有吉 政博		坂根 剛
	石川 賢治		石倉 武久
	諏訪 義和		志摩 孝洋
	幾島 悠喜		前野 亮一
	小林 友和	事 務 局	技術本部
		編集協力	(株)千代田プランニング

住 友 重 機 械 技 報	
第208号 非売品	
2022年9月10日印刷 9月20日発行	
発 行	住友重機械工業株式会社
	〒141-6025 東京都品川区大崎2丁目1番1号
	(ThinkPark Tower)
	お問い合わせ電話 横須賀 046-869-2300
発 行 人	千々岩敏彦

