

Sumitomo Heavy Industries Technical Review



Sep.2025

No.217 ISSN 0387-1304

住友重機械 技報



産業車両特集

Special Issue for Industrial Vehicles

住友重機械技報 No. 217 2025

巻頭言 クローズドイノベーションからオープンイノベーションへ 三觜 勇

産業車両特集

論文・報告	油圧ショベル SH200-8	中根雅敏	1
	マシンコントロールの新機能開発	本田圭二	7
	油圧ショベル積込み重量計測技術の開発	西牧 潤, 平沼一則	11
	自律ショベルの開発	佐野裕介, 原 孝介, 相澤 晋, 平手奨二	15
技術解説	アスファルトフィニッシャのダンプトラック誘導自動化システム	小林朋弘, 寺元陶太	19
	クローラクレーン用俯瞰映像合成モニタ ARGUSサラウンドビュー	本庄浩平	21
	クレーン起立外観検査 C-SAI ―確実な点検で, 安全作業を担保―	戸井田 実	25
	無人フォークリフトシステム	小橋喬茂, 溝 大貴	29

論文・報告

	機械学習を用いた連続殺菌装置の予測制御	井原 亮	33
--	---------------------	------	----

施設紹介

	技術研究・創発棟 Cs'-Lab+ が完成	堀 重雄, 梶井宏樹	39
--	-----------------------	------------	----

From closed innovation to open innovation

Isamu MITSUHASHI

Special Issue for Industrial Vehicles

T/PAPERS	Hydraulic Excavator SH200-8	Masatoshi NAKANE	1
	Development of New Features for Machine Control	Keiji HONDA	7
	Development of Loading Weight Measurement Technology for Hydraulic Excavator	Jun NISHIMAKI, Kazunori HIRANUMA	11
	Development of Autonomous Excavator	Yusuke SANO, Kosuke HARA, Susumu AIZAWA, Shoji HIRATE	15
T/INVITATIONS	Dump Truck Guidance Automation System for Asphalt Pavers	Tomohiro KOBAYASHI, Touta TERAMOTO	19
	“ARGUS” Surround View System for Crawler Cranes	Kohei HONJO	21
	Crane-Standing Appearance Inspection C-SAI –Ensure safety operations with reliable inspections–	Minoru TOIDA	25
	Automated Forklift System	Takashige KOHASHI, Taiki MIZO	29

T/PAPERS

	Predictive Control of Continuous Sterilizer Using Machine Learning	Ryo IHARA	33
--	--	-----------	----

FACILITY INTRODUCTION

	Introduction of “Yokosuka Innovation Hub, Cs’-Lab+”	Shigeo HORI, Hiroki KAJII	39
--	---	---------------------------	----

クローズドイノベーションから オープンイノベーションへ ―「産業車両特集」に寄せて―

執行役員
住友建機株式会社 代表取締役社長
住友建機販売株式会社 代表取締役社長

三 觜 勇



かつて、当社において、藤本隆宏教授の製品アーキテクチャー論を中心とした戦略論を展開した時期があり、そのときにインテグラルな製品は、模倣しづらく競争優位に一役買っているということになっていた。特に日本でいえば自動車産業がその中心であり、インテグラルな製品としてその当時は差別化できていた。

インテグラルとは、機能群と部品群の関係が錯綜している製品設計思想を言い、その対比としてのモジュラーは機能と構造が一對一に近く機能簡潔ですっきりしている製品設計思想を言う。モジュラーの典型がパソコンであり、DELL等のメーカーが権勢を誇っていた。自動車産業と似た建設機械等は、インテグラルであるからこそ、日本のメーカーが優位に立てていたという事実はあると思う。

その後パソコンをはじめとする製品や家電製品などの日本製品は、モジュラー思想により中国等の海外勢に駆逐され今に至っている。

人間が実際に乗って運転するような自動車、商用車、また産業車両のモジュラー化はなかなか難しく、日本の優位性は保たれるのではないかと考えていたが、それが覆されつつある。まずは、乗用車等の電動化や自律運転化により、それは成り立たなくなっている。テスラ、BYD等の躍進がその典型である。

さて、クローズドイノベーションとオープンイノベーションだが、前者は、自社リソースのみを活用したクローズドな環境下でのイノベーションで、自社の人材による研究開発で自社独自のプロダクトやサービスの開発を行うことを指している。これは、インテグラルという製品設計思想に極めて密接に関係しているように思う。これまでの日本企業は、高度経済成長とともに築き上げられた高い技術力を誇り、自前主義と言われるクローズドイノベーションが主流であった。つまりインテグラルな設計思想が優位性を保ってきたのである。

しかしながら、グローバル化や最新の技術によるデジタル化、顧客ニーズの多様化など急激なビジネス環境の変化に伴い、自社のノウハウやリソースのみではその変化に対応していくことが困難となってきている。まさに当社もその変化のスピードについていくのがやっとの状況であり、さまざまな開発が後手に回るようになってきた。

建機業界でも電動化や自動化が急速に進んでおり、自社内のクローズドイノベーションだけで戦うことは難しく、外部のさまざまな企業(スタートアップ企業等)と協業して新しい技術や斬新なアイデアを取り入れたオープンイノベーションに取り組む必要性が増してきている。自社リソースと外部リソースの掛け算で新たな差別化をしていかないと、世の中の動きに対峙していけなくなることは自明である。

油圧ショベル SH200-8

Hydraulic Excavator SH200-8

●中 根 雅 敏*
Masatoshi NAKANE



図1 油圧ショベル SH200-8
Hydraulic excavator SH200-8

表1 SH200-8 主要仕様
Specification of SH200-8

基本	バケット容量：新JIS (m ³)	0.8
	運転質量 (kg)	21 000
	エンジン定格出力 (kW) / 回転数 (min ⁻¹)	119.3 / 1800
寸法	輸送時全長 (mm)	9470
	輸送時全幅 (mm)	2800
	輸送時全高 (mm)	3150
	標準シュール幅 (mm)	600
性能	走行速度：高速/低速 (km/hr)	5.6 / 3.4
	旋回速度 (min ⁻¹)	11.5
	バケット掘削力：通常/昇圧時 (kN)	142 / 154
	アーム掘削力：通常/昇圧時 (kN)	103 / 112
作業範囲	最大掘削半径 (mm)	9900
	最大掘削深さ (mm)	6650
	最大掘削高さ (mm)	9610
	最大ダンプ高さ (mm)	6810
	後端旋回半径 (mm)	2830

油圧ショベルの開発において、従来機までは作業性能や経済性能などの基本性能を追求することでブランドイメージを向上させ、シェアを伸ばす戦略を採用していた。しかし、施工現場では人材不足や高齢化などの社会的背景から、基本性能の向上だけでなく、現場全体の作業効率を向上することができる機械が求められている。このことから、住友建機株式会社の20tクラスの最新機種SH200-8では引き続き基本性能の改善によって本体の差別化を図りつつ、現場での作業効率を考慮した商品開発を行った。また、顧客価値を分類し、VOC調査や他社の動向をもとに、分類した価値を検証した。さらに、スペックに依存せず、顧客のための価値を提供できるよう快適性能、作業性能、安全性能、省エネルギー性能、メンテナンス性能を改善し、商品力の向上を図った。

In the development of previous hydraulic excavators, we adopted a strategy of enhancing brand image and increasing market share by pursuing basic performance such as work performance and economic efficiency. However, due to social factors such as labor shortages and aging populations at construction sites, there is a demand for machines that not only improve basic performance but also enhance overall work efficiency on sites. Therefore, with Sumitomo Construction Machinery's latest 20ton class model "SH200-8", we have developed products that consider work efficiency on sites while continuing to differentiate the machine by improving basic performance. Additionally, we classified customer values and verified these values based on VOC surveys and competitor trends. To provide value to customers without relying on specifications, we improved comfort, work, safety, energy-saving and maintenance performance, thereby enhancing product strength.

1 まえがき

20tクラスの油圧ショベルは需要が多く、同クラスのSH200は住友建機の油圧ショベル事業の核となるモデルである。本報では優れた燃費性能、作業性能および安全性能を持つ油圧ショベルLEGEST (レジェスト) シリーズの最新機種として、2025年4月に日本市場に導入したSH200-8について報告する。

2 製品の特長

図1に本機の外観、表1に主要仕様を示す。

商品の開発コンセプトを「Real Value, Real Satisfaction」とし、スペックの向上だけではなく、現場で実際に使用する顧客の満足を追求することを目指して開発を行った。顧客価値を分類し、多数のVOCから価値を検証した。さらに、それぞれの価値を向上させるべく快適性能、作業性能、安全性能、省エネルギー性能、メンテナンス性能の改善を実施した。



図2 シートサスペンション/コンソール
Seat suspension/Console



図3 アームレスト
Armrest



図4 モニタディスプレイ
Monitor display

3 快適性能

3.1 コンソール一体型シートサスペンション

シートの高さ調整時に操作レバーを搭載しているコンソールとシートサスペンションが連動することで、オペレータに対し、レバー位置を常に最適なポジションに維持できるようにした。これにより、複数のオペレータが交代しながらショベルを操作する現場においても、ポジションの調整が容易になった(図2)。

3.2 アームレスト高さ調整

従来機ではアームレストの角度のみ調整可能だったが、本機では高さの調節が可能となり、これまでに比べオペレータに合わせた操作姿勢に調整できるようになった(図3)。

3.3 操作レバーとシートの位置関係最適化

人間工学に基づき、操作レバーとシートの位置関係を見直した。これにより、どんな体格のオペレータでも最小限の調整で快適なポジションをとることができるようになり、作業効率が向上した。また、走行ペダルや予備ペダルの位置や高さも人間工学に基づいて適正化し、長時間の運転でも疲れにくい操作性を実現した。

3.4 大型10インチモニタディスプレイ

本機に搭載した10インチ縦型ディスプレイは、画面面積が

従来機の約2倍で、高解像度化によって機械情報の視認性を高めつつ、シンプルな表示による直感的な操作を追求している。最大で3分割のカメラ画像を表示することが可能となり、安全性と作業効率が向上した。サイズは大きくなったが、視界を妨げない位置に配置しており(図4)、さらに、左アームレストの陰に隠れて操作しづかったエアコンスイッチを、モニタディスプレイに付随させることで操作性が向上した。

3.5 ファンクションスイッチのショートカットキー設定

モニタディスプレイに付随しているファンクションスイッチにショートカットキーを設定可能とした。これにより、各種設定画面や情報画面への遷移が迅速かつ快適に行えるようになった。

4 作業性能および省エネルギー性能

4.1 新作業モード

油圧ショベルでは、作業内容に合わせて作業モードを切り替えることができるスロットルボリュームを設定している。従来機の作業モードはSP/H/A(6段階)で構成されていたが、本機ではSP/P(10段階)/Eco(10段階)となり、作業の種類に応じて作業モードを細かく調整できるようした。これにより、オペレータの好みや作業内容に合ったスロットルボリュームの調整が可能となった。

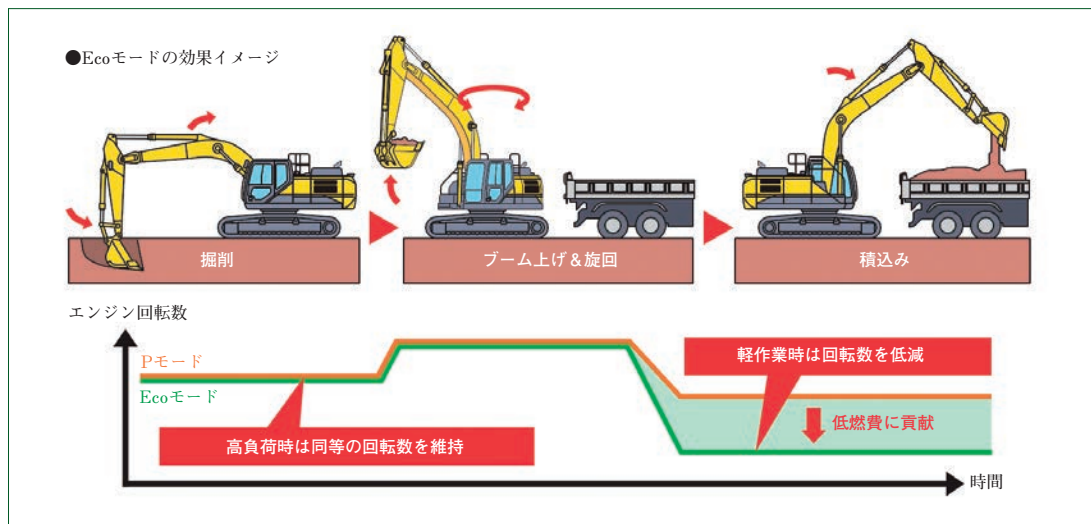


図5 Ecoモード
Eco mode

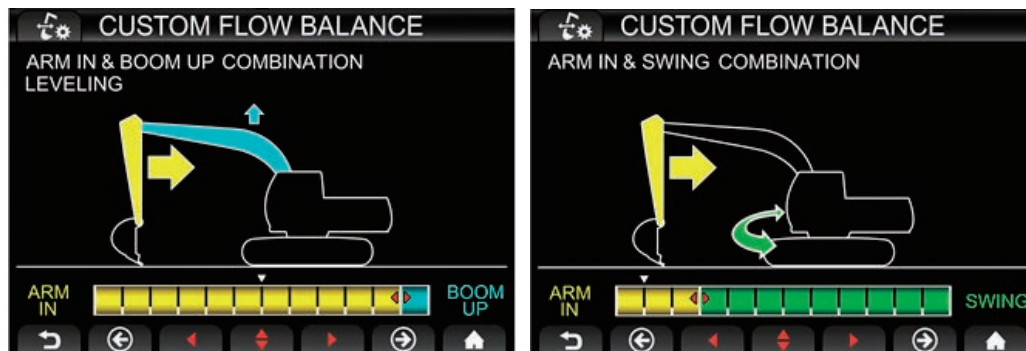


図6 操作性カスタマイズ機能
Custom flow balance feature

4.2 Ecoモード

さらなる燃費低減を求める顧客に対して、Ecoモードを新たに導入した。このモードでは、Powerモードとほぼ同じ作業スピードを維持しながら、生産性を極力下げずに燃費を低減することを可能とした。Ecoモードでは作業内容を検出し、エンジン回転数と旋回速度を必要最小限に抑えることで省エネルギーを実現している。また、掘削やブーム上げなどの重作業時には、Powerモードと同様の作業性能を発揮できるようにしたことで、作業効率を維持しつつ、燃費性能も向上させるモードになっている(図5)。

4.3 操作性カスタマイズ機能

複合操作時に各アクチュエータへ配分する作動油の流量バランスをモニタ上で調整できるようにし、オペレータの好みや作業内容に応じた操作性のカスタマイズを可能とした。「アーム閉じ/ブーム上げ」と「アーム閉じ/旋回」の2種類の調整機能を用意し、コントロールバルブのスプールストロークを電磁比例制御弁で制御することにより流量バランスを変化させている。オペレータは、重いエンドアタッチメントを装着したときなどに、流量バランスを調整することにより効率の良い作業が可能となる(図6)。

5 アドバンス機能 (オプション)

5.1 概要

IMU (慣性計測装置) を油圧ショベルの旋回体やアタッチメントに取り付けることで、どの方向にどれくらい移動したかという情報が得られる。また、ブームシリンダやアームシリンダの油圧ラインに圧力センサを取り付けることで、アタッチメントに掛かる負荷を推定することができる。これらの情報から、アドバンス機能としてペイロード機能、高さ・深さ警報、デジタル水準器、挙動安定化機能を搭載した(図7)。

5.2 ペイロード機能

ペイロード機能は、土木工事で行われるダンプ積込み作業時のバケット内の土砂重量と、ダンプトラックへの積載量をリアルタイムでモニタに表示するシステムである。この機能により、オペレータは積込み作業中に常に正確な重量を把握でき、過積載や過少積載のリスクが低減する。同時に、積込み作業の効率と精度を大幅に向上させ、オペレータの負担も軽減できる。普段通りの操作で精度良く計測ができるように設計されており、積込み量が目標に達すると通知音と視覚的な表示で知らせるので、効率的な作業が可能となる。

ペイロード機能を活用することで、積込み後の台貫(大型

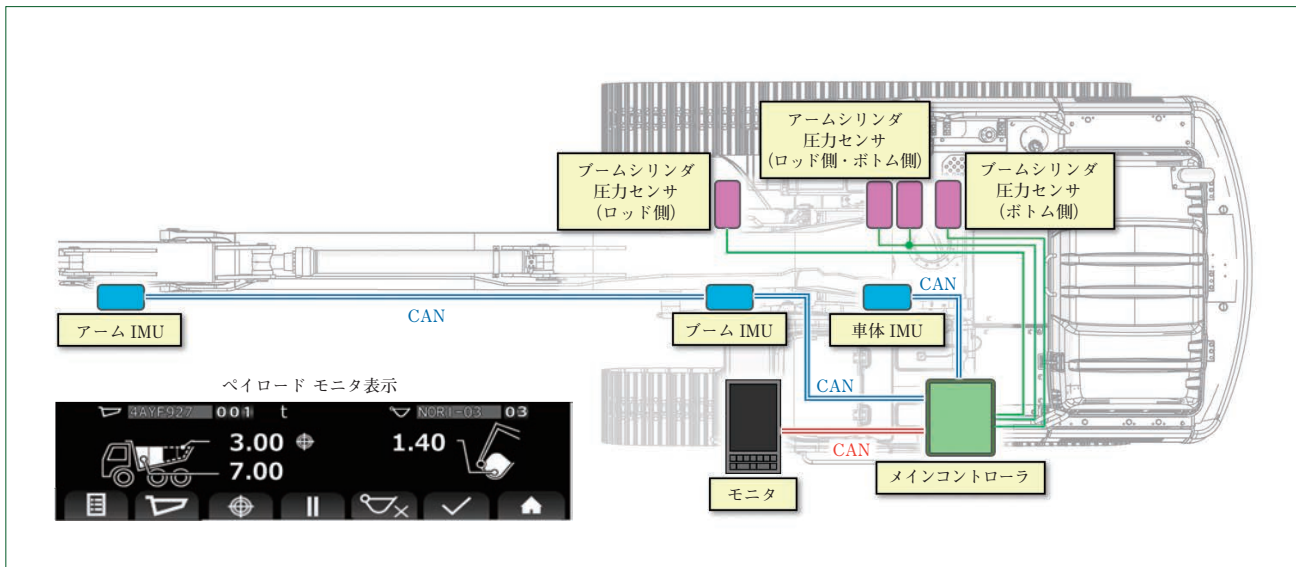


図7 アドバンス機能 主要構成部品
Main components of advanced functions

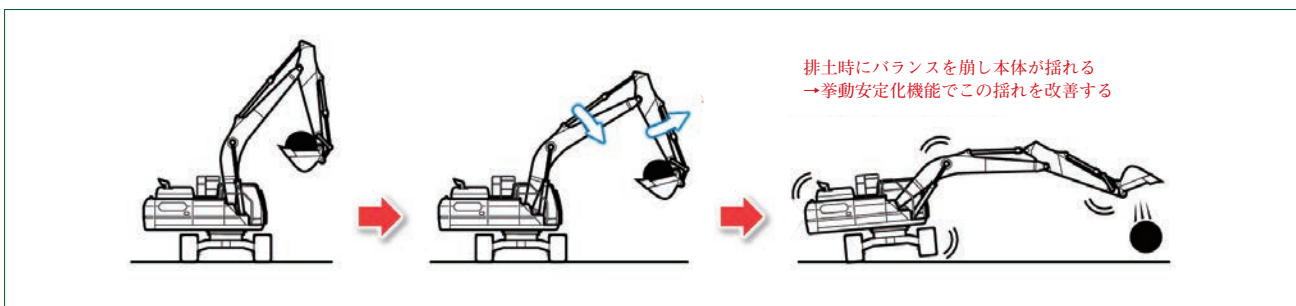


図8 挙動安定化機能(改善する動作)
Dynamic stability assist (Action to be improved)

の計量器)での過不足調整を大幅に低減することが可能となり、計量の時間と手間を大幅に削減でき、作業効率が向上する。経験の浅いオペレータでもベテランと同等の積み込み品質を実現できることから、人材の有効活用が可能となる。シンプルで分かりやすい画面操作により、誰でも簡単に使用することができる。一目で理解できるインターフェースは、過積載や過少積載のリスクを低減し、コンプライアンスと効率向上の両立を実現している。

こうしたパイロード機能を実現するためにモデルベース開発(MBD)を活用したアルゴリズム開発を行った。積み込み作業において掘削後の安定したブーム上げ状態を判定し、アタッチメント動作や旋回動作による増減を補償することで、高精度な重量計測を実現している。破損のリスクが高いことからバケットのIMUは廃止しているが、高い精度を保っている。

5.3 高さ・深さ警報

アタッチメントを安全に使える範囲(高さ・深さ)をあらかじめ設定しておくことで、作業中にアタッチメントが設定した高さや深さに近づいたときに画面表示とブザーで警報を鳴らす機能である。これにより、アタッチメントが電線に接触したり、埋設物を損傷させたりするリスクを軽減している。

5.4 デジタル水準器

機体のロール角(左右の傾斜)とピッチ角(前後の傾斜)をモニタ上に表示することができる。この機能により、機体の傾きを把握しながら作業できるので機体の安定性を確保でき、積み込みや法面作業時の作業性および精度が向上する。

5.5 挙動安定化機能

各種センサにより排土作業の動作と判断したときに、バケットに掛かる荷重と加速度を算出し、コントロールバルブのスプールの移動量を制御することでシリンダへの作動油量を制限し、アタッチメントの動作速度を抑制することができる。この機能により、排土作業時のショベルの揺れが軽減する(図8)。

モニタの設定画面で制御のレベルを調整することが可能で、バケットのサイズや重量、オペレータの習熟度により制御を調整することができる。

6 安全性能 (FVM3)

6.1 概要

国内向け従来機では、お知らせ機能付き周辺監視装置FVM2を標準設定とし、衝突軽減機能搭載のFVM2+をオプションで設定している。FVMは、3台の単眼カメラの画

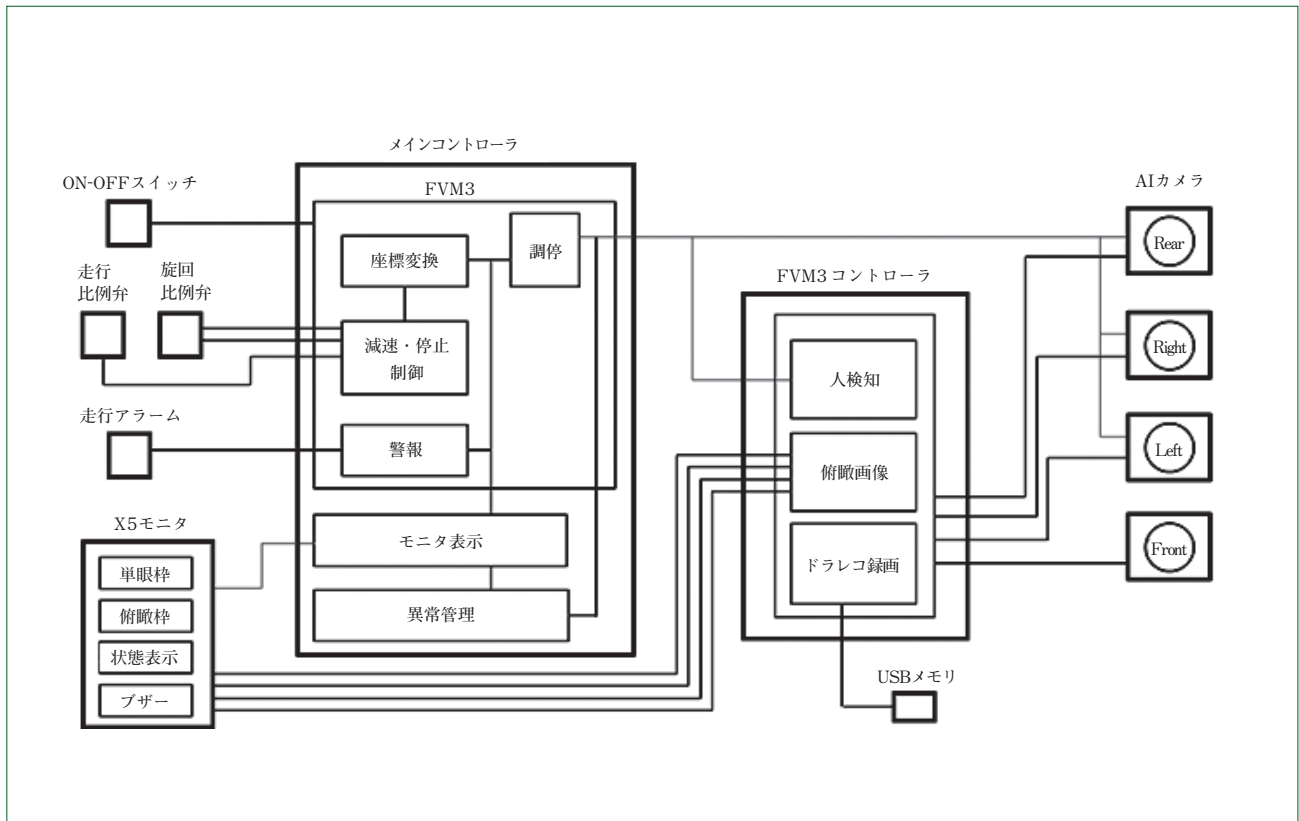


図9 FVM3システム構成図
System configuration of FVM3

像をリアルタイムに合成し、モニタに表示することで油圧ショベル後方270°を一目で確認できる機能である。FVM2は機械学習により、人らしい像があればモニタ表示と音で知らせる機能である。FVM2+はLiDARを搭載し、反射物検知方式により危険エリア内にいる安全ベストを着用した人を検知し、機械の走行および旋回を自動で減速・停止させる装置である。

本機で標準搭載するFVM3は、AIカメラとコントローラの深層学習により人検知能力を向上させ、FVM2+で使用していた高価なLiDARを使うことなく、人検知機能と衝突軽減機能を実現している(図9)。

6.2 人検知システム

FVM3では、機械周辺の人の検知に3台のAIカメラを使用している。AIカメラは、カメラ単独で安全ベストを着用した人を検知する機能を持っており、3台のAIカメラ(後・右・左)はCAN通信線でメインコントローラに人検知の情報を送る。一方で、AIカメラの映像はFVM3コントローラに送られ、FVM3コントローラでも人検知が行われる(AIカメラとは異なる検知アルゴリズムを使用)。この情報もまた、CAN通信線でメインコントローラに送られる。これら2種類の人検知を併用し、メインコントローラ内で互いの情報を補う処理を行うことで安全性を向上させている。また、検知結果はモニタ上に枠表示され、周囲270°の検知状況を容易に確認

できる。検知状況を周囲の作業者に外部アラームを鳴らして知らせる。

LiDARを使用せず、カメラ画像で安全ベストを着用している人を判断していることや、カメラの画角を増やしていることで検知範囲が拡大し、しゃがんでいる人も検知することが可能になった(図10)。

6.3 衝突軽減機能

走行中または旋回中に安全ベストを着用した人の接近を検知すると、人と機械の距離に応じて走行や旋回を自動的に落とし停止させる。減速エリア内に人がいる場合は、走行や旋回を減速させ、停止エリア内に人がいる場合は、走行や旋回を停止させる。FVM2+と同様、パイロットラインに設定している電磁比例制御弁を制御することにより、スムーズに減速し停止時のショックを軽減している。

6.4 ドライブレコーダおよび前方カメラ

キャブ上に専用の前方カメラを装着することで、機械の前後左右4画面を録画でき、万一のトラブル発生時などの状況確認に活用することができる。またFVM3の映像表示も360°に拡大し、前方部の現場確認も支援する。

7 メンテナンス性能

7.1 キャブ内フロアマット

分割式のフロアマットを採用し、フロアマットの脱着を容

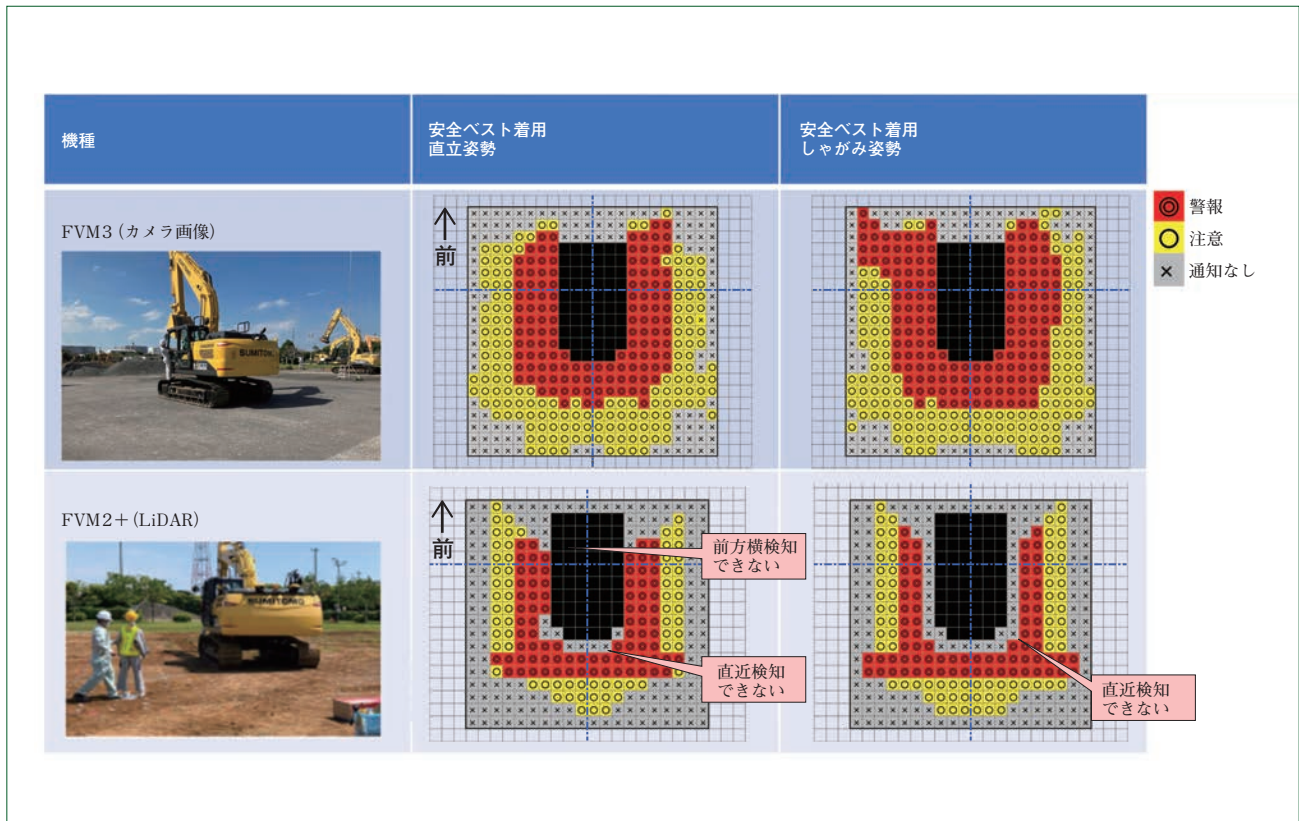


図10 人検知範囲 (FVM2+との比較)
Human detection area (Comparison with FVM2+)

易にすることでキャブ内部の清掃性を改善した。従来機はフロアマットを装着したままでの水洗いを想定した構造であったが、フロアマットを取り外さずに水洗いする人は少ないという情報から、脱着性を高めた。

7.2 エンジン健康診断機能

稼働監視システムG@Nav上でエンジンの状態を3段階で評価するエンジンパフォーマンスレポートを発行できるようにした。従来のG@Navは、故障確定後に故障コードを発報し事後対応するツールだったが、故障コード発報前の「不調」の段階でAIが診断を行い、重大なマシンダウンを防ぐべく予防的な診断機能を追加した。エンジンパフォーマンスレポートを活用することにより、点検時の見落とし削減、顧客へのメンテナンス提案、故障時のトラブルシューティングの効率向上などの効果がある。

8 むすび

SH200-8は、現場での実際の使用における顧客の満足を追求し、快適性能、作業性能、安全性能、省エネルギー性能、メンテナンス性能を大幅に改善した。これにより、効率的かつ安全な作業が可能となり、現場での価値を最大限に引き出すことができる機械となった。

- (1) シートサスペンションやモニタディスプレイなどキャブ内の機能を向上させることにより、快適性能が改

善した。

- (2) 作業モードの変更やアドバンス機能の追加で作業性能や省エネルギー性能が改善した。
- (3) 人検知性能を高めたFVM3を標準搭載することにより安全性能が向上した。
- (4) エンジンの健康診断機能追加で予防保全を強化した。

※「FVM」は、住友重機械工業株式会社の登録商標です。
「G@Nav」は、住友建機株式会社の登録商標です。

マシンコントロールの新機能開発

Development of New Features for Machine Control

●本田 圭二*
Keiji HONDA



SH200Z-8MC

住友建機株式会社は、建設業界の人手不足と生産性向上という課題に対応すべく ICT 施工対応の新型ショベル SH200Z-8MC を開発した。本機は高性能 ICT コントローラと電気レバーを搭載し、操作性と施工精度を向上させた。また、新たに「旋回正対アシスト」「アームスピードアシスト」「ブームパワーアシスト」の3機能を追加し、施工効率と安全性を強化した。実証試験では、特に法面施工における有効性が高く評価され、現場での実用性を確認した。

To address the challenges of labor shortages and productivity improvement in the construction industry, Sumitomo Construction Machinery Co., Ltd. has developed the new ICT-construction-ready excavator, SH200Z-8MC. This model is equipped with a high-performance ICT controller and electric levers, enhancing both operability and construction precision. Additionally, three new assist functions have been added—"Swing Head-On Assist," "Arm Speed Assist," and "Boom Power Assist"—to further improve operational efficiency and safety. Demonstration tests highly evaluated its effectiveness, particularly in slope construction, confirming its practical utility on-site.

1 まえがき

現在、建設業界を取り巻く環境は、人材不足などの問題が深刻化する一方で、インフラの修繕などの工事増加も見込まれており、生産性の向上が急務となっている。国土交通省では、土工における調査、測量、設計、施工および検査のプロセスにおいて ICT や 3 次元データを活用し、生産性の向上や魅力ある建設現場の実現を目指す i-Construction を進めており、ICT 施工の施工件数は着実に増加している。

住友建機では、これまでに i-Construction の ICT 施工に対応したショベルを市場に投入している。今回さらなる精度向上と使い勝手を向上させるべく高性能 ICT コントローラを新たに開発し、操作レバーを電気レバー化して新機能を搭載した SH200Z-8MC の開発を行った。本報では、SH200Z-8MC の新機能について報告する。

2 ICT 施工とマシンコントロール (MC)

ICT 施工では、現場の設計面データを電子管理し、その情報をショベル内のシステムと共有する。ICT 施工に対応したショベルは、その設計データとオペレータの操作をもとに半自動制御する。これをマシンコントロール (MC) と呼ぶ。ICT 施工により従来の丁張り作業が不要となり、大幅な効率化が期待できる。

通常のショベルの動作ではブーム、アーム、バケットの複合動作となり、バケットを設計面に沿うように真っすぐ動作させるのは容易ではない。住友建機の ICT 施工に対応したショベルはアーム操作用の左レバーにスイッチ (MC スイッチ) が付いている。このスイッチを押しながら左レバーを操作することでアームは手で操作し、ICT コントローラがバケットの爪先を設計面に沿うようにブームを自動で動作させる (図 1)。

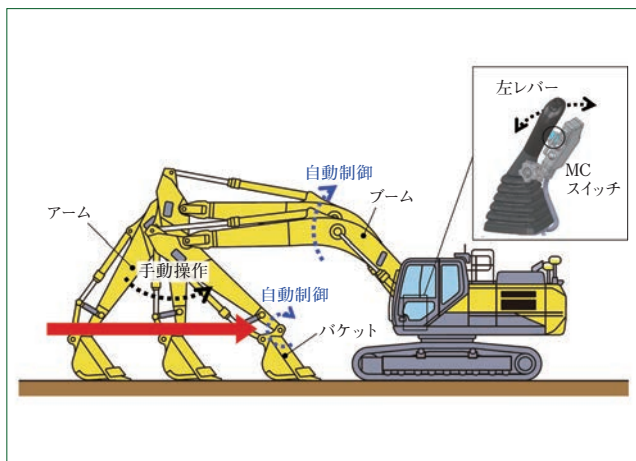


図1 MCの動作イメージ
MC operation image

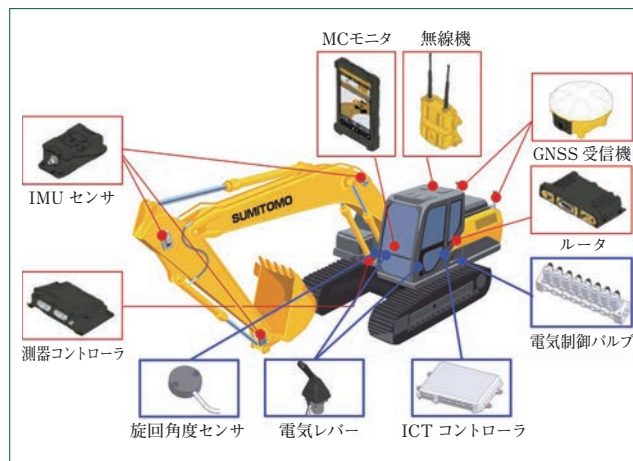


図2 MCの機器構成
MC equipment configuration

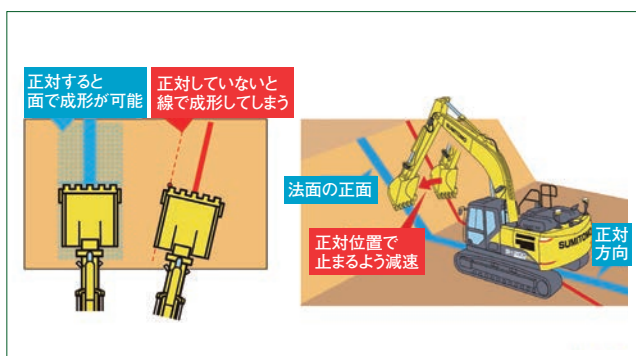


図3 旋回正対アシスト
Swing head-on assist

なお、バケット底面が設計面に沿うようにバケットの姿勢を自動制御するモードも有する。これらの機能により、熟練オペレータでなくても目標設計面どおりに施工することが可能となる。住友建機では、MCのさらなる使い勝手の向上を目的として新機能(旋回正対アシスト、アームスピードアシスト、ブームパワーアシスト)を開発した。

3 システムの構成

図2に、ICT油圧ショベルSH200Z-8MCの機器構成を示す。Trimble社製のEarthworksシステムを搭載し、住友建機のシステムと融合することでMCの機能を実現している。

3.1 姿勢・測位計測器

ショベルの本体とブーム、アームおよびバケットリンクに設置されたIMU (Inertial Measurement Unit: 慣性計測装置) のデータをもとにショベルの姿勢を高精度に計算する。3D仕様では、GNSS (Global Navigation Satellite System) アンテナと通信機器が搭載され、衛星測位情報と補正情報によりショベル本体の位置を算出する。測器コントローラは各IMUと3D機器からの情報により作業機の位置を算出し、さらに設定されている施工目標面とバケット爪先との距離情報を算出する。その結果は、モニタにガイダンス情報として表示される。オペレータはこのガイダンス情報を確認しながらショベルを操作することで、設定されている施工目標面どおりに施工することが可能となる。

3.2 ICTコントローラ

ICTコントローラは、自動制御の対象であるブームやバケットへの指令を設計面と機械の位置・姿勢情報をもとに計算する。指令生成のアルゴリズムにはMPC (Model Predictive Control) を採用し、施工精度の向上を図った。MPC制御は制御対象をモデル化し、得られたセンサ情報と制御モデルから未来の状態を予測し、制御周期ごとに動作が目標軌道に合うように指令を修正する制御手法である。MPCにより生成した指令を電気レバー制御に通知し、オペレータのレバー操作(手動操作指令)と制御指令とを調停した結果が電気制御バルブで出力される。

3.3 電気レバー

SH200Z-8MCは、オペレータの操作性やMCとの親和性を向上させるべく従来の油圧パイロット系を電気レバー化し、動作指令生成をソフトウェア化することで各種機能への対応を可能にした。電気レバーは油圧レバーに比べ操作感が軽く、慣れれば快適だが、油圧レバーとの操作感の差に戸惑うという声もあった。このことから、各種現場やオペレータのさまざまな意見を参考に電気レバーの快適性は残しつつ、油圧レバーの操作性に近づける改善を行った。また、電気レバー化にはコンポーネントの削減によりコストが抑制できたり、機械を減速・停止させるような安全機能の実装が容易といったメリットもある。

3.4 旋回角度センサ

下部の走行体と上部の旋回体の相対角度を計測可能な旋回角度センサを搭載した。旋回角度センサは後述するブームパワーアシスト、FVM3、作動範囲制御で用いる。

4 SH200Z-8MCの新機能

4.1 旋回正対アシスト

旋回正対アシストは、法面の設計面に対して機体を半自動で正対させる機能である(図3)。法面を施工する場合、法面に正対していないとバケットが法面と平行にならず、法面の成形が困難となる。法面に正対することは必須である。しかし、目視での判断は容易でなく、実際の作業ではオペレータが時間をかけてショベルを正対させる調整作業が必要となっ

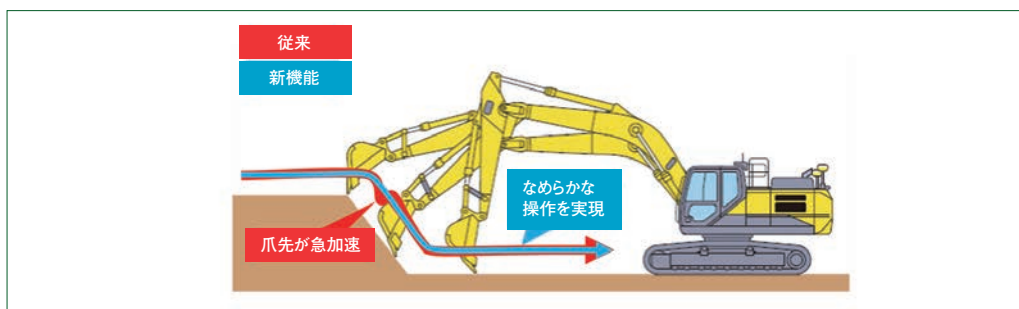


図4 アームスピードアシスト
Arm speed assist

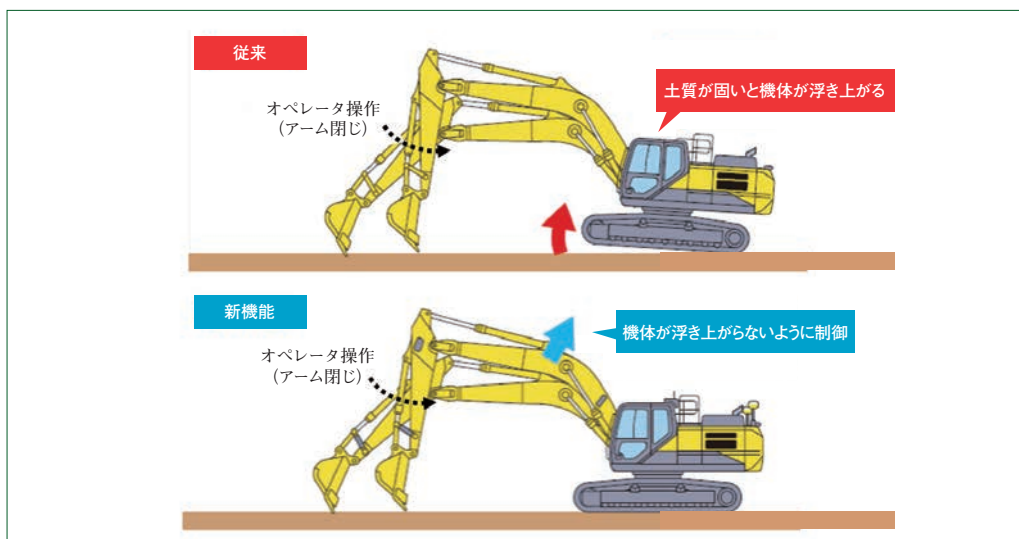


図5 ブームパワーアシスト
Boom power assist

ていた。旋回正対アシスト機能は、MCスイッチを押しながら旋回することで正対方向に近づくとき自動で減速して正対位置で停止する。旋回正対アシスト機能が働いているときはモニタ表示により機能が有効であることを示し、通知音でも知らせることでオペレータは作業しながら制御の状況を知ることができる。これにより、オペレータの負担を軽減しつつ、施工効率を向上させることが可能となった。

4.2 アームスピードアシスト

アームスピードアシストは、設計面の切替わり時にアーム速度を自動制御することでバケット爪先の急加速を防ぎ、施工精度を向上させる機能である（図4）。

従来機であるSH200-7MCでは、MCで操作する場合はアームの操作量に応じてブームを制御することから、水平面から法面への切替わり時に爪先が急加速し、施工精度が低下するという問題があった。また、オペレータはこの挙動を認識しており、設計面の切替わりでは気を使いながら操作する必要があった。

アームスピードアシストは、基本的には手動操作の対象であるアームの速度を自動で調整する機能である。この機能により、切替わり面でも連続して安定した動作が可能となり、施工精度を向上させるとともにオペレータの負担軽減を実現した。本機能はMCの設定画面からON/OFFが切り替えられるので、アーム操作に自動制御が介入してほしくないオペレータはOFFにすることも可能である。

4.3 ブームパワーアシスト

ブームパワーアシストは、掘削力を制御し、硬い地面を施工する際に車体前方が浮き上がるジャッキアップを防止する機能である（図5）。本機能によりSH200Z-8MCではMCによる作業中でも掘削力を維持しつつ、ジャッキアップを防止することが可能となった。

油圧ショベルは、工作機械などと異なり土台（地面）に固定されていない。このことから、車体重量を超えるような掘削力を出すことはできず、硬い地面に過度な力を加えようとすると車体がジャッキアップしてしまう。MCでは、爪先が設計面に自動で追従するように制御されるが、地面が硬い場合は必要に応じてブームを逃がしジャッキアップを防止する必要がある。ただし、ブームを逃がしすぎると掘削力が低下することから、掘削力を最大限に確保しながらジャッキアップを防止する必要がある。また、クローラは前後方向と左右方向の長さが異なるので車体上部がクローラに対しどのような向きになっているかによってジャッキアップのしやすさは異なる。

SH200Z-8MCはIMUセンサ、シリンダ圧力センサ、旋回角度センサを搭載しているため、掘削反力やショベルの安定性を推定することが可能である。バケットを地面に押し付けた際の反力と車体重量から計算される掘削力の限界を計算し、掘削限界を超えないようブームを制御することで、掘削力を維持しながら安定した施工を実現した。制御レベルは調整可



図6 FVM3への追加機能
Additional features in FVM3

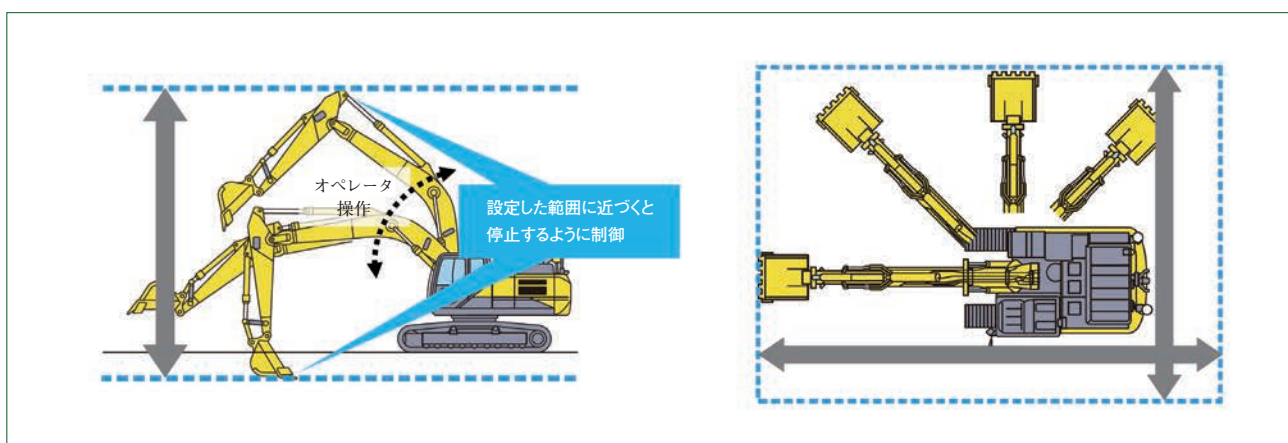


図7 作動範囲制御
Operating area control

能で、オペレータは実際の施工状況に応じた最適な制御ができる。

4.4 その他の新機能

ベースとなるSH200-8は、アドバンス機能としてFVM3を搭載している。人検知機能と衝突軽減機能により安全ベストを着用した人の接近を検知すると、人と機械の距離に応じて走行や旋回を自動的に落とし、停止させる。SH200Z-8MCは旋回角度センサを搭載しており、カメラが付いている旋回上部と走行体の相対関係が把握できる。このため衝突軽減機能により停止しても、人が検知されていない方向への走行を可能にすることで作業効率の向上を図った(図6)。

また、SH200Z-8MCには安全性向上のため作動範囲制御機能を搭載している。作動範囲制御は、高さ・深さ・面(前後左右)の各方向に動作範囲を設定(図7)し、設定範囲に近づくときアタッチメントと旋回を減速・停止させる機能である。これにより、構造物や障害物との接触リスクが低減した。

このように、SH200Z-8MCはFVM3により作業現場における人との接触リスクを低減し、作動範囲制御により周囲の構造物や障害物に接触するリスクを低減することで、オペレータが安心して作業できる機械となった。

4.5 実証試験

SH200Z-8MCの実証評価を2022年から複数の顧客現場で行ってきた。試験は香川県、富山県、神奈川県の現場で実施し、土質や作業内容の異なる環境下で性能が検証された。特

に評価が高かったのは旋回正対アシスト機能で、法面施工での有効性が認められた。また、電気レバーについては、油圧レバーに比べて操作が軽いので戸惑うが、慣れれば操作性が向上するとの意見が多かった。しかし、慣れるまでに時間がかかるという声もあり、量産機へフィードバックし、改善した。

総評として、SH200Z-8MCはスムーズな動作による現場での使い勝手や施工精度に高い評価を得た。

5 むすび

- (1) ICT施工に対応したショベルの施工精度と使い勝手を向上させたSH200Z-8MCを開発した。
- (2) 電気レバーを採用することで動作指令生成をソフトウェア化し、シンプルな構成でMC機能の組み込みを実現するとともに、機械の減速や停止など安全に関わる機能や、今後の拡張を容易に行えるシステムを構築した。
- (3) 実証試験において、3つの新機能(旋回正対アシスト、アームスピードアシスト、ブームパワーアシスト)による使い勝手の向上や電気レバーの操作性を検証し、高評価であることを確認した。

※「FVM」は、住友重機械工業株式会社の登録商標です。

油圧ショベル積込み重量計測技術の開発

Development of Loading Weight Measurement Technology for Hydraulic Excavator

● 西 牧 潤* 平 沼 一 則*
Jun NISHIMAKI Kazunori HIRANUMA

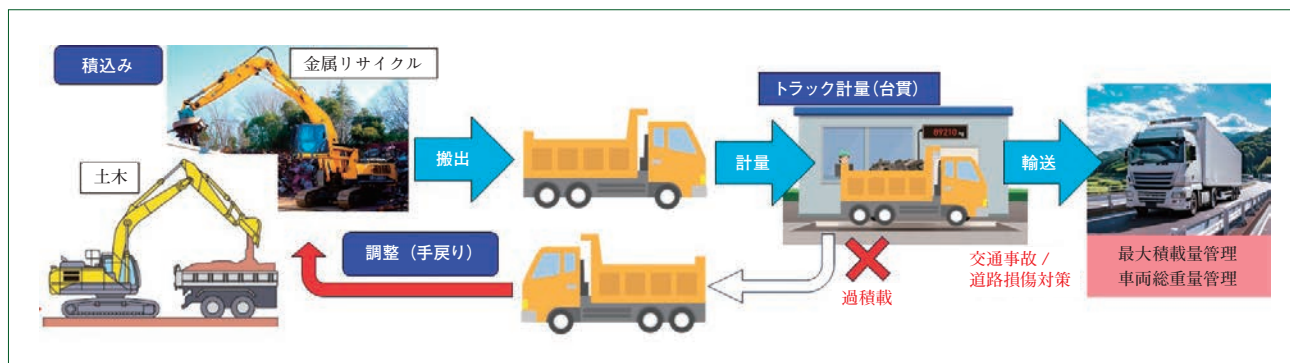


図1 油圧ショベル積込み作業現場
Loading work site by hydraulic excavators

油圧ショベルのペイロード機能は、トラックへの積込み作業中に搬送重量をリアルタイムで計量するシステムである。この機能により、オペレータは正確な積載重量を把握することができ、トラックの過積載防止と効率の良い輸送を可能とする。本報では、油圧ショベル標準機およびマテリアルハンドリング機向け製品の機能開発、製品実装および精度評価結果について報告するとともに、各種アタッチメントへの適応を目的とした機種展開と、開発効率向上のための手法について説明する。

The payload technology of hydraulic excavators is a system that measures the transport weight in real time while loading the truck. The operator can know the exact load weight, which prevents overloading of the truck and enables efficient transportation. In this paper, we report on the technology development and product implementation of products for standard hydraulic excavators and material handling machines and the results of accuracy. We will also explain the development of models that are compatible with various attachments and methods for improving development efficiency.

1 まえがき

油圧ショベルにおけるペイロード機能は、作業中に搬送物の重量をリアルタイムで計量して正確な積載目標を達成することを目的とした技術である。この機能によりオペレータはトラックへの正確な積載重量を把握でき、違法で危険な過積載や作業効率を低下させる過少積載を防ぐことができる。

実際の現場では、土砂や金属材料などの資材を積載したトラックが公道や構内通路へ出る際に積載物の重量を台貫によって計測する必要がある(図1)。このとき積載物がトラックの最大積載重量を超えている場合や、運搬を予定した重量よりも少ない場合には、トラックは再度積込み位置まで戻り積載物の重量を調整した後に再計量する。このような手戻り作業が発生することや、それが繰り返されることでエネルギーの浪費やコストの増加にもつながる。また、船への積込み現場など台貫を使用せず経験による積込み量調整を行っている現場では、往々にして目標積載量に対し過少量の積込みとなるが、ペイロード機能を使用することで最大積載量近くまで積み込むことが可能となり、20%程度の積込み効率改善が見込まれる。これによりトラックの輸送回数が減り人件費、停泊料、CO₂排出の削減につながる。このように輸送の安全性

を確保しつつ輸送効率を向上させることができるペイロード機能の需要は、環境保全の観点からも高まっている。

主にバケットが装着され土砂掘削に使用される油圧ショベルの標準機において、ペイロード機能付きの製品は各社からすでに市場投入されており、このたび、当社でも商品開発を行い製品への実装を実現した。一方、マグネットやグラブが装着され金属スクラップや木材の搬送などに使用されるマテリアルハンドリング機においては、各社に先駆けて商品開発を行い、機械特性や作業特性に合わせてペイロード機能を追加した製品を上市した。

顧客ニーズや市況に対応した開発を速やかに行うには、ソフトウェアの早期開発とリードタイムの短縮が必須であったが、当社はモデルベースデザイン開発手法を採用することで、開発の効率化とソフトウェアの品質向上を両立した。また、機種やエンドアタッチメント展開のさらなる拡充を見据えてプロダクトライン開発の設計手法を導入し、設計品質の向上と設計リスクの低減を図っている。

当社のペイロード機能付き油圧ショベルにおいては、オペレータが通常行っている作業感覚はそのままに、計測精度が高くストレスフリーな機能設計を行った。特に、台貫補正機能を実装し、作業を重ねるごとにオペレータの癖や作業環境

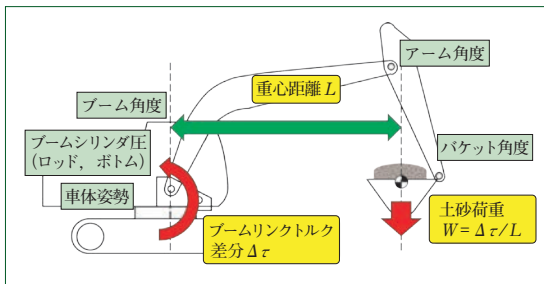


図2 基本重量計算
Basic weight calculation



図3 機種展開と対象アタッチメント
Model lineup and applicable attachments



図4 機種ごとの搬送軌跡の違い
Differences in transport trajectories

の影響を補正可能とした点や、スピードモードと調整モードの切り替え機能により搬送作業全体の速度を落とさず精度を保つ機能を実装した点を特長としている。これらの機能の詳細は後述する。

当社製品の顧客試乗会やモニタ試験を実施したところ使用感、精度ともに高い評価が得られ、市場に受け入れられる性能を十分に有していることが実証できた。

2 ペイロード機能の基本原理解

標準機、マテリアルハンドリング機ともに、基本となるペイロード機能の重量計算方法は同じで、ブームリンクトルク差分 $\Delta\tau$ を搬送物重心距離 L で割ることで搬送物重量 W を算出する(図2)。

重量計算に使用するセンサの構成例は、①ブームシリンダ圧力センサ、②アタッチメント角度計測センサ、③車体およびアタッチメント角速度センサだが、このほかにアタッチメント自重による空荷時のトルクや、ブーム・アーム、旋回の動作時に生じる誤差トルクを補償することで、搬送物のより正確な重量を算出する。さらに、掘削積込み中に安定した動作を行った瞬間の計算重量を切り出し、搬送物重量を確定させている。

3 ペイロード機能の技術開発

3.1 ペイロード機能の機種展開

ペイロード機能の対象機種は、バケットが装着された20t標準機およびマグネットが装着された33tマテリアルハンドリング機である。これに加えて、簡易にエンドアタッチメントを交換可能にするオプションとして、クイックヒッチが装

着された場合も対象としている。これらのうち、特にバケットにおいては顧客が装着するアタッチメント形式を特定できないという実情から、正確な諸元を知ることができない。この点においては、現場で可能な寸法および質量の計測方法の確立や、キャリブレーション機能による誤差の吸収などで対応している。図3に、機種展開と対象アタッチメントを示す。これ以外の機体サイズや対応アタッチメントの拡充を図るべく現在も開発継続中である。

3.2 標準機向けペイロード機能の開発

土砂掘削機である標準機を対象としたペイロード機能の開発では、土砂を掘削して持ち上げ、搬送してトラックに積み込むという一連の動作において、ペイロード機能が追加されてもオペレータは特別な操作を求められないストレスフリーであること、正確な重量を計測できることに重点を置いた。これは、すくい上げる動作にほぼ限定できる土砂掘削のオペレーション特性を最大限に活用するとともに、機械の配置と作業現場環境によって発生する動作軌跡のわずかな違いによる誤差要因への補償機能を加えることにより実現した。なお、土砂掘削作業の特性を分析しバケット姿勢の検知が不要であることを見極め、損傷を受けやすいバケット角度センサを不要とする設計としたことで、さまざまな用途に兼用で使用される機械にも搭載が可能となった。これらの機能開発により、高効率・高精度な積込み作業をストレスフリーに実行することができる。誤差調整の手戻り回数が激減することも相まって、現場での有用性は非常に高い。

3.3 標準機とマテリアルハンドリング機における使用方法の違い

標準機では図4左に示すように土砂をすくってこぼさないような搬送動作（バケットを手前に引き寄せて持ち上げるという軌跡）となり、姿勢を限定しやすく動作中のアームの動きは小さい。一方、マテリアルハンドリング機はスクラップ山のいたるところから金属材料を吸着・把持し持ち上げられることから、図4右に示すように作業現場のレイアウトや各オペレータの操作特性などにより軌跡や姿勢が限定しにくく、また動作中のアームの動きが大きくなる。さらに、各アタッチメントの質量が大きいうことも相まって搬送作業中の振動が大きくなりやすく、その結果精度が悪くなるという問題がある。

つまり、マテリアルハンドリング機のスクラップ積込み作業では、土砂掘削を行う標準機に比べて把持の瞬間の姿勢や搬送軌跡が限定しにくいという特徴がある。これに対して振動しないように丁寧な操作を要求することで高い精度を保つ

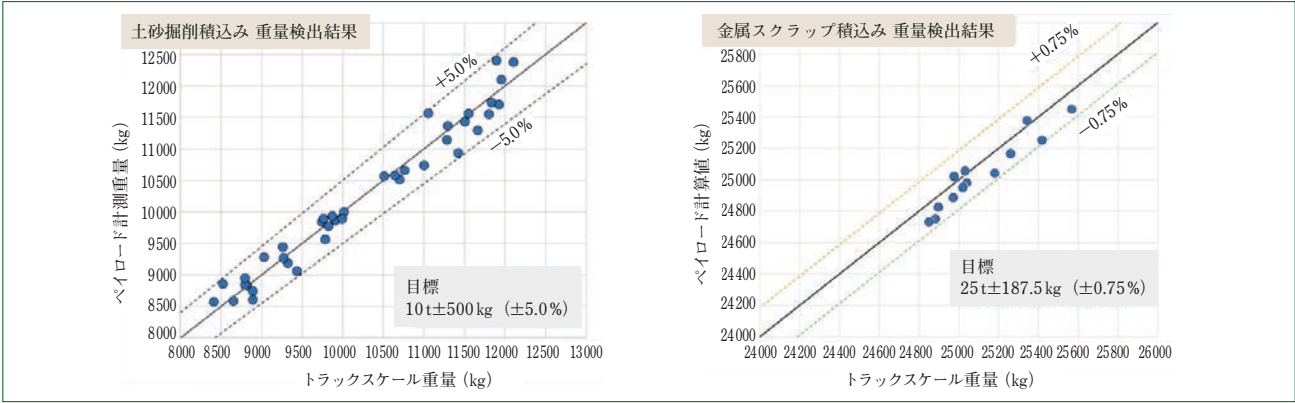


図5 積込み重量検出精度
Payload measurement accuracy

表1 積込み重量精度の目標仕様
Payload measurement accuracy target specifications

土砂掘削積込み作業	10t±500kg (±5%)
スクラップ積込み作業	25t±187.5kg (±0.75%)

こともできるが、オペレータに対する操作制約が厳しくなり、作業速度・効率の低下、オペレータの負担増加やストレスにつながってしまう。

3.4 マテリアルハンドリング機向けの技術開発

当社のマテリアルハンドリング機向け製品では、搬送作業の分析をもとに、トラックへの積込み作業を「スピードモード」と「調整モード」の2つの作業モードに分類することとした。

スピードモードは、計測精度よりも作業速度を優先するモードである。精度が低いと推定される動作による確定重量であっても、そのまま積算できることから計量に特別な操作は要求されず、通常の搬送作業と同様にストレスフリーな作業が可能である。

調整モードは、作業速度よりも計測精度を優先し、計量操作の安定性を高めるべく強い制限を課すモードである。操作制限値を満たさない場合はオペレータにエラーを伝え、再計測動作を求める。これは、スピードモードで積み込んだトラックの台貫計量後の再計測、つまり目標重量に対する誤差調整作業への使用を想定しているが、積込み作業全体のなかで調整モードによる積込み回数の割合はかなり少ない。つまり、現状では高精度計量のための丁寧な操作をオペレータに要求することや、所望の精度が得られない操作の場合のやり直しが許容されている。これら2つのモードは操作画面上からオペレータが任意に切り替えることができる。

このように、通常の搬送作業ではスピードモードによって計量を意識しない操作で大半の作業を行うことができ、調整モードの高精度計量により、調整作業の手戻りがおよそ1回で済む。このことは、誤差が大きくなりやすいマテリアルハンドリング機でも、ストレスフリーと積込み作業の効率改善を両立できるという大きな効果をもたらす。

4 精度目標値と性能

表1に、標準機とマテリアルハンドリング機それぞれの積

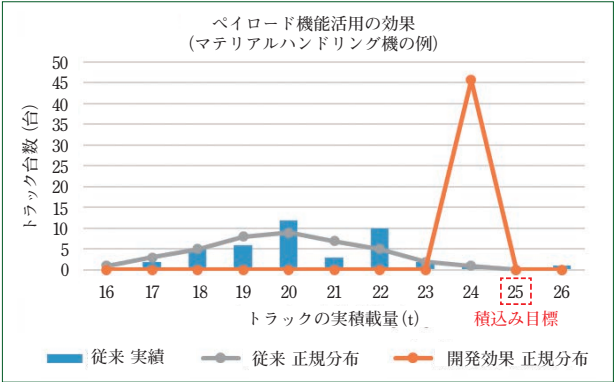


図6 ペイロード機能活用による効率向上効果見込み
Estimated effect by payload technology

込み重量精度の目標値を示す。

この後に記述する手法で作成されたソフトを性能検証機のコントローラに実装し、トラックへの積込み試験を行った。図5に、精度目標に対しての達成結果を示す。縦軸がペイロード機能で計測されたトラック1台分の積算重量で、横軸が台貫で外部計測された実重量である。実線は誤差がゼロとなる点を示し、点線で挟まれた範囲が目標仕様範囲を示している。すべての試験条件で計測誤差が目標精度を達成する結果となったことが示されている。

図6に、マテリアルハンドリング機を例にこの目標精度を達成したことによるトラックの輸送効率向上に対する見込み値を示す。ペイロード機能を使用しない場合、25tの積込み目標値に対して実測値は16～24tの範囲で正規分布の広いつきを示す。この25tに満たない分は、再度積込み量を調整することを数回繰り返すか、そのまま搬出される。一方、ペイロード機能を使用した場合は、1度の調整作業によって積込み量がほぼ24t前後の値に集約され、高い輸送効率を実現することが可能である。これにより、手戻りを繰り返す分の積込み作業時間が削減されることが、トラックの輸送台数が削減されることで、環境負荷や輸送コストに対して約20%もの大きな改善効果が期待できる。

5 開発効率ならびにソフトウェア品質の向上

5.1 モデルベースデザイン開発の導入による開発効率化

従来の開発は、作成したソフトウェアを実装して繰り返し実機試験が行われており、非常に効率の悪い方法であった。そこで、本開発におけるペイロード機能の実装用ソフト開発

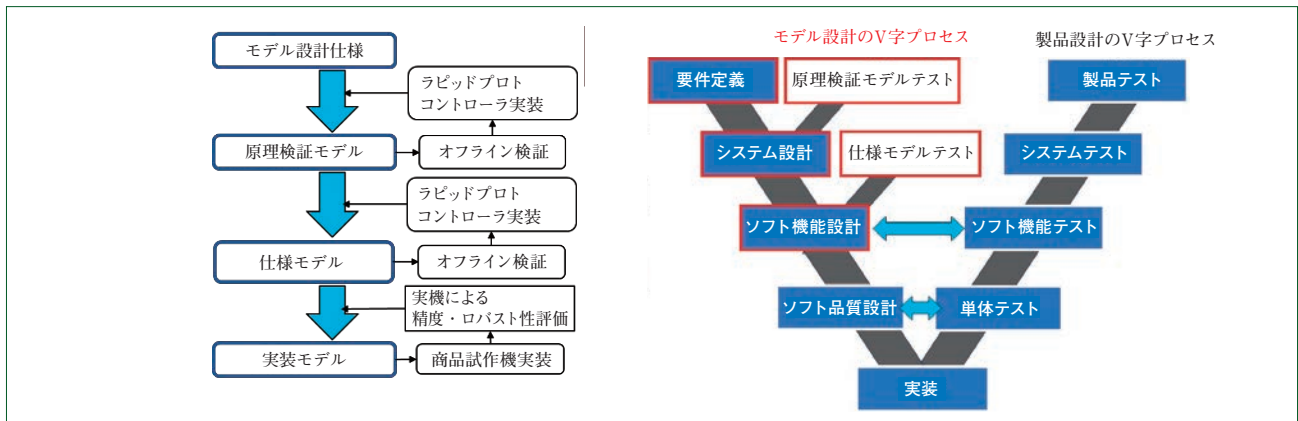


図7 ペイロード開発におけるモデルベースデザインのV字プロセス
V-process of MBD in payload development

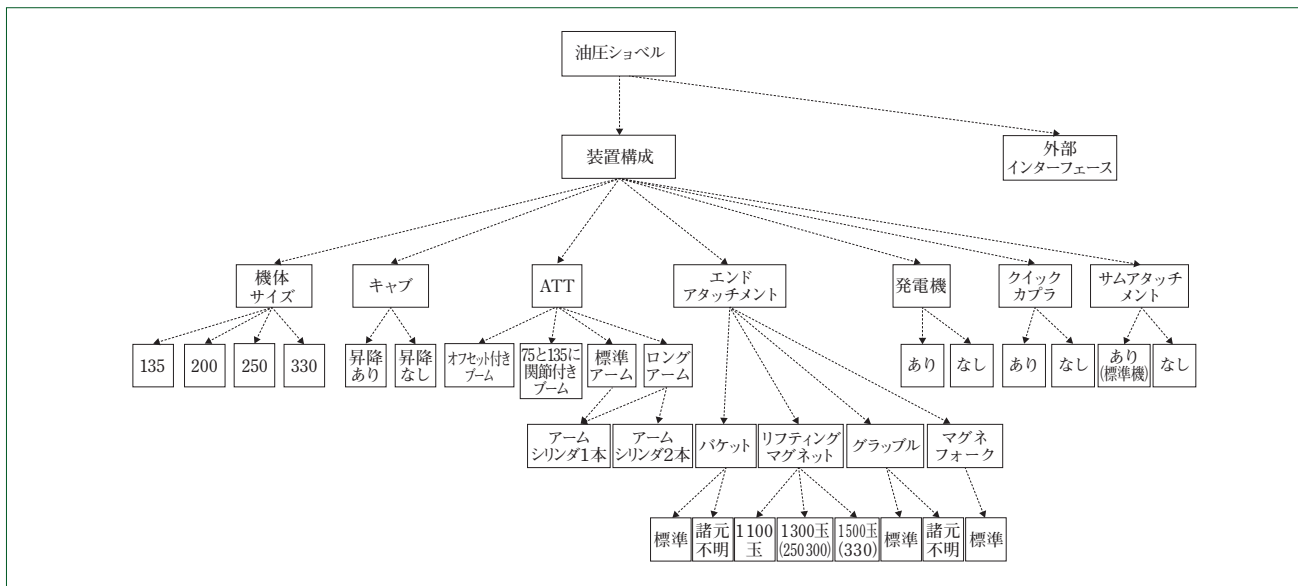


図8 機種展開におけるフィーチャー図
Feature diagram for model lineup

には、モデルベースデザイン開発手法を用いた。この手法により、シミュレーション技術による品質向上が早期の段階で可能となった。図7に、ペイロード機能のモデルベース開発におけるV字プロセスを示す。

図7の「原理検証モデルテスト」と「仕様モデルテスト」において、開発目標のリファレンスとする油圧ショベル動作データを活用したシミュレーションが可能となったことで、試作と実機実装試験を削減した革新的効率化を実現し、ソフトウェア開発のリードタイム短縮に非常に大きな効果があった。

5.2 プロダクトラインの開発戦略

油圧ショベルは、用途ごとに異なる機種サイズやエンドアタッチメントが選択され、それに従って作業現場や運用方法も異なる。このことから、ソフトウェアの構成も変更が必要となる。このソフトウェア管理の問題を解決する方法として、自動車産業やエレクトロニクス業界のソフトウェア開発に広く使われているプロダクトライン開発手法を適用した。異なる機種間で共有できるコア資産を特定し、再利用することで開発リスクやコストを削減でき、品質の向上とトレーサビリティの確保を可能とする。本開発においては、機種展開に際しての機能変動点をフィーチャー図によって抽出し、それに

対応したペイロード機能のマッピングを行い、分類に基づいたソフトウェアアーキテクチャの再構築を行った(図8)。これにより今後の機種展開やアタッチメント展開に際して起こり得るリスクを大幅に削減し、ソフトウェアの品質を向上させることができる。

6 むすび

- (1) 油圧ショベル標準機ならびにマテリアルハンドリング機の2機種に対して、搬送重量とトラックへの積載量をリアルタイムで算出するペイロード機能を実装し、上市を実現した。
- (2) 機能の特長であるオペレーションの特性を踏まえた当社独自の重量計測手法により、作業性を損なわないストレスフリーかつ精度の高い重量計測手法を実現した。
- (3) 顧客試乗会や客先モニタ試験を実施し、高い評価を得たことで当社製品の優位性を実証した。
- (4) 製品の実現に際しては、開発効率向上を目的として建機機種にモデルベース開発手法を適用した。また、適用機種をさらに展開させるに当たって、ソフトウェアの品質確保を目的としたプロダクトライン開発を導入した。

自律ショベルの開発

Development of Autonomous Excavator

●佐野 裕介* 原 孝介* 相澤 晋* 平手 奨二*

Yusuke SANO

Kosuke HARA

Susumu AIZAWA

Shoji HIRATE

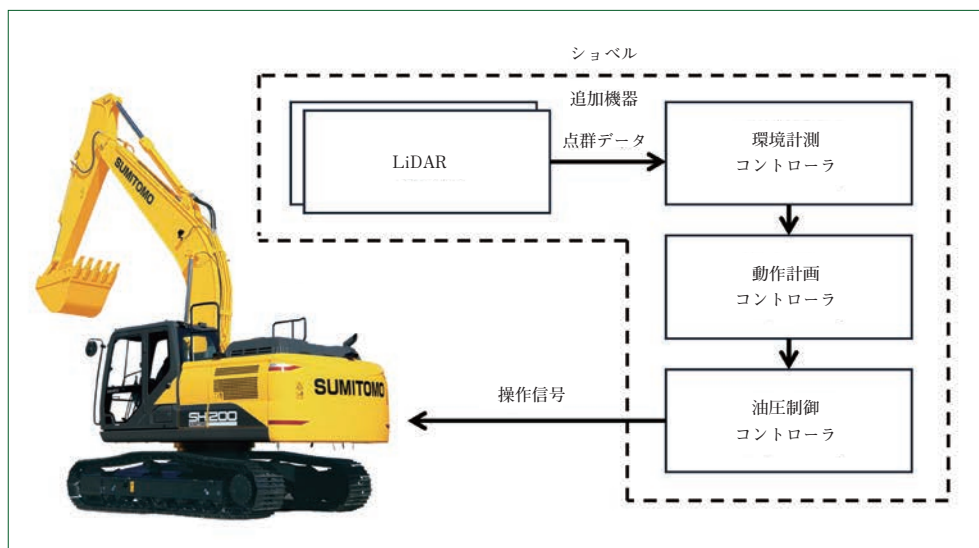


図1 自律ショベルの機器構成
Device configuration of autonomous excavator

建設業界では、熟練労働者の減少による労働力不足の解消と生産性向上が課題となっている。国土交通省のi-Construction2.0は施工のオートメーション化を目指しており、特に油圧ショベルの自動化が注目されている。当社グループでは自律ショベルの開発を進めているが、これは搭載されたコンピュータが周囲の環境を考慮しながら自律的に動作を計画し、作業を実施するものである。自律ショベルには、LiDARなどの自律動作に必要な機器が搭載され、これらのセンサ情報をもとに環境計測、動作計画、油圧制御が動作する。実証実験では、自律ショベルの性能を掘削土砂重量や作業時間によって評価し、掘削積込みと法面整形が自律作業によって行われることを確認した。また、開発中の成果は、国内外の展示会で参考出展を行った。

Major problems in the construction industry are labor shortages due to a decline in skilled workers and the need to improve productivity. In i-Construction 2.0, the automation of construction work is being promoted, and the development of autonomous construction machinery is progressing. We are developing an autonomous excavator that plans its operations autonomously while taking into account the surrounding environment and carries out tasks. This machine is equipped with sensors necessary for autonomous operation, and environmental sensing, motion planning, and motion control are performed based on this sensor information. In a proof-of-concept experiment, the performance of the autonomous excavator was evaluated based on the excavated soil weight and cycle time, and it was confirmed that the tasks of loading dump trucks and leveling slopes could be performed automatically.

1 まえがき

建設業界では、熟練労働者の減少による労働力不足の解消と生産性の向上が課題になっている。国土交通省が2024年に策定したi-Construction2.0では、施工のオートメーション化、データ連携のオートメーション化、施工管理のオートメーション化によって省人化を実現することを目指している⁽¹⁾。施工のオートメーション化では、施工を自動化することによって、一人のオペレータが複数の建設機械を遠隔で管理することを目指している。施工を自動化するには、建設機械を自動で動作させる必要があるが、建設機械のなかで油圧ショベ

ルは作業タスクや動作環境の複雑さによって、ルールベースで動作する自動化が困難であった。しかしながら、近年、高度なアルゴリズムを搭載し油圧ショベル自らが考えて動作する自律ショベルの開発が進んでおり⁽²⁾、現場への適用が期待されている。

2 開発目的

当社グループにおいても油圧ショベル自律化開発の成果を報告しており⁽³⁾、本報では自律ショベルの性能実証を目的に、油圧ショベルを自動で動作させるための機能を開発し、実証実験を行った結果を報告する。自律ショベルは、自動で所望



図2 ショベルに設置された LiDARのうち、車体上のもの
LiDAR mounted on machine, installed on vehicle body

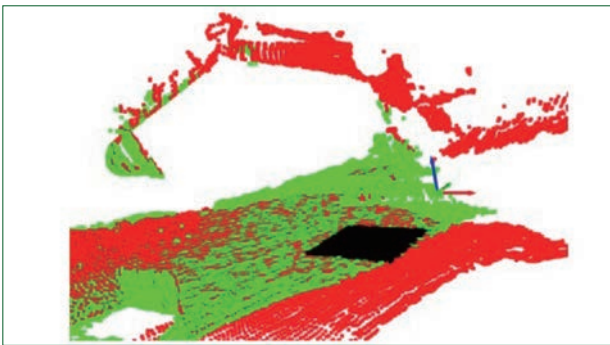


図4 点群データ
Point cloud data

のタスクを完遂する油圧ショベルである。通常の油圧ショベルは、機械に搭乗したオペレータの操作によって動作するが、自律ショベルは、ショベル内部に搭載されたコンピュータが周囲の環境を考慮しながら自律的に動作を計画し、作業を実施する。無人での作業が可能になることで、熟練オペレータの確保が不要になり、労働力不足の解消が期待される。また、一人のオペレータによる複数台の自律ショベルの管理が可能になることで、生産性の向上も期待できる。

3 機器構成

開発中の自律ショベルの概要を次に示す。自律ショベルのベース機として、住友建機株式会社製SH200-8(運転重量21t, バケット容量(新JIS) 0.8 m³)を用いた。本機はICT建機として、アタッチメントと車体の姿勢情報を計算するためのIMU センサ、車体位置を計測するGNSS受信機を搭載している。ショベルを自動で動作させるべく、図1に示す機器をショベルに設置した。外界センサとしてLiDARを車体とブームに設置し(図2)、外部情報を取得する。複数台のLiDARによって計測範囲の重複が発生するが、今回の実証実験では検証用として複数台のLiDARを設置した。取得したセンサ情報や外部情報を処理することを目的として、環境計測コントローラ、動作計画コントローラ、油圧制御コントローラを搭載した。各コントローラで今回開発した機能が実行される。

4 システム構成

図3に、自律ショベルのシステム構成を示す。自律ショベ

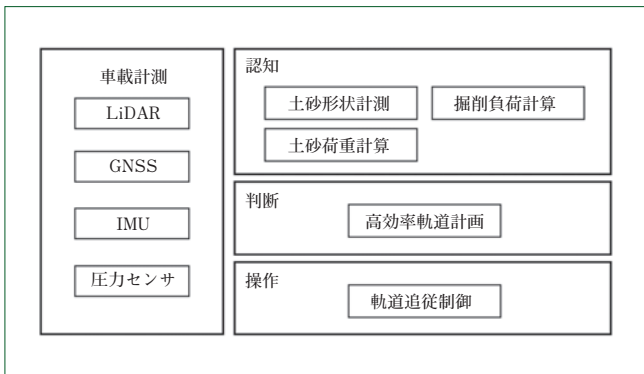


図3 システム構成
System configuration

ルの動作に必要な機能を「認知」「判断」「操作」に分類し、それぞれの分類において機能開発を行っている。認知は土砂形状計測、掘削負荷計算および土砂荷重計算を、判断は高効率軌道計画を、操作は軌道追従制御を行う。ショベルに設置された各種センサからの計測情報は「車載計測」に分類される。

4.1 認知

認知に分類される土砂形状計測は、ショベルに搭載されたLiDARによって取得された外部情報を用いて、ショベル周囲の地面形状とダンプトラックの荷台形状を計測する機能で、環境計測コントローラで実行される。計測された土砂形状の情報は、ショベルの目標動作を計算する高効率軌道計画で利用される。ショベル周辺の地面形状の計測は、ショベル車体上に設置された2台のLiDARによる計測情報を使用する。それぞれのLiDARの座標系が異なることから、LiDAR同士の位置関係をショベル座標に校正することで、高精度な地形形状の地図生成を可能にした。図4に、校正された点群を示す。2台のLiDARによる点群データが色分けしてプロットされているが、2台のLiDARによる点群データがショベルのバケットと地面を構成しており、精度良く校正されていることが確認できる。ダンプトラック荷台の土砂形状は、主にブームに設置されたLiDARによって計測される。ショベルによって積載されるダンプトラック荷台内の土砂形状を用いて、軌道計画機能は荷台内の積載可能な位置に土砂を排土する軌道を生成する。

4.2 判断

判断に分類される高効率軌道計画は、土砂形状計測によって得られた土砂形状をもとに、ショベルが動作する軌道を生成する機能で、動作計画コントローラで実行される。ショベルが土砂を掘削するとき、作業効率を最大化するには1回で多くの土砂をすくう必要があるが、掘削によって時々刻々と変化する地面の形状やショベルの機構的な制約(力・速度など)をリアルタイムに考慮する必要がある。油圧ショベルのアクチュエータは、油圧ポンプによって動作することから、各アクチュエータの速度の合計は油圧ポンプの吐出流量によって制限される。また、油圧ショベルのアタッチメントは、油圧シリンダによって動作するので、動作可能な角度範囲が存在する。生成された軌道が、これらの制約を満たしていな

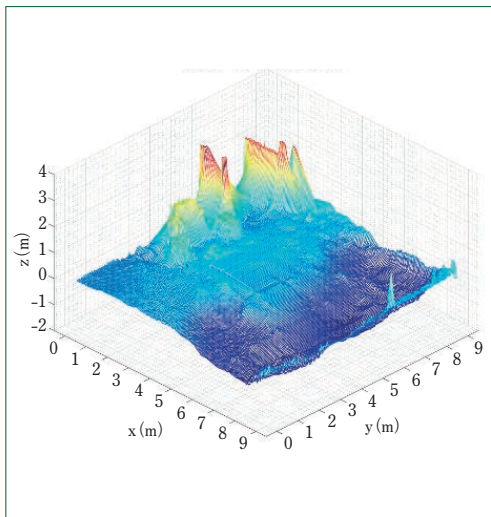


図5 地形形状
Measured terrain shape

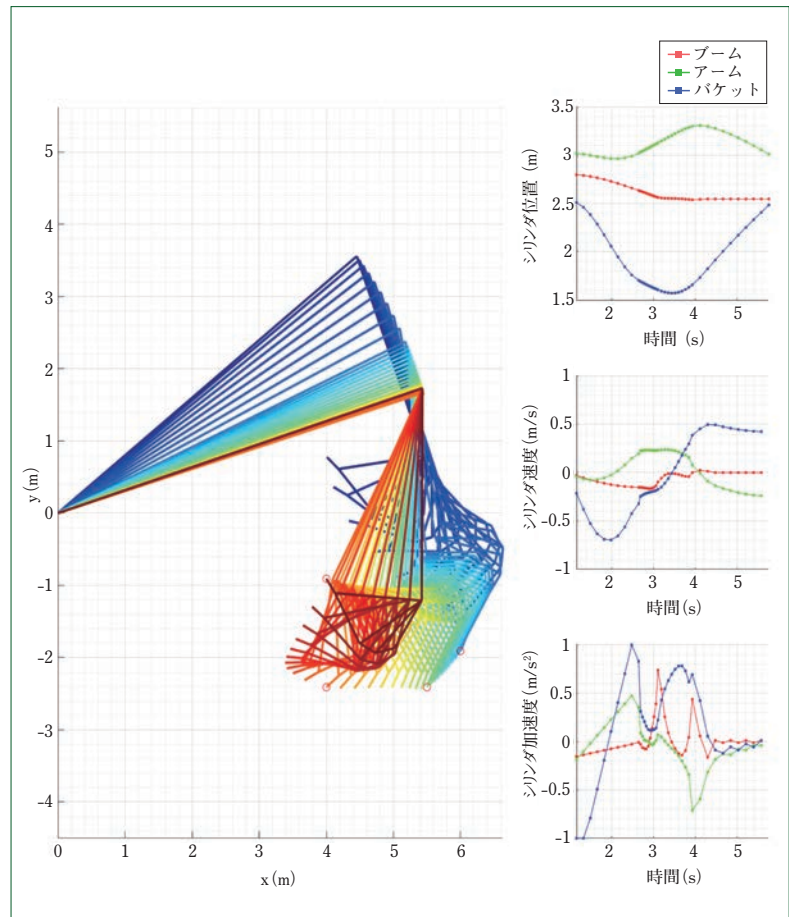


図6 生成された目標軌道
Generated target trajectory

いと実現不可能なものになってしまう。この問題に対応すべく、動作計画と軌道生成の階層構造を持つように動作計画機能が設計された。動作計画は掘削、旋回、排土などの動作の状態遷移や、土砂形状に適した軌道パラメータを深層学習によって学習した予測モデルを使用して推論する。軌道生成は、動作計画で決定された指示をもとに、最適化計算によって軌道を生成する。軌道はブーム、アーム、バケット、旋回の4軸それぞれに対する位置、速度、加速度の目標値で、リアルタイムに生成される。

4.3 操作

操作に分類される油圧制御機能は、動作計画機能によって生成された軌道に対してショベルアタッチメントの4軸（ブーム、アーム、バケット、旋回）を制御する。油圧ショベルは油圧特性やアタッチメント姿勢による非線形性の影響が大きく、高精度な制御は困難である。このことから、モデル予測制御を採用し、ショベルの油圧特性と姿勢の影響を考慮することで高精度な制御を実現した。これにより、ショベルの動作に応じた最適な制御入力生成され、計画された軌道に高精度に追従する。

4.4 機能検証

開発した地形形状計測機能が正しく動作し、所望の軌道が生成されること、アタッチメントが軌道に追従することを確認した。図5に、環境計測機能によって計測された地面形状

を示す。X方向がアタッチメント方向、Y方向が車体横方向である。X方向に地面が傾斜していることが地面形状として表現されていることが分かる。X方向の0m付近の土砂が盛り上がっている箇所は、ショベル車体を土砂と認識してしまっているが、ショベルの位置座標から削除することが可能である。図6に、計測された土砂形状と目標形状をもとに生成された軌道を示す。ショベルアタッチメントの目標位置が時系列で算出され、動作が生成されていることが分かる。図7に、生成された目標軌道に対する爪先位置の制御結果を示す。赤色の目標軌道の爪先位置に対し、青色の測定値は掘削中の外部負荷による影響で部分的に偏差が発生している箇所も存在するが、精度良く追従していることが分かる。これらの結果から、自律ショベルの一連の動作が可能であることが確認された。

5 実証実験

開発中の自律ショベルを用いた実証実験により、ダンプトラックへの掘削積込み（図8）と法面整形（図9）の自律作業が可能であることを確認した。ダンプトラックへの掘削積込みでは、ショベル周囲の土砂形状を認識しながら複数回の掘削を実行し、ダンプトラックが満載になるまで積み込めることを確認した。法面整形では、事前に与えられた目標地形をもとに法面を整形できることを確認した。なお、法面整形中の

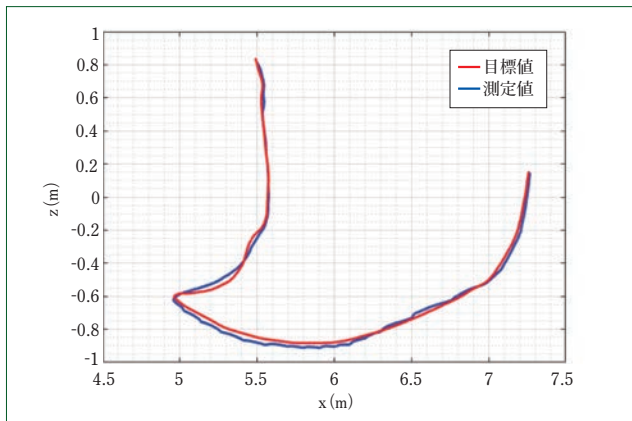


図7 アタッチメントの軌道追従試験結果
Attachment trajectory tracking results



図9 法面整形試験
Slope leveling tests

走行操作は、ショベル内部に設置された無線通信機器によって、車外のアオペレータが遠隔操作で実施した。整地作業後にバケット幅分の移動が行われ、連続して整地作業が行われた。

自律ショベルの評価に、掘削積込み作業時に掘削された土砂量と作業時間を用いた。掘削された土砂量の基準値は、バケットに土砂を平積みしたときの土砂重量とし、その重量は680kgであった。ダンプトラックへの掘削積込みを行う試験中の掘削土砂量の平均値は1135kgであり、バケットに平積みしたときの167%である。表1に、自律ショベルによる作業時間を示す。自律ショベルによる1回の掘削積込み動作の平均時間は21.84秒で、参考ではあるが、同様の試験をオペレータが行ったときは21秒であった。このことから、自律ショベルの動作速度はオペレータ操作の96%であった。

これらの結果から、実証実験の目的は達成したと考えられる。実証実験の映像を展示会 (CONEXPO：米国, CSPI：日本) に参考出展した。

6 むすび

- (1) 自律動作に必要なLiDARなどの機器を油圧ショベルに設置し、自律動作可能にした。
- (2) 自律ショベルに必要な機能を認知、判断、操作と分類して開発し、それぞれの機能の動作を検証した。
- (3) 開発中の自律ショベルを用いた実証実験で、掘削土



図8 掘削積込み試験
Loading dump trucks tests

表1 作業時間
Cycle time

作業	オペレータ操作時間(s) (参考)	自律ショベル作業時間(s) (平均)
掘削	5	4.26
上げ旋回	6	6.56
排土	5	4.11
下げ旋回	5	6.91
合計	21	21.84
動作速度比	-	96%

砂量や作業時間を計測し、掘削積込みと法面整形の自律作業が実施可能であることを示した。

(参考文献)

- (1) 国土交通省ウェブサイト, 報道発表資料: 「i-Construction 2.0」を策定しました～建設現場のオートメーション化による生産性向上(省人化)～, 国土交通省, https://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08_hh_001085.html, 参照 2025年5月8日.
- (2) Jud, D., Leemann, P., Kerscher, S. and Hutter, M., Autonomous free-form trenching using a walking excavator, IEEE Robotics and Automation Letters, 4-4 (2019), 3208-3215.
- (3) 横木竜次・原孝介・臼井道太郎, 熟練者の模倣による自律ショベルのための高効率な軌道計画アルゴリズムの開発, 第21回建設ロボットシンポジウム, (2023-9).

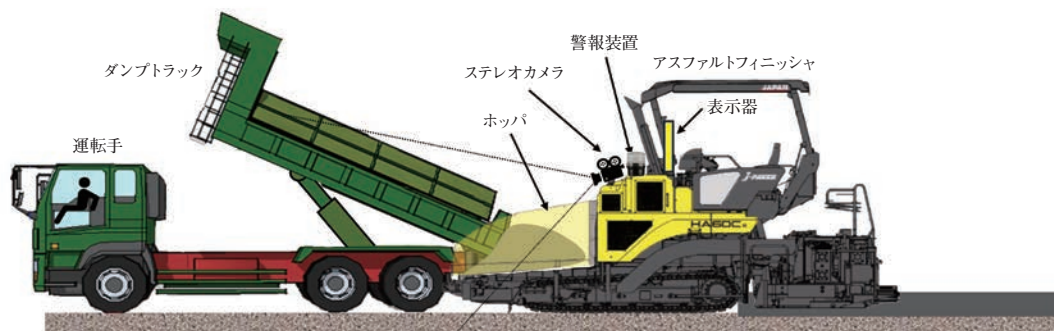
アスファルトフィニッシャのダンプトラック誘導自動化システム

Dump Truck Guidance Automation System for Asphalt Pavers

●小林 朋 弘* 寺 元 陶 太*

Tomohiro KOBAYASHI

Touta TERAMOTO



ダンプトラック誘導自動化システム
Dump truck guidance automation system



図1 現状のダンプトラック運転手への誘導指示
Current guidance instructions to dump truck drivers

1 はじめに

道路舗装施工では、現場から離れた合材プラントから現場までダンプトラックによってアスファルト合材が運搬される。アスファルトフィニッシャは、搬送された合材を受け取るべくダンプトラックを接車させる。その際、ダンプトラックの運転手に後退誘導やダンプトラック荷台の上げ下げなどの指示を出す必要がある。住友建機株式会社では、アスファルトフィニッシャの自動化機能を「ASTRA」と名付け、車両自体の自動化および施工時に車両の前後で稼働するダンプトラックや、ロードローラとの連携技術の開発を進めている。本報では、ASTRAの技術の一つであるダンプトラックの接車誘導システムについて紹介する。

2 現状と問題点

現状では、ダンプトラック運転手への指示はアスファルトフィニッシャのオペレータや誘導員が行うことが一般的であり、オペレータまたは誘導員がダンプトラックの運転手にハンドサインや声、ホーンなどの音声で指示を出している(図1)。

近年ではアスファルトフィニッシャに表示器を搭載し、誘導指示を表示させることでダンプトラックの運転手に指示を出す機能も出てきているが、その多くは表示の切り換えを手動で行う必要がある。また、日本国内ではダンプトラックの積載重量規制が厳しく、運搬が複数回にわたる場合、その都度ダンプトラックの運転手に対して指示を出さなければなら

ず、作業負荷が高くなっている。

アスファルトフィニッシャの自動化では、車体動作の自動化を進めても、ダンプトラックの運転手に誘導指示を出す作業は残る。オペレータや現場作業者の負担軽減、人員削減、さらには無人化といった課題を解決するには、誘導指示の自動化が必要となる。

3 ダンプトラック誘導自動化システム

3.1 システム構成

図2に、本システムの機器構成図を示す。本システムではステレオカメラを使用し、それによって得られた画像情報と深度情報をコントローラに送信する。

コントローラには画像処理部と制御部が実装されており、画像処理部では画像情報と深度情報から周囲状況や各機械の状態認識を行い、それらの情報から制御指令を決定し、各機器に指令を出力する。

ダンプトラック誘導指示表示器には、ダンプトラックの運転手に向けて運転動作を指示する画像が表示される。画像は、接車指示や荷台上げ指示など、従来は人が指示していた内容を図で表現したものである。警報装置は安全確保を目的として、機械が動作することを周囲の作業員に対してランプや音で知らせる。また、ホッパを開閉させるために油圧バルブに指令を出力する。

3.2 物体検知

本システムでは、アスファルトフィニッシャの周囲状況や各機械の状態を検知することが必要である。具体的には、ダンプトラックと人の認識、ダンプトラックとアスファルトフィニッシャの位置関係、ダンプトラックの荷台角度と荷台内の合材量、ホッパ開閉状態などで、その検出は前述したようにステレオカメラで行う。

ダンプトラックと人の認識には、一般に公開されている学習済み物体検出モデルを使用している(図3)。その他の位置関係やダンプトラック荷台角度、合材量、ホッパ開閉状態の検知には、ステレオカメラから得られる深度情報を用いる(図4)。

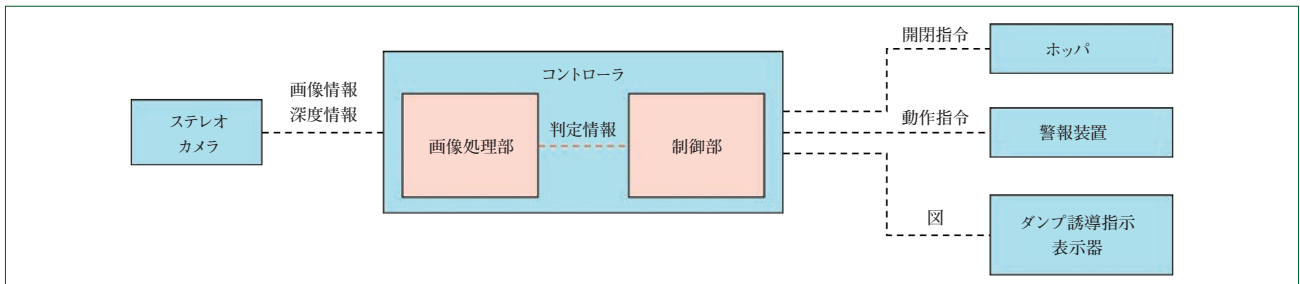


図2 機器構成図
Equipment configuration diagram



図3 物体検出
Object detection

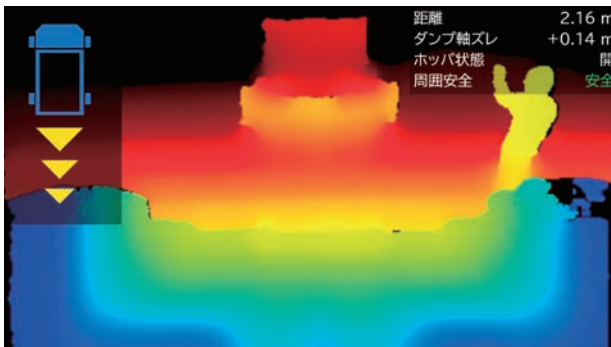


図4 深度情報
Depth information

3.3 ダンプトラック誘導自動化システム動作フロー

ダンプトラック誘導自動化の一連の流れを説明する。

まず、アスファルトフィニッシャの前方にダンプトラックが待機しているか否かを検出する。検出したダンプトラックとアスファルトフィニッシャ間の距離を推定し、接車されるまで後進指示を表示させる。後進指示の表示中に、ダンプトラックとアスファルトフィニッシャの間で任意に設定した危険エリアに作業者がいないかを確認する。作業者が危険エリア内で検出された場合には、ダンプトラックの運転手に向けて停止指示を表示し、警報装置からランプと音で警報を出力し、危険状態であることを周囲に知らせる。作業者が危険エリアから退避し、安全が確認された後に再度後退の表示が出力される。

ダンプトラックがアスファルトフィニッシャに近づき、接車されたと判定したら後進停止指示を表示する。その後、ダンプトラックの荷台を上げてアスファルト合材を供給する指示を表示する。荷台角度や荷台内合材量の推定値から荷台上げの停止タイミングを判定し、荷台上げ停止指示を表示する。合材供給が完了した後、荷台下げ指示を表示し、荷台角度が所定の角度以下になると、前進指示表示に切り替わりダンプ

トラックを離車させる。

ダンプトラックが離車して安全な距離まで離れるとホッパを閉じ、新たに搬送してきたダンプトラックがアスファルトフィニッシャの前方に待機していると判定すると、ホッパを開き、合材の受け取りが可能な状態となる。ホッパを開閉する際には、ホッパ周囲の安全が確認された状態で、ホッパが動作することを警報装置で知らせ、開閉指示を出力する。

以上が一連の流れである。本システムが実現するとダンプトラックの誘導を自動で行うことが可能となり、作業者の負荷軽減や誘導員の人員削減が期待できる。

4 今後の課題

本システムを実現するに当たり、課題となっているのがダンプトラック荷台内の合材量推定方法の確立であり、現在検証を進めている。また実際の施工現場では、さまざまなサイズ・形状のダンプトラックによって合材供給が行われることから、多種多様なダンプトラックに対応できる検出ロジックを確立する必要がある。しかし、現状では2種類のみの検証にとどまっていることから、今後さまざまな種類で検証を実施し、あらゆるダンプトラックに対応できるシステムを構築する必要がある。

舗装工事は夜間に実施されることも多い。これまでの経験から、作業現場では作業灯や対向車線を走行する自動車のヘッドライトなどによる光の映り込みが検出精度に影響を及ぼすことが想定されるが、そのような状況でも精度を確保することが必要となる。

これらの課題を解決すべく、試験場や施工現場でのデータを収集し検証を進めていく。

5 おわりに

- (1) アスファルトフィニッシャによる道路舗装施工では、搬送されたアスファルト合材を受け取る際に、合材を搬入してきたダンプトラックに対して誘導などの指示が必要である。その作業の多くは自動化されておらず、誘導員の人的負荷を軽減することが課題となっている。
- (2) アスファルトフィニッシャによる施工現場での省力・省人化を推進するには、車両の前後で稼働するダンプトラックやロードローラとの連携が不可欠であり、ダンプトラックの誘導も自動化する必要がある。
- (3) ダンプトラックの誘導自動化に必要とされる要素技術および開発を進めている誘導自動化のシステム構成、動作フロー、今後の課題について説明した。

※「ASTRA」は、住友建機株式会社の登録商標です。

クローラークレーン用俯瞰映像合成モニタ ARGUS サラウンドビュー

“ARGUS” Surround View System for Crawler Cranes

● 本 庄 浩 平*
Kohei HONJO



図1 ARGUS ブランドイメージ
Brand image of ARGUS

1 はじめに

住友重機械建機クレーン株式会社は、クローラークレーン用俯瞰映像合成モニタ「ARGUS (アルゴス) サラウンドビュー」を開発し、クローラークレーンSCX900-3、SCX1200-3とハイラインブル仕様1000HLX、1500HLXのマイナーチェンジ機向けオプションとして2024年5月より国内市場で販売を開始した。

ARGUSは、ギリシャ神話に登場する100の目を持つ巨人の名にちなみ、Advanced Recognition Gadget with Unified Sensor (統合センサを備えた先進的な認識装置) の意味を込めた周囲監視関連商品の新しいブランドである(図1)。

2 開発の背景

一般社団法人日本クレーン協会より報告されている統計⁽¹⁾によると、2023年におけるクレーンなどに関係する労働災害の死亡者数は46人である。災害現象別では、つり荷などとの挟圧によるもの(機体との接触を含む)が15人(32.6%)と、つり荷などの落下によるものと並んで最も多い状況となっている。またクレーンなどに関係する死傷災害は同年に1722件発

生しており、その中には機体との接触によるものが相当数含まれていると推測している。

住友重機械建機クレーンはこのような状況に対し、従来製品には後方監視カメラなどの監視装置を搭載し、機体と人または障害物との衝突事故防止に努めてきた。しかし、大型かつ複雑な機体形状を有するクローラークレーンでは死角領域が多いことから、近年各種建設機械への普及が進んでいる俯瞰映像合成モニタの適用が求められていた。

3 ARGUS サラウンドビューのシステム構成

本装置は4台の広角カメラ映像を合成処理し、全周360°の俯瞰映像をモニタに出力するものである(図2)。機体との情報通信はなく、始動スイッチの操作に連動して起動/終了するスタンドアローンシステムである。本装置はドライブレコーダー機能を搭載しており、撮影された映像が外部記憶媒体(SSD)に録画される。また、録画ファイルに記録する日付および時刻情報の取得、補正にGPS受信機を用いている。

開発に当たっては、サードパーティーから販売されている建設機械向け汎用製品を採用し、住友重機械建機クレーン製のクレーン専用に俯瞰合成を最適化して一部ソフトウェアの

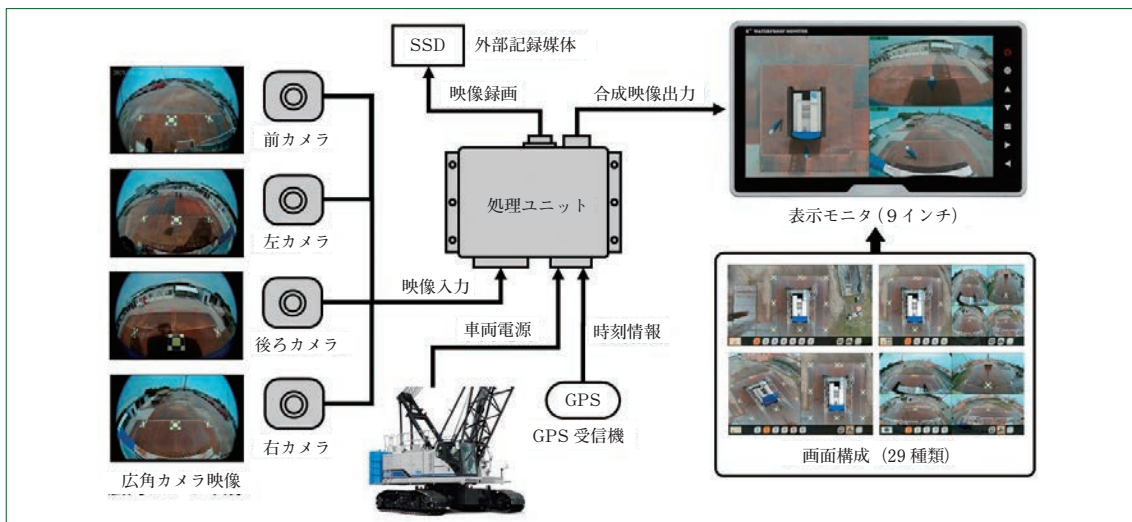


図2 システム構成・表示モニタ画面構成
System configuration / Monitor display configuration

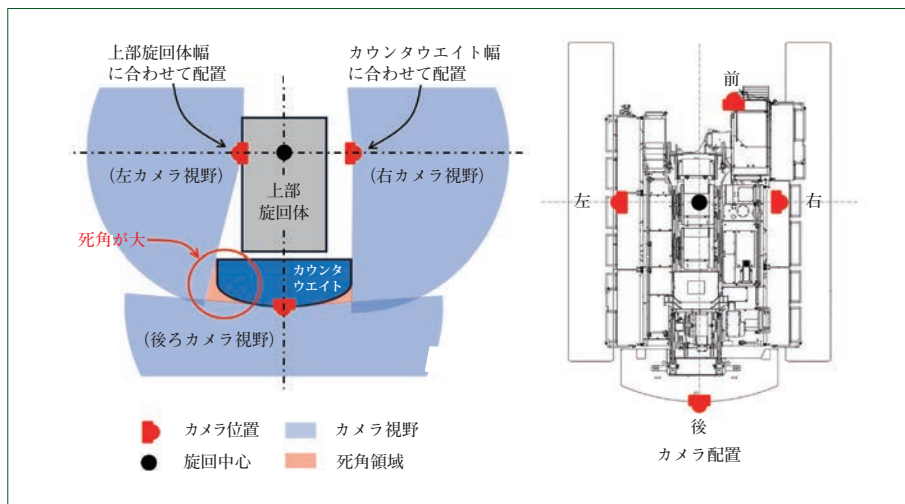


図3 死角領域比較とカメラ配置
Comparison of blind spots and camera layout

カスタマイズも行った。本装置の特長の一つにオートキャリブレーション機能がある。これは、合成変換値を決定するキャリブレーションを使用者（開発者）が実行でき、それがユーザーインターフェース上で半自動かつ短時間で完了する機能で、これを活用することにより、機種ごとに異なる合成変換値を短期間に決定することができる。

4 技術的課題への取組み

俯瞰映像合成モニタをクローラクレーンに適用する場合の技術的課題と、それに対する取組みを紹介する。

4.1 機体後方の死角領域の削減

クローラクレーンのカウンタウエイト（CW）は、設計上の制約から上部旋回体より幅広くなることがある。住友重機械建機クレーンでは最大つり上げ能力100t以上の機種にこの特徴が見られ、大型機種になるほど張り出し寸法が大きくなる傾向にある。この機体形状に対して左右カメラを上部旋回体幅に合わせて配置すると、張り出したCWによって視野が遮られ、機体後方の死角領域が増加してしまう。そこで、左右カメラをCW幅に合わせて配置することで死角領域を

削減した（図3）。

4.2 走行履帯映像の合成品質向上

クローラクレーンの走行履帯は、接地圧を低減するために幅広かつ長尺で、安定度を確保するために上部旋回体幅より大きく張り出して配置されている。このような機体で俯瞰映像合成を行う場合、すべての旋回角度で走行履帯が実映像として撮影されるので、合成画像の中央に表示する上部旋回体アニメーションとの重畳結果が実車イメージに近くなるように作り込む必要がある。理論的には、各カメラが旋回中心から同一円周上に4等配に配置され、設置高さや撮影角度が同じ場合に、全周で一様な合成映像が得られる。CW後端に設置される後ろカメラは走行履帯を撮影しないことから、前カメラと左右カメラの位置関係がこの品質に影響する。そこで、左右カメラは旋回中心を原点とした直交座標系の機体幅方向線上に、前述のCW幅に合わせて左右対称に配置した。前カメラは同座標系の機体長さ方向線上に、旋回中心からの距離が左右カメラと等しくなる位置に配置したいが、ブームなどの機体構造上の制約から実現できず、オペレータキャビン前方の機体中心寄りに配置した（図3）。カメラの設置高さは前

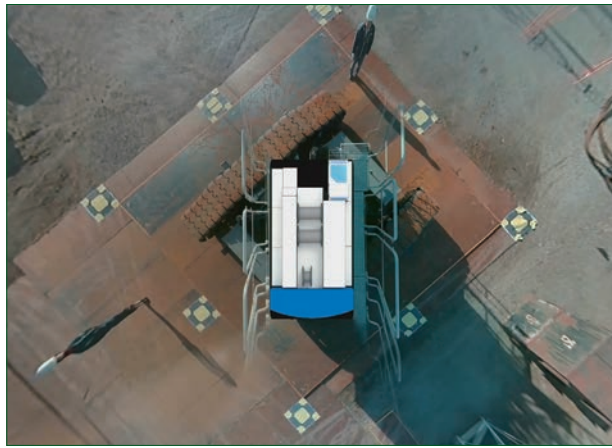
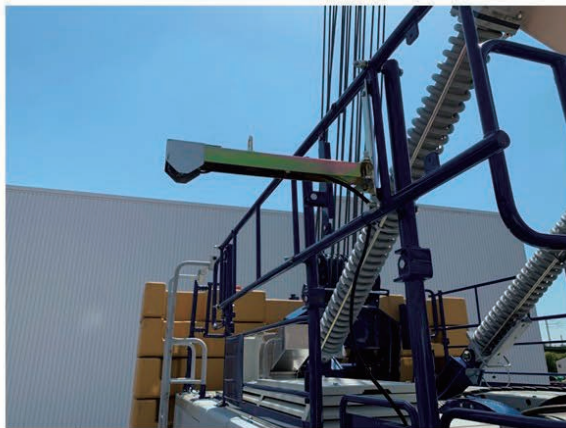


図4 旋回動作中の俯瞰映像
Surround view during slewing



張り出し状態（作業時）



格納状態（輸送時）

図5 カメラ格納機構(右カメラ)
Camera folded mechanism (right camera)

カメラと左右カメラをできるだけ近い値とし、撮影角度（俯角）は同じ値とした。この結果、旋回動作中でも走行履帯映像の合成が途切れにくい高品質な俯瞰映像を表示することができる（図4）。

4.3 分解組立性への配慮

クローラクレーンは、作業現場の移動ごとに分解・組立てが発生することに伴い、着脱を必要とするカメラについては作業性と位置再現性に配慮した。左右カメラは、前述の張出し量が上部旋回体輸送幅を超えるので、輸送時はアームを回動させて格納する構造とした（図5）。後ろカメラはCW上面にマグネットで固定する方式とし、マグネット位置を示すマーキングがCW側に貼付されている。前カメラは着脱の必要性がなく固定式である。

4.4 減トン仕様への対応

クローラクレーンには、分割式CWの段数を減らし定格荷重を下げて作業を行う減トン仕様がある。減トン仕様ではCW最上段の高さが低くなることから、カメラブラケットの設置高さが変わってしまうが、ブラケットへのカメラ固定位置を減トン段数に応じて変更可能な構造とし、カメラ高さが標準仕様と変わらない設計とした（図6）。この構造によって

合成変換値を変更することなく俯瞰映像の品質を一定に保つことができる。

5 その他の特長

5.1 3Dビュー

本装置は、俯瞰映像において一般的な真上からの視点（2Dビュー）に加え、合成変換値を調整することで斜め上からの視点に変換する3Dビューを備えている。遠方視野の表示範囲は視点ごとに決定できるので、2Dビューでは比較的機体近傍を、3Dビューでは前方視野を広く表示するように設定し、提供機能を差別化した（図7）。

5.2 各種画面構成の選択

本装置は、モニタに表示される映像をあらかじめ設定された複数の画面構成から選択切替えできる機能を備えている。選択可能な画面構成は俯瞰映像の2Dビュー、3Dビュー（6視点）と各カメラの単眼映像を1画面もしくは2～5分割に割り当てた29種類である。

5.3 ドライブレコーダー機能

本装置はドライブレコーダー機能を備えている。オペレータが録画モードを有効にすると、モニタ表示映像と4台のカ

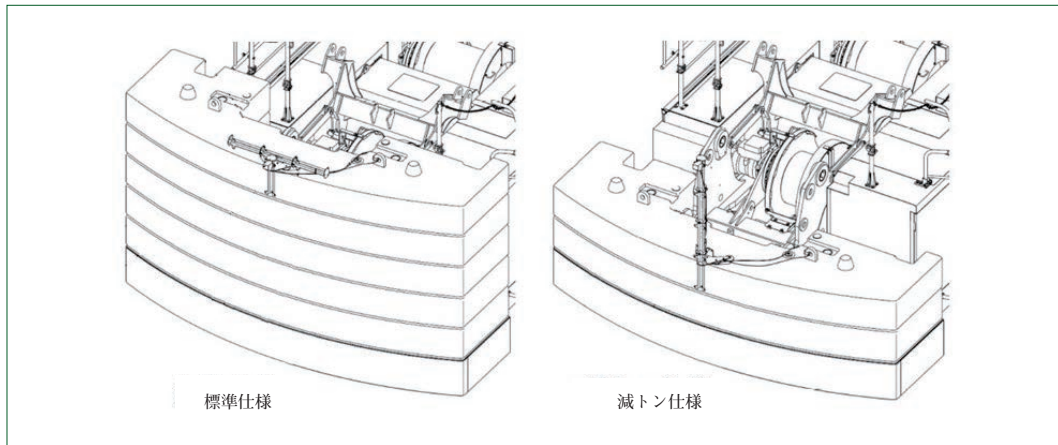


図6 減トン仕様時の後ろカメラ
Rear camera position compatible with Reduction CW



図7 3Dビュー(左)と2Dビュー(右)
3 D View (left) and 2 D View (right)

メラ映像(1画面を4分割した映像)の2種類の動画ファイルが記録される(常時録画)。商品に付属する容量1TBのSSDを用いて約120時間分の録画が可能である。

6 おわりに

- (1) 住友重機械建機クレーンは、クローラクレーンの製造メーカーとして国内初(住友重機械建機クレーン株式会社調べ)となるクローラクレーン向け俯瞰映像合成モニタ「ARGUSサラウンドビュー」を発売した。
- (2) クローラクレーン特有の機体形状に起因する技術的課題を解決し、直観的で高品質な俯瞰映像合成を実現した。
- (3) 分解組立て性に配慮し、減トン仕様にも対応している。また、各種画面構成の選択機能やドライブレコーダー機能を備え、顧客のさまざまなニーズに応えるメーカー純正品ならではの商品価値が提供できる。

ARGUSは、この度発売したサラウンドビューのみならず、住友重機械建機クレーンの周囲監視関連商品の共通ブランドである。今後は画像認識による人検知機能や各種センサ

技術を応用した衝突判定機能を備える新商品を開発し、ARGUSシリーズの商品ラインナップを拡充していく。

(参考文献)

- (1) (資料) 令和5年におけるクレーン等による死亡災害の発生状況、クレーン、63-1(2025)、29-34

※「ARGUS」は、住友重機械建機クレーン株式会社の登録商標です。

クレーン起立外観検査 C-SAI

— 確実な点検で、安全作業を担保 —

Crane-Standing Appearance Inspection C-SAI

— Ensure safety operations with reliable inspections —

● 戸井田 実*
Minoru TOIDA



図1 クレーン起立外観検査 C-SAI 紹介リーフレット
Leaflet : C-SAI (Crane-Standing Appearance Inspection)

1 はじめに

現在、クローラクレーンは大型化、複雑化、高性能化が進み、事故や故障を未然に防ぐことを目的とした定期点検の重要性が増している。しかし、稼働する現場の広さ、工期、人員などの都合で十分な点検が困難なケースもある。住友重機械建機クレーン株式会社は、こうした状況の下、クレーンの安全な稼働に必要な点検作業の新たな手法として、ドローンの自動飛行による点検システム「クレーン起立外観検査 C-SAI」を開発した。

2 クレーン点検の課題と解決策としての C-SAI

クローラクレーンの定期点検を実施する際は、ブームを地上に伏せて行うよう一般社団法人日本クレーン協会出版の「移動式クレーン定期自主検査」の検査指針に明記されている。ブームを伏せるにはスペースの確保や作業員の手配に加

え、高所作業車なども必要となり、その準備から点検完了までに長時間を要する。その間はクレーン作業が行えないことから、現場の生産性を損ねる要因となっている。さらに、ブームを伏せた状態でも高所での点検箇所が多く残り、転落の危険もある。このほか、機械を熟知するベテラン検査員が不足するなかで「点検レベルの平準化」「点検結果の可視化」「経年変化の管理」も課題となっている。

これらの課題を解決すべく、高精細な撮影が可能なドローンの活用を検討した。しかし、クローラクレーンは構造が複雑なうえ、ブーム長さが現場ごとに違うなど、さまざまな要因によって手動操作によるドローン飛行は難易度が高く、ベテランパイロットでも近接飛行で等間隔撮影を行なうことは不可能だった。また、既存の自動飛行アプリは、固定構造物や位置の変動が少ないものを対象にしており、座標位置が常に定まらない構造物に対し、現場で即座に等間隔を維持しながら正確に自動飛行させるアプリは存在しな



図2 約2mの距離を維持しながら自動飛行するドローンと、実際のモニタ画像
Drone flying automatically while maintaining of about 2 meters and its actual monitor image



図3 実際の点検画像：ワイヤロープとシーブ
Actual inspection images : Wire rope and sheave



図4 実際の点検画像：接続ピンや割りピンの挿入状態
Actual inspection images : Status of joint pins and split pins inserted

かった。そこで、住友重機械建機クレーンは独自に、ドローンの自動飛行によるクレーン点検システムを開発した(図1)。

3 C-SAIの技術と特長

「稼働現場に則した、簡単かつ安全に」をコンセプトに開発したC-SAIの技術と特長を紹介する。

3.1 クローラクレーンの稼働現場に則した仕様

C-SAIでは、クレーンの正確な寸法データをもとに、作業姿勢のまま数cmの誤差で、約2mの距離を維持しながら近接飛行することが可能である(図2)。これにより、建設躯体や近接するクレーンとの接触リスクを低減でき、飛行ルートの制約を少なくした。また、現場の状況や点検内容に応じて、一時停止や手動操作への切替え機能も備えている。近接から自動撮影した2千万画素の高精細度画像から、ワイヤの素線切れや割りピンの状態、部材の錆なども目視と同等の点検が可能である(図3、図4)。

点検に要する人員は、現場状況により人数は変わるが、最

少でドローンパイロットと周辺監視者の2名で可能である。撮影時間は、350tつりタワー仕様機で約1時間と、お昼の休憩時間内に実施することが可能である。

3.2 事前準備が少なく、現場での素早い自動飛行が可能

C-SAIは、点検前日の自動飛行ルートの設定や当日のクレーンの位置および姿勢に制約されることなく、作業姿勢のまま即座に自動飛行プログラムを生成することが可能である。飛行ルートは、機種やブーム長さ・角度を入力する「機種仕様登録」、ドローンの飛行やカメラ設定を選択する「飛行情報設定」、クローラクレーンの現在位置や向きを決定する「位置登録」をアプリに入力すると自動生成される。これにより飛行準備が少なく、迅速な自動飛行が可能である(図5)。

また、各入力値は、選択した機械のスペック以外は選択できない仕様とした。これにより、入力角度が作業可能な角度から外れる場合は「入力範囲エラー」と表示され、人為的なミス未然に防止する(図6)。

クレーン機種仕様確認			
機種	6000SLX(SL-N)	タワーブーム種類	12mEXTタワー
フロント仕様	タワー	タワーブーム長さ	72.0 m
姿勢	作業姿勢	タワーブーム角度	80.0 °
シュー幅	標準	タワーブームフック	なし
		ジブ長さ	60.0 m
		ジブ角度 (対地角)	60.0 °
		ジブフック	160 t
		- 吊り具長さ (フック過巻状態=0m)	0.0 m
		ジブ先端ショートジブ	あり
		ジブ先端ショートジブフック	15 t
		- 吊り具長さ (フック過巻状態=0m)	0.0 m

変更 変更 OK

図5 機種仕様登録画面
Model and specification registration page

クレーン機種仕様登録 - タワー入力	
タワーブーム種類	12mEXTタワー >
タワーブーム長さ	72.0 m >
タワーブーム角度	89 (°)
タワーブームフック	なし >
ジブ長さ	60.0 m >
ジブ角度 (対地角)	60.0 (°)
ジブフック	160 t >
- 吊り具長さ (フック過巻状態=0m)	0.0 (m)
OK	

入力範囲エラー (タワーブーム角度)
タワーブーム角度の入力値が間違っています。
64.5 ~ 86.5 の範囲で入力してください。

図6 入力ミス時の画面表示
Screen of input error



図7 片面自動飛行イメージ
Single-sided automatic flight image

3.3 狭い場所や地盤の傾きにも柔軟に対応

どのような現場にも対応できるよう、周回自動飛行のほか、狭い稼働現場でも安定して自動飛行を行う①片面自動飛行機能や、接地場所の傾斜状況に応じた②傾斜入力機能を装備した。

① 片面自動飛行機能 (4方向個別自動飛行)

これまで、極端に狭い現場での周回飛行では、飛行ルートと建築物などが干渉してしまい、飛行できないことがあった。C-SAI ではそのような状況においても、現場の空いたスペースを利用して、すべての面で点検を可能とする片面自動飛行機能を用意した(図7)。

② 傾斜入力機能

ブーム長さが100mを超えるクローラクレーンの場合、接地地盤の傾斜でブーム先端付近では大幅なズレが生じ、ブームに接触する可能性や撮影の距離に差が出てしまう。そのズレを補整すべく、真下まで下げたフックの位置を登録することで、ブームのたわみ量を考慮したブーム先端位置の特定を行う補正機能も用意した。

3.4 自動飛行の状態を常に監視し、異常を即座に検知

ドローンが計画通りに、正しく安全に飛行しているかを確認するフェイルセーフ機能として①本体位置座標確認機能と、②計画飛行ルート確認機能を装備した。

① 本体位置座標確認機能

クローラクレーンの座標位置を確定させる位置登録画面では、地図画面上にクローラクレーンのブーム方向と、予想されるドローンの飛行エリアを赤枠で表示するようにした。これにより飛行開始前に、敷地からの逸脱や飛行ルートが間違っていないかを確認することが可能である。

② 計画飛行ルート確認機能

各飛行階層のドローン位置を計画飛行ルートへ表示し、生成された飛行ルートに対してドローンがどの位置に存在するかをリアルタイムに把握することができる画面構成とした。また、一時的に手動飛行した後も、どの位置からでも安全に自動飛行ルートへ戻せるよう、飛行経路を可視化した。これにより部材との接触が回避できる。

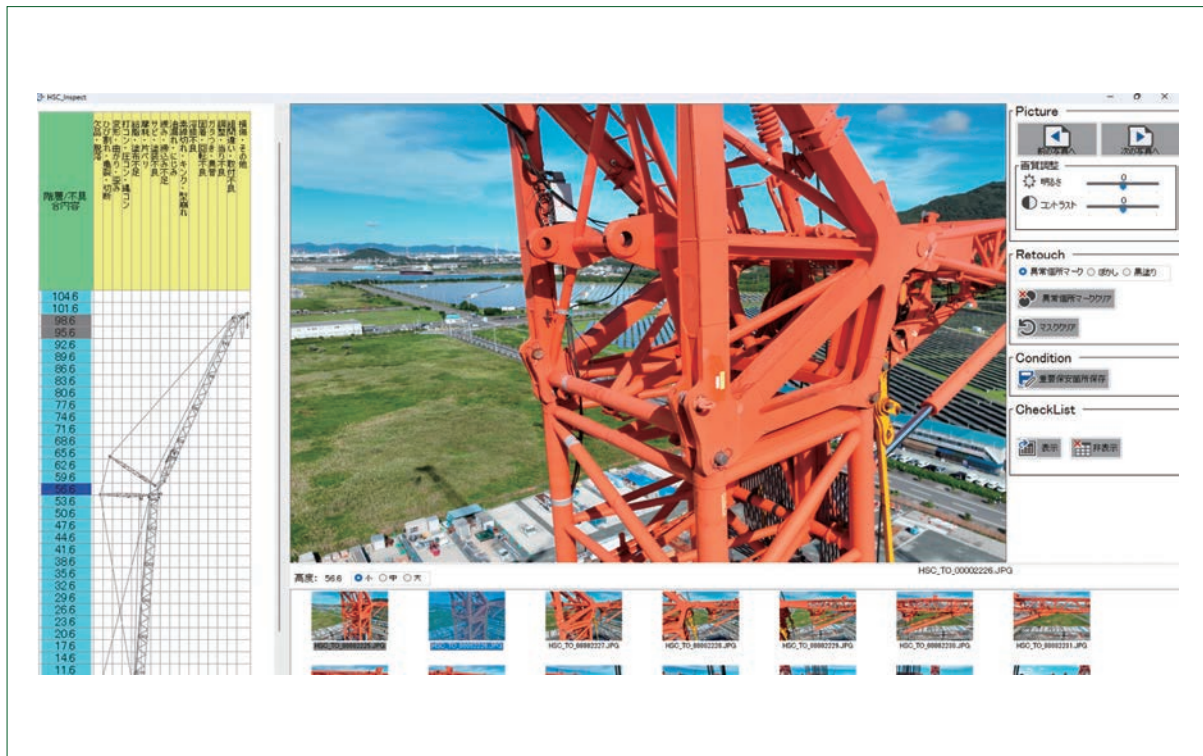


図8 専用診断ツール
Specialized diagnosis tool

4 点検結果の可視化と経年管理

撮影した画像は持ち帰り、専用診断ツールを用いて点検を実施する。点検報告書は、不具合箇所や状態をすぐに確認できるように起立状態図、不具合箇所画像一覧、重要保安箇所状態に分類・整理した高精細画像を付けて提供する。撮影箇所はドローンの撮影データに残る緯度・経度・高さ情報をもとに、部材のどの位置かを特定できるようにした。これらにより、経年管理も容易に可能となる(図8)。

5 日本クレーン協会の検査指針解説に追加

クローラークレーンの点検における現在の課題とそれらを解決するドローンを活用した点検技術が認められ、日本クレーン協会が出版する「移動式クレーンの定期自主検査指針の解説」令和6年8月1日改訂版では、参考資料-8に「ドローンを使用した検査について」が追加され、「ドローンを活用した画像により検査を実施する事で、機械の健全性と検査作業の効率化や安全性の維持・向上を図ることが出来る」と明記された。

6 おわりに

- (1) 住友重機械建機クレーンが独自開発した C-SAI は、移動式クレーンを安全に稼働させるための課題解決に重要な役割を果たすものである。
- (2) C-SAI は、座標位置が常に変化する構造物に対して、その場で自動飛行ルートの生成が可能で、生成後は直

ちに等間隔を維持しながら正確に自動飛行し、限られた空間や地盤の傾きにも対応できるシステムである。

- (3) ドローンが自動撮影した目視同等以上の高精細度画像を持ち帰り、専用診断ツールを用いて点検を実施する。撮影データに記録された緯度・経度・高さ情報をもとに経年管理も可能である。
- (4) 日本クレーン協会が出版する「移動式クレーンの定期自主検査指針の解説」令和6年改定版にも「ドローンを使用した検査について」が明記され、普及への道が開かれた。
- (5) 災害発生時の臨時点検や異常発生時の緊急点検のほか、タワークレーンや港湾クレーンなど、他分野においても広く活躍の場がある。正常で安全な作業のために、この技術の普及に注力する所存である。

※「C-SAI」は、住友重機械建機クレーン株式会社の登録商標です。

無人フォークリフトシステム

Automated Forklift System

●小 橋 喬 茂* 溝 大 貴*
Takashige KOHASHI Taiki MIZO

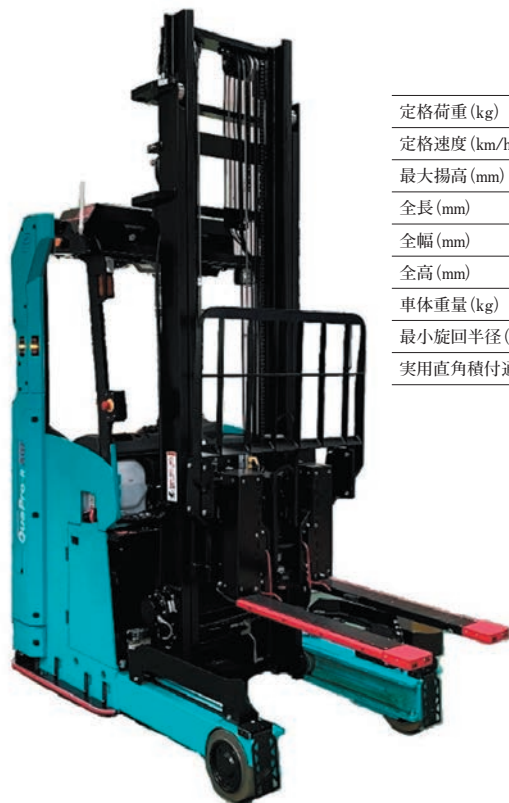


図1 無人フォークリフト外観と主要仕様
Automated forklift exterior and specification

定格荷重 (kg)	1090
定格速度 (km/h)	3.6
最大揚高 (mm)	4500
全長 (mm)	2355
全幅 (mm)	1268
全高 (mm)	2435
車体重量 (kg)	2650
最小旋回半径 (mm)	1745
実用直角積付通路幅 (mm)	2960

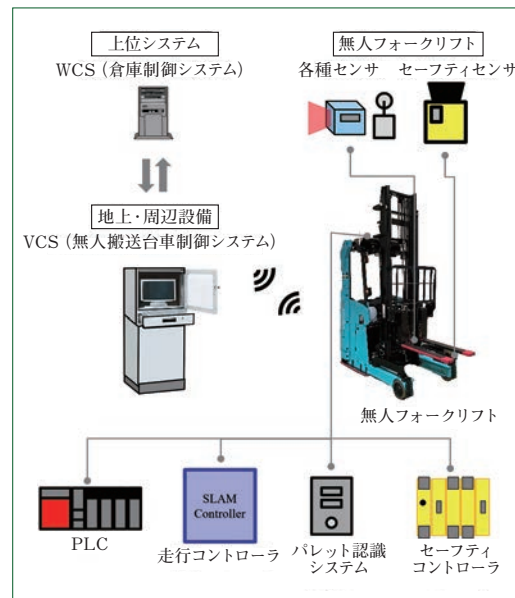


図2 無人フォークリフトのシステム構成図
System configuration diagram

1 はじめに

住友重機械搬送システム株式会社では、スタッククレーンやマジックラック、RDRV(Roll Delivery and Retrieval Vehicle)、AGV (Automatic Guided Vehicle)、天井移載機など多くの自動搬送システムを納入してきた。特に2017年に上市したディープストレージ式自動倉庫であるマジックラックは、従来のスタッククレーン式自動倉庫では困難であった高密度保管を実現し、顧客から高い評価を得ている。

マジックラックではパレットを用いて荷を保管しており、そのパレットはコンベヤまたは自律走行搬送ロボット(AMR: Autonomous Mobile Robot)がマジックラックまで搬送する。しかし、コンベヤは設備が固定化されていることから運用の柔軟性が課題であり、AMRは専用の置き台や、マジックラック上段の荷を搬送するための垂直搬送機が必要である。また、AGVはマグネット誘導であることからマグネットの埋込み工事が必要なものに加え、安全性や手動操作の複雑さなどが課題であった。これらの課題の解決に向けて住友重機械搬送システム株式会社は、長年培ってきた自動化のノウハウをもとに有人フォークリフトをベースとした無人フォークリフトを開発し、2024年に上市した。

2 無人フォークリフトの概要

図1に、無人フォークリフトの外観と主要仕様を示す。新たに開発した無人フォークリフトは、有人リーチタイプフォークリフトをベースに開発した。自動化に関連する電気部品は、オーバーヘッドガードの上部や車体の側面部に設置されており、有人機の優れた操作性を残しつつ自動化を実現している。

図2に、システム構成を示す。無人フォークリフトの車体には走行コントローラ、パレット認識システム、セーフティコントローラ、各種センサおよびセーフティセンサが追加され、それらを統合するPLC(Programmable Logic Controller)を搭載している。地上設備には無人搬送台車制御システム(VCS: Vehicle Control System)があり、倉庫制御システム(WCS: Warehouse Control System)から送信される荷の搬送指示を複数の車体に振り分けて効率的に搬送する。またWCSがない小規模システムであってもVCS単独で運用が可能であり、設備導入費用の圧縮に貢献できる。

3 無人フォークリフトの特長

3.1 SLAM誘導方式

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) とは、自己位置推定と環境地図作成を同時に行う技術であり、AMRやロボットなどに活用されている。SLAMにはいくつかの種類があるが、無人フォークリフトには比較的精度が高く、計算量が少ない2次元光測距センサ2D-LiDAR(2D-Light Detection and Ranging)に加え、事前に走行マップを作成し周辺環境の

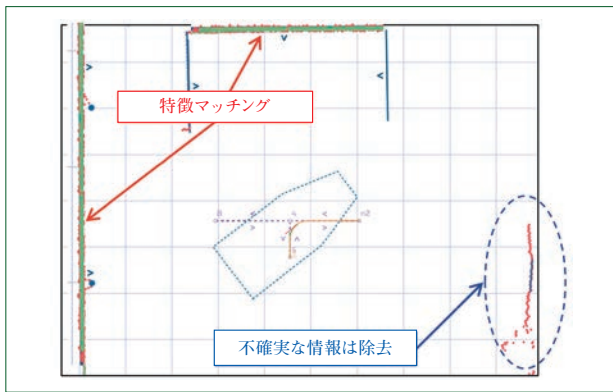


図3 2D-LiDAR SLAM 走行マップ
2D-LiDAR SLAM map

特徴を設定することで不確実な情報を除外して自己位置を推定する方法を採用した(図3)。オーバーヘッドガード上に設置された2D-LiDARが壁またはリフレクタまでの距離を計測し、得られたデータから自己位置を推定することにより、AGVに必要であったマグネット埋込みなどの床面工事を不要とした。これにより搬送ルートの変更も容易になり、複雑な搬送経路や設備のレイアウト変更など、顧客の要望にも柔軟に対応することができる。

3.2 JIS D 6802 : 2022 準拠設計

住友重機械搬送システムの無人フォークリフトは、ほかの国内メーカーに先駆けて「JIS D 6802 : 2022 無人搬送車及び無人搬送車システム—安全要求事項及び検証」に準拠した。過去に開発した商用ロボットの知見に基づいた機能安全設計とリスクアセスメントにより、JIS規格で指定されたPLr(要求パフォーマンスレベル)を達成した。また、当JIS規格に記載されている人検知のための試験を実施し、有人作業場でも安全に荷を搬送することを確認した。

3.3 2D-LiDARを用いた点群処理システム

無人フォークリフトにおいて課題であった移載時のパレット検出、荷置き時の障害物検出、トラックなどの高さが変動する置き台への移載を解決すべく、2D-LiDARを用いた点群処理システムを新たに開発し搭載した。住友重機械搬送システム独自の低負荷な点群処理アルゴリズムを用いることで、小型で省電力な車載型PCでも十分な処理速度と精度を達成した。次にこのシステムの機能を紹介する。

3.3.1 パレット検出・人置きパレット対応

荷の転倒や荷崩れを防ぐには、パレットとの接触検出やパレットそのものの検出が必要である。従来のパレット検出手法にはリミットスイッチや光電センサが用いられていたが、無人フォークリフトでは前述のとおり、2D-LiDARを用いて対応した。

パレット検出用の2D-LiDARをフォーク中央に設置し、出力された点群データを車載PCで処理することでパレットとフォークの干渉を判定している(図4)。さらに、パレットとの6自由度を演算することでパレットの位置を正確に把握し、人が置いた位置ずれしたパレットでも走行ルートを修正しながら鉛直に接近することで荷役できる。

3.3.2 二重格納検出

荷置き位置にすでに荷があり、荷同士が干渉する状態を二

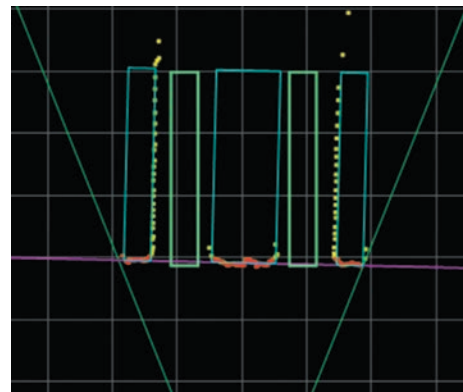


図4 パレット干渉判定
Pallet interference determination

重格納と呼ぶ。従来は光電センサなどを用いて二重格納を検出していたが、検出できる荷物のサイズに制約があった。無人フォークリフトではパレットを持った状態でもパレットの下から前方の障害物を検出するので、パレット検出用の2D-LiDARを電動シリンダによって上下させる機構を実装した。2D-LiDARは面で検出することから死角が少なく、移載先ごとに検出範囲を変更し、周辺環境に応じた適切な検出範囲を設定できる。

3.4 自動充電機能

無人フォークリフトは自動充電機能を有しており、設定されたバッテリー残量を下回ると、自動で充電スタンドまで移動して充電する。またリチウムイオンバッテリーを搭載し、急速充電にも対応した。標準の鉛バッテリーでは充電に8~12時間が必要であることに対し、リチウムイオンバッテリーではバッテリー残量が15%から100%になるまで1時間30分ほどで完了する。さらに短期間に繰り返し充電することや、継ぎ足し充電もできることから稼働率が大きく向上した。

4 おわりに

- (1) AMRやAGVにおける課題を解決すべく無人フォークリフトを開発した。
- (2) 本報では、無人フォークリフトシステムの特長として次の4つを説明した。
 - ① SLAM誘導方式を採用したことにより、柔軟なレイアウト変更に対応した。
 - ② JIS D 6802 : 2022に準拠した設計により、人車共存を実現した。
 - ③ 2D-LiDARを用いた点群処理システムを開発し、パレット検出および二重格納機能を実現した。
 - ④ リチウムイオンバッテリーを搭載し、自動充電と稼働率の向上を達成した。

今後は、トラックへのパレット積み下ろしや規格外パレット対応、安全性と速度の両立など、無人フォークリフトの機能をさらに拡張し、商品力を強化して顧客のニーズに応えていく。

※「マジックラック」は、住友重機械搬送システム株式会社の登録商標です。
「RDRV」は、住友重機械工業株式会社の登録商標です。

T/PAPERS
論文・報告

FACILITY INTRODUCTYION
施設紹介

機械学習を用いた連続殺菌装置の予測制御

Predictive Control of Continuous Sterilizer Using Machine Learning

●井 原 亮*
Ryo IHARA



連続殺菌装置
Continuous sterilizer unit

飲料水などを製造する連続殺菌装置において、生産中は温度・流量・圧力を管理している。もし管理値を逸脱すれば生産を中断し、装置内の製品液は廃棄して装置を洗浄しなければならないため、装置の安定性向上に対するニーズは高い。温度・流量・圧力は、相互に影響し合うなかで目標設定値に安定させるためのループ制御をしている。しかし、一般的に使用されるPID (Proportional, Integral, Derivative) 制御は、相互影響を考慮しないことから不安定になることがある。

本報では、従来のPID制御に代わり、機械学習を用いた予測制御システムについて報告する。予測制御は、センサデータをもとに応答特性を予測した結果から相互影響を考慮しながら制御することが可能なため、温度・流量・圧力それぞれの安定性の向上が期待できる。また、機械学習により過去の稼働データから予測モデルを学習するので、制御システムの調整が不要となる。加えて、自動で定期的に学習することで予測モデルが最適化され、無駄な動作を低減でき時短や省エネルギー効果も期待できる。

In continuous sterilization systems used for the production of drinking water and similar products, temperature, flow rate, and pressure are monitored and controlled during operation. If any of these parameters deviate from their specified control values, production must be halted, the product liquid inside the equipment must be discarded, and the system must be thoroughly cleaned. As a result, there is a strong demand for improved system stability. Since temperature, flow rate, and pressure influence each other, loop control is employed to stabilize them at their target setpoints. However, the commonly used Proportional-Integral-Derivative (PID) control does not take these mutual interactions into account, which can lead to instability. This report presents a predictive control system utilizing machine learning as an alternative to conventional PID control. Predictive control enables regulation based on forecasted response characteristics derived from sensor data, allowing for control that considers the interdependencies among variables. This approach is expected to improve the stability of temperature, flow rate, and pressure. Moreover, the predictive model is trained using historical operational data, eliminating the need for manual tuning of the control system. Additionally, by implementing automatic periodic learning, the predictive model can be continuously optimized, reducing unnecessary operations and contributing to time savings and energy efficiency.

1 まえがき

株式会社イズミフードマシナリでは、飲料水や調味料など、いわゆる液体食品を生産する装置を製造・販売している。た

例えば、豆や茶葉からコーヒーやお茶を抽出する装置、砂糖や脱脂粉乳などの添加物を混ぜるタンクなどがあるが、このほかに製品液を上流から下流へ流しながら連続で加熱殺菌する連続殺菌装置がある。今回はその連続殺菌装置の予測制御

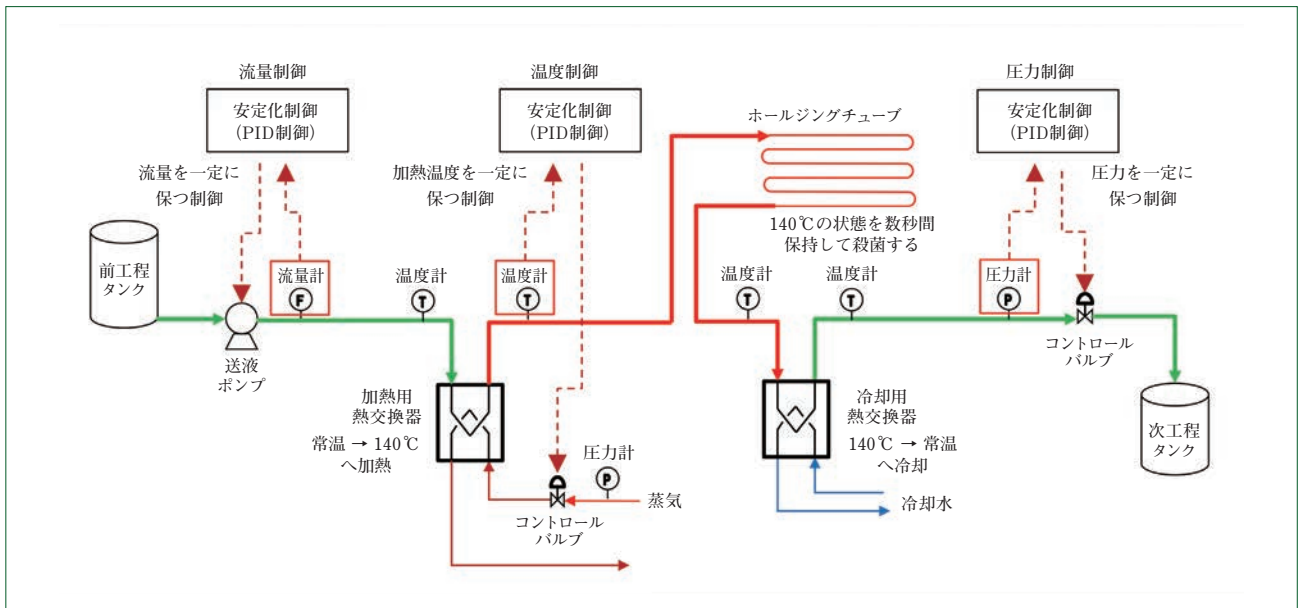


図1 一般的な連続殺菌装置の概要図
Schematic diagram of continuous sterilizer unit

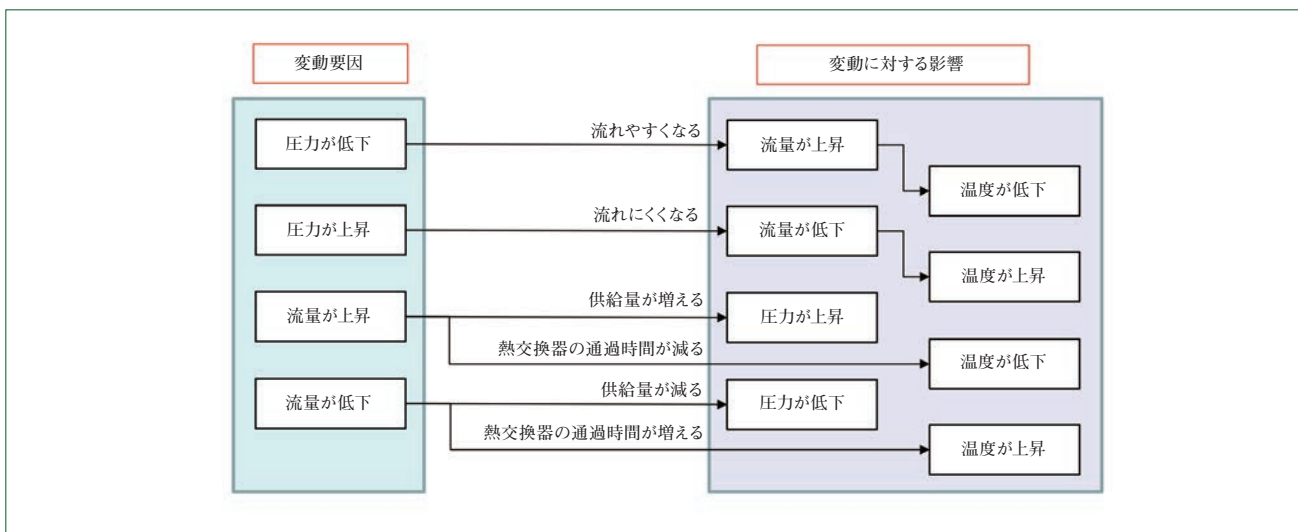


図2 変動要因に対する影響
Impact of variables

について報告する。

連続殺菌装置とは、製品液となる飲料水を熱交換器へ一定速度、一定圧力で送液しながら、温度が140℃程度になるまで加熱・滅菌し、その後常温まで冷却して次工程へ送液する装置である(図1)。

装置の運用においては、まず運転前に装置内部の洗浄と滅菌処理を行い、装置を無菌の状態にしてから運転を開始する。運転中は製品液の温度・流量・圧力を要所ごとに制御盤で常時管理し、装置内の無菌状態と製品品質を保持している。万が一管理値を逸脱してしまうと殺菌不良などの品質不良となり、装置内の製品液はすべて廃棄しなくてはならない。廃棄量は装置の大きさにもよるが、大型のものでは約1500l(500mlペットボトル飲料水の約3千本分)の廃棄となる。さら

に、装置内は品質不良に起因して汚染されたとされ、生産運転を一時停止して装置は再洗浄と再滅菌を行う必要がある。装置の洗浄と滅菌処理には約4時間もかかり、その間は生産ラインが完全に停止してしまう。1時間に約3万本作れる生産ラインの場合は、約12万本の出来高をロスすることとなり、生産に多大な損害を与えることとなる。

このことから、連続殺菌装置において、温度・流量・圧力を常に一定に保つ制御は非常に重要な要素であるといえる。

2 連続殺菌装置の課題

連続殺菌装置において、温度・流量・圧力の変動は互いに影響を与える(図2)。装置内の圧力が低下すると流体が流れやすくなるので流量が増え、逆に圧力が上昇すると流体が流

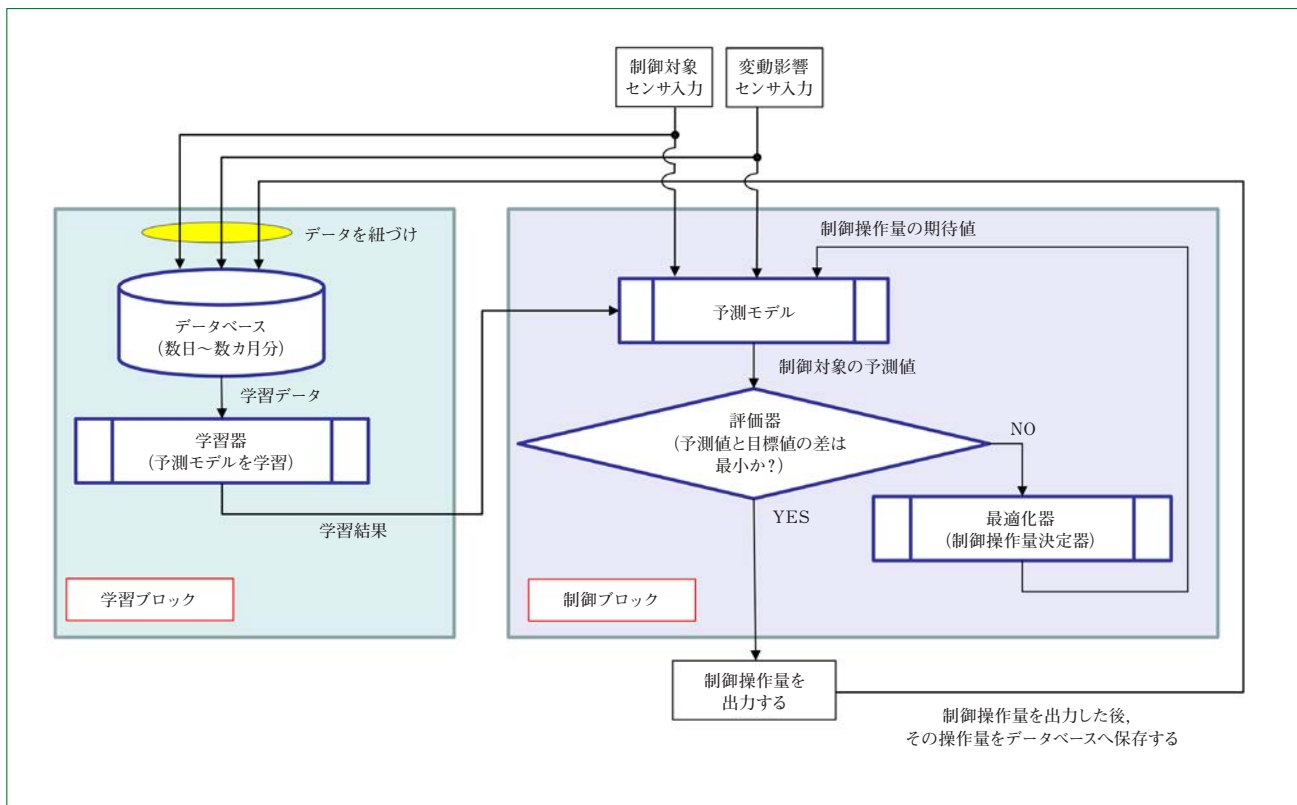


図3 予測制御システムのフローチャート図
Flowchart diagram of predictive control system

れにくくなり流量が減少する。つまり圧力の安定化制御には流量を一定に保つ必要があり、流量の安定化制御には圧力を一定に保つ必要がある。流量と圧力のバランスが崩れ始めると互いに制御が交錯し合い不安定になってしまう。さらに流量の変動に影響して温度も安定を保てなくなる。

既存の連続殺菌装置では、安定化ループ制御に指示調節計によるPID制御を使うことが一般的である。PID制御とは、安定化対象の測定値と安定化目標値の差分値から比例 (Proportional)、積分 (Integral)、微分 (Derivative) の計算値を足し合わせて制御操作量を求める方式である。このPID制御は、製造現場では主流の方法として信頼と実績があり、さらに計算が単純なことから装置のコストを抑えることができるというメリットもある。しかし、対象値と目標値の差分値から計算するため、対象値以外の入力数を増やすことができない。つまり、安定化対象の測定値以外のセンサで外乱変動要因を検出できたとしても、それを安定化制御に生かすことができないというデメリットがある。また、PID制御のパラメータ調整は、エンジニアの経験や勘で行われることが多く、現場でオペレータが調整するのは難しいというのが現状である。

3 予測制御システム

3.1 予測制御システムの概要

入力数を増やす制御手段として、モデル制御 (MPC制御: Model Predictive Control)⁽¹⁾を採用する。MPC制御とは制御

対象の応答特性、いわゆる振る舞いを予測して、その結果から予測値と目標値が一致するように、制御操作量の最適化を行う制御方法である。MPC制御には入力数および出力数に制限がなく、各入力を考慮した制御が可能である。このことから、変動要因をセンサなどで検出したときに、その後の振る舞いを予測して先読み制御させることが可能で、今回のターゲットである連続殺菌装置のように2つ以上の制御が影響し合う装置の場合に、それぞれの制御対象を協調させて制御することができるというメリットがある。

一方で、制御対象の振る舞いを予測するために予測モデルの構築が必要となることがデメリットとして挙げられる。この予測モデルには複雑な計算をするプログラムが必要で、構築には専門知識を持つエンジニアが求められる。また、制御対象の振る舞いが少しでも変化すると予測モデルの再調整が必要となるので管理が難しく、現場での調整は現実的ではない。

そこで、このデメリットを解決する手段として挙げられるのが、機械学習を用いて過去の稼働データから学習し、高い柔軟性を持つ予測モデルを採用することである。この予測モデルは、初期パラメータの調整を除き、これまでに装置が稼働したデータを用いて定期的に学習させることで最適化され、パラメータの調整が不要な予測制御システムとして最適状態を半永久的に維持することができる。

3.2 予測制御システムのアルゴリズム

予測制御システム (図3) は、学習ブロックと制御ブロック

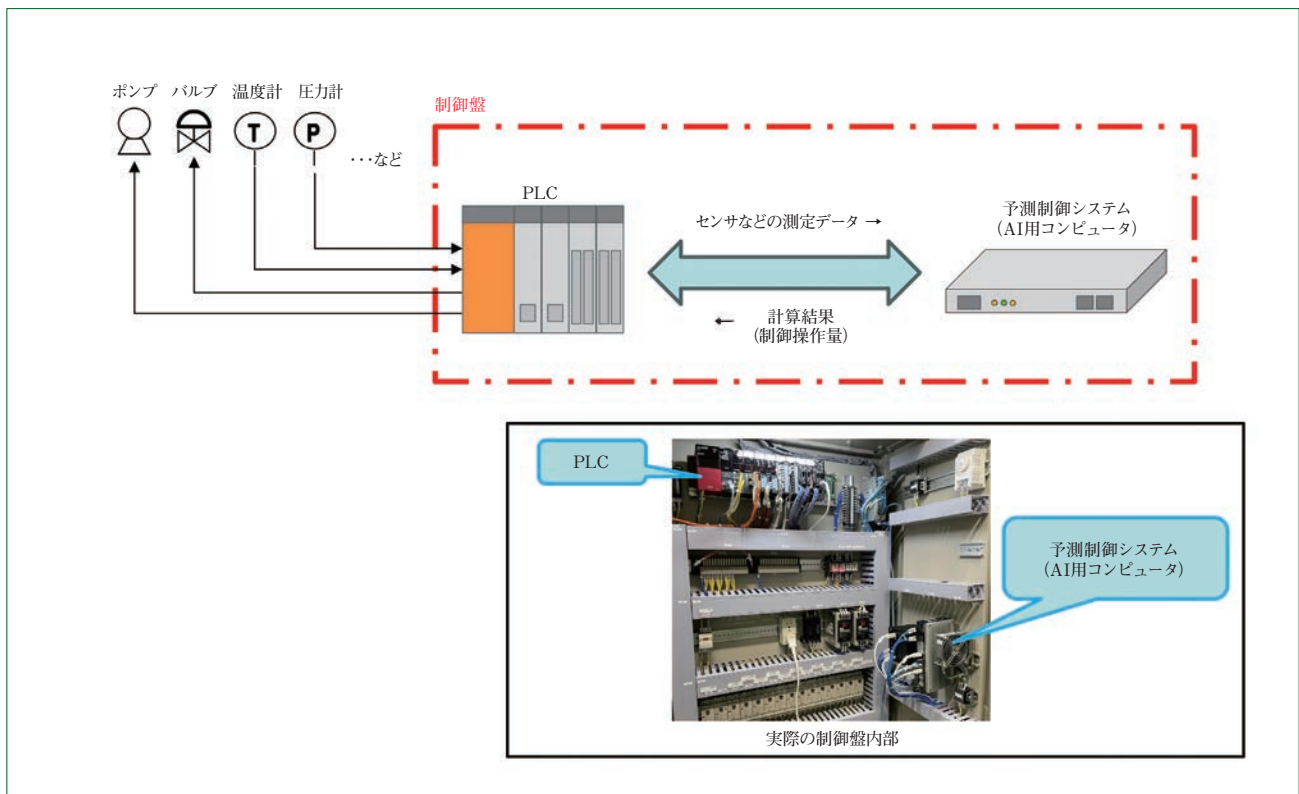


図4 予測制御システムの実装方法
Implementing a predictive control system

の2つのブロックで構成され、学習ブロックには学習のもととなるデータベースと、予測モデルを学習させるための学習器が備わっている。また、制御ブロックには予測モデル、最適化器および評価器が備わっている。学習ブロックと制御ブロックは、同時に処理させることができる。

学習ブロックでは、過去の数日から数カ月に及ぶ膨大な制御対象センサ値と、変動影響センサ値を紐づけたかたちでデータベースに蓄積する。このとき、制御操作量も紐づけたかたちで保存しておく。次に学習器では、データベース内に保存されている膨大なデータを用い、予測モデルを学習する。これは装置の仕様にもよるが、1日に1～2回の頻度で自動的に行われる。この学習では、温度・流量・圧力などの装置の応答特性を予測モデルに学習させて未来の状態を予測することが可能である。また、制御操作量を紐づけて学習することで、後述する制御操作量の期待値に対する応答特性も予測できる。予測の精度は過去に学習したデータが多いほど向上するため、装置を稼働させた分だけ予測精度が向上することが期待できる。

制御ブロックでは、まず予測モデルに制御対象のセンサ値を入力し、合わせて変動影響に関係するセンサ値を入力する。このとき、影響センサ値は1つに限らず、複数を入力することができる。たとえば制御対象が温度の場合は、変動影響に関係する流量のほかに、加熱前の温度や、蒸気などの加熱媒体の圧力・量を計測するセンサ値を入力して、変動影響を考慮することができる。さらに、制御操作量を予測した値、い

わゆる制御操作量の期待値を入力する。この制御操作量期待値の初期値は、その時点で出力している制御操作量を仮にセットしておく。

予測モデルでは制御対象センサ値、変動影響センサ値および制御操作量期待値の3つの入力から、制御対象の応答特性を予測する。次に、評価器で制御対象の予測結果と目標値の差を評価して、差が最小であるかを判断する。最小でないと判断した場合、最適化器で制御操作量期待値を加算もしくは減算して、最適と思われる値へ更新した後、再度予測モデルへ入力して制御対象の応答特性を予測する。この動作を繰り返し、制御操作量期待値を最適化していく。一方で評価器が最小であると判断したときは、最適化された制御操作量期待値を制御操作量に更新して制御対象センサへ出力する。

この動作を一定周期でリアルタイムに繰り返すことにより、常に安定を保つことができるようになる。本システムでは、1秒間に4回の周期で制御操作量を最適値に更新して出力している。

3.3 予測制御システムの実装方法(図4)

殺菌装置の制御盤内にはPLC (Programmable Logic Controller) が設置されている。PLCには、装置の工程ごとの各制御目標値があらかじめ設定されており、装置全体の運転制御を担いながら各種センサ値を入力して、インターロックを管理しつつバルブ開度やポンプ速度などを操作している。

予測制御システムは専用のAI用コンピュータ内で動作し、

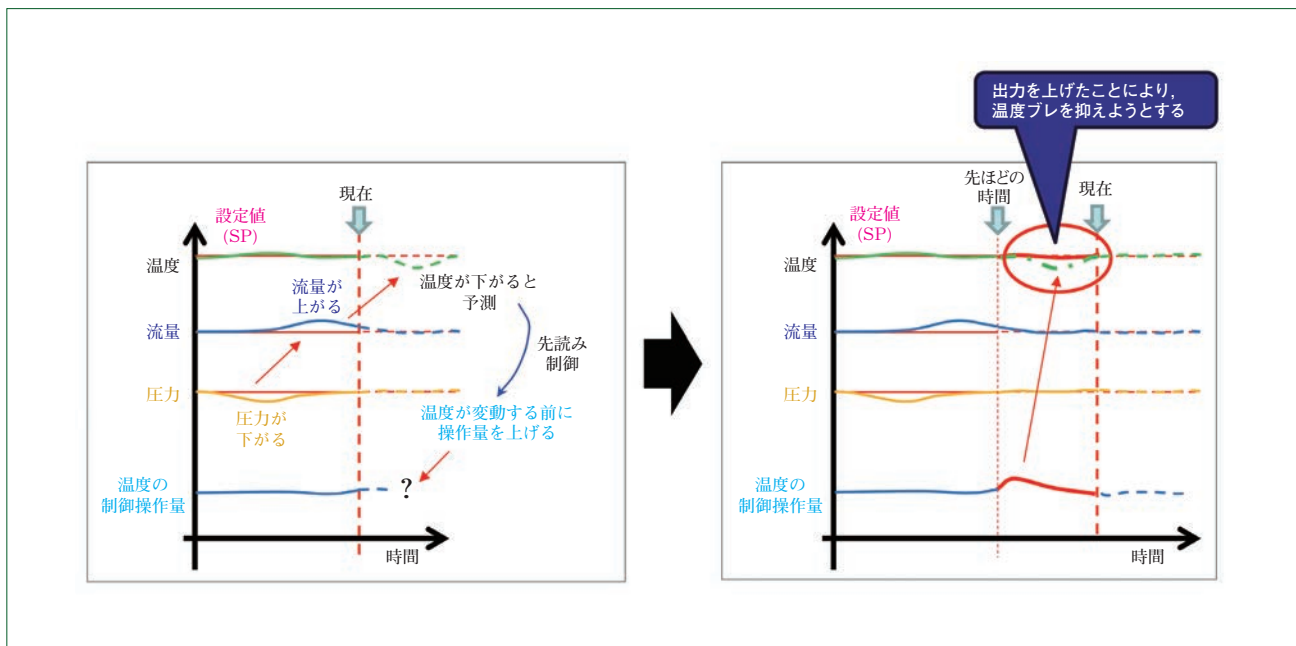


図5 外乱影響に対する安定性の向上
Improved stability against disturbance effects

PLCとEthernet通信で接続される。PLCは、各種センサの情報や各制御目標値を予測制御システムへ送信し、予測制御システム内で安定化制御の計算を行い、制御操作量をPLCへ返す。PLCは返された制御操作量にもとづいて、バルブ開度やポンプ速度を操作する。この動作を繰り返すことにより、安定化ループ制御の動作が可能となる。

4 予測制御システム導入による効果

4.1 外乱影響に対する安定性の向上(図5)

予測制御システムは、外乱影響の変動などを考慮しながら30秒先、60秒先の変化を予測し、予測した結果から安定化制御をする。たとえば圧力が下がり流れやすくなったことで流量が上がってしまったとする。流量が上がると熱交換器での加熱時間が減り、結果として温度が下がってしまうことが予想される(図5左)。このようなときに予測制御システムでは温度が下がることを予測できるので、制御操作量を上げて温度が下がらないように対処することができる(図5右)。これにより、従来では温度ブレが生じていた事例でもブレを抑えて製品品質を担保し、安定した生産を実現することが可能となる。

4.2 学習による最適化と時短や省エネルギー効果(図6)

実際の装置で従来のPID制御と予測制御で温度のみを加熱制御したときの結果をグラフに示す。PID制御では設定値に到達するまでにオーバーシュートした部分も含めて、約90秒かかっている(図6左上)が、約1カ月間学習させた予測制御では70秒ほどで設定値に到達している(図6中央上)。さらに6カ月間学習させた予測制御では、動作が最適化されており約55秒で設定値に到達している(図6右上)。この結果から、装置を稼働させれば学習して最適化され、さら

に学習が進めばより効果が発揮されると推測できる。この結果から到達時間が早いと、より早く次の工程へ進むことができるので時間短縮となり、その間のエネルギーを削減することができる。

図6下のグラフ3点は、加熱熱媒である蒸気の使用量を示している。制御が最適化され時短が進んだ結果、装置の規模や仕様によって効果の程度は変わるが、この装置ではPID制御で約16.5kg必要だった蒸気使用量が、予測制御では約6.6kgまで60%削減することに成功した。加熱時や工程変化時のこのような動きは1日の生産運転を通して数十回程度だが、この20~40秒の時短が積み重なり、1カ月~1年を通せば一定の省エネルギー効果が期待できると考える。

5 予測制御システムの課題と今後の展望

本システムは、機械学習により日々蓄積された膨大な稼働データから学習して最適化する仕組みだが、新規に設置した装置や大幅な改造を施した装置など、有効な学習データが十分に蓄積されていない状態では期待した制御ができずに不安定となる。この点を解消するために、現状では従来のPID制御システムを予測制御システムと合わせて実装し、学習データが十分に蓄積するまでの期間はPID制御をある程度動作をさせる必要がある。つまり、PID制御の振る舞いを予測制御システムに真似させるというイメージである。学習データが十分に蓄積された後に予測制御システムへ切り替えるため、装置の立ち上げには2種類の制御方法を個別に調整する必要があり、従来の方法より多くの時間を要する。

今後これを解決するには、新規の装置を導入する際に学習済みのシステムをあらかじめ準備できるような仕組みを確立させなければならない。その1つの方法として、装置の仕様

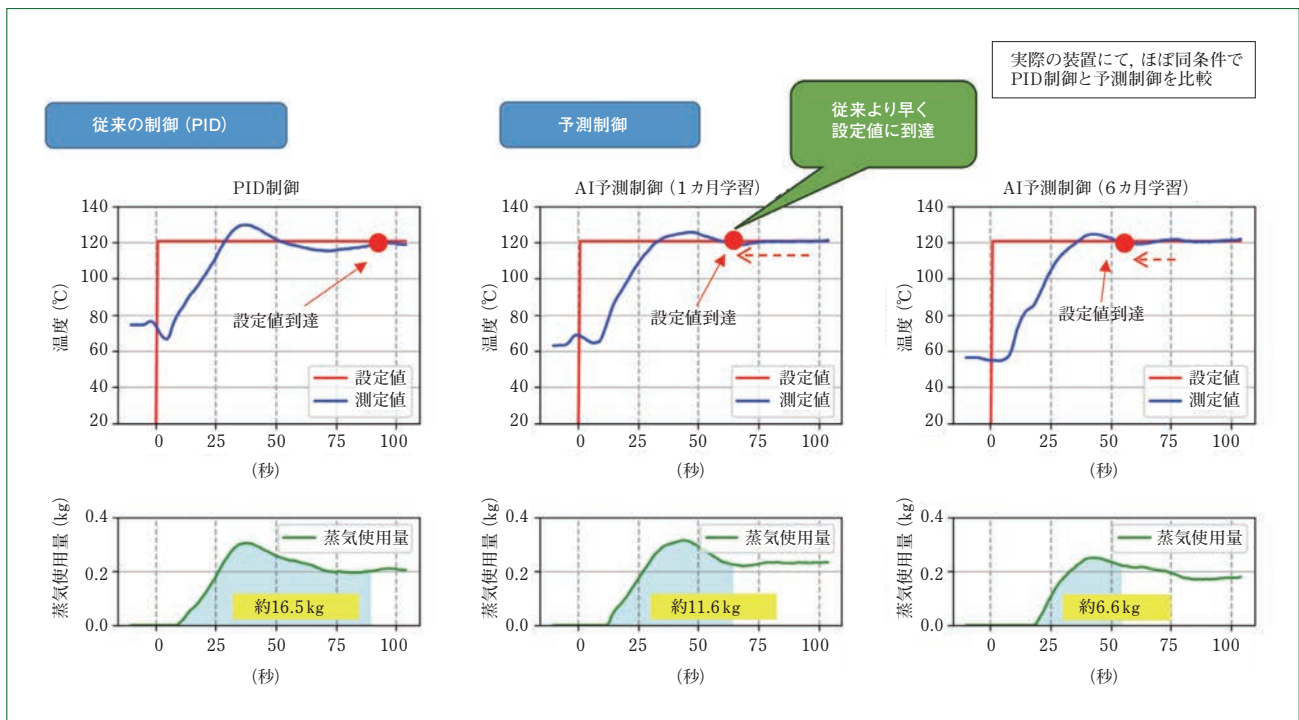


図6 学習による最適化と、時短、省エネ効果
Optimization through learning, time saving, and energy saving effects

や熱交換器の動特性をコンピュータ上でシミュレートすることができれば、強化学習などの手法を用いて学習させることができるのではないかと考える。この実現にはシミュレータを開発することや、異なる仕様の装置でさらなる導入実績を積み重ね、多くのデータを収集することが必要である。

予測制御システムを動作させるコンピュータは、稼働データを収集することを目的として、住友重機械グループ共通基盤プラットフォームSHICuTe⁽²⁾と接続することができる。SHICuTeは独自の閉域通信網とクラウド機能を有し、安全にデータ収集ができるプラットフォームである。SHICuTeと接続することにより、すでに導入した装置の日々の稼働データと学習の結果などを記録した各種ログを、定期的に収集・分析することができ、今後の開発に役立てていくことができる。

6 むすび

- (1) 予測制御システムは、制御対象以外の変動要因をセンサが検出したとき、その後の振る舞いを予測して制御することができるため、殺菌装置のような制御が影響し合う装置では、協調して制御できるというメリットがある。
- (2) 機械学習を用いることで、定期的に予測モデルが最適化されて制御の精度が向上することから、時短や省エネルギーの効果が期待できる。
- (3) 学習データが蓄積されていない新規の装置などの場合は、期待通りの制御ができず、従来のPID制御で装置を稼働させて学習させなければならないという課題

が残されているが、これは今後開発を重ねて解決していく。

(参考文献)

- (1) 足立修一, モデル予測制御の基礎, 日本ロボット学会, 32-6 (2014), 499-502.
- (2) 明渡豊, 村上憲司, 住友重機械グループ共通基盤プラットフォーム SHICuTe, 住友重機械技報, 209(2023), 1-4.

※「SHICuTe」は、住友重機械工業株式会社の登録商標です。

技術研究・創発棟 Cs'-Lab+ が完成

Introduction of “Yokosuka Innovation Hub, Cs'-Lab+”

●堀 重 雄* 梶 井 宏 樹*
Shigeo HORI Hiroki KAJII



技術研究・創発棟 Cs'-Lab+ の外観 (2025年3月撮影)
Appearance of Yokosuka innovation Hub, Cs'-Lab+ (Photo taken in March 2025)

住友重機械工業グループ (以下、当社グループ) の新たなイノベーション拠点となる「技術研究・創発棟 Cs'-Lab+」(読み方：シーズラボ。以下、当施設) が、2025年4月、横須賀製造所内に開所した。当施設は、当社グループの研究開発部門である「技術研究所」(以下、技研) を主たる入居部門とし、当社グループ商品の基盤・要素技術開発に加え、将来に向けた研究開発を推進する。また、名称に「創発」を掲げるとおり、技術研究にとどまらずにイノベーションを志向し、その実現に向けて随所に工夫を凝らした。本報では、当社グループの今後の技術研究開発を大きく担う当施設について、(1)新設の背景、(2)施設概要、(3)研究開発を強化する充実の施設内容、(4)全体コンセプト「創発する空間」に絞って紹介したい。

1 新設の背景

技研は、1934年に愛媛県新居浜市で住友機械製作株式会社製造部研究係として発足し、現在は横須賀製造所内と新居浜製造所内の2拠点で当社グループの商品開発を担っている。技研に求められる技術範囲が拡大し、技研の研究員数も10年前と比べて倍増するなか、特に横須賀製造所における設備・機能の強化は必須であった。2021年7月より横須賀技研棟の整備・拡張計画を開始し、製造所共管部門(人事、安全、総務、施設、環境、ICT本部)と統合した新規建屋とする計画への拡充を経て、2023年に新設を正式決定した。

2 施設概要

表に、施設概要を示す。前述のとおり、当施設は製造所の統合建屋であり、研究機能のほか、製造所の共管部門の居室やサーバ室、食堂などの施設も有する(施設名称のLab+の「+」は、将来への想いや共管部門を表現している)。延べ床面積で考えると、移設対象とした全施設の約2.7倍の広さである。また、災害時には横須賀製造所の全員が一時避難でき

る拠点にもなるよう耐震性の高い構造とし、執務室のある3階以上は想定される最大クラスの津波高よりも高くなっている。

所在地	神奈川県横須賀市夏島町19番地
建築面積 / 延べ床面積	4131㎡ / 19563㎡
階数	地上6階建て(屋上施設含む)
開所 / 総工費	2025年4月 / 119億円
基本設計 / 設計・施工	株式会社日総建 / 清水建設株式会社
その他	「ZEB Ready」*1と、建築物省エネルギー性能表示制度「BELS」*2の最高ランクである6つ星を取得

3 研究開発を強化する充実の施設内容

当施設では、研究員の執務室やさまざまな分野の研究・実験設備を大幅に整備・拡張した。また、4階と5階の執務室では、各技術部門における専門分野の近接性を分析した結果をもとに部署を配置したり、執務室中央に両階をつなぐ階段(図1)を設けたりするなど、コミュニケーションを促すような工夫も講じた。

実験室は1階および2階に配置し、各技術部門が取り組む研究開発の目的に応じた多様な設備を導入した(図2)。これにより機械構造技術、生産技術、材料技術、CAEなどの基盤・要素技術の研究体制はもとより、当社グループが中期経営計画2026で重点投資領域として掲げる「ロボティクス・自動化分野」「半導体分野」「先端医療機器分野」「環境・エネルギー分野」といった将来に向けた研究開発体制も一層強化された。

さらに、顧客や共同研究先にますます安心して当社と協働いただけるよう、一層のセキュリティ対策も講じている。

4 全体コンセプト「創発する空間」 一人と社会を優しさが満たすイノベーションハブへ

当施設の大きなポイントの一つは、技術研究に加えて「創



図1 執務室中央の階段 コミュニケーションスペースとしても機能する
Staircase in the center of the office. It also works as a communication forum



図3 食堂「SumiCafe」製造所内の全員が利用でき、打ち合わせにも使える 災害時には災害対策本部としても機能する
“SumiCafe,” a cafeteria that is available to everyone in the Yokosuka Works and can be used to either work or take a break. It also functions as a disaster response headquarters in case of emergency.



図2 実験室の一例 1階吹き抜け部の大型実験室は天井クレーンを有する(写真は入居前の様子)
Example of laboratories; the double height laboratory on the first floor has an overhead crane (the photo was taken before occupancy).

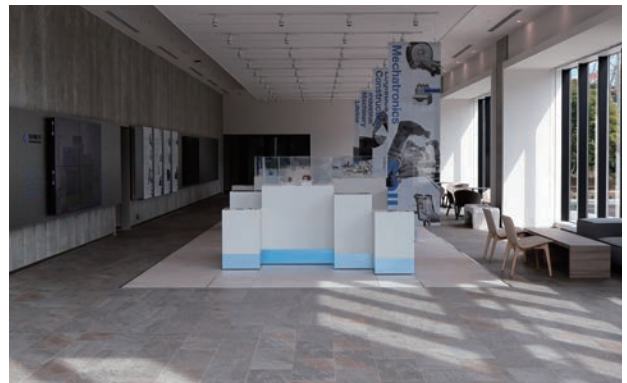


図4 1階ギャラリー 当施設にお越しの方との共創の第一歩として機能する
Gallery on the first floor, which works as the first step in co-creation with visitors.

発」を掲げている点である。「創発」とは「部分同士の相互作用で全体として新たな価値を生み出すこと」を意図する。社会に貢献する優れた研究開発を進めるうえでは、当社グループ内にとどまらず、外部の大学や企業ともますます良い関係を構築し、ともに成長していく取組みが必須であると考えた。そこで、当施設では全体コンセプトに「創発する空間」を設定した。

さらに、全体コンセプトをかなえるワークスタイルコンセプトとして、施設名称にも採用した「3つのC」(選べる: Choose, つながる: Connect, 創り出す: Create)を考案し、設計やデザインに生かした。たとえば、執務室のフリースペースや各階の会議室では部屋の数と種類を豊富にそろえた。食堂も十分な席数の確保に加え、席の種類やメニューの豊かさにこだわった(図3)。1階エントランスには当社グループの製品や技研の技術に親しんでいただけるギャラリーを設けた(図4)。その他、日頃の部活動や講演会などに活用できるイベントホール、日頃のコミュニケーションや特別な催しに使えるレセプションラウンジ、いつでも使えるナッブルームに礼拝室など、3つのCを実現する多様な施設内容とした。

5 おわりに

今回、当社の新たなイノベーション拠点となる技術研究・創発棟 Cs'-Lab+が横須賀製造所に誕生した。その内部ではすでに、当社グループ内外の方々との創発に向けた「つながる」取組みも盛んに行われている。本記事では紹介しき

れないこだわりの施設内容も多くあるので、打ち合わせや見学などにぜひお越しいただき、人と社会を優しさで満たす新たな技術とともに生み出していけると幸甚である。

なお、手前味噌ではあるが、最後に当施設の建設過程での社員の貢献を紹介したい。当時は国内で大阪・関西万博などの大規模プロジェクトが進んでいた。建設費の高騰などの困難を伴う状況下においても安全・安心を第一に、工程を短く、コストを抑制するかたちでプロジェクトを完遂できた。これには、設計会社および施工会社のご尽力は言うまでもなく、当社グループの技術力(施設管理能力、施工管理能力など)や、プロジェクトメンバーをはじめとする社員の主体的な協力が欠かせなかった。また、コンセプトや施設内容は、入居するメンバーがワークショップなどを通じて「どのような職場にしたいか」を考え、相互作用した結果生まれた。創発を志向する施設を創り出すに当たり、社員が積極的に参与する形の創発的な過程を経たことは非常に意義深いと考えている。

*1 Net Zero Energy Building Readyの略。快適な室内環境を実現しながら、従来の建物に必要なエネルギーと比較し、省エネによって50%以上のエネルギー消費量の削減を実現している建物。

*2 Building-Housing Energy-efficiency Labeling Systemの略。建築物の省エネルギー性能を第三者機関が評価・認定する制度で、星の数で6段階評価が行われる。2014年に一般社団法人住宅性能評価・表示協会により開始。

住友重機械技報第217号発行に当たり

住友重機械技報第217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ので、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。

2025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217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

メカトロニクス

- ギヤモータ:サイクロ減速機, ハイボニック減速機, アステロギヤモータ
- 大型ギヤボックス:パラマックス減速機, 特定用途向け減速機, カップリング
- 精密制御用減速機:精密制御用サイクロ減速機, 精密制御用Eサイクロ減速機, サーボモータ用遊星歯車減速機 IB シリーズ
- 制御システム: Roll to Roll 搬送装置向け駆動制御システム
- モータ・インバータ:インバータ, Lafert/Invertek
- ドライブソリューション: AGV/AMR用ドライブソリューション Smartris
- 自律移動ロボット: KeiganALI
- 極低温冷凍機:GM 冷凍機, パルスチューブ冷凍機, GM-JT 冷凍機, ソルベイ冷凍機
- クライオポンプ
- 精密位置決め装置: SA/SL Series 小型サーフェイスステージ, TL Series スタック型リニアガイドステージ
- モーションコンポーネント:高性能モーションコントローラ MG78, 高精度サーボドライバ SDLN/SDPH, コアレスリニアモータ SM/SL/SSL, エアアクチュエータ Airsonic 50N

サイクロ, サイクロ減速機, ハイボニック減速機, アステロ, パラマックス, Smartris, AIRSONICは, 住友重機械工業株式会社の登録商標です。

インダストリアル マシナリー

- 射出成形機: Zero-molding, ダイレクトドライブシステム
- 封止プレス
- イオン注入装置

- レーザ関連装置
- PET 用サイクロトロンシステム
- PET 用薬剤合成システム
- 陽子線治療システム
- 真空成膜装置
- 鍛造プレス
- STAF (Steel Tube Air Forming)
- リフティングマグネット
- 非破壊検査
- スピニングマシン
- クリーンルームシステム
- 集塵装置: 新型パルス式バグフィルタ エコバルサー
- 圧延用ロール
- 平面研削盤: CNC 門形平面研削盤 KSL Series, CNC 門形平面研削盤 KSL-F Series, 立軸円テーブル形平面研削盤 SVR Series, 立軸円テーブル形平面研削盤 SPG Series
- クーラント処理装置
- ラミネータ装置: コンバイニングアダプター, SPS7000 オートTダイ, コンピュータコントロールシステム MACS-Win

Zero-molding, STAF は, 住友重機械工業株式会社の登録商標です。
エコバルサーは, 日本スピンドル製造株式会社の登録商標です。

ロジスティックス&コンストラクション

- 油圧ショベル
- 道路機械
- クローラクレーン
- 基礎工事中用機械(アースドリル, 地盤改良機など)
- 運搬荷役機械:連続式アンローダ(パケットエレベータ型)
- 物流システム
- 機械式駐車場
- フォークリフト

エネルギー&ライフライン

- 循環流動層 (CFB) ボイラ
- バブリング流動床 (BFB) ボイラ
- 液化空気エネルギー貯蔵 (LAES)
- ロータリーキルン式再資源化設備
- 電気集じん機
- 灰処理設備
- 蒸発・晶析装置
- 流動床ガス化炉: 空気式/酸素-蒸気式
- 廃熱ボイラ
- 廃棄物発電プラント
- CFB スクラバ
- バグフィルタ式排ガス処理装置
- 排煙脱硝装置(選択接触還元法/無触媒脱硝法)
- デジタルサービス(プラント運用支援システム)
- 産業排水処理施設
- 下水処理施設: メンブレンバイプ式超微細気泡散気装置ミクラス
- 蒸気タービン
- プロセスポンプ
- 蒸留・抽出設備
- 反応容器
- 攪拌槽
- コークス炉機械
- 食品・飲料製造設備
- オイルタンカー

ミクラスは, 住友重機械エンパイロメント株式会社の登録商標です。

※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 (新居浜)
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	千葉市稲毛区長沼原町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			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。
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			住友重機械工業株式会社のホームページ https://www.shi.co.jp/
西条工場	〒 799-1393	愛媛県西条市今在家1501番地			

技報編集委員

委員	梶井 宏樹	委員	阿部 昌博	住友重機械技報
	廣田 真人		白澤 克年	第217号 非売品
	井上 千晶		野口 真人	2025 年 9 月10日印刷 9 月20日発行
	梶谷 純平		加藤木 暁	住友重機械工業株式会社
	針ヶ谷 崇		田中 哲平	〒 141-6025 東京都品川区大崎2丁目1番1号 (ThinkPark Tower)
	有吉 政博		横田 和幸	お問い合わせ電話 横須賀 046-869-2300
	石川 賢治		前田 憲男	千々岩敏彦
	諏訪 義和		山崎 勝彦	
	幾島 悠喜		山室 征也	
	永易 卓也		前野 稜彦	
		事務局	技術本部	
		編集協力	(株)千代田プランニング	



住友重機械工業株式会社
Sumitomo Heavy Industries, Ltd.



Printed in Japan