単船倉型内航ばら積み貨物船向け連続式アンローダの自動化技術開発

Automation of Continuous Ship Unloaders for Single-Hold Coastal Bulk Carriers

●茶屋道　暢*　原　孝介*　宮澤宣嗣*　臼井道太郎*
Toru CHAYAMICHI　Kosuke HARA　Noritsugu MIYAZAWA　Dotaro USUI

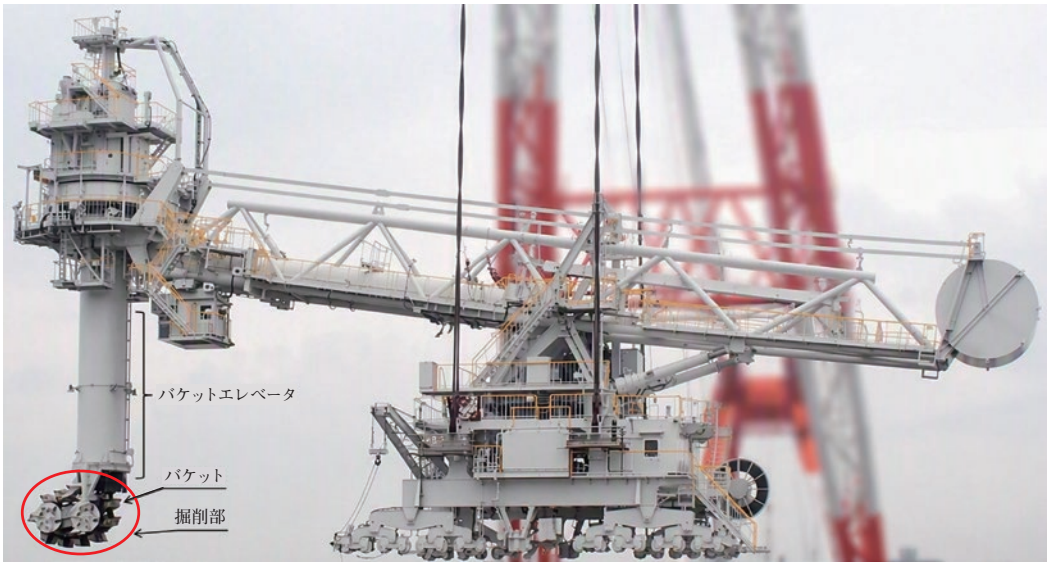

図1　CSU外観
External view of CSU

単船倉型の内航ばら積み貨物船向けに連続式アンローダ（CSU：Continuous Ship Unloader）の自動化システムを開発した。CSUは高効率な荷役が可能である一方，船倉壁面近傍での精密な操作を要することから，高度な技能が要求される。本システムは，既設CSUへのレトロフィットを前提とし，LiDARによる船位置・荷山高さ検出，船体との衝突監視，センサ自己診断，荷役軌道生成および荷役量一定制御を組み合わせることで，自動荷役を実現した。実荷役試験では，船倉壁面への安全な接近，安定した荷役量の維持，底荷工程終了時の残荷量低減を達成するとともに，手動運転と同等もしくはそれ以上の荷役効率を確認した。本システムは2026年３月に上市され，オペレータ負荷の軽減や将来的な熟練者不足への対応に寄与することが期待される。

An automated continuous ship unloader (CSU) system was developed for single-hold coastal bulk carriers. Although CSUs enable highly efficient cargo handling, their operation near hold walls requires precise machine control and a high level of operator skill. The developed system can be retrofitted to existing CSUs and integrates LiDAR-based vessel position and cargo-surface height detection, collision monitoring, sensor self-diagnostics, unloading trajectory generation, and constant unloading-rate control. Full-scale cargo-handling tests confirmed safe operation near hold walls, stable unloading performance, and reduced residual cargo after the bottom-cargo handling stage. The system also achieved unloading efficiency equivalent to or higher than that of manual operation. Commercialized in March 2026, the system is expected to reduce operator workload and help address the anticipated shortage of skilled operators.

1　まえがき

連続式アンローダ（CSU）は，電力会社や製鉄会社の岸壁で使用される大型機械であり，ばら積み貨物船から石炭や鉄鉱石などの貨物を陸揚げする荷役機械である。**図1**に，CSUの外観を示す。掘削部およびバケットエレベータ部は，チェーンで連結された複数のバケットが循環する構造となっており，バケット内に荷をかき入れることで，バケットエレベータ，機内コンベヤなどを通過して地上コンベヤへと搬送される。また，CSUは多関節リンク構造になっており，それらを動作させて周回軌道を形成することで，船倉内の荷を陸揚げする。

CSUが荷役対象とするばら積み貨物船は大別すると，単一の船倉を有して国内輸送を行う単船倉型の内航ばら積み貨物船と，複数の船倉を有して国際輸送を行う多船倉型の外航ばら積み貨物船の２種類に分けられる。

住友重機械搬送システム株式会社（SHI-MH）と当社技術研究所は，単船倉型の内航ばら積み貨物船向けCSUの自動化技術を開発し，2026年３月にSHI-MHより上市した。本報では，その自動化システムについて紹介する。

2　自動化の背景と求められる性能

CSUと別方式であるグラブバケット式橋形アンローダが，グラブバケットを投入した箇所を点として荷役するのに

＊技術本部

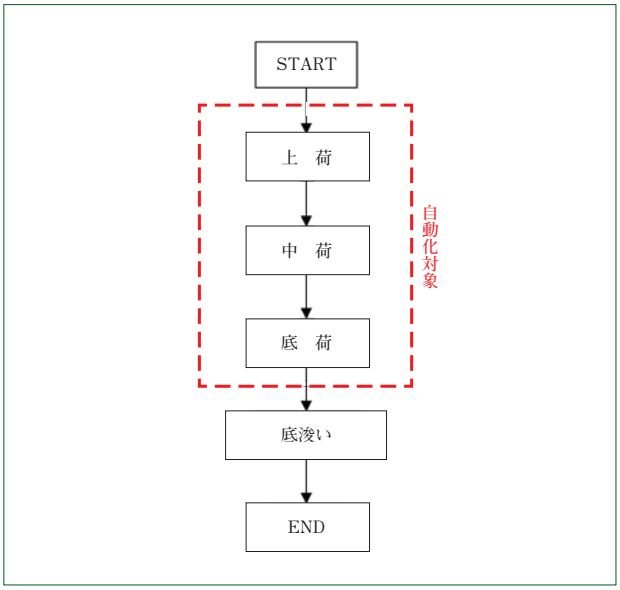

図２　CSUの荷役工程と自動化対象範囲
CSU cargo-handling stages and scope of automation

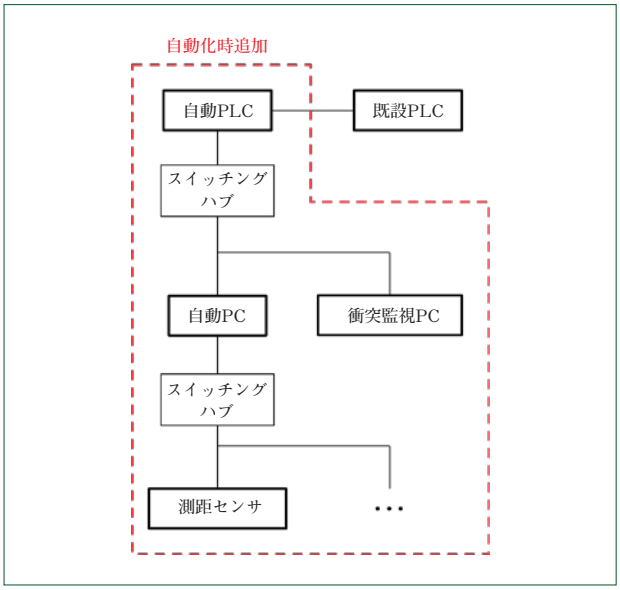

図３　自動化システムの構成
Automation system configuration

対して，CSUは連続するバケットにより，面として荷役を行う。故に，荷役方式の観点では，CSUは高効率な荷役を実現しやすいといえる。一方で，船倉壁面に接近した荷役を行う場合には，高い技能が要求されるので，習熟には長い期間を要する。加えて，高さ数十メートルに及ぶ巨大な機械を数十センチの精度で操作することが要求されることから，オペレータへの負荷が大きい作業となっている。そのため，労働人口の減少に伴い，将来的に熟練オペレータが不足する懸念や，肉体的・精神的負荷の高い作業からオペレータを開放するといった観点から，CSU荷役の自動化に対する要求が高まりを見せている。

図２に，ばら積み船からの荷役工程と本システムの自動化対象範囲を示す。荷役は上荷，中荷，底荷，底浚いの手順で進められ，荷役最終盤の底浚い作業では，残り少なくなった荷を集約する目的で船倉内にブルドーザーなどの重機が投入される。CSU荷役における要点の一つとして挙げられるのは，周回荷役による荷の取り切りである。底浚い作業は，ほかの工程と比較して荷役効率が悪いことから，可能な限り底浚いより前の周回荷役工程で残荷量を少なくすることが肝要となる。本システムは，上荷から底荷までの工程を対象とし，重機やハッチ内作業員など，ほかの作業が交錯する底浚いは対象外としている。

また，CSU本体は，船倉の壁面に対して数十センチの距離まで接近して荷役することが求められる。なぜなら，壁面から離れた荷役は，壁際の荷の取り残しが生じるだけでなく，周回を重ねて蓄積した荷が崩落し，CSUの掘削部が荷で埋まるという懸念があるからである。埋まった場合，CSUは過負荷となりインターロック停止し，復旧動作が必要となる。これは荷役効率に悪影響を与える。

さらに，荷役量にムラがあってはならないので，地上コンベヤなど，搬送設備全体への影響を考慮した均一な荷役が求められる。

CSUを自動化するには，これらの荷役要点を手動オペレータと同等以上に実現することが求められる。したがって，求められる性能はおおむね次の通りとなる。

・船壁に接近しながら衝突せずに荷役すること
・底荷後の残荷量が規定値以下であること
・一定かつ高効率に荷役すること

これらの要求仕様を満たすべく，要素機能に分解して自動システムを構築した。

3　自動化範囲とシステム構成

本自動化は，既存のCSUに対してレトロフィットするかたちで実現した。**図３**に，自動化システムの構成を示す。本システムは，既設CSUに自動運転用の制御装置，計算機，測距センサおよび監視装置を追加することで，自動荷役を実現するとともに，船倉形状，荷山高さおよびCSUの自己位置を用いて，荷役軌道の生成，荷役量の調整，船体との接近監視を行う。

追加した計算機は自動PLC，自動PC，衝突監視PCである。自動PLCは，軌道生成などの自動運転に関するロジックが組み込まれたものであり，自動PCは，高い計算能力を要するLiDARの点群処理を担いながら船の位置を計算する。衝突監視PCは，自動PCで得られた船の位置とCSUの自己位置から，お互いの距離を計算する。LiDARはバケットエレベータ部に設置され，船位置検出および荷山高さ検出，LiDAR自身の健全性を監視する自己診断機能に利用される。

4　要素機能

本システムの機能は，船倉および荷山の状態を把握する認識機能，荷役動作を生成する判断機能，荷役量を調整する制御機能，安全を確保する監視機能に大別される。船位置検出および荷山高さ検出は認識機能に，衝突監視および自己診断は安全監視機能に，軌道生成および荷役量一定制御は判断・制御機能に位置付けられる。本章では，これらの主な要素機能について述べる。

4.1　船位置検出

本システムには，LiDAR点群を利用した船位置検出機能を

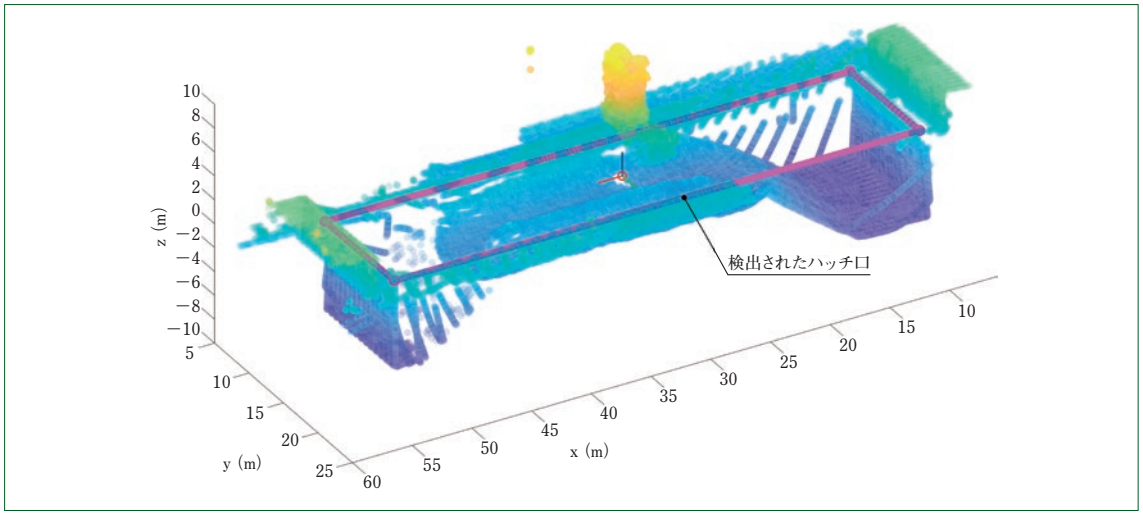

図4　船位置検出
Vessel position detection

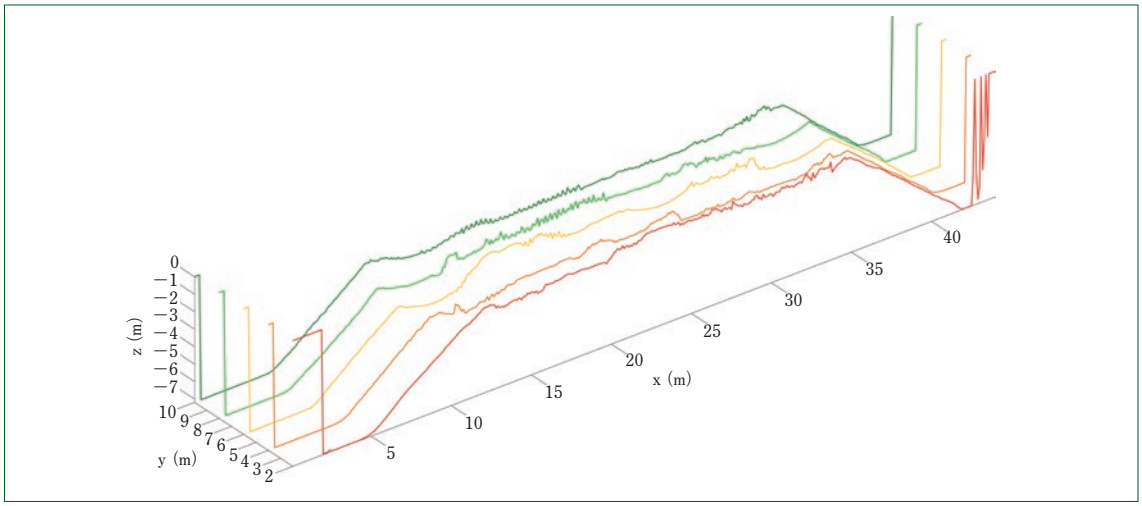

図5　荷山高さマップ
Cargo-surface height map

実装した。安全のため異なる２つの検出方式を並列実行するシステムを採用しており，それぞれが点群処理を実時間で実行している。１つ目は，間接検出と呼称している方式である。**図４**に検出の様子を示す。同方式は，ハッチ口と呼ばれる船倉の開口部のエッジを検出し，時間経過に伴うハッチ口の姿勢変化を非線形モデルに基づく逐次的な状態推定手法によりトラッキングするものである。算出されたハッチ口の姿勢は，後述する衝突監視機能に反映され，従来技術では困難であった船の揺動を考慮したCSUと船倉との距離計算を可能にした。

２つ目は，直接検出と呼称している方式である。間接検出はハッチ口周辺のみの点群を検出に利用していたのに対し，直接検出は，ハッチ口および船倉壁面の点群を利用し，統計モデルに基づく反復的なパラメータ推定手法により船の姿勢を算出する。２手法のいずれかが検出に失敗した場合や，検出結果に大きな齟齬が生じた場合には，自動運転を停止するシステムとなっている。

4.2　荷山高さ検出

船位置検出と同様にLiDARを利用して，船倉内の積荷の点群を取得し，高さマップを形成する機能である。**図５**に，その概略図を示す。マップは規定のグリッドで区切られており，各グリッド高さは，そこに含まれる点群をもとに代表値が算出される。また，点群情報を時間方向にスムージングすることで湯気や舞い上がる粉塵など，外乱の影響を抑制したマップ生成を可能とした。得られたマップは，後述する衝突監視装置に表示されるとともに，自動運転の軌道生成において掘削開始位置や周回動作における反転位置を決定することに利用される。

4.3　衝突監視

与えられた船の寸法情報とCSUの自己位置から，船とCSU本体の間の距離を計算し，接近距離に応じて警報などを発信する安全機能である。**図６**に，衝突監視画面の概略図を示す。同機能は，手動CSUにおいてもオプションとして搭載され多くの実績がある。また，自機や船体により遮蔽されることの多い視野を補助する可視化装置としての役割も担う。自動化システムとして，船位置検出および荷山高さ検出機能と連携することで，インターロック停止を未然に防ぐような衝突回避軌道を生成することが可能となり，安全面や情報量の点でより重要度の高い要素機能となった。

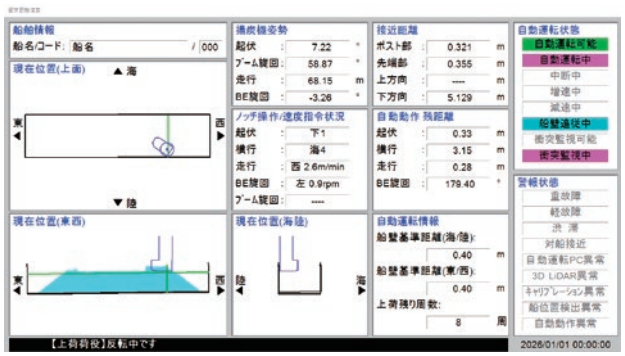

図6　衝突監視画面
Collision monitoring screen



自動荷役開始前　　自動荷役終了後

図7　自動荷役試験
Automated cargo-handling test

4.4　自己診断

LiDAR自身の健全性を診断する機能である。同機能により異常判定された場合は，自動荷役を開始できないようインターロックが作動する。自己診断機能の担う役割の一つは，性能劣化の検出である。万一LiDARが完全に故障し，点群データを送信しなくなった場合は，船位置検出機能の成否判定に基づき自動運転を安全に停止することが可能である。一方，LiDAR内の部分的な測距不良や喪失は，実際の船の姿勢変化と区別することが困難であるが，この自己診断機能により正常時の状態との比較を行い，センサ単体での異常を判定する。

4.5　軌道生成

船位置検出および荷山高さ検出で得られた情報を用いて，周回荷役におけるCSUの動作を決定する機能である。船倉形状，荷山高さおよびCSUの自己位置に基づいて，掘削開始位置や周回動作の範囲を設定し，船倉壁面への接近，残荷量の低減，荷役量の安定化を両立するよう荷役動作を生成する。

4.6　荷役量一定制御

CSUによる荷役は搬送設備全体を考慮した均一さが要求される。一方で，荷表面の凹凸や船の揺動など，これを阻害するさまざまな要因が挙げられる。本システムでは，荷役量一定制御として，バケットへの荷の充填量に応じてCSUの動作を最適化することで高充填かつ一定な荷役を実現した。これによりバケットエレベータ，ブームコンベヤを通過した荷は過不足なくホッパに蓄積され，払い出しコンベヤにより後方設備へ安定的に搬送される。また，バケット内の荷の量が一定となることで，CSU本体への負荷変動が抑制され，寿命の延長も期待できる。

5　試験

要素機能の開発および実機実装を順次行い，自動荷役を実現した。具体的には，センシング部分の機能開発およびオフライン試験，手動オペレータによる荷役中のセンシング部分のオンライン試験および精度検証，自動運転による実荷役試験の順で実装した。

このうち実荷役試験では，自動荷役の成立性を確認するべく，船体との接近監視，荷山高さ検出に基づく周回荷役，荷役量の安定性，底荷終了時の残荷量を主な評価項目とした。特に，最終段階の実荷役試験では約２年間にわたり試験と改良を繰り返し，荷役軌道の高度化や残荷量削減に取り組んだ。また，適用対象として定めた複数の船に対し，船倉寸法や一部形状の違いを考慮した調整および検証を実施した。さらに，雨環境下での運転試験を通じて，所定条件下での自動荷役の継続性を検証した。

性能指標には，荷役効率と残荷量を用いた。荷役効率に関しては，上荷および中荷は，手動運転と比較して掘削深さを浅く，周回数を多く行う方策をとり，高効率な荷役を実現した。また，浅い掘削を行うことにより，バケットチェーンへの負荷が低減され，寿命の伸長が期待される。さらに，船位置検出や衝突監視機能により適切な離隔距離を維持した荷役を行うことができ，衝突によるインターロック停止を起こさずに荷役可能である。

残荷量としては，重量ベースで自動運転開始時，自動運転終了時，手動による底浚い終了時それぞれの荷役量から積荷の除去率を算出した。除去率は最大で96.6％であった。**図7**に，試験時の様子を示す。左側が自動運転開始前，右側が終了後である。これは，次工程の重機による底浚いを開始するのに十分な除去率である。

これらの結果から，本システムは船倉壁面への接近，残荷量の低減，荷役量の安定化というCSU荷役で重要となる要求に対して，実荷役環境で有効に機能することが確認できた。特に，手動オペレータと同等の所要時間を達成したことは，自動化による作業負荷低減と荷役効率の両立を示す結果といえる。

6　むすび

(1) CSU自動化システムの開発により，手動と同等以上の荷役効率での自動荷役を実現し，2026年にSHI-MHよりこれを上市した。
(2) 測距センサによる船位置検出機能をはじめとする各種要素機能を開発し，実装している。
(3) 上荷から底荷までの工程を自動化し，手動荷役と同等の除去率および荷役時間を達成した。
(4) 自動荷役の実現でオペレータの高負荷作業からの解放，将来的な人員不足対策へ貢献する。