

オフショア無人施設の点検業務自律化に向けたロボット活用

Utilization of Robots for Autonomous Inspection in Offshore Unmanned Facilities

原 朱里^{*1} 櫻井 康樹^{*2} 谷川 洋平^{*1}
Akari Hara Yasuki Sakurai Youhei Tanigawa

近年、プラント向けロボットの市場投入が進み、ユーザーによる実用性の検証が始まっている。当社もロボット事業への参入を進めているが、ベンダーとユーザーの双方において、実運用を想定した具体的なユースケースの設計は進展途上にあるのが現状である。本研究では、日本財団の助成および国際的な海洋技術開発コンソーシアムである DeepStar の支援のもと、オフショアプラットフォームにおけるロボット活用のユースケースを設計し、三菱重工株式会社製の防爆型自律点検ロボット EX ROVR の第二世代機“ASCENT”を用いて実証実験を実施した。オンプレミス環境を構築し、オフショアプラットフォームを模擬した環境においてロボットの走行試験を行い、現実的な運用条件下における技術的課題を抽出した。本成果は、プラント施設におけるロボット導入に向けた具体的な指針を提供するものである。

In recent years, the deployment of robots for plant operations has been accelerating, accompanied by initial evaluations of their practical applicability by end-users. YOKOGAWA has also been pursuing entry into the robotics business; however, the design of realistic use cases currently remains underdeveloped for both vendors and users. This study, supported by the Nippon Foundation and the international offshore technology consortium DeepStar, focuses on the design and demonstration of robotic use cases for offshore unmanned platforms. For this purpose, we employed the EX ROVR, an explosion-proof plant inspection robot developed by Mitsubishi Heavy Industries, to conduct verification trials in a simulated offshore platform environment under an on-premises system configuration. Through these trials, we identified technical challenges associated with practical operating conditions. The results of this study provide concrete guidelines for the implementation of robotic systems in plant facilities.

1. はじめに

近年、プラント産業においては、安全性の確保や作業効率の向上といった課題に加え、熟練作業員の不足という問題への対応が求められている。そのような中で、産業用ロボットや AI 技術の進展により、これまで人間が担ってきた巡回点検や監視業務を自動化・遠隔化する動きが広がりつつある。特に危険作業や単調な点検業務を代替するロボットの導入は、安全性の向上と業務の効率化の両立に資する有効な手段と期待されている。

石油・ガス産業に代表されるオフショアプラットフォームは、陸地から隔絶された過酷かつ危険な環境に設置されており、施設内の日常的な巡回点検や緊急対応が不可欠である。このような作業は、高温多湿、塩害、強風といった厳しい気象条件や、硫化水素などの有毒ガスへの曝露と

いった重大なリスク環境で行われるため、作業員の安全確保が大きな課題となっている。また、可燃性ガスを取り扱うことから、施設全体が防爆エリアとして運用されることも作業環境を一層厳しいものになっている。さらに、遠隔地に設置されていることから、人員派遣や交代に伴うコストが高く、長期的な運営効率の改善も求められている。このような理由から、オフショアプラットフォーム施設の点検業務へのロボット導入の必要性は極めて高い。

しかしながら、このような環境下で稼働可能な防爆型自律移動ロボットの導入は依然として限定的である。その要因として、防爆認証に伴う技術的制約や、過酷なオフショア環境における長期稼働の実証と信頼性確保の難しさ、そして実運用に基づくユースケース設計や評価事例の不足が挙げられる。

こうした背景を踏まえ、当社は、日本財団ならびに国際的な海洋技術開発コンソーシアムである DeepStar の支援を受け、石油・ガス分野の主要企業と連携し、オフショアプラットフォームにおけるロボット運用のユースケース設

*1 マーケティング本部イノベーションセンター

*2 デジタルソリューション統括本部システム事業部事業センター

計、システム開発、および実証実験を実施した。この取り組みを通して、ロボットの実運用における要件と課題を明らかにし、さらに、三菱重工株式会社製の防爆型自律点検ロボット「EX ROVR」と当社のロボット統合管理システム「ロボット管理コア（OpreX Robot Management Core: RMC）」（図 1）を組み合わせた自律巡回点検システムを構築した。

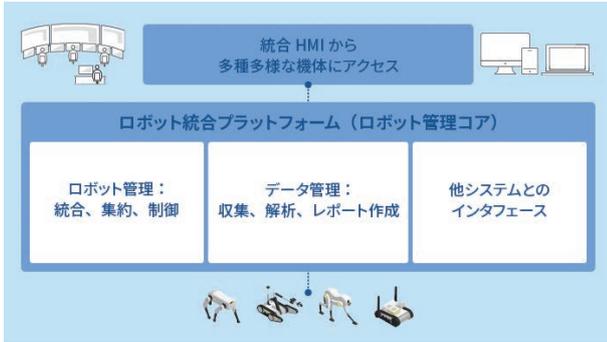


図 1 ロボット管理コアの概念図（HMI: Human Machine Interface）

出典：文献 (1) より引用

本稿では、その成果と知見を報告するとともに、プラント施設におけるロボット導入に向けた具体的な指針と将来的な施設保全の在り方を考察する。

2. オフショアプラットフォームにおけるロボット運用環境の現状と課題

一般的なプラント設備は、人間の作業を前提に設計されており、計測機器やバルブの位置、高さ、操作方向、アクセス経路などは作業員の身体寸法や動作範囲に基づいて配置されている。そのため、段差、狭小通路、急勾配階段など、ロボット走行に不向きな構造が随所に見られる。

オフショアプラットフォームでは、限られたスペースに多数の機器や配管が密集しているためロボット運用環境はさらに厳しくなる。密集する配管や機器が計測センサーを遮り、データ取得に支障をきたす場合がある。また、許可が必要な作業立入制限といった安全規定も、ロボット運用のスケジュールやタスクの柔軟性を制限する要因となる。

危険区域で運用するために移動ロボットを防爆仕様にすることも可能であるが、防爆に適合するセンサーや搭載機材は限られており、高出力レーザーや一部の光学計測機器は使用できない場合がある。このため、運用範囲は平坦な通路中心に限定されやすく、施設全域の点検業務の代替は容易ではない。

通信面でも課題は大きい。セキュリティ上の理由から、多くのオフショアプラットフォーム施設は外部ネットワークと隔離された閉域環境で運用されており、クラウド経由での制御やデータ共有は制限される。衛星通信は高遅延かつ低帯域のため不適であり、光ファイバーを備えていても外部

接続が許可されない場合が多い。そのため、ロボット運用にはオンプレミス構成の通信・管理インフラが必要となる。

これまでの事例では、非防爆ロボットや遠隔操縦型機器による短期間の実証が主に行われており、防爆区域における長期的かつ自律的な巡回点検、複数種の点検タスクの統合的な評価はほとんど行われていない。このことから、現場環境に適合したロボット運用モデルの確立が強く求められている。現在、オフショアプラットフォームでのロボット運用において想定される課題と、それに対応する技術要件を表 1 に示す。

表 1 オフショアプラットフォームにおけるロボット運用に想定される課題と技術要件

分類	想定される課題	技術要件
ロボット管理	交代制勤務によるロボットの常時監視・支援	自律巡回、異常検知、一次判断機能の実装
通信環境	衛星通信による高遅延・低帯域、外部接続制限	閉域ネットワーク下で稼働可能なオンプレミス型運用プラットフォームの実装
ユーティリティ	電源・空気供給・通信設備の常設制限、厳格な承認手続き	省電力・省スペース設計、既存設備の活用
施設環境	塩害、鳥害、台風、軍事レーダー干渉、広範囲な温度条件（-25°～50°）	高耐食・防水・耐候性設計、広温度範囲対応、長期保守間隔への対応
認証要件	防爆・船級認証による重量・サイズ・搭載機器制限	防爆適合機体、代替計測手法の確立

これらの課題解決には、ロボットの機体仕様・通信構成や運用方法など、システム全体の最適設計が必要となる。本研究では、この要件を満たすために、防爆型自律巡回ロボット、閉域ネットワーク型通信基盤、および統合アプリケーションを中核とするシステムを構築した。

2.1 システム全体のアーキテクチャ

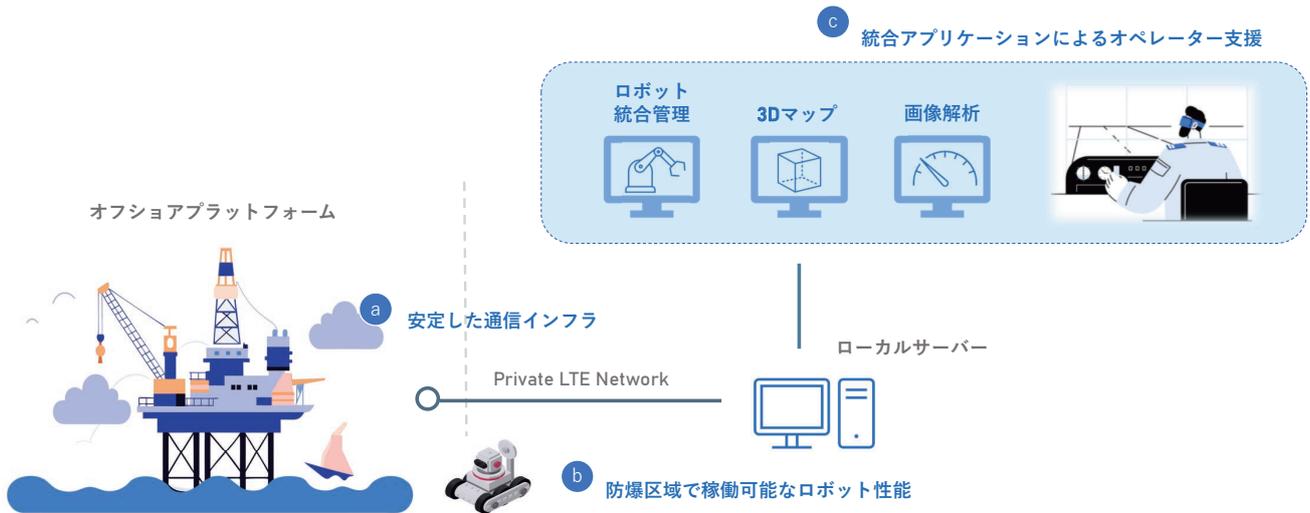
図 2 に示すように、オフショアプラットフォームにおいてロボットの長期安定運用を可能とするシステム全体のアーキテクチャは以下の要素から構成される。

2.1.1 閉域ネットワーク下で安定稼働する通信インフラ

Private Long Term Evolution (LTE) ネットワークによって閉域環境を構築し、その環境下でオンプレミスサーバーを稼働させることで通信の安定性とセキュリティを確保する。

2.1.2 防爆区域で長期自律運用が可能なロボット

国内の防爆電気機器に関する認証である TEX (Technology Evaluation for Explosion-proof Products) および国際的な防爆規格である IEC 防爆機器規格適合試験制度認証を取得している「EX ROVR」の第二世代機“ASCENT”を採用し



た。EX ROVRは、通常の運転状態において、Zone 1 環境（爆発性ガス雰囲気が存在する、あるいは発生する可能性のある環境）で引火源となり得る要素を排除するように設計されており、危険区域での自律巡回および情報収集が可能になっている。また、階段昇降機能を備え、マルチフロアに対応可能な高い走破性を有している（図3）。

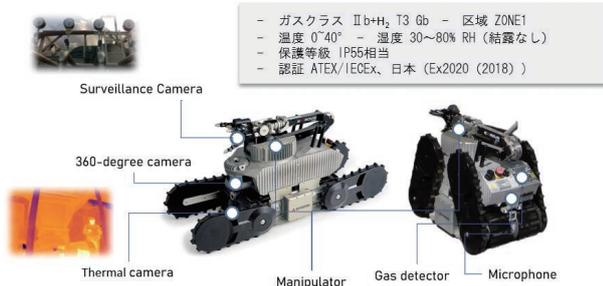


図3 EX ROVRの主要仕様

2.1.3 オペレーターを支援する統合アプリケーション

統合管理システムは、ロボットの運行・監視・管理を一元化するとともに、AIによる現場計器の自動解析や3Dマップを活用した遠隔操作支援を備えている。これにより、遠隔地にいるオペレーターのプラットフォーム運用に関する意思決定を総合的に支援する。

2.2 実証試験環境

実証試験は、オフショアプラットフォームを想定し、横浜マニュファクチャリング駒ヶ根事業所で実施した。同施設にはプライベートLTEネットワークが敷設され、屋上には圧力計、バルブ、回転機器などの実環境に近い計測対象が配置されている。環境の詳細を以下に示す。

2.2.1 建屋外観および屋上点検エリア

圧力計、バルブ、回転機器などが設置されており、計器

読取、温度監視、および音収集を目的とした試験を実施した（図4）。



図4 駒ヶ根事業所の建屋外観および屋上点検エリア

2.2.2 屋上へのアクセス経路

オフショアプラットフォームに特徴的な多層構造環境を模擬するため、屋外階段を巡回経路に含めた。屋外階段の昇降動作における安定性や安全性を評価し、移動性能を検証した（図5）。



図5 多層構造環境を模擬した屋上へのアクセス経路

2.2.3 ネットワーク構成

実際のオフショア運用を想定し、プライベートLTEネットワークを基盤とした閉域環境を構築し、その上でロボット管理システムおよび関連サーバーを稼働させた(図6)。

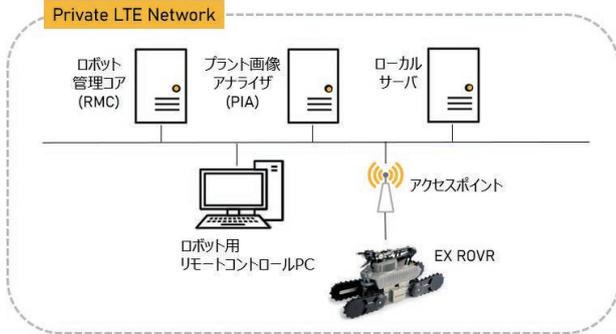


図6 実証試験用ネットワーク構成

3. 統合管理システムの構築と実証試験

本章では、オフショアプラットフォームを模擬した環境において統合管理システムを構築し、その運用性能を評価した結果について述べる。環境構築から各機能の実装、さらに実運用を想定した試験までを一貫して実施することで、システムの有効性と運用上の留意点を明らかにした。

3.1 オンプレミス環境の構築とロボット運用評価

オフショアプラットフォームの運用条件を模擬したオンプレミス環境を構築し、EX ROVRの運用サーバーをオンプレミス環境下へ移設した。Private LTEネットワーク上でEX ROVRを運用し、オンプレミス環境におけるロボットの自律運用性能を評価した。

現場条件として、階段、段差、および狭隘通路を含む試験ルートを設定した。試験ルート上には踊り場に障害物があり、通路幅が不足する箇所が存在したが、木製の土台を設置して障害物を覆うことで走行経路を確保し、その上をロボットが走行できるようにした(図7)。



図7 試験ルート上の障害箇所に設置した木製土台

点検タスクは、(i)バルブ開閉状態確認用の画像取得、(ii)アナログ計器の撮影、(iii)空調周辺でのガス濃度測定、(iv)回転機器の音響データと熱画像の取得とした(図8)。確認項目は全点検地点で所定のデータを取得できることとした。

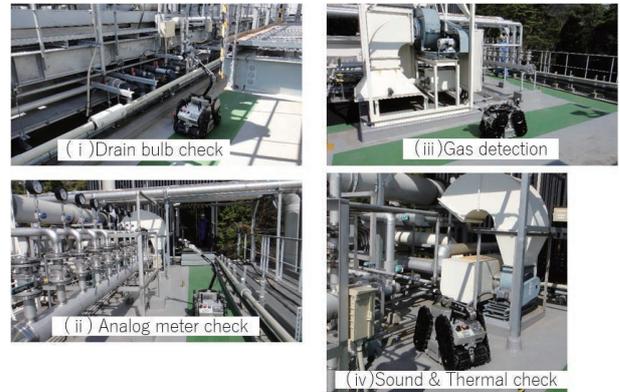


図8 実証実験で実施したロボットの点検タスク

試験の結果、ロボットは段差や階段を含むルートを安定して走破し、光学カメラ、熱画像、ガス検知、音響といった各センサーも良好に動作し、各種データの取得に成功した。光学カメラについては逆光や雨天時などの一部条件で撮影精度の低下が見られたが、全体としては、オンプレミス環境下でロボットは安定運用でき、想定環境での自律点検において十分な性能を発揮することが確認された。同時に、ロボット運用を円滑に進めるためには、ロボットフレンドリーな環境側の設計も重要であることが明らかとなった。

3.2 プロセスパラメーターの読取精度評価

EX ROVRの画像取得機能と、当社のAI画像解析アプリケーション「プラント画像アナライザ(OpreX Plant Image Analyzer: PIA)」を連携させ、圧力計や温度計などの一般的な計器を対象にメーターの読み取り精度を検証した。

検証では、想定される好ましくない画像取得環境、すなわち、照明不良(日陰や暗所に配置した計器)、汚れや付着物による計器面の部分的な隠蔽、および周囲環境の映り込みやハレーションにより撮影角度が制約される場合の3項目について条件を変えてメーター画像を取得し、プラント画像アナライザにより計測値を自動抽出した。

その結果、図9に示すすべての条件下においてメーター値の正確な読み取りが確認され、本アプリケーションが多様な環境条件下においても安定して計器値を抽出可能であり、高い計測精度と環境変動に対する頑健性を備えていることが示された。



図9 プラント画像アナライザによる計器読取に用いたメーター画像一覧

3.3 3D マップ統合表示アプリケーションの開発

オフショアプラットフォームにおけるロボット運用の課題の一つに、プラント操業の緊急事態に対して迅速かつ臨機応変に対応できるロボットオペレーションの実現が挙げられる。緊急時には、ロボットは自律走行だけでは対処できない非正常作業を行う必要があり、オペレーターによる遠隔操作が求められる。しかしながら、遠隔操作はロボットに搭載されたカメラの映像に基づいて行われるため、特に経験の浅いオペレーターには操作が極めて困難であり、これが迅速な対応を阻害する要因となる。そこで本研究では、ロボットの位置および検査ポイント情報をあらかじめ作成した3Dマップ上に統合表示し、オペレーターが施設全体を俯瞰的に把握できるユーザーインターフェースを開発した。これにより、緊急時における遠隔操作を支援するだけでなく、温度監視、騒音検査、ガス漏れ検知、オンデマンド点検、遠隔トラブルシューティングなどの多様なタスクにおいて、取得データとロボット位置を直感的に関連付けて確認することができる。

模擬施設全体の3Dマップ作成にはモバイルデバイスのLight Detection and Ranging (LiDAR) センサーと3Dスキャンアプリケーションを使用し、従来の3Dスキャナーを用いた手法よりも迅速かつ低コストでのモデル化を実現した(図10)。

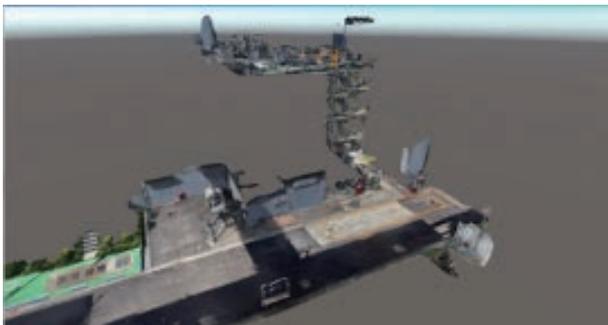


図10 モバイルデバイスによって作成した駒ヶ根事業所の3Dモデル

一方で、この手法で作成された3Dモデルはすべてのオブジェクトが単一のモデルに結合され、かつ広範囲スキャンに起因する解像度の制約が存在する。そのため、ロボットの検査ポイントとなる対象物については個別に3Dスキャンを実施し、高精度モデルを併用した(図11)。

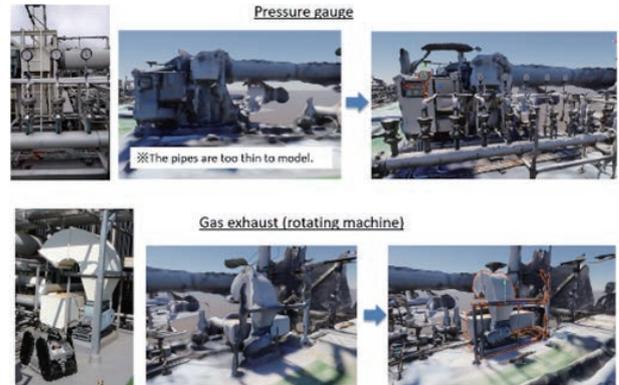


図11 高精度モデルを適用した検査対象の置換例

このように構築した3Dモデル上にロボット位置を重畳することで、巡回点検ルートを低コストに可視化し、オペレーターが施設全体の状況を直感的に把握できるユーザーインターフェースを実現した。

さらに、ロボットが取得した画像データをロボット管理コアに集約し、プラント画像アナライザで解析した結果を3Dマップ上の検査ポイントに統合した。これにより、オペレーターは、ロボット運用や点検に関わるデータを、単一の3Dマップビューアーで統合的に参照できる(図12)。

本アプリケーション統合により、ロボットの巡回点検を3Dマップ上で効率的に視覚化する統合環境を実現し、遠隔監視や運用支援に対して有用な基盤を提供することが可能になった。

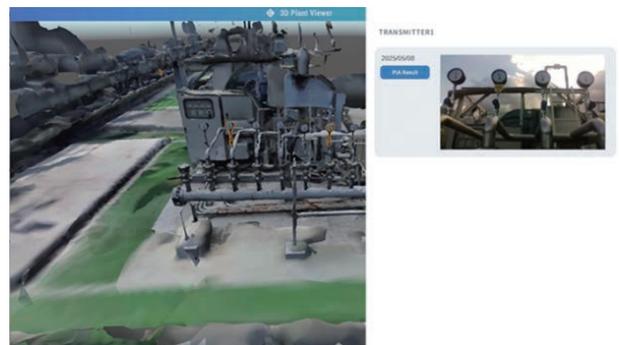


図12 ロボット位置と検査データを可視化する3Dマップビューアー

3.4 統合試験

駒ヶ根工場に構築したオンプレミス環境において、階段、段差、および狭隘通路を含む試験ルートを設定し、現

地環境の3Dマップ生成から点検タスクの自律実行、結果の取得までの一連の流れを対象として、統合管理システム全体の動作検証を以下の手順で実施した。

1. ロボットの巡回点検ルートおよびシナリオを作成する。
2. 作成したシナリオをロボット管理コアから実行する。
3. ロボットによる自律点検を実施し、3Dマップを用いて遠隔地からロボット位置を確認する。
4. 点検結果の取得およびプロセスパラメーターの自動解析を行い、3Dマップ上で結果を確認する。

統合試験の結果、ロボットは事前に定義したシナリオに基づく各点検タスクを滞りなく実行し、取得された画像データと計測値はプラント画像アナライザによる自動解析を経て3Dマップ上に統合表示された。これにより、遠隔環境下からロボット位置および点検結果を一元的に把握できることが確認され、統合管理システムが実運用レベルで巡回点検プロセスを円滑に実行できることが実証された。

3.5 考察

本実証試験により、オフショアプラットフォームにおいて自律走行ロボットを用いた巡回点検が技術的に実現可能であることを示した。一方で、自律走行ロボットがその能力を十分に発揮するためには、プラント側も、ロボットの移動経路や点検対象の配置を考慮した設計であることが望ましい。高所や狭隘部へのアクセス性、計器やバルブの視認性、通信環境の安定性などが、今後のプラント設計段階で考慮すべき重要な要件である。

4. おわりに

本研究開発は、オフショアプラットフォームにおける自律走行ロボット運用の技術的実現性とシステム統合の有用性を示し、危険区域での安全かつ効率的な点検業務に向けた基盤を確立した。これにより、従来人手で行っていた単

純かつ高負荷な点検作業を自動化し、作業者の負担軽減および作業品質の均一化が可能になる。

今後は、本システムをドローンや生産制御システムと連携させることで、設備全体を俯瞰的かつリアルタイムに監視・管理できるスマートプラント化を推進する。さらに、石油・ガス分野にとどまらず、化学、電力、食品などの多様な製造業への適用を視野に入れ、運用条件や施設設計指針の標準化、および国際的な技術展開を進めることで、プラント運営の安全性、効率性および持続可能性を高める統合型次世代プラントマネジメント基盤の確立を目指す。

謝辞

本プロジェクトの遂行にあたり、多大なるご協力とご支援を賜った日本財団、DeepStar、ならびに三菱重工工業株式会社に深く感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 横河電機株式会社, ロボット・ドローンテクノロジー, https://www.yokogawa.co.jp/solutions/featured-topics/robot_and_drone_technology/, (参照 2025-09-29)

* EX ROVR および ASCENT は、三菱重工工業株式会社の登録商標または商標です。

* ロボット管理コア (Robot Management Core: RMC) は、横河電機株式会社の登録商標または商標です。

* プラント画像アナライザ (Plant Image Analyzer: PIA) は、横河電機株式会社の登録商標または商標です。

* その他、本文中で使用されている会社名、団体名、商品名、サービス名およびロゴ等は、横河電機株式会社、各社または各団体の登録商標または商標です。

Supported by 