

自動粉じん清掃ロボット「GAZMASTAR®」の開発

Development of Automatic Dust Cleaning Robot “GAZMASTAR™”

高木 勇輝 TAKAKI Yuki JFE スチール スチール研究所 サイバーフィジカルシステム研究開発部 主任研究員
佐々木成人 SASAKI Masato JFE スチール スチール研究所 サイバーフィジカルシステム研究開発部 グループリーダー
小林 正樹 KOBAYASHI Masaki JFE スチール DX 戦略本部 DX 企画部 主査

要旨

コークス炉頂など高温・粉じん環境での清掃作業を自動化するため、自律走行清掃ロボット「GAZMASTAR®」を開発した。LiDAR センサとパーティクルフィルタを用いて自己の位置を推定し、ロボット本体の清掃ブラシを地面に密着させて清掃ルートを自動走行することで堆積粉を回収する。高温環境への対応として冷却用の樹脂材料と水による気化冷却を組み合わせた独自の冷却機構を備え、粉じん環境への対応として LiDAR 出力に生じる粉じん・発煙によるノイズの除去処理およびスタック発生時に自動復帰する制御フローを搭載することにより、製鉄所内の過酷な環境に対応できる。また現場操作向けのユーザーインターフェースにより、専門知識がなくても操作できる。今後は落粉以外の清掃対象物へも適用を拡大し、より多くの現場での 3K 作業の削減を図る予定である。

Abstract:

JFE Steel has developed an autonomous cleaning robot called “GAZMASTAR™” to automate cleaning operations in high-temperature and dusty environments such as coke oven tops. The robot performs self-localization using a LiDAR sensor and a particle filter, and automatically follows a cleaning route while keeping its cleaning brush in close contact with the ground to collect accumulated coal and iron ore powder. To cope with high-temperature environments, it is equipped with a unique cooling mechanism that combines cooling resin materials and water evaporation. To address dusty conditions, it features noise filtering for LiDAR data affected by dust and smoke, as well as control logic that automatically recovers from stalls, enabling it to operate in the harsh environments of steelworks. Additionally, the user interface designed for on-site operation allows operation without specialized knowledge. In the future, we aim to promote deployment across all areas and continue adding new functions.

1. はじめに

近年、少子高齢化に伴う労働人口の減少に加え、政府が主導する働き方改革の中で労働生産性の向上や、悪環境、重筋、危険といったいわゆる 3K（きつい、汚い、危険）作業の撲滅が社会的なテーマとなっており、ロボットによる 3K 作業の自動化が注目されている。JFE スチールにおいてもロボットによる 3K 作業の自動化を推進しており、これまでに厚板精整工程における手押し台車で行っていた内部探傷作業の自走式超音波探傷ロボットによる自動化¹⁾、オペレータがグラインダなどを用いて鋼管の表面欠陥を除去する手入れ作業のロボットによる自動化²⁾等を実施している。

これら JFE スチールで導入しているロボット技術は、出荷前の製品を扱う圧延工程の例が多く、製鉄工程、製鋼工程などの上工程と呼ばれるプロセスでの適用例は少ない。これは上工程では石炭、鉄鉱石などの粉体や溶銑、溶鋼などの高温物を扱うため、精密機器であるロボットの使用に不

向きな高温、粉じん環境が多いためである。

例えば、コークス炉（図 1）では、高炉で鉄鉱石を還元するために使用するコークスを石炭から製造しており、炉内からコークスを押し出す押出機や押し出されたコークスを搬送する消火車、ガイド車が走行する消火車軌道およびプラットフォームでは、コークス押出し時に赤熱した大塊のコークスが落骸する。これらの落骸は、放置すると押出機や消火車の軌道に挟まり操業が停止する原因となるため、定期的に重機で清掃している。またコークス炉の炉頂では、原料である石炭を送炭車で装入孔から炉内に装入しており、装入の際に原料炭が装入孔の周囲に漏れて堆積する。この落粉は、放置すると風により周囲に飛散し、環境汚染を招いたり石炭中の硫黄分による設備腐食の原因となったりするため、定期的に人手で清掃している。

このようなコークス炉周辺での 3K 作業は省力化が求められており、本稿ではその中で、現状では人手作業に頼っている、コークス炉頂の清掃作業の自動化技術について述べる。

2026 年 3 月 18 日受付

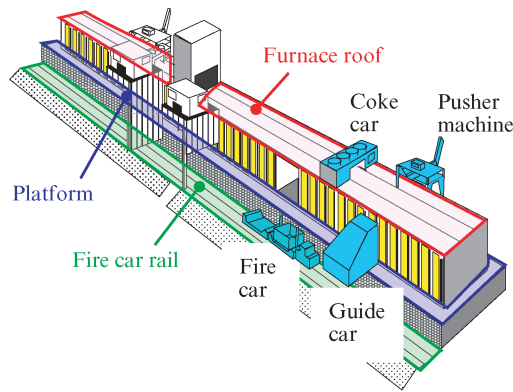


図1 コークス炉概観図

Fig. 1 Schema of coke oven

2. ロボットによる落粉自動清掃

清掃作業を自動化する手段として清掃ロボットが市販されているが、これらの市販ロボットは、最大数十L程度の集塵ボックスを本体内に設けて、清掃対象物を吸引回収する方式が主流である^{3,4)}。このような清掃ロボットを用いる場合は、堆積粉が1mm積層している領域を1m²清掃するために1Lの落粉吸引が必要で、オフィス、商業ビルや落粉の少ない工場などでは問題とならないが、落粉が数mm～数cm堆積している製鉄所では能力不足で、適用するのは非現実的である。

そのため図2のように、清掃ブラシを地面に密着させた状態で、あらかじめ設定した清掃経路を自動追従させて堆積粉を回収場所に収集するロボットを開発した。清掃ブラシは、ロボットの幅方向に沿った板状部材と、掃き取った堆積粉がロボット幅方向の外側に逃げないようにする両側の側板から構成されており、板状部材と側板の下部にブラシを取り付ける構造である。

2.1 清掃ロボット自律走行手法

清掃経路を自動追従するためにはロボットが自分の位置(座標、姿勢角)を常時把握する必要があり、これはレーザー光を用いたLiDAR (Light Detection and Ranging) センサで常時測定する周囲障害物の形状と、予め記録させた障害物マップより自己の位置を推定することで把握する。自律走行を行うロボットでは、自己位置推定的手段として、パーティクルフィルタ^{5,6)}と呼ばれるモンテカルロ法に基づくアルゴリズムがよく用いられる。

本節ではその概要を示す。まずロボットの動作開始時の初期位置周辺に、ロボットの状態(位置・姿勢)を表すパーティクルを集中して散布する。続いて予測ステップでロボットの制御入力(モータ回転量)に基づき、各パーティクルの状態を更新する。この際、動作ノイズを考慮し、パーティクルの状態にランダムな摂動を加えることで、状態分布

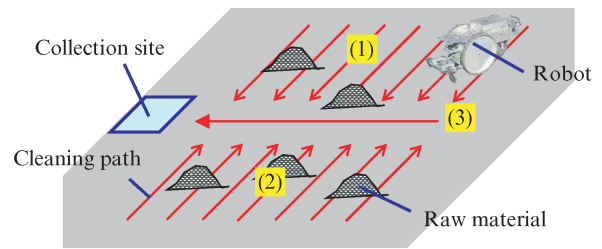


図2 清掃ロボットによる自動清掃方法

Fig. 2 Automatic cleaning method with a robot

の広がりを表現する。

次に更新ステップでLiDARセンサから得られた観測データと、各パーティクルの状態と障害物マップから予測される観測値を比較し、観測モデルに基づいて各パーティクルに重みを割り当てる。重みは、観測データと予測値の一致度を反映し、尤度関数により計算する。そしてサンプリングステップで重みの偏りを是正するため、重みの高いパーティクルを多く、低いパーティクルを少なくする操作を行う。これにより、推定分布がロボットの実際の状態に収束しやすくなる。この予測～サンプリングを繰り返し実施することでロボットは常時自己の位置を推定、把握している。この手法により、屋内外の複雑な環境下で、高い精度の自立走行を実現している。

この清掃ロボットに関し、コークス炉頂の高温、粉じん環境に対応させるため、①耐熱機能、②LiDARセンサ出力に生じる粉じんノイズ対策、③落粉などによる過負荷停止対策について開発した内容を次節以降に示す。

2.2 清掃ロボット耐熱対策

図3に夏季条件(気温32℃)で取得したコークス炉頂のサーモビュー画像を示す。コークス炉頂は耐火物で覆われており、その耐火物面は80～100℃、装入孔の鉄製の蓋、ガス配管などは200℃を超える温度になっており、コークス炉頂は輻射熱を多く受ける環境であることがわかる。一方でロボット内部の電子基板を熱から保護するため、内部温度を60℃以下に維持することが必要である。

一般的に機器内部の電子部品を冷却する場合はファンで内部に外気を取り込むが、コークス炉頂は粉じん環境であるため、この手法を用いることはできない。そこで図4のような冷却機構を独自に開発した。

内部の電子機器からの発熱を吸収するために、常温常圧では固体であり、30～50℃程度で液体化する樹脂ポリマー物質を、吸熱材として筐体内部に設置する。この吸熱材はロボットの始動前は固体の状態であり、移動中に固体から液体へ相変化(融解)することで、内部の電子機器から発生した熱を吸収する。この際、吸熱材は融解潜熱として熱を蓄えるため、内部温度の上昇を抑制できる。

また、外部からの輻射熱、周囲からの伝熱に関しては、

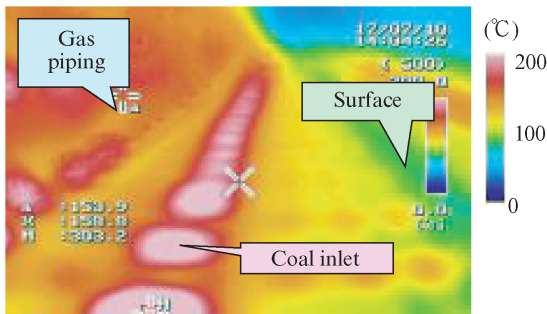


図3 コークス炉頂のサーモビュア画像

Fig. 3 Thermal image of top of coke oven

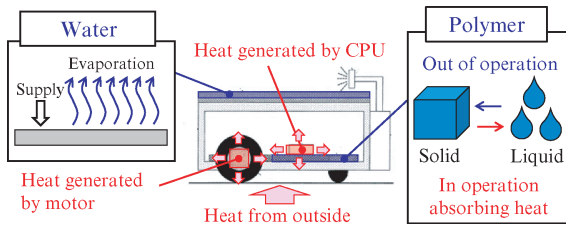


図4 冷却機構の模式図

Fig. 4 Schema of cooling system

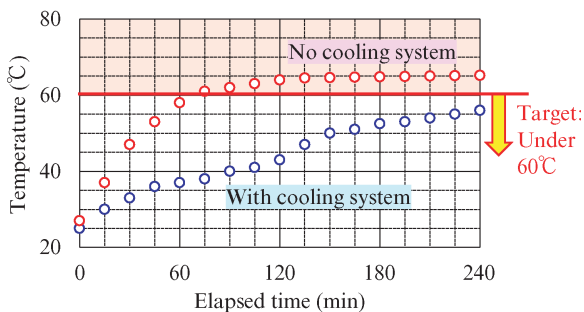


図5 冷却機構の性能評価試験結果

Fig. 5 Test results of the cooling system performance

筐体の下面および側面の内側に断熱材を設置することで入熱を抑制する。さらに水の気化熱を応用した気化熱冷却機構により、上面から筐体外部に放熱している。気化熱冷却機構は、外面に多孔質体を設け、そこに水を含浸させて高温環境下で蒸発させることで、蒸発潜熱により筐体上面から内部の熱を放出する。タンクから一定量の水分を継続的に供給することで、持続的に冷却効果を発揮できる。

これら冷却機構の能力確認のため、夏季条件（気温 34℃）でコークス炉頂に清掃ロボットを設置し、稼働状態での内部機器の温度変化を測定する試験を実施した。試験中の温度変化を示したグラフを図5に示す。冷却機構を作動させない条件では、開始30分で内部機器温度が27℃から47℃まで20℃上昇し、開始1時間程度で60℃を超えた。一方で冷却機構が作動している条件では、開始30分の内部機器温度の上昇を6℃に抑制し、4時間経過後も60℃を超えないこ

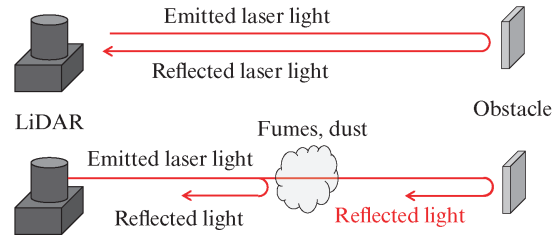


図6 LiDAR センサの測定原理

Fig. 6 Measurement principle of LiDAR sensor

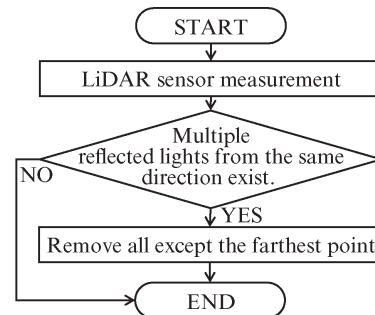


図7 LiDAR 出力の粉じんノイズ除去フロー

Fig. 7 Noise filtering flow from LiDAR output

とを確認した。清掃ロボットの連続駆動時間が約4時間であることを考慮すると、十分な冷却効果があると判断できる。

2.3 粉じん環境でのセンサ計測技術

清掃ロボットは、前述のとおり LiDAR センサを用いたパーティクルフィルタによって自己の位置を推定し、清掃経路を自動走行している。周囲の障害物を測定する LiDAR センサの測定原理を図6に示す。センサは測定方向にレーザー光を発射し、反射光が返ってくるまでの時間から測定方向に存在する障害物までの距離を把握し、一定の角度刻みで測定することで周囲の障害物の形状を測定できる。しかし、製鉄所のように粉じん、発煙が存在する環境では、LiDAR センサと障害物の間に存在する粉じんや発煙がレーザー光を反射することで、LiDAR が仮想障害物としてこれらを誤検出し、自律走行中の清掃ロボットが回避行動を取ろうとしたり不必要に停止したりして、清掃効率が低下する。

そのためノイズを除去する手法が必要であるが、単純に特定領域の測定点を除去する手法や反射強度のみでフィルタリングする手法は、粉じんや発煙の位置および反射強度が距離により変動するため、適用が困難である。そのため図7のような粉じん、発煙の位置変動、反射強度変動に対応可能なノイズ処理手法として、同一方向から複数の反射光を受光できるマルチエコー方式⁷⁾の LiDAR センサを採用した。同一方向から複数の反射光を受光した場合に、最遠方からの反射光のみを残し、それよりも近距離側からの反射

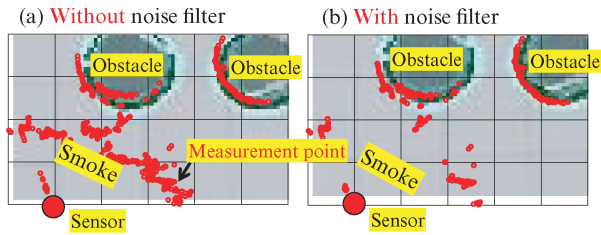


図8 ノイズフィルタ機能の検証試験結果

Fig. 8 Evaluation results of the noise filtering function

光をノイズとして除去することで、実際の障害物より手前にある粉じんや発煙による反射（仮想障害物）の影響を低減できる。

ノイズ除去手法の能力を確認するため、障害物とセンサの間で人工的に発煙させて、センサ出力を記録する試験を実施した結果を図8 (a) (b) に示す。ノイズ除去を用いない条件 (a) では発煙によるノイズ測定点が非常に多く存在するのに対して、ノイズ除去フィルタを用いた条件 (b) では発煙部分の測定点が大幅に減少することがわかる。これにより仮想障害物が発生する確率を大幅に低減させることができ、ロボットの安定的な自律走行が可能となる。

2.4 落粉などによる過負荷停止対策

清掃ロボットは、あらかじめ記録された経路点情報を、1番目の点から順番に辿るように自律走行することで指定領域の清掃動作を実施するが、製鉄所内には落粉が局所的に多く堆積しているような箇所も存在する。

このような箇所では、清掃ロボットで押し切れない量の堆積粉が清掃ブラシにたまった状態になり、押し切れずに車輪が空転し続けた状態で経路点を目指して自律走行を続けた結果、最終的にバッテリー切れで途中停止してしまうリスクがある。そのため、安定した自動清掃にはタイヤが空転したスタック状態を検知して復帰させる処理が必要で、清掃ロボットは、スタック状態から復帰させる異常処理を含めた、図9のような動作制御フローを搭載している。

動作制御フローは以下のとおりである。まず、あらかじめ記録した経路点（ロボット位置座標、姿勢角、スクレーパ動作フラグ）を1番目の経路点から読み込む。次に経路点と清掃ロボットの自己位置から必要な移動量と必要な姿勢角の調整量を算出する。さらにこの値から移動目標時間 T を設定したうえで、スクレーパ動作フラグに基づいてスクレーパを上下動作し、経路点までの移動を開始する。経路点への到達判定は、自己位置と経路点との距離が設定された閾値以下であるか否かにより実施し、記録したすべての経路点を走破するまでこの処理を繰り返し実施することで清掃動作を完了する。

異常検出および対処については、スタック状態および経路生成不可の二つのケースを想定している。スタック判定

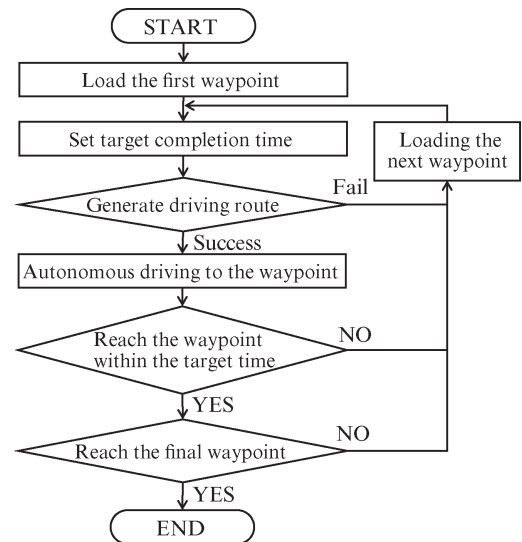


図9 清掃ロボット制御フロー

Fig. 9 Control flow of the cleaning robot

は、移動開始から移動目標時間 T を経過しても経路点まで到達できない場合に行い、移動中の経路点をパスして次の経路点に向かうようにすることで、途中でスタックすることを回避する。経路生成不可の判定は、LiDAR センサで取得した障害物情報あるいは障害物マップ上の障害物との干渉により、経路点までの走行経路が生成できない場合に行い、スタック判定の際と同様に次の経路点に向かうように変更する。

前述の移動目標時間 T は以下の式 (1) で算出される。

$$T = \alpha \Delta L + \beta \Delta \theta + \gamma \quad \text{..... (1)}$$

ここで、 α, β, γ は定数、 ΔL が必要移動量、 $\Delta \theta$ が姿勢角調整量である。この制御フローにより、複雑な異常処理プログラムやスタック検知用の追加センサなどを使用せずに対処できる。なお、スタック発生時や経路生成失敗時に次の経路点が存在しない場合は、操作用タブレットにエラー表示して処理を終了する。

3. 清掃ロボットの性能と現場適用性

前章では、製鉄所環境に自律走行ロボットを適応させるために開発した機能について述べた。これらの機能を搭載して稼働する本ロボット（図10）は、英語の Gather（収集）と Master（名人）の単語をもじった造語の GAZMASTAR® と耐熱機能（Heat resistant）より GAZMASTAR®-H と命名した。

本章では GAZMASTAR®-H の、①単位時間当たりの清掃面積、落粉回収性能、②ロボット操作ユーザインターフェース、③ロボット適用箇所の拡大に向けた取り組みにつ

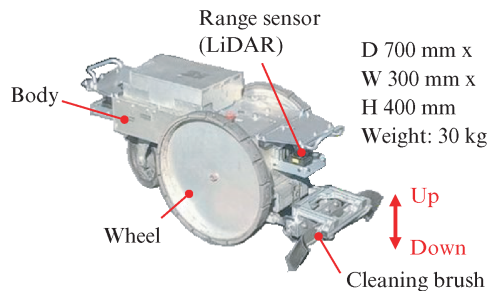


図 10 自動清掃ロボット GAZMASTAR®-H

Fig. 10 Automatic cleaning robot GAZMASTAR™-H

いて示す。

3.1 ロボット清掃能力

清掃中は速度 0.4 m/s で走行するため、理論上の清掃経路長は 1 440 m/hr であるが、経路点での停止、旋回動作、ブラシを上げて戻す動作のため、開けた場所で前後動作のみで集塵可能な場所でも清掃経路長は 300 m/hr 程度で、幅 400 mm のブラシを使用する場合は 120 m²/hr 程度となる。狭所が多い場合は旋回動作が増えるため、清掃能率は 60 m²/hr 程度となる。またロボットは内部バッテリーで駆動し、5～6 時間の充電で約 4 時間連続稼働できることから、1 度の充電で 240～480 m²/hr 程度を清掃する運用が可能である。

また清掃対象は粒径 1 mm 以下の石炭、鉱石、コークスなどの粉がターゲットであり、樹脂製ブラシで掃き集めて回収する。清掃能力評価のため、ラボで縞鋼板上にサンプル粉を 2 kg 散布し、ロボットのブラシを下げた状態で通過させたときの回収量を測定した。回収量、回収量÷散布量から算出した回収率、掃き取り前後の写真を図 11 に示す。サンプル粉によってばらつきはあるが、縞鋼板のように地面の段差が少ない条件であれば、1 回の掃き取りで 80% 以上、2 回の掃き取りで 90% 以上の落粉を回収でき、製鉄所内の清掃に十分な清掃能力があることを確認した。

3.2 ロボット操作性向上

清掃作業は、製鉄所設備の操業状況に応じて毎回異なる箇所で行うため、図 12 のようにアクセスポイントに操作タブレットと清掃ロボットを接続する機器構成とし、操作タブレットから清掃箇所を指定して実行できるようにした。各箇所の清掃に必要な障害物マップと清掃経路情報はロボット側に記憶させ、清掃中はロボット側で自律走行などの制御を行うため、操作タブレットとの通信が断絶しても清掃動作を最後まで実行できる。またロボットの重量は 30 kg 程度で、停止時などは人力で運搬できる。

現場作業者がロボットを使用する運用であるため、専門知識がなくてもロボット操作を行うことができるようユーザーインターフェースを設けた。清掃ロボットの操作イメー

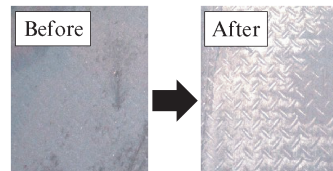
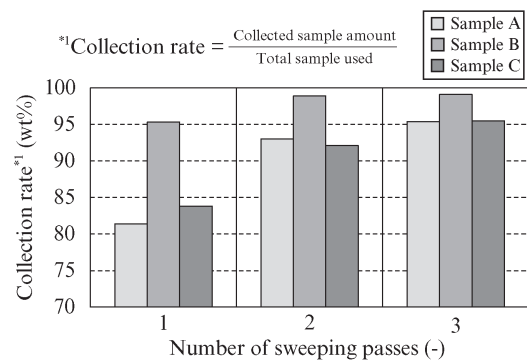


図 11 サンプル粉回収試験結果

Fig. 11 Result of cleaning test

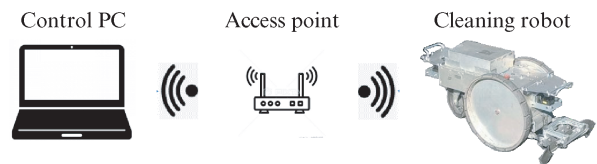


図 12 清掃ロボット機器構成

Fig. 12 Cleaning robot system configuration

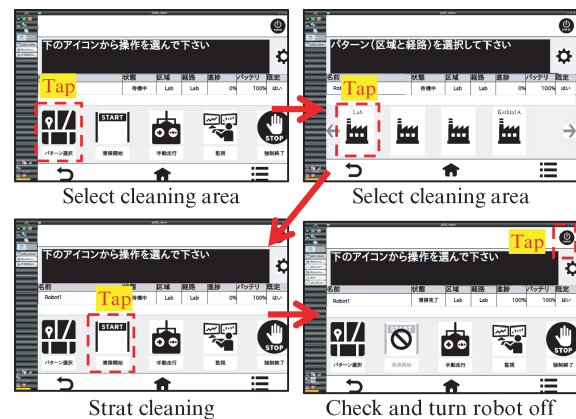


図 13 清掃ロボット操作イメージ

Fig. 13 Image of cleaning robot operation

ジを図 13 に示す。操作タブレットの画面に表示されたボタンをタップすることで、清掃箇所の指定、清掃開始ができ、清掃中はロボットと通信できていれば進捗状況が画面に表示されるので、ロボットの状態を監視できる。これにより、現場オペレータでも、容易にロボットを操作・運用できるようになっている。

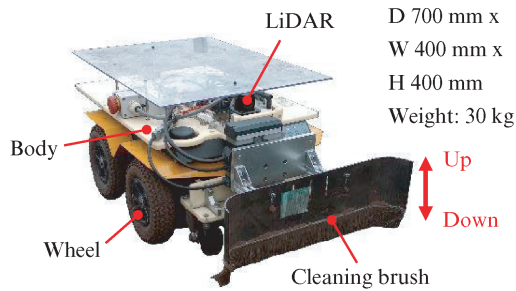


図 14 常温清掃ロボット (GAZMASTAR®-S)

Fig. 14 Picture of GAZMASTAR™-S

3.3 ロボット適用箇所の拡大に向けた取り組み

これまで高温箇所のコークス炉頂向けの清掃ロボット (GAZMASTAR®-H: Heat resistant) について論じてきたが、石炭、鉱石、コークスなどの落粉清掃を実施している箇所には常温環境の箇所もある。そのような場所向けには図 14 のように走行台車部分に汎用移動台車を用いたタイプ (GAZMASTAR®-S: Standard model)⁸⁾ を開発した。

この汎用移動台車は、地面からの熱影響を考慮する必要がないため、4 輪駆動で低重心の車体となっており、コークス炉頂向けの機体より大きな段差や傾斜にも対応できる。さらに汎用品であるため部品を簡単に交換できることから安全性が向上している。またオプションとして非接触充電機能を有し、充電ポートまで自動帰還して自動充電を行うことで、現地作業を伴わない連続稼働を実現している。

一方で、アクセスポイントに操作用タブレットと清掃ロボットを接続し GUI 上で操作する機器構成や、LiDAR センサの粉じんノイズ除去、スタック回避制御フローなど自律走行に関する機能は、コークス炉頂向けの GAZMASTAR®-H の機能を踏襲している。

4. おわりに

本稿ではコークス炉頂の 3K 作業自動化を目的として開発した自律走行清掃ロボット「GAZMASTAR®」について述べた。

- (1) 本ロボットは、ブラシを用いた掃き取り回収方式により、数 mm～数 cm 堆積した落粉を清掃できる。
- (2) 本ロボットは、冷却用樹脂と水の気化冷却を組み合わせた独自冷却機構により高温環境へ適応できる。
- (3) 本ロボットは、LiDAR 出力のノイズ除去処理とスタック状態から自動復帰する制御フローにより、粉じん環境での安定稼働を実現している。
- (4) 本ロボットは簡易なユーザーインターフェースにより、専門知識がなくても現場で運用できる。

常温箇所向けに、汎用移動台車を用いた GAZMASTAR®-S も開発し、シリーズ化している。今後は性状の異なる落塊等への適用拡大を進め、より多くの現場で 3K 作業の削減を図る予定である。

参考文献

- 1) 小林正樹, 山下浩二, 宮脇光備, 竹村悠作, 宮長淳. 自走式精密検査ロボットの開発. 第 57 回機械振興賞受賞者業績概要. 2022, p. 17-20.
- 2) 渡邊拓, 牧田陽行, 角谷拓馬, 山下浩二, 石田匡平. 鋼管自動研削ロボットシステムの開発. 鉄と鋼. 2025, vol. 111, no. 13, p. 814-824.
- 3) 青山元, 田島茂樹, 横田和隆, 尾崎功一, 山本純雄. 自律走行式床面清掃ロボットの開発. 日本ロボット学会誌. 1998, vol. 16, no. 1, p. 57-64.
- 4) 青山元, 石川和良, 関淳也, 足立佳儀, 石村左緒里, 薩見雄一, 高橋朝美. 自動車運搬船清掃ロボットの開発. 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集. 2011, 1A1-D03.
- 5) Fox, D.; Burgard, W.; Dellaert, F.; Thrun, S. Monte Carlo Localization for Mobile Robots. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 1999, p. 1322.
- 6) Doucet, A.; de Freitas, N.; Murphy, K.; Russell, S. Particle Filters for Online Nonlinear/Non-Gaussian Bayesian Tracking. Proceedings of the Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI). 1999, p. 1.
- 7) Man, Y.; Weng, X.; Sivakuma, P. K.; O'Toole, M.; Kitani, K. A Survey on LiDAR Data Processing for Autonomous Driving. arXiv preprint arXiv:2107.11470, 2021.
- 8) JFE スチールニュースリリース
<https://www.jfe-steel.co.jp/release/2024/03/240318.html>