

電力インフラ設備の点検省力化に貢献する 走行ロボットを用いた自律巡視技術

Robots Equipped with Autonomous Patrol Functions for Labor-Saving Inspections in Electricity Infrastructures

上田 紘司 UEDA Koji 笹川 憲二 SASAGAWA Kenji 藤田 崇 FUJITA Takashi

発電所や変電所などの電力インフラ施設では、少子高齢化に伴う人手不足を背景に、巡視点検業務の一部を自動化する省力化が検討されている。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、あらかじめ設定した巡視ルートを定期的に走行し、計器類など点検対象の画像情報を自動的に収集可能な走行ロボットを開発した。施設内の巡視では、狭い通路の自律走行機能、点検対象の確実な撮影機能、及びロボットの異常発生時に巡視を中止して停止・帰還する機能が求められる。これらの機能を搭載した走行ロボットを用いた屋内外での実験の結果から、基本的な自律巡視機能の実現性を確認した。

In electricity infrastructures including power plants and substations, there is a growing need for autonomous systems to handle part of the patrol inspection work in order to address the labor shortage accompanying the declining birthrate and aging of society in recent years.

As a solution to this issue, Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation has developed autonomous patrol robots that can automatically collect image data of target instruments while traveling along a predetermined patrol route at regular intervals. These robots incorporate the following functions: an autonomous movement function making it possible to travel through narrow passages, an imaging function to reliably capture images of target instruments, and an interruption function to stop the patrol work and return the robot to the base station in the event of an abnormality. Experiments using prototype robots for indoor and outdoor use equipped with the above-mentioned functions have confirmed the feasibility of realizing basic autonomous patrol tasks by means of these robots.

1. まえがき

発電所や変電所をはじめとした電力インフラ施設では、運転時は無人の施設でも、定期的に作業員が現場に出向いて点検作業を行う必要がある。このような業務の一部を施設内に配備したロボットで行うことで、省力化する取り組みを進めている(図1)。ロボットが収集した計器類の画像などのセンサーデータは、クラウドシステムやオンプレミス上に構築したエネルギーシステム向けIoT(Internet of Things)プラットフォームで管理・分析し、設備の状態把握や予防保全などに活用する⁽¹⁾。

このようなロボットとして、点検対象が高所にある場合や巡視ルートに大きな段差や配管などの構造物があるような場所に有効なドローンと、多くのセンサー類が搭載でき、長時間の安定した移動が可能な走行ロボットを開発している⁽²⁾。

ここでは、走行ロボットについて、開発した自律巡視機能と屋内外での実験による検証結果について述べる。

2. 走行ロボット

電力インフラ施設を巡視点検するロボットには、以下の機能が要求される。

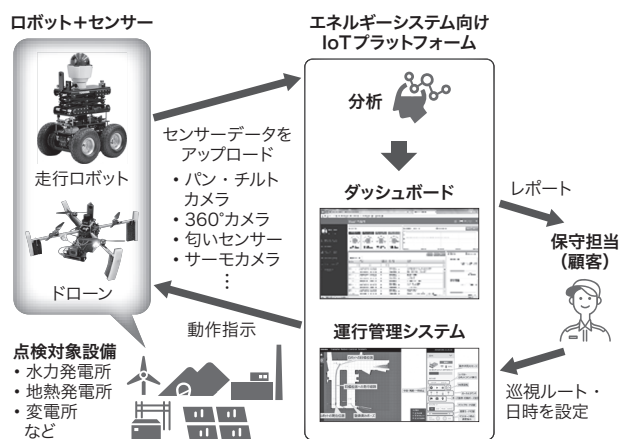


図1. 発電設備の巡視点検システムの概要

様々なセンサーを搭載したロボットが、発電所内を自律的に巡視して、取得したセンサーデータをアップロードする。このデータを分析後、保守担当者へレポートする。

Overview of patrol inspection system for electricity infrastructures

- (1) 巡視ルートにある狭い通路を通過できる。
- (2) 点検対象を確実に撮影できる。
- (3) ロボットに何らかの異常が発生した際は、巡視を中止して停止あるいは帰還できる。

次の2.1節以降で、走行ロボットの装置構成と、上記の要求に対応するために開発した自律巡視技術について述べる。

2.1 装置構成

走行ロボットは、図2及び表1に示すように、屋内タイプと屋外タイプの2種類を開発した。いずれも台車部分は、左右独立2輪駆動による4輪方式のもので、その上部にセンサー類を配置した。主に計器類の撮影に使用するズーム付きパン・チルトカメラや、全周囲を撮影できる360°カメラ、制御盤や配管などの異常発熱を確認するためのサーモカメラのほか、照明のない屋内や夜間の屋外での巡視を可能とするために、照明を搭載している。

2.2 自律巡視の概要

開発した自律巡視機能の概要を説明する。事前準備として、まず巡視対象のエリアにて走行ロボットを手動操作で走行させて、ロボットに搭載した2次元(2D)レーザー距離センサーにより周囲の構造物の位置情報を取得して、地図を作成する。次に、ロボットが移動する経由点や点検対象の位置を、地図に関連付けて登録する。その後、以下の自律巡視動作を、繰り返し行う。巡視時は、常に車輪の回転速

度と2Dレーザー距離センサーの測定値を取得して地図と照合することで、ロボットがいる位置を推定しながら移動する。

- (1) 充電ステーションを出発
- (2) 事前に登録した経由点を結ぶ巡視ルートを移動して、点検対象を撮影
- (3) 充電ステーションに帰還し、走行ロボットを自動充電
- (4) 撮影した画像をエネルギーシステム向けIoTプラットフォームにアップロード

2.3 狭い通路を通過する走行制御

走行ロボットの自律走行機能には、オープンソースのロボット用ミドルウェアであるROS (Robot Operating System) を活用した。ただし、ROSの標準的な機能を用いた自律走行では、以下のような問題があった。

- (1) 発電所などにある狭い通路を通過する際に、壁面に接触して通過できない場合がある。
- (2) 巡視ルートに障害物がある場合には、障害物を迂回(うかい)して目的地に向かうルートを再計画するため、あらかじめ設定した巡視ルートを逸脱する場合がある。

問題(1)は、車輪と床面との摩擦の影響により、走行ロボットが指令どおりに旋回できず、計画した巡視ルートに精度良く沿って移動できないことが原因と考えられる。問題(2)については、障害物を回避するよりも、想定外のリスク発生を防止する観点から、停止・帰還する方が望ましい。

これらの問題を解決するために、新たな走行制御処理を開発してROSの標準機能と換装した。この走行制御処理は、図3に示すように設定した経由点間を結ぶ線分を定義して、これに沿うようにロボットの速度指令を生成し、前方に障害物を検知した場合は、一定距離を後退してから再度前進するというものである。後退時も、前述の線分に沿うように速度指令を生成する。

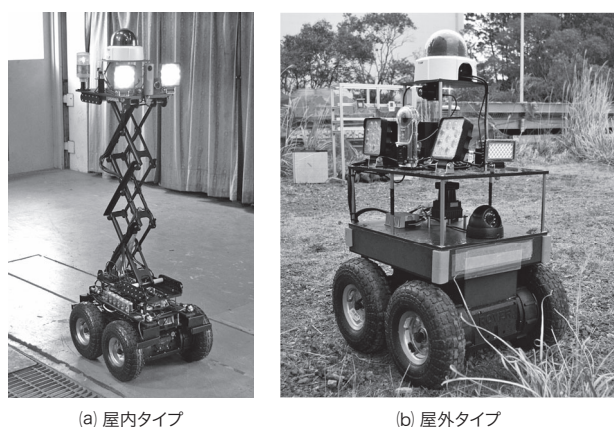


図2. 走行ロボット

屋内タイプは、人の目線の高さにある計器類を確認しやすくするため、昇降機構を搭載した。屋外タイプは、防じん・防滴仕様の構造とした。

Autonomous patrol robots for indoor and outdoor use

表1. 走行ロボットの諸元

Specifications of autonomous patrol robots

項 目	仕 様	
	屋内タイプ	屋外タイプ
寸法(幅×奥行き×高さ)(mm)	445×540×780～1,430	445×540×850
質量(kg)	30	30
センサー	パン・チルトカメラ、360°カメラ、サーモカメラ	
バッテリー駆動時間	約4時間	
その他	カメラ昇降機能	防じん・防滴対応

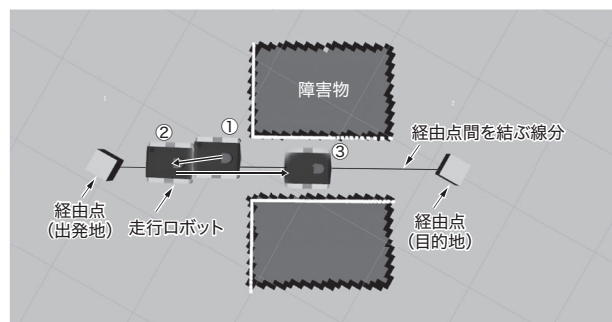


図3. 狭い通路を通過する際の制御

経由点間を結ぶ線分に沿うように走行する。①線分からそれて障害物を検知、②後退、③再度前進して通過する。

Control for traveling through narrow passage

単純な方法ではあるが、後退・再度前進の過程で計画ルートに近づいていくため、通路内で壁面に接触して停止することはほぼなくなり、問題(1)を解決できた。また、問題(2)に対応するため、前進と後退を所定回数繰り返しても通過できない場合は巡視ルート上に予期せぬ障害物があると判断して巡視動作を中断し、充電ステーションに自動帰還するようにした。

2.4 パン・チルトカメラによる点検対象の自動撮影

巡視ルートに設定した幾つかの経由点では、走行ロボットを一時停止させて点検対象を撮影する。しかし、床面の摩擦の影響でこの停止位置に精度良く位置決めできないため、点検対象が撮影画像に収まらない場合があることが判明した(図4)。

そこで、まず3次元位置を測定できるモーションキャプチャシステムを利用して、停止位置のばらつきを計測した。その結果、位置決めのずれは、最大で走行ロボットの中心位置が約200 mm、角度が約10°であった。しかし、自己位置推定処理による走行ロボットの推定位置のずれは、最大で位置が約150 mm、角度が約1.5°であった。点検対象がカメラの撮影画像に収まるかは、角度のずれの影響が大きいが、推定した角度のずれは位置決めの角度のずれと比較して小さかった。

そこで、推定した走行ロボットの停止位置と、事前に登録した点検対象の座標からカメラのパン・チルト角を算出して補正することで、走行ロボットの停止位置や角度にばら

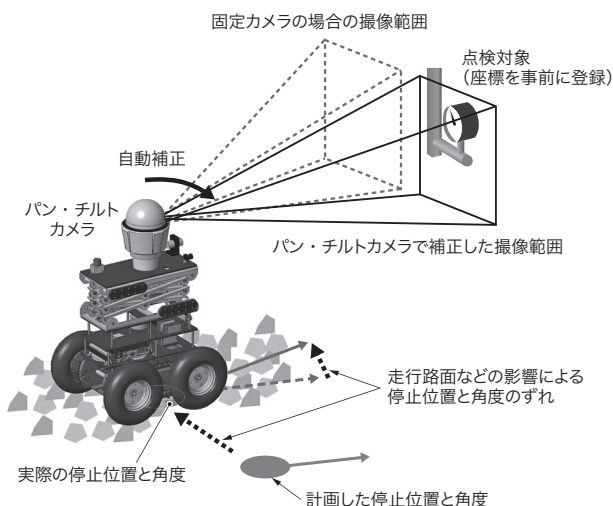


図4. パン・チルトカメラによる点検対象の自動撮影

走行ロボットの停止位置がばらつくても、パン・チルトカメラの撮影方向の補正により、点検対象を確実に撮影できる。

Automatic image capturing of inspection target using pan-tilt camera

つきがあっても、点検対象をカメラで正確に捉えられるようにした。

2.5 異常時の安全機能

発電所などの巡視において、走行ロボットに何らかの異常が生じたまま走行し、発電設備などに衝突することは、避けなければならない。そこで、自己位置推定ずれや、走行ロボットに搭載した各種センサーの測定値、通信状態などを監視し、異常がある場合はその場で停止して、異常停止中であることを担当者に通知するようにした。

ここで、自己位置推定ずれの判定方法について説明する。自己位置推定には、ROSのamclパッケージ⁽³⁾を用いた。これはパーティクルフィルターで実装されたもので、ロボット位置の確率分布をパーティクルの分布で表現し、地図と2Dレーザ距離センサーの測定値との合致度を表す尤度(ゆうど)に基づいて、その分布を逐次更新する。この尤度を監視することで、自己位置推定ずれを検知することとした。図5は、車輪を10 s間空転させて意図的に自己位置推定ずれを発生させた様子を示したものである。車輪の空転時間の経過とともに、地図と2Dレーザ距離センサーによる壁の位置が一致しくなくなり、尤度が低下するため、ずれ発生を判断できることが分かる。しきい値は、記録した正常時の尤度に基づいて設定した。

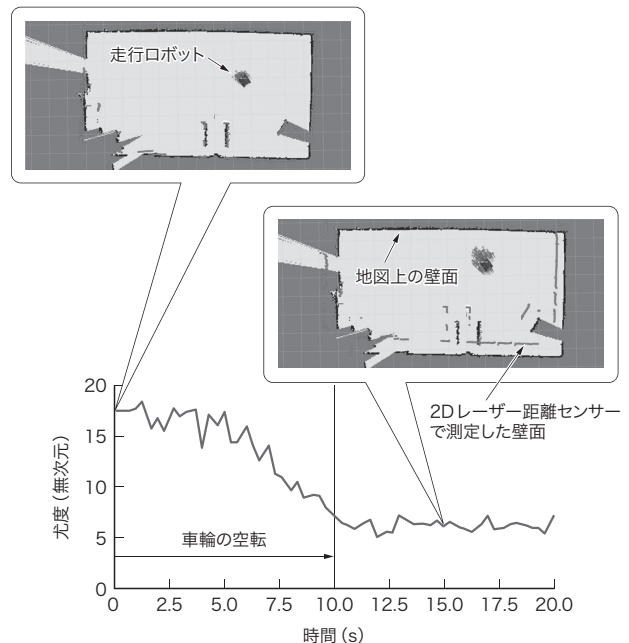


図5. 自己位置推定ずれの発生に伴う尤度の低下

車輪を空転させて自己位置推定ずれを発生させると、車輪の空転時間の経過とともに地図と2Dレーザ距離センサーの測定値が一致しくなくなり、尤度が低下することで自己位置推定ずれを検知できる。

Decrease in likelihood due to localization error occurrence

3. 自律巡視実験

3.1 屋内での自律巡視実験

実験室での自律巡視実験により、2章で示した自律巡視機能について、以下の項目を確認した。

- (1) パン・チルトカメラの撮影画像に、模擬点検対象が収まること
- (2) 狭い通路などの走行中に、周囲に接触しないこと
- (3) 大きな自己位置推定ずれが発生しないこと、発生時は自動停止できること

巡視ルートには、発電所などにある狭い通路と同等の650 mm幅の通路を設けた(図6)。また、実際の点検では設備や構造物で点検対象に近づけず、約4 m離れた位置から撮影する必要がある箇所もあるため、ここでは巡視ルートから4 m前後の距離に2個のメーターを、模擬点検対象1及び2として設置した。

充電ステーションから出発して帰還するまでの巡視動作に対し、周囲の明るさの変化が走行制御や撮影に与える影響を確認するため、様々な時間帯で巡視を計14回試行した。パン・チルトカメラで撮影した模擬点検対象1、2の画像の例を、図7に示す。ロボットの位置決めにはばらつきがあっても、2.4節で述べたパン・チルト角を自動調整する機能により、全ての試行で模擬点検対象を画像内に収めることができた。模擬点検対象2は、窓際に配置したため日中は逆光となるが、ロボットに搭載した照明により逆光の影響を軽減できることも確認した。また、全ての試行で狭い通路を含む

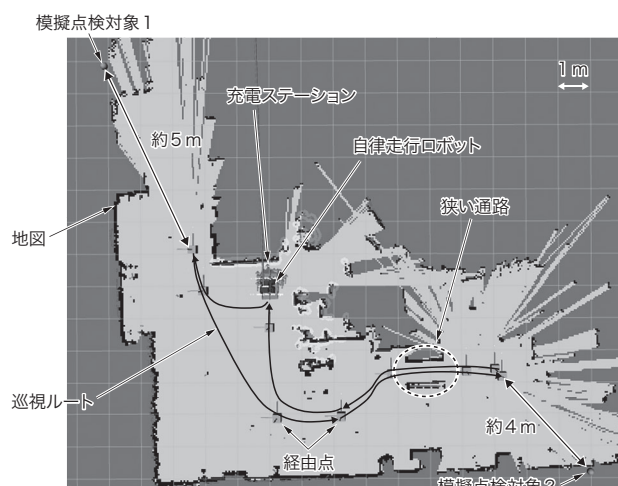


図6. 屋内での自律巡視実験の概要

事前に作成した地図上に、経由点と点検対象の位置を登録して、自律巡視実験を行った。充電ステーションから出発し、巡視ルートを移動して帰還するまでの巡視動作を、計14回試行した。

Overview of indoor autonomous patrol inspection experiments

周囲との接触や、自律巡視に影響を及ぼすような自己位置推定ずれも発生しなかった。

3.2 屋外での自律巡視実験

屋外での巡視は、砂利面の走行や、雨天時や夜間などの悪条件の中での運用が想定されるため、これらの条件における走行性や点検機能の課題を抽出することを目的として、自律巡視実験を実施した。ここでは晴天・雨天、日中・夜間の各組み合わせにおいて、舗装されていない路面の約5 m四方を数回ずつ周回させて、模擬点検対象を撮影した。

その結果、大きな自己位置推定ずれは発生することなく、屋内と同様にパン・チルト角の補正機能により撮影画像内に模擬点検対象が収められることを確認した。

図8の1、2、3にパン・チルトカメラで撮影した画像を示

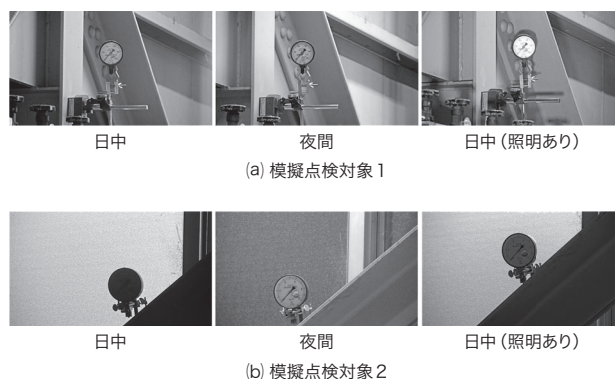


図7. 屋内で撮影された模擬点検対象の画像

14回の巡視のうち3回分を抜粋したもので、いずれもパン・チルト角の補正機能により、撮影画像内に模擬点検対象1及び2が収められることを確認した。

Images of simulated indoor inspection targets

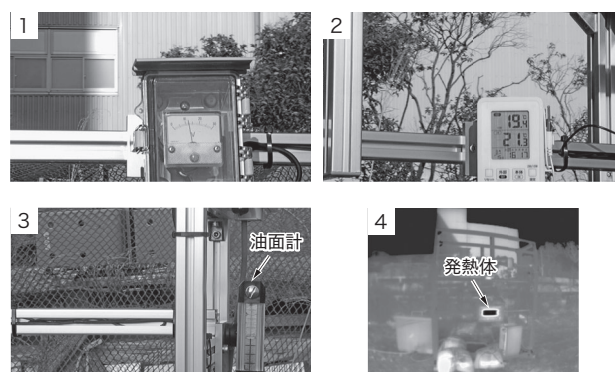


図8. 屋外で撮影された模擬点検対象の画像

1、2、3はパン・チルトカメラで撮影したアナログメーター、デジタルメーター、油面計で、4はサーモカメラで撮影した発熱体である。1～3はパン・チルト角の補正機能により、撮影画像内に模擬点検対象が収められることを確認した。

Images of simulated outdoor inspection targets

す。画像からアナログメーターの指針位置、デジタルメーターの数値、油面計の位置を確認することができた。また、夜間もロボットに搭載した照明により、点検対象を撮影できることを確認した。更に、図8の4はサーモカメラで撮影した画像であり、模擬発熱体の位置を確認することができる。

一方、図9に示すように、日中は計器カバーに太陽光の反射や映り込みが生じる場合や、雨天時はカメラのドームカバーに付着した水滴により、数値読み取りが困難なケースも確認された。前者はロボットが少し移動して別の位置から撮影することで、後者はカメラのドームカバーに親水性コーティングを施すことで、それぞれ解決できると考えられる。



(a) 日中



(b) 雨天時

図9. 数値読み取りが困難な画像例

日中には計器カバーに太陽光の反射や映り込みがあったり、雨天時にはカメラのドームカバーに水滴の付着があったりするなど、数値読み取りが困難な場合がある。

Examples of images with difficult-to-read numerical values

4. あとがき

発電所や変電所などでの点検作業の省力化に貢献できる、走行ロボットを開発した。屋内外での自律巡視実験により、地図上に設定した経路点を巡視して計器類を撮影し、管理・分析を行うエネルギーシステム向けIoTプラットフォームに撮影画像をアップロードできることを確認した。今後、実プラントへの適用を図っていく。

文 献

- (1) 渋谷真人, 辻 尚志. 持続可能なエネルギーシステムを実現するスマートO&M. 東芝レビュー. 2020, 75, 3, p.25-28. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2020/03/75_03pdf/a07.pdf>, (参照 2021-08-26).
- (2) 川端俊一, ほか. “巡視点検高度化を目指した移動プラットフォーム開発”. 日本保全学会 第17回学術講演会, オンライン, 2021-07, 日本保全学会. 2021, C-3-3-3.
- (3) ROS.org. "amcl". amcl - ROS Wiki. <<http://wiki.ros.org/amcl>>, (accessed 2021-08-26).



上田 紘司 UEDA Koji, D.Eng.

東芝エネルギーシステムズ(株)
エネルギーシステム技術開発センター 機械技術開発部
博士(工学) 日本ロボット学会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



笹川 憲二 SASAGAWA Kenji

東芝エネルギーシステムズ(株)
エネルギーシステム技術開発センター 機械技術開発部
日本ロボット学会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



藤田 崇 FUJITA Takashi

東芝エネルギーシステムズ(株)
パワーシステム事業部 水力プラント技術部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.