A Thesis for the Degree of Ph.D. in Engineering

Advanced Robotic Inspection Technology Based on Force Information Processing

July 2022

Graduate School of Science and Technology
Keio University

KUWAHARA, Hiroaki

別表５　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　（様式甲３）
⑶

主　論　文　要　旨　　No.1

報告番号	甲　第　号	氏　名	桒原　央明

主 論 文 題 名 :

Advanced Robotic Inspection Technology Based on Force Information Processing
(力情報処理に基づいた高度なロボット検査技術)

（内容の要旨）

老朽化する社会インフラ設備の急増は世界規模の問題であり，設備の維持・管理のためには，点検・補修などの予防保全技術の確立が喫緊の課題である．これまでに，人のアクセスが難しい検査対象に移動して定量的な検査をするための，ロボット点検技術が研究されている．従来のロボット点検技術は，目的・用途に応じて個別開発されてきたが，主な要求機能は，「検査位置へのアクセス機能」，「周辺環境への適応機能」，「点検機能」に集約される．これらの要求機能では，点検ロボット，移動環境および検査対象間の力情報が共通して関わっており，力情報の応用がロボット点検技術の高度化に有効であることを示唆している．そこで本研究では，ロボット点検技術の高度化へ向けた，力情報の抽出・適用指針の明確化と有効性の実証を目的とした．本研究は，各要求機能の観点に基づき，力情報を点検ロボットの 1. 状態推定と運動制御，2. 環境適応，3. 構造物診断に適用する 3 つのアプローチにより遂行した．

第 1 章では，本研究の背景と従来技術の問題点と課題，目的について説明した．

第 2 章では，本研究の基礎技術である，外乱オブザーバによるロバスト制御と，外乱オブザーバを応用した反作用力の推定方法について説明した．

第 3 章では，路面を移動する点検ロボットの，非線形で複雑な滑りを含む速度の推定方法として，駆動軸への外乱力と機械学習を用いた方法を提案した．移動時に滑りを伴うクローラ型機構を用いた，従来手法との比較実験により，提案手法の有効性を確認した．また，学習する路面環境と推定速度の関係について実験的に調査し，提案手法の適用に向けた機械学習の方針を明確にした．さらに，インフラ点検で想定される斜面走行において，点検ロボットの重力補償を併用することで速度推定性能を確保する方法を提案し，実験により有効性を示した．

第 4 章では，点検ロボットの運動エネルギを発生させる駆動力に基づく制御方法を提案した．まず，第 3 章で述べた方法による推定速度から駆動力を推定するオブザーバを設計し，駆動力制御に基づく運動制御系を提案した．提案手法をクローラ型機構に適用し，並進方向の滑り抑制効果を示した．次に，駆動力制御時に左右のクローラの駆動力の干渉が旋回を妨げることに言及し，この解決方法として，瞬間的な旋回中心に基づく駆動力分配方法を提案した．提案手法により，旋回方向への滑りが誘発され，旋回性能が向上することを実験により示した．さらに，点検ロボット含む一般的な移動ロボットの課題である非ホロノミック拘束下での移動性能確保のため，駆動力分配と移動ロボットの非ホロノミック拘束を含む横方向の外乱を補償する仮想旋回速度制御を併用し，旋回方向の滑りを適切に許容する運動制御を提案した．従来手法との比較実験により，提案手法の有効性を示した．最後に，受動性の観点から提案する制御系の安定化条件と設計指針について考察した．

第 5 章では，狭隘空間に適応しながら移動し，電源供給消失など非常時を含み狭隘空間内で姿勢を保持するための点検ロボットの機構として，力制御アクチュエータと受動機構を用いた押付力制御機構を提案した．また，提案する押付力制御機構のモデルベース制御方法およびオフラインで同定する外乱モデルに基づく外乱補償方法を提案した．タービン発電機の回転子・固定子間を点検するロボットに実装した押付力制御機構による評価により，提案手法の有効性を示した．

第 6 章では，力情報に基づく点検ロボットによる構造物内部診断の実現に向け，打撃力制御と反作用力推定を 1 つの機構で実現する打振検査デバイスを開発した．また，構造物内部状態を連成振動モデルで表現し，打振検査デバイスの入出力特性と構造物内部状態の関係を明確化した．さらに，打振検査デバイスの入出力特性から推定されるモデルパラメータに基づく診断方法を提案した．従来，人手による打音検査で実施されるタービン発電機の固定子楔緩み検査をモチーフにした提案手法による診断の妥当性を，シミュレーションと実験により示した．

第 7 章に，結論として各章で得られた内容をまとめ，本研究の成果を要約した．

別表６　　（様式甲 4）
（３）　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　*Keio University*

Thesis Abstract

No.

Registration Number	■ "KOU"　□ "OTSU" No. *Office use only	Name	KUWAHARA, Hiroaki

Thesis Title

Advanced Robotic Inspection Technology Based on Force Information Processing

Thesis Summary

The rapid increase in aging infrastructure facilities is a global problem, and the establishment of preventive maintenance technologies is an urgent issue. Robotic inspection technologies have been studied to inspect targets quantitatively that are inaccessible by humans. Conventional technologies have been developed individually for the application; however, required functions are summarized as access, environmental adaptation, and inspection functions. The functions commonly involve force information, suggesting that it is practical for the advancement of the technology. Therefore, the purpose of this study is to clarify the effectiveness of processing force information. This study takes three approaches to process force information for 1) state estimation and motion control, 2) environmental adaptation, and 3) structural diagnosis.

Chapter 1 describes the motivation, related works, and objectives of this dissertation.

Chapter 2 describes the basic technology of this study, namely, robust control using a disturbance observer and estimating the reaction force by applying the disturbance observer.

Chapter 3 proposes a novel velocity estimation method of mobile mechanisms moving on road surfaces, including complex slippage, using disturbance forces and machine learning. Then, a learning policy for the application of the proposed method is clarified through experimental studies.

Chapter 4 proposes motion control based on the driving force. First, the motion control using the estimated velocity described in Chapter 3 is designed. Next, it is mentioned that the interference of driving forces can disturb the turning. Thus, driving force distribution is proposed to solve this problem. Furthermore, the novel motion control that appropriately allows slippage by driving force distribution and virtual turning velocity control that compensates for lateral disturbance is proposed. Finally, the stabilization conditions and design guidelines are discussed.

In Chapter 5, pushing force control mechanisms using force-controlled actuators and passive mechanisms are proposed for the robot that moves while adapting to the environment. Then, model-based control with disturbance compensation based on an identified model is proposed. The validity is demonstrated with the mechanisms implemented on a turbine generator inspection robot.

Chapter 6 proposes a novel percussion device that can control the impact force and estimate the reaction force with a single mechanism for internal structures diagnosis. The relationship between the device's input/output characteristics and internal structure state expressed by a coupled vibration model is clarified. Furthermore, a diagnosis method is proposed using the model parameter estimation. The validity of the proposed diagnosis method is demonstrated by simulation and experiment, using stator wedge loosening diagnosis for the turbine generator as an example.

Chapter 7 concludes this dissertation by summarizing the contents obtained in each chapter.