

自律制御による姿勢安定航行型ダム点検ロボットと 損傷解析システム

Autonomous Posture Control Dam Inspection Robot and Damage Analysis System

九郎丸 俊一
Shunichi Kuromaru
海老名 明弘
Akihiro Ebina

中西 清史
Kiyoshi Nakanishi
江澤 弘造
Kozo Ezawa

久保 聖治
Seiji Kubo

要 旨

従来のダム点検においては、損傷の程度と位置を定量的に評価できないことが課題であった。そこで自律制御型の水中ロボットを用いて壁面を高精細に撮影し、画像から損傷を自動抽出する点検システムを開発した。このシステムでは、点検業務を省力化し、人手による点検よりも精度良く、定量的な情報をベースに診断することが可能になった。

Abstract

In conventional dam inspection, the inability to quantitatively assess the degree of damage and its location is a problem. Therefore, we have developed an inspection system that uses a dam inspection robot to capture an image of the dam wall in high definition, and automatically extracts the damage from the photographed image. This system could save labor in inspection work. In addition, robot inspection can provide more accurate and quantitative information for making a diagnosis than manual inspection.

1. はじめに

高度成長期に集中整備された社会インフラの老朽のリスクに加え、少子高齢化による労働人口の減少が社会課題となっており、今後、増大するインフラ点検需要に対して、省人化、自動化取り組みが急務と言われている。この状況を鑑みて、社会インフラ維持管理ロボット開発を国が促進し始めている[1]。

本稿では、社会インフラ維持管理の省人化に向けた取り組みとして、自律制御による姿勢安定航行型ダム点検ロボットと損傷解析システムによる、従来のダム点検の課題を解決するための技術を報告する。

2. ダム点検ロボットシステムへの要件

建設後50年以上経過する国内ダムの割合が、半数以上と増加するなか、点検結果に基づき、予防保全を反映した長寿命化計画の策定が求められている。このような状況のなか、2014年に公募された国交省の国家プロジェクト「次世代社会インフラ用ロボット技術・ロボットシステム」[1]に応募、採択され、水中ロボットの開発をスタートさせた。現場検証への取り組みや識者へのヒアリングをとおして、現行のダム点検の問題点を、以下のとおり具体化させた。

- ①人手による潜水作業：ダイバーによる水深40 mを超える点検は、危険作業であり、作業効率低下が発生する。
- ②視界が悪い：ダムの水は、濁りがあり不透明で視認性

が低い。また、水中では照明が必要となるが、現行の照明は、中心は明るい、周辺は暗いというスポット照射で映像品質が低い。

- ③映像が不安定：ダイバーによる水中での点検映像の撮影では、映像のふらつきは不可避で、長時間の映像確認をすると、画像酔いが発生するというケースがある。

- ④位置の推定精度が悪い：前回点検した場所と同じ場所に戻れないケースがある。

- ⑤定量性に乏しい劣化管理：現行点検データは定量性に乏しく、健全性の判断が、評価者の主観に依存する。

- ⑥ピンポイント点検：現行のダイバーによるピンポイント点検では、俯瞰（ふかん）解析や経年変化管理など、インフラの健全性評価において、重要な位置付けの解析・評価ができていない。

これらダム点検の問題点を解消するために、ロボット

第1表 システム要件

Table 1 System requirements

ダム点検の問題点	ロボット要件	システム課題
①	水中での作業実施	水深200 mでの防水/耐水圧
		遠隔操作のための通信品質
②, ③	視認性の高い均質かつ安定映像取得	点検映像の視認向上のための鮮明化
		輝度ムラ無し撮影のための均一照明 対象に正対した安定撮影のためのロボット姿勢制御
④~⑥	定量的な損傷解析	損傷抽出と損傷サイズ測定
		自己位置推定による損傷位置の特定

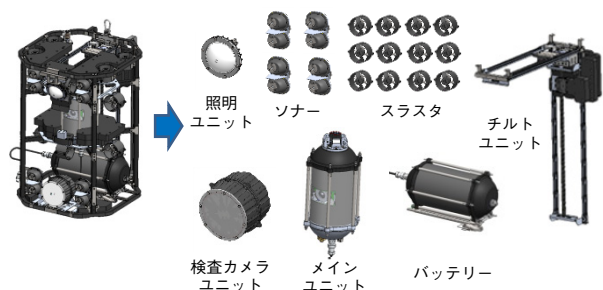
に要求される要件，それを実現するためのシステム課題を第1表に示す。本稿では，3章で従来点検におけるダイバーの代わりに，水深200 mクラス級の大規模ダムでも作業可能なダム点検ロボットのシステム概要を説明し，4章で従来のダイバー点検に比べて，点検品質を向上させるための自律姿勢制御技術と，5章で劣化状態を定量的に解析するための損傷解析システムについて述べる。

3. ダム点検ロボットシステム概要

本章では，前述の要件を実現するために開発したダム点検ロボットシステムの概要について述べる。

3.1 ダム点検ロボット

第1図にダム点検ロボットの本体構成とシステム系統図を示す。各ユニットは水深200 m耐圧の防水ケースで格納されている。照明ユニットと検査カメラユニットは，撮影画角に合わせて本体に設置されている。姿勢制御はセンサと前面の超音波を使ったソナーの情報に基づき，スラスタ（推進器）とチルトユニットで行う。12基のスラスタは垂直・前後・左右の3軸方向の推進用にそれぞれ4基ずつ搭載する。ロボットの操縦は，HD-PLC（High



第1図 ダム点検ロボットの本体構成とシステム系統図

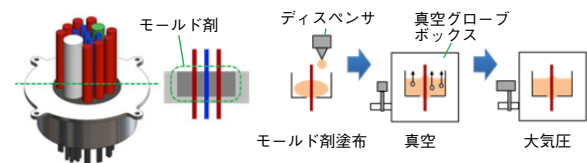
Fig. 1 Main components & system block diagram

UART : Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
GPIO : General-Purpose Input/Output
MCU : Memory Control Unit
PCB : Process Control Block
PWM : Pulse Width Modulation

Definition Power Line Communication) (注1) [2]で接続された制御PCを使って，操縦用カメラのモニタ映像を確認しながら行う。検査用カメラには4Kカメラならびに測距用レファレンスレーザを搭載し，操縦用カメラには広角ネットワークカメラを搭載した。

3.2 防水工法

水深200 m (2 MPa) 耐圧の防水工法を開発した。そのなかの1つのメインユニットのハーネス取り付け部におけるバルクキャップ (第2図) について述べる。この取り付け部には各ユニット，センサ，スラスタとバッテリーから合計16本のワイヤーハーネスが集結する。本開発では汎用の深海用防水コネクタは使用せず，直接まとめて取り付けするバルクキャップ工法を選択し，モールド剤の注入工程には高価な真空注入装置を使用せず，ディスペンサで直接塗布した後，真空グローブボックスで脱泡する方式を採用した。さらに細部まで充填するため，粘度・流れ込み性・吸水性・硬化時間に関して最適なモールド剤として，エポキシ接着剤を選定することで水深500 m相当の5 MPa耐圧を確保し，水深200 mに対して十分なマージンを取ることができた。



第2図 バルクキャップとモールド剤充填工法

Fig. 2 Bulk cap & implantation process of mold adhesive

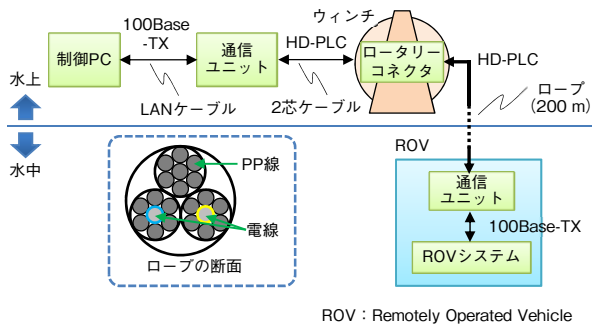
3.3 有線通信システム

ロボットの操縦と映像ストリーミングを行うための通信システムを開発した。第3図に示すように，制御PCと水中ロボットは通信ユニットを介して100Base-TXでポイントツーポイント接続される。通信ユニット間の下位層プロトコルとしては，1対のペアケーブルで通信可能なHD-PLC[3]を採用した。

ロープは200 mと長尺なためノイズの影響を受けやすく，またウィンチに巻かれた状態と伸ばした状態で通信特性が大きく変動する。この課題を解決すべく，ロープへの通信用電線の編み込み方法を開発した。具体的には，電線 (AWG24) を芯線にして多数のポリプロピレン線 (PP線) を撚 (よ) った1本のロープを作り，同じものを3本撚って1本のケーブルとなる構造とした (第3図)。ロー

(注1) 当社の登録商標または商標。

ブに電線を編み込むことで、適度なツイスト状態を維持することができる。これにより耐ノイズ性に優れ、伸ばした状態でも巻いた状態でも、電線間の間隔は変化することがなくケーブルの状態によって電気特性が大きく変化することがない。またこのロープは、ロボットが操作不能になった際、約40 kg本体を引き上げるに十分な引っ張り強度7000 Nを確保している。



第3図 通信システム概要
Fig. 3 Overview of communication system

4. 自律姿勢制御技術

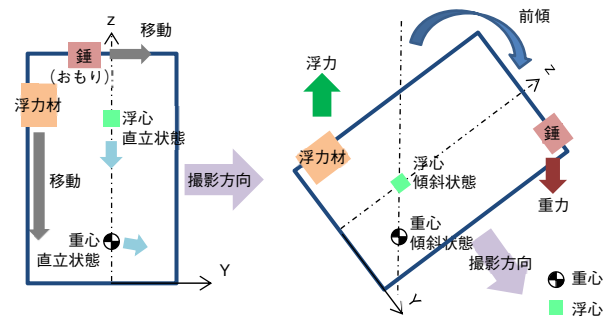
本章では、カメラを搭載しているロボットが点検対象に正対して、安定した映像を撮影するための自律姿勢制御技術について述べる。

4.1 傾斜機構

ダム壁面の最大傾斜（アースロックダムなど）は、約60°である。水中ロボットは、歪（ひず）みのない高精細な画像撮影のため、ダム壁面に正対させる必要がある。そのため錘（おもり）と浮力材を用いた傾斜機構を開発した。

本傾斜機構では、傾斜動作のためにスラストの推力を用いることなく、また極力省スペースで構成することを目標とした。これにより、消費電力の増大、本体サイズの拡大を抑制できる。これを実現させる構成として、重力・浮力バランスを変化させ効率的に本体を傾斜させるべく、重力と浮力が両極端である錘と浮力材を用いた。さらに両者の距離差を極力拡大させることを可能とするために本体上部における錘の前後移動、および背面部における浮力材を上下移動させる構成とした。

この動きにより、重心は本体前後方向に、浮力の働く中心である浮心は上下方向に移動する。この機構により、水中ロボットの60°傾斜を実現した。概要を第4図に示す。



第4図 傾斜機構
Fig. 4 Tilt mechanism

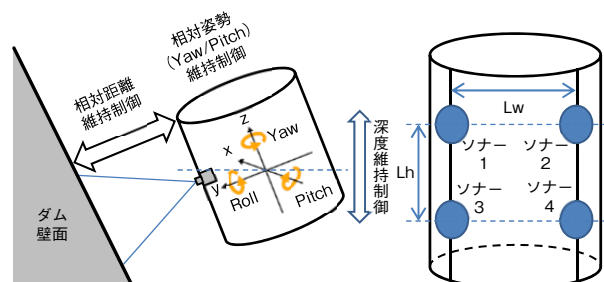
4.2 自律姿勢制御

高精細な安定映像を取得するためには、ロボットが深度とダム壁面との距離を一定に保ちながら、ダム壁面の傾斜に正対して一定速度で横方向に移動する必要がある。しかし、操作する者の習熟度が低いと、安定した姿勢の確保が困難になるため、運転操作をアシストする自律制御技術を開発した。以下に、第5図に対応した、各制御項目の内容を示す。

1. 深度制御は、ロボットの深度を一定に維持
2. 壁面相対距離制御は、ダム壁面とロボットとの距離を一定に維持
3. 壁面相対姿勢制御（Pitch/Yaw）は、傾斜する壁面に対して正対姿勢を維持
4. 絶対姿勢制御（Roll）は、Roll軸姿勢を0度に維持

自律制御の各機能では、深度センサ、ソナー、6軸センサなどのセンシング情報を基に、傾斜機構により壁面との相対姿勢（Pitch）を制御し、第5図における左右（x軸）、前後（y軸）、上下（z軸）それぞれの方向ごとに各4個ずつ搭載したスラスト駆動により深度や壁面との相対距離および相対姿勢（Yaw）、絶対姿勢（Roll）を制御する。

まず、深度目標値を D_t 、深度センサ値 D_c とするととき、深度制御量 ΔD は（1）式で算出できる。



第5図 自律制御概要
Fig. 5 Outline of autonomous control

$$\Delta D = D_t - D_c \dots\dots\dots (1)$$

深度制御は、 ΔD が0になるように上下（z軸）方向のスラストを駆動し深度を維持する。次に、相対距離目標値をR、ソナー1、2、3、4と壁面との距離を r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 とするとき、相対距離制御量 ΔR は（2）式で算出できる。

$$\Delta R = R - \frac{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}{4} \dots\dots\dots (2)$$

壁面相対距離制御は、 ΔR が0になるように前後（y軸）方向のスラストを駆動し相対距離を維持する。

次に、相対姿勢制御量のYaw成分 $\Delta\beta$ とPitch成分 $\Delta\gamma$ は、第5図の L_h 、 L_w を用いて、（3）、（4）式で算出できる。

$$\Delta\beta = \frac{\left(\arctan\left(\frac{r_2 - r_1}{L_w}\right) + \arctan\left(\frac{r_4 - r_3}{L_w}\right)\right)}{2} \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta\gamma = \frac{\left(\arctan\left(\frac{r_1 - r_3}{L_h}\right) + \arctan\left(\frac{r_2 - r_4}{L_h}\right)\right)}{2} \dots\dots\dots (4)$$

壁面相対姿勢制御（Yaw）は $\Delta\beta=0$ となるように前後（y軸）方向のスラストを駆動することでYaw軸を回転させ、相対姿勢を維持する。また、壁面相対姿勢制御（Pitch）は $\Delta\gamma=0$ となるように傾斜機構を駆動し相対姿勢を維持する。

次に、Roll目標値を0度、6軸センサRoll値を α とするとき、Roll制御量 $\Delta\alpha$ は、次のように算出できる。

$$\Delta\alpha = -\alpha \dots\dots\dots (5)$$

絶対姿勢制御（Roll）は、 $\Delta\alpha$ が0になるように、上下（z軸）方向のスラストを駆動することでRoll軸を回転させ、姿勢を維持する。

上記 ΔD 、 ΔR 、 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$ をそれぞれに制御することで、傾斜しているダム壁面に正対した安定姿勢で撮影し、高精細な画像を収集することができる。

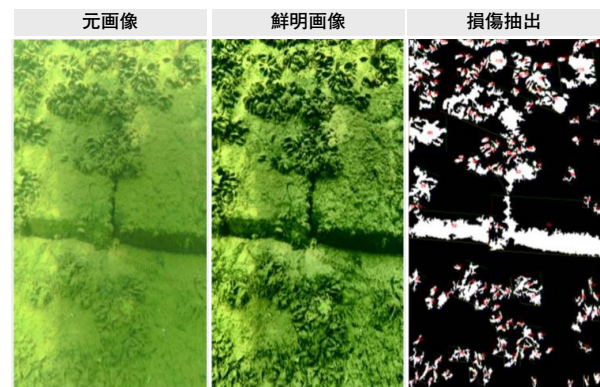
5. 損傷解析システム

本システムでは、ダム点検ロボットで撮影された画像に対して、画像鮮明化技術[3]による視認性の向上、そして、損傷を抽出、損傷状況をマップ化し、損傷の計測および、経年比較するための処理を行う。

5.1 キズ抽出処理

水中での撮影映像に対して、画面の各部で輝度分布を解析し、各部で異なる濃度変換（局所コントラスト補正）を行うことで、画像の鮮明化[3]を行い、さらに鮮明化を行った画像に対して、2値化処理を施し、特異点を損傷と

して抽出している（第6図）。さらに、本損傷解析システムでは、抽出された損傷対象のサイズを自動測定している。まず、検査用カメラの撮影画角内に、4本の平行レーザを照射しており、カメラと撮影面との距離が1 mの際のレーザ照射点と画角内の撮影面での位置関係、ならびに、カメラの画素間距離を基準解像度として規定している。この基準数値からの比例換算により、レーザ照射位置から、ロボット（カメラ）と壁面（撮影面）との距離を算出し、さらに、撮影画素間の距離を求めることで、損傷対象のサイズ計測を実現している。



第6図 キズ抽出結果

Fig. 6 Original image, corrected image, damage extraction

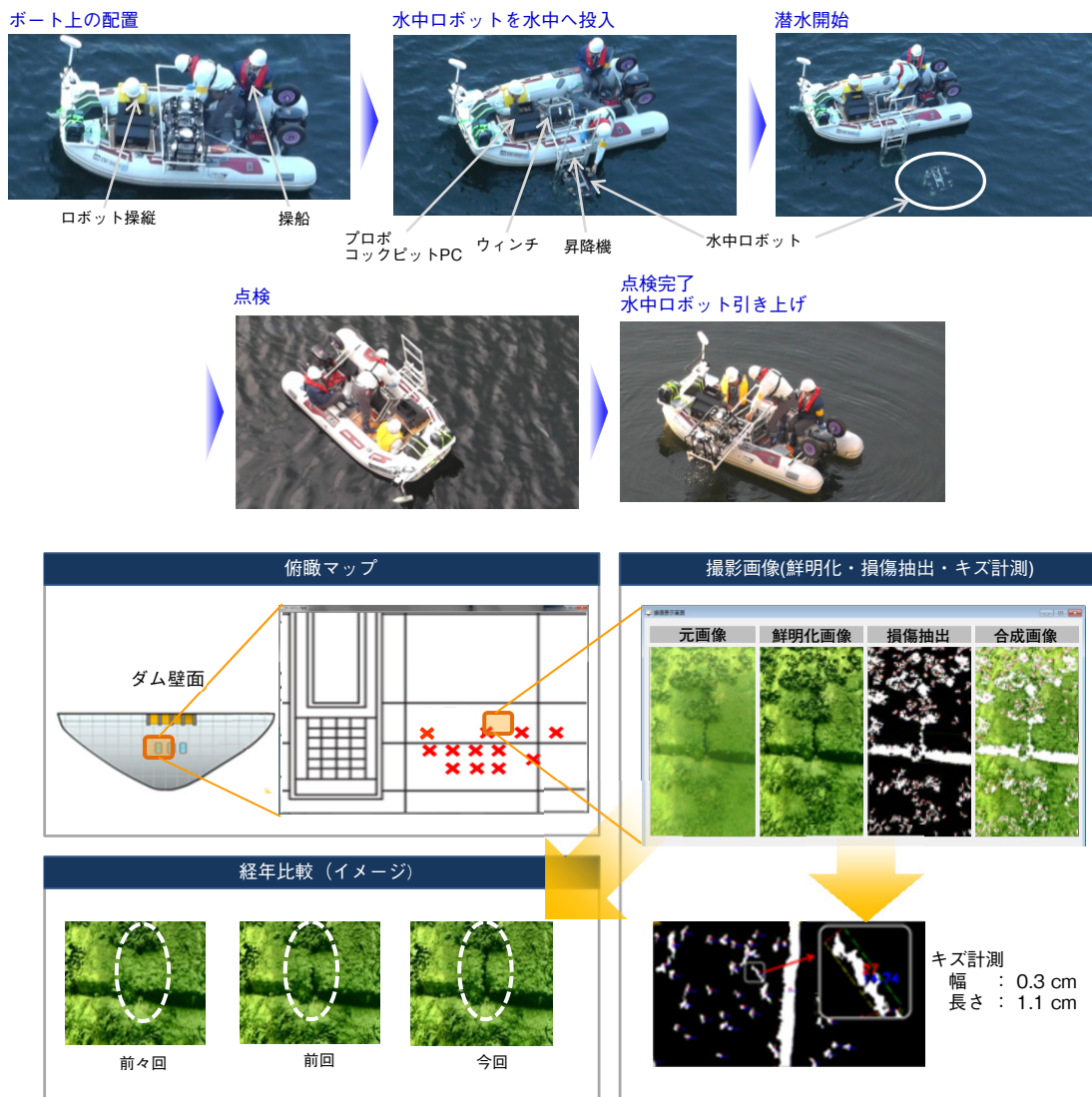
5.2 自己位置推定

損傷箇所の位置把握は、現行ダム点検の課題であり、補修のため、ダイバーが発生場所にたどりつくために、誤差は2 m以内が求められている。水中ではGPSが使用できず、超音波装置を利用した三角測法を用いる方法はあるが、コストアップにつながるため使用できない。そこで、ロボットに搭載している6軸の慣性センサで水平成分、深度センサで垂直線分を算出し、さらに精度を確保するために、自律制御により安定して取得できた検査カメラの連続画像の特徴点の差分情報から移動量を算出する。

本自己位置推定処理により画像の撮影場所を推定し、損傷位置を定量的に把握でき、さらに、マップ化した情報をデータベースに蓄積することで損傷の経年変化を確認できる。

6. 実証実験

国交省の実証実験において、ダム点検ロボットによる点検データの取得、ならびに、点検データに対する定量的な解析を実証した。第7図に、実証実験の様子と解析結果例を示している。解析結果は、元画像、鮮明化画像、損傷抽出画像という一連の画像とキズのサイズの自動計



第7図 実証実験結果
Fig. 7 Field test result

測結果を例示しており、これらの結果を国交省へ提出した結果、水深80 m以上での潜行作業性を初めとして、クラックなどの幅、長さの計測、点検対象位置の把握、劣化状況の網羅的な確認、点検データの履歴管理による経年変化比較の可能性、など、総合的な性能が国交省にて評価され、2016年3月に試行導入メーカーに選定[4]、2016年10月に商用化を実現した。

7. まとめ

現行ダム点検の問題点を解消するために、安定した映像を撮影するための自律姿勢制御技術を搭載し、水深200 mクラス級の大規模ダムでも作業可能なダム点検ロボットと劣化状態を定量的に解析するための損傷解析システムを実現し、実際のダムにおける実証実験において、

その性能を確認した。

今後、上記技術をダム点検のお客様に提供するとともに、港湾、河川など、ダム点検以外の用途への展開可能性を探っていく。

参考文献

- [1] 国土交通省, “次世代社会インフラ用ロボット技術・ロボットシステム (公募),” “https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_fr_000023.html”, 参照 Apr. 20, 2018.
- [2] 井形祐司 他, “オートモーティブ分野におけるPLC (Power Line Communication) 技術の応用展開,” パナソニック技報, vol.57, no.3, pp.56-58, 2011.
- [3] 古田 暁広, “画像鮮明化技術と捜査支援ソリューションへの応用”, 画像電子学会誌, vol.44, no.3, pp.544-550, 2015.
- [4] 国土交通省, “次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の推進 水中維持管理技術の現場検証・評価の結果,”

“<http://www.mlit.go.jp/common/001125345.pdf>”, pp.29-30, 参照 Apr. 20, 2018.

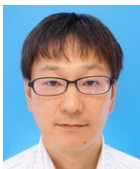
執筆者紹介



九郎丸 俊一 Shunichi Kuromaru
コネクテッドソリューションズ社
イノベーションセンター
Innovation Center, Connected Solutions Company



中西 清史 Kiyoshi Nakanishi
コネクテッドソリューションズ社
イノベーションセンター
Innovation Center, Connected Solutions Company



久保 聖治 Seiji Kubo
コネクテッドソリューションズ社
イノベーションセンター
Innovation Center, Connected Solutions Company



海老名 明弘 Akihiro Ebina
コネクテッドソリューションズ社
イノベーションセンター
Innovation Center, Connected Solutions Company



江澤 弘造 Kozo Ezawa
コネクテッドソリューションズ社
イノベーションセンター
Innovation Center, Connected Solutions Company