

# 画像鮮明化技術を用いた ダム維持管理ロボットシステム

中西清史・丸俊一

従来のダム点検においては、大深度潜水など高度な潜水技術が必要なうえ、潜水士による目視確認のため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る。そこで自律制御型的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よく、定量的な情報をベースに診断することを実現した。  
キーワード：ロボット、ダム、ダム点検ロボットシステム、自律姿勢制御

## 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<sup>1)</sup>。

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り、従来のダム点検の課題解決事例を紹介する。

## 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中、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。このような状況の中、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」<sup>1)</sup>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通して、現行のダム点検の問題点を、以下の通り具体化させた。

- ① 人手による潜水作業：ダイバーによる水深40m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、映像のフラツキは不可避で、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表-1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200m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

表-1 システム要件

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200m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

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。

#### (1) ダム点検ロボット

図-1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200m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、スラスト（推進器）とチルトユニットで行う。12基のスラストは垂直・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 Definition Power Line Communication)<sup>2)</sup>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カメラ並びに測距用レファレンスレーザーを搭載し、操縦用カメラには広角ネットワークカメラを搭載した。

#### (2) 防水工法

水深200m(2MPa)耐圧の防水工法を開発した。その中の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(図-2)について述べる。



図-2 バルクキャップとモールド剤充填工法

この取り付け部には各ユニット、センサ、スラスト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500m相当の5MPa耐圧を確保し、水深200mに対して十分なマージンを取ることが出来た。

#### (3) 照明機構

画像中の検査可能領域の最大化および誤検出のない損傷抽出のために均一の照度を持つ照明を開発した。ターゲットの撮影範囲は1mの距離で1.6m×1.1m、一番遠い端との距離は1.4m、角度は45度となる。照度と画像品質(解像度とコントラスト)から最小照度を200lx、中心照度を300lxとした。均斉度は60%とした(図-3)。

照明は外側から水深200m耐圧のためのカバー、レンズアレイ、光を分配する導光板、反射板、LED(Light Emitting Diode)が環状に配置されたLED基板、電源基板の順でアルミ製の筐体に配置される。LEDの光は導光板内を全反射しながら進み、レンズに対応する導光板上のドットにあたり表面の臨界角を超えると外側に放射され、レンズでターゲットに集光される。

### 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。

#### (1) 傾斜(チルト)機構

ダム壁面の最大傾斜(アースロックダム等)は、約60°である。水中ロボットは、歪みのない高精細な画

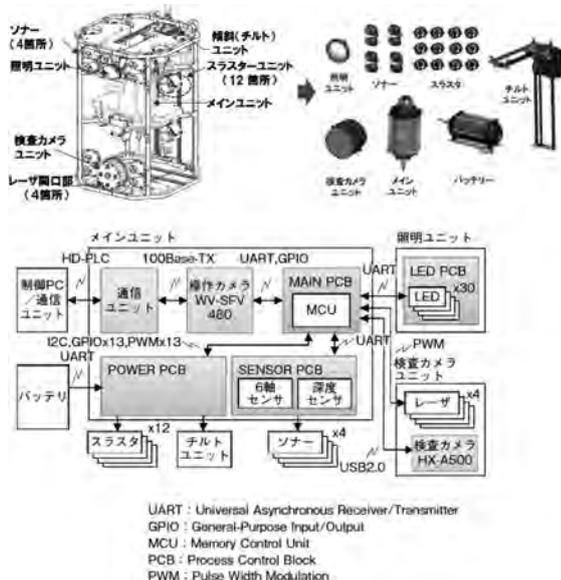


図-1 ダム点検ロボットの本体構成とシステム系統図

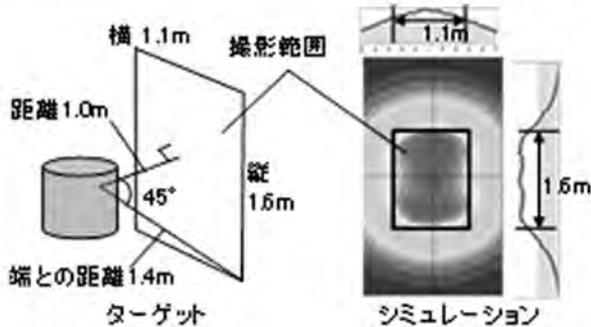


図-3 照明機構

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面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。概要を図-4に示す。

(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

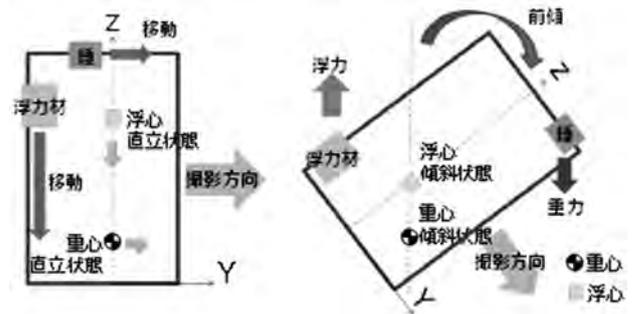


図-4 傾斜機構

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、図-5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軸センサ等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、なお、図-5における左右 (x軸)、前後 (y軸)、上下 (z軸) それぞれの方向毎に各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及び相対姿勢 (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  $D_c$  とする時、深度制御量  $\Delta D$  は (1) 式で算出できる。

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

深度制御は、 $\Delta D$  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  $r_1, r_2, r_3, r_4$  とする時、相対距離制御量  $\Delta R$  は (2)

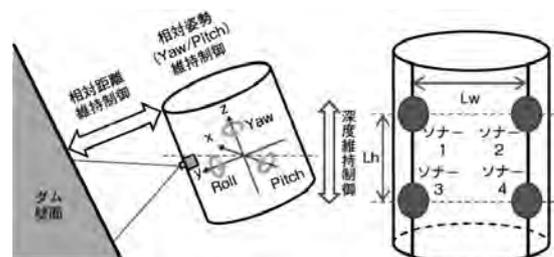


図-5 自律制御概要

式で算出できる。

$$\Delta R = R - \frac{r1 + r2 + r3 + r4}{4} \quad \dots\dots(2)$$

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

次に、相對姿勢制御量の Yaw 成分  $\Delta\beta$  と Pitch 成分  $\Delta\gamma$  は、図-5 の  $L_h$ ,  $L_w$  を用いて、(3), (4) 式で算出できる。

$$\Delta\beta = \frac{\left( \arctan\left(\frac{r2-r1}{L_w}\right) + \arctan\left(\frac{r4-r3}{L_w}\right) \right)}{2} \quad \dots\dots(3)$$

$$\Delta\gamma = \frac{\left( \arctan\left(\frac{r1-r3}{L_h}\right) + \arctan\left(\frac{r2-r4}{L_h}\right) \right)}{2} \quad \dots\dots(4)$$

壁面相對姿勢制御 (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、相對姿勢を維持する。また、壁面相對姿勢制御 (Pitch) は  $\Delta\gamma = 0$  となるように傾斜機構を駆動し相對姿勢を維持する。

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

$$\Delta a = -a \quad \dots\dots(5)$$

絶対姿勢制御 (Roll) は、 $\Delta a$  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  $\Delta D$ ,  $\Delta R$ ,  $\Delta a$ ,  $\Delta\beta$ ,  $\Delta\gamma$  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<sup>3)</sup>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、損傷の計測及び、経年比較するための処理を行う。

### (1) キズ抽出処理

水中は、浮遊物と濁りが有り、損傷の検出が困難なため、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<sup>3)</sup>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 (図-6)。さらに、本損傷解析システムでは、抽出された損傷対象

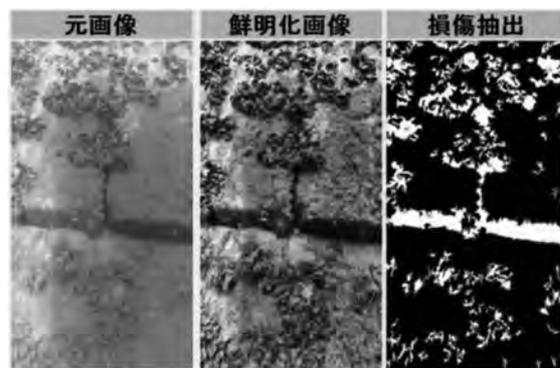


図-6 キズ抽出結果

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 本の平行レーザーを照射しており、カメラと撮影面との距離が 1 m の際のレーザー照射点と画角内の撮影面での位置関係、並びに、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、レーザー照射位置から、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。

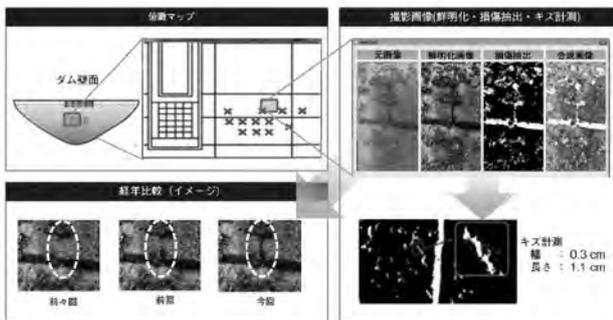
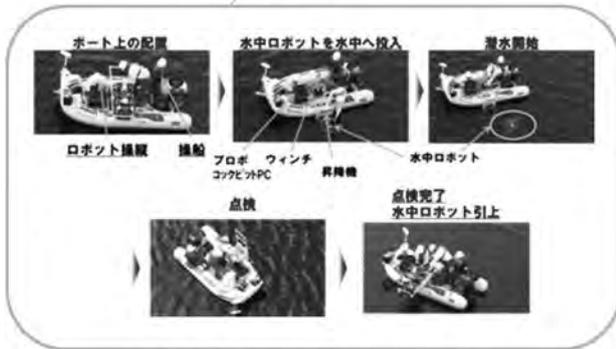
### (2) 自己位置推定

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、並びに、点検データに対する定量的な解析を実証した。図-7 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



図一七 実証実験結果

性をはじめとして、クラック等の幅、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<sup>4)</sup>、2016年10月に商用化を実現した。

## 7. おわりに

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200mクラス級の大規模ダムの中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共に、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。

JCMA

### 《参考文献》

- 1) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, “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](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_fr_000023.html)”, Nov.30, 2017
- 2) 井形 祐司, “オートモ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, Oct. 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年7月
- 4) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, “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, Nov.30, 2017

### 【筆者紹介】



中西 清史 (なかにし きよし)  
 パナソニック(株)  
 コネクティッドソリューションズ社  
 イノベーションセンター 技術総括  
 メカトロソリューション開発部  
 要素技術担当総括



九郎丸 俊一 (くろうまる しゅんいち)  
 パナソニック(株)  
 コネクティッドソリューションズ社  
 イノベーションセンター 技術総括  
 メカトロソリューション開発部  
 部長