

# 栈橋上部工点検用ロボットと診断支援システムの開発

田中 敏成

栈橋上部工下面の目視点検作業は、船外機船等に乗った作業員や潜水士により実施されている。しかしながら、波浪や潮汐の影響を受けた場合、狭隘な栈橋下では作業の安全性の確保は容易ではない。また、供用中の栈橋施設においては効率的な点検作業の実施が求められている。

そこで当所では、当該作業の安全性や効率向上を目的とし、陸上からの遠隔操作で栈橋上部工下面を撮影し、その劣化度判定に資する画像データを収集する ROV (Remotely Operated Vehicle) 型の栈橋上部工点検用ロボット (栈橋上部工点検用 ROV) を開発するとともに、収集した膨大な写真を扱う内業を支援する点検診断支援システムを開発した。本稿では、栈橋上部工点検用 ROV と点検診断支援システムについて紹介する。

キーワード：栈橋上部工、目視点検、ROV、点検診断支援システム、劣化度判定

## 1. はじめに

定期的実施される栈橋の一般定期点検においては、その上部工下面の目視点検作業は船外機船等に乗った作業員により行われている。また、海面とのクリアランスが少なく栈橋下へ船外機船等による進入が困難な施設では、潜水士により点検作業が実施されている。しかしながら、作業中に受ける波浪や潮汐の影響を想定すれば、このような狭隘な空間における作業の安全性の確保は容易ではない。また、供用中の栈橋施設においては、極めて制限された作業時間や期間内での効率的な点検作業の実施が求められている。

筆者が所属する研究開発グループでは、このような点検作業の安全性や効率の向上を目的として、陸上からの遠隔操作によって栈橋上部工下面の変状を撮影し、その劣化度判定に資する画像データを水上無人で収集する ROV (Remotely Operated Vehicle) 型の栈橋上部工点検用ロボット (栈橋上部工点検用 ROV) を 2014 年から開発してきた。2017 年からは ROV の実証試験を実施し、このような特殊な作業環境下においてその確実な操作と運用を実現するために種々の作業支援機能を開発し導入した。代表的な支援機能として、GNSS (Global Navigation Satellite System) を用いない栈橋下における測位機能や写真の撮影位置の管理機能、障害物の衝突回避機能、撮影漏れを防止するための撮影履歴提示機能である。また、現場作業へ

の当該 ROV の導入によって膨大な点検写真が容易に得られることとなるため、それらを用いた点検診断から点検帳票を完成させるまでの内業を支援する点検診断支援システムを併せて開発した。

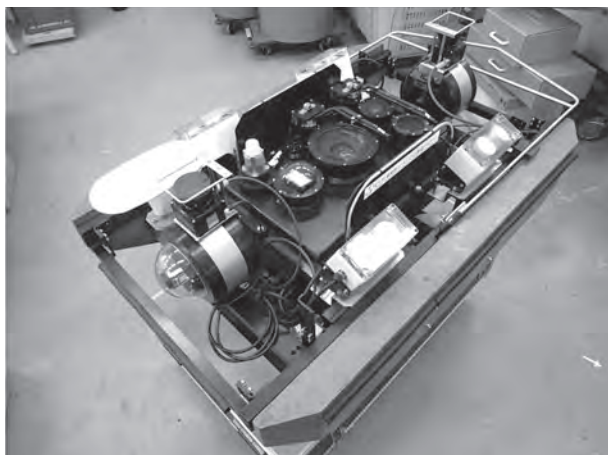
本稿では、栈橋上部工点検用 ROV と点検診断支援システムについて紹介する。

## 2. 栈橋上部工点検用 ROV

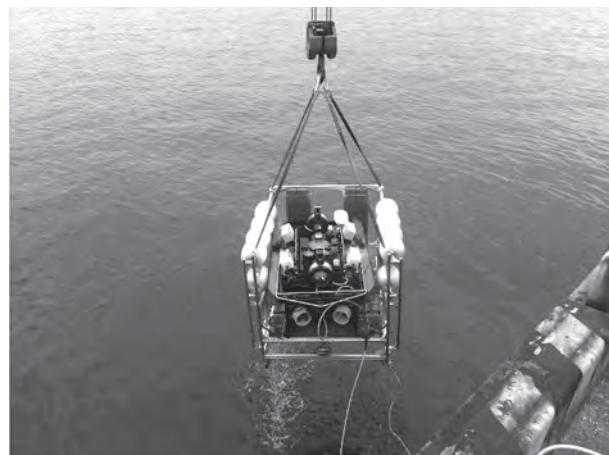
栈橋上部工点検用 ROV は側面に浮体を装備して半没水型 ROV とし、浮心と重心間の距離を大きくとって波浪等に起因する動揺等の外乱に対する耐性を有している (写真—1)。また、6 基のスラスタ (水平 4 基、垂直 2 基) と 3 台の操縦用カメラ (水中前 1 台、気中前後 2 台) を装備して水平移動の自由度と広い視野を備えている。寸法は、突起部と吊具を除いて全長 1200 mm × 全幅 800 mm × 全高 712 mm (最低高設定時)、質量は約 100 kg である。なお、全高と質量は設定と装備により増減する。

構造物を撮影するカメラは、プレビューと画像処理用の GigE カメラ 1 台と点検画像記録用のデジタル一眼レフカメラ 1 台をそれぞれ上向き設置で搭載している。なお、これら上向きのカメラ前面には水滴や汚れを払拭する清掃機能 (ウォッシャーおよびワイパー) を装備している (写真—2)。

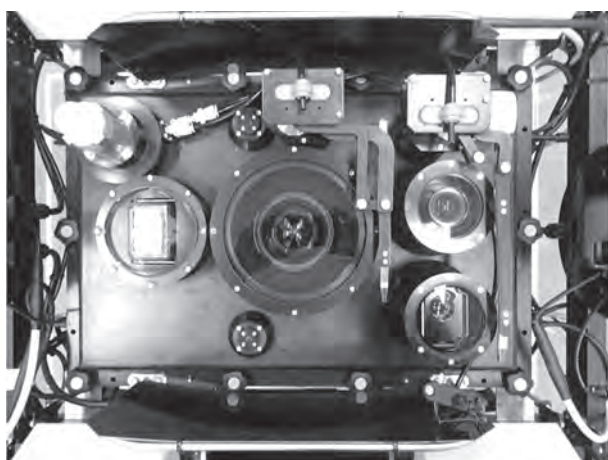
これらのほか、自機の周辺の構造物や障害物等の状



写真一 1 棧橋上部工点検用 ROV (台車上)



写真一 3 ケージを利用した ROV の揚収作業



写真一 2 清掃機能を装備した構造物撮影用カメラ部



写真一 4 陸上からの ROV の操作状況

況を逐次把握するために2基のLRF (Laser Range Finder) や、自機の方位推定の補助のために方位ジャイロ、構造物までの距離を逐次計測する距離計を装備している。これらを利用した支援機能については次章で詳述する<sup>1)</sup>。

なお運用時は、ユニック等での海上投入と揚収が必要となるが、専用ケージに入れたまま海上に投入すればランチャー形式で進水できるため、海上での玉外し作業は不要である。また、揚収時においてもケージに帰還させて吊り上げることで、玉掛け作業も不要である(写真一3)。投入されたROVは、陸上から遠隔操作により運用される(写真一4)。

### 3. ROV の支援機能

#### (1) LRF 測位機能

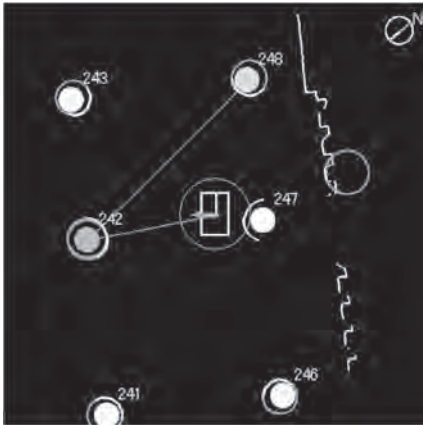
棧橋下ではGNSSを利用できないことから、これに依らない測位技術を開発し実装した。ここでは前出のLRFと方位ジャイロを利用した棧橋下における測位技術について説明する<sup>2)</sup>。

LRFは水平面上270°の走査断面を得ることが可能であり、これを前後に2基設置していることから、前後2方向の走査結果を合成してROV周囲の全周走査画像を作成する。この画像の中から画像処理で杭の形状的特徴を持った杭と思しき物体を検出する。次に、これらの検出杭の位置と地図データベース(杭の配置図)を照合する。照合に成功した杭の位置は既知となることからランドマーク化し、これらの照合杭の位置から見た自機位置や方位を逆演算によって推定することで自機位置を測位することができる(図一1)。また、これらのランドマーク化された照合杭を追跡することで測位が継続される。

なお、照合杭数が2本未満の場合は、自機方位の情報元は前述の方位ジャイロに自動的に切り替えられる。

#### (2) 衝突回避機能

ここではまず、測位に用いた2台のLRFで観測したROVの全周走査結果から各方位の第1反射点までの距離を抽出する。次に、ROVを中心とした警戒円を設定し、その円に対する各方位の第1反射点の侵食



図一 1 LRF を用いた測位と衝突回避  
(オペレータが操作時に参照する周囲走査結果)

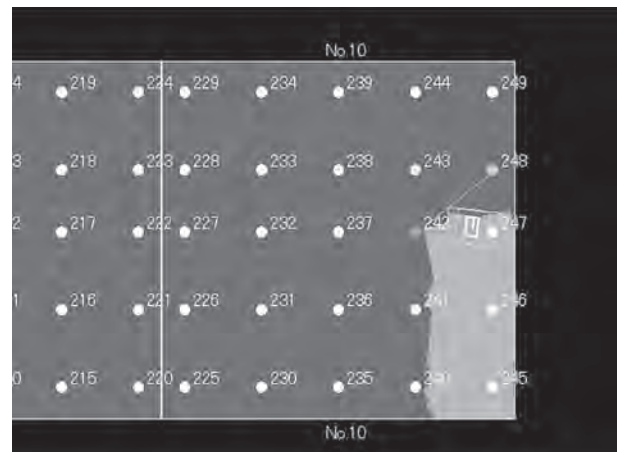
度合いに応じた荷重を求めておく。ここで ROV が衝突を回避するためには、これらの第 1 反射点のうち、警戒円を侵食している全ての反射点を警戒円の外に排除できれば実現可能である。よって、各方位の単位ベクトルに先ほど求めた各方位の荷重を乗じてこれらの総和を取れば、ROV の回避方向ベクトルが算出できる。図一 1 では、中心の ROV から左に伸びる矢印が回避方向ベクトルに相当する<sup>3)</sup>。

当該 ROV は遠隔操作で運用されることから、オペレータの操作に基づく移動指示にこの衝突回避ベクトルを重畳して指示することで、遠隔操作中の自動衝突回避を実現している。ただし、回避動作中においても移動指示にオペレータの意図を反映できるよう、回避動作に充てる推進力に上限を設けた。

### (3) 撮影履歴の提示機能

前述の測位によって得られた位置情報を NMEA0183 準拠のパケット情報に変換して撮影と同時にカメラに直接受け渡すことが可能である。この手法により、撮影日時や撮影方位、撮影位置情報等は写真データ中の Exif GPS IFD タグに直接書き込まれて写真と位置情報が一体となって管理可能となり、汎用の地図連動写真ビューアーや GIS アプリケーション上で撮影位置と連動した取得写真の管理や利活用も可能である。これと同時に、撮影動作と同期したログファイルを作成し、同様の情報を書き込んで記録することが可能である。取得写真とこれらの情報の関連付けにより、取得写真を利用した展開図の作成など位置情報を活用した取得写真の二次利用が容易になる。

図一 2 は杭の配置図からなる地図画面上に ROV を表示したナビゲーション画面である。オペレータはこの画面の情報から施設に対する ROV の現在位置を把握し、計画経路に沿った ROV の操縦を行う。なお、

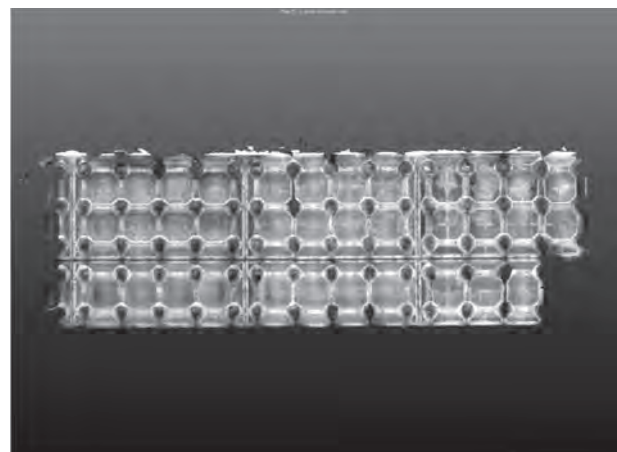


図一 2 杭配置図上における ROV の位置と撮影履歴

ROV を囲む矩形の細線はカメラの撮影範囲を示しており、その撮影範囲をフットプリントとして残しておくことで撮影履歴を提示することができる。この図では右下の明るい塗りつぶし範囲が撮影済み領域となる。この機能により、栈橋下面の撮影済み領域と未撮影領域が容易にリアルタイムで判別可能となり、撮影漏れを防ぐことができる<sup>4)</sup>。

## 4. 点検診断支援システム

現場作業への ROV の導入によって膨大な点検写真が得られることとなるため、点検帳票を完成させるまでの内業を支援する点検診断支援システムを併せて開発した<sup>5),6)</sup>。帳票作成に際しては、まずドローン測量などでも用いられる市販の SfM-MVS (Structure from Motion-Multi View Stereo) ソフトを用いて取得写真を合成し、栈橋上部工下面の 3D モデルを作成する(図一 3)。ここで作成された 3D モデルが点検診断支援システムへの入力情報の一つとなる。なお、写真のオーバーラップ率が低い場合でも、写真に位置



図一 3 取得写真から SfM-MVS で合成した 3D モデル

情報を付加することで合成可能となるケースが増えることを確認している。

開発した点検診断支援システムは、作成した3Dモデルを部材単位に分解して施設全体の2D展開図を自動的に再構成し、この展開図から劣化の可能性のある箇所を変状候補として自動的に抽出することができる(図-4, 5)。ユーザーは抽出された変状候補から劣化の位置と種類を目視で判別し、対象部材の劣化をグレードa, b, cに分類し、以上の工程を経て図-6のような点検帳票を作成することができる。

### 5. おわりに

本稿では、コンクリート栈橋上部工の目視点検用の栈橋上部工点検用ROVとその作業支援機能および内業を支援し省力化する点検診断支援システムについて紹介した。

栈橋上部工点検用ROVは、水上部無人で栈橋上部工下面の変状を撮影し、その劣化度判定に資する画像データを収集するROV型の点検装置である。ここに

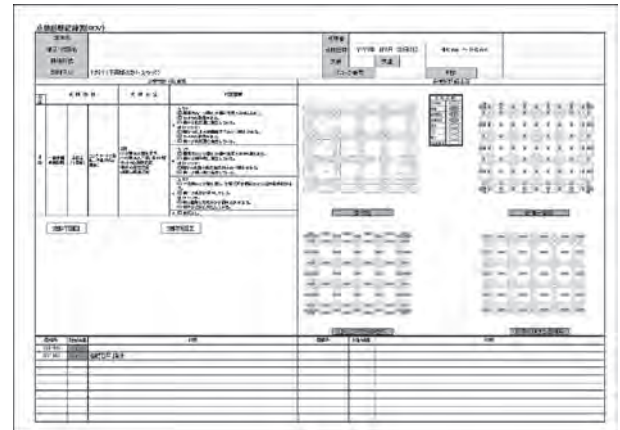


図-6 点検帳票の出力例

実装した種々の作業支援機能は、栈橋下という狭隘で特殊な作業環境下におけるROVの安全で確実な操作・運用や利活用の促進に寄与するものである。とりわけ、GNSSを利用できない栈橋下での測位を実現したLRF測位機能は、このような特殊環境下において運用中の当該ROVの位置をリアルタイムに把握することを可能とするものであり、他の類似手法と異なる最大の特徴であると言える。さらに、測位の過程でLRFが取得する周囲の障害物の情報は衝突回避にも利用され、その安全で確実な操作に貢献するものである。また、ROVの位置情報は写真の取得位置として撮影履歴の管理に活用できるとともに、客観的に点検位置を把握できることから点検写真の利活用の面でも有用な情報源となるものである。

点検診断支援システムは、ROVが取得した写真から栈橋上部工下面の点検診断を実施してその点検帳票の作成までを行う作業を支援するものであり、ROVによって大量に取得される写真をSfM-MVSソフトで3Dモデルに合成してから取り扱うものである。当該システムの内部では3Dモデルに合成された写真を再

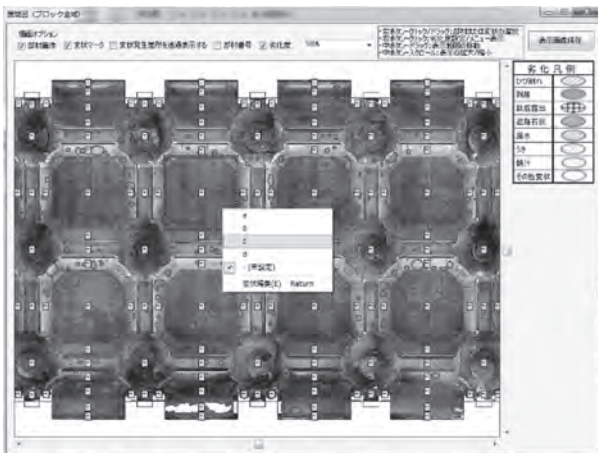


図-5 再構成した展開図上での変状候補の自動抽出

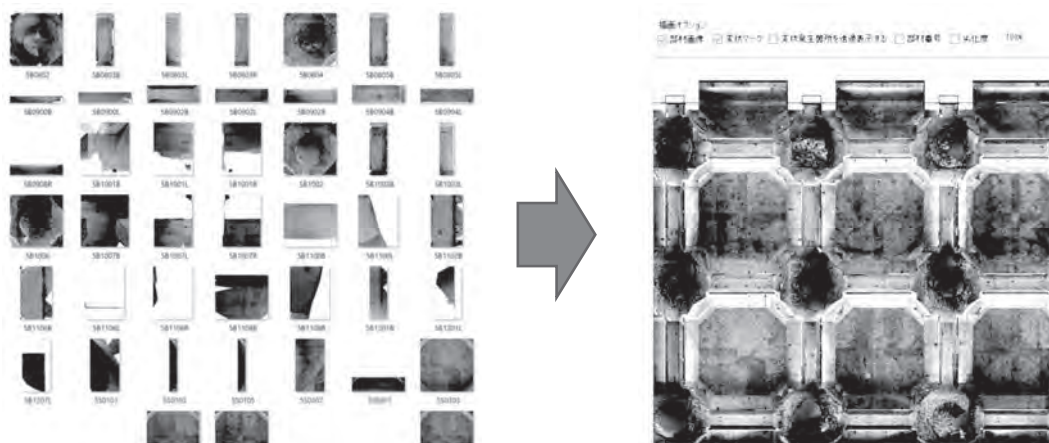


図-4 3Dモデルから切り出された部材単位の2D展開図(左)とそれらを再構成した2D展開図(右)

度2次元に展開して利用することで各部材の各面に対応した部分写真を取得できることから、写真上で部材単位の劣化度判定が可能となる。取得した写真から作成した2D展開図上で各部材の変状図を作成し、劣化度のグレードの最終的な判断はユーザーが行うことから、点検帳票を成果物とする作業の流れは従来手法と類似している。このため、実作業への導入はスムーズであると考えている。

現在、点検診断支援システムの活用促進策として、CIMモデルとの連携技術について取り組んでいる。CIMモデルを有する施設については、点検診断支援システム上で作成した点検診断結果を属性情報として提供することで、施設の維持管理情報のCIMモデル上での一元管理を目指すものである。また、従来からのCIMモデルを持たない施設についても、点検診断支援システム上で劣化度判定を行うだけでなく、維持管理情報の利活用が可能となるような機能を導入中である。

今後10年のうちに日本の労働者構成には大きな変化が見込まれ、生産年齢人口の減少が予測されている。港湾の中長期政策PORT 2030においても、維持管理の生産性向上は目標のひとつとして掲げられており、本稿で紹介した技術もその一助となることを目指している。

J C M A

#### 《参考文献》

- 1) Tanaka T., Nogami S., Kato E. and Kita T., Development of ROV for Visual Inspection of Concrete Pier Superstructure, In *Proc. the 37<sup>th</sup> ISARC*, pp.954-961, 2020.
- 2) 田中, 加藤, 宇野, 栈橋上部工下における点検装置の測位とその下面の撮影実験, 第17回建設ロボットシンポジウム, O-54, 2017.
- 3) 田中, 加藤, 宇野, 喜彦, 栈橋上部工点検用ROVのための遠隔操作支援機能の改良, 第18回建設ロボットシンポジウム, O4-2, 2018.
- 4) 田中, 加藤, 野上, 遠隔操作支援機能を実装した栈橋上部工点検用ROVの現場実証実験, 第19回建設ロボットシンポジウム, O2-5, 2019.
- 5) 野上, 加藤, 田中, 栈橋上部工点検用ROVおよび点検診断支援ソフトによる点検作業の効率化, 土木学会第74回年次学術講演会予稿集, VI-770, 2019.
- 6) Kato E., Nogami S., Kawabata Y. and Tanaka T., Demonstration test for improvement of inspection and diagnosis of concrete pier superstructure by remotely operated vehicle. In *Proc. the 3<sup>rd</sup> ACF symposium*, S5-3-1, 2019.

#### 【筆者紹介】



田中 敏成 (たなか としなり)  
 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所  
 港湾空港技術研究所 インフラ DX 研究領域  
 メタロボティクス研究グループ  
 グループ長, 博士 (工学)