

栈橋上部工点検用 ROV の研究開発

田 中 敏 成

栈橋上部工下面の一次点検作業を目的として、遠隔操作により水中部無人で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安全かつ効率的に収集する ROV 型点検装置とその操作・運用支援システムの研究開発に取り組んでいる。ここでは、ROV の遠隔操作支援とその位置情報を撮影画像に自動的に関連付ける目的で、GPS を利用できない栈橋下における測位機能等を付加し、ROV の操作性の改善と点検装置としての利便性の向上を図った。本稿では、これらに関する一連の取り組みについて紹介する。

キーワード：栈橋上部工下面、一次点検作業、ROV、栈橋下における測位、遠隔操作支援、点検位置情報

1. はじめに

栈橋上部工下面のコンクリートの点検作業については、まず全体の外観を確認することを目的として、潜水士や船外機船等が直接その下に入って実施する目視による一般点検診断が行われている（写真—1）。この点検作業においては、外観から得られる変状情報を全ての部材について把握することが求められるが、作業の実施は波浪や潮汐の影響を受け、その安全性の確保は必ずしも容易ではない。とりわけ供用中の係船施設においては、施設の利用状況を勘案した作業の実施が求められることとなる。

このような現状を鑑み、筆者らは栈橋上部工下面の一次点検作業を目的として、遠隔操作により水中部無人で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効率的に収集する ROV（Remotely Operated Vehicle）型点検装置（以下、栈橋上部工点

検用 ROV）とその操作・運用支援システムの研究開発に取り組んでいる。

栈橋下では、点検装置の上部を構造物によって遮蔽されることから、GPS を直接的に利用した測位は期待できず、その遠隔操作や点検位置の管理は容易ではない。ここでは ROV の遠隔操作支援と点検位置情報の管理を目的として、構造物下における ROV の測位と運動推定機能を付加し、その操作性の改善と点検装置としての利便性の向上を図った^{1), 2)}。

なお、現地実証試験に用いた当該試験機においては、撮影画像のファイル名に独自書式の位置情報等を付与することで点検位置情報を管理していたが、現在の改良型では、任意の測位デバイスが出力する位置情報を撮影画像内のメタデータを利用して各々の画像にジオタグを付することとし、点検位置情報の管理手法の一般化を試みている。本稿では、これらの取り組みについて紹介する。



a) 上部工下への進入 状況



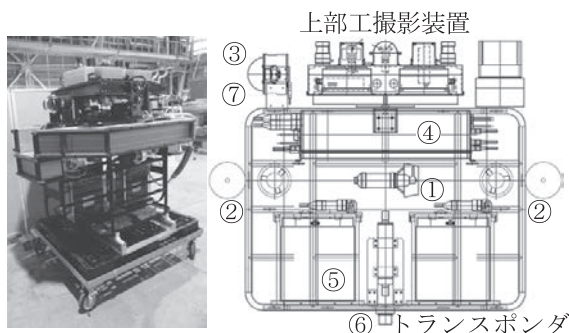
b) 栈橋下での作業状況

写真—1 栈橋上部工コンクリートの目視点検の様子

2. 上部工点検用 ROV 実証試験機

(1) ROV ビークル部

ROV のビークル部の形式は半没水型であり、本機が具備する調査機能や操作性等々の検証を目的とした実証試験機である。これは、後述する上部工撮影装置を常時空中に露出する状態でビークル部の上部に設置し、装備された2種類の上方撮影カメラによって、床版や梁など上部工下面の画像撮影を行うものである(図一1、表一1)。



図一1 栈橋上部工点検用 ROV

表一1 ROV のビークル部の諸元

	仕 様
型 式	半没水型
推進器	前進用スラスタ (150 W) × 2…① 側行用スラスタ (150 W) × 2…②
前方カメラ	NTSC カメラ × 1 (操縦用) …③
搭載センサ	傾斜計…④, 磁気方位計…⑤, USBL 型音響測位装置…⑥ (上部工撮影装置部の搭載物を除く)
照 明	LED × 2 (操縦用) …⑦
寸 法	L1160 mm × W800 mm × H1117 mm L1460 mm × W1350 mm (浮体含む)
質 量	約 230 kg (自動雲台を含む最大構成)

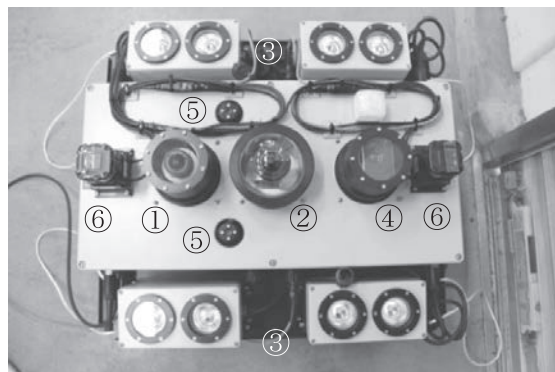
※ USBL : Ultra Short Base Line

(2) 上部工撮影装置

上部工撮影装置は、上方撮影カメラとして GigE 規格の工業用カメラを2台装備し、いずれのカメラも筐体内のカメラ制御用 PC 上で動作する当所開発のアプリケーションで制御される(写真一2、表一2)。また、陸上の操作用 PC から LAN を介してカメラ制御用 PC にリモート接続することで、カメラとその周辺機器の操作や撮影画像の確認を行うことができる。

(3) 栈橋下における ROV の測位

上部を遮蔽された栈橋下では、GPS を直接的には



写真一2 上部工撮影装置 (従来型)

表一2 上部工撮影装置 (従来型) の主要諸元

	仕 様
上方撮影カメラ	1/2.5" 2590 × 1942 GigE カメラ × 2…①②
レンズ	f = 4 ~ 12 mm Zoom…①, f = 2.7 mm…②
上方照明	LED (60 deg デフューザ付) × 8…③
搭載センサ	上方レーザー距離計 × 1…④ 上方レーザーマーカ × 1 (並行光2点照射, W = 200 mm) …⑤ LRF × 2 (270 deg) …⑥
寸 法	L650 mm × W580 mm × H222 mm
質 量	約 25 kg

※ LRF; Laser Range Finder

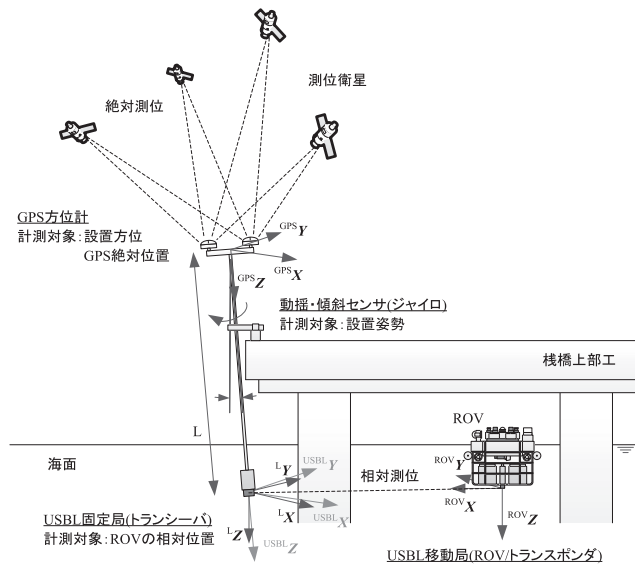
利用できない。ここではまず、上部に遮蔽物のない基準点を GPS で測位し、そこを起点とする ROV の相対測位によって測位情報の中継を行った。この相対測位には USBL (Ultra Short Base Line) 型音響測位装置を適用し、中継処理の大部分はこの音響測位装置内で行われる。なお、広指向角のトランシーバを採用することで、水面付近における水平方向の広い音響測位範囲を確保した。式 (1) に ROV の位置ベクトル ${}^W P_{ROV}$ を示す。

$$\begin{aligned}
 {}^{USBL} P_{ROV} &= \begin{pmatrix} {}^{USBL} x_{ROV} & {}^{USBL} y_{ROV} & {}^{USBL} z_{ROV} \end{pmatrix}^T \\
 {}^{GPS} P_{ROV} &= {}^{GPS} P_{USBL} + {}^{USBL} P_{ROV} \\
 \begin{pmatrix} {}^W P_{ROV} \\ 1 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} T \cdot R & {}^W P_{GPS} \\ O^T & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^{GPS} P_{ROV} \\ 1 \end{pmatrix} \\
 {}^W P_{ROV} &= T \cdot R \cdot {}^{GPS} P_{ROV} + {}^W P_{GPS}
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{緯経度変換行列 } T = \begin{pmatrix} t_x & 0 & 0 \\ 0 & t_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{傾斜回転行列 } R = R_z(\theta_z) \cdot R_y(\theta_y) \cdot R_x(\theta_x)$$

ここで、位置ベクトル P の左肩の添え字は座標系、右下の添え字は測位対象、小文字の xyz は座標値、大文字の XYZ は座標軸を表す (図一2)。



図一 2 栈橋上部工下での測位手法

(4) ROV の簡易運動推定機能

上方撮影カメラで逐次撮影している上部工下面画像の逐次変化と上部工に対する ROV の相対運動には大きな相関がある。よって、微小時間における画像各所の変化をオプティカルフローで捉えてそれらのフローベクトルを合成することで、上部工に対する点検装置の相対的な並進速度と旋回速度として推定することが可能である。ここで、オプティカルフローとは画像フレーム間の画像変化を画素の移動としてベクトルで表現したものである。ただし、ここでは計算量低減のため、画像をいくつかのセクションに分割して、その代表点のフローのみを計算した。

次に ROV の運動を 2 自由度の並進運動と 1 自由度の旋回運動で表現する二次元平面内の運動と規定し、床版裏の連続撮影画像のオプティカルフロー群からその並進運動と旋回運動を分離する手法について記述する^{3), 4)}。

旋回運動を伴わない並進運動の場合、全てのセクションの速度ベクトルは等しくなる。一方、並進運動と旋回運動の組合せからなる一般運動は、セクション毎に異なるフローベクトルで示される。これらの特性を整理すると、各々のフローベクトルは画像中心の並進運動の速度ベクトルと画像中心周りの旋回運動の接線方向の速度ベクトルの合成ベクトルとなる。すなわち、各セクションのフローベクトル v_{ij} の総和をとることでその旋回運動成分を相殺することができることから、画面全体の並進運動の速度ベクトル v は次式で推定できる。

$$v = \frac{1}{n} \sum_i \sum_j v_{ij} \quad (2)$$

i, j : 行と列の要素番号

n : 有効なセクション分割数

また、各セクションのフローベクトル v_{ij} から前式で推定された並進運動の速度ベクトル v を減ずることで、画像中心周りの旋回運動の接線方向速度ベクトルのみを抽出できる。よって、画像中心周りの旋回角速度 ω は次式で推定できる。なお、 r_{ij} は各セクションの位置ベクトルであり、その絶対値は画像中心から各セクション中心までの距離である。また、 Δt と $\Delta\phi_{ij}$ はそれぞれ微小時間とその間の旋回角度である。

$$\omega = \frac{1}{n} \sum_i \sum_j \frac{\text{sgn}(\Delta\phi_{ij}) |v_{ij} - v|}{|r_{ij}|} \quad (3)$$

$$\Delta\phi_{ij} = \text{atan2}\left(\frac{r_{yij} + v_{yij}\Delta t}{r_{xij} + v_{xij}\Delta t}\right) - \text{atan2}\left(\frac{r_{yij}}{r_{xij}}\right)$$

ここで、レンズの幾何学的収差に起因する推定結果への影響は、対称位置にあるフローベクトル同士の和によって相当量が軽減されることから、画像内全域でフローベクトルを算出した場合はそれらを偏りなく推定計算に利用することが望ましい。その一方で、これらの運動推定は異なる 2 点以上のフローベクトルで可能であることから、大きな誤差を含むフローベクトルについては、あらかじめ除外した方がよい推定結果が得られる場合が多い。よってここでは、並進速度と旋回角速度のいずれの推定計算においても有効なフローベクトルのみを前処理で取捨選択してから実施するとともに、フローベクトルの母数を多く取ることで前述の歪みの相殺効果や推定結果のロバスト性の低下を抑えることとした。なお、その際の有効なセクション分割数 n はこれらの運動推定に使用されたベクトル数に等しい。

以上の運動推定の例を写真—3 に示す。床版下面の撮影画像のオプティカルフローは細線で示され、推定された並進速度と旋回速度は画面中央のベクトルと十字の傾斜として提示される。

3. 現地実証試験

2014 年 2 月、供用中の栈橋において、筆者らは当該試験機を用いた栈橋上部工調査の現地実証試験を実施した。栈橋上部工の下面を撮影する ROV の様子を



a) 並進運動（縦の細線）



b) 旋回運動（円状の細線）

写真—3 オプティカルフロー

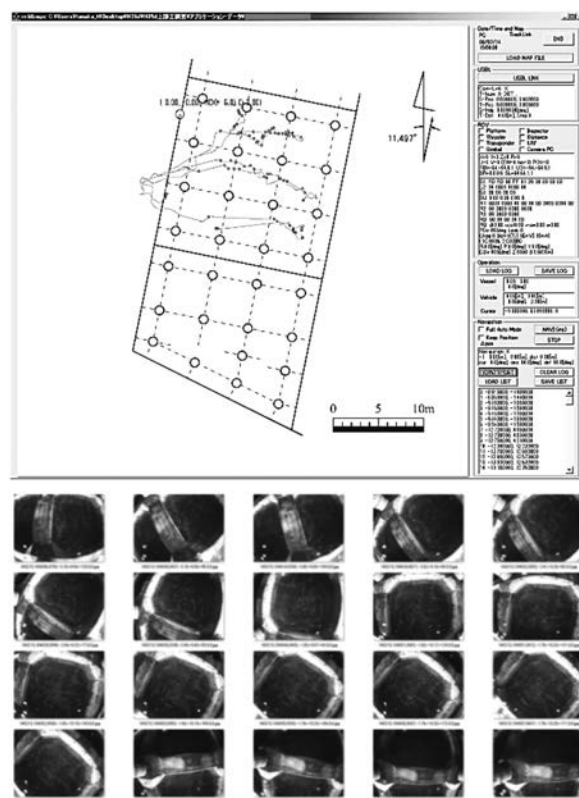


写真—4 栈橋上部工下でその下面を撮影中の ROV

写真—4 に示す。

調査の範囲は 19 m 四方の 1 スパン分であり、ここでは陸上からの遠隔操作によって ROV を栈橋下へ進入させて栈橋上部工下面の撮影を行った。その際、オペレータは ROV を直接視認することなく、前方および上方カメラの画像と、運動情報および地図上に示された自機位置情報のみに基づいて遠隔操作を行った。

ここでは、杭をかわしながら約 7 分で 1 スパンのほぼ全域にわたって ROV を誘導し、任意の位置の上部工下面の画像を収集できた。なお、この間に観測した



図—3 移動軌跡（上段地図上の線）と撮影位置（上段軌跡上の点）および撮影写真（下段写真）

全位置情報の約 0.95% に相当する 4 点で測位異常が確認された。これら 4 点の異常点を除き、ROV の移動軌跡と撮影位置を地図（構造物の配置図）上に描画した結果を図—3 に示す。

この測位機能で得られた位置情報や調査日時等の付帯情報は、撮影画像のファイル名に自動的に付与され、収集される膨大な撮影画像の管理を容易に実現することができる。つまり、提示される点検位置情報は、点検作業中においては栈橋上部工下における ROV の遠隔操作支援機能として働き、点検作業後においては点検情報の管理・運用支援機能として活用される。

なお、本用途で求められる ROV の測位精度は、点検情報の管理の観点からは、点検部位が杭からの相対位置として特定できる場合に限り、どの杭の組に囲まれた領域かが判別できる程度で十分であろう。一方、ROV の安全かつ確実な誘導のためには、杭の間隔と ROV 寸法を考慮すれば、少なくともサブメートルオーダーの精度が必要であると考えられる。

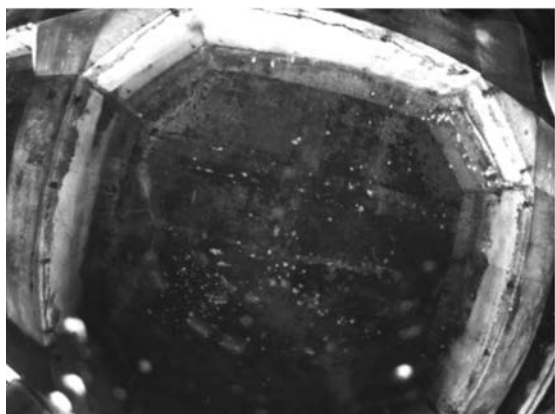
4. カメラ機能の改善

(1) カメラ機能についての考察

従来型の上部工撮影装置では、同型の GigE カメラ 2 台にズームレンズと広角レンズを装備し、被写体に

応じて撮影画角を変更することを想定していた。しかしながら、現地実証試験の際には、カメラ切り替え操作やズーム操作を要したケースは皆無であり、ほとんどの場面で広角レンズによる撮影に終始した。これは、ROVの運用中における操作の煩雑さも一因と考えられるが、一定の撮影画質が確保されている限り、オペレータにとっては一度に広範囲を視認しながら撮影の方が都合が良いことを示唆している。

写真—5に現地実証試験の際に撮影した上部工下面画像の一例を示す。このケースでは、4本の杭で囲まれた5m四方の範囲のほぼ全域を1枚の写真に納めることができしており、梁の側面もその状態が判断できる程度に撮影されている。よって、4本の杭で囲まれた範囲の点検のためには、数枚程度のランダム撮影写真でその全域を十分カバーできると考えられる。



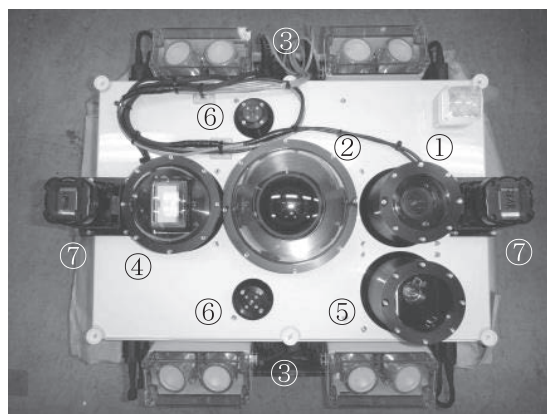
写真—5 従来型の上部工撮影装置による撮影例

ただし、従来型による撮影画像には、広角レンズに特有の強い樽型の歪曲収差が発生していた。これをソフトウェア的に補正することは可能であるが、大きな補正は画像周辺部の画質を著しく劣化させること、また、変状の確認に収差が大きく影響しないことを理由に、ここでは補正を実施しなかった。

(2) 上部工撮影装置 (改良型)

改良型の上部工撮影装置では、カメラ構成をGigEカメラ1台とDSLR (Digital Single Lens Reflex, デジタル一眼レフ) カメラ1台とし、それぞれ操作支援用と調査点検用として役割を分担させた。また、前節に示した考察結果から、いずれのカメラのレンズ構成も広角の短焦点レンズとして広い視野角を確保した⁵⁾。結果として、調査点検用カメラの撮影画像はダイナミックレンジと歪曲収差が改善され、撮影画像の画質が向上した。

これらのカメラはいずれもカメラ制御用PC上で動



写真—6 上部工撮影装置 (改良型)

表—3 上部工撮影装置 (改良型) の主要諸元

	仕 様
上方撮影カメラ	1/2" 1024 × 1024 GigE カメラ × 1…①
	35 mm 6016 × 4016 DSLR カメラ × 1…②
レンズ	f = 3.5 mm (GigE カメラ) f = 14 mm (DSLR カメラ)
上方照明	LED (80 deg デフューザ付) × 8…③ ストロボ × 1…④
搭載センサ	上方レーザー距離計 × 1…⑤ 上方レーザーマーカ × 1 (並行光 2 点照射, W = 250 mm) …⑥ LRF × 2 (270 deg) …⑦
寸 法	L600 mm × W580 mm × H385 mm
質 量	約 20 kg

※ DSLR : Digital Single Lens Reflex

作するソフトウェアで制御される(写真—6, 表—3)。なお、GigEカメラは当所開発のソフトウェアで、DSLRカメラはメーカー製ソフトウェアと外部レリーズ信号で制御される。また、従来型と同様に、カメラ制御用PCにリモート接続することで、カメラ操作が可能である。

(3) 点検位置情報の管理機能の改善

従来型の上部工撮影装置では、任意の測位デバイスが出力する位置情報から必要な情報のみを抽出し、撮影画像のファイル名に独自書式の位置情報を逐次書き込むことでそれらの位置情報を管理していた。この手法は、システム構築時のハードウェアに対する制約が少ない反面、調査後に点検情報を管理・活用するためのアプリケーションを利用者自身で開発するなどして準備する必要があった。

そこで改良型の上部工撮影装置では、撮影画像が保持するメタデータに位置情報を直接書き込むことで、各々の画像に汎用的なジオタグを付与することとした³⁾。つ

まり、任意の測位デバイスが出力する非 GPS 位置情報パケットをカメラが解釈可能な NMEA-0183 フォーマットに変換してカメラに逐次入力することで、個々の撮影画像内のメタデータに直接位置情報を書き込むものである。ここで対象となるメタデータは Exif (Exchangeable Image File Format) の GPS IFD タグであり、測地系、撮影日時、緯度経度、高度等の情報が NMEA-0183 フォーマットの位置情報パケットに基づいて書き込まれるものである。

ここではまず、非 GPS 位置情報の供給元として、現地実証試験で使用した USBL 型音響測位装置が出力する LQF フォーマットの位置情報パケットを想定してパケット変換器を実装した。この変換器は、カメラ制御用 PC 上で動作する中間ソフトウェアであることから、この仕様を変更することで任意の測位デバイスに対応することができる。よって、利用する測位デバイスの種類に関わらず、撮影画像のジオタグを Exif で管理することが可能となり、取り扱う位置情報の一般化が図られて市販の写真管理ソフトや GIS ベースのアプリケーションによる点検情報の管理を可能とした。

5. 撮影画像の要求解像度についての考察

係留施設の劣化度の判定基準は、国土交通省が定める「港湾の施設の点検診断ガイドライン【第1部 総論】」に従うことができる(表—4)⁶⁾。ここで、栈橋上部工下面部の保有性能評価を目的とする場合、この4段階劣化度(a,b,c,d)の判定基準についても「港湾の施設の点検診断ガイドライン【第2部 実施要領】4.1.6」に従うことができる⁷⁾。例えば、はりやハンチについては、鉄筋軸方向のひび割れ幅が3mmを超えるか否かが劣化度a判定とb判定の閾値の一つとされている。

従来型の上部工撮影装置に搭載した調査点検用カメラ(GigEカメラ)の解像度は、2590×1942画素で約503万画素である。一方、改良型に搭載した調査点検用カメラ(DSLRカメラ)の解像度は、6016×

表—5 抽出可能な最小ひび割れ幅

	従来型	改良型
解像度	2590 × 1942	6016 × 4016
画素数	約 503 万画素	約 2416 万画素
抽出可能な最小ひび割れ幅	約 1.28 mm	約 0.62 mm

4016画素で約2416万画素である。既往の報告によれば、画像から抽出可能なコンクリートの最小ひび割れ幅は、1画素の1/2程度である⁸⁾。ここで写真—4の撮影例のように、従来型のGigEカメラと改良型のDSLRカメラの双方で5m四方の範囲をカメラの画角内に納めたと仮定した場合、抽出可能な最小ひび割れ幅(短辺方向)は、従来型で約1.28mm、改良型で約0.62mmと推定できる(表—5)。実際には、コンクリート表面の汚れや種々の環境要因によって抽出性能がこれらの推定値に及ばないことも想定されるが、前出の閾値3mm幅に対して数値上は十分な余裕を有していると考えられる。

このような検討をした上でもなお、撮影条件によっては変状の発生状況を4段階では判別できない場合も想定される。劣化度判定の安全性を確保するためには、3段階あるいはそれ以下の段数の判別をせざるを得ない場合であっても、安全側で厳しく判定すべきであろう。

6. おわりに

本稿では、筆者らの研究グループで実施している栈橋上部工点検用ROVの研究開発について紹介した。これまでに得られた知見により、課題に対して提案手法が有力な解決策になり得ることを示すとともに、劣化度判定に求められる要件など、今後の実運用を想定した検討についても触れた。

現在筆者らは、SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)インフラ維持管理・更新・マネジメント技術「港湾構造物のライフサイクルマネジメントの高度化のための点検診断および性能評価に関する技術開発」の一環として、本稿で紹介した栈橋上部工点検用ROVの点検位置情報の管理手法や撮影品質の改善とあわせて、測位手法の改良、遠隔操作支援機能や運用支援機能の強化に取り組んでいる。また、当該点検技術の実証試験とあわせて、実運用を想定した運用マニュアルの整備等を計画しており、増加の一途をたどる点検対象施設の安全で効率的な点検作業の一助とすべく、早期の実現を目指している。

表—4 劣化度の判定基準

劣化度	劣化度の判定の基準：部材の状態
a	部材の性能が著しく低下している状態
b	部材の性能が低下している状態
c	変状はあるが、部材の性能の低下がほとんど認められない状態
d	変状が認められない状態

《参考文献》

- 1) 田中敏成, 加藤絵万, 野上周嗣, 平林丈嗣: 遠隔操作支援機能を有する
栈橋上部工点検 ROV の開発, 第 14 回建設ロボットシンポジウム
論文集 (CD-ROM), pp.55-62 (2014)
- 2) 田中敏成, 加藤絵万, 野上周嗣, 平林丈嗣: 栈橋上部工点検用 ROV
の提案と現場実証試験によるその運用支援機能の検証, 港湾空港技術
研究所資料, No. 1303 (2015)
- 3) 田中敏成: 栈橋床版下部点検装置のための遠隔操作支援システムの提
案, ROBOMECH 2009 講演論文集, pp.1P1A-17 (2009)
- 4) 田中敏成: 錯綜構造物下における水中ビークルの遠隔操作支援シス
テムの開発, 第 12 回建設ロボットシンポジウム論文集, pp.339-344 (2010)
- 5) 田中敏成, 加藤絵万: ジオタグに対応した ROV 用栈橋上部工撮影装
置の開発, 第 15 回建設ロボットシンポジウム論文集 (CD-ROM),
O-12 (2015)
- 6) 港湾の施設の点検診断ガイドライン【第 1 部 総論】, 国土交通省港湾
局, pp.14 (2014)
- 7) 港湾の施設の点検診断ガイドライン【第 2 部 実施要領】, 国土交通省
港湾局, pp.3-34 (2014)
- 8) 庄野昭, 齋藤淳: コンクリート表面のひび割れ評価方法, ハザマ研究
年報 (2009)

【筆者紹介】

田中 敏成 (たなか としなり)
国立研究開発法人 港湾空港技術研究所
新技術研究開発領域 計測・システム研究チーム
主任研究官

