

河川維持管理に資する水中点検ロボットの開発事例紹介

清 成 研 二

平成 28 年度、国土交通省により「次世代社会インフラ用ロボット」の試行的導入が実施された。本報では、ロボット開発・導入が必要な 5 つの重点分野のうち、水中維持管理技術（河川）に資する水中点検ロボットの開発事例を取り上げ、試行的導入とその後の実用化に向けた取り組みを中心に紹介する。

キーワード：河川維持管理、河道、護岸、点検、次世代社会インフラ用ロボット

1. はじめに

平成 25 年 6 月に閣議決定した「日本再興戦略」に基づき、同年 11 月、インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議において、「インフラ長寿命化基本計画」が取りまとめられた。この計画では、点検・診断の結果に基づき必要な対策を適切な時期に、着実・効率的・効果的に実施し、取り組みを通じて得られた施設の状態や対策履歴を記録して次の点検・診断に活用する、「メンテナンスサイクル」の構築と発展が重要とされている。一連のメンテナンスサイクルを継続し発展させていくには、インフラの安全性・信頼性の向上、維持管理・更新業務の効率化、に係る新技術の開発・導入が重要で、産学官が連携して研究開発を促進し、生み出された新技術を積極的に活用することで、メンテナンス産業にかかわる市場の創出と拡大を図っている（表 1）。

同年 12 月、国土交通省と経済産業省が「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入」の取り組みを開始

表 1 「インフラ長寿命化基本計画」における必要施策の方向性

点検・診断	定期的な点検による劣化・損傷の程度や原因の把握 等
修繕・更新	優先順位に基づく効率的かつ効果的な修繕・更新の実施 等
基準類の整備	施設の特性を踏まえたマニュアル等の整備新たな知見の反映 等
情報基盤の整備と活用	電子化された維持管理情報の収集・蓄積、予防的な対策等への利活用 等
新技術の開発・導入	ICT、センサー、ロボット、非破壊検査、補修・補強、新材料等に関する技術等の開発・積極的な活用 等
予算管理	新技術の活用やインフラ機能の適正化による維持管理・更新コストの削減平準化 等
体制の構築	[国]技術等の支援体制の構築、資格・研修制度の充実 [地方公共団体等]維持管理・更新部門への人員の適正配置、国の支援制度等の積極的な活用 [民間企業]入札契約制度の改善 等
法令等の整備	基準類の体系的な整備 等



図 1 「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入」における 5 つの重点分野



写真 1 水中点検ロボット

した。この施策は、社会インフラ老朽化、少子高齢化に伴う建設産業の担い手不足、大規模災害、への対応を課題に据え、両省が特定した「5 つの重点分野」で活躍するロボットを民間企業や大学等から募り、開発を支援し直轄現場で検証・評価を行うことで、ロボット開発・導入を促進する内容となっている（図 1）。本報では、5 つの重点分野のうち「維持管理—水中（河川）」に資する水中点検ロボット（写真 1）の開発事例を紹介する。

2. 河川点検の現状

我が国のインフラは、多くが高度経済成長期に建設されたものであり、老朽化への対策が急務になっている。一方で人口減少・少子高齢化が進行し、働き手の減少が課題となっており、より効果的・効率的な対応が可能な技術開発が求められている。特に長大な河川の維持点検においては、ダイバーによる構造物点検、有人船による深淺測量等が行われているが、点検頻度、点検精度、コスト面等で課題が多い。水上・水中の作業を人に代わりロボットが実施するようになれば、働き手不足や点検頻度の課題は解消され、繰り返し動作が多い様な特定の作業では、点検精度やコスト面で大幅な改善が期待される。

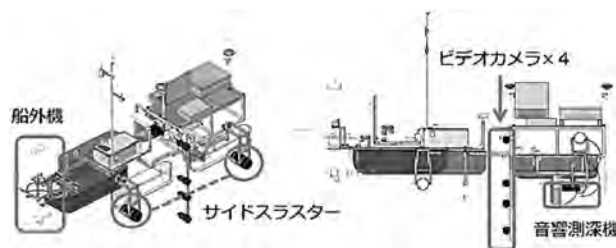
河川管理で用いられる「堤防等河川管理施設及び河道の点検要領」には、治水上の2項目、「河道が所要の流下能力を確保していること」、「堤防等の河川管理施設が所要の機能を確保していること」、を目的とした自然および人口構造物に対する点検事項が広く規定されている(表一2)。平成26年度から2カ年にわたり、国土交通省が実施した「次世代社会インフラ用ロボット現場検証」では、これら河川の点検事項のうち、「河道」および「護岸・護岸基礎部」の水中部の点検に着目し、ロボットの能力や耐久性の確認が実施された。本報のロボットは、平成27年度の「次世代社会インフラ用ロボット現場検証」水中維持管理技術一河川で「試行的導入」の推薦を受け、平成28年度から約2カ年に渡り実用化に向けた改良を施したものである。

表一2 「堤防等河川管理施設及び河道の点検要領」における点検事項抜粋

対象	点検事項(抜粋)		
河道(低水路)	土砂堆積、樹木の繁茂、流木、構造物の沈下、等		
河川管理施設	堤防	土堤	
		護岸、鋼矢板護岸、根固工、水制工	目地の開き、亀裂、破損、洗堀、侵食、劣化、腐食、沈下、崩れ、陥没、等
		高潮堤防、特殊堤、聴聞	
	河川構造物(周辺の堤防含む)	橋門等構造物周辺の堤防	
	構造物本体	劣化、腐食、沈下、傾き、洗堀、破損、土砂堆積	

3. 水上を移動して河川点検を実施するロボットの開発

平成27年度に、小型無人動力船に計測用台船(河床・護岸の3次元形状を取得する音響測深機と護岸を撮影するビデオカメラを搭載)を連結した試作機を製作し(図一2)、「次世代社会インフラ用ロボット現場検証」



図一2 「次世代社会インフラ用ロボット現場検証」試作機

に臨んだ。河床の洗掘把握と河川護岸の概査を効率的に行う技術として、位置精度、変状把握性能、費用対効果、等の基本要件をクリアし、翌平成28年度に実施される「試行的導入」への推薦を受けた。しかし、点検エリアに向かう移動速度が遅い、0.5 m/s以上の流速環境で思うように制御できない、等、運動性能に課題があり、また、準備・進水・陸揚げ・撤収にも時間を要し、適用現場の拡大や作業全体を通した効率化を実現する改良が望まれた。

試行的導入およびその先の実用化に向け、機体構造を抜本的に見直し、新たな形の機体を設計して改良開発を実施した。主たる改良は、(1)多様な現場条件に則する運動性能の向上、(2)進水・陸揚げ含めた現地工程の効率化、(3)自律航行に向けた操縦システムの高度化、で、以下にその内容を述べる。

(1) 多様な現場条件に則する運動性能の向上

本報のロボットは水上を移動するタイプで、機体側方に取り付けたビデオカメラを護岸に正対させ、横方向にスキャンする形で機体を平行に移動し護岸を撮影する。河川は濁りがあり、その中で変状が把握できる画像を撮影するには、カメラを護岸から0.5 m以内に近づけ、離隔を保ったまま移動する必要がある。この動作の実現にあたり、試作機は、機体下部に取り付けたサイドスラスターを使って正対姿勢を制御した。しかしこのスラスターは、河床計測時や移動時に水中抵抗を生み、推進の妨げとなった。また、動力船と台船の連結構成は、異なるセンサーを使う業務に台船変更のみで対応できる応用性を備えていたが、スラスター同様に水中抵抗が大きく、河川での点検ロボットとして十分な運動性能が得られなかった。そこで、動力船と台船の連結構成を取り止め一体型の機体とし、推進力向上とスラスター相当の動作実現を狙って、電動式船外機を機体の前後に2基取り付ける設計とした(図一3)。計測用途であることから、単胴船より安定性の高い双胴船とし、計測に適した速度で河川を自在に動く実績があるレジャーボートのフロートを採用した。フロートおよび船外機前後2基掛けがどこまで機

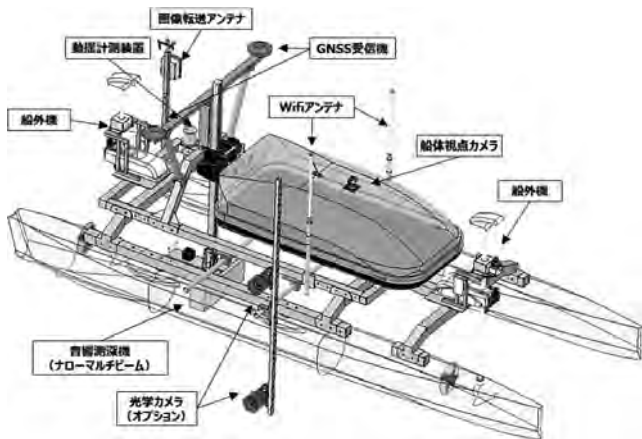


図-3 試行的導入および実用化に向けた改良機



写真-2 仮組による動作確認の様子

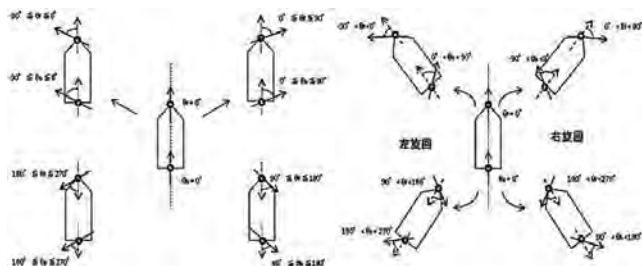


図-4 スライド(左)と旋回(右)パターン

能するか仮組で検証し(写真-2)、完成時の予定積載重量と音響測深機のモックアップによる水中抵抗を科した状態で、静止水域での航行速度や、前後船外機を同一方向に向けたスライド走行および逆方向に向けた旋回運動(図-4)、等を確認した。

(2) 進水・陸揚げを含めた現地工程の効率化

試作機は動力船と台船の連結構成であったため、現地での艀装に時間を要し、進水時にクレーンで吊り上げる際もバランスや荷重分散に十分な配慮が必要であった。(1)で一体型設計としたことで、艀装時間の短縮につながり、吊り上げ・吊り降しの作業負荷も軽減した。しかし、水上に吊り降した際スリングを外す、

逆に水上から吊り上げる際スリングを取り付ける、等、水上作業は変わらず発生し、進水・陸揚げにおける安全面や効率面の課題は残っていた。そこで、ロボットの発着台となる器具を製造し、発着台ごと吊り降して台上から発進/台上に停止させることで、人が水上作業を介さずとも進水・陸揚げができるようにした。さらに発着台を陸上やユニックの荷台上で安定するようにし、車輪の脱着が可能となるよう加工することで、保管・整備時や運搬時の架台となり、保管・整備 → ユニック運搬 → 現地準備(艀装等) → 進水 → 陸揚げ → 撤収(艀装解除等)、までの一連の作業が滞りなくスムーズに流れるようになった(写真-3)。



写真-3 発着台を使った進水(左)と現地準備(右)の様子

(3) 自律航行に向けた操縦システムの高度化

ロボットによる点検で実現されるべき事項として、現場作業の省力化と安全性の向上があげられる。ロボットが自律航行で水域を点検可能な場合、目視外や通信外の領域までロボットの行動範囲は広がり、現場作業は大幅に省力化され費用対効果が高まる。しかし、環境の予期せぬ変化や外乱により不測の事態が発生する可能性があり、座礁や転覆、流失、衝突による器物損壊、等が起こりうる。あらゆる事態への自律対応は困難であり、ロボットの状態や周囲状況の遠隔監視、マニュアル航行への切り替え、緊急措置、等、人による安全面での監視・対応は残ることになる。このように河川における自律航行での無人点検には課題が多く、まずは支援機能による有人作業の省力化と安全性向上を確実に実現し、その作業データの実績を無人点検の実現に向けて活用する方向性とした。

平成28年度の試行的導入現場では、実質3名でロボットによる河床計測を実施し、うち操縦者と計測オペレーターの2名(残り1名は安全監視)がロボットの操作に参与した(写真-4)。操縦者はプロボを使って目視でロボットを操縦する。計測オペレーターは基地局PCの電子図面上で、ロボットの位置、付近の水深、計測済みの領域、等、刻々と変化する情報をリアルタイムに監視し、計測済みの領域と計画測線を照ら



写真一4 計測オペレーター（左）と操縦者（右）の様子

し合わせながらロボットの方向や速度を操縦者に指示する。計画時には詳細が不明であった河床状況が明らかになるに連れ、座礁等危険回避や測線間隔調整のため、適時に計画を修正する。試行現場で分かったことは、操縦・計測両者の連携が計測作業の効率や精度に大きく影響を及ぼす点であり、相応な成果を得るには十分な作業経験が必要であった。この連携作業や計画変更作業を、ツールやセンサー、プログラムによってオートメーション化・省力化していくことで、属人性を脱却し、短期間の技術習得で誰もが一定品質の成果を得られる構造に変え、ゆくゆくは安全監視とロボット操作の2名による運用に発展させる。この方針のもと、次に、省力化・安全性向上を目指した改良点を述べる。

- ・操縦者がプロポのスティック操作をしなくても、そのまま直進方向にロボットが進むようオートメーション化プログラムを組み込むことで、計画測線のない比較的長い直進航行の操縦負荷を軽減する。
- ・操縦者にプロポとセットでタブレット画面を携行させ、ロボットに取り付けた専用カメラから周囲画像をリアルタイムにタブレットへ送信する。これにより、目視困難な遠方作業で操縦者が周囲状況を確認できるようにする。
- ・ロボットに衝突・座礁回避用のセンサー（水上前方に測距センサー、水中前方に測深センサー）を取り付け、操縦者のタブレットに逐次送信し、数値情報として操縦者が危険察知可能とする。
- ・計測オペレーターが監視している電子図面同様に、測線とロボットの位置・航跡をタブレットの電子図面でリアルタイムに表示し、計測オペレーターの指示を視覚的に確認できるようにする。

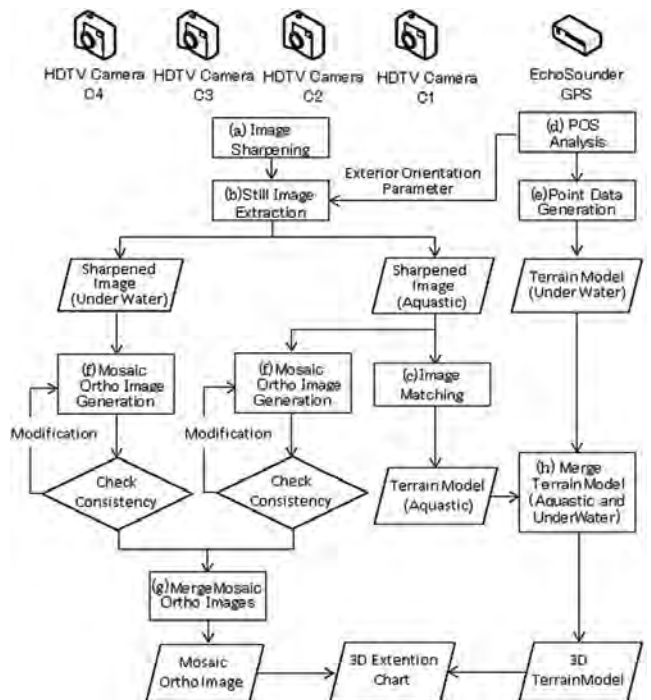
4. 計測後のデータ解析処理

本報のロボットは音響測深機とビデオカメラ（HDTV

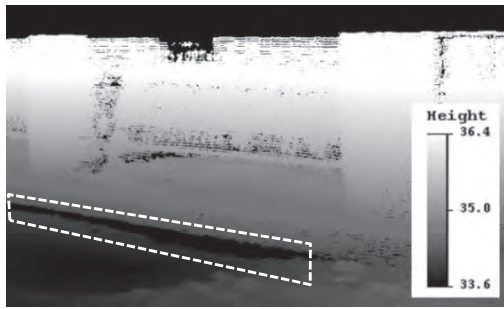
カメラ）を搭載している。水平方向から傾けて音響測深機を取り付け計測することにより、河床と護岸の両方の三次元点群データが取得可能となる。搭載する音響測深機はR2Sonic社製のSonic2024で、周波数400 kHzの超音波がスワ幅160°で照射され、高密度な三次元点群データが取得される。Sonic2024の測位システムは慣性GPSジャイロを用いて位置と姿勢を取得し、水平精度は0.5～1.0 m、更新レートは最大10 Hzである。またビデオカメラは、水上と水中の画像情報が同時に取得できるように、水上に1台および水中に3台を鉛直方向に並べてロボット側面に配置し、護岸に正対しながら動画像を撮影する。ロボットによる計測データを解析して作成される成果品およびその用途は表一3に示すとおりである。成果品作成処理フローを図一5に、成果品のイメージを図一6に示す。

表一3 成果品一覧

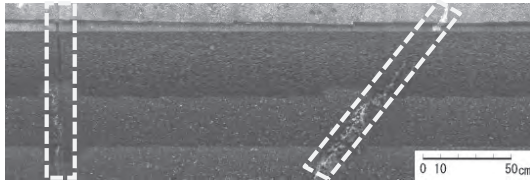
Products	Generation	Use
3D Terrain Model	3D point data, generate from echo sounder and GPS Data.	Grasp the distribution of the abnormality of the River Facility.
Mosaic Ortho Image	Ortho-rectify and mosaic the still images extracted from movie files, aquatic and under-water.	Grasp the situation and measure the scale of the abnormality.
3D Extension Chart	Generate mesh from 3D Terrain Model and paste Mosaic Ortho images.	Grasp the distribution of the abnormality of the River Facility and measure the scale of the abnormality three-dimensionally.



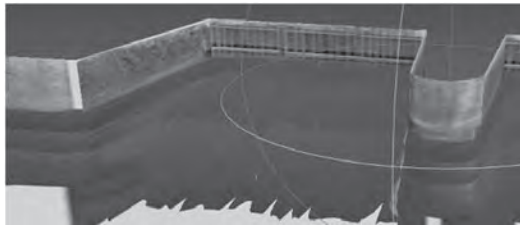
図一5 成果品処理フロー



3D Terrain Model



Mosaic Ortho Image



3D Extension Chart

図一6 成果品イメージ

成果品作成の処理フロー詳細は以下の (a)~(h) に示すとおりである。

(a) 画像鮮明化処理

濁度のある水中でビデオカメラにより撮影された動画は視認性に課題があるため、画像鮮明化処理を施して視認性を向上させる。

(b) 静止画抽出

鮮明化した動画像から 15 fps にて静止画を抽出する。

(c) 画像マッチング

静止画間でマッチング処理により対応点を取得して各静止画の位置と姿勢を算出するとともに、三次元点群データを生成する。この処理は水上カメラで撮影した画像についてのみ行う。

(d) POS 解析

国土地理院が 1 秒間隔で観測している電子基準点データを使用して RTK 測位を行い、GPS センサーによって取得されたデータを補正して、精度数 cm 精度の位置情報データを得る。

(e) 点群データ生成

音響測深機によって取得された斜距離データと POS 解析によって得られた位置情報データを用いて、三次元点群データを生成する。

(f) モザイクオルソ作成

静止画とその撮影時の位置情報および、三次元点群データを用いて正射変換し、モザイク処理を行う。

(g) モザイクオルソ統合

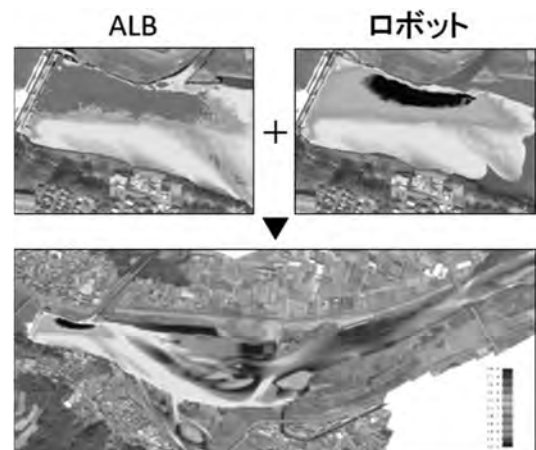
水上カメラおよび水中カメラを用いて作成したモザイクオルソを統合する。

(h) モデル統合

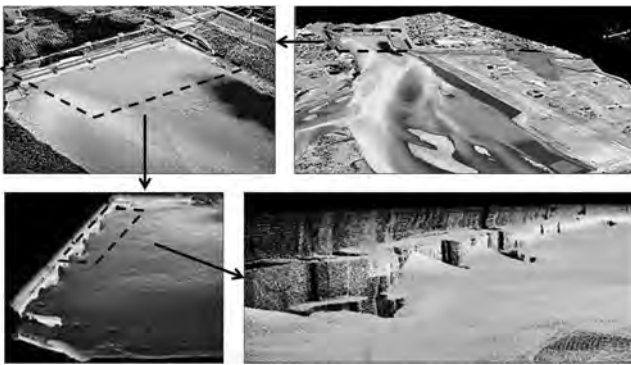
モザイクオルソと音響測深機の三次元点群データを統合し、VRML 形式のデータを生成する。

5. 現場実証結果に関して

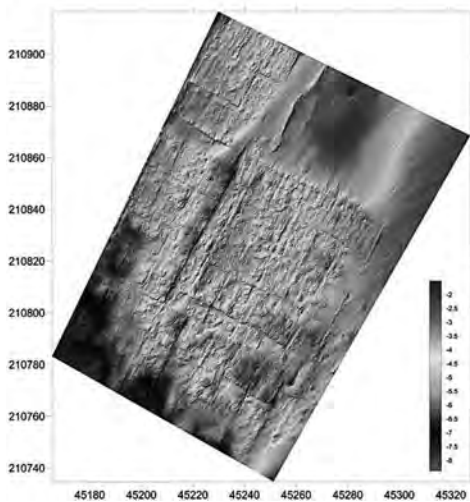
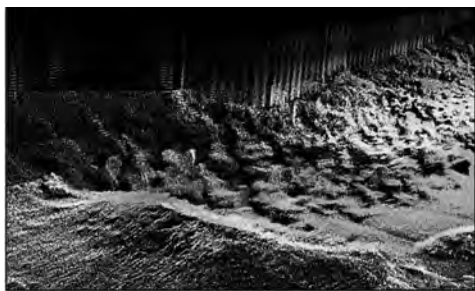
長大な河川の形状を効率的に把握する手段として現在は航空測深システム (ALB) が存在する。水中を透過するグリーンレーザーと近赤外レーザー測距機を航空機に搭載し、高度 400 m の高さから陸上及び水中の地形を面的に測量し、水陸シームレスな三次元点群データを取得するシステムであり、理論上、透明度の 1.5 倍まで測深が可能である。平成 28 年度~平成 29 年度に実施した試行的導入含む現場実証では、現場での実用性検証が目的であり、ALB を使って河川全体を把握し、ALB で捉えられなかった箇所 (水深が深い、橋梁の下、など、濁度や遮蔽物の影響でレーザーが届かなかった箇所) をロボットで水上から補完するシナリオで、水陸シームレスかつ広域・網羅的な河川点群データを効率的に取得することを確認した (図一7)。結果、俯瞰的視点から詳細確認まで、一連の情報を一度に扱うことが可能な成果を得た (図一8)。また、矢板護岸や根固工、護床工、等、水中にある河川管理施設の形状も把握でき (図一9)、沈下や崩れ、陥没、洗堀、等の形状認識による点検への適用可能性を確認した。なお、現場実証で記録した、作業に係る人員・時間等を以下に述べる。



図一7 ALB 欠測箇所をロボットで補完



図一八 俯瞰的視点から詳細確認まで



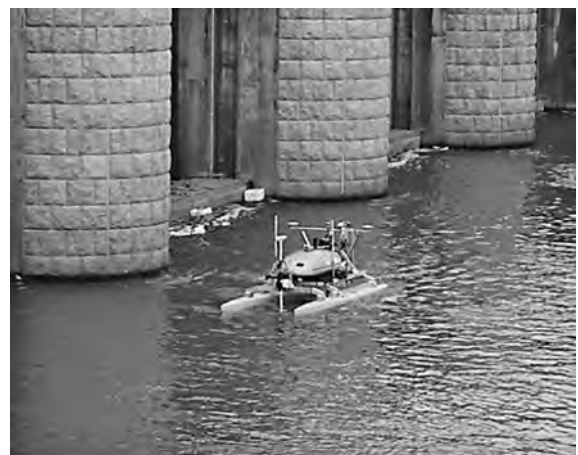
図一九 矢板護岸と根固工(上), 護床工(中), 護床工段彩図

人員：操船者 (1), 計測オペレーター (1), 安全管理者 (1), ユニックオペレーター (1), 警戒船操船者 (1), 計 5 名 (うち 3 名で計測作業)
 時間：艀装・準備時間 (1.5 h), 陸揚げ・撤収 (1.0 h)
 機材：ロボット一式 (本体, プロポ, 基地局, 音響測深機, 慣性 GPS ジャイロ, ビデオカメラ), ユニック, 警戒船

時間当たりの計測量は環境条件 (深さ等) により異なるが, 今回の現場実証では水深 4 ~ 5 m の河川で約 30,000 m²/h を記録している。

6. 今後の展開に関して

開発したロボットが広く活用されるには, 主たるシナリオ「河床・護岸点検」以外にも用途を見出し, 適用可能性を検証する事が重要だと考える。平成 29 年度には, 河床・護岸点検以外の 2 つの業務で試行利用を行った。1 つはダムの地形測量で, ロボットによる計測で得られた横断方向の三次元点群データを使い, シングルビームソナーによる横断測量の精度確認を実施した。ロボットが搭載する Sonic2024 (もしくは相応の音響測深機) は水深 ~ 400 m 程の測深が可能で, ダムの堆砂測量等に利用可能である。ダムは流速がなく往来する船舶も少ないことから, 河川よりロボットの作業条件がよく, 追加開発なしで活用が見込める。また, バッテリー駆動のため, 水域作業の許可が通りやすい利点もある。しかし, 現状は連続稼働が 2 ~ 3 時間であり, 一日作業ではバッテリー交換が必須となることから, 点検エリアが進水ポイントから離れている場合は, 安全監視用ゴムボートにバッテリーを積み水上で交換する等, 作業上の工夫が必要となっている。もう 1 つは, 堰ゲート交換工事に伴い予備ゲートを閉じる際, 直下に異物や堆砂がどれだけあるか確認を実施した (写真一五)。費用面の課題はあるが, 10 cm 前後の分解能から流木等が判別可能で, 施工前に水中の状況を確認し計画に反映する, 施工中・施工後に出来形を確認する, といった応用を見込む。なお, ロボットには, 既存の有人作業を省力化し働き手不足の課題を解決するツールとしての観点もあるが, 人間が作業できない箇所で, 今まで実施困難であった点検



写真一五 堰予備ゲート下の状況確認の様子

を実現するツールとしての使い道もあり、港湾等における危険水域（例えば棧橋下）での適用可能性を検討することも、今後の発展につながるものと判断する。

7. おわりに

現時点ではまだ、操縦者や計測オペレーターの作業負荷が高いが、今後の技術発展、バッテリー容量の向上や充電時間の短縮、危険回避等の安全対策を備えた自律航行プログラムの発達、通信容量の拡大、準天頂衛星による GPS 精度の向上と受信域の拡大、等に伴い、現場作業の省力化・安全性向上が実現していくことになる。本報のロボットは、その第一歩となるプラットフォームで、今後は業務で活用しながら、技術動向を踏まえて部分的な改良やソフト面での充実を図っていく予定にある。2～3年後の近い将来、本報のロボットや類似製品が、河道や護岸点検、浚渫工における出来形測量、ダムの堆砂測量、等で数多く利用されていることを願って本報の結びとする。

なお、今回紹介した水中心点検ロボットは、平成 28 年度から約 2 ヶ年に渡り、「国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）」による助成を受けて開発したものである。

J C M A

《参考文献》

- 1) 「インフラ長寿命化に向けた取り組みと精密計測技術への期待」精密工学会誌 No.80, 2014 年 11 月
- 2) 「河川点検を効率化・高度化するフロートロボットの開発」日本ロボット学会誌 Vol.36, 2018 年 3 月
- 3) 「次世代ロボット」ACTEC ウェブページ (<http://actec.or.jp/robot/>)
- 4) 「Topographic & Bathymetric LiDAR System」Leica Geosystems ウェブページ (<https://leica-geosystems.com/products/airborne-systems/lidar-sensors/leica-chiroptera-ii>)

【筆者紹介】

清成 研二（きよなり けんじ）
朝日航洋㈱
空間情報事業本部 商品企画部
上級主任技師

