

大水深対応型水中作業ロボットの開発

DEEP CRAWLER

飯田 宏

水中での潜水士による重労働を低減するために、水中バックホウが実用化され、多岐に亘る工事に適用されてきた。しかし、水中バックホウでは進入不可能な極めて狭隘な環境下や、波浪や潮流の激しい海域、浅海域での施工装置も求められている。また一方では、海洋資源開発などの機運の高まるにつれ、水深数千mという過酷な圧力下に対応可能な無人化施工装置も求められている。本稿では、これらの条件下でも作業が可能な水中作業ロボット「DEEP CRAWLER」（以下「本ロボット」という）について説明し、作業事例を紹介するとともに今後の展開について述べる。

キーワード：水中作業ロボット，無人化施工，水中構造物調査，海洋資源開発

1. はじめに

水中バックホウによる遠隔操縦作業の実績から、大水深域や危険箇所等の過酷な環境下での施工をはじめ、その適用範囲の拡大が求められるようになった^{1),2)}。更に、動けなくなった場合など緊急時の対策も求められており、潜水士の補助を必要としない遠隔からの緊急時対処を行う必要もある。以上の要望を受け、小型軽量で遠隔操縦による本ロボットを建造するに至った。写真-1に大型施工実験水槽で作動テストを行う本ロボットを示す。

本稿では本ロボットの概要及び性能を紹介するとともに、作業実績と今後考えている展開について述べる。

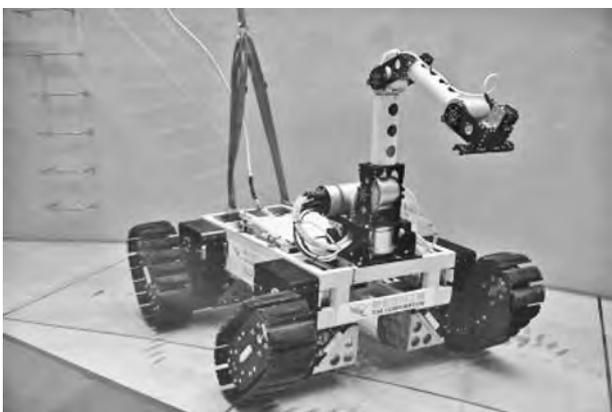


写真-1 本ロボット全景

2. 本ロボットの全体概要

(1) 概要

今回開発した本ロボットは、様々な地形・地盤での走行性を高めるため4軸のクローラ装置を装備していることが第一の特徴となっている。このクローラ装置は各々を任意の角度に変更できるため、走行地形や、走路上の障害物に応じた機体の安定性を向上させている。

水中バックホウによる作業が不可能な狭隘な現場にも適用可能とするため、最小で幅1.6m×長さ2.0m程度とコンパクトな設計としている(図-1)。また、海洋資源開発分野等への適用を想定し、水深3,000mという非常に高い水圧にも対応可能としている。

(2) 構造

図-1に示した通り本ロボットは4軸式のクローラ構成となっている。走行用のクローラは可動式とし

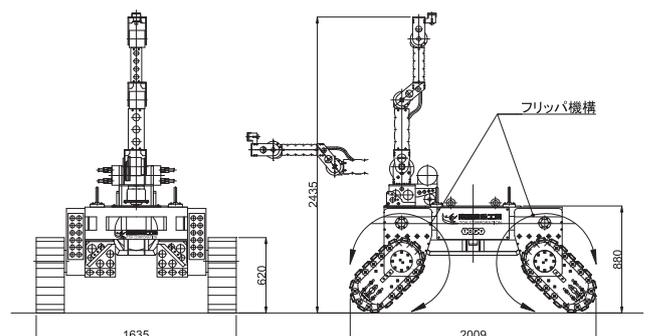


図-1 本ロボット外形（フリッパー135°）

たフリッパ機構を採用しており、各クローラを単独で操作できる構造としている。また、フリッパは無制限回転する。

(3) 機能及び性能

クローラ式の本ロボットは水中での走行が重要であるが、各種走行試験は、水中質量 800 kg を想定して行った。

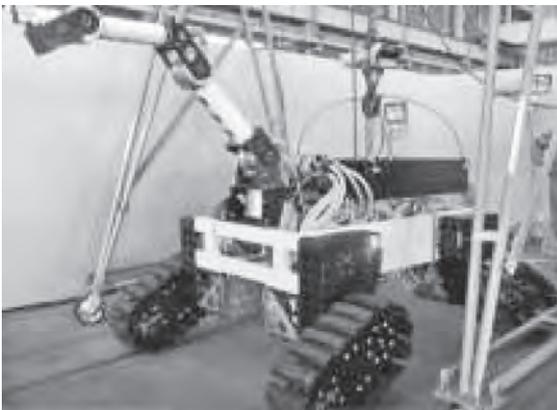
(a) 走行性能

平坦な路面（傾斜 $\pm 3^\circ$ 以下）において、以下の走行が可能である。

- ① 走行速度約 0.35 km/h
- ② 走行旋回及び超信地（その場）旋回
- ③ 200 mm の段差乗り越え

(b) フリッパリフトアップ性能

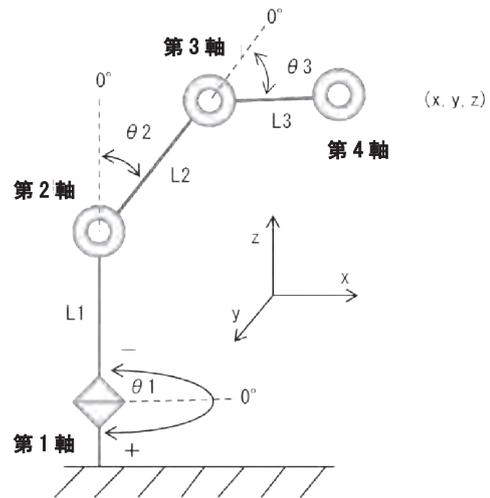
写真一2にはリフトアップ試験状況を示す。気中質量 1,500 kg（錘搭載）にて、フリッパでのリフトアップが可能である。各種装置を装備した状態で本体姿勢を変化させることができるため、追加機材を装備した状態でも海底面の岩などに乗り上げた際の回避や乗り越えを可能とする。



写真一2 リフトアップ試験

(c) マニピュレータ

本ロボットには4軸のマニピュレータを装備しており、マニピュレータ先端に作業ハンドやコアリング装置等を取り付けることにより各種作業が可能となる。マニピュレータ各軸の可動模式図を図一2に示す。第1軸は水平回転、第2軸は円直面回転、第3軸は円直面回転、第4軸は円直面回転としており、マニピュレータ各軸の可動範囲は、第1軸 $\pm 30^\circ$ 、第2軸 $0 \sim 80^\circ$ 、第3軸 $0 \sim 120^\circ$ 、第4軸 $0 \sim 60^\circ$ である。また、マニピュレータ本体取付角度は5段階（ $0 \sim 90^\circ$ ）に設定することが可能である。



図一2 マニピュレータ可動模式図

(d) 耐水圧性能

クローラとフリッパにそれぞれ4軸、マニピュレータに4軸のアクチュエータを装備しており、この耐水圧性を高めることにより水深 3,000 m（30 MPa）にも耐えうる性能を確保している。

アクチュエータはモジュール化しており、各モジュールは設計圧力を掛け、耐圧性能を確認している。

3. 遠隔操作システム

本ロボットには、遠隔操縦による無人化施工を可能とする光通信を採用している。

(1) 姿勢センサ

ロボット本体には多数のセンサを搭載しており、これらのデータを操作画面に数値と3Dグラフィックで表示し、異常値を検出した場合の警報機能も組み込まれている。また、機体が大きく傾いた時に一旦動作を停止させ、転倒を防止する安全機能も有する。図一3に遠隔操縦システムの操作画面を示す。操作画面の左側は標準装備されている光学式カメラからの映像を表示する。



図一3 操作画面

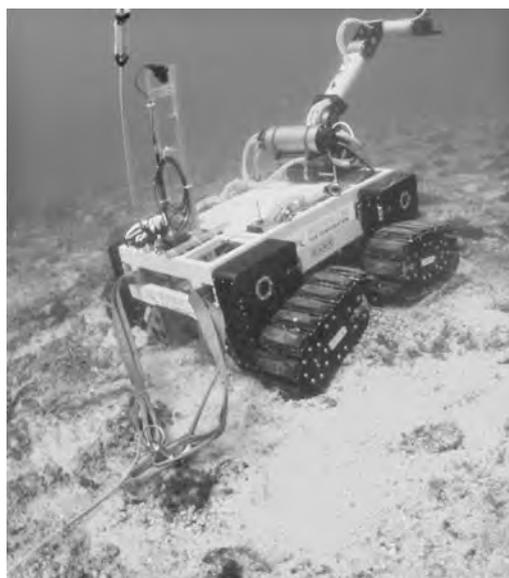
(2) 操作コンソール

写真—3に遠隔操縦システムの操作コンソールを示す。12個のアクチュエータ（クローラ4軸，フリッパ4軸，マニピュレータ4軸）は，すべて単独で操作できる。海底面によっては非常に複雑な操作が求められるため操作用のコントローラを足回り用（クローラ等）とマニピュレータ用の2つに分けることで操作を簡略化し，作業性を向上させている。また，あらかじめフリッパやアームの角度を操作PC内で設定しておくことにより，簡単に角度調整を行うことができる。

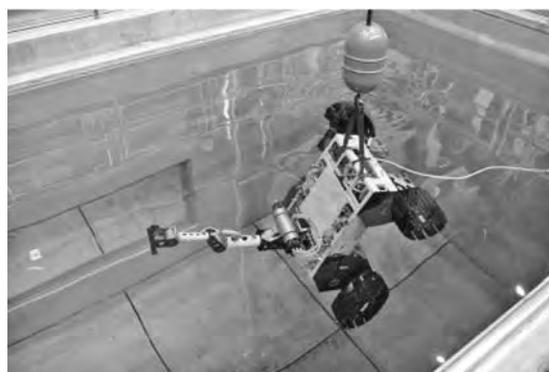
操作コントローラには，適正な手順以外の操作が安易に行えないよう，インターロック機能が組み込まれており，各アクチュエータの誤操作を防止している。



写真—3 操作コンソール



写真—4 緊急時回収用ワイヤ取り付け状況



写真—5 緊急回収時の吊り上げ確認

(3) 操作性

本ロボットは，移動速度が最速 0.35 km/h と遅めの設定であるが，情報量が少ない水中での移動では十分と考えている。透明度の高い水域での作業では，標準に装備されている光学式の水カメラのみによる移動も可能であるが，前後左右の確認ができる映像を表示することにより作業性を向上できる。

4. 緊急時対処方法

本ロボットの走行装置が作動不能になった場合，軽度又は重度の2段階で対処を考えている。軽度は構造上一部機能が停止しても走行できる程度とし，重度は完全に機能が停止した場合とする。クローラ部のアクチュエータはそれぞれモジュール化しており，1基が作動不能となっても，他の3基には影響なく作動可能な構造となっている。そのため，作動可能なクローラのみでバランスを取りながら自力退避を行う。フリッパの無限回転のみを使用した移動も可能である。重度な故障である完全に機能が停止した場合は，退避用の

ワイヤをウインチで強制的に巻き取り，機体を引き出す。水路などでの作業を行う場合は，緊急時回収用のワイヤをロボット後部フレームに接続した状態で調査を行うこととしている。クローラによる走行であるため，十分な引っ張り強度を有したワイヤを数百m引き回すことが可能である。写真—4に緊急時回収用ワイヤを取り付けた状況を，写真—5に緊急回収時の吊り上げ確認状況を示す。

5. 作業実績

(1) 海底ケーブル調査

海洋工事を行う際には周辺海域の精度が高いケーブル位置を把握しなければ，作業船のアンカリングでケーブルに損傷を与える可能性がある。そのため，海図に示されているケーブル敷設位置の再確認を行った。調査海域では，潮流による海底ケーブルの移動や砂などがケーブルに覆い被さっていることが多く，ケーブルの敷設位置をトレースすることが難しい。し

かし、船上から肉眼で確認ができる浅瀬からクローラ型の本ロボットで海底ケーブルの調査を実施した（写真—6）。砂地盤上に敷設されたケーブルは、大部分が砂に埋もれた状態であり、地盤上からでは全く視認することができない範囲もあったが、海底地面の状況とケーブル敷設の僅かな痕跡から、ルートを予測しながらトレースし、ケーブル敷設座標及び水深、ケーブルの敷設状態を確認できた。

〈調査概要〉

- ・水深：5～20m
- ・地盤：砂
- ・潮流：0～3ノット
- ・延長：300m程度×2系統
- ・装備：光学式カメラ、音響測深機、GPS



写真—6 海底調査状況

(2) 水路内部調査

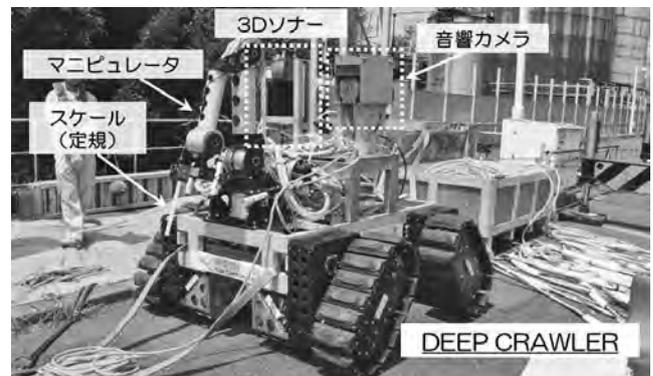
本ロボットにより水路内部（幅×高さ：2.5×2.5m）の調査を行った。水路内では滞留する水が濁ることで、光学式カメラは十分な役目を果たすことができないと予想され、濁りに強い音響カメラと内部に存在する障害物等の形状を非接触で計測できる3Dソナーを装備した。写真—7に調査時の装置外観を示す。調査は、水路内の堆積物確認、堆積量（厚さ）計測、側壁への付着物確認、天井面への付着物確認を目的に行われた。水路内は潮位によるが天井面が没水しない時間があるため、必要に応じてカメラを水面上に出す必要があり、マニピュレータ先端のカメラを活用した。側壁面の確認は濁っていても対応できるように10cm程度までカメラを近づけた。下床部には堆積物が薄く全面を覆っていたが、側壁面・天井面共に付着物は疎らであり、広範囲にわたるコンクリート面の確認も行うことができた。今回の調査では、コンクリートの浮き、剥離等は確認できなかったが、水路内の流速が変化する地点に直径1m近い障害物が存在しているこ

とを確認した。実寸確認は、マニピュレータに取り付けたスケールの先端で障害物表面をトレースすることにより、先端座標の軌跡を抽出、幅及び高さを測定した。

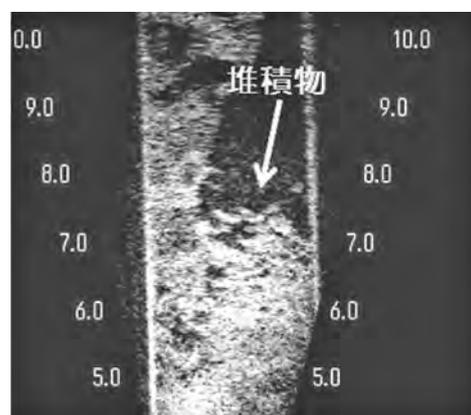
濁り対策で装備した音響カメラ及び3Dソナーの画像を図—4及び図—5に示す。音響カメラは、堆積物や障害物の確認に有用であった他、ロボットの前方を確認、進路調整時にも有用であった。3Dソナーは水路の構造に因ると考えられるが、ノイズと考えられる表示が多く、実際には何も無いところに障害物があるように表示されることを散見した。3Dソナーで詳細に状況を把握することは難しいが、全体の確認をリアルタイムで行えることに有用であった。今後知見を増やし、適用条件の確立や計測精度の向上を図りたい。

〈調査概要〉

- ・水深：1～3m
- ・地盤：コンクリート
- ・流速：なし
- ・延長：約150m
- ・本数：1本
- ・装備：光学式カメラ、音響カメラ、3Dソナー



写真—7 調査時外観



図—4 音響カメラ画像 (堆積物)

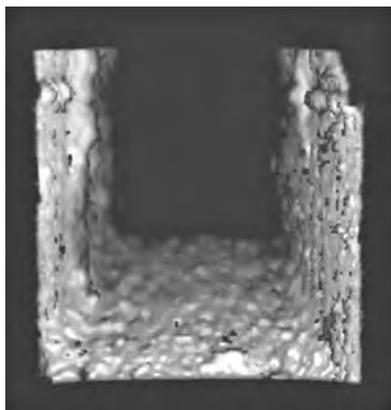


図-5 3D ソナー画像 (水路内部)

6. 今後の作業

本ロボット本体は水深 3,000 m まで耐えられる構造を採用しており、海底資源開発での調査や補助作業を見据えた研究開発を進めている。作業イメージを図-6 に示す。また、狭隘な水路トンネルなどの内部での調査のみではなく、構造物が損傷している箇所への補修や障害物の撤去など実際の作業まで行うことを見据えた研究も進める。その他、高さが 2 m を超える壁の調査は、水中重量を小さくし、スラストで壁に貼り付きながら壁面移動ができる装備を計画中的である (図-7)。

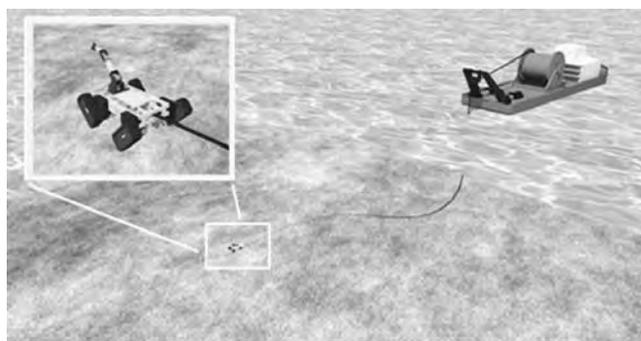


図-6 大水深での調査概要

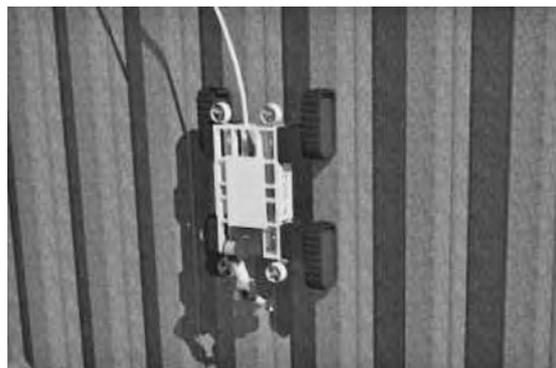


図-7 壁面調査時の姿勢制御方法

7. おわりに

本ロボット水中作業ロボットは、今までできなかった危険度の高い条件下での調査や作業を可能にするツールとして非常に有用であると考えている。本体上には様々な装置を装備できるようにスペースを設けてあり、多様な作業に対応して行きたい。また、日本の広い EEZ 内で確認されているレアアース³⁾などの海底鉱物資源開発にも寄与できるよう、取り組んでいく所存である。

JICMA

《参考文献》

- 1) 泉信也, 飯田宏, 津久井慎吾, 大村誠司, 高橋弘: 大水深対応型水中作業ロボットの開発, 第 25 回海洋工学シンポジウム, 日本海洋工学会, 2015.
- 2) 小川和樹, 泉信也, 高橋弘: 大水深対応型水中作業ロボットの開発, 建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, 一般社団法人日本建設機械施工協会, pp.49-54, 2015.
- 3) 経済産業省資源エネルギー庁, 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構: レアアース堆積物の資源ポテンシャル評価報告書, 2016.

【筆者紹介】

飯田 宏 (いいだ ひろし)
 東亜建設工業(株)
 土木事業本部 機電部 機械グループ
 担当課長

