

12. 大水深対応型水中作業ロボットの開発

東亜建設工業株式会社

○小川 和樹 泉 信也

東北大学大学院環境科学研究科

高橋 弘

1. はじめに

従来の水中土木工事においては、そのほとんどを潜水士による人力作業に頼っていたのが実情であり、潜水士の安全の確保・海中作業技術の伝承、施工能力の向上等の課題に常に直面していた。水中土木作業の効率化と安全性の向上に寄与するため潜水士搭乗型の中多機能作業機「水中バックホウ」が平成7年に開発・実用化され、捨石均し工事、水中掘削工事等々、現在に至るまで国内の様々な水中土木工事へ導入されている。

水中バックホウの水中土木工事での活躍が示されることで、大水深域や危険箇所等の過酷な環境での施工をはじめ、その適用範囲の拡大が求められるようになった。これに呼応して、このような施工条件においても、潜水士の安全性向上や施工能力の向上を実現していく必要があった。そのような課題を解決すべく遠隔操縦型水中バックホウ「イエローマジック7号」が新たに開発・建造されたり。それと同時に、重機の体感情報（視覚、聴覚、触覚）をオペレータへ提供する「水中バックホウ施工支援システム」も開発され、同機へ採用された。これにより潜水士作業では危険度が高いとされてきた条件下（暗渠、狭隘箇所等）での無人化施工も可能となった。

これらの水中バックホウは施工水深としては概ね30m以浅を対象としていたが、近年海洋資源開発などの機運も高まっており、水深数千mという過酷な水圧に対応可能な無人化施工システムが求められていること、またその一方で、従来の水中バックホウでは進入不可能な極めて狭隘な環境下での無人化施工システムも求められていることから、今回小型で大水深に対応可能な水中作業ロボット「DEEP CRAWLER（ディープクローラ）」を開発・実用化した。

本稿では DEEP CRAWLER の概要を紹介するとともに、その走行性能や耐圧性能の実証確認試験について述べる。また造船用ドックを使って水中走行試験や障害物の走破（乗り越え）試験、運転状況の可視化確認試験も行ったので、その結果についても報告する。

2. 大水深対応型水中作業ロボットの概要

2.1 4軸クローラによる高い走行性

今回開発した水中作業ロボット DEEP CRAWLER は、各種の地形・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特徴となっている。（図-1）

このクローラ装置は任意の角度に変更可能であり、走行地形や、走路上の障害物に応じて機体姿勢を任意に調整可能である。走行性能確認試験については後述する。

2.2 水深3,000mに対応可能な耐水圧性能

DEEP CRAWLER は今後の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対応可能としている。耐水圧性能確認試験についても後述する。

2.3 狭隘現場に適用可能なコンパクト設計

DEEP CRAWLER は、従来の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、図-1に示す通り、幅1.6m×長さ2.2m程度と非常にコンパクトな設計としている。

2.4 無人化施工可能な遠隔操縦システム

DEEP CRAWLER は、潜水士作業が不可能な現場にも適用可能とするため、光通信を活用した有線式遠隔操縦システムを採用している。

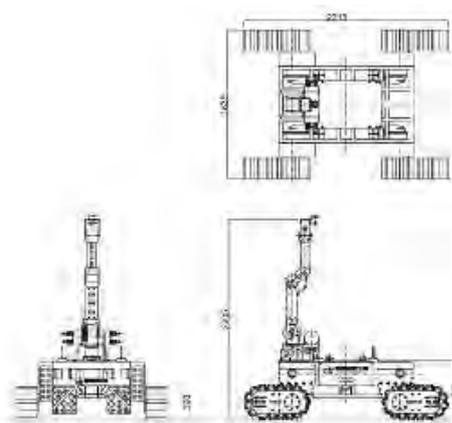


図-1 概略図

3. DEEP CRAWLER の走行性能試験

3.1 クローラ構成

写真-1 に示した通り DEEP CRAWLER は 4 軸式のクローラ構成となっている。不整地での走行性能を向上させるため、走行用のクローラを可動式とし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なっている。これにより、機体姿勢を自由変化させることができ、海底面の大きな岩などの乗越えが可能となる。また、フリッパは無限回転するため、障害物等により走行不能になった場合の回避性能が向上した。フリッパの姿勢は遠隔操縦システムのモニター画面で確認することが可能である。(図-2)

またクローラユニットは、クローラ用アクチュエータ、フリッパ用アクチュエータを構成するユニット単位で取外しが可能であり、メンテナンスが容易な構造となっている。(写真-2) またボディフレームの変更等にも対応が可能であり、拡張性が高くなっている。

3.2 各種走行試験

DEEP CRAWLER の実際の運転は水中での走行となるが、各種走行試験は、水中質量 800kg、ペイロード 700kg を想定し、気中質量 1.5t で陸上試験を行った。

(1) 走行性能

平坦な路面(傾斜 $\pm 3^\circ$ 以下)、気中質量 1.5t にて、以下の走行が可能であることを確認した。

① 走行速度約 0.35km/h

② 走行旋回及び超信地(その場)旋回

※旋回姿勢はフリッパを約 45 度とした。(写真-3)



写真-1 外観



図-2 遠隔操作システム 3D イメージ図



写真-2 クローラユニット



写真-3 旋回試験



写真-4 段差乗り越え試験



写真-5 リフトアップ試験

(2) 段差乗越え性能

写真-4 には段差乗越え試験状況を示す。気中質量 1.2t にて、約 120mm の段差乗越えが可能である。

また、動解析シミュレーションを用い確認した結果、200mm までの段差乗越えが可能であることを確認している。

(3) フリッパリフトアップ

写真-5 にはリフトアップ試験状況を示す。気中質量 1.5t にて、フリッパでの自重のリフトアップが可能である。これにより、本体姿勢を自由変化させることができるため海底面の大きな岩などに乗り上げた際の回避や乗越えが可能となる。

(4) マニピュレータ性能

DEEP CRAWLER には 4 軸の作業マニピュレータを搭載しており、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稼働範囲を図-3 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移動範囲は、第 1 軸約 $\pm 30^\circ$ 、第 2 軸 約 $0\sim 80^\circ$ 、第 3 軸 約 $0\sim 120^\circ$ 、第 4 軸 約 $0\sim 60^\circ$ である。

図-4 にマニピュレータ取付図を示す。マニピュレータ取付角度を 5 段階 ($0\sim 90$ 度) に傾けて取付けが可能であり、使用目的により変更が可能である。

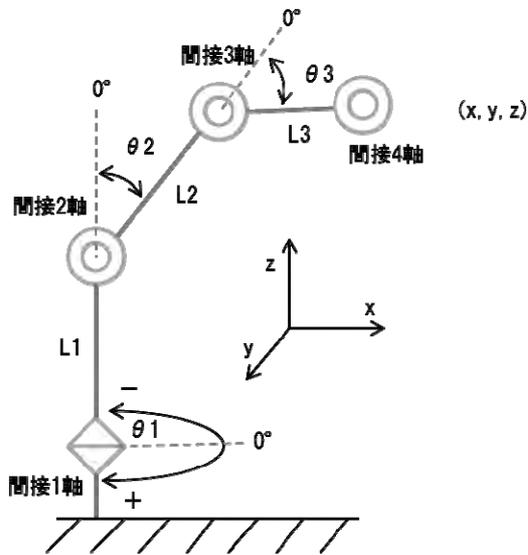


図-3 マニピュレータ稼働範囲

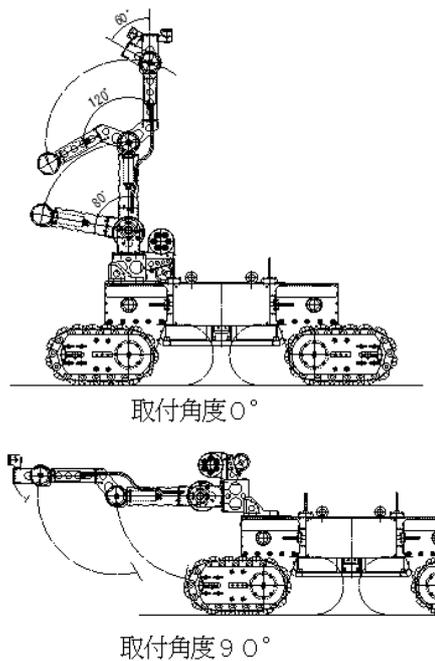


図-4 マニピュレータ取付図



写真-6 ロータリーアクチュエータ

4. DEEP CRAWLER の耐水圧性能試験

水中作業ロボット DEEP CRAWLER の開発にあたっては、技術的に可能な限り耐圧性能を高めている。

写真-6 に示す通り、クローラとフリッパにそれぞれ 4 軸、マニピュレータの根元と先端にそれぞれ 2 軸、耐水圧構造の回転アクチュエータを搭載しており、この耐水圧性能を高めることにより水深 3,000m (水圧 30MPa) にも耐えうる性能を確保している。

写真-7~写真-10 に今回開発したアクチュエータを示す。耐水圧構造のアクチュエータをモジュール化し、クローラからマニピュレータまで、組合せの自由度の高いアクチュエータとして開発した。

本アクチュエータは水深 3,000m(30MPa)の耐水圧を想定して設計されたが、実際の耐圧性能を確認するため写真-11 に示す耐圧試験を行った。各アクチュエータに 30MPa の圧力かけ、仕様通りの耐水圧性能を有していることを確認した。



写真-7 ロータリーアクチュエータ (クローラ)



写真-8 ロータリーアクチュエータ (フリッパ)



写真-9 ロータリーアクチュエータ
(マニピュレータ先端)



写真-10 ロータリーアクチュエータ
(マニピュレータ根元)



写真-11 アクチュエータ耐圧試験

5. DEEP CRAWLER の遠隔操作システム

大水深対応型水中作業ロボット DEEP CRAWLER には、遠隔操縦により無人化施工を可能とする有線式遠隔操縦システムを採用している。

5.1 姿勢センサ

写真-12 に遠隔操縦システムの操作画面を示す。ロボットの傾斜角度が把握できるように、ロボット本体に姿勢センサを搭載しており、機体が大きく傾いた時に動作を停止させ転倒防止としている。操作画面には、姿勢センサの情報及び機体やマニピュレータの状態を 3D で表示することにより、直感的な操作が可能である。写真-13 に傾斜させた DEEP CRAWLER 本体と、姿勢センサによって検知した 3D イメージ図を示す。



写真-12 操作画面



写真-13 姿勢センサ 傾斜確認

5.2 操作コンソール

写真-14 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、すべて単独で稼働し、海底面によっては非常に複雑な操作が求められる。そのため操作用のコントローラ（ゲームパッド）をクローラとマニピュレータ操作用の 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 内で指定しておくことにより、自動で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取り付けられており、各アクチュエータの誤操作を防止している。



写真-14 操作コンソール

6. DEEP CRAWLER の水中実証実験

6.1 水中走行確認

前記した通り、動解析シミュレーションを用いた室内走行性能試験により、DEEP CRAWLERは200mmの段差乗り越えが可能であることが確認されている。今後、実際に多様な形状をもつ海底にて走行し作業を行っていくにあたり、障害物の走破は不可欠な要素であると考えられる。

今回、東亜建設工業安善ヤード（横浜市）内に既存する造船用ドライドック（写真-15）を用いて、平坦な路面、ならびにドック底盤に高さ200mm程度の障害物を設置し、DEEP CRAWLERの走行性能確認試験を行った。写真-16にはDEEP CRAWLERのドックへの投入状況を示す。

(1) 平坦路面での走行性能

平坦な路面では、水中でも以下の走行が可能であることを確認した。確認方法としては、DEEP CRAWLERに取り付けた球形の浮きを水面に浮かばせ、その動きを目視確認した。

① 走行速度約 0.35km/h

② 走行旋回及び超信地（その場）旋回

(2) 段差乗越え性能

障害物は写真-17に示す通り、H200×200の型钢をコの字型に組み合わせたもので、外形寸法縦1m×横1mとして、水深約5mのドック底盤に設置し、これを乗り越える形で走行試験を行った。



写真-15 ドライドック（安善）



写真-16 着水状況

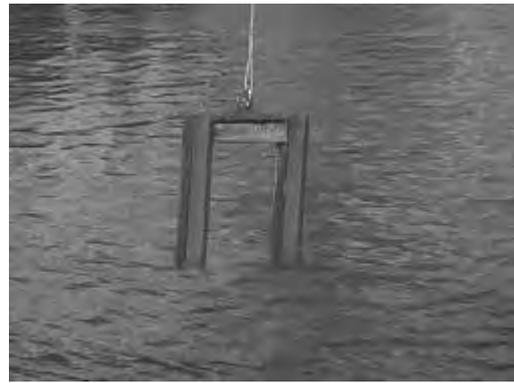


写真-17 障害物の形状



写真-18 Dual Freq. Identification SONar (DIDSON)

6.1 水中可視化確認

今回試験を行ったドック内の海水は透明度がそれほど高くなく、光学式TVカメラでは数十センチ程度の範囲でしか有効な映像を捉えることができなかつたため、水中でのDEEP CRAWLERの動きを可視化するために、水中音響カメラ Dual Frequency Identification SONar（以下 DIDSON、写真-18）を用いて水中における動作の確認を行った。

今回使用した水中音響カメラ（DIDSON）は、1.8MHz及び1.1MHzと極めて高い周波数の超音波を使用した音響ビデオカメラであり、音響ビームによる反射でターゲットを映像化するものとなっている。また1.1MHzの標準モードでは、約40m遠方のターゲットを撮影することができる。今回の試験では、DIDSONとDEEP CRAWLERの距離は約10m程度であり、図-5に示すような状況にて撮影が行われた。実際に撮影されたDEEP CRAWLERの作動状況を写真-19に示す。

DIDSONによって撮影された映像により、DEEP CRAWLERが障害物を乗り越えていく様子を視認することができた。

今回の試験ではDEEP CRAWLERの動きを確認するために、DIDSONをドライドック壁側に固定し撮影を行ったが、今後想定される実施工では、DEEP CRAWLER本体にDIDSONなどの視認装置を取り付け、作業対象物や周囲の状況を可視化確認する方法が考えられる。また、現状では3Dイメ

ージ図と水中音響カメラによって得られた情報によって水中での動作を確認しているが、「イエローマジック7号」に搭載する体感式遠隔操縦システム（写真-20）のように、装置の動きに応じた傾斜・揺れを操作コントローラーによって体感できる簡易的なシステムの導入が求められる。

今後ともドライドックや海域を使った試験により、これらの知見を高めていきたい。

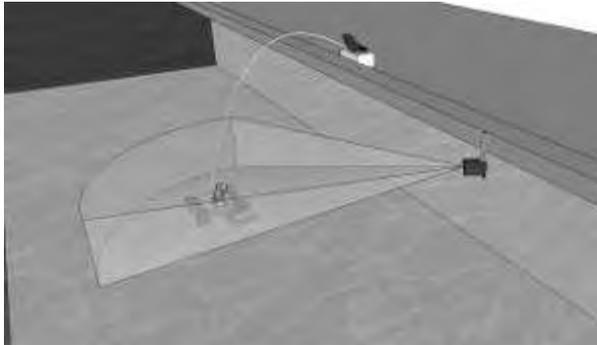


図-5 試験状況（イメージ図）

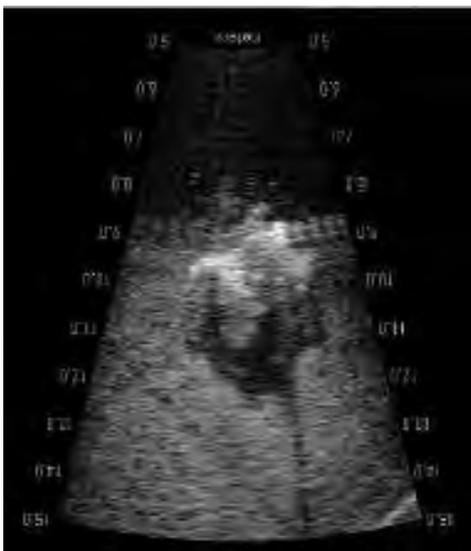


写真-19 DIDSON 画面



写真-20 体感式遠隔操縦システム

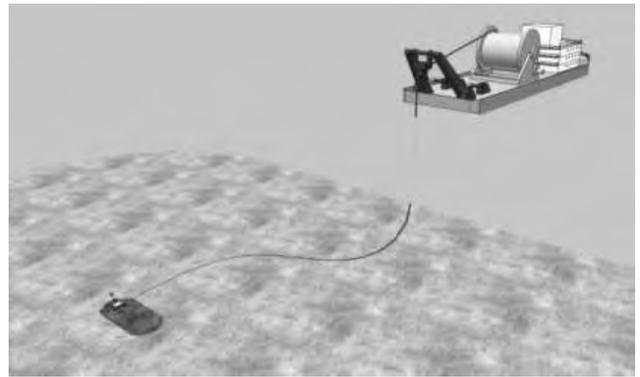


図-6 大水深での動作イメージ

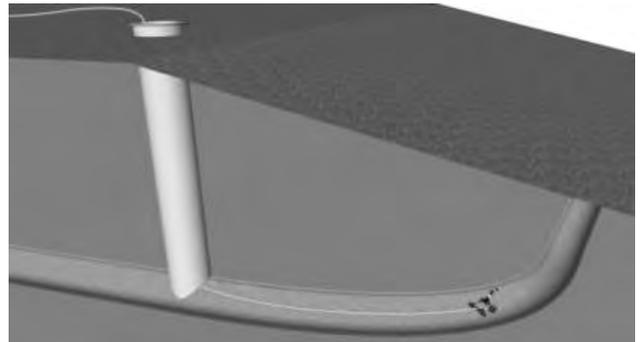


図-7 狭隘地での動作イメージ

7. おわりに

本稿では DEEP CRAWLER の概要を紹介するとともに、その走行性能や耐圧性能の実証確認試験について述べるとともに、造船用ドックを使った水中走行試験や障害物の乗り越え試験、運転状況の可視化確認試験の結果についても報告した。

水中作業ロボットは、今後の海洋開発（図-6）や、潜水士による作業が不可能な狭隘な現場（図-7）での活躍が期待されているが、図のような作業で求められる各種のアタッチメントを開発することによりその作業性や適応性を高めることができ、狭隘現場や大水深での各種調査・作業に活用できるものと考えている。

また対象とする海底などの地盤・土質と走行性能との関係、すなわちトラフィカビリティについても、今後各種実験や実証試験を行うことにより確認していきたい。

参考文献

- 1) 飯田宏, 森澤友博, 泉信也, “水中バックホウによる海底鉱物資源掘削に向けた開発”, 第 24 回海洋工学シンポジウム, OES24-061, pp.1-4. 2014.