

原子力発電所の廃止措置に向けた水中調査用遊泳ロボットの基盤技術開発

Development of underlying techniques for underwater survey robot to decommission nuclear power plants

(株)日立製作所	小林 亮介	Ryosuke KOBAYASHI	Non-member
(株)日立製作所	河野 尚幸	Naoyuki KOUNO	Non-member
日立GE(株)	大谷 健一	Kenichi OTANI	Non-member
日立GE(株)	山田 泰一郎	Taiichiro YAMADA	Non-member
日立GE(株)	高取 洋介	Yousuke TAKATORI	Non-member
日立GE(株)	稲田 崇	Takashi INADA	Non-member

This paper describes localization and cable handling method as the underlying techniques for underwater survey robot. Map matching method comparing cross-sectional shape data cut from a 3-D CAD with structural shapes measured by a range sensor is proposed as the localization. The cable handling system mounted to a robot is developed to operate the cable remotely. Some experiments to evaluate performance of the proposed techniques were implemented at mock-ups of a reactor building and the real field. As a result, it was confirmed that the position was detected with an accuracy of 100 mm, and 100m cable was handled.

Keywords: Decommissioning, Underwater Robot, Localization, Cable Handling, Map Matching

1. 緒言

東京電力福島第一原子力発電所の廃止措置に向けた対応においては、構造物が複数存在する狭隘空間での調査や作業が必要となる[1]。水中調査においては、対象箇所へのアクセス自由度が高い遊泳ロボットが有効であるが、操作者がロボットを直接目視できず、搭載カメラの映像により位置を把握するため時間を要する。また、電力の供給やセンサ信号の授受をするケーブルを長距離引き回すため、移動中にケーブルが構造物等に拘束されロボットの動作を阻害する可能性がある。

本研究では、水中調査用遊泳ロボットの基盤技術として、狭隘環境に適用できる自己位置検知技術と長尺ケーブル処理技術を開発する。本報告では、開発技術の詳細と、実機模擬環境及び実機トラス室で性能を評価した結果について述べる。なお、本報告の技術は、資源エネルギー庁の発電用原子炉等事故対応関連技術基盤整備事業（遠隔技術基盤の高度化に向けた遊泳調査ロボットの技術開発）に係る委託契約にて開発したものである。

2. 自己位置検知技術

2.1 方式検討

本技術を搭載することを想定している水中遊泳ロボットの状態は、6つの量、すなわち、3次元の位置と3軸周りの姿勢により定義される。位置検知においては、これらの量を検出する必要があるが、特に3次元の位置（水平位置と垂直位置）と移動方向である方位は、ロボット操作者にとって重要な情報である。表1に、位置検知方式の検討結果を示す。水中で利用可能な方式として、ロボット本体の外部に設置したカメラや音響センサ等の情報からロボットの絶対位置を同定する外界センサ方式、ロボット本体に内蔵した角速度センサや加速度センサ等の慣性センサの情報から相対位置を算出する慣性センサ方式[2]がある。

表1 位置検知方式の検討結果

	内容	狭隘部適用性	遊泳ロボット適用性	位置検知性能
外界センサ方式	ロボット外部に設置したセンサ情報から絶対位置を算出	低	低	ロボットが構造物等の死角に入ると検知不可
慣性センサ方式	ロボット内部の慣性センサ情報から算出した移動量を積算	高	高	移動量の誤差が蓄積して検知誤差大
マップマッチング方式	設計データから作成したマップと計測した形状データから絶対位置を特定	高	高	マップと比較するため検知誤差小

連絡先:小林亮介、〒319-1221 茨城県日立市大みか町7-2-1、(株)日立製作所 日立研究所、
E-mail: ryosuke.kobayashi.xc@hitachi.com

外界センサ方式は、複数の定点カメラや超音波音源を挿入する必要があるため、構造物が多く設置箇所に制約がある狭隘部での使用は困難である。また、ロボットが構造物等の死角に入ると外部に設置したセンサで捉えることができないため、遊泳ロボットへの適用性も低い。一方、慣性センサ方式は、ロボット内部のセンサ情報のみで位置を算出するため、狭隘部への適用性と遊泳ロボットへの適用性ともに高い。しかし、移動量を積算して基準点からの位置を算出しているため、移動量に含まれる誤差が蓄積し、最終的に絶対位置の誤差が大きくなる。

上記2方式に対し、マップマッチング方式は、適用環境に存在する構造物の3次元設計データから作成したマップと、形状計測センサで計測した構造物の形状データをマッチングして絶対位置を特定する。本方式は、慣性センサ方式と同様に、ロボット内部に搭載した形状計測センサの情報のみで位置を算出するため、狭隘部への適用性と遊泳ロボットへの適用性ともに高い。さらに、マップと比較して絶対位置を算出するため、蓄積誤差の影響がなく、位置検知誤差も小さいと考えられる。

従って、本研究ではマップマッチング方式をベースとして開発する。なお、本報告では、ロボット搭載前の要素開発として、センサユニットを試作して基本性能を評価した。

2.2 提案手法

遊泳ロボットへの搭載性を考慮し、構造物の形状データは、小型軽量の装置化が可能な2次元走査タイプの形状計測センサを用いて取得する。そして、構造物形状の計測結果と構造物設計データの断面形状情報を照合するマップマッチング方式を開発した。図1に構成を示す。圧力センサから算出される水深（垂直位置）の情報から2次元断面をマップとして逐次切出し、水平方向の2次元構造物形状測定結果とマッチング処理を実施することでロボット位置を算出する。

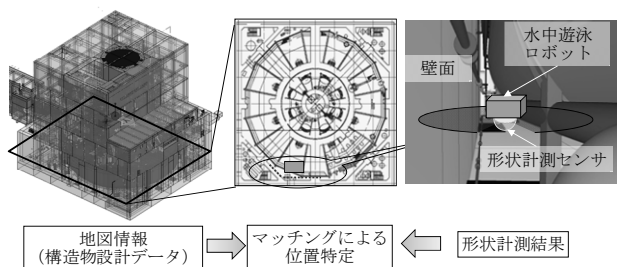


図1 位置検知方式の構成

3. 長尺ケーブル処理技術

3.1 方式検討

本技術を搭載することを想定している水中遊泳ロボットは、構造物が複数存在する狭隘空間を移動する。また、水中部へのインストールにおいても、ケーブルが接触する構造物が存在する可能性がある。表2に、ケーブル処理方式の検討結果を示す。処理方式として、遊泳ロボットをインストールする開口部近傍にケーブル送出し・巻取り装置を設置する地上設置方式、ロボット本体にケーブル送出し・巻取り装置を搭載する移動体搭載方式がある。

地上設置方式は、ロボットがケーブルを牽引しながら移動するため、ロボットの推進力を大きくする必要がある。また、途中のケーブルが構造物等に拘束された場合、移動することが困難となる。一方、移動体搭載方式は、ロボットの移動量と移動方向に応じてケーブル送出し・巻取り量を調節できる。そのため、ロボットによりケーブルを牽引する必要がなく、構造物等へ拘束される可能性も低い。本方式は、ロボットに搭載できる小型軽量の装置とすることで、狭隘部を移動するロボットへ適用できると考える。

従って、本研究では移動体搭載方式をベースとして開発する。なお、本報告では、基本性能を確認するために、2次元平面を移動する水上遊泳ロボットを用いて適用性を評価した。

表2 ケーブル処理方式の検討結果

	内容	特徴
地上設置方式	遊泳ロボットをインストールする開口部近傍にケーブル送出し・巻取り装置を設置	<ul style="list-style-type: none"> ・ロボットによりケーブルを牽引する必要あり ・ケーブルが構造物に拘束された場合、移動が困難 ・推進器を大きくする必要あり
移動体搭載方式	ロボット本体にケーブル送出し・巻取り装置を搭載	<ul style="list-style-type: none"> ・ロボットによりケーブルを牽引する必要なし ・ケーブルが構造物に拘束される可能性低 ・ロボットのペイロードに制限あり

3.2 提案手法

ケーブル処理装置をロボットへ搭載するため、ケーブル直径と重量を小さくすることで、装置の小型軽量化を図る。図2に、搭載式ケーブル処理装置の構成を示す。ロボットへの給電は内蔵したバッテリーで行い、光ファイバケーブルでセンサ信号や制御信号のみを伝送する。また、ケーブル張力や送出し・巻取り量を監視し、ロボットの移動にあわせてケーブル処理装置を遠隔制御可能な構成とする。

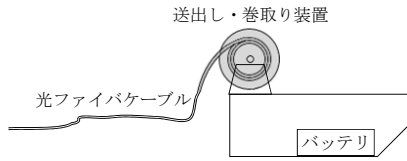
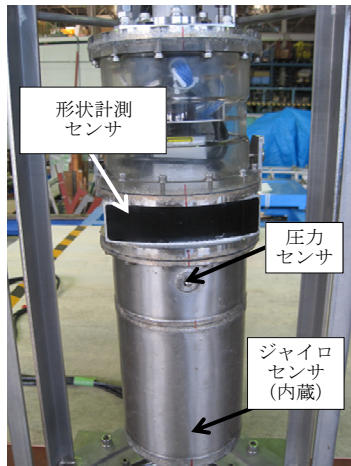


図2 搭載式ケーブル処理装置の構成

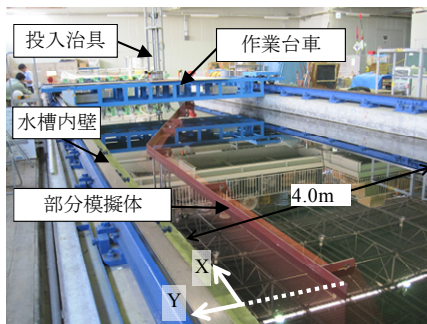
4. 試験結果と考察

4.1 自己位置検知技術の性能評価

本技術を搭載したセンサユニットを試作し、福島第一原子力発電所原子炉建屋地下階を模擬した環境において性能を評価した。センサユニット（図3(a)）には、構造物形状を計測する形状計測センサ、水深を計測する圧力センサ、方位角を計測するジャイロセンサを内蔵した。試験では、図3(b)に示すように、部分模擬体を水槽内に設置して、投入治具を用いてセンサユニットを水中へ投入し、真値と計測値を比較した。図4に、取得した形状データとマップのマッチング例を示す。図4より、部分模擬体と水槽内壁の形状の一部が計測できており、設計データより切出したマップ上で位置が特定できていることが分かる。



(a) センサユニット



(b) 試験設備の外観

図3 自己位置検知試験装置の構成

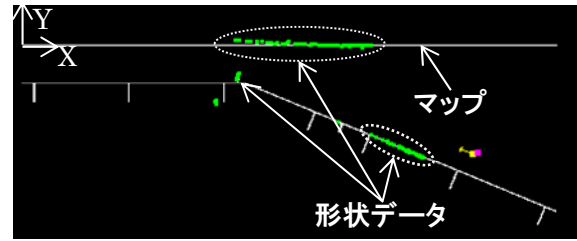
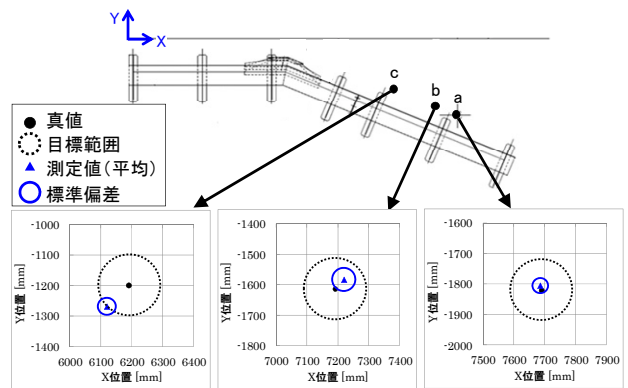
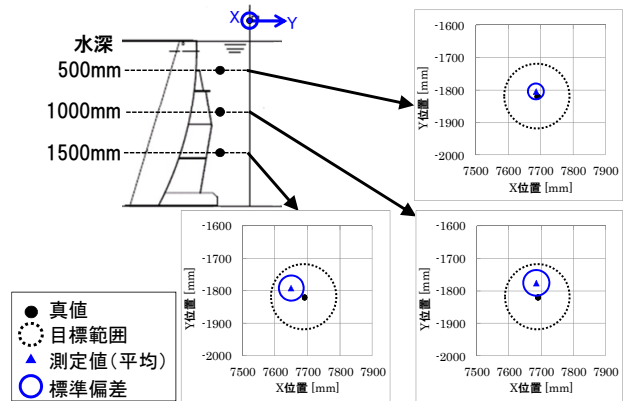


図4 形状データとマップのマッチング例

センサユニットの位置を水平・垂直方向へ変化させた場合の位置検知結果を図5に示す。図5より、ロボットの位置を概ね誤差 100mm 以内で検知できることが分かった。



(a) 水平位置変化時



(b) 垂直位置変化時

図5 位置変化時の位置検知結果

4.2 長尺ケーブル処理技術の性能評価

ケーブル処理装置を水上遊泳ロボットに搭載し、福島第一原子力発電所原子炉建屋地下階を模擬した環境において性能を評価した。図6に、試作したケーブル処理装置の外観を示す。ケーブル処理装置は、長さ 100m の光ケーブルを収納するリール部と、ケーブルの送出し・巻取りを支援するハンドリング部からなる。また、図7に本装置を搭載した水上遊泳ロボットの外観を示す。ロボッ

トには、周囲の状況確認に利用する気中・水中カメラ、ケーブル処理装置とケーブル本体を監視するカメラを設置した。試験では、図 8 に示すように原子炉建屋地下階を模擬した水路を製作し、100m の光ケーブルを送出し・巻き取りしながら航行できることを確認した。

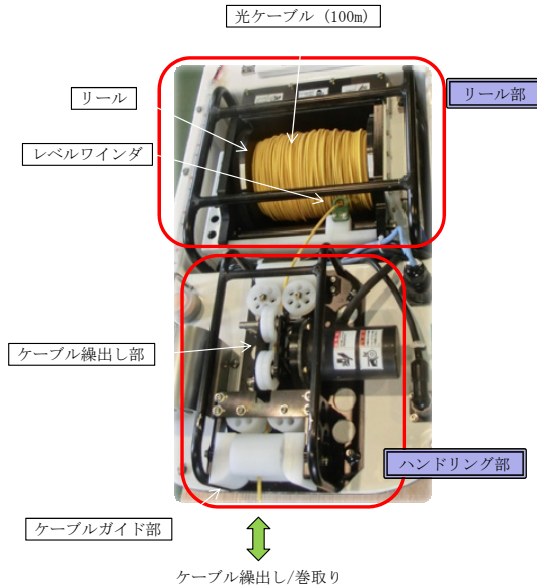


図 6 ケーブル処理装置の外観

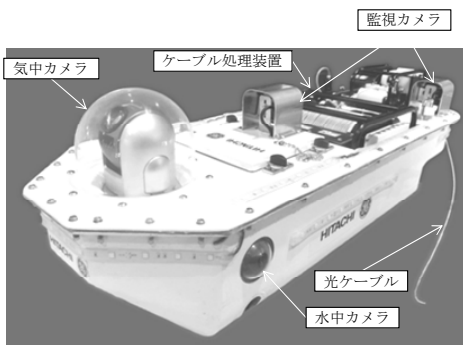


図 7 ケーブル処理装置を搭載した水上遊泳ロボット

4.3 実機検証試験の結果

福島第一原子力発電所一号機地下階のトラス室において、本研究で開発した技術の実証試験を実施した。その結果、自己位置検知技術については実機水質でも構造物形状を計測でき、マップと照合して位置を特定できる見通しを得た。また、長尺ケーブル処理技術については、ケーブルが構造物に拘束されることなく、引き回しできることを確認した。

5. 結言

水中調査用遊泳ロボットの基盤技術として自己位置検知技術と長尺ケーブル処理技術を開発し、実機模擬環境



(a) 試験設備の外観



(b) 航行試験の様子

図 8 実機模擬環境でのケーブル処理結果

において性能を評価した結果、誤差 100mm 以内で位置が検知できること、100m ケーブルの処理が可能であることを確認した。また、実機検証試験の結果、実機水質においても構造物形状が計測できること、ケーブルを引き回しながら水上ロボットが航行できることを確認し、実機環境においても開発技術を利用できる見通しを得た。今後、本技術を水中調査用遊泳ロボットへ適用し、狭隘空間での調査の効率化を図る。

6. 謝辞

本開発は、水中遊泳ロボットワーキンググループ（主査：九州工業大学 浦教授）のメンバー及び遠隔技術タスクフォース（主査：東京大学 浅間教授）関係各位のご支援、ご協力を受けて実施したものであり、深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 東京電力（株）福島第一原子力発電所 1～4 号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ（2013.6.27 改定），廃炉対策推進会議資料，2013.
- [2] S. Okada, R. Kobayashi, M. Tooma, Y. Takatori, Y. Kometani, "Development of the Tandem Underwater Vehicle System for Narrow Section Inspections", Proc. of the 7th Int. Conf. on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, Japan, 2009, pp.437-444.