

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	損傷原子炉内滞留汚染水の流れ場を計測するための超音波センサ搬送ロボットシステムの提案
Title(English)	Proposal of a Robot System Transporting an Ultrasonic Sensor for Measuring Flows of Contaminated Water in Reactor
著者(和文)	遠藤玄, 木倉宏成, 都築宣嘉, 木本和志, 柳瀬諒, 古村博隆, 中村吉秀, 難波江裕之, 鈴森康一
Authors(English)	Gen Endo, Hiroshige Kikura, Nobuyoshi Tsuzuki, Kazushi Kimoto, Ryo Yanase, Hiroataka Komura, Yoshihide Nakamura, Hiroyuki Nabae, Koichi Suzumori
出典(和文)	第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, Vol. , No. , pp. 477-480
Citation(English)	Proceedings of the 17th SICE System Integration Division Annual Conference, Vol. , No. , pp. 477-480
発行日 / Pub. date	2016, 12
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は公益社団法人計測自動制御学会に帰属します。 (c) 2016 The Society of Instrument and Control Engineers

損傷原子炉内滞留汚染水の流れ場を計測するための 超音波センサ搬送ロボットシステムの提案

遠藤 玄 (東工大), 木倉 宏成 (東工大), 都築 宣嘉 (エネルギー総合工学研究所), 木本 和志 (岡山大学),
○柳瀬 諒 (東工大), 古村 博隆 (東工大), 中村 吉秀 (東工大), 難波江 裕之 (東工大), 鈴森 康一 (東工大)

Proposal of a Robot System Transporting an Ultrasonic Sensor for Measuring Flows of Contaminated Water in Reactor

Gen ENDO(Tokyo Tech.), Hiroshige KIKURA(Tokyo Tech.), Nobuyoshi TSUZUKI(IAE), Kazushi KIMOTO(Okayama University),

○ Ryo YANASE, Hiroataka KOMURA, Yoshihide NAKAMURA, Hiroyuki NABAE, Koichi SUZUMORI(Tokyo Tech.)

Abstract : This paper proposes that measuring flows of contaminated water in reactor by using an ultrasonic sensor is effective as a way to specify leakage points. We describe a concept of a robot system achieving the task above, which transports an ultrasonic sensor and gets a position and an attitude of an ultrasonic sensor.

1. 緒言

東日本大震災により損傷した東京電力福島第一原子力発電所の廃炉措置に関する研究開発が行われている。その中でも最大の難関である燃料デブリの取り出しに向けて、カメラと形状変化型ロボットを用いた原子炉格納容器内部調査 [1] や宇宙線ミュオンを用いた燃料デブリの位置把握調査 [2] が行われているが、いまだ取り出しの段階に到達できていない。それは、燃料デブリを取り出す方法で最有力と考えられている冠水工法 [3] が格納容器内に水を満たし放射線の拡散を防止してから取り出しを行う方法であるため、原子炉内に漏洩箇所がある現状では水を満たすことができないからである。よって原子炉内漏洩箇所を特定して補修・止水を行うことが急務である。

筆者らは、すでに米国スリーマイル島原子力発電所 2 号機の事故の際に原子炉内の燃料形状を捉えた実績のある超音波計測に着目し、超音波流速分布計測技術とフェイズドアレイ信号処理を用いた 3 次元での滞留汚染水の流れ場の計測方法が有望であると考えている。そこで、この方法で多点計測を行うことによって Fig. 1 に示すように広範囲の流れ場を取得し、原子炉内漏洩箇所を特定する技術を開発する。

原子炉内はおおよそ 10 Sv/h と放射線量が高く、人が近寄って作業することが困難であるため、ロボットによりセンサを搬送することが不可欠である。本稿では、3 次元での滞留汚染水の流れ場の計測を行うロボットシステムを提案し、超音波センサを昇降させるウィンチ部分の試作と特にセンサ位置制御実験について述べる。

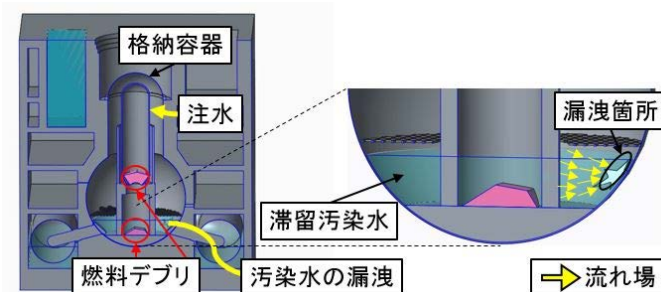


Fig. 1: Identification of leakage points by using flows of contaminated water

2. ロボットシステム

原子炉は格納容器とその内部にある圧力容器からなり、現状は圧力容器内の核燃料が溶け落ちて圧力容器直下あるいは格納容器にまで広がっている可能性がある。また、原子炉内には常時冷却水が注入されているものの、漏洩箇所があるため格納容器の底から約 2.8 m しか冷却水が溜まっていない。そのため漏洩箇所の特定と燃料デブリの位置の把握を行うロボットシステムが必要となる。

ここで、ロボットシステムは原子炉内につながる内径約 100 mm の経路を通ることができ、グレーチングという格納容器内の底から約 3.8 m の高さにある網目状に隙間ができた鉄板の上から計測を行えなければならないが、本稿では提案する計測方法の妥当性に注力するため、後者のみを考慮してロボットシステムを提案する。

Fig. 2 にロボットシステムの概略図を示し、以下に詳細を述べる。

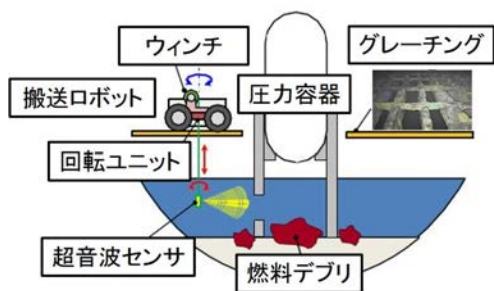


Fig. 2: Concept of proposed robot system

2.1 超音波センサ搬送ロボット

グレーチング上を走行し、周辺環境からの地図生成と障害物回避を行いながら超音波センサを搬送しなければならない。また、超音波センサのグレーチング平面上での位置の把握をするために自己位置推定を行わなければならない。

本研究では Fig. 3 に示すようにレーザレンジファインダ (LRF) を用いた Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) とカメラを用いたビジュアルオドメトリ (VO) を並行して行うことで、片方に問題が生じたとしても、もう片方で補完できるようなシステムを構築する。

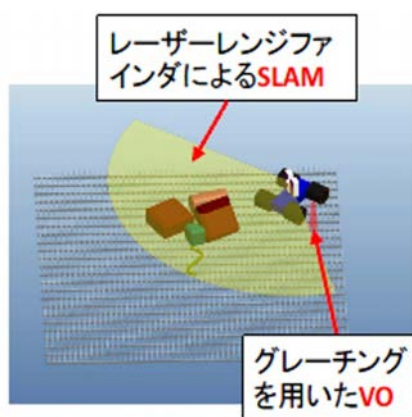


Fig. 3: Self position estimation by using LRF and VO

2.2 超音波センサの高さ・向き決め

原子炉内漏洩箇所の特定と燃料デブリの位置の把握を行うために、超音波センサを滞留汚染水内に投入して 3 次元での流れ場の取得や滞留汚染水内周辺環境の把握を行う。

Fig. 4 に本研究での計測方法の概略図を示す。

グレーチングの網目の隙間から超音波センサを懸架して超音波センサを滞留汚染水内に投入する。この時、ウインチで超音波センサの高さ・向きを制御することで滞留汚染水内の指定した位置での流れ場や周辺環境の取得を可能と

する。また、本研究で用いる超音波センサは Fig. 4 で示す 2 平面の流れ場の計測ができるので、ウインチでケーブル軸回りに回転させることで 3 次元での流れ場を取得することができる。この計測をグレーチング上の多点で行うことで広範囲の流れ場を取得する。

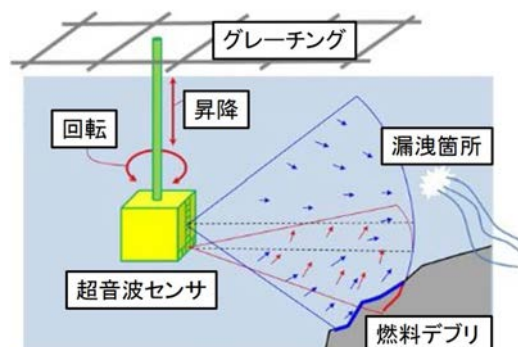


Fig. 4: Measurement of flows

3. 試作機の開発

3.1 超音波センサ

Fig. 5 に本研究で使用する超音波センサの外観と仕様を示す。

Fig. 4 に示すように超音波素子を十字に並べることで赤と青の扇で表される 2 平面の流れ場を計測することが可能である。計測方法の詳細は文献 [4] を参照されたい。



幅 [mm]	22
奥行き [mm]	30
高さ [mm]	34
重さ [kg]	0.135

Fig. 5: Two dimensional phased array ultrasonic sensor

3.2 超音波センサ搬送ロボット

Fig. 6 に製作した超音波センサ搬送用ロボットの外観と仕様を示す。

4 輪独立駆動で防水・防塵設計となっているほか、車体の中央部には空間があり、そこから超音波センサを降下させることができるようになっている。車体上にはウインチ、前

部には自己位置推定のためのカメラ、レーザーレンジファインダを装備できる。

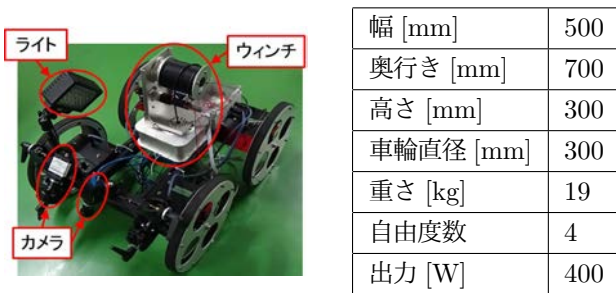


Fig. 6: Robot transporting an ultrasonic sensor

3.3 周辺環境の把握と自己位置推定

カメラを用いて、VO による自己位置推定の実験を行った。現在と一時刻前のカメラ画像における特徴点の移動量よりロボット自体の移動量が分かるので、各時刻での移動量を積算することで自己位置推定を行った。Fig. 7 に示すのは各時刻のカメラ画像を特徴点をもとに張り合わせて作成した超音波センサ搬送ロボットの移動経路を示す地図である。

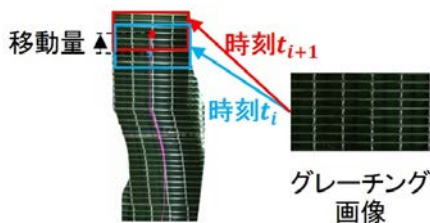


Fig. 7: Experimental result of self position estimation by using VO

3.4 ウィンチの試作と実験

3.4.1 試作機

Fig. 8 に示すウィンチ試作機の製作を行った。試作機はケーブルを巻き取るスプール、スプールを回転させるための DC モータ、ケーブル軸まわりに超音波センサを回転させるケーブル軸回転ユニット、スプールの回転によりケーブルが捻じれるのを防ぐためのスリップリングからなる。

3.4.2 センサ位置制御実験

Fig. 9 に示すようにケーブルの先に超音波センサのダミーを取り付けて指定した長さ分だけ降下させる実験を

行った。ここで、スプールを回転させるための DC モータには指定した長さをスプールの円周で割り、回転量に変換した値を指令値として出し、降下した分の長さをスケールで計測をした。

結果は、指定した降下量とスケールで計測した降下量に 100 mm につき 25 mm 程度の誤差は出てしまうが線形関係にあるため補正することで超音波センサを指定の位置に降下できることが確認できた。また、降下中にケーブル軸まわりに回転が生じてしまうという新たな課題を確認した。

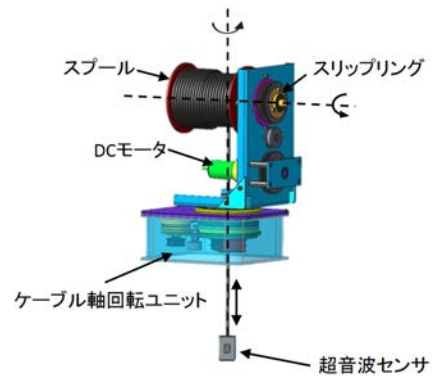


Fig. 8: Experimental model of winch

■ 実験全体図



Fig. 9: Experiment of position control of a dummy sensor

4. 結言

本稿では 3 次元での滞留汚染水の流れ場の計測を行うロボットシステムを提案し、特にウィンチ部分の試作とセンサ位置制御実験を行った。その結果、補正することで指令値と同じ分だけ超音波センサを降下させることが可能であることが確認できた。また、降下中にケーブル軸まわりに回転が生じるという課題を確認した。今後はこの回転を打ち消す方法を模索し、原子炉モックアップ施設にて流れ場の取得実験を行う予定である。

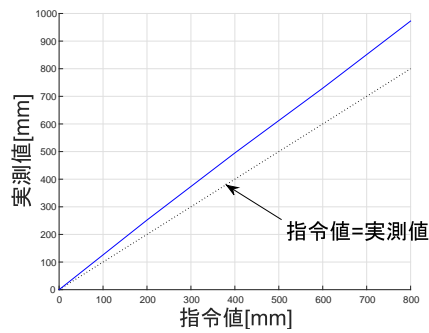


Fig. 10: Experiment result of position control of a dummy sensor

5. 謝辞

本研究は、「文部科学省英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」により実施された「漏洩箇所特定とデブリ性状把握のためのロボット搬送超音波インテグレーション」の成果である。

参考文献

- [1] 原子炉格納容器内部調査装置（形状変化型ロボット）の実証試験の実施について
<http://irid.or.jp/research/20150420/>
 (アクセス日:2016年9月20日)
- [2] 福島第一原子力発電所2号機ミュオン測定による炉内燃料デブリ位置把握について
<http://irid.or.jp/wp-content/uploads/2016/07/20160728.pdf>
 (アクセス日:2016年9月20日)
- [3] 燃料デブリ取り出しに向けての「冠水工法」CG
<http://irid.or.jp/video/>
 (アクセス日:2016年9月20日)
- [4] 福本 拓哉, 塚田 圭祐, 井原 智則, 都築 宣嘉, 木倉 宏成: 超音波フェイズドアレイ技術を用いた二次元流速分布計測法に関する研究, 流体工学部門講演会講演論文集, SG04 (2014)