T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ Science Tokyo Research Repository

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 Reacter	
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, Hirotaka 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), 〇柳瀬 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 Reacter

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

 \bigcirc Ryo YANASE, Hirotaka 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,ウィン 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, ウィンチでケーブル軸 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.車体上にはウィンチ,前 部には自己位置推定のためのカメラ、レーザレンジファイ ンダを装備できる.



幅 [mm]	500
奥行き [mm]	700
高さ [mm]	300
車輪直径 [mm]	300
重さ [kg]	19
自由度数	4
出力 [W]	400

Fig. 6: Robot transporting an ultrasonic sensor

周辺環境の把握と自己位置推定 3.3

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

ウィンチの試作と実験 3.4

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

結言 4.

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)