P22-06 核融合実験炉用ブランケット遠隔保守ロボットの開発

Development of Remote Handling Robot for ITER Blanket

正角 館 聡, 正 檜 山 昌之, 正岡 潔, 柴 沼 清

Satoshi KAKUDATE, Masayuki HIYAMA, Kiyoshi OKA, Kiyoshi SHIBANUMA

Abstract: Remote maintenance is an essential technology of the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) since the in-vessel components such as blanket are scheduled to be replaced remotely. Major object of the development of the remote robot is to verify the feasibility of sensor based control for rail deployment and module replacement. This paper describe a new control scheme of sensor based control regarding the rail deployment and module replacement.

Key Words: ITER, Blanket Maintenance, Remote Handling Robot, Sensor Based Control

1. はじめに

核融合実験炉の中心部分を構成するブランケット（最大 4.5ton/1 個）は、DT 燃焼により放射化されるため、その保守・交換は全て遠隔機器で行う必要がある。このため真空容器内に円弧状の軌道を敷設し、軌道上を走行するビークル/マニピュレータによって保守・交換を行う方式を採用した（図 1）[1]。本報では、核融合実験炉用遠隔保守ロボットの主要な技術である 1) 真空容器内へロボットを自動敷設する技術、2) ブランケットの高精度な遠隔自動交換技術について報告する。

2. 遠隔保守ロボットの真空容器内部へのアクセス

(1) 軌道展開装置の概要

図 2 は、遠隔保守ロボットを真空容器内部へアクセスさせる装置であり、遠隔保守ロボットは、真空容器ポート部より内部にアクセスする。本ロボットは、ブランケットをハンドリングするビークル/マニピュレータ、ロボットの自重及び作業荷重を支持し周方向ガイド機能を有する軌道、軌道接続機構、軌道展開装置より構成され、搬送キャスクによって搬送する方式(Cask based IVT)である。特に、軌道は、構造強度および機構としての信頼性を向上させるために関節部には駆動源を一切持たせていない。

(2) 軌道展開動作（運動）

図 3 は、代表的な例として第 3 リンクを炉内に展開するときの動作手順を示す。搬送キャスク内部で接続された軌道は、ポート内部に一直線上に並べられると共に、ビークルは旋回アームで自重を支持され所定の位置に固定される。軌道展開のための動作自由度は、ビークルが軌道を周方向に送る自由度 $\theta 1$ 、および径方向に軌道を送る自由度 $\delta 1$ 、 $\delta 2$ の 3 自由度である。図 3 に示す軌道展開運動は、以下のようにまとめられる。

姿勢 A-C：ビークル（ $\theta 1$ ）によって軌道は周方向に送られると同時に、 $\delta 1$ 、 $\delta 2$ 軸によって一直線上の軌道が径方向に送られる。

姿勢 C-D： $\delta 1$ 、 $\delta 2$ 軸によって軌道は径方向に送られ、真空容器内に円弧化される。

第 4 リンク以降は、これを周期的に繰り返すことによって、180 度分のリングを真空容器内部に形成する。リング形成後は、ビークルが軌道上を走行可能となる。

(3) 展開動作に関わる制御法および結果

これまで、軌道の展開動作には一般産業用ロボットで用いられる教点再生法（位置制御）を適用してきたが、協調ブレにモータトルクの急激な変動が、円滑な展開動作を阻害する問題があった。このため、軌道展開中の急

Fig.1 Remote Handling Robot for ITER blanket

Fig.2 Cask based IVT

激なトルクの変動や高いトルクを緩和するため位置制御とトルク制御を併用する制御法を適用した。図4は、位置制御だけの場合とトルク制御を併用した場合のビークル($\theta 1$)および径方向移動軸($\delta 1$)のトルク出力を比較している。教示再生方式に比較しトルク制御の併用により動作中のトルク出力は減少し、滑らかな展開動作が実現されている。

Fig.3 Procedure of rail deployment

Fig.4 Test result (motor torque)

3. 遠隔自動交換技術

真空容器内は、放射線強度が高くカメラの使用が制限されるため、視覚情報に依存した操作法(テレオペレーション)が使用できないことや、熱変形によるブランケットの位置ズレ等が生じるためブランケットと遠隔機器の相対位置を計測し、計測情報をフィードバックするセンサ(位置・力)情報に基づいたブランケット交換(取り付け/取り外し)技術が必要である。

(1) ブランケット取り付け部構造およびセンサ配置

図5はブランケットの取り付け部構造とエンドエフェクター上のセンサ配置を示す。ブランケットは、電磁力を強固に支持するため、 $\pm 0.25\text{mm}$ 以下の高いはめ精度を有するキー構造である。このため、キーとブランケット間との相対位置関係を正確に測定するためにエンドエフェクターには、距離センサ及び歪みゲージを利用した接触センサを配置させている。

(2) センシング方法

距離センサと接触センサの機能は、それぞれ粗位置決め($\sim 10\text{mm}$)、精密位置決め($\sim 3\text{mm}$)の機能を有し、粗計測から精密計測という段階を経て対象物体に徐々に近づいていくと同時に計測精度を上げていく。粗位置決め用の距離センサはスキャニング動作により測定対象との距離や測定対象の特徴点となるエッジ情報を基準とし、6個(並進3軸、回転3軸)の相対的な位

置関係を算出する。把持穴やキーのエッジ部分の同定法は、距離情報の急激な変化として現れる特異性を利用してエッジ位置を同定するエッジ検出法を採用した。最終的な位置決めは、精密位置決め用の接触センサによって行う。基本的には、接触させたときの信号とロボットの姿勢角信号を基に、相手面との相対的な位置・姿勢を算出し、エンドエフェクターの位置姿勢を補正する。

(3) センシング結果(接触センサー)

表1は、ブランケットを取り付ける場合の接触センサによる最終位置決め誤差を示す。特に、キーと溝のはめ合いに関係する z ($\approx 2.5\text{mm}$)及び y 軸回りの回転($\approx 0.45\text{deg}$)については、はめあいギャップ $\pm 0.25\text{mm}$ を越えているが、マニピュレータの機械的剛性が誤差を吸収できる程度に柔らかいために、キー前面にある 10mm の面取り部に沿いながらスムーズな挿入動作が可能であった。

Table 1 Positioning error by contact sensor
in case the blanket installation

	X	Y	Z
Translation error(mm)	3	-1.5	2.5
Rotation error (Deg.)	0.08	0.45	-0.12

4. まとめ

ブランケット遠隔保守ロボットの開発における主な成果は、以下のようにまとめられる。

(1) 位置制御とトルク制御を併用した制御手法によって、滑らかな敷設/収納運動を実現し、敷設/収納時間の目標値である15時間以下での展開を実現した。

(2) 高い嵌合精度($\sim \pm 0.25\text{mm}$)を有するブランケットの取り付け部構造に対し、距離センサと力センサ(接触)により3次元的な位置ズレ量を補正するアルゴリズムを確立し、約30分でブランケットの高精度な取付けを実現した。

Fig.5 Blanket supporting structure and location of sensors for sensor based control

参考文献: [1]K.Shibanuma et al., Development of In-vessel Remote Maintenance System for Fusion Experimental Reactor (FER), Proc.91 Int. Symp. on Advanced Robot Technology, p.127(1991).