大重量物を扱うマニピュレータのための制御システムの開発 (ITERブランケット遠隔保守ビークル型マニピュレータへの適用)

吉 見 卓^{*1} 角 館 聡^{*2} 多 田 栄 介^{*2}
辻 光 一^{*1} 宮 川 信 一^{*1} 久 保 智 美^{*1}

Development of a Control System for a Heavy Object Handling Manipulator (Application to a Remote Maintenance System for ITER Blanket Module)

Takashi Yoshimi^{*1}, Satoshi Kakudate^{*2}, Eisuke Tada^{*2},
Kouichi Tsuji^{*1}, Shinichi Miyagawa^{*1} and Tomomi Kubo^{*1}

This paper describes a control system for the heavy object handling manipulator. It has been developed for the blanket module remote maintenance system of ITER (International Thermonuclear Fusion Experimental Reactor). A rail-mounted vehicle-type manipulator is proposed for the precise handling of a blanket module which is about 4 tons in weight. Basically, this manipulator is controlled by teaching-playback technique. When grasping or releasing the module, the manipulator sags and the position of the end-effector changes about 50 [mm]. Applying only the usual teaching-playback control makes the smooth operation of setting/removing modules to/from the vacuum vessel wall difficult due to this position change. To solve this proper problem of heavy object handling manipulator, we have developed a system which uses motion patterns generated from two kinds of teaching points. These motion patterns for setting/removing heavy objects are generated by combining teaching points for positioning the manipulator with and without grasping the object. When these motion patterns are applied, the manipulator can transfer the object's weight smoothly at the setting/removing point. This developed system has been applied to the real-scale mock-up of the vehicle manipulator and through the actual module setting/removing experiments, we have verified its effectiveness and realized smooth maintenance operation.

Key Words: Model-based Control System, Teaching-playback, Heavy Object, ITER, Blanket Remote Maintenance

1. は じ め に

現在、工学設計活動の段階にある ITER (国際熱核融合実験炉) においては、高い放射線環境下に設置されている大重量、大型の炉内構造物であるブランケットの保守・交換作業を高精度で行うため、炉内に敷設した軌道上を走行するビークルに搭載型のマニピュレータを用いた、新しい保守概念に基づく遠隔保守システム [1] の開発を進めている。このブランケット遠隔保守用ビークル型マニピュレータは、システムの信頼性や運転の容易性等を確保するため、一般の産業用ロボットに広く用いられている教示再生制御方式 [2] で動作することを基本としている。

教示再生制御方式の利点としては、マニピュレータの手先部

を目標位置へ実際に位置決めして教示操作を行えるため、一般に手先負荷によるたわみの影響や、マニピュレータの設置位置誤差、リンク長等の各パラメータの誤差の影響を除去することができる。しかしながら、ビークル型マニピュレータが扱うブランケットの重量は約 3~4 [ton] であり、このような大重量対象物を扱うマニピュレータにおいては、作業対象を把持してその重量がマニピュレータにかかっている状態と、そうでない状態でのマニピュレータ手先部のたわみ量が大きく異なるため、マニピュレータが作業対象を離したりその重量を受け取った瞬間に手先位置が大きく移動してしまい、作業が行えないという問題が発生する。また、一般に保守点検作業ロボットは作業環境内を対象機器の設置場所まで移動して作業を行うため、ロボットと作業対象の位置関係に誤差が含まれやすく、事前に設定された動作軌道に沿って忠実に動作を繰り返す教示再生制御方式では、目的の作業が行えないという問題が生じる。ビークル型マニピュレータの場合も、走行軌道が保守・交換作業実施時のみ炉内に敷設されるため、展開設置される軌道の位置決め誤差によっては毎回同一の教示点列では作業が行えない恐れがあ

原稿受付 2000 年 5 月 31 日

^{*1}(株) 東芝

^{*2}日本原子力研究所

^{*1}Toshiba Corporation

^{*2}Japan Atomic Energy Research Institute

る。以上のことから、ピークル型マニピュレータのような大重量物を扱う遠隔保守ロボットの制御システムに、従来のマニピュレータの教示再生制御方式をそのままの形で適用するのは困難である。しかし、これまでは大重量物を扱う大型マニピュレータに対するニーズが少なく、その制御システムにおいて、これらの問題が検討されることはなかった。

一方、マニピュレータの手先負荷の変動や、マニピュレータと作業対象との位置関係の変化に対応する技術的な方法として、作業環境やマニピュレータ自身の情報（環境モデル）と作業手順に関する情報（作業モデル）からロボットの実際の動作軌道を生成して作業を実行する、モデルに基づく作業システムが提案されている [3]～[9]。この方法を大重量対象物を扱うマニピュレータに適用すれば、システム内部にマニピュレータの詳細な機構モデルを持つことで、手先負荷の変動によるマニピュレータ手先位置の移動量を求めることも可能となり、マニピュレータが作業対象を把持する前後の負荷状態に応じた作業モデル（作業動作パターン）を作成することができる。また、マニピュレータと作業対象との位置関係が変化した場合には、環境モデルのデータを変更することにより、同一の作業モデルに基づく作業動作で、その時々状況に合わせた作業の実行が可能となる。しかしながら、モデルに基づく作業システムにおいては、マニピュレータの機構情報を含む正確な環境モデルや、それを用いて適切な作業動作を決定する作業モデルの作成が作業成功の鍵であり、それらを常に準備するのは容易なことではない。

以上のことから筆者らは、大重量物を扱う遠隔保守ロボットの制御システムとして、マニピュレータ手先のたわみや位置誤差の影響を容易に除去できる教示再生制御方式に、マニピュレータの負荷状態や作業対象との位置関係の変化に対応できるモデルに基づく作業システムの考え方を導入した、教示点データ列から生成した作業動作パターンを用いる制御システムを提案する。このシステムでは、マニピュレータが大重量物を把持している状態と把持していない状態での手先のたわみ量が大きく異なることから、まず、① 所定位置に設置された大重量の作業対象をマニピュレータで把持するまでの負荷を持たない状態でのマニピュレータ単独の動作、および ② あらかじめ作業対象を把持した状態のマニピュレータを所定位置に位置決めして作業対象を設置するまでの、負荷がかかった状態での動作を実現する教示点データ列をそれぞれ教示操作で作成する。次に、①と②の教示点データ列を組み合わせることで、所定位置での作業対象の取り付け／取り外し動作の際に、マニピュレータと相手側との間で負荷の受け渡しをスムーズに行いながら一連の着脱動作が行える作業動作パターンを作成する。これにより、大重量の作業対象を把持したことにより生じるマニピュレータ手先のたわみ量を正確に求めることなく、作業対象の取り付け／取り外し動作を実現する作業動作パターンが作成できる。さらに、マニピュレータと把持する作業対象との位置関係が変化した場合でも、作業動作パターンの基準座標系を環境情報データの変化に合わせて変更することで、容易に位置ズレに対応することが可能である。

本論文では、まず最初到大重量物を扱う遠隔保守ロボットの具体的な作業例として、ITER で計画されているブランケット

遠隔保守の概要について簡単に説明する。その後、大重量物を扱うマニピュレータに固有な課題を示し、それを解決する教示点データ列から生成した作業動作パターンを用いた作業対象の取り扱い手法、および位置ズレへの対応手法を備えた大重量物を扱うマニピュレータのための制御システムについて述べる。さらに、開発したシステムを、試作した可搬性能約 4 [ton] の実規模ブランケット遠隔保守ピークル型マニピュレータに適用した結果を示す。実験結果より、開発したシステムで、ブランケット取り付け／取り外し作業時のスムーズな負荷の受け渡し、軌道の収納／再展開による位置ズレへの対応が行え、提案した手法の有効性が確認できた。

2. ITER ブランケット遠隔保守の概要

ITER において、ブランケットは炉の内壁を覆う大重量・大型の炉内構造物であり、高い放射線環境下に設置される炉内機器の一つである。運転中にプラズマから高い熱負荷を受けて損傷するため、定期的な交換が必要となる。また、ITER の段階的運転計画に従って、すべてのブランケットを遮蔽ブランケットから増殖ブランケットに交換することが予定されており、現在までの工学設計活動の結果によれば、保守性の観点から約 400 個のモジュールに分割されたブロック形状の構造となっている。しかしながら、分割されたモジュール 1 個の重量が最大で約 4 [ton]、サイズが (W) 1.1 × (H) 1.5 × (D) 0.5 [m] 程度もあるため、その保守・交換作業には大重量、大型の構造物を安定かつ高い精度でハンドリングできる遠隔保守技術が要求される。そこで、Fig. 1 に示すような、炉内に敷設した軌道上を走行するピークル型マニピュレータを用いた新しい保守概念に基づく、ブランケット遠隔保守システムの開発が進められており、現在、試作した実規模試験システムによる試験検証が実施されている [10]。

ピークル型マニピュレータによるブランケットの交換作業は、炉内にピークル型マニピュレータの走行軌道を敷設後、以下の手順で進められる。

- (1) ピークル型マニピュレータが軌道上を作業位置へ移動し、専用ツールを炉壁の対象ブランケットへアクセスしてボルトによる仮固定、溶接部切断を行う。
- (2) ピークル型マニピュレータは専用ツールをグリッパに持ちかえ、対象ブランケットの把持、仮固定ボルトの取り外し、ブ

Fig. 1 Remote maintenance system for ITER blanket module

Fig. 2 Configuration of vehicle and telescopic manipulator

ランケットの炉壁からの取り外しを行う。

(3) ビークル型マニピュレータはブランケットを保守用ポート部の搬送装置パレット上へ移送し、仮固定ボルトで固定後、グリッパを開いて離す。

(4) 取り外されたブランケットは、搬送装置により炉外へ搬送される。

(5) 以後は、ブランケット取り外し・搬出の逆手順により、新規ブランケットの搬入・所定位置への取り付けが行われる。

Fig. 2 に、ブランケットの着脱・搬送を行うビークル型マニピュレータの構成および座標系の設定を示す。基本構成は、直動軸を持つ 6 自由度のマニピュレータ＋軌道上を走行する走行機構であるが、可動範囲を大きく取るために、直動軸とビークルまわりの回転軸はそれぞれ二つのモータで駆動している。ブランケットの把持は、エンドエフェクタ部先端に用意された 4 本の L 字形の爪をブランケット表面の把持穴に挿入し、対向する 2 組の爪をスライド軸により開閉することで行う。さらに、エンドエフェクタ部には仮固定ボルトの締結／解除軸およびブランケット落下防止用ストッパーの動作軸が各 2 組備えられており、ブランケットや専用ツールの着脱・搬送が安全確実に行えるようになっている。

3. 大重量物を扱うマニピュレータのための制御システム

3.1 大重量物を扱うマニピュレータに固有な課題

ブランケット遠隔保守ビークル型マニピュレータの制御システムは、教示再生制御方式による運転を基本として構成している。前節に示したブランケット交換の作業手順において、マニピュレータが炉内の作業空間で周囲の拘束を受けずに動作し、目標ポイントへの位置決めを行っている部分については、マニピュレータが大重量のブランケットを把持している場合でも、各軸をあらかじめ用意した教示点データ列に従って再生運転することで、問題なく目的の動作を行うことができる。これは、教示再生制御方式で動作するシステムの場合、マニピュレータの手先部を目標位置へ実際に位置決めして教示操作を行うことができるため、マニピュレータの手先負荷の差異によるたわみ量の違

いを含んだ形で教示点データが作成され、その影響が再生運転時に現れないからである。この他に、教示再生制御方式の利点として、マニピュレータの設置位置誤差やリンク長等の各パラメータ誤差の影響が容易に除去可能である。しかしながら、マニピュレータがブランケットを炉壁から取り外したり、搬送装置パレット上へ設置後に把持爪を引き抜く部分では、約 4 [ton] のブランケット重量がマニピュレータと作業の相手側（炉壁／パレット）との間を瞬間的に移動するため、マニピュレータに作用する負荷変動の影響でたわみ量が変化し、作業がスムーズに行えないだけでなく、最悪の場合、マニピュレータが大きな衝撃力を受けて破損してしまう恐れがある。

以上、ブランケットの交換作業を例に説明したが、マニピュレータによる大重量物の着脱動作において、手先に作用する負荷が大きく変動する部分では、従来の教示再生制御方式が対応できないことから分かるように、一般に大重量対象物を取り扱うマニピュレータには、自身に対する負荷変動の影響でたわみ量が変化し、手先位置が大きくずれるという固有の課題が存在する。したがって、大重量物を扱う場合、この負荷変動による手先位置のずれを吸収し、負荷変動をなだらかに生じさせることが可能な制御方式が必要となる。そこで我々は、教示再生制御方式で動作する大重量物を扱うマニピュレータに、モデルに基づく作業システムの考え方を導入し、教示点データ列を用いて大重量の作業対象を把持・設置する際の負荷の変動を緩やかに生じさせる作業動作パターンを生成した。それに沿ってマニピュレータを動作させることで、スムーズな大重量物の取り付け／取り外し動作を行うことができる。教示点データ列から重量物の取り付け／取り外し動作のための作業動作パターンを生成する具体的な方法については、次節で詳細に説明する。

3.2 教示点データ列から作成した作業動作パターンを用いた大重量物を扱うマニピュレータのための制御システム

大重量対象物を取り扱うマニピュレータに共通の固有な課題を解決し、負荷変動による手先位置ずれ量の補償、なだかな負荷変動を実現するために、教示点データ列から大重量物の取り付け／取り外し動作を行うマニピュレータの作業動作パターンを生成した。作業動作パターンの生成においては、所定位置に設置された作業対象をマニピュレータで把持するまでの動作、および、あらかじめマニピュレータで把持した作業対象を所定の設置位置に位置決めするまでの動作を実現する教示点データ列をそれぞれ教示操作により作成し、両者を組み合わせることで、マニピュレータが手先の対象物を着脱する際に、マニピュレータと周囲環境との間で負荷のスムーズな受け取り／受け渡しを実現する動作パターンを生成している。なお、ここで用いる各教示点データは、Fig. 2 中に示したビークル型マニピュレータ基準座標系 ΣV で表現したマニピュレータ手先の仮想的な目標位置／姿勢データ列（三次元目標位置データとオイラー角表現の目標姿勢データの集まり）であり、マニピュレータの各軸データを順座標変換することにより求める（マニピュレータ自身のたわみ量は考慮されないため、必ずしも実際の手先位置・姿勢とは一致しない）。大重量物の取り外し動作（炉壁バックプレートからのブランケット取り外し）および取り付け動作（炉壁バックプレートへブランケット取り付け）の作業動作パター

ンの生成は、具体的には以下の手順に従って実施した。

まず最初に、次の二つの動作について実機のマニュアル誘導による教示操作を行い、それぞれの教示点データ列を生成する。
[A] 大重量対象物を把持するまでの無負荷アクセス動作教示点データ列 An の生成

大重量対象物を把持する教示点データ列 An は、マニピュレータ手先を把持動作開始位置、把持位置へ順次誘導後、把持動作を行う教示点データ列で生成される。

ビークル型マニピュレータでは、 An は炉壁に設置されたブランケット表面の把持穴真正面近傍へマニピュレータ手先を誘導し、手先を前進させて把持爪を把持穴の所定深さまで挿入、その後把持爪を所定量だけ閉じ、ブランケット落下防止用ストッパーを動作させる教示点データ列となる。

[B] あらかじめ把持した大重量対象物を所定設置位置に位置決めするまでの有負荷アクセス動作教示点データ列 Bn の生成

大重量対象物を所定の設置位置に位置決めする教示点データ列 Bn は、あらかじめマニピュレータにて把持した大重量対象物を所定設置位置近傍の設置動作開始位置、所定設置位置へ順次誘導後、大重量対象物の固定動作を行う教示点データ列で生成される。

ビークル型マニピュレータでは、 Bn はあらかじめマニピュレータにて把持したブランケットを炉壁設置位置の真正面近傍へ誘導し、マニピュレータの手先を前進させて把持したブランケットを炉壁の設置位置まで移動、仮固定ボルトの締結軸を所定量動作させ、ブランケットを炉壁バックプレートへ仮固定する教示点データ列となる。なお、ブランケットの位置決めは、背面のテーパ付き位置決めピン（長さ 30 [mm]）を炉壁バックプレート上の位置決め穴に挿入することで行われる。

以上により、二つの教示点データ列 An 、 Bn が生成された。次に、これら二つの教示点データ列を組み合わせ、大重量対象物の取り外しおよび取り付けの作業動作パターンを生成する。

[C] 大重量対象物取り外しの作業動作パターンの生成

教示操作で生成した上記二つの教示点データ列を **Fig. 3** に示すように順につないで、大重量対象物を取り外す一連動作の教示点データ列 $Cn (= An, rev(Bn))$ を生成する。ここで $rev(Bn)$ は Bn の逆順を表す。この教示点データ列を相対座標系で記述したものが、教示点データ列から生成した、大重量対象物取り

外しの作業動作パターンである。

Fig. 3 は、ビークル型マニピュレータで炉壁からブランケットを取り外す一連動作における教示点データ列 Cn の、X 方向（軌道半径方向）および Y 方向（鉛直方向）をプロットしたものである。ブランケットを把持しに行くとき（教示点データ列 An ）と、炉壁から離すとき（教示点データ列 $rev(Bn)$ ）に、マニピュレータ手先は実際にはほぼ同じ領域を通過するが、ブランケットの負荷支持状況が異なるため、手先の仮想的な三次元位置・姿勢は同一とはならない。したがって、負荷支持状態である $rev(Bn)$ は、支持状態でない An の上方に位置することになり、全体としてコの字形の作業動作パターンが形成される。これにより、実際にはブランケットがともに所定の設置位置（同一位置）にある An の最後のポイントから $rev(Bn)$ の最初のポイントへマニピュレータが移動するときに、ブランケットの負荷が炉壁バックプレート側からマニピュレータ側へ移動して、負荷の受け渡しが行われることになる。

[D] 大重量対象物取り付けの作業動作パターンの生成

大重量対象物取り外し動作の教示点データ列を逆順にたどったのが、取り付け動作の教示点データ列 $Dn (= Bn, rev(An))$ である。取り外し動作同様、この教示点データ列を相対座標系で記述したものが、教示点データ列から生成した、大重量対象物取り付けの作業動作パターンである。また、マニピュレータが Bn の最後のポイントから $rev(An)$ の最初のポイントへ動作するときに、大重量対象物の負荷がマニピュレータ側から設置する相手側へ受け渡される。

ブランケット遠隔保守システムにおいては、以上示した方法の適用により、ビークル型マニピュレータによる炉壁バックプレートへのブランケットの着脱や搬送装置パレットとの間のブランケットの受け渡し／受け取りといった、マニピュレータの手先負荷が大きく変動する作業動作を実現する作業動作パターンを容易に作成することができる。なお、本手法では取り扱い対象の種類が増加した場合には新たな作業動作パターンの追加が必要であるが、多くの場合、保守点検作業を行う 1 台のロボットが扱う作業対象の種類には限りがあり、同一の作業動作パターンが利用される状況は多いと考えられる。このため、提案手法においては、必要な数の作業動作パターンを用意しておけば良い。ブランケット遠隔保守システムの場合も、約 400 個のモジュールに分割されたブランケットはドーナツ形状の炉の内側に **Fig. 4** に示すように配置されており、トロイダル（横）方向には同一形状のものが並んでいることから、全体としてポロイダル（縦）方向の 17 種類の形状・重量に分けられる。したがって、ビークルが走行軌道上を作業対象ブランケットの正面まで移動して取り付け／取り外し動作を行うとすると、作業動作パターンとしてはこれら 17 種類のブランケットに対応するものを用意しておけばよい。ただし、ハードウェアの制約等により、常にビークルを対象ブランケットの正面に移動できるとは限らず、この場合は異なる場所から作業を行うために、作業動作パターンの追加が必要である。これらの作業動作パターンに従ってマニピュレータを動作させる場合は、そこに記述されているマニピュレータ手先の目標位置・姿勢データ列を逆座標変換してマニピュレータ各軸の教示点データ列を作成し、教示

Fig. 3 Motion pattern made from teaching points

Fig. 4 Isometric view of blanket system

再生制御方式により再生運転を実施する。

ここでは、大重量物の取り付け／取り外し動作を実現するためのマニピュレータの作業動作パターンを、教示点データ列を用いて生成した。大重量物の取り付け／取り外し動作時に負荷の受け渡しを行う作業動作パターンを生成するには、マニピュレータが負荷を支持したことにより生じる手先のたわみ量をマニピュレータの機構モデルなどを用いて計算により求め、その結果を利用してマニピュレータの動作目標位置・姿勢データを生成することも可能である。しかしながら、実機を動作させて教示操作を行えば、大重量の作業対象を把持してマニピュレータ手先を所定の把持・設置位置へ誘導することで負荷支持状態での各軸の教示点データ列が、また、作業対象を把持せずにマニピュレータ手先を把持・設置位置へ誘導することで負荷を支持していない状態での各軸の教示点データ列が容易に求まり、それらを順座標変換したマニピュレータ手先の目標位置・姿勢データ列をつなぐことで、大重量の作業対象を把持したことにより生じるマニピュレータのたわみ量を正確に計算することなく、簡単に負荷受け渡し動作を含んだ大重量物の取り付け／取り外しを実現する作業動作パターンを作成することができる。

以上示したように、我々は教示再生制御方式にモデルに基づく作業システムの考え方を導入することで、教示点データ列から作業動作パターンを生成し、それを用いた大重量物を扱うマニピュレータのための制御システムを構成した。これをピークル型マニピュレータに適用することで、ブランケットの交換作業がスムーズに行えるようになる。

3.3 位置ズレへの対応

本手法では、モデルに基づく作業システムの考え方を導入したことから、作業動作の内容を記述した作業動作パターンと作業環境の情報をその都度組み合わせ、具体的なロボットの動作プログラム（動作目標値列）を生成する。このように、教示点データ列を用いて生成した相対座標系記述の作業動作パターンを利用することで、作業環境の変動に対応した教示点データ列をそのつど容易に作成できるというメリットが得られる。作業現場へ移動して作業を行う多くの保守点検ロボット同様、ブランケット遠隔保守システムの場合も、毎回の保守作業実施の際

にマニピュレータが動作する軌道を外部から敷設するためその設置精度が問題になる。マニピュレータの把持爪をブランケット表面の把持穴に挿入する際の許容位置ズレ量は最大で ± 5 [mm] 程度であるが、直径 16 [mm] の走行軌道を炉内に ± 5 [mm] 以下の精度で敷設するのは容易ではなく、いったん軌道の収納／再展開を行うと、マニピュレータと作業対象の位置関係が変化して同一の教示点データ列では作業が行えなくなることが想定される。しかしながら、本手法により制御システムを構築することで、作業実施時に位置決め基準ポイントにおける前回作業からの位置ズレ量を計測して環境情報を修正し、容易に位置ズレに対応した教示点データ列を生成・実行することができる。

位置ズレ量を計測する位置決め基準ポイントは、一つの動作パターンにおいて、最も精度が要求される場所一点を設定した。ブランケットの取り付け／取り外し動作の場合、エンドエフェクタの把持爪をブランケット表面の把持穴に入れる動作や、ブランケット背面の位置決めピンを炉壁バックプレート上の位置決め穴に入れる動作の実行時に高い位置決め精度が要求されることから、位置決め基準ポイントとしては、それらの動作が実行される直前位置となる。このように、保守点検ロボットが実行する作業対象の把持、設置、取り付け、取り外しといった基本的な各単位動作においては、一連の動作目標値の中に、作業動作実現の成否にかかわらず高い位置決め精度が要求される特別なポイントが存在するため、その点において正確な位置決めが達成されていれば、その他の点における若干の位置ズレは許容され、多くの場合、あらかじめ用意された作業動作パターンを利用することで、目的の作業動作が実現できる。特に、大重量を扱う大型のマニピュレータにおいては、マニピュレータ自身のたわみにより位置ズレ量が吸収されるため、この傾向が顕著である。作業動作実施時は、マニピュレータが位置決め基準ポイントに相当する教示点に到達した時点で、そこにおける位置・姿勢のズレ量が無くなるように、マニピュレータをマニュアル操作で誘導する。ピークル型マニピュレータによるブランケット取り外し動作の場合は、エンドエフェクタの把持爪がブランケット表面の把持穴に挿入される直前の教示点 C_p において、把持爪が把持穴の真正面近傍に位置決めされるようにマニュアル操作でマニピュレータを誘導し、修正後の教示点 C_q を得る。そこで以下に示す教示点データ列の修正計算を実行することで、位置ズレ量を吸収した教示点データ列（各教示点データ）が生成される。

位置決め基準ポイントにおける教示点 C_p から C_q への位置・姿勢の修正量 ΔM は C_p から C_q への変換であり、

$$\Delta M = C_q \cdot (C_p)^{-1} \quad (1)$$

と表せる。ただし、ここではマニピュレータ手先の位置・姿勢を表す各教示点データを 4×4 の同時変換行列形式で表記した。教示点データ列の修正計算では、作業動作パターンの形を変化させず、位置決め基準ポイントにおける位置および姿勢のズレ修正量を一連の教示点データすべてに反映することから、ブランケット取り外しの一連動作の修正前教示点データ列 C_n に式 (1) と同じ変換を適用し、修正後の教示点データ列 C_n' を求める。したがって、 ΔM が教示点データ列 C_n の修正の式と

Fig. 5 Position/orientation error modification

なる。この修正変換を図示したのが Fig. 5 である。これらの計算処理により、作業動作パターンから得られたマニピュレータ手先の目標位置・姿勢データ列のすべての要素に位置ズレ修正が施され、同一の作業動作パターンからそのときの位置ズレ状況に合わせた作業動作目標値が作成されることになる。ただし、本手法においては、作業動作パターンの重力方向に対する姿勢が重要であることから、パターン作成時と動作実行時の重力方向に対するマニピュレータ姿勢が大きく異ならないようにする必要がある。なお、ブランケット取り付けの作業動作パターンは取り外しの作業動作パターンを逆順にたどったものとなっているため、取り外し動作の位置決め基準ポイントで求めた位置・姿勢の修正量 ΔM で取り付け動作の教示点データ列の修正を行うことが可能であり、位置ズレ修正の作業量低減が図れる。

ブランケット遠隔保守システムにおいては、現在、放射線環境下における位置決め基準ポイントでのズレ量修正の自動化が検討課題であり、近接距離センサなどを用いた自動計測・修正の実現が期待されている。それにより、マニピュレータとブランケットの相対位置関係が変化した状況下でも、マニピュレータ手先の目標位置・姿勢データ列の修正による一連のブランケット取り付け／取り外し動作の自動実行が可能になると考えられる。

4. 実規模ブランケット遠隔保守システムへの適用実験

前章までに示した、大重量物を扱うマニピュレータのための制御システムの有効性を確認するため、開発したシステムを試作した可搬性能約 4 [ton] の実規模ブランケット遠隔保守ビークル型マニピュレータに適用し、教示点データ列から生成した作業動作パターンに基づくマニピュレータ動作の評価および軌道収納／再展開による位置ズレへの対応性能評価の実験を実施した。

4.1 実規模ブランケット遠隔保守システム

Fig. 6 に、適用実験を実施した実規模ブランケット遠隔保守ビークル型マニピュレータシステムの全景を、Fig. 7 にビークル型マニピュレータ本体を示す。実規模ブランケット遠隔保守ビークル型マニピュレータシステムは、直径 16 [m] 仕様で設計された炉の炉内保守用軌道 180° 分の展開／収納が行える軌道展開／収納装置と、90/180° のポート部で軌道を支持する軌道支持装置、さらに展開敷設した軌道上を走行し、45° 位置に設

Fig. 6 Real-scale mock-up of remote maintenance system for ITER blanket module

Fig. 7 Real-scale mock-up of rail-mounted vehicle-type manipulator

置された炉壁を模擬した構造体上の模擬ブランケットの交換作業を行うビークル型マニピュレータで構成されており、機器のサイズや可搬性能などは実機と同レベルを実現した実験システムである。制御軸数は、ビークル型マニピュレータ部の 9 軸（構成は 6 自由度＋走行軸）をはじめ、エンドエフェクタ部 6 軸、軌道展開／収納装置 13 軸、90/180° ポート部の軌道支持装置 10 軸など、全 42 軸の AC サーボモータ駆動による構成となっており、基本的には全軸が教示再生制御方式で動作する。ただし、制御軸数は多いものの軌道展開完了後は軌道展開／収納装置、軌道支持装置の各軸はブレーキにより固定されるため、ブランケット交換作業中は、主としてビークル型マニピュレータ部およびエンドエフェクタ部の協調動作による、模擬構造体上の模擬ブランケットの取り付け／取り外し、および 90° ポート部の搬送装置パレットに対するブランケットの受け取り／受け渡し作業が実施される。

4.2 教示点データ列より生成した作業動作パターンの評価実験

3.2 節に示した方法に従って、マニピュレータが搬送装置パレットとの間で模擬ブランケットの受け取り／受け渡しを行う作業動作パターンおよび模擬構造体上の炉壁バックプレートと

Fig. 8 Blanket set/removal to/from transporter pallet

Fig. 9 Blanket set/removal to/from wall back plate

の間で取り付け／取り外しを行う作業動作パターンを生成し、それに基づいてマニピュレータを動作させることで、生成した作業動作パターンの評価を行った。Fig. 8に、マニピュレータが搬送装置パレットとの間で重量約3[ton]の模擬ブランケットの受け取り／受け渡し動作を行っているところを、Fig. 9に、模擬構造体上のバックプレートとの間で取り付け／取り外し動作を行っているところを示す。

作成した作業動作パターンがうまく機能しているかどうかは、マニピュレータがブランケットを搬送装置パレットや炉壁バックプレートに対して着脱する際に大きな振動が発生せず、両者の間でブランケットの負荷の受け渡しがうまくできているかどうかで評価することができる。Fig. 10は、マニピュレータがブランケットを炉壁バックプレートに取り付け後、把持爪を引き抜いたときの、エンドエフェクタ部に発生する振動の様子を加速度センサで計測した結果である。(a)は作業動作パターンを用いず、エンドエフェクタの把持爪をそのまま真っ直ぐに引き抜いた場合、(b)は作成した作業動作パターンに基づいてブランケットの取り付け動作を行った場合の結果である。(a)より、エンドエフェクタの把持爪をそのまま引き抜いた場合は、把持爪がブランケット表面の穴から抜けた瞬間に最大約2[G]の大きな振動が発生していることが分かる。このときは、把持爪がブランケット表面の穴から抜けた瞬間に、エンドエフェクタが上方にはね上がるのが認められた。(b)より、作成した作業動作パターンに基づいてマニピュレータを動作させた場合は、エンドエフェクタの把持爪がブランケット表面の穴から抜けてもほとんど振動が発生せず、負荷の受け渡しがスムーズに実現で

(a) Not using motion pattern

(b) Using motion pattern

Fig. 10 Acceleration data measured at end-effector (Blanket installation to wall back plate)

(a) Not using motion pattern

(b) Using motion pattern

Fig. 11 Torque data of vehicle roll axis No.1 (Blanket removal from pallet)

きていることが分かる。また Fig. 11は、マニピュレータが搬送装置パレットからブランケットを受け取る動作を行った際の、マニピュレータテレスコ部の軌道まわり回転軸 (No.1) の駆動トルクの変化を示している。(a)は作業動作パターンを用いず、把持したブランケットをそのままパレットに垂直な方向へ引き抜いた場合、(b)は作成した作業動作パターンに基づいてブランケットの受け取り動作を行った場合の結果である。(a)より、ブランケットをそのまま引き抜いた場合は、ブランケット背面の位置決めピンがパレット上の位置決め穴から外れた瞬間 (図中 A の位置) に駆動トルクが大きく変動しており、急激に負荷の状態が変化していることが分かる。実際、位置決めピンがパレットから外れた瞬間には、「ドン」という大きな衝撃音が発生し、マニピュレータが軌道まわりに大きく揺れた。駆動トルクのグラフの正負反転は、ブランケット把持前のマニピュレータではテレスコ部がエンドエフェクタ部よりも重く、ピークルまわりの回転軸にエンドエフェクタ部を持ち上げる方向のモーメントが作用するが、ブランケット把持後はエンドエフェクタ部のほうが重くなり、ピークルまわりに逆方向のモーメントが作用するためである。なお、動作前の駆動トルクが0となっている部分は、ブレーキによる停止状態である。Table 1(a)は、Fig. 11(a)

のブランケットがパレットから離れた A 部前後の動作における、マニピュレータに与えた手先の目標移動量、手先に把持したブランケットの実際の位置変位量（静定後まで）およびその差を示したものである。表より、マニピュレータ手先の目標移動量に対してブランケットが実際に移動した量は大きく、その差は距離で 47 [mm]（斜め下方）、角度で 1.5 [degree] となっている。これより、ブランケットの負荷の影響で、マニピュレータ本体に大きなたわみが発生していることが分かる。Fig. 11 (b) は、作成した作業動作パターンに基づいた動作の場合で、パレット側からブランケットの負荷を受け取り（図中 B の区間）、その後ブランケットをパレットから離している（図中 C の区間）。その間の駆動トルクのなだらかな変化から、負荷の受け渡しがスムーズに実現できていることが分かる。また、Table 1 (b) には、Fig. 11 (b) の負荷受け取り動作時（図中 B 区間）におけるマニピュレータ手先の目標移動量とブランケットの実際の位置変位量、その差を示したが、こちらの場合はマニピュレータ手先の目標移動量約 47 [mm] に対してブランケットの位置はほとんど変化しておらず、その差 43 [mm]、0.8 [degree] で、マニピュレータ本体に発生したたわみ量がキャンセルされていることが分かる。なお、これらの実験において、マニピュレータは各軸を定格速度で動作させたが、ピークル型マニピュレータは大きな可搬重量を達成するために各軸の減速比が大きく、作業時のマニピュレータ手先の動作速度は 6 [mm/sec.] 程度であった。

以上より、教示点データ列から作成した作業動作パターンに基づいてマニピュレータを動作させることで、ブランケットの把持・設置動作時の負荷のスムーズな受け渡しが可能で、その有効性が確認された。

4.3 軌道収納／再展開による位置ズレへの対応実験

軌道収納／再展開の実施により炉内に敷設された走行軌道の

位置がずれ、マニピュレータとブランケットの相対位置関係が変化した場合は、3.3 節に示した方法に従って位置ズレに対応した教示点データ列を作成する。この手法の有効性を確認するため、軌道の収納／再展開作業後に、マニピュレータ—搬送パレット間のブランケット受け取り／受け渡し動作を実施した。なお、今回試作したシステムにおける軌道敷設の位置ズレ量は、最大でも 10 [mm] 以下であった。位置決め基準ポイントの教示点において、マニュアル操作により実施した位置ズレ修正前後のマニピュレータ手先の位置・姿勢および誤差（修正量）を Table 2 に示す。表中の C_p 、 C_q の値を用いて、式 (1) により一連のブランケット受け取り動作の教示点データ列に対する位置ズレ量の修正を行った。修正された教示点データ列によりマニピュレータを動作させたところ、位置決め基準ポイントにおいて要求精度の ± 5 [mm] 以下を下まわる ± 2 [mm] 程度の精度でマニピュレータ手先が良好な位置に位置決めされ、スムーズなブランケットの受け取り動作が行えた。

逆動作である搬送パレットへのブランケット受け渡し動作の教示点データ列に対しても、同じ値を用いて位置ズレ量の修正計算を実施した。修正された教示点データ列によるマニピュレータの動作で、受け取り動作同様スムーズな受け渡し動作が行え、同一作業対象の受け取り／受け渡しといった逆動作教示点データ列に対しては、片方の位置決め基準ポイントにおける位置ズレ修正計算量が他方の修正にもそのまま適用できることが確認された。

5. お わ り に

本論文では、教示再生制御方式にモデルに基づく作業システムの考え方を導入し、教示点データ列から生成した作業動作パターンにより大重量対象物の把持・設置の際に手先位置ズレ量の補償、なだらかな負荷変動を実現する、大重量物を扱うマニピュレータのための制御システムを提案した。そして、開発したシステムを可搬性能約 4 [ton] の実規模ブランケット遠隔保守ピークル型マニピュレータへ適用し、機能確認実験を実施した。

実規模システムによる実験の結果、大重量のブランケットを把持したことによるマニピュレータのたわみ量を正確に求めなくても、ブランケットの把持動作および設置動作の教示点データ列を教示操作で作成し、それらを組み合わせることで、マニピュレータと設置対象との間で負荷をスムーズに受け渡しながら一連のブランケット着脱作業を行う作業動作パターンが容易に作成可能なことを確認した。また、マニピュレータと作業対象の位置関係が変化した場合でも、容易にその位置ズレを吸収できることが確認され、提案した制御システムの有効性を示した。

今後は、位置制御系がベースの制御システムへの力制御やコンプライアンス制御の機能付加についても検討を進め、さらな

Table 1 Displacement of end-effector and blanket

(a) In case not using motion pattern

Displacement	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Roll[°]
Manipulator(Desired)	17.4	9.9	-1.2	0.0
	Distance: 20.1			
Blanket(Actual)	49.6	-24.3	-3.8	1.5
	Distance: 55.4			
Difference	32.2	-34.2	-2.6	1.5
	Distance: 47.0			

(b) In case using motion pattern

Displacement	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Roll[°]
Manipulator(Desired)	32.4	34.3	2.5	-1.0
	Distance: 47.2			
Blanket(Actual)	2.8	3.2	0.0	-0.2
	Distance: 4.3			
Difference	-29.6	-31.1	-2.5	0.8
	Distance: 43.0			

Table 2 End-effector position/orientation and error at positioning point

	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Roll [°]	Pitch [°]	Yaw [°]
C_p	-1745.19	-2365.47	664.78	-150.42	-3.49	-92.32
C_q	-1740.97	-2372.11	669.68	-150.26	-3.49	-92.33
Error	+4.23	-6.64	+4.90	+0.16	0.00	+0.01

る機能アップにより、大重量対象物の安定・確実なハンドリングを実現していく。

参 考 文 献

- [1] K. Shibamura, 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.
- [2] 小菅 他: ロボット工学ハンドブック (日本ロボット学会編), pp.515-546, コロナ社, 1990.
- [3] K. Asano: "Concept for a Model Databased Remote Maintenance System," Proc. of the 4th ISRR, MIT Press, pp.401-410, 1987.
- [4] T. Lozano-Perez: "Robot Programming," Proc. IEEE, vol.71, no.7, pp.821-841, 1983.
- [5] H. Asama, K. Yokota and H. Yoshikawa: "A Knowledge-Based Task Sequence Planning System for Maintenance Manipulators," Proc. of 7th CISM-IFTOMM Symp. on Theory and Practice of Robots and Manipulators (RoManSy 7), pp.342-349, Hemes, 1988.
- [6] S.A. Hutchinson and A.C. Kak: "Spar: A Planner That Satisfies Operational and Geometric Goals in Uncertain Environments," AI Magazine, vol.11, no.1, pp.30-61, 1990.
- [7] T. Hasegawa, T. Suehiro and K. Takase: "A Model-Based Manipulation System with Skill-Based Execution," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.8, no.5, pp.535-544, 1992.
- [8] H. Sato, T. Yoshimi, Y. Asari, K. Tatsuno and K. Asano: "Development of a Model-Based Remote Maintenance Robot System (I-IV)," Proc. of 1993 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'93), pp.1225-1251, 1993.
- [9] 吉見 他: "自律形保守点検ロボットの作業動作手順自動生成システム", 日本ロボット学会誌, vol.16, no.5, pp.640-651, 1998.
- [10] E. Tada, et. al.: "Development of Remote Maintenance Equipment for ITER Blankets," Proc. of the 4th Int. Symp. on Fusion Nuclear Technology, Tokyo, 1997.

吉見 卓 (Takashi Yoshimi)

1961 年 10 月 11 日生。1987 年大阪大学大学院基礎工学研究科修士課程 (機械工学分野) 修了。同年 (株) 東芝入社。ロボットの力制御技術, タスクプランニング技術および核融合炉内機器遠隔保守システムの研究・開発に従事。1999~2001 年日本原子力研究所, 外来研究員。2000 年大阪大学大学院博士課程 (機械科学分野) 修了。工学博士。2001 年 4 月より, (株) 東芝, 研究開発センター, 機械・システムラボラトリー, 研究主務。1997 年日本ロボット学会実用化技術賞受賞。計測自動制御学会会員。(日本ロボット学会正会員)

多田栄介 (Eisuke Tada)

1954 年 1 月 10 日生。1976 年群馬大学工学部機械工学科卒業。1978 年同大学大学院機械工学修士課程修了。同年日本原子力研究所入所。超伝導コイルの開発に従事。1988 年工学博士 (東北大学)。1991 年より炉構造・遠隔保守の開発に従事。現在, ITER 開発室, 安全評価グループリーダー。日本機械学会, 日本原子力学会, プラズマ核融合学会会員。

宮川信一 (Shinichi Miyagawa)

1959 年 7 月 5 日生。1983 年神奈川大学工学部電気工学科卒業。同年 (株) 東芝入社。ロボット制御の開発設計に従事。現在, 京浜事業所, 機器装置部, 機器装置設計担当, 機器設計主査。(日本ロボット学会正会員)

角館 聡 (Satoshi Kakudate)

1963 年 1 月 15 日生。1990 年岩手大学大学院機械工学専攻修了。同年日本原子力研究所入所。国際熱核融合実験炉 (ITER) に関する炉内遠隔保守機器の設計・開発に従事。現在, 核融合工学部, 炉構造研究室, 研究員。日本機械学会会員。(日本ロボット学会正会員)

辻 光一 (Kouichi Tsuji)

1958 年 7 月 15 日生。1982 年神戸大学工学部機械工学科卒業。1984 年同大学大学院修士課程 (機械工学分野) 修了。同年 (株) 東芝入社。特殊ロボットのメカ設計に従事。現在, 京浜事業所, 機器装置部, 機器装置設計担当, 機器設計主査。日本機械学会会員。(日本ロボット学会正会員)

久保智美 (Tomomi Kubo)

1968 年 11 月 20 日生。1991 年九州大学工学部動力機械工学科卒業。1993 年同大学大学院修士課程 (エネルギー変換工学専攻) 修了。同年 (株) 東芝入社。特殊ロボット制御システムの開発設計に従事。現在, 京浜事業所, 機器装置部, 機器装置設計担当。