核融合実験炉の遠隔保守作業に対するリアルタイム
シミュレータを用いた実現性検討*浜田 朋之^{*1}, 田中 敬二^{*2}
岡 潔^{*3}, 柴 沼 清^{*4}Feasibility Study of Teleoperational Maintenance
Using Real-Time Simulator for Experimental Fusion ReactorTomoyuki HAMADA^{*5}, Keiji TANAKA,
Kiyoshi OKA and Kiyoshi SHIBANUMA^{*5} Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd.,
502 Kandatsu, Tsuchiura-shi, Ibaraki, 300-0013 Japan

The maintenance manipulator for the experimental fusion reactor has long vertical and horizontal telescopic booms to access the neutral beam injector of the fusion reactor. Due to this boom structure, the vibration and deflection of the manipulator are the critical issues for the accurate operation. A real-time simulation system was constructed to evaluate the maneuverability of the manipulator under these vibration and deflection. In this simulation system, the dynamic behavior of the flexible manipulator is calculated synchronized with the real-time control input of the human operator. A vibration and position compensation method was adapted to improve the maneuverability. Through the evaluation using the real-time simulation system, it was verified that the manipulator is maneuverable by using vibration and position compensation.

Key Words: Teleoperation, Manipulator, Remote Maintenance, Real-Time Simulation, Maneuverability, Fusion Reactor

1. 緒 言

国際熱核融合実験炉(ITER)を構成する機器の1つである中性粒子入射(NBI=Neutral Beam Injector)装置は、イオン源、加速器、真空ダクト等から構成され、核融合を行う高温プラズマを密閉した真空容器の側面より中性粒子を注入して核融合反応を持続させる装置である。これらの装置は中性粒子照射によって放射化されるため、補修及び交換作業は炉外からの遠隔操作により行う必要がある。

このため、図1に示すようなマニピュレータを用いて遠隔操作により保守作業を行なうことが検討されている。本マニピュレータは、狭い真空容器内のイオン源にアクセスするため、長い水平および垂直伸縮管(ブーム)の先端に取り付けられている。従って、マニピュレータが重量物を取り扱う場合には、伸縮管部分で生じる変形やたわみにより、先端位置の大きなずれや振動が発生すると予想される。

Fig.1 Manipulator for NBI maintenance.

従来、遠隔操作マニピュレータの開発では、実物のマニピュレータを試作し、操作性の検討が行われることが多かった。特に、宇宙用遠隔マニピュレータについては、事前検討を十分に行うためにテストベッドを構成して実験することが多い⁽¹⁾⁽²⁾。これに対し、今日では各種解析ツールの発達により、計算機上で高度な力学シミュレーションを行なうことも可能となり、実物の試作前にマニピュレータの基本的な運動特性を把握することも可能となってきた⁽³⁾。しかしながら、操作者の操作入力に対応してリアルタイムにマニピュレータの挙動をシミュレーションするためには、集中

* 原稿受付 2004年4月9日。

^{*1} 正員、(株)日立製作所機械研究所(☎300-0013 土浦市神立町502)。^{*2} (株)日立製作所電力・電機グループ原子力事業部(☎317-8511 日立市幸町3-1-1)。^{*3} 正員、日本原子力研究所東海研究所(☎319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4)。^{*4} 日本原子力研究所那珂研究所(☎319-1195 茨城県那珂郡那珂町向山801-1)。

E-mail: hama@merl.hitachi.co.jp

定数系のモデル(4)(5)(6)などを導入して計算時間を短縮する必要があった。

このような背景の下、本研究では、遠隔操作手順の確立とマニピュレータ開発の期間短縮を目的として、シミュレータを用いた仮想試作により開発を進めることとした。具体的には、梁の弾性変形を模擬する仮想関節を導入した集中定数モデルを構築し、保守作業を行う遠隔操作者の操作入力に対応してマニピュレータのたわみや振動をリアルタイムに計算・表示するリアルタイムシミュレータを構成して、実際の遠隔保守作業時と同じ状態におけるマニピュレータの挙動を再現した。これにより、本マニピュレータを用いた遠隔保守作業時のたわみ量や振動量を評価した。また、本シミュレータに制振制御やたわみ補正制御プログラムを組み込み、これらの補正制御を適用した場合のたわみと振動の低減効果についても評価した。これらの評価検討を通して、本マニピュレータを用いた NBI 保守作業の実現性について検討した。

2. リアルタイムシミュレータ

2.1 マニピュレータのモデル化 マニピュレータの個々のリンクはほぼ剛体とみなすことができ、マニピュレータ部分の挙動は剛体運動として扱うことができる。しかし、マニピュレータの運動に伴って、長い水平・垂直ブームにたわみが発生するため、システム全体の挙動を求めるためには、マニピュレータの剛体運動とブーム部分の弾性変形を連成して解く必要がある。

しかしながら、このような連成問題を厳密に解こうとすると計算時間が多大となり、実時間の操作入力と同期してモデルの挙動を計算することが困難となる。そこで、本研究では集中定数系モデルの考え方を応用して計算を単純化した。まず、ブームのたわみを単純な梁の弾性変形に近似し、更にこの弾性変形を仮想的な関節の回転で表現する。これにより、マニピュレータとブームからなるシステム全体を剛体運動方程式で一元的に計算できる。仮想関節も含めたマニピュレータの軸構成を図2に示す。

水平・垂直ブームのたわみを模擬する仮想関節 J3, J5 の剛性は、以下の方法で近似する。図3(a)に示すような片持ち梁の自由端に働く力 W とたわみ量 v の関係は、ヤング率を E 、梁の断面二次モーメントを I として以下の式で表される。

$$v = \frac{Wl^3}{3EI} \quad (1)$$

一方、図3(b)に示すような2リンク機構の一端に働く力と変位との関係は、関節の回転角度が十分小さい場合には関節の剛性係数を k として以下の式で表される。

$$v = \frac{4Wl^2}{9k} \quad (2)$$

式(1)と(2)の比較から関節の剛性係数 k を

$$k = \frac{4EI}{3l} \quad (3)$$

とおくことで、梁のたわみを仮想的な関節で近似することができる。

同様に、水平・垂直ブームのねじれを模擬する仮想関節 J4, J6 についても、片持ち梁に働くねじり力とねじれの関係から、等価な剛性係数を設定する。

また、クレーンの梁変形についても仮想関節 J1, J2 を設けて模擬する。これらの仮想関節の剛性係数については、シェルモデルを用いた応力変形解析により等価な係数を設定する。

Fig.2 Dynamics calculation model of manipulator.

Fig.3 Approximation of beam bend.

2・2 運動方程式の計算手順 上記のようにブームやクレーンのたわみ・変形を模擬する仮想的な関節を導入することにより、マニピュレータの動力学的挙動は、関節部の剛性を考慮した剛なリンクの運動方程式により扱うことができる。式(4)にこの運動方程式の形を示す。

$$H(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g(\theta) + K(\theta)^T w = \tau \quad (4)$$

但し、

- $H(\theta)$: $N \times N$ の慣性行列
 $C(\theta, \dot{\theta})$: 遠心力とコリオリの力の影響を表す $N \times N$ の行列
 $g(\theta)$: 各関節に働く重力による影響を表す N 次元のベクトル
 $K(\theta)$: マニピュレータ先端に働く外力とモーメントによって各リンクに生じるトルクを表わす $6 \times N$ の Jacobian 行列
 w : マニピュレータ先端に働く外力とモーメントからなる 6 次元のベクトル。最初の 3 項がモーメントの 3 成分であり、後の 3 項が外力の 3 成分である。
 τ : 各関節に働くトルクを要素とする N 次元のベクトル
 θ_i : 関節 i の角度 θ_i を第 i 要素とする N 次元のベクトル
(N は、仮想的な関節により構成される自由度も含めた全自由度の数)

上記方程式において、マニピュレータ部分に相当する関節 J_7 から J_{12} のトルクを以下の式で与えることにより制御入力に対する挙動を計算する。

$$\tau_i = k_i(\theta_n - \theta_i) - c_i\dot{\theta}_i \quad (i=7, \dots, 12) \quad (5)$$

ここで、 θ_n は関節 i の角度指令値、 k_i と c_i は関節 i の制御系や減速器の機械的特性などを総合した剛性係数と粘性係数である。

また、ブームやクレーンのたわみ・変形を模擬する関節 J_1 から J_6 については、2.1 節で設定した等価な剛性係数 k_i を用いて、以下の式でトルクを与えることにより、たわみ・変形を模擬する。

$$\tau_i = -k_i\theta_i - c_i\dot{\theta}_i \quad (i=1, \dots, 6) \quad (6)$$

上記運動方程式の計算は、Luh, Walker, Paul の計算手順¹⁾などを用いることにより、実時間で計算が可能である。

2・3 シミュレーション装置の構成 シミュレーション装置は、図 4 に示すように操作者が実際に操作可能なマスタアームと計算機とからなり、計算機は操作入力に応じてマニピュレータの動力学的挙動を計算して CG として表示する。マスタアームには、3 次元の位置・姿勢 6 パラメータを入力可能な 6 自由度のアーム型装置を用いた。マスタアームから入力された操作指令は、マニピュレータの関節角度指令値に変換された後、動力学計算ルーチンに供給される。計算結果は、CG 画像として計算機の画面に表示され、操作者はこの CG 画像を見ながらマニピュレータの操作を行う。

関節角度指令値に対しては、モードを切り替えることにより制振制御やたわみ補正制御で補正可能とし、これらの制御を行った場合の評価ができる。

クロック周波数が 866MHz である 32 ビット CPU を備えた市販の計算機を使用した場合、マスタアームによる操作指令入力から、CG 描画までの処理時間は、約 10ms であった。

Fig.4 Simulation system configuration.

3. FEM 解析結果との比較

操作性評価に先だて、今回構築したシミュレーションシステムの計算精度を確認するため、FEM 解析結果との比較を行った。FEM 解析では、クレーン部分、および垂直ブームと水平ブームの接続部をシェル要素とし、その他の部分をビーム要素としてモデル化した。アームを水平前方向に伸ばした状態で、アーム先端に 50kg の物体を把持した場合のアーム先端の降下変位量と、固有振動数を比較した。

表 1 に比較結果を示す。本来連続的に変形するブームをリンク機構で近似するため誤差が生じるが、アーム

ム先端の降下変位量や振動周波数は、ほぼ一致している。本システムのシミュレーション結果でも、大まかなクリアランスの確認や、振動状態の把握など操作性を評価できる程度に挙動が再現されていると考えられる。

Table 1 Movement at manipulator tip.

		Simulation system	FEM Analysis
Displacement [mm]		49.7	54.6
Modal frequency [Hz]	Mode 1	2.42	2.40
	Mode 2	4.53	4.06

4. 操作性評価の結果

NBI 保守においてイオン源を交換するためには、イオン源の高電圧配線（バスバー）の取り外し、イオン源固定部（ピボット）の取り外しなどを行う必要がある。この中でも、バスバーの取り外しは、マニピュレータを伸ばした状態で、約 50kg のバスバーを把持する作業となるため、マニピュレータのたわみや振動が最も大きく発生すると考えられる。そこで、以下本論文ではバスバーの取り外し作業について述べる。

4・1 基本的な操作性 図5は、バスバー取り外し作業時のシミュレーションシステムのCG画面を示す。画面では、手前から奥に伸びるマニピュレータとその先に並ぶバスバーなどが示されている。操作者は、このような画面を見ながらマニピュレータを操作し、マニピュレータの手先をバスバーに近づけて把持する。

図6は、バスバー取り外し作業時のマニピュレータ手先位置の上下方向座標軌跡を示す。操作入力として与えられる目標位置に対して、手先位置は平均 40mm 程度降下した状態で追従している。そして、バスバーを把持すると、その重さによって降下量はさらに 80mm 程度にまで増大する。また、マニピュレータの手先をバスバーに近づける操作の全域において振幅 40mm 程度の振動が発生している。これは、この姿勢におけるマニピュレータの固有周期に近いことから操作入力により励起された振動であると考えられる。また、バスバー把持時には、手先重量の変動によりやはり振幅 40mm 程度の大きな振動が発生している。

図7は、バスバー取り外し作業時にマニピュレータの関節に働くトルクを示す。ここでは、マニピュレータの6関節の中でも特に大きな荷重が作用すると考えられる第2関節と第3関節（図2におけるJ8とJ9）について示している。バスバーの把持により、最大

700Nm 程度のトルクが発生している。また、マニピュレータの振動に起因するスパイク状のトルクも発生している。

Fig.5 Screen image of bus-bar disassembly task.

Fig.6 Manipulator tip trajectory.

Fig.7 Manipulator joint torque.

以上の結果より、今回想定したマニピュレータでは、操作に伴ってかなり大きな振動が発生し、手先位置もたわみによって大きくずれることがわかった。これらの特性は、マニピュレータの操作性を悪化させるものであり、実際の操作感覚でも、操作しづらいと感じられた。

4・2 制振制御の効果検討 操作時に発生するマニピュレータの振動を低減するため、制振制御の適用について検討した。柔構造マニピュレータの制振制御手法としては、歪みフィードバックや加速度フィードバック、力フィードバックなど種々の方法が提案されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。本件で検討している把持重量が 50kg の NBI 保守用マニピュレータにおいては、狭い空間内での作業であり、慎重に操作する必要がある。また、操作者のマニピュレータに対する操作入力が過剰になることが、マニピュレータの振動を引き起している原因の一つであると考え、マニピュレータへの制御入力に対して制限を設ける方法について検討した。すなわち、関節角指令信号に対してマニピュレータを共振させる周波数成分をカットするフィルタを適用することで、マニピュレータの励振を低減するものである。なお、この制振制御の効果は、マスタアームにメカニカルなダンパを設けることでも得ることができる。

固有振動数が最も低くなるマニピュレータを前方に伸ばした状態において、振動数は約 2.5Hz であったので、これより高い周波数成分をカットすることにより、マニピュレータの振動が抑えられると考えられる。図 8 は、カットオフ周波数が 2Hz である 4 次のバターワース型ローパスフィルタを適用した場合のマニピュレータ手先位置の上下方向座標軌跡を示す。バスバー把持時に手先重量が変動することで生じる振動は残っているものの、操作入力により誘発されていた振動は、10mm 以下に大きく低減されている。また、図 9 に示す第 2、第 3 関節に働くトルクの波形でも、振動により生じていたスパイク状のトルクが無くなっている。

操作入力にローパスフィルタを適用すると応答特性が悪くなる懸念があるが、実際に操作した感覚では応答が遅いと感じることはなかった。

制振制御を適用していない場合、マスタアームをゆっくり動かしても、動かし方の揺らぎによってマニピュレータの振動を励起するような速い動きの指令が入力されてしまう。これに対して、制振制御を適用することで、作業に不要な動きの成分が取り除かれ、振動のみが効果的に抑えられたと考えられる。このように操作入力が必要とされる周波数帯と振動の周波数帯が分離している場合には、本手法は有効であるといえる。

Fig.8 Manipulator tip trajectory with vibration compensation control.

Fig.9 Manipulator joint torque with vibration compensation control.

4・3 たわみ補正制御の効果検討 次に、マニピュレータの自重や把持物体の重量によって生じる手先位置の降下を低減するために、たわみ補正制御の適用について検討した。本システムは操作者が画像を見ながらリアルタイムに操作を行うことができるリアルタイムシミュレーションシステムであるため、画像センサなどによりマニピュレータの実際の手先位置と操作入力で与えられる目標位置とのずれを検出し、関節角度を補正する視覚誘導⁽¹¹⁾が操作者の入力補助として有効であることに着目し、本システムに適用した。

関節角度の補正值については、以下の方法で求める。関節角度 θ によって計算上求まる手先位置を $P(\theta)$ 、目標位置と実際の手先位置とのずれを P_e とする時、各関節 i において評価式

$$e_i = \frac{\partial P(\theta)}{\partial \theta_i} \cdot P_e \quad (7)$$

が正となる場合には θ_i を微小量増加させ、負となる場合には微小量減少させるようにする。

図 10 に制振制御とたわみ補正制御を適用した場合のマニピュレータ手先位置の上下方向座標軌跡を示す。

バスバー把持時に手先重量が変動することで生じる振動は残っているものの、手先位置の降下量は 10mm 程度に軽減されている。制振制御とたわみ補正制御を併用した状態では、振動と手先位置のずれが共に 4 分の 1 程度に軽減され、特にバスバー把持時の手先位置のずれは 8 分の 1 程度に改善されている。また、実際の操作感覚においても、把持対象物に対する位置決め操作が容易になって操作時間が短縮されるなど操作性が改善された。

Fig.10 Manipulator tip trajectory with position and vibration compensation control.

5. 結 言

マニピュレータを用いた NBI の遠隔保守作業の実現性を検証するため、実際のマスターアームとリアルタイムシミュレータからなるシミュレーションシステム内に、実機を模擬した NBI 保守システムを構築し、遠隔作業時のマニピュレータの操作性を評価した。その結果、制御対象の動特性を考慮しない場合、操作に伴って振幅 40mm 程度の振動が発生し、手先位置もたわみによって 40~80mm 程度ずれるため、操作性が悪いことが分かった。これに対して、操作入力に制限を設ける制振制御と視覚誘導を用いたたわみ補正制御を施すことにより、振動の振幅は 10mm 以下に、たわみによる手先位置のずれも 10mm 以下に低減でき、操作性を大きく改善できることが分かった。以上の結果から、検討対象としたマニピュレータは、制振制御とたわみ補正制御を組み合わせることで、適切な遠隔操作が可能である見通しが得られた。また、今回構築したシミュレーションシステムは、FEM 解析結果との比較では手先位置の変位や固有周期に関して 1 割程度の誤差であり、操作性評価のシミュレーションでは問題のない精度であることが分かった。

謝 辞

本研究は、国際熱核融合実験炉 (ITER) プロジェクトの一環として実施したものであり、本研究の推進にご協力いただいた日本原子力研究所の関係者の方々に謝意を表します。

文 献

- (1) 泉田啓, 他 4 名, 柔軟マニピュレータを持つ宇宙作業ロボットの地上模擬制御実験, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.6, (1994), pp.899-904.
- (2) 渡辺一郎, 他 9 名, 宇宙ロボット作業評価用テストベッドの開発と衛星補足模擬実験, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.7, (1998), pp.974-984.
- (3) 高信英明, 設計支援・システム構築のためのモデリングツール, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.3, (2000), pp.349-352.
- (4) Y. Huang and C. G. S. Lee, Generalization of Newton-Euler Formation of Dynamic Equations to Nonrigid Manipulators, Trans. ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, 110, (1988), pp.308-315.
- (5) 吉川恒夫, 細田耕, 仮想的な剛体リンクと受動関節を用いたフレキシブルアームのモデリング, 計測自動制御学会論文集, Vol.27, No.12, (1991), pp.1389-1395.
- (6) 金鎖秀, 今野淳, 内山勝, フレキシブルマニピュレータ動力学の高精度集中定数モデリング, 機論 C, Vol.62, No.602, (1996), pp.4005-4011.
- (7) John Y. S. Luh, Michael W. Walker, Richard P. C. Paul, On-line computational scheme for mechanical manipulators, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control 102 (1980), pp.69-76.
- (8) 坂和愛幸, フレキシブル・マニピュレータのモデリングと制御, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.2, (1994), pp.172-177.
- (9) 近野敦, 他 3 名, 加速度指令による三次元フレキシブルマニピュレータの振動抑制制御, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.8, (1994), pp.1166-1174.
- (10) 松野文俊, フレキシブル・マニピュレータの力制御, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.2, (1994), pp.192-199.
- (11) Tomoyuki Hamada, Kohji Kamejima and Ikuo Takeuchi, Dynamic work space model matching for interactive robot operation, Proceeding of the International Workshop on Industrial Application of Machine Intelligence and Vision (1989), pp.82-87.