

柔軟関節をもつマニピュレータの制御モデルと同定

西田吉晴*・藤平雅信*・村上 晃*・湊 達治**

*技術開発本部・生産技術研究所 **FA・ロボット本部・開発室

A New Control Model and its Identification for Manipulators with Elastic Joints

Yoshiharu Nishida・Masanobu Fujihira・Akira Murakami・Tatsuji Minato

Industrial robot manipulators with reducers have been conventionally controlled based on flexible joint models. In the conventional control models, only elastic deformation due to joint shaft twisting is taken into consideration. Consequently, the dynamics of the manipulators can't be described fully by the model. In addition, the proposed stiffness identification method for the model is not practical. In this paper, a new flexible joint model and a practical stiffness identification method are proposed. The new identification method for this model was applied to an actual manipulator. Through identification experiments, it was confirmed that the identified model corresponded to the actual manipulator very well. Improvements in dynamic positioning accuracy and precision was realized by an elastic deformation compensator based on this new model.

まえがき = 近年、産業用ロボットの分野では、関節の弾性変形を考慮し、ロボットを2慣性系として扱う柔軟関節モデルに対する研究が盛んになされ、柔軟関節モデルに基づくオブザーバによる制振制御技術^{1)~3)}や計算トルク法に基づくフィードフォワード制御技術⁴⁾の開発が進められている。2慣性系とは二つの質点をばね要素で連結した系である。また、減速機を持つロボットに対する柔軟関節モデルとしては、減速機がばね要素として作用し、その両端にモータ慣性と負荷慣性の二つの慣性を有するモデルが一般的である。

このように広くもちいられるようになった柔軟関節モデルであるが、そのモデリング手法についての研究はほとんどなされていない。とくにばね要素の剛性の同定手法については、周らが関節等価ばね定数同定手法⁵⁾を提案しているだけである。周らの手法では、ロボットを静止させた状態で外力を加えて弾性変形量を計測している。静止させているために関節部の摩擦力などの影響を受けやすく、また、各部を固定するための治具が必要であるなど、実用上の問題が多い。さらに、周ら自身が指摘しているように、モデルの不備によってばね定数を正確に同定できない問題もある。

いっぽう、ロボットの減速機が弾性変形するということは、その弾性変形によって位置精度が低下していることは明らかである。また、従来モデルに基づき、弾性変形量を補償した場合においても、位置精度の向上は期待されない。これは従来の2慣性系に基づくモデル(以後、軸ねじれモデルという)では、減速機のみが弾性変形すると仮定しているために、関節の回転軸方向のねじれ変形以外の変形がモデル化されていないことによる。すなわち、リンクは剛体であり、関節部も回転方向以外は剛体支持されていると仮定している。このため、実際のロボットの動特性を十分に記述できず、従来の軸ねじれモデルに基づいた弾性変形補償などでは位置精度の向上は困難であった。

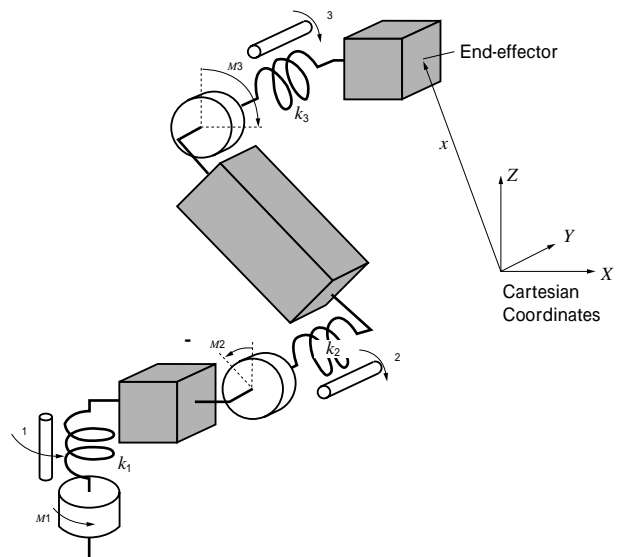
本稿では、関節部などの可動部およびその支持部における全方向の弾性変形を取上げ、新たな柔軟関節モデルを構築した。さらに本モデルに基づく剛性同定およびモ

デリング手法を提案するとともに、実験による検証を実施し、高精度なモデリングがなされていることを確認した。また、同定してえられた柔軟関節モデルに基づき、弾性変形補償する制御手法を提案し、実験においてロボットの動的な位置精度の向上を確認した。

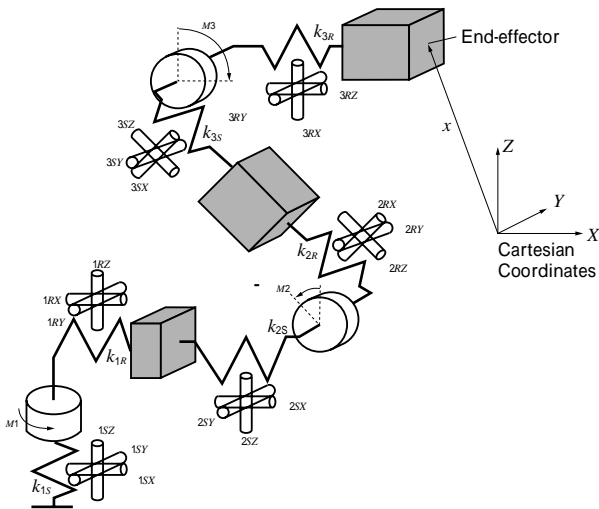
1. 柔軟関節モデル

第1図に従来の軸ねじれモデルを示す。図からわかるように、軸ねじれモデルでは回転関節の軸ねじれ変形以外の変形が考慮されていないため、姿勢変化などによる弾性変形量や固有振動数の変動をうまく表現することができない。より精度よくロボットの動特性を記述するために、関節などの可動部およびその支持部における任意方向の曲げ変形に着目し、第2図に示す柔軟関節モデルを提案する。ただし図のモデルは垂直多関節ロボットに対するものである。

なお、図中のばね要素は任意方向に曲げ変形するが、伸張方向への変形はおこなわないものとする。また、 k_{iR} は第 i 関節によって駆動される側のばね要素、 k_{iS} はそれを支持する側のばね要素、



第1図 従来の軸ねじれモデル
Fig. 1 Conventional flexible joint model



第2図 可動部および支持部の弾性変形を考慮した柔軟関節モデル
Fig. 2 Proposed flexible joint model

を表す。

リンクに固定された直交座標系におけるばねの弾性変形を $i_{RX}, i_{RY}, i_{RZ}, i_{SX}, i_{SY}, i_{SZ}$ 、ばね定数を $k_{iRX}, k_{iRY}, k_{iRZ}, k_{iSX}, k_{iSY}, k_{iSZ}$ 、曲げモーメントを $M_{iRX}, M_{iRY}, M_{iRZ}, M_{iSX}, M_{iSY}, M_{iSZ}$ でそれぞれ表す。一般に、産業用ロボットでは可動部の剛性はそれ以外の部分にくらべ低いので、本柔軟関節モデルでは可動部近傍の弾性変形のみを扱っている。

2. 剛性パラメータ同定手法

第1図あるいは第2図に示された柔軟関節モデルの剛性パラメータの同定手法としては、周らの手法が提案されているだけである。周らの手法では、ロボットを静止させた状態で外力を加えて弾性変形量を計測している。ロボットを静止させているために弾性変形量は関節部の摩擦力の影響を受け、また各部を固定する治具が必要であるなど、実用上の問題点が多い。著者らは、各部を固定するための大がかりな治具や外力の付加を必要としない剛性パラメータ同定手法を開発した。

慣性および粘性パラメータは従来手法などによってすでに同定されているものと仮定し、以下では剛性パラメータ同定手法について述べる。剛性パラメータ同定では、つぎのばね定数を対角にもつ剛性パラメータ行列

$$K = \text{diag}(k_{iRX}, k_{iRY}, k_{iRZ}, k_{iSX}, k_{iSY}, k_{iSZ})$$

を同定することを目的とする。

行列 K を同定するために、まずロボットの手先位置 x およびモータの回転角 $M = [M_1 \ M_2 \ M_3]^T$ を計測し、弾性変形によって生じた手先の変位 e を次式によって算出する。ただし $L(M)$ は M から x への順変換とする。

$$e = x - L(M) \quad \dots \quad (1)$$

また、すでに同定されている慣性および粘性パラメータなどから、 $M_{iRX}, M_{iRY}, M_{iRZ}, M_{iSX}, M_{iSY}, M_{iSZ}$ を要素とするモーメントベクトル M は算出可能である。 e と M の間にはつぎの関係が成立し、最小自乗法によって K を同定することができる。

$$e = J \dot{M} = J K^{-1} M \quad \dots \quad (2)$$

ただし、 J は $i_{RX}, i_{RY}, i_{RZ}, i_{SX}, i_{SY}, i_{SZ}$ を要素とする縦ベクトル、 J は M から e へのヤコビ行列とする。

以上により剛性パラメータの同定は可能である。しかし手先位置の変位 e は一般に微小量であり、精度よく剛性を同定することはできない。変位 e を精度よく算出するためには、式(1)から絶対座標系における手先位置 x の計測精度が重要であるが、 x を精度よく計測することは非常に困難である。本論文では手先位置 x を微小量 e だけ微小運動させる。弾性変形量 e と手先位置変位 e とモーメント M において、微小運動にともなう増分をそれぞれ $\Delta e, \Delta M$ とすれば、次式の関係がえられる。

$$\Delta e = -J \Delta M \quad \dots \quad (3)$$

$$e = J \dot{M} = J K^{-1} M \quad \dots \quad (4)$$

ただし、 J は M から x へのヤコビ行列である(従来の軸ねじれモデルでは J と J は同じものである)。式(3)、式(4)に基づいてパラメータ同定をおこなうためには x を計測する必要があるが、 x は相対的な位置変位を計測すれば良く、高精度な計測が可能である。式(1)、式(2)に基づく同定にくらべて、 x の高精度な計測が可能なることから、高精度な剛性パラメータの同定をおこなうことができる。

また本剛性パラメータ同定手法では、ロボットが微小運動しているために摩擦などの影響を受けにくく、従来の関節等価ばね定数同定手法で必要であった固定治具や外力の付加などの手間も不必要である。

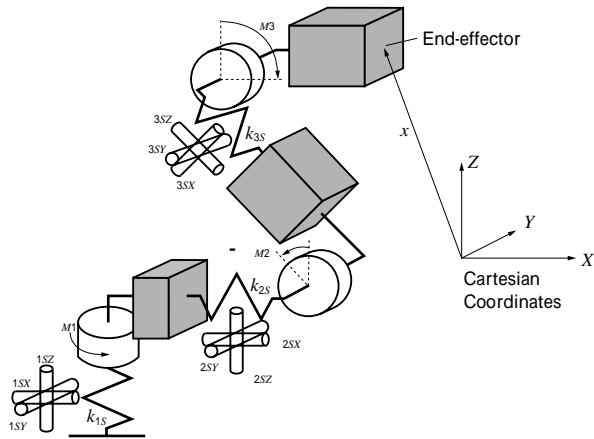
3. モデルの簡略化と同定実験

第2図からもわかるように、本柔軟関節モデルでは冗長な弾性変形が多数存在し、第2図の例では未知の剛性パラメータが18個も存在する。同定する上で、冗長性を有するパラメータを18個も同定することは容易ではない。すなわち、パラメータ相互の独立性などから、十分に豊富な同定データを与えることは困難であり、同定不可能あるいは物理的にありえない値が同定される問題が発生する。これらの問題を解決するために、以下では本モデルの簡略化について検討する。

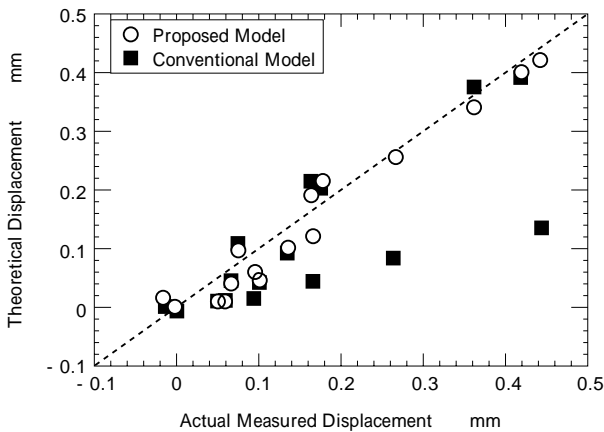
今、関節の回転方向に直交する弾性変形の剛性がほぼ等しいとする。すなわち、 k_{1RX} と k_{1RY}, k_{1SX} と k_{1SY}, k_{2RX} と k_{2RZ}, k_{2SX} と k_{2SZ}, k_{3RX} と k_{3RZ}, k_{3SX} と k_{3SZ} がほぼ等しいと仮定する。このとき、二つのばね要素 k_{iR} と k_{iS} は等価なばね要素であり、区別する必要がない。

そこで簡略化のために k_{iR} と k_{iS} に含め、一つのばね要素として扱うことにする。一つにまとめられたばね要素を改めて k_{iS} で表す。以上によって同定すべき剛性パラメータを大幅に削減することができる。パラメータを削減したモデルを第3図に示す。

本柔軟関節モデルを検証するために、従来の軸ねじれモデルと本柔軟関節モデルの双方における剛性パラメータの同定を、2章の同定手法に基づき実施した。試作し



第3図 ばね要素を統合した柔軟関節モデル
Fig. 3 Proposed flexible joint model eliminated some elastic elements



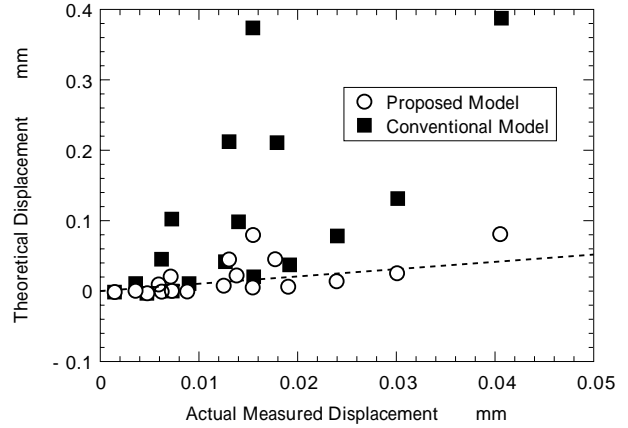
第4図 手先位置変位量
Fig. 4 Displacement of end-effector

た垂直多関節ロボットに対する同定結果を第4図に示す。第4図は従来の軸ねじれモデルと第3図の本柔軟関節モデルに対する同定結果であり、それぞれのモデルから算出される手先位置変位量の理論値と実測値の関係を示している。図から従来の軸ねじれモデルでは理論値と実測値が大きくばらついているが、本柔軟関節モデルでは実測値とよく一致している。

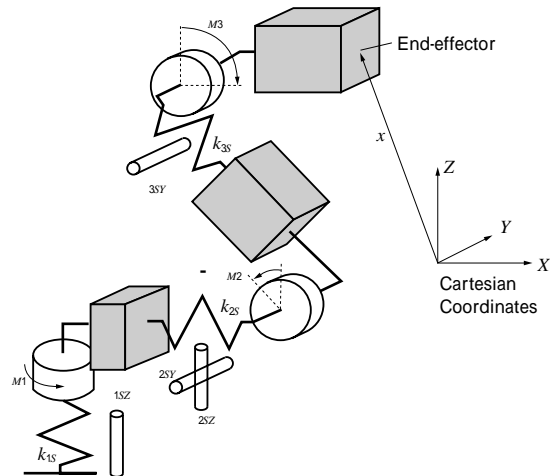
第5図は、弾性変形の中から軸ねじれ成分だけを抜き出し、軸ねじれによって生じた手先位置の変位量について、従来の軸ねじれモデルと本モデルを比較したものである。第5図中の実測値は、実際に関節角度とモータ回転角を計測し、その角度差を軸ねじれ変形量としたときの値である。図から軸ねじれによる変形量が手先位置変位量全体に占める割合がかなり小さいことがわかる。

すなわち、軸ねじれのみを考慮した従来の軸ねじれモデルでは正確に実システムを記述できない。軸ねじれモデルに基づき同定をおこなえば、軸ねじれだけで無理に手先位置変位を記述しようとするため、実測値に対して理論値が大きくばらついてしまう。本柔軟関節モデルでは、十分に実際のロボットの動特性が記述され、良好な同定結果がえられている。

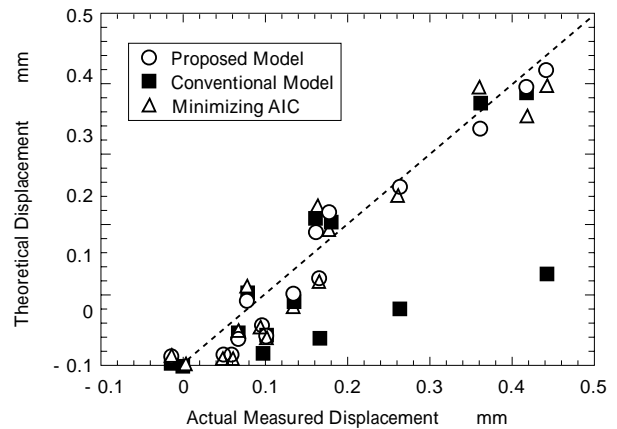
いっぽう、従来の軸ねじれモデルでは弾性変形の自由度は3であったのに対し、第3図の簡略化された本柔軟関節モデルでも自由度は9個存在し、本モデルに基づく制御系は複雑なものとなる。そこでAIC (Akaike Infor-



第5図 軸ねじれによる手先位置変位量
Fig. 5 Displacement of end-effector due to twist of joint shafts



第6図 AICを最小化する本柔軟関節モデル
Fig. 6 Proposed flexible joint model which minimizes AIC



第7図 AICを最小化する本柔軟関節モデルの手先位置変位量
Fig. 7 Displacement of proposed flexible joint model which minimizes AIC

mation Criterion) 最小化推定法⁶⁾によって、さらなる次数 n (ここでは弾性変形の自由度) の低減をおこなった。AIC 最小化推定法とは、次式で示される AIC を最小にするようにパラメータ数あるいは次数を決定する手法である。

$$(AIC)_n = N \log \left(\frac{2}{n} \right) + 2n \quad \dots \dots \dots (5)$$

N は同定にもちいるデータ数であり、 n は次数 n のモデルからえられた理論値と実測値との誤差である。今回の同定実験では、次数4のときにAICが最小となった。

AIC を最小にする低次元モデルを第 6 図に示す。この低次元モデルでは $1SZ, 2SY, 2SZ, 3SY$ 方向にのみ弾性変形し、他の方向には弾性変形しない。

第 7 図は低次元モデルによってえられる手先位置変位量の理論値と実測値の関係を示している。図から明らかかなように、低次元化する前の柔軟関節モデルにくらべて、低次元モデルでは手先位置変位量のばらつきが大きくなる傾向にある。しかし、従来の軸ねじれモデルにくらべれば、誤差が飛躍的に改善され、自由度を 4 とした低次元モデルでも実際のロボットの動特性を十分にあらわしている。

4. 柔軟関節モデルに基づく制御実験

AIC 最小化推定法によって弾性変形の自由度を 4 にまで低次元化した低次元モデルに基づき制御系を構成し、試作したロボットにおいて制御実験をおこなった。第 8 図に本制御系のブロック図を示す。弾性変形補償制御は低次元モデルに基づいて弾性変形量を求め、モータに対する目標回転角度を補正する FF (Feed Forward) 制御であり、主に位置精度の向上を担う。すなわち式 (3)、式 (4) の関係に着目すれば、目標回転角度補正量 c は次式で与えられる。

$$c = -J^{-1}J = -J^{-1}JK^{-1}M \dots\dots\dots (6)$$

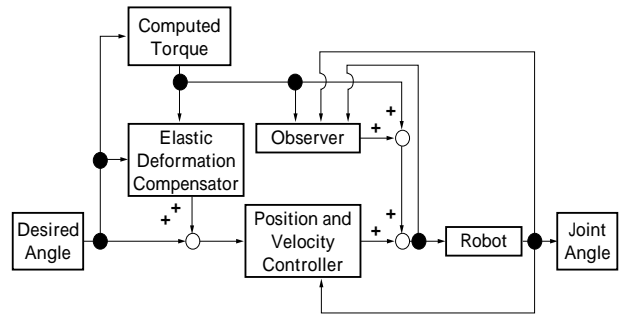
また、図中のオブザーバは我々が提案したオブザーバ⁽²⁾³⁾を本モデルに拡張したものであり、主に過渡振動の低減が目的である。

4.1 実験結果

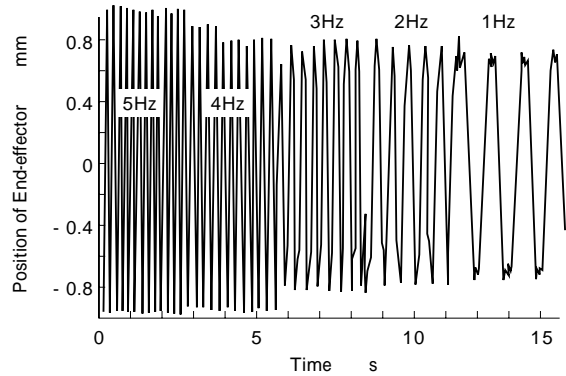
試作したロボットにおいて手先位置を 5~1Hz で正弦波運動させた場合の実験結果を第 9 図に示す。この実験では手先位置の目標振幅を両振幅で 1.5mm としている。弾性変形を考慮しない従来制御では、第 9 図(a)のように弾性変形によって 4~5Hz では実振幅が目標振幅を大きく上回り、振幅精度が低下している。

いっぽう、第 9 図 (b) の本制御実施例では周波数を問わず、目標振幅に対する実振幅の誤差は $\pm 0.1\text{mm}$ 以下であり、高い振幅精度を実現している。以上から本柔軟関節モデルによって実際のロボットの動特性が精度よく記述され、大きく動的な位置精度が改善されることが確認された。

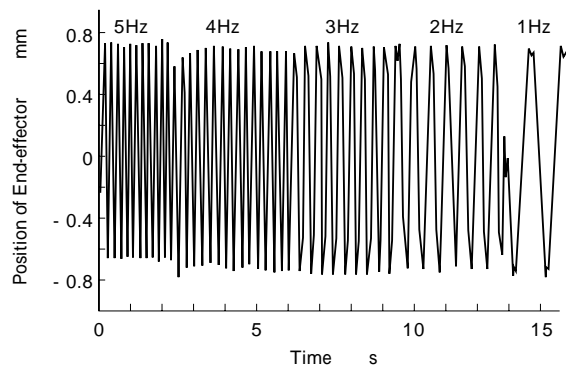
むすび = 柔軟関節を持つマニピュレータにおいて軸ねじれのみを考慮した従来の軸ねじれモデルに対して、新たに任意方向に曲げ変形する柔軟関節モデルおよびその剛性パラメータの同定手法を提案した。剛性同定実験および解析によって従来手法の問題点を明確化し、本柔軟関節モデルと同定手法を検証した。また、本モデルを低次元化し、低次元化モデルに基づく弾性変形補償制御およびオブザーバの有効性を実験によって検証した。



第 8 図 制御ブロック図
Fig. 8 Block diagram of proposed control system



(a) Without Elastic Deformation Compensator



(b) With Elastic Deformation Compensator

第 9 図 手先位置の正弦波動作実験結果
Fig. 9 Experimental results of sine wave motions

参考文献

- 1) 宇野知之ほか：電気学会論文誌 (D 編), Vol.107, No.8 (1987), p.1018.
- 2) 西田吉晴ほか：日本ロボット学会誌, Vol.12 No.3 (1994), p.466.
- 3) 本家浩一ほか：機械学会論文誌 (C 編), Vol.60, No.577 (1994), p.153.
- 4) 西 義和ほか：日本ロボット学会学術講演会 (1986), p.61.
- 5) 周 梶完ほか：日本ロボット学会誌, Vol.13 No.3 (1995), p.390.
- 6) 木村英紀：デジタル信号処理と制御, (1982), p.193, 昭晃堂.