関節トルクフィードバックによる減速機付き ロボットアームの運動制御

橋 本 稔*

Motion Control of Robot Arms with Reducers Based on Joint Torque Feedback

Minoru HASHIMOTO*

Since the dynamic equation of robot arms represents a nonlinear and time-varying system, it is difficult to control precisely the manipulator when it moves with high speed and heavy load. In order to solve this problem there have been proposed many control schemes with compensating the dynamic effects involving dynamic interaction between joints. However, it is not easy to compute the inverse dynamics in real time. To reduce the computational burden, many authors have derived various computational schemes of the inverse dynamics.

In the present paper, we propose to introduce a torque sensor for each joint, instead of the computation, to measure the torque generated by the dynamic effects. The advantage of this technique is that the computational load is reduced much and the control system becomes robust for unexpected external disturbance such as gravity acting on objects picked up and put down or other interactions with the environment. Therefore, this control scheme could be useful to the precise and robust control of the robot manipulators. We introduce dynamic modeling and stability analysis of the joint torque feedback control for robot arms with reducers in the drive trains. Furthermore, we will show the experimental results for a two joints arm which prove the validity of the control technique.

Key Words: robot control, torque sensor, dynamic control, manipulator, robot arm

1. はじめに

ロボットアームは、リンク間の動的干渉、慣性変動、手先に物体を把持したときの負荷の変動などロボットの運動中にさまざまな外乱や変動を生じるために、その制御は定慣性定負荷のサーボ機構にはない特殊性をもっている。そのため一般に産業用ロボットなどでは、高ゲインフィードバックによりできる限り各関節のサーボ剛性を上げることにより、それらの外乱や変動の影響を少なくする方法がとられている。しかし、それでもなお高速または高負荷荷重の場合その位置制御性が悪くなるという問題や、高ゲインであるために効率が悪い、制御系が不安定になりやすいなどの問題が存在する。

このような問題を解決するために、計算トルク法^{1),2)}、非線形フィードバック制御³⁾などさまざまな制御法が考案されてきたが、それらを実際のロボットアームの制御に適用するためには、多くの実時間計算を必要とし、いかに計算量を減らすかということが一つの重要な課題とされてきた^{4),5)}。

一方、最近、ロボットアームを関節間の干渉や非線形性を含む多入力多出力系と考えるのではなく、ロボットの各関節に着目して、動力学の干渉や負荷変動により各関節に作用するトルクをセンサにより測定し、それをフィードバックすることにより補償しようという制御法がKirkansky⁶⁾と小菅ら⁷⁾により提案された。この制御法の特徴は、

- ① 動力学の干渉項や把持物体などによる負荷を推定することなくそれを補償する運動制御ができること、
- ② トルクセンサとして用いられるストレインゲージが安価で、サーボ系の構成が容易であることである。

小菅らは、この方法により二関節ダイレクトドライブ

* 電気通信大学 調布市調布ヶ丘 1-5-1

* University of Electro-Communications, Chofu
(Received June 6, 1988)

(Revised September 26, 1988)

アームを制御し、関節トルクセンサ情報をフィードバックすることにより、位置制御性が向上することなどを示した。同時に彼らは、トルクセンサにより測定されるトルクは、ロボットアームの動的干渉によって各関節に作用するトルクの一部であって、各関節が空間中を運動する際のモータに加わる慣性力が含まれていないこと、それを知るためには直交座標系における各関節の位置および速度を計算する必要があることを指摘している。しかしこの計算のためにはニュートンオイラー法における一巡計算の台座側から手先に向かう計算を必要とし、実時間計算削減の障害となるものと思われる。

この問題を解決する一つの方法は、モータを台座に固定し、リンクのみを適当なトルク伝達機構を介して駆動させるような機構を構成することである。この方法によれば、モータ自身が空間中を運動することによる慣性力はゼロとなり、このための計算はまったく必要なくなる。しかし一方、この方法では、多自由度化にともない機構が複雑となり、また特殊な機構のロボットアームでなければこの制御法を適用できないという問題が生じる。

筆者らは、減速機付きロボットアームの場合、このモータに加わる測定不可能なトルクが減速比に比して減少し、その位置制御性への影響がきわめて小さいことに着目して、より現実的な方法として、従来の補償要素とトルクセンサフィードバックによってのみ構成される位置サーボ機構を提案したい。この方法によれば、動的干渉によるトルクの1次成分を補償することができるし、把持物体の負荷変動に対してはモータの飽和限界内で完全に無反応化することができ、理想的な位置サーボ剛性を得ることができる。本論文の目的は、このような制御系のモデルを示すとともに、その安定性について考察し、本制御法の特徴を実験的に検証することである。

なお、本制御法は、大槻ら⁹⁾によるいわゆる「負荷無反応形電気サーボ機構」をより安定なサーボ機構として発展させたものと考えられる。負荷無反応型サーボ機構は負荷系による外乱トルクのみならずモータ発生トルクをも含む系全体のトルクを電流などのフィードバックループにより無反応化させようとするもので、その安定性が保たれる領域がきわめて制限されるなどの問題がある。これに対して本制御法は、負荷系による外乱トルクのみをトルクセンサで検出しフィードバックすることにより、ロボットアームの複雑な動力学を補償して、単なるモータ系の制御問題に帰着させようというもので、後述するように安定な領域がよ

り広くなるという特徴がある。

また、最近、動的非線形干渉項を直接測定するのではなく、入力トルクと関節角加速度から推定しようという研究^{9)~11)}や、加速度を直接制御することにより負荷トルクの影響を抑制する方法が研究¹²⁾されている。これらの方法は、前述したような測定できない動的干渉要素がないという利点がある反面、加速度推定におけるノイズと推定時間遅れが問題となるものと思われる。ロボットのように不連続的な負荷変動を伴うシステムの場合、時間遅れなく正確に状態を推定することはロバストな制御を実現する上で重要な課題である¹³⁾。

本論文ではまず、ロボットアームの各関節に着目した力学モデルを示し、関節トルクセンサにより測定不可能なトルクの位置制御への影響を考察する。第3章では、トルクセンサフィードバックを含んだサーボ機構のモデル化とその閉ループ安定性について議論される。第4章では試作システムによる制御実験の結果を示し、本サーボ機構の有効性を示す。

2. 関節の力学モデル

ロボットアームの各関節における動力学をここでは **Fig. 1** のようにモデル化する。トルクセンサの位置を境としてモータと台座側のリンクにより構成されるモータ系とそのモータよりも手先の側にあるすべてのリンクおよび関節によって構成される系とに分けることができる。モータ系の慣性 J_m および粘性摩擦 B_m は一定と仮定し、リンク系のそれら J_i , B_i は他の関節角の変化などにより変動するものとする。 T_i はこの関節から手先までのリンクによる動的干渉力および重力、把持物体による負荷などの和である。 T_m はモータが発生するトルクであり、これはモータの電流を制

Fig. 1 Schematic drawing of the joint model

御することにより制御できる。さらに T_d は、この関節のロータおよび減速機が空間を運動するために生ずる慣性力である。ここで、 T_m 、 T_d は実際にこの位置に作用するトルクに減速比 $n(<=1)$ の逆数を乗じて関節座標系に変換してあるとし、同様に J_m 、 B_m も関節座標系で表わされているとすると、この系の運動方程式は (2.1) 式のような簡単な形で表わすことができる。

$$T_m + T_d + T_i = (J_m + J_i)\ddot{q} + (B_m + B_i)\dot{q} \quad (2.1)$$

ここで、 $\dot{q}$ 、 $\ddot{q}$ は着目している関節の角速度および角加速度を表わしている。トルクセンサにより測定される T_s は、センサ位置における釣合条件よりつぎのようになる。

$$T_s = -T_i + J_i\ddot{q} + B_i\dot{q} \quad (2.2)$$

(2.2) 式より、(2.1) 式はつぎのようなモータ系の負荷のみを用いた式に変換される。

$$T_m + T_d - T_s = J_m\ddot{q} + B_m\dot{q} \quad (2.3)$$

モータへの制御入力として目標角からの偏差を補償するためのトルク T_e をもちいて、

$$T_m = T_e + T_s \quad (2.4)$$

とするならば、制御システムはつぎの式で表わされる。

$$T_e = J_m\ddot{q} + B_m\dot{q} + T_d \quad (2.5)$$

したがって、ロボットアームの動的干渉を含む複雑な制御系を各モータ系に分離された制御問題として扱うことができる。ここで T_d はトルクセンサによって測定できないので外乱トルクとして扱われる。

このトルク T_d の位置制御性への影響を考察するためにモータ系の運動方程式をオイラー法により記述してみる。いま、第 i 関節軸上に原点があり、 z 軸がその関節軸と一致する座標系を設定し、その z 軸方向の単位ベクトルを z_{i-1} とすると、

$$\tau_{di} = z_{i-1}^T [I_{mi}\ddot{\omega}_{i-1} + I_{mi}[\omega_{i-1} \times (z_{i-1}\dot{q}_i/n)] + \omega_i' \times (I_{mi}\omega_i')] \quad (2.6)$$

ここで、下付き添え字 i は台座側から数えた関節の番号を示し、上付きの T は行列の転置を表わしている。 ω_{i-1} は絶対座標系における第 $i-1$ リンクの角速度で、 ω_i' は第 i ロータの角速度であり次式によって表わされる。

$$\omega_i' = \omega_{i-1} + z_{i-1}\dot{q}_i/n \quad (2.7)$$

また、 I_m はアクチュエータ座標系で示された慣性行列である。 τ_{di} はアクチュエータの座標系で示されており、これをリンク座標系へ変換すると、

$$T_{di} = \tau_{di}/n \quad (2.8)$$

いま、Fig. 2 のようにモータ系の質量中心が z 軸上にあり、 z 軸に関して回転対称であるようなモデルを

Fig. 2 Coordinate system of a joint

考えると、上式はつぎのように簡単に表わされる。

$$T_{di} = nJ_m z_{i-1}^T \ddot{\omega}_{i-1} \quad (2.9)$$

いま比較のために、リンク系がこの $\ddot{\omega}_{i-1}$ の運動をするために要するトルク T_i' を見積ると、

$$T_i' = J_i z_{i-1}^T \ddot{\omega}_{i-1} \quad (2.10)$$

となる。インピーダンスマッチングがとれていて、 J_m と J_i が等しい場合を考えると、(2.9)、(2.10) 式よりつぎの関係が得られる。

$$T_d = nT_i' \quad (2.11)$$

一般のロボットマニピュレータでは、 n として 1/50 程度が使われているから、モータ系が空間中を運動することによる慣性トルク T_d は、リンク系のそれ T_i' に比べ無視できるほど小さいことになる。 T_i' は関節トルクセンサにより測定されるために、測定不可能なトルク T_d による位置制御性への影響はきわめて小さいものと思われる。

3. サーボ機構の安定性

(2.1)～(2.5) 式にしたがってトルクセンサフィードバックを含むサーボ系のブロック線図を書くと Fig. 3(a) のようになる。 K_i はトルクセンサのフィードバックゲインである。いま、関節角の目標値を Q_d 、外乱トルク T_d と T_i 、制御量を Q としたときにつぎの関係が得られる。

$$\{G_ms + K_i'G_is + G_bK_b s/K_e + K_aG_eG_b\}Q = K_aG_bG_eQ_d + T_d + K_i'T_i \quad (3.1)$$

ここで、 K_a は増幅ゲイン、 K_b は逆起電力定数である。 G_b は電機子電圧から出力トルクへの伝達関数で (3.2) 式のものであり、そのブロック線図を Fig. 3(b) に示してある。

$$G_b = K_eK_f/(Ls + R + K_eK_e) \quad (3.2)$$

ここで、 L は電機子インダクタンス、 R は電機子抵抗、 K_e は増幅ゲイン、 K_f は電流フィードバックゲイン

(a) Total system

(b) Part Gb in the system

Fig. 3 Block diagram of the servo system

ン, K_f はトルク定数である。また, G_m , G_l はそれぞれモータおよびリンク系の負荷の逆数を表わし, G_e は位置補償要素でここでは PD 制御 (比例ゲイン: K_p , 微分ゲイン: K_d) を用いている。

$$G_m = 1/(J_m s + B_m) \quad (3.3)$$

$$G_l = 1/(J_l s + B_l) \quad (3.4)$$

$$G_e = K_p + K_d s \quad (3.5)$$

$K'_i = 1 - K_i$ であり, $K'_i = 1$ であれば, トルクセンサフィードバックのない制御系を表わし, $K'_i = 0$ とすると以下のように G_i , T_i の項が含まれない式となり, リンク系の影響を受けない制御系とすることができる。

$$\begin{aligned} \{G_m s + G_b K_b s / K_e + K_a G_e G_b\} Q \\ = K_a G_b G_e Q_d + T_d \end{aligned} \quad (3.6)$$

この場合, サーボ機構の特性方程式は, つぎのようになる。

$$\begin{aligned} L(K'_i J_m + J_l) s^3 + \{L(K'_i B_m + B_l) \\ + (R + K_e K_g)(K'_i J_m + J_l)\} s^2 \\ + \{(R + K_e K_g)(K'_i B_m + B_l) \\ + K'_i (K_b K_f + K_a K_e K_f K_d)\} s \\ + K'_i K_a K_e K_f K_p = 0 \end{aligned} \quad (3.7)$$

ここで, $K'_i = 1/(1 - K_i)$ であり, いま $K'_i \rightarrow \infty$ の極限における安定性を, Hurwitz の安定判別法を利用して考察する。各次数の項の係数は正なので, つぎの式が安定条件を与える。

$$\begin{aligned} \{L(K'_i B_m + B_l) + (R + K_e K_g)(K'_i J_m \\ + J_l)\} \{(R + K_e K_g)(K'_i B_m + B_l) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} + K'_i (K_b K_f + K_a K_e K_f K_d)\} \\ > L(K'_i J_m + J_l) K'_i K_a K_e K_f K_p \end{aligned} \quad (3.8)$$

$K'_i \rightarrow \infty$ の極限においては,

$$\begin{aligned} \{L B_m + (R + K_e K_g) J_m\} \{(R + K_e K_g) B_m \\ + (K_b K_f + K_a K_e K_f K_d)\} \\ > L J_m K_a K_e K_f K_p \end{aligned} \quad (3.9)$$

が安定条件を与えることになる。(3.9)式には, 負荷変動を伴うリンク系の慣性および粘性抵抗の項がいつい含まれておらず, このサーボ機構の安定性がモータ自身に対する従来のサーボ機構のそれと等価なことを示している。

つぎに K_i のとりうる範囲を考察したい。理想的には K_i は 1 となるべきものであるがサーボ機構のモデル化に伴う誤差などにより, 1 からずれる可能性がありこの近傍での安定性について議論する。(3.7)式の特性方程式を書き換えると,

$$\begin{aligned} L K_J s^3 + \{L K_B + (R + K_e K_g) K_J\} s^2 \\ + \{(R + K_e K_g) K_B + (K_b K_f + K_a K_e K_f K_d)\} s \\ + K_a K_e K_f K_p = 0 \end{aligned} \quad (3.10)$$

となる。ここで,

$$K_J = J_m + (1 - K_i) J_l \quad (3.11)$$

$$K_B = B_m + (1 - K_i) B_l \quad (3.12)$$

を用いた。各次数の項の係数が正であるためには, つぎの条件が成り立てばよい。

$$K_J > 0 \quad (3.13)$$

$$K_B > 0 \quad (3.14)$$

このサーボ系が安定であるためには, さらにつぎの式

が成り立つ必要がある。

$$\{LK_B/K_f + (R + K_e K_\theta)\} \{(R + K_e K_\theta)K_B + (K_e K_f + K_e K_e K_f K_d)\} > LK_e K_e K_f K_d \quad (3.15)$$

(3.15)式は K_e に依存するが, (3.13), (3.14)式の条件下で, どのような K_e に対しても (3.15)式が成立するためには, つぎの条件を満たす必要がある。

$$(R + K_e K_\theta)(K_e K_f + K_e K_e K_f K_d) > LK_e K_e K_f K_d \quad (3.16)$$

つまり, (3.15)式は (3.16)式が満たされるように K_p , K_d を選ぶことにより, 自動的に満足される。したがって, (3.13), (3.14)式がこのサーボ系の安定性の K_e 依存性を決める式となり, これらの式を満たすためには, K_e について次式が成り立てばよい。

$$K_e < 1 + \min(J_m/J_l, B_m/B_l) \quad (3.17)$$

つまり, 本サーボ機構の場合, モデル誤差, トルクリップルなどにより K_e が1からずれた場合でも安定性は保たれる。その度合は, モータ系の負荷とリンク系のそれとの比によって決まる。粘性項は, 減速機の摩擦などによりモータ系のほうがリンク系のそれより大きいものと思われる。 J_l は一般に運動中に変化するので定量的に判断することは難しいが, 減速機付きアクチュエータでインピーダンスマッチングのとれたもの場合, (J_m/J_l) は1の近傍であるとする, 十分安定性は保たれる。

4. 実験結果

本サーボ機構の特徴を検討するために, 減速機付き二関節アームを試作し, その制御実験を行った。試作ロボットアームは, 30 W の DC モータによりなる二関節を有し, 第1関節は平歯車による減速機が取り付けられ, 第2関節にはハーモニックドライブ方式が採用されている。減速比は両関節とも 1/50 である。トルクセンサとしてはストレインゲージを用い, 減速機の出力軸上に軸に対して 45° と 135° にそれぞれ2枚ずつ計4枚のゲージを貼った。第1, 第2リンクの長さは, それぞれ 20 cm と 30 cm である。ロボットアームの先端には負荷を取り付けられるようになっており, これにより慣性および負荷の変動実験を行うことができる。各モータは, ドライバ回路, D/A 変換装置を介してパーソナルコンピュータに接続されている。各関節の位置検出はエンコーダにより行われ, 速度は, タコメータ (第1関節) と F/V 変換 (第2関節) により行われる。トルクセンサの出力は交流型の増幅器により約 700 (V/strain) に増幅され, A/D 変換装置を用いてコンピュータに読み込まれる。サーボコンピ

ュータとしては, 16 ビットマイクロプロセッサを用い, 2 ms のサンプリング周期でサーボ計算を行った。

慣性変動に対する効果を調べるために, 第1関節に対する慣性を変えて, 第1関節にステップ状の目標入力を与え, その応答を測定した。実験は, リンクによる慣性がゼロの場合と, それが 900 kgcm² の二種類について行った。PD ゲインは, リンク慣性がゼロの場合に制御系がクリティカルダンピングを示すように決定された。このサーボ系に, トルクフィードバックを入れない場合と入れた場合の応答を測定した結果が, Fig. 4 に示されている。

PD 制御の場合, 負荷にともなう慣性変動により, ステップ応答が負荷のない場合に比べ乱れ, わずかではあるがオーバーシュートを示している。これにトルクフィードバックを加えることにより, ステップ応答は, 負荷のない場合のものとはほぼ同じ軌跡を示すようになることがわかる。

Fig. 5 に動的干渉の影響に対する実験結果を示す。これは台座側の第1関節にステップ入力を与え, そのときの第2関節の位置制御性への影響を測定したものである。第2関節は 0° を目標角として位置制御され

Fig. 4 Step response curves with load change

Fig. 5 Compensation of dynamic intervention between joints

Fig. 6 Response for abrupt change in load

ている。トルクフィードバックにより動的干渉が補償されており、外乱トルク T_d の影響も小さいことがわかる。

トルクフィードバックを含むこのサーボ機構は手先で把持した負荷に対して、モータの飽和限界内で理想的なサーボ剛性を示すことができるものと思われる。そこで、第1関節を一定角にフィードバック制御を行い、そこに2kgの負荷をかけ、そのときの角度偏差を測定した。さらに、ロボットが物体を握んだり、放したりする場合負荷の瞬間的な変動が予想され、その場合の本サーボ機構の追従性、安定性が問題となるものと思われる。そこで、先の実験の負荷を急激に取り除いて、その後の応答を調べた。Fig. 6にその結果を示した。PID制御の場合この外乱負荷により0.2°程度の位置偏差が生まれたが、本制御法によりその偏差はほぼゼロにでき、サーボ剛性がきわめて高いことを示している。さらに除荷にともなうステップ状の負荷変動に対しても、正確に追従し位置偏差が生じないことがわかる。

7. 結 論

減速機付きロボットアームへの応用を目標として、トルクセンサを用いた運動制御系の理論的解析、実験結果を示した。動力学解析より、減速機付きロボットアームの場合、関節トルクセンサにより測定不可能なトルクが、他の動的干渉によって発生するトルクに比べきわめて小さいことを明らかにした。安定性の解析からは、トルクフィードバックゲインの変動に対して本サーボ系は広い範囲にわたって安定性が保たれることを示した。実験結果からは、慣性変動、関節間の動的干渉に対してそれらを無反応化し、より良い運動制

御を可能にした。また、ワークの着脱時などに生じる瞬間的な負荷変動に対しても、時間遅れを伴わずに正しく応答した。さらに、本サーボ系のトルクフィードバックを含む実質的なサーボ剛性は、モータの飽和限界内で理想的に高いことが示された。

これらにより、本制御法が減速機付きロボットアームのより正確な運動制御に有効であることを示した。

本研究をすすめるにあたり、電気通信大学佐藤公子教授、山田達也氏に多大なる援助をいただきました。ここに深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) R.C. Paul: Modeling Trajectory Calculation and Servoing of a Computer Controlled Arm, A.I. Memo 177, Stanford Artificial Intelligence Lab., Stanford University, Sept. (1972)
- 2) J.Y.S. Luh, M.W. Walker and R. Paul: On-line Computational Scheme for Mechanical Manipulators, ASME Transaction, J. of Dynamical Systems, Measurements and Control, **102**, 69/76 (1980)
- 3) T.J. Tarn, A.K. Bejczy, A. Ishidori and Y. Chen: Nonlinear Feedback in Robot Arm Control, Proc. of 23rd Conf. on Decision and Control, Las Vegas, NV, December, 736/751 (1984)
- 4) W. Khalil, J. F. Kleinfinger and M. Gautier: Reducing the Computational Burden of the Dynamic Models of Robots, IEEE 1986 Int. Conf. of Robotics and Automation, San Francisco, 525/531 (1986)
- 5) A. Izaguirre, M. Hashimoto, R. Paul and V. Hayward: A New Computational Structure for Real Time Dynamics, Technical Report MS-CIS-87-107, University of Pennsylvania, CIS Dept., Moore School, Philadelphia (1987)
- 6) N. Kircanski: Real-Time Dynamics of Manipulation Robots, Colloquium at University of Pennsylvania, Philadelphia, December (1986)
- 7) 小菅, 竹内, 古田: 関節トルクセンサを用いたロボットアームの制御, 第26回 SICE 学術講演会予稿集, 359/360 (1987)
- 8) 大槻, 平井, 池辺: 負荷無反応形電気サーボ機構, 計測自動制御学会論文集, **21**-10, 74/79 (1985)
- 9) J.R. Hewit and N. Tan: Dynamic Coordination of Robot Movement, Proceedings of 4th CISM-IFTOMM Symp. on Theory and Practice of Robots and Manipulators, 77/88 (1981)
- 10) M. Nakao, K. Ohnishi and K. Miyachi: A Robust Decentralized Joint Control Based on Interference Estimation, Proc. of IEEE 1987 Int. Conf. on Robotics and Automation, 326/331 (1987)
- 11) T.C. Hsia, T.A. Lasky and Y. Guo: Robust Independent Robot Joint Control: Design and Experimentation, Proc. of IEEE 1988 Int. Conf. on Robotics and Automation, 1329/1334 (1988)
- 12) 堀 洋一: 加速度制御形サーボ系の提案, 電学論研究開発ノート, 107-D-12, p. 1531 (1987)
- 13) 橋本 稔, P.R. Paul: アクチュエータマルチセンサ情報の統合によるロボットの状態推定と故障検出, 計測自動制御学会論文集, **24**-3, 72/79 (1988)