ダイレクト・ドライブアームのための 関節トルクの計測と制御[†]

浅 田 春比古*

Measurement and Control of Joint Torques for Direct-Drive Arms

Haruhiko ASADA*

In a direct-drive arm, motors are directly coupled to their arm linkages without reducers. This eliminates some defects of traditional gearing such as backlash, friction and deflection, and therefore enables the drive system to have improved control accuracy. The D.C. motors used for the direct-drive arm, however, have a significant amount of torque ripples and deadband, which limits the control accuracy, particularly for compliance and force control.

In this paper, a method for the torque feedback control of a direct-drive joint is presented. The motor output torque is directly measured by a strain gage sensor built into the motor. It is found that closed loop torque control can compensate for the complicated nonlinearities and improve the overall control accuracy.

First, the design of the torque sensor is presented. The effect of the structural vibration mode which results from the insertion of the flexible torque sensor is analysed, and a design method to place the natural frequency of this mode far above the operating frequencies is shown. Torque feedback control using the sensor is then discussed. The sensor design is verified experimentally, and the control performance using the direct torque feedback is evaluated.

Key Words: direct-drive arm, torque control, torque sensors

1. 緒 言

ロボットアームによって、組立作業などの高度な作

業を行うには、力の制御あるいはコンプライアンスの制御が必要とされている。ところが、従来のロボットにこれらの制御方式を適用すると、減速器に摩擦やバックラッシュが存在するため、制御精度上、著しい制約を受けることがある。そこで、減速器の非線形性を補償する方法が、いろいろ検討されているが、なかでも、Wu と Paul¹⁾ならびに Luh ら²⁾は、関節の駆動トルクを計測して、トルクの閉ループ制御を行うことにより、減速器の問題に対処している。また中野³⁾は力の閉ループ制御をマスター・スレーブマニピュレータに用い、Salisbury と Craig⁴⁾は多関節指の制御に応用して、特性の改善につとめている。ところが、これらの閉ループ制御では、減速器に強い非線形性があるとき、リミットサイクルを生じたり、不安定になることが認められており²⁾、やはり減速器付きロボットで高精度の力制御を実施するのは本質的に難しい問題である。

一方、近年、高トルクモータを負荷に直結するダイレクト・ドライブアームが開発され⁵⁾、実用化されるようになった^{6), 7)}。ダイレクト・ドライブアームでは減速器が省略されるので、摩擦などの機械的非線形性がきわめて小さく、精密な位置制御のみならず、高精度の力制御・コンプライアンス制御が可能なものと期待されている。ところが、近年開発されたダイレクト・ドライブモータでは、強大な駆動トルクの発生が可能であっても、著しいトルクリップルや不感帯など、電磁気的非線形性が存在するため、トルクの制御精度に限界がある。たとえば筆者らが開発した MIT ダイレクト・ドライブアームの場合、出力トルクに 10% 以上の変動がみられた⁸⁾。またバリエブルリラクタンス (Variable Reluctance) 形モータ⁹⁾においては、原理上さらに大きな変動があるものと考えられる。

そこで本文では、ダイレクト・ドライブアームにお

[†] 第 28 回自動制御連合講演会で発表 (昭 60・11)

* 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

* Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto
(Received December 13, 1985)

(Revised May 14, 1986)

いて、関節の駆動トルクを計測し、トルクの閉ループ制御を行うことを提案する。これによって、モータや駆動アンプの非線形性が補償されるとともに、同定の困難な複雑な特性やノイズに対しても改善がはかられ、機構部の優れた機械的特性とあいまって、高い制御性能が得られるものと期待される。

2. トルクセンサの設計

ロボットアームにおいて、関節駆動トルクを計測するには、モータへの入力電流を計る間接的方法と、歪ゲージなどを用い、出力トルクを計る直接的方法とがある。前者の方法では入力電流と出力トルクの間関係をあらかじめ調べておき、電流を計測してトルクを推定する。したがって計測精度は駆動系のトルク-電流特性に依存するので、電磁気的に非線形で複雑な特性を有するダイレクト・ドライブモータの場合には適用が難しい。そこで本文では、歪ゲージを用いて出力トルクを直接計測する方法を検討する。

Fig. 1 は歪ゲージ式関節トルクセンサで、モータから関節軸に伝達される駆動トルクが、弾性体に取り付けられた歪ゲージにより計測されることを示す。このセンサの感度は弾性体の剛性 k に依存し、剛性が低くなるほど感度が向上する。しかしむやみに剛性を下げると、位置制御の精度が低下したり、制御系の安定性を損うことになるので、センサの設計には、計測感度のみならず、制御系への影響を十分考慮する必要がある。

Fig. 1 に示すように、モータのロータの回転変位を θ_r 、アームリンクのそれを θ_a とし、まず剛性の低下が位置制御系の静特性へ及ぼす影響を考える。ロータ変位を計測して位置のフィードバック制御を行う場合には、弾性体が閉ループ系の外におかれるため、弾性体の変形量 $\Delta\theta = \theta_r - \theta_a$ が、直接位置決め誤差となって現れることになる。そこで、 θ_r のかわりに θ_a を計測し、閉ループ系を構成することを考えれば、弾性体が閉ループの内部に含まれるので、弾性変形による偏差は、閉ループ制御によって補償されることにな

Fig. 1 Schematic Construction of arm link, motor and torque sensor

る。ところが弾性体の剛性が低いと、動的には θ_a の位相が θ_r に比べて著しく遅れることになるので、閉ループ系の安定性が損われるおそれがある。そこで弾性体の剛性が系の動特性に及ぼす影響を検討する。

図中に示すように、弾性体で二分されたアームリンク側の慣性を J_a 、モータのロータ側の慣性を J_r とする。特に減速器が用いられる場合には、ロータ側の慣性は減速比を考慮に入れ、関節軸回りに換算された等価慣性を意味するものとする。モータの発生するトルクを入力、アームリンクの回転変位を出力とした場合の伝達関数は、

$$G_p(s) = \frac{1}{(J_r + J_a)s^2} \cdot \frac{1}{s^2/\omega_n^2 + 1} \quad (1)$$

となる。ここに第1項は、モータとアームリンクが、弾性体を介さずに直結された場合の伝達特性を示し、第2項が、弾性体を挿入することによって生じる高次要素を示す。第2項の固有振動数 ω_n が十分大きければ、第2項は省略でき、弾性体の影響が無視できる。そこで、どのようにして ω_n を高めることができるかについて検討する。

固有振動数 ω_n は、

$$\omega_n^2 = k \frac{J_r + J_a}{J_r J_a} \quad (2)$$

で与えられ、弾性体の剛性のみならず、ロータ側およびアームリンク側の慣性と、それらの比によっても値が異なる。そこで、両慣性の比を $r = J_r/J_a$ として、(2)式を書きかえれば、

$$\omega_n/\omega_a = \sqrt{(1+r)/r} \quad (3)$$

が得られる。ここに、 ω_a は、ロータ側が固定された場合の固有振動数で、 $\omega_a = \sqrt{k/J_a}$ により与えられる。すなわち、 ω_a は、アームリンク側慣性 J_a と、弾性体の剛性 k が指定されるとき、一意に定められるものである。これに対して系の固有振動数 ω_n は、ロータ側とアームリンク側慣性の比により、変更できる。

Fig. 2 Normalized natural frequency v.s. normalized rotor-side inertia

Fig. 2 は ω_a で無次元化した系の固有振動数 ω_n/ω_a と、慣性比 r の関係を示したもので、ロータ側の慣性を、アームリンク側のそれに対して著しく小さくすれば、 ω_n を ω_a に比べて大幅に大きくとることができる。すなわち、センサの計測感度を高くするべく、剛性 k が低くなっても、ロータ側慣性を小さくすれば、系の固有振動数は高い値に保たれ、センサ挿入による系の特性変化は無視できる。

一般に、ダイレクト・ドライブアームでは、このような条件は容易に達成される。すなわち、モータロータが減速器を介さずに関節軸に直結されるため、ロータ側の等価慣性はアームリンク側のそれに比べて、きわめて小さいものとなり、固有振動数は著しく高いものになる。さらに、トルクセンサの取り付け場所をできる限りモータロータに近づけるように工夫すれば、ロータ側の慣性が極力小さくなるので、固有振動数はさらに高くなる。たとえ、感度向上のためトルクセンサーの剛性を低めても、慣性比 r が十分小さい限り、動的影響は無視されうる。これはダイレクト・ドライブアームに特有の重要な利点である。一方、減速器付きロボットの場合には、このような条件は達成が困難である。通常、減速器付のロボットは、アームリンク側の慣性 J_a とロータ側の等価慣性 J_r がほぼ等しくなるように、減速比が選ばれる（インピーダンス・マッチング：impedance matching）。したがって慣性比 r はほぼ 1 となり、系の固有振動数は ω_a のわずか 1.4 倍と低い。そこでばね定数 k を高くとらない限り、動的遅れが顕著になるので、計測感度向上のため、むやみに剛性は下げられない。ダイレクト・ドライブアームの場合には、このような制約条件はない。

3. トルクセンサの試作と実験

前節の理論解析に基づき、トルクセンサを設計・製作し、性能試験を行った。Photo 1 は、試作したセンサをダイレクト・ドライブモータに組込んだところを示す。使用したモータは、ステータ外径 254 mm、ロータ外径 139 mm、極数 18 のブラシレスモータで、最大トルクは 130 Nm である。一方、モータを駆動するアンプには、電圧 350 VDC、最大電流 30 A、周波数 4 kHz の PWM アンプを用いた。

歪ゲージは、ロータと関節軸（モータ軸）を結ぶ三本のはりの円孔の四隅に取り付けた。ヒステリシスが小さくなるよう、部材は削り出しによる一体加工部品とし、材料にはリン青銅を用いた。また電氣的ノイズを低下させるため、プリアンプをモータ内部に設けた。この部材のねじり剛性は $1.5 \times 10^5 \text{ Nm/rad}$ で、

Photo. 1 Torque sensor built in direct-drive motor
(1) stator (2) rotor (3) shaft
(4) sensor beam (5) strain gages
(6) amplifier circuit

Fig. 3 Static performance test for torque sensor

感度は 97 mV/Nm 、電氣的ノイズは 5 mV 以下となった。アームリンク側の慣性 $J_a = 0.24 \text{ kgm}^2$ に対し、ロータ側の慣性はわずか $J_r = 0.01 \text{ kgm}^2$ で、(2)式による固有振動数の理論値は 629 Hz となり、系の通常の帯域幅 (20 Hz 以下) と比べて十分大きな値となった。

Fig. 3 は、このトルクセンサの静特性の実験で、ロータを固定した状態で、負荷を時計方向および反時計方向に加え、センサの読みと実際の印加トルクを比較したものである。ロータの位置を変え、数回実験を繰返した結果、図に示すような、優れた直線性と再現性が確かめられた。すなわち、最大計測誤差は $\pm 0.2 \text{ Nm}$ で、これは関節の軸受けが有する摩擦と同程度の大きさである。

トルクセンサにおけるコンプライアンスが、系の動特性にどのような影響を与えるかを調べるため、周波数応答の実験を行うとともに、センサを取りつけない場合と比較した。Fig. 4 は、モータ駆動信号を入力、関節角速度を出力とする開ループ周波数応答を示す。ここに丸印はセンサの弾性部材を含む場合、三角印は含まない場合である。両周波数応答は、実験の可能な

Fig. 4 Open loop frequency responses of position control systems

周波数範囲ではほぼ同一の応答を示した。また、開ループ周波数応答に基づいて、閉ループ位置制御系を設計し、センサによる剛性低下の影響を調べた。閉ループ系のバンド幅は約 3 Hz で共振周波数に比べて、著しく低い値であり、位置制御系の応答には剛性低下の影響はまったく見出されなかった。このように低剛性の弾性部材を用いても動特性にはほとんど影響を与えず、かつ高いトルクの計測精度が得られることが確かめられた。

4. 閉ループトルク制御

4.1 補償器の設計

前節に述べたトルクセンサを用いてトルクの閉ループ制御を行う。力制御やコンプライアンス制御では、ロボットは外部環境と機械的に接触し、これから拘束を受ける。本文では、単一の関節についての力制御を扱うこととし、アームリンクの運動が外部の固定物によって拘束される場合を調べる。

アームリンクを固定した状態では、制御対象は、Fig. 5 の鎖線内に示すようなブロック図で表わされる。ここに u と K_a は駆動アンプの入力とゲイン、 L と R はモータのインダクタンスと抵抗、 i はモータ電流、 K_t はトルク定数、 τ は出力トルク（関節トルク）を表わす。ロータ変位 θ_a からのフィードバックはモータの逆起電力を表わすが、これの影響は小さいので、入力 u から出力 τ に至る系の伝達関数は、

Fig. 5 Block diagram of torque feedback control system

Fig. 6 Open loop frequency responses of torque control systems

$$G_t(s) = \frac{K_t}{Ls + R} \cdot \frac{k}{Js^2 + k} \quad (4)$$

となる。Fig. 6 の実線は、(4)式に含まれる各パラメータを実験により求めて描いたボード線図である。この線図を参考に、トルク制御系の特性補償、すなわち Fig. 5 に示す補償器 G_c の設計を行う。まずこの制御系は 0 型のサーボ系であり、定常偏差をもつ。そこで、位相遅れ補償を行い、低周波ゲインを引き上げる。つぎに、弾性部材による共振の影響を避けるべく、ノッチフィルタを用いて、共振曲線のピークを和らげる。また実際の系では、高周波域において、この共振点のほかにも厳密な同定が不可能な数多くのピークが現れた。この種のダイレクト・ドライブモータでは、トルク制御の場合、100~800 Hz の高周波域まで、ゲインが高いレベルに保たれるのが特徴で、高周波ノイズなどにより、系の安定性が損われることがある。そこで低域通過フィルタを用いて、高周波域でのゲインを下げ、高周波のモードを刺激しないようにした(注1)。以上の特性補償を組合せると、Fig. 6 に一

(注1) Suehiro ら¹⁰⁾は、位置制御系の補償において低減通過フィルタを用いて安定化を行っている。

Fig. 7 Output torque v.s. command torque without torque feedback control at a fixed rotor position

Fig. 8 Output torque v.s. command torque with torque feedback control

点鎖線で示す周波数応答が得られる。なお、比較のために、インピーダンスマッチングのとられた減速器付ロボットの周波数応答を破線で示した。同じねじり剛性を有するトルクセンサを用いても、共振点は 60 Hz 付近にまで下がり、特性補償が難しくなる。

4.2 閉ループトルク制御の実験

閉ループトルク制御の制御性能を実験により調べる。Fig. 7 と Fig. 8 は、一定のロータ位置に対して、入力トルク信号と出力トルクの間の定常特性を調べた結果である。Fig. 7 は、トルクの閉ループ制御を行わない場合で、原点付近に約 ± 5 Nm もの不感帯が存在する。また、トルクの作用する方向によって出力が異なる、いわゆるヒステリシス特性を顕著に示す。これに対して Fig. 8 は、フィードバック制御を行った場合で、不感帯がほぼ解消されると同時に、ヒステリシス幅も数十分の一に減少している。

ついでロータの位置を変えて同様の実験を繰り返した。前に述べたように、ダイレクト・ドライブモータでは、ロータの位置によって出力トルクが変動するため、精密なトルク制御が困難である。特に出力トルク

Fig. 9 Variations of output torque due to rotor position changes

Fig. 10 Transient response of torque control system

の指令値が小さい場合、変動幅が相対的に大きくなる傾向にある。Fig. 9 は比較的小さい一定のトルク指令値に対し、実際の出力トルクがどのように変動するかを調べたもので、開ループ制御の場合には三角印で示すように、顕著な変動が見られる。これに対して、閉ループ制御を行ったときには、 ∇ 印で示すように、大幅に変動が圧縮され、標準偏差で指令トルク値の 0.1% 以下となった。

最後に過渡応答についての評価を行った。Fig. 10 はトルク指令値に対するステップ応答で、速応性ならびに安定性とも満足な応答である。図より遅れ時間、整定時間は、それぞれ 6 ms と 60 ms と求まる。また、閉ループ系の帯域帯については約 30 Hz が達成されていることが確かめられた。

5. 結 言

ダイレクト・ドライブアームのための、関節トルクの閉ループ制御を提案し、実験によりその有効性を確かめた。まず歪ゲージ式トルクセンサの設計法を明らかにし、センサによる機械的剛性の低下が系の動特性に悪影響を及ぼさないための条件を明らかにした。すなわちロータ側慣性がアームリンク側慣性に比べて十分小さいことが必要となるが、ダイレクト・ドライ

プではこの条件が容易に達成されることを示した。ついで、トルクセンサを試作するとともに、実験により、計測誤差 $\pm 0.2 \text{ Nm}$ 、固有振動数 650 Hz の高性能トルクセンサを製作するとともに、これが位置制御系に何らの影響も及ぼさないことを確認した。ついで、トルクセンサを用いたトルクの閉ループ制御について、その特性補償を行い、帯域幅 30 Hz 標準偏差 0.1% の高性能を達成した。このようにトルクの直接計測と閉ループ制御により制御性能は飛躍的に改善されることが明らかになった。

なお、本文では、トルクセンサをトルク制御のためにのみ用いたが、トルクフィードバックは位置制御の特性改善にも利用できる。今後トルクセンサの利用方法について、検討を加えてゆくことが重要と考えられる。

本研究にご協力いただいたマサチューセッツ工科大学 Swee Keng Lim 氏と新明和工業(株)山本裕敏氏に深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) C. H. Wu and R. P. Paul: Manipulator Compliance Based on Joint Torque Control, Proc. of 19th IEEE Conference on Decision and Control, 88/94 (1980)
- 2) J. Y. S. Luh, W. D. Fisher and R. P. Paul: Joint Torque Control by Direct Feedback for Industrial Robots, IEEE Trans. Automatic Control, **AC-28-2**, 153/161 (1983)
- 3) E. Nakano, et al.: Cooperational Control of the Anthropomorphic Manipulator MELARM, Proc of 4th Int. Symp. on Industrial Robots, 251/260 (1974)
- 4) K. Salisbury and J. Craig: Articulated Hands: Force Control and Kinematic Issues, Int. J. of Robotics Research, **1-1**, 4/17 (1982)
- 5) H. Asada and K. Y. Toumi: Analysis and Design of a Direct-Drive Arm with a Five-Bar-Link Parallel Drive Mechanism, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, **106-3** (1984)
- 6) R. Curram and G. Mayer: The Architecture of the ADEPT One Direct-Drive Robot, Proc. of 1985 American Control Conference, 716/721, Boston (1985)
- 7) H. Kuwahara, et al.: A Precision Direct-Drive Robot Arm, Proc. of 1985 American Control Conference, 722/724, Boston (1985)
- 8) S. Davis and D. Chen: High Performance Brushless DC Motors for Direct-Drive Arms, IEEE Industrial Electronics Conf. (1984)
- 9) R. Welburn: Ultra High Torque Motor System for Direct Drive Robotics, Robot 8, Detroit, 19-3/19-71 (1984)
- 10) T. Suehiro and K. Takase: A Manipulation System Based on Direct-Computational Task-Coordinate Servoing, Proc. of 2nd Int. Symp. Robotics Research, 34/41 (1984)