〔原著論文〕

光学式トルクセンサーを内蔵したダイレクト・ドライブロボットの動的コンプライアンス制御

浅田 春比古* 金 寧 鐸*

本論文ではダイレクト・ドライブの特長を生かし、安定性や速応性に優れた動的コンプライアンス制御系の設計方法について述べる。まずロボットの機械的構造やセンサーの設置場所によるシステムの動的な挙動の違いを解析し、望ましい機械構造やセンサーの配置を導く。次に実際にこの設計方法に基づいてダイレクト・ドライブシステムを設計製作し、その特性を評価する。また本方式に適した光学式トルクセンサーをあらたに開発し、ダイレクト・ドライブモータに組み込む。最後にコンプライアンス制御系の極とコンプライアンスを望ましい値に指定する動的コンプライアンス制御系を設計し、試作したダイレクト・ドライブロボットに応用して、その特性を実験によって評価する。

1. 緒 言

ロボットが外部環境と機械的な干渉を持つ高度な作業では力やコンプライアンスの制御が必要とされ、さまざまな制御方式が研究されている。Whitney¹⁾は環境を含む力制御系のモデリングを行い、制御系の安定性を解析した。また Raibert と Craig²⁾は作業戦略を導出するための Mason³⁾の理論を基礎とし、位置と力のハイブリッド制御を実現した。末広と高瀬⁴⁾は作業座標において望ましい加速度や力を生み出すための直接計算トルク制御をダイレクト・ドライブロボットに適用した。一方 Hogan⁵⁾は静的コンプライアンスや粘性抵抗の他に慣性負荷を加えて、より一般的な制御方式のインピーダンス制御を提唱し、また Kazerooni⁶⁾はインピーダンス制御のロバスト安定性について研究を行った。

力やコンプライアンスの制御において安定性は重要な問題で、速応性を損なわず広い範囲で力やコンプライアンスを安定に制御する有効な方法が望まれている。力制御系の安定性はループゲインやサンプリングレートなどコントローラの諸パラメータに左右されるが、根本的には機械的構造やセンサーの位置など機械系の特性に支配される。したがって安定性を確保するには、制御系の補償方法だけでなく、機械的構造やセンサーの設計法にまで逆のぼって考える必要がある。Cannon⁷⁾や Eppinger⁸⁾らはアームリンクや減速機の弾性を考慮して

系の安定性を検討している。また Luh, Fisher と Paul⁹⁾は力覚センサーを用いた場合の力制御の問題点を指摘し、関節トルクフィードバックを提唱している。また Asada と Lim¹⁰⁾はダイレクト・ドライブロボットに関節トルクフィードバック制御を行い、高い性能を得ている。

ダイレクト・ドライブロボットは伝達機構での摩擦がほとんどなく、バックラッシュや機械的剛性の点でも優れているため、精密な力制御に適する他、トルクの計測も容易に行える利点を有する。本論文ではダイレクト・ドライブロボットの特長を生かして、機械設計の段階からセンサーの配置や質量の配分を考慮し、安定性の高い力・コンプライアンス制御系を設計する方法について述べる。また実際にこの設計方法に基づいて光学式のトルクセンサーをダイレクト・ドライブモータに組み込んだロボットを製作し、動的コンプライアンス制御系の実験を行って特性の評価を与える。

2. 力・コンプライアンス制御系の動的解析

Fig.1 は力・コンプライアンス制御系のモデリングで、 J_e はエンドエフェクタの慣性、 J_a はアームリンクのそれ、また J_r は減速機を含むモータロータの等価慣性を表す。減速機付きのロボットでは減速機で弾性変形を生じるので、ばね定数 k_j のばねをアームリンクとモータロータの間に仮定する。また手首に力覚センサーを取り付ける場合には、センサー部材に弾性変形を生じるので、これをばね定数 k_w のばねで表す。

まず手首のセンサー信号をフィードバックして目標力

原稿受付 1988年2月10日

* 京都大学工学部

Fig. 1 Model of torque and compliance control system

(トルク) τ_a と比較する単純な力制御系を考える。簡単のために手先は環境に固定されたとするとモータ入力 τ_m から手先に作用する力 $\tau_w (=k_w(\theta_a - \theta_e))$ までの開ループ伝達関数は次のようになる。

$$\frac{\tau_w}{\tau_m} = \frac{k_j k_w}{J_r J_a s^4 + \{(J_r + J_a)k_j + J_r k_w\} s^2 + k_j k_w} \quad (1)$$

この制御系に単純比例制御 $\tau_m = K_f(\tau_a - \tau_w)$ が行われる場合、根軌跡は Fig. 2 のようになる。伝達関数の分母と分子の相対次数が 4 であるため根軌跡の 2 本の枝が複素平面の右半平面に入ってしまう。実際のシステムでは機械構造にある程度の減衰も存在するが安定性の基本的な傾向は同じである。このようなシステムの制御は一般に難しく、特にシステムのパラメータの変動がある場合には安定性の保証が困難なことが知られている⁷⁾。

次にコンプライアンス制御系について考える。ロボットの手先に作用する外部からのトルク τ_e を入力、手先の変位 $\Delta\theta_e$ を出力とする制御系を考える。Fig. 1 のようにアームリンクの位置 θ_a と手首で測った力 τ_w をフィードバックする単純な制御則 $\tau_m = K_p(\theta_a - \theta_e) - K_f \tau_w$

Fig. 2 Root locus of non-collocated torque control system with wrist force feedback

が適用された場合、 τ_e から $\Delta\theta_e$ までの閉ループ伝達関数は次のようになる。

$$\frac{\Delta\theta_e}{\tau_e} = C \frac{b_4 s^4 + b_2 s^2 + 1}{a_6 s^6 + a_4 s^4 + a_2 s^2 + 1} \quad (2)$$

ここに a_2, a_4, a_6, b_2, b_4 は慣性 J_e, J_a, J_r と各部分の剛性によって定まる定数である。また C は静的コンプライアンスで次の式のようになる。

$$C = \frac{1}{k_w} \left\{ 1 + \frac{k_w}{K_p} (1 + K_f) \right\} \quad (3)$$

上式で分かるようにトルクのフィードバックゲイン K_f を増加させることによりコンプライアンスを大きくすることができ、逆に位置のフィードバックゲイン K_p を増加させることにより剛性を大きくすることができる。しかし最大剛性は力覚センサーの剛性 k_w によって制限される。

次にこのコンプライアンス制御系の根軌跡の傾向を調べてみる。位置のフィードバックループと力のフィードバックループについてそれぞれ開ループ伝達関数 $G(s)$ を求めると、いずれも次式のような相対次数 4 の系であることが導かれる。

$$G(s) = \frac{b_2' s^2 + b_0'}{a_6 s^6 + a_4 s^4 + a_2 s^2 + a_0} \quad (4)$$

したがって Fig. 2 と同じく根軌跡の 2 本の枝は不安定領域に入ってしまう。

このような特性はシステムの構造に起因する。上述の例では、位置センサーがアームリンクの部分 J_a に取り付けられ、力覚センサーは手首部分、すなわち J_a と J_e の間に設置されている。一方アクチュエータはモータロータ部分 J_r に駆動トルクを発生するので、両方のセンサーとの間にはばね k_j が介在して相対変位を生じる。このようにアクチュエータとセンサーの配置が異なり、相対変位を生じるシステムはノンコロケートなシステム (Non-Collocated System) と呼ばれる⁷⁾。ノンコロケートな場合には極と零点の数の差、すなわち相対次数が大きくなり、安定性の良い制御が困難になる。

相対次数は制御の難かしさを表す指標でもあって、それが 2 より大きくなればループゲインが上がることでシステムは不安定になる。相対次数は制御則や構造物の剛性、質量分布、ならびにアクチュエータとセンサーの相対位置に依存する。Table 1 は質量分布や制御則ならびにアクチュエータとセンサーの相対位置による極と零点の数の差を調べた結果である。まず 4 種類の機械的構造が比較されている。最初の構造は上で述べた一般的

な構造である^{1,2)}。2番目の構造はモーター側側の慣性 J_r が無視できる程度に小さい場合であり¹⁰⁾、3番目の構造はエンドエフェクタとアームの間のコンプライアンスが無視できるような構造である⁹⁾。最後の構造は2番目と3番目の組合せで、モーター側の等価慣性やエンドエフェクタとアームの間のコンプライアンスが共に無視できる場合の構造である。各々の構造に対してさまざまな制御則を適用してみた。位置の計測をアームあるいはエンドエフェクタから行ったり、力の計測を関節あるいは手首から行った場合を分類して考えた。制御則には位置と力の2つのフィードバックゲインが存在するので各々のフィードバックゲイン K_p 、 K_f に対して2つの根軌跡を描くことができる。従って Table には K_p 、 K_f 各々がパラメータの場合の極と零点の数の差を示した。

Table 1 から次のことが分かる。

- 1) モーター側側の等価慣性 J_r が無視できる程度に小さいならば、ばね k_j が介在しても相対次数は2つ減る。
- 2) 位置の計測地点からモーター側のところまで n 個の独立な慣性負荷が存在するならば、位置フィードバック K_p に関する相対次数は $2n$ となる。

- 3) 力の計測地点からモーター側のところまで m 個の独立な慣性負荷が存在するならば、力フィードバック K_f に関する相対次数は $2m$ となる。

任意のフィードバックゲインに対して制御系が安定性を失わないためには相対次数は2より小さいことが望まれる。Table 1 でこの条件を満たす構造は2番目と4番目の構造の2つである。しかし2番目の構造では実現可能な最小コンプライアンスが手首の剛性 k_w によって制限されてしまうので望ましくない。次の節ではこの4番目の構造に相当するものを設計する。

3. ダイレクト・ドライブロボットの関節トルクフィードバック

コンプライアンスの可変範囲が広く安定性の良い制御を実現するには、前節の解析で分かるように、次の条件を満たす構造が適当と考えられる。

- 1) アームリンクとエンドエフェクタの間にはコンプライアントな要素が含まれないこと。
- 2) モーター側の等価慣性を十分小さくすること。
- 3) 以上の条件のもとに、位置センサーとトルクセンサーを関節部分に設置し、コロケートな配置とする

Table 1 Difference of pole and zero numbers of compliance control systems

structure	control law	(number of poles)-(number of zeros)	
		K_p	K_f
	$\tau_m = K_p(\theta_d - \theta_a) - K_f\tau_j$	4	2
	$\tau_m = K_p(\theta_d - \theta_a) - K_f\tau_w$	4	4
	$\tau_m = K_p(\theta_d - \theta_e) - K_f\tau_j$	6	2
	$\tau_m = K_p(\theta_d - \theta_e) - K_f\tau_w$	6	4
	$\tau_m = K_p(\theta_d - \theta_a) - K_f\tau_j$	2	0
	$\tau_m = K_p(\theta_d - \theta_a) - K_f\tau_w$	2	2
	$\tau_m = K_p(\theta_d - \theta_e) - K_f\tau_j$	4	0
	$\tau_m = K_p(\theta_d - \theta_e) - K_f\tau_w$	4	2
	$\tau_m = K_p(\theta_d - \theta_a) - K_f\tau_j$	4	2
	$\tau_m = K_p(\theta_d - \theta_a) - K_f\tau_j$	2	0

Fig. 3 Direct-drive robot with built in optical torque sensor

こと。

これらの条件が全て満足される制御系を構成すればコンプライアンスの可変範囲が広い、しかも安定性の良い制御が実現可能になる。そこで本研究ではこれらの条件を満足する制御系として、ダイレクト・ドライブ方式の手首関節を考える。

Fig. 3 はトルクセンサーを内蔵したダイレクト・ドライブ手首の先端関節の構造を示したもので、エンドエフェクターがアームに直結され、エンドエフェクターとアームの間には減速機や力覚センサーなど弾性変形を生じる要素は含まれない。したがって前述の条件 1) が満たされる。一方位置センサーは関節軸に直結され、またトルクセンサーはモーターロータと関節軸を結合するハブの部分に取り付けられて、ロータから関節軸に伝達されるトルクが計測される。これは前述の条件 3) に相当し、コロケートなシステムである。またモーターロータの慣性は負荷側の慣性、すなわち関節軸とエンドエフェクターの慣性に比べて十分小さく、2) の条件も、満足されている。なお減速機付きモーターの場合には、減速比の 2 乗

に比例して関節軸に換算したモーターロータの等価慣性が增大するため、条件 2) の達成は困難となる。

関節トルクフィードバックを有するダイレクト・ドライブ手首関節は、以上の条件を満足する他、実用上重要な利点を有する。まずダイレクト・ドライブ方式であるため、モーターの出力トルクが伝達機構の摩擦や非線形性によって乱されない他、逆に手先に作用する外力が正確にモーター軸に伝達される。また手首の力覚センサーでは過負荷を防止する保護装置が必要なのに対し、モーターに内蔵された関節トルクセンサーでは衝撃などによる過負荷の恐れがない。すなわちトルクセンサーに作用するトルクは、モーターの発生したトルクとロータの慣性トルクの和と常につきあう。このうちロータの慣性トルクが小さい限り、トルクセンサーにはモーターの最大トルク以上のトルクは作用しない。ロータが共振を起こす場合には慣性トルクは無視できず、トルクセンサーにモーターの最大トルク以上のトルクが作用する恐れがある。しかしロータ側の慣性が十分小さいために固有振動数は極めて高い値となり、通常の帯域周波数内では共振の心配は少ない。したがって、センサーの強度をモーターの最大トルク以上に設定すれば、共振以外には衝撃などの過負荷によって壊れる可能性はない。

4. ダイレクト・ドライブモーターに内蔵した光学式トルクセンサーの設計と性能評価

4.1 設 計

Fig. 4 はブラシレス・ダイレクト・ドライブモーターに内蔵したトルクセンサーの構造を示す。トルクが作用すればハブが弾性変形を起こし、ロータと軸の間にねじれが生じる。この微小のねじれを Fig. 4 の (b) に示す光センサーによって検出する。すなわち光源側の光ファイバーはトルクが作用すると受光側のファイバーに対して横方向にずれる。受光側には 2 本の光ファイバーがあり、光源側ファイバーの光軸の移動にともなって、2 本のファイバーに受光量の差を生じる。これをモーターの外部で電気信号に変換し、トルク信号とする。

さてモーターの内部にセンサーを組み込むには困難な問題がある。特にダイレクト・ドライブモーターでは大きな電流が流れ、強い磁場が形成されるため、信号レベルの低い電気式センサーは著しいノイズの影響を受ける。本研究で用いたブラシレスモーターではスイッチング周波数 15kHz の PWM アンプが用いられ、最大 8A の電流が供給されるので、歪ゲージなどのセンサーを設置するには厳しい環境である。本研究で開発した光学式トルクセンサーではモーターの内部には一切の電気回路が入らず、光ファイバーが入るだけなので、ノイズ源とは遮断される。

(a) Mechanical part of optical torque sensor

(b) Electric part of optical torque sensor

Fig. 4 Optical torque sensor

従ってモータのなかにセンサーを組み込んでもノイズレベルの低い計測が可能となる。

4.2 トルクセンサーの性能評価

Fig. 4 に示したように、モータの内部にはセンサーの電気回路が一切入らないので S/N 比の極めて高い信号が得られた。すなわち信号とノイズの比は平均 115 : 1 で、歪ゲージ式の場合と比べて数十倍の改善になった。また歪ゲージ式のセンサーは頻繁なキャリブレーションが必要なのに対し、光学式センサーは長期間安定な動作を行うことが確認された。

Fig. 5 は光学式トルクセンサーの静的実験結果である。モーターを固定した状態で軸側にトルクを加えて、センサーの読みと印加トルクを比較したものである。トルクは時計、反時計方向に数回繰り返して印加してみた。その結果零点付近で 0.1Nm 以下の極めて小さいヒステリシスが見られた。また 0Nm から 20Nm の範囲での非直線性は 0.5% であった。

前節で述べたようにトルクセンサーの動的な性能はセンサー弾性体の剛性とロータの等価慣性、アームリンクの慣性に依存する。試作装置における弾性体のねじれ剛性は 1,100Nm/rad でかなり柔らかいが、ロータの慣性は $3.5 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ であり、アーム側の慣性は $5.11 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ に比べて十分小さい。従って両者の慣性比は 150 になり固有振動数は 280Hz となって十分高い値が得られた。

5. トルク・コンプライアンス制御

5.1 制御系の設計

ブラシレス・ダイレクト・ドライブモータを有する手首関節制御系は Fig. 6 のようなブロック線図で示すこ

とができる。ここに R, L, k_e は各々モータ巻線の電気抵抗、インダクタンス、ならびにモータのトルク定数である。また I は慣性負荷でアームリンクとエンドエフェクタの慣性の和である。パワーアンプには電流のフィードバック k_i と逆起電力による速度のフィードバックがかかっている。

ここで制御系設計の目標は速応性や安定性を損うことなく望ましいコンプライアンスを実現することであり、そのためにコンプライアンスと系の極を任意の値に設定する方法を検討する。コンプライアンスは手先の外力 τ_e に対するアームリンクの変位 $\Delta\theta$ の比で定義される； $C = \Delta\theta(s)/\tau_e(s)$ 。本システムは 3 次系であるため 3 つの極が存在し、これらと独立にコンプライアンス C の指定を行いたい。まず、位置、速度、ならびに関節トルクのフィードバックを行うことによって 3 つの極が指定できる。コンプライアンスの調整に関しては、まず理想的な手首の力覚センサーを考え、外力のフィードフォワード

Fig. 5 Sensor reading vs load torque

Fig. 6 Block diagram of single link compliance control system with wrist sensor

ド制御を行う(註1)。一般にフィードフォワード制御は極の配置には影響を及ぼさないで極と独立にコンプライアンスの調整が可能である。実際、 K_e を外力のフィードフォワードゲイン、 K_p 、 K_v 、 K_r を各々位置、速度、ならびに関節トルクのフィードバックゲインとすれば外力トルク τ_e から関節変位 $\Delta\theta (= \theta - \theta_d)$ までの伝達関数は(5)式のようなになる。

$$\frac{\Delta\theta}{\tau_e} = \frac{B_1 s + B_0}{s^3 + A_2 s^2 + A_1 s + A_0} \quad (5)$$

ここに

$$\begin{aligned} A_0 &= K_p k_{pre} k_a k_t / LI \\ A_1 &= (K_v k_{pre} k_a + k_t) / LI \\ A_2 &= (R + k_i k_a + K_r k_{pre} k_a k_t) / L \\ B_0 &= \{R + k_i k_a + k_{pre} k_a k_t (K_r + K_e)\} / LI \\ B_1 &= 1 / I \end{aligned}$$

また静的コンプライアンスは(6)式のようなになる。

$$C = \frac{B_0}{A_0} = \frac{R + k_i k_a + k_{pre} k_a k_t (K_r + K_e)}{K_p k_{pre} k_a k_t} \quad (6)$$

従って、 K_e 、 K_p 、 K_v 、 K_r を調整することにより、コンプライアンスと極の指定が独立に可能である。

外力を直接測るためのセンサーは必然的に手先に置かれることになり、前述したようにノンコロケートな系を構成して相対次数を高くしたり、過負荷によってセンサーが壊れる危険性があるなどさまざまな問題を有する。そこで関節トルクセンサーでこれを置き換えることを考える。すなわち外力トルク τ_e と関節トルク τ とは

$$\tau_e = \tau - I\dot{\omega} \quad (7)$$

(註1) コンプライアンスは外力に対して生じる変位の比率であって、外力を外部から与えられた入力と見なす。したがって入力信号から直接にコントローラに向かう力覚センサー信号を用いた制御は一種のフィードフォワード制御と見なせる。

の関係にあるので、外力のフィードフォワードを Fig. 7 に示すように関節トルクと加速度のフィードバックに等価変換させることができる。関節トルクと加速度のフィードバックに等価変換を行えば、(5)、(6)式は(5)'、(6)'式になる。

$$\frac{\Delta\theta}{\tau_e} = \frac{B_1 s + B_0'}{s^3 + A_2' s^2 + A_1 s + A_0} \quad (5)'$$

ここに

$$A_2' = \{(R + k_i k_a + K_r' k_{pre} k_a k_t) I + K_a k_{pre} k_a k_t\} / LI$$

$$B_0' = \{(R + k_i k_a + k_{pre} k_a k_t K_r') / LI$$

$$C = \frac{B_0'}{A_0} = \frac{R + k_i k_a + k_{pre} k_a k_t K_r'}{K_p k_{pre} k_a k_t} \quad (6)'$$

従って望ましいコンプライアンス C_d と3つの極 p_1 、 p_2 、 p_3 が指定された場合、位置、速度、加速度、関節トルクのフィードバックのゲイン K_p 、 K_v 、 K_a 、 K_r' を次のように調整すれば手先の力覚センサーを用いた場合と同じ効果をもつ。

$$\begin{aligned} K_p &= (-p_1 p_2 p_3 LI) / (k_{pre} k_a k_t) \\ K_v &= \{(p_1 p_2 + p_2 p_3 + p_3 p_1) LI - k_t^2\} / (k_{pre} k_a k_t) \\ K_a &= \{C_d I p_1 p_2 p_3 - (p_1 + p_2 + p_3) LI\} / (k_{pre} k_a k_t) \\ K_r' &= \{-C_d p_1 p_2 p_3 LI - (R + k_i k_a)\} / (k_{pre} k_a k_t) \end{aligned} \quad (8)$$

Fig. 8 はタコメータからの信号を微分して得られた加速度信号の例を示す。周波数と波形を変えて実験を行って見た結果、図のようにノイズレベルの低い信号が得られた。

ここで加速度は速度の疑似微分によって求めているがこれの実現可能性を検討する必要がある。一般にダイレクト・ドライブロボットは機械的ダンピングが極めて小さいので、高ゲインの速度フィードバック補償によって減衰性を改善している。高ゲインの速度フィードバックを可能とするには高精度でノイズレベルの低い速度信号

Fig. 7 Block diagram of single link compliance control system without wrist sensor

Fig. 8 Acceleration signal by the differentiation of tachometer signal

が必要となり、さまざまな速度計測方法が検討されている¹¹⁾。低いノイズの信号からは、適当な疑似微分の方法により、加速度信号が得られるものと考えられる。

5.2 実験

Fig. 9 は光学式トルクセンサーを内蔵した 3 自由度ダイレクト・ドライブ手首関節である。一番根元の軸のモータは前腕のひじに設けている。2 番目の軸は 1 番目の軸と 3 番目の軸に直交する構造である。1 番目の軸と 3 番目の軸の間にはオフセットがあり、3 つの軸は一点で交差しないので機構学的には Solvable な構造ではないが¹²⁾、姿勢によって慣性がほとんど変化せず、かつ重力バランスが取れるように工夫されている。

Table 2 は本手首関節の諸元である。慣性負荷に比べてモータの出力トルクは十分大きくて手先の加速度は 3G にも達する。位置の検出のためには光学式のインクリメンタリーエンコーダ、速度の検出のためにはパンケキ型の DC タコメータが用いられた。トルクセンサーを含むすべてのセンサーはモータと同軸上に設けられている。

先端の関節を対象として、まず単純なトルクの比例制御 $\tau_m = K_f(\tau_d - \tau_j)$ を行った。エンドエフェクタが外部環境と接触している状態で、トルクの目標値をステップ状に変化させた。そのとき環境側に設けられた歪ゲージにより接触力を観測したら Fig. 10 に示すように、立

ち上がり時間は $t_r = 5\text{ms}$ 、整定時間は $t_s = 90.5\text{ms}$ 、またオーバーシュートは 66.7% で十分な速応性と減衰性が達成されている。

比較のためにノンコロケートな構造の制御系について同様のトルク制御の実験を行った。Fig. 11 に示すように、関節軸の中間にねじり剛性 11Nm/rad のばねを挿入するとともに、リンクの先端付近に歪ゲージを取り付け、これよりトルクのフィードバックを行った。このときロータ側の慣性は無視できず、またリンク先端に力センサーが設置されているので、Table 1 の最初に示したノンコロケートな構造に相当する。Fig. 12 はこのときのステップ応答で著しく大きなオーバーシュートを生じ、また減衰性も悪い結果となった。なお力のフィードバックゲインは Fig. 10 の場合と同じ値にとっている。このようにノンコロケートな構造に比べ、本方式のコロケートな構造は優れた応答性をもつ。

次に動的コンプライアンス制御の実験を行った。前節で述べた動的コンプライアンス制御系を Fig. 13 に示す装置を用いて、コンプライアンスの周波数応答を調べた。コンプライアンス制御系の 3 つの極は $p_1 = -100$, $p_{2,3} =$

Table 2 Specification of the 3d. o. f. direct-drive wrist

element \ joint No.	#1	#2	#3
maximum inertia [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]	0.6672	0.095	0.0511
maximum torque of motor [$\text{N} \cdot \text{m}$]	230	83	49
encoder resolution [pulse/rev.]	18,000	18,000	18,000
tachometer generator sensitivity [V/rad/s]	1.2	1.2	1.2

Fig. 9 3D.O.F. Direct-drive wrist with built in optical torque sensors

Fig. 10 Force step response of collocated system

$-80 \pm j80$, コンプライアンスは 0.18 rad/Nm で、かなり柔らかい系になるように位置やトルク、速度ならびに加速度のフィードバックゲインを調整した。この関節モータとは別に回転速度が自由に換えられるもう一つのモータを用意し、そのモータの軸には Fig. 13 のように中心をずらした円盤を取り付けた。次に円盤の側面にアームリンクの先が接触するように関節軸には一定値の位置の目標入力を加えた。この時、アームリンクと円盤の間には適当な接触力が発生するようにアームリンクの位置の目標値を円盤の側面よりすこし円盤の中心側にずらした。その状態で円盤を回すと関節軸には正弦波の強制変位 θ が与えられる。その正弦波の振幅は円盤の偏心量によって決まるが周波数は円盤の回転速度による。このような方法で一定の振幅のいろんな周波数の関節変位を加えて、そのときのアームリンクと円盤の間の接触力の変化を観測した。本来は外力を入力として変位を観測するのが自然であるが、外力を正弦波状に加えるのが現実的に難しいので、逆に変位を入力とした。したがって本実験ではコンプライアンスの伝達関数、(5)' の逆数につ

Fig. 12 Force step response of non-collocated system

Fig. 11 Torque/force control system with compliance between the arm and the end effector

いて調べたことになる。なお接触力の観測は、Fig. 13 のように、アーム先の歪ゲージによって行われた。ところが歪ゲージの設置による剛性の低下やその先方の質量が振動の原因となり、せっかくコロケート構造のつもりで設計した機械系が Table 1 の二番目に示した構造になる恐れがある。そこで歪ゲージの設置場所を可能な限り先方によらせたり、剛性を十分高くしたので、実験を行った 40 rad/s までの周波数ではその恐れはない。接触力 τ_e の強制変位 $\Delta\theta$ に対する比は、剛性 (Stiffness) に相当する。コンプライアンスは剛性の逆数なので $\Delta\theta/\tau_e$ を計算し、ボード線図に示した。Fig. 14 の丸印に示すように、コンプライアンスは 30 rad/s 付近まで減少しないのが分かる。実線で示したのは (5)' 式を用いて計算した理論曲線であり実験結果より多少高い周波数まで延びている。実験では摩擦などの非線形性の影響が現れたものと考えられる。

比較のためにトルクや加速度フィードバックを用いず、位置のフィードバックゲイン K_p だけを調整して同じコンプライアンス 0.18 rad/Nm を得た場合の応答を調べた。Fig. 14 に三角印で示したものがそれであり、 10 rad/s からコンプライアンスが減少していくのが分かる。これ

Fig. 13 Experiment setup of dynamic compliance control

は大きなコンプライアンスを得るために位置のフィードバックゲイン K_p を小さくしたので、制御系の極が複素平面の原点近くに移動したからである。この時の制御系の3つの極はそれぞれ $p_1 = -46$, $p_{2,3} = -16 \pm j14$ になった。

6. 結 言

光学式トルクセンサーを内蔵したダイレクト・ドライブロボットの設計と動的コンプライアンス制御について論じた。その結果を以下に挙列する。

- 1) コンプライアンス制御系の動的な挙動は機械的構造やセンサーとアクチュエータの位置関係に大きく依存することを示した。またコンプライアンスの可変範囲が広く、安定性の良い制御系を実現するための制御系の構造と機械系の設計条件を導いた。すなわち、
 - ◎アームリンクとエンドエフェクタの間にはコンプライアントな要素が含まれないこと。
 - ◎モータロータの等価慣性を十分小さくすること。
 - ◎以上の条件のもとに、位置センサーとトルクセンサーを関節部分に設置し、コロケートな配置とすること。
- 2) この設計方法に基づいて実際機械系の設計を行い、光学式のトルクセンサーをダイレクト・ドライブモータのなかに組み込んだ。本研究で開発した光学式トルクセンサーはモータのなかに一切の電気回路を持たないため極めてノイズレベルの低い、しかも安定な計測信号を与えることが確認された。
- 3) 上記のダイレクト・ドライブロボットを対象に、トルクのフィードバックを用いた動的コンプライアンス制御を行った。その結果コンプライアンスと極が独立に指定され、安定性や速応性に優れたコンプライアンス制御系の実現が可能となった。

謝 辞

本研究に際し、貴重な御助言いただいた京都大学の得丸英勝先生と田中聡史君、実験装置の製作に御協力いただいた新明和工業㈱の山本裕敏、宇根正美の両氏に深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Whitney, D. E.: "Force feedback control of manipulator fine motions", Transaction of ASME Journal of Dynamic System, Measurement and Control, pp. 91-97, June 1977.
- 2) Raibert, M. H. and Craig, J. J.: "Hybrid Position/

Fig. 14 Bode diagram of compliance

Force Control of Manipulators", Transaction of A SME Journal of Dynamic System, Measurement and Control, Vol. 102, pp. 126-133, June 1981.

- 3) Mason, M. T.: "Compliance and force control for computer controlled manipulators", IEEE Trans. Syst. Man, Cybern., Vol. SMC-11, No. 1, pp. 418-432, 1981.
- 4) 末広, 高瀬: "直接計算方式による作業座標サーボに基づくマニピュレーションシステム", 日本ロボット学会誌, Vol. 3-2, pp. 11-21, 1985.
- 5) Hogan, H.: "Impedance control: An approach to manipulator: Part I-III", Transaction of ASME Journal of Dynamic System, Measurement and Control, Vol. 107, pp. 1-24, March, 1985.
- 6) Kazerooni, H., Sheridan, T. B., Houpt, P. K.: "Robust compliant motion for manipulator, Part I-II", IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-2, No. 2, pp. 83-105, June 1986.
- 7) Cannon, R. H. and Rosenthal, D. E.: "Experiments in Control of Flexible Structures with Noncollocated Sensors and Actuators", AIAA Journal of Guidance and Control, September-October 1984, Vol. 7, No. 5, pp. 546-55.
- 8) Eppinger, S. D. and Seering, W. P.: "Understanding Bandwidth Limitations in Robot Force Control", Proceedings of the 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 904-909.
- 9) Luh, J. Y. S., Fisher, W. D. and Paul, R. P. C.: "Joint torque control by a direct feedback for industrial robots", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-28, No. 2, Feb. 1983.
- 10) Asada, H., and Lim, S. K.: "Design of Joint Torque Sensors and Torque Feedback Control for Direct-Drive Arms", Proc. of the 1985 ASME Winter Annual Meeting, Robotics and Manufacturing Automation Symposium, pp. 277-284, 1985.
- 11) Asada, H., Youcef-Toumi, K.: "Direct-Drive Robots", MIT Press, 1987.
- 12) Asada, H., and Slotine, J.-J. E.: Robot Analysis and Control, John Wiley, Chapter 3, 1986.

浅田春比古 (Haruhiko ASADA)

昭和53年京都大学大学院博士課程(精密工学専攻)修了。同年、京都大学工学部助手。昭和55年より1年半米国カーネギーメロン大学 Visiting Research Scientist。昭和57年米国マサチューセッツ工科大学機械工学科 Assistant Professor, 昭和60年同大学 Associate Professor。昭和60年9月より京都大学助教授, 工学部数理工学科勤務, 現在に至る。ロボット工学, 機械力学, 自動制御, 生産工学の研究・教育に従事。計測自動制御学会, 日本自動制御協会, 日本機械学会, ASME, IEEE などの会員。(日本ロボット学会正会員)

金 寧 鐸 (Young-Tark KIM)

昭和60年九州工業大学制御工学科研修員。昭和61年京都大学大学院工学研究科博士課程入学, 現在に至る。ダイレクト・ドライブロボット, ロボットの力・コンプライアンス制御に興味を持つ。計測自動制御学会, 韓国機械学会の会員。(日本ロボット学会学生会員)

Dynamic Compliance Control of Direct-Drive Robots with Built-In Optical Torque Sensors*

Haruhiko ASADA** Young-Tark KIM**

ABSTRACT

This paper describes an efficient design method for dynamic compliance control by taking the advantages of direct drive. First we analyze dynamic behavior of compliance control system having force/torque sensors attached to various locations such as wrists, arm joints and actuators. Pole-zero locations and natural frequencies as well as stability issues are compared for each control system. It is shown that the dynamic performance depends on the structural stiffness and mass distribution as well as relative locations of actuators and sensors. An efficient structure of mechanical construction and actuator-sensor locations is then derived. An optical torque sensor built in a direct-drive motor is developed on the basis of the analysis. The compliance control system equipped with the torque sensor is synthesized in such a way that an arbitrary compliance be accommodated while placing all the poles at arbitrary locations. It is shown through experiments that the compliance of the torque control system can be varied from a small value to an extremely large value without sacrifice of the system stability.

Key Words : Dynamic Compliance, Optical Joint Torque Sensors, Direct-Drive

* Received February 10, 1988.

** Dept. of Applied Mathematics and Physics, Kyoto Univ.