[計測と制御] Vol. 25, No. 1 (昭和61年1月)]

解 説

ロボットアームのカフィードバック制御

が 本 浩 一*

1. 緒 言

ロボットの高機能化、インテリジェント化を行うには、センサによりロボットの周囲環境の状態を認識し、この認識結果に基づいてロボットを制御するセンサフィードバック制御技術の開発が重要である。ロボットに用いられるセンサの代表例として視覚および力覚をあげることができる。視覚はロボットの周囲環境について多くの情報を得ることができる重要なセンサである。ロボットの制御の面から視覚を見ると、これはロボットに対して位置情報を与えるもので、従来のロボットの制御の中心である位置決め制御や軌道制御と容易に結合できる場合が多い。また視覚からの位置情報はロボットの動作とは独立で、ロボット動作中の実時間処理を必要としない場合が多い。

これに対し力覚からの情報はロボットと対象物との 微妙な相対関係によるもので、ロボットの微小な動作 にも大きな影響を受け、したがって情報の実時間処理 が不可欠である.力覚からの情報を用いたロボットの 力フィードバック制御は、ロボットの各瞬間での動き がフィードバック信号に大きな影響を与え、これを安 定に制御するには、データ処理の高速化、要求される 作業に適した安定な制御方式の開発など多くの技術課 題がある.本報告ではこれらの問題に対する筆者の最 近の研究の紹介を中心とし、力フィードバック制御の 現状と今後の動向について考察する.

2. カフィードバック制御

ロボットの力フィードバック制御とは何らかの手段でロボットのハンド(エンドエフェクタ)に作用する外力を検出し、これに応じてロボットを制御するものである。力フィードバック制御は力制御とコンプライアンス制御(インピーダンス制御)に分けることがで

* (株)日立生産技術研究所 横浜市戸塚区吉田町 292 キーワード: ロボット (robot), マニピュレータ (manipulator), センサ制御 (sensor control), 力制御 (force control), コンプライアンス (compliance). きる. 力制御とはロボットのハンドが対象物に定められた力を作用させるようにロボットを制御するものであり、コンプライアンス制御とはハンドに作用する外力に応じてハンドの軌道を修正し、外力に倣うようにロボットを制御するものである.

2.1 力制御

ロボットの運動方程式は,

$$I(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + C(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + J(\boldsymbol{\theta})^T \boldsymbol{q} = \boldsymbol{\tau}$$
 (1)

で与えられる。 ここに θ , $\dot{\theta}$, $\ddot{\theta}$ は対偶の変位,速度,加速度を表わすベクトル,I は慣性マトリックス,C はコリオリカ,遠心力,重力など加速度以外の運動要因によって生じる力を表わし, \mathbf{q} はハンドに作用する外力である。 J^T はヤコビ行列の転置行列, $\mathbf{\tau}$ はアクチュエータにより対偶に作用している力あるいはトルクである。

(1)式からわかるようにハンドに作用する外力,すなわちハンドが対象に作用させる力はロボットの姿勢,速度,加速度に影響される.そこでロボットの力制御では(1)式を τ について解いて,得られた値を目標値としてサーボモータのトルク制御を行う手法が提案されている 10 .

またロボットの手首とハンドとの間に力センサを取り付け、ハンドに作用する力を検出し、これと設定値の差の信号をモータのトルクに換算し、モータのトルク制御を行う手法も提案されている²³.

これらの力制御の実用化のための技術課題としてつ ぎのものがあげられる.

- (1) ロボット運動方程式の高速演算による慣性力,遠心力の影響の補償
- (2) 摩擦などのパラメータ変動への対応

ロボットの制御には座標変換や動特性の解析が不可 欠であり、これらの演算に要する時間が制御のサンプ リング時間を決定する。サーボモータのトルク制御に は、位置制御や速度制御に比べより短いサンプリング 時間を必要とする。また位置制御や速度制御では運動 学的解析 (kinematics) を行っていたが、力制御では 動解析(dynamics)を行う必要があり、これに必要な演算量は運動学的解析に比べ大幅に増加する。これらの理由からロボットの力制御には現在実用化されている制御装置より数段上の性能をもつものが必要である。このためプロセッサの高速化とともに並列演算による高速化の研究が進められている。さらに高速演算に適した動解析手法の開発も必要である。

サーボモータのトルク制御では減速機や対偶の摩擦力を正確に知る必要がある.現在市販されている産業用ロボットではハーモニックドライブや歯車列によって減速を行っているが、これらの摩擦力は大きく、モータの定格トルクの半分程度となることもある。またこれらの摩擦力は温度や潤滑材の微妙な変化によって大きく影響され、摩擦力を正確に知ることは困難である.したがってモータのトルク制御を行っても、その大部分が減速機の摩擦にくわれ、これが力制御の精度を悪化させる.これに対処するために減速機出力軸への力センサの付加やダイレクトドライブモータによる駆動などの研究が行われている.

以上のようにロボットの力制御はいまだ研究, 開発 段階であり, 実用化にはまだ時間を要する.

2.2 コンプライアンス制御

コンプライアンス制御とは力情報と位置情報とをコンプライアンスという概念のもとに結合してロボットを制御するものである。筆者のグループが開発を行っている力フィードバック制御の一手法である仮想コンプライアンス機構を例にしてコンプライアンス制御の内容について紹介する。

コンプライアンス機構は**図1**のように出力節をばね、ダンパを用いて静止部に結合したばね機構であ

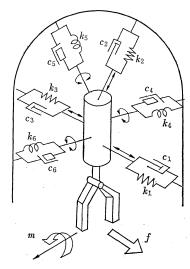


図1 6白由度コンプライアンス機構

り、出力節に作用する外力に応じて、その外力の作用する方向に逃げる倣い機構である。従来からコンプライアンス機構はみがき、ばり取り、組立てなどに広く用いられている。仮想コンプライアンス機構はこの機能をロボットの力フィードバック制御で実現するものである。コンプライアンス機構の一般的なものは図1に示すように並進の3自由度と回転の3自由度をもつ6自由度機構である。

図1のコンプライアンス機構に外力として力 f とモーメント m が作用しているとする. このとき出力節の運動方程式は

$$M\frac{d}{dt}\mathbf{s} + C\mathbf{s} + K\Delta \mathbf{x} = \mathbf{q} \tag{2}$$

となる. ここに s は出力節の並進速度 v と回転速度 w からなる 6 次元ベクトル

$$\mathbf{s} = \begin{pmatrix} \mathbf{w} \\ \mathbf{v} \end{pmatrix} \tag{3}$$

であり, 🛾 は力, モーメントを表わす 6 次元ベクトル

$$q = \binom{m}{f} \tag{4}$$

である。 Δx は出力部の釣り合い位置からの偏差である。M, C, K はそれぞれ,質量・慣性行列,粘性定数行列,ばね係数行列である。

出力節の位置+姿勢を出力節に固定された直交座標の原点の位置ベクトルpと、各軸に平行な単位ベクトルx,y,zで表わす。いま出力節の釣り合い位置・姿勢が (p_0,x_0,y_0,z_0) であるとすると、出力節の位置・姿勢が(p,x,y,z)のときの偏差はつぎのようになる 3 。

$$\Delta x = \begin{pmatrix} \Delta \phi e \\ \Delta p \end{pmatrix} \tag{5}$$

$$\Delta \mathbf{p} = \mathbf{p}_0 - \mathbf{p} \tag{6}$$

$$e = \frac{x_0 \times x + y_0 \times y + z_0 \times z}{|x_0 \times x + y_0 \times y + z_0 \times z|}$$
(7)

$$\Delta \phi = 2 \tan^{-1} \frac{\boldsymbol{x} \cdot (\boldsymbol{e} \times \boldsymbol{x}_0)}{\boldsymbol{x} \cdot \boldsymbol{x}_0 - 2(\boldsymbol{e} \cdot \boldsymbol{x}_0)^2 + 1}$$
 (8)

ここに $\Delta \phi e$ は姿勢偏差であり、単位ベクトル e 回り に角 $\Delta \phi$ 回転すれば釣り合い位置に到達することを示している.

仮想コンプライアンス機構は出力節であるロボットのハンドに作用する力・モーメントを検出し、(2)式で表わされる運動をロボットの制御によりハンドに与えるものである。(2)式左辺の第2項と第3項を移項し、積分することにより

$$\mathbf{s} = M^{-1} \int (\mathbf{q} - C\mathbf{s} - K\Delta \mathbf{x}) dt \tag{9}$$

を得る. すなわちハンドに作用する力・モーメントと

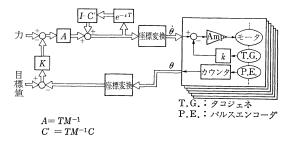


図 2 仮想コンプライアンス機構ブロック図

そのときのハンドの位置・姿勢および速度から(9)式によりハンドの速度 s を計算し、ハンドがこの速度をとるようにロボットを制御するs0.

(9)式を離散値系にすると、n 回目のサンプリング時のハンドの速度 S_n は、(9)式右辺の s を n-1 回目のハンドの速度指令値 S_{n-1} に近似すると

 $S_n = TM^{-1}(\mathbf{q} - K\Delta \mathbf{x}) + (I - TM^{-1}C)S_{n-1}$ (10) となる. ここに T はサンプリング時間, I は単位行列である.

(10) 式の右辺で q はハンドに加わる外力で、力センサにより検出される. Δx はサーボモータの変位検出結果から計算することができる. M,C,K の行列には任意の値を設定することができる. したがって目的とする作業に応じて M,C,K の値を適切に設定し、(10)式によりハンドのとるべき速度を計算し、これをモータの速度に変換し、各モータを速度制御することにより、ハンドがあたかもコンプライアンス機構に接続されているかのような動作を行う. この制御のブロック図を図 2 に示す.

以上に示したようにコンプライアンス制御ではサーボモータは速度制御されており、トルク制御のときほどの短いサンプリング時間は必要でない。またサンプリング時間内に行わなければならない演算量も動解析の場合に比べ大幅に少なくてすむ。これらの理由により、力制御に比べコンプライアンス制御のほうが実現容易であり、力フィードバック制御の実用化はコンプライアンス制御から始まるものと思われる。

3. 仮想コンプライアンス機構の実際

3.1 6 軸力センサ

仮想コンプライアンス機構ではハンドに作用する外力を正確に求める必要がある。外力の検出には種々の方法が考えられるが、ロボットの手首とハンドの間に力センサを取り付ける方法が一般的である。ハンドに作用する外力としては力と、基準点を定めたときのその点に作用するモーメントの6成分で表わされる。し

たがってこの力・モーメントを検出するためには6軸 力センサが必要である.

力センサは作用している力・モーメントに応じて生じる部材の微小変位や歪を検出するものである。検出には微小変位計や歪ゲージが用いられる。 6 軸力センサでは 6 個以上の検出部が必要である。いま検出部で検出された歪 $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \cdots, \varepsilon_k)$ $k \ge 6$ を k 次元ベクトルをで表わす。センサに作用する外力を,センサに固定された直交座標系の成分として

$$\mathbf{q}_{s} = \begin{pmatrix} \mathbf{m}_{s} \\ \mathbf{f}_{s} \end{pmatrix} = (m_{s}^{x} m_{s}^{y} m_{s}^{z} f_{s}^{x} f_{s}^{y} f_{s}^{z})^{T}$$

$$\tag{11}$$

で表わす. ことに T は転置行列を示す. ここでセンサ部材の歪が微小であるなら、 ε と q。の間には線形関係が成立し、

$$q_s = A \varepsilon$$
 (12)
と表わされる.

力センサはロボットの手先に取り付けられるため、ロボットの運動に従って力センサの姿勢が変化する.いまセンサに固定された座標の原点(基準点)の静止座標に対する位置ベクトルを r_s 、センサ座標軸に平行な単位ベクトルを x_s , y_s , z_s とすると、力センサにより検出された力・モーメントの値を静止座標系で、その原点に作用する力、モーメント f_0 , m_0 で表わすと、

$$\begin{pmatrix} \mathbf{f}_0 \\ \mathbf{m}_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_s & \mathbf{y}_s & \mathbf{z}_s & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{r}_s \times \mathbf{x}_s & \mathbf{r}_s \times \mathbf{y}_s & \mathbf{r}_s \times \mathbf{z}_s & \mathbf{x}_s & \mathbf{y}_s & \mathbf{z}_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{f}_s \\ \mathbf{m}_s \end{pmatrix}$$

$$(13)$$

となる.

3.2 仮想コンプライアンス機構のパラメータ

仮想コンプライアンス機構において任意に設定できるパラメータとしては、ばね係数行列 K、粘性定数行列 C、質量・慣性行列 M およびハンドの基準点の位置 p がある.

ばね定数行列はコンプライアンス機構の形状,自由 度およびコンプライアンスの大きさを決めるものである.すなわち座標系のとり方により機構形状が定ま り、行列の要素の1つを無限大とすることによりその 方向のコンプライアンスの自由度をなくすことができ る.またばね定数を零とすることによりその方向には 自由となる.

行列 C と M により外力に対する応答の速さおよび大きさを設定することができる。図3および図4に M, C の値を変化させたときの応答の実験結果を示す。分銅によりハンドに一定力を加え,またその方向のばね定数を零としたときのハンドの速度変化を示したものである。M, C の値により応答が変化することが示されている。

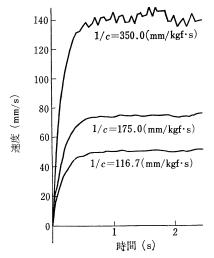


図 3 ハンドの速度応答 (m/c 一定)

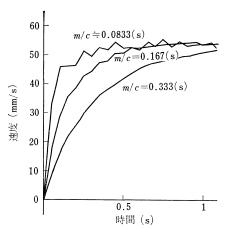


図 4 ハンドの速度応答 (1/c 一定)

ハンドの基準点とは(2)式における力および速度を表わすために用いられる点であり、物理的には出力節の重心の位置を意味する。ハンドに作用する力・モーメントが一定であっても、ハンドの重心の位置が異なると、ハンドはまったく違った運動を行う。仮想コンプライアンス機構ではこの基準位置を任意に設定することができる。

いまハンドに作用する外力が (13) 式により f_0, m_0 で与えられるとする. このときのハンドの基準位置の静止座標に対する位置ベクトルを p とすると, p に作用するモーメント m_0 は

$$\boldsymbol{m}_{p} = \boldsymbol{m}_{0} - \boldsymbol{p} \times \boldsymbol{f}_{0} \tag{14}$$

となる. そこで(10)式における q を

$$\boldsymbol{q} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{m}_p \\ \boldsymbol{f}_0 \end{pmatrix} \tag{15}$$

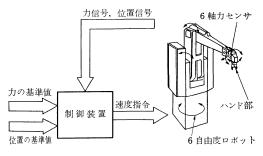


図 5 ハードウェア構成

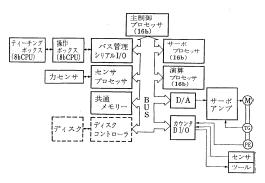


図 6 制御装置の構成

とし、ハンドの指令速度

$$S_n = \begin{pmatrix} w_n \\ v_n \end{pmatrix} \tag{16}$$

を計算する. このとき w_n はハンドの回転速度, v_n はハンドの基準点の並進速度となる. この S_n に対応する対偶の速度を求め、これをモータへの速度指令値とすることにより仮想コンプライアンス機構が実現する.

3.3 適用例

仮想コンプライアンス機構のハードウェア構成を図 5 に示す. ロボットは6 自由度関節形ロボット(日立 A 6030), 力センサは歪ゲージ出力の6 軸力センサ (日立建機 LSA 6010) を用いている. 制御装置は図6 に示すもので, 4 組のマイクロプロセッサを用いたシステムである. マイクロプロセッサはインテル社製16 ビットマイクロプロセッサ 8086 であり, 浮動小数点演算用プロセッサ8087 と対にして用いている. 4 組のプロセッサはそれぞれサーボモータの制御, 仮想コンプライアンス機構の演算, センサ信号処理,全体制御に用いられており, 15 ms のサンプリング時間を実現している.

(1) はめ合い作業

軸の穴へのはめ合い作業には RCC 機構 (Remote Center Compliance) が用いられている. RCC 機構は

図7に示す構造をもち、軸の先端を中心とする回転の3自由度と水平方向の並進の2自由度をもつ5自由度コンプライアンス機構である。これを仮想コンプライアンス機構で実現するには、図7に示すように軸上に直交座標系 xyz を定め、ばね定数行列の対角要素をこの座標系を基準として $(k_{rx},k_{ry},\infty,k_{tx},k_{ty},\infty)$ とすればよい。サフィックス r および t はそれぞれ回転,並進を表わし、k に適切な値を設定することにより RCC 機構が得られる。この例では軸の回転自由度は不要であるため、4自由度機構でよい。

コンプライアンスの基準点は実際の RCC 機構では 軸の先端である。しかし仮想コンプライアンス機構で は図8に示すように穴への挿入部の中点を基準点と し、軸に作用するモーメントに対し、軸の姿勢を容易 に倣わせることにより安定した挿入を行うことができ る。このように仮想コンプライアンス機構では基準点 をロボット動作中に変化させ、常に挿入部の中点を基 準点とすることが可能であり、実際の RCC 機構より も高度な動作を行うことができる。

(2) 倣い動作

図 9 ではフロッピディスク装置を治具上に設けられた L 形コーナに押し付けて設置している。 L 形コーナに押し付ける際に仮想コンプライアンス機構を用いている。 この場合はまずばね係数行列 K の対角要素を $(\infty, \infty, \infty, k, k, k)$ とし、並進成分のみに k のばね定数を設定し、(10) 式の q の値として、(15) 式で与えられる実際の外力から一定の設定力 f を引いた

$$\mathbf{q}' = \mathbf{q} - \begin{pmatrix} 0 \\ \mathbf{f}_c \end{pmatrix} \tag{17}$$

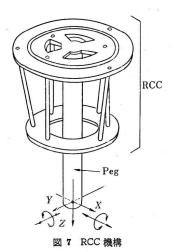
の値を用いている。この条件でフロッピディスク装置をL形コーナに押し付けた後は、ばね係数行列の対角要素をすべて k の値にし、L形コーナに姿勢も含めて精度よく倣わせ、その後(17)式の \mathbf{f}_ϵ の値を零とし、こじりの解消を行い、安定した動作を得ている。この手法はパレタイジングにもそのまま適用可能である。

(3) 直接教示

ロボットの教示を行う場合、ティーチングコンソールのスイッチ操作によるのではなく、ロボットの手先をもって直接ロボットを駆動することを直接教示という. 直接教示ではハンドに加えられた力の方向にハンドが移動し、力が加わらなければ停止する. これは仮想コンプライアンス機構においてすべてのばね係数行列の要素を零とした場合に対応する.

4. おわりに

力フィードバック制御ではロボットの動きとセンサ



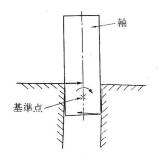


図 8 基準点の設定

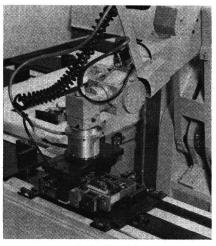


図 9 倣い動作

からの出力信号とが密接に関係し、センサ情報のロボット動作中での実時間処理が不可欠であり、制御が複雑となる. カフィードバック制御ではハンドの位置情報 6 個と力情報 6 個の 12 個の情報を作業に応じて適宜組合せ、6 個の情報に圧縮してロボットを制御する必要がある. さらに力センサに作用している力にはハ

ンドに作用する外力以外にハンドおよびハンドに把持されたワークの重量による力・モーメントが作用している。この値はハンドの姿勢によって変化するため、常時ハンドの姿勢を計算し、ハンドおよびワークの自重分を力センサ信号から除く必要がある。このように力フィードバック制御では実時間処理を要する内容が従来の位置制御に比べ大幅に増加している。したがってこれらの処理を高速で行うことができる制御装置の開発が強く望まれる。

さらに力フィードバック制御の高度化を行うために は視覚、超音波センサなどとの協調による制御が必要 であり、また適応制御、最適制御の技術を活用し、各 種制御パラメータの実時間でのチューニングを行うな ど、最適なロボット動作を実現するための技術開発が 必要である.

(昭和60年9月5日受付)

参考文献

- 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, 3-2,95/105 (1985)
- M. H. Raibert and J. J. Craig: Hybrid Position/ Force Control of Manipulators, Trans. ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, 102-2, 126/133 (1981)
- K. Sugimoto: Determination of Joint Velocities of Robots by Using Screws, Trans. ASME, J. of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, 106-2, 222/227 (1984)
- A. Asakawa et al.: A Variable Compliance Device and Its Application for Automatic Assembly, AUTOFACT Conference Proceedings, 10.1-10.17 (1983)

技術報告投稿のおすすめ

会誌編集委員会

本学会は広く会員から"技術報告"の投稿を求めております。技術報告は下記執筆規定に記述されるように、技術活動の成果の発表によって、大きな波及効果を得ることを目的としたものです。奮って投稿されることをおすすめします。

"計測・制御の分野で、新技術の開発、または既成技術の合理化などにおいて著しい成果を修め、この結果が工業技術の進歩に大きな貢献をしつつある実例報告である。学問的な独創性よりも、技術的な応用可能性を重視する。すなわち、そこでとられた手段または得られた結果が、大きな波及効果を期待できることが必要である。図、表などを含み刷上り8ページ以内とする。"