

解説

ロボットアームのカフィードバック制御

すぎもと こう いち
杉 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

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、

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

で与えられる。ここに $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ 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 はコリオリ力、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、 $\boldsymbol{\tau}$ 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 $\boldsymbol{\tau}$ 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¹⁾。

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²⁾。

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

* (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).

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

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

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

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

$$\mathbf{s} = \begin{pmatrix} \mathbf{w} \\ \mathbf{v} \end{pmatrix} \quad (3)$$

であり、 \mathbf{q} は力、モーメントを表わす 6 次元ベクトル

$$\mathbf{q} = \begin{pmatrix} \mathbf{m} \\ \mathbf{f} \end{pmatrix} \quad (4)$$

である。 $\Delta \mathbf{x}$ 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 \mathbf{p} と、各軸に平行な単位ベクトル $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$ で表わす。いま出力節の釣り合い位置・姿勢が $(\mathbf{p}_0, \mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{z}_0)$ であるとする。出力節の位置・姿勢が $(\mathbf{p}, \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ のときの偏差はつぎのようになる³⁾。

$$\Delta \mathbf{x} = \begin{pmatrix} \Delta \phi \mathbf{e} \\ \Delta \mathbf{p} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\Delta \mathbf{p} = \mathbf{p}_0 - \mathbf{p} \quad (6)$$

$$\mathbf{e} = \frac{\mathbf{x}_0 \times \mathbf{x} + \mathbf{y}_0 \times \mathbf{y} + \mathbf{z}_0 \times \mathbf{z}}{|\mathbf{x}_0 \times \mathbf{x} + \mathbf{y}_0 \times \mathbf{y} + \mathbf{z}_0 \times \mathbf{z}|} \quad (7)$$

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

ここに $\Delta \phi \mathbf{e}$ は姿勢偏差であり、単位ベクトル \mathbf{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

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

を得る。すなわちハンドに作用する力・モーメントと

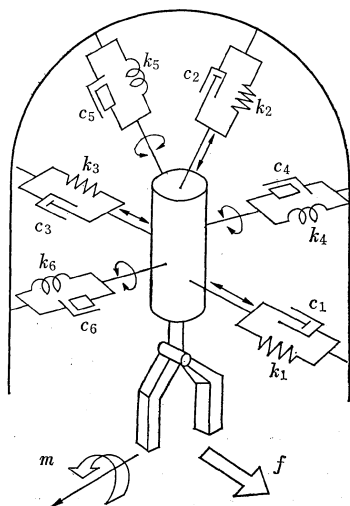
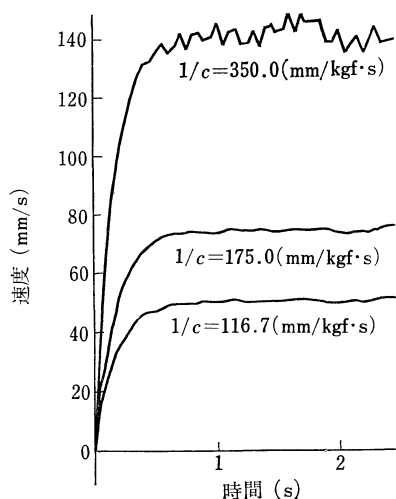
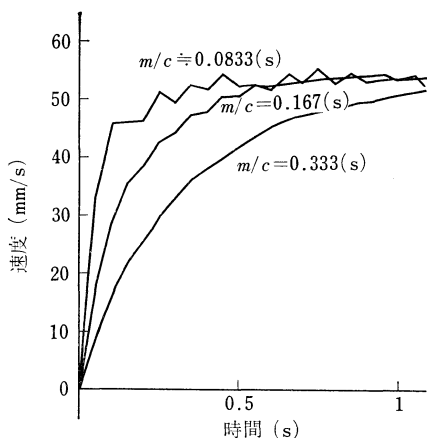


図 1 6 自由度コンプライアンス機構

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_p は

$$m_p = m_0 - p \times f_0 \quad (14)$$

となる。そこで(10)式における q を

$$q = \begin{pmatrix} m_p \\ f_0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

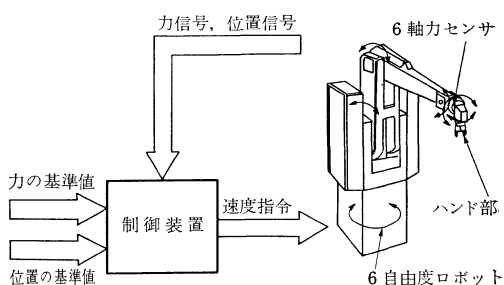


図5 ハードウェア構成

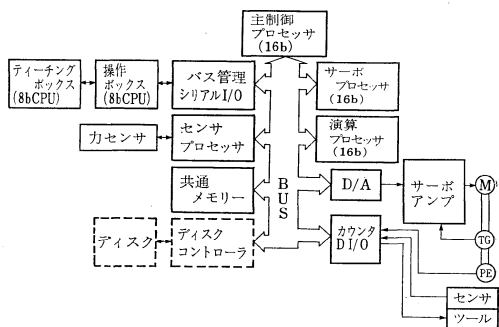


図6 制御装置の構成

とし、ハンドの指令速度

$$S_n = \begin{pmatrix} w_n \\ v_n \end{pmatrix} \quad (16)$$

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A6030)、力センサは歪ゲージ出力の6軸力センサ(日立建機LSA6010)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、15ms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 $(k_{rx}, k_{ry}, \infty, k_{tz}, k_{ty}, \infty)$ 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_c を引いた

$$q' = q - \begin{pmatrix} 0 \\ f_c \end{pmatrix} \quad (17)$$

の値を用いている。この条件でフロピディスク装置を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 f_c 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

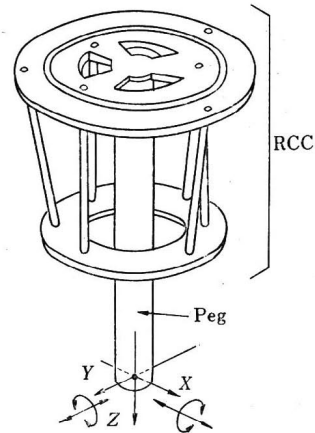


図7 RCC機構

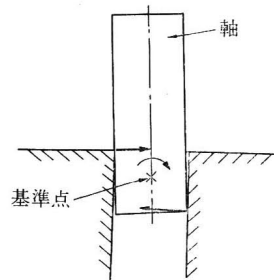


図8 基準点の設定

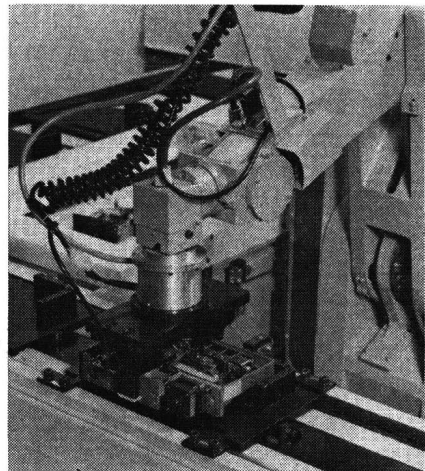


図9 倣い動作

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。力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

- 1) 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)
- 2) 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)
- 3) 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)
- 4) 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”の投稿を求めています。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。”