〔解 説〕

触覚を用いたロボットアーム・ハンドの制御*

増 田 良 介**

1. ま え が き

最近のロボット技術の発展に伴い、各種外界計測センサを用いた感覚制御型のロボットが実用レベルに達してきた。ロボットの新しい分類にも「感覚制御ロボット」「適応制御ロボット」「学習制御ロボット」の各項目が設けられ、ロボット新世代が始まっている。

ロボットの感覚器のうち、広義の触覚は、ロボット研究の初期の段階から各種のセンサ素子が提案されていたにもかかわらず、視覚と対比してその実用的応用が遅れている感がある。このことは、触覚に利用できるセンサ材料の問題が第一にあげられるだろうが、それだけではなく、応用の必要性、制御とからめた情報処理、あるいはメカニズムとの協調性などに統一的な考え方が欠けていたことに問題があったのではないだろうか¹⁻³⁾。

本稿では、近接覚も含めた広い意味の触覚、すなわち「効果器センサ」の応用について、ロボットの動作制御の面から眺めることによって、感覚制御系の階層的な構成を考察してみることにする。感覚としては、接触覚、分布圧覚、すべり覚および近接覚を一般的に取扱うことにするが、これらの素子材料あるいはセンサの構成法については、本特集の別稿を参照されたい。

2. ロボットの触覚と感覚制御の形態

2.1 感覚制御の階層構造

従来の単純繰返し作業のみを実行するだけではなく、軌道制御、感覚制御などある程度の高級な動作機能を与えるためには、ロボットの制御機能に対して階層性を明確に規定しておかねばならない⁴⁾。この階層性は、内界計測センサの部分で構成されるとともに、外界計測センサについても、上位の階層として構築されることになる。この階層性をもとに、感覚制御形態をいくつかのレベルに分類することができる。基本的なレベルから分類表を

原稿受付 1984年7月16日

* Control of Robot Arm and Hand by using Tactile Sensors.

** 東海大学工学部

作成すると表1のようになる。

このような4種の制御形態について、効果器センサによる例をもとに示してゆくことにする。

2.2 感覚シーケンス制御

単純繰返し型ロボットは、内界計測センサによるシーケンス制御により実現されているものが多いが、外界計測センサからの情報処理により、環境や対象の状況に適応し得る感覚シーケンス制御系が実現される。

この目的で使われる感覚素子は、通常オンオフ出力の得られる接触覚、あるいは近接スイッチなどであり、2値信号の形で論理処理がすすめられるわけである。この形態の感覚制御は、古くからロボットの動作制御の高度化の1ステップとして実験されてきた方法である。また、単純であるが他のレベルの制御系との組合せにより知的行動をロボットにとらせるときに有効な方法である。

例としては、ロボットハンドによる物体の探索、障害物検知、対象物体のハンドリング前段階の動作決定、あるいは、移動ロボットの壁面検出などの自己経路の決定への応用がある。図1に、感覚シーケンス制御系としての接触覚探索制御の形態を示す。

触覚センサからの論理信号変数を、同図(a)に示したように、ハンド先端部で t_{fl} , t_{fr} , 外側部で t_{ol} , t_{or} 内側部で t_i としておく。シーケンス動作は、①物体を発見するための「探索動作」、②物体をよけて移動する「回避動作」および③物体を掴むための「把握動作」の3つのモードの組合せにより作られる。ロボットアームの一定距離づつの前進(+ Δx)、後退(- Δx)、右移動

表1 感覚制御の形態の分類

感覚制御形態	処 理 形 態	感 覚 器
感覚シーケンス制御	オンオフ、2値化論理処理	接触覚、近接覚
感覚フィードバック制御	加減算、定数倍、PID演算処理	圧覚、力覚、近接覚
感覚適応制御	座標変換、パラメータ設定、モード変更	力覚、近接覚
知能自律制御	判断、認識、学習、行動決定	分布圧覚、力覚、近接覚、すべり覚

($+\Delta y$), 左移動 ($-\Delta y$) の動作のための論理条件は, 主に順序論理の形式で与えられる。

例えば, 把握動作に移るためのシーケンスを示すと,

$$\begin{aligned} \Delta x &\iff [t_{fr}]_{or}[t_{fl}]_{on} \longrightarrow -\Delta X \\ &\longrightarrow +\Delta Y_{or}-\Delta Y \longrightarrow \Delta X \\ &\iff [t_i]_{on} \longrightarrow \text{Grip} \end{aligned}$$

のようになる。なお, 記号 $\iff []_{on}$ は, センサ入力が入オンになるまで繰返すことを示している。

Grip (把握) のための組合せ論理条件は次式となる。

$$\text{Grip} = t_i \cdot t_{fl} \cdot t_{fr}$$

これらの論理条件は, プログラマブル・コントローラ (PC) やコンピュータに容易にプログラミングできよう。

2.3 感覚フィードバック制御

この形態の制御では, センサからのアナログ信号に演算処理を施した後に, 直接駆動部へフィードバックすることになる。この演算の目的としては, 動作の応答に関する安定化, 特性の改善, 特殊な動作モードの実現などであり, 増幅, 加減算の他に微分, 積分が行われる。

例として, 圧覚による把握力制御系と, 近接覚による溶接線探索制御をとりあげて説明しよう。図2に, ロボットハンド部と把握力制御系のブロック図を示す。ロボットハンドの指部で分布圧覚あるいは把握力覚によって検出された, 把握力 (指面の圧力と同義と考え, ここでは把握力を圧覚で検知する) 信号を, 微分積分などの処理を施した後に駆動系へフィードバックする。

ここで, 左右の指の圧覚信号を F_r , F_l としておけば, 把握力信号は $F_t = F_r + F_l$ となり, 物体の指中心からのずれを表す信号は $F_d = F_r - F_l$ となる。把握力制御には F_t 信号を, 物体を中心にもってくるような手首部位位置修正制御には F_d 信号を用いることになる。

この演算フィードバックのための演算部の伝達関数は,

$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

の形であり, PID 調節計となっている。この伝達関数をフィードバックループに入れることにより, 一種の補償系が構成される。そして, ロボットハンド部の遅れ特性やガタなどの非線形特性のための振動を防止し, 把握の

図1 接触覚を用いた感覚シーケンス制御

図2 圧覚による感覚フィードバック制御

図3 近接覚による感覚フィードバック制御

ための各種の動作モードを実現することができる。すなわち, 指が物体にそっと触れる軟接触や, ゼロの力で物体をはさみ込む零把握, しっかり物体を掴む剛把握などの接触・把握モードの組合せが実現される。なお, $G(s)$ のパラメータ, K_p , T_i , T_d を, 作業の目的や物体の状をもとにあらかじめ設定しておくことになる。

図3は, センサと対象面との間のギャップ幅を測定する電磁式近接覚のフィードバックを用いた, 溶接トーチの位置制御系を示したものである。同図(a)において, 手前側のセンサを揺動させ, センサ出力のギャップ長 P_g の関係から, 演算により溶接トーチの y 軸位置を決めてゆき, x 軸方向に一定速度で進んでゆく。センサ信号演算は(b)の信号処理回路で行われる。この場合, 平均ギャップ幅の修正は, z 軸方向で

独立に行えるので、1軸ごとの独立した感覚フィードバック制御系となっている。このようにして、溶接ラインのずれやゆがみに対して経路を修正することができる。

2.5 感覚適応制御

これは、感覚信号による制御を行う際に、信号の各種変換と多変数処理を要する方法である。この適応制御には、処理結果をフィードバック情報として用いる入力適応と、制御系のパラメータ修正に用いるパラメータ適応の2通りがある。

先に述べた近接覚制御において、ロボット各軸間の相互干渉除去や、ロボット座標軸とセンサ座標軸、物体座標軸の間の変換が必要になる系では、この感覚適応制御のレベルとなる。図4に、近接覚を用いた適応フィードバックの例を示す⁷⁾。図(a)において、近接覚はロボットハンドの先端部に設置されており、対象面までの間隔距離 l と、対象面との相対傾き角度 α, β を検出できるものである。このセンサ情報を $x=(l, \alpha, \beta)$ とする。また、ロボット座標系は、手首中心位置 (w_x, w_y, w_z) と手首方向 $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ の合計6自由度とする。

このロボットハンドによる曲面の自律な制御系を考えてみよう。図の(a)に示したような曲面 θ と、平面 π の交線をロボットハンドの先端部がトレースする。このとき、ロボットハンドの座標ベクトル表現を w_p 、センサの中心位置 S_p (センサポイント)とその視線が対象面と交わる点を t_p (ターゲットポイント)とする。作業条件として次の3項目を考える。

- ① ロボットハンドの先端 S_p と、対象面は常に一定間隔 l_r を保ち、かつ対象面の法線 n と手先の方向が一致する。すなわち、 $x=(l_r, 0, 0)$ とする。
- ② ロボットハンドの向きで決まるターゲットポイント t_p を一定速度で交線に沿って動かす。 $|\dot{t}_p|=c$ (定数)
- ③ 交線からのずれを戻すよう補正する。

以上の機能を実現するための制御系の構成は、同図(b)となり、姿勢制御系とならぬ制御系の2つの部分の組合せから成り立っている。

(a) 曲面と平面の交線のトレース

(b) 自律な制御系の構成

ターゲットポイント t_p の交線からのずれを補正するための、手首部速度 $\dot{w}_i$ に対する修正指令は、

$$\dot{w}_{tri} = -k_1 \{t_p - q_0\} \cdot m$$

となる。ここで m は、平面 π の法線ベクトル、 q_0 は平面上の任意の一点である。また、交線の接線方向への $\dot{w}_i$ の移動指令は、次のようになる。

$$\dot{w}_{trv} = -k_2 (m \times \dot{S}_x)$$

ここで、 $\dot{S}_x$ はロボットハンドにあるセンサの視線方向ベクトルである。また k_1, k_2 は定数である。 $\dot{w}_{tri}$ と $\dot{w}_{trv}$ を合成した指令をロボット制御系のならぬ制御部に入力することによって目的とする作業が実現される。このならぬ制御部の指令の形によって、平面トレース、登坂、稜線探索などの感覚適応動作が実現されるのである。

もう一つの感覚適応制御の例として、パラメータ適応を利用した組立作業のための能動コンプライアンス制御を取りあげる⁸⁾。コンプライアンスとは、剛性の逆数であるが、ロボットでは機構の柔らかさを示す値として意味づけられている。このコンプライアンス機能を実現する方法には、メカニズムの柔軟性による機構(RCC機構など)と、力感覚フィードバック制御に依る柔軟制御系(触覚はめ合いロボットなど)の2種類がある。これらは、それぞれ特徴をもっており、目的によって使い分けられているが、最終的には両方を合わせた形の適応コンプライアンス制御系が有効だろう。すなわち、能動的にコンプライアンス値を設定できるようにするわけである。この方法の例としては、2本のアームの協調制御のための仮想目標値制御法や、はめ合い作業のための利得・飽和値設定法がある。

図5は、はめ合い作業のための適応制御系を示したものである。この系では、ロボット手首部の各方向駆動モータの電流値よりトルクを推定し、現在の力の値とモーメントの値および作業目的に従って、位置フィードバック制御系の利得と飽和値を設定している。利得の値によりコンプライアンスを、飽和値により動作ベクトル方向の設定を行うことができる。すなわち、利得を高くする

図4
近接覚による感覚適応制御

ことにより剛性が上がり、飽和値を高くすることによってその方向への移動が行われるのである。

2.6 知能自律制御

現在、各種の分布圧覚のセンサが提案されているが^{7,8)}、主にこの分布圧覚から得られる情報を処理し、対象物体の計測、認識を行ってロボットの行動を制御しようとするのが知能自律制御である。分布圧覚の情報処理は、視覚情報処理の技術の応用により実現できる。

分布圧覚から得られた2次元圧力信号を $f(x, y)$ とすると、その処理方法と抽出できる情報には次のようなものがある。

① 荷 重：

$$W = \iint f(x, y) dx dy$$

② 接 触 面 積：

$$S = \iint \text{sgn}\{f(x, y) - sh\} dx dy$$

③ 平均接触力 (圧力)：

$$P = \frac{1}{S} \iint f(x, y) dx dy = W/S$$

④ 重 心 位 置：

$$G_x = \frac{1}{S} \iint x f(x, y) dx dy, \quad G_y = \frac{1}{S} \iint y f(x, y) dx dy$$

⑤ ピーク値およびピーク位置：

$$F_{\max} = \max f(x, y), \quad Q_{\max}(x_m, y_m) | F_{\max}$$

⑥ エ ッ ジ：

$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial x}, \quad \frac{\partial f(x, y)}{\partial y}$$

⑦ すべり変位：(S —一定で)

$$\iint [h(x, y, k) - h(x, y, k-1)] dx dy$$

ただし、 $h(x, y) = \text{sgn}(f(x, y) - sh)$ 、 sh は閾値

⑧ 把持している棒状物体にかかる力とモーメント

⑨ 物体の方向、丸さ、細長さなどの特徴パラメータ

これらの情報処理の結果によって、物体の識別・分類、物体の把握状況の検知、ロボットハンドの相対位置および姿勢の検知が可能となり、その結果作業目標の設定、動作選択などの知的制御が実現される。

例としては、センサ情報としてすべり方向と距離の信号を用い、把持物体の形状とアームの移動方向および手首の角度を補助的情報とした「持上げ積上げ」「はめ合い」「障害物回避」などの作業がある。組立作業の実行では、力信号のフィードバック制御だけでなく、このような状況検知と判断が不可欠となろう。

(a) はめあい作業

(b) 能動コンプライアンス制御系の構成

図 5 はめ合い作業のための感覚適応制御系

3. 総合センサ制御

以上述べてきた各レベルの感覚制御形態を複合化した総合センサ制御系を考えてみよう。図6は前節で述べてきた各レベルをひとまとめにした、総合センサ制御系の構成である。これらのレベルがすべて必要であるとは限らないが、協調的に用いられることによって各センサが効果的に利用でき、ロボットの手作業の機能が飛躍的に向上するだろう。

この場合の問題は、

- (1) いかにかひとつのセンサから信号処理によって多くの情報を抽出するか
- (2) 異種の効果器センサ間の協調をどのようにするか

の2点である。前者に対しては、知能自律制御の項でも述べたように、分布的な圧覚センサの情報に画像処理的な手法の適用により可能になると考えられる。後者は、近接→接触→圧力→すべり→力のレベルおよび順序づけから考えて、適応作業の中からひとつの適正利用の評価基準のようなものを作成しておけばよいだろう。

また、感覚制御でここまで触れなかったが、オペレータとの情報交換、すなわちマンマシン・インターフェースとしての触覚応用もまた重要な問題である。例えば、バイラテラルサーボ系によるテレオペレーションの技術、

図 6 総合感覚制御系の構成

ロボットの作業ティーチングにおけるセンサ応用指示技術、診断・検査などにおける触覚情報の表示技術などに有効であり必要であろう。

また非効果器センサ、すなわち視覚や聴覚との競合、協調関係も問題になってくるだろう。現在のロボットは、検査用、監視用などの一部を除いて、その最終目的がハンドリングにあるということから、触覚、近接覚を主感覚とし、視覚は補助センサとして、物体の発見と粗位置決め程度にとどめておくことが、今後のひとつの行き方ではないだろうか。

4. む す び

ロボットハンド部に用いられる広義の触覚—効果器センサ—に関して、制御の面からみたレベル分けと制御方式のパターンを示した。ここでは、従来開発されてきている個々の触覚に関する制御応用だけではなく、一般的な触覚情報が得られることを前提とした議論も行ってみた。これらの制御法に十分適合できるような、汎用触覚のセンサが多く実用化されることを望みたい。それによって従来の視覚中心の感覚制御の考えが、触覚中心に移りゆくことが期待できるだろう。

参 考 文 献

- 1) L.D. Harmon, "Automated tactile sensing", International Journal of Robotics Research 1, 2, p. 3, 1982
- 2) 増田, "FA 用センサ", 電気学会雑誌, 105 巻 5 号, p. 9, 1984
- 3) W. D. Koenigsberg, "Noncontact distance sensor technology", Proc. 3rd Intr. Conf. on Robot Vision and sensory controls, p. 371, 1983
- 4) 長谷川, "ロボット知能化の動向", 電子技術, 26 巻 5 号, p. 2, 1984
- 5) 小林, "近接センサを用いた自律な制御", 東京工大修士論文, 1982
- 6) H. Van Brussel & I. Simons, "The adaptive compliance concept and its use for automatic assembly by active force feedback accommodation", Proc. 9th ISIR, p. 167, 1979
- 7) J. Rebman and M. A. Morris, "A tactile sensor with electrooptical transduction", Proc. 3rd Intr. Conf. on Robot Vision and Sensory Controls, p. 341, 1983
- 8) B. E. Robertson and A. J. Walkden, "Tactile sensor system for robotics", ibid, p. 327, 1983

増田良介 (Ryosuke MASUDA)

昭和 21 年 5 月 26 日生れ。47 年東京工業大学大学院修士課程制御工学専攻修了。49 年同大学工学部助手, 57 年東海大学工学部電気工学科講師, 58 年同大学助教授, 現在に至る。工学博士。ロボットの感覚および制御システムに関する研究に従事。計測自動制御学会, 電気学会, バイオメカニズム学会会員。(日本ロボット学会正会員)