センサフィードバックとロボット制御ソフトウェア*

毛利 峻 治

秦 清 治

1. は じ め に

産業用ロボットは FA, FMS の中心設備として多数導入されている。これらのロボットは、溶接・塗装といった作業を中心に、連続軌跡制御方式によるティーチング・プレイバック主体で利用されていた。しかし近年、組立・検査の自動化が進むにつれて、産業用ロボットもこれらの分野に多用されるようになってきた。とくに、多品種中少量生産における組立・検査作業にロボットを応用するような際は、ロボットを知能化し、広汎な作業内容に柔軟に対処できるようにすることが必要となる。これには、ロボットに感覚機能を付与し、外界の状況を判断し、作業対象や環境の変化に応じた動作を行わせることが必要である。

現在、感覚付知能ロボットとして、アーク溶接用ロボットが市販されている¹⁾。これは溶接に用いるアーク電流を利用し、溶接トーチと被溶接物との間にある溶接ワイヤを流れる電流が、その距離と比例することを用い、継手形状の基準値からのズレを求め、その軌道を補正するものである。これはアーク作業に伴う現象を利用し、特別なセンサを必要とせず、簡便なため多用されている。また、本格的視覚付アーク溶接ロボットもあり、工業用テレビカメラを利用している。これは溶接すべき対象の詳細形状を検知し、軌道補正と伴に、ギャップ幅ごとに最適な溶接条件を求められるという利点もある。

組立や検査等を含む分野を対象とする産業用ロボットの感覚としては、視覚と触覚が重要であり、これらは今後多用されると思われる。現在ロボット用視覚としての画像処理装置の開発はさかんである²⁾。これは、組立・検査の自動化・柔軟化には不可欠の要素として、その高機能化・低価格化などにより、多に利用されてゆくであろう。また触覚としては、力感覚が特に重要であり、MIT で開発された RCC (Remote Center Compliance) 装置³⁾ や力フィードバックによる制御方式の研究開発も

さかんであり⁴⁾、精密なはめあいを要する組立作業への適用など、実用化も着実に進められている⁵⁾。

以下、ここでは触覚・視覚を例にとって、構成・原理とロボット制御との関連につき示すこととする。

2. 視 触 覚 セン サ

2.1 力感覚センサ

(1) 構成例

触覚は細かく分けると、近接覚、接触覚、すべり覚、圧覚、力感覚などがある。ロボット用の触覚としては力感覚が重要である。これはロボットの手先にかかる力(反力等)を検出するものである。力感覚を用いると、はめあいにおける挿入力や方向の制御やバリ取りにおける手先の受ける反力を検知し、グラインダに所定の力を加えつつ、対象物の表面に沿って移動する制御などが可能となる。

力 F の大きさと方向は、力とモーメントの3成分 f_x, f_y, f_z と M_x, M_y, M_z で表される。これらの6成分を検出するのが力感覚センサである。検出量を E であらわすとき、力感覚センサの構造より決まる変換マトリックス H を用いて、

$$F = HE \quad (1)$$

と表される。例えば、図1に示すような4本の棒と、棒の決められた位置(中心より l の距離)の両面につけられた1対の歪ゲージを用いると、次のように表される。

図1 クロスバー形力感覚センサ

原稿受付 1984 年1月18日

* Robot Control Software for Sensor Feedback Systems

すなわち、8枚の歪ゲージの電圧の集合 E, E から図に示す7つの力の成分 E_f を求める変換マトリックスを T_2 とし、その力の成分から力 F を求める変換マトリックスを T_1 とすると、

$$F = H \cdot E = T_1 \cdot T_2 \cdot E = T_1 \cdot E_f$$

$$= \begin{pmatrix} -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & l & 0 & -l & 0 \\ -l & l & l & -l & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & l & 0 & -l \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{xz1} \\ f_{zx1} \\ f_{xz2} \\ f_{zx2} \\ f_{yz1} \\ f_{zy1} \\ f_{yz2} \\ f_{zy2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

となる。

(2) 利用例

力感覚センサをロボット制御に利用するには、式(2)で示すような検出量と力の変換式の他に、特定の運動制御に必要な運動方程式の求解や、ロボットの移動に必要な各種座標変換を必要とする。

例えば、手先に発生する力・モーメントに応じた大きさと方向を持つ並進・回転速度でロボットを制御する方法を考えよう。この運動方程式は、手先の6方向の質量マトリックス M 、粘性係数マトリックス C 、速度ベクトル V 、外力ベクトル f とするとき、

$$f = M dV/dt + CV \quad (3)$$

と表される。したがってこの力制御には、この微分方程式を解いて速度 V を求める必要がある。これには、この系に加わる外力を求める必要がある。これらを図示すると図2を得る。

図2から分かるように、単純な位置フィードバックにくらべ、連続軌道制御方式における規定時間内に行うべき計算量が格段に増加している。通常ロボット制御システムは、このような制御方式を実現するための処理の他

図2 力感覚によるセンサフィードバック制御の一例

図3 パターンマッチング法

に、種々の処理を同時に実行しており、そのようなオーバーヘッドや余分な計算も含め、これらをいかに効率よく実行するかが問題である。

2.2 視覚センサ

(1) 視覚センサの概要

ロボット用の視覚としては、専用のもの⁹⁾や研究的なもの⁷⁾については、古くから各種のものが開発されているが、実用的なロボット視覚は、ようやく応用展開が始められたところである。視覚機能は、2次元認識を行う視覚と3次元視覚に大きく分けられるが、実用装置はほとんど2次元視覚であり、3次元視覚は現在盛んに研究、開発が進められている。

2次元視覚の代表的な例としては、SRIのVision Moduleがあげられる⁹⁾。これは、2値画像化された部品の画像としての面積や周囲長、モーメント値等を計算し、その値を辞書データと比較することで、部品の種別、位置、姿勢を判別するもので、現在市場に出回っているかなりの製品がこの方式を採用している^{9,10)}。もう一つの2次元視覚装置としてはパターンマッチング法を用いるもの⁹⁾がある。これは、辞書パターンとして12×12画

素程度の画像を用意しておき、図3に示すように、入力画像との間で相関をとって、一番よくマッチする位置をさがして位置決めを行うものである。

ロボット用の3次元視覚としては、細いスリット光を物体に当て、それを光の投射方向とは異なる方向からカメラで見て、三角測量の原理により物体までの距離を測定する、光切断法によるものが多い。このような例としては、中川らの例¹¹⁾、Rossolらの例¹²⁾がある。図4に中川らの例を示すが、スリット光による検出ヘッドを送り機構で送って多数の光切断線による3

図4 光切断法による3次元視覚

図5 ロボット座標系と視覚座標系の関係

次元距離画像を作成し、それをもとに物体認識を行うものである。

(2) 視覚センサのロボット制御との結合

ロボットと視覚の結合には、(a) 固定した TV カメラで測定した結果をロボットへ伝える場合と、(b) ロボットの手先につけた TV カメラでロボット動作と同期して測定する場合がある。これらのどの場合においても、ロボット座標系と視覚座標系のキャリブレーション（視覚座標系からロボット座標系への変換パラメータの決定）が重要な問題である。

ロボット座標系と視覚座標系の関係を、図5に示す。ここで、ロボット座標系から見た視覚座標系の原点： V_R 、視覚座標系のなす角： θ_v 、視覚系で測定した部品の（画像としての）視覚重心 G_V の位置： P_V 、部品の視覚重心 G_V から見たチャック中心 G_C の、部品上に（画像のフォーミング時等に決まる）適当な座標系をとっての位置 G_P 、その方向を θ_C 、測定結果から見た部品の姿勢 θ_P による変換係数 B 、視覚系からロボット系への座標変換およびスケール係数を A として、ロボットから見た物体の位置 P_R 、姿勢 θ_R は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} P_R &= V_R + A \cdot (P_V + B \cdot G_P) \\ \theta_R &= \theta_v + \theta_P + \theta_C \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 V_R 、 A 、 G_P 、 θ_v 、 θ_C はあらかじめ求めておくことができる。 P_V 、 θ_P は視覚系が決定する位置姿勢であり、 B は部品座標系と視覚座標系のスケール・ファクタを1にすると、次式になる。

$$B = \begin{bmatrix} \cos \theta_P & -\sin \theta_P \\ \sin \theta_P & \cos \theta_P \end{bmatrix}$$

これらの座標変換の実際の応用にたあては、キャリブレーション時、視覚系とロボッ

ト系の座標の比較方法、測定方法により各種の変形が行われる。特に、視覚の部品重心 G_V とチャック中心 G_C が一致する場合 ($G_P=0$) には、変換は非常に簡単になる。

(3) ロボットと視覚のデータ変換

ロボットと視覚とのデータのやりとりには、RS-232C等のシリアルデータ通信がよく利用される。この例としては、日立の組立ロボット A 4020 等で使用されている方式がある。

A 4020 の場合、視覚装置との結合は、図6に示すようにコンピュータ・リンケージ・インターフェース (CCP) を経由して行われる。CCP にはマイコンが載せられており、ロボット制御用マイコン間で、共有メモリを介してデータをやりとりする。ロボット言語からは、共有メモリ上のデータを参照することが可能であり、CCP への指示も共有メモリにフラグを立てて行う。

共有メモリ上には、送信ブロックと受信ブロックの2つのブロックが設けられる。このブロック上のデータ形式と、CCP と画像処理装置間でやりとりする伝送データの形式を図7に示す。また、ロボットと視覚間でやり

図6 ロボットと視覚間のデータ伝送

(b) データ伝送形式

図 7 データ伝送形式

とりされる主要なデータ内容を表 1 に示す。

3. センサフィードバックとロボット言語

3.1 センサフィードバックの分類

ロボット言語とは, ロボットに対する指令であり, それは制御ソフトウェアにより解釈され実行される。この制御ソフトウェアの見地から, センサフィードバックを分類すると次のようになる。

(1) システム管理センサフィードバック: システムが決めている特定の動作をするため, それに必要な情報をセンサより受け取る。

(2) ユーザ管理センサフィードバック: 動作の内容や作業順序をロボット言語によるプログラム内で変更するために, センサから信号を受け取る。

アーク溶接にみられる継手位置の追跡や, 力フィードバックによる直接教示などは (1) の例であり, 動作方式や軌道制御アルゴリズムに深く関係している。また (2) は, 動作中の状態監視や条件分岐により作業内容を変更・選択するようなものである。

また, 制御ソフトウェアが, センサフィードバックを受け付けるタイミングとしては,

- (a) ロボット動作中にフィードバックを行う。
- (b) ロボットの動作と動作の間で, フィードバックを行う。

に分けることができる。上述のシステム管理センサフィードバックにおけるタイミングは (a) であるが, ユーザ管理センサフィードバックには (a) と (b) がある。

3.2 言語による記述

センサフィードバックのロボット言語による記述方法として, 当社開発の ARL (Assembly Robot Language) における記述を中心に述べる。

ARL は, PASCAL に準拠しており, 配列・サブルーチンや各種条件分岐機能を含む高機能ロボット言語である。ARL では, センサ等外部信号とのやりとりは I/O 変数と呼ばれるシステムで用意した変数を介して行う。

表 1 交信データの内容の例 (R: ロボット, I: 視覚)

名 称	方 向 R: ロボット I: 視覚	内 容
リ セ ッ ト	R→I	画像処理装置初期化
JOB 指 定	R→I	認識 JOB 指定
部 品 No. 指 定	R→I	認識部品 No. 指定
ス タ ー ト	R→I	認識スタート
ステータス転送	I→R	認識結果報告
デ ー タ 転 送	I→R	位置, 姿勢データ転送

付: 本表以外に, データ管理, 実績管理等の伝送形式を持つ。

I/O 変数は, 特定のポートアドレスに対応したものであるが, さらに型・マスク情報等種々の情報をあわせ持っている。通常, センサは処理したデータを, この決められたポートに格納する。制御ソフトウェアは, 入出力命令発行時点あるいはある決められた時間ごとに, このポートを参照し, そのデータに必要な処理をして, I/O 変数領域に格納する。以下この I/O 変数は下線を引いて, FORCE のように示すこととする。

(1) システム管理センサフィードバック

これは, ロボット利用者が動作条件・動作方式を指定することが特徴である。この動作方式が決められたものであり, 多用される場合は新しい命令として表現するのが使いやすい。例えば,

TRACE 物体 (目標物追従型動作)

などである。

また, センサが複数個あったり, 可変条件を記述するには, 動作命令のオプションとして記述するのがよいと考えられる。

例: TRACE 物体 USING ITV1

(1 番目の ITV を用いよ)

MOVE 目標点 WITH FORCE=1

(FORCE と名付けられたセンサの状態を 1 に保ちつつ目標点へ動け)

(2) ユーザ管理センサフィードバック

これは, フィードバック信号にもとづき, 使用者の意志により, 動作内容を変更するためのものである。次に示す (a), (b) 2 つのタイプに分けられる。

(a) 動作と動作の間でのフィードバック

これには, 独立したセンサフィードバック用の命令を用意することが使いやすい。これを動作の終了時に用い, データを取り込み, そのデータをもとに次の動作の決定あるいは条件の変更を行うものである。基本的には入出力命令を用いる。この例を表 2 に示す。

これらは, 画像処理装置やプログラマブルコントローラといったロボット制御ソフトウェアとは別体系のシステムとの間でのデータのやりとりに用いられる。図 8 に視覚利用例を示す。

表 2 入出力命令

項目 分類	命令形式	機能
入出力	INPUT I/O 変数	I/O ポートより値を取り込む
	OUTPUT I/O 変数=式	I/O ポートに値を出力する (F 8 ビット)
	SET I/O 変数	1 ビット情報の出力
	RESET I/O 変数	ク
条件待ち	WAIT I/O 変数 [関係演算子 式]	関係式が満たされる (1 になる) まで待つ
	MATCH I/O 変数	I/O ポートが 0 なら 1 にして, 0 になるまで待つ. I/O ポートが 1 なら 0 にして継続

(PASCAL の条件判断文 IF, WHILE 等と I/O 変数を組み合わせてもよい)

また, 特別なセンサには固有の命令を設けることもある。

例: GVDEV 物体, DX, DY, DTH (Get Deviation from Vision System)

(基準位置からの偏差)

TIGP 物体 (Test if Good Part)

(良品か否かの判定)

(b) 動作中でのフィードバック

これは, 動作中や動作命令を含むあらゆる命令の実行中に, あるセンサからの信号を監視し, そのモニタ結果により動作状態・実行状態を変化させるものである。これには,

(i) 一つの動作命令に対してのみ有効

(ii) 複数の命令群に対して有効

なものに分けられる。表 3 にこれらの例を示す。また命令の使用例を図 9 に示す。

これらは, 動作中の異常監視といった意味合いが強いが, 図 9 (b) に示すように, パレットの既到着 (AR-RIVAL=1) か否かで処理を変えるとといったような応用もある。

しかしながら, これらの命令により多くのセンサを同時に起動・監視すると, その処理のためオーバーヘッド

表 3 センサフィードバック命令

項目 分類	命令形式	機能
一文のみ対象	ON 条件式 THEN 文	動作命令につけて, その動作中に条件を監視し, 成立すると THEN 以下に制御が移る。
複数文を対象	ENABLE 制御変数, 条件式	条件式で示されるセンサの起動制御変数は, 条件成立時の飛び先等の情報
	DISABLE 制御変数	センサ終了
	BREAK 制御変数	これに続く次の文のみセンサ処理中断

図 8 ARL における視覚利用の例

がふえすぎ, 本来のロボットの軌道制御が円滑に行えなくなる。したがって, センサ処理には専用のセンサプロセッサを持つことが望ましい。

4. あとがき

センサフィードバックとロボット制御ソフトウェアの関連として, 視覚・力感覚につきその概要を示した。

センサフィードバックを含むシステムを, 商品として本格的に実用化するには,

- (1) 性能のよいセンサの開発
- (2) 強力なアルゴリズムの開発
- (3) 増加する計算量に対処するための制御装置と制御ソフトウェアの改良
- (4) うまく使いこなすためのロボット言語の開発

といった項目を, 機能面, 性能面, 価格面から解決しなければならない。これらは早急に最良の結果が出るわけではないが, 着実な研究開発の進められている分野である。これらの成果をふまえて, よりよいシステムを作るための作業を今後も推し進めねばならない。そしてその結果, 産業用ロボットの高度利用の道が開けるものであると考えている。

参 考 文 献

- 1) 横島直彦, “アーク溶接ロボットのセンシング”, 自動化技術, Vol.14, No.6, pp.100-106, 1982
- 2) 秦清治他 4 名, “ファクトリーオートメーションにおける画像処理技術の応用”, 日立評論, Vol.65, No.12, pp.39-44, 1983
- 3) D. E. Whitney, J. L. Nevis, “What is the remote center compliance (RCC) and what can do?”, Proc. 9th ISIR pp.135-152, 1979
- 4) 平林久明他 3 名, “多自由度ロボットの力フィードバック制御”, 第 26 回自動制御連合講演会 (昭和 58 年 11 月)
- 5) “触覚センサと連動するロボットで磁気ディスクを組立て”, 日経メカニカル, pp.108-111, 1983.3.28
- 6) 柏岡他, “時分割パターン認識技術による群制御トランジスタ組立システム”, 電学論集, C 96, 1, pp.9-16, 1976
- 7) K. Takeyasu et al., “An Approach to the Integrated

Intelligent Robot with Multiple Sensory Feedback", Proc. of 7th Int. Symp. Ind. Robots. pp. 515-538 (2 papers), (19~21, Oct. 1977, Japan)

- 8) G. J. Gleason et al., "A Modular Vision System for Sensor-Controlled Manipulation and Inspection", Proc. of 9th Int. Symp. Ind. Robots. pp. 57-70, 1979
- 9) J. W. Franklin et al., "Programming Vision and Robotics Systems with RAIL", Proc. of ROBOTS VI (SME) pp. 392-406, 1982
- 10) B. Carlisle et al., "The PUMA/VS-100 Robot Vision System", Proc. of Rob. Vision and Sensory Controls (IFS Ltd.), pp. 149-160, 1981
- 11) Y. Nakagawa et al., "Structured Light Method for Inspection of Solder Joints and Assembly Robot Vision System", Proc. of 1st Int. Symp. of Robotics Res. (Bretton Woods, Aug. '83)

図9 センサフィードバック命令使用例

- 12) L. Rossol, "Computer Vision in Industry", Robot Vision (Editor A. Pugh, IFS Ltd) pp. 11-18, 1983
- 13) 的場秀彰他3名, "組立用ロボット言語 ARL", 第1回ロボット学会学術講演会(昭和58年12月)

毛利峻治 (Shunji MOHRI)

昭和45年早稲田大学理工学部機械工学科卒業。日立製作所機械研究所を経て生産技術研究所勤務。三次元NC自動プログラム, CADシステムの研究を経て, 現在ロボット制御ソフトウェアの開発に従事。

日本機械学会, 情報処理学会, SME等の会員。

秦 清治 (Seiji HATA)

昭和46年東京大学工学部精密機械工学科卒業。同年日立製作所, 生産技術研究所入社。NC自動プログラム, 制御用コントローラの研究を経て, 現在ロボット視覚の研究に従事。情報処理学会, 電気学会, 精機学会, IEEE等の会員。

精機学会, IEEE等の会員。