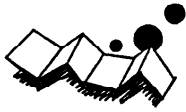


解説

FA 用要素システム



ロボット用センサおよびアクチュエータ†

秋山 勇 治††
永島 純 雄††††

野村 芳 士†††
横山 邦 彦††††

1. ま え が き

FA 機器の代表格とも言える産業用ロボットにおいて、いかに優れた頭脳(情報処理部)を有していても、情報の入力部である感覚器=センサと、実際に、腕を駆動するアクチュエータがなくては、ロボットとして機能しえない。

ロボットの知能化につれて、単なる回転位置センサだけでなく、人間並に、視覚情報や触覚情報などを取込む必要が生じてきている。一方、ロボットの高精度化、高速化につれて、制御性と保守性のよいアクチュエータが開発されてきた。

本稿では、ロボット用センサ・アクチュエータの概要と適用例について、代表的な事例をあげて解説する。まず、センサには、内界センサと外界センサがあることを説明し、外界センサの例として、情報処理面から興味深い、二次元位置ずれ検出用視覚について述べる。次いで、ロボット用アクチュエータを概観し、最近注目を浴びている AC サーボを紹介する。最後に、6軸の多関節ロボットに視覚センサを組合せて位置決めを行う過程を簡単に述べる。

2. ロボット用センサ^{1),2)}

ロボットには目的及び機能により各種あるが、代表的な産業用組立てロボットにつき検討してみると、自己の位置決めを主目的とする内界センサと外部からフィードバック信号を得て修正信号を出すための外界センサに大別できる。

内界センサの代表的なものとしてサーボモータの回転角度及び速度を検出するためのサーボ用回転センサ

があり、回転位置検出用としてインクリメンタルエンコーダ(パルスゼネレータ)、アブソリュートエンコーダなどのデジタルエンコーダと、シンクロ、レゾルバなどのアナログセンサに大別される。

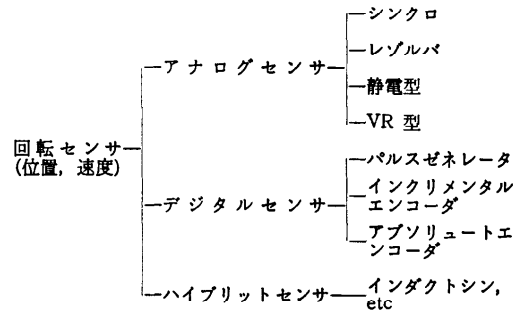
この他、速度センサとしてはタコゼネレータのようなアナログ形とデジタル位置センサの位置信号から演算により速度信号を作る方式のデジタル/アナログ変換方式が存在する。この速度センサの主目的は高い応答性と超低速領域における安定性を確保するためのフィードバック信号として用いられている。

さらにこれをセンサの構成面よりみると、デジタルセンサは光式と磁気式の二方式があり、現時点では分解能の面で光方式の方が有利なため光学式回転センサが多く実用されている。しかし磁気式にも有利な点が多々有り、今後磁気式回転センサの開発、実用化が注目されている。この他アナログ式センサの代表は信号レベルが高いタコゼネとかレゾルバのような電磁誘導形の回転センサが多い。

このようにサーボ用回転センサとしては信号の種類により、媒体及び構成により各種の方式が実用化されている。これらの関係を表-1 にまとめて示した。

次に外界センサにつき示すが、これは前述のごとく目的の制御を行うため駆動結果に対する修正を目的にフィードバック信号を発生することが主目的であり、

表-1 回転センサの種類と分類



† Sensor and Actuator for Industrial Robot by Yuji AKI-YAMA, Yoshihito NOMURA, Shumio NAGASHIMA and Kunihiko YOKOYAMA (TOSHIBA Corporation).
†† (株)東芝重電技術研究所
††† (株)東芝府中工場電子制御機器部
†††† (株)東芝生産技術研究所
††††† (株)東芝 FA システム技術部

位置信号、力、圧力信号などが代表的なものであるが、知能化ロボットを対象に視覚センサ、聴覚センサなどの高度な信号の取込みも原理的には可能である。

外界センサは目的により、機能により各種考えられるが、現在実用化または研究開発対象となっているものとしては視覚センサ、聴覚センサ、加速度、振動センサ、触感センサなど無数に存在する。

視覚センサについてみると人間の目と同じ機能を有しきわめて高度の情報が期待できる。センサとしては、工業用テレビカメラ (ITV) が使用され実用化されているが、その後の形状認識判断などの情報処理技術の面では、多くの開発要素が存在する。

この他レーザ光線を用いた非接触かつ超精密に距離及び位置の計測が可能であることを利用して位置の精密測定を行うことにより、内界センサでは不可能な超精密位置決め制御を行うことができる。

聴覚センサとしては通常のマイクロフォンにより音圧信号として検出処理する方法と、レーダの原理により超音波の直進性を利用し、反射音の検出により物体の存在と方向や距離の計測を行う方法があり、すでに超音波発受信器も製作市販されている。

この他、圧力センサ、力センサなどをロボットのグリップ部に取付けることにより人間の手の触感を得ることができる。さらに目的に応じ、臭覚センサ、温度、ガス濃度、その他各種センサの利用が可能である。

特に知能化ロボットを対象とするセンサ及びシステムの研究を行うには生体研究が不可欠なようである。

3. 視覚センサ³⁾

ITV(工業用テレビ)カメラや CCD(電荷結合素子)カメラなどの視覚センサを用いて、対象物の位置や形状を認識することは、人の目視作業や外観検査作業を自動化する上で重要な技術である。

視覚センサによる自動認識は、(1)非接触・非破壊で離れた距離から測定できる；(2)光学レンズにより任意の精度が設定できる；(3)モニタテレビにより容易に二次元モニタリングできる；(4)いわゆる「画像処理技術」が利用できる；などの利点がある。

一方、欠点としては、(1)画像情報量が莫大である〔高品質な画像では一画面が512画素×512画素×8ビット階調と256kバイトにもなる〕；(2)画像情報速度が高速である〔標準走査の一画面あたりは33m秒なので上記情報量を除すると毎秒8Mバイトの速度

となる〕；(3)高度な「知能」をもたせないと複雑な画像を認識させることが困難である；(4)これら諸条件を満たす認識装置は高価となる；などがあげられる。

これらを克服して実用的な視覚認識装置を実現するためにはまず、画像情報量を縮小し必要最小限にするとともに、ノイズ除去などの前処理回路により画像の質を上げることが考えられる。たとえば8ビット階調でなく二値化して1ビット階調にすることや一画面の画素分割数を少なくするなどには実用上よく行われている。

次に、高速な画像信号を処理するには高速な画像メモリや論理演算素子を使うことが必要である。最近ではメモリ IC の高集積化・高速化が進んでおり、この点では今後とも期待がもてる。最後に、最適な画像処理アルゴリズムを選び、トータルとして高速な処理をすることも重要である。処理対象を狭く限定したとしても、IC・LSI によるハードウェア処理が実用的視覚認識装置として有効な場合が多い。

ここで位置認識装置の一例を図-1に示す。本装置はカメラ映像信号を二値化していったんメモリに蓄え、順次取出してあらかじめ記憶させたパターンとの相関をとって、最も良く一致する画面位置を高速に演算するものである。たとえば入力画面の画素数は128×128で、あらかじめ記憶させているパターンの画素数は64×64であるが、これらはマイコンソフトにより変更することができる。二値化データ間の相関演算は排他論理和 (Exclusive-or) をとって、その結果の0であるビットの数を累算すればよい。したがってハードウェア回路により高速処理することが可能であり、本装置では0.1~0.6秒を実現している (処理

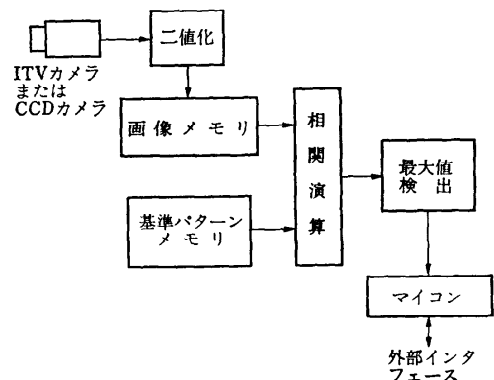


図-1 位置認識装置

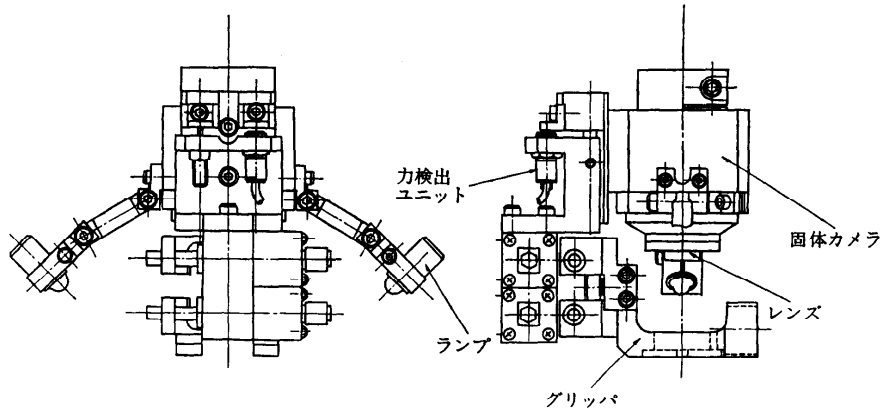


図-2 視触覚センサ付ロボットハンド

画素数による)。

本装置は構造上、白/黒のコントラストの鮮明な対象物の位置を検出する機能のみに限定はしているものの、高速処理とその実用性の面から適用範囲は少なくない。

適用例として、カメラをロボットの手先に組み込み本装置によって部品を正確にハンドリングした例を示す。図-2のように固体撮像カメラを実装し、部品の位置を $\pm 0.1\text{mm}$ の精度で位置検出したのちはめあい動作を行わせることができる。さらに、図-2のグリッパには触覚センサとして力検出ユニットが組み込まれており、部品が正しく挿入されたかどうかの判定もしている。

このように視触覚センサとその情報処理を組み合わせることにより、さまざまな実用的ニーズに応えることができる。今後とも、いわゆる「知能」ロボット・自動機への取組みは各方面で研究開発されてゆくと思われる。

4. ロボット用アクチュエータ

ロボット用アクチュエータとしては現在一番多く用いられているのが回転形サーボモータである。この他にリニアモータ、空気、油圧シリンダなど各種のアクチュエータが考えられるが、現在ロボット用に限定してみると減速機直結の回転形サーボモータが一番多く実用されている。この理由は高速回転設計にして駆動システム全体の重量を軽減するのが目的である。

サーボ、アクチュエータ技術の変遷と現状につき歴史的にみると、初期のサーボは交流2相サーボと直流モータであった。これらはおもに信号系の伝達を中心

とする小容量のものが対象であり、パワーサーボという概念ではなかった。その後高性能の油圧モータが開発され、さらに電動サーボとの組合せによりNC工作機械を中心とする油圧パワーサーボが一世を謳歌した。

この他、組立てロボットやNC、MC(マシニングセンタ)のようにデジタル制御を対象に高速位置決めが要求されるようになると、必然的に「高性能電動サーボ」が要求される。これに対応すべく現在DCサーボモータが中心であるが、今後ACサーボモータを含めた電動化の時代となることはほぼまちがいない。また制御技術の面では「全デジタル制御」化の方向にある。

しかし、使い勝手の面からみると回転形のサーボモータがすべてではなく、電子部品組立てロボットのように直交座標形ロボットの要求も強い。

この場合には直線運動式が有利と考えられ、リニアモータ、磁気アクチュエータなども回転形サーボモータと平行して研究、開発が進められていることも事実である。

〔リニアモータ、アクチュエータ〕

産業用リニアモータに対し信州大学山田教授は表-2のような分類をしている。このなかで高度なサーボ性能が期待できると考えられるのはリニア直流モータとリニア直流ソレノイドである。

前者のリニア直流モータでの実用例として米国アノラッド社のANOLINE®がある。

後者のリニア直流ソレノイド型については、IC、LSI用のリード線張り作業に代表され、ストロークは比較的小さいが、高速往復運動であるため可動部の慣

表-2 リニアサーボモータ、アクチュエータの分類

名称	電磁力	構造	
		固定子(1次側)	可動子(2次側)
リニア直流モータ	電流	平板状(片側式, 両側式) 円筒状	角形 円筒形
リニア誘導モータ	電流	平板状(片側式, 両側式) 円筒状	均一形, 分割形, セグメント形 均一形
リニアパルスモータ	磁気力	平板状(片側式, 両側式) 円筒状	格子形, すだれ形, 旋形, リング形
リニア振動アクチュエータ	磁気力	円筒状, 角形	均一形, 複合形
リニア直流ソレノイド	磁気力	円筒状	均一形
MHDポンプ	MHD力	円筒状	円筒形
リニアハイブリッドモータ	電磁力	円弧状, 円筒状	円板形, 円筒状

性を極力少なくする必要がある。

このため回転式のサーボモータでは対応しきれず、結局最少限の可動部(ソレノイド導体部)のみが電磁力で駆動されるこのタイプ以上の高速性は他の方式では難しい。このようにリニア直流ソレノイド型磁気アクチュエータは IC ボンダをはじめ XY テーブル駆動、フロッピディスクのヘッドの駆動などの各種用途に実用化されている。

この他意外に多く使われているのがステップモータである。これは回転位置センサ、速度センサを必要としないので他のサーボモータにくらべ実質的に小形軽量化と経済性が期待できる。

以上述べたように高性能サーボ、アクチュエータと位置センサは不可分一体の関係にある。

5. AC サーボモータとドライバ⁴⁾

FA 用要素システムとして、NC 工作機械、産業用ロボット、自動倉庫、搬送システムなどがあげられるが、それらの共通な重要な要素として、サーボ駆動装置がある。従来この駆動装置として DC サーボがおもに用いられてきたのに対し、最近 AC サーボが脚光を浴びるようになってきた。DC サーボは整流子とブラシによる整流のため、保守上の制約があるにも拘らず制御が簡単で、安価にできるというメリットから主流であったが、パワー/マイクロエレクトロニクス

表-3 サーボモータの種類と比較

モータの種類	DC サーボモータ	SM サーボモータ	IM サーボモータ
モータ設計上の制約条件	<ul style="list-style-type: none"> ・マグネットの減磁 ・整流 ・巻線(軸受)温度 ・運転速度 ・端子電圧 	<ul style="list-style-type: none"> ・マグネットの減磁 ・巻線(軸受)温度 	<ul style="list-style-type: none"> ・巻線(軸受)温度
長所(○) 短所(×)	<ul style="list-style-type: none"> ○制御装置が簡単経済的 ×ブラシメインテナンス必要 ×クリーンな環境が必要 ○停電時 DB 制動可能 ×回転数制限(トルク制限) ○センサレス制御可能 	<ul style="list-style-type: none"> ○制御回路が複雑(ただし LSI 化可能) ○メンテナンスフリー ○耐環境性 ○停電時 DB 制動可能 ○高速一大トルク △位置検出器 	<ul style="list-style-type: none"> △制御装置が複雑高価 ○メンテナンスフリー ○耐環境性 ×DB 制動不可 ○高速一大トルク △位置検出器

の進歩により交流機においても直流機に勝るとも劣らない制御が経済的に実現できるようになり、さらに、優れた保守性を評価され AC サーボが総合的に優位性を発揮してきたものと言え、この傾向は、今後、ますます加速されるものと思われる。そこで AC サーボ装置の特徴について述べる。

5.1 サーボモータの比較

サーボモータは、そのトルク発生機構、冷却、制御特性などを含め、その経済性や保守性を総合的に考慮し適用を考える必要がある。

たとえば、ステップモータは小容量ながら運転効率がよく、発生トルクも大きい。応答性の制約及び低回転速度から極小容量が対象となる。一方同期機は一種のステップモータであるから特徴としては、ほぼ類似しているが回転速度が高くとりうる。中容量が対象として適当である。誘導機の場合には、小～中容量機では励磁電流分が比較的大きく運転効率が下がるため、サーボモータとしては不利となるが、中～大容量になると効率も上がりかつ経済的にも有利となる。

適用から考えた分類に加え、各種サーボモータの設計上の制約、長所、短所、効率の比較をまとめると表-3 のようになる。

FA 要素システム駆動部を考えると容量的にみて、同期方式、すなわち SM 形 AC サーボモータが適していると思われる。

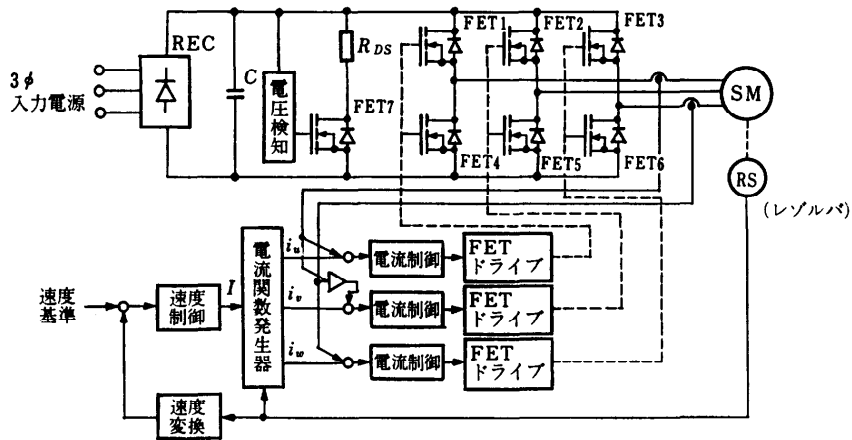


図-3 SM形ACサーボ制御ブロック図

5.2 制御方式

サーボモータの制御装置に要求される性能として

- (1) トルクリップルが少なく滑らかな回転制御ができること
- (2) 高速応答、高精度で広範囲の速度制御ができること
- (3) 高効率、高過負荷耐量、高速回転が可能なこと
- (4) 小形、軽量で、モータ及び位置検出器へのケーブル本数が少ないこと
- (5) 省保守、省エネルギーであること

が、あげられるが、特にFA機器の場合、サーボモータは小形軽量、ケーブル布設上の難しさ、信頼性の面から、ケーブル本数が少なくさらに保守点検を要しないことが必要である。

図-3にSM形ACサーボの基本回路構成を、図-4にその外観図例を示す。同期機方式の場合、モータの回転子位置に応じて相電流を制御する必要がありこれが特徴となる。

主回路、相電流制御の上で、特に次の点を考慮する必要がある。

- (1) インバータ部、パワートランジスタのPWM制御による相電流リップル、損失の増加、磁気騒音
- (2) 電流制御における相電流アンバランス及びDC分重量による回転リップル
- (3) 回転子位置検出器の取付によるモータ部検出機構の大形化、コストアップ

これらの点について、(1)については、主回路パワー素子の高速化、特にパワーMOS-FETの採用に

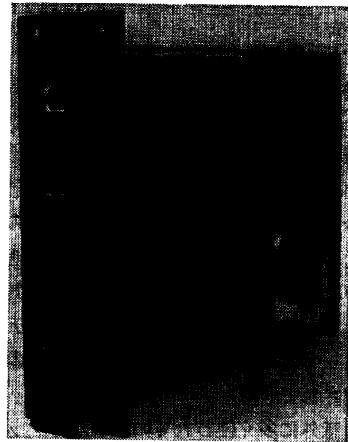


図-4 SM形ACサーボドライバ外観図

より、数10kHzのPWMキャリア周波数とすることにより改善できる。(2)については、高精度の電流センサ、制御アンプの使用及び特性を合わせる必要があり、(3)については、モータのロータ位置検出、速度検出、及び位置検出信号を1台のブラシレス・レゾルバで検出する方式が実用化されている。

以上、ACサーボの特徴について述べたが、さらにパワー/マイクロエレクトロニクスの発展により、機械系トータルシステムとして最適な動作が、できるよう高機能化することが重要であり、今後の課題として努力する必要があると考えられる。

6. 視覚センサと組合せたロボットシステム

ロボットと組合せて用いる視覚センサの機能は、

- ① 距離または位置計測 (X, Y, Z, 姿勢)
- ② 色の識別
- ③ 物体の認識

に大別できる。これらの機能を利用して現在の視覚センサ付のロボット（知能ロボットという）はワークまでの距離、穴の位置、ワークの形あるいは色の判別を行うことができる。

一般的な知能ロボットのシステム構成を図-5に示す。知能ロボットはロボット本体、ロボットコントローラ、センサ（プローブ部）、センサコントローラより構成される。ロボットコントローラには事前にティーチングにより作業プログラムが入力されており、センサにより捉えられた外界情報をセンサコントローラで処理して必要情報のみを取り出し、ロボットコントローラにフィードバックして、前記作業プログラムの一部を補正してロボットを動作させる。

これらの知能ロボットのうち、比較的早くから実用化が進んでいるのがアーク溶接ロボットであり、TVカメラで溶接線を検出し、これにならってトーチを移動させることができる。また、最近になって開発が活発化しているのが組立知能ロボットである。

普通のティーチング/プレイバック形のロボットは教えられた作業プログラム通りの動作を繰り返すだけであり、パーツの取出し位置やパーツを組付ける相手の位置や姿勢が変化すると誤動作となってしまうため、高精度な取出し位置が得られる高価なパーツフィーダやワークの位置決め治具が必要である。このよ

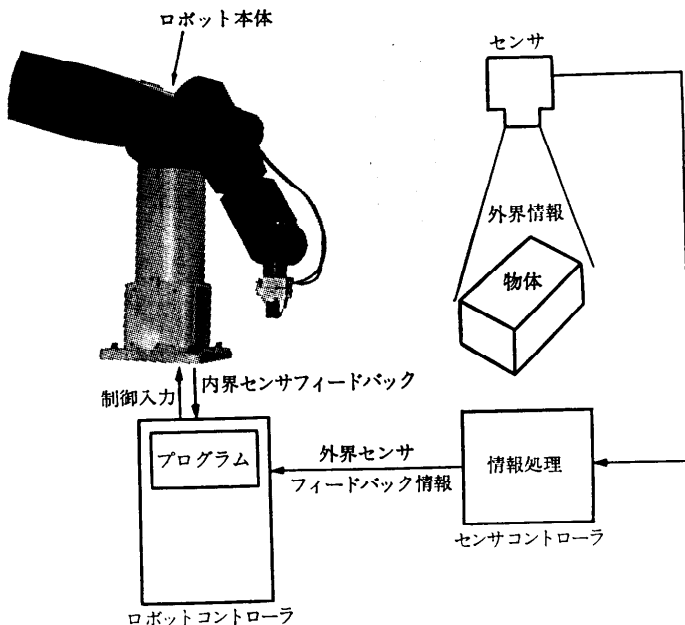


図-5 知能ロボットのシステム構成

うな組立作業には TV カメラを用いた位置決め補正機能を持った知能ロボットが適用できる。

まず、二次元の位置決め補正について述べる。図-6は固定カメラを用いた場合の座標系を示す。 O_R はロボット原点、 O_s はセンサ原点でありともに固定点である。センサ座標系における物体の位置 \vec{V}_{Os} は、カメラの映像より得られる情報であり、ロボット原点に対するセンサ原点の位置を \vec{V}_s とするとロボット座標系における物体の位置 \vec{V}_{OR} は、 $\vec{V}_{OR} = \vec{V}_{Os} + \vec{V}_s$ で求めることができる。この \vec{V}_{OR} の値をロボットコントローラに入力すれば物体を掴むことができるわけである。ただし、ここで注意しなくてはならないのは、その測定精度であり、たとえば画素数が 512×512 の TV カメラを使って上方より 500 mm 四方の視野を撮影しているとするとその分解能は 1 mm 程度しか期待できないことになる。1 mm ではハンドリング作業程度なら十分な精度であるが組立作業では精度不足である。ここで登場するのがハンドカメラであり、小型・軽量のカメラをロボットのハンド部に仕込み、カメラの視野を狭くして分解能を上げることができる。たとえば視野を 50 mm 四方とすれば 0.1 mm 程度の分解能が得られる。

ハンドカメラの場合は、センサ原点 O_s がロボットの腕とともに移動するため、このセンサ原点の位置 \vec{V}_s

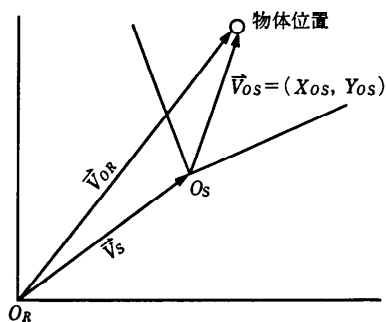


図-6 ロボット座標系とセンサの座標系

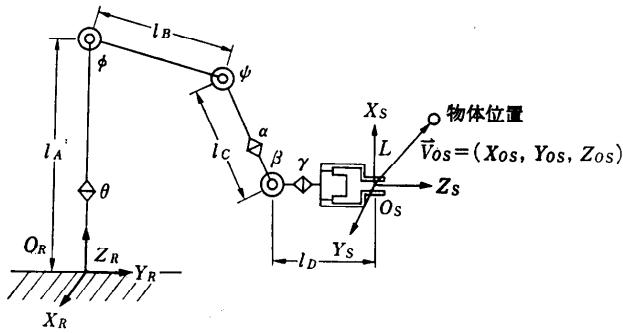


図-7 6軸多関節形ロボット

をロボットの関節角より計算して求めなくてはならない。図-7 に示すような6自由度の垂直多関節形ロボットにおいて、センサ原点 \vec{V}_s は次式により与えられる。

$$\vec{V}_s = \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \\ 1 \end{bmatrix} = [T_1][T_2][T_3][T_4][T_5][T_6] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$T_1(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_A \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_2(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi & l_B \cos \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi & l_B \sin \phi \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3(\psi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi & l_C \cos \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi & l_C \sin \psi \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_4(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_5(\beta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta & l_D \cos \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta & l_D \sin \beta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_6(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & \sin \gamma & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

さらに三次元の位置決め補正は、二次元の位置決め補正に距離センサを組合せることにより可能となる。図-7 においてハンドカメラから得られる物体の位置情報を (X_{Os}, Y_{Os}) し、ハンドに付けた距離センサによって計測した物体までの距離を L とすると、 Z_s 軸方向の物体の位置 Z_{Os} は $Z_{Os} = \sqrt{L^2 - (X_{Os}^2 + Y_{Os}^2)}$ で求まるので $\vec{V}_{Os} = (X_{Os}, Y_{Os}, Z_{Os})$ を座標変換式に代入すれば、

$$\vec{V}_{OR} = \begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= [T_1][T_2][T_3][T_4][T_5][T_6] \begin{bmatrix} X_{Os} \\ Y_{Os} \\ Z_{Os} \\ 1 \end{bmatrix}$$

として、ロボット座標における物体の位置 \vec{V}_{OR} を求めることができる。

参考文献

- 1) 秋山：サーボセンサ，ロボットエンジニアリング，p. 81 (Nov. 1983);
- 2) 秋山：サーボ技術マニュアル11章トリケップス (1983).
- 3) 永島：視覚付き組立ロボット，電子材料，Vol. 22, No. 4, pp. 123-125 (Apr. 1983).
- 4) 上山編：ニュードライブエレクトロニクス，電気書院 (1982).

(昭和59年1月5日受付)

