ロボット制御の基礎

——センサ及びアクチュエータ技術——

A Control of Roboto

——Sencer and Actuator Technology——

西井 完治* 河村 浩幸* 米澤 武敏*

1. はじめに

ロボット制御は、メカトロニクスの代表的な技術分野である。メカトロニクスとは、いうまでもなく従来のメカニクス（機械技術）に最新のマイクロエレクトロニクスを応用する事で発展してきた技術である。

このロボット制御を構成する主要要素として、

- 1) センサ技術 [感覚認識機能]
- 2) アクチュエータ技術 [作業機能]
- 3) AI（人工知能）技術 [大脳機能]

があげられる。

一般のメカトロニクスと同様に、このロボット制御においても、より高速で、より高精度な制御を行うためには、センサおよびアクチュエータの応答性、分解能、精度等が重要なファクタとなっている。

そこで、本報告ではロボットにおけるセンサ技術およびアクチュエータ技術を主に取り上げ、それらのロボティクス（ロボット工学）における位置付け、最近の開発動向等について報告する。

2. ロボットの進化と機能

Fig.1¹⁾は、ロボットの進化とその特徴を示したものである。図中の感覚認識機能のうち、内界情報とはロボット自身に関する情報、例えばアーム駆動モータの回転角等の情報を指す。一方、外界情報とは作業対象あるいは

作業空間に関する情報、例えば対象物体までの距離情報等を指す。Fig.1から分かるように、すべてのロボットにおいて、先ほど述べた要素技術が全部必要なわけではない。

しかし、近年普及レベルに達した第2世代以降のロボットにおいては、NIES 製品の台頭等の社会的ニーズを踏まえた高付加価値製品の生産を実現する知能化ロボット、すなわち、“より人間に近いロボット”の研究開発が盛んになってきている。こうした“より人間に近いロボット”においては、とりわけ人間の五感に匹敵するような感覚認識機能を実現するセンサ技術が重要な要素技術として位置付けられる。

3. ロボット用センサ

3.1 ロボット用センサの要件

ロボット用として特別に開発されたセンサはそれほど多くはないが、ロボット開発の究極の目的は、“1台の機械（ロボット）で多品種を無人で24時間生産できる無人化工場を実現する事”である。

従って、ロボット用センサには、

- 1) 人間の五感に相当する機能の実現
- 2) 悪環境下での長期信頼性の確保
- 3) 可動部に搭載可能な小型化

等が、主に要求される。

3.2 内界センサと外界センサ

ロボット用センサは、その用途から内界情報を検出する内界センサと、外界情報を検出する外界センサに大別できる。内界センサは、位置制御、モータ回転制御に用いられる“位置センサ”、速度制御に用いられる“速度センサ”、振動対策に用いられる“加速度センサ”等に分類

*Kanji Nishii, Hiroyuki Kawamura, Taketoshi Yonezawa
松下電器デバイス工法開発研究所/Matsusita Electric Industrial Device Process Technology Research Laboratory

Fig.1 Evolution of robot

Fig.2 Piezoelectric Accelerometer

できる。

一方、外界センサは部品の認識、欠陥の検出等に用いられる“視覚センサ”，対象物体の探索、確認に用いられる“接触覚センサ”，把握力検出に用いられる“圧覚センサ”および“すべり覚センサ”，押圧制御に用いられる“力覚センサ”，ロボットの移動制御等に用いられる“距離センサ”および特に近距離で用いられ高精度距離検出を行う“近接覚センサ”等に分類できる。

またロボット制御との関係から見ると、内界センサはロボットアーム等のフィードバック制御に主に用いられる。一方、外界センサはロボットの行動制御すなわち行動計画、知識データベースとの照合による認識等に用い

られる。従って内界センサには主として精度，応答性が要求され，外界センサには高機能，インテリジェント性が求められている。このような観点から最近開発されたセンサのいくつかを紹介する。

3.2.1 加速度センサ（圧電型加速度センサ）

Fig.2²⁾は、外力により圧電素子が歪むと電荷が発生する“圧電効果”を利用した圧電型加速度センサのセンシング部の基本構造である。片持ち梁型にレーザ加工により構成した圧電素子の振動子に加わる加速度を，素子に発生する電荷から検出する原理である。温度変化補償回路を付加する事で， $-40 \sim +125^{\circ}\text{C}$ の広い温度範囲で1%オーダの出力直線性を，従来の加速度センサと比較して簡単な構造で実現している。

3.2.2 位置センサ（リニアスケール）

Fig.3³⁾は約 $0.5\mu\text{m}$ のピッチの格子パターンを記録した体積型位相ホログラムを用いたホログラフィックリニアスケールの検出光学系の原理図である。半導体レーザから出射された光は，PBSにより2つにわけられスケールのホログラムにより各々2度ずつ回折される。その際，両者の回折角の正負が逆のため逆位相が付加され反射光が検出器上で干渉する。この干渉縞の強度を検出することで格子ピッチの $1/4$ の精度で移動量を検出できる。さらにヘテロダイン検波を併用することで $0.01\mu\text{m}$ オー

Fig.3 Holographic Linear Scale

Fig.4 3D Range Finder

Fig.5 VLSI Tactile Array Sensor

の精度を実現している。

3.2.3 視覚センサ（3次元距離センサ）

Fig.4⁴⁾は、対象物体に対して一定角度に設定した液晶シャッターとレーザ平行光源による面パターン投光装置と対象物体の真上に設置した CCD カメラを用いた 3 次元

PF_x : Parallel Plates For X-direction Force
PF_y : Parallel Plates For Y-direction Force
PF_z : Parallel Plates For Z-direction Force

Fig.6 Crasping Force Sensor

距離センサの原理図である。半導体レーザから出射された光は、レンズ系により平行光化され液晶シャッターによりピッチ 100 μm の 256 本の縞状パターン化される。この面パターン画像上の縞には空間符号化法により番号付けしている。この符号化画像の濃淡を 2 値化し画像処理を行い、縞ピッチと番号とから Fig.4 の Δx を求め、高さ h を算出することで高速な 3 次元認識を実現している。

3.2.4 圧覚センサ（VLSI 圧覚センサ）

Fig.5⁵⁾は、半導体製造技術を利用した高密度インテリジェント圧覚センサの構成図である。導電性シリコンゲムの下に絶縁層と金属接点を置き、それぞれの接点に対応して 1 つずつプロセッサを共通のシリコンウェハ上に構成したものである。ロボットハンドによる圧力印加により変化する接点間の抵抗値を検出することで 2 次元圧力分布を検出できる。また組み込みのアレイプロセッサにより圧力信号に対して、空間フィルタリング処理を行いその結果をシリアルデータに変換して出力するので、情報圧縮、信号線のチャンネル数低減が同時に行える。

3.2.5 力覚センサ（6 軸力センサ）

Fig.6⁶⁾は、ロボットの手首にかかる 6 軸（XYZ 軸と、そのまわりの回転）の力を検出する力覚センサの構造図である。3 組の平行平板と歪みゲージとから構成されている。平行平板を用いることで、例えば X 方向に力を加えた時に Y 及び Z 方向の力を検出する歪みゲージの出力が非常に小さくなる。すなわち各軸間の干渉防止が図れる。これにより、構造の簡略化、手首着装可能な小型化を実現している。

3.2.6 近接覚センサ（光学式近接覚センサ）

Fig.7 Optical Proximity Sensor

Fig.7⁷⁾は、基本的には反射光量から対象物体までの距離を測定する光学式近接覚センサの原理図である。LED 1, LED 2は光源であり受光素子 PHTR に対して非対称の位置に配置されている。この2つの光源の輝度を互いに90°位相のずれた $\sin \omega t$, $\cos \omega t$ のごとく時間的な変調を与える。従って、受光素子により検出される対象物体からの反射光量の和は $\sin(\omega t + \phi)$ で表される位相ずれ ϕ を持つ。この位相ずれ ϕ は距離 x の関数となるので、位相検波により距離検出を行うことができる。また、位相ずれ ϕ を用いることで対象物体の反射率に影響されない距離測定が可能であるという特徴を持っている。

4. センサとアクチュエータの協調制御

センサとアクチュエータの協調制御の代表例としてコンプライアンス制御とハンド・アイシステムの2つを取り上げる。

4.1 コンプライアンス制御

VTR 等の精密部品のはめ合い等 μm オーダの精密作業、柔らかい物体の把握といった作業の場合、力と位置の両方の制御が必要になる。コンプライアンスとは“柔らかさ”を意味し、力学的には剛性（ばね定数）の逆数すなわち（位置）/（力）で定義されるものである。従って、このコンプライアンスを制御することで結果的に位置制御と力制御の両方を行った事になる。

具体的には Fig.8⁸⁾ のばね定数 K を調整する制御であ

Fig.8 Compliance Control

Fig.9 Magnetically Supported Hand

り、位置センサ及び Fig.5 の圧覚センサ, Fig.6 の力覚センサをセンサとして用い、アクチュエータとして、例えば Fig.9⁹⁾ に示した磁力支持ハンドが用いられる。これは電磁石の吸引力を変化させることで、5 軸のコンプライアンス制御を行うものである。

4.2 ハンド・アイシステム

ロボットハンドと視覚の協調制御であるハンド・アイシステムは、様々な環境に適応し自律的に作業を行う自律ロボットの制御技術の1つである。ハンド・アイシステムは言語系、認識系、モデル系の3つのサブシステムから構成される。言語系にはプランニング機能から動作レベルの言語まで含まれる。認識系では視覚情報（触覚情報）に基づいて対象物体の位置・姿勢を認識する。モデル系は作業環境に関する情報、アームの動特性、カメラに関するセンサ情報等が含まれ、言語系及び認識系に対してロボット環境情報のデータベースを提供する。

具体的には Fig.10¹⁰⁾ に示したように、電子計算機、多自由度を有するロボットアーム、濃淡画像を入力する

Fig.10 Hand Eye System

TV カメラ及び距離データを入力するレーザ測距計等から構成されている。

5. 知的ロボット制御技術

新しいロボット制御技術の代表例として、人間の右脳が持つといわれている優れたパターン認識能力（並列情報処理機能）をロボット制御に取り入れる事で、ロボットの高度知能化を目指す知的ロボット制御技術について述べる。その例として、ニューロロボット及び光情報処理技術を用いたロボットアイの2つを紹介する。

5.1 ニューロロボット（同時並列型情報処理）

ニューロロボットは、人間の脳をモデルとして並列的に動作するニューロ素子を相互に結合したネットワークを構成し並列分散処理と学習を行うニューロコンピュータによる制御技術を用いたロボットである。

具体的には、Fig.11¹⁾に示したように超音波センサ、光センサ、タッチセンサ、リミットセンサの入力を受け、ニューロコンピュータの出力でロボットのモータを制御して前進、後進、左右回転を行うものである。このニューロコンピュータは“探索行動”を受け持つ“理性ネットワーク”と、“回避行動”を受け持つ“本能ネットワーク”と呼ばれる2つの階層ネットワークからなり長期記

Fig.11 Neural Network

Fig.12 Optical Correlater

憶型ユニットを介して結合されている。

このニューロロボットは、学習のさせ方、すなわちセンサ入力情報と行動パターンの対応関係を変化させる事で、同一構造のロボットを様々な習性を持ったロボットに変化させる事が可能な柔軟性を持つ。

5.2 光情報処理ロボットアイ（逐次並列型情報処理）

最近、逐次直列情報処理マシンであるノイマン型計算機（現在の電子計算機）の課題を、光の本質的特性である並列情報処理性で克服しようとする光情報処理の研究が盛んである。特に、パターン認識は従来のノイマン型計算機が最も不得意としているものの1つである。これを高速に行う技術として、ホログラフィによる光相関演算技術がある。

Fig.12¹²⁾は、半導体レーザを用いて小型化した光相関器の構成図である。結像レンズで取り込んだ入力像と、マッチトフィルタフィルム（標準パターンのフーリエ変換ホログラム）との光学的フーリエ変換による相関演算の結果を検出器出力（光量）から求め、この相関度（パターン類似度）を用いて高速パターン認識を実現している。

しかしながら、このような光相関器の標準パターンのフーリエ変換ホログラムの作成は、基本的に写真プロセスに立脚している。従って、これをロボット・アイに適用する場合、作業内容が変更される都度その対象物体のフーリエ変換ホログラムを撮影し、Fig.12のマッチトフィルタフィルム面に再配置する必要がある。一方、従来の電子計算機ではプログラムの変更で対応できる。

すなわち、光情報処理は従来のノイマン型計算機と比較して高速化が図れるが、作業内容の変更等に対する柔軟性に欠けるという欠点を持っている。そこで、光情報処理に柔軟性を持たせ、これをロボット・アイに応用しようとする研究が盛んになってきている。

Fig.13^{13),14)}は、実時間計算機ホログラムによる形状認識システムの構成図である。このシステムでは、実際に

Fig.13 Recognition System Using Realtime Computer Generated Hologram

標準パターンを置いてそのフーリエ変換ホログラムをフィルム上に撮影するのではなく、FFT（高速フーリエ変換）プログラムを用いて計算機ホログラムを作成し、それを液晶ディスプレイ上に絵素マトリックスの透過率を空間的に変調する事で表示するものである。従って、光の並列情報処理機能による高速性を維持しつつ、柔軟性をも賦与することができる。また、計算機ホログラムには座標変換等のトポロジカルな機能を与える事が可能なため単純なパターンマッチング以外の光情報処理をCCD素子からの電気的フィードバックにより逐次並列処理の形で実行可能である。

6. おわりに

ロボット制御の要素技術としてセンサ技術を中心に、アクチュエータ技術、AI技術について三者の位置付けおよび相互の関連という観点で述べてきたが、ロボット制御技術の今後の動向として、

1. 高信頼性化

2. 知能化

の2つの大きな流れ、具体的には、

高信頼性化として、圧電デバイス、Siベースのマイクロメカニクス等の研究開発によるセンサ、アクチュエータの固体化、構造の単純化及び、複合機能化による素子数の削減等があげられる。一方、知能化としてオプトロニクス、光情報処理と知識データベースの導入によるインテリジェントセンサ化、ロボット制御の知的制御技術化等があげられる。

今後は、このような分野の研究開発がニーズを踏まえつつ、より盛んになっていくものと考えられる。

参考・引用文献

1) 館 他：計測自動制御学会誌，p.1140（S57-12）

2) 若宮：センサ技術，p.93（89-6）

3) 谷口：M&E，p.112（88-5）

4) 姉崎 他：インテリジェントFAシンポジウム講演論文集，p.67（JULY，1989）

5) 長谷川：センサ技術，p.73（83-6）

6) 日経メカニカル，p.60（86.7.28）

7) 増田 他：計測自動制御学会論文集，p.73（S56-12）

8) 谷江 他：精密工学会誌，p.1189（89-7）

9) 樋口 他：'88日本ロボット学会講演論文集，p.75

10) 坂根 他：電気学会システム制御研究会，SC-84-18

11) 木本 他：電子通信学会研究会，CPSY 88-20

12) 三橋：情報処理学会誌，p.909（85-8）

13) 西井 他：89春精密工学会講演論文集，p.957

14) 河村 他：89秋精密工学会講演論文集（投稿中）