

# ロボット コントローラAR にみる新技術

*New Technology of  
AR Controller for Industry Robot*

キーワード

ロボットコントローラ, デジタルサーボ,  
視覚センサ, ロボット言語, 32bit CPU,  
SLIM, 協調制御, ME-NET

技術開発部  
ロボット開発部  
桐井裕司

## 摘要

高度化するロボットを支えるロボットコントローラの性能向上を, 32ビット化およびデジタルサーボ化を軸に行った。

開発のねらいとしては, ①安全柵内設置を考えたコンパクト設計, ②デジタルサーボの採用でサーボ性能を飛躍的に向上する, ③JIS化したロボット言語SLIMを取り入れる, ④操作性を容易にする, ⑤豊富な拡張機能を備えるをあげた。

操作を容易化するため, 操作性の評価指数を導入して改善に努めた。デジタルサーボ化によるサーボ性能の向上には, 現代制御理論を駆使し, 慣性, 遠心力, 重力を反映する動的モデルによる最適制御を実現した。不二越が開発したロボット制御装置“組込形視覚センサNV-R1”は, 階層化マッチングの手法を用いて認識の信頼性を向上させた。さらに, FA・CIM化に対応し, 周辺機器制御の一体化, ME-NETのようなネットワーク機能, シーケンサ機能の内蔵を行った。

## Abstract

We improved the performance of robot controllers supporting high-end robots, by making them 32 bit CPU and using digital servo technology.

The development objectives were established as follows: (1) compact design to fit inside safety fence; (2) significant progress of servo performance by using digital servo; (3) use of SLIM robot language which now conforms to JIS; (4) easier operability; and (5) preparing various enhanced functions.

We introduced operability evaluation indexes to make operations easier, make full use of contemporary control logic to improve the servo performance, and as a result, optimal control has been achieved by a dynamic model reflecting the inertia, centrifugal force, and gravitation. Built-in visual image sensor NV-R1, the robot controller developed by Fujikoshi, uses a hierarchical matching technique to improve the recognition reliability. To be used in FA and CIM, the controller also has network like ME-NET, built-in sequencer and a comprehensive peripheral device control unit.

## 1. はじめに

産業用ロボットが市場に普及するにつれ、ロボットコントローラの性能、機能に対する要求が多様化するとともにその内容も高度化してきている。要求内容は高作業品質、高生産性、高信頼性、操作の容易化、FA・CIM化、省スペース化である。とりわけ、高作業品質、高生産性はロボットの価値そのものである。ロボットの機能面からみれば、作業品質の向上は位置決め精度、軌跡精度の向上であり、生産性の向上は動作速度の高速化と視覚、力センサを利用した知能化である。また、製造現場におけるロボットの位

置付けは自動化のツールから生産システムのユニットへと移行し、より高い信頼性が求められるようになってきた。操作の容易化と小形化の要求はロボットに限らず、すべての製品に共通のものであり、時代に適合したものでなければならぬ。

これらの要求に対し、従来のコントローラでの対応に限界があり、CPUの32bit化およびデジタルサーボ化を軸にAR制御装置の開発を行った。

## 2. 開発のねらいと特長

### 2.1 コンパクト設計

省スペース化はロボットのデッドスペースに設置可能なサイズを目標とした。CPU、サーボ回路のカスタムLSI化、サーボ回路のフルデジタル化、サーボアンプの小形化を軸に制御装置を小形化し、安全柵内配置の考え方を初めて提案した。図1に示すように、ロボット動作範囲のデッドスペースを利用し、ロボット本体とともに制御装置を安全柵内部に設置可能なサイズとなった。

### 2.2 デジタルサーボ化によるサーボ性能の向上

デジタルサーボ化により、高性能化を実現するとともに、調整要素のパラメータ化による保守部品の共用、調整ボリューム除去による経年変化要因を減少させ信頼性を向上させた。サーボ性能の向上に関しては、“4.2 サーボ性能の向上”で詳細に述べるが、高速化・高精度化において飛躍的な性能向上を実現した。

### 2.3 JIS化したロボット言語SLIMの搭載

SLIMは日本産業用ロボット工業会が中心となって標準化が図られたロボット言語であり、'92年2月にJISに制定された。SLIMはBASIC言語を基本とし、ロボット制御用のコマンドを追加したものであり、BASIC言語でプログラム作成の経験があれば誰でも使いこなすことができる。

ロボットを視覚センサなどのセンサと接続した高度な使い方をを行う場合は、センサからの信号の処理やその結果を判定して、プログラムを切り替えるなど複雑な処理が多く、従来の同一動作の繰り返しを行うプレイバック方式のティーチングだけでは対応できない。そこで高度な演算機能・条件判断機能を有するロボット言語の採用が不可欠となる。SLIM採用の結果、ティーチングプログラムによりロボット言語プログラムをコールすることも可能であり、ロボット言語を算術演算のサブルーチンとしても利用できる。逆にロボット言語で条件判断プログラムを作成し、条件によりティーチングプログラムを選択実行することも可能である。このようにティーチングとロボット言語を組み合わせ、効率的に目的の作業を実現できる。

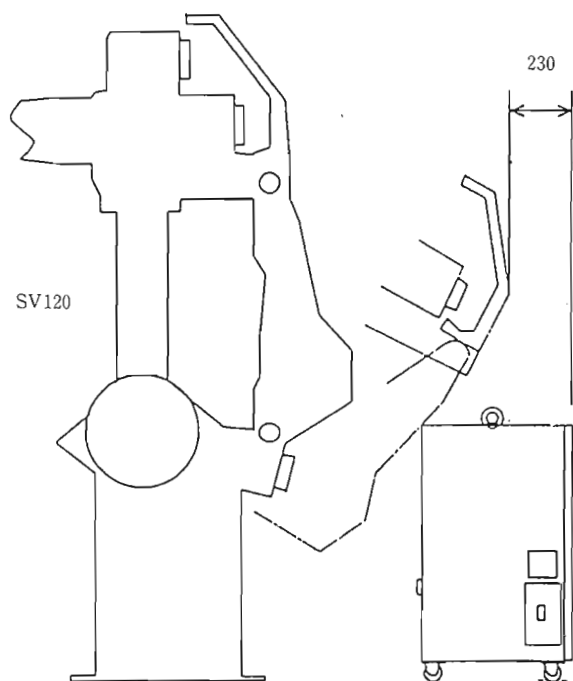


図1. 制御装置の設置

## 2.4 容易な操作

操作性については、“4.1 操作の容易化”でも述べるが、キー操作に関して評価指標を用いてキーの種類、数、配置を決定して改善を行った。また、データ入力に関しては、短縮コード入力とメニュー選択を併用し、初心者から熟練者まで、幅広く快適に操作できるようになっている。メニュー画面には項目のカスタマイズ機能を持たせ、ユーザが自分で使い勝手を調整できるようにした。

表示はティーチペンダントに40桁×20行の大形漢字ディスプレイを採用し、オペレータにより多くの情報を提供できるようにした。さらに、来るべき高齢化社会を考慮し、簡単に画面の文字の大きさを4倍に拡大する倍角表示機能を設けた。このように随所にきめ細かな配慮をし、操作性の向上をめざした。

## 2.5 豊富な拡張機能

スポット溶接、アーク溶接、塗装、ハンドリング、ばり取りなどの各種アプリケーションに対応した豊富な機能を取り揃えている。また、AR制御装置では最大4台のロボットを同時に制御するマルチロボット制御機能を有する。例

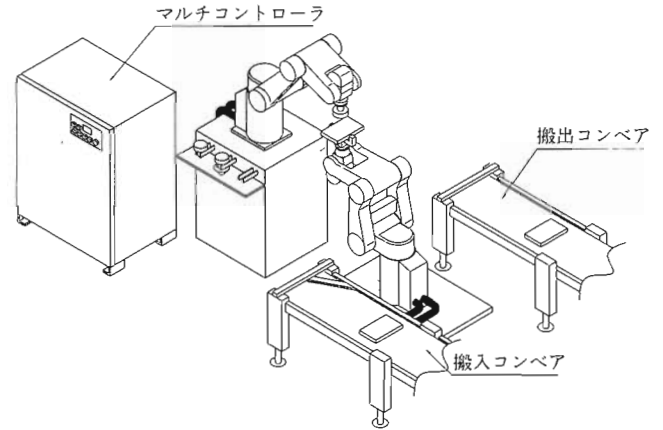


図2. 協調制御によるばり取りシステムの構成

えば、6軸ロボットと3台の治具軸ロボットを1台の制御装置で独立に制御することや、2台の6軸ロボットを人間の両腕のように協調制御することが可能である。図2はばり取りシステムに協調制御を用いた例である。ツールの交換、ワークの取り出し・排出は独立制御で行い、ばり取り作業の部分を協調動作で行う。このように、独立制御時は2台の6軸ロボットとして、協調制御時は1台の12軸ロボットとして動作させることができ、新しいロボットの適用法を提供する。

# 3. ハードウェア構成

## 3.1 外観

AR制御装置は制御盤本体、ティーチペンダントより構成される。図3、4に制御盤本体とティーチペンダントの外観を示す。制御盤本体サイズは、W660×H890×D575mmと小形である。小形化の際に問題となる点は、表面積が小さくなることによる放熱能力の減少である。その対策として、制御盤内部に隔壁を設け、密閉部と非密閉部に分割し、非密閉部にはサーボアンプのヒートシンク、回生放電抵抗など、放熱の大きい部品を配し外気で直接冷却している。また、密閉部においては、熱対流効率を高める部品配置とし、熱交換器も小形で効率の良いものを採用した。この結果、容積比1/2と小形化されたにもかかわらず、動作保証温度は、0～45℃と従来と同等の性能を得ることが可能となった。

## 3.2 ハードウェアブロック図

図5に制御盤のハードウェアブロック図を示す。

CPUブロックはCPU・メモリ基板、サーボ基板、PC基板

を基本とし、その他、ME-NET、視覚センサなどのオプション基板が実装可能となっている。CPU、メモリ基板およびサーボ基板には合計9個のカスタムLSIを使用し、基板の集約による小形化と部品点数削減による信頼性の向上を図った。CPUは制御装置全体を制御する32bitCPUと各軸サーボ、PCにそれぞれ専用CPUを採用した。各役割に応じたCPUを配置することにより処理速度を向上させるとともに、異常検知を多重化し安全性を高めている。

サーボアンプは3軸単位で構成する。サーボアンプの3軸化は、電源回路の共有による小形化および部品点数削減と省配線化による信頼性の向上を目的とした。パワー素子にはIGBTを採用し、PWMキャリア周波数を従来の4倍にした。PWMキャリアの高周波数化は、無駄時間低減によるサーボ（電流制御）性能の向上、電流リップル減少によるモータ温度上昇の抑制、磁気騒音の減少などに効果がある。

I/O制御ブロックは汎用のデジタル入出力と非常停止などの安全回路を構成する。安全回路は非常停止、デッドマンスイッチ、柵内作業、安全プラグなどの状態を監視し、

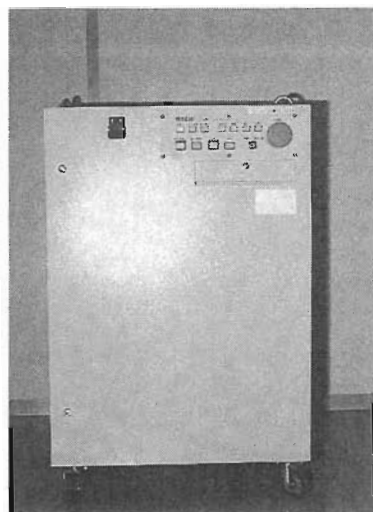


図3. 制御装置

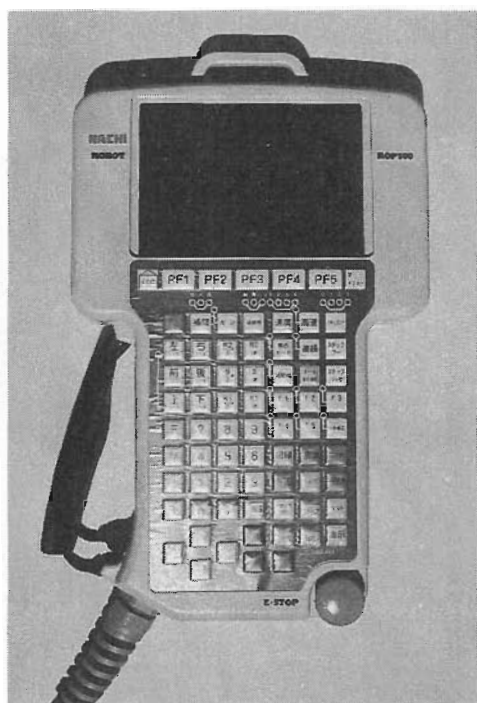


図4. ティーチペンダント

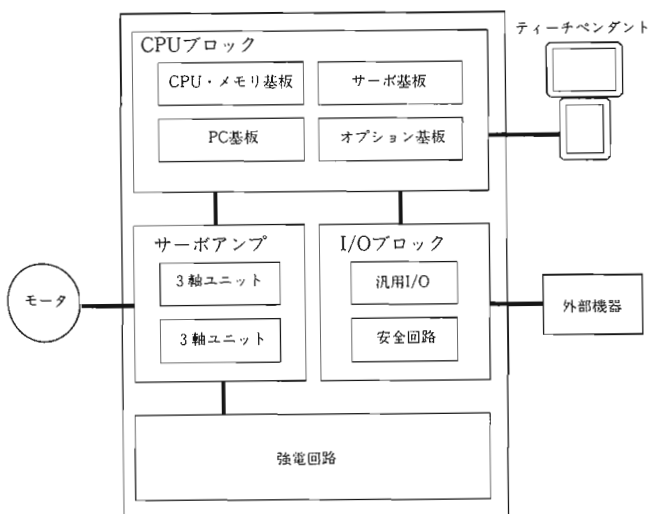


図5. ハードウェアブロック図

異常や危険な操作を検知した場合、サーボ電源を遮断する回路である。回路はハードウェアロジックで設計し、安全性を高めている。また、このブロックの入出力は外部機器と接続されるため、制御盤扉面に配置した。扉を開くと配線用のコネクタ、端子台が制御盤外に引き出されるため、作業者は広い空間で配線作業ができる。

## 4. 機能

### 4.1 操作の容易化

操作性は、オペレータの感覚によって判断されることが多く定量的な評価が困難である。特に、設計段階で検討される操作性は設計担当者の立場で検討されるため、現場のオペレータの感覚と必ずしも同一ではない。操作性のレビューを行ったとしてもレビュー参加者自体、設計者であることが多く、問題は解決されない。さらに、現場のオペレータに参加してもらったが“実際に操作してみないとわからない”ということでこれもあまり効果がない。そこでAR制御装置の開発においては、このような感覚的な品質に対して評価指標という考え方を導入し、操作性の容易化にあたった。

評価指標には、表1に示すように1回のキー操作に要する配点を決め、一連の操作における合計点数を用いた。

この評価指標に基づきスポット溶接における打点記録の作業を評価したものが図6である。点数が少ないほど操作

動作	キーの種類	配点
探す	専用キー	3
	ファンクションキー	5
押す	メニュー選択キー	2
	その他のキー	1

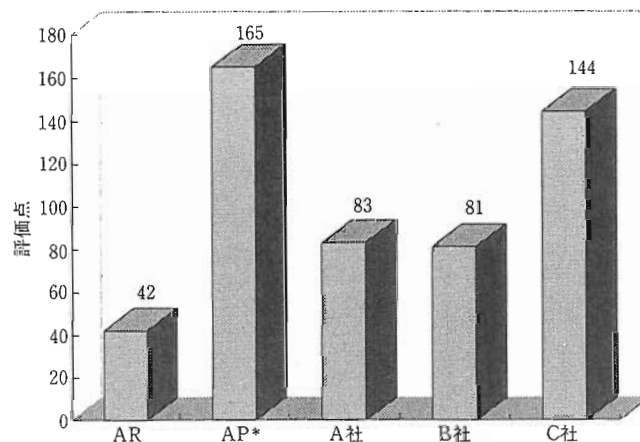


図6. 操作性比較 \* APは不二越の従来形制御装置

性がよい。操作性がよいといわれるA社、B社の評価点が良く、評価指標の妥当性を裏付けている。

AR制御装置では、このような評価指標を用い、ティーチペンダントの専用キーの種類、数、配置を決定した。表2にAR制御装置での評価内容を示す。また、図7にティーチペンダントのキー配置を示す。

## 4.2 サーボ性能の向上

### 4.2.1 フルデジタルサーボ

図8にサーボ系のブロック図を示す。サーボ系は位置制

表2 AR制御装置の操作性評価

項目	操作	点数
プログラム選択	“プログラム”, “I”, “セット”	12
速度選択	“高速”	4
補間指定	“座標系”	4
軸操作		
MX信号選択	“MX”	6
速度選択	“高速”	4
ガン信号選択	“ガン”	4
アキュラシー設定	“ACC”	4
ステップ記録	“記録”	4

合計 42

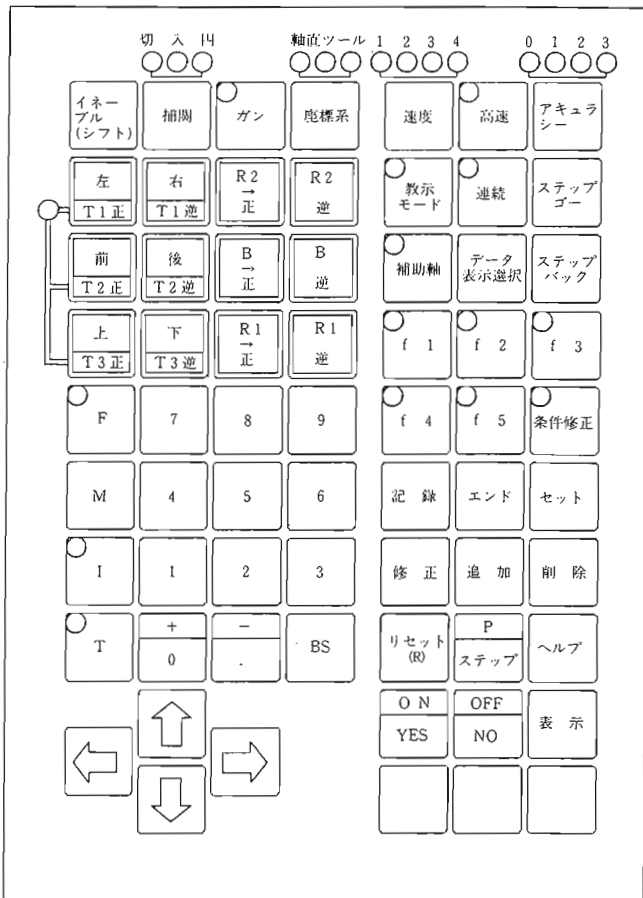


図7. ティーチペンダントのキーの配置

御 (Position Feedback), 速度制御 (Velocity Feedback), 電流制御 (Current Feedback) の各フィードバックループで構成される。位置制御は、位置指令とエンコーダの位置信号を入力とし、位置偏差 (速度指令) を出力する。速度制御は、速度指令とエンコーダの位置信号を微分した速度信号を入力とし、速度偏差 (トルク指令) を出力する。電流制御は、トルク指令とモータ電流を検出する電流検出器の電流信号を入力とし、モータを駆動するためのPWM信号を出力する。AR制御装置では、これらの制御ブロックをフルデジタル化した。デジタル化することにより、重力や負荷による補償をダイナミックに変更することが可能となっている。また、機能面においては、速度オブザーバによる干渉検知を行い、従来の1/5の時間で干渉を検知する機能や、モータ電流をモニタし、故障を予知する機能を搭載した。

### 4.2.2 トルク飽和を考慮した軌跡制御

多関節形ロボットの軌跡制御において、関節角と直交座標の非線形性を無視すれば、サーボ系のゲインがすべて等しければ、目標軌跡に対し正確に追従できる。しかし、高速動作させる場合、各関節毎に加わるトルクの大きさが異なり、許容トルクによるトルク飽和处理 (電流制限) を行う必要がある。このトルク飽和を考慮しないと、目標軌跡上の位置を指令しても、トルク飽和した関節は電流を制限されるため、目標軌跡に追従できない。そこで関節トルクが飽和した状態でも目標軌跡の追従を行うため、目標軌跡と実現可能軌跡についてフィードバック制御系を導入し、得られた実現可能な軌跡から関節角に変換する制御手法を採用した。

図9にトルク飽和を考慮した場合としない場合の軌跡誤差を示す。トルク飽和を考慮した場合、2300mm/secの高速動作時に約10倍の改善が見られる。

### 4.2.3 アンバランストルクとイナーシャを考慮した加速度制御

垂直多関節形のロボットは、その構造から姿勢によるアンバランストルク、イナーシャの変化が大きく、最悪姿勢で調整されたパラメータで動作させようとするロボットは、動きが全体的に遅くなってしまいます。そこで、ロボット質点モデル、各軸角度より決まるアンバランストルク、イナ

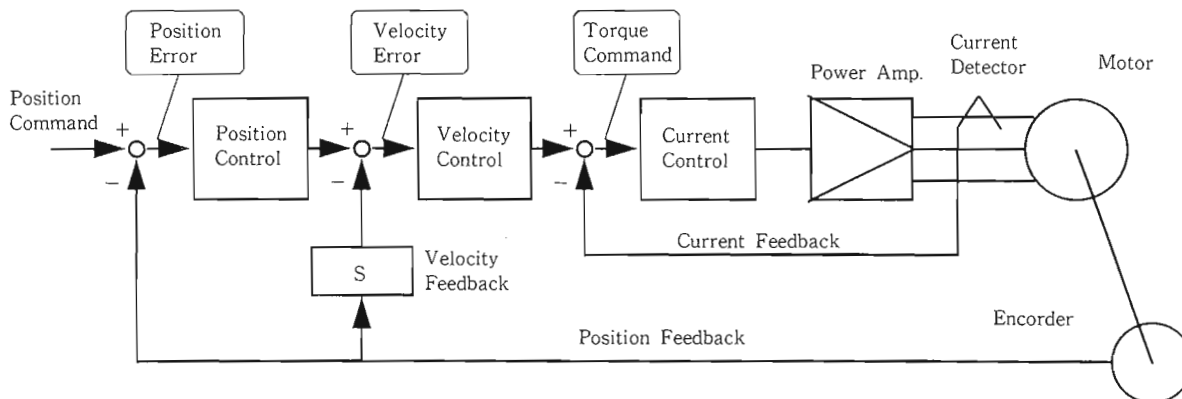


図8. サーボ系ブロック図

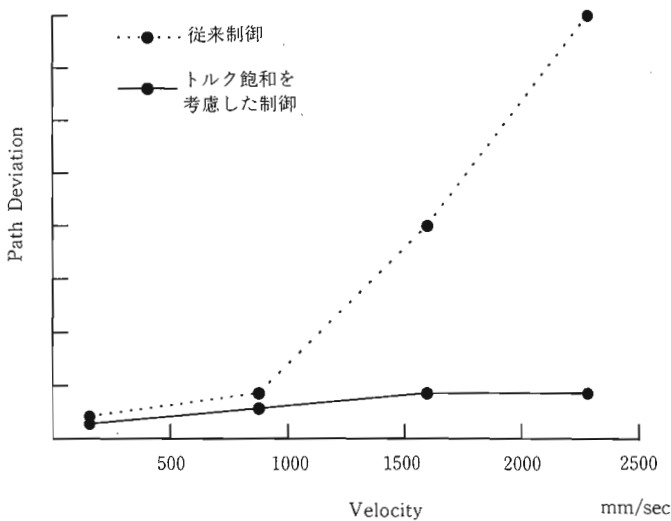


図9. 軌跡精度比較

ーシャと減速機許容トルクから加速度を求め、リアルタイムに許容加速度を変化させ、動作の高速化を図った。

アンバランストルク、イナーシャは回転軸中心を原点とした質点座標、質点質量、リンク長さから求めることができる。

アンバランストルク  $T_u$ 、およびイナーシャ  $J$  は

$$T_u = \sum_{j=1}^K -m_{j+1} l_j l_{g(j+1)} \sin \theta_{j+1} \quad (1)$$

$$J = \sum_{j=1}^K m_{j+1} l_j^2 \frac{1}{g} \quad (2)$$

$K$  : 関節数       $l$  : リンク長さ

$m$  : 質点質量     $l_g$  : 関節から質点までの長さ

$g$  : 重力加速度

となる。

アンバランストルクとイナーシャが求めれば許容加速度  $\omega$

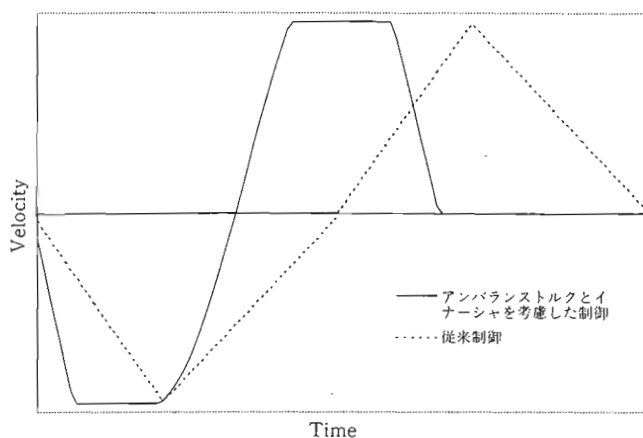


図10. 速度比較

は次式で求めることができる。

$$\omega = \frac{T_L + T_u}{J} \quad (3)$$

$T_L$  : 減速機許容トルク

図10に従来制御との速度比較を示す。アンバランストルクとイナーシャを考慮することにより、ロボットの移動時間を約30%短縮することができた。

### 4.3 組込形視覚センサNV-R1

サーボ技術とならびセンサ技術はロボットの適応範囲を拡大する基本技術である。中でも視覚センサ技術はラインのフレキシブル化が可能となるため、飛躍的にロボット適用範囲を拡大できる。しかし、従来の視覚センサは環境の変化に弱いという問題が普及をさまたげていた。NV-R1は、階層化マッチングとよふ手法を用い、認識の信頼性を向上させた組込形の視覚センサである。

### 4.3.1 画像処理の流れ

図11にNV-R1における画像処理のフローを示す。TVカメラから入力された画像データは、前処理は空間フィルタ演算によって、輪郭の強調やランダムノイズの除去を行う。認識処理は、画像から対象物を抽出する処理で局所の特長照合と大局的特長照合の2段階に階層化している。この階層化された認識手法によって、周囲環境の変化に対する適応力を高めることができる。計測処理は、ステレオビジョン方式を用い、対象物の3次元計測を行う。

### 4.3.2 階層化マッチング

図12に階層化マッチングの基本的な処理の流れを示す。教示は、対象物の中に特徴的な点を2か所以上設定することによってなされる。これらの特徴点はテンプレートマッチングにより照合されるので、回転の影響を受けにくい、例えば、円形の特徴を持つ領域を選ぶ。ここでは、特徴A、

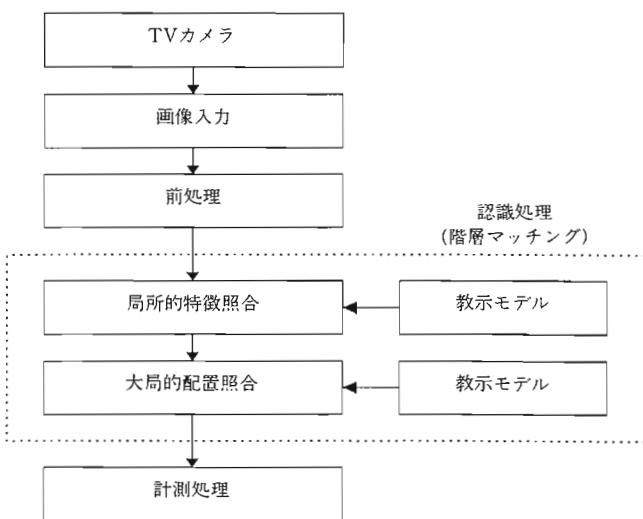


図11. 画像処理のフロー

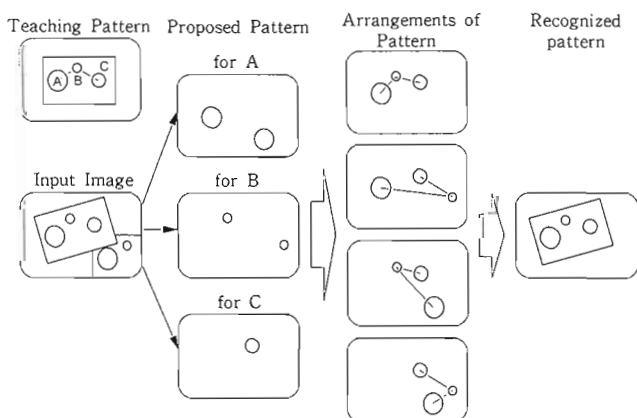


図12. 階層化マッチング

B,Cとする。

認識対象画像が与えられたとき、最初にテンプレートマッチングにより、画像の中から特徴A,B,Cの候補をそれぞれ求める。次に、これらの候補を組み合わせ、それらの位置関係を教示モデルと比較し、配置パターンの一致度により対象物を認識する。配置パターンの一致度は各特徴間の距離と角度の比較によって行う。このように局所的な認識と大局的な認識を階層的に行うことによる利点は、局所的な認識において、一致判定のしきい値を低く設定し、とれあえぬ候補をすべて抽出し、大局的認識において本物の候補を検出することができることにある。その結果、周囲の照明変化に対する適応力が高いものになる。

### 4.3.3 テンプレートマッチング

テンプレートマッチングは、通常、認識対象画像の中から唯一の対象物を検出する目的で利用されるが、NV-R1は階層マッチングを行うため、テンプレートマッチングを対象物の候補の検出を目的として利用する。以下にNV-R1のテンプレートマッチングによる候補の検出方法を述べる。最初に、入力画像(図13.1)とテンプレート画像(図13.2)との正規化相関演算(式4)を行う。

$$C(x,y) = \frac{\sum \sum \{ [f(i+x,j+y) - \bar{f}] \cdot [t(i,j) - \bar{t}] \}}{\sqrt{\sum \sum [f(i+x,j+y) - \bar{f}]^2} \cdot \sqrt{\sum \sum [t(i,j) - \bar{t}]^2}} \quad (4)$$

$f(x,y)$ : 入力画像内の座標(x,y)における濃度値

$t(i,j)$ : テンプレート画像内の座標(i,j)における濃度値

$\bar{f}$ : 入力画像の平均濃度値

$\bar{t}$ : テンプレート画像の平均濃度値

図13.3は得られた相関係数をグラフ化したものである。相関係数が大きいほどテンプレート画像と一致度が高いことを表している。次に、相関係数をあらかじめ設定されたしきい値と比較し、しきい値以上の値を抽出すると、図13.5に示すように複数のテンプレート画像の候補を得ることができる。ここで、相関係数のしきい値を低く設定することにより、照度変化などにより、相関係数が低くなって抽出ミスが犯すことがなくなる。最後に、これらの候補になった領域において、式(5)、(6)、(7)に従って画素の位置を求める。式(5)は相関係数の総和であり、式(6)

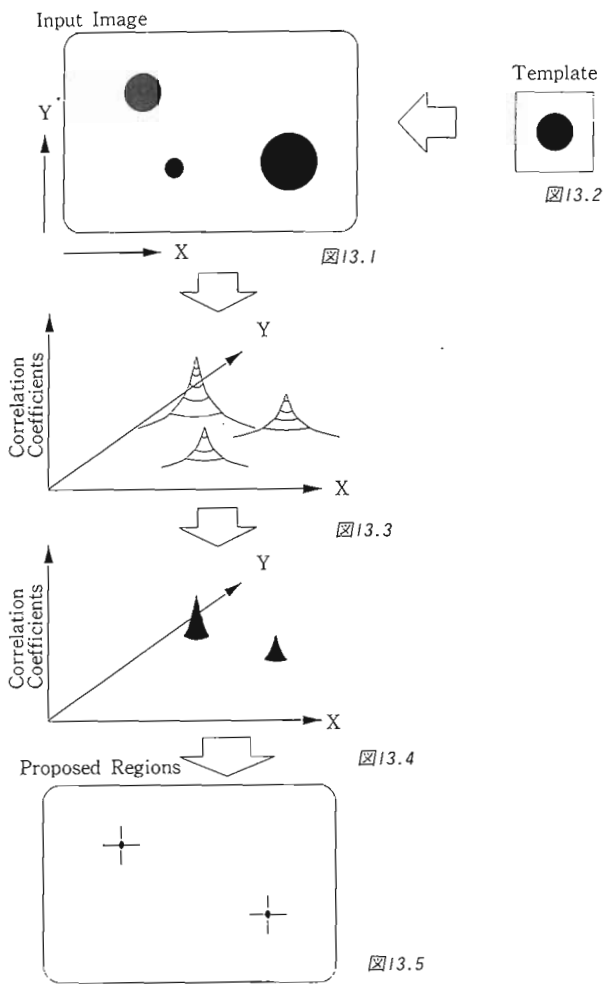


図13. テンプレートマッチング

(7) は相関係数の重心位置である。この重心を対象物の位置として利用する。

$$D(l) = \sum C_i(x,y) \tag{5}$$

$$X_c(l) = \frac{\sum \sum x \cdot C_i(x,y)}{D(l)} \tag{6}$$

$$Y_c(l) = \frac{\sum \sum y \cdot C_i(x,y)}{D(l)} \tag{7}$$

$C_i(x,y)$  : 相関係数

重心を用いることにより、雑音の影響を抑える効果とともに、サブピクセルでの計測精度を得ることができ、計測の信頼性を向上させることができる。

#### 4.4 FA・CIM化への対応

AR制御装置ではFA・CIM化に対応し、溶接機制御やシーケンサ機能の内蔵といった、周辺装置の一体化を行うとともに、ME-NET、M-NETなどに対応し、ネットワーク機能を強化した。特にME-NETに関しては、比較的高機能な通信を小形かつ安価に実現できるため、ロボット用ネットワークとしては最適であり、今後の普及が予想される。図14は、ME-NETの構成例である。

さらに、ME-NETのコンピュータリンクを用い、各種センサやホストコンピュータと接続した場合、算術演算や条件判断などの高度な使い方が、可能となるよう'92年度にJISに制定されたロボット言語SLIMを搭載した。

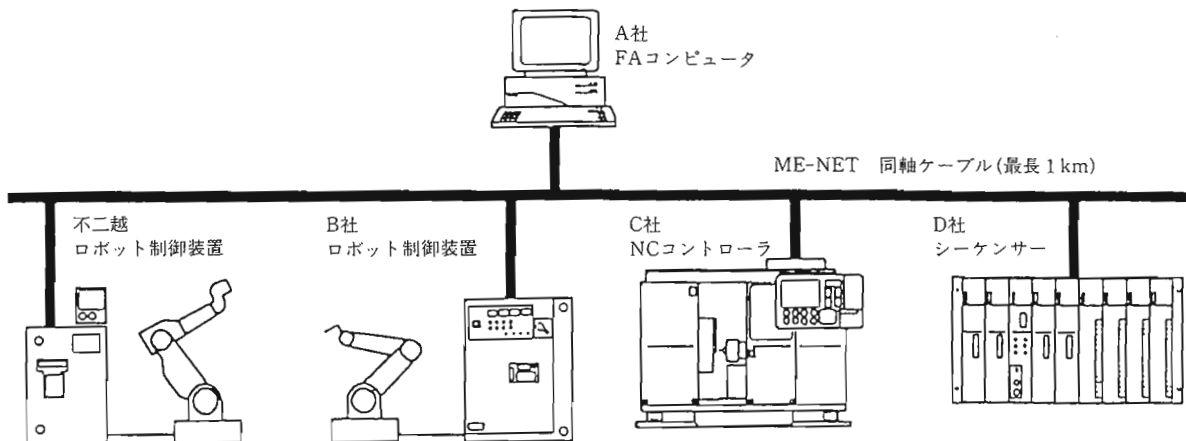


図14. ME-NET構成例



5.

おわりに

AR制御装置における、サーボ技術の開発により、高速・高精度化といった基本性能を飛躍的に向上させることができた。これらの基本性能はロボットの価値であり、たゆまず向上させることが重要である。また、”知能ロボット”という言葉は古臭いものになってしまったが、現状は、それほどロボットの知能化は進んでいない。組込形視覚センサNV-R1の開発により一歩”知能ロボット”に近づくことができた。操作性に関しては、キー操作を基本に改善を試みたが、パソコンがマルチメディアの代表となり、画期的に操作性がよくなったことに比較すると保守的な改善といわざるをえない。操作性に限らず、今後のロボットコントローラ開発においては、改革的な性能向上にチャレンジすることが最重要課題である。

文献

- (1) 蟹谷清他. ロボットの軌跡制御. 不二越技報. VOL.49, No.1, p.7-11 (1993).



桐谷裕司

1981年新潟大学(電子)卒, 同年, ㈱不二越に入社, 技術開発部電子技術部にて, 画像処理システムの開発, 1991年より, 技術開発部ロボット開発部にて, ロボットコントローラの開発に従事, 現在に至る。