

組立ロボットとその技術課題

Assembly Robot and Its Technological Problems

ファクトリーオートメーションを推進するためのフレキシブルな自動組立ラインの中核となるべき組立ロボットを開発した。このロボットは、可動範囲を広げるために新しいダブルリンク駆動方式を採用した6自由度関節形ロボットであり、実時間センサフィードバックに対応できる高機能制御装置により制御され、また、複雑な動作の教示を容易に行なうための動作記述形ロボット言語を備えている。

本論文では、この組立ロボットシステムの概要について述べるとともに、高度組立システムを実現するためになお今後の研究・開発が待たれる技術課題について述べる。

杉本浩一* *Kōichi Sugimoto*

磯部光庸* *Mitsunobu Isobe*

毛利峻治* *Shunji Mōri*

1 緒言

従来産業用ロボットは、塗装、スポット溶接、アーク溶接など半ば専用装置として利用されてきた。これらは熟練を要する作業であり、また悪環境下での困難な作業であるため、作業者の確保が難しく、産業用ロボットに対する投資の面での制約の少ないことが、これらの分野に産業用ロボットが活発に導入されている理由の一つである。また例えば、溶接用というように産業用ロボットを単一作業分野を対象として開発することは比較的容易であったことも理由として挙げられる。しかし、塗装・溶接作業は全作業に占める割合は小さく、ファクトリーオートメーションを推進するためには組立作業の自動化が強く望まれている。

ロボットによる組立作業の自動化の効果を専用自動機と比較して考えてみると、以下の点が考えられる。

- (1) 多品種生産に対応したフレキシブルな組立ラインの構成が可能である。
- (2) 汎用ロボットを導入することにより、自動化ライン開発工数の低減が図れる。
- (3) 組立ラインを同一の装置で構成することにより、群制御が可能となる。

しかし、組立作業は挿入、かしめ、ねじ締め、布線及び配線などの種々雑多な作業を含み、これらをロボットで自動化するとすれば、ロボットには高度な機能が要求される。例えば、上記(1)及び(2)の効果を得るためにはロボットだけでなく、コンベヤ、部品供給装置など周辺をも含めたシステムに汎用性が要求され、必然的に視覚、触覚、力感覚などのセンシング機能が必要となり、これらセンサからの情報を実時間でフィードバックする高度な制御が不可欠である。更に、(3)の効果を得るためには、このような高度な制御を統一的な制御システムの下で実現する必要がある。また、ロボットへの動作の教示のためのデータ構成、ロボット言語などの標準化が必要である。

本論文で述べる組立ロボットは、以上のような高度な組立システムを構成するための基本要素とすることを目的として開発したものである。ロボットのハードウェア及びソフトウェアは、共に汎用性を考慮して開発されたもので、特にソフトウェアはでき得るかぎりハードウェアとは独立させた標準的なシステムとするよう努力した。以下にこのロボットの詳細について述べるとともに、高度組立システムを実現するために

今後の研究・開発が待たれる技術課題について述べる。

2 ハードウェア構成

2.1 ロボット機構

3次元空間内で剛体を任意の位置に、任意の姿勢で位置決めするには6自由度のロボットを必要とする。したがって、汎用組立システムを構成するためのロボットには6自由度必要である。しかし、現状の組立ロボットシステムは汎用システムと呼ぶほどの機能はなく、このシステムの中では4ないし5自由度のロボットでも十分な場合が多い。そこで現時点での組立ロボットは、6自由度の構成は可能であるが、場合に応じ4、5自由度に変更できるモジュール構成をとることが望ましい。このような考えで開発したロボットの外観を図1に示す。このロボットは、腕の軽量化を図るために極力電動機をベース部に集中し、リンク及びチェーンによる動力伝達で腕及び手首を駆動している。

図2に前腕及び上腕を駆動する平行リンク機構を示す。通常の平行リンク機構には思案点(運動方向がいずれか定ま

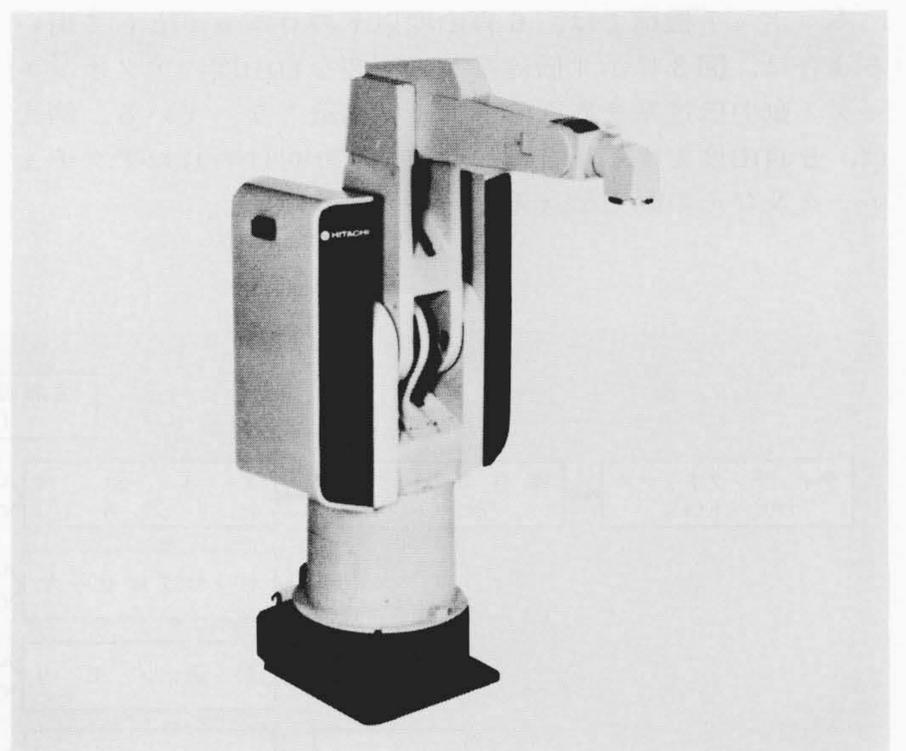


図1 組立ロボットの外観 — 各軸の駆動電動機をベース部に集中した軽量構造とした。

* 日立製作所生産技術研究所

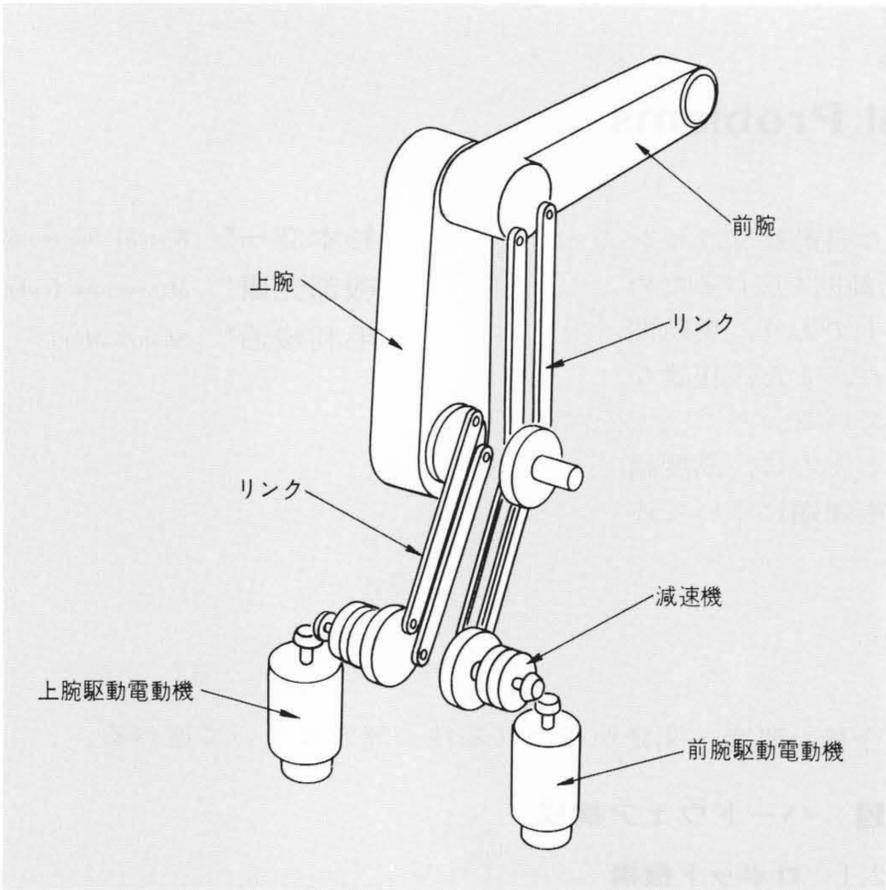


図2 腕駆動用リンク機構 ダブル平行リンク機構により、可動範囲を拡大した。

らない点)が存在し、大きな可動範囲をとることができない。そこで、ここでは90度の位相差を設けた2本の平行なリンクで入力節と出力節を結合したダブル平行リンク機構を採用し、思案点の通過を可能とし、腕の可動範囲を広げている。

図3に手首を含めた全体機構の動力伝達系を示す。手首は3自由度をもち、そのうち2自由度は、旋回台上の上腕支持部に取り付けられた電動機からチェーンにより動力伝達を行なっている。残りの1自由度は、前腕に取り付けられた電動機からシャフトにより動力伝達を行なっている。手首機構は傘歯車列により構成され、各々の歯車にはバックラッシ除去のための調整機構が取り付けられている。

本ロボット機構では、6自由度以下のロボットとして用いる場合は、図3に示す伝達系から不要な自由度のアクチュエータと動力伝達系を取り除けばよい構造となっている。例えば、5自由度とする場合は、前腕に取り付けられたアクチュエータ及びその動力伝達系をすべて取り除く。

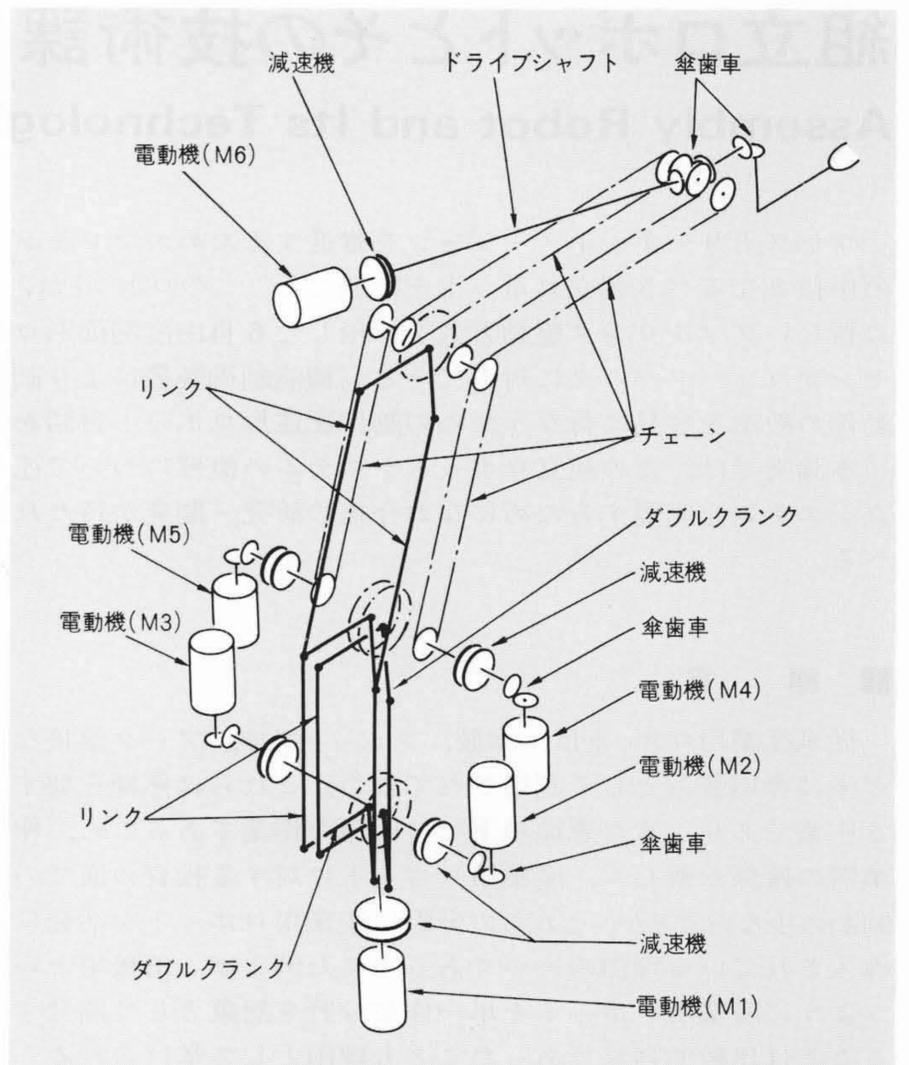


図3 腕、手首駆動系 3自由度腕機構と3自由度手首機構を組み合わせた6自由度機構駆動系である。

2.2 制御装置

組立作業には、部品の移載など比較的簡単で高速性を必要とする作業から、部品挿入のように精度を要する作業や、布線、配線処理など視触覚センサを利用してはじめて実現できるような高度な作業まで幅広いものがある。これら組立作業をロボットで行なわせるには、腕を高速高精度で制御するだけでは対応できず、視触覚センサの利用が必要となってくる。このため組立作業に向くロボット制御装置としては、ロボットの自由度や作業目的に応じて適切なプロセッサ構成をとることができ、更に複雑で多様なセンサ情報を処理するための専用プロセッサを付加できるようなマルチプロセッサ構成が適し、必要機能を階層的に分割することにより、将来の高

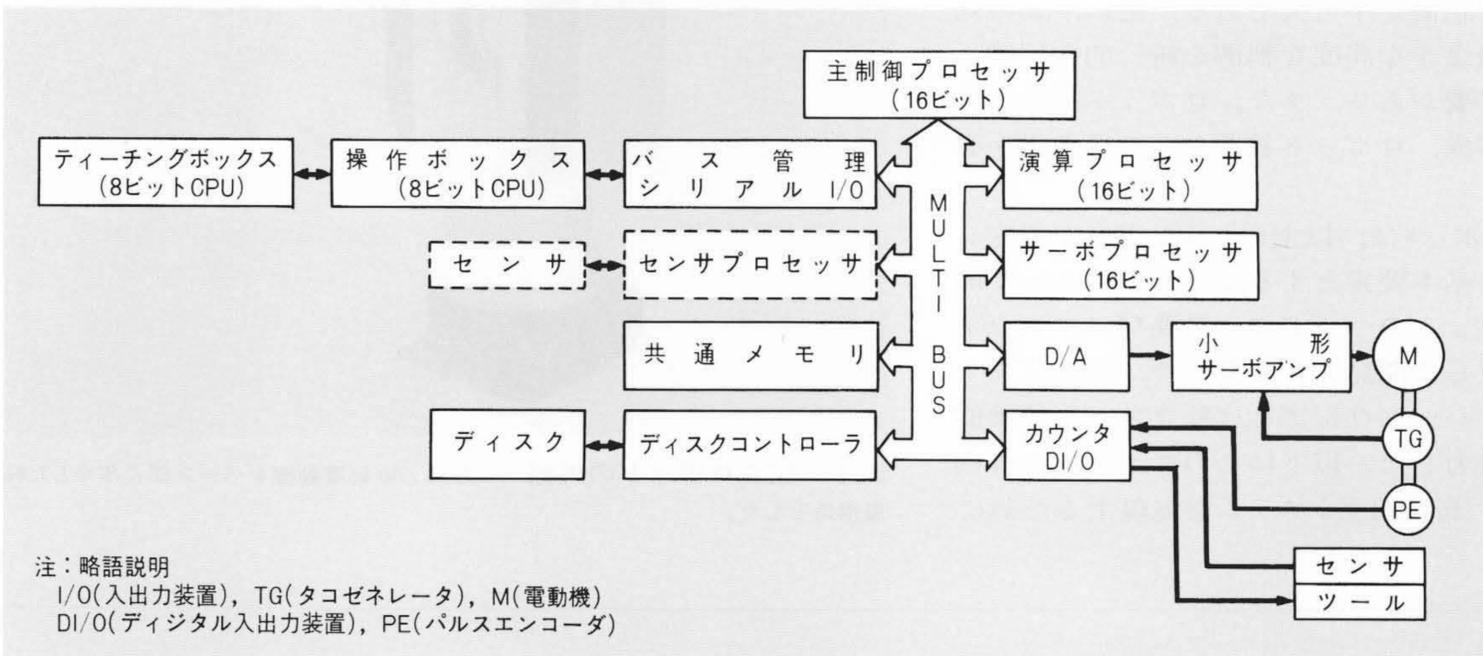


図4 制御装置の構成 標準バス接続によるマルチマイクロプロセッサ構成を基本としているので、センサ情報処理プロセッサなど容易に機能を付加できる。

注：略語説明
I/O(入出力装置), TG(タコセネレータ), M(電動機)
DI/O(デジタル入出力装置), PE(パルスエンコーダ)

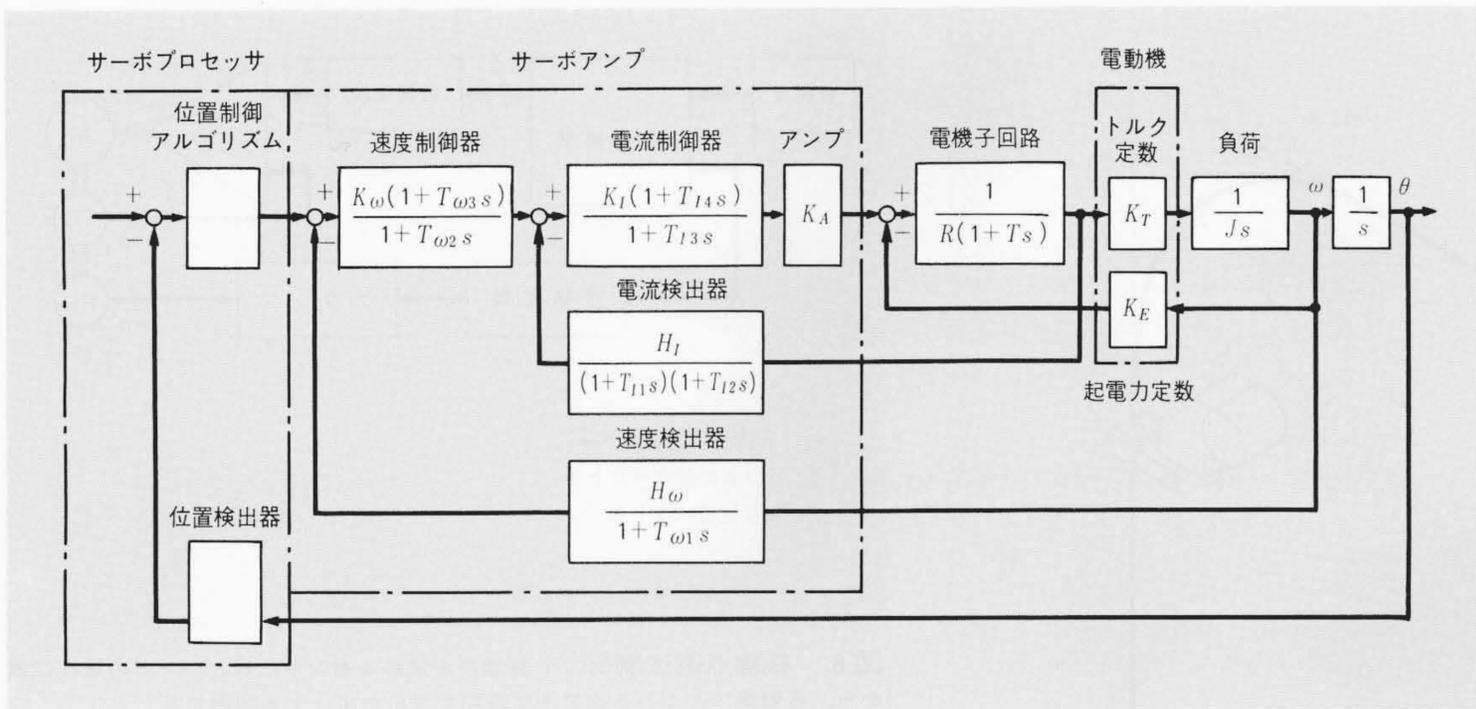


図5 サーボ系のブロック線図 位置制御ループをサーボプロセッサのソフトウェアで構成しているので、多モード制御が容易に実現できる。

機能化にもフレキシブルに対処できるようにすることが望ましい。このような考え方に基づいて試作した制御装置の構成を図4に示す。

この制御装置は、IEEE(米国電気電子学会)-796標準バス(通称マルチバス)に3個のプロセッサと共通メモリ、ロボット駆動回路などを結合した構成を基本としている。各プロセッサのタスク分担は、主制御プロセッサでシステムの全体管理、外部との通信制御とロボット言語及びティーチング処理、演算プロセッサで座標変換、サーボプロセッサでサーボ制御を行なう。それぞれのタスクは、マルチプロセッサ用簡易分散モニタ(プロセッサ相互間のタスクの起動、タスクの終了待ち機能を付加)の管理のもとで並列に処理される。プロセッサ間のデータ交換は、共通メモリを介して行なう。このようなタスク管理方式により、制御ソフトウェアの大幅な変更なしにプロセッサとプログラムの対応関係を自由に変更することが可能となり、センサ情報処理用プロセッサボードを追加するだけで、容易に機能アップが図れるようになった。

腕の高速動作制御の基本要素であるサーボアンプは、ロボットの自由度に応じてサーボ系の増減が容易にできるよう駆動電動機別にモジュール化してある。パワーアンプ部は、スイッチング素子としてMOS FET(Metal Oxide Semiconductor:電界効果トランジスタ)を使用したパルス幅変調方式を採用して、小形化を図っている。スイッチング周波数は、制御応答性を良くすることと、外付けの平滑リアクトルを省略する目的で、50kHzと従来よりも高くとっている。サーボ制御系の構成は、電動機駆動電流を制限するための電流制御系と速度帰還系をリード回路でもち、位置制御はサーボプロセッサで行なう、いわゆるソフトウェアサーボ方式をとっている。制御の補償要素としては、従来の進み遅れ補償を基本としている。図5は駆動電動機当たりのサーボ制御系の構成を示したものである。

3 制御方式

従来の産業用ロボットは、教示により与えられた複数個の点の間を補間することにより経路を創成し、この経路に沿ってハンドが移動するような制御を行なっている。この制御方式のブロック線図を図6に示す。まず教示により与えられた2点間を指定された速度に対応するように補間し、中間点を定める。この中間点が制御のサンプリング時の目標点となる。

ところで補間により経路を決定するには、ハンドの位置・姿勢を表わすデータは直交座標系で与える必要がある。ところが、ロボットの制御は各々の対偶(二つの剛体相互の運動を拘束する機構要素で、例えば関節のたぐい)の回転変位であるから、直交座標系で与えられた位置・姿勢データを対偶の変位に変換する座標変換を行なう必要がある。このようにして得られた対偶変位を目標点として、各々の対偶を駆動するアクチュエータの制御を行なう。この方式では1個の目標点を定めるために各々1回の補間、座標変換の演算が必要であり、この演算に要する時間がサンプリング時間の大部分を占める。なお補間方式としては通常直線補間を用いている。

直線補間を用いた場合、創成される経路は教示された点を頂点とする折線経路となる。この経路は各々の頂点で不連続となるため、ハンドを一定速度でこの頂点を通過させることができず、頂点近傍で加減速を行なう必要がある。組立作業に適用した場合、図7に示すように点Aでワークをつかみ、点Bまで持ち上げ、点Cまで搬送し、点Dで組み付ける動作が多い。このとき点B及びCでは、ハンドはこれらの点の近傍を通過するだけでよく、これらの点の近傍で加減速を行なうことは作業のサイクルタイムを長引かせる大きな要因となる。そこで本ロボットには、点B及びC近傍を放物線により連続化することにより、動作時間の短縮を行なう機能をもたせた¹⁾。

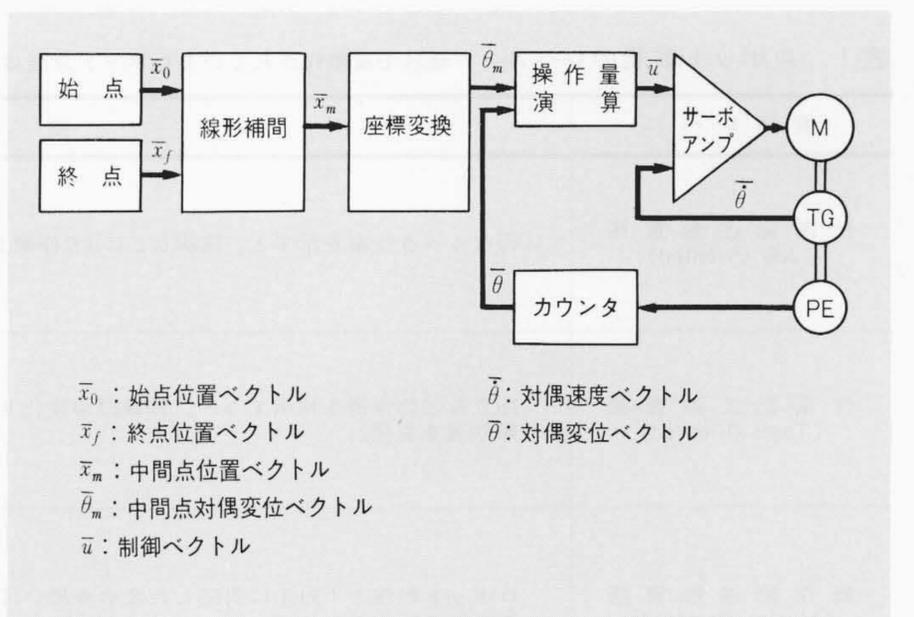


図6 軌道創成制御 始点と終点の間を中間点の点列で線形補間し、経路を決定する。

- \bar{x}_0 : 始点位置ベクトル
- \bar{x}_f : 終点位置ベクトル
- \bar{x}_m : 中間点位置ベクトル
- $\bar{\theta}_m$: 中間点对偶変位ベクトル
- \bar{u} : 制御ベクトル
- $\bar{\theta}$: 対偶速度ベクトル
- $\bar{\theta}$: 対偶変位ベクトル

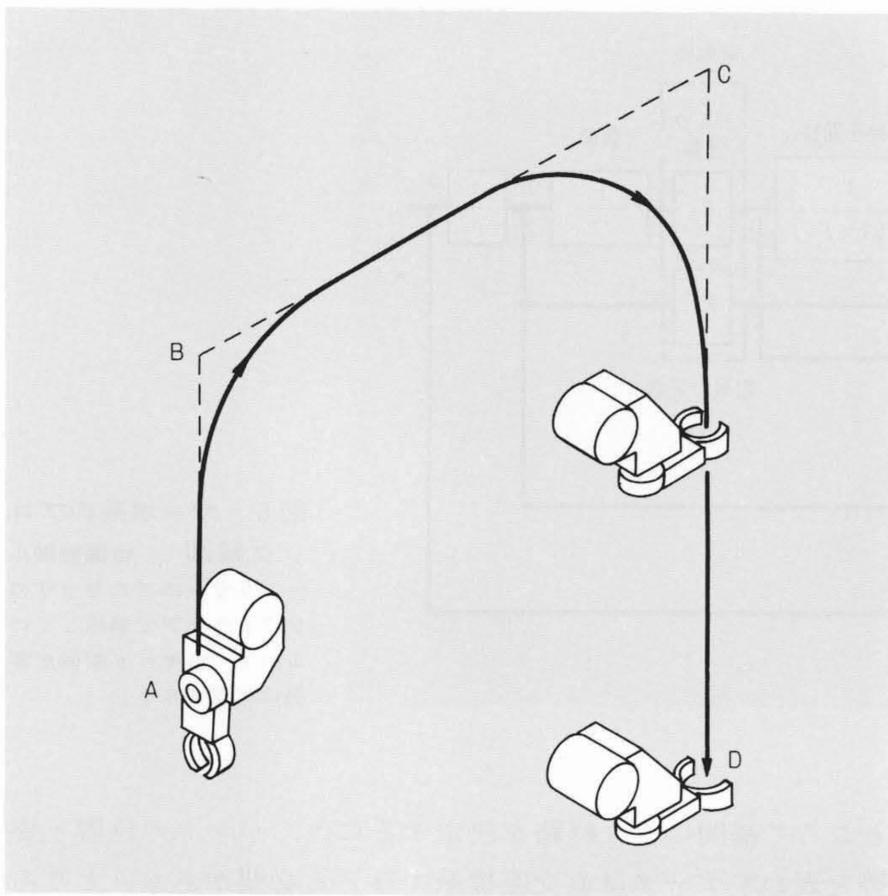


図7 経路円滑化補間 点B及び点C近傍で放物線経路となるよう滑らかに補間する。

ここで用いている方法は簡単な直線補間の演算だけで放物線を創成するものであり、ロボットの動作中の実時間で演算を行なうのに適している。

以上に述べた方式はロボットハンドの経路創成制御のためのものであるが、実時間センサフィードバックに対応する場合、この方式では不十分である。センサフィードバックによりロボットを制御する場合、センサ信号とハンドの現在位置の情報からハンドに必要な瞬間運動を決定し、この瞬間運動をロボットを構成する対偶の速度に変換する必要がある。このときの制御のブロック線図を図8に示す。同図は位置制御の例であり、目標点のデータは視覚センサから与えられ、ロボット動作中に変化することを認めている。このデータは直角座標系で与えられる。一方、ハンドの現在位置は対偶の変位から計算され、現在位置と目標位置とからハンドのとりべき速度を決定し、これを対偶の速度に変換し、ロボットを制御する。これらの計算をすべて実時間で行なうことによってだけ、

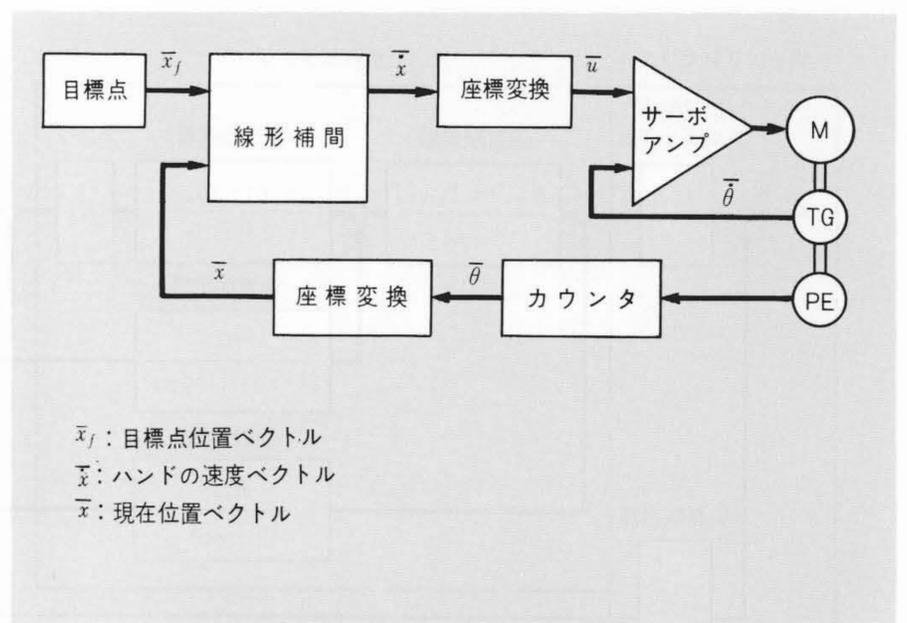


図8 目標点追従制御 目標点を決めるセンサ信号とハンドの現在位置から、各対偶のとりべき速度を実時間で求めロボットを制御する。

実時間センサフィードバックに対応できる。以上の計算の量は図6に示す経路創成制御に比べて大幅に増加しているが、前章の制御装置により24msのサンプリング時間で処理を行なっている。

以上のように本ロボットは、各種の制御モードにより駆動され、目的に応じてモードの切替えを行なっている。

4 ロボット言語

従来のロボットの教示方法は、動作の順序と位置情報を同時に教える方法であった。すなわち、ロボットを操作ボタンにより操作し所定の位置に移動させ、そのときの位置データを制御装置に記憶する。この操作を繰り返す、教示を行なうと、再生時にロボットはこの順序どおりに動作する。また周辺装置とのインターロック信号、ハンドの開閉などの情報も位置データとともに教示する。しかしこの方法では教示に時間を要し、また後の修正も困難な作業であった。そこで動作の順序及びインターロックなどの情報はロボット言語により教え、位置データだけを別途ロボットを操作して教える手法が一般的となりつつある。

ロボット言語は表1に示す三つのレベルに分けられる⁴⁾。命令がロボットの基本動作と1対1に対応した動作記述形言語、ロボットの機構や制御系から独立して、組立での作業を部品

表1 ロボット言語のレベル 現状で実用化されているロボット言語は、すべて動作言語である。

| 言語レベル | 特徴 | 実例 |
|------------------------------|--------------------------------------|--|
| 仕事記述形言語 (Job Oriented) | 行なうべき仕事を示すと、推論などにより作業を自動生成。 | AUTOPASS(IBM) PLACE INTERLOCK ON BRACKET SUCH THAT INTERLOCK. HOLE IS ALIGNED WITH BRACKET. HOLE AND INTERLOCK. BASE CONTACTS BRACKET. TOP |
| 作業記述形言語 (Task Oriented) | 組立などの作業を指示すると、作業環境変化を考慮して作業軌道を生成。 | AL(スタンフォード大学 AI Lab.) FRAME beam, beam-hole; beam←FRAME(ROT(Z, -90*DEG), VECTOR(10, 6, 0)); beam-hole←beam * TRANS(ROT(X, 90*DEG), VECTOR(3, 0, 7)); AFFIX beam-hole TO beam; |
| 動作記述形言語 (Motion Oriented) | ロボット動作と1対1に対応した命令を用いて、ロボットの手先の動きを記述。 | VAL(ユニメーション) OPEN APPRO PICK, 50 SPEED 30 MOVE PICK CLOSEI DEPART 70 |

をつかめ、放せといった命令で表現する作業記述形言語、更に、どのような仕事をするのかということを書き記述することにより、部品をつかむべき位置、置くべき場所をデータベースをもとに自動的に決定する仕事記述形言語である。このうち作業記述形言語以上のレベルは、人工知能研究グループを中心とする実験システムであり、産業用ロボットとしては現時点では動作記述形言語が主流である。

本ロボットシステムでの言語は、ロボットの腕の運動やハンドの動作の記述を行なう動作記述形言語であり、ARL (Assembly Robot Language) と呼ぶ。ARLではロボットの種類の制御モードの指定、周辺装置との同期・協調の指定、更に複雑な組立作業に不可欠なセンサフィードバック制御の指定が可能である。ARLの特徴をまとめると以下のとおりである。

(1) 連続点入力と各種補間方式の指定

二つの位置を指定し、この間を直線補間するといった方式に加え、点列情報を記述し、これらの点間を滑らかに補間することができる。従来数行にわたって記述されていた命令を1行で書くことができ、かつ円滑に補間することにより動作の高速化が図れる。

(2) 外部入出力名称の定義

外部入出力は制御装置のI/O (入出力装置) ポートを介して行なうが、このポートに名称づけをし、論理名称で入出力を行なうことを可能とした。

(3) アナログ情報処理

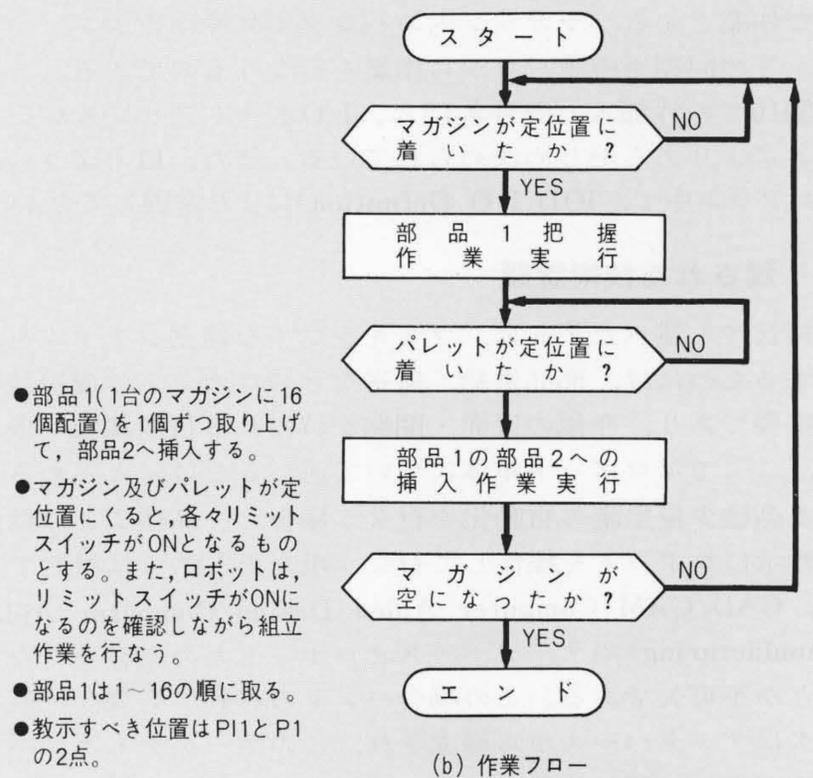
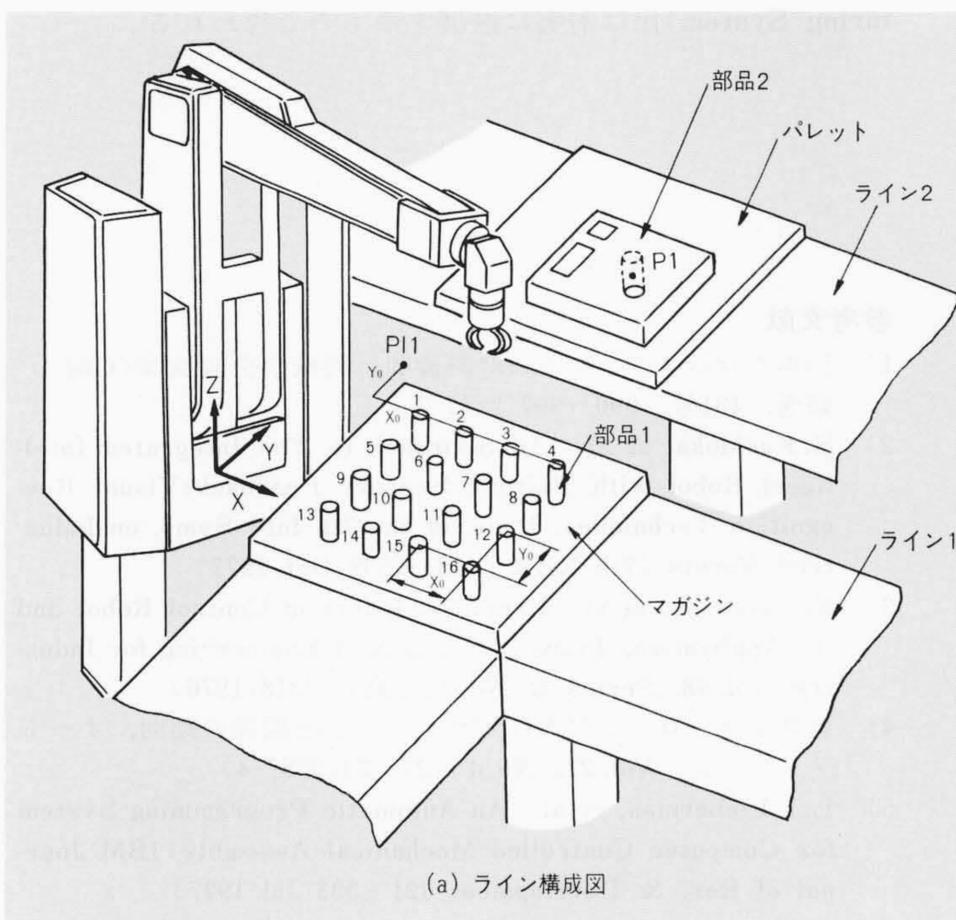
外部入出力としてON/OFF信号だけでなく、8ビットアナログ情報を取り扱い、これらの情報の四則、論理演算を可能とし、判定による分岐などで使用できるようにした。またセンサ情報で特殊な処理を必要とする場合は、その処理プログラムを容易に付加でき、またこの処理に対応した命令をユーザー拡張命令として定義が可能である。

(4) ティーチングボックスからの言語入力

ARLではユーザー拡張命令を除き、ティーチングボックスの

表2 プログラム文法概要 ARLの主要な文法を示す。ここで用いられる位置定数はティーチングを経由して実際の値が決定される。

| 分類 | 命令 | 形式 | |
|------------|----------|--|--|
| 動作命令 | 動作 | MOVE 補間方式, {[中間点,]...[中間点,]目標点}[,オプション] | |
| | 軸単位動作 | DRIV 軸No. {/絶対角度/ /相対角度/} | |
| ハンド命令 | ハンド交換 | CHG ハンドNo. | |
| | ハンド定義 | HAND ハンドNo.[,パラメータ] | |
| プログラムフロー制御 | 単純繰返し | FOR {変数} = {変数} / {定数} END | |
| | 条件判断 | IF {変数} / {I/O変数} {比較演算子} / {論理演算子} {変数} / {I/O変数} / {定数} THEN~ ELSE~ | |
| | 条件判断繰返し | WHILE {変数} / {I/O変数} {比較演算子} / {論理演算子} {変数} / {I/O変数} / {定数} END | |
| | 単純分岐 | GOTO ラベル | |
| | 条件待ち | WAIT I/O変数 {比較演算子} / {論理演算子} {変数} / {I/O変数} / {定数} | |
| | サブルーチン分岐 | CALL ルーチン名 [(パラメータ [, パラメータ, ...])] | |
| | 停止・リターン | STOP/RETURN | |
| | 時間待ち | DELAY {変数} / {定数} | |
| | その他 | 代入 | {変数} / {I/O変数} = {変数} / {I/O変数} / {定数} {算術演算子} / {論理演算子} {変数} / {I/O変数} / {定数} |
| | | 位置定義 | 位置変数 = {位置変数} / {位置定数} + (DX, DY, DZ) (ある点からX, Y, Zにある値だけ離れた点の定義) |



- 部品1 (1台のマガジンに16個配置) を1個ずつ取り上げて、部品2へ挿入する。
- マガジン及びパレットが定位置にくると、各々リミットスイッチがONとなるものとする。また、ロボットは、リミットスイッチがONになるのを確認しながら組立作業を行なう。
- 部品1は1~16の順に取る。
- 教示すべき位置はP11とP1の2点。

(b) 作業フロー

図9 組立作業例 パレタイジングを含む作業例を示す。

```

JOB EX1
IOD I1(OA00H)          —— I/Oポートアドレス
SPEED 500              —— 速度のデフォルト値注)
WAIT I1=1              —— リミットスイッチI1が1になるまで
PT=PI1                 待つ

FOR J=1,4
PT=PT +(0,-y0,0)      —— 次の列の第1番目の部品位置

FOR J=1,4
PT=PT +(x0,0,0)      —— 次の部品位置

MOVE A,PT +(0,0,20),S=800
MOVE I,PT
HAND I,0
MOVE I,* +(0,0,20)     } 部品1把持作業
                        *は現在位置を示す

WAIT I2=1              —— リミットスイッチI2が1になるまで
                        待つ

MOVE A,P1 +(0,0,20),S=800
MOVE I,P1
HAND I,1
MOVE I,* +(0,0,20)     } 部品2の挿入作業

END

PT=PT +(-4x0,0,0)    —— 次の列の第1番目の部品位置
END

JEND

注) デフォルト値[オプションとして指示されなかった場合に与えられる値]
(本例で、速度指定のないMOVEの速度は500mm/sとなる。)

```

図10 プログラム例 ARLによるパレタイジング、インターロックのプログラム例を示す。

キー操作だけで入力することが可能である。また修正、教示、実行もティーチングボックスだけで行なうことができ、作業効率の向上が図れる。

表2にARLのプログラム文法の概要を示す。同表のほかに変数の各種演算を記述することができ、複雑な条件判定による作業の切替えが可能である。

ARLによるプログラム例を次に示す。組立作業としては図9に示すように、ライン1上にあるマガジン内に配置された部品1を、ライン2上のパレット内の部品2のP1に挿入するような作業とする。マガジン内のパレタイズやマガジン、パレットとの同期を確認しながら作業を行なうものである。

図10での外部入力信号名I2は、I/Oポートアドレスがシステムによりあらかじめ決められている。また、I1のように、プログラム中で、IOD(I/O Definition)により定義してもよい。

5 残された技術課題

緒言でも述べたように、フレキシブルな組立システムを構成するためには、部品供給、搬送などのロボットの周辺技術が重要であり、今後の研究・開発が待たれる技術課題が多いが、ここではロボット本体について述べるだけにとどめる。

多品種少量生産の自動化を行なう場合、一品種ごとの動作の教示にロボットを操作して行なう現在の方法では対処できず、CAD/CAM(Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing)のデータベースとロボットとの結合を行なうことが不可欠である。この場合ハンドの移動に必要な位置データはデータベースから創成され、このデータをもとにハンドを所定の位置に位置決めするには、ロボットに対して絶対位置決め精度が要求される。しかし、ロボット機構は多くの対偶が複雑に組み合わされたものであり、多くの誤差要因が存在し、現時点では十分な精度を保証できない。これを解決す

るためにはロボットの機構誤差の補償を行なうとともに、センサを利用した位置誤差補償が必要となるであろう。現在研究的に行なわれている作業記述形言語の実用化、ロボットの群制御などはこの誤差補償の技術があってはじめて実現されるものである。

また、ロボット制御での重要な技術課題は、実時間センサフィードバック制御であろう。手先に取り付けられた力センサの情報をフィードバックしてはめ合い作業を行なうこと、また、手先に取り付けられた視覚を用いて上記の位置補償を実時間フィードバックで行なうことなど技術的には実現の目途はついているが^{2),3)}、これらをいかに汎用ロボットシステムに組み込むかが重要である。ある一種の作業に専用的に用いるのなら、実時間センサフィードバックは既に実現可能であるが、これを軌道創成制御のような通常のロボット制御とうまく結合させ、かつロボット言語に組み込み、汎用的に利用できるようにすることがシステムに汎用性をもたせるために必要である。また、実時間センサフィードバックにはデータの座標変換が必要であり、特に手先センサを用いた場合は必要な座標変換の回数が多い。この座標変換に要する演算時間が制御のサンプリング時間となるため、制御装置の演算機能の高速化を図らねばならない。

6 結 言

日立製作所で開発した以下の特長をもつ組立ロボットを紹介することにより、ファクトリーオートメーションの基本要素として、組立ロボットに要求される機能について説明した。(1)可動範囲が広く軽量で4～5自由度への削減も可能なモジュール構成6自由度機構。(2)センサ制御への対応も可能な拡張性をもつ制御装置。(3)滑らかな経路補間、目標点追従を可能とする制御方式。(4)教示が容易で種々の制御モード指示可能なロボット言語。

今後ロボットの機能向上に加えて、エレクトロニクスを中心とした技術革新による価格低減、信頼性向上が見込まれる一方、生産技術者、製品設計者の協力による導入条件の改善が行なわれることにより、組立工程のFMS(Flexible Manufacturing System)化は着実に進展するものと思われる。

参考文献

- 1) 杉本：ロボットハンドの経路補間，機械学会論文集(C編)，48巻，431号，990～997(昭57-7)
- 2) S. Kashioka, et al. : An Approach to The Integrated Intelligent Robot with Multiple Sensory Feedback: Visual Recognition Techniques, Proc. of the 7th Int'l Symp. on Industrial Robots (7th ISIR), 531～538(Oct. 1977)
- 3) K. Takeyasu, et al. : Precision Insertion Control Robot and Its Application, Trans. ASME, J. of Engineering for Industry, Vol. 98, Series B. No. 4, 1313～1318(1976)
- 4) 新井：ヨーロッパにおけるロボット言語開発の動向，オートメーション，Vol. 27, No. 4, 27～31(昭57-4)
- 5) L. I. Lieberman, et al. : An Automatic Programming System for Computer Controlled Mechanical Assembly: IBM Journal of Res. & Development 321～333(Jul. 1977)
- 6) S. Mujtaba, et al. : AL User's Manual : Stanford AI Lab. Memo, AIM 323(1979)