

組立FA用ロボット基礎技術の開発

Development of Robot Technology for Assembly in Factory Automation

単純なプレイバック機能をもつロボットによる機械系部品の部分組立の自動化は着実に進展しているが、今後は最終組立などのより複雑な作業へのロボット利用が必要である。このための要素技術としては、環境に適應するためのセンサ制御技術と、複雑な動作を教示するプログラミング技術が特に重要である。センサ制御を標準とした汎用ロボット制御方式を基礎に、仮想コンプライアンスを導入した力覚制御を実現し、精密組付けなどに必要な複雑な専用手先機構を不要にした。また、3次元視覚付ロボットにより、空間的に位置不定なコネクタなどの組付けが可能となった。ロボットを中心とした組立セルの制御を記述する言語FA-BASICを開発し、これを基にして更に図形を用いた組立作業教示システムを開発した。

武田健二* Kenji Takeda
 杉本浩一* Kōichi Sugimoto
 毛利峻治* Shunji Mōri
 高橋道郎* Michio Takahashi

1 緒言

1980年代に入ってから、盛んにFA(Factory Automation)という言葉が用いられ、従来の繰返し形の単純な自動化から、多品種生産が可能で変化に対する適應力の高い自動化への飛躍が追求されている。特に、電機産業や自動車産業などの組立産業では、組立ての自動化が最大の課題の一つで、最終組立に近いほど実現が困難である。そして、ロボットが解決の先導役として大いに期待されている。

NC(数値制御)データを与えれば、機械自身の座標系を中心に、所要の精度で形状を創成するNC工作機械と異なり、組立ては対象部品が複数で、その形状や精度に応じた多様な作業が要求されるため、データをあらかじめ与えるだけでの自動作業が困難である。現在は、パレット、治工具、部品供給装置などによって各対象部品を位置決めし、実際にロボットを動かして教示し再生する単純なプレイバック方式が主流で、應用範囲も機械系部品の部分組立などに限られている。そこで、より複雑で高精度な組立や多品種の組立を行なうためには、周辺機器の精度を上げるよりもロボットの感覚による適應機能が必要であり、複雑な作業を記述できる言語による指示のほうがプレイバックよりも有効である。

このような背景から、ここでは多様な組立作業を自動化することを目的に開発したロボットの力覚や視覚によるセンサ制御技術と、言語や図形を用いたプログラミング技術について述べる。

2 センサ制御技術

2.1 汎用センサフィードバック制御

組立ロボットの標準感覚として力覚や視覚を装備できるように、各種のセンサと異なる機構のロボットの組合せに対しても対応可能な汎用センサフィードバック制御の方式を開発した。図1に、ロボット制御ソフトウェアの体系を示す。

ロボット制御装置の基本部分である動作制御に関して、ロボットの機構と制御アルゴリズムとは、座標変換を介して分離され、制御アルゴリズム内で用いるパラメータは、機構形状とは無関係な直交座標系を基礎としている。制御アルゴリズムは複数の標準化されたサブルーチン群から成り、言語か

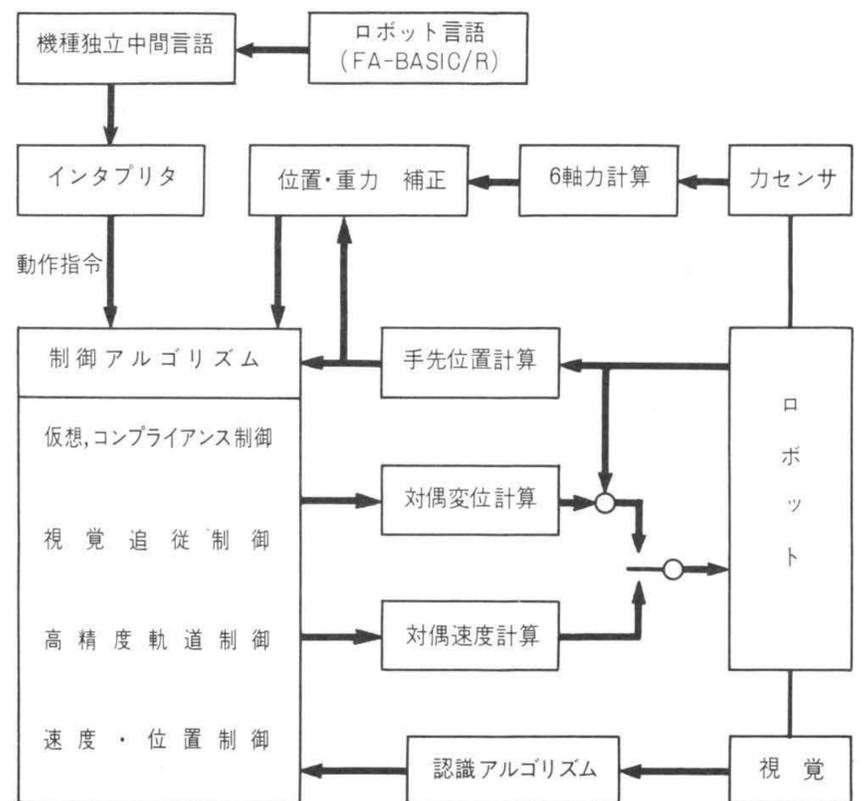


図1 ロボット制御ソフトウェアの体系 手先位置、対偶変化・速度計算の座標変換ルーチンにより、ロボット機構と制御アルゴリズムを分離したソフトウェア体系を実現した。

らの指令により、これらを組み合わせて軌道制御や視覚・力覚を用いたセンサフィードバック制御を構成することができる。また各制御アルゴリズムは、パラメータを言語を介して設定することにより、種々の条件に適した制御が実現できる。

2.2 仮想コンプライアンス制御

はめ合いをはじめとして、組付作業は常に対象物との接触によって外力が変化し、これを検知して制御する必要が生じるので、センサフィードバック制御のうちでも、力フィードバック制御が重要な役割を担っている。力フィードバック制御とは、ロボットのハンド部に加わった外力を検出し、ハンド部の運動を決定する制御である。ロボットのハンド部の運

* 日立製作所生産技術研究所

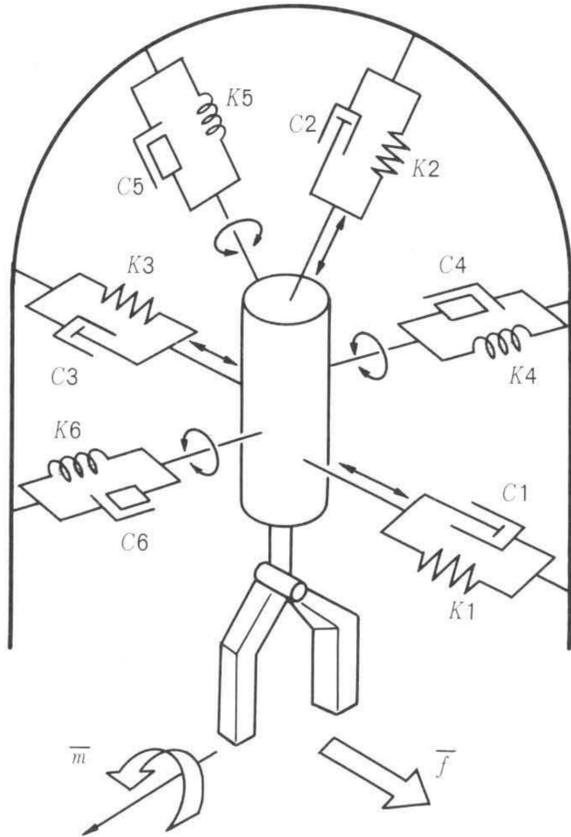


図2 仮想コンプライアンス制御の概念 ロボットのハンド部を6自由度のばね機構で支持された剛体と考え、ばね定数K, 粘性抵抗Cをソフトウェアで自在に設定して、用途に応じた機構特性を実現できる。

動を3次元空間内の6自由度のばね機構で支持された剛体と考え(図2), その運動方程式を次式のように表わす。

$$M \frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} + C \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{f} - K(\vec{x} - \vec{x}_0) \dots\dots\dots(1)$$

- ここに M: 剛体の質量
- C: 粘性抵抗
- K: ばね定数(6×6行列)
- \vec{f} : 剛体に作用する力・モーメント(6次元ベクトル)
- \vec{x} : 剛体の位置・姿勢(6次元ベクトル)
- \vec{x}_0 : 剛体のばね機構によるつり合い位置・姿勢

これまでM, C, Kはハードウェアの構成によって決められるとして、作業内容に応じた適切な機構やハンド部の設計に大きな開発努力を払ってきた。しかし、ハードウェアで実現する方法は、異なる作業に対応できる自在性を失うことになる。そこで(1)式を変形して、

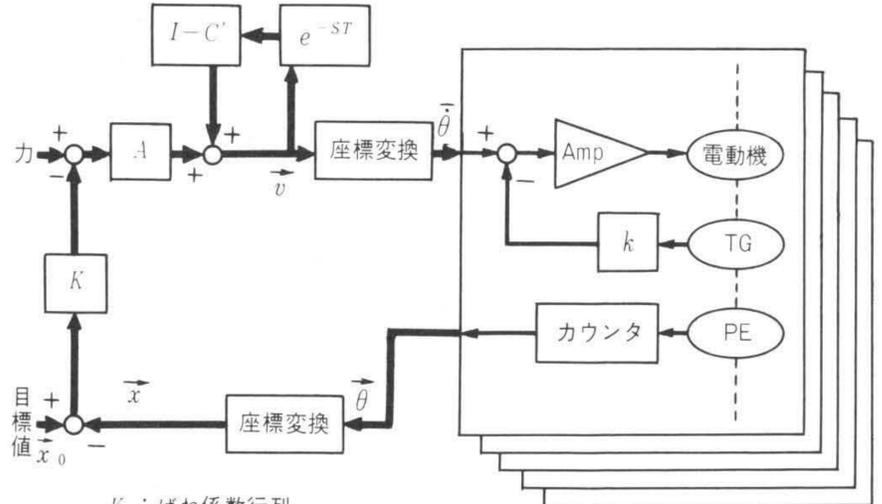
$$\frac{d\vec{x}}{dt} = M^{-1} \int \left\{ \vec{f} - K(\vec{x} - \vec{x}_0) - C \frac{d\vec{x}}{dt} \right\} dt \dots\dots\dots(2)$$

とし、外力 \vec{f} をロボットの手先に取り付けた力センサで検出し、行列M, C, Kの値を作業に応じて適切に設定できるソフトウェアサーボ方式を開発した。(2)式を離散値形の制御で実現する場合には、n回目のサンプリング時のハンド部のとるべき速度指令は、次式で表わされる。

$$\vec{v}_n = TM^{-1} \left\{ \vec{f}_{n-1} - K(x_{n-1} - x_0) \right\} + (I - TM^{-1}C) \vec{v}_{n-1} \dots\dots\dots(3)$$

- ここに T: サンプリング時間
- I: 単位行列

図3はこれを実現する制御ブロック図である。電動機に取り付けられた検出器から電動機回転角を求め、ハンドの位置を計算する。この結果と目標位置の差にばね定数を掛け、これと力センサによる力検出結果を用いてロボットを制御す



K: ばね係数行列
A: 力・速度変換行列
I-C': 遅れ係数行列
 $C' = TM^{-1}C, A = TM^{-1}$

注: 略語説明
TG(タコセネレータ)
PE(パルスエンコーダ)

図3 仮想コンプライアンス制御のブロック図 行列M, C, Kの値を設定することにより、任意のコンプライアンス機構をロボットの制御により実現する。

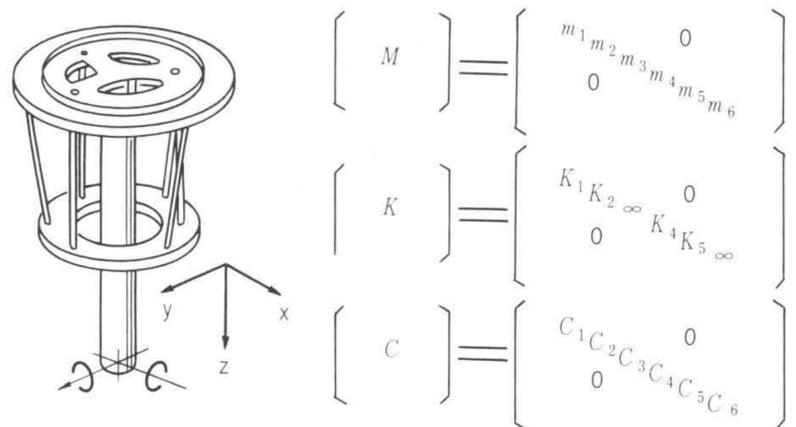


図4 RCC(Remote Center Compliance)機構 仮想コンプライアンス制御で、ばね定数行列Kを対角行列とし、要素 k_{33}, k_{66} を無限大に設定するとRCCが実現できる。

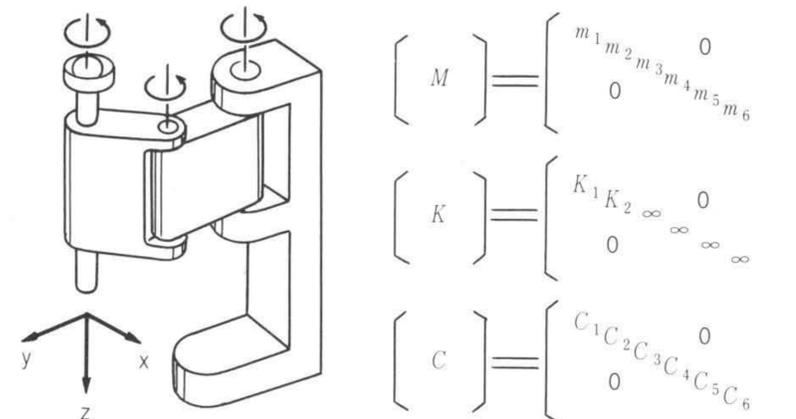


図5 SCARA(Selective Compliance Assembly Robot Arm)機構 RCCと同じくKを対角行列とし、 $k_{33}, k_{44}, k_{55}, k_{66}$ を無限大とすると、SCARAを実現できる。

る。以上の方式により、用途に応じた機構を制御装置のソフトウェアによって仮想的に構成できることから、仮想コンプライアンス制御と名付けた。

従来の自動組立基礎研究の多くが、特にはめ合いに関して適度なコンプライアンスをもたせることが有効であることを示している。図4, 5に示すように実際のはめ合いに有効な機構の代表例として、RCC(Remote Center Compliance)¹⁾や、SCARA(Selective Compliance Assembly Robot Arm)²⁾

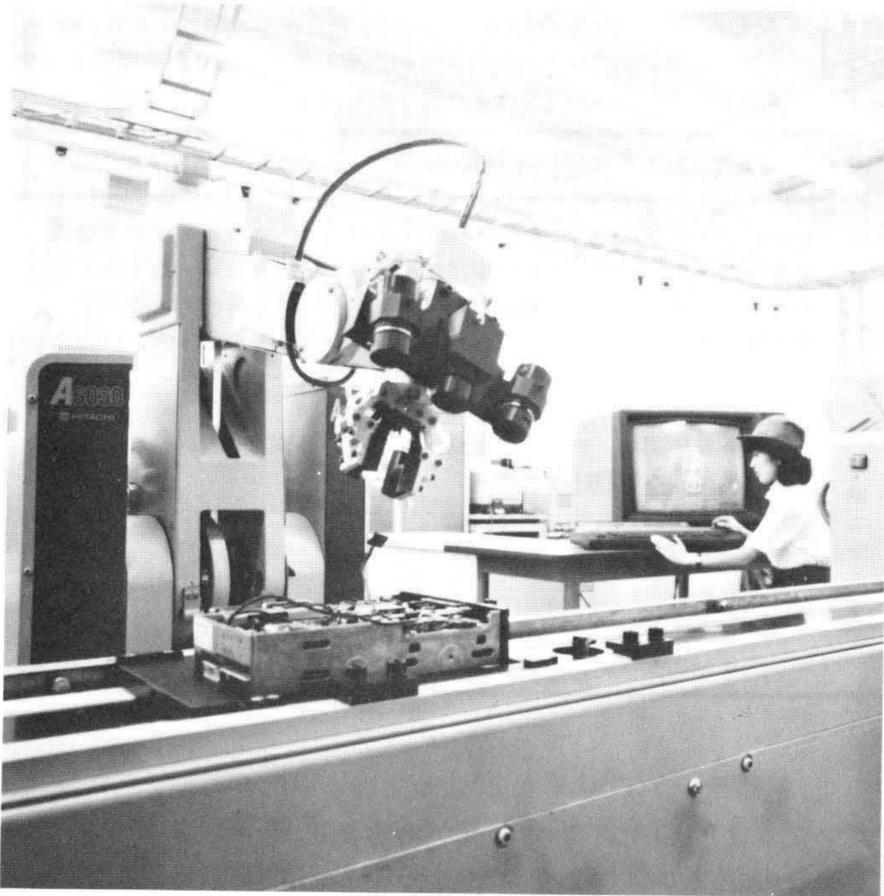


図6 3次元視覚付ロボット 総組立や配線など、空間的な位置の不定な部品を扱う3次元視覚付ロボットを示す。

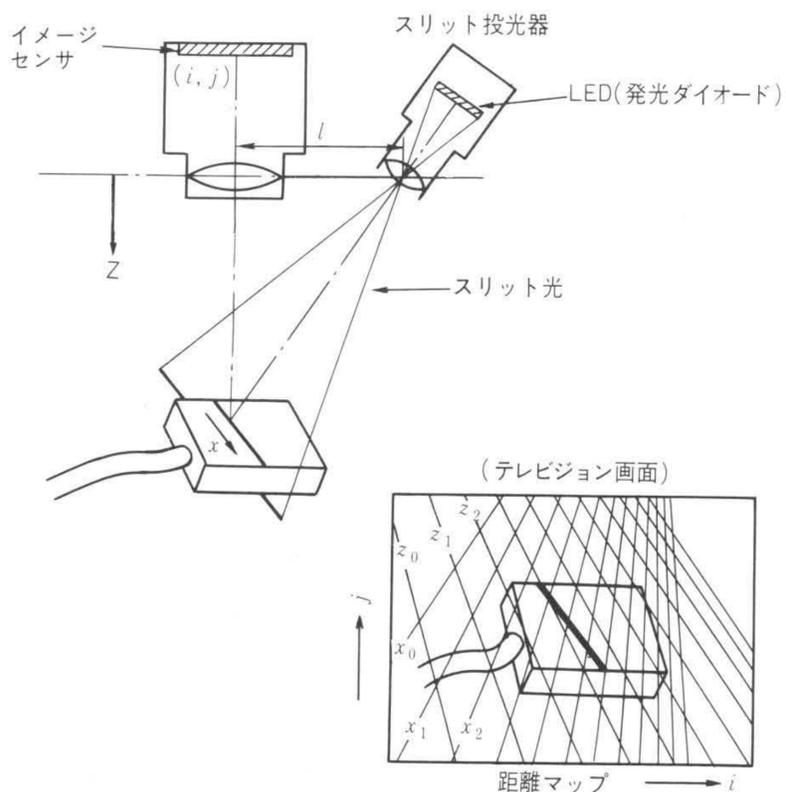


図7 3次元視覚の原理 斜め十字のスリット光を宙づり状態のコネクタに投射し、その像をテレビジョンカメラで検出し、あらかじめ作成しておいた距離マップと照合することにより、コネクタの3次元的位置、姿勢を算出する。

がある。仮想コンプライアンス制御を用いた場合、RCCを実現するには K を対角行列とし、対角要素のうちはめ合い方向の並進及び回転に対応する要素 k_{33} 、 k_{66} を無限大とし、残りを適当な値に設定すればよい。またSCARAを実現するには、対角行列 K の上下方向の並進とすべての回転に対応する要素 k_{33} 、 k_{44} 、 k_{55} 、 k_{66} を無限大とし、残りを適当な値に設定すればよい。

2.3 3次元視覚フィードバック制御

力覚と並んで今後のロボットの標準感覚として必要となる

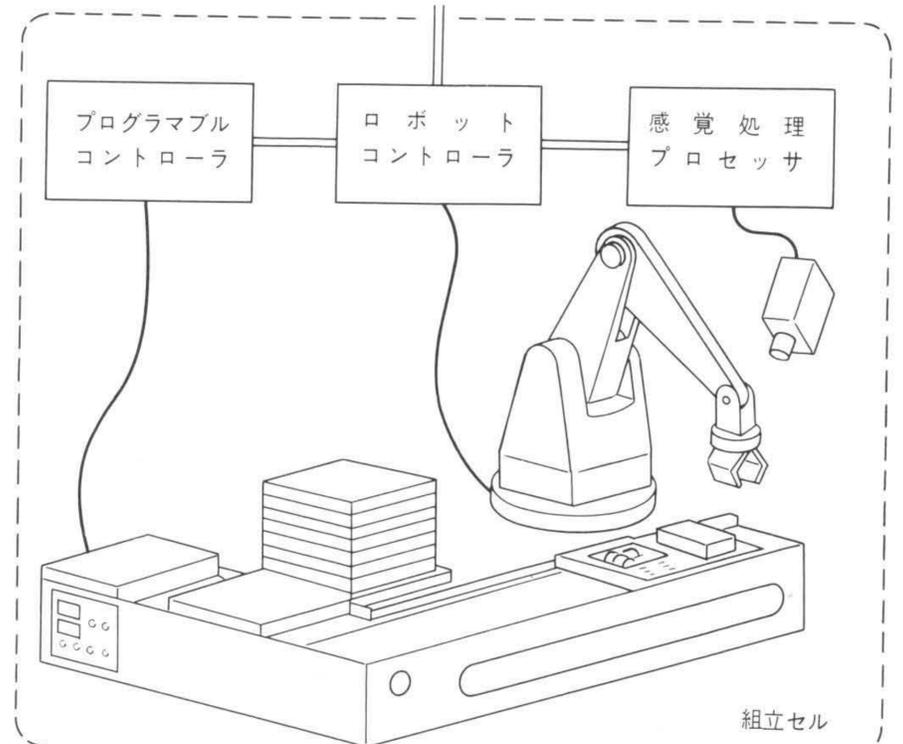


図8 組立セルの基本要素 多品種対応の組立セルは、ロボット、センサ(画像処理装置)、プログラマブルコントローラが基本要素である。

のが視覚である。多品種生産での自動組立を実現するためには、部品の認識、位置・姿勢の計測、外観の検査と様々な要求に対して適用できる視覚の開発が進められている³⁾。

これまでロボット用、FA用視覚として実用化されたもののほとんどは、平面画像の処理である。しかし、電子機器のきょう体内の最終配線や、電動機の端線処理などに代表されるように、自動組立の困難な課題として残されているものに、空間的に不定で宙づり状態の部品の扱いがあり、その場合には、3次元的な部品の認識が必要となる。図6に、そのような作業に用いるために開発した3次元視覚付ロボットを示す。図7は3次元視覚センサとして開発した斜め十字スリット光を用いたレンジファインダと宙づり状態のコネクタの姿勢認識の原理を示したものである。斜め十字のスリット光をテレビジョンカメラで検出し抽出した光切断線を、あらかじめ作成しておいた距離マップと照合することにより、コネクタの3次元的位置・姿勢を算出する。その情報をもとに、ロボットが対応した姿勢をとり、コネクタを正しくつかむことができる。開発した検出ヘッドは重量500gで、テレビジョンカメラによる平面画像の処理も組み合わせる行なうことができる。また、認識した形状をもとに軌道を創成することもできるので、端線を適当に巻き付けるとか、溝に沿ってはわせるなどの応用動作も可能である。

3次元画像処理では、高速処理が必要とされ、30Mipsの処理性能をもつFA用高速画像処理装置PPI-II⁴⁾を用いている。

3 ロボットプログラミング技術

3.1 セル制御用統合言語

これからの多品種組立の自動化システムを考えると、基本要素としての図8に示すような、ロボット、センサ(特に画像処理装置)、周辺機器の同期制御を行なうプログラマブルコントローラにより構成される。この各々の要素は、いずれもマイクロプロセッサを中心に構成されており、あらかじめプログラムすることで、多様な動作を実現できるという自在性をもっており、ロボット言語などのプログラム用の言語の開発も進められている⁵⁾。しかし、これらの基本要素をセルとして結合し動作させるためには、次の問題点がある。

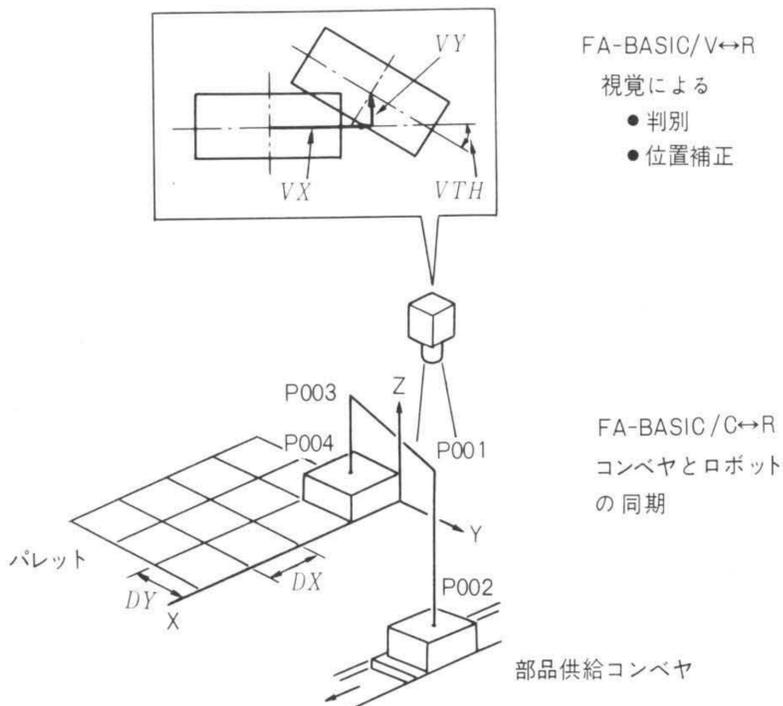


図9 FA-BASICの応用例 FA-BASICにより、ロボットと視覚センサの同期・協調運転を容易に記述できる。

- (1) ユーザーにとってプログラム作成工数が大きい。
- (2) 設備ごとに異なる言語を用いると習得・保守が困難である。
- (3) 設備間のインタフェースが不統一で、専用のハードウェアとソフトウェアをシステムごとに開発する必要がある。

そこで、これを抜本的に解決するために、セル制御用統一言語FA-BASICを開発した。そのねらいは次のとおりである。

- (1) ロボット、画像処理、プログラマブルコントローラが同一の言語で記述できる。
- (2) 強力な問題向き命令語を備えて、プログラム作成工数・期間を大幅に削減する。
- (3) 統一インタフェースによる通信機能により、高機能のセルを容易に構成できる。

表1に、FA-BASICの全体構成を示す。コマンドには共通

表1 FA-BASICの構成 FA-BASICは、組立セルを構成するロボット、センサ、プログラマブルコントローラのための統一言語であり、問題向きコマンドと共通コマンドから成っている。

| | FA-BASIC/R | FA-BASIC/V | FA-BASIC/C |
|----------|---|--|--|
| 問題向きコマンド | <ul style="list-style-type: none"> ● ロボット動作記述 ● センサ入出力記述 ● 座標系定義 ● 位置演算 | <ul style="list-style-type: none"> ● 線分化画像処理 ● 特徴抽出関数 ● 図形処理演算 ● パターンマッチング | <ul style="list-style-type: none"> ● マルチタスク管理 ● リレー形・ステップ形制御記述向き ● 割込制御 |
| 共通コマンド | 【共通拡張部】 | | |
| | <ul style="list-style-type: none"> ● 各種変数, データ交信文, グローバル変数 ● 信号入出力, 条件制御 | | |
| | 【基本BASIC】 | | |
| | <ul style="list-style-type: none"> ● 整数 ● 演算子 (+, -, *, /, ^, AND, OR, NOT, ……) ● 制御文 (IF, FOR-NEXT, GOTO, STOP) | | |

コマンドと問題向けコマンドがある。共通コマンドは、どのような応用プログラムを記述する際にも共通に必要な演算子や制御文で、基本BASICの形式である。問題向きコマンドは、ロボット動作記述、画像処理基本演算といったセル開発者が高度なコンピュータ知識なしで、自在に各装置の動きをプログラムできるようにするためのコマンドである。問題向きコマンド群はそれぞれ機能に応じて次の3種類に分類できる。

- (1) FA-BASIC/R：ロボット動作の記述
- (2) FA-BASIC/V：画像処理アルゴリズムの記述
- (3) FA-BASIC/C：シーケンスコントロールプログラムの記述

計算機内の情報処理だけを対象とした一般の高級言語と異なり、計算処理結果に基づき、ロボットや画像処理のハードウェアを動作させるということから、FA-BASICは、ハードウェアの動作をチェックしながらの修正が容易なように、部分実行、部分修正が可能な処理方式としてある。更に対象とする機器類も低機能から高機能までを網羅できるようにコマ

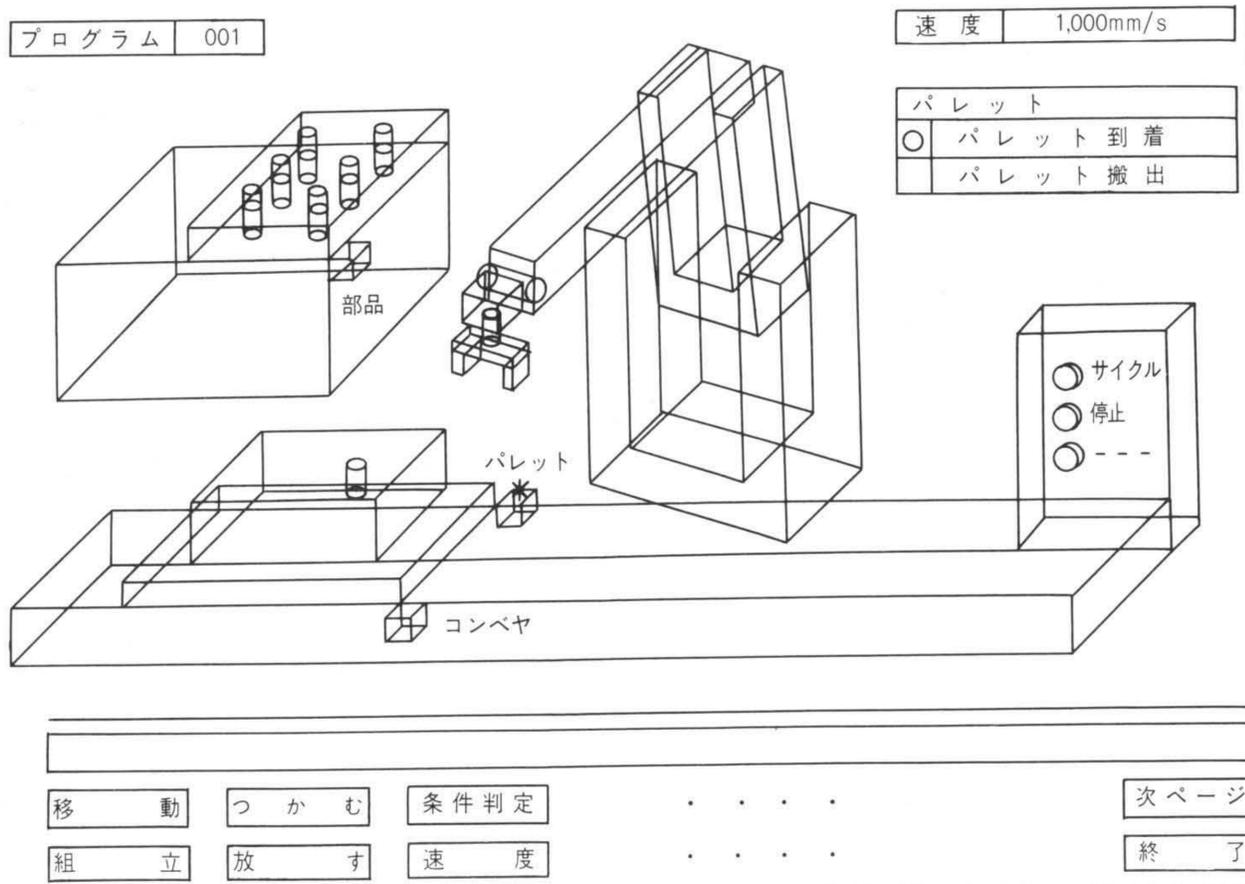
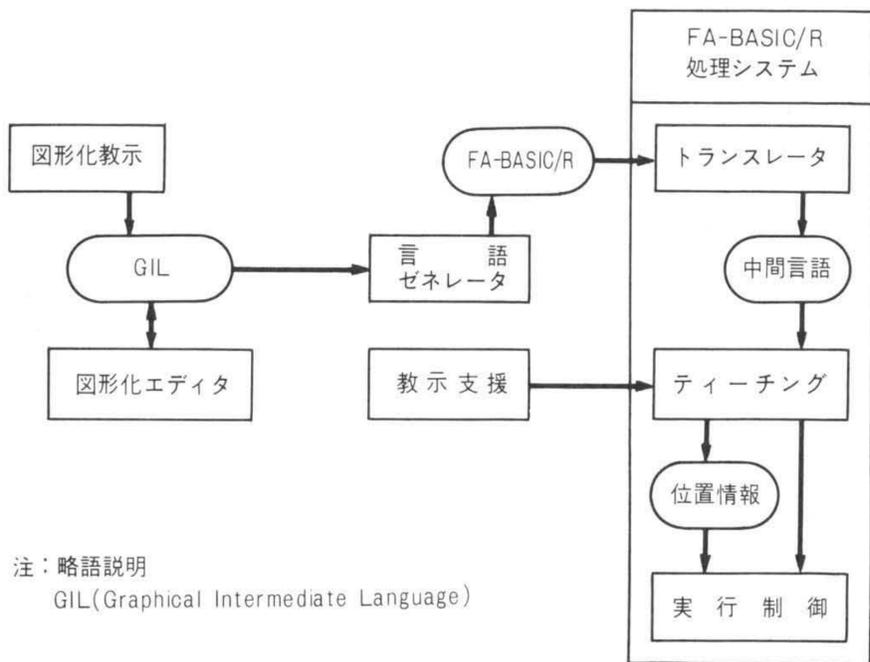


図10 図形化教示での条件設定の例 ディスプレイ上のリミットスイッチ(名称パレット)を選択すると、右上にその入出力信号の表が表示される。更に、その表から条件を選択することによって条件を設定し、その条件での動作を入力する。



注：略語説明
GIL(Graphical Intermediate Language)

図11 図形化教示の処理概要 表示された図形を見ながら作成されたロボット動作データは、FA-BASICに変換される。教示による位置データ入力が必要な場合に、プログラムを呼び出すこともできる。

ンド群から取捨選択して、サブセットが構成できる言語体系となっている。

図9は、一つの応用例として、組立ての基本動作の一つであるパレタイズ作業を示したものである。ここでは、コンベヤの制御がFA-BASIC/Cで記述され、FA-BASIC/Rとの間でコンベヤの停止とロボットの起動の同期制御が表現できる。コンベヤ上の部品の位置の基準位置からのずれをFA-BASIC/Vで記述されたプログラムにより画像処理装置で算出し、これを位置補正のデータとしてFA-BASIC/Rで記述されたロボット動作プログラムに送信する。FA-BASIC/Rでは、直前に積んだ部品に一定の反力が検出されるまで押し付けるという、力覚フィードバック制御についても記述できる。

3.2 図形による組立作業教示技術

FA-BASICによって高度な組立セルの制御が記述できる

この基礎の上に、より利用者に理解しやすく、誤りの少ないプログラミング技術として、グラフィックスを用いた図形による組立作業の教示技術を開発した。

教示とは、ロボットに動作順序と位置情報やハンド・溶接トーチなどの制御情報を入力することである。組立に関しては動作順序(特に外部信号による条件分岐動作)の教示と組付けの位置決め点の教示が必要である。動作順序入力は、FA-BASIC/Rを用いることにより、比較的容易に行なうことができる。しかし、ディスプレイを用いて対話形にオンラインで入力する技術を用いて、言語イメージによらず動作順序を入力することにより誤りのない簡便な教示が行なえる。また位置教示は、時間のかかる作業であり、これをいかに簡易化するかが大きな課題である。このため、プログラミング段階では、精密な位置決めを要さない点を図上で教示するにとどめ、精密な位置決めはロボットを操作しての従来方式の教示か、あるいは視覚・力覚センサに任せる。

図形化教示の特徴は、

- (1) どのような動作をするのかを、ディスプレイ上の図形指示(移動点などの表示)とメニュー(動作方法)を用いて入力する。
 - (2) センサなどの入出力は、ディスプレイに図示されているセンサを指示することにより、あらかじめ入力してある条件を図示し、それから選択することにより行なう。
- など、すべて図形情報を用いて教示することである。図10に図形化教示の条件設定時の画面例を示す。

図形化教示での問題点は、ロボットを含む環境の入力と3次元的位置・姿勢の2次元画面からの入力である。組立作業では、溶接・塗装と異なり、対象部品形状の詳細よりはその位置・姿勢、把持点・挿入点などの情報が簡便に得られることが重要である。また、手先の姿勢も三面図的に表示することにより正確に決められる場合が多い。このようなことから、部品や挿入・組付位置には、固有の座標系を設定し、「部品の座標系とハンドの座標系が合うような姿勢で、その部品をつかむ」といった座標系に着目して組立動作が行なえるように

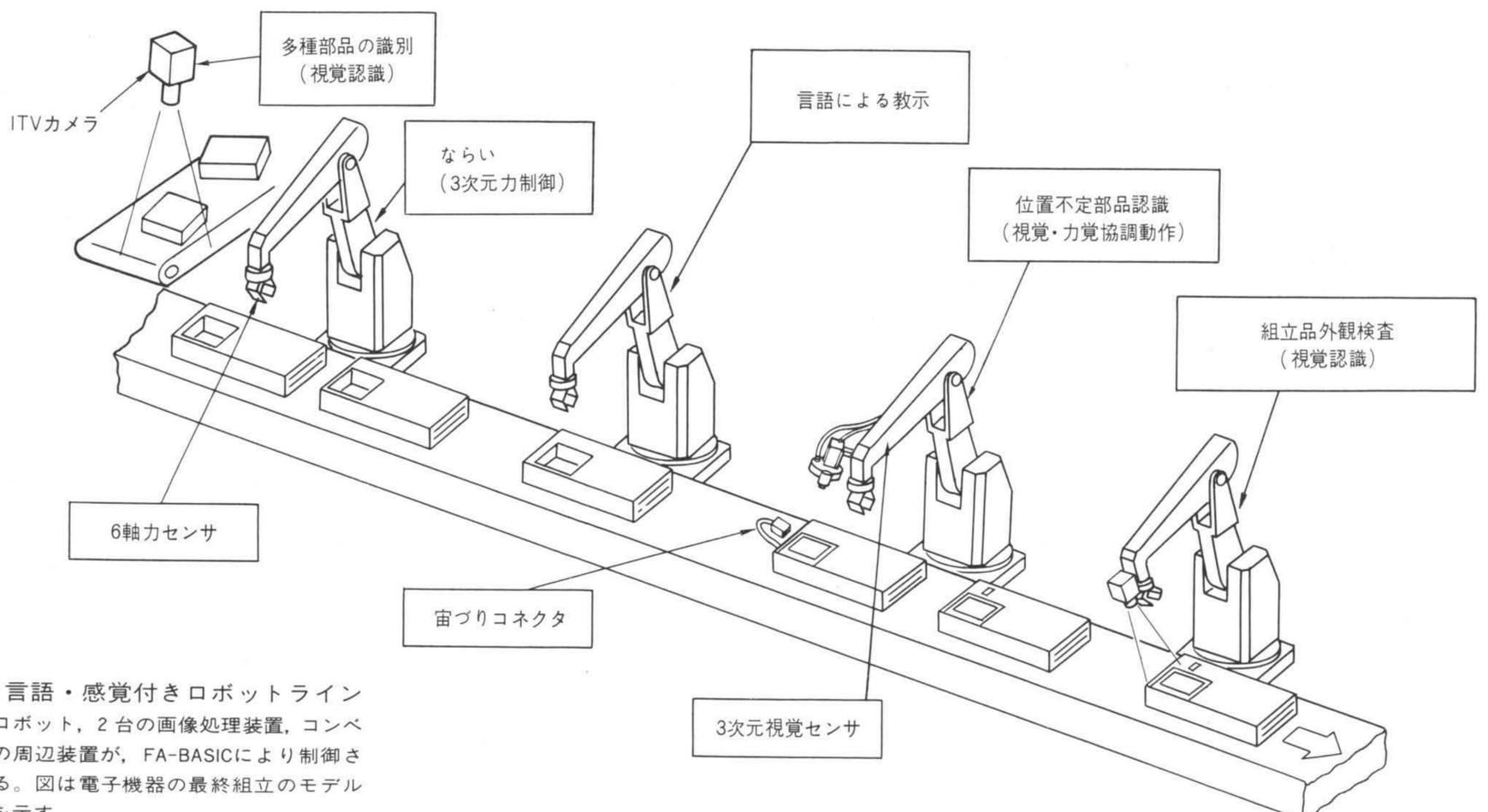


図12 言語・感覚付きロボットライン 4台のロボット、2台の画像処理装置、コンベヤなどの周辺装置が、FA-BASICにより制御されている。図は電子機器の最終組立のモデルラインを示す。

した。

3次元位置の指示も、正確な位置決めが必要な際は、目的位置を指示した際に表示される座標系の軸をピックアップすることにより行なうという方法を用いている。

図11に示すように、図形化教示によりプログラムされた動作の内容は、自動的にFA-BASICに展開され、ロボット制御が可能となる。また、この情報をもとに、ロボットを動かしながら、精密な位置情報を現場で教示し直すことも可能である。

4 結 言

最終組立などの複雑な作業にロボットを利用し、多品種と変化に対する適応力の高い自動化ラインを実現するために次の要素技術を開発した。

- (1) センサ制御の基礎として、汎用センサフィードバック制御方式を考案した。
- (2) ロボットの力覚として、ソフトウェアサーボにより、仮想的に用途に最適な機構を構成できる仮想コンプライアンス制御を開発した。
- (3) 3次元視覚付ロボットにより、宙づり部品などの空間的に位置不定の部品の扱いを可能にした。
- (4) ロボット、画像処理、プログラマブルコントローラ用の統一言語FA-BASICを開発した。
- (5) グラフィックスを用いた組立作業の図形化教示システムを開発した。

図12は、ここで述べた技術を応用した「言語・感覚付ロボットライン」の日立技術展に出展したモデルである。4台のロボット、2台の画像処理装置、コンベヤなどの周辺装置が、組

立セル制御用統合言語FA-BASICで記述されたプログラムによって制御されている。4台のロボットは、それぞれ「仮想コンプライアンス制御による組立」、「グラフィックスによるオフライン図形化教示」、「視覚による位置、姿勢不定の部品の認識、組立」、「視覚による組立品の検査・調整」といったように各種機能を組み合わせて、電子機器の最終組立のような複雑な組立作業の自動化を実現する。ロボットに象徴されるように、これからの生産機械はますます智能化が進み、米国の技術予測では、1995年までに96%のロボットが知的でプログラマブルなものになると言う。

智能化の基礎は、ここで紹介した言語による指示と感覚による適応の機能である。このような機能の強化により、FAの目標である多品種生産の自動組立がいつそ促進されるばかりでなく、CAD/CAM(Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing)とも結合したFAシステム全体の高度化が期待できる。

参考文献

- 1) D. E. Whitney, et al.: What is the Remote Center Compliance and What can it do? C. S. Draper Lab. Report p. 728(1978)
- 2) 牧野, 外: SCARAロボットの開発, 精密機械, 48-3, 378~383(昭54-3)
- 3) 秦, 外: 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, 65, 12, 857~862(昭58-12)
- 4) 秦, 外: プログラマブル高速画像処理装置PPI-II, 電気学会全国大会前刷, p. 1717(昭58-4)
- 5) 的場, 外: 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58-12)

論文抄録

計算機を用いた生産システムの設計

日立製作所 武田健二

情報処理 25-4, 364~370 (昭59-4)

いま、電機、機械などの組立産業での工場自動化はFA(Factory Automation)と呼ばれ、単なる作業の自動化から計算機による情報処理を伴った自動化システムの段階を迎えている。しかし、これらのシステムは多額の投資が必要で、そのリスクを避けるためにも、十分なシステムの検討が必要である。新しい設備の導入効果の評価から、その新しい組合せによる作業の再設計まで、様々な生産性に関連する指標によりシステム構成を評価し、最適設計しなければならない。このような生産システムの設計に計算機を用いる研究が、1970年ごろから盛んになってきた。

生産システムの設計には、構想の立案から、しだいに構成の詳細化を進めてゆき、最終的には各システム構成要素の詳細仕様とレイアウト決定に至る段階的な過程がある。その中で、設備構成計画と設備配置設計の計算機の利用が最も進んでいる。

設備構成計画では、まず生産の基本形態

である見込生産か受注生産かにより異なり、一般に見込生産ではフローショップ、受注生産ではジョブショップの構成が多い。

フローショップ設計での代表的な計算機利用は、主に人手作業中心の組立ラインを対象とした組立ラインバランス問題で、1950年代から研究されている。これに対して、高速でしかも完全に自動化されたラインを設計する場合には、各作業ステーションでの設備の故障などの外乱が、ライン全体の稼働率にどのような影響を与えるかを評価するほうが重要である。このような目的に、計算機シミュレーションが用いられる。ラインの各作業ステーションでの物の細かい動きを記述するために、シミュレーション専用の言語によるモデル化が多く用いられる。

ジョブショップの設計は、フローショップに比べ複雑で困難である。この場合、詳細なシミュレーションによらず、まず巨視的な粗い評価ができれば有効である。待ち行列理論を応用した解析の方法で、与えら

れた設備構成案に対して、各生産設備の稼働率と各製品の着手から完了までの平均停滞時間の二つの基本的な指標を計算することができる。設備構成の基本設計の後、詳細設計の段階でのシステム評価は、やはりシミュレーションによらざるを得ず、各種FMS専用のシミュレータが開発されている。更に最近では、コンピュータグラフィックスを応用した入力方式やアニメーション的出力方式も研究されている。

最適な設備配置設計への計算機の応用は、1960年代から盛んになり、米国では40を越すプログラムが市販されている。基本的な数理的取扱いは、平面配置で、配置される設備を占有面積で代表し、対象領域の中に座標的に割り付けてゆく。位置最適化に関しては、最適解法のほか各種近似解法が提案されている。今後、CAD(Computer Aided Design)技術の応用や、立体的配置への展開が期待されている。