

FAセル制御統一言語“FA-BASIC”

Universal Language for Controlling FA Cells “FA-BASIC”

製品の最終組立や多品種の組立など、複雑で高度なFAを実現するためには、多様なFA機器を組み合わせ、自在に制御する技術が必要である。そこで、セルを構成する基本要素であるロボット、画像処理装置、プログラマブルコントローラの統一プログラミング言語を開発した。

演算や通信などの機器にも共通な処理を、共通コマンドとして接続の容易化を図り、各機器に特有な処理に対しては強力な問題向きコマンドをそろえて、開発工数の削減を図った。特に、従来のFA機器ごとに研究されてきた各種言語に比べ、統一言語であることに加え、ロボットのセンサ制御、画像処理での各種の形状操作などが強化されているために、応用システムのプログラム規模が従来の $\frac{1}{10}$ 以下にできることが確認された。

武田健二* Kenji Takeda
毛利峻治* Shunji Mōri
秦 清治* Seiji Hata
松崎吉衛* Kichie Matsuzaki

1 緒 言

電機産業や自動車産業などに代表される組立産業では、部品の機械加工や組立作業の自動化が着実に進展している。そこで、今後のFA(Factory Automation)の最重要課題として、最終組立に近い複雑な製品組立作業や多品種生産に適した組立作業の自動化が追求されている。そして、多様な作業を実行できる汎用的な自動機械ということで、ロボットに大きな期待が寄せられている。しかし、現在のロボットは、作業を教示するのにティーチング プレイバックと呼ばれる単純な記憶・再生方式が主流であるため、応用も繰返し形の単純な自動化が中心である。これに対して、多様な作業を教示する手段として、言語を用いて作業をあらかじめプログラムする方法が研究され、各種のロボット言語が開発されている。そして、ロボット言語の利用の本格化を前に、各種ロボット言語の機能の分類や相互比較も盛んに検討され始めている¹⁾。また、ロボット言語の普及に伴って予想されるメーカー、ユーザー双方のソフトウェア開発や保守の負担軽減とソフトウェア資源の蓄積を図ることを目的に、各国でロボット言語の標準化の議論も始められている²⁾。

このようなロボットを中心とした技術開発をもとに、高度なFAシステムを実現しようとした場合、基本的な問題点として、ロボット単独では複雑な組立や多品種の組立のできる自動化の実現が困難であるということが挙げられる。機械部品の加工の場合は、通常一つの単純な形状の素材から一つの完成品を作る。これに対して組立では、既に加工が施され様々な形状や精度をもつ複数の部品から一つの完成品を作る。したがって、ロボットは常にコンベヤや部品供給装置などの他の装置と組み合わせて用いられる。また、対象部品の形状や精度が多様であるため、センサ特に視覚を用いる必要性が増している。すなわち、高度なFAシステムを構成する基本単位として一つのまとまった組立作業を実行できる自動組立セルは、図1に示すように、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を組み合わせ構成される³⁾。このような構成で、セルを制御して組立作業を行なわせるためには、ロボットのアームの動作をプログラムできるロボット言語だけでは不十分で、利用者

にとって次の点が重要である⁴⁾。

- (1) ロボットの動作だけでなく、視覚の機能や周辺機器との協調動作の機能も含めてプログラムできる。
- (2) 上記(1)のプログラムを、設備ごとに異なる言語でなく、同一の言語で記述できる。
- (3) 統一インタフェースによる通信機能で、各種の機器を容易に接続できて、高度なセルを構成できる。

そこで、上記の要求を満足するために、これまで日立製作所で研究開発してきたロボットの制御⁵⁾、ロボット言語⁶⁾、FA画像処理⁷⁾、プログラマブルコントローラ⁷⁾の技術を統合し、FAセル制御用統一言語FA-BASICを開発した。ここでは、FA-BASICの言語体系や機能の概要について述べる。

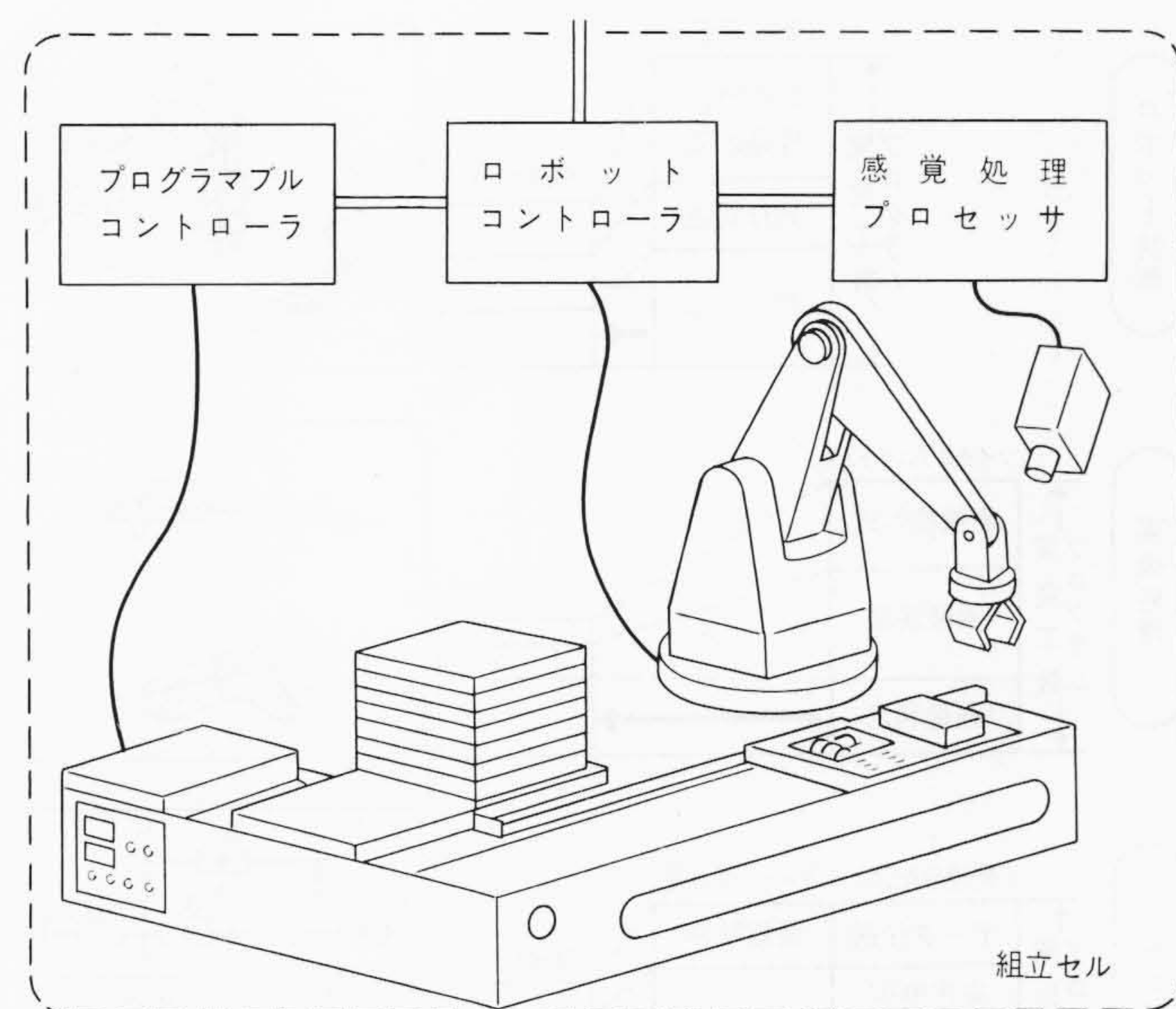


図1 組立セルの基本要素 多品種対応の組立セルは、ロボット、センサ(画像処理装置)、プログラマブルコントローラが基本要素である。

* 日立製作所生産技術研究所

2 FA-BASICの概要

2.1 言語のレベル

FA-BASICのFAセル制御用統一言語としての言語体系を考えるに当たり、まず言語の性質とも言うべき記述の意味のレベル設定を明確にする必要がある。ロボット言語のレベルに関しては、一般に動作レベル、対象物レベル、作業レベルといった分類が行なわれているが⁸⁾、ここでは、ロボットだけでなく、画像処理、シーケンス制御のプログラムも含めて対象とし統一するという観点から、まず図2に示す三つのレベルに分類して考える。

言語によって動作や処理をあらかじめプログラムすることのできるロボットや画像処理装置、プログラマブルコントローラといった機器は、いずれも内蔵しているマイクロプロセッサに対してプログラムを与えることにより、多様な機能を実行する。したがって、言語としてまず考えられるのが内蔵されているマイクロプロセッサ固有の言語で、これをプロセッサ処理定義レベルと呼ぶ。例えば、機械語やアセンブラ、高級汎用言語などがある。しかし、このレベルの言語は、コンピュータの一般的な情報処理には向いているが、FAの制御を記述するのには適していない。一見しても、プログラムのどの部分がロボットの動作や画像処理のどれに対応しているのかが分かりにくいし、わずかに動作を記述するにも数十行以上を要したりするため、高度な応用になるほど高度なコンピュータ知識と多大な開発工数が必要となる。

これに対して、システム動作手順定義のレベルでは、装置としてどう動かしたいかを、問題向きの命令語によって記述することができる。ロボットであれば「手先を動かせ」とか「開け」、画像処理装置であれば「画像データを取り込め」とか「画像を回転させよ」といったことを直接指示できる。このよう

に、装置の一つの動作や処理が一つの命令語に対応していると、利用者である応用システムの開発者にとっては、自然で見やすい表現となり、開発工数も少なくて済む。FA-BASICは、このシステム動作手順定義のレベルでの統一を図った。図2には、従来日立製作所で実用化したプログラム方法のレベルとFA-BASICのレベルを位置づけ、開発工数の削減効果の様子を示している。

更に上位のレベルとして、システム作業内容定義のレベルがある。これは、「部品Aと部品Bを組み立てよ」といった表現に近く、システムを制御した結果、なんの作業を行なわせたいかを記述する。そして、記述された対象物間の状態変化を達成するための動作手順を自動的に生成する。このレベルの言語は、まだ初期の研究段階であり、実用化された例はない。動作手順の自動生成機能では、利用者からは見えない内部で、システム動作手順定義レベルの言語形式に展開され、実行される。その場合、組立作業を考えると、単にロボット動作だけを表現する言語では不十分で、FA-BASICのように、センサや周辺機器の制御も含めて表現できる強力なシステム動作手順定義レベルの言語が必要となる。日立製作所では、システム作業内容定義レベルの第一歩として、グラフィックスを用いた組立作業の簡易プログラミングシステムを試作したが、これは図3に示すように、内部でFA-BASICに変換される⁹⁾。

2.2 命令語の体系

FA-BASICは、全体として一つの言語体系であるが、その中は表1に示すように、共通コマンドと問題向きコマンドか

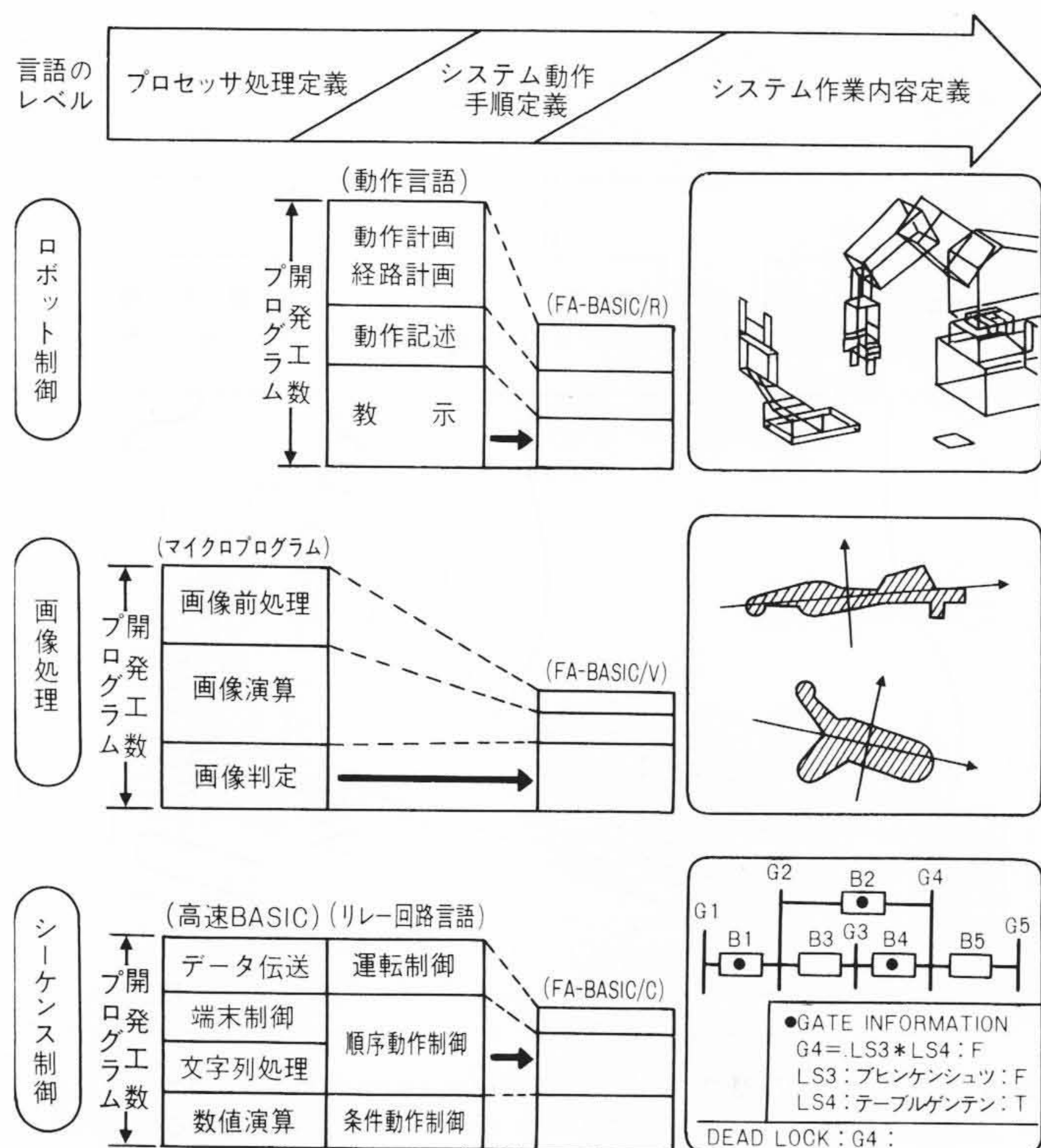


図2 言語のレベル FA-BASICは、システム動作手順定義のレベルに統一され、見やすく、プログラム開発工数も削減できる。また、より高度なシステム作業内容定義のレベルに対する強力な基礎となっている。

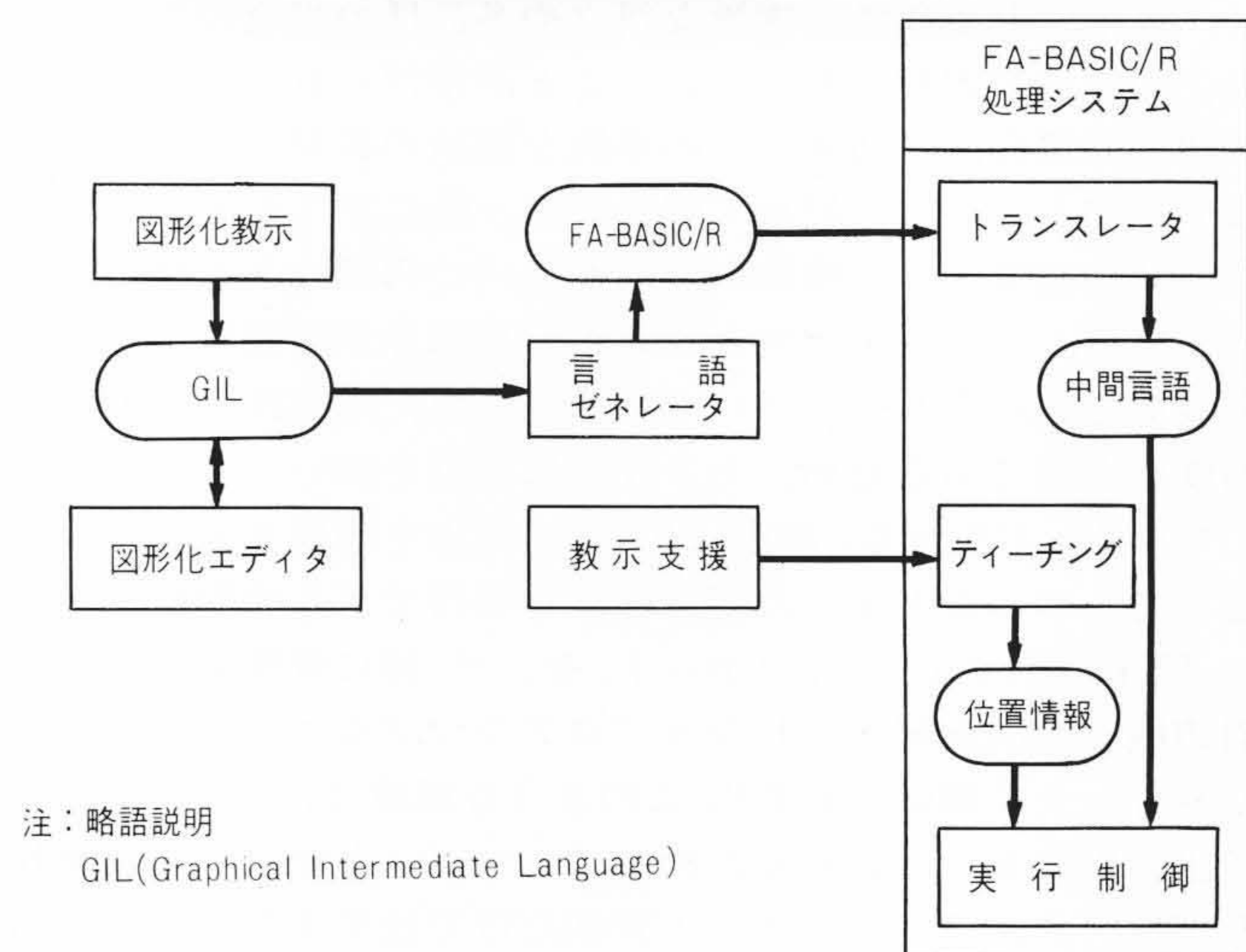
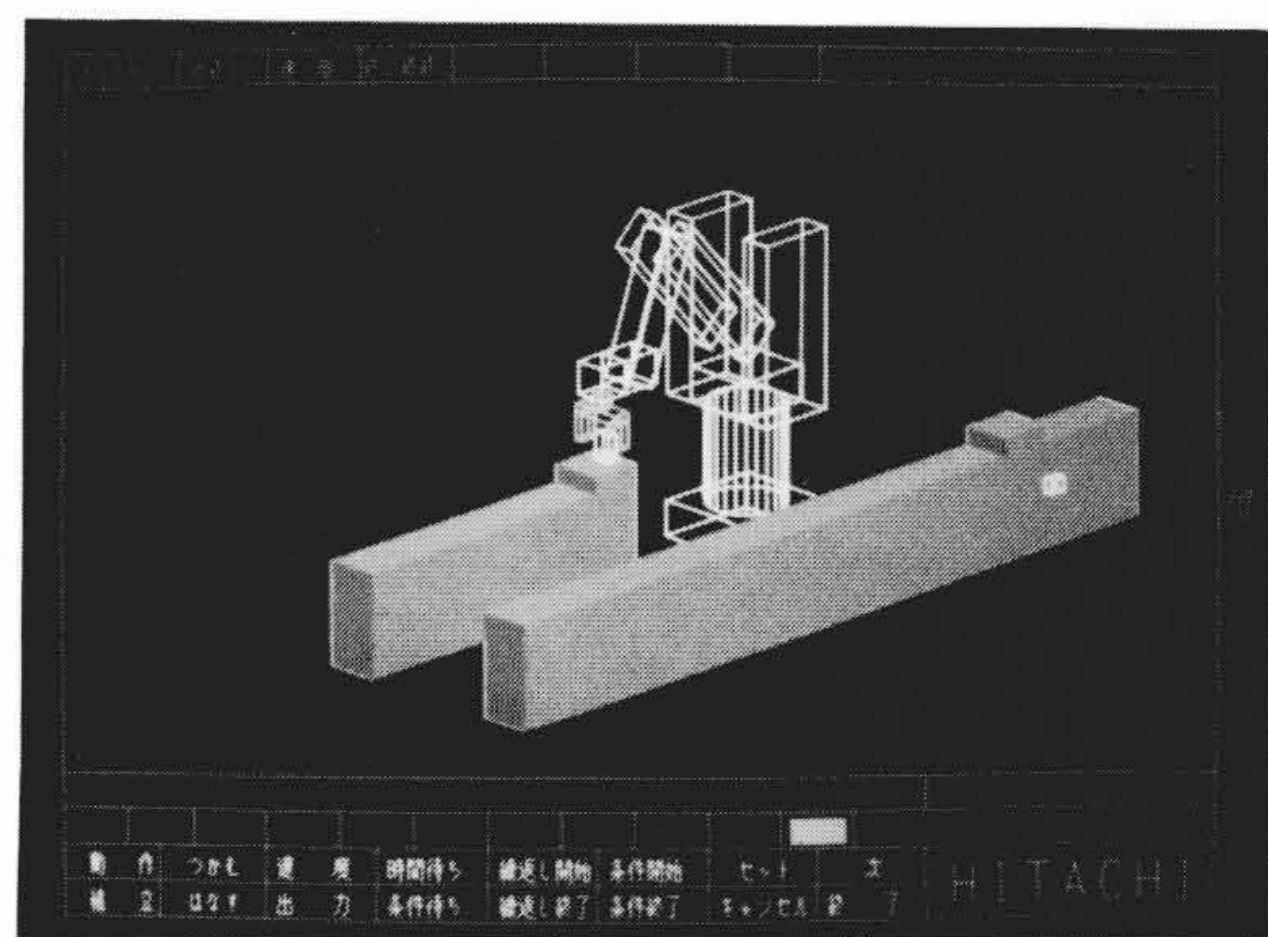


図3 ロボットの図形化教示システム グラフィックディスプレイ上の図形を操作して、ロボットの動作をプログラムする。内部ではFA-BASICに変換され、実行される。

表1 FA-BASICの構成 FA-BASICは、組立セルを構成するロボット、画像処理、プログラマブルコントローラのための統一言語で、共通コマンドと問題向き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	● 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	● 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	● 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 ● 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 ● 整数 ● 演算子（＋，－，＊，／，＾，AND，OR，NOT，……） ● 制御文（IF，FOR-NEXT，GOTO，STOP）		

ら構成されている。

ロボットでも画像処理でも、プログラムを記述する際に共通に必要な命令語が共通コマンドである。このうち、変数の定義、演算子、プログラムシーケンスの制御文などの命令語を基本BASICに準拠させている。したがって、パーソナルコンピュータなどで通常のBASICを使ったことのある利用者には、理解しやすい。また、BASIC形の言語は処理系を小形化できるため、各種のマイクロコンピュータに搭載することが可能である。更に、計算機内の情報処理だけを対象とする言語と異なり、機器を動かすための言語には生産現場でハードウェアの動作を確認しながらのデバッグが必要となる。この場合には、プログラムの部分実行や部分修正が容易な言語が要求される。FA-BASICは、このような理由からもBASIC形式の言語とした。

共通コマンドの中で、各種機器を接続して通信を記述する方法として、次の三通りを備えている。

- (1) 共通メモリ アクセス
 - 各機器をバス接続し、メモリを共有して高速なデータ交換を実現する。
 - (2) シリアル転送
 - 各機器をRS-232Cにより接続し、データの転送を行なう。したがって、入出力のポートと接続先の機器が対応している。
 - (3) ネットワーク システム
 - 各機器をLAN (Local Area Net work)で接続し、メッセージの転送を行なう。メッセージ中に送信先を指定する。
- 問題向きコマンドは、ロボットや画像処理装置などのFA機器を自在に使いこなす上で必要な、機器特有の処理の命令語である。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) R コマンド (FA-BASIC/R)：ロボット動作の記述
- (2) V コマンド (FA-BASIC/V)：画像処理の記述
- (3) C コマンド (FA-BASIC/C)：シーケンス制御の記述

2.3 言語処理

FA-BASICの言語処理系を開発するに当たっては、図4に示すような多様な実現形態を考慮した。一つは、ロボットや画像処理のコントローラに内蔵されたマイクロプロセッサに、FA-BASICの処理系を搭載する方式である。これは、機器専用のプログラミング装置として、ロボットを単独で用いる場合やオンライン プログラミングに適している。ここでオンライン プログラミングと呼ぶのは、ロボットや画像処理装

置の傍で動作をさせながらプログラムすることを言う。もう一つは、マイクロコンピュータやミニコンピュータをロボットや画像処理装置に共通のプログラミング装置として用いる方式である。これは、オフライン プログラミングへと発展してゆく上で必要となる。更に将来、CAD/CAM (Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing)の一貫化へ向けて、大形計算機でのオフライン プログラミングの要求も考えられる。

このような様々な実現形態を考慮すると、言語処理系のモジュール化が必要となる。FA-BASICでは、基本構成として図5に示すような、中間言語を介した2段階処理の方法を開発した。この方法により、FA-BASICで記述されたプログラムを中間言語に翻訳するトランスレータの部分だけをオフライン プログラミング装置に搭載し、中間言語を解釈しながら実行する制御ソフトウェアの部分をコントローラに搭載するという分離が可能となる。このように中間言語をインタフェースとして分離すると、トランスレータは制御対象のロボットや画像処理装置の機種の違いの影響を受けないし、トランスレータを変更しても中間言語を変えなければ、コントローラ側の制御ソフトウェアを修正する必要がない。

中間言語は、インタプリタにより高速実行が可能なコード形式になっており、小規模なコントローラにもインタプリタを搭載することができる。また、FA-BASICのソースプログラムへ逆翻訳可能な情報を中間言語にもたせているので、小規模なプログラミング装置でのオンライン プログラミングでも、生産現場での部分修正・部分実行によるデバッグが容易である。

3 FA-BASICの機能

3.1 ロボット動作制御：Rコマンド

FA-BASICのRコマンドは、ロボットの動作制御を記述するための問題向き命令語群で、表2に例を示す。このRコマン

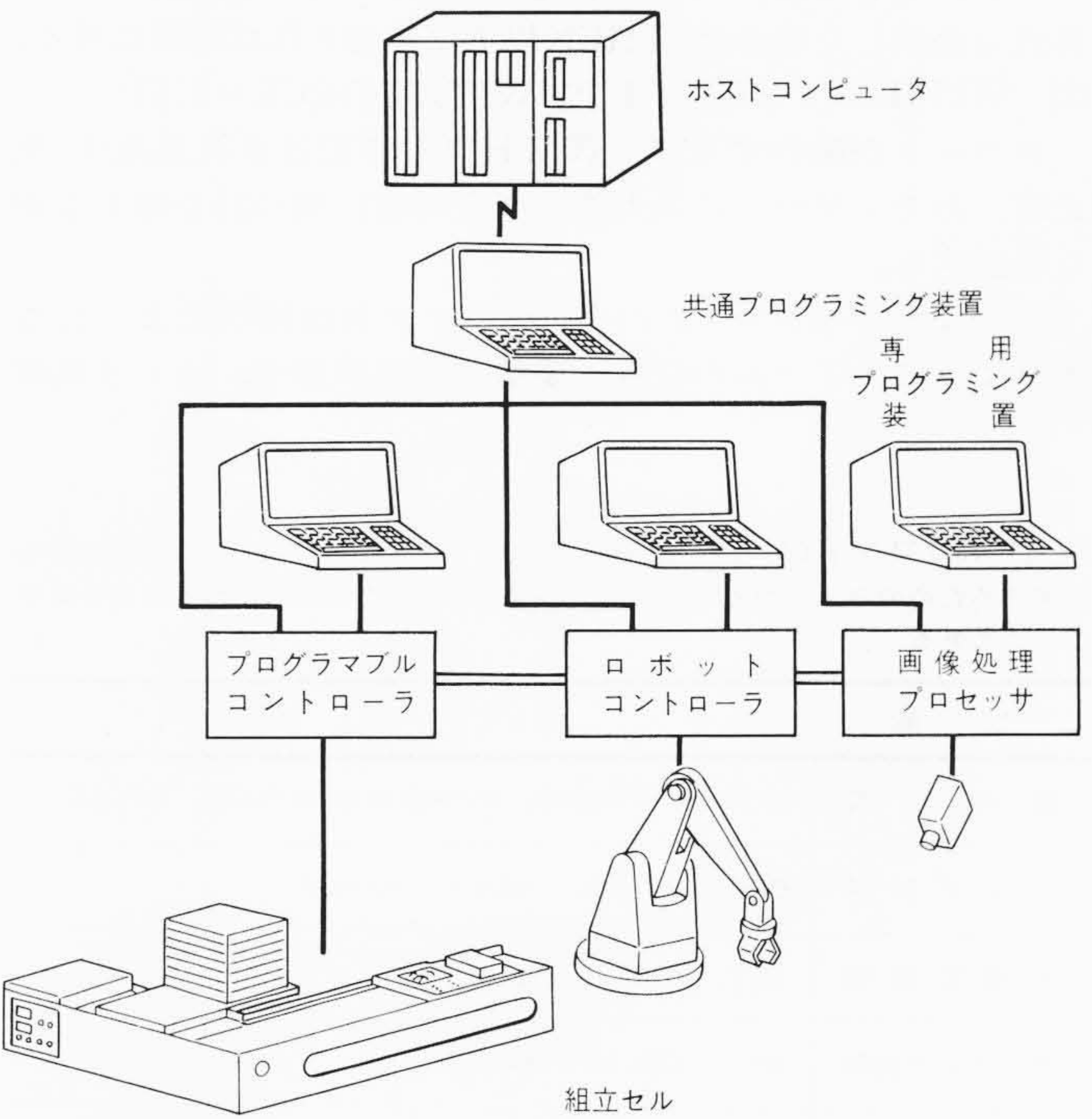


図4 FA-BASICのプログラミング装置 ロボットや画像処理装置に専用のプログラミング装置や、オフライン プログラミングに適した共通プログラミング装置など用途に応じたプログラミング装置が必要である。

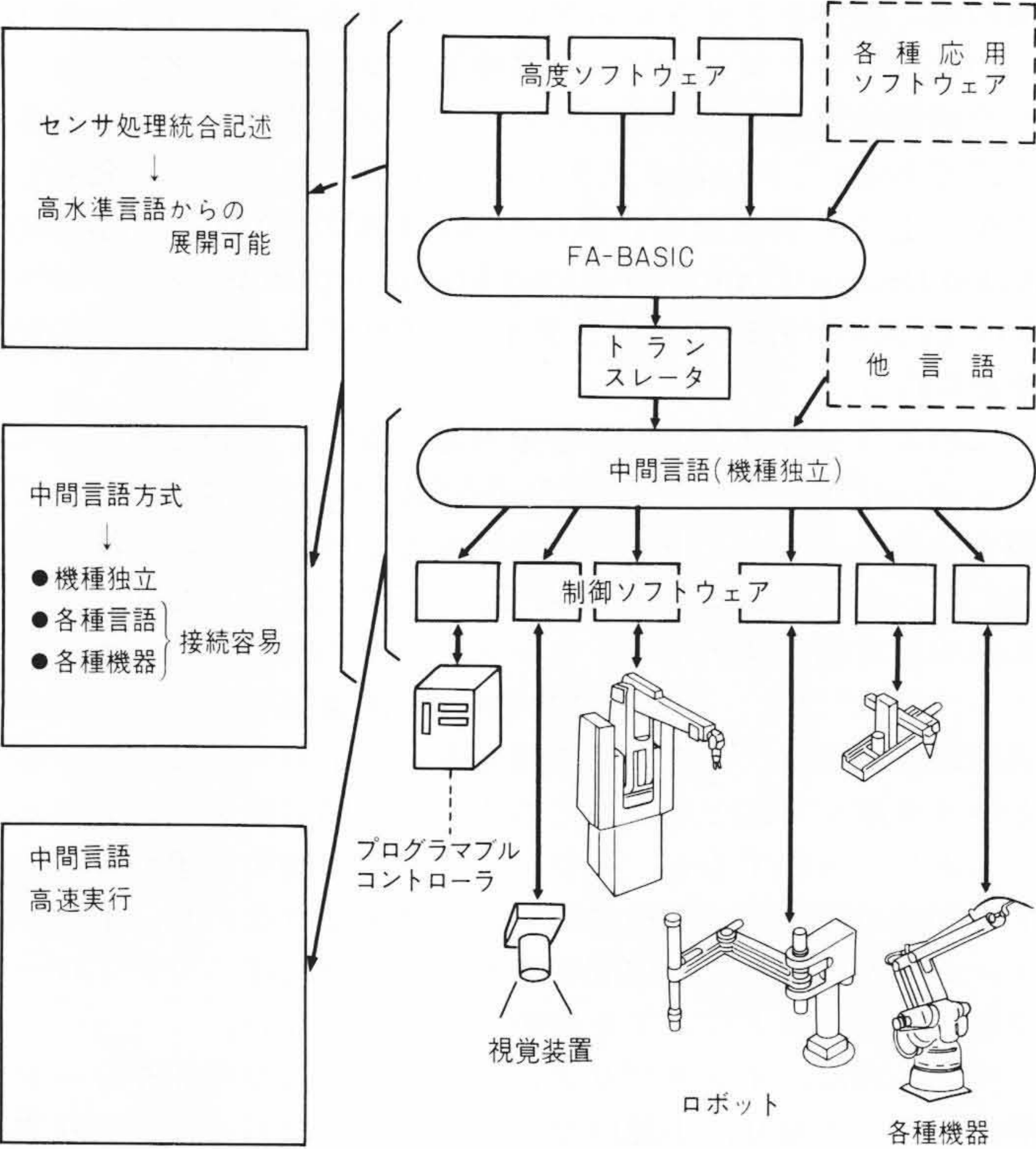


図5 中間言語を介した言語処理系 中間言語を介した2段階処理とすることにより、プログラミング装置と機器の分離が可能となり、応用システムの高度化と機器制御の高速化が容易となる。

ドは、従来のロボット言語のアームの動作を記述する機能に加えて、センサ処理の機能を強化した点が特徴である。このうちの代表的なコマンドのONとWITHについて述べる。

(1) ON(例: MOVE I, P1 ON FORCE>0.5 THEN GOTO L1)

ロボットが動作中(MOVE命令実行中)に、センサ信号をモニタし、センサからの入力信号値がON以下に記述された条件式に合致した場合は、THEN以下に記述された処理に移る。

(2) WITH(例: MOVE I, P1 WITH FORCE=0.5)

ロボットが動作する際、WITH以下で記述された条件(例えば、力センサからの入力値を所定の値に保つ。)を保ちながら移動する。

このようなセンサ フィードバックが言語指示により行なえるように、アームの位置・姿勢の高速演算や、センサ座標

表2 Rコマンドの例 FA-BASICのRコマンドは、ロボット単体の動作を制御するための命令に加えて、センサ処理や通信による協調制御のための命令が強力である。

機 能	命 令
動 作 制 御	MOVE + (ON条件, WITH条件), ROTATE, SPEED
ハ ン ド 制 御	OPEN, CLOSE, HAND, CHANGE
入 出 力 制 御	SET, RESET, IN, OUT
タイミ ング制 御	WAIT, DELAY, HALT
通 信 制 御	SEND, SENDDATA, RECEIVE
位 置 演 算	位置演算 FRAME

からの高速座標変換、ロボット機構の種類に影響を受けない汎用的な制御アルゴリズムをもつロボットの制御システムを開発した³⁾。

3.2 画像処理：Vコマンド

FA-BASICのVコマンドは、表3に例を示すような画像処理のアルゴリズムを記述するための命令語である。このVコマンドは、日立製作所で開発した線分化画像処理方式を基礎としている。

線分化画像処理方式とは、物体の画像の外形を多数の線分で線図形近似し、頂点座標のデータ列として表現し、そのデータを用いた計算により高速に特徴量計算などの認識処理を実行する方法である⁶⁾。図6は、線分化画像処理方式での認識処理の基本ステップを示すものである。

画像処理の各種の応用では、画像のどのような特徴量を、どのように用いて判定したり認識するかが、応用により異なるために、豊富な関数や処理のコマンドをもつ言語が必要である。従来市販されている画像処理装置の多くは、形状の特徴量だけを用いて認識を行なっている。これに対してFA-BASICのVコマンドでは、形状の線分化データをもとに多様な演算処理が可能である。例えば、画像の回転や移動、パターンマッチング処理が次のコマンドにより可能である。

(1) LSHIFT(例: LSHIFT L0, DX, DY)

外形が線分近似され頂点データ列(L0)で表わされた画像をX軸方向(DX)とY軸方向(DY)に指定された変位に関して平行移動する。

(2) LROTATE(例: LROTATE L0, DT, XC, YC)

画像(L0)を指定の点(XC, YC)を中心に指定の角度(DT)分回転させる。

(3) MATCH(例: MATCH L0, L1, A)

二つの画像(L0とL1)を重ね合わせ、重なっている部分の面積(A)を計算する。このコマンドは、形状の弁別や形状の欠陥検査に有効である。

3.3 シーケンス制御：Cコマンド

FA-BASICのCコマンドは、複数の自動機械の協調動作を

表3 Vコマンドの例 FA-BASICのVコマンドは、画像の特徴量を計算する命令や関数に加え、画像の形状データに対する演算や回転などの変換処理の指定が可能である。

機 能	命 令
問題向き変数	Bn(256, 256): 2値画像メモリ Gn(256, 256): 多値画像メモリ Tn(*, 8): セグメンテーション テーブル Ln(*, 2): 頂点座標テーブル [Xn, Yn, Rn, WXn, WYn, WRn] X: プロセス入力, Y: プロセス出力, R: 内部レジスタ, W: ワード型, n: ビットのアドレス
画像処理コマンド	PICTURE: 画像入力 GDISP, BDISP, 他: 画像表示 SEGMENT: セグメンテーション LINESEG, LINEALL: 線分化 LSHIFT, LROTATE: 画像データ変換 FEATURE, GRAVITY, etc.: 特徴量計算 THDSET: しきい値セットほか
画像処理関数	AREA: 面積, PERIM: 周囲長, LENGTH: 距離 MAJOR, MINOR: 二次モーメント長, 短軸 RMIN, RMAX: 最近点, 最遠点 ANGLE: 主軸角, ほか

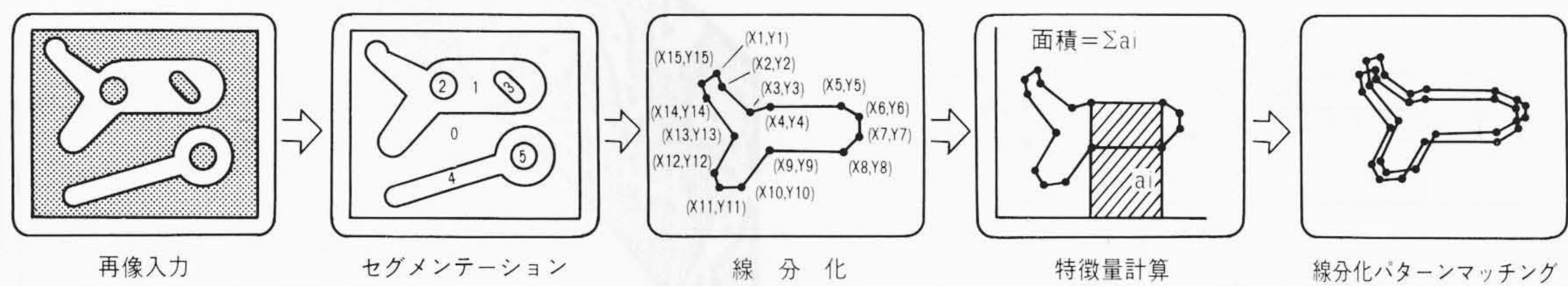


図6 線分化画像処理方式 線分化画像処理方式は、画像に関する約6万点の画素データを線分近似により、約60点のデータ列に圧縮して処理するため、通常のマイクロプロセッサでも高速に認識処理が行なえる。

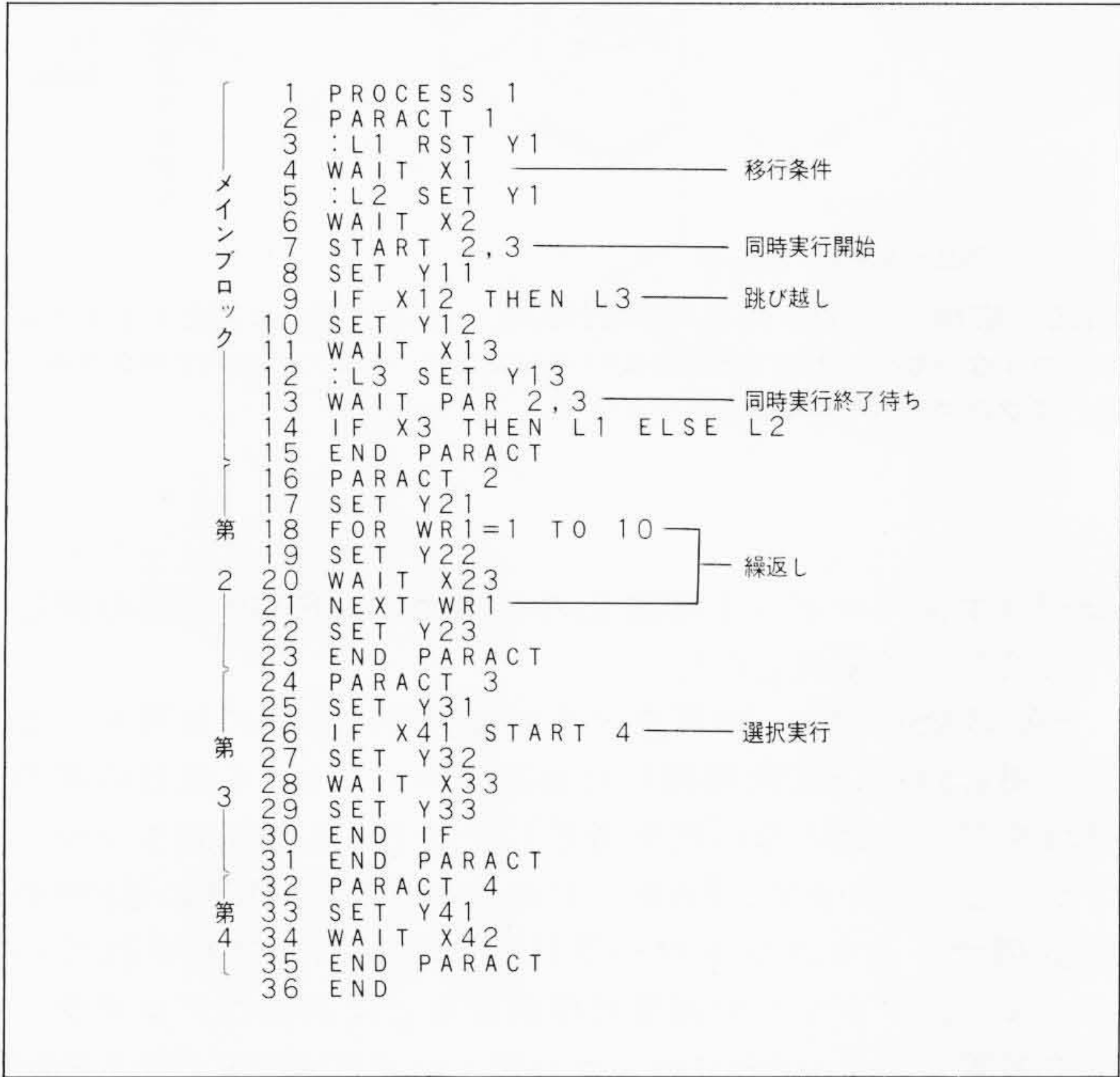


図7 シーケンス制御プログラム例 FA-BASICのCコマンドを用いると、同時実行を含む複雑なシーケンスの制御を容易にプログラムすることができる。

表4 Cコマンドの例 FA-BASICのCコマンドは、同時実行の制御の記述をはじめ豊富な命令によって、複数の自動機械の高度な協調動作をプログラムできる。

機 能	命 令
タスク範囲定義	PROCESS, END
サブプログラム範囲定義	SUB, ENDSUB
動作始点	PARACT(メイン)
動作終端	ENDPARACT(メイン)
同時動作始点	PARACT
同時動作終端	END PARACT
同時実行開始	START
同時実行終了待ち	WAIT PAR
選択実行開始	IF START
選択実行終了待ち	END IF
移行条件	WAIT
条件付き跳び越し	IF THEN ELSE
無条件跳び越し	GOTO
ケース跳び越し	ON GOTO
繰返し始点	FOR
繰返し終端	NEXT
代入	LET
ビット出力のセット, リセット	SET, RST
タスク起動, 停止, 中断	ACT, STOP, PAUSE
サブプログラム呼び出し	CALL
リターン	SUB EXIT

制御するプログラムの記述に用いられ、プログラマブルコントローラによって実行される。記述できる内容は、次の五つに分類でき、表4に例を示す。

- (1) 単純移行
- (2) 選択
- (3) 跳び越し
- (4) 繰返し
- (5) 同時実行

図7に示すプログラム例によって、Cコマンドの機能を説明する。このプログラム例には、行番号2-15, 16-23, 24-31, 32-35の四つの同時実行動作が含まれている。行番号7のSTARTコマンドで、2番目, 3番目のシーケンス動作を同時に開始する。行番号13のWAITコマンドで2番目, 3番目のシーケンス動作の終了を待つ。また、4番目のシーケンス動作は、行番号26のIFコマンドによる分岐条件により選択的に実行される。

3.4 セル制御の記述例

自動組立セルの代表的な作業の例として、図8に示すようなコンベヤ上を流れてくる部品をロボットによりつかみパレタイズする作業を取り上げ、FA-BASICによりプログラムしたものが図9である。パレタイズのような繰返し作業は、Rコマンド部に示すようにFORとNEXTコマンドによって短く明確に記述することができる。また、コンベヤが止まったことを示すリミットスイッチの信号LSをロボットが待つことを記述した行番号90により、コンベヤとロボットとの同期がとれる。更に、ロボットと画像処理装置の間の協調は、ロボットから画像処理装置への作業指示(行番号100)と受信(行番号310)及びその返信(行番号450)と受信(行番号110)や、画像処理装置による部品位置のずれの計測結果の送信(行番号420~440)とロボットによる利用(行番号120, 130)などに示されている。Rコマンドによる力フィードバックを用いた動作の表現は、行番号190と200とに示されている。

3.5 効果の検討

実際のFAシステムの例として、家庭電気製品の自動組立セルを図10に示す。このセルでは、3種類の異なる形状の部品を一つのフィーダに入れ、上方からテレビジョンカメラを用いて画像処理装置がフィーダの出口付近の部品の形状を認識し、必要な部品とその位置をロボットに伝える。そして、ロボットは部品を正しくつかむとコンベヤ上を流れてくるシャシに組み付ける。このような構成により、部品専用のフィーダや位置決め装置が不要となり、部品の種類が変更になっても適応できる自動化ラインを実現できる。

このセルの場合、従来のプログラムの方法を用いると、プログラムの規模が約11Kステップとなるのに対して、FA-BASICを用いれば約0.85Kステップと $\frac{1}{10}$ 以下に削減できるため、開発工数及び期間が大幅に節約できる。

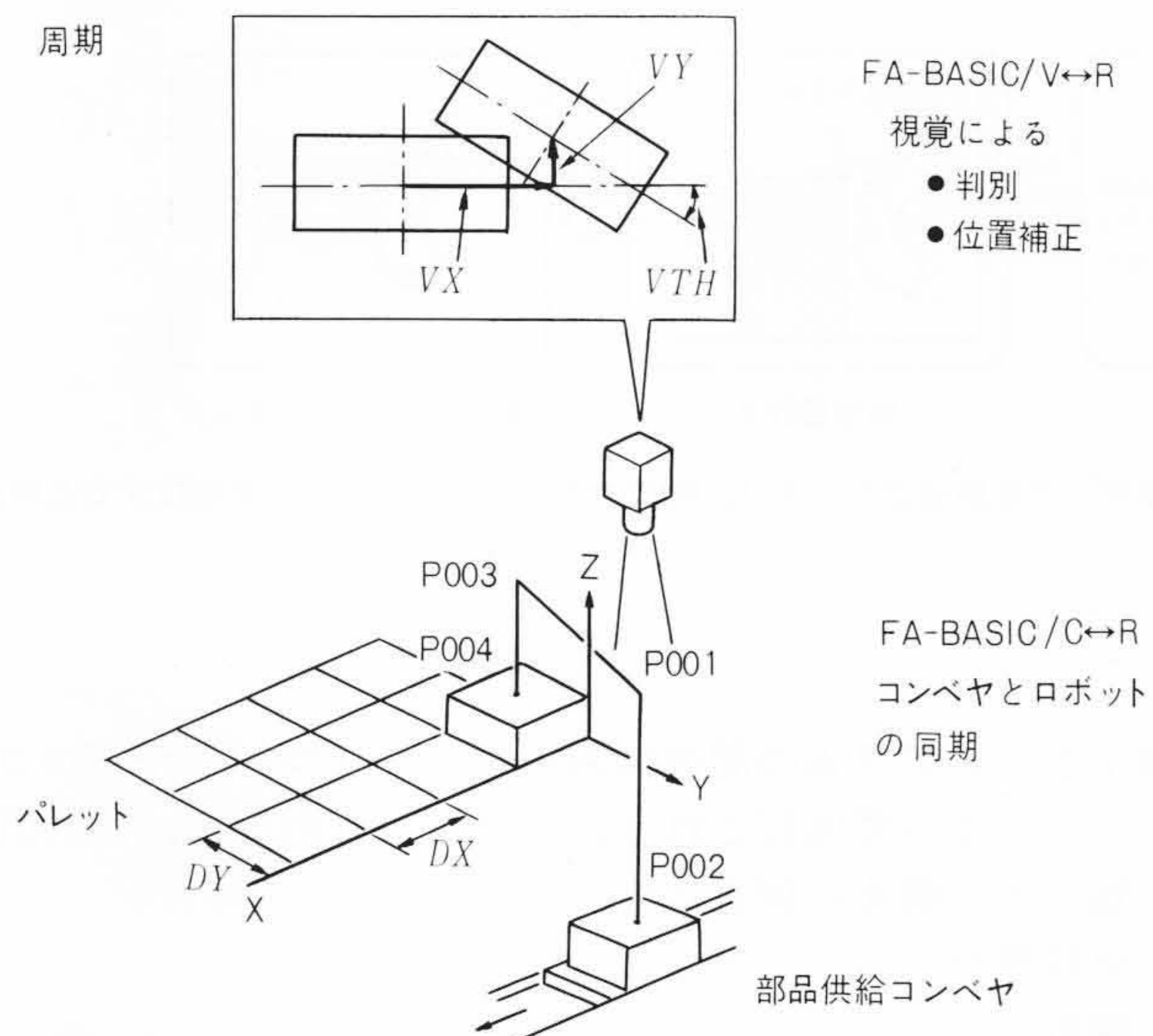


図8 視覚機能を用いたパレタイズ作業 コンベヤ上の部品の位置ずれを、画像処理装置がロボットに伝え、ロボットは反力を検出しながらパレタイズ作業を行なう。この協調動作がすべてFA-BASICで記述できる。

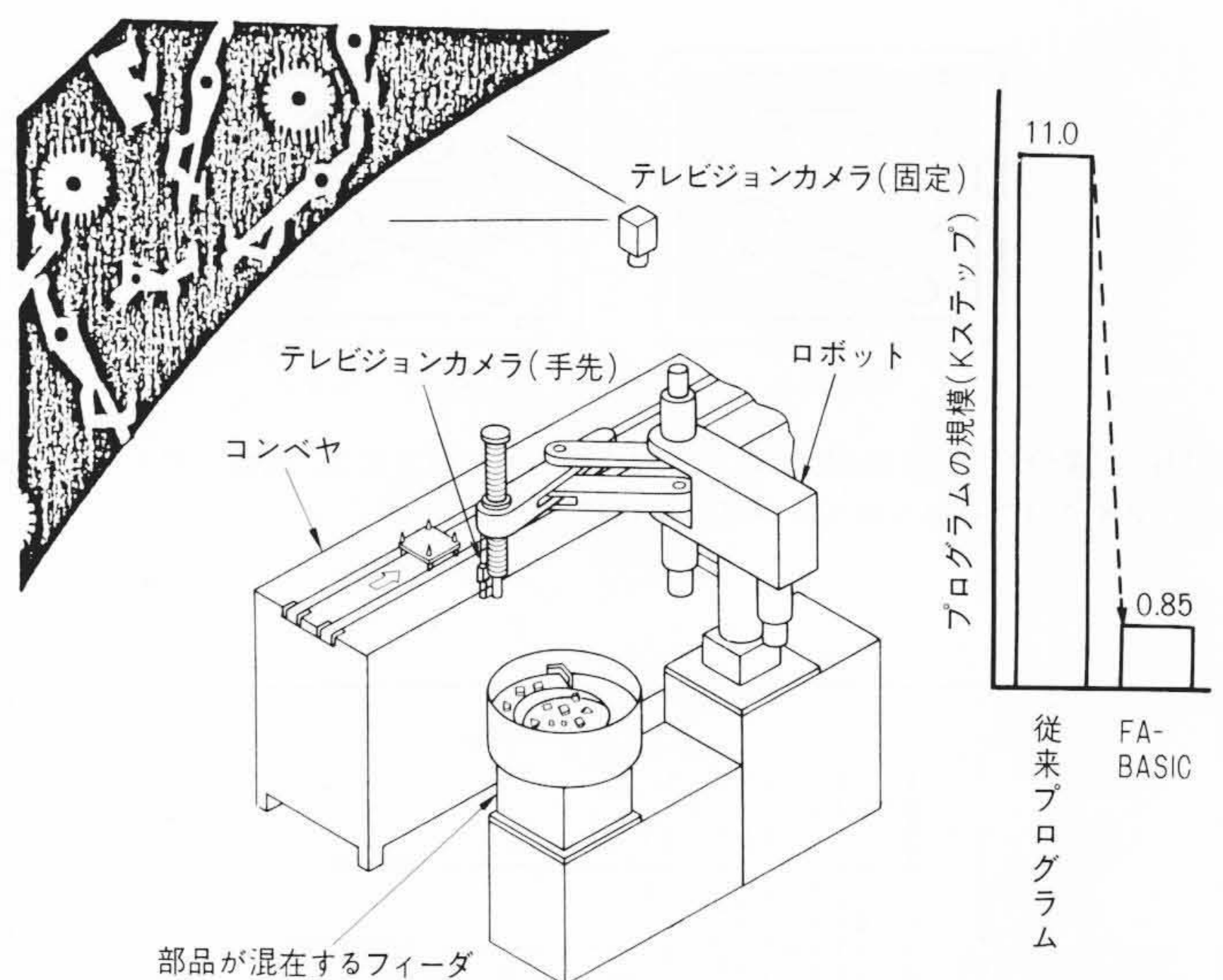


図10 応用例による効果の検討結果 高度に変化に適應できるフレキシブルな自動化を実現する場合にFA-BASICを用いると、従来のプログラムに比べてプログラムの規模が $\frac{1}{10}$ 以下となる。



図9 FA-BASICのプログラム例 パレタイズ作業でのロボット動作と画像処理を記述した部分を示す。

4 結 言

多品種を組み立てられる自動化システムを目指す、これからの高度なFAシステムは、ロボット、画像処理装置、プログラマブルコントローラを基本要素として組み合わせて構成される。そこで、プログラムの容易さや応用システムの開発工数削減、高度なセンサ制御の実現を目的に、従来FA機器ごとに研究されてきたプログラミング言語をシステムの観点からとらえ、統一言語FA-BASICを開発した。そして1985年6月に開かれた米国商務省NBS (National Bureau of Stan-

dards)主催のロボット標準化の会議にも、FA用言語の新しい技術として発表した⁹⁾。

FA-BASICには、演算など多様な機器に共通の処理を行なう汎用言語BASICに準拠した共通コマンドと、各機器特有の処理を専門知識のない利用者でも記述できる問題向きコマンドがある。これまで、FA用小形画像処理装置HISEC-SP¹⁰⁾や制御用マイクロコントローラHIDIC S10/2に搭載されている。また、ロボットや画像処理装置などに共通なプログラミング装置として、パーソナルコンピュータB16/EX上でもFA-BASICを用いることができる。更に、今後本言語を多種多様なFA機器に搭載し利用することにより、FAの推進に大いに寄与するものと考えられる。

参考文献

- 1) W. A. Gruver, et al.: Industrial Robot Programming Languages: A Comparative Evaluation, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-14, No.4, pp.565~570 (1984-7)
- 2) 新井: ロボット言語の標準化, 日本ロボット学会誌, 2巻, 2号, pp.136~141 (1984-4)
- 3) 武田, 外: 組立FA用ロボット基礎技術の開発, 日立評論, 66, 10, 749~754 (昭59-10)
- 4) 井上: ロボット言語の研究課題, 日本ロボット学会誌, 2巻, 2号, pp.87~90 (1984-4)
- 5) S. Mohri, et al.: Robot Language, HITACHI REVIEW, Vol. 34, No.1, pp.37~42 (1985-2)
- 6) S. Hata, et al.: Vision Systems for Assembly Automation, HITACHI REVIEW, Vol.34, No.1, pp.43~48 (1985-2)
- 7) 石田, 外: 高級言語(BASIC), オートメーション, 30巻, 4号, pp.51~55 (1985-4)
- 8) D. Falek, et al.: An Evolutive Language for an Intelligent Robot, Industrial Robot, Vol.7, No.3, pp.168-171 (1980-9)
- 9) S. Mohri, et al.: Robot Language from Standpoint of FA System Development, Proc. of the Workshop on Robot Standards, NBS (1985-6)
- 10) 秦, 外: 位置・形状計測に向けた小形画像処理装置“HISEC-SP”, 日立評論, 67, 9, 727~730 (昭60-9)