

〔解 説〕 言 語

ロボットシステム用プログラミング言語*

武 田 健 二**

1. 緒 言

産業用ロボットは、電機産業や自動車産業などの製造工場の自動化 (FA: Factory Automation) の主役としての期待を集め、1980 年代初頭には多くの企業が市場参入して、80 年代前半は活発な製品開発が行われた。その間、ロボットの市場は、年率 20% 以上の伸びを示し、今や我が国のロボット保有台数は 20 万台を突破したと言われている¹⁾。しかし一方では、参入企業の増加による市場競争の激化や、最近の製造業全般の設備投資のかげり等、ロボットメカにとっては、環境の厳しさが一段と増している。このような状況を打開するために、大きな需要創造となる新しい技術開発や製品展開が求められている。

市場に登場したロボットの技術的な動向を見ると、機構やアクチュエータ等のハードウェア開発が先行して来たが、いわゆる汎用ロボットとしての基本的な機構やアクチュエータは、一通り出揃った感があり、むしろこれからは、制御やソフトウェアといった応用技術面の開発が中心になるものと考えられる。そもそもロボットへの期待は、多様な作業を実行できる汎用的な自動機械という面に寄せられていた。この汎用性実現の鍵を握るのは、各種の作業を教えられる機能 (Programmability) である。このプログラマビリティについては、これまでティーチングプレイバックと呼ばれる動作の記憶・再生方式が主流であったが、ロボットの高機能化・多機能化に伴って、操作が複雑で約束事が多くなり、大変面倒で手間がかかるといった問題が出ており、これを解決するためのロボット言語の本格的利用が始まろうとしている。そこで本稿では、実際の言語とその応用の例を引用しながら、「なぜ言語が必要か」「誰がどこでどのように使うのか」といった、ロボット言語を設計するにあたっての基本的命題を述べ、技術の状況を解説する。

2. プログラミングの対象

図 1 は、ロボット応用の組立自動化の最新事例の 1 つで、家庭用 VTR (ビデオテープレコーダ) の機構部の組立を行う 視覚付双腕ロボットシステムである²⁾。従来から、家庭用 VTR などの大量生産製品は、組立の自動化が進められ、特に近年では、製品の短ライフサイクルに対応するため産業用ロボットを用いた自動化ラインが開発されている³⁾。しかし、リンク構造の部分組立品のような姿勢の不安定な部品の組付けは、従来の単純なロボット応用では自動化ができず、人手に頼っていた。そこで図 1 のシステムでは、部品 (ロードリンク) の姿勢を視覚で認識し、1 台のロボットでこれを把持し、もう 1 台のロボットに把持された部品 (ガイドローラ) と同時にシャーシに組み付けて姿勢を固定する。このような作業をティーチングすることを考えてみると、たとえば視覚装置とロボット間のデータ授受や、2 台のロボットの協調動作を、単純な繰り返し動作の基本パターンとしてティーチングすることが極めて困難であることがわかる。つまり、高度なロボット応用システムで必要となる通信や論理、順序、演算のような処理は、プログラミング言語という手段が不可欠となる。

逆に、これまでのロボット応用の殆んどは、単体のロボットの単純な動作の繰り返しを中心で、その場合には、プログラミング言語よりは、動作を目で確認できるティ

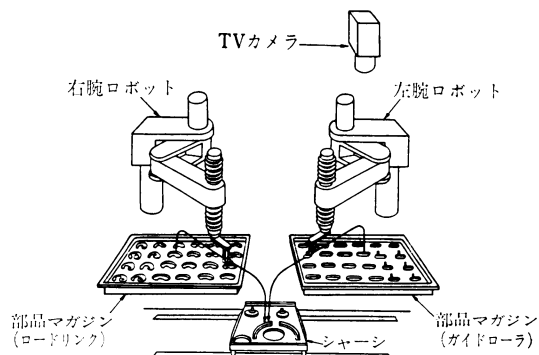


図 1 視覚付双腕ロボットシステム

原稿受付 1987 年 4 月 13 日

* The Programming Language for Factory Automation System with Robots

** (株)日立製作所技術管理部

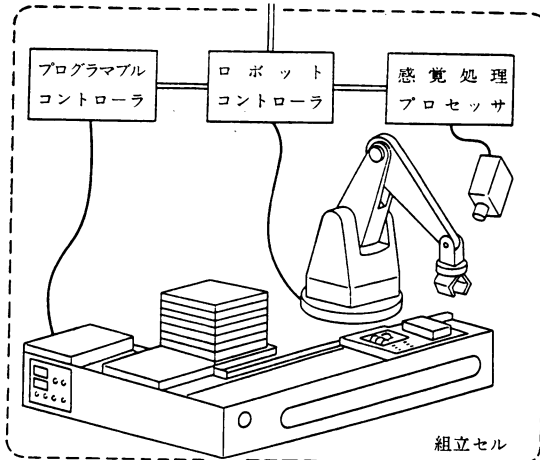


図2 組立セルの基本要素

ーチングプレイバックの方が便利と言える。特に、生産技術者と作業者が生産現場で協力してロボットを使いこなすという風潮のある日本では、ロボット言語は敬遠されて来たと言え、ロボット言語の商品化と高度化は、必ずしも活発ではなかった。

しかし、今後は図1の例のような量産ラインにおけるより複雑な作業の自動化や、多品種生産ラインの自動化へ向うにつれ、プログラミング言語の必要性が増して来る。当然その場合は、ロボット単体のアームの動作をプログラムするだけのロボット言語では不十分で、ロボットとセンサや部品供給装置等とを組み合わせで構成され

た1つの自動組立セル全体の動作をプログラムできる言語でなければならない。

高度なFAシステムを構成する基本単位として1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2に示すように、ロボットとセンサ（特に画像処理装置）および周辺機器の同期制御を行うプログラマブルコントローラの組み合わせである⁴⁾。ところが、従来のプログラミング言語としては、ロボット用、画像処理用、プログラマブルコントローラ用がそれぞれ別々に発展して来ており、1つの自動組立セルの動作をプログラムしようとする、いくつもの異なる言語を駆使しなければならないという不便が生じる。利用者の立場からは、次の点が重要である⁵⁾。

(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。

このような要求が満足されない限り、ロボット応用の高度化は、なかなか加速されまい。そこで、著者らは、FAセル制御用統一言語 FA-BASIC を開発した⁷⁾。

3. 言語の表現能力

プログラミング言語を設計するにあたっては、まず言語の表現対象を明確にする必要がある。ロボット言語で

表1 ロボット言語の記述レベル

レベル	Bonner の分類	対応する記述レベル	記 述 上 の 特 徴	例
(6)	LEVEL OF HUMAN INTELLIGENCE	仕事記述	行うべき仕事の目標を記述する	STRIPS (SRI) BUILD (MIT)
5	TASK-ORIENTED LEVEL	作業記述	ロボットの単位作業と部品間をの関係を記述する	AUTOPASS (IBM) RAPT (エジンバラ大) ROBEX (アーヘン工大)
4	STRUCTURED PROGRAMMING LEVEL	手順記述	条件による動作の選択や座標変換／サブルーチンによる作業内容、手順の変更。	AL (スタンフォード大) HELP (GE) MCL (McAuto) AML (IBM)
3	PRIMITIVE MOTION LEVEL	動作記述	ロボットの手先の動作と1対1に対応したコマンドを用いてロボットの動きを記述	VAL (ユニメーション) SIGLA (オリベッティ) EMILY (IBM)
2	POINT-TO-POINT LEVEL	ティーチング	ティーチングペンダントやダイレクトティーチによりロボットの動作・位置を教示する	FUNKY (IBM) T ³ (シンシナティミラクロン)
1	MICROCOMPUTER LEVEL	サーボデータ	数値データ	—

(文献8)より引用)

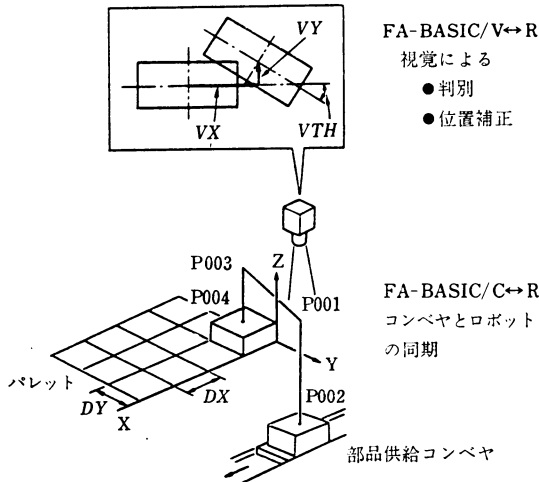
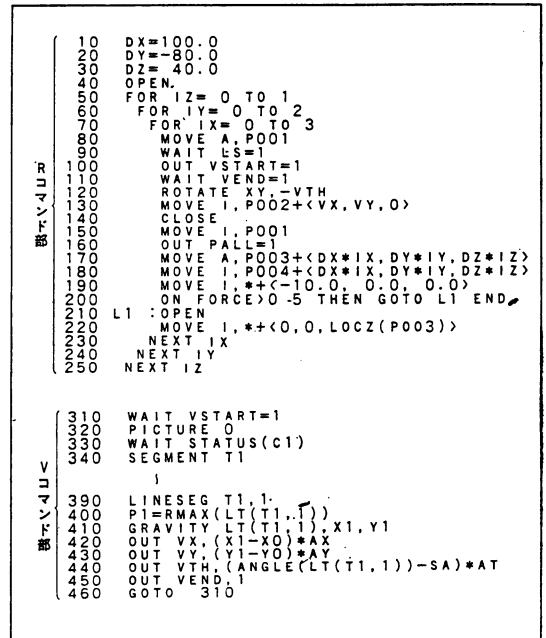


図 3 視触覚機能を用いたパレタイズ作業

は、これを記述のレベルと称して表 1 に 1 例を示すように数段階に分類している⁹⁾。このうちのどのレベルを選択するかは、誰が言語を使うのかという観点から決める必要がある。前述のように、プログラミング言語の必要性が複雑な制御において高いとすれば、当初の言語利用者は、応用システムの開発者と考えられる。応用システムの開発者にとっては、動作および手順の記述レベルが自然で見易い表現となり、開発工数も少なく使い易い。たとえばロボットであれば、「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表現できる。現実に実用化されているロボット言語は、全てこのレベルに属している。これに対して作業記述や仕事記述のレベルに関し、これまで発表されて来たロボット言語は、FA における実用化よりも、チェスの問題同様一種の人工知能研究の例題といった性格が強い。これを実用化するためには、CAD(Computer Aided Design) データ(幾何モデル)だけでなく、周辺環境のモデル(world model)も必要になり、さらには手順最適化のための各種知識ベースも前提となる。むしろ、言語の高水準化は、単にロボット動作だけでなく、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動作記述レベルの言語をベースに、パレタイズ作業用とかネジ締め作業用といった特定の作業別の応用プログラムや簡易言語を開発する方向で実現するものと考えられる。

ロボットに限らず画像処理装置とプログラマブルコントローラを含めたプログラミング言語の命令語体系では、何が共通の命令語で何がロボット特有の命令語かを明確にする必要がある。これをプログラミングの例を示して述べる。



FA-BASICのプログラム例

図 4 FA-BASIC のプログラム例

自動組立セルの代表的な作業の例として、図 3 に示すようなコンベヤ上を流れて来る部品を視覚で認識し、ロボットでつかんで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 4 である。ロボットの動作を記述した R コマンド部と、画像処理装置の処理を記述した V コマンド部を見ると、ロボットと画像処理装置の間の協調に関して、次のような表現がある。

(行番号 100) ロボットから画像処理装置への作業起動

(〳 310) 上記指示の画像処理装置側の受信

表 2 FA-BASIC の命令語体系

	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) 		

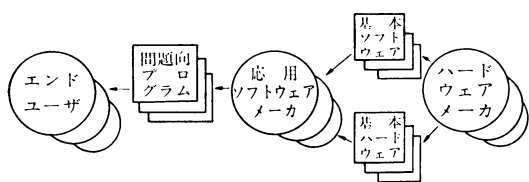


図5 ロボットシステム供給の構造

(ク 450) 画像処理装置の作業終了の返信

(ク 110) 上記返信のロボット側の受信

(行番号 420~440) 画像処理装置による部品位置の
ずれの計測結果の送信

(ク 120, 130) 上記データのロボットによる利用

このように、通信による起動やデータの授受の部分や演算等の記述形式は、ロボットであろうと画像処理装置であろうと共通にする必要がある。従って、FA-BASICでは表2に示すように、共通コマンドと問題向コマンドから構成されている。共通コマンドのうち、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。従って、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。さらに、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。

4. 言語処理系

ロボットがいかに汎用的な自動機械とは言え、毎回エンドユーザが言語を用いてプログラミングしていたのでは、活発な利用の拡大は望めない。その点でロボットは、パーソナルコンピュータの普及と似たような展開をたどると考えられる。つまり、図5に示すように、各種のロボットや画像処理装置のメーカーが基本ハードウェアと基本ソフトウェアを開発し、供給する。応用ソフトウェアメーカーがこれを利用して各種問題向パッケージを開発する。エンドユーザは、ロボット等の機器を買い、問題向パッケージを利用する。このような関係を可能にするためには、できるだけ多くの機器が同じ言語でプログラムできたり、各種の言語が同じ機器をプログラムできたりという状況を実現することが必要である。そのためには、図6に示すようにプログラム装置とロボット制御装置の処理系とを機種独立な中間言語を介して分離し、論理的に相互接続する構成が有効である。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

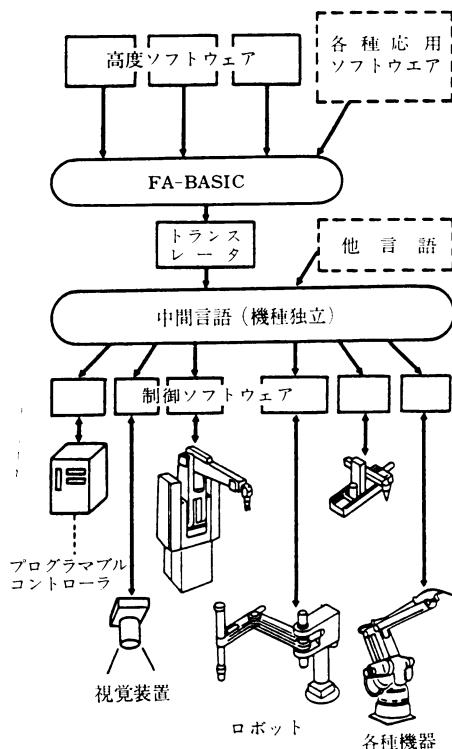


図6 中間言語を介した言語処理系

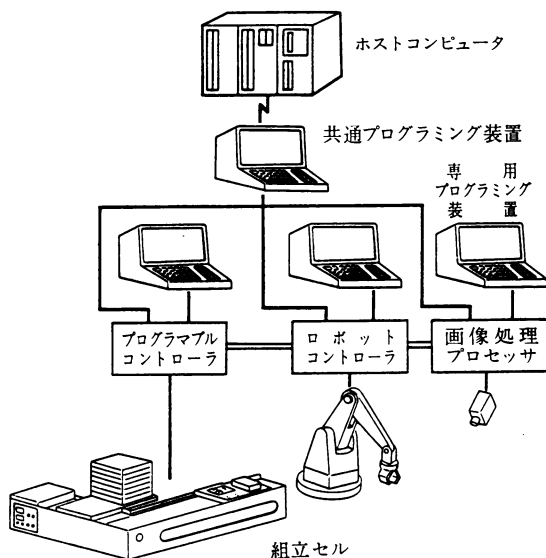


図7 FA-BASIC のプログラミング装置

分をコントローラに搭載する。このような構成により、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ように設計され、また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。さらに、中間言語さえ共通であれば、別の言語を利用することもできる。

次に、プログラミング言語の使われる環境を考えると、これは計算機内での情報処理を対象としているパーソナルコンピュータなどとは異なり、生産現場での機器を動かしながらのデバッグが必要である。従って、図7に示すような多様な実現形態を考慮しなければならない。1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、ロボットや画像処理装置の傍で、動作させながらプログラムするのに便利である。もう1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、将来のCAD/CAM (Computer Aided Manufacturing) の一貫化へ向けて、大形計算機によるプログラミングの要求も考えられる。このような実現形態に対応するためにも、中間言語を介した2段階の処理系によるソフトウェアのモジュール化が有効である。

中間言語の形式については、小規模なプログラミング装置を用いて、生産現場での部分修正・部分実行によるデバッグができるように、ソースプログラム (例 FA-BASIC) へ逆翻訳可能な情報を添えることが望ましい。

5. 効 果

まず、本稿で述べたようなプログラミング言語により実現されるロボットシステムの効果を、図8のような自動組立セルの例で考える⁹⁾。このセルでは、3種類の異なる形状の部品を1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、部品を正しく把むとコンベア上を流れてくるシャーンに組み付ける。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。昨今の激しい市場競争によって、ロボット本体の低価格化も進み、ロボットよりも部品専用のフィーダや位置決め機構等がハードウェアのコストに占める割合が大きくなりつつある。従って、システムのコスト面でも、今後エレクトロニクス技術に

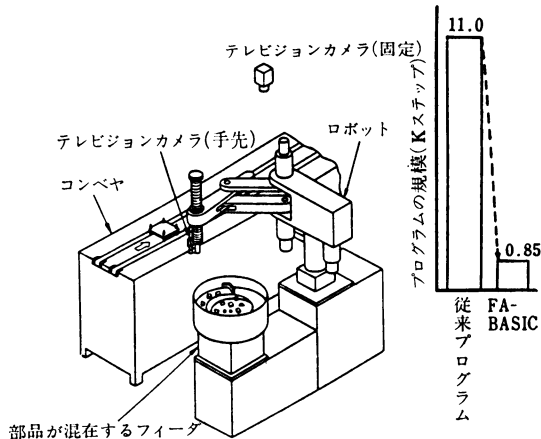


図8 応用例による効果の検討結果

より大幅な低価格化が期待できる画像処理装置を用いたこの図のようなシステム構成が有利なと考えられる。

プログラミング言語としての効果は、この図のセルの場合、従来の装置毎に異なる言語を用いると、プログラムの規模が約 11 K ステップになるのに対して、FA-BASIC を用いれば約 0.85 K ステップと、1/10 以下に削減できるため、開発工数および期間が大幅に節約できる。

6. 結 言

FA において、ロボットの応用が一段と高度化するに伴い、プログラミング言語の本格的利用が活発になり、システム全体の動作を記述できるプログラミング言語の必要性が増すことを述べた。しかし、ロボットの応用がより活発に、より高度化するためには、ここで述べた以外にも多くの解決すべき技術課題がある。たとえば、ロボット1台1台で異なる機構の誤差や、同じロボットでも時々必要となる原点合わせ、ロボットと視覚の座標系のひずみ等、各種誤差に対するキャリブレーションの容易化や自動化は、完全なオフラインプログラミングを実現するための大きな前提である。

また、技術開発以外にも多くの課題がある。1つは、標準化の問題で、オフラインプログラミングが一般化し活発化するためには避けられない問題である。現在、ISO/TC 184/SC 2/WG 4 で議論が進められており、日本では (社) 日本産業用ロボット工業会のロボット言語の標準化委員会が中心となって規格案を作成中である¹⁰⁾。

社会的な側面から見ると、特に日本では応用システム開発といったエンジニアリングに対する価値の重視がロボット応用の発展を左右すると考えられる。日本においては、これまでハードウェア重視の傾向が強く、応用システム開発に必要なエンジニアリングは、ロボットメー

カーがハードウェアに付帯する作業として行なったり、ユーザの生産技術者が行うことが多い。これに対して米国では、応用システム開発を専門に事業としている会社 (System builder とか system integrator と呼ばれている) が多数活躍している。ロボット応用の発展のためには、こうした専門化、分業化の進展が必要であり、特にソフトウェア開発に日本が立ち遅れないためにも、重要な問題である。

参 考 文 献

- 1) 福地ほか, “ロボットの現状と将来展望”, 日立評論, Vol.68-10, pp.763-768, 1986
- 2) M. Kono, et al., “Real-time Synchronization of Two Robots for Co-ordinated Assembly”, Proc. of 16th International Symposium on Industrial Robots, pp. 219-228, 1986
- 3) 松永ほか, “量産工場における組立ロボット応用システム”, 日立評論, Vol.65-12, pp.847-852, 1983
- 4) 武田ほか, “組立FA用ロボット基礎技術の開発”, 日立評論, Vol.66-10, pp.749-754, 1984
- 5) 井上, “ロボット言語の研究課題”, 日本ロボット学会誌, Vol.2-2, pp.87-90, 1984
- 6) K. Takeda, “Programming language brings one

tongue to the factory floor”, Electronic Design, Vol.33-22, pp.161-166, 1985

- 7) 武田ほか, “FA セル制御統一言語 “FA-BASIC””, 日立評論, Vol.67-9, pp.685-690, 1985
- 8) S. Bonner, et al., “A Comparative Study of Robot Languages : IEEE Computer, Vol.14-12, 1982
- 9) A. Miyakawa, et al., “A Flexible Assembly Station with Visual Sensors”, Proc. of IECON '84, pp. 1036-1048, 1984
- 10) 新井ほか, “ISO/TC 184/SC 2/WG 4 (プログラミングとデータ通信) について”, ロボット, No.53, pp.94-106, 1987



武田健二 (Kenji TAKEDA)

昭和22年3月生れ。44年東京大学工学部精密機械工学科卒業。工学博士。46年同学科修士課程を修了し、(株)日立製作所に入社。同社生産技術研究所で自動化システムの設計、生産管理システムの開発、生産制御ソフトウェアの開発に従事。60年同社研究開発部(現技術管理部)に移り現在に到る。この間、51年米国MIT修士課程修了。精密工学会、日本機械学会、IFIPなどの会員。