

## 展 望

## ロボットの作業教示とプログラミング

How to Teach and Program the Motion of Robots

松 元 明 弘\* \*東洋大学工学部機械工学科

Akihiro Matsumoto\* \*Department of Mechanical Engineering, Toyo University

## 1. は じ め に

ロボットの教示やプログラミングに関しては、論文発表を見る限り、ロボット導入初期（'80年代前半）に活発に行われ、その後下火になっているように思われる。特に国際産業用ロボットシンポジウム（ISIR）（現在は「産業用」を取ってISRと呼ばれている）においてその傾向は顕著である。また次章に述べる特集号の扱いを見ても想像できる。

しかしながら、この特集の趣旨に説明されているように、ロボットに作業を教えるという問題は古くて新しい問題である。なぜならば暗黙的にせよ明示的にせよ、ロボットに動作や作業を教えないということは考えられないからである。「人間の意図をいかにロボットに伝えるか」という問題は、生産活動のために必要だから、その改善の努力は地道に行われているのである。

一見簡単そうで学術的にはもはや何の問題もなさそうに見えるが、実際にはそうではない。技術開発は引き続き行われ、特許申請は今でも多い。今日、コンピュータのGUI（Graphical User Interface）やマルチメディア技術の急速な進歩のおかげで、新たなブレイクスルーが生まれようとしている。その実用化の時期はもうすぐであろう。

本稿は展望という立場であり、個々の技術の解説はこれ以降に述べられるので詳細を示すことはせず、教示あるいはプログラミングの意味や意義を原点に戻って考えてみたい。ロボットの動作や作業の教示の問題は、産業用ロボットを対象とした研究と、特に産業用ロボットを対象とせず理論的にコンピュータ科学の観点から行った研究とがあり、アプローチや前提条件が異なることに注意しよう。本特集でも両者のバランスを取って解説がされているので、両者の違いを意識しながら読むことをお勧めする。もちろん、両者の方向づけに共通性が増すことを期待するのは当然である。

## 2. 過去に扱われた関連特集

本題にはいる前に、日本ロボット学会誌において、ロボットの教示やプログラミングに関しての取り扱いについて列挙する。まず、特集号としては、年代順で、

- 「ロボット言語」、第2巻第2号（1984年4月号）
- 「ロボットプログラミング」、第3巻第2号（1985年4月号）
- 「ロボットのシミュレーション」、第6巻第2号（1988年4月号）
- 「ロボットのオフラインプログラミング」、第7巻第4号（1989年8月号）
- 「組立作業計画」、第11巻第2号（1993年3月号）
- 「教示」、第13巻第5号（1995年7月号）

が組まれている（なお、この特集のなかの解説記事は参考文献リストからは除く。）

また、日本ロボット学会の10周年を記念しての「次世代ロボット実用化への道」特集号第11巻第1号に筆者が「ロボット言語の現状と動向」[1]という題でロボット言語の標準化活動（その成果の一部は文献[2]にも述べられている）を中心に解説し、また第16巻第7号には、長谷川が「作業教示と計画」[3]と題し、作業計画と作業教示の問題点を解説している。

教示やプログラミングに関しては上記の特集記事を読むとその技術的内容と共に歴史的経緯が理解できる。'80年代前半はロボット用のプログラミング言語である「ロボット言語」自体の開発が最初に来て、それに関係すると考えられた（実際には距離があった）作業計画問題が「ロボットプログラミング」として取り上げられた。コンピュータの汎用言語と同様に、言語ができれば次はデバッグなどの開発環境やユーティリティが必要となるのは当然で、書いたプログラムが正しいかどうかを調べるための「シミュレータ」が必要となり、ロボット単体のみならず生産ライン全体として計画するために「オフラインプログラミング」システムが必要となる。そこで使われるべき作業計画の一部が「組立作業計画」である。また教示の問題を産業応用のみならず、原点に立ち戻って動物や生物の学習のメカニズ

原稿受付 1999年1月12日

キーワード: Robot, Teaching, Programming

〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100

\*Kawagoe-shi, Saitama

ムを参考としたり、人間工学的な立場から見ようとしたのが「教示」特集である。以上が大体の流れであろうと思われる。

### 3. 用語の定義

#### 3.1 用語の規格

さて、これまでに「教示」あるいは「プログラミング」という言葉を使っているが、この意味を考える上で、まずは定義をしておかねばならない。筆者はロボット言語の標準化にかかわってきたこともあり、用語の JIS 規格が改訂されたばかりなので、この機会を利用して紹介する。

産業用ロボットに関する用語は、国際規格として ISO 8373 [4] および国内規格として JIS B 0134 に定義されている。JIS B 0134 には、すでに普及している JIS B 0134-1993 [5] (以降、「旧 JIS」と呼ぶ) と、制定されて間もない JIS B 0134-1998 [6] (以降、「新 JIS」と呼ぶ) とがある。もちろん、旧 JIS は新 JIS に置き換わるものであるが、まだ普及していないのでここでは区別しておく。なお研究用や他の応用に対してはこのような活動はされていないが、上記の規格策定段階で多少考慮されている。

#### 3.2 ISO の定義

以下に、ISO 8373 における教示・プログラミング関係の用語を列挙する。新 JIS [6] にそのまま取り入れられているので新 JIS の日本語訳を採用するが、表記法は多少変更している。

プログラムとは

- タスクプログラム task program
- 制御プログラム control program

からなり、

**タスクプログラム** ロボットシステムに作業を実行させる手順、動作、条件などを指示するプログラム。(備考：通常、タスクプログラムは、利用者が作成する。タスクとは、アプリケーションのなかの、ある限定された作業のことである。)

**制御プログラム** ロボットシステムの機能を実現するための固有のプログラム。(備考：通常、制御プログラムは、ロボットの利用者が変更することはできない。)

と定義されている。

プログラミングとは、

- タスクプログラミング task programming
- マニュアルデータ入力プログラミング manual data input programming, MDI
- 教示プログラミング teach programming
- オフラインプログラミング off-line programming
- 作業指示プログラミング goal directed programming

からなり、

**タスクプログラミング** タスクプログラムを作成する行為。

**マニュアルデータ入力プログラミング** キーボードなどによって、ロボット制御装置に直接プログラムを作成すること。

**教示プログラミング** ロボットのエンドエフェクタ、もしくは模擬ロボット機構を手で動かすか、または教示ペンダントを用いて、要求どおりにロボットを動かすことによってプログラムを作成すること。

**オフラインプログラミング** ロボットから独立した機器でタスクプログラムを決定し、その後に、ロボットにプログラミング情報を入力するプログラミング。

**作業指示プログラミング** ロボットの動作する経路、軌道などを直接指示しなくても作業目的を指示することによって作業を実行できるプログラムを作成すること。とそれぞれ定義されている。

教示、プログラミングに関する ISO の定義はこれだけしかない。「タスクプログラム」がロボット言語の「タスクレベル」の「タスク」とは異なり、単にアプリケーションタスクを指すことに注意しよう。また、「教示プログラミング」がプログラム言語を使わない方法を指していることに注意しよう。

#### 3.3 JIS の定義

新 JIS では上記の ISO の用語がそのまま取り入れられている。またこれまでに旧 JIS で使われてきた用語が引き続き定義されている。

プログラミングの項に、ISO の定義に加えて

- 動作指示プログラミング motion programming

があり、

**動作指示プログラミング** ロボットの動作する経路、軌道などを指示することによってプログラムを作成すること。

と定義されている。

また、教示という分類が旧 JIS の時代から存在し、

- 教示 teaching
- 再生 playback
- 作業教示 task teaching
- 環境教示 environment teaching
- 直接教示 direct teaching
- 遠隔教示 remote teaching
- 間接教示 indirect teaching

が定義されている。なお、新 JIS にはさらに「同期作業」と「協調作業」が追加されているが、ここでは関連が薄いので省略する。それぞれの用語は、

**教示** ロボットに、作業を実行するために必要な情報を指示し、記憶させること。

**再生** ロボットが、記憶した情報によって指示された作業・動作を実行すること。

**作業教示** ロボットに実行させる作業内容を教示すること。

**環境教示** ロボットにその環境状況を教示すること。

**直接教示** ロボットの腕、手などを直接人が動かして教示すること。

**遠隔教示** 直接教示の一種であって、ペンダントなどを使用して、ロボットの腕、手などを動かして教示すること。

**間接教示** ロボットを動かさずにデータ入力などの方法によって教示すること。

とそれぞれ定義されている。

さらに、旧 JIS にもあったロボット言語という分類が存在し、

- ロボット言語 robot languages
- 動作レベル言語 motion level languages
- 対象レベル言語 object level languages
- 作業レベル言語 task level languages
- 標準ロボット言語 standard robot languages
- ロボット用中間コード intermediate code
- ロボット用制御コード robot control code

が定義されている。これらの説明はここでは割愛する。

### 3.4 ISO と JIS との用語定義の比較

ISO と JIS の規格の関係については、ここ数年通産省の指導により、JIS 規格は可能な限り ISO 規格と一致するように制定することになっている。JIS 規格は 5 年で改訂が更新か廃止かを決めることになっており、JIS B 0134 は 1993 年に制定された旧 JIS の改訂にあたり、対応する用語規格 ISO 8373 [4] との一致を検討した。その過程で、上記の「教示」と「プログラミング」の用語の定義の違いが問題となった。日本では、「教示の手段の一つとしてプログラミングが利用される」のに対して、ISO 規格では「プログラミングの手段の一つとして教示が利用される」のである。

この点に関し、新 JIS の巻末に解説がある。まずはその該当部分を句読点を含めそのまま引用する。

ISO 8373 の 5.2.3 では、“teach programming”を“programming performed by

- manually leading the robot end effector; or
- manually leading a mechanical simulating device; or
- using a teach pendant to move the robot through the desired actions”

と定義している。

“教示プログラミング”は、定義から分かるように旧 JIS B 0134-1993 では、これまでプログラミングという“実装”のための概念に対して、教示を“目的”という上位概念で捉え、その用語と分類を与えてきている。そこでは教示の種類に準じて、プログラミングを“直接教示プログラミング”、“間接教示プログラミング”などと分類して

いた。一方、ISO 8373 では教示 (teaching) について定義することなしに、5.2.3 “teach programming”を定義し、ロボット若しくは疑似ロボット機構を“動かす”ことでプログラムを作成することにその特徴を与えている。したがって、これを単に“教示プログラミング”とすると“教示”に対しての概念の上下関係に矛盾が起こる。また、これが必ずしも“直接教示プログラミング”に対応するものでもない。“直接教示プログラミング”は、ロボットだけに限定して、これを直接に動かすという点に特徴を置いているからである。

このことについて、用語 JIS 原案作成分科会で議論した結果、ここで用いる“教示プログラミング”の“教示”は、“教示プログラミング”の定義に含まれる狭義の“教示”とすることとした。また、教示ならびにこれに関連する用語については、将来その種類が増え、高度化する可能性を含んでいるので、今後、その進展に応じて検討することとし、今回は従来の用語を採用することにした。

(新 JIS の巻末の解説から引用)

このように、日本では、プログラミングという言葉で、記号的表現すなわちプログラム言語を利用すると限定し、また実際のロボット機構を使うか疑似ロボット機構を使うかを区別している。一方欧米ではプログラミングという言葉をやより一般的に解釈し、ティーチングボックスを使って動作を教えるのも、プログラム言語で動作を指定するのも、手段こそ違え目的は同一とみなしている。

つまり旧 JIS から新 JIS に移行する際、教示・プログラミングに関する限り、JIS B 0134 は完全に ISO 8373 の翻訳規格とはなっておらず、従来の概念や慣習を引きずったものとなっているということである。これは日本が産業用ロボットの利用で先行したがゆえに、教示技術に頼っての歴史が長いことを意味している。欧米では歴史が短いゆえに計算機利用技術としての「プログラミング」の概念を強く出したほうが理解されやすいのであろう。

どちらが正しいということは即断できない。単に、同じ概念に対して異なる言葉を使用しているだけなのかもしれない。技術的な正しさと慣習とは必ずしも一致しないし、国際規格だからといっても完全なものではないのでそれを盲目的に信ずるのもおかしい。将来的には国際規格と国内規格は完全に一致するのが理想的であるが、当面は両方の呼び方を念頭に置く必要があり、特に欧米のロボットを利用するとき、あるいは欧米にロボットを販売するときに注意が必要である。どの定義に基づいて用語を使用しているかを使用者自身が認識する必要がある。なお、この記事においては、「教示」「プログラミング」という用語の意味を

日本での慣習に従って使っている。

いずれにせよ、用語というものは、それがかわっている技術的背景、歴史・文化的背景に影響されているので、用語の定義を規格化することは実に難しいことであることが理解できる。

#### 4. 特に期待される技術

##### 4.1 データベースの利用

教示作業は産業界においては極めて時間のかかる作業である。オフラインで教示あるいはプログラミングする場合、機械の加工や組立てにおける誤差、あるいは機構特性や制御特性のモデル化における誤差のためにモデルと実際の位置がずれる。そのため、それを修正するために「現場あわせ」が必要であり、その間生産活動が停止し、生産性が低下する。

それにはどうしたらよいか。誤差は本質的になくすることはできないが、教示に必要な時間を軽減する方法はある。すべてを教示するのではなく、一部をプログラム言語により記号化する方法はこれまでもオフライン教示と呼ばれて利用されている（例えば上記特集のなかの文献[7]）。

別のアプローチとして、人間がそうであるように、経験を元にして学習する機能があればよいと考えるのは自然である。これについては、教示と学習の関係が本特集の解説として示されている。学習の成果をなんらかの形でデータベース化すればその再利用が可能となる。

産業応用では、学習の度合いの違いによりロボット動作が異なるのは問題なので、より明示的に動作を指定する必要がある。動作の教示に関する限り、基本的には類似の動作の繰り返しが圧倒的に多いので、その部分で時間の短縮ができればその効果は大きい。その例としては、飛躍的に進歩したパソコンの能力、特に優れたGUIを利用して、溶接作業のデータベースを視覚的に示す技術が、本特集にある簡易教示システム VIRTUE である。これは地道ではあるが確実なアプローチである。

##### 4.2 マルチモーダルインターフェース

長谷川が文献[3]で述べているように、メディアのマルチモーダル化により、仮想現実あるいは人工現実技術の手法は人間とロボットのインターフェースを取る上で期待される技術の一つである。仮想世界のモデルを使つての教示は、研究としては従来からあるが（例えば、文献[8][9]）、技術の進歩によりこれから実用化される方向にあるだろう。

ただ、グラフィックスなどコンピュータ自身の技術は先行しているものの、データの入力と出力、すなわち外界の世界とのインターフェース部分には課題がまだ多く残されている。測定精度のいいVR機器（ヘッドマウントディスプレイなど）、三次元マウスのような教示装置の一般化な

どが望まれるが、結局のところ三次元空間における位置と姿勢を高速にかつ高精度に測定する問題であり、実世界を扱うロボット技術者／ロボット研究者のやるべき課題ではなかろうか。

この分野は魅力的でかつ技術進歩が激しいのだが、システム指向であり、辛口で言えば場当たりのなアプローチが多いので、技術開発と並行して学問体系としてまとめる努力を行う必要がある。

#### 5. おわりに

用語の規格の説明に予想以上に誌面を使つてしまい、今後の課題の記述が少なくなつてしまった。しかし個々の技術分野の動向についてはこれ以降の解説記事で十分述べられているので、ここではその導入をすることでとどめる。むしろ、規格化に携わる者としての責務として、用語規格の説明を優先した。学会誌にその説明の機会を与えられたことに感謝している。

最初に書いたように、教示あるいはプログラミングの分野にはまだまだ多くの課題が残されているので、多くの人々の参入、貢献を期待したい。

#### 参考文献

- [1] 松元明弘, 新井民夫: “ロボット言語の現状と動向”, 日本ロボット学会誌, vol.11, no.1, pp.36-39, 1989.
- [2] 新井民夫 (編): 産業用ロボット言語“SLIM”, 日本規格協会, 1994.
- [3] 長谷川勉: “作業教示と計画”, 日本ロボット学会誌, vol.16, no.7, pp.918-920, 1998.
- [4] 国際標準化機構: ISO8373 “Manipulating Industrial Robots — Vocabulary,” International Organization for Standardization, 1994.
- [5] 日本工業標準調査会: JIS B 0134-1993 “産業用ロボット — 用語”, 日本規格協会, 1993.
- [6] 日本工業標準調査会: JIS B 0134-1998 “産業用マニピュレーティングロボット — 用語”, 日本規格協会, 1998.
- [7] 松島幹治: “オフライン教示”, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.5, pp.611-614, 1995.
- [8] 松井俊浩, 塚本亨治: “マルチメディアディスプレイを用いた統合型遠隔ロボット制御法”, 日本ロボット学会誌, vol.6, no.4, pp. 301-310, 1988.
- [9] T. Takahashi and H. Ogata: “Robotic assembly operation based on task-level teaching in virtual reality,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1083-1088, 1992.



松元明弘 (Akihiro Matsumoto)

1958年6月8日生。1983年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了。1983年東京大学工学部助手、1988年東洋大学工学部講師、1990年同大助教授、現在に至る。工学博士。1994-1995年ルイバスツール・ストラスブール第1大学(フランス)訪問研究員。ロボット言語、自律分散型ロボットシステム、RoboCup、パラレルメカニズムの研究に従事。精密工学会、日本機械学会、IEEEの会員。(日本ロボット学会正会員)