組立作業用技能システムの一構成法

村 川 洋 介* 内 山 勝*

An Approach to the Design of a Skill System for Assembly Tasks

Yousuke MURAKAWA Masaru UCHIYAMA

To enhance the ability of robot manipulators to be applied to assembly tasks in unstructured environments, intelligent control to extend the autonomy of the manipulator is urgently required. The concept of the intelligent control, however, has not been established although many approaches have been presented. This paper presents an approach to the implementation of artificial skill-artificially realized human physical skill to be controlled intelligently-that combines the framework of symbolic manipulation by Lisp and the framework of hybrid control of positions and forces that has been presented for the control of constrained motion. First, on the analogy of human brain that implements natural skill, the control system is designed hierarchically, of which the upper level consists of recognition and planning systems based on specially designed rules and the lower level consists of a hybrid controller written by C. An important part is the interface between the upper and lower levels, which is designed in order for the framework of the hybrid control to be matched with the upper level. The above design framework is applied to a special task: a peg-in-hole task, to yield a skill system for the task. Simulation results show that the system controls the task successfully.

Key Words : Robot Manipulator, Intelligent Control, Artificial Skill, Automatic Assembly, Hybrid Control.

1. 序 論

ロボットにとって複雑な環境や、未知の環境で作業を行わせる場合には、ロボット自身が環境や操作対象の変化を認識し、適切な動作を行っていく必要がある。このような知能ロボットの制御において、過去に習得された知識の果たす役割は大きい。人間が過去に習得した知識にもとづいて状況を判断し、個々の動作を適切に制御する能力を、本論文では技能と呼ぶ。そして、ロボットによって実現された同様の能力を人工技能と呼ぶ¹⁾。これを実現するためには、センサ情報やサーボレベルの制御情報と、認知判断や動作計画などの高度な情報処理との連携を、どのように行うかという、システムの設計法が問題となる。そこで我々は、人間の技能行動の発現機構

についての知見をモデルとし、人工技能システムの一構成法を提案する。

人間の技能行動の発現機構は、以下のものであるといわれている²⁾。運動全体の計画は前頭前野で行われ、個々の運動の発現は、運動前野にあらかじめ用意されている運動パターンを起動することによって行われる(運動レパートリー)。起動された運動パターンは小脳・運動野を経て筋肉への動作指令となる。感覚領野の一部には、この動作指令を受け取って、特定の動作を行なっている時にのみ反応して認識を行う部分がある。このような動作と結び付いた認識を、アクティブタッチと呼ぶ³⁾(視覚の場合にはダイナミックビジョンと呼ばれる⁴⁾)。

本論文では、以上の知見をもとに、コンピュータ上にルールベースな人工技能システムを構成する。そして組立作業シミュレータを対象に、ハイブリッド制御を用いた作業実験を行い、その機能を確かめる。

原稿受付 1990 年 3 月 27 日

* 東北大学工学部

組立作業における接触状態については、その識別可能性を論じた研究⁵⁾や、組立の運動学・静力学を定式化し、部品の幾何モデルから識別手続きを自動生成する手法を提案した研究⁶⁾などがある。これらの手法では静力学的な解析に基づいて識別を行っているが、そのみでは一意に状態を決定するのが困難である場合がありうる。そこで動作指令を含めて識別手続きを構成する手法（アクティブペリフィケーション）が提案されている⁷⁾。これは前述のアクティブタッチと同様の考え方であり、我々の手法とも共通する。

またルールベースシステムによってロボットを制御しようとする研究としては、オペレータの効果が不明な状況から動作を通じて必要なマクロオペレータを獲得する方法が提案されている⁸⁾。

2. 人工技能の構成法

2.1 全体構成

新たな技能行動を習得する際には、既に習得している技能を組み合わせることで数多くの練習をするなど、高度な知能の働きが必要であるが、一旦習得した技能行動は、半ば無意識の状態で行うことができることからわかるように、さほど高度な知能の働きは必要とされない⁹⁾。であるならば、アプリケーションとしての人工技能を考えた場合には、習得能力を省いたレディメードの技能パッケージという方法も十分ありうる。そこで、本論文では、既に修得した技能を発現させる機構の実現を目指す。その習得過程については、基本的なアイデアを示すにとどめる。

システムの全体構成は、知覚→認識→計画→動作というループを描いている。認識・計画等を行う部分は記号処理的な機能が主となるが、実際の動作を行っている部

分では数値データの取り扱いが主となる。また認知サイクルと動作のサーボサイクルでは、必要とされる時間に10倍以上の開きがある。そこで、認識・計画モジュールを含む部分（認知計画部）と、知覚・運動モジュール末端でセンサやサーボに関わる制御部は、独立した別プロセスとする。そして両プロセス間では、非同期の通信機能を用いて連絡をとることとする（Fig. 1）。

認知計画部内の知覚・認識・計画の各モジュール間の情報の伝達には、イベントという概念を用いる。イベントは、その認知サイクルに発生した新たな信号や認識、動作指令などを示すもので、全てのモジュールから発生し、認識・計画の各モジュールでの判断に用いられる。

認識モジュールと計画モジュールの中核は、イベントに基づいてルールの選択発火を行うプロダクションシステムで、それぞれに用いられるルール群が用意されている。これらのルール群は、インタープリタが効率的に処理できるように、前処理が施されている。

以下に各モジュールごとの機能を示す。

2.2 知覚モジュール

知覚モジュールは、センサ信号に対してフィルタをかけて、必要な情報を取り出す機能を持つ。センサから得られた数値データは、まず作業記憶要素の値としてそのまま記憶される。次にその値を前回の値と比較して、しきい値以上の変動があった場合には、UP、DOWNなどの定性的な記述の作業記憶を生成し、それをイベントとして登録する。この知覚イベントは、特定の属性ごとにグループ化しており、そのグループ内では一つのイベントのみが発生するようになっている（Table 1）。動作に応じて、しきい値のレベルを制御することにより、想定通りに作業が進行している時には不要な情報は考慮せず、

Fig. 1 Artificial skill system

Table 1 Examples of event group

Group name	Event name	Meaning
wms\$horizontal	wm\$horizontal_left wm\$horizontal_stop wm\$horizontal_right	Moving to left Not moving Moving to right
wms\$moment	wm\$momentright_up wm\$momentright_even wm\$momentright_down wm\$momentsmall_even etc.	MR ^{*1} is increasing MR is constant MR is decreasing MS is constant
wms\$turn	wm\$turn_left wm\$turn_stop wm\$turn_right	Turning to left Not turning Turning to right
wms\$push&pull	wm\$pushed_up wm\$pushed_even wm\$pushed_down	PF ^{*2} is increasing PF is constant PF is decreasing

*1 MR means "moment to turn right" and MS means "very small moment".

*2 PF means "pushed force".

逆に想定外の異常な入力があった場合には、すぐに対応することができるようになる。

2.3 認識モジュール

認識モジュールでは、知覚モジュールで発生したイベントと、それまでの作業の経緯・動作指令などをもとにして対象物の状態を推定し、その記述を生成する。この認識の生成に用いられるルール群は、作業内容や対象物によって異なってくる。そこで、各単位作業ごとに必要なルールサブセットを構成し、計画モジュールのサブセットにあわせて選択する。

現在得られている情報から、状態が一意に定まらない場合や、あてはまる状態が見つからない場合は、状態を「不明 (unknown)」とし、計画モジュールに探索動作を要請する (アクティブタッチ)。そして次の認知サイクルで、動作モジュールの行ったアクティブタッチ動作に対するセンサ入力から、状態を推定する。

2.4 計画モジュール

計画モジュールでは、認識モジュールの出力をもとに、作業目的を達成するような動作の系列を計画する。1. で述べた運動レパートリーの機能を実現するために、次のような機能を用いる。まず、条件に応じて特定の動作パターンを発現する動作ルールを、多数用意する。次に、特定の作業目的を遂行するために、必要なルールを集めたサブセットをいくつか作り、登録しておく。そして実際の作業を行う時には、各単位作業ごとに必要なサブセットを選択し、状況にあわせてルールを発火させていくことによりその単位作業を遂行する (Fig. 2)。

2.5 動作モジュール

動作モジュールは、計画モジュールで発火したルールに記述されている動作指令にもとづいて、運動制御を行うモジュールである。認知計画部内の動作モジュールは制御部との通信機能を持った関数群からなり、制御部内

のモジュールは、指令にもとづいてモータの制御を行うサーボループを構成している。ルール内に記述されている動作指令は対象物レベルのもので、これをコマンドレベルに分解・変換する必要がある。作業座標の管理等も行う必要がある。

2.6 技能の習得

技能の習得は本論文の目的ではないが、以上の枠組みの中で、それがどのように実現できるかを考えておくことは重要である。本システムでは、新たな課題を遂行する技能の習得は、基本的にはルールサブセットの再構成によって行う。サブセットの再構成は、次の5段階にわたって行われる。

(1) 与えられた新課題を分析して、既に習得しているルールサブセットの中で、その課題を遂行できる、あるいはできそうなものを探す。

(2) 単一のサブセットでは遂行できそうにない場合は、課題を分割して各々の部分を遂行できるものを探し、組み合わせる。

(3) (1), (2) で選択された新サブセットによって、課題を実行する。

(4) 失敗した場合にはその原因を探し、新たなルールを加えるか、特定のルールを除いて繰り返す。あるいは、(1), (2) に戻ってサブセットごと組み直す。

(5) 一応成功するようになっていても何度も実行を繰り返す、常に連続して発火するルールを一体化したり、逆にまったく発火しないルールを除いて、サブセットを洗練させて行く。

このような機構を実現するためには、充分な数のルール群と模範的なサブセット群を準備し、作業の類似性を判断する、失敗につながったルールを捨て、別なルールを取り込む、といった機能を実現させる必要がある。ただし、作業の類似性の判断は、完全にプログラムによって行うことは現時点では困難であり、人間側から教示する必要がある。実現するための手がかりとして、作業の効果 (移動の方向、距離、変形、結合、離脱) や、必要な力 (上下方向か水平方向か)、エネルギーといった指標を用いて作業を評価することで、ある程度類似性の推定もできるのではないかと考えられる。また、ルールの取捨選択も、失敗の原因推定に難しい面もあり、人間の教示によりカバーする必要がある。

3. インプリメンテーション

以上の考えにもとづく人工技能システムをコンピュータ上に構築し、作業実験を行った。使用したコンピュータは VAX STATION II/GPX であり、認知計画部の記述には Lisp を、制御部の記述には C 言語を用いた。

3.1 作業対象

作業対象には、野崎らが開発した円柱形のペグをホールに挿入する組立作業シミュレータを用いる (Fig. 3)¹⁰⁾¹¹⁾。このシミュレータは、ペグ重心に対して加える力とモーメントを入力すると、慣性やホール壁面との接触・摩擦などのダイナミックスを考慮してペグの運動を計算し、画面上に表示するものである。ホール座標から見たピンの位置や角度、ペグにかかる反力、ペグとホールの接触状態 (ステート) などのデータは、シミュレーション中に自由に取り出すことができる。

目標とする単位作業は、空中で保持しているペグをホールの中に挿入するというものである。ホールの位置や方向はおおよそしか与えられておらず、ペグを用いて手探りで探索する必要がある。今回の実験では、ペグはホールの左上から接近することにする。ペグとホールの諸元及び初期位置を Table 2 に示す。

3.2 知覚モジュール

認知計画部内の知覚モジュールでは、制御部から送られてきたペグの位置と加えられた力の情報をもとにして、イベントを発生させる。今回用いた知覚イベントのグループ名とその意味を Table 3 に示す。

Fig. 3 Peg-in-hole simulator ;
(X, Z) is the hole frame and
(X', Z') is the peg frame

3.3 認識モジュール

作業対象の状態の内部表現は、基本的には野崎らの定義したシミュレータのステートを用いる (Fig. 4)。これらのステートは、シミュレーションを行うための力学的な解析から得られたもので、運動方程式の違いに対応している¹¹⁾。ただしこれらのステート区分は、必ずしも作業状態の認識とは一致していない。例えばステート E, F, G, J, K, M, N, O などは、「挿入中の状態」として認識させることもでき、またそのように一括して取り扱った方が、ルール構成が自然になると考えられる。そこで、これらのステートは区別せずに M で代表させる。また野崎らの定義していないつまり状態を OJ として別に定義し、判別できない場合を UNKNOWN とする。

これらの状態認識を発生させるルールは、2.3 で示したように、前回の動作指令、前回のステート、知覚イベントを条件部とし、現在のステートを実行部とする形式で構成する。ルールの記述は経験にもとづいて行い、各ステートについて、条件部の各要素の組み合わせごとに複数のルールを作成した。Table 4 にその 1 例を示す。表中で、Old state は前回の状態、Motion command は動作指令、Fired events は成立している知覚イベントで、その意味は Table 1 に示す。これらの条件が満たされたとき Current state と判断する。なお No. 7 のルールは動作指令にかかわらず成立し、知覚イベントにより判断する。

Table 2 Parameters for the peg-in-hole task

Hole height H	0.1 (m)	X	-0.1 (m)
Hole radius R	0.05(m)	Z	0.07 (m)
Peg length L	0.11(m)	θ	0.0 (rad)
Peg clearance $R - r$	$0.8 (10^{-3}m)$		
Peg mass	0.2 (kg)		
Friction coe.	0.1		
Rebound coe.	0.0		

a) Physical parameters

b) Initial position of the peg with respect to the hole frame

Table 3 Event groups for the sensor module

Group name	Meaning
wms\$vertical	Vertical movement with respect to the control frame.
wms\$horizontal	Horizontal movement with respect to the control frame.
wms\$turn_0	Indices to show if the peg is standing vertically.
wms\$turn	Rotation.
wms\$push&pull	Change of vertical force on the peg.
wms\$moment	Change of moment.

3.4 動作モジュール

ペグの運動制御にはハイブリッド制御を用いる。認知計画部からは、モード選択ベクトルと制御目標値を制御部に送信し、制御部では、送られてきた目標値を選択ベクトルに従って解釈し、指定された制御則で制御する。制御則の指定は、Raibert らの定義¹²⁾に従う。制御用座標系は、認知計画部から変更指示があった時に、その時点でのペグ座標系に固定する。

制御部の動作モジュールでは、サンプリングタイム 2 ms で制御を行う。上位モジュールとの通信は 10 サンプリングタイム毎に mailbox を検査し、通信プロトコルにもとづいて指令を解釈する。

1 回の認知実行サイクルには、知覚モジュールからの情報要求指令と動作モジュールからの制御指令の 2 回の指令が必要なため、40 ms の時間がかかる。

3.5 計画モジュール

計画モジュールのルール内で用いられる動作命令の一覧を、Table 5 に示す。制御目標値は制御座標系で表した位置または力であり、選択ベクトルによって確定する。また $px-c$, $pz-c$ はペグの現在位置の X, Z 座標の値である。これらの動作命令を用いて、次のような方策で動作計画を行う。

(1) 接触していない状態 (ステート A) あるいは状態が不明の場合には、ゆっくりペグを下ろす (slow-down)。

(2) 一点で表面に触れ、表面の方向が不明な場合 (ステート B, L, S) は、ペグを押し付けて表面の方向を確定する (touchsurface)。

(3) ペグ底面が表面に接触した状態 (ステート C) になったら、その方向を記憶する (touchsurface)。

Fig. 4 States of peg-in-hole

Table 4 Examples of recognition rule

No.	Old state	Motion command Fired events	Current state
1	UNKNOWN	slowdown	C
		wm\$turn_stop	
		wm\$pushed_even	
		wm\$moment_small_even	
2	UNKNOWN	slowdown	C
		wm\$turn_stop	
		wm\$pushed_up	
		wm\$moment_small_even	
3	UNKNOWN	slowdown	S
		wm\$pushed_even	
		wm\$moment_right_even	
4	UNKNOWN	slowdown	S
		wm\$pushed_up	
		wm\$moment_right_even	
5	S	touchsurface	C
		wm\$moment_small_even	
		wm\$turn_stop	
6	B	touchsurface	C
		wm\$moment_small_even	
		wm\$turn_stop	
7	C	(any command)	L
		wm\$horizontal_right	
		wm\$turn_right	

(4) 表面が確定したら、ペグを斜めに傾けて（ステート S）ホールの探索を始める（slide, goright）.

(5) ホールの縁にペグが当たったら（ステート N, W）、ホールに対してペグを直立させる（turn, stop）.

(6) ペグが直立したら（ステート E, F, G, J, K, M, N, O）、挿入する（push）.

(7) 途中で詰まった場合には（ステート OJ）引き抜き、再び挿入する（pull, push）.

これらのうち（1）、（2）は、認識に必要な情報を得るための動作であり、アクティブタッチの一つの実現である.

4. シミュレーション結果

以上のシステムにより、シミュレーションを行った.

Fig. 5 Trajectory of the peg

Table 5 Motion commands

Motion name	S ^{*1}	Target ^{*2}
slowdown	(1 0 1)	(0, pz_c + 1, 0)
touch-	(0 0 0)	Change the control frame
surface ^{*3}		
a)	(1 1 1)	(0, 0.01, 0)
b)	(1 1 1)	(0, 0.01, 0)
slide	(0 1 0)	(px_c - 1, 0.01, -4)
goright	(0 0 0)	(px_c - 1, 0, -4)
push	(1 0 1)	(0, pz_c + 1, 0)
turn	(1 1 0)	(0, -1.5, 4)
stop	(1 1 0)	(0, -1.5, 0)
pull	(1 1 1)	(0, -2, 0)

*1 Compliance selection vector, ($S_x S_z S_\theta$).

*2 Units are (N or 10^{-2} m, N or 10^{-2} m, N·m or deg), respectively, according to the selection vector S.

*3 If rotation of the peg stops then do a) else do b).

その結果を Fig. 5-8 に示す.

Fig. 5 はペグの重心の移動と、角度の変化を示したものである. Fig. 6 は、シミュレータからのステータス出力と、認識結果を比較している. この図では、ステータス A, B, C, ... を順に 0, 1, 2, ... とする表現を用いている. 24 は OJ, 25 は UNKNOWN を表す. また、各々の時点で用いられた制御モードを Fig. 7 に示す.

Fig. 8 はペグに加えられた力とモーメントを示す. Fig. 6-8 の横軸は、認知実行サイクル (40 ms/cycle) を表す.

Fig. 6 より、認識モジュールはシミュレータの出力とほぼ等しい状態認識をしていることがわかる. Fig. 8 では、ペグがフリーの状態では、Fz は重力を打ち消すために -0.2 (N) 近くの値を示す. 挿入過程でも、Fz はほぼ 0 から -0.2 (N) の間の値となっており、ペグがスムーズに挿入されていることがわかる. このとき、Fx と Moment については、制御モードが目標値 0 の力制御であるため、0 のままである.

5. 結論と展望

技能を構成する各要素に要求される機能を考察し、人工技能を構成する場合のひとつの方針を示した. また、

Fig. 6 Real states and recognized states

Fig. 7 Compliance selection vector for the hybrid control

その方針のもとについて、サーボレベルにハイブリッド制御を用いたペグ挿入組立作業を行う技能システムを構成し、シミュレーションにより、その機能を確認した。

今後の研究課題として以下の課題があげられる。

- (1) 作業対象の幾何学的な表現を内部モデルとして用い、ルールの記述に抽象性、汎用性を持たせる。
- (2) 十分な数のルール群と、基本的なサブセット群を準備し、適用可能な作業の範囲を広げる。
- (3) 技能学習の機能を実現する。

謝 辞

本研究は、電子技術総合研究所の小笠原司・松井俊浩両氏によって開発された ETALisp を用いて行われた。またプログラム開発にあたっては、同研究所の北垣高成氏の協力を得た。以上の諸氏に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 高瀬國克, “ロボットのスキルと知能”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '89 講演概要集, pp. 32-33, 1989
- 2) 澤口俊之, “知性の脳構造と進化”, pp. 5-44, 海鳴社, 1989
- 3) 岩村吉見, “触る-アクティブタッチの神経機構”, 脳と認識, pp. 145-165, 平凡社, 1982
- 4) 浅田 稔, “ダイナミックビジョン”, 計測と制御, Vol. 29, No. 3, pp. 226-231, 1990
- 5) T. Lozano-Perez, M. T. Mason and R. H. Taylor, “Automatic Synthesis of Fine-Motion Strategies for Robots”, The Int. J. of Robotics Resch, Vol. 3, No. 1, pp. 3-24, 1984

Fig. 8 Forces and moment applied to the peg

- 6) 平井慎一, 浅田春比古, 得丸英勝, “組立作業における接触状態の位置・力信号の解釈による識別とモデルをもとにした識別手続きの自動生成”, 計測自動制御学会論文誌, Vol. 26, No. 2, pp. 225-232, 1990
- 7) R. S. Desai and R. A. Volz, “Identification and verification of termination conditions in fine motion in presence of sensor errors and geometric uncertainties”, Int. Conf. on Robotics and Automation 1989, pp. 800-807
- 8) 三浦 純, 下山 勲, 三浦宏文, “知能ロボットにおける問題解決と学習の統合”, 日本ロボット学会誌, Vol. 8, No. 3, pp. 281-291, 1990
- 9) ビーターソン, “学習心理学入門”, 新曜社, pp. 89-116, 1977
- 10) M. Uchiyama and T. Toyofuku, “Simulation of constrained motion in robotized assembly”, Proc. of the 20th Int. Symposium on Industrial Robots, pp. 601-608, 1989
- 11) 野崎秀洋, 内山 勝, 豊福貴司, “組立作業における拘束運動のシミュレーション”, 第7回日本ロボット学会学術講演会予集, pp. 519-520, 1989
- 12) M. H. Raibert and J. J. Craig, “Hybrid Position/force Control of Manipulators”, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 102, pp. 126-133, 1981