触覚ロボットの制御方式†

武安清雄・猪山忠男・霜村来爾・後藤達生

日立製作所中央研究所 国分寺市東恋ヶ窪 1-280

(昭和 47 年 4 月 15 日 受付)

Control Algorithm for Tactile Controlled Hand

Kiyoo TAKEYASU, Tadao INOYAMA, Raiji SHIMOMURA and Tatsuo GOTÔ

(Central Research Laboratory of Hitachi Ltd., Kokubunji)

(Received April 15, 1972)

This paper describes a robot equipped with a computerized tactile member named "HI-T-HAND" that can feel the forms of various objects and their positions and, according to the command, pack the objects compactly one by one into a given pallet.

The major functions of the robot are to, (1) feel for scattered objects, (2) recognize the form and the position of an object for holding it firmly, (3) change the posture of an object to facilitate subsequent operations, (4) select the best methods of shifting an object toward and positioning it in a pallet and, (5) push an object, for tight packaging, against the inner wall of a pallet or against other objects already thus arranged.

1. 緒 言

生産ラインにおける工業用ロボットの導入は、労働人口の減少を反映して活発化している。しかし生産形態そのものが多品種中小量生産へ移行する傾向があることから、ある程度の判断能力と、触覚や視覚などの認識能力を持つ、フレキシビリティの高い知能機械への関心が高まっている。

人工知能ロボットに関しては、MIT、スタンフォード大学あるいは SRI など米国の各研究機関での研究が著名であり¹⁾、わが国でも電子技術総合研究所や日立中央研究所において視覚認識を有するロボットシステムへのアプローチが進められている^{2,3)}。とくに触覚認識に関しては国内での研究が活発であり、電子技術総合研究所における物体の探索や把握への利用⁴⁾、早大における義手感覚としての利用⁵⁾、あるいは中央大におけるパターン認識の試み⁶⁾などがある。また東工大では触覚信号を PID 処理することにより、作業条件に応じてロボットの応答特性を変化させる試みが行なわれており⁶⁾、東大では力感覚を連続量としてフィードバックすることによってロボットに双動性を与

え、クランクの回転やピンの押しこみ作業などを可能にした⁷⁾。

われわれは、多品種の製品を対象とした箱詰作業や、段ボール箱のパレットへの積上作業の自動化に必要な触覚による認識制御アルゴリズムの開発を目的として触覚ロボット "HI-T-HAND" (Hitachi Tactile Controlled Hand) を完成した。このロボットは箱の中における物体群の配置パターンおよび箱詰順序を命令されることにより、触覚により適宜物体の位置姿勢などを判断しながら作業手順を決定し、これらの物体をすきまなく詰め込んでいくことができる。本論文では、とくにオンオフ的な触覚および力感覚をもちいた、物体の適応的なつかみ機能ならびに、あてがい、押しつけによる位置決め機能の制御アルゴリズムについて述べる。

2. 触覚ロボットの構成と機能

2.1 箱詰作業に関連したロボットの機能

試作した触覚ロボットは、Fig. 1 に示すように判断処理機構としての電子計算機と、外部環境の検出手段としての触覚および力感覚を有するハンドリング装置とで構成されており、人間から与えられる命令を理

† 電気学会東京支部大会で一部発表 (昭 46.11)

Fig. 1 Schematic diagram of tactile-controlled-hand

解することによって適切な作業手順を判断し、対象物体の状況に応じて作業を進めていく能力がある。箱詰作業に必要なロボットの判断能力は、Fig. 2 に示し

Fig. 2 Decision making for packaging operation

たように、与えられる命令のレベルによって異なる。人工知能開発の側面から言えば、①や②の処理段階、すなわち箱の中の物体配置や箱詰順序の決定の問題に興味が多い。しかし実用化の観点からすれば、現状ではこのような決定はまだ人間が行なった方がよく、むしろ与えられた状況に応じた作業手順の決定をロボット自身に行なわせるべきだと考えている。このような意味からわれわれは、箱の中の物体の配置は命令としてロボットに与え③以降の判断の処理を行なわせることを目的とした。またこのロボットは視覚要素を持たないので、広範囲の作業台上を探索することをさけるため、箱や供給物体の存在する領域はあるていど指定することにしている。このように必要最小限の命令が与えられると、ロボットはまず目的とする物体を手探りで見つけてその姿勢を調べ、後続する作業に都合の

よい位置を判断してつかみ、箱の中の所定位置に適切な方向から物体をあてがって置いたり、必要な方向から押しつけて位置決めするなど、希望の箱詰パターンを命令するだけで、ロボット自身が状況に応じた作業手順の判断を行なってコンパクトな箱詰作業を進めていくことができる。

2.2 ハードウェアの構成

ハンドリング装置は手首までの全長 610 mm の関節形で 6 つの運動の自由度を持ち、半径ならびに高さ約 500 mm の作業空間を有する。つかみ機構は平行 2 指で、つかみ幅約 100 mm の開閉動作を行なうことができる。各関節の駆動はマイクロモータ(出力 2 W)とポテンシオメータを利用した直流サーボ機構で行なう。移動速度は基幹部の 3 軸が約 90°/s、先端部の 3 軸が約 180°/s である。駆動モータをできるだけ駆動軸付近に配置することによって、全体として小形軽量、高効率な設計とした。

感覚器としては、接触覚、圧覚、すべり感覚ならびに力感覚を持つが、すべてオンオフ的に信号を検出している。Fig. 3 に指先における触覚の配置構造を示

Fig. 3 Distribution of tactile sensors around finger surfaces

す。指の周囲には接触圧の小さい(約 30 gr)金属接点を用いた 12 個の接触検出素子があり、指の内面には導電性ゴムを利用した圧覚検出素子を 4 個配置し 100~500 gr の範囲内で 2 段階程度の圧力変化を検出することができる。さらに指の内面全体が指の基部に対して相対的に約 2 mm 移動できる構造とすることによって、一方向性のすべり感覚として利用している。また各関節に生じるサーボ偏差を力感覚として利用し⁷⁾、一定のしきい値を設定することにより反力の方向を含めた 3 値の検出々力を取り出せる。いっぽう指の開閉操作は、計算機からの指令によって位置制御モードと力制御モードの切換えが可能である。

2.3 ソフトウェアの構成

ソフトウェアに融通性を与え、小容量化することを

目的として、ロボットの動作処理機能のレベルに応じてプログラムを分類し、Fig. 4 に示すようなハイアラキ構成としている。まず基本動作プログラムは指の開閉動作や手の直線移動など、各種の作業に含まれる8種類の手の基本的な動作要素を抽出したものである。これらはFig. 2の④の段階に対応したレベルのプログラムであり、座標変換やデータ転送など、より基本的なサブルーチンで構成されている。次に物体をつかむ、対象面にあてがうなど作業として意味を持つ最小単位を10種類の単位作業プログラムとして、基本動作プログラムを組合わせて構成する。これらはFig. 2の③に対応したレベルのプログラムである。箱詰など一連の目的を持つ作業は単位作業の連続であり、命令

Fig. 4 Schematic diagram of software system

Fig. 5 Algorithm for grasping function

解説や作業管理を行なうメインプログラムによってコントロールされる。各プログラムには個々のレベルに応じた入出力データが必要であり、これらをコアやドラムのデータエリアに格納する。このように機能単位ごとにプログラムを分割することにより、全体としての容量を少なくすると同時に、プログラムの部分修正あるいは新しい機能の付加をできるようにした。

3. 触覚適応制御のアルゴリズム

3.1 つかみ機能

物体の姿勢の判定、物体の適切な方向からのつかみあげなど、一連の目的を持つ作業を実行するためには、まず物体の位置を確認し、その姿勢に応じて手の位置を修正し、安定な状態で物体をつかむ制御が要求される。このような適応的なつかみ動作を手と物体の相対位置関係に応じて整理するとFig. 5 のようになる。Fig. 5 において①から⑤は指の先端の触覚検出パターンに対応して、物体を捕捉可能な状態に手の位置を修正する動作であり、⑤から⑪は指の内面の触覚検出パターンに応じて、物体を動かすことなく指の方向を一致させ、できるだけ物体の中心位置をつかむ動作である。③、⑥あるいは⑦のように触覚による検出が不可能な条件に対しては、力感覚のバックアップにより、触覚検出が可能な位置または方向に手を移動する。たとえば⑦の状態では指に生じる力感覚によって物体をつかんでいることは検出できるが、手と物体の相対位置関係を具体的に把握することは不可能である。したがって指をいったん開いたのち、じゃっかん方向を変えた状態でつかみ動作をやりなおす。このように個数の限られた触覚装置に基づいて生じる問題点を、力感覚によるバックアップ処理で実用的な解決を行なっている。Fig. 5 の⑤から⑪に示したつかみ動作を例にとると、指の内面の4個の触覚の検出パターンに応じて、両指を一定値閉じる動作、手首を一定値直線移動する動作、手首を一定値回転する動作、のいずれかが実行される。これらの対応関係はFig. 6 に示したとおりである。4個の触覚のうち3個以上がオンとなったときを安定なつかみ状態とみなして動作を打切る。

このような適応的なつかみ動作は、治具などに拘束された物体を無理なくつかみ出す場合に必要の機能であり、また物体の寸法をより正確に測定することができるので姿勢形状の判定ミスを防ぐことにもなる。

Fig. 6 Grasping motions corresponding to tactile detection patterns

3.2 位置決め機能

箱詰作業における位置決めは、常に箱の内面あるいはすでに箱詰めされた物体の表面で形成される3直交面を対象として行なわれる。すなわち Fig. 7 に0として示した無拘束状態から、物体を任意の1面にまずあてがったのち3面に拘束された30の状態に物体を移行することで種々の動作手順がある。物体を指ではさむつかみ機構では、最終的な位置決め状態を得るために、物体をいったん手ばなしたあと、対象面に押しつける動作が必要である。

このような位置決め作業を行なう場合に、触覚の配置や個数に制限があり、力感覚をオンオフ信号として利用できるようにするために、対象面に対する手先の

Fig. 7 Positioning states transition in packaging

Fig. 8 Movement direction for positioning

姿勢や移動方向に一定の制限を与えている。まず Fig. 8 に示したように手先の移動方向として次の3種類を設定する。

- (i) mode 1: 手先を基準として前後方向 (Fig. 8 の x' 軸方向) の移動。
- (ii) mode 2: 手先を基準として左右方向 (Fig. 8 の y' 軸方向) の移動。
- (iii) mode 3: 手先を基準として上下方向 (Fig. 8 の z' 軸方向) の移動。

さらに、これらの各移動方向を箱の内面を基準とした直交座標系 x, y, z 軸のいずれかに平行となる状態に限定する。この結果、位置決め動作にさいして手先の触覚が常に対象面にほぼ対向した状態になり、検出ミスを少なくできると同時に、各移動モードに対応する触覚や力感覚が自動的に定まり、接触状態の判定など情報処理を簡単化できる。

位置決めのための対象面への接近動作は、各対象面から一定距離の位置に設定されたバイアス点から、対象面を越えて設定された接近動作切り点に向って各移動モードを組合わせて実行される。この場合 Fig. 9 に示したように作業空間を最小移動単位でメッシュ状に分割することにより、接近動作の実行を移動モードの実行回数で処理する方法をとっている。移動モードの組合わせ方で接近軌道が変化し、Fig. 9 の①に示したように各移動モードを順次その全回数を実行する方法もあるが、比較的小さな対象面に対しても物

Fig. 9 Approach movement for positioning

体を確実にあてがえるように、特に指定しない限り②のように各移動モードを1回ずつ交互に実行する方法をとっている。

対象面との接触を生じた移動モードはその時点で実行を打ち切って、以後は他の移動モードだけを実行する。この場合、対象面との接触状態を一定に保つため、Fig. 9 の③に示したように対象面をチェックするための動作を間欠的に実行する。

あてがい動作は次のいずれかの場合に終了し、物体を手ばなす。

(1) すべての移動モードの方向に接触を生じた場合。したがって物体を手ばなした状態は Fig. 7 の⑳になる。

(2) モード3の方向に接触を生じた場合。したがって物体を手ばなした状態は、Fig. 7 の⑩、⑳、㉔または㉔のいずれかになる。

後者は物体を対象面の近くに置く作業に相当する。特に指定がないときは前者が実行される。

物体を手ばなしたあとは、次章に述べるように、あてがい作業の結果に応じて優先方向を考えながら物体を対象面に押しつけて位置決めを行なう。オンオフ的な力感覚で対象面への押しつけ状態を確認可能にするため、反力をともなう移動が連続した時点で反力が消滅するまで後退する。これらの実行回数が等しいときは物体が対象面に押しつけられたと判定して作業を打ち切る。反力が消滅するまでの後退回数の方が少ないときは物体が拘束されず移動していると判断して押しつけ作業を続行する。押しつけによる位置決め作業では、物体が手に固定されていないため、物体が対象面とほぼ面接触状態となりコンパクトな箱詰が可能である。

4. 箱詰作業実験

4.1 箱詰命令の処理と作業手順決定

箱詰作業の命令は Fig. 10 に示したように箱の内

number of object	adjoining objects in pallet			size and posture		
	x	y	z	x	y	z
1	0	0	0	50	50	50
2	1	0	0	35	50	50
3	0	1	0	50	35	50
4	3	2	0	35	35	50
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Fig. 10 Example of the packaging instruction

面を基準とした物体の接触関係と各物体の寸法姿勢で与える。この命令内容はメインプログラムによって個々の物体の位置と接触面の方向を示すデータに変換される。箱詰作業はこれらのデータをもとに、つかみ、あてがい、押しつけ作業の順序で実行される。

まずつかみ作業は、対象物体を手探りでさがして姿勢を判定し、あてがい作業に都合のよい状態に物体を

Fig. 11 Procedure of grasping operation

Fig. 12 Procedure of positioning by press motion

つかみ上げることを目的として Fig. 11 の手順で実行される。上述された箱詰命令によって対象物体の寸法形状は与えられているので、物体の寸法測定結果と照合して姿勢を判定する。物体の形状および姿勢によって判定に要するつかみ回数は異なり、適宜ロボット自身が必要な動作を判断して行なう。

Fig. 12 にあてがい作業の実行手順を示す。これらの作業では各移動モード方向の位置決め状態を、まだ位置決めが完了せず、移動モードの実行残回数がある場合（レベル 1）、接触を生じないまま残回数が零となった場合（レベル 2）、位置決めが完了し実行が打ち切られた場合（レベル 3）に分類表示して、作業手順処理に利用している。あてがい作業における移動モード 1, 2 の方向は、つかみ作業の結果で異なり、これに応じてバイアス点と手先姿勢が定まる。あてがい作業の種類、あるいは箱や物体のつかみ位置のばらつきに応じて、物体が手ばなされた段階での各モードの位

置決め状態は上記の 3 種類のレベルのいずれかである。これらの位置決めレベルに応じて、Fig. 13 に示したように適切な手順で押しつけ動作を実行する。モード 1 および 2 のレベルが 1 のときは対象面に押しつけず一定値だけ押しこんだのち他方向を押すことにより作業ミスを少なくする。

4.2 箱詰作業実験例

Fig. 10 に示した箱詰命令を与えた場合の作業実験結果を Fig. 14 に示す。A は指の下端の触覚を利用して物体を手探りでさがす状態を示す。B は各物体のつかみ動作を示している。(i) は立方体で姿勢判定が不要な場合であり、位置ずれを指の内面の触覚で検出しながら物体を動かさないようにつかむ。(ii) は手先に対し物体の方向がずれている場合であり、指の内面を物体に合わせてつかむ。本物体の場合このつかみ動作だけで姿勢判定が可能であり、しかもあてがい動作に必要なつかみ条件を満たしているので、そのままつかみ上げる。(iii) は(ii)と同形状の物体であるが、姿勢判定に 2 回のつかみ動作が必要な場合である。1 回目の動作で中心位置をつかみなおしているのがわかる。(iv) では 2 回のつかみ動作によって姿勢を判定した結果、

Fig. 13 Procedure of positioning by push motion

Fig. 14 Example of packaging operation

物体の姿勢変更を必要とする場合である。

Fig. 14 の C は箱への物体の位置決め動作を示している。(v) はあてがいによる位置決め動作例であり、(vi) は同じ物体を手ばなし、押しつけ動作で位置決めする状態を示す。あてがい動作でモード 1 の方向にはすでに位置決めを完了しているのでモード 2 の方向に押しつけ作業を実行する。以下同様にしてあてがい、押しつけ作業を適宜行ないながら 4 個の物体を指定された配置にすきまなく箱詰している。なお、これらの作業に要する時間は触覚割込制御を主体とするつかみ作業の場合で約 3 s である。位置決め作業ではサーボ偏差を力感覚として用いるため移動モード 1 回の実行に約 100 ms を要し、あてがい、押しつけを含めた作業時間は 15~20 s となっている。作業速度向上のためには割込制御が可能な力感覚検出方式の開発が必要である。

5. 結 言

手さぐりで種々な形状寸法の物体の姿勢位置などを認識し、箱の隅からつぎつぎとすきまなく、命令された配置でつめて行くことができる触覚ロボットを開発した。このロボットの持つ主な触覚動作機能は、

- (1) 触覚によって物体位置を探索し、一定範囲内にある物体を探してつかむ。
- (2) 物体の置かれている姿勢に指の方向、位置を合わせて、物体を動かさずに安定につかむ。
- (3) 物体の寸法を測定し、形状や姿勢を判定する。
- (4) 物体を対象面にあてがい、あるいはあてがったまま移動して位置決めする。

(5) 物体を対象面に押しつけて位置決めする。などである。さらにマクロな命令をもとに視覚機能なしに箱詰を実行するための判断処理機能をこれらの触覚機能との関連で開発し、知能ロボット実用化への 1 つの方向を示した。また触覚と力感覚を相互にバックアップ処理させることにより、個数の限られた検出器で作業を満足に実行できるようにしたこと、あるいは検出器の出力をオンオフ信号として利用できるように制御アルゴリズムを構成することによって装置の簡略化を行なったことなどが特長である。

最後に本ロボットの開発に関連してかずかずの有益な御助言をいただいた東大産業機械工学科藤井教授、電子技術総合研究所システム制御研究室佐藤室長、井上研究員、ならびに当所沼倉部長に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 合田：アメリカにおけるロボット研究の現状と今後の問題点，計測と制御，7-12，23/34 (1968)
- 2) 上滝・佐藤ほか：ETL ロボット M^K I 特集，電子技術総合研究所集報，35-3 (1971)
- 3) M. Ejiri, T. Uno, H. Yoda, T. Goto, K. Takeyasu: An Intelligent Robot with Cognition and Decision-Making Ability, Second International Joint Conference on Artificial Intelligence, Session 8, 350 (1971)
- 4) 加藤ほか：計算機によって操作される力逆送型人工の手，第 1 回バイオメカニクス・シンポジウム，14 (1970)
- 5) 森・木下：閾値変化法による人工触覚のパターン認識，生産研究，21-3，21/22 (1969)
- 6) 増田・長谷川：触覚を持ったサーボ機構の接触動作，昭和 45 年電気四学会連合大会，2567 (1970)
- 7) 井上：人工の手の計算機制御，日本機械学会誌，73-618，946/954 (1970)