

〔原著論文〕

# スキルに基づくマニピュレーションシステム

末 広 尚 士\* 高瀬 國 克\*

Skill Based Manipulation System

Takashi SUEHIRO Kunikatsu TAKASE

This paper proposes "skill" of manipulator to execute complex tasks. Skills are essential and elemental motions obtained by analysis of motions needed to execute target tasks. Since the skills are made to be adaptable to the task environment using force control, sensor feedback and so on, the elemental sub-tasks can be reliably accomplished with the corresponding skills. Higher level system can program or plan to execute a complex task by combining skills without knowing complex control of them. In this paper, considering assembly tasks as realization of target contact states, we analyze contact states appearing in polygonal assembly tasks and skills for the tasks are obtained by the analysis. Some of them have been realized using DD-manipulator: ETA3, and successfully applied to insertion of square pole.

**Key Words:** Skill, Manipulator Control, Motion in Contact, Assembly Task

## 1. はじめに

マニピュレータの行う作業が複雑になり、環境とのインタラクションが避けられないものとなると、環境に適応するために、力制御などの高度な運動制御や、動作状態に応じた高度なセンサの利用が必要となる。

力制御を含めたマニピュレータの制御に関する研究としては、Mason のハイブリッド制御<sup>1)</sup>や Hogan のインピーダンス制御<sup>2)</sup>などが挙げられるが、いずれも実際の作業において制御系のパラメタなどをどのように設定するかという点については触れられていない。Taki ら<sup>3)</sup>や浅田ら<sup>4)</sup>は、そのような動作パラメタを人間の作業者の教示データから抽出して力制御を用いた動作プログラムを生成することを提案している。

一方、組立作業の計画問題に関しては、平井らによる点接触を基本とした接触状態遷移を運動学的解析により求めるものがある<sup>5)</sup>が、実際の動作の制御については論じられていない。Lozano-Pérez はジェネラライズドダンパによる速度制御を用いて並進運動のみの平面はめ合い動作の自動生成手法として backprojection の技法を

提案している<sup>6)</sup>。しかし、作業全体を考えた場合、速度制御のみで作業を完成させることは不可能であろう。

このように環境とのインタラクションが避けられない複雑な作業の実行に関して、作業の記述から、動作の制御までを統一的に実現したシステムはない。

本論文では、このような複雑な作業を実現するための手法として、スキルの導入を提案する。スキルというのは対象作業から抽出された作業を実行するのに必要な基本的な動作のことである。スキルを導入することにより、力制御やセンサフィードバックなどのサーボレベルと、作業プログラミングや作業計画などのシンボリックな知能とを有機的に結合することが可能となる。作業はスキルを基本動作として組み合わせて使うことによって実行される。

スキルのレベルで、位置と力の混成制御などの複雑な制御や、力センサ、触覚、視覚など多種のセンサの利用を行う。そのようにして実現された動作により確実な単位作業の実行を保証する。計算機内の環境データに基づいてロボットを動作させる場合、実環境との誤差により確実な作業の達成が難しくなるが、それもスキルのレベルで確実に動作するように工夫する。

このようにスキルを導入して複雑な制御をそのレベル

原稿受付 1990 年 1 月 27 日

\* 電子技術総合研究所

で行なうことにより、上位のシステムではその複雑な制御モードを意識する必要がないため、人間によるプログラミングも容易になるし、プランニングシステムによる動作計画も容易になる。例えば、平井らが行った接触状態遷移に基づく組立作業計画は、その状態遷移に対応するスキルを呼び出すことにより容易に実現されることになる。また、スキルによる動作記述と言うのは、対象作業に必要な基本動作として抽出されたものに基づいており、ハードウェアによらない抽象化を行なっていると言える。すなわち、異なるマニピュレータを用いても作業に必要なスキルが実行できるようになっていれば、同じプログラムにより作業を実行することができる。

本論文では具体的に、組立作業を対象作業として、スキルに基づくマニピュレーションシステムの構築について述べる。まず組立作業を与えられた接触状態の達成という観点でとらえ、多角形平面内組立作業における接触状態の解析を行なう。それに基づき各状態間の遷移に必要な動作を組立動作のスキルとして抽出する。そして、それらのスキルを DD マニピュレータ：ETA 3 を用いて実現し、実際に多面体の組立作業に適用する。

## 2. 多角形の接触状態の解析

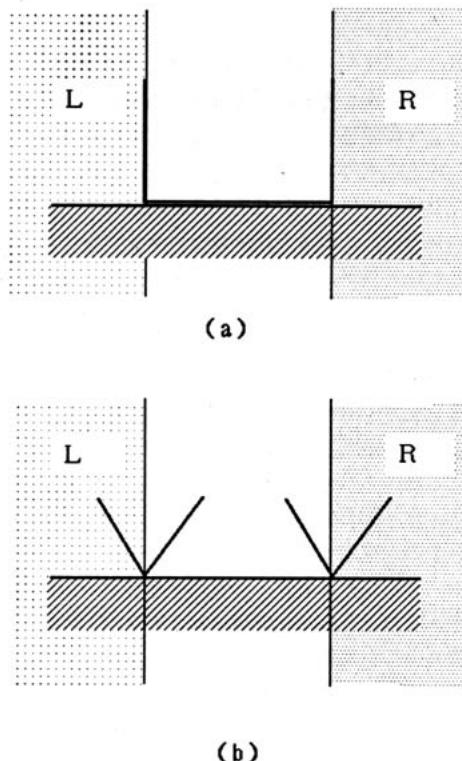


Fig. 2 Contact of two edges

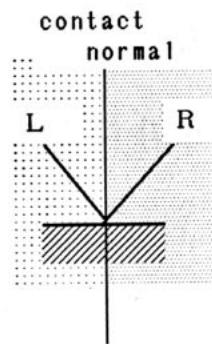


Fig. 1 Contact of edge and vertex

### 2.1 多角形の接触状態

多角形の接触を考えると、頂点と辺の接触 (Fig. 1), 辺と辺の接触 (Fig. 2 (a)), 凸頂点と凹頂点の接触 (Fig. 3 (a)), 凸頂点と凸頂点の接触 (Fig. 4 (a)) がある。文献 7 では平面内運動に関して、環境に固定された物体と、マニピュレータなどに把持された可動体との接触状態を運動の瞬間中心を用いて解析している。本章でもそれに基づいて解析を行う。

Fig. 1 の接触では、頂点と辺は、それぞれマニピュレータに把持された可動体、環境中の固定物のどちらであってもよい。頂点側を可動体とすると接触を維持するよ

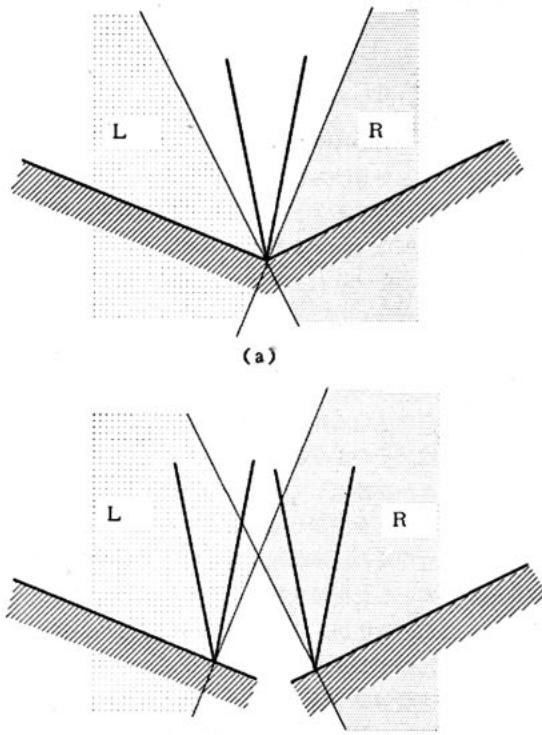


Fig. 3 Contact of convex and concave vertices

うな運動の瞬間中心（拘束中心）は接触の辺の法線上である。接触から離脱する運動の離脱中心領域はそれぞれ図中の L, R の領域となる。L は左回りの回転による離脱中心域であり、R は右回りの回転による離脱中心域である。ここでは、同じ頂点が同じ辺の上にある状態を同じ接触状態と考えることにする。

このように運動に対する拘束を考えた場合、Fig. 2 (a), Fig. 3 (a) の状態はそれぞれ Fig. 2 (b), Fig. 3 (b) のように 2 つの Fig. 1 の接触の組合せとして扱うことができる。

また、Fig. 4 (a) の状態は実際には瞬間にしかありえず、安定した状態は Fig. 4 (b) の 4 つの中のいずれかの状態である。Fig. 4 (a) の状態はこれらの状態間を縦横の矢印の向きに遷移するときに瞬間に通過されると考える。Fig. 4 (b) の対角線方向の遷移を行うときに、Fig. 4 (a) を通過することは並進運動の方向を逆

転させなくてはならずきわめて困難であり、通常は Fig. 2 の 2 点接触の状態を通過することが多い。

以上から多角形の接触状態の基本は Fig. 1 の頂点と辺による 1 点接触であることが分かる。

## 2.2 接触状態を維持する運動

1 つの基本接触（頂点と辺の接触）により、その接触を維持したまま可能な運動の自由度は 1 つ減る。平面運動の自由度は 3 なので、0 から 3 の基本接觸によってえられる接觸状態を考えれば十分である。以下ではそれぞれの接觸状態で可能な運動がどのようなものかを考察する。

### 0 点接觸：

運動に対する拘束は存在せず、接觸が生じない限り任意の動作が可能である。

### 1 点接觸：

運動の瞬間中心が接觸法線上にあるような運動が接觸

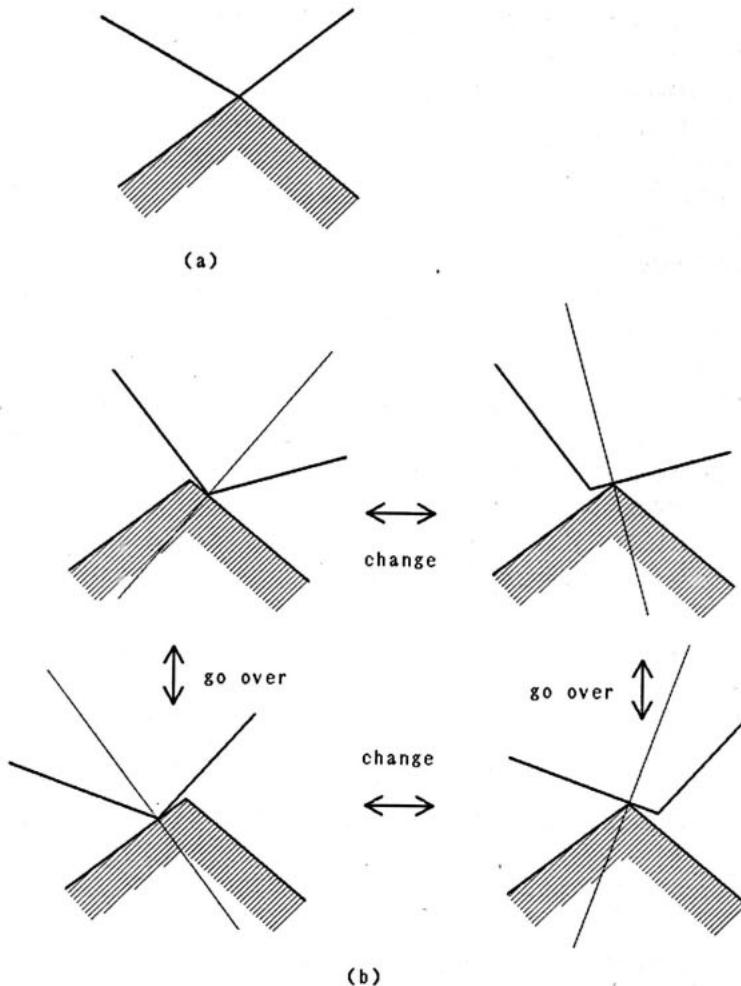


Fig. 4 Contact of two convex vertices

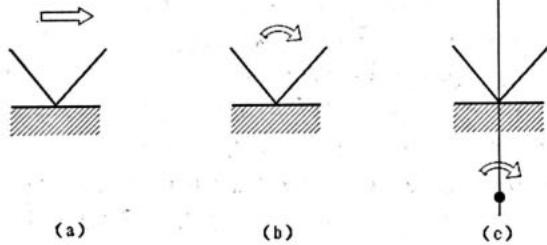


Fig. 5 Motions keeping one-point contact

を維持する運動となる。

このような運動の自由度は2であり、接線法線上の任意の異なる2点を中心とする回転運動に分解できる。無限遠点に回転中心を持つ並進運動と接点を中心とする回転運動は、それぞれその運動の回転中心を変化させずに運動を持続できるので動作を実現しやすい。

すなわち、可能な運動は

- 1) 接線方向の並進動作 (Fig. 5 (a))
- 2) 接触点を中心とする回転動作 (Fig. 5 (b))
- 3) およびその合成 (Fig. 5 (c))

のうちの任意のものである。

いずれの場合も接觸維持のためには法線方向に押しつける力制御を行なうことになる。

#### 2点接触：

拘束中心は2つの接線法線の交点であり、瞬間的な拘束中心回りの回転をつなぎ合わせたものが唯一可能な運動である。

一般には運動により拘束中心の位置が変化するのでそれに伴って回転中心を変化させる必要がある (Fig. 6)。この動作を「滑らし動作(2点ならい動作)」と呼ぶことにする。Fig. 2, Fig. 3 の辺接觸、凸頂点と凹頂点の接觸などの代表的な接觸の場合は、回転中心を変化させずに接觸を維持する運動が可能である。

すなわち、Fig. 2 では無限遠点に拘束中心があり、接線方向の並進運動、Fig. 3 の場合は接点を中心とする回転運動が可能である。

可能な運動をまとめると、

- 1) 滑らし動作：一般的な2点接觸。
  - 2) 接線方向の並進動作：辺接觸で代表される、2つの接觸の辺が平行な場合。
  - 3) 接触点を中心とする回転動作：凸頂点と凹頂点の接觸で代表される、2つの接觸点が一致している場合。
- となる。場合に応じて、1, 2, 3のいずれか1つが可能な運動となる。

接觸を維持するためには、Fig. 7 のように拘束中心

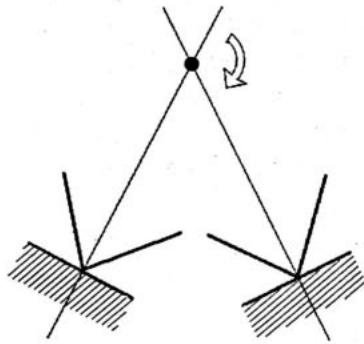


Fig. 6 Two-point profiling motion

と2つの接点の位置にジョイントをもつ仮想的なリンク機構を導入して、拘束中心回りは位置制御を行い、接点位置のジョイント回りはそれぞれもう一方の接觸を維持するための力制御を行う。このような制御を行えば接点上で大きな摩擦があっても力制御による接觸の維持が可能となる。

#### 3点接觸：

一般に3点接觸では Fig. 8 のように3つの接線法線は1点で交わらず、運動は不可能である。このような3点接觸を実現することにより物体の相対的位置・姿勢は完全に定まることになる。この状態での運動が不可能であるので、これ以上の接觸点が新たにつけ加わることはありえない。

#### 冗長な接觸：

Fig. 2 (a) の辺接觸は辺の間の点も接觸しており、無限遠点の接觸ができる。しかし、物体の運動に対する拘束を考えると、両端の2点の接觸による拘束と同じである。また、この接觸状態の実現を考えた場合には、両端の2点の接觸を実現すれば、他の点は同時に実現される。すなわち、中間の点については、接觸の実

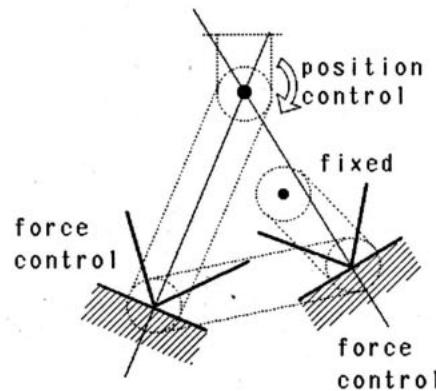


Fig. 7 Motion control under the constraint of two-point contact

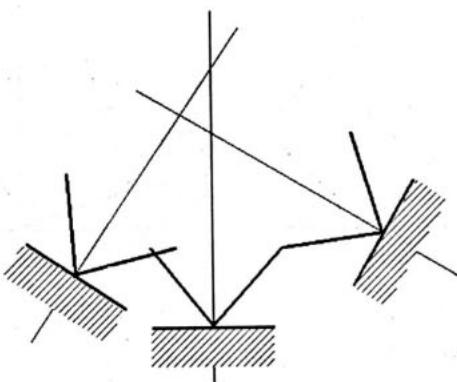


Fig. 8 Three-point contact

現を考慮する必要がないということになる。

このように、①運動に対する拘束が、他の点の与える拘束に含まれる、②他の点の接触と付隨的に実現される、のような接触は冗長な接触であり組立作業を実現する上で考慮する必要のない接触といえる。

**Fig. 9** のいわゆる両側拘束と呼ばれる状態を考える。この状態は、3点接触でも運動が可能な状態である。しかし、接触を維持する動作は2点接触の状態と同じものである。このように、接触を維持する動作に関してはこの3点は冗長であるといえる。またクリアランスを考慮すれば実際には3点で接触することはありえないであろう。ただし、離脱領域は2点接触とは異なっている。すなわち、この状態から接触点の数を減少させるとか、接触点の少ない状態からこの状態を達成する動作は、他の2点接触の場合と異なる。

### 2.3 接触状態を変化させるための動作

いつでも必ず同時に接触するような複数の接触は、そのうちの1つの接触にだけ着目して実現すればよい。一般には、どの接触が先に生じるか任意性がある。そのような場合には、複数の接触が同時に発生するというのも、むしろ例外的な状況であり、その実現には工夫が必要となる。このような場合には、先に達成すべき接触を積極的に選択することにより、接触状態を確定的なものとして確実に実現していくのが簡単な方法であろう。したがって本論文では、着目している多数の接触を同時に変化させることは考えない。

よって、接触状態の変化は、①接触している頂点と辺は変化するが接触点の数は変化しない場合、②新たに1つの新しい接触が生じる場合、③1つの接触がなくなる場合、の3つに分類される。

③の離脱動作は②の逆の動作であり、接触の検出も不要であるため接触状態を維持する運動が実現できていればよい。よって、③は②に含めて議論する。

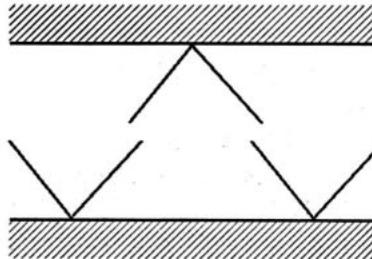


Fig. 9 Three-point contact which gives same constraint of two-point contact

状態を変化させる動作は残りの変化しない接觸については前節で求めた接觸を維持する運動を行い、接觸状態の変化を検出して動作を終了することになる。

この検出には、触覚、力覚などさまざまなセンサの利用が考えられる。ここでは、拘束状態の変化が動作に及ぼす影響を観測することによって検出することを検討する。

その影響は、行っている運動方向へのものと、その他の方向へのものと分けられる。運動方向への影響は、抵抗の増大、運動の停止などとして観測される。その他の方向への影響は、運動方向の変化、すなわち運動の瞬間中心の位置の変化として観測される。

それぞれの影響の出現の仕方は動作の制御により異なるので、適当な検出方法を選ぶ必要がある。

#### 2.3.1 接触点の数が変化しない状態遷移動作

接觸点の数が変化しないということは1つの接觸に注目すれば、①1つの頂点が相手の隣合う辺の間を移動する場合（乗り越え動作）（Fig. 4 (b) の縦方向の変化）、②2つの物体の頂点と辺とが入れ替わる場合（乗り換え動作）（Fig. 4 (b) の横方向の変化）、がある。

これらは凸頂点と凸頂点の接觸状態を瞬間に通過する。

#### 1点接觸での状態遷移

接觸の辺上の位置を変えなくてはならないので、1点接觸で可能な運動のうち接觸点を中心とした回転運動では、乗り越え、乗り換えは生じない。よって、接線方向の並進運動を主として運動を行うことになる。

このとき、並進運動の運動方向への抵抗が状態変化時に増大しないため、抵抗増大による検出は難しい。それぞれの接觸状態において運動中心はFig. 4 のそれぞれの接觸法線上にある。この運動中心の変化により状態変化を検出することができる。

#### 2点接觸での状態遷移

2点接觸の場合、可能な運動は一意に決まっている。 $1 \rightarrow 1'$  と同様で接觸点を中心とした回転運動では、乗り越え、乗り換えは生じない。すなわち、凸頂点と凹頂

点の接触ではこの状態遷移はありえないということになる (Fig. 3 (a)). 滑らし運動 (Fig. 10, 11) または並進運動が可能な場合のみ状態を遷移させることができる。

運動中心は、2つの接触法線の交点であり、状態変化により大きく変化する。この運動中心の変化を観測することにより、状態変化を検出することができる。

例えば、Fig. 10 (b) は右側からの突き当動作 (2.3.3に後述) により達成可能であり、Fig. 10 (a) から乗り越え動作を行う必要はない。このように、目標とする頂点と辺の接触が直接達成できるなら、これらの動作は不要である。これらの動作は大域的な幾何形状などから直接達成することが困難な接触を実現するのに用いられることになる。

Fig. 11 (b) などがその典型的な例であろう。クリアランスが小さい場合には、Fig. 11 (b) を直接達成するのは非常に難しい。Fig. 11 (b) の状態を達成するためには、まず比較的容易に達成される Fig. 11 (a) の2点接触状態を作り出す。Fig. 11 (a) の2点接触をガイドとして利用し、これを維持しながら動作することにより、乗り換え動作を行い、Fig. 11 (b) の状態が確実に達成されることになる。

この動作は組立作業ではよく現れ、重要な動作なので、これを特に「はめ合い動作」と区別して呼ぶことにする。

### 2.3.2 新たに1つの接触が生じる動作

これら動作は、新たに生じさせたい接触点がすでに存在するものとして、その1点だけを離脱させる離脱運動を考え、その逆動作として求めることができる。

可能な動作が複数ある場合は、制御の容易さ、大域的な幾何条件などを考慮することになる。ここでは制御の容易さの視点から利用価値の高い動作を考える。

大域的な幾何条件などによりその動作が困難な場合は、同じ接触状態での移動、乗り換え、乗り越え動作などを併用すればよい。

#### 1点接触の達成：

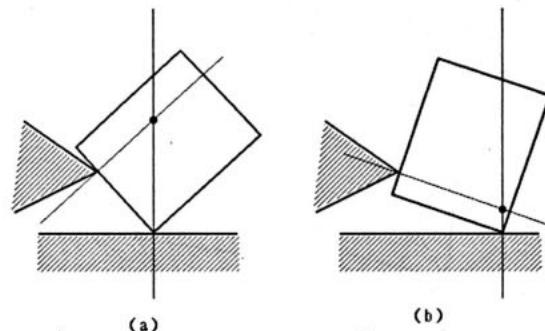


Fig. 10 Vertex goes over the other vertex

1点接触状態からの離脱には、頂点が接触の辺の法線方向外側に速度成分を持てばよい（辺側が可動体の場合はその逆）。最も簡単にはその方向の並進運動である。

逆に接触を生じさせるためには目標とする接触付近で接触の辺に向けて法線方向の並進運動を行い、接触を検出して停止すればよい (Fig. 12)。接触は運動方向の抵抗の増大により検出することができる。この動作を「突き当動作」と呼ぶことにする。

#### 2点接触の達成：

2点接触の状態で、2つの辺が平行でなければ、一方の接触の接線方向の並進運動により、その接触を維持したままもう一方の接触から離脱することができる。逆に、1点接触の状態で目標の2点接触に近い位置・姿勢にして、その1点接触を維持しつつ接線方向に並進運動を行い、接触を検出して停止すれば、第2の接触が実現できる (Fig. 13)。運動方向の制御は前述の突き当動作と全く同様である。法線方向には接触の維持のための力制御が必要であるが、それらは互いに独立に制御できることからこの動作も「突き当動作」と呼ぶことにする。2つの接触の辺が平行な場合は、回転運動によって第2の接触を生じさせる必要がある。同じ向きで平行な状態は典型的には Fig. 14 の辺合わせにおいて生じるもの

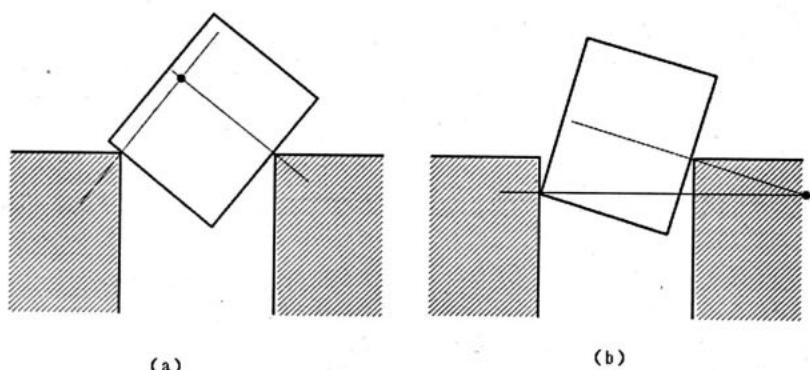


Fig. 11 Motion changes contact and uncontact vertices

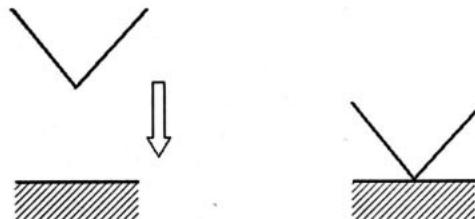


Fig. 12 Touch motion

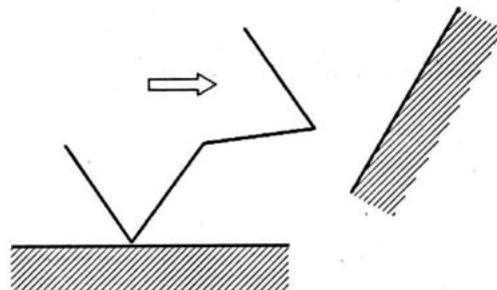
で、これを「辺合わせ動作」と呼ぶことにする。このような場合には、その回転に対して接触後にも離脱中心域が存在し、運動は自動的には停止しにくい。よって、運動方向の抵抗の変化を利用して接触検出の適用は難しい。この場合は、Fig. 14(a), (c)において運動中心がそれぞれの接触法線上にあることを利用して Fig. 14(b)の状態を検出することになる。

**Fig. 15** のように向かい合っている場合は、その回転に対して接触後の離脱中心域が存在せず運動は停止しやすい。これは突き当て動作の回転運動版と言えるので「回転突き当て動作」と呼ぶことにする。

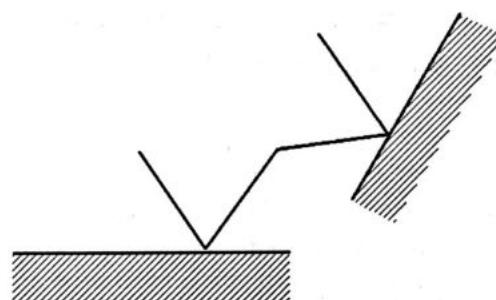
### 3点接触の達成：

3点接触の状態からの離脱動作において、3点のうち2点の接触を維持しながら他の1点の接触を離脱するためには、維持すべき2点の接触法線の交点を中心として他の1点から離脱する方向に滑らし運動すればよい。

逆に、その状態に近い2点接触からその拘束中心回りに逆方向に滑らし運動させれば、第3の接触が実現する。この動作を「滑らし当て動作」と呼ぶこととする (Fig. 16)。Fig. 16の場合、C点が接触した後さらに同じ方向に回転を続けると、Fig. 16(a)の3点の接触を維持することはできず、回転中心はZ点から左離脱中心域に移る。この変化を観測することにより、C点の接触を検出することができる。



(a)



(b)

Fig. 13 Touch motion from one-point contact to two-point contact

実際の組立作業の場合は3点接触は辺と辺が接している状態を含むことが多い。その場合は、まず辺のあった状態を達成して、その接線方向の並進運動による「突き当て動作」を行なえばよい。

また凸頂点と凹頂点の接触を含む場合は、その接触を先に実現することにより、「辺合わせ動作」または「回転突き当て動作」により第3の接触を実現できる。

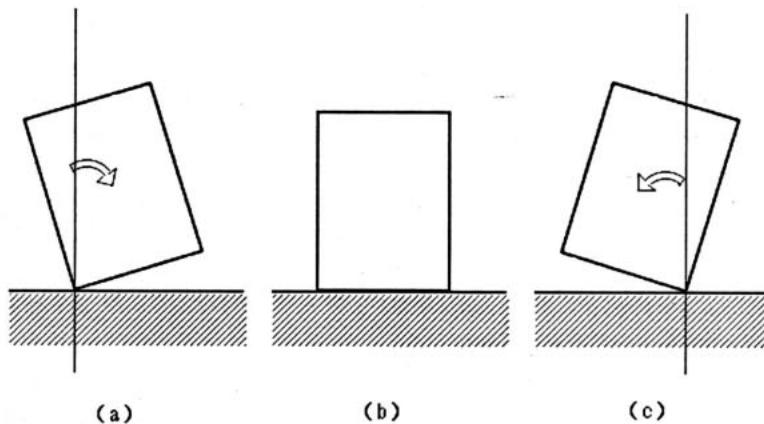


Fig. 14 Edge mating motion

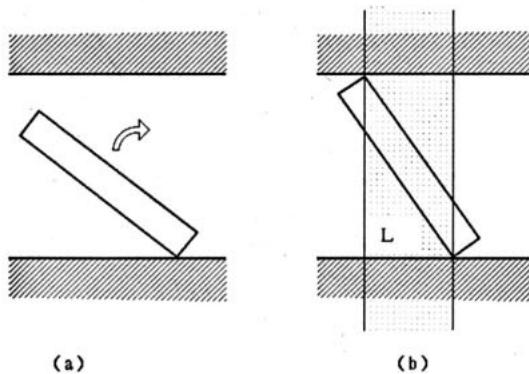


Fig. 15 Touch by rotation

### 3. マニピュレータによるスキルの実現

#### 3.1 多面体組立作業のためのスキル

現実のマニピュレータを用いて3次元環境で作業を行うために、2章で求めた動作を多面体の組立作業に適用することを検討する。

2章で求めた動作は平面運動であったが、三次元組立作業でも特に多面体を対象とする場合は座標系の設定を適切に行えば、多くの場合、それら平面運動の組合せで作業の実行が可能であると考えられる。また逆に、多面体組立作業を実行する場合、それらの動作が全て必要なわけではない。たとえば1点乗り越え動作などのように接触を維持したまま頂点を乗り越えるなどの複雑な動作を必要とすることはまれであり、たいていの場合は接触のない状態から目標とする頂点と辺の接触状態を突き当て動作によって直接に達成できる。このようにいくつかの動作は不要であったり、まれにしか使われなかつたりする。

ここでは、多面体の典型的な組立状態について、それを実現するために必要な動作を求める。3次元多面体の拘束状態を並進運動と回転運動に対する束縛の数によって分類して考えると典型的な組立状態は Table 1 のようになる。表中の記号  $[T_i R_j]_k$  は物体の並進運動の自由度を  $i$  だけ、回転運動の自由度を  $j$  だけ束縛した状態を表す。 $k$  はバリエーションの通し番号である。これらは Table 2 に示すように、突き当て動作 ( $t_i$ )、辺合わせ動作 ( $f_{ij}$ )、はめ合い動作 ( $i_{ij}$ ) およびそれらと力制御 ( $p_{ijk}$ ) の組合せで達成できる。動作の添え字の  $i$ ,  $j$ ,  $k$  は動作に関する座標軸を表わす。 $[t_i]$  は、 $i$  軸方向に突き当て動作を行うことを表わす。 $[f_{ij}]$  は、 $i$  軸回りの回転運動で  $j$  軸方向の辺合わせを行うことを表わす。 $[i_{ij}]$  は、 $i$  軸回りの回転運動で  $j$  軸方向のはめ合い動作を行うことを表わす。 $[p_{ijk}]$  は  $i$ ,  $j$ ,  $k$  軸方向は力制御を行うことを表わす。「&」により先行する動作と力

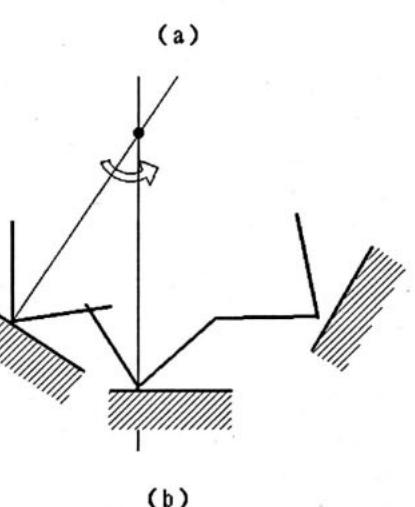
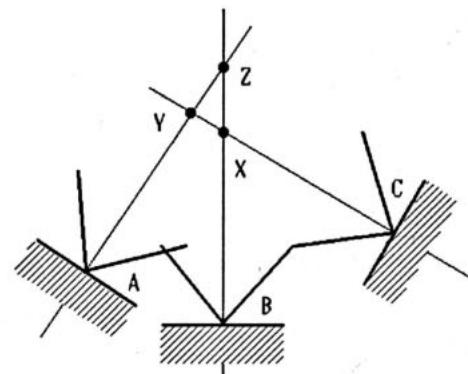


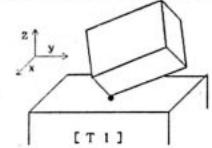
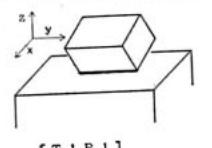
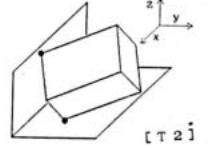
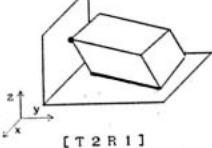
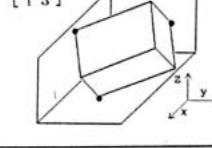
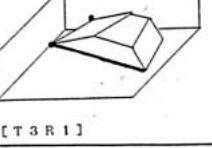
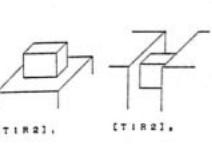
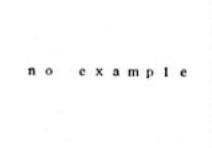
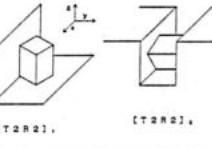
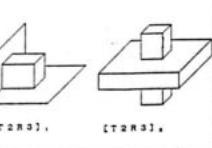
Fig. 16 Touch by two-point profiling

制御を同時にを行うことを表わす。また、すでに達成された状態を利用できる場合は先頭にその状態を書くことによりそこまでの手順を省略して表わすことにする。状態によっては複数の達成手順が存在する場合もあるが、ここではその内の1つだけを示している。

各座標軸は分類表に示す方向を向いているものとする。また、運動方向や力制御の正負や力零制御の指定は煩雑さを避けるために省略する。動作は状態が達成されると予想される運動方向、力制御は片側拘束の場合は状態を維持するための押し付け、両側拘束の場合は力零というようにそれぞれ簡単に決定される。最終状態から位置・姿勢の偏差を与えた無接触状態を初期状態としている。特にはめ合い動作を含む  $[T_1 R_2]_2$ ,  $[T_2 R_3]_2$  の達成手順では初期状態の位置・姿勢の偏差の与え方に注意する必要がある。これについては後の節の DD マニピュレータによる  $[T_2 R_3]_2$  の状態達成の実行例で説明する。

いくつかの典型的な例について Table 2 の手順を言葉で説明すると以下のようになる。

Table 1 Contact States of Polyhedron

		number of constrained rotational freedom	
		0	1
number of constrained translational freedom	0	free	no example
	1	 [T1]	 [T1R1]
	2	 [T2]	 [T2R1]
	3	 [T3]	 [T3R1]
	2	 [T2R2], [T3R2]	 [T3R3], [T2R3]
	3	 [T3R2], [T3R3]	 [T2R3], [T2R2]

[T1] : z 方向に突き当て動作を行う。

[T2] : [T1] の状態を達成した後, z 方向に力制御で押しつけながら y 方向に突き当て動作を行なう。

[T1 R1] : [T1] の状態を達成した後, x 軸回りの回転による y 方向の辺合わせ動作を行う。動作中 z 方向には力制御で押しつける。

[T1 R2] : まず, 初期状態として, はめ合いの一方の辺の頂点が確実に溝にはまるよう傾けておく。その

状態から底面の 1 点が溝の縁に接触するように z 方向に突き当て動作を行う。次に, 側面の 1 点がもう一方の溝の縁に接触するように y 方向に突き当て動作を行う。さらに, 側面が溝の縁に沿うように辺合わせ動作を行う。最後に, はめ合い動作を行い, 底面の接触をもう一方の側面に移す。

以上のように, ここで示した典型的な多面体組立状態は, 座標系を適切に設定することにより, 突き当て動作,

Table 2 Sequences of Skills to Realizing Contact States

```

[T1] : t_z
[T2] : [T1] + t_y & p_z
[T3] : [T2] + t_x & p_yz
[T1 R1] : [T1] + f_xy & p_z
[T2 R1] : [T1 R1] + t_y & p_z
[T3 R1] : [T2 R2] + t_x & p_yz
[T1 R2] : [T1 R1] + f_yx & p_z
[T1 R2] z: t_z + t_y & p_z + f_yz & p_yz + I_xz & p_yz
[T2 R2] z: [T1 R2] z + t_y & p_z
[T2 R2] z: [T1 R2] z + t_z
[T2 R2] z: [T2 R2] z + t_x & p_yz
[T2 R2] z: [T2 R2] z + t_y & p_z
[T2 R3] z: [T2 R2] z + t_y & p_z
[T2 R3] z: t_z + t_x & p_z + (f_yz + t_y) & p_xz + (I_xz + I_yz) & p_xy
[T3 R3] z: [T2 R3] z + t_x & p_yz
[T3 R3] z: [T2 R3] z + t_z

```

辺合わせ動作、はめ合い動作の3つの動作で達成される。このように前節で求めた動作は平面、多角形組立作業の分析に基づくものであるが3次元多面体組立作業にも適用可能なものであることが分かる。

### 3.2 ETA 3 マニピュレーションシステム

実行システムについて簡単に説明する。全体のシステムはDDマニピュレータ：ETA 3、サーボ計算機(micro proc 16)、スキル制御計算機(micro VAX 2)から構成されている(Fig. 17)。

動作プログラムはスキル制御計算機上のETA Lispというリスト言語で記述される。サーボ計算機では、作業に応じた任意の直交座標系での位置と力の混成制御が可能なトルクの直接計算方式による作業座標系サーボを実現している。スキルは数十ミリ秒程度の高速なフィードバックループを構成する必要があるためスキル制御計算機上にC言語によりインプリメントされておりETA Lispのコマンドにより実行される。

組立作業の実験のためにETA 3で実現されている動作は通常の移動命令と力制御および位置制御指令と突き当て動作、辺合わせ動作、はめ合い動作の3つのスキルである。それについて簡単に説明する。

移動命令：

(move pos)…同次変換行列 pos で表わされた位置・姿勢になるように移動する。

力制御指令：

(press axis force) : axis 方向を force で押しつける力制御モードにする。

位置制御指令：

(fix-pos axis k) : axis 方向を位置制御モードにする。k は最大値で正規化したフィードバックゲインである。

press は3.1節の  $p_{ijk}$  に相当する。ただし、座標軸は1つずつ独立に指定する。また、位置制御指令 fix-pos を行わない限り力制御モードが持続する。

制御のための座標系は、作業対象にあわせて任意の位置・姿勢の直交座標系を選ぶことができる。接触法線と力制御の座標軸が一致するように設定を行って、移動命令を実行すると、力制御モードの自由度に対しては位置制御を行わず、目標とした接触を維持しながらの運動が達成できる。

突き当て動作：

(touch axis vel) : ツール座標系での座標軸方向 axis へ速度 vel で並進移動して、接触を検出したら停止するという「突き当て動作」を行なう。

$t_i$  に相当する。axis が i に対応している。

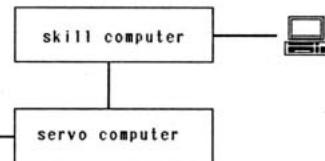


Fig. 17 ETA3 manipulation system

辺合わせ動作：

(fit axis1 avel axis2 thr force) : axis1 の回りに avel で回転運動を行い、axis2 方向の瞬間回転中心の変化を検出すことによって「辺合わせ動作」を行なう。そのときの回転中心の変化の予想中心値を thr で、残りの軸の押し付け方向を force の +/- で表す。

$f_{ij}$  に相当する。axis1 が i, axis2 が j に対応している。

はめ合い動作：

(insert axis1 avel axis2) : axis1 の回りに avel で回転運動し、「はめ合い動作」を行なう。axis2 は挿入方向を示す。

$i_{ij}$  に相当する。axis1 が i, axis2 が j に対応している。

### 3.3 直方体のはめ合い作業

Table 1 に示される多面体の拘束状態を実際にスキルの組合せにより実現することにより本論文の手法の有効性を示す。突き当て動作、辺合わせ動作、はめ合い動作の実現は、それぞれ [T1], [T1 R1], [T1 R2]₂ の達成に対応している。ここではその他の状態のうち最も複雑な手順を必要とする [T2 R3]₂ の達成、すなわち Fig. 18 の直方体のはめ合い作業を例として示す。Fig. 18 で鉛直方向が z 軸、右方向が x 軸、奥行き方向が y 軸となっている。直方体はペークライト製で、大きさは 50×50×150 [mm] で、重さは 500 g である。穴はアクリル製でクリアランスは約 1/10 [mm] である。

この作業の実行手順は Table 2 から

[T2 R3]₂ :

$$\begin{aligned} & t_z + t_x \& p_z + (f_{zy} + t_y) \& p_{xz} \\ & + (i_{xz} + i_{yz}) \& p_{xyz} \end{aligned}$$

であり、プログラムは Fig. 19 のように書かれる。これは Fig. 11 のはめ合い動作を xz 平面、yz 平面で 2 回繰り返すものである。start-position では Fig. 11(a) の状態を実現するために姿勢を傾け、位置も中心からずらしてある (Fig. 18(a), Fig. 19(1))。2 回の突き当てで xz 平面で Fig. 11(a) の状態を達成する (Fig. 18(b), Fig. 19(2~5))。z 軸回りに辺合わせ動作をすることにより xz 平面、yz 平面が分離して操作できるようになる (Fig. 19(6))。y 軸について突き当てる

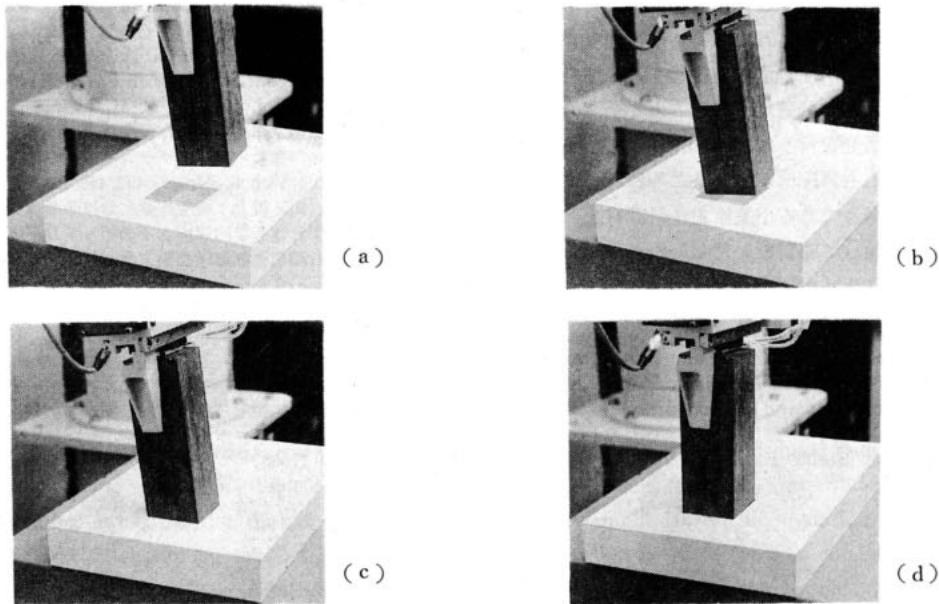


Fig. 18 Execution of insertion task

ことにより  $yz$  平面で Fig. 11 (a) の状態を達成する (Fig. 19 (7)),  $xz$  平面ではめ合い動作を行い (Fig. 18 (c), Fig. 19 (8)), 最後は  $yz$  平面ではめ合い動作を行う (Fig. 18 (d), Fig. 19 (9))。

このようなスキルに基づく作業の実行においては位置合わせの正確さはあまり要求されない。それを確認するために各試行において 1 cm 程度の偏差を意識的にあた

えた。また Fig. 18 (b) でもわかるように  $z$  軸回りの回転も含め姿勢についても偏差をあたえた。このように位置・姿勢に不確定性があるにもかかわらず、同じプログラムで確実なめ合い作業の実行が可能であることが確認できた。

#### 4. 結論

本論文では、マニピュレータによる複雑な作業を実現する手法として、スキルの導入を提案した。

スキルというのは対象作業から抽出された作業を実行するのに必要な基本的な動作のことである。力制御やセンサの利用により、計算機内部のデータと実環境との誤差の吸収や環境への適応などをスキルのレベルで実現する。そのようにして実現された安定な動作により確実な単位作業の実行を保証する。上位のシステムからは、そこで行っている複雑な制御方式を意識することなく、高度な作業を行うことが可能になる。

具体的には、組立作業を対象作業として、スキルに基づくマニピュレーションシステムの構築を行った。まず組立作業を与えられた接触状態の達成という観点でとらえ、多角形平面内組立作業における接触状態の解析を行った。それに基づき多面体を対象として組立動作に必要なスキルを抽出した。そして、それらのスキルのうち重要な「突き当て動作」、「辺合わせ動作」、「め合い動作」などを DD マニピュレータ：ETA 3 を用いて実現した。

また、実際に多面体の組立作業に適用し、計算機内のデータと実環境の間に誤差がある場合にもそれを意識し

(move start-position)	1
(touch 'z -10.0)	2
(press 'z -5.0)	3
(touch 'x -10.0)	4
(press 'x -5.0)	5
(fit 'z 0.05 'y 0.0 -1.0)	6
(touch 'y -10.0)	7
(insert 'x 0.05 'z)	8
(insert 'y 0.05 'z)	9

Fig. 19 Program for insertion task

ない簡単なプログラムにより安定な作業の実行が可能であることを示した。抽出されたスキルは平面多角形組立作業のものであるが、注目する座標軸を限定することにより3次元組立にも十分適用できることを確認した。

最後に、この研究を行うにあたって日頃お世話になっている電子技術総合研究所知能システム部、弓場部長、ETA Lisp の開発者である小笠原主任研究官はじめ、いろいろ、ご討論、ご助言をいただいたロボット研究グループの皆さまに深く感謝致します。

#### 参考文献

- 1) M. T. Mason: Compliance and Force Control for Computer-Controlled Manipulators, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, SMC11-6, 418/432 (1981)
- 2) N. Hogan: Stable Execution of Contact Tasks Using Impedance Control, IEEE Robotics and Automation, 1047/1054 (1987)
- 3) H. Taki and Y. Sakaue: A Programming System for Intelligent Robots with Force Feedback, Proc. Robot 9, Vol. 1, 11-29/11-41, Detroit (1985)
- 4) 浅田、出海：作業者の動作計測によるハイブリッド制御のための作業教示とプログラム生成、日本ロボット学会誌、JRSJ Vol. 5, No. 6, 452/458 (1987)
- 5) 平井、浅田、得丸：組立作業における物体の接触状態遷移に関する運動学的解析とそのネットワーク表現の自動生成、計測自動制御学会論文集、Vol. 24, No. 4, 406/413 (1988)
- 6) T. Lozano-Pérez, M. T. Mason and R. H. Taylor: Automatic Synthesis of Fine-Motion Strategies for Robots, Int. J. Robotics Research, 3-1, 3/24 (1984)
- 7) 末広、高瀬：接触運動の表現と制御およびその組立作業への応用、日本ロボット学会誌、JRSJ Vol. 6, No. 6, 499/506 (1988)