

「日本ロボット学会誌」（第11巻第2号、1993年3月15日発行）別刷

視覚による組立作業理解のための 作業モデルとそれに基づく動作生成

池内 克史 末広 尚士

(社)日本ロボット学会
Robotics Society of Japan

視覚による組立作業理解のための 作業モデルとそれに基づく動作生成

池内克史* 末広尚士**

Task Model for Assembly Plan from Observation System

Katsushi IKEUCHI* Takashi SUEHIRO**

We have been developing a system which observes a human executing an assembly task, recognizes the task, and generates a robot program to achieve the same task. We call the system Assembly Plan from Observation System (APO system). In order to understand purpose of task operation, it is important to model a task execution procedure. This paper defines a task model for assembly of polyhedral objects. The task is analyzed based on face contacts between an object and other objects. The task model is defined as transition between face contact relations and operation which causes the transition. We also demonstrate an APO system based on the task model.

Key Words: Teaching by showing, Assembly task, Task recognition, Task model, Skill

1. はじめに

ロボットの特長は物理的な構造を大きく変えることなく、さまざまな作業を行うことができる汎用性にある。しかし、ロボットに作業をさせるためには適切な動作の指示が必要であり、それが簡単に行えなければロボットの汎用性は生かされない。

作業動作の教示法としては、人間がマニピュレータを操作して、そのとき得られた動作データを再生することによりロボットに作業を行わせるティーチングプレイバック方式が簡便であり現在でも産業用ロボットでは広く用いられている。しかし、この方法は教示した作業の一部を変更したり他の作業に用いたりすることや、センサや他の装置と組合せることが困難であるなどの問題点がある。

一方でロボット用プログラミング言語により作業動作を記述し、それに基づいてロボットを動作させる方法が開発されてきた¹⁾。しかし、環境が複雑になり、またロ

ボットが高度な機能を持つようになるとプログラミングをすべて人間が行おうとすると負担が大きく、きわめて時間がかかるものとなる。

この負担を軽減するために高レベルロボット言語や自動プログラミングの研究も行われているが^{2~4)}、衝突回避軌道、精密動作、把持、作業手順など、さまざまな問題が含まれておりいずれも完全には解決されていない。

人間によるプログラミングや自動プログラミングを行う場合でも作業環境の情報を入力することは必須である。このため人間による環境データの教示、もしくは視覚システムなどによる環境認識が必要となる。

そこで、我々は視覚システムによる環境認識をさらに押し進めて、対象物体の認識だけでなく、人間が行う作業動作を観察することにより、どのような作業が行われたかの認識を行うことを提案している⁵⁾。そして、認識された作業をロボット用に展開することにより、人間と同じ作業を実行するロボットシステムの開発を行っている。このシステムを我々は Assembly Plan from Observation System、略して APO システムと呼んでいる。

同様な視覚による作業教示の研究としては、山藤、千々松らが pick & place 作業において、対象物の初期位

原稿受付 1992 年 5 月 29 日

* カーネギーメロン大学

** 電子技術総合研究所

置と最終位置の視覚データから移動経路を生成する研究を行っている⁶⁾。國吉、井上、稲葉らは、人間の行う pick & place 作業の連続画像を処理し、記号化された動作列を抽出してマニピュレータのコマンドを生成する研究を行っている^{7,8)}。平井、佐藤らは視覚ではなく、テレオペレーションにおける操作データからの作業理解の研究を行っている⁹⁾。

これらの研究は主として pick & place 作業を対象としている。しかし、一般的に人間とロボットはその構造や利用できるセンサなどさまざまな点で大きく異なっているため、単に pick & place として人間の手や対象物体の位置情報をトレースするだけではロボットを用いて組立作業のような複雑な作業を行わせることは困難である。人間の行った動作が作業の中でどのような目的を持っているかという、いわゆるスキル動作レベルでの意味を抽出することにより、ロボットの動作として展開することが可能となる¹⁰⁾。そのためには行動理解の枠組みとなる作業モデルの構築が不可欠である。

本論文では APO のサブシステムとして具体的に多面体組立作業を対象とし、その作業モデルを構築する。さらに、それに基づき人間の行った組立作業を理解し、同じ作業を実行するロボットシステムを実現する。

2. APO システムの概要

APO システムでは、まず人間が行う組立作業をカメラで観察する。そこから得られた画像から、どのような作業が行われたかを解析して、ロボットが同じ作業を行う。そのために必要な処理はおおよそ以下の 6 つであり、その処理の流れの概略は Fig. 1 のようになる。

○時系列のセグメンテーション

連続画像を、人間の組立作業として意味付け可能な動作単位に対応する部分に区間分けする。

○物体認識

画像から対象物体の認識およびその位置・姿勢の決定を行う。

○作業認識

物体認識の結果から作業モデルに基づいてどのような作業が行われたかを認識する。

○把持状態認識

人間が対象物体をどのように把持したかを認識する。

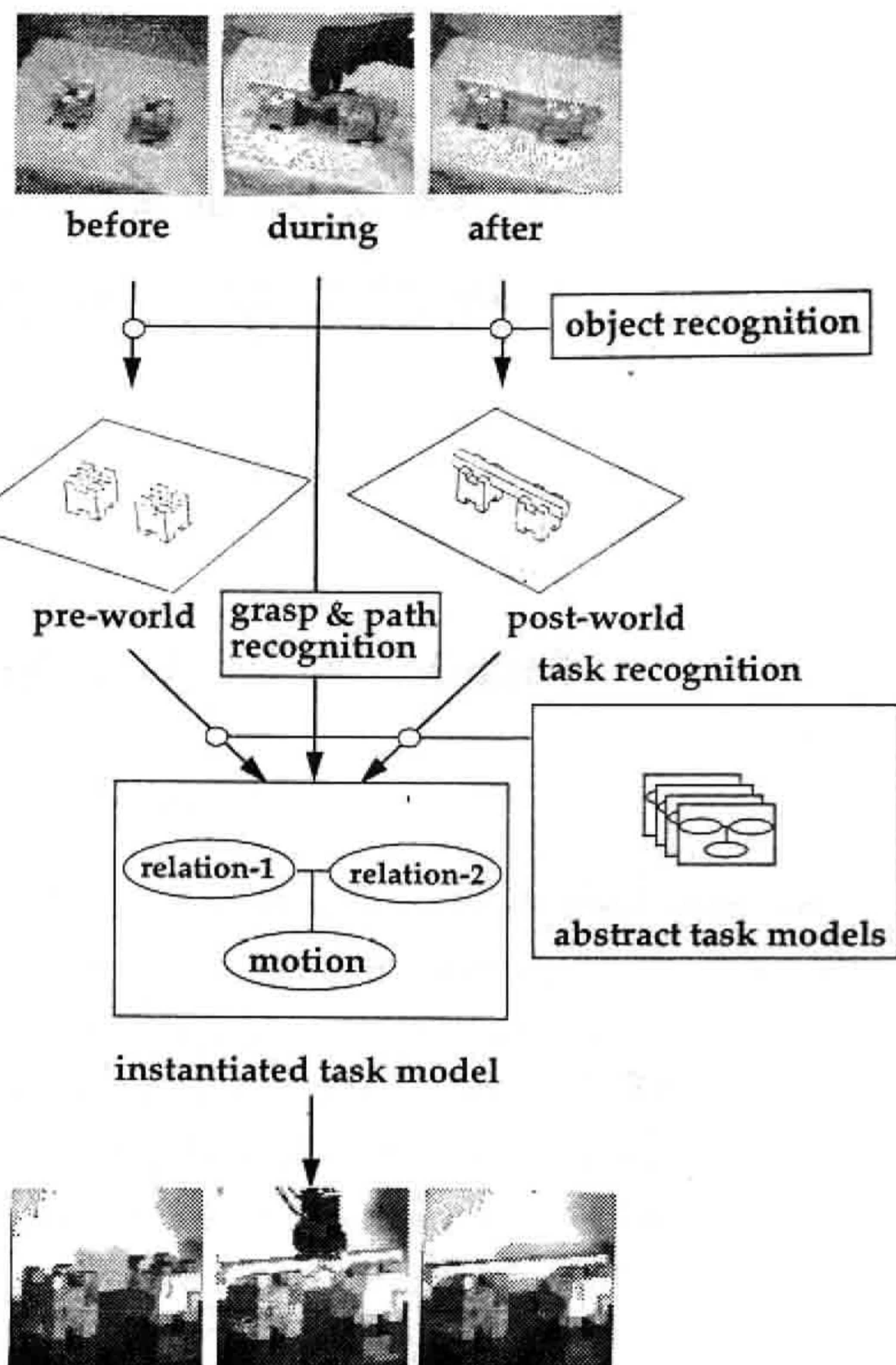
○大域動作認識

人間が対象物体をどのように他の物体との衝突を避けながら移動させたかを認識する。

○作業動作生成

物体認識、把持状態認識、大域動作認識などから必要な動作パラメタを抽出し、認識された作業モデルに基づ

human assembly task



robot assembly task

Fig. 1 Overview of APO system

いてロボットの作業動作を生成する。

このシステムで中心的な役割を果たすのが作業モデルである。人間の行う作業をどのような点に着目して認識するか、把持状態、大域動作のどこに注目するか、作業動作をロボットにどのように実行させるかなど、作業というものをどのようにとらえるかを定義するものである。

組立作業の場合、その目的は複数物体を適切な位置に配置し組み付けることにある。なかでも接触によって決められる位置関係の実現は特に重要である。接触が存在する場合には単なる自由空間の移動とは異なり物体間の干渉により物体運動への拘束が生じる。このため動作の制御に工夫が必要となる。そこで本論文では組立作業動作を適切な接触関係を達成するものと考えることにする。

そこで組立作業を達成されるべき接触関係によって分類して作業モデルの基本表現として用いる。

多面体の接触による運動の拘束の一般的な導出は比留川、松井、高瀬らが行った例がある¹¹⁾。ここでは単に接触による局所的な運動への拘束だけでなく、接触状態の分類、さらには分解・組立動作の導出を考える。

まず 3 章では面接觸の分類を行う。4 章では作業モデル構築の準備として接觸状態間の遷移を整理する。5 章

で各遷移に対応する動作テンプレートを割り付け作業モデルを完成する。6章で作業モデルがどのように APO システムの中で使用されるかを実装システムの動作例で示す。

3. 多面体の面接触状態の分類

ここでは簡単のため面接触状態を基本に運動に対する拘束を考える。同様な面接触状態の分類については文献 12 でも行われている。扱う運動は接触状態での微小な並進運動とする。1つの多面体が環境中の物体と面接触している状況で多面体の運動への拘束を考える。接触面の法線は環境中の物体の外側方向にとる。ここでは拘束された運動の自由度の区別を明確にして、それぞれの運動の自由度数により面接触状態の分類の意味付けを行う。

3.1 面接触と運動方向のガウス球表現

実際に問題となるのは可能な運動の方向であるのでここではガウス球面を用いて可能な運動方向と接触面の法線の関係を示す。接触面はその法線方向に対応したガウス球面上の点で表わす。運動方向もその方向に対応したガウス球面上の点で表わされる。Fig. 2 は面接触状態の各分類の典型例とガウス球面上での接触面の分布と可動方向の領域を示したものである。

接触がないときは全方向に動くことが可能である (Fig. 2 (s))。

面接触が1つ生じると運動方向は法線方向の半空間に制限される (a)。この接触面はガウス球面上の1点で表わされる。可能な運動方向はガウス球面上ではその点を含む半球面 (図中の網かけ部分) となる。この半球面は境界となる大円を含むものである。

接触面が増加すると可動方向はそれぞれの接触面に対応したガウス球面上の半球面の共通領域になる。接触が増えた場合でも、それらの接触面の法線が平行で同じ向きの場合はガウス球面上で同じ点になり運動に対する拘束も同じになる。このように法線が同じ方向の面接触は複数あっても運動に対しては1つの面接触と同じ拘束を与える。

3.2 維持運動と離脱運動

状態 a では接触面の法線に垂直な大円上に方向に微小に動いた場合はその接触を維持する。このような動作を「維持動作」と呼び、その動作の自由度を「維持自由度」と呼ぶことにする。状態 a の維持自由度は 2 である。ちなみに状態 s の維持自由度は 3 ということになる。

他の半球面内の方に動くと接触がなくなり s の状態になる。このように接触が減少する方向に接触状態を変化させる動作を「離脱動作」と呼ぶことにする。この離脱動作は接触面の法線方向の運動と大円上の方の

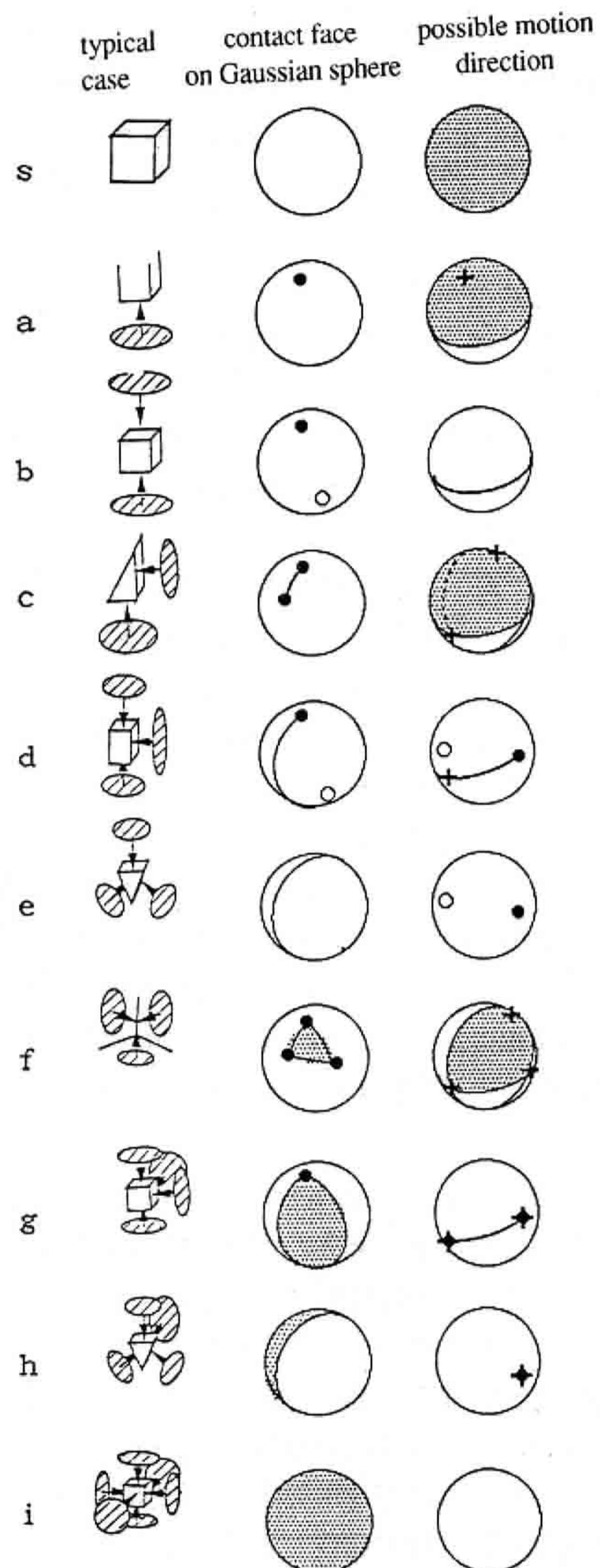


Fig. 2 Classification of face contact states

運動（維持動作）との合成（球面上の凸結合）として考えることができる。すなわち純粹な離脱動作は法線方向の運動である。このように離脱動作から維持動作の成分を除いた純粹な離脱動作の自由度を「離脱自由度」と呼ぶことにする。状態 a では離脱自由度は 1 である。一般的の離脱動作は維持動作と零でない純粹離脱動作の合成として表わされる。

3.3 2 方向接触

接触面が平行で向かい合っている場合、すなわちガウス球面上で両極点に分かれる場合は可動方向は両極を結ぶ軸に垂直な大円上に制限される (b)。図中の白抜きの丸は裏の球面上の点を表わしている。

状態 b の可動方向は大円上である。この場合微小な運

動では接触状態が変化しない。すなわち状態 b の維持自由度は 2 であり、離脱自由度は 0 である。自由空間での並進の 3 自由度のうち 1 つの自由度は向かい合った法線をもつ面によって完全に拘束され、なくなってしまっている。このような自由度を「拘束自由度」と呼ぶことにする。

平行でない場合はそれぞれの接触面が与える可動な半球面の共通領域が作る 2 つの経線で囲まれた球面 2 角形領域に運動が制限される (c)。この拘束は、接触面を表わす 2 点を結ぶ大円の円弧（短い側）の内部の点に対応する接触面が新たに付け加わっても変化せずに、円弧の両端の 2 点で表わされる接触面できまる拘束と同じになる。この円弧の中心角によって、可動空間の領域の大きさが変化するが、円弧が半円を越えない限り同じ種類の拘束として扱える。以下では円弧といった場合は半円を越えないものをさすことにする。

状態 c では、可動方向である球面 2 角形の頂点方向の運動が維持動作であり、維持自由度は 1 である。離脱動作は球面 2 角形の内部の方向であり、これは球面 2 角形の頂点方向に垂直な大円の内部の円弧方向の運動と維持動作との合成になっている。すなわちその円弧方向の動作（図中点線）が純粹離脱動作でありその自由度は 2 である。

ここで円弧の端点方向（図中 + 印）の動作を行うと、その端点を含む球面 2 角形の大円に対応する面接触を維持しつつ、状態 c から離脱することになる。純粹離脱動作は 2 つの端点方向の動作の凸結合により張られる。一般に純粹離脱動作が球面凸多角形内の点として表現されている場合、それらは頂点方向の運動の凸結合により張られる。このように純粹離脱運動の領域を凸結合として張る運動を「基本離脱動作」と呼ぶことにする。

3.4 3 方向接触

状態 b に 1 面付け加わると可動方向は半円になる (d)。この半円は極となる 2 つの端点を含む。接触面を表わす点は両極と 1 点になるが、それが定める半円の上の点に対応する接触面が付け加わっても拘束は変化しない。

状態 d の維持運動は半円の端点方向の運動であり維持自由度は 1 である。基本離脱運動は端点を結ぶ軸に垂直な半円の中央方向の運動であり、離脱自由度は 1 である。拘束自由度は 1 である。

状態 c に 1 面付け加わった場合それを表わす点と他の面を表わす点が円弧に納まるならば状態 c の拘束であり、半円に納まるなら状態 d の拘束である。状態 c の円弧と同じ大円上で半円に納まらず全体に分布するならば可動方向はその大円を含む平面に垂直な 2 つの極方向のみに

なる (e)。大円上にない場合は可動空間は球面 3 角形になる (f)。一般に接触面を表わす点が球面凸多角形で覆われるなら可動方向は接触面を表わす点の球面凸包多角形の各頂点に対応する接触で決まる球面多角形の領域になる。

状態 e は維持運動は両極方向の運動であり、維持自由度は 1 である。離脱運動は存在せず、離脱自由度は 0 である。拘束自由度は 2 である。

状態 f は維持自由度は 0 である。基本離脱運動は球面凸多角形の各頂点方向の運動であり、その頂点を含む 2 つの大円に対応した接触を維持しながら離脱する動作となる。離脱自由度は 3 となる。基本離脱運動は球面凸多角形の頂点方向の運動である。

3.5 その他の接触

状態 d に接触面が増えた場合、接触面を表わす点が半円に納まる場合は同じ状態 d であり、同じ大円上だが半円に納まらず全体に分布すれば状態 e となる。その他の場合、接触面を表わす新しい点と両極点は別な半円を形成し、可動方向は円弧となる (g)。この拘束は 2 つの半円で囲まれた球面 2 角形の内部の点で表わされる接触面が加わっても同じ拘束になる。可動方向の円弧の両端は球面 2 角形の境界の 2 つの半円によって決まる。この維持自由度は 0 である。基本離脱運動は円弧の端点方向の運動であり、離脱自由度は 2 である。

状態 e から接触面が増えた場合は、接触面を表わす点が同じ大円上なら同じ状態 e である。そうでない場合は可動方向は接触面を表わす点と反対の半球の極 1 つになる (h)。この拘束は付け加わった接触面を表わす点と大円とで決まる半球面内の別な点で表わされる接触面がさらに付け加わっても同じ拘束になる。この維持自由度は 0 である。唯一可能な運動方向が基本離脱運動であり離脱自由度は 1 である。

状態 f から接触面が増えた場合、接触面を表わす点の球面凸包多角形が半球面内に納まるなら状態 f である。もともとの球面凸包多角形の頂点のいずれかと反対の点で表わされる面が付け加わった場合は状態 g となる。もともとの球面凸包多角形のいずれかの辺と同じ大円上に並びそれが半円内に納まらないならば状態 h となる。いずれでもなく全球面上に分布するならば可動方向はなくなる (i)。

同様に状態 g に接触面が付け加わった場合は状態 h, i になり、状態 h に接触面がつけ加わった場合は状態 i になる。

状態 i は維持自由度、離脱自由度ともに 0 である。

3.6 接触状態の分類結果

ガウス球面上でと接触面を表わす点を覆う領域と可動

方向および自由度との関係を要約すると **Table 1** のようになる。

用語を要約すると、
維持運動：接触状態を維持する運動
離脱運動：接触が減少する方向に接触状態を変化させる運動
純粋離脱運動：維持運動成分を除いた離脱運動
基本離脱運動：純粋離脱運動の領域を凸結合により張る運動
維持自由度：維持運動の自由度
離脱自由度：純粋離脱運動の自由度
拘束自由度：接触により消失した運動の自由度
また、これらの自由度の間には
全自由度 = 拘束自由度 + 維持自由度 + 離脱自由度の関係がある。

4. 状態間の遷移動作

組立作業の1つのステップは操作している1つまたは1群の物体の初期接触状態から終了接触状態への遷移とを考えることができる。この状態間の遷移を実現する動作のテンプレートをあらかじめ用意しておくことにより任意の組立作業が達成できる。このため本章では状態間遷移を離脱運動を利用して考察する。

4.1 基本離脱運動による状態遷移

離脱自由度がある接触状態からは離脱運動により離脱して離脱自由度が低い状態に移ることができる。接触が増加する方向の状態変化は目標状態の離脱運動の逆の運動として実現される。

Table 1 Contact states

	covering area of contact faces	possible motion directions	degrees of freedom
			maint., detach, const.
s	none	sphere	3 0 0
a	point	semisphere	2 1 0
b	poles	great circle	2 0 1
c	arc	crescent	1 2 0
d	semicircle	semicircle	1 1 1
e	great circle	poles	1 0 2
f	convex polygon	convex polygon	0 3 0
g	crescent	arc	0 2 1
h	semisphere	point	0 1 2
i	sphere	none	0 0 3

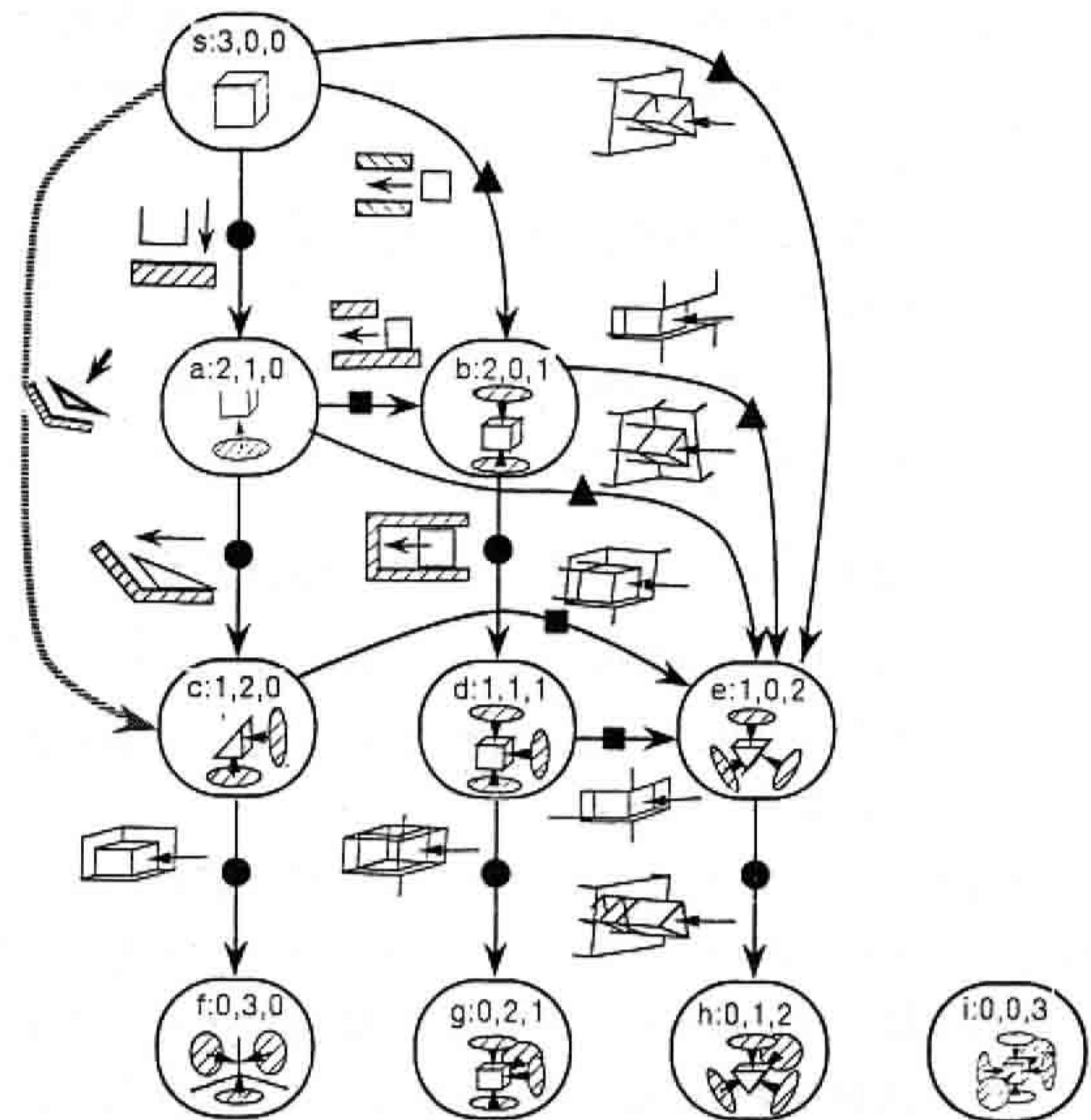


Fig. 3 Transition between contact states

減少した離脱自由度は遷移した状態で維持自由度になる。離脱運動として基本離脱運動を選択するとそれぞれの自由度の変化が1になるような状態遷移を生じることができる。

状態 a の基本離脱運動は接觸面の法線方向の運動であり、その運動により接觸がなくなり状態 s になる。

状態 c の離脱運動は球面2角形の頂点方向を除く2角形領域の運動である。2つの基本離脱運動のどちらかを選べば対応する接觸を維持しつつ他の接觸がなくなり状態 a になる (Fig. 3 の図中 a から c への実線矢印)。また他の純粋離脱運動を選べば状態 s に直接移る (Fig. 3 図中 s から c への点線矢印)。組立時の容易さを考慮すると同時に実現する接觸面の数が少ない方が良いので基本離脱運動すなわち状態 a から状態 c への遷移のみを考えることにする。

同様に状態 d, f, g, h はそれぞれ基本離脱運動を選ぶことにより状態 b, c, d, e に遷移する。

4.2 幾何形状による遷移

状態 b や状態 e などの離脱自由度がない接觸状態は微小動作では接觸の少ない状態へと変化させることができない。このような状態から離脱するためには接觸面の境界を越えるまで維持運動を持続させる必要がある。このとき大域的な幾何形状によって、拘束自由度が低く、維持自由度が大きい状態のどれかに遷移する。

状態 b は、維持運動である大円上のいずれかの方向に移動して接觸している面の境界を越えることによってこの状態から抜け出す。このとき2つの接觸の拘束が同時に失なって状態 s になるか片方だけ失なって状態 a

になる。これらは接触面の形状に依存し必ずしも任意に選ぶことはできない。よって両方の遷移を予め考慮する必要がある。

同様に状態 e は幾何形状により状態 s, a, b, c, d のいずれかに遷移する。

各状態からの状態遷移を Fig. 3 に示す。Fig. 3 の矢印の向きは組立方向を示している。

5. 動作テンプレートの割付と作業モデル

Fig. 3 のそれぞれの遷移に対して分解/組立動作のテンプレートを割り付ければ面接触に基づく任意の組立作業が達成できることになる。

状態 a, c, d, f, g, h からの分解動作は離脱運動方向に微小移動するだけで実現することができる。状態 b, e からの分解動作は幾何形状によって状態変化が生じるまで、その接触の維持運動を持続することにより実現できる。これらの分解動作は単純に移動するだけで実現できるため、状態変化の検出を特に必要としない。

一方、組立動作は接触状態を確実に実現するために力制御やセンサーフィードバックなどの利用が必要となることが多い。

離脱自由度がある状態 a, c, d, f, g, h への組立動作は、それぞれの目標状態での離脱運動の逆を新たな接触が生じるまで行うという、いわゆる突き当て動作によって実現される (Fig. 3●印)¹⁰⁾。

離脱自由度がない状態 b, e への組立動作は維持自由度が同じ状態からの遷移の場合は維持動作による単純な移動により実現される。すなわち a から b および c, d, から e への遷移動作がこれにあたる (Fig. 3■印)。このとき移動前にあった離脱自由度がなくなり拘束自由度になる。

維持自由度が異なる場合は、維持自由度を拘束自由度に変化させるために、いわゆるはめ合い動作を行う必要がある。すなわち s から b および s, a, b から e への遷移動作がこれにあたる (Fig. 3▲印)。

以上をまとめると Table 2 のようになる。

作業モデルは Fig. 4 に示すように、作業動作前の接觸状態と作業動作後の接觸状態、その状態間の遷移を実現する作業動作テンプレート、動作実行に必要なパラメタから構成される。人間が行った作業を観察し対応する作業モデルを見つけだすことにより、どのような作業が行われたかの認識を行うことになる。さらに作業モデルにしたがって、必要なパラメタなどを観察結果から抽出したり、幾何モデルを用いた推論により決定したりする。最終的にはこれらの情報から実際のロボットの動作へ展開される。ロボットの動作を実際にどのような形で実現

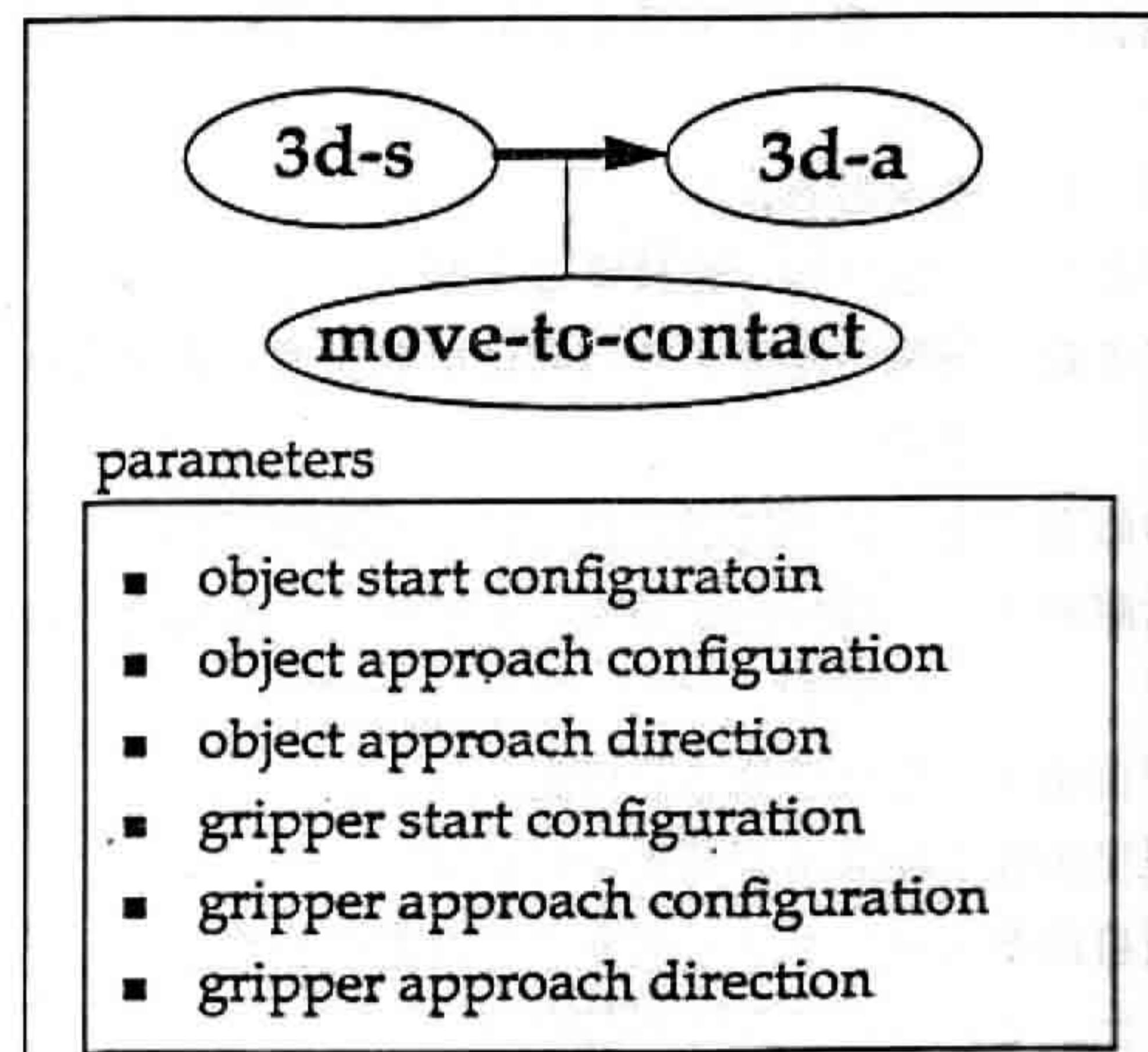


Fig. 4 Task model

Table 2 Classification of transition motions

type of motion	state transition
move	a-b, c-e, d-e
move-to-touch	s-a, a-c, b-d, c-f, d-g, e-h
insert	s-b, s-e, a-e, b-e

するかは個々のロボットシステムに依存する。

6. APO システムへの実装

ここでは以上の結果を用いて、組立作業の 1 ステップを 1 つの物体の初期面接觸状態から終了面接觸状態への遷移動作としてモデル化し、人間が行った動作を作業モデルに基づいて解釈し、割り当てられた動作テンプレートを展開することによって同じ組立作業をマニピュレータによって実行するシステムを実現した。現在のシステムはカメラ、レンジファインダー、4 自由度マニピュレータから構成されている。使用したマニピュレータは力制御、センサーフィードバックなどの機能を備えていないので、組立動作は位置制御のみによる簡略化されたものとなっている。現在のシステムは Fig. 5 に示す 3 種類の物体を対象として扱っている。システムの構成は時系列分割、物体認識、作業モデル識別、作業モデル完成の 4 つのモジュールからなる。ここでは、例を交えながらシステムの動作を説明する。

6.1 時系列分割

システムは組立作業の各ステップで人間の手が画面に現れ、ステップ終了後画面より消えることを仮定している。この仮定の基に連続画像を解析する。0.5 秒ごとに濃淡画像を取り込む。各画像と 1 つ手前の画像の画面全

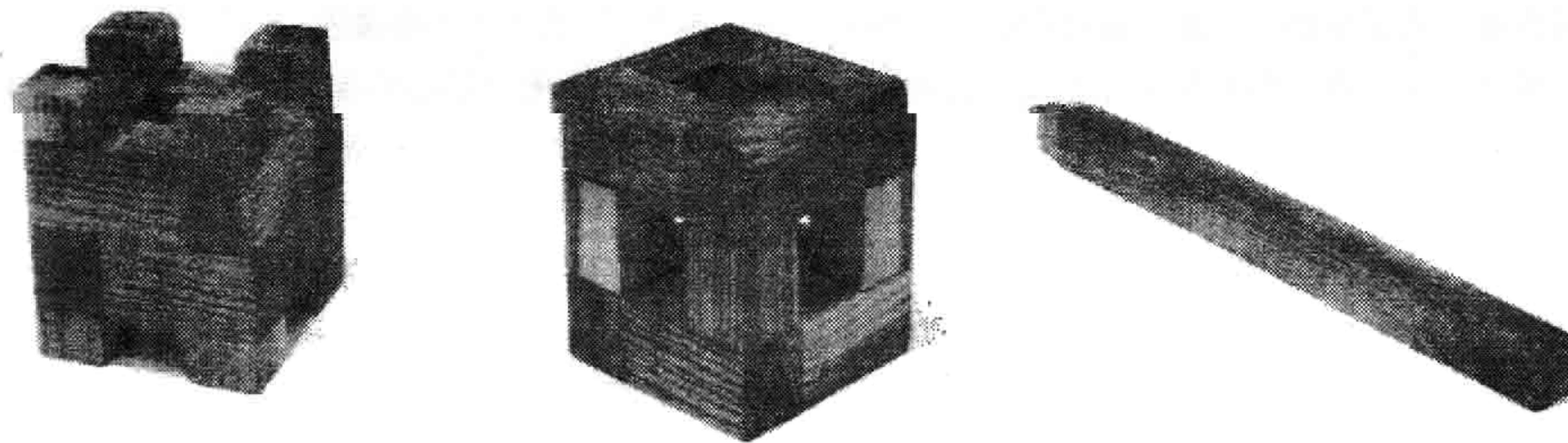


Fig. 5 Castle, block and stick

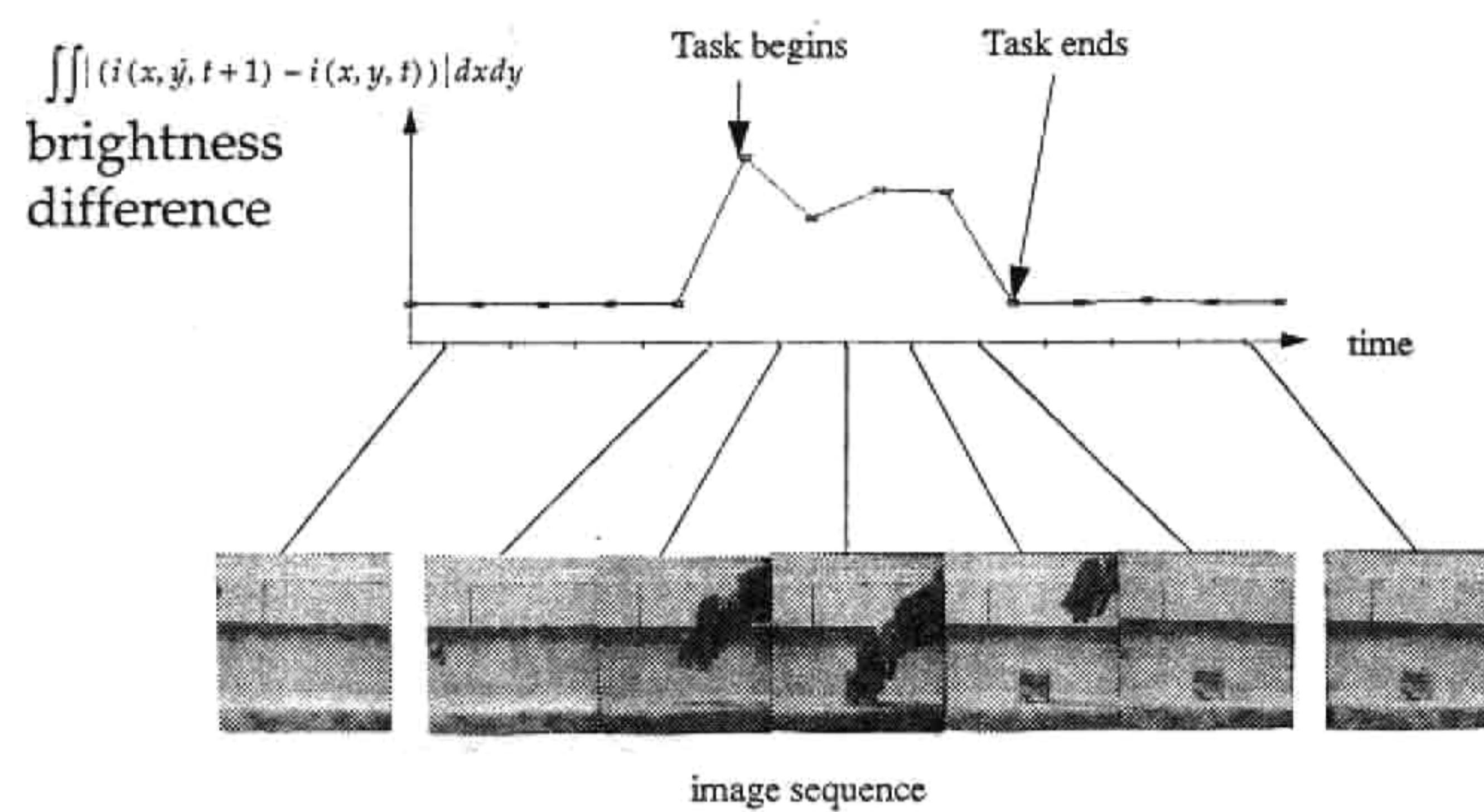


Fig. 6 Brightness change in grey scale image

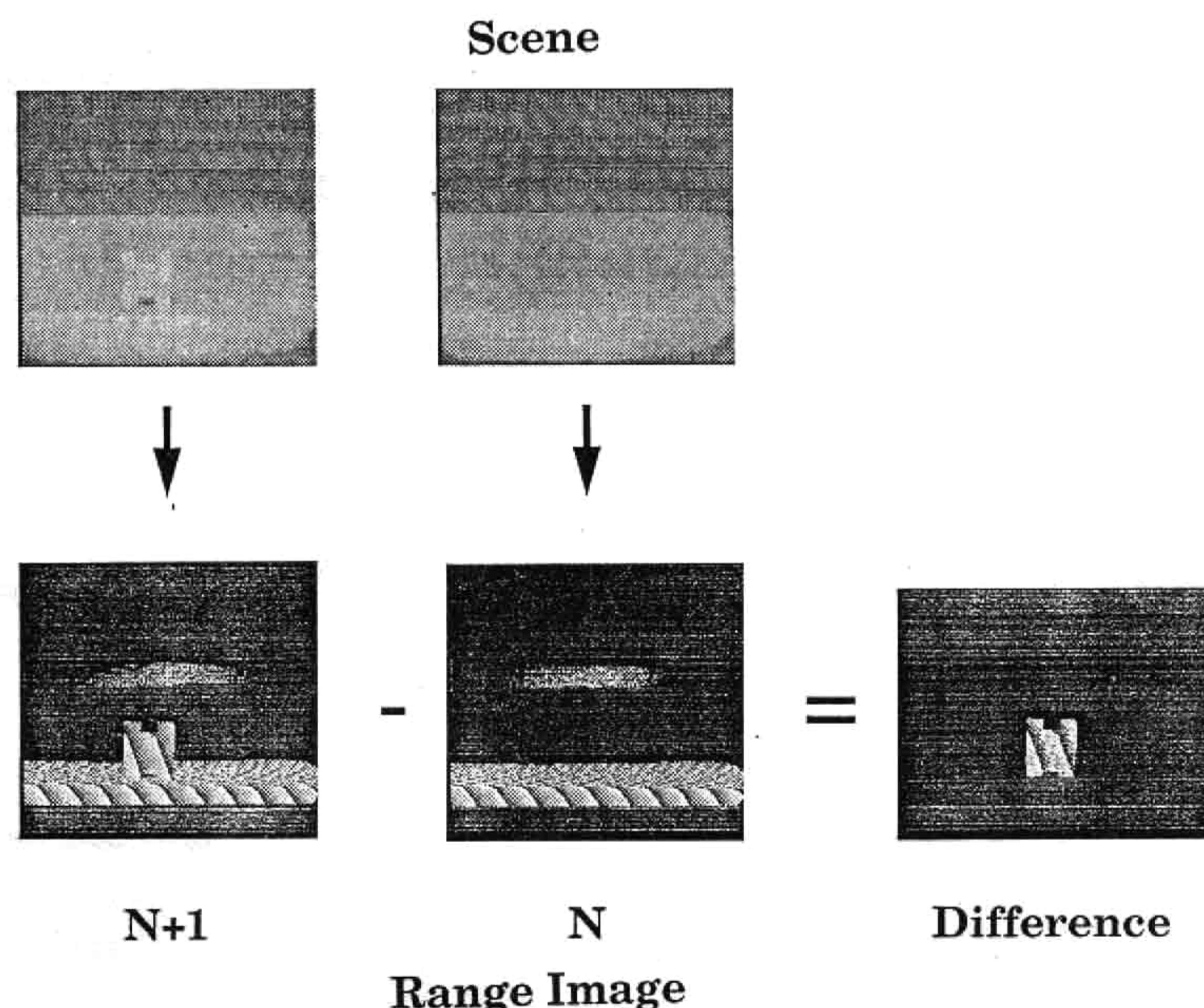


Fig. 7 Difference in range image data

体での差を計算する。作業中は、手と物体の動きにより差の総和は高い。終了後は差の総和は低くなる。差の総和の減少により Fig. 6 に示されたように作業の終了を

知る。

6.2 物体認識

物体認識は濃淡画像でなく距離画像を用いて行われる。

これは、距離画像の方が信頼性が高く処理が容易だからである。先の濃淡画像の差の解析により1つの作業動作の終了を検出すると、約5秒後にレンジファインダ¹³⁾がシステムにより自動的に起動され距離画像を取り込む。

1つ手前のステップ終了後の距離画像と現ステップ終了後の距離画像の差をとる。これにより現ステップで動かされた物体（作業物体）に対応する距離画像が得られる。差を抽出して認識するのは、複雑な背景などによるシステムの誤認識を防ぐためである。Fig. 7ではテーブルや背景の配管に対応する領域が消されている。

差の距離画像に対して、領域分割プログラムを適応し、領域を得る。領域の平面方程式を調べることでオクルージョンなどにより複数に分割された面をつなぎ合わせる。こうして統合された各領域について幾何学特徴を調べ、各領域がモデルのどの面に対応するかを求める。対応結果と幾何モデルから物体の位置姿勢を計算する。その結果を基に、計算機内部にFig. 8のような現在のワールドの幾何モデル表現を作る。

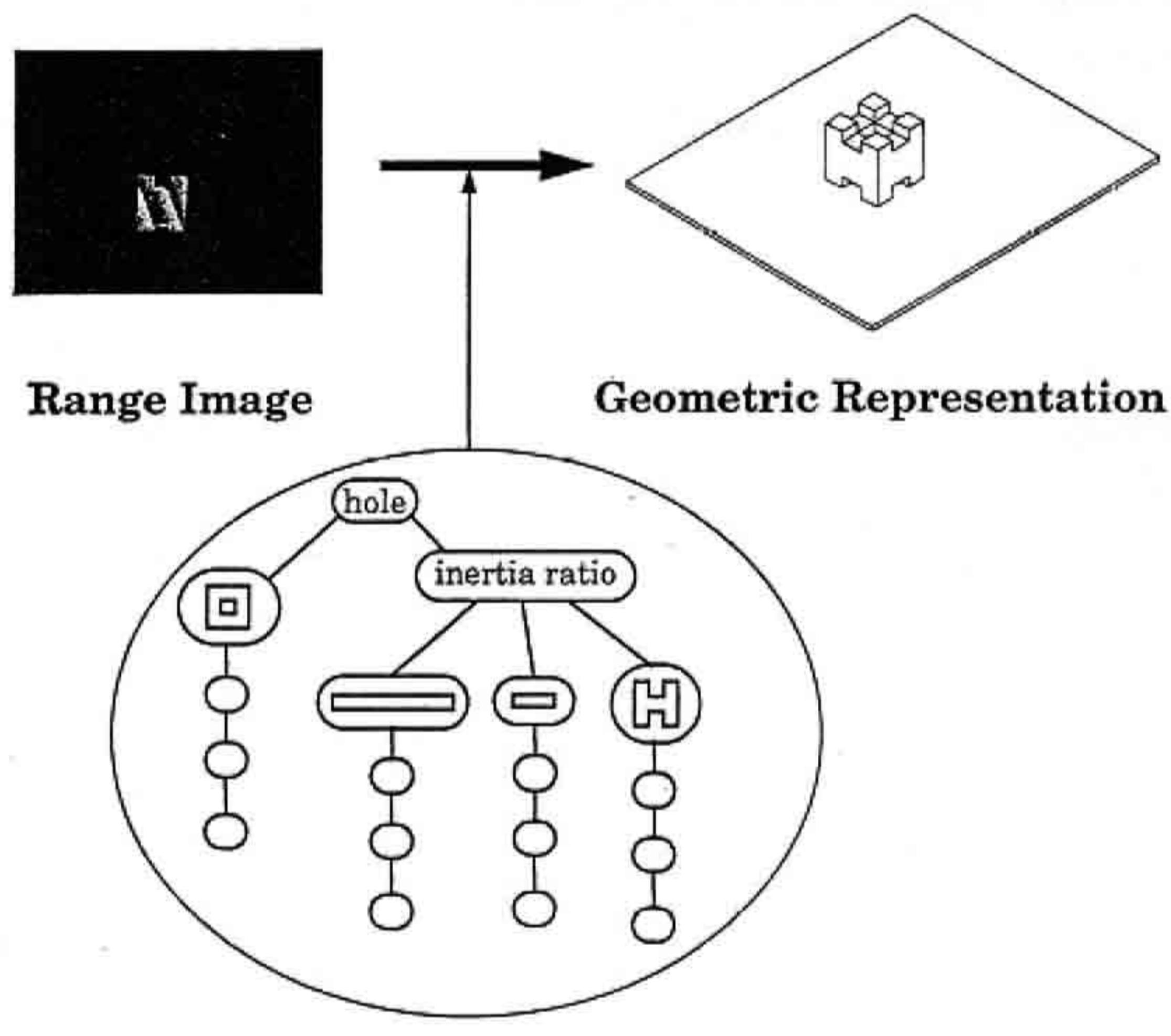


Fig. 8 Object recognition

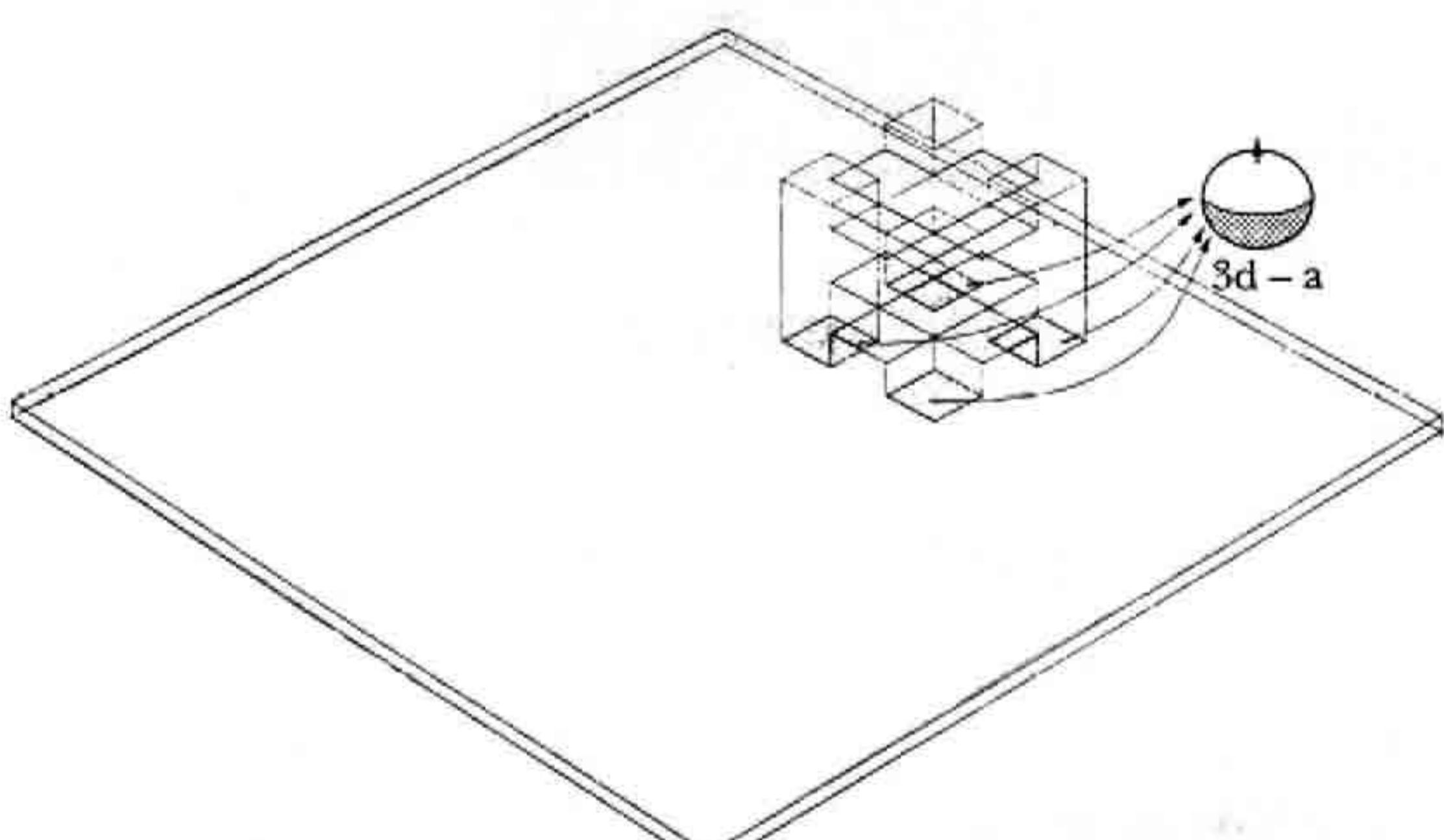


Fig. 9 Extraction of contact state

6.3 作業モデルの識別

人間の作業に対応する作業モデルを識別するために面接触状態の遷移を求める必要がある。ワールドの幾何モデル表現は、操作された物体（操作物体、例では Castle）と以前から存在する物体（環境物体、例ではテーブル）の表現を保持している。この表現を利用して、操作物体と環境物体の各面の方程式を調べる。距離が近く法線の方向が反対の操作、環境物体の面の組を抽出し、これを接触面とする。例では、Castle の4つの底面とそれに対応するテーブルの面の一部が抽出されている。環境物体の接触面の方向分布をガウス球に投影することにより現在の面接触関係が得られる。この例では状態 a と識別される。

作業前の面接触状態を以前のワールド表現より取り出す。この例では Castle は倉庫の床と状態 a の関係にあった。また Castle はテーブルとは接触がなかった。これより、a-to-s の分解（倉庫～空中）と s-to-a の移動（空中～空中）、s-to-a の組立（空中～テーブル）の状態遷移が起こったことが分かる。これによりそれぞれに対応する作業モデルが生成される。

6.4 作業モデルの完成

各作業モデルには動作テンプレートを完成するのに必要なパラメタが記述されている。これらの動作パラメタを幾何モデル内の物体の位置情報に基づいて計算する。得られたパラメタと作業モデル内の動作テンプレートを組み合わせることにより、実行可能な動作列が得られる (Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12) に示すような組立作業を人間に習って実行することができる。

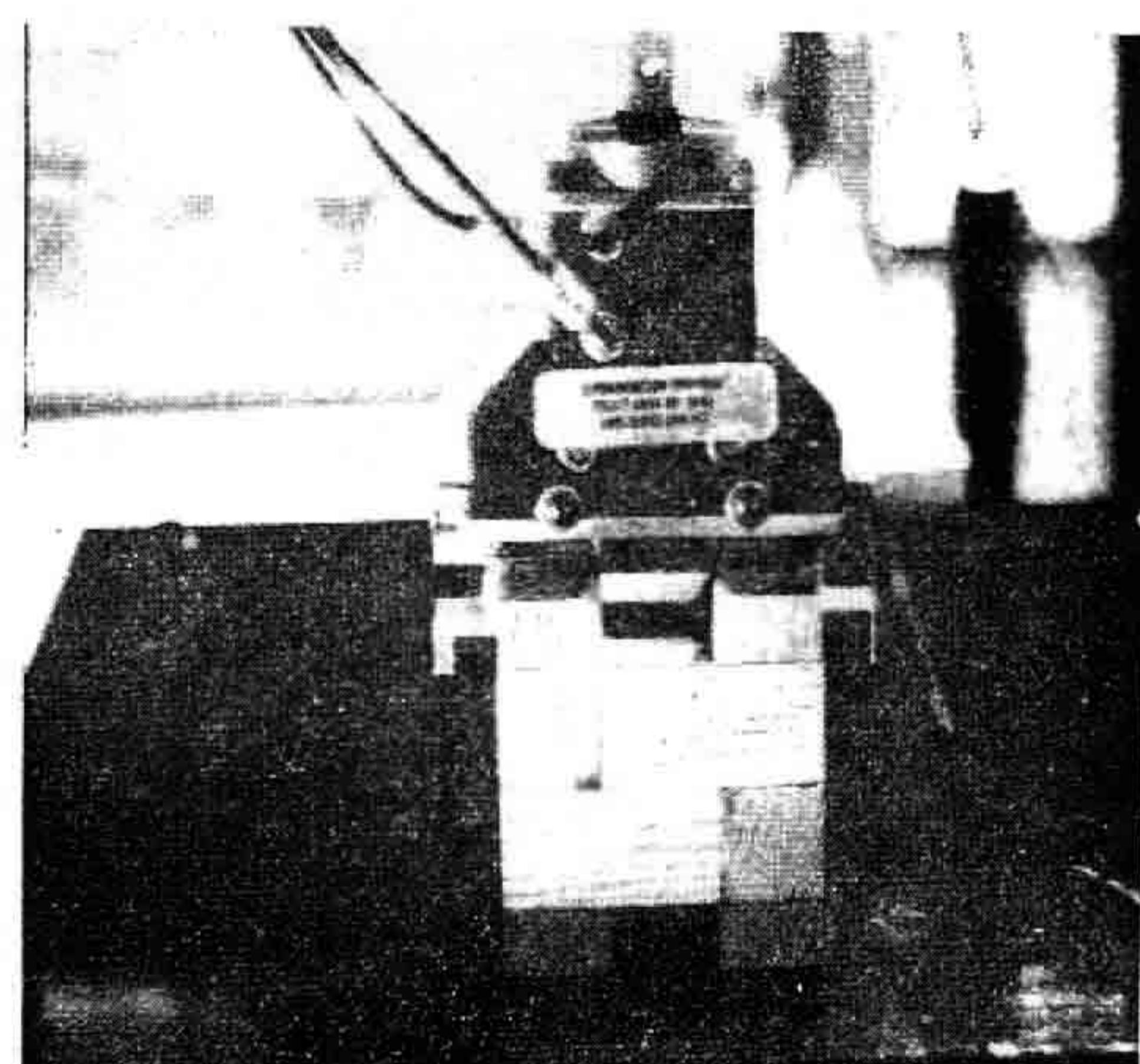


Fig. 10 Put a castle on the work table

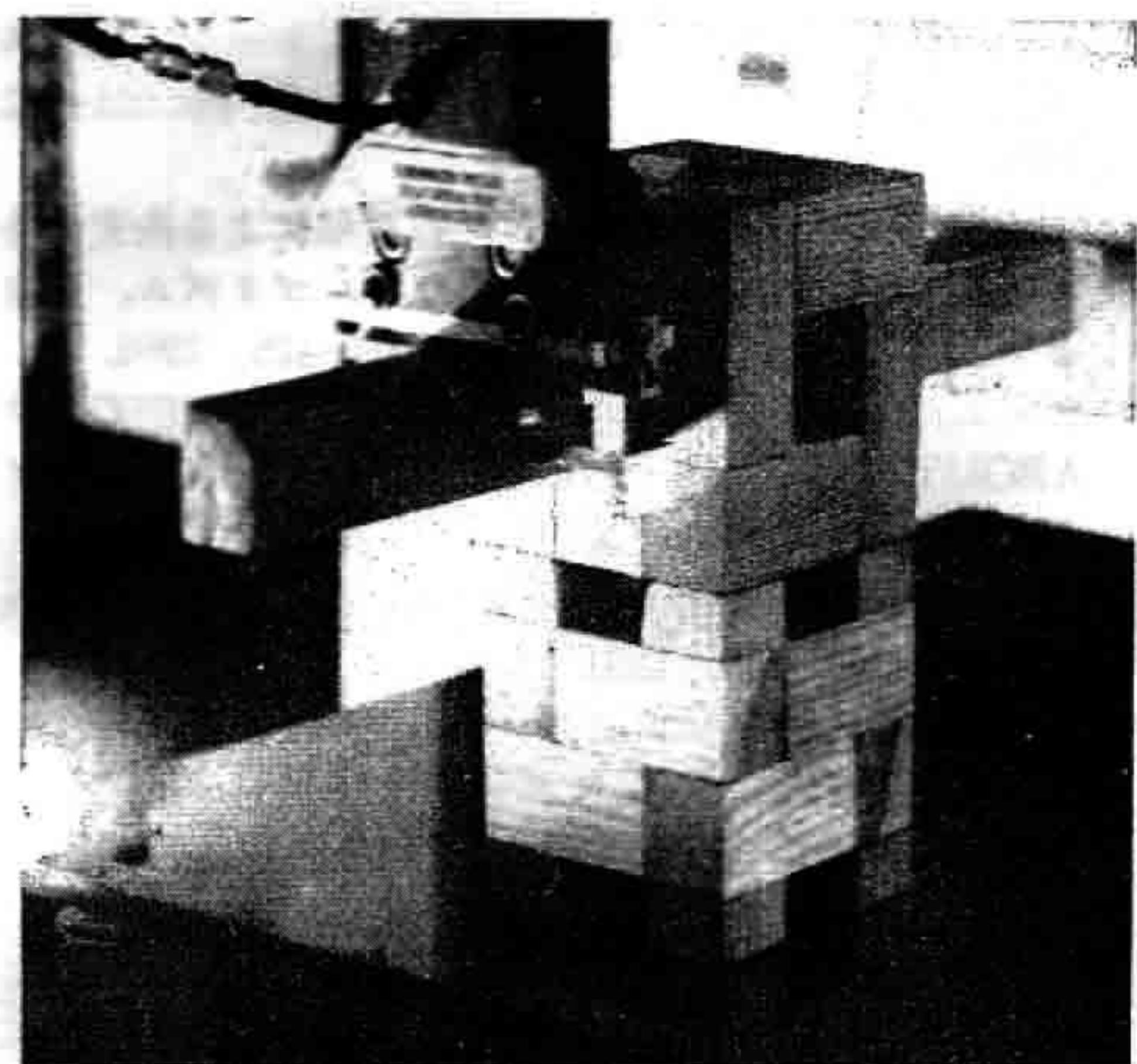
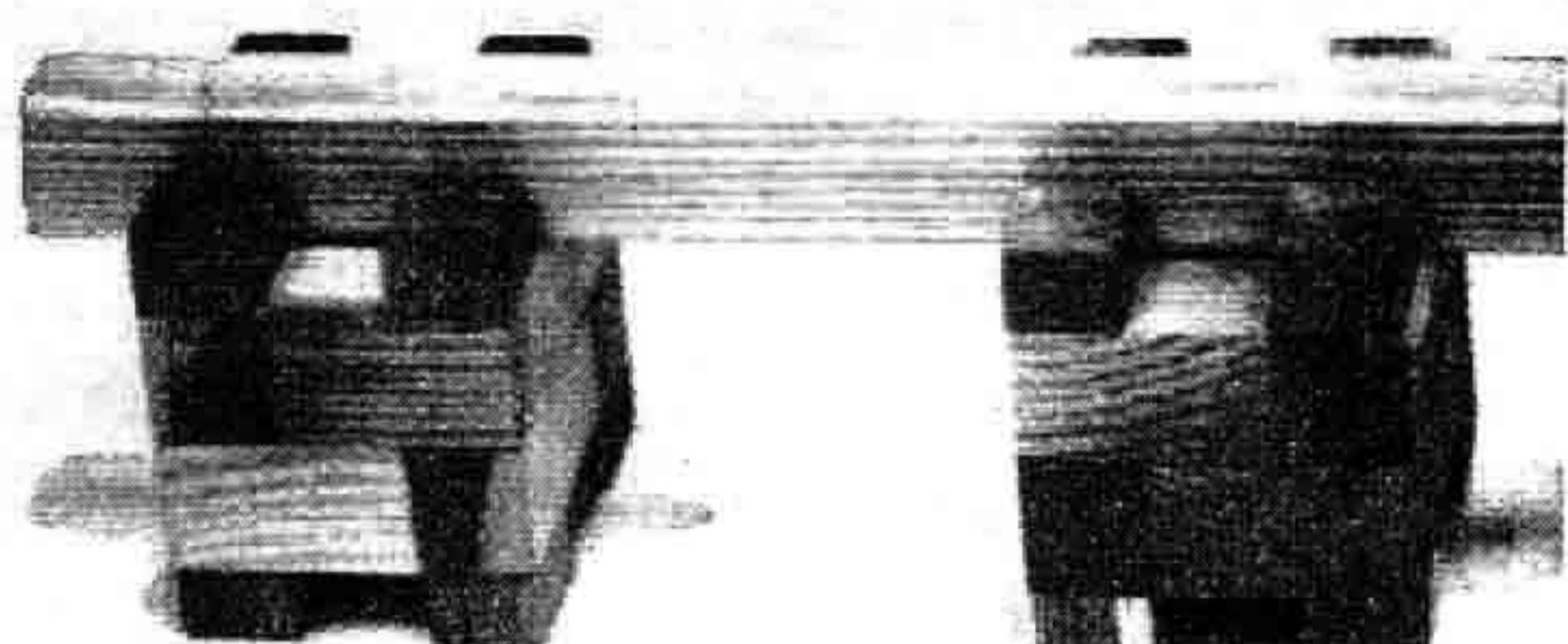


Fig. 11 Insert a stick into a block



(a)



(b)

Fig. 12 Additional examples

組立作業では Fig. 11 のような挿入作業を考えれば分かるように目標位置姿勢だけではなくそこへ達するまでの軌道や運動制御が重要になる。このような作業を単純な再生により行おうとすると連続的な位置の観測が必要であるし、場合によっては力情報の観測も必要となる。しかし、我々の APO システムでは作業モデルを導入したことにより、物体認識を要所でのスナップショットで済ませることができる。また、逆に最終組上がり状態から全ての手順を導くことは本来、非常にコストがかかる問題であるが、要所で認識を行っているため動作手法の計画は単にテンプレートを展開するだけで済ませること

が可能になっている。このように適切な単位で作業を分割し作業モデルを導入することにより作業の認識、作業の計画が相補的に働くことが可能となった。

7. む す び

人間が行う組立作業を視覚システムで観察し、同じ作業を実行するロボットシステムでは人間の行った動作が作業の中でどのような目的を持っているかなど動作の意味を抽出する必要がある。そのためには行動理解の枠組みとなる作業モデルの構築が不可欠である。本論文では多面体組立作業を対象物同士の接触を実現する作業ととらえ、目標となる面接触状態を運動に対する拘束に着目して分類し、作業対象物体の状態変化とその状態間の遷移動作とを組み合わせたものとして組立作業の作業モデルを構築した。それを用いて、視覚システムにより得られた対象物体の位置・姿勢から環境との面接触状態を抽出し、対応する作業モデルに割り付けられた動作テンプレートを開することにより同じ作業を行うロボットシステムを実現した。

将来の課題としては、より複雑な組立作業を理解し、実行するために、平面接觸以外の組立関係、例えば点接觸、曲面接觸、ネジなどの関係に基づく作業モデルの導入や現在は十分に行われていない大域動作、把持動作の理解・計画の導入が挙げられる。

謝 辞

本研究は Carnegie Mellon University, The Robotics Institute において行ったものである。研究にあたりご討論、ご助力いただいた Task-oriented Vision Laboratory の皆様および VASC グループの皆様に感謝します。

参考文献

- 1) R. Finkel, R. Taylor, R. Bolles, R. Paul and J. Feldman. AL : a programming system for automation, Technical Report AIM-177, Stanford University, Artificial Intelligence Laboratory, Stanford, CA, 1974.
- 2) L. I. Lieberman and M. A. Wesley. Autopass : an automatic programming system for computer controlled mechanical assembly, IBM Journal of Res. Develop., Vol. 21 No. 4, pp. 321-333, 1977.
- 3) T. Lozano-Perez. Automatic planning of manipulator transfer movements, IEEE Trans. System Man and Cybernetics, SMC-11 No. 10, pp. 681-689, 1981.
- 4) T. Lozano-Perez, M. T. Mason and R. H. Taylor, Automatic synthesis of fine-motion strategies for robots, Robotics Research 1, pp. 65-96, MIT Press, 1984.

- 5) K. Ikeuchi, T. Suehiro, P. Tanguy, M. Wheeler. Assembly Plan from Observation, Annual Research Review 1990, The Robotics Institute, CMU.
- 6) 山藤, 千々松. 人まねロボットの構想と動作例, 第6回日本ロボット学会学術講演会, pp. 193-194, 1988.
- 7) 國吉, 稲葉, 井上. 実演による作業教示—第1報: 新しい教示方式の提案と動作認識のための視覚情報抽出機構, 第7回日本ロボット学会学術講演会, pp. 261-264, 1989.
- 8) 國吉, 稲葉, 井上. 人が実演してみせる作業の実時間視覚認識とそのロボット教示への応用, 日本ロボット学会誌, Vol. 9 No. 3, pp. 295-303, 1991.
- 9) 平井, 佐藤. テレロボットにおけるワールドモデル管理のための操縦行動の理解機能, 日本ロボット学会誌, Vol. 7 No. 6, pp. 714-724, 1989.
- 10) 末広, 高瀬. スキルに基づくマニピュレーションシステム, 日本ロボット学会誌, Vol. 8 No. 5, pp. 551-562, 1990.
- 11) 比留川, 松井, 高瀬. 多面体間の接触による拘束条件を幾何モデルから導出する一般的なアルゴリズム, 日本ロボット学会誌, Vol. 9 No. 4, pp. 415-426, 1991.
- 12) S. S. Krishnan and A. C. Sanderson. RESONING ABOUT GEOMETRIC CONSTRAINTS FOR ASSEMBLY SEQUENCE PLANNING, Proc. of International Conference on Robotics and Automation, pp. 776-782, 1991.
- 13) 佐藤, 井口. 液晶レンジファインダー液晶シャッタによる高速距離画像計測システム—信学論, Vol. J 7 1-D No. 7, pp. 1249-1257, 1988.



池内克史 (Katsushi IKEUCHI)

1949年5月29日生。1973年京大工機械卒。1978年東大工情報博士了(工学博士)。MIT人工知能研究所、電総研を経て1986年CMU計算機科学科(CS Division)兼ロボティクス学科(Robotics Institute)研究准教授(Senior Research Scientist)。人の視覚機能、明るさ解析、物体認識、ハンドアイの研究に従事。D. Marr賞(ICCV: 1990), IEEE優秀論文賞(CVPR: 1991), 最多引用論文賞(AI Journal: 1992)等授賞。

(日本ロボット学会正会員)



末広尚士 (Takashi SUEHIRO)

1955年11月30日生。1978年東大・工・電子卒。1980年同大学院修士課程終了。同年電子技術総合研究所に入所。以来知能ロボットの研究に従事。1990年東大工学博士。1990~91年米国CMU客員研究員。計測自動制御学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)