

視覚を中心とした新ロボット技術の展開

Development of Visual Information Processing and Related Techniques in Robotics

江尻正員* Masakazu Ejiri

知能ロボット技術、とりわけ三次元物体を対象とした視覚情報処理技術は、明日の自動化・省力化のための基本技術として重要視されてきている。本稿は日立製作所のこの分野での基礎研究と応用研究の成果について概観している。

視覚をもつ新しい自動機械の例として、複雑パターンのきず認識装置、移動物体の実時間認識を行なうボルト締緩ロボット、時分割視覚方式を用いたトランジスタ組立システムを取り上げ、視覚情報処理技術の現状と問題点を整理した。特に、映像の諸変動要因に対処して普遍的な情報を引き出すための強い認識アルゴリズムの開発こそが、映像処理実用化の基本であることを強調した。

1 緒言

視覚・触覚などの感覚機能を機械に付与することにより、外界の状況を認知できるような自動機械を作ろうとする試みは、計算機科学の一分野である知能ロボット技術研究の一環として行なわれてきている⁽¹⁾。日立製作所でも中央研究所を中心に視・触覚の基礎的な研究とその応用研究が行なわれ、生産工程の自動化・省力化につながる新規な方式が次々と開発されつつある⁽²⁾。本稿はこのうち、特に視覚技術に焦点を絞り、現在までの知能ロボット技術の展開経過を振り返り、明日の技術の可能性を探るための資としたい。

2 知能ロボット技術の位置付け

知能ロボットとは、図1に示すように、従来の機械に比べて次のような機能を付与された機械であるとみることができる⁽³⁾。

- (1) 目的の理解能力
- (2) 外界状況の把握能力
- (3) 外界への適応的働きかけの能力

このうち(1)は、人間から与えられる指令をどのようにして理解するかという問題である。この命令は、できるだけ人間に近いマクロな情報として記述されるものが望ましく、例えば、自然言語を理解してそこから実行すべきタスクの内容と目的を理解させる研究とか、あるいは組立図など二次元並列的な図形情報によって作業の目的や最終形態、必要部品などを理解させるという研究⁽⁴⁾もまた、機械を知的にするための基礎的研究として大きな意義をもつ。また、(2)は視覚・触覚などによって外界の状況を把握する能力であり、(3)はその結果に基づき(1)で指令された目的に応じた最適な意思決定と判断を行ない、その結果で外界に適応した形で必要な動作を行なう能力である⁽⁴⁾。これらのうち、現在我々が最も注目している技術は特に(2)に関するものである。

機械に感覚をもたせようとする夢は、人間のパターン認識機能があまりに高度、且つ複雑なために、長い間その実現を阻まれていた。外界の情報の90%以上が目を通して得られるという事実は、目をもった機械が実現されたとき、これが人間に替わって有効に働くことができるであろうことを十分に示唆するものである。しかし、現在の高度に発達した計算機科学の粋をもってしても、人間に迫ることのできるパターン

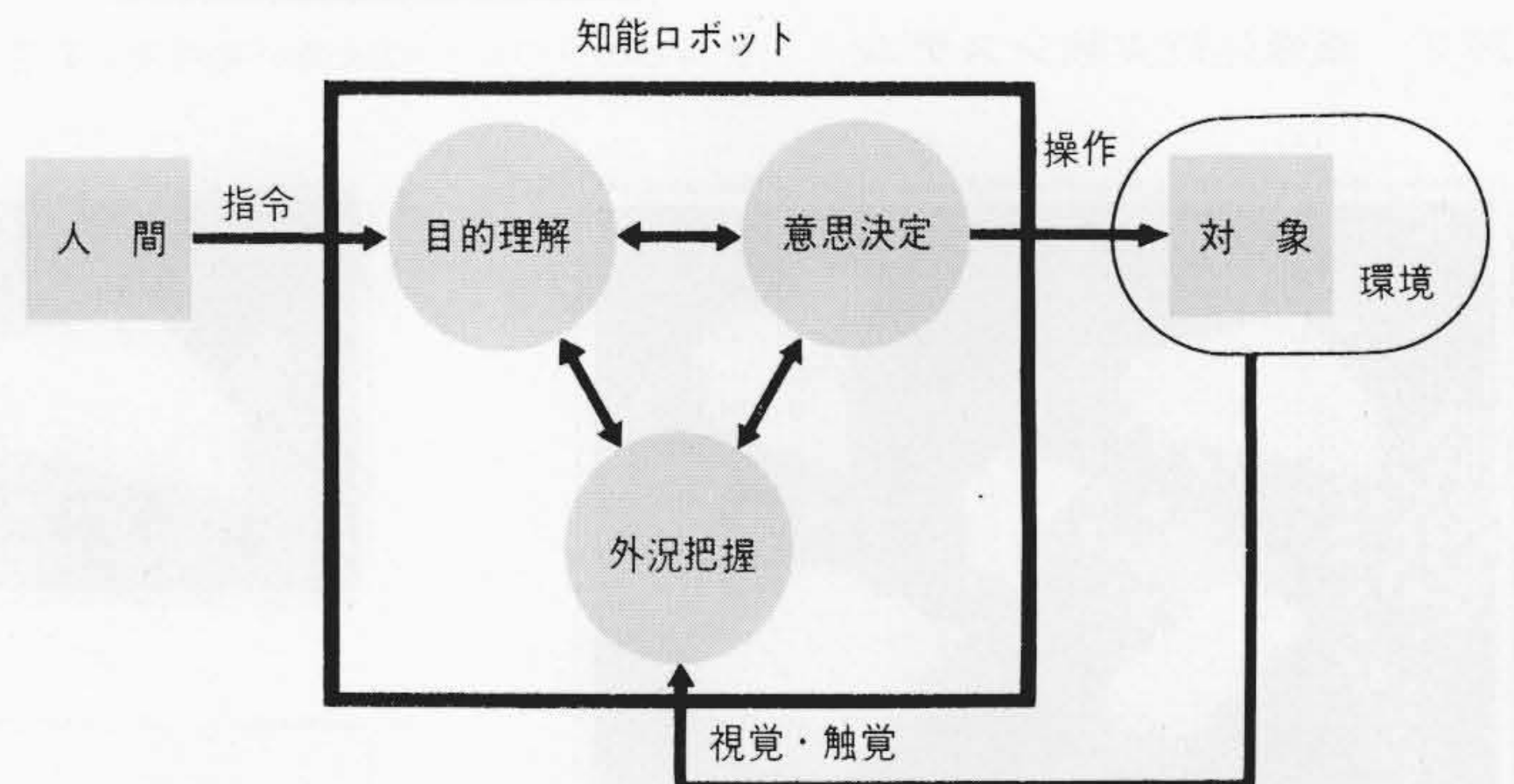


図1 知能ロボットの基本的な機能 目的を理解し、外界の状況に応じて、適応的に働きかける能力がロボットには必要とされる。

認識機能を付与できるにはあまりにも隔たりがあることもまた事実である。この隔たりを少しでも埋めるため、現在数多くの研究が行なわれつつある⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

3 視覚情報処理とその実験システム

ロボットの視覚技術——scene analysis——の根幹を形成する三次元物体の認識の研究では、物体のもつ幾何学的性状と質的性状が識別の対象として取り扱われている。幾何学的性状とは、物体の形、位置、姿勢、大きさなど、通常、物差しで計測可能な性状であり、質的性状とは、きず、汚れ、しみ、つやなど、物体の良否に関連した性状である。どの認識も、なんらかの形で二次元に投影された対象の映像を基に識別が行なわれる点で、通常の画像処理の研究と手法的に異なる面はあまり多くはない。

周知のように画像処理の研究では、取り扱われる画像が膨大な情報量をもつだけに、これをどのようにして高速に処理し、効率よく情報を圧縮し、有効な情報を抽出するかに力点が置かれる。そのアルゴリズムの研究開発のための道具として、計算機を主体とした様々な形態をもつ画像処理実験システムが構築され、利用されてきている。図2は筆者の研究室

* 日立製作所中央研究所 工学博士

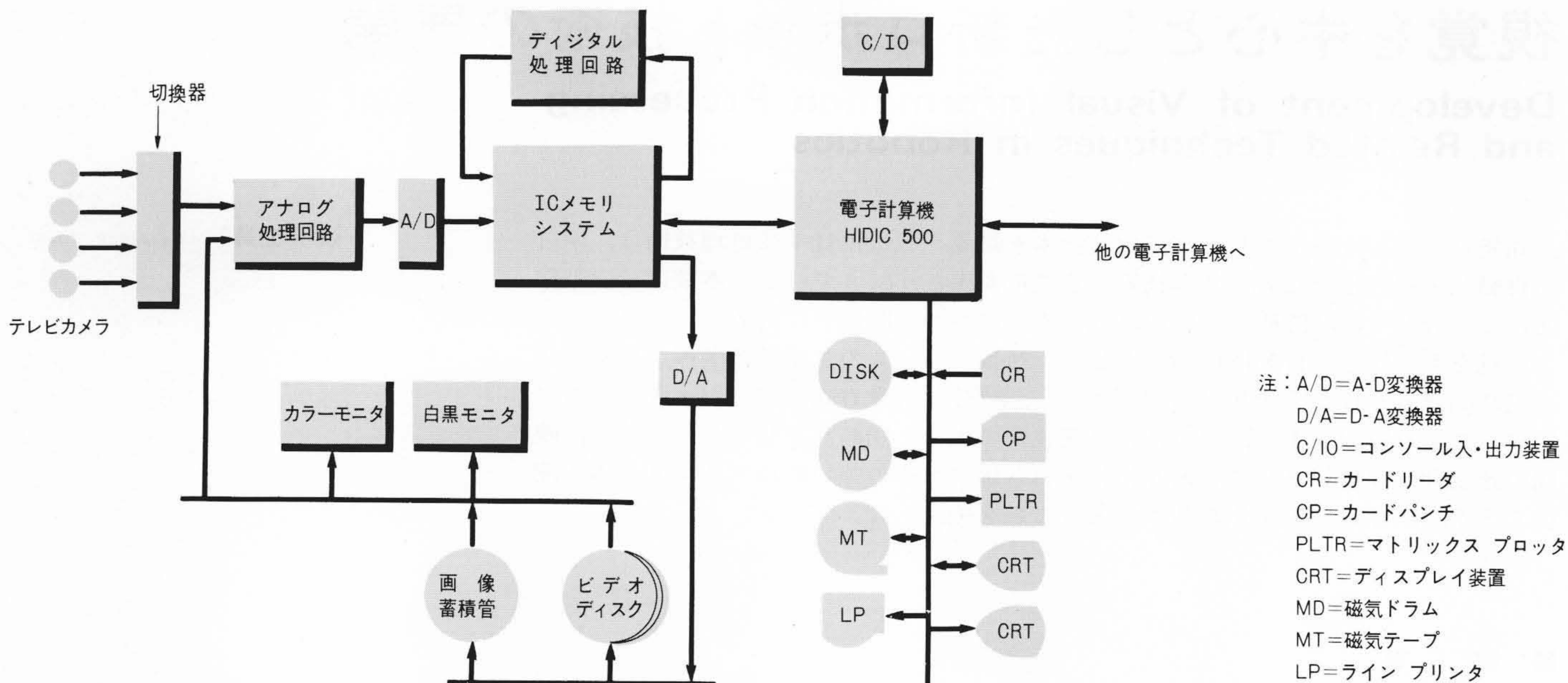


図2 画像処理実験システム テレビカメラからの映像が実時間で高速にICメモリに取り込まれ、処理される。

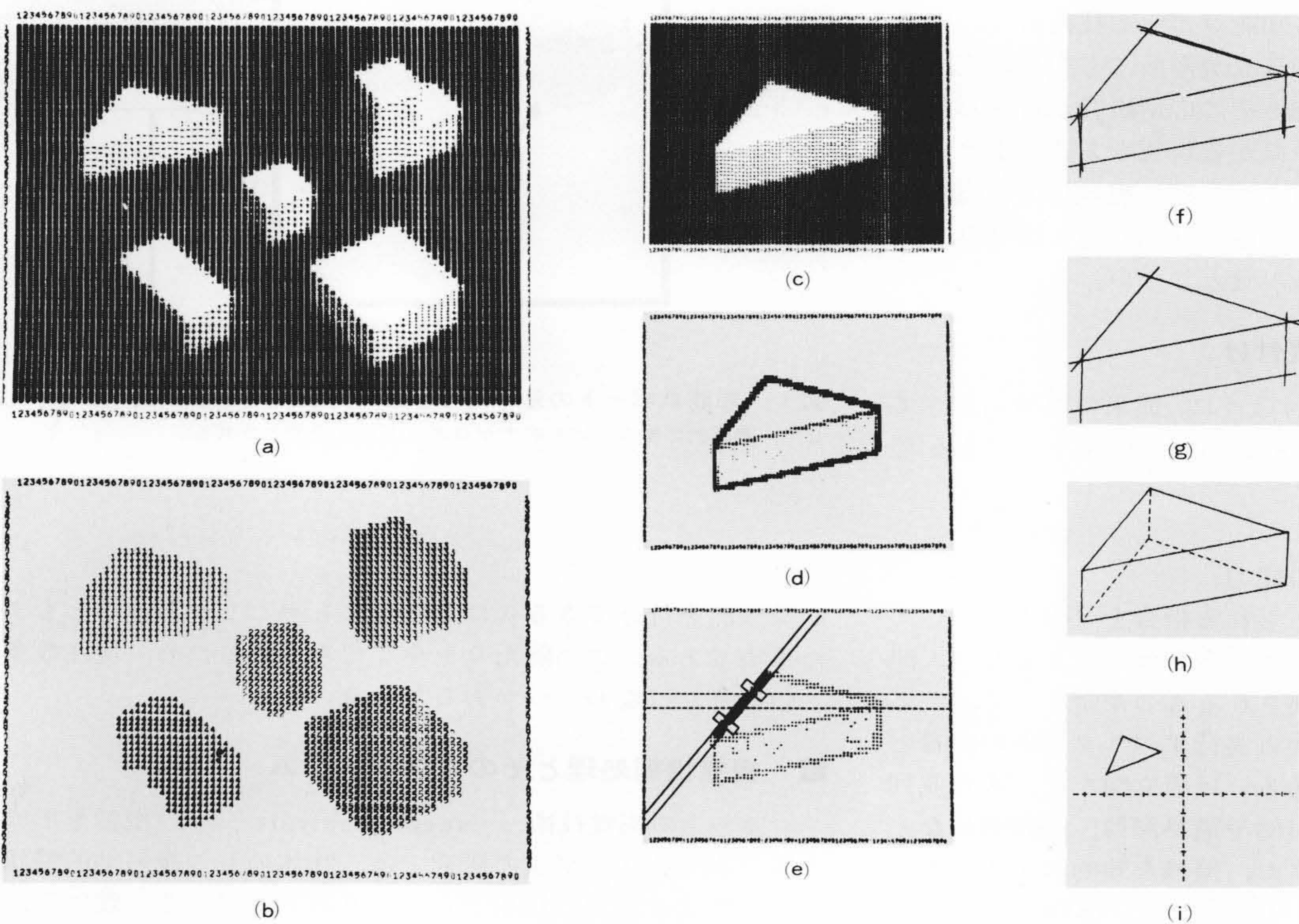


図3 多面体の認識過程の例
(a)物体群の映像から(b)物体の存在を知り、(c)個々の物体を切り出して、(d)輪郭を強調し、(e)稜線を見つける。(f)見つかった稜線を(g)整形し、(h)見えない稜線を想像して(i)机上位置を求める。

の汎用画像処理実験システムの例である^(*)。このシステムでは、256×256画素のIC(集積回路)メモリを用いた多面映像記憶装置を中心に配置し、映像の実時間入力と、各ループで映像を転送しつつ処理を行なっていくとする基本的機能が盛り込まれている。

このシステムのソフトウェアとしては、空間微分、輪郭追跡、部分相関、方向コード処理、拡大・縮小処理など、画像処理での基本的ソフトウェア、映像情報の入出力・表示などのための映像転送ソフトウェア及びこれらを有機的に結び付けた汎用画像処理ソフトウェアシステム、会話型画像処理シ

ステムなどを構築してきており、映像処理の各種アルゴリズムの開発に実用されている。

4 物体認識の基礎手法

4.1 映像の線図形化

上述のような画像処理実験システムを用いて三次元物体の情報を取得するには、具体的には(1)能動的手法と、(2)受動的手法の二つがある⁽²⁾。(1)は対象に対して積極的に光などを照射し、その像をテレビカメラなどの撮像装置にてとらえるものであり、三角測量の原理によって対象までの距離の情報が直接に得られる点に特徴がある。光としてはスポット光、スリット光、グリッド光などが使われる。一方、(2)の受動的方法とは、対象のもつ明暗情報をそのまま撮像する方式であ

(*) 1 機器構成の一部は、通商産業省大型プロジェクト委託研究費により購入されたものである。

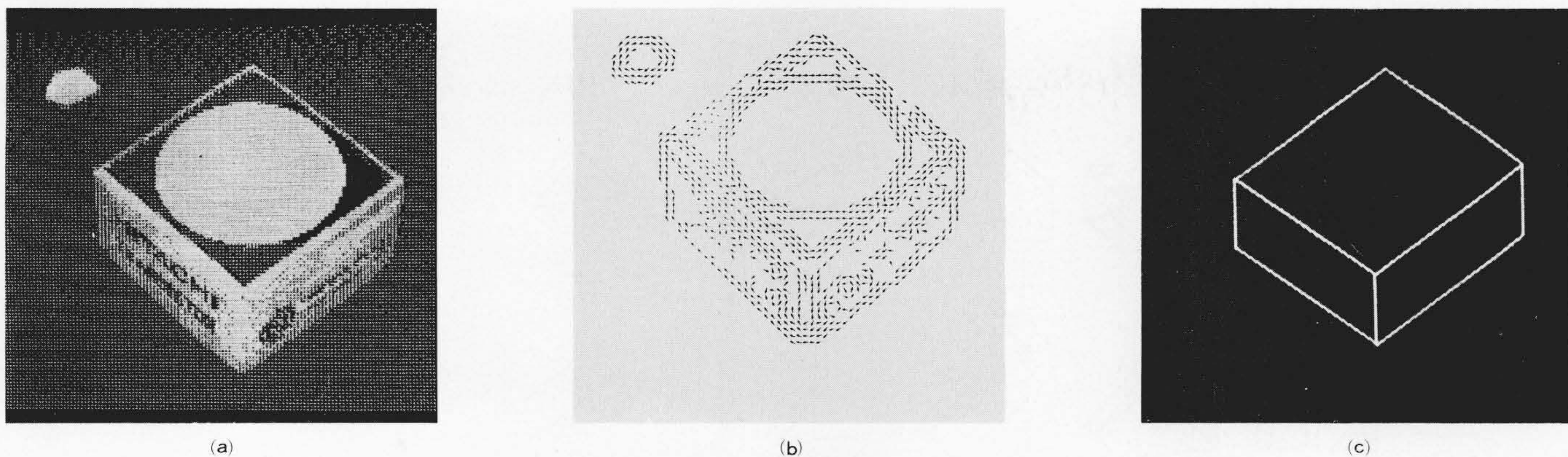


図4 方向コード法による箱状物体の認識 (a)撮像された明暗映像は、(b)明暗変化の接線方向を表わす方向コード映像へと変換され、(c)複雑な表面情報を自動的に消去して稜線が抽出され、物体の構造が決定される。

り、明暗映像又はその幾つかの組合せから対象を抽出し識別する。その場合、情報量の圧縮とノイズ低減を目的に各種の前処理が施され、一般には対象のもつ稜線や中心線を抽出し、線図形化して構造を記述し、この特徴化された構造情報を基に認識が行なわれる。図3は多面体の認識過程の一例を示すものであり、濃淡映像から空間微分による稜線の強調、稜線の発見、稜線の整形とノイズ消去などの過程を経て最終的に対象の形と位置及び姿勢が認識される⁽⁴⁾。

4.2 表面情報の認識

しかし、背景が複雑であったり物体の表面にマークや模様などの表面情報が付与されている対象になると、その認識は極度に困難さを増してくる。更にまた、映像自身が外的照明条件の変動や撮像装置のノイズや特性変動によって変化し、たとえ同一物体を同じように撮像したつもりでも、全く同じ映像が得られることは期待できない。このような変動要因に対して不変な映像処理が行なえるかどうか、現実的には極めて重要な問題となってくる。そのための一方法として、方向コード法がある⁽⁷⁾。この方法は図4に例示するように、各絵素での明暗変化の接線方向をもってその点の映像値とする方式である。これによれば、少なくとも映像のゲイン変動、レベル変動に対しては「強い」アルゴリズムを構築できる。従って、安定な認識が期待できる。図4はこの方法によって複雑な表面情報をもつ箱状物体を、64方向のコード値をもつ方向コード映像に変換し、方向別の頻度分布を主体としたマクロな処理手法によってその輪郭構造を認識した例である。また図5は、同じ手法により斜め上方から見た物体映像から、その表面情報をあたかも真上からながめたかのような映像へと自動変換した例である。この手法を用いれば、表面情報は正規化され、位置や回転姿勢に不変な認識手法が得られる⁽⁸⁾ので、将来、表面情報を用いた物品の選別処理などに利用できよう。この箱状物体を対象とした認識技術の研究は、通商産業省工業技術院大型プロジェクト、パターン情報処理システムの研究開発の一環として行なわれているものである。

4.3 物体の構造記述

物体が複雑に重なった場合のscene analysisとしては、既に線図形化された情報からの個別化を目指したアルゴリズムが開発されている⁽⁹⁾。例えば、図6の図面を認識して構成部品とそれらの結合関係を見いだす例⁽⁴⁾や、図7の物体の組立過程⁽⁴⁾を計算機内でシミュレートした例、図8に示すような複合組立体の視点位置、視線方向を変えた場合の図形変換の

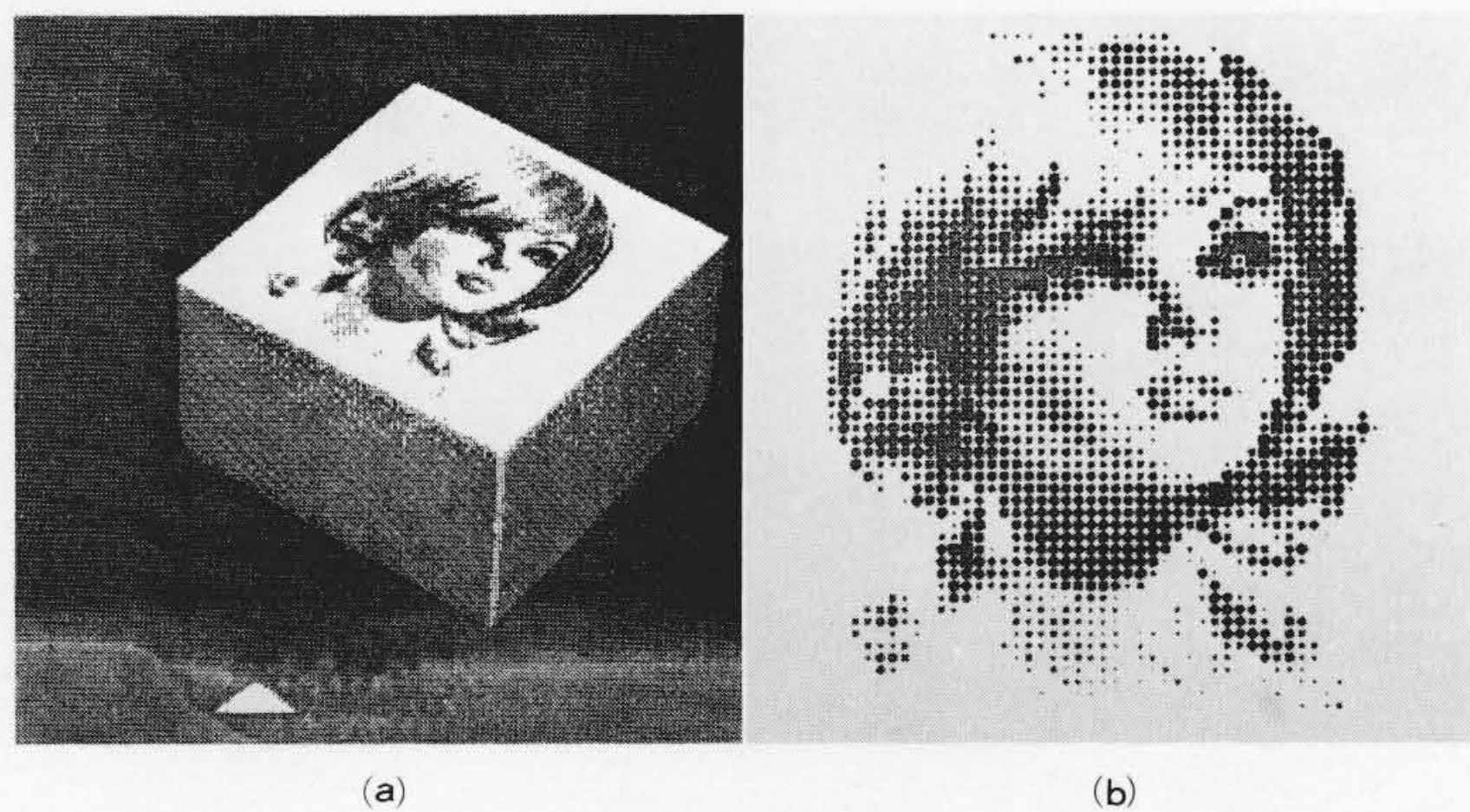


図5 物体の表面情報の抽出と変換 (a)もとの映像の表面情報が、(b)ちょうど真上からながめたかのような映像へと自動変換され、認識される。

例などにみるように、各構成部品そのものの幾何構造だけでなく物体相互間の干渉を伴う結合関係をどのようにして計算機内で記述し処理していくか⁽⁴⁾に問題の難しさがあり、面の共有問題、hidden line問題などもこの中に含まれる。これらについては上述の例のように、現在の計算機的能力から定まる所要処理時間上の問題を除けば、多面体間についての情報の取扱いに関する限りほぼ解決された。

しかし、実際上の問題は線図形化された後の処理よりも、むしろ既述したように入力映像からどのようにして安定な線図形を得るかにある。これは主にテレビカメラなどの撮像装置の特性が計測やパターン認識などの目的には必ずしも十分ではないことによるものである。

5 物体認識技術の応用

5.1 基本的考え方

以上のような基礎的な物体情報処理技術の研究と並行し、幾つかの視覚技術実用化の努力を行なってきた。物体の認識といっても結局は二次元的にとらえた映像を基本として処理するものであるし、また目的によっては、次元を縮退した二次元面内での情報の認識で十分な効果を発揮できる用途は数多い。ところで、このような視覚情報処理機能の工業応用を目指す場合、問題を困難にする要因として、

(1) 一般に認識アルゴリズムが複雑になりやすい。

(2) 一般に大形の処理装置を必要とする。

などがある⁽¹⁰⁾。これらを排除し、高速で実用的な映像処理を

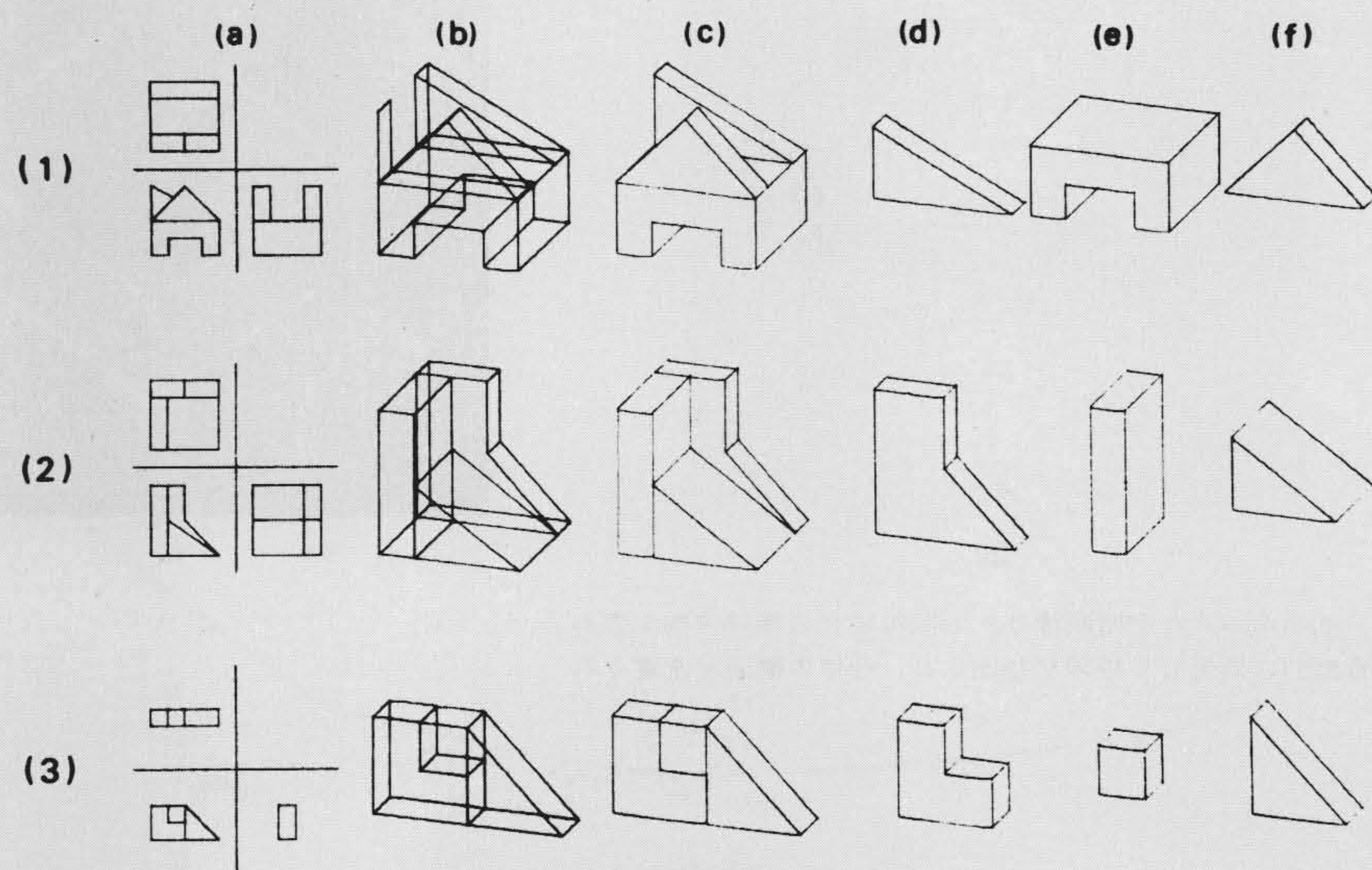


図6 図面の認識 (a)図面を(b)三次元情報に変換して(c)立体として理解し(d), (e), (f)それぞれの構成部品を発見する。

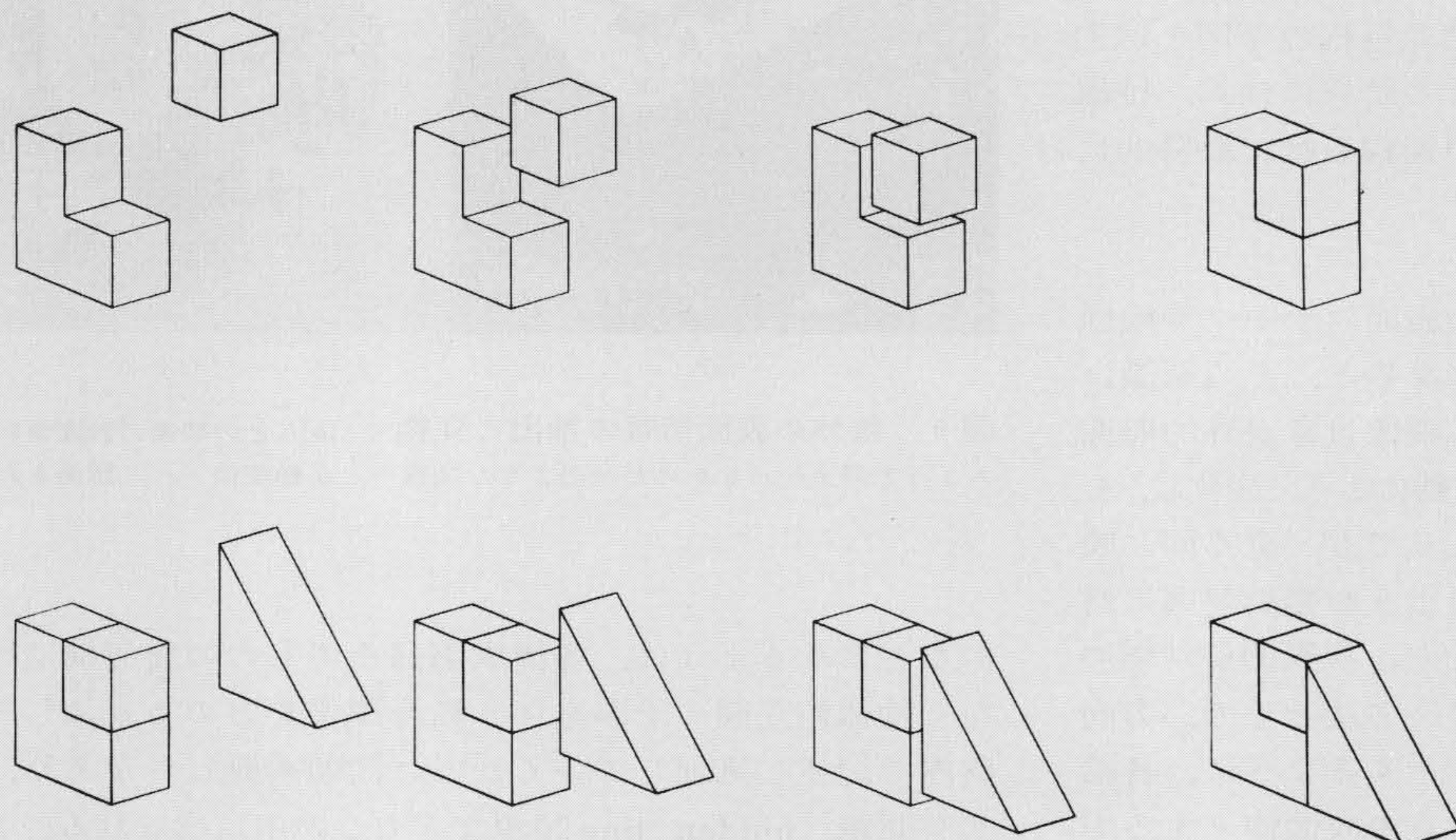


図7 物体の組立過程の計算機処理 図6の例(3)の組立を計算機の中で実現した様子を示す。組立順序、組立方向が自動的に決定され、実行される。

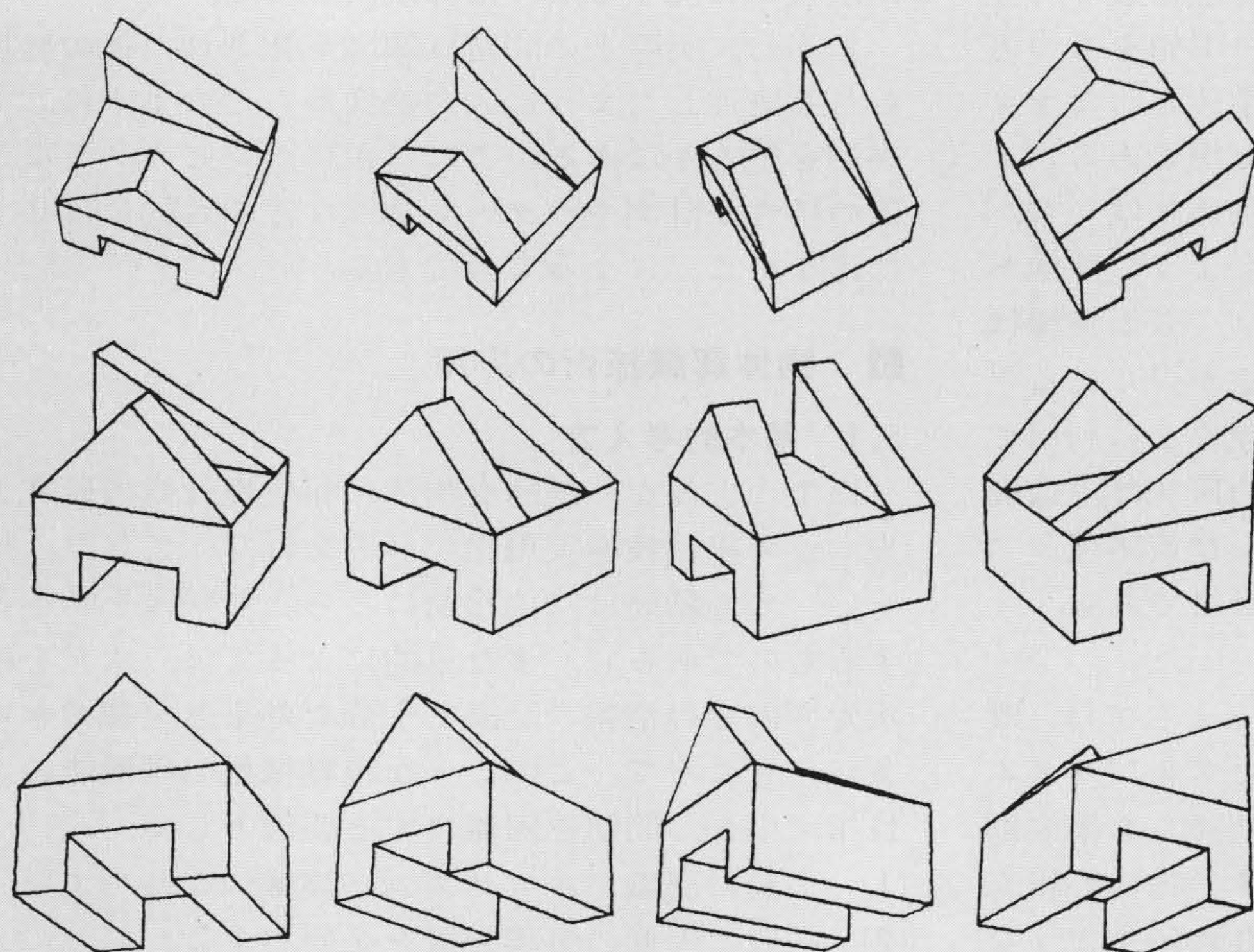


図8 複合組立体の図形変換 立体図形が、いろいろな角度からながめた図形へと変換される。ここでは部品相互間の干渉をなくし、人間にとって見やすい図形へと変換されている。

行なうためには、現状では次のような配慮を行なう必要が生じてくる。すなわち、線追跡などのマイクロな手法は極力排し、homogeneousな処理、マクロな処理を主体とするアルゴリズムとしたり、ハードウェア規模の極小化と処理の高速化のために、照明条件や背景などの環境整備によって極力2値映像化するなどである。このような基本的考え方によって、最近、次のような工業用視覚情報処理装置とその応用システムを開発し、実用化することができた。

5.2 複雑パターン中のきずの認識装置

前述した物体の質的性状の認識の一例として、プリント基板中のきずを自動抽出する装置を開発した⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。500×300mm程度の基板1枚を例えば、0.1mmの分解能で記憶するには実用規模をはるかに超える高速メモリ装置が必要となり、たとえ記憶できたとしても、テレビカメラから入力される部分的パターンがどこに記憶された情報に対応するかを見付けることは容易でない。また、二つのカメラで被検査パターンと標準となるパターンを同時撮像し比較できるほど、撮像装置は十分な性能をもっていない。

この装置では、入力映像そのものから「もしきずがないとすればこのようになるはずだ」という「準」標準パターンを実時間で自ら創成し⁽¹³⁾、自分同士で比較するという方式を採用し、標準パターンの事前登録やregistrationの問題を解決した。図9はこのプリント基板きず検査装置の外観である。

5.3 自動ボルト締緩ロボット

コンクリートのパイルやポールを成形する際の、型わくのフランジ部に並んでいるボルトを締緩する作業の自動化のための装置が開発された。フランジ部のボルトは定ピッチ位置になく、且つ奥まった位置にあるため、これを視覚的に見分ける必要がある。型わくは連続的に移動しているので、テレビカメラの視野内に入った物体がボルトならマニピュレータに締緩を指令し、追従しながら作業を行なわせ、また物体が型わく補強用リブやタイヤのような突出物の場合は、マニピュレータに対しインパクト レンチの待避を指令する。図10に装置の外観を示す。その視覚装置は1/60秒を周期として認識を繰り返すものであり、四つのサブ エリアに分かれた窓わく情報を用いた積分型の処理を主体としているため、映像ノイズに強くしかもハードウェア規模が小さくて済むという特徴がある⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。

5.4 トランジスタ全自動組立システム

トランジスタの電極位置を自動的に見付け、ここと外部リード端子との間に配線を行なう作業の自動化は、半導体生産技術分野の永年の夢であった。この新しいシステムは、図11に示すように構成され、最大50台の「目をもった組立機」が小形計算機によって制御されるよう構成されている。各自動

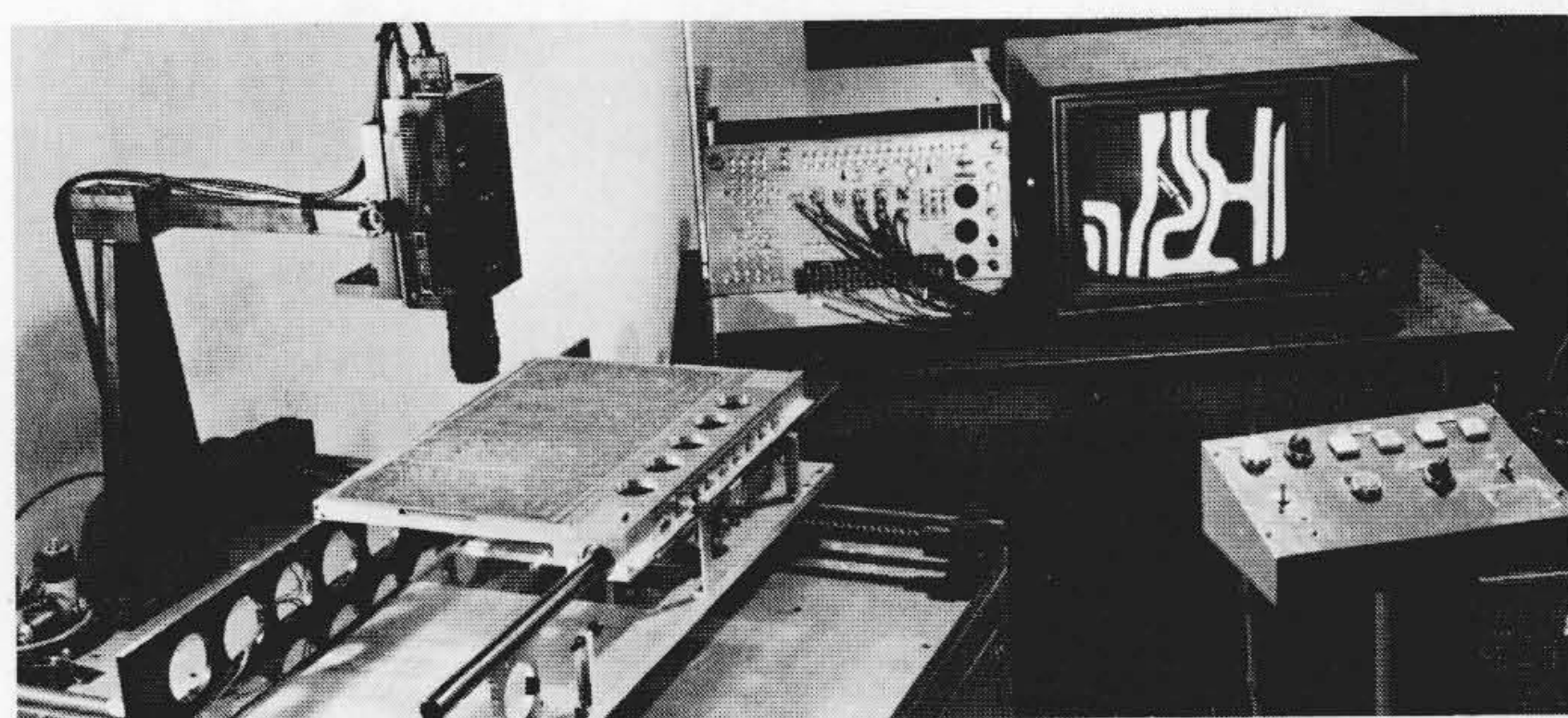


図9 プリント基板きず検査装置 複雑パターン中に埋もれた微小なきずを、1画面当たり1/60秒で自動的に発見することができる。

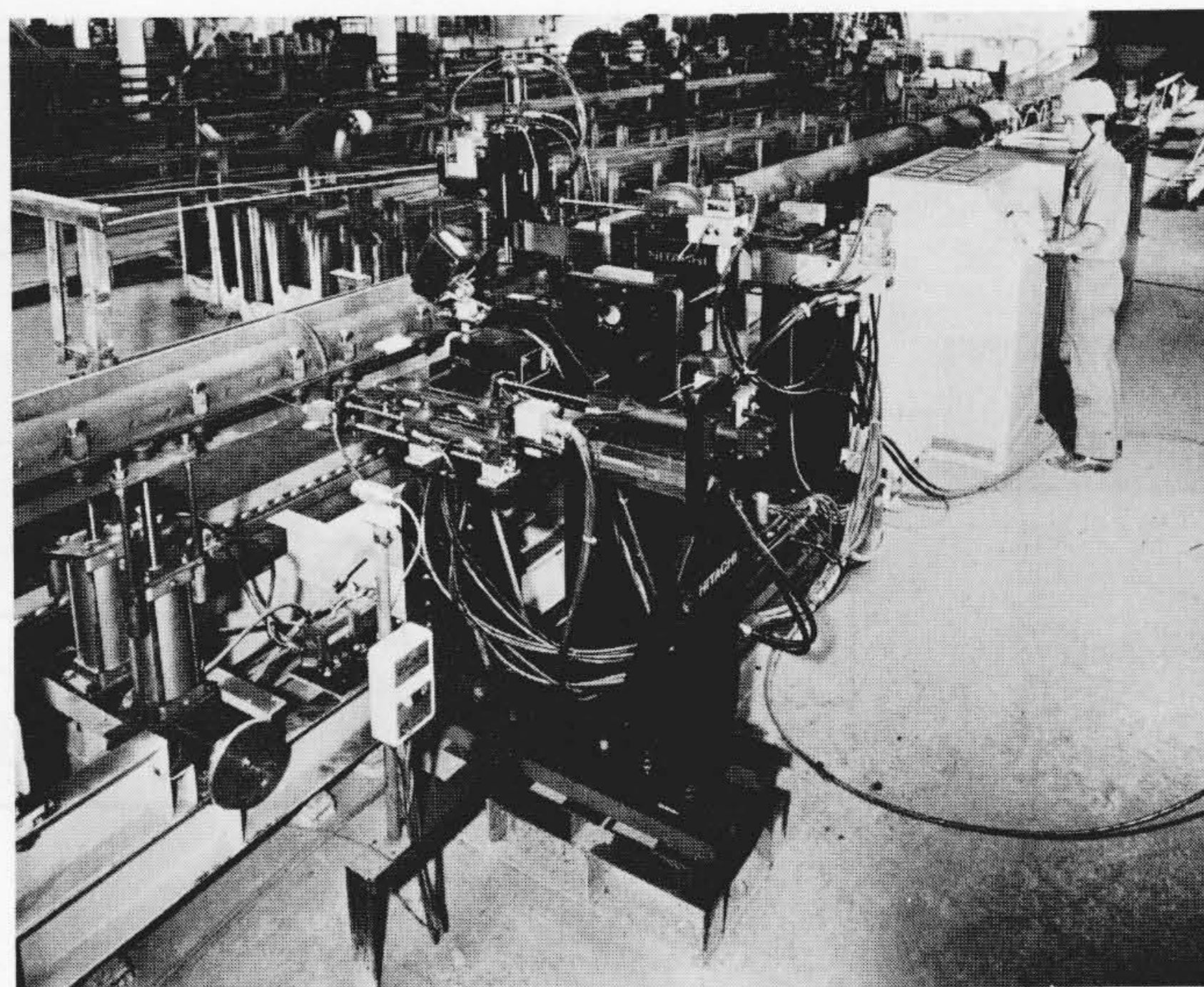


図10 ボルト締緩ロボット コンクリート ポール製造の際、型わくに並んだボルトを自動的に発見し、締緩する視・触覚をもったロボットである。

組立機では、1台のテレビカメラが顕微鏡を介して上方から監視し、視野中に供給されるチップの映像からその電極位置を自動的に認識し、サーボ機構によって金線を自動的に高速配線するものである⁽¹⁰⁾。組立機の外観を図12に示す。

ここで用いた認識方式は、「複合型部分パターン マッチング法」と称しているもので、対象パターンの特徴的な複数個の部分パターンをあらかじめ計算機内に記憶しておく。視覚装置では、二次元的に次々と切り出される部分映像パターンと標準パターンとを実時間で比較し、画面中最もよく一致した部分の位置座標を計算機に送り出す。計算機はこの座標を評価し、最も確からしい電極位置を高精度で割り出す。このときの平均認識所要時間は0.2秒程度と極めて速い。

このシステムの特徴は、計算機がm系列×n台の自動機を群制御し、各系列1台の視覚装置がn台を時分割でサービスするようになっている点や、視覚装置と計算機が並列処理と時系列処理を効率よく分担し、複数個の標準パターンによって認識アルゴリズムにredundancyを与え、必然的に高い認識率、高い信頼度を得ている点などである。

6 問題点と今後の課題

以上の諸例のように、視覚情報処理の研究は一部実用化への道を歩むことができたに至った。とはいっても、まだ実用に見合う経済範囲での実現という制限から、対象映像が2値化できるような用途には限られている。多値映像のそのままの取扱いは、専用ハードウェア化するにはコスト的な制約があり、通常計算機で行なうには処理時間的な制約がある。多値映像処理のための安価な並列演算処理装置の出現が、画像処理の将来にとって不可欠のものとして待たれている。

一方、固体撮像技術に関する研究開発は着々と進行しつつあるし、複合機能型の装置や高速A-D変換器など、映像にまつわる周辺技術、周辺デバイスも整備されつつある。更に、従来実時間で高速映像処理には不向きであったマイクロコンピュータも、少しずつ応用の可能性が出てきている現状にある。これらのエレクトロニクス技術の発展は、ロボット技術、とりわけその感覚制御技術の高度化に役立つものであり、「柔らかな機能」をロボットに与えることを可能とするであろう。

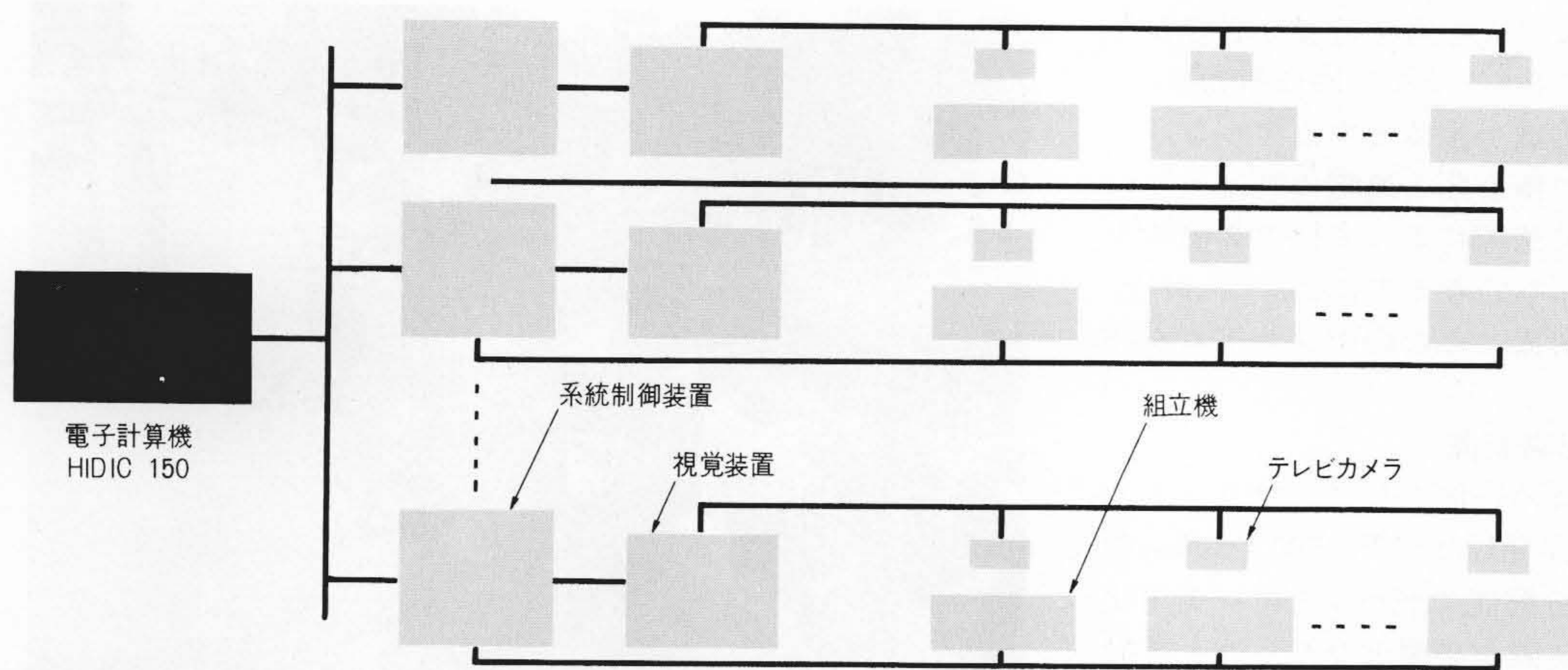


図11 トランジスタ組立システムの構成 目をもった組立機が、最大50台まで接続できる群制御システムである。計算機と視覚装置は、多くの自動機に対して時分割でサービスするよう構成されている。



図12 トランジスタ自動組立機 テレビカメラの視野に入るチップの位置を自動的に認識し、その電極と外部リードとの間に高速配線を行なう装置である。

一方、認識のアルゴリズムの面について言えば、画像のあらゆる変動要因に対処できる「タフ」なアルゴリズムへとみがき上げる努力が今後ますます重要となる。画像のもつ本質的な不安定性を超越した新しいアルゴリズムの開発こそが、視覚情報処理の実用化へのキーとなるものである。今後も、生産システム、物流システムなどへの応用を目指して視覚応用技術の開拓がなされていくであろうが、その普遍な方向は、「より高速」、「より安定」な視覚技術の実現にある。

7 結 言

知能ロボット技術、特に視覚情報処理技術に焦点をあて、その位置付けとともに、日立製作所のこの分野での技術開発の展開について述べた。本稿に述べた視覚情報処理の三つの応用例のうち、第一のものは物体の質に関連した認識としての特徴をもち、第二は移動する物体の実時間認識として、また第三の例はマイクロパターンの、しかも初の「視覚システム」としての特徴をもち、工業的にも価値の高い装置となった。このほかにも、基礎技術としての立体視の研究⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾、色認識の研究、複雑物体認識の研究⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾や、カラーブラウン管の白色むらや面欠点の認識装置⁽²⁰⁾⁽²¹⁾など、各種の実用技術、実用装置の開拓が行なわれつつある。このような視覚技術は、物体の幾何学的性状、質的性状の認識への幅広い応用の可能性をもち、今後の新しい自動化・省力化技術の核として、その発展が期待される。

参考文献

- (1) 例えば、Proc. of Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence, 第1回 Washington D. C. (1969), 第2回 London (1971), 第3回 Stanford (1973) 参照
- (2) 江尻, 鳥野:「物体の認識」電学誌 93, 986 (昭48-11)
- (3) 江尻:「ロボット工業と物体認識技術」機学誌 73, 26(昭45-1)
- (4) M. Ejiri, T. Uno, H. Yoda, T. Goto and K. Takeyasu: "A prototype intelligent robot that assembles objects from plan drawings" IEEE Trans. Computers, C-21, 161(1972)
- (5) 辻:「ロボット新技術」電学誌 94, 771 (昭49-9)
- (6) 白井:「物体をどこまで機械で認識できるか」日経エレクトロニクス No. 100, 137 (1975-1-27)
- (7) 依田, 本池, 江尻:「方向コード映像による物体認識の提案」電子通信学会全国大会 No. 1621 (昭49-7)
- (8) H. Yoda, J. Motoike, M. Ejiri: "A direction coding method and its application to scene analysis" Proc. of 4th Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence, Tbilisi, USSR(1975)
- (9) A. Guzman: "Decomposition of a visual scene into three-dimensional bodies" AFIPS Proc. of the Fall Joint Computer Conference, 33, 291 (1968)
- (10) 江尻:「ディジタル回路による視覚情報処理——生産自動化への応用」電気四学会連合大会 (昭50-10)
- (11) M. Ejiri, T. Uno, M. Mese and S. Ikeda: "A process for detecting defects in complicated patterns" Computer Graphics and Image Processing, 2, 326 (1973)
- (12) 目瀬, 鳥野, 池田, 江尻:「複雑パターンを対象とした傷抽出装置方式」電気学会論文誌 94-C, 89 (昭49-5)
- (13) 鳥野, 目瀬, 江尻:「複雑パターンの傷認識」電気学会論文誌 95-C, 53 (昭50-3)
- (14) 鳥野ほか:「形状位置認識用インダストリアル・アイ」電子通信学会研究会資料 PRL 74-29 (1974)
- (15) 磯尾, 松岡, 鳥野, 増田:「ボルト締緩用知能ロボットの開発」日立評論 56, 1105 (昭49-11)
- (16) 目瀬, 鳥野, 江尻:「両眼立体視による距離認識」電子通信学会全国大会, No. 114 (昭47-4)
- (17) 安江, 白井:「物体認識のための両眼立体視」電子技術総合研究所集報 37, 1101 (1973)
- (18) 依田, 池田, 江尻:「回転形パターンマッチングによる形状選別の試み」計測自動制御学会論文集, 10, 284 (昭49-6)
- (19) 依田, 本池, 江尻:「生産工程における複雑物体認識の一手法」電子通信学会全国大会 No. 1266 (昭50-3)
- (20) 木滑, 山本, 野中:「カラーブラウン管の白色むらの測定」電気学会研究会資料 VIN-74-3 (1974)
- (21) 横内, 山本, 野中:「カラーブラウン管の面欠点自動認識装置の開発」テレビジョン学会研究会資料, TV画像表示11-5 (1974)