

ロボットの物体認識技術

白 井 良 明*

1. はじめに

人間は感覚器を使って外界の情報を得ているが、感覚器の中でも視覚は重要である。ちなみに、網膜の視細胞の数は 10^8 で、聴覚の有毛細胞の約 3,000 倍、皮膚感覚の受容細胞の約 100 倍、中枢神経に達する情報も、視覚は 10^6 で、聴覚や皮膚感覚の約 100 倍である。人間の目を代行する機械を作れば便利であることはいうまでもない。しかし、逆にあまりにも人間の目が優れているので、人間と競争することがむずかしいのであろう。

計算機に視覚情報を入力し、外界を認識させる研究は 1960 年代の始めに米国で人工知能の一分野として着手された。当時は、人間と同じような手法で対象物を認識し、その結果から作業計画を作り、マニピュレータを動かすという、いわゆる知能ロボットの開発を目標にしていた。しかし、当時の技術では人間に近いロボットを作ることができず、真に研究を進めるためには、視覚情報処理、問題解決、手の制御などの個別技術を開発しなければならないことがわかった。1970 年代には、総合ロボットの開発は下火になり、個別技術の研究が進展した。

いっぽう、実用面でも 1970 年代には産業用ロボットで代表される手だけのロボット、視覚情報処理だけを行う機械のような個別機能をもつロボットが使われるようになってきた。1980 年代には、プロセッサのコストの低下とともに、普及が加速された。今後は再び目と手のドッキングが行われることが予想される。

ここでは、実用的な物体認識技術の現状を紹介し、さらに現在開発中のロボットの目の基礎技術や、人工知能で取り上げられている画像理解を概観する。内容が多岐にわたるため、個々の話題は簡単にふれるだけ

にとどめざるをえないが、このような研究の動向がおわかりいただければ幸いである。

2. 実用化技術

2.1 必要な機能

実用的なロボットの目はどのような機能を必要とするかを示せばつぎのようになる。

(1) 計測……既知のものを測る。振幅、液面高さ、電子ビームの位置などの幾何学的手法や色などを測る。パターン計測とも呼ばれ、この技術自体は簡単である。

(2) 位置決め……既知の物の位置を知る。物体の自由度が小さければ容易である。

(3) 検査……一定の明るさ以外を検出すればよい簡単な検査から、種々の欠陥パターンを区別する検査までである。

(4) パターン認識……対象をあらかじめ教えておいたクラスに分類する。対象がシーン内に 1 個だけ、複数個が分離している、複数個が重なっている場合により難易度が大きく異なる。

もちろん、検査やパターン認識にも、位置決めや計測を必要とすることが多い。

2.2 実用化の条件

実用的なロボットの目の必要条件と、それを達成するための工夫をつぎに示す。

(1) 簡単な処理

工場で使うロボットの目は短期間に開発しなければならない。そのためには最も重要な情報処理のソフトウェアが複雑であってはならない。そこで、見やすい環境を設定したり、対象に拘束をもたせたりして、簡単な処理で目的が達せられるようにする。

(2) 実時間処理

処理を高速化するために、入力情報をなるべく少なくし、時間のかかる処理を高速にする。前者のためには、画像を 2 値化することが多い。後者のためには、画像全体に施す処理を専用プロセッサに行わせる方法

* 電子技術総合研究所

キーワード：画像処理 (image processing), 画像理解 (image understanding), 物体認識 (object recognition), 知能ロボット (intelligent robot), 人工知能 (artificial intelligence)

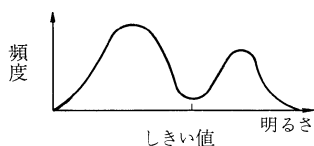


図 1
モード法

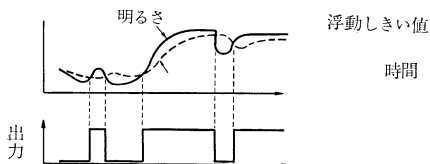


図 2
浮動 2 値化

がある。

(3) 高信頼性

あらかじめ種々の条件で実験を行っておくことはもちろんであるが、誤りを検出して、やり直したり停止したりする。はっきり判断できなければ不明であるとするなどの対策をとることも必要である。

2.3 2 値化

実用化されたシステムではほとんど入力画像を 2 値化して 2 値画像に変換している。2 値化は基本的には明るさが一定の値 (しきい値) 以上を 1, それ以外を 0 とする。しきい値のきめ方にはつぎの方法がある。

(1) 固定しきい値

あらかじめしきい値を与えておく。対象の変化が少なく、コントラストが十分ある場合に使える。

(2) p -タイル法

画像内で 1 となる部分の割合が既知の場合に有効である。通常は、明るさのヒストグラムをとり、累積分布が p パーセントとなる明るさをしきい値とする。あらかじめヒストグラムをとらなくても、適当なしきい値で 2 値化して、1 の割合を調べることを繰返すことにより、ほぼ p パーセントとなるしきい値を得ることができる²⁾。

(3) モード法

明るさのヒストグラムが図 1 のように双峰性であれば、その谷の明るさの値をしきい値とする。画面全体に一定のしきい値を適用するのではなく、画面を分割し、分割された領域に対してモード法によってしきい値を決める変動しきい値法もある³⁾。

(4) 浮動 2 値化、移動平均しきい値

図 2 のように、明るさの信号の振幅を減衰させ、遅らした信号をしきい値とすれば、急変する明るさの変化を検出することができる。類似な方法であるが、明るさの一定期間の平均をしきい値とする移動平均法も用いられている³⁾。

2.4 パターンマッチング

特定のパターンがどこにあるかを知るパターンマッ

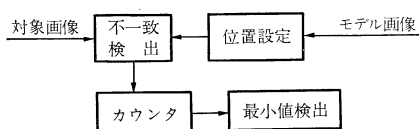


図 3 パターンマッチング

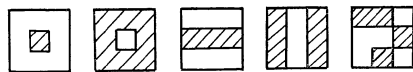


図 4 欠陥パターン

チングの原理を図 3 に示す。対象画像は 2 値画像とし、求める領域が 1 とする。その領域を画像の適当な位置に設定して、対象画像との重なりを調べる。いくつかの位置に対して調べ、その重なりが最大でそのときの不一致が小さければ、パターンの位置がわかる。もしどこでも不一致が小さくならなければ、そのようなパターンはないものとみなす。この処理は専用装置で高速化できる。

もし位置だけを求めればよいならば、つぎの方法でさらに高速化を図ることができる。

(1) 2 段マッチング

まず、低分解能の画像でマッチングを行いその近傍だけで高分解能のマッチングを行う⁴⁾。

(2) 部分マッチング

パターンの特徴的な部分 (もし平面パターンなら 2 カ所) だけをマッチングする⁵⁾。

以上は、いずれも物体の位置がある範囲内に入っていなければ効率が悪い。そうでなければ、重心を求めてからマッチングしたり⁶⁾、重心と慣性主軸を求めたりしなければならない。

2.5 特徴抽出

対象物体の 2 次元パターンが一定でなければ、単純なパターンマッチングだけでは十分でない。画像から種々の特徴を抽出し、それを組合せて判断を下さなければならない。画像の一部分から得られる特徴は局所特徴と呼ばれ、これに基づいて以後の処理を行うことが多い。以下に主な特徴抽出とその利用法を示す。

(1) 局所特徴による検査

プリント板のパターンや、IC のパターンには、線の最小幅、最小間隔、方向などに一定の制限がある。この制限を守っていない異常を検出するためには、局所特徴だけをいれればよい。たとえば微細な構造は欠陥とみなされるので、図 4 のパターンは欠陥となる⁷⁾。また、2 値画像の拡大、縮小を繰返すことによって、微細パターンを検出する方法もある⁸⁾。

(2) 局所特徴の組合せ

図 5 は IC パターンの水平方向に隣り合う 3 個の局

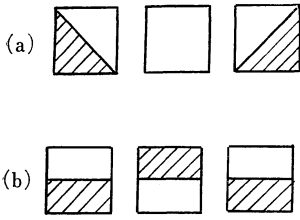


図 5 3つ組欠陥パターン

| | | |
|---|---|---|
| A | B | C |
| D | E | F |
| G | H | I |

図 6 画素の記事

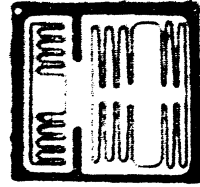


図 7 IC チップ像

| | | | |
|---|----|----|----|
| 1 | 2 | 2 | 1 |
| 2 | -1 | -2 | -3 |
| 2 | -2 | | |
| 1 | -3 | | |

図 8 左上角検出用重み

所特徴の組合せを示している⁷⁾。いずれも、それぞれの局所特徴は、正常とみなされる。しかし (a) は水平な境界の欠け、(b) は不規則パターンでいずれも欠陥である。

(3) 特徴の計測

IC パターンの線幅を求めるためには、線の方向に直角な幅を計測しなければならない。線の方向と両側の位置は、局所特徴に基づいて決めることができる⁹⁾。このように、大部分の計測は特徴の位置を知ることによって帰着できる。

(4) 局所特徴による位置決め

画像の局所特徴を抽出するために、積和演算が用いられることが多い。簡単な例として微分を考える。いま図 6 に示すような 3×3 の画素からなる領域の中心 E の明るさの差 ΔI を求めたいとする。横方向の明るさの差 Δx と縦方向の明るさの差 Δy を使えば次式となる。

$$\begin{aligned}\Delta I &= |\Delta x| + |\Delta y| \\ \Delta x &= A + D + G - C - F - I \\ \Delta y &= A + B + C - G - H - I\end{aligned}$$

もし ΔI が一定値以上ならば、そこには明るさが異なる領域間の境界があるとみなされ、その境界線の方角 θ は次式となる。

$$\theta = \tan^{-1}(\Delta x / \Delta y)$$

対象物によっては、画像自体に対する θ のヒストグラムから、物体の方向を知ることができる。たとえば図 7 に示す IC チップの画像から θ のヒストグラムを作れば、 $\theta = 0^\circ$ と $\theta = 90^\circ$ にピークが現れる。もし傾いていれば、ピークがずれる。正しい方向のチップに対してその位置を求めることもできる¹⁰⁾。図 8 に示す重みのフィルタによって局所領域の積和を計算すれば、チップの左上の角で最大値をとる。他の角も同様なフィルタによって検出できる。

3. ロボットの目の開発

産業用ロボットの機能を拡張するために、視覚機能を付与する研究開発が行われている。ここでは現在実

用化を目ざして開発されている主な技術を述べる。

3.1 ビジュアルフィードバック

ロボットの手が物体を把んだときに手と物体の関係がどのようになっているか、あるいは把んでいる物体を定められた位置に置きたいときに、それがほんとうにそこにあるかどうかを知りたいことがある。もしロボットの目がこの機能をもっていて、必要な情報をフィードバックしてくれれば、正確な作業を行うことができる。このビジュアルフィードバックを実用化するためには、フィードバックの時間を短くしなければならない。対象物は既知であるから、必要な所だけを見ればよい。

もし、1 台のテレビカメラを入力装置として、物体の 3 次元位置を知りたい場合には、必ず何らかの拘束条件が必要である。たとえば、手が既知平面上の物体を把む場合に、手の高さが正確に制御されていれば、物体と手の位置関係に拘束条件が生じる¹¹⁾。また、定められた位置に置く場合、その位置が既知の面の上であれば、物体をその面に拘束してから見れば 3 次元位置がわかる¹²⁾。

ビジュアルフィードバックでもう 1 つ大切なことは、画像から必要な部分を抽出することである。もし対象物体が多面体であれば、その頂点を抽出すればよい¹¹⁾、¹²⁾。画像において、物体に凹の部分があるか、穴があるか、曲率の大きい部分があれば、そこを抽出すればよい¹³⁾。特徴的な部分がなくても、物体の姿勢が一定ならば、パターンマッチングを適用できる。なお、拘束がない一般曲面体に対してビジュアルフィードバックを行うことは現状では実用的でない。

3.2 画像処理専用プロセッサ

実用的な視覚情報処理装置は専用プロセッサを使って高速処理を行っている。1970 年代初期から 2 値画像処理用プロセッサが使われてきた⁸⁾、¹⁴⁾。いずれも、出力画像の 1 画素が、入力画像の 1 画素だけからか、小さい局所領域内の画素だけから決定されるような処理に限られている。その方式は図 9 に示すようなパイプライン型である。入力画像はラスタ走査の順に入力

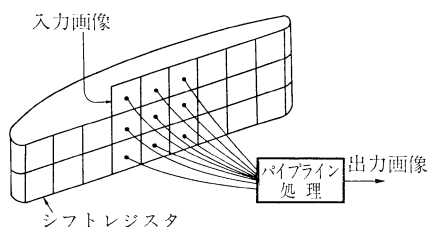


図 9 局所処理を行うパイプライン型プロセッサの例
されると、少し遅れて入力 of 走査速度と同じ速度で出力画像が得られる。図では 3 近傍の例を示したが、より大きい局所領域を用いる場合もある。また、出力画像に再び局所処理を施せるように、図 9 の処理装置を何段も備えているものもある¹⁵⁾。

いっぽう、画素 1 個に 1 個の演算要素を対応させる完全並列型もある¹⁵⁾。演算要素の数が多くなるので、1 個を簡単化しなければならない。そこで、一度に 1 ビットだけを処理することが多い。処理プログラムは一度に主計算機から送られ、同一命令を実行する。小さい 2 値画像を繰返して処理するのに適している。

演算要素の数を減らし、1 個の演算要素の機能を増強する方式もある¹⁵⁾。それぞれが異なったプログラムを実行することもできる。演算要素の数は 16~256 程度である^{16), 17)}。

よく用いられる画像処理に適したハードウェアを複数個用意しておき、パイプライン処理を行う方式もある。データフロー方式で種々の演算要素を利用する装置も試作されている¹⁷⁾。

専用プロセッサは、汎用画像処理のための道具として、あるいは会話型処理のできるディスプレイ装置の一部として実用されている。

専用プロセッサを有効に利用するためには、望みの処理をいかにして専用プロセッサ向きのアルゴリズムに帰着するかを考えなければならない。いっぽう、もし従来のプロセッサではうまく処理できない場合が生ずれば、新しい専用プロセッサ開発のシーズとなるう。

3.3 距離情報の利用

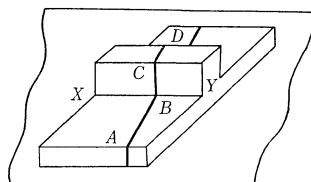
物体の位置を知ったり、物体の形を知るのに、距離情報を直接使うことができれば都合がよい。視野内の多数の点の距離を入力する装置はまだ商品として作られていない。距離を測定する主な方法を図 10 に示す。

超音波は障害物検出に使える。レーザー光、ミリ波は、発射方向を制御することと、正確な時間測定を必要とする。両眼立体視は、一般的には対応点決定が困難であるが¹⁸⁾、距離を求めたい点と他と区別できる場合には適用できる^{19), 20)}。両眼立体視の一方の眼を光の

| | | |
|-----------|--------------|------------------------|
| 伝播時間 | 超音波…………… | 横方向の分解能が低い。 |
| | レーザー光…………… | 測定できる視野は広いが装置が大がかりになる。 |
| 三角測量 | ミリ波…………… | |
| | 両眼立体視…………… | 対応点の決定が問題。 |
| | 光の投影…………… | 遠くない物体なら使える。 |
| 自動焦点…………… | パターンの投影…………… | 画像処理を伴う。 |
| | | 多数の点の測定には時間がかかる。 |

図 10 距離測定法とその特徴

図 11
距離測定の応用例



投影に置き換えれば、対応点決定を行わなくてすむ、スポット光を 2 次元的に走査する方式と、スリットを通した平面光を 1 次元的に走査する方式がある¹⁸⁾。パターンの投影の代表例はモアレトポグラフィである²¹⁾。そこでは、モアレ縞のパターンを検出しなければならない。

以上の方法の中で、光投影法が最も信頼できる入力法として、物体認識に利用されてきた。また、その中の平面光投影方式は、光切断法とも呼ばれ、現在実用化のための開発も行われている^{22), 23)}。たとえば、図 11 のようにスリットを通した光を左方から投影し、その像をテレビカメラで入力する。その画像から特徴的な点を求める。同図では、点 A, B, C は 2 直線の交点として求められ、点 D は不連続点として求められる。これらの点から、物体の形状がわかる。もし、点 B を溶接するならば、この投影装置と溶接機が一体となって動いていくことにより、つねに正しい溶接点を知ることができる。

4. 画像理解

実用的画像処理では、対象を制限して必要な情報だけを抽出する。人間が物を見て理解する場合には、対象シーンがどのようなものかという記述を作り、その記述に基づいていろいろな情報を抽出していると考えられる。その際に対象に関する知識を使っていることはもちろんである。このように人間と類似な方式で画像を処理することを画像理解と呼んでいる。

4.1 画像理解の過程

一般的な画像理解の過程を図 12 に示す。図における画像は、濃淡画像やカラー画像だけでなく、多数の点の距離を表わすいわゆる距離画像であってもよい。

典型的な例として、図 13 に示すような直方体と三

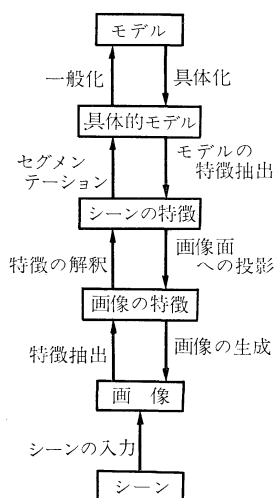


図 12 画像理解の概念図

角柱を含むシーンを取り上げる。入力された画像は濃淡画像とする。まず、明るさの急変する点（緑点）を抽出し、それを連結して図 13（線につけられた符号は無視）の線画を得る。緑点や線画は画像の特徴である。つぎに線画の線の意味を決定する。図 13 には、面が凸に交わるか、凹に交わるか、一方の面が他方の前にあるかによって線に符号がつけられている¹³⁾。これはシーンの特徴である。つぎに、直方体と三角柱を分離し（セグメンテーション）、それぞれのモデルと照合すれば認識される。この例では、シーンを構成するいくつかの物体のモデルを、セグメンテーションの結果と照合した。もしシーンが簡単であれば、シーン全体のモデルをもつこともできる。あるいは、モデルからあらかじめシーンの特徴や画像の特徴を求めておき、そのレベルで照合することもできる。

図 12 で、下から上へ処理を進めることを bottom-up、上から下へを top-down と呼ぶ。複雑なシーンを理解するためには、いずれか一方だけでは十分でない。最初は bottom-up 処理を行うが、ある段階で仮説を立て、それを top-down に検証することもある。照合も種々のレベルで行われることになる。

4.2 画像の特徴

画像の特徴の抽出は古くから研究されている^{24)~26)}。濃淡画像に対しては、2 値化、緑点抽出、縁線や線の抽出、テクスチャ解析、領域分割などがある。2 値画像（濃淡画像から求めた領域や線を含む）に対しては、細線化、曲線の記述、領域の形の記述などがある。

4.3 シーンの特徴

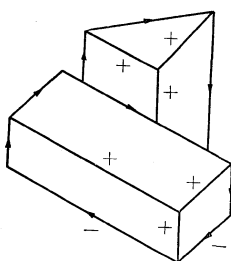


図 13 シーンの例

2 次元の画像から 3 次元シーンの特徴を得るためには何らかの拘束条件（あるいは知識）を必要とする。以下に代表的な拘束条件を示す。

(1) 光源と物体表面

光源の方向が既知で、物体表面が拡散面で一様とすれば、面が滑らかであるという条件から面の 3 次元形状が求められる^{27), 28)}。複数の方向から照明したシーンの画像が複数個あれば、面の連続性の拘束は必要ない²⁹⁾。

(2) 物体の種類

シーンに含まれる物体が多面体であれば、線画から線の物理的解釈を得ることができる¹³⁾。逆に、物体はすべて滑らかな曲面をもつという条件を利用することもできる³⁰⁾。

(3) 形

対象の形に関する知識が与えられ、その形が画像内で求められれば、3 次元情報を得ることができる。たとえば、シーン内には多数の平行線があることがわかっていれば、画像においてそれらを延長して交わる点（無限遠点）を求めることにより、平行線がのっている平面を求めることができる³¹⁾。画像内に多数の既知図形があれば、それらを含む曲面を再構成することもできる³²⁾。

(4) テクスチャ

テクスチャの要素の大きさの変化から、面の向きを得ることができる³³⁾。もし、テクスチャがランダムな明るさパターンをもつことがわかっていれば、その明るさの微分の方向の分布を調べることにより、面の向きを計算できる³⁴⁾。

4.4 知識の表現と利用

これまで、シーンの記述を作る過程を述べてきた。記述から、シーンの中の物体の名前や関係を知るためには、何らかの判断を下さなければならない。この判断基準がモデルであり、モデルやモデルとの照合法が知識である。知識をどのように計算機内に表現して使うかは、目的に応じて異なる。簡単な対象に対しては、2 節で述べたパターンエッチングや局所の特徴に基づく判断で十分である。対象物体によっては、シーンの特徴を求めればよいこともある²⁴⁾。一般に、照合が図 11 の上位で行われれば、モデルの数は少なくすむ。しかし、照合の自由度がふえるため、照合の試行錯誤の回数を減らす工夫をしなければならない。以下に、2 次元モデルと 3 次元モデルの主な手法を示す。

(1) 2 次元モデル

対象シーンが、画像の特徴とその画像内での位置関係によって表わされる場合に有効である。たとえば屋

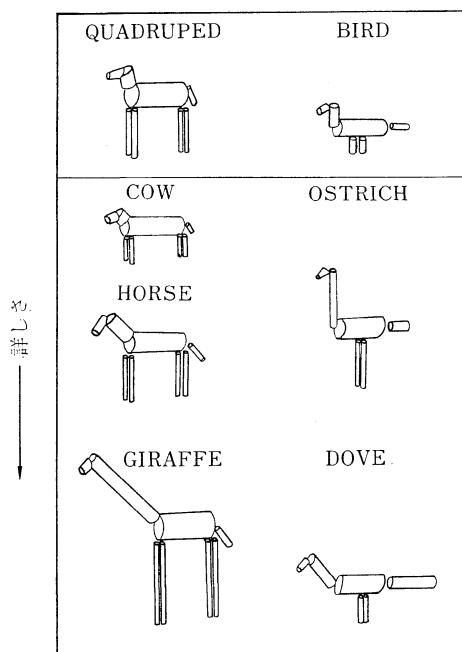


図 14 階層的モデル

内風景で、床、壁、ドアなどは、領域を基本要素とした 2 次元モデルで表わされる¹³⁾。机上シーンのように、シーン全体のモデルをもつことができず、その構成要素ごとにモデルをもたなければならないこともある。最初は正しい領域が得られていないことが多いので、モデルとの照合を行いつつに正しい領域を求めていくことが重要である¹³⁾。

(2) 3 次元モデル

この場合も、シーン全体のモデルと構成要素ごとのモデルがある。前者は地形モデルとしての地図のような場合で、地形を見る方向もあらかじめわかるので照合が楽である³⁵⁾。

物体ごとの 3 次元モデルを必要とし、しかも各物体をどちらから見ているかがわからない場合は、照合がむずかしくなる。まず、何らかの方法で物体の姿勢の候補を絞ってから照合を行ったほうが効率が良い³⁶⁾。

3 次元モデルでもう 1 つ問題になるのは、機械部品の設計図のように物体を再構成できる固定的モデルとするか、あるいはもっと柔軟なモデルとするかである。前者の場合は、類似の物体でもそれぞれに対してモデルを作っておかなければならない。認識のさいに、多数のモデルと照合を試すことを避けるためには、階層的なモデルを作っておくことが考えられる。

図 14 に、円筒の組合せで作った階層モデルの例を示す³⁷⁾。最初に上位のモデルで照合を行い、成功すれば

下位でより詳しい照合を行う³⁸⁾。柔軟なモデルとしては、物体を領域に分け、領域の特徴を相互関係で表わす方法がある³⁹⁾。しかし人間が、コーヒーカップや電話機に対してもつ概念は、どのようなモデルによって表現できるかは今後に残された問題である。

5. おわりに

実用的なロボットの日としての物体認識技術に、ビジュアルフィードバックや画像理解の研究成果が取り入れられ、高度な機能をもつロボットを実現することが今後の課題であろう。処理速度向上のためには、画像処理専用プロセッサや並列処理計算機の利用が有望である。また、視覚情報処理の発展は、ロボット言語、指先の各種センサ、マニピュレータの制御などの関連、技術と密接な関係にあり、知識の共用を推進することが望まれる。

(昭和 57 年 9 月 1 日受付)

参 考 文 献

- 1) M. Mese, et al.: An Automatic Position Recognition Technique for LSI Assembly, Proc. 5th IJCAI, 685/693 (1977)
- 2) C. K. Chow and T. Kaneko: Boundary Detection of Radiographic Images by a Threshold Method, Frontiers of Pattern Recognition, S. Watanabe(ed.), 61/82, Academic Press (1972)
- 3) 岩崎, 中井: リアルタイム画像処理を用いた赤熱鋼片表面探傷装置, 第 12 回画像工学コンファレンス論文集, 113/116 (1981)
- 4) T. Uno, et al.: An Industrial Eye that Recognizes Hole Position in a Water Pump Testing Process, Dodd, G. G. et al. (eds.) Computer and Sensor-Based Robots, 101/116 (1979)
- 5) 成瀬, 五十嵐: 半導体製造設備の自動化, テレビジョン学会誌, 35-11, 934/940 (1981)
- 6) 依田, 池田, 江尻: 回転形パターンマッチングによる形状識別の試み, 計測自動制御学会論文集, 10-3, 284/289 (1974)
- 7) 須田, 高見, 岩谷: 半導体プロセスにおける欠陥・微粒子のレーザによる検出, 電子材料, 16-9, 103/109 (1977)
- 8) 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, 96-C-5, 89/96 (1974)
- 9) 中島, 稲垣: パターン幅測長によるプリント板用ホトマスク致命欠陥検査, 第 11 回画像工学コンファレンス, 33/36 (1980)
- 10) M. L. Baird: SIGHT-1: A Computer Vision System for Automated IC Chip Manufacture, IEEE Trans., SMC-8-2, 133/139 (1978)
- 11) Y. Shirai and H. Inoue: Guiding a Robot by Visual Feedback in Assembling Tasks Pattern Recognition, 5-2, 99/108 (1971)
- 12) W. A. Perkins and T. O. Binford: A Corner Finder for Visual Feedback, Computer Graphics and Image Processing, 2-3-4, 355/376 (1973)
- 13) 白井良明: 物体・光景の認識と理解, 情報処理, 19-10, 969/976 (1978)

- 14) 鳥野, 江尻, 徳永: 移動物体の実時間視覚認識方式とその応用, 電気学会論文誌, **96-C-3**, 49/55 (1976)
- 15) 木戸出正継: 画像処理用ハードウェア, 情報処理, **21-6**, 620/625 (1980)
- 16) 白井: 生産システムにおけるパターン認識技術と将来, 自動化技術, **13-2**, 18/25 (1981)
- 17) 木戸出, 坂上: パイプライン方式と完全並列処理方式が増えた最近の画像処理装置, 日経エレクトロニクス, **295**, 179/216 (1982)
- 18) 白井良明: 距離情報の検出と処理, bit 増刊, 711/724 (1976)
- 19) S. Fujii, et al.: Computer Control of a Locomotive Robot with Visual Feedback, Proc. 11th ISIR, 219/225 (1981)
- 20) J. D. Dosson and F. Germain: A New Approach to the Problem of Acquiring Randomly Oriented Workpiece out of a Bin, Proc. 7th IJCAI, 796/802 (1981)
- 21) 飯塚智弘: 自動判定や実時間撮影などの研究が進むモアレ・トポグラフィ, 日経エレクトロニクス, 92/105 (1978. 9. 18).
- 22) 寺島, 作井, 上杉, 山田, 小柳: 画像処理技術の工業計測への応用 [II]—光切断法による溶接ならいセンサー, 第19回 SICE 学術講演会予稿集, 1618, 191/192 (1980)
- 23) T. Bamba, et al.: A Visual Sensor for Arc-Welding Robots, 11th ISIR, 151/157 (1981)
- 24) A. Rosenfeld and A. C. Kak: Digital Picture Processing, Academic Press, New York (1976), 長尾真監訳デジタル画像処理, 近代科学社 (1978)
- 25) 長尾: 画像の特徴抽出と認識, 信学誌, **59-11**, 1181/1188 (1977)
- 26) 横矢, 田村: 2値画像処理, 画像学誌, **10-1**, 40/50 (1981)
- 27) B. K. P. Horn: Obtaining Shape from Shading Information, in the Psychology of Computer Vision, ed. P. H. Winston, McGraw-Hill (1975); 白井, 杉原訳: コンピュータビジョンの心理, 産業図書 (1979)
- 28) K. Ikeuchi and B. K. P. Horn: Numerical Shape from Shading and Occluding Boundaries, Artificial Intelligence, **17-3**, 141/184 (1981)
- 29) E. N. and R. Jain: Shape from Shading for Surface with Texture and Specularity, Proc. 7th IJCAI, 652/657 (1981)
- 30) H. G. Barrow and I. M. Tenenbaum: Recovering Intrinsic Scene Characteristics from Images, Computer Vision Systems, A. R. Hanson, et al. (eds.) Academic Press (1978)
- 31) J. R. Kender: Shape from Texture, Proc. 6th IJCAI, 475/480 (1979)
- 32) 池内克史: 被写体表面上の小図形の幾何学ひずみから3次元形状を再構成する1手法, 信学論, **J 65-D-7**, 850/857 (1982)
- 33) 大田, 前信, 坂井: 透視射影されたテクスチャから平面の傾きを得る一方法, 情報学研資, コンピュータビジョン, **16-2** (1982)
- 34) A. P. Witkin: Recovering Surface Shape and Orientation from Texture, Artificial Intelligence, **17-1-3**, 17/45 (1981)
- 35) R. C. Bolles, L. H. Quam, M. A. Fischler and H. C. Wolf: Automatic Determination of Image-to-Database Correspondence, Proc. 6th IJCAI, 73/78 (1979)
- 36) K. Ikeuchi and Y. Shirai: A Model Based Vision System for Recognition of Machine Parts, Proc. 2nd Annual National Conf. on Artificial Intelligence (1982)
- 37) D. Marr: Analysis of Occluding Contour, Proc. Roy. Soc., B, **197-1129**, 441/475 (1977)
- 38) R. A. Brooks: Goal-Directed Edge Linking and Ribon Finding, Proc. Image Understanding Workshop, Science Application, Inc., 72/78 (1979)
- 39) 大島, 白井: 3次元情報を用いた物体認識, 信学論, **J 65-D-5**, 629/645 (1982)

産業用ロボットの統計 (3)

需要部門別出荷割合比 (日本産業用ロボット工業会調べ)

