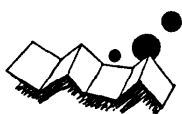


## 解説

—形状認識技術への応用(1)—

## 自動組立てにおけるパターン認識の応用†



鳥野 武††

## 1. はじめに

生産工程における組立て作業の効率を上げる手段として分業化が行われる。しかしながら、絶えず同じ動作を繰り返す単純作業は、人にとって苦痛であり、結果もまた機械におよばないことが多い。人に替って組立て作業を行う自動組立て装置はこのような背景から開発されつつある生産装置であるが、作業そのものは単純に見えても、人に替ってものを組立てるといふことは、見掛けほど簡単なことではない。とくに、組立て部品を機械に供給する段階において一つのむつかしさがある。形状・姿勢・位置を一定にしないで供給しようとする、それらの情報を組立て機械に与える何らかのセンサがなければ、機械は手の下しような状態になってしまう。

また、機械が部品を手に入れた後、二つの部品を結合するというもっとも基本的な組立て作業においてもむつかしさがある。それぞれの部品の位置が結合に十分な精度で判っていると同時に、部品を掴む手の位置精度もこの条件を満たさなければならず、これを実現することは容易でない。精度が高いということは、機械の一つの特質であるけれども、人に替って組立て作業をする機械においては、それは必ずしも望ましい性質とは言えない。なぜなら、人が精度の低い柔らかい手で組立てていたものを、強固な精密な手に委ねると、部品は異なる影響を受けるであろうし、組立ての方法も必然的に変更せざるを得なくなる筈だからである。

このような部品の供給、部品の結合といった組立て作業を合理的に行うために、パターン認識技術を応用した人工の視覚を用いる。この視覚装置は、組立て用部品を対象として、形状・姿勢・位置などの認識を行うものである。組立て用部品によっては、形状や表面の様子などを十分定義できない場合があり、さらに、

明るさの変化や複雑な背景などが、視覚装置の実現をむつかしくすることが多い。以下では、この視覚装置について、実用上の問題とその解決例を概説する。

## 2. 組立て用視覚装置の必要性能

ここで、組立て用視覚装置の備えなければならない一般的な性能について述べる。

## (1) 高速性

通常のデータ処理装置に比べて、パターン認識装置は、扱う情報量が膨大なために、とかく処理時間を要し勝ちである。しかしながら、実用化のためには、生産工程における他の装置群との速度強調が必要である。とくに組立て装置においては、マニピュレータの動きに合わせた実時間性が重視される。

## (2) 低コスト

複雑な処理、膨大な繰返し演算を短時間で実施するために、回路数を多くすることがよく行われるが、生産工程用の自動化装置は、人手によった場合との経済性比較によって取捨選択がなされるので、装置の大規模化は自から限度がある。

## (3) 高信頼性

低い故障率や短い時間での故障回復能力はもちろん大切な性能であるが、生産装置であるために、認識結果の確からしさがということが重要である。組立て部品はそれぞれ高価であり、誤った視覚認識による組立ての不良や部品の破損は可能な限り避けなければならない。もし、十分な認識率が確保できない場合には、認識結果の確からしさを自動判定するようにした上で、確かでないときには不明という結果を出力し、不良率を下げるようなことも考えなければならない。

## (4) 柔軟性

自動組立て装置を経済的に利用するためには、多品種生産に適應できることが大切である。形式の類似した部品を扱えるようにするとともに、その変更手続きが簡単であることが望まれる。

また、このようなことの延長として、拡張性も大切

† Pattern Recognition Applied to Automatic Assembly System by Takeshi UNO (Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd.).

†† (株)日立製作所中央研究所

である。組立て部品などのモデルチェンジに対応でき、組立て装置の増設や高性能化に応じられることが望まれる。

### 3. 撮像の方法

組立て用視覚装置は撮像装置によって画像情報を入力し、これを手掛りに物体を認識するものである。したがって、この入力が適切に行われないと、その後にくら努力しても良い結果は得られない。この撮像の方法には、物体と照明・撮像の形態によった多くの組合せがある。実用されているものを中心に、特徴のある方法を、表-1と図-1~11を用いて概説する。

#### (1) 2次元画像を入力する上での分類

一般に、組立て用視覚は2次元の画像情報を処理対象とする。撮像素子の入力領域に0, 1, 2\*次元の種類があるほか、撮像素子全体（以下撮像器という）の走査\*\*、照明光束の形状、照明光束の走査\*\*、物体の走査\*\*\*にもそれぞれ0, 1, 2次元のものがあって、これ

表-1 撮像の方法を定める要因

撮 像	走 査	0次元走査 1次元走査 2次元走査
	素 子	0次元撮像素子 1次元撮像素子 2次元撮像素子
	対 象	平 面 上 面 側 面 角 度 その他
照 明	走 査	0次元走査 1次元走査 2次元走査
	平 行 光	0次元光束 1次元光束 2次元光束 射 方 斜 角 その他
	非 平 行 光	点光源 線光源 面光源 順 光 斜 光 逆 光
物 体	走 査	0次元走査 1次元走査 2次元走査
	透 明	透 明 半透明 不透明 鏡面反射 乱反射 その他

\* テレビカメラの入力領域は2次元とみなす。

\*\* 0次元走査は固定の意。

\*\*\* この場合の走査は移動の意。なお、画像入力のための走査のほか、視野を移動するための走査があるが、後者についてはここでは採りあげない。

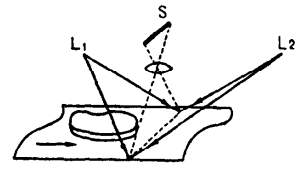


図-1

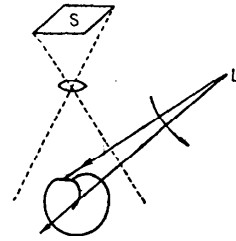


図-2

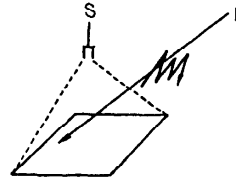


図-3

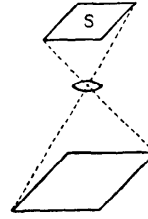


図-4

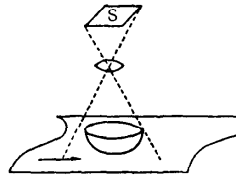


図-5

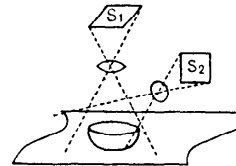


図-6

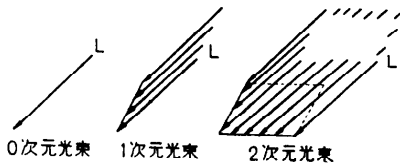


図-7

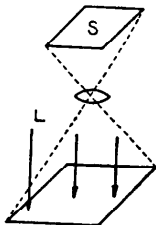


図-8

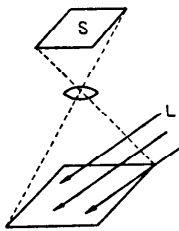


図-9

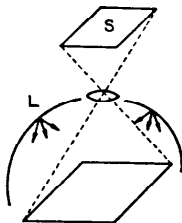


図-10

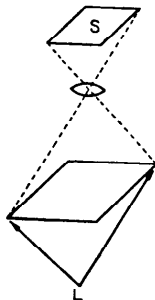


図-11

らの組合せで2次元の画像情報を入力する。実用化されているもの、あるいはそれに近いものは2次元の撮像素子を用いる傾向にあるが<sup>11-3)</sup>、安価でかつ高い解像度を得たい場合に1次元の撮像素子を用いることが多い。1次元の撮像素子の場合には、物体を1次元走査することにより2次元画像情報を入力する形式がほとんどである<sup>4)</sup>。

1次元の撮像素子、1次元の物体走査の組合せにおいて、さらに1次元の照明光束を斜めに投光することによって、距離<sup>\*</sup>に関する画像情報を得る方法<sup>6)</sup>がある(図-1参照。図においてSは撮像素子、Lは照明光)。距離情報は物体の反射率や反射面の状態とは関係なく、物体の形状そのものの情報が得られる特徴がある。

また、これよりもっと基本的な距離情報を得る方法として、1次元の照明光束を1次元走査するものがある<sup>6)</sup>。この場合2次元の撮像素子を用い、照明光束を走査しつつ繰り返し撮像する。このため撮像所要時間が長く、速度面での不利があるが、視野全体にわたり多値の距離情報が得られる(図-2参照)。

フライング スポット スキャナは0次元の照明光束を2次元走査し、これが物体に当たる反射光を0次元の撮像素子で受ける形式である。遮光を要し、物体は平面的なものに限定されるが、この条件が満たせる場合には実用性が高い(図-3参照)。

(2) 撮像の方向と物体の姿勢による分類

もっとも簡単な場合は、平面状の物体に対し正面から撮像するものである。半導体の組立てなどがこの例に属し、実用されているものの多く<sup>11-3)</sup>がこの形式をとっている(図-4参照)。

ベルトコンベア上の物体を認識する場合<sup>6),7)</sup>のように、撮像器を下方に向ける形式は、上記の形式の変形と見ることできるが、ここでは、組立て部品のような比較的単純な形の物体を水平な面上に置くとき、安定な姿勢はせいぜい数種程度であるので、上方から撮像した場合の物体の形状も数種程度しかない、という仮定があって、これが有益に働いている撮像形式である。前者が平面状の物体に利用されるのに対し、この形式は立体状の物体に適用を上げたものといえる(図-5参照)。

この形式の発展形態として、撮像器を水平方向にも構え物体の側面の画像情報も入力しようとするものがある<sup>6)</sup>。側面の情報は上面の情報の補助として役立つ。

\* この場合には距離情報は2値である。

(図-6 参照)。

### (3) 照明の形式による分類

照明の形式は大別して、平行光と非平行光からなる。平行光は前述のような0, 1, 2次元光束(図-7 参照)という分類のほかに、その平行光の投射の方法として、落射照明、斜方照明などがある。落射照明は撮像器のレンズ光軸と平行な方向に投射し、光軸と直交するよう配置した平面状物体の鏡面反射をする部分を明るく撮像する画像入力に用いられる(図-8 参照)。斜方照明は撮像器のレンズ光軸に斜交する方向に投射し、光軸と直交するよう配置した平面状物体の乱反射をする部分を明るく撮像する画像入力に用いられる(図-9 参照)。

非平行光は、発光部の形状によって、点光源、線光源、面光源\*に分けられる。通常の室内照明はこれらの混合したもので、物体が乱反射面からなる場合にはおおむね適当であるが、鏡面を含む場合には安定な像を得難い。

鏡面を含む物体を認識対象とする場合には、面光源で物体や撮像器を取囲むようにすれば、むらのない鏡面部の像が得られる(図-10 参照)。

撮像器、照明器、物体の相互位置によって、順光、斜光、逆光の関係が生じる。とくに逆光形式は透明あるいは半透明の部分と不透明の部分を明瞭に区別したいときに有効である<sup>1)</sup>(図-11 参照)。

(なお、物体については透明、半透明、不透明の状態があり、それぞれについて、鏡面反射、乱反射などがあるが、画像入力との関係については照明の部で説明したので重複を避ける。)

## 4. 認識の方法

撮像によって得られた2次元のパターンを手掛りに形状を識別しその位置を求める方法について簡単に説明する。ここにとりあげる二つの例は、ともにマッチング法といい、あらかじめ記憶したテンプレートのパターンと類似したパターンを、認識対象を撮像して得た画像の中から捜し出す方法である。テンプレートを交換しさえすれば、認識目的を変更できるので、柔軟性が高い。

### (1) マッチング法<sup>1)</sup>

この方法は、画像の中に1つの形状だけが存在して、その形状の部分はたとえば黒く、その他の部分は

すべて白いことが約束されている場合に適するものである。処理の具体的方法はつぎのようなものである。

(a) 水平方向と垂直方向に量子化された画像が入力されると、

(b) 画像中の黒い部分の重心を求め、

(c) 画像全体を水平方向と垂直方向にシフトして、画像中の黒い部分の重心を画面の中心に移す。

(d) 画像全体を、画面の中心を原点とする極座標形式で量子化し、

(e) 画像全体を周方向にシフトしつつ、テンプレートのパターンとの一致度を調べる。

(f) テンプレートのパターンと十分に一致した場合、(c)での水平方向と垂直方向のシフト量および(e)での周方向のシフト量を、テンプレートからのずれ量として出力する。

ここで述べたマッチング法は、図-6に示した撮像形式などに適している。各種の物体ごとにとり得る姿勢の数だけテンプレートを用意するようにすれば、もっとも良い一致が得られたテンプレートから、物体の種類と姿勢を知ることができる。図-12はこの処理過程を示したものである。

### (2) マッチング法<sup>2)</sup>

この方法は、画像の中に認識対象とする形状以外のものが混入していても差支えなく、さらに認識対象が黒であり、その他の部分がすべて白でなければならないような酷しい条件もなく、柔軟性の高い方法である。

(a) 水平方向と垂直方向に量子化された画像が入力されると、

(b) その画面の数パーセントから十パーセント程度の辺をもつ局所パターンを順次切出し、

(c) テンプレートのパターンとの一致度を調べる。

(d) 2つのテンプレートのパターンに対し、十分に一致する位置がそれぞれ得られた場合、この2位置の座標から、全体像のずれ量を求め出力する。

この方法では、局所パターンをテンプレートにしているから演算量が少なく済むこと、および全体像の回転の影響が少ないこと、またテンプレートのパターンが小さくても全体像に対応するそれぞれの位置を十分離すことにより高い精度で位置ずれ量が測れることなどの特徴がある。

なお、2つのテンプレートでは、画像のノイズなどのために、少なくとも一方のマッチングができないよ

\* 0, 1, 2次元光源とも呼ぶべき光源形式であるが、ここでは通称に従っておく。

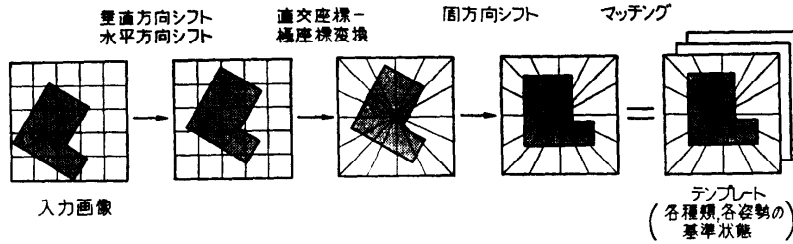


図-12 マッチング法1

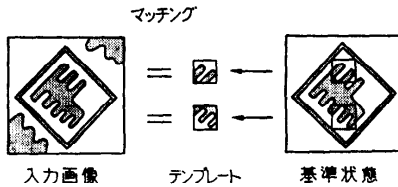


図-13 マッチング法2

うな事態が生じると、全体像のずれ量を求めることができなくなる。1, 2のテンプレートを追加すると、そのような確率は急激に減少するから、認識率と組立て装置の信頼性をあげることができる。図-13はこの処理過程を示したものである。

### (3) 実用例

半導体のワイヤボンディング作業を自動化する目的で開発された視覚装置<sup>9)</sup>について、具体的な諸元を示し、現在の利用状況の一端を紹介しておく。

この視覚装置はテレビカメラと専用回路(2次元局所メモリ部、テンプレートマッチング部、座標計算部など)からなる。テレビカメラの出力は2値化とともに3MHzでサンプリングし、サンプリングごとに得られる画素データをシフトレジスタで受け、この中から2次元配列の8×8画素の局所パターンを読出す。この局所パターンと、あらかじめ用意した同画素数のテンプレートのパターンと比較し、十分に一致する位置が得られれば出力する。やや具体的には、局所パターンとテンプレートパターンの間で互に対応する画素64組について、状態が一致する画素の数を求めるという処理を、全画面160×120画素に対して均等に繰返すと、一致画素数が最大となる位置、すなわちテンプレートパターンにもっともよく類似した局所パターンの位置を求めることができる。なお、8×8画素のマッチング演算を333ns以内に完了するようにすると、1画面中からテンプレートパターンにもっとも近い位置を求める処理は、テレビカメラの1画面の走査時間と同じ16.7msでできる。

また、8×8画素では±5°の範囲の画像の傾きが許容できる。したがって、認識対象の回転が±15°の範囲を超えなければ、テンプレートは+10°、0°、-10°の3種類を用意すればよい。予備を1つ含めた3つの局所テンプレートのそれぞれに、3種類の傾きをもったテンプレートを用意するようにすれば、テンプレートの総数は9種類となる。したがって、認識可能な場合の最大処理時間は150msとなるが、順序の合理的な選択を行えば、せいぜい83msで目的を達する。

実際には、マッチング以外の演算もあり、入出力装置等の待ち時間もあって、半導体1個あたりの平均処理時間は200msである。この速度は、1台の視覚装置で5~10台のボンディング装置の位置決めを行える能力があることを示し、速度そのものについてはもちろんのこと、コストについても実用上十分なものとなっている。また認識率も99.9パーセント以上を達成している。

この種の装置は国内外で広く開発<sup>9)-13)</sup>され、トランジスタ、IC、LSIに適用されているほかに、最近では照明条件によって画像が不安定なハンダ系トランジスタや、局所的に距離変動のあるハイブリッドICなど<sup>14)</sup>の組立てに活用されている。

## 5. 目と手の協調

自動組立て装置における視覚装置は、これまでに説明した撮像方法や認識方法などから形状・位置を認識するものとして構成し、ここから得られた情報をマンピュレータ部に供給するようにするのが通常の構成方法であるが、視覚部とマンピュレータ部とを有機的に結合することによって、いっそう特徴ある機能を発揮できる。このようなシステムの実例は人間の作業にも見ることができる。すなわち、人の目は絶対的な位置を精度良く測定する能力にはたけていないし、人の手もそれだけでは指定された位置に正確に物を運ぶことはできないが、目と手を協調させることによって、こ

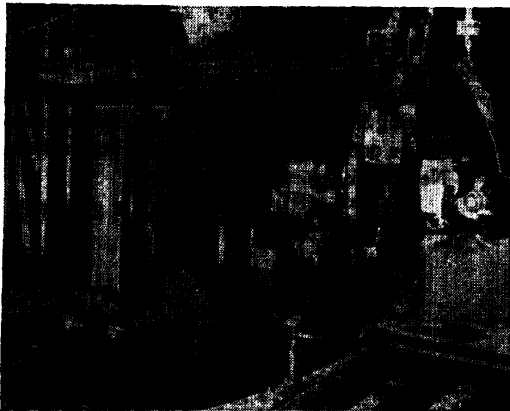


図-14 ポンプ、ホース自動組立て装置の外観

うしたことが容易に実現できるようになる。これは目が置く物と置く場所とのずれ量を測り、手はこれを少なくする方向に動くといった、協調制御が行えるためである。

実用例としてここに紹介するシステム<sup>15)</sup>は、図-14に示すような、ポンプの吸水孔や吐水孔にホースを接続する自動組立て装置である。ここでは、ホースを把持した腕の先端にテレビカメラを備え、腕の位置と孔の位置のずれを少なくするように動作し、自動的に精度良くホースの位置が合わせられるようにしている。

また、このシステムでは、ポンプを供給した際の位置精度が悪くて、視野に孔の一部分しか入らないような場合、通常ならマッチングによる一致が十分とれないため認識不能となるところを、画像から孔の一部分と推定することができ、さらに、この情報で腕を動かして視野を移動させ、完全な孔をとらえるようにして最終的に孔の位置を正確に求めることができる。一般には、画像の量子数が一定の場合、視野を広くとれば測定精度が劣化するが、この方法では、測定精度を変えことなく視野を拡大することができる。

また、このシステムでは、孔の位置を視覚装置で計測した後、触覚装置で孔を再確認してホースを接続するようにしている。ここでは、遠方から形状を識別しおおまかな位置を測ったうえ、接触によって実体を確認し精度の向上を図るという視触覚の機能分担が行われている。このような方法は、動作の最終目標に到達する時間が短く、対象物に傷をつけることもなく得るところが多い。

## 6. おわりに

生産工程で利用する組立て用視覚装置の備えなければならぬ一般的な性能、認識物体や照明方法との関連で各種の形態が考えられる撮像方法とその実用例、形状認識の有力な方法であるマッチング法とその実用例、目と手を協調させた組立て装置の実用例について述べた。組立て用視覚装置は基礎実験例は多いが実用例はまだまだ乏しい開発途上の分野に属し、全体を体系づけることは容易でない。やや広く紹介した撮像の方法についても、すでにこの範囲に入らぬものがあるし、今後の開発もこうした組み合わせの中のみからなされるとは考えていない。あくでも実用に至っている有力な例を挙げたものと受取っていただき、このような枠を超えたより良い組立て用視覚装置が開発されることを期待したい。

## 参考文献

- 1) 目頼道弘他：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C，Vol. 94，No. 5，pp. 89-96 (1974)。
- 2) 鳥野 武他：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C，Vol. 96，No. 3，pp. 49-55 (1976)。
- 3) 柏岡誠治他：時分割パターン認識技術による群制御トランジスタ組立てシステム，電気学会論文誌C，Vol. 96，No. 1，pp. 9-16 (1976)。
- 4) 野村良忠：野菜の自動選別システム，自動化技術，Vol. 10，No. 7 (1978)。
- 5) Holland, S. W., Rossol, L. and Ward, M. R.: CONSIGN-I, A Vision-Controlled Robot System for Transferring Parts from Belt Conveyors, GMR-2790, General Motors Research Laboratories (1978)。
- 6) Shirai, Y. et al.: Recognition of Polyhedrons with a Range Finder, Proc. 2nd International Joint Conf. on Artificial Intelligence, pp. 80-87 (1971)。
- 7) 依田晴夫：回転形パターンマッチング法による形状選別の試み，計測自動制御学会論文集，Vol. 10，No. 3，pp. 284-289 (1974)。
- 8) 高野英彦：機械部品の輪郭形状認識，自動化技術，Vol. 13，No. 2，pp. 35-40 (1981)。
- 9) Baird, M. L.: An Application of Computer Vision to Automated IC Chip Manufacture, Proc. 3rd IJCP, pp. 3-7 (1976)。
- 10) Mese, M. et al.: An Automatic Position Recognition Technique for LSI Assembly, Proc. 5th IJCAI, pp. 685-693 (1977)。
- 11) Inoue, T. et al.: Automatic Transistor Die-Bonding System with TV Cameras, Proc. 7th

- Int. Symp. on Industrial Robots pp. 515-522 (1977).
- 12) 成瀬正之他: トランジスタベレットの電極認識アルゴリズムほか, 昭和53年電子通信学会総合全国大会予稿, pp. 5-54-5-57 (1978).
- 13) 竹中俊夫他: パターン認識技術応用のハイブリッドIC自動組立システム, 自動化技術, Vol. 13, No. 2, pp. 41-44 (1981).
- 14) 柏岡誠治他: 部分パターンマッチングを用いた汎用の自動位置認識システム他, 昭和54年電気学会東京支部大会予稿, pp. 435-440 (1979).
- 15) Uno, T. et al.: An Industrial Eye that Recognizes Hole Positions in a Water Pump Testing Process, Proc. Symposium on Computer Vision and Sensor-Based Robots, Plenum Press, New York, pp. 101-116 (1979).

(昭和56年2月25日受付)