6. マ シ ン ビ ジ ョ ン

6-1 組立用ロボットの視覚

内 山 隆†

1. ま え が き

ロボットが視覚で外界を認識し、作業計画を立てて作業を実行する知能ロボットの研究は、1960年代中頃より米国で始まり、その後、日本においても1970年代初期に、組立図面を認識し視覚を用いて積木の組立を行う知能ロボットのプロトタイプ¹⁾が開発された。1977年になると、視覚機能を利用して2台のロボットにより実物の掃除機を組み立てる試行がなされ、組立ロボットにおける視覚の有用性が示された²⁾。しかし、これらの技術の実用化には、計算機を初めとするハードウェアの大幅な能力向上が必要であった。

その後、1980年代の初期になって、実用を目的として機能を簡素化し、ロボットとの結合を意識した視覚認識装置が、米国のSRIを中心として開発された。これは2値画像を対象とした2次元視覚で、カメラからの対象物形状の教示と特徴パラメータを用いたマッチングを特徴としたものである。

さらに、ICの高集積化や低価格化、MPUの高性能化に支えられて、濃淡画像を処理できる画像処理装置の実用化も進められている。また制限はあるものの実用化を指向したロボット用3次元視覚の開発も試みられている。以下に、これらロボット用視覚の現状と今後の動向について述べる。

2. ロボット用視覚の意義と課題

2.1 ロボット用視覚の役割

ロボットと結合して使われる視覚の役割は、“ロボットが作業しようとする対象物あるいはロボット自身

を計測し、ロボットにフィードバックして動作を出力するクローズドループを形成すること”にあると考えられる。この概念を図にしたものが図1である。

例えば、対象物が1種または既知の場合(A)、対象物が未知で形状特徴量などの辞書やモデルを持っている場合(B)、一般的概念や属性などの知識で対象物が記述されている場合(C)などがある。また、ロボットによる作業結果を確認する場合にはループを一巡したのちに(E)のパスをとる。ロボット動作の教示や、移動する場合の位置計測は(D)のループとなる。

このような視覚を用いたループの形成により、外界の変化に適応できる柔軟なロボット動作が可能となる。

2.2 ロボット用視覚の課題

ロボット用視覚において、他の一般的画像処理と比べて留意すべき点は、以下の事項である。

(1) 視覚情報フィードバック

画像入力から、前処理、特徴抽出、記述、セグメン

図1 ロボット用視覚の役割

† 株式会社富士通研究所

6. "Machine Vision ; 6-1 Machine Vision for Assembly Robots" by Takashi Uchiyama (Fujitsu Laboratories Ltd., Kawasaki)

テーションへと進むボトムアップの処理法、あるいはモデルからスタートしてモデルの特徴抽出、シーンの記述、画像面への投影へと進むトップダウンの処理法、さらには両者の併用と、いずれの手法を採用にしても最終的に重要となるのは、ロボットの制御に必要な対象物の空間的位置と姿勢の情報（最大6自由度）である。この数値情報をフィードバックすることで、ロボットの適応的運動が可能となる。

（2） 高速性
組立用ロボットでは1～3秒程度のサイクルタイムが要求され、これを可能とする高速性が必須となる。ハード化に適したアルゴリズムと、具体的な実現手法がポイントとなる。

（3） 複雑背景・低コントラスト
ロボット用のセンサとして工場などの実環境で使用する場合には、背景を整備したり、対象物に手を加えたりすることが困難な場合が多い。特に、低コントラスト、金属光沢、複雑背景、外乱などに対する照明法、前処理法の工夫が重要となる。

（4） 信頼性
ロボットと共に視覚を生産工程で用いるためには、認識・計測結果の高信頼性が重要となる。結果を誤ると、ロボットを破損したり、不良品の山を築くこととなる。

（5） 小型・低コスト
近年、ロボット本体の低価格化と制御装置の小型化が著しく進んでいる。小型の4軸制御のロボットでは200～300万円台が珍しくない。これらのロボットと結合して使用する視覚装置では、経済性・規模の点でのバランスが要求され、人手による作業とのコスト比較が重要な要因となる。

3. ロボット用視覚の手法

組立用を中心として、ロボット用視覚における画像入力方式、計測・認識方式について述べる。なお、濃淡画像の2値化や前処理方式については、本特集1章の画像処理アルゴリズムを参照されたい。

3.1 画像入力形式

画像入力における撮像、照明、物体に関する各種の形式・要因を表1に示す。対象物や背景の条件、抽出すべき情報、処理能力などに応じて、最適な組合せを選択することがポイントとなる。また、入力画像の質は、処理の効率・信頼性を左右する重要な要因であり、

表 1 画像入力形式

撮 像	素 子	1次元撮像素子 2次元撮像素子
	光 学 系	固定焦点 オートフォーカス ズーム
	方 向	平 面 側 面 鳥 瞰
	個 数	単 眼 2 眼 3 眼
	走 査	0次元（固定） 1次元 2次元
照 明	平 行 光	0次元（スポット光） 1次元（スリット光） 2次元 落 射 斜 方 逆 光（シルエット）
	非平行光	点光源 線光源 面光源 順 光 斜 方 逆 光（シルエット）
	走 査	0次元（固定） 1次元 2次元
	表 面	乱反射 部分正反射 鏡 面 透 明
	走 査	0次元（静止） 1次元 2次元

図 2 パターンマッチング法の処理の流れ

照明などには十分な配慮が必要である。

3.2 2次元視覚の同定の手法

(1) パターンマッチング法

2つのデジタル画像間の距離を定義し、入力画像に対して距離が最小となる標準パターン（テンプレート）を選択して同定する方式である。図2に処理の流れを示す。

(2) ウィンドウ内画素計数法

入力画像中に複数のウィンドウを設定し、その中の物体の画素を計数して同定と計測を行う方式である。比較的単純な形状で、回転や位置ずれが少ない場合に効率的な処理を実現できる。

(3) 特徴パラメータ法

2値画像を領域分割した後、位置や姿勢によって変化しない形状特徴量（面積、周長、動径など）を、辞書の値と比較して同定する方式（SRI方式）である。分

類には、特徴空間を用いたクラスタリングの手法やバイナリトリート法が使われている。図3に処理の流れの例を示す。最近の2次元2値の視覚認識装置の多くがこの方式を採用している。また、対象とする物体の組合せに応じて、同定に使用する特徴パラメータの有効性を、定量的に自動判定する手法も開発されている³⁾。

3.3 3次元視覚の方式

以下にロボット用の視覚として、研究開発が進められている代表的な手法について述べる。

(1) 2眼立体視法

人間の眼と同様に、2台のカメラを用いて画像を入力し、三角測量の原理で3次元計測を行う。両眼の画像の対応点の効率的決定法が解決課題であるが、エピソードライン法やDPマッチング法を用いた高速化⁴⁾の研究が進められている。

(2) 構造照明法

2眼の一方をスリット光照明などに置き換えたものである。対応点決定問題はなくなるが、照明の走査が必要で、入力に時間がかかる。半導体レーザを用いて複数スリット光を同時に生成し、入力を高速化する方式の研究がなされている⁵⁾。

(3) 照度差ステレオ法

3方向から照明して得た3枚の画像をもとに、対象物の反射照度の差から面方向を求め、3次元情報を抽出する。この計測結果に基づいて重なり物体をハンドリングするシステムが試作されている⁶⁾。

(4) 運動立体視法

1眼のカメラの移動による視差を用いて奥行きを計測する手法で、球面上の写像処理と多重画像処理により、信頼性の向上と処理の効率化を目指して研究が進められている⁷⁾。

ハードウェア処理

ソフトウェア処理

図3 特徴パラメータを用いた視覚認識の処理の流れ

4. ロボット用視覚とプログラミング

ロボットと視覚を結合する場合、ハードウェアだけ

図4 視覚機能を組込んだオフラインプログラミングシステム

FAROT-M6

でなくソフトウェアの面においても融合化に配慮した使い易い環境の提供が大事である。ロボットと視覚のプログラミング環境が全く独立している場合には、本来の動作と視覚処理以外に、腕と眼の同期、データの転送制御、カメラ座標系の変換、較正などにおいてオペレータの負担が増大する。そこで、ロボットの動作を記述する言語のなかに視覚機能の命令も組み込み、統一的にプログラミングできる機能が有用である。図4に、視覚系の命令も組み込んだオフラインプログラミングシステムの構成例を示す。

5. ロボット用視覚の適用例

2次元視覚や3次元視覚を組立ロボットと結合して、ハンドアイシステムを構成した例について紹介する。

5.1 2次元ハンドアイシステム

以下の例は、実際の工場の製造ラインに導入されているシステムである。

(1) VTRの組立ライン⁸⁾

供給されたVTRの基準コネクタを視覚で計測し、ハンドの位置を補正した後にドライバで3つの半固定抵抗を回し、最適値に調整する。この作業に必要なサイクルタイムは20秒である。

(2) 工業用記録計の組立ライン⁹⁾

ロボットに搭載されたカメラで、チャートに記録されたデータを計測し、この値に応じて記録計のレベルを調整する。また視覚の認識機能により、表示器の精度をチェックする。人手に比べて約2分の短縮が図られた。写真1にシステムの外観を示す。

(3) 腕時計組立ライン¹⁰⁾

パレットに配列された腕時計の部品を、視覚により位置と姿勢を計測しロボットがハンドリングして組立を行う。ラインサイクルタイムは3秒で1日に7500個を組み立てる。また、作業の切り換え時間は、30秒以下が要求されている。写真2に組立ロボットの外観を示す。

5.2 3次元ハンドアイシステム

組立の自動化を狙いとして、実時間性を重視した3次元視覚の例を示す。いずれも、処理の効率化が期待される、スリット光を用いた三角測量の原理により奥行きを求める方式のものである。実際の製造ラインでの部品を用いた評価が行われている。認識よりはむしろ計測に重点を置き、対象や計測機能のある程度限定することで実用的な性能を得ている。

(1) 十字スリット光方式¹¹⁾

2台のスリット光源を光線が互いに直角になるよう

写真1 工業用記録計の組立ライン(横河電機提供)

写真2 腕時計組立ライン(セイコー電子提供)

写真3 十字スリット光を用いたハンドアイシステム
(日立提供)

に配置し、この反射光の像をカメラで取込み、3次元計測を行う。ハードウェアにパイプラインの手法を適用し、処理時間は33msの高速性が得られている。写真3にシステムの外観を、図5に3次元計測の原理を示す。

(2) マルチスリット光方式¹²⁾

半導体レーザーの回折を利用して1つの光源から多数のスリット光を発生させ、スリット光の走査を不要に

図 5 十字スリット光を用いた 3 次元計測の原理

写真 4 マルチスリット光の画像例

写真 5 マルチスリット光を用いたハンドアイシステム (富士通提供)

して画像入力の高速化を図ったものである。線材などの特徴点の単純な対象物に対して有効である。写真 4 にマルチスリット光による画像の例を、写真 5 にハンドアイシステムの例を示す。

6. 今後の課題

ロボット用視覚として、特に組立などの FA 分野で、実際に実用化されているもの、あるいは、それに近い試作例について述べた。今後の主な課題としては、以下の点が挙げられる。

(1) LSI の技術を最大限に利用して、アルゴリズムのハードウェア化を進め実時間性の向上を図るとともに、FA の要求に応え得る低コスト・小型の濃淡視覚認識装置の実用化を推進する。

(2) 手と眼の協調を図り、ロボットのプログラミングをより使い易くするために、視覚をはじめとするセンサ機能を組み込んだ、高機能の作業レベルのロボット言語を開発する。

(3) CAD データを用いて、ロボット作業を统一的に計画できるシステムの実現が望まれている。これには、視覚による環境の容易な入力法や、視覚による作業計画プログラムの適応的な補正法の開発が重要である。

(昭和 62 年 6 月 22 日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) M. Ejiri, et al.: "A Prototype Intelligent Robot that Assembles Objects from Plan Drawing", IEEE Trans., C-21, p. 161 (1972)
- 2) S. Kashioka, et al.: "An Approach to the Integrated Intelligent Robot with Multiple Sensory Feedback: "Visual Recognition Techniques", Proc. of the 7th Int. Symp. on Indust. Robots, pp. 531-538, Tokyo (1977)
- 3) 小野ほか: "視覚認識システム (第 2 報) 分離度を用いたパラメータ・マッチング法", 第 2 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3304, pp. 255-256 (1984)
- 4) 大田ほか: "ステレオ画像における区間対応探索処理の高速化について", 信学技報, RPL86-1, pp. 1-8 (1986)
- 5) 吉見ほか: "複数光源を用いた距離情報入力装置の試作", 第 3 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3107, pp. 291-292 (1985)
- 6) 池内ほか: "照度差ステレオとプリズムステレオによるピンピッキングタスクのグリップ姿勢決定", 信学論, J68-D, 4, pp. 546-553 (1985)

- 7) 稲本ほか：“球面写像による線分の3次元方向と距離の計測”，情処学CV研資，45-2（1986）
- 8) 日経メカニカル，179，p. 70（Nov. 5, 1984）
- 9) 藤田：“工業用記録計の自動調整・検査ステーション”，日本産業用ロボット工業会，第32回産業用ロボット利用技術講習会資料，pp. 83-87（1987）
- 10) 鈴木：“視覚センサ付きロボットによる時計の組立作業”，同上，pp. 66-72
- 11) Y. Takagi, et al.: “High Speed Precise 3-D Vision Sensor Using Slit-light Method”, Proc. of Int. Workshop on Indust. Applications of Machine Vision and Machine Intelligence, pp. 235-239, Tokyo（1987）

- 12) 丸山ほか：“マルチスリット光を利用した線材の3次元計測”，第4回日本ロボット学会学術講演会予稿集，1698，pp. 181-182（1986）

うちやま たかし
内山 隆 昭和48年，東京工業大学大学院修士課程修了。同年，(株)富士通研究所に入社。ロボットの制御，視覚システム，プログラミングシステムの研究を行うとともに，極限作業ロボット，宇宙ロボットの開発に従事。

6-2 道路状況監視

正会員 山平拓也[†]

1. ま え が き

一般道路，高速道路における交通管制システムでは，情報収集部として主要交差点等に数多くの車両感知器が設置されている。車両感知器の検知した情報に基づき，オンラインで信号機，情報板等の制御，表示を行い，円滑でかつ安全な交通を保てるよう管制している。

車両感知器の多くはループ式あるいは超音波式と呼ばれるもので，走行車両の交通量，速度，オキュパンスの計測を従来から行っている。これらの感知器はいずれも道路上の一地点の交通情報を収集するセンサであり，地点的計測精度は良いが，渋滞長や個々の車両の動きなどは計測不能である。さらに工地上，都市美観上にも不都合な点が挙げられている。

機能的には交通状況把握，交通制御，経路案内，突発事象発見などの性能の向上が，より効果的な交通管制を行うために必要と考えられる。そのため，従来の車両感知器による地点的な交通状況のほか，旅行時間や空間密度あるいは個別車両の動きを直接計測することが必須となる。

一方，ITVカメラは多くの産業分野で幅広く利用されている。特に近年，固体撮像素子の進歩によりITV映像を計測に利用することが可能になった。それに伴い単なる監視機能だけでなく，ITVカメラの映像をそのまま利用し，計測等の付加価値を持ったCCTVシステムの開発が望まれている。

画像処理による交通流計測システムは，前記のよう

な背景から1975年ごろから徐々に研究が行われていた^{1)~13)}。

尾上らは，1975年頃に面積法と呼ぶ，映像内の車線部のみに着目し映像2フレーム間の画像の差を利用した方法，線分法と呼ぶ，複数本の検出線を車線方向に並列させて設定し車両位置を検出する方法により，それぞれ交通流を解析した¹⁾。

Hilbeltらは，1980年頃にITVカメラ映像の最も手前の分解能の良い位置に車線と垂直（走査線方向）に基準線を設け，基準線上を通過した車両の輝度変化により車両を検出する。その後，各車両の特徴点を抽出し特徴点のフレーム間の類似度から車両の動きを追跡するシステムを構築した²⁾。

現在，マイクロコンピュータ，記憶素子，ITVカメラ等の急速な技術進歩も手伝って，各社各様の方式で交通流計測システムが開発されている。特にトンネル内においては，CCTVシステムの導入が数多く行われているのに伴い，画像処理により得られた情報を利用して，トンネル内表示板に警告メッセージを表示するシステムも実現している。

次章以降では，特に実用化に近いと考えられる国内4機関による方式，トンネル内の実用化例および今後の課題について述べる。

2. 道路状況監視の現状

2.1 交通流計測システム開発の現状

ここでは，論文等でその方式が公表され，実用化が近いと考えられる（一部は実用化されている）4システムについて概説する。

（1） サンプル点輝度を分類する方式³⁾

本方式では図1(a)のように映像を車線毎に区切り

[†] 日本電気株式会社 放送映像システム本部
“6-2 Traffic Surveillance” by Takuya Yamahira (Broadcast and Video Systems Division NEC Corporation, Fuchu)