

解説

ロボットビジョンと光システム

久野 義徳

(株)東芝総合研究所 〒210 川崎市幸区小向東芝町 1

(1989年12月29日受理)

Robot Vision and Optical Systems

Yoshinori KUNO

Research and Development Center, Toshiba Corporation,
1, Komukai Toshiba-cho, Saiwai-ku, Kawasaki 210

1. ま え が き

知能ロボットにとって視覚が重要な機能であることに異論はないであろう。1983年から8年間の計画で行われている通産商工業技術院の大型プロジェクト「極限作業ロボット」¹⁾の中でも視覚の研究は活発に進められている。このプロジェクトでは原子力発電所²⁾・海底³⁾・火事などの災害現場⁴⁾という、人間による作業の困難な状況下で作業を行うロボット、およびその基盤技術⁵⁻⁷⁾を開発している。このような困難な状況下での作業ということで、完全な自律ではなく、自律に支援された遠隔操作ロボットが開発目標になっている。

ロボットが活動する世界は3次元である。しかし、通常の画像は2次元である。工場の自動化ラインのロボット視覚では、2次元世界での形や位置だけでロボットの作業に必要な情報が得られるように、周囲条件をくふうするのが普通である。工場内という不変な環境下では、このような簡略化が可能な場合が多い。また、このような簡略化が可能な場合でないと、現状ではスピード・コストの観点から実用にならないともいえる。

しかし、極限作業ロボットの場合には、このような簡略化は不可能である。そこで、3次元情報をいかに獲得するかが研究課題になっている。

一方、ロボット視覚を考えるとときには、画像入力系についても検討する必要がある。ロボット視覚の主な入力系は光学システムだが、二つの点で検討しておく必要がある。一つは、目的に適したデータを入力できるかというセンサーの問題である。もう一つは処理アルゴリズム

を考えるとときの、画像生成過程・センサー特性の考慮である。簡単に言えば、良いセンサーを用い、そのセンサーでどのような情報が得られるかを良く考えた認識法を用いなければならないということである。

ここでは、ロボット視覚と光学系の問題を念頭に置きながら、極限作業ロボットプロジェクトで開発されている視覚技術を中心に、3次元ロボット視覚の研究動向について述べる。

2. 光学とロボット視覚

ここまでロボット視覚という言葉を用いてきたが、特に独立してロボット視覚という技術分野があるわけではない。技術としては画像理解・コンピュータビジョンと呼ばれる領域であり、それがロボットに利用されるときにロボット視覚というものと捕らえておく。

ロボット視覚・画像理解の一般的な処理の過程を図1に示す^{8,9)}。始めにシーンからセンサーにより画像信号を得る。そこから、たとえばエッジのような画像の特徴を求め、そして面の向き、距離、反射率などのシーンの特徴を求め、画像の特徴とシーンの特徴は区別して考えなければいけない¹⁰⁾。画像の特徴はシーン中に何らかの物理的要因があるために生じている。シーンの特徴はそのような物理的要因に対応する。対象物のモデルというのは、一般に物体の形、色などシーンの領域で表現されている。したがって、シーンの特徴を正しく求めることが画像を理解するうえで非常に重要になる。シーンの特徴が得られたら、そこから3次元世界の記述を作る。物体のモデルと照合し、そのインスタンスとして実

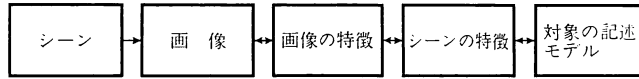


図 1 ロボット視覚・画像理解の処理過程⁸⁾

際の物体を理解する。

このような処理過程を検討する際に、光学および光学システムは二つの面がかかわってくる。

一つは画像入力の部分である。最近の CCD などの撮像素子の進歩は視覚処理の能力向上に貢献している。とくにロボット視覚の場合は、首の上にカメラを載せたい場合が多いが、軽量小型のカメラは首の運動機構の実現も容易にしてくれる。

また、濃淡画像から 3 次元情報を得るのはたいへんだということで、対象までの距離を各画素の値とする距離画像が得られるようなレンジファインダの開発も進んでいる²¹⁾。

もう一つは、処理方法を検討する際の画像生成過程・センサー特性の考慮である。画像データは光学に従う物理現象により 3 次元世界が 2 次元に投影された像を、センサーを通じて変換して得られるものである。したがって、光学およびセンサーの性質の理解は、処理法の検討にあたり重要な要素になるはずである。

しかし、この面での検討はまだ十分とは言えない。人間にとって視覚はきわめて容易な処理である。画像が入力されれば途中の処理を全く意識しないで必要な情報を得ることができる。そこで、ロボット視覚を考える場合にも、入力画像から直接、必要な情報出力を求めようとしてしまう。たとえば、この物体はこういう線画で表される特徴的な部分をもつから、濃淡の変化を画像から検出して、そういう形の部分を見つければよいと考える。しかし、人間の眼には確かにエッジが見えるけれども、それが近傍の濃淡変化だけに着目した手法で安定に求められるとは限らない。工場内のように環境の制御が可能な場合には、調節によりうまく働くようにすることができる場合もある。しかし、環境が変化するところでは安定な動作は期待できない。また、このような方法では特徴の選出も問題ごとに適当に決めており、一般性がない。

そこで、このようなアドホックな方法でなく、画像生成過程を考えて、より本質的な処理を行わなければならないという考えが生まれてきた。Horn は著書の中でその点を強調している¹¹⁾。

Shafer も同様の観点から image understanding (画像理解) には、imaging understanding の領域の研究が

必要であると主張している¹²⁾。

彼は撮像系の構成・状態を表す 12 のパラメータを定め、それにより作られる 12 次元の空間を考え、ロボットの撮像系を表す configuration space というところで imaging space と名づけた。12 のパラメータはカメラの位置と向きを表す六つ、レンズ系に関する三つ (焦点距離、合焦点面からセンサー面までの距離、絞り) に、露出時間、カメラ系の利得、それにフィルタの透過特性である。

Imaging space はパラメータを定めたただけなので、これを活用するためには撮像系のモデルとキャリブレーション法が必要である。従来のカメラキャリブレーションは、ピンホールカメラモデルを用いて幾何学関連のパラメータについてだけ考えていた。しかし、画素の値に関連する要因についての radiometric なキャリブレーションも考えなければいけない。1 次近似では両者は独立であるとしてモデル化するが、実際には両者は独立でない。したがって、より正確な 2 次近似のモデル化では両者の依存性を考慮する必要がある。

彼は、このような研究を進めるために画像入力のすべてのパラメータを計算機で制御し、定量的な画像入力ができるような実験室を整備し、CIL (calibrated imaging laboratory) と呼んでいる¹³⁾。

この研究では最終的には、ロボットが自分の目的に適したように撮像系のパラメータを自動設定することを考えている。このように与えられた画像を何とか処理しようというのではなく、ロボット自身が入力にかかわろうという方法は、最近 active vision として注目されてきている¹⁴⁾。

このような考え方に基づく研究としては、物理現象をモデル化して考えることにより、各種の条件が混じり合った結果である画像の濃淡値から、シーンや物体に固有の (intrinsic) 情報を取り出そうという研究がある。たとえば、Klinker らは物体の光の反射のモデルを用いることにより、カラー画像から鏡面反射成分と拡散反射成分を分離し、それぞれの成分ごとの画像を得る方法を報告している¹⁵⁾。この研究は CIL を用いて行われた。

センサーの性質の考慮については池内も重要性を指摘している¹⁶⁾。認識法を検討するに際、センサーモデルを用い、認識に使う特徴が使用するセンサーで検

出できるか、またその結果がどれほど信頼できるかを考慮する方法を報告している。

3. 極限作業ロボットにおける視覚

極限作業ロボットプロジェクトは、実用原子力発電施設作業ロボット(原子力ロボット)、海底石油生産支援ロボット(海洋ロボット)、石油生産施設防災ロボット(防災ロボット)の三つのロボットの開発と、基盤技術の研究開発からなる。そして、それぞれのロボットについて視覚の開発が行われている。また、基盤技術の中でも研究が進められている。

極限作業という限定の困難な環境下で動作するロボットということで、3次元情報をどう獲得するかが視覚の研究の中心になっている。表1は3次元情報の入力法の観点から、プロジェクトで開発されている視覚技術をまとめたものである。

3次元情報の入力法については文献¹⁷⁻²¹⁾によくまとめられているので、ここでは簡単に述べておく。

受動式というのは通常の画像を用いる方式である。能動式というのはレーザーなどの発射を伴うものである。単眼視²⁰⁾で shape from X というのは X に shading, shape, texture などが入る。物体の反射特性やものの見え方についての知識・仮定を利用して3次元情報を求めようというものである。既知の幾何学的条件利用というのは、対象物がある平面上にのっているとか、その大きさが既知である場合に、その条件を利用して3次元情報を求める方式である。多重画像¹⁹⁾というのは複数の画像を用いる方式で、ステレオ視が代表的なものである。カ

メラを動かして多数の画像を入力して利用する運動立体視もある。

能動式²¹⁾では光の伝播時間を利用する伝播時間(time-of-flight)方式と、投射光の物体面上に作る像をカメラで見るステレオ視と同原理の三角測量方式がある。三角測量方式では投射する光のパタンにより各種の方法がある。

光以外にも超音波を利用する方式もある。光を使う方法でも、異なる位置にある光源による複数の画像を用いる照度差ステレオ²²⁾など他にもいくつかの方法があるがここでは省略する。

この表でわかるように多数の方式が研究されている。研究の範囲については、海洋・防災ロボットでは海中や火煙の中で画像を得ることがまず課題なので、センサー開発が中心になっている。原子力ロボットは他の2者にくらべれば良好な環境下にあるので、認識の部分为中心課題になっている。基盤技術ではセンサーから認識まで幅広く研究されている。

4. 3次元情報の入力

極限作業ロボットプロジェクトの中で、3次元情報の入力を中心にした研究開発について述べる。この部分は光学システムが直接ロボット視覚に関係するところである。

4.1 伝播時間方式レーザー視覚センサー

防災ロボットでは煙や炎に妨げられない視覚が要求される。そこで、CO₂赤外レーザー光を2次元走査しながら対象物へ照射し、対象物からの反射光を検出して距離

表1 極限作業ロボットプロジェクトで開発されている視覚技術の3次元情報入力方式による分類

3次元情報入力方式			原子力	海洋	防災	基盤
光	受動式	単眼視 Shape from X 既知の幾何学的条件利用	○	○		
		多重画像 ステレオ視 運動立体視	○ ○			○
学 式	能動式	伝播時間 (time-of-flight)			*	
		三角測量 スポット光 スリット(線状)光 複数スリット(線状)光 2次元パタン		○		○ ○ *
超音波		音響映像(伝播時間)		*	*	

*: センサー部分の開発に主眼のあるもの, ○: センサーの利用や画像認識部分に主眼のあるもの

および反射明暗画像を形成するレーザー視覚センサーが開発されている^{23,24)}。距離計測はレーザー光を高周波振幅変調して照射し、反射光の復調信号と元の変調信号を比較して、その位相差から光の伝播時間を算出し距離を求める、振幅変調・位相比較方式である。明暗画像はレーザー反射光の強度を輝度に変換して形成している。

図2(a)は炎の向こう側にパルプなどの物体のあるシーンを通常のカメラで撮像したものである。図2(b)は同地点からこのセンサーにより距離画像を得たものである。炎の向こうの像が良好に得られており、このセンサーが防災用に有効であることがわかる。

この方式で高速にデータを入力するためには、レーザー光を高速に走査する必要がある。そのために、回折格子を利用したホログラムスキャナの開発が進められている。

4.2 複数レーザー光源による3次元データ入力

基盤技術のなかでは視覚認識処理に使うために、高速・高精度のレンジファインダが開発されている^{25,26)}。原理としてはスリット(線状)光を用いた三角測量方式である。高速入力のために同時に複数の線状光を照射するようになっていく。

複数線状光源は、独立した15個の線状光源と回転平面鏡によって構成されている。おのおのの光源は波長780nm、出力5mWの半導体レーザーの射出光をシリンドリカルレンズで線状光にしている。すべての線状光源は、図3に示すように鉛直に設置された回転平面鏡の回転軸を中心とする水平の円周上に等間隔に並べられ、光線が回転軸上で反射するように向けられている。これにより、平面鏡の回転により、すべての線状光を同時に同じ角度だけ走査することができる。

複数の光源を用いているので、距離計測のためにはテレビ画像内の線状光像からその光源を特定する必要がある。ここでは時系列符号化格子法²¹⁾を採用している。こ

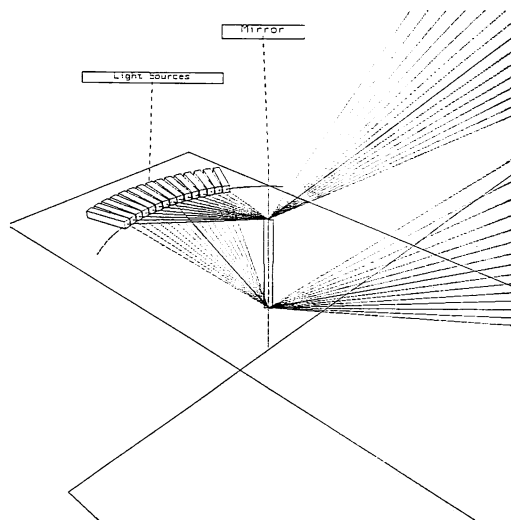


図3 複数線状光源の構造図²⁵⁾

れは15個のレーザーをオンオフを変えて4回点灯し、画像上の各点の4回の点滅のパターンを調べることにより一意に光源を特定する方法である。

レンジファインダを実際に使うためには、キャリブレーションが重要である。この研究ではミラー系とカメラ系に分けて高精度にキャリブレーションを行う方法を開発している²⁷⁾。キャリブレーション後、カメラから700~1100mmの距離に対して、誤差1mm程度の距離画像が得られている。

4.3 運動立体視

受動式の3次元情報入力として、原子力ロボットの中では、運動立体視が検討されている²⁸⁻³⁰⁾。これは魚眼レンズを光軸に垂直方向に少しずつ動かしながら多数の画像を入力し、そこから3次元情報を得るものである。原子力発電所内に特徴的な線分や円柱(パイプ)の3次元情報を、ステレオ視のような対応探索の問題なしに求めることができる。

魚眼レンズによれば、通常のカメラのような平面投影でなく、球面投影の画像が得られる。運動立体視ではこの画像に対する球面写像が処理の中心になる。球面写像の基本は投影球面上の各点を、その点を極とする大円に変換する操作である。3次元空間の線分上の各点の球面写像結果の大円は一点で交差する。そこで、1枚の魚眼レンズ画像からエッジを検出し、その各点に対して球面写像を行い、大円を球面に書き込んでいく。球面上で多くの大円の交差する点を検出すれば、3次元空間の線分が求められる。ここでカメラを動かすと、大円の交点も

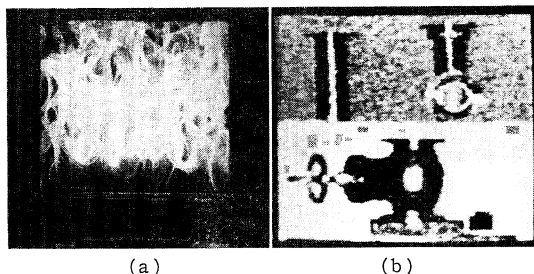


図2 炎環境での画像形成²⁴⁾
(a)炎環境の通常画像, (b)レーザー視覚センサーによる距離画像

球面上を移動する。この点列に対してさらに球面写像を行うとその大円はまた一点で交差し、その点と球の中心を結ぶベクトルは線分の方位ベクトルと一致する。すなわち線分の方位が求められる。このような球面写像を利用した処理により、さらに点の距離、線分の距離、円柱の位置なども求められる。

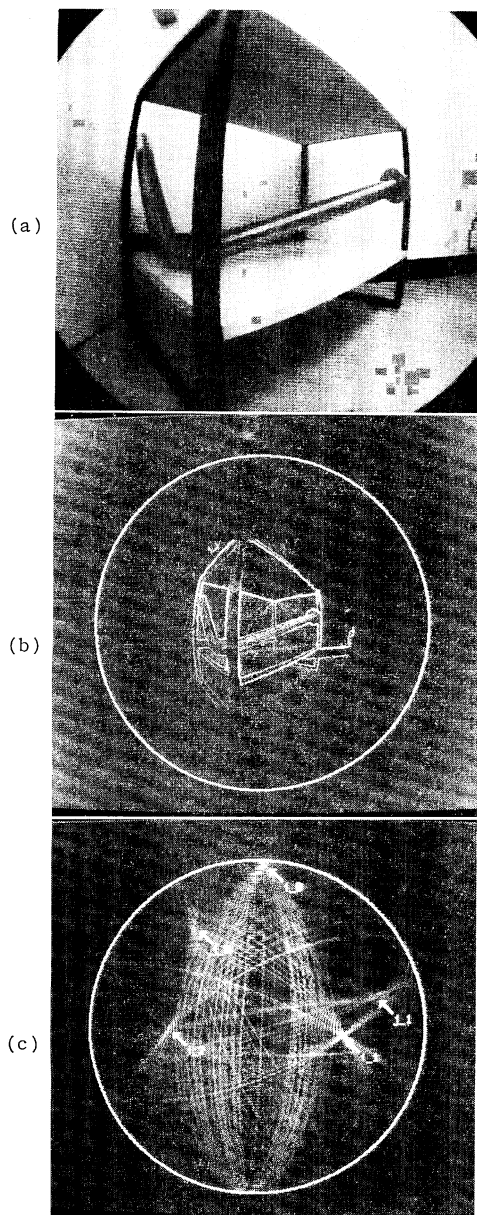


図4 運動立体視の処理例²⁹⁾

(a)あるフレームの魚眼レンズ画像、(b)エッジ検出結果、(c)線分方位計測結果、大円の交点が(a)の柱やパイプの直線部分の方位を示す。

図4に処理例を示す。(a)は魚眼レンズ画像で、(b)はエッジ検出の結果である。(c)は線分方位検出のための球面写像の結果を示したもので、大円の交点が対象物の柱やパイプの直線部分の方位を示している。

この研究では、球面写像を行う専用ハードウェアも開発されている。

5. 物体の見え方の利用

光学系とロボット視覚の関係の二つ目の観点である、光学知識の解析への利用に関連した研究開発について述べる。極限作業ロボットプロジェクトでは、物体や環境のモデルに光学の知識を加味して、物体の見え方を検討して利用しようという研究が進められている。光学現象をモデル化して画像の解析に取り入れようというよりは、高速化が可能な比較的簡単な処理で確実に情報が得られるような条件を、物体のモデルと光学の知識から求めて利用するという研究が中心になっている。

5.1 能動的視覚センシング設定計画

ハンドアイシステムの作業が行いやすいように、カメラ視点や照明の位置を作業環境に適応して計画するシステム：HEAVEN (hand-eye active vision planning engine) が基盤技術として開発されている³¹⁾。

ハンドアイシステムで作業を行う場合、環境内の他物体により作業対象物に対する視野がさえぎられること(以後オクルージョンと呼ぶ)がある。また、光源の位置により、同様なオクルージョンにより対象物上に影が投影されて、十分な明るさの画像が得られない場合もある。このシステムでは作業環境の幾何学的・物理的なモデルに基づき、オクルージョンの問題を回避するようなカメラ・照明の位置の計画を立てる³²⁾。オクルージョン回避のほかにも、ビジュアルフィードバック作業における注視行動計画³³⁾、照明設定計画³⁴⁾、照度差ステレオの照明設定計画³⁵⁾など、ハンドアイシステムのさまざまなセンシングの計画を行うことができる。

このシステムでは基本的には対象物の回りに球面を想定し、この球面上でカメラや照明の配置を考える。球面を離散化するために、正20面体から始めて3角形の面素を再起的に必要な分解能まで細分化した測地ドームを用いる。測地ドームの各面の位置にカメラや照明を置いたときの物体の見え方を検討し、ハンドアイ作業に最適な視点や照明を決定する。

図5にシステムの利用の簡単な例を示す。対象物(直方体)の回りに測地ドームが置かれている。測地ドームの3角形の面の中央の数字は、その方向から観察できる

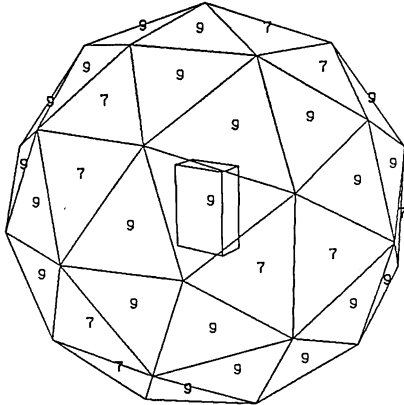


図 5 物体の周囲に設定された測地ドーム³⁴⁾

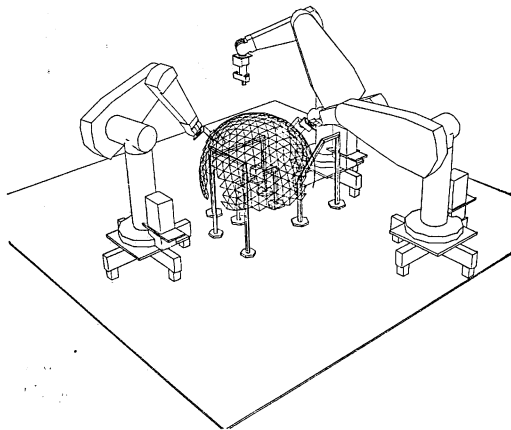


図 6 球面画像処理により求められたオクルージョン回避視点位置の候補例³¹⁾

エッジの数である。たとえば、認識には可視エッジ数が多く、とくに長いエッジが存在すると都合が良いとする。また、エッジ検出の観点からはエッジのコントラストが大きいことが望ましい。そこで、幾何モデルを用いて、このような観点からの評価を行い、最適なカメラ・照明の配置計画を立てる。

図 6 は物体の回りに測地ドームを考えて、オクルージョンを回避するカメラの視点の候補を求めた例である。

このシステムはバルブとナットを分解した後の、露出したスリーブ上面の水漏れの外観検査にも適用されている³¹⁾。この場合、照明はカメラに関して検査対象であるスリーブの上面の法線ベクトルに対して鏡像となる位置にする。こうすれば、水漏れのある場合、水滴による鏡面反射で明るく光る場所の検出が容易になる。

以上のように、このシステムでは物理現象を考えるこ

とにより、できるだけ簡単な視覚処理で、確実な情報が得られるようにしている。ロボット視覚としては有効なアプローチといえよう。

5.2 見え方の解析による認識手順の自動生成

原子力発電所の作業ロボットでは多種類のバルブや工具を扱わなければならない。そこで、物体の3次元モデルを入力すればその認識手順が自動生成できるシステムが開発されている^{36,37)}。

このシステムは一つのカメラ画像を用いて認識を行う。物体が画像上に投影された後、すなわち物体の見え方は物体を見る方向により変化する。このシステムでは、このような見え方の変化に効率よく対処できる認識手順を生成する。

認識手順の生成に当たっては、前項と同様に測地ドームを考え、離散化された方向からの物体の見え方を扱う。このシステムでは楕円・平行線・多角形などを認識用の特徴としている。そこで、測地ドームの各面素からの物体の見え方を、これらの特徴を用いて記述する。これは物体の3次元モデルから求める。その際に、他の部分にあまり隠されない可視性の大きい特徴を選んで、記述を作成する。すなわち、認識の際に検出しやすい特徴をモデルを利用して選出している。

物体を見る方向が不明のとき、すべての見え方について総当たりに画像を調べるのでは効率が非常に悪い。始めは多くの方向から共通に見える特徴を検出し、検出された特徴から物体を見る視点の可能性が絞られてきたら、その特定方向からだけしか見えない特徴を調べに行くという、認識の戦略が有効である。このシステムではこのような戦略に基づく特徴探索手順を見え方の記述から自動的に生成する。

生成法の詳細は省略するが、基本的には多数方向からの見え方の記述を比較し、同じように見える部分を抜き

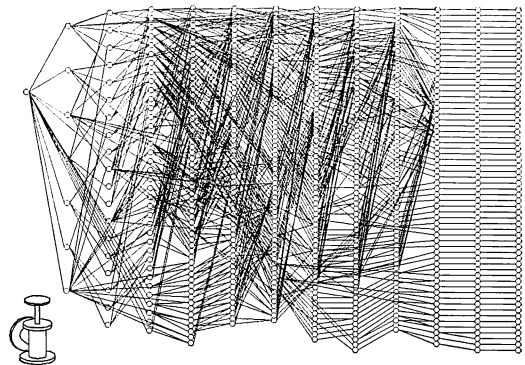


図 7 特徴探索手順を示すグラフの例⁸⁾

出すという処理を繰り返すことにより行う。図7は図中の左下のバルブに対する生成された手順を示すグラフである。グラフの各ノードが一つの検出対象特徴を示す。ノードには優先順位がついていて、左端のルートノードから優先順位に従ってノードの示す特徴を調べる。その特徴が見つければその子のノードを調べに行く。検出できなければ次の優先順位のノードを調べる。このようにして特徴を検出して右端に到着すれば認識終了である。右端のノードは測地ドームの各面素からの見え方に対応する。

可視性の大きい特徴を認識用に選出してはいるが、照明条件などは未知としているので、それらがエッジ検出で確実に求められるかまではモデルから求められない。そこで、特徴を構成するエッジの検出が不完全でも特徴の検出できる特徴検出法を開発している³⁹⁾。これは、特徴の部分と考えられるところから、全特徴の存在を仮定し、その仮説が正しいかエッジデータを調べるというものである。

ここまでの結果で、測地ドームで離散化された値で物体の姿勢がわかる。正確な姿勢や3次元位置を求めるためにはさらに処理が必要である。ロボットが作業するときには作業対象部分の3次元位置がわかれば十分ことが多い。その場合は認識結果からその部分を定め、そこについてだけステレオ視やレンジファインダで距離を求めればよい。

もう一つの方法として、単眼画像から3次元情報を求める方法も開発している³⁹⁾。このシステムでは対象物の正確な大きさが物体のモデルとしてわかっている。したがって、物体の姿勢だけでなく、像の大きさから物体までの距離を求めることができる。測地ドームで概略の向きがわかったら、特徴の画像上の大きさから物体までの概略の距離を求める。この位置・姿勢データにより、モデルから線面を発生する。この線面と実際のエッジの差を検出する。以後、その誤差が一定値以下になるまで、位置・姿勢を修正して線面発生・エッジとの比較という処理を繰り返す。図8(a)は概略の位置・姿勢データから求めた物体の像をエッジ検出結果に重ねて表示したものである。図8(b)は最終的な位置・姿勢の検出結果に基づく像である。

原子力ロボットの視覚としては、他に自律移動用の視覚としてステレオ視を利用したものが開発されている。あらかじめ教示した目標物を検出し、その位置をステレオ視により計測することにより、自己の位置を知る機能⁴⁰⁾と、走行範囲の障害物をステレオ視により求める機

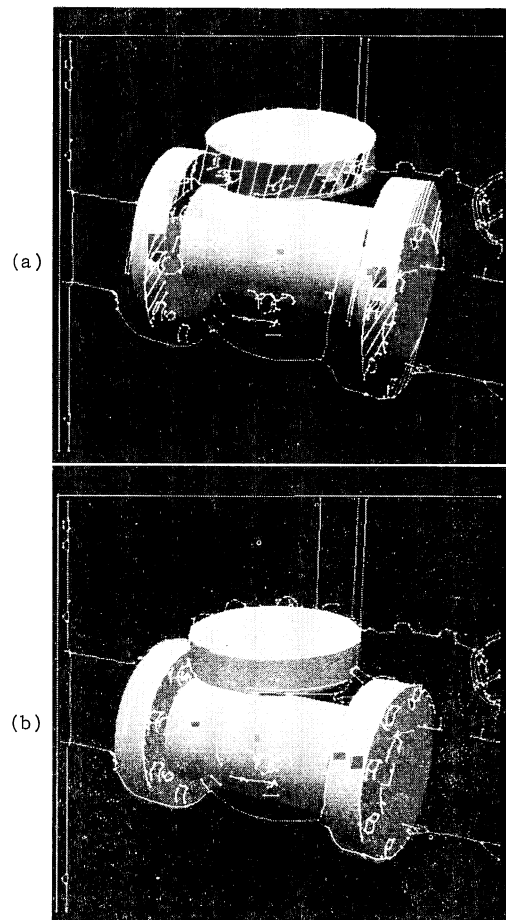


図8 3次元モデルを用いた物体の位置・姿勢検出。エッジ画像と求めた位置・姿勢に基づきモデルから生成した像を重ねて表示。
(a)初期状態(生成された認識手順による認識結果)、(b)最終結果

能⁴¹⁾が検討されている。

6. あとがき

極限作業ロボットプロジェクトのもとでのロボット視覚の研究開発について、光学に関連した視点から紹介した。ロボット視覚の分野からは光学関連領域に二つの期待がある。一つはよいデータを得ることに対する協力である。二つ目は、視覚処理アルゴリズム開発に際しての光学に関する知識の導入である。前者については、人間の眼にきれいな画像というより、ロボットに処理しやすいという観点からの開発が望まれるが、協力関係としてはわかりやすいものだと思う。後者は、環境変化に強い視覚を実現するための重要なポイントであるが、どのように研究を進めていくか大きな問題がある。この点につ

いて、光学と視覚の両分野の協力の発展が期待される。

文 献

- 1) 岡田 泰: “大型プロジェクト・極限作業ロボットについて”, *ロボット*, No. 62 (1988) 34-43.
- 2) 早坂好幸: “実用原子力発電施設作業ロボットの研究開発”, *ロボット*, No. 62 (1988) 44-51.
- 3) 池田玉治: “海底石油生産支援ロボット”, *ロボット*, No. 62 (1988) 52-58.
- 4) 鶴谷三郎: “石油生産施設防災ロボット”, *ロボット*, No. 62 (1988) 59-67.
- 5) 阿部 稔: “機械技術研究所における基盤技術の研究開発”, *ロボット*, No. 62 (1988) 68-73.
- 6) 白井良明, 高瀬國克, 大島正毅, 柿倉正義, 長谷川勉, 塚本亨治: “電子技術総合研究所における基盤技術の研究開発”, *ロボット*, No. 62 (1988) 74-81.
- 7) 岩山孝信, 鷺沢 忍, 藤川昭雄: “極限作業ロボット技術研究組合における基盤技術の研究開発”, *ロボット*, No. 62 (1988) 82-89.
- 8) 久野義徳, 岡崎彰夫: “画像理解”, *東芝レビュー*, 44 (1989) 798-801.
- 9) 谷内田正彦: “画像処理から画像理解へ”, *人工知能学会誌*, 4 (1989) 5-12.
- 10) 金出武雄: “画像理解のモデルと構造”, 第10回画像工学コンファレンス論文集 (1979) pp. 115-120.
- 11) B. K. P. Horn: *Robot Vision* (MIT Press, Cambridge, 1986) p. 12.
- 12) S. A. Shafer: “Automation and calibration for robot vision systems,” Technical Report, Computer Science Department, Carnegie Mellon University, CMU-CS-88-147 (1988).
- 13) S. A. Shafer: “The calibrated imaging lab under construction at CMU,” *Image Understanding Workshop* (DARPA, 1985) pp. 509-515.
- 14) R. Bajcsy: “Active perception,” *Proc. IEEE*, 76 (1988) 996-1005.
- 15) G. J. Klirner, S. A. Shafer and T. Kanade: “The measurement of highlights in color images,” *Comput. Vision*, 2 (1988) 7-32.
- 16) K. Ikeuchi and T. Kanade: “Applying sensor models to automatic generation of object recognition programs,” *Second International Conf. on Computer Vision* (IEEE, 1988) pp. 228-237.
- 17) 大田友一, 池内克史: “3次元情報の再構成とモデル化”, 画像処理アルゴリズムの最新動向, 高木幹雄, 鳥脇純一郎, 田村秀行編 (新技術コミュニケーションズ, 1986) pp. 108-127.
- 18) 大田友一: “画像を用いた三次元計測技術の動向”, *電気学会論文誌 C*, 107-C (1987) 608-612.
- 19) 伊藤 稔: “立体視を用いた三次元計測技術”, *電気学会論文誌 C*, 107-C (1987) 613-618.
- 20) 北橋忠宏: “単眼視による三次元計測”, *電気学会論文誌 C*, 107-C (1987) 619-624.
- 21) 佐藤幸男, 荒木和男: “能動照明法による三次元計測技術”, *電気学会論文誌 C*, 107-C (1987) 625-631.
- 22) 池内克史: “反射率地図に基づき二次元濃淡画像より三次元形状を再構成する2手法”, *電子通信学会論文誌, J 65-D* (1982) 842-849.
- 23) 内藤宏之: “防災ロボット用視覚センサー”, *光学*, 18 (1989) 21-22.
- 24) 内藤宏之: “防災ロボット用視覚センサ”, *光技術コンタクト*, 26 (1988) 470-478.
- 25) 吉見 隆, 植芝俊夫, 大島正毅: “視覚認識のための高速三次元データ入力装置”, 「極限作業ロボットの研究開発」研究成果発表会講演予稿集 (電子技術総合研究所, 1989) pp. 29-39.
- 26) 吉見 隆, 植芝俊夫, 大島正毅: “複数光源レンジファインダシステム”, *信学技報, PRU 89-61* (1989) 23-28.
- 27) 吉見 隆, 植芝俊夫, 大島正毅: “光切断法に基づくレンジファインダのための高精度キャリブレーション法”, *信学技法, PRU 89-62* (1989) 29-36.
- 28) 稲本 康, 川上 進, 内山 隆, 安川裕介, 森田俊彦: “球面写像による線分の3次元方位と距離の計測”, *情報処理学会研究報告*, 86-CV-45 (1986) コンピュータビジョン 45-2.
- 29) 川上 進: “鳥まねで単眼立体視を実現”, *科学朝日, Jun.* (1987) 28-33.
- 30) T. Morita, Y. Yasukawa, Y. Inamoto, T. Uchiyama and S. Kawakami: “Measuring in three dimensions by motion stereo and spherical mapping,” *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition* (IEEE, 1989) pp. 422-428.
- 31) 松下俊夫, 坂根茂幸, 平井成興, 佐藤知正, 柿倉正義: “ハンドアイ作業自律実行システム—手と目の協調と能動的センシングの試み”, 「極限作業ロボットの研究開発」研究成果発表会講演予稿集 (電子技術総合研究所, 1989) pp. 23-28.
- 32) 坂根茂幸, 石井 優, 柿倉正義: “ハンドアイ行動シミュレータ: HEAVEN システムに基づく視覚センサのオクルージョン回避”, *日本ロボット学会誌*, 4 (1986) 41-54.
- 33) 坂根茂幸, 佐藤知正, 柿倉正義: “視覚フィードバック制御の注視行動プランニング”, *計測制御学会論文集*, 24 (1988) 64-71.
- 34) 坂根茂幸, R. Niepold, 佐藤知正, 白井良明: “環境モデルに基づくハンドアイシステムの照明設定プランニング”, *日本ロボット学会誌*, 7 (1989) 130-141.
- 35) 坂根茂幸, 佐藤知正, 柿倉正義: “照度差ステレオ用光源の自動配置プランニング”, 第28回計測制御学会学術講演会予稿集 (1989) pp. 667-668.
- 36) 久野義徳, 岡本恭一, 沼上英雄: “3次元モデルからの物体認識用特徴探索手順の自動生成”, *日本ロボット学会誌*, 6 (1988) 271-281.
- 37) Y. Okamoto, Y. Kuno, K. Onoguchi, M. Watanabe and H. Asada: “Object recognition using a tree-like procedure generated from 3-D model,” *IAPR Workshop on Computer Vision*, Tokyo (1988) pp. 441-446.
- 38) 沼上英雄, 久野義徳: “仮説検証による楕円検出法”, *情報処理学会第32回全国大会予稿集*, 1435 (1986).
- 39) 岡本恭一, 久野義徳, 岡田 敏: “3次元物体認識における姿勢計算方式”, *情報処理学会第40回全国大会予稿集*, 5E-7 (1990).
- 40) K. Onoguchi, M. Watanabe, Y. Okamoto and H. Asada: “Visual navigation system for a mobile robot,” *IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, Tsukuba (1989) pp. 590-597.
- 41) 渡辺 睦, 小野口一則, 麻田治男: “ステレオ視を用いた障害物検出システム”, *信学技報, PRU 88-103* (1989) 25-32.