〔解 説〕

室内環境自律移動ロボットの視覚*

辻 三 郎**

知能ロボットの研究が進むにつれて、与えられた仕事を達成する計画を作成し、環境内を自由に移動して仕事を実行する自律移動ロボットの研究が盛んになった¹⁾。本稿は、その中で室内のような人工環境で働くロボットの視覚システムに焦点をあてて解説をする。屋外のような自然環境での移動ロボットについては、本学会誌の別の解説²⁾を参照されたい。

1. 室内環境の移動ロボット

産業用移動ロボット

オートメーションの普及とともに、物流の自動化のために室内環境を移動し、搬送作業を行う無人搬送車が実用化している。これは、床面に車を誘導するための目印（電磁誘導線、磁性ストリップ、白線など）を設け、センサでこれを検出して移動の制御を行なう。最近では、経路の全面にわたってガイドを設定する代りに、要所に灯台の働きをする道標を設け、それを利用して車の現在位置を算定する方式も開発されている。これらのシステムのガイドや道標の検出に、視覚センサは有効な手段として利用されている。

このような実用化システムは、機械にとって検出が容易で、しかも識別に誤りが無い目印の設定とセンシングに、研究の重点が置かれている。すなわち、産業用ロボットの開発の流れであった「環境を人工的に設定して、より易しく、より信頼性の高いロボットの動作を実現する」を移動ロボットに用いていると言えよう。

自律移動ロボット

「ヒトのような機械」を実現しようという知能ロボットの研究の立場から考えると、何も環境の変更をしなくてもヒトと同じように作業できることが望ましい。そして、本稿で述べる自律移動ロボットは、そのようなアプローチから研究されている。もっとも、これらのロボットでも、すべての環境で働けるわけではない。それぞれ

の動物が、生きていく環境に適応するように進化したことから考えても、ロボットの働く世界をある程度限定しないと、実際にロボットを製作して、我々のアイデアを試すことはできない。そこで、本稿は室内のような人工の環境に限定して視覚のあり方について考察する。

屋内環境

屋内は野外に比べて以下の特徴を持つ。

- (1) ロボットが働く世界は、ほぼ水平な床と垂直な壁にかこまれる。その中に置かれているものも、机や本棚といった人工物が多い。
 - (2) 予め環境の構造や寸法などを知ることができる。
 - (3) 自然環境に比べてイメージングの条件が良い。
- 野外は気象や日照の変化により、入力画像の明度や色の変化が激しく、さらに雨や雪などによるイメージングの劣化の影響も考えねばならない。室内は、これらの因子の影響が少なく、またロボットからの照明も野外に比べて容易である。

このような性質を制約条件として利用するシステムの構築が可能である。(1)の条件にある床の平坦性から、移動のメカニズムとして車輪を用いるロボットが多い。また、ロボットの本体の運動を、水平面内の平行移動の2成分と垂直軸回りの回転の3自由度で簡単に表現し得る。

この世界には水平と垂直の平面が多いので、人工知能の初期の研究で扱われた積木の世界の解析手法³⁾が利用できそうである。事実、多くの研究は3次元空間内の垂直と水平の稜や平面を検出して、シーンの解析の重要な手がかりとしている。ここで注意したいことは、積木の世界では多面体のみが存在するという制約条件が利用できたが、室内シーンの解析では、それ以外の形状の対象、例えば人間、も包含できる柔軟性が必要である。

移動ロボットの視覚

移動ロボットの視覚とコンピュータビジョンの研究を比べると大きな差がある。コンピュータビジョンは、与えられた画像の解釈を受動的に行なうが、ロボットは、自分の環境のモデルを総合的に、かつ能動的に作成する¹⁾。すなわち、(a)種々のセンサ情報の融合、(b)同

原稿受付 1987年11月6日

* Vision of autonomous mobile robots in indoor environment

** 大阪大学基礎工学部

じセンサでも、異なる位置や時点、さらにマニピュレータなどで環境を変更しながらの観測、(c) これらの実行計画の自律的作成が必要である。

移動ロボットに視覚が有用なことは、広く認められているが、ヒトの目の機能をすべて備えたシステムを実現することは困難である。そこで、移動ロボットに必要な視覚の機能を、ロボットが行なう仕事別に考えてみよう。

(1) ナビゲーション

計画システムから与えられた経路に沿って移動するため、視野内の経路の発見、障害物の検出、軌道の修正、を行なう。多くの場合、物体の詳しい形状や位置は必要でない。運行の目標となる目印の検出には、ある程度詳しい形状情報が必要である（もちろん、目印の識別のしやすさに依存する）。

(2) マニピュレーション

移動した後に、手などで作業するには、対象の形状や寸法の情報が必要である。これは、静止環境で働くロボットと同様であるが、移動ロボットが目的地で静止する位置が、あまり正確でない点は考慮すべきである。

(3) モニタ

環境の状態をモニタするには、形状情報は必要である。しかし、予め位置や形状の分かっている対象については2次元のパターン処理で十分の場合が多い。

(4) 地図の作成・更新

環境の詳しい寸法情報を持つ地図が必要な場合とトポロジカルな性質と目印で十分な場合がある。従って、視覚の役割も異なる。

これらの事から分るように、視覚システムは、その目的に応じて異なる性能や構造を持つことが、有利である。世界モデルも様な構造でなく、異なる機能、構造、分解能を持つ多様な表現が望ましい。

2. 詳細地図の利用

移動ロボットの視覚システムの枠組みは、予め環境について詳しい知識を持っている場合と未知の環境での移動に大別される。本節では、建物の構造や形状についての詳細な知識を地図の形式で与え、ロボットがそれを利用しながら観測と移動を行なう方式を述べる。

予めシステムに与えられた対象のモデルから、現在見えると思われる画像を生成し、それと実際の入力画像を比較する画像解析の方法は、コンピュータビジョンで広く用いられている。大阪大学では、建物内を巡回してモニタをする移動ロボットの基礎研究として、その働く3次元世界を図1のように階層モデルで表現した⁴⁾。最上位には、経路を示す1次元の地図があり、経路計画に用いられる。ロボットが移動すると、現在地とその近傍の数ブロックの構造を示す詳しい地図をデータベースからアクセスする。この動作空間モデルは、高さ方向の情報を持つから、ロボットの位置と向きから、今見えているはずの画像の線画を作成できる。このイメージモデルと入力画像から作成した線画の垂直線分を比較して、ロボットの現在の正確な位置と向きを算定し、移動を修正する。また、イメージモデルと入力線画の差異を解析して、ドアが開かれているか、データベース中にある物体が存

図1 屋内環境の階層モデル⁴⁾

図2 力学モデルによる動的マッチング機構⁹⁾

にするか、余分の物はないかを確認する。また、複雑な3次元形状の物体との照合には計算時間がかかるので、観測点とそこで観測される2次元パターンを最下位の形状モデルとして登録しておき、ロボットはそこを目標に移動し、2次元のパターン照合でモニタリングをする。

このロボットは、少し移動しては静止して監視と軌道修正を行なうので、能率が悪い。日立の藤江らは、実時間で観測と軌道修正をする移動ロボットシステムを開発した^{5,6)}。これは、幾何モデルを用いて環境を表現し、予測画像を作成する。移動中の軌道の修正には、図2に示す力学モデルに基づく動的パターンマッチングを行ない、実時間でステアリングを変更する。

3. 未知環境内の観測

前節で述べた詳細な環境モデルを利用する方式は、画像解析を容易にするのに有効である。しかし、人間のようには、未知の建物でも移動できる方式の研究は、より困難であるが重要と思われる。

単一画像の利用

静止した1台のカメラの画像からは、物体の3次元位置や寸法は定まらない。移動ロボットの研究では「物体が床面上に立っていて、その最下部が見えている」というヒューリスティックスを用いて、3次元世界での位置や大きさを算定することが多い。すなわち、図3のABやCDが床面にあると、カメラのパラメータと各点の画面内の位置から逆透視変換で各点の3次元位置が算定できる。この方法は簡単であるが、観測結果から作成した移動計画には、問題がある。例えばABが床面から浮いていると、障害物の算定位置が実際の位置より遠くになり、衝突の危険性がある。また、床面上のマークや影な

図3 簡略化した室内シーン

ども障害物と見なして、それらを回避する経路を計画する。

ステレオ法

2台のカメラの画像から3次元情報を得るステレオは、移動ロボットによく用いられている。ステレオの問題点は、シーンの構造が複雑になると左右画像の対応点の決定が難しいことである。初期の研究でMoravecは、インタレストオペレータで特徴点を検出し、その対応を相関計算で決定し、ロボットが移動と観測を繰返して、環境の地図を作成した⁷⁾。その後、コンピュータビジョンの研究では、粗から密へのマッチング⁸⁾、動的計画法の応用⁹⁾、線分単位での対応¹⁰⁾などが提案されている。

通常の左右にカメラを配置したステレオでは、水平な線分（例えば図3のEF）は、左右画面の対応が決定しても、その3次元位置は定まらない。そこで、もう1台のカメラを垂直方向に配置した3眼ステレオが用いられる¹¹⁾。これは、画面間の対応決定プロセスを簡単にすることも有効である¹²⁾。

移動ロボットの特徴として多地点での観測結果の融合がある。画面の分解能のために、ステレオの視差から計算した3次元データは、距離の2乗に比例した不確実性がある。INRIAのFaugerasらは、多地点の観測結果をカルマンフィルタを用いて処理し、信頼性の高い世界モデルを作成する方式を開発した¹³⁾。図4(a)は、垂直と水平面を持つ入力ステレオ画像、(b)は最初の観測結果の垂直と水平面の分散を、(c)は複数の観測を融合した結果である。

先に述べた二眼ステレオの水平エッジの3次元位置の不確実性を解決するために、最初の観測で作られた粗い世界地図を用いて観測の計画を作り、移動ステレオの原理で3次元位置を決定する方式も研究されている¹⁴⁾。

観測された3次元データから、環境の地図が作成される。先に述べたように、目的に応じて多様な構造の地図を作成することが必要である¹⁵⁾。また、ロボットの移動

(a) 入力ステレオ画像

(b) 垂直面(左)と水平面(右)の各点の分散

(c) 観測融合結果の分散

図 4

する環境が広くなると、絶対座標系で地図を記述するよりも、推論に適した柔軟な構造で目標の相対関係を記述した方が有利と思われる¹⁶⁾。

4. 動画像解析

走っている車から景色を眺めると、その動きのパターンから車の動きを推定できる。本節では、単眼の移動ロボットが同様の情報を得る方法を述べる。

カメラが直進運動をすると、画像の各点は図5に示すように、動きの無限接点 (focus of expansion) から放射する直線上を移動する。座標系として、画像の xy 軸を X, Y 軸に、光軸を Z 軸に設定する。空間内の点 $P(X, Y, Z)$ の移動速度を (U, V, W) 、その画像 $p(x, y)$ の画面内で動く速度を (u, v) とする。動きの無限遠点の座標 (x_F, y_F) は、

$$x_F = U/W, \quad y_F = V/W$$

図 5 直線運動による動パターン¹³⁾

(a) 廊下を移動するロボットの動画像より得た運動ベクトル

(b) 回転成分を含むベクトル場

(c) 回転成分を除去したベクトルと動きの無限遠点¹⁸⁾

図 6

で与えられる。点 P の空間内の位置や速度を算定するには、条件がひとつ不足し、内部センサの利用、またはヒューリスティクスが必要である。しかし、 P が画像面に到達する時間 t_c は、画像情報だけから

$$t_c = |(x - x_F)/u| = |(y - y_F)/v|$$

で求められる。また、カメラ以外に移動物がないと、環境内の物体の相対的な遠近も判定できる。

回転も含む一般化したカメラの運動を画面内の速度ベ

クトルから算出する理論も、発表されている¹⁷⁾。大阪大学では、ロボットが移動中に床の凹凸のためにカメラが振動する場合の動画像解析が研究された。回転成分の検出には、建物内の垂直エッジの消失点の動きを利用し、さらに動きの無限遠点のクラスタが最小になるように回転パラメータを設定した。これから、回転成分を補正して得た動きの無限遠点を図6に示す¹⁸⁾。また、x軸方向の速度ベクトルのクラスタを解析して環境内で移動する物体を検出した¹⁹⁾。

動画像解析では、画像内の速度ベクトル(optical flow)の検出が、困難で重要な問題である。時間軸に対して密に画像をサンプリングし、それから生成されるxytの3次元画像の断面(例えばxt画像)の線分を検出して、速度ベクトルを算定する方式が着目される²⁰⁾。

参 考 文 献

- 1) 辻 三郎, "知識処理とロボティクス", 人工知能学会誌, Vol.1-1, pp.30-37, 1986
- 2) 白井, 大田, "自律移動ロボットにおけるセンシング技術", 日本ロボット学会誌, Vol.5-5, pp.391-397, 1987.
- 3) 長尾 真編, パターン認識と図形処理, 岩波書店, pp.207-221, 1983
- 4) S. Tsuji, "Monitoring of a Building Environment by a Mobile Robot", in H. Hanafusa and H. Inoue (eds.), Robotics Research The Second Symposium, MIT Press, pp.349-356, 1985
- 5) 藤江ほか, "知覚誘導クローラ形移動ロボット", 日立評論, Vol.66-10, pp.755-758, 1984
- 6) 中野, 亀島, "ロボットにおけるAI応用", 日本機械学会誌, Vol.89-815, pp.1174-1179, 1986
- 7) H. P. Moravec, "The Stanford Cart and CMU Rover", Proc. IEEE, Vol.71-7, pp.872-884, 1983
- 8) W. E. L. Grimson, "From Images to Surfaces", MIT Press, 1981
- 9) Y. Ohta and T. Kanade, "Stereo by Intra and Inter-Scanline Search Using Dynamic Programming", IEEE Trans. PAMI, Vol.7-2, pp.139-154, 1985
- 10) W. E. L. Grimson, "Computer Experiments with Feature-Based Stereo Algorithm", IEEE Trans. PAMI, Vol.7-1, pp.17-34, 1985
- 11) N. Ayache and F. Lustman, "Fast and Reliable Passive Trinocular Stereo Vision", Proc. 1st Int. Conf. Computer Vision, pp.422-426, 1987
- 12) 北村, 谷内田, "三眼視による三次元情報の計測", 日本ロボット学会誌, Vol.5-2, pp.47-54, 1987
- 13) N. Ayache and O. D. Faugeras, "Building, Registering and Fusing Noisy Visual Maps, Proc. 1st Int. Conf. Computer Vision, pp.73-82, 1987
- 14) 鄭, 辻, "室内ロボットの環境認識システム", 情報処理学会研究報告, Vol.86-CV-47, 1987
- 15) A. Elfes, "Sonar-Based Mapping and Navigation System, Proc. IEEE Conf. Robotics & Automation, pp.1151-1156, 1986
- 16) R. A. Brooks, "Visual Map Making for a Mobile Robot, Proc. IEEE Conf. Robotics & Automation, pp.824-829, 1985
- 17) A. R. Bruss and B. K. P. Horn, "Passive Navigation", Computer Vision, Graphics & Image Processing, Vol.21-1, pp.3-20, 1983
- 18) 八木ほか, "動画像処理を用いた移動ロボットの環境認識", 電子通信学会論文誌, Vol. J 69 D-6, pp.967-974, 1986
- 19) 八木ほか, "移動カメラで観測した環境内の運動物体の検出", 電子通信学会論文誌, Vol. J 69 D-5, pp.794-801, 1986
- 20) R. C. Bolles, et al., "Epipolar-Plane Image Analysis: An Approach to Determining Structure from Motion, Computer Vision, Vol.1-1, pp.7-56, 1987

辻 三郎 (Saburo TSUJI)

1955年大阪大学大学院修士課程修了。同年に電子技術総合研究所入所, 実時間計算機, 最適制御, バイオニクス, 知能ロボットの研究に従事, 1970年より大阪大学基礎工学部教授, 人工知能, コンピュータビジョン, ロボティクスの研究に従事。電子通信情報学会, 情報処理学会, 人工知能学会, IEEEなどの会員。(日本ロボット学会正会員)