



技術解説

自律移動ロボット

辻 三 郎*

1. 知能ロボットの発展

“ヒトのような機械”を創るのは、人類の長い夢である。これを実現するための試みは、1960年代から“知能ロボット”の研究として始められた。当時は、多面体だけが置かれている単純の環境の下で、ロボットが目で積木の種類と場所を見つけ、手でそれをつかんで積上げという簡単な作業を行った。

しかしながら、試作されたロボットは、このように限定された“積木の世界”でも十分満足できる性能を得ることは難しく、まず要素技術を開発する必要性が明確になった。1970年代ではロボティクスの研究は、高性能のマニピュレータ（機械の手）とその制御方式、コンピュータビジョン（ロボットの目）、触覚センサ、ロボットの仕事を記述する言語といった個々の分野に分化して行われた。特に着目されることは、これらの基礎研究で得られた経験や知識を利用し、さらにマイクロエレクトロニクス技術を結合したロボティクスの発展である。今日、近代化されたオートメーション工場の中では、あらゆる仕事がロボット化され、わが国産業の生産性向上のひとつの重要な柱となっている。

最近では、工場といった限定された場所だけでなく、より自由な環境で作業するロボットの開発研究が盛んである。農場や山林といった自然環境、原子力プラント、海中、宇宙といった危険な環境、各種の建設工事などの人手の集まらない職種、さらに病院やサービス産業などもロボットの職場とする研究が始まった。大型の開発プロジェクトとしては、わが国の極限作業ロボ

ット、アメリカのDARPA（国防総省高等研究計画局）のALV（Autonomous Land Vehicle 自律地上走行車）やNASAの火星探査ロボット、ヨーロッパのESPRI計画など新しいロボット技術の開発が進められている。本稿は、これらの研究の中から自分の判断で環境内を自由に動き廻って仕事をする“自律移動ロボット（Autonomous Mobile Robot）に焦点をしばって、その技術の幾つかを紹介する。

2. 自律移動ロボット

産業用移動ロボット

移動ロボットは、工場、倉庫、オフィスなどで品物の運搬に広く利用されている。これらは、予め環境に設置した目印（電線、磁性箔、白線）を比較的簡単なセンサで検出し、それに沿って移動するように制御する。また、経路の全面にわたってガイドを設けるかわりに、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しながら移動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、しかも識別の誤りがない目印の設定とセンシングの開発に研究の重点が置かれている。すなわち、産業ロボットの開発の鍵となった「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」方策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することが望ましい。本稿で述べる自律移動ロ

*辻 三郎(Saburo TSUJI), 大阪大学基礎工学部 制御工学科, 教授, 工学博士, 人工知能

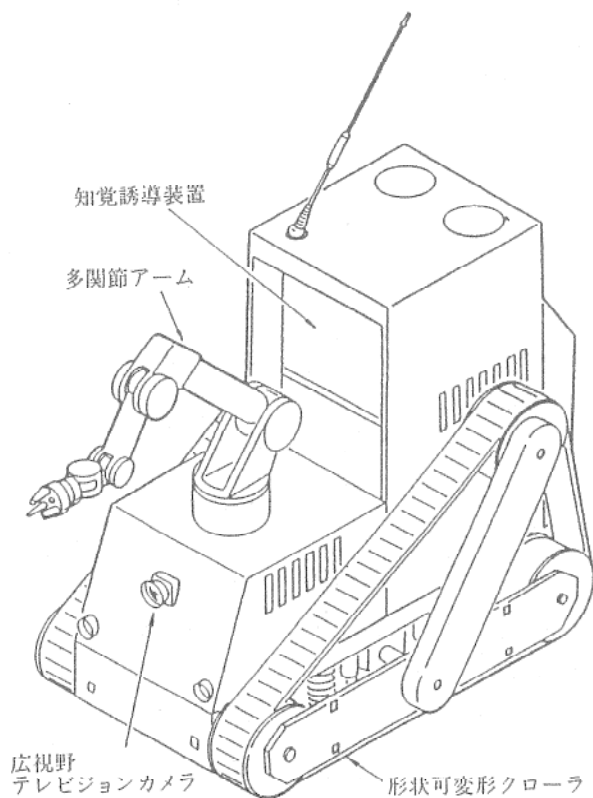


図1 移動ロボットの外観¹⁾

知覚誘導される移動ロボットの上に、移動先の目的地で軽作業をすることが可能なマニピュレータを搭載

ボットは、そのアプローチから研究されている。図1に、試作されたロボットの一例¹⁾を示す。

もともと、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。今までの研究は、屋内環境、道路環境、宇宙などの特殊環境にそれぞれのターゲットをおいて、試作と実験が行われてきた。

人工知能とロボット

人間のような知能を機械で実現しようという人工知能 (Artificial Intelligence) は、ロボットと深い関わりを持つ。特に、自律ロボットの実現は、人工知能にとっても大きな目標である。

産業ロボットは、工場で流れてくる多数の製品の加工、組立、検査を繰返し行うので、そのセンサの働き、アームの動作を予めプログラム

しておけば、それを読出して実行することにより複雑な仕事も遂行できた。言うまでもなく、ロボットの働く環境は何時も同じで、そのためプログラムは容易である。

我々の目指すロボットは、人間が与える種々の仕事を、色々な環境で行うものである。したがって、いちいち仕事のやり方をプログラムで、こと細かく指令するのは不可能である。ロボットが独力で作業計画をたて、それを実行するという問題解決能力が必要になる。これは、人工知能の重要課題のひとつである。また、いちいちプログラムしなくても、ロボットが経験を蓄積して知的レベルを向上させる学習も欠かせない。

最近のロボット研究の特徴のひとつは、能動的人工知能の流れである。従来のコンピュータビジョンの研究は、テレビカメラが捉えた1枚の画面をコンピュータが解析し、そこに写った物体の種類を認識していた。しかし、ロボットは目で見た物体の形がよく分らないと、自分で分りやすい場所に移動して、観測をくり返して認識する。障害物があると、手でそれを取り除く。さらに手でふれて、その表面形状を確認する。このように、運動、観測が一体となり、また体内のセンサ、視覚・触覚センサ情報を融合する情報処理方式などが、最近の研究課題として特に注目される。

3. 屋内環境

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、それらが直交することが多い。また、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、ロボットに教えることが可能である。
- (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要因もある。室内は、これらの因子の影響が少なく、またロボット自身による照明も容易である。

これらの性質を利用して、ロボットは設計される。(1)の床の平坦性から、車輪を用いて移動できる。また、ロボット本体の運動を、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。以下は、視覚を用いて移動するロボットの研究を紹介する。

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、予め環境についても詳しい地図を持っている場合と未知の環境に大別される。まず、建物の構造や形状についての詳細な情報を地図の形式で与え、ロボットがそれを利用して観測と移動をする方式を述べる。

予めシステムに与えた対象のモデルから、現在見えるはずの画像を生成し、それと実際の入力画像と比較する画像解析手法は広く用いられている。我々は、移動ロボットの初期の研究として、建物を巡回してモニタする作業を想定し、ロボットの働く世界を図2のように階層モデルで表現した²⁾。最上位には、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読み出す。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が作成できる。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を比較して、ロボットの現在の位置と向きを算定し、計画した軌道上を通るように制御する。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、予めデータベースに登録された物体が存在するか、余分のものはないかを確認する。また、モニタすべき対象のパターンを下位モデルに登録しておき、モニタリングに利用する。

建物の構造モデルを利用する方式を実時間で行うシステムは日立機械研究所で行われ、力学モデルに基づく動的パターンマッチングにより制御量を算定し、ステアリングを行った^{1), 3)}。

未知環境内の観測

詳細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環境でも移動できる方式の研究は、より困難であるが重要である。

静止した1台のカメラの画像からは、物体の奥行き情報が得られない。そこで「物体が床面上に立っていて、その最下部が見えている」という仮定の下に、物体の位置や大きさを算定することが多い。しかし、上からぶら下っている障害物の位置を見あやまったり、床面上のマークや影も障害物と見なす問題点がある。

2台のカメラを用いるステレオ法は、この欠

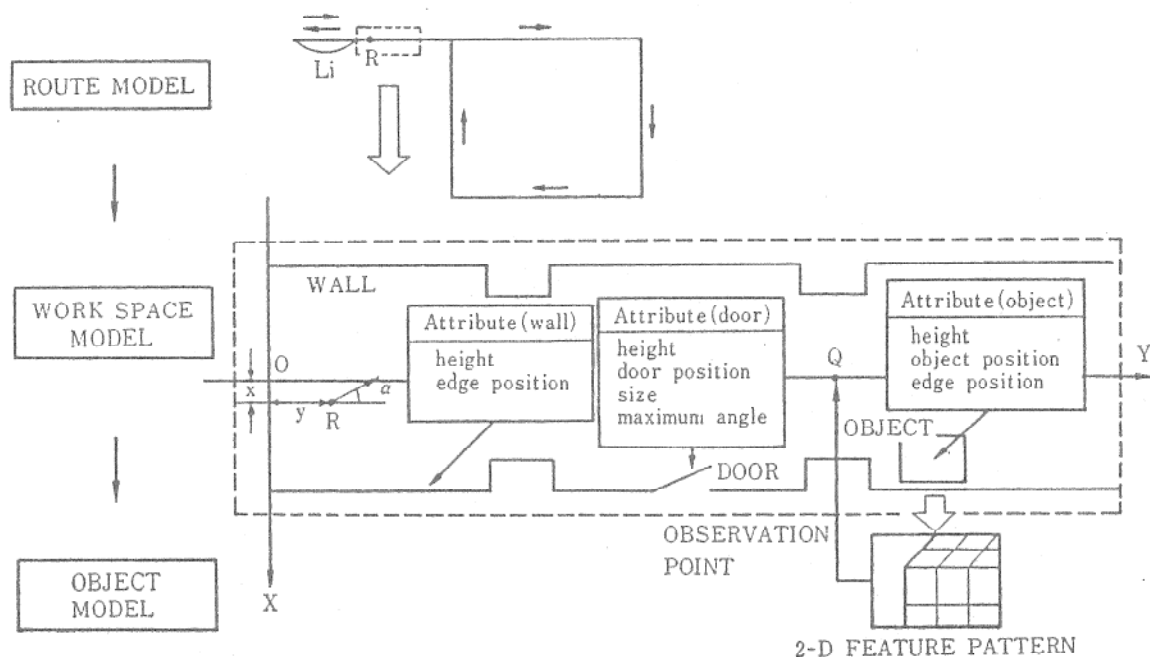
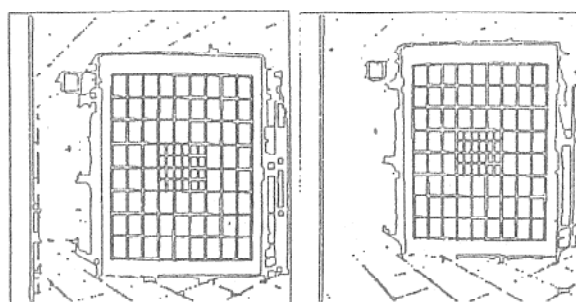
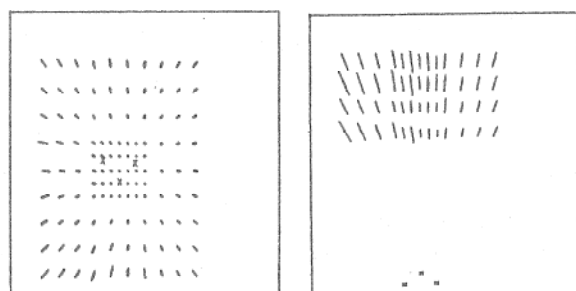


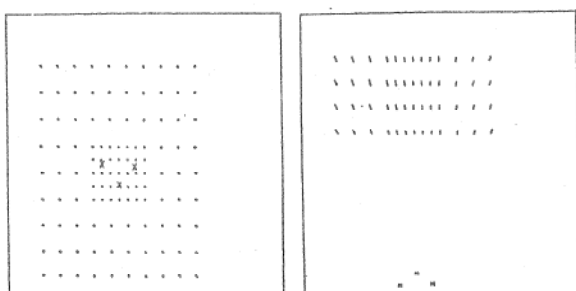
図2 屋内環境の階層モデル²⁾



(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3 ステレオ画像の融合による精度向上⁴⁾

点を補うため広く用いられている。移動ロボットの特徴としては、多数の点で観測したデータを融合して、より信頼性の高い結果を得ることがあげられる。フランスの研究所のINRIAでは、多地点の観測結果を信号名理の手法(拡張カルマンフィルタ)を用いて処理した⁴⁾

図3(a)は、垂直面と水平面を持つ入力ステレオ画像、(b)は第1回の観測で得た垂直と水平面の各点の位置の分散を(c)は複数の観測を融合して少なくなった分散を示す。

これらの観測結果を利用して、ロボットは環境のモデル、地図を作成する。広い環境に対して地図を作るには、多様の構造のものがなければならない⁵⁾

4. 道路環境

ドライバーのかわりにコンピュータが運転

する車は、21世紀に向っての開発ターゲットである。もちろん、この目標を達成するのは容易なものではなく、そのための基礎技術が研究されている。

そのひとつは、先に述べたDARPAのALVプロジェクトで、その後ヨーロッパや日本で相次いで実験が行われている。

車の走る道路環境は、屋内に比べてはるかに多様で、しかも気象、日照条件も変動が大きい。現在のところは、単純化した条件の下でアイデアの有効性をテストしている段階である。

まず、道路の条件としては2本のほぼ平行な線でその領域を定める。車に取りつけたテレビカメラで進行方向を観測すると、図4のように道の両端(または中央の白線)が現れ、それから車の向きと中央線からの路離が算定できる。これを、目標の値になるように制御すれば、自動走行ができるはずである。

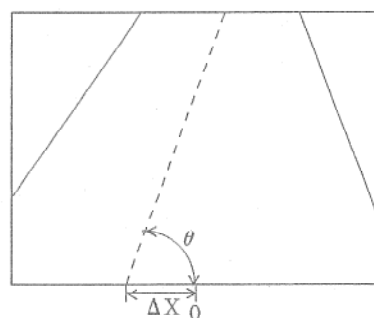
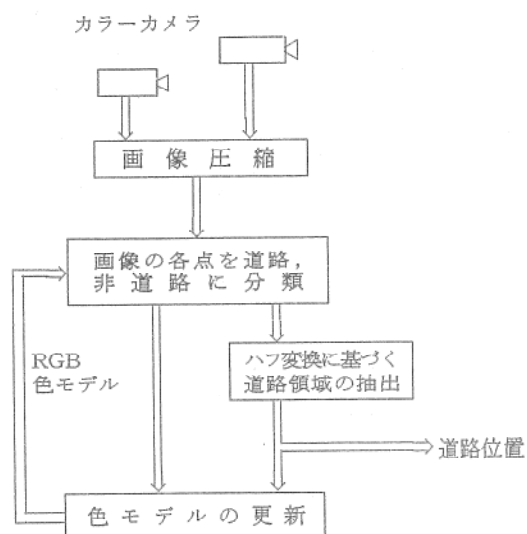
図4 仮想の中央線の角度 θ とその位置 Δx を用いて制御を行う。

図5 道路発見の処理手法

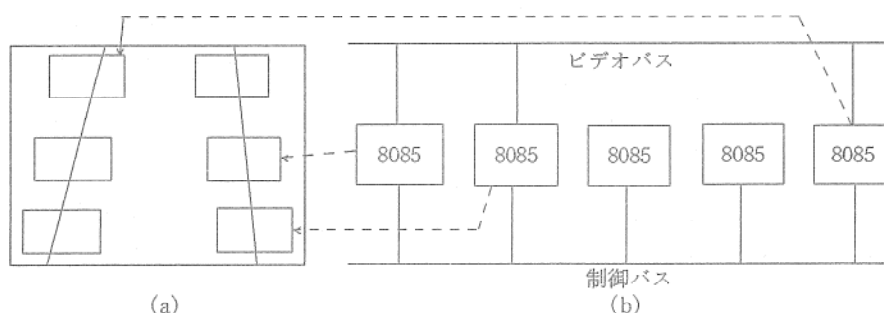


図6 画像の中の各々の窓を1台ずつマイクロプロセッサが受持ち、並列に道路の端（または白線）の位置を測定する。信号処理の手法を用いているので、幾つかのプロセッサが誤った結果をある瞬間出力しても、正しく自動走行する。

問題は、道の両端を信頼性高く画像内でコンピュータが発見することである。アメリカのカーネギー大学のロボット研究所は、バンに多数のワークステーションや画像処理高速コンピュータを搭載し、視覚を用いる自律走行の実験システムNAVILABを作成した⁶⁾。道路の色は短時間では変わらず、また道路の幅が局所的に平行な直線であるという仮定の下で、8種類の道路と道路以外の領域の色モデルを記憶し、図5で示すシステムでそのモデルを修正しながら画面内の道路領域を発見する。また、ハフ変換を用いた統計的手法により、認識の一部の誤りは差支えない。本手法は、多種の道路モデルを持っているため、整備された道路だけでなく、森の中で木の影が多くある小路も運行できる所に特徴がある。また、レーザ光により物体までの距離画像を得る手法も研究している。

ドイツのミュンヘンにある空軍大学では、アウトバーンのように整備された道路を高速自動する車の研究を行っている。これは、道路の白線と道路端を白黒画像から検出するもので、16台の8085マイクロプロセッサを用いた小型の特殊設計コンピュータを用いている。画面内に図6に示す6個の窓を設け、それぞれの窓を1台のマイクロプロセッサが受持って白線や道路端を発見する。この手法の特徴は、信号処理の手法を用いて窓の位置を予測し、またたとえ処理が誤っても今までの結果に基づいて結果の修正をするので、比較的簡単な処理でも自動走行が可能な点である。他の車が走行してない状態ではあるが、実際の道路で時速100kmの自動走行

の実験に成功した。

知能ロボットが自動走行するには、自分で経路を記憶し、それに基づいて正しい経路を進行することが必要である。我々は、ロボットが走行しながら眺めた景色を記憶し、次の走行からはそれに基づいて位置や交叉点を見つける方式を研究している⁷⁾。

5. む す び

最近の自律移動ロボット的话题を幾つか紹介した。紙数の制限のため省略したが、宇宙で働くロボット技術⁸⁾も今後益々重要になると思われる。

参 考 文 献

- 1) 藤江ほか; 知的誘導クローラ形移動ロボット, 日立評論, 60巻10号, pp. 755-758, 1984.
- 2) 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.
- 3) 中野, 亀島: ロボットにおけるAI応用, 日本機械学会誌, 89巻, 815号, pp. 1174-1179, 1986.
- 4) N. Ayache and O.D. Faugeras: Building, registering and fusing noisy visual maps, Proc. 1st Int. Conf. Computer Vision, pp. 73-82, 1987.
- 5) A. Elfes: Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation, Computer,

Vol. 22, No. 9, pp. 46—58 (1989).

- 6) 金出：米国における自律移動ロボット研究の動向，
日本ロボット学会誌，5巻，5号，pp. 376—
383, 1987.

- 7) J.Y. Zheng and S. Tsuji, Panoramic repre-
sentation of scenes for route understanding,

Proc. 10th International Conference on
Pattern Recognition, pp. 161—167 (1990).

- 8) J. Bares et al., Ambler: An autonomous rover
for planetary exploration, Computer, Vol. 22,
No. 9, pp. 18—26 (1989).

報 告



本協会元理事長池田悦治氏は，平成2年7月28日逝去されました。ここに，謹んで哀悼の意を表します。

同氏は，昭和36年6月から昭和60年5月まで，24年の長きにわたり，本協会の発展にご貢献なさいました。本協会に対するご尽力に感謝の念を捧げつつ，ご冥福をお祈りいたします。

平成2年10月25日

社団法人 生産技術振興協会
理 事 長 長谷川 嘉 雄