

知覚誘導クローラ形移動ロボット

Mobile Robot with Transformable Crawler and Intelligent Guidance

ロボットは、従来の製造業用だけでなく、第一次あるいは第三次産業を含む新しい市場への展開が予想されている。このような展開に対応するためには、従来のロボットの中心技術である「マニピュレーション」技術に加えて、新たに移動機能とそのための知能を利用した技術の開発が必要であり、しかもこの「知能を利用した移動」は、小さく、軽く、速くなければならない。このような「知能移動」の開発を目的として、階段や障害物を回避あるいは乗り越えて目的地まで自律的に移動するロボットの主要技術を開発した。第1は路面に適した姿勢制御が可能なクローラ形移動機構、第2は扉、壁など建屋構造物に対する視覚認識情報と地図情報との比較結果を、クローラ速度に変換して所定ルートへ誘導する技術であり、総合実験の結果、実用化への見通しを得た。

藤江正克*
岩本太郎*
亀島 鉦二*
船橋 誠寿**
佐々木正祥***

Masakatsu Fujie
Tarō Iwamoto
Kōji Kamejima
Motohisa Funabashi
Masayoshi Sasaki

1 緒 言

1980年代に入って、ロボットは製造業分野での市場を確立したばかりでなく、それ以外の産業分野にも新しい需要を喚起しつつある。図1にロボット需要動向¹⁾と、需要にこたえるために解決しなければならないブレークスルー技術を示す。新しいロボットはここ数年間、原子力分野での需要が先行し、7、8年後には海洋、建設、運輸、医療などの分野が加

わり生産額が1,000億円を超えると予想されている¹⁾。ところが、このような分野でロボットに期待される作業は、(1)多様性、(2)非繰返し性、(3)不定性、(4)広域性を特徴としており²⁾、しかもロボットが人間と共存する可能性が大きい。したがってこのようなロボットを完成するには、従来のマニピュレーション機能に関する技術に加えて、ロボットが自律的に移動する機能を実現する技術の開発が不可欠となる。新しいロボットを実現するための技術課題を表1に示す。機構、制御両面にわたって幅広い技術開発を必要とし、特に移動と知能を不可欠とする点が従来の製造業のロボットと大きく異なる。本論文では、自律的移動のための知能をもち、人間に近い速度で移動できるロボットの開発を目標として、その主要技術である軽量、高速でフレキシブルな移動機構と自律移動す

表1 次世代ロボットの技術課題 幅広い技術を機構と制御の2面からまとめている。特に、移動と知能が特徴的に現われている。

	機 能	技 術 課 題
移動ロボット機構	移 動	軽量高トルクアクチュエータ 多変数サーボ技術 アダプティブサスペンション(適応移動機構) 高密度動力源
	マニピュレーション	低剛性高精度アーム機構と制御 小形軽量高トルクアクチュエータ
知覚制御	センシング	視覚処理 超広角視覚 視触覚複合(立体)動画 平衡覚 皮膚覚 力覚
	知 能	位置標定 3次元モデル } による誘導 知識利用
	遠隔監視制御	操作支援技術(パラメータチューニング機構) 低パワー耐高ノイズ情報伝送

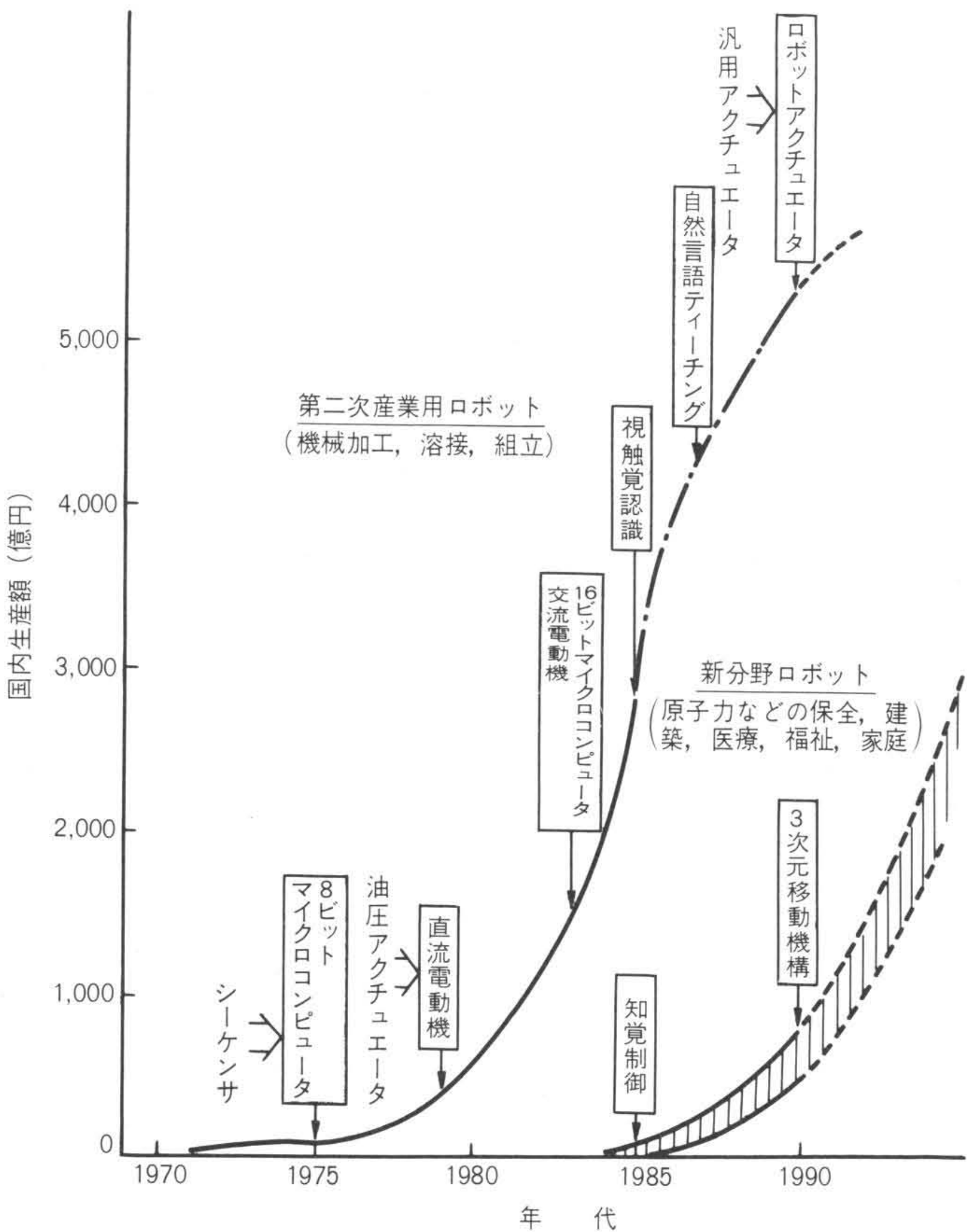


図1 ロボット需要動向とブレークスルー技術(数値は文献1)による。) ロボットの需要伸長に貢献する技術が、実際に製品に適用される時期で示してある。

* 日立製作所機械研究所 ** 日立製作所システム開発研究所 *** 日立製作所日立工場

るための高速の知覚誘導技術の開発について述べる。

2 ロボットの移動環境と目標仕様

新しいロボットの中でも特にニーズが顕在化しているのは、ビルでの災害救助や夜間の警備、また原子力発電所をはじめとするプラントでの点検作業など建屋内を移動するロボットである。これらのロボットは、人間と共通の領域を移動する必要があり、路面には階段、段差、踏み板、坂などの通路設備がある。これらの設備は、歩行移動する人間には都合がよいが、ロボットにとっては逆に障害となる。ロボットを実用的なものにするためには、階段や障害物があっても人間が歩く程度の速度で安定に移動できる機構の開発が必要である。また建屋内通路は一般に狭く、床の許容荷重も小さい場合が多いのでロボットが小形・軽量であることも必要である。小形・軽量化は高速化のためにも重要なことである。

一方、ロボットの自律的移動のためには周囲の状況変化をロボットの移動中に高速で理解する機能が必要である。ところが従来の技術では、複雑な環境情報から移動に必要な理解を行なうために要する時間が長くなることから停止せざるを得ず、理解、移動、停止を交互に繰り返す必要があった。そこでここでは、ロボットの移動環境が建屋内であることを利用して、次の工夫によって理解に要する時間の短縮を図る。第1に、ロボットが移動する環境を、扉、廊下、階段など比較的限られた特徴パターンで理解する。第2に、ロボットの行動に先立って建屋内の3次元形状を、これらの特徴パターンで構成した地図で用意する。その結果として、人間がゆっくり歩く程度の速度で移動できるロボットの開発の可能性がでてくる。このときの主要な技術課題は、建屋内の通路設備に対して十分な環境適応能力をもつ小形・軽量の移動機構と、建屋内でのロボット自身による高速誘導技術である。

3 ロボット移動機構とその制御

3.1 ロボット移動機構

ロボットの移動機構は、(1)車輪式、(2)クローラ式、(3)脚式に大別できる。各方式ともそれぞれ特徴があるが、車輪式の場合は車輪半径より大きい段差を乗り越えられないこと、また脚式の場合は速度の速いロボットの実現が難しいことが難点である。これに対してクローラ式は、不整地での走行が可能で制御も比較的簡単であり、しかも高速度が得られることから、前述の用途に適している。しかし、従来のものは車体の姿勢を積極的に制御する手段をもたないため、階段や高い段差を乗り越える際に転倒する危険性があった。これを防ぐため工夫した例に、4基のクローラユニットを備え、これらのユニットを車体に対して揺動し、路面に適応させるようにした走行車がある³⁾。この走行車はクローラの数を増すことによって対地適応能力を高めたものである。しかし、この方式は走行車が重く、また大きくなりやすい。日立製作所は今回、建屋内では十分移動でき、しかも小形・軽量化を図った新しいクローラ方式の走行車を開発した。すなわち形状可変形クローラ走行車と名付けたもので、図2に示すように、車体に取り付けられた主車輪、副車輪のほかにアームで支持され位置を移動できる遊星輪で構成したクローラユニットを車体の両側に備えている。この遊星輪の位置を移動させて、車輪に巻き付けた履帯を路面状態に最もなじみやすい形状に変化させることによって、踏破能力を高めることができる。

3.2 クローラ形状の制御

クローラの形状は遊星輪の位置を移動させて変えるが、こ

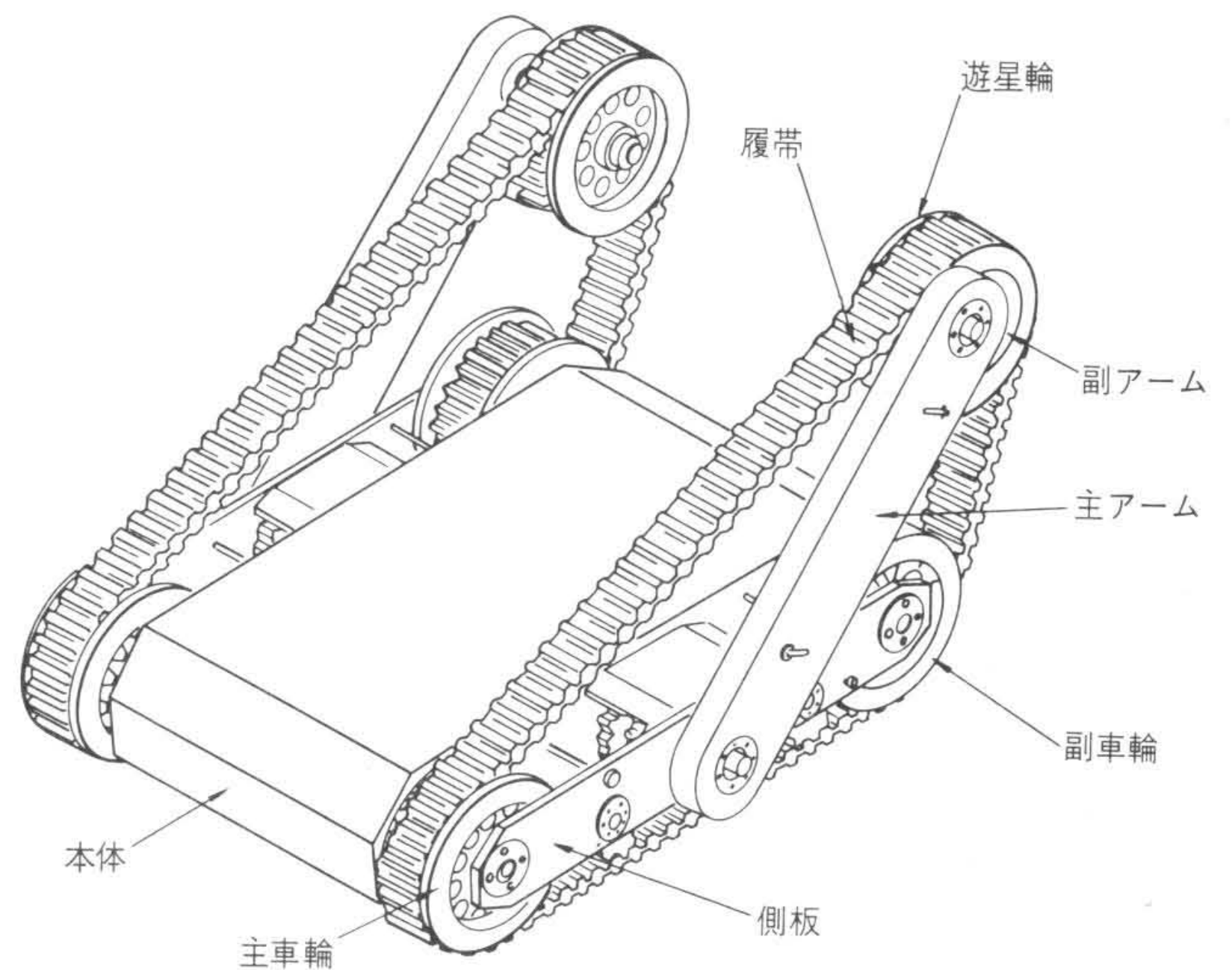


図2 形状可変形クローラ走行車 側板の中央を回転中心に主アームを回転させることによって、主車輪、副車輪、遊星輪により構成されるクローラ形状を変える。

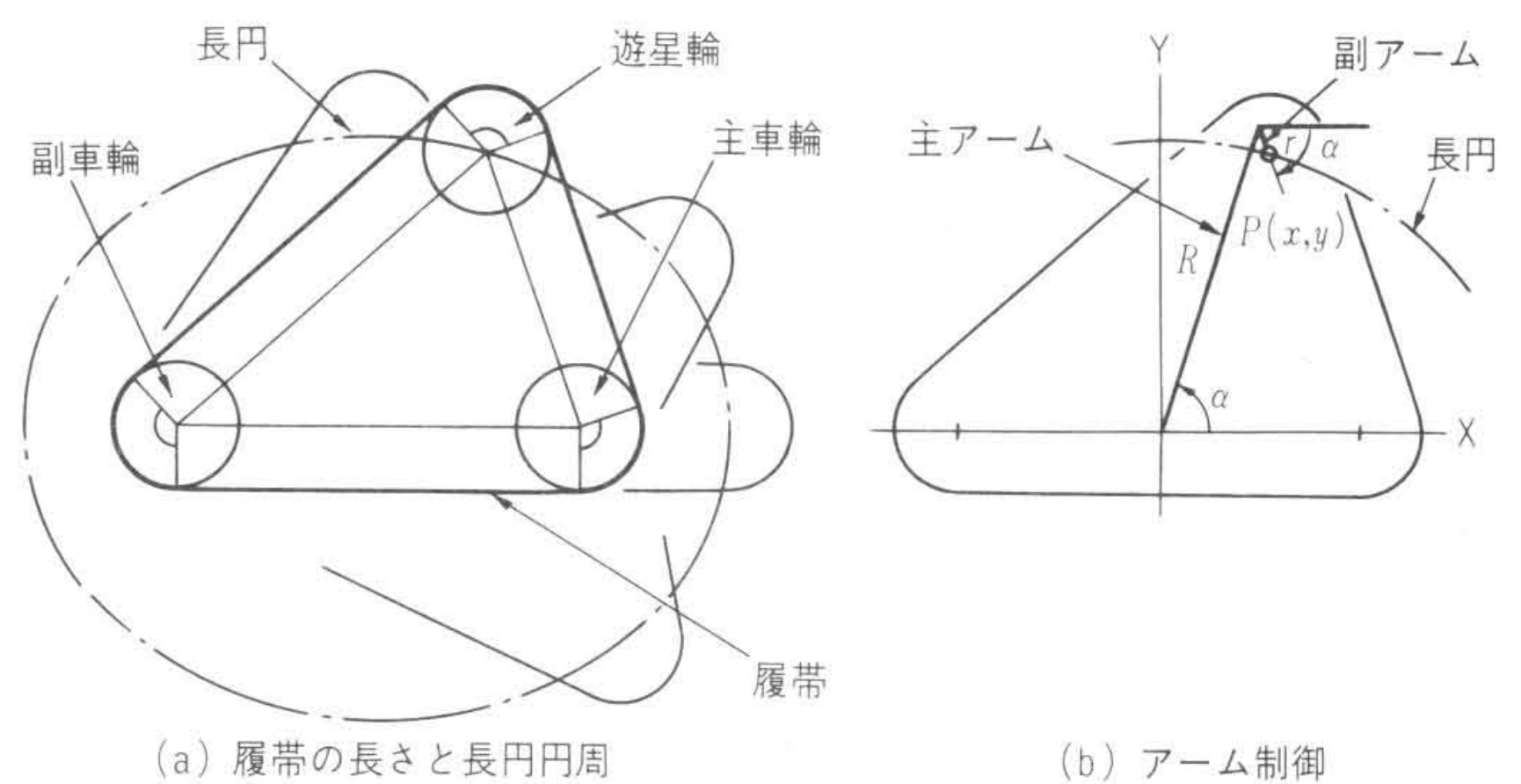


図3 クローラ形状の制御 履帯を緊張させたままクローラ形状を変化させるには、遊星輪を長円円周上で移動させる。主アームの先に副アームを付けることによって実現している。

のときに履帯が緩まないようにしなければならない。アームが伸縮してクローラの形が変化しても、履帯に常に一定張力を加えるように制御しようとする、そのために制御機構が複雑になり、ひいては、重量を増加させる。ところが、履帯を緊張させたまま遊星輪を移動させるときのその運動軌跡は、主車輪、副車輪、遊星輪の径を同一にすると図3(a)に示すように、両車輪の中心を焦点とする長円となる⁴⁾。更に同図(b)に示すように、主アームの先端に副アームを取り付けて主アームの回転角だけ反対方向に回転させると、両車輪の中点を回転軸とする主アームの運動によって副アームは前述の長円軌跡を描く。この結果、両アームを簡単な歯車機構で結び履帯張力を一定にできるため、大幅な小形・軽量化を実現した。

またロボットには、高速性と高トルクを両立させる必要があることから、ロボットの重量に駆動機構の占める割合が大きい。今回の開発では一組みの減速機と直流サーボモータの速度制御により、障害物や階段での高トルクと平地での高速性を実現し、駆動機構の重量軽減を図った。

3.3 近接覚によるクローラの運動制御

障害物や階段の乗り越えには、走行車と障害物の相対位置を高精度に検出する必要がある。図4に示す障害物乗り越えを例に、車体の底に設けた近接センサによるクローラの運動制御のシーケンスを説明する。視覚による障害物の検出によりクローラに迎え角を作り、前輪を乗り越える。障害物への

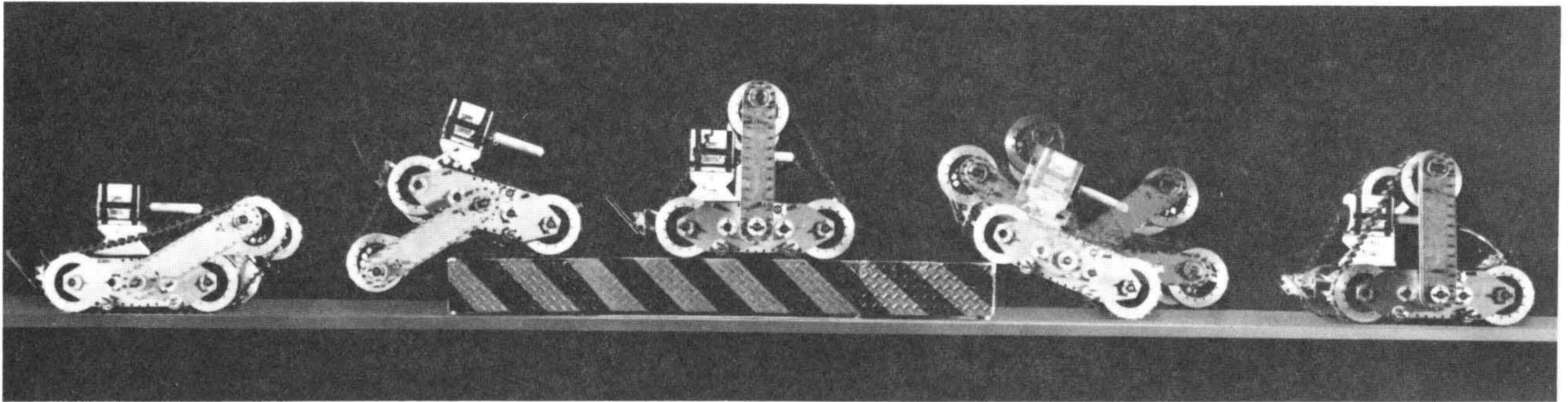


図4 障害物乗り越えシーケンス 車体底に設けた近接センサを利用して、障害物を滑らかに乗り越える。

乗り上げを完了したことは、車体底のセンサで検出する。降りる場合は、車体底のセンサで障害物の終端位置を検出すると、アームを前下方に回して遊星輪と路面距離を短くする。更に前進し、障害物から車体が完全に乗り出したことを車体底のセンサで確認した後、静かに着地する。階段走行中は車体底のセンサが常に階段の端部を検出している。

4 ロボットの知覚誘導

4.1 誘導の原理

ロボットを誘導するためには、ロボットが環境を理解し、自身の位置を知ることが必要である。階段や段差のように、近接した物体を乗り越える場合の位置を近接覚で知ること、移動機構の制御の項で既に述べた。ここでは、視覚を利用して離れた物体との相対位置を知り、ロボットを誘導する知覚誘導技術について述べる。

移動環境が建屋内であるため、建屋内環境の3次元形状は「地図」として用意することができ、その場合、「地図」を事前の情報として観測の計画を立てるとともに観測データの予測ができる。開発した「地図」を利用する誘導システムは、「地図」と走行車の移動距離信号に基づいて計算した予測画像と視覚でとらえた実際の撮影画像とを比較し、操だ角と速度の信号を計算する。この動的なパターンマッチングによる誘導の手順を図5を用いて説明する。建屋構造物の特徴パターンのワイヤフレームモデルで記述した「地図」から作成した予測パターンと、撮影画像からエッジパターンを抽出した測定パターンを各々のメモリに取り込む。次に両パターンの全対応点を結んで得られるずれベクトルをパターンプロセッサI、IIで演算し、予測パターンを源とするポテンシャルのこう配ベクトルに置き替える⁵⁾。このずれベクトルはロボットが予測した

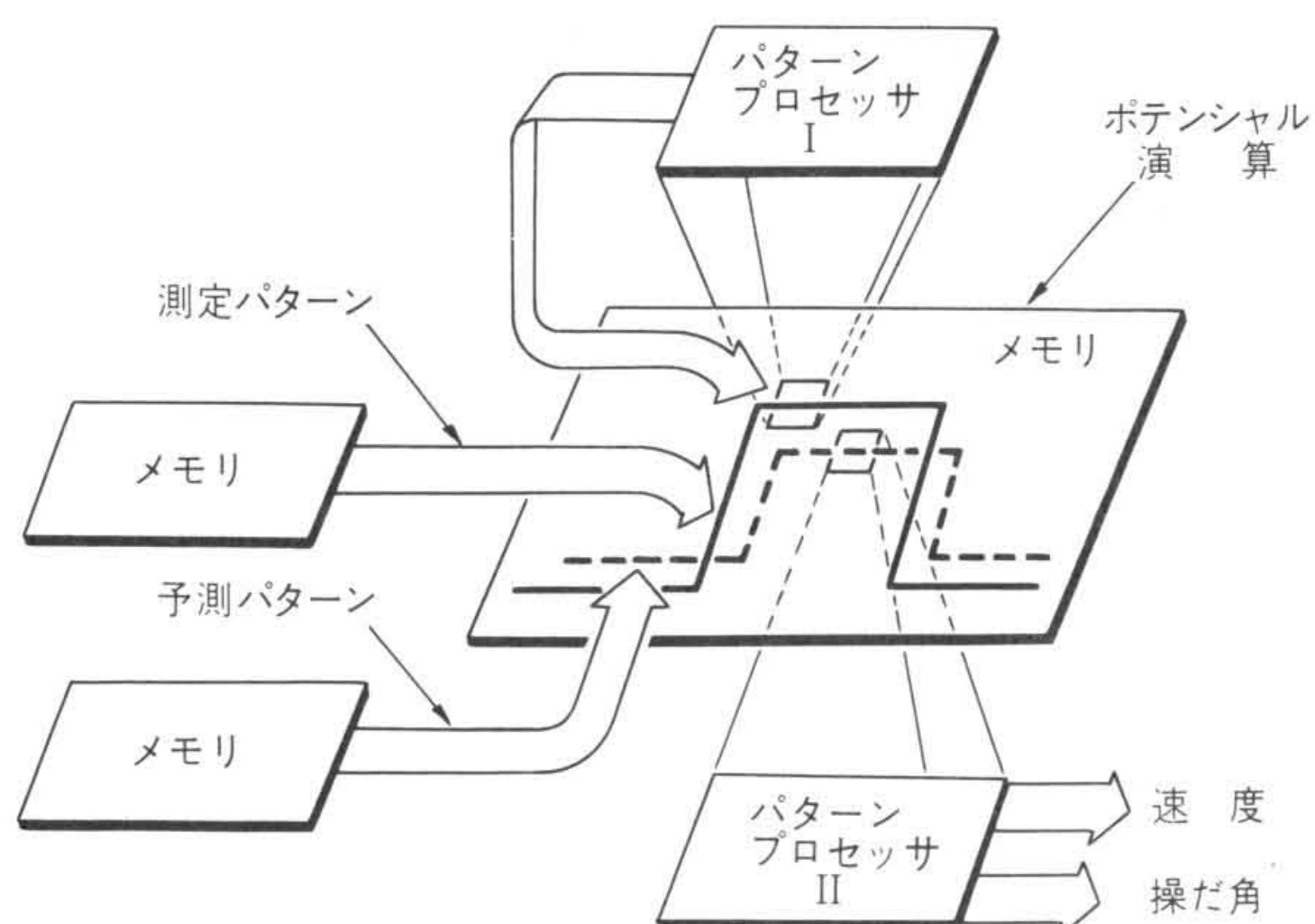


図5 動的パターンマッチングによる誘導 ポテンシャル演算を行なうメモリ上で、実線の測定パターンと破線の予測パターンを比較し、その差を小さくするようにロボットの操だ角と速度を制御する。

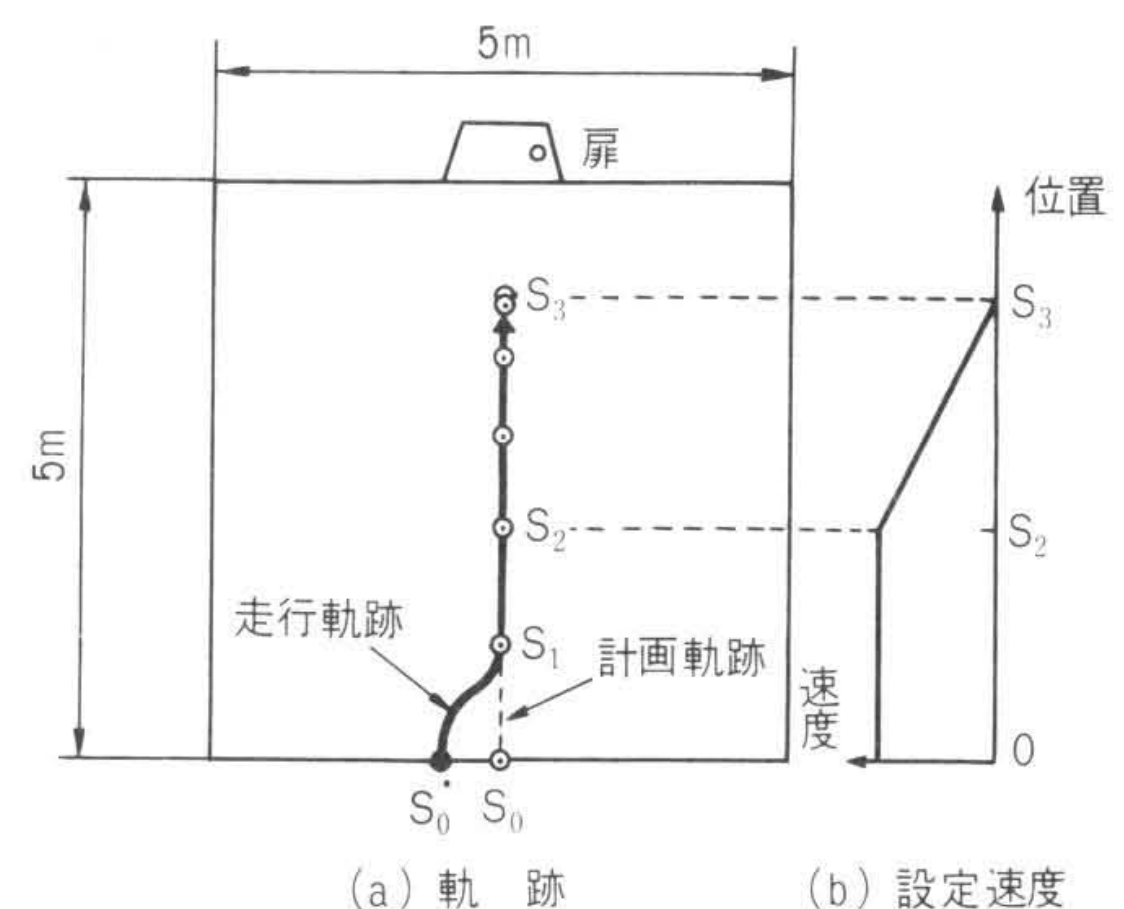


図6 視覚による誘導結果 大形コンピュータHITAC M-200Hによるシミュレーションの結果を示す。

位置にいないために視点がずれて生じたものとして、このずれを目標地点に向かって移動しながら逐次減少させるようにロボットの操だ角と速度の目標信号を修正する。同図では破線で示す予測パターンに対して実線で示す測定パターンは左にずれており、視点が右へ移動するようにロボットを誘導する。なおパターンの縦線成分は方向のずれ量の、横線成分は距離のずれ量の計算に用いる。

4.2 計算機シミュレーション

図6に示す5m四方の面積で、1面の壁に扉のある簡単な部屋を想定して、ロボットの誘導の計算機シミュレーションを行なった。その結果、次のことが分かった⁶⁾。

- (1) ロボットの操だ角と速度の指令信号は $\frac{1}{60}$ 秒で計算でき、ロボットは実用的な速度(2.5km/h)で移動できる。
- (2) 予測パターンの更新は間欠的(図6中◎印)に行なえば十分である。
- (3) 垂直方向及び水平方向のエッジをとらえるのに1秒必要であり、この間エッジを視野から外さなければ安定に誘導することができる。
- (4) システムを安定に動作させるために、目標地点への接近に従って減速する必要がある。

4.3 装置の構成

次に前節で述べた誘導を実現するための装置構成について説明する。画像入力用テレビジョンカメラには162度の画角をもつ魚眼レンズを用いた。魚眼レンズを使用すると広い視野で深い焦点深度の画像が得られるため、測定パターンを視野から外すことがなく、またロボット誘導情報の検出装置が小形・軽量になる。しかし、撮影画像は周辺部が圧縮されひずんだものとなる。これに対してレンズのひずみパターンを記憶したメモリを用い、ひずみ画像中から任意視点を中心とするひずみのない画像を切り出す方法を工夫した。

図7に開発した誘導システムのブロック線図を、図8に移

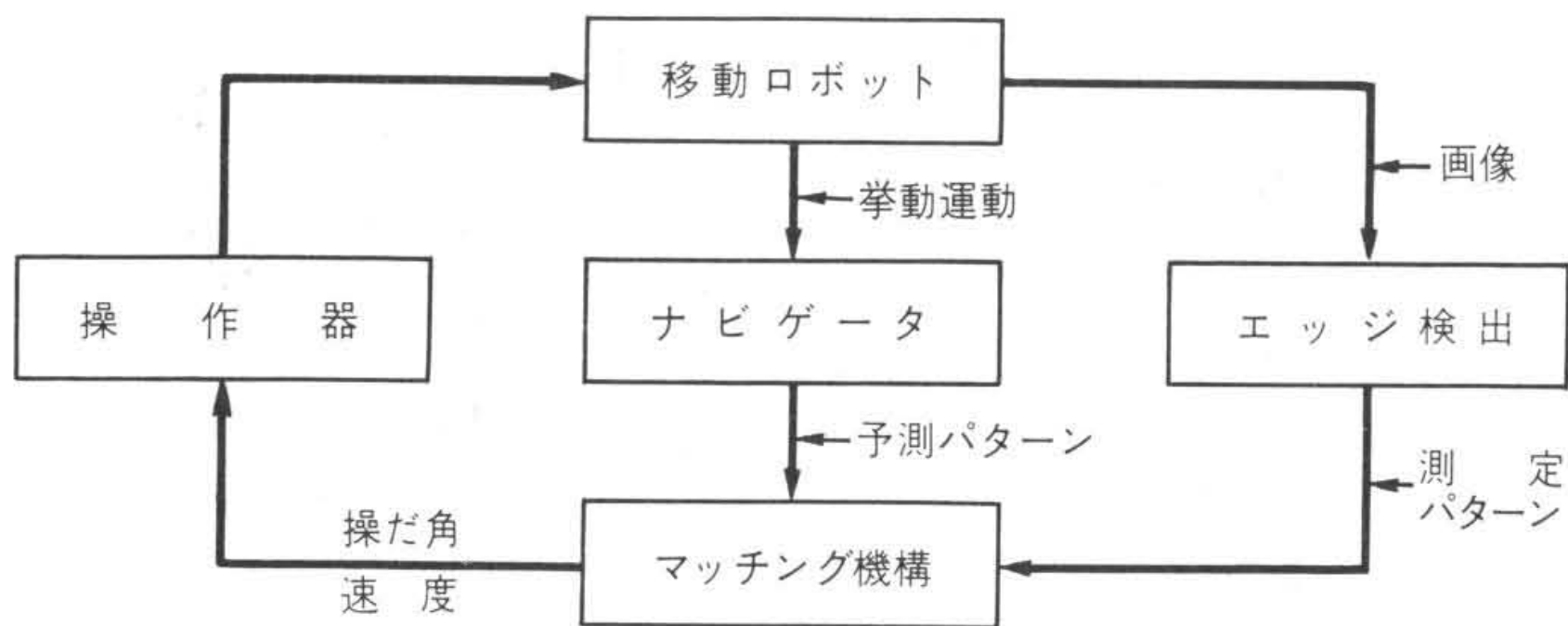


図7 移動ロボット誘導システム ロボットの移動結果で演算した予測パターンと、ロボットの目からの画像を処理した測定パターンのずれで移動ロボットを誘導する。

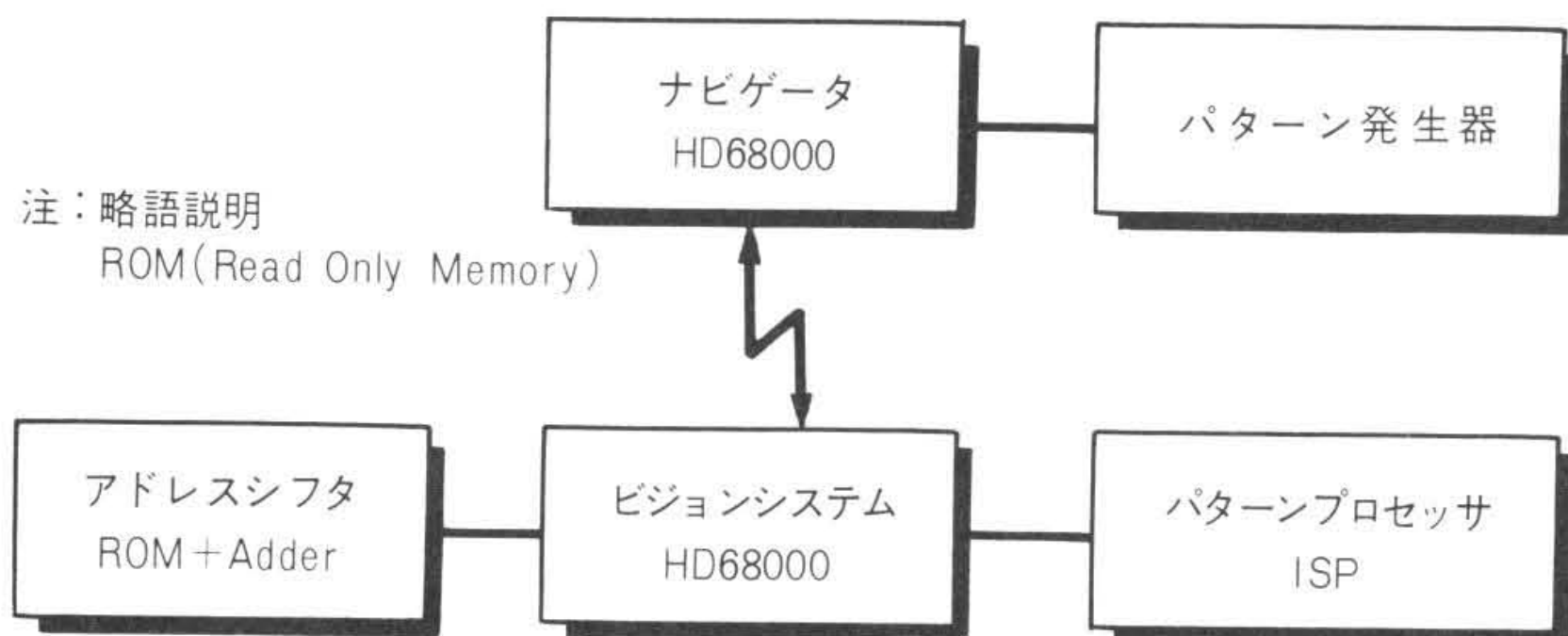


図8 動画像処理システム装置構成 移動しながら誘導信号を計算しているのは、予測パターン用と測定パターン用各々16ビットマイクロプロセッサHD68000である。

動しながら誘導信号を計算する動画像処理システムの装置構成を示す。装置は64kバイトのフレームメモリと画像処理LSI(ISP⁷⁾)を用いたパターンプロセッサで構成し、処理速度は1画面につき16msである。パターンの生成はワイヤフレーム構成ベクトルの透視-投影変換で行なっている。処理を高速化するため端点の計算だけをソフトウェアで行ない、描画は専用のLSIで実行している。

5 移動ロボットのトータルイメージ

対地適応能力の高い移動機構と環境を理解してロボットを誘導する技術の開発により、建屋内を実用的な速さで自律的

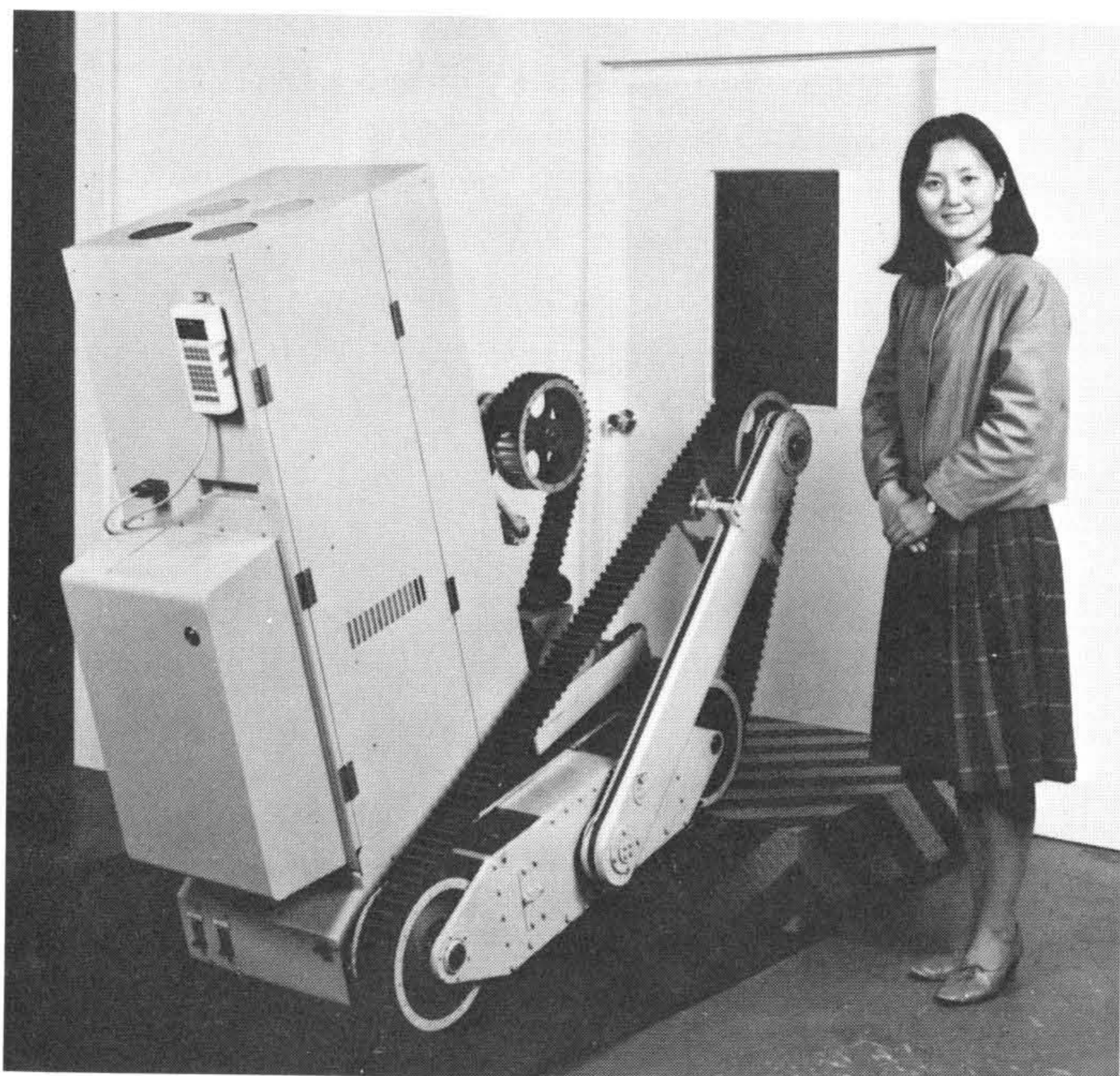


図9 移動ロボット 本論文で述べた二つの主要な技術を応用した移動ロボットの例である。

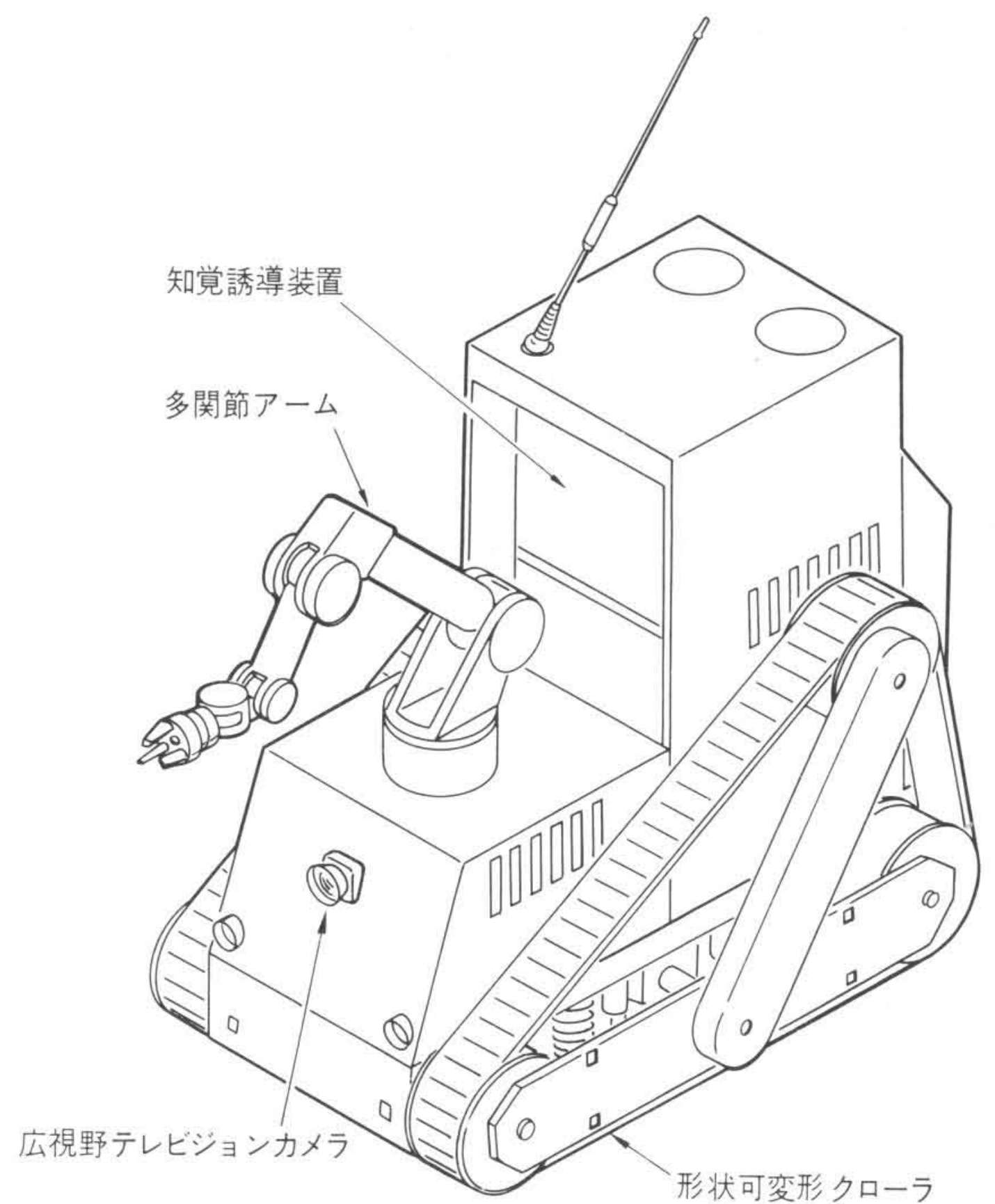


図10 移動ロボットの外観 本論文で述べた技術で知覚誘導される移動ロボットの上に、移動先の目的地で軽作業をすることが可能なマニピュレータを搭載したものである。

に移動する知能ロボットを実現する見通しを得た。図9にこの二つの主要な技術を応用したロボットの例を、図10に作業用マニピュレータを搭載した知能移動ロボットのトータルイメージを示す。図10に示したロボットは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して、人間がゆっくり歩く程度の速度を実現している。

6 結 言

建屋内で階段や障害物を回避したり、あるいは乗り越えて目的地まで自律的に移動する知能移動ロボットの主要技術である移動機構と知覚誘導技術を開発した。この技術は、原子力関連を中心にしたプラント内の機器などの点検ロボットに応用し威力を発揮するであろう。更に、今後需要の高まりが予想される第一次、第三次産業の様々な分野へのロボット導入にも応じられる知能移動ロボットにとっても必要の技術となろう。

参考文献

- 1) (社)日本産業用ロボット工業会：産業用ロボット長期需要予測報告書(1981-3)
- 2) (財)機械システム振興協会：社会資本維持補修型機械システムに関する調査研究報告書(1982-3)
- 3) G. W. Köbler : Manipulator Type Book, p. 570, Verlag Karl Thiernig, München(1981)
- 4) 岩本, 外：形状可変形クローラ走行車の機構と運動制御, 第1回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1~4(昭58-12)
- 5) K. Kamejima, et al. : A Pattern Kinematics Concept and Its Application to Mobile Robot Navigation, 6th SICE Symp. on DST, 87~90(1983)
- 6) 小川, 外：移動ロボット視覚誘導の一方法, 電子通信学会総会全国大会予稿集, 6-131(昭和59)
- 7) 福島, 外：画像処理LSI-ISPの開発, 情報処理学会第26回全国大会予稿集, 5B-2(1983)