

知能形床面移動ロボット

Intelligent Mobile Robots

原子力プラントでの遠隔作業装置などへの応用を目的として、目標地点を指示するだけで自動的に移動を完遂する移動ロボットのソフトウェアと移動機構を試作した。

ソフトウェアは準最短経路を求める経路探索の機能と、ロボットの動作を管理し目的地へ導く実行管理機能を備える。経路探索法にヒューリスティックスを取り入れたこと、情報量は少ないが距離検出の容易な超音波を「視覚」の機能に利用したことによって、実行時間を高速化した。

シミュレーションによる検討と試作移動機を用いた実験で、ほぼリアルタイムで経路プランが作成できること、未知の障害物の出現を衝突前に発見し、プランの改訂により合理的に回避できることを確かめた。

市川芳明* Yoshiaki Ichikawa

妹尾 誠* Makoto Senoo

1 緒 言

原子力プラントでの遠隔作業や工場、病院内での無人搬送など、様々な用途に移動ロボット導入の試みがある^{1),2)}。これらのロボットは、移動領域の情報(地図)と目的地を指示するだけで操作者の介助なしに自律的に移動することが望ましい。このため、一定位置で定められた手順の仕事をする従来のロボットに比べて技術的に難しく、実用化に至っていない。未知の物体などを含む複雑な環境下で目的を完遂するためには、高度なセンシングや判断の機能(人工知能)が求められる。特に現在地点から目標地点へ行くための経路を計画する経路プランナープログラムと、実際にロボットを動作させ目標地へ導く実行管理プログラムが不可欠である。

実行管理プログラムはリアルタイム(ロボットの動きに間に合う実行時間)で動作する必要があるが、単にロボットのサーボだけでなく、地図にない未知の物体の出現に対処できるように観測と判断の能力が求められる。周囲を観測する手段としてMoravec³⁾はテレビジョンカメラを使用して未知物体の回避を実現したが、現状では画像解析に十数分の時間を要するため前述のリアルタイム性を満足していない。そこで日立製作所は、従来水中でソナーとして用いられている超音波

に注目した。空中では、超音波を壁などの既知の物体との距離測定に使用した例⁴⁾は報告されているが、指向角が水中に比較して広がることや、反射の法則に従うために1回の観測では十分な数のエコーが得られないことなどの問題点があり、未知の物体の位置と形状の検出には使用されていなかった。これらの問題を解決するために、複数の視点から得たデータを蓄積する方法を考案した。すなわち、超音波のエコーを逐次地図に記載することでデータの蓄積を図り、最新の地図に基づく、現在地点からの最適経路に沿って移動と観測を繰り返すことで、合理的に複数の視点を得るというものである。

経路プランニングのプログラムは、このような繰り返し使用が可能なりアルタイム性を備え、また上記実行管理プログラムに適した地図の表現に基づいたものでなければならない。そこで地図の実用的な表現方法を工夫することと、知識工学で用いられているヒューリスティックス⁵⁾(Heuristics)の概念を応用することで、効率の良い経路プランナーを開発した。ここでは、上記ソフトウェアと、これを搭載する試作機、及び試作機を用いた実験結果について述べる。

2 人工知能の内容

2.1 環境モデル

経路プランや実行中のロボットの状態を表現するために、環境のモデルが必要である。これを2次元の地図として表わす。地図での障害物の表現法として、図1に示すような円と線分を用いる方法を考案した。円及び線分の半径、長さは任意である。円は単独に用いてよいが、線分は常に二つの円の中心間を連結するリンクとして使用する。この方法は障害物を外接する円として大略的に表現することも、複数の円を頂点とし線分を辺とした多角形で詳細に表現することもできる。円を頂点とした多角形表現には内部と外部を区別する情報が不要であり、線分だけを用いた表現法よりも処理が容易

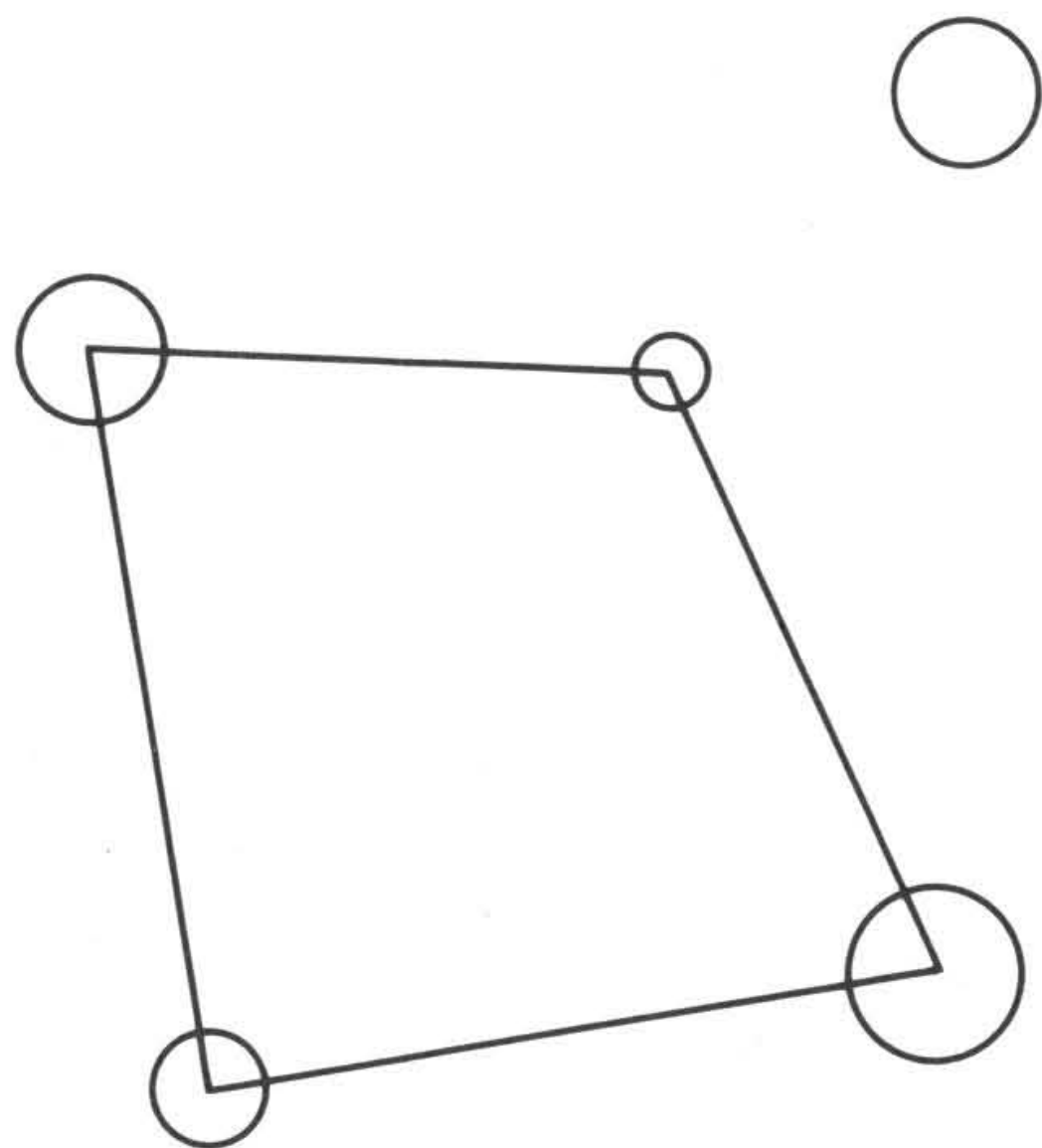


図1 地図の表現 障害物は、円及び線分を使用して2次元的に表現する。通常は多角形に近似した後に、頂点を小さな円で、辺を線分で表わす。

※1) ヒューリスティックス：常に成功するわけではないが、多くの場合に速く正しい解を見いだせる方法をいう。

* 日立製作所エネルギー研究所

である。障害物や通路の大きさに対して移動ロボットの大きさが無視できない場合には、あらかじめ障害物の周囲を拡大して地図を作成し、経路プランナーに与える。

2.2 経路プランナー

ここで前提とする移動ロボットは、回転半径がほぼゼロで方向転換ができるものとする。このようなロボット用の走行経路は、折れ線により構成することができるため、経路プランナーが簡略化される。

経路プランナーは、与えられた現在位置と目標位置に対して地図に基づいて経路を導出する。通常、経路は複数存在し得るので総延長の最も短いものを選択する。このような最適経路問題に対して従来用いられている解法は、地図を幾つかの部分領域に分割し、個々の領域中の代表点をノード(節)とするグラフを作成した後に、最適経路となるノードの連結を探索するものである⁵⁾。この方法は領域の分割を細かくしてノードの数を増やすに従って厳密解に近い解を見いだせるが、探索すべき組み合わせの数が指数的に増大して著しく処理速度が低下する。

地図の詳しい記述を許し、しかも探索時間を短縮するためには、不必要なノードの探索をできるだけ避け、効率良く正しい解に到達する方法を採らなければならない。いつでも効果を発揮する方法は存在しないが、通常の多くの場合に効果のある方法、すなわちヒューリスティックスを取り入れることにより、探索の平均的効率を上げることができる。

ノードの探索順序を定める基準と、個々のノードに引き続く子供ノードの数を制限するための基準に以下に述べるヒューリスティックスを導入した。図2の例を用いて説明する。同図上部には、円と線分で表現した障害物及び出発点I、目標地点Gが示してある。地点Iと地点Gを端点とし、障害物と交わらない折れ線状の経路を見いだす過程は、折れ点をノードと

する探索木により表現できる。この探索木を中央部に示した。初期ノードが地点Iに対応し、目標ノードが地点Gに対応する。探索の始めには初期ノードIしか存在しない。これを展開して子供ノードP1, P2, P3を見いだし、次にこれらの中の一つ、例えばP2を展開して新たなノードP4, P5を生成し、更に未展開ノードを展開し続け、目標ノードGが生成されるまで続けるのである。

以上の過程で重要な第1の点は、未展開ノードの中からどのノードを先に展開すべきかを定める方法である。このため各ノードにコストを対応させ、コスト最小のノードから展開する方法をとった。ノード k に対応するコスト $f(k)$ を次のように定めた。

$$f(k) = g(k) + h(k) + \alpha(k),$$

ここで $g(k)$ は初期地点からノード k に対応する地点に至る経路の総長、 $h(k)$ はノード k に対応する地点から目標地点への直線距離である。この2項の和だけをコストとし $\alpha(k)$ をゼロとした場合、 $h(k)$ はノード k から目標地点へ至るまでのコストの下限を与えるものとなり、最初に目標ノードに到達できた経路が最短経路となることが保証される⁶⁾。しかし、これらのコストだけでは速やかに目標ノードに到達できない場合があるため、次のような $\alpha(k)$ の項を付け加えた。ノード k がその親ノードの示す地点から更に1世代前のノードの示す地点へ引いた半直線上にあるとき、 $\alpha(k)$ を十分大きな正の値とし、他の場合はゼロとする。この項は逆戻りを繰り返して多くの無意味なノードを生成することを防止する効果がある。

第2の重要な問題点は、ノードを展開する際に解の最適性をあまり損なわずに子供ノードの数を制限しなければならないことである。ここで提案する方法は、あるノードを展開する際にまず目標地点の方向にある障害物を探し、最もノードの近くにある障害物の両側を回避する道を求め、これが更に他の障害物に妨げられれば、これらを回避する道を求めるという手順を繰り返し、最後に回避すべき障害物がなくなった時点で残った回避路を子供ノードとするものである。再び図2の例を用いて説明する。同図中央部の探索木は、初期ノードIが展開されて三つの子供ノードP1, P2, P3が見いだされたことを示しているが、この過程を同図下部に示したノード展開専用の探索木によって説明する。まず地点Iから地点Gへ引いた直線と交わる地点Iに最も近い障害物として、線分L1が見いだされる。線分は前述のように二つの円の中心を結ぶ役割を負っており、L1は両端の円C1, C2を引き出すインデックスとなる。この円C1, C2を初期ノードとしてノード展開の探索を進める。まず円C2の回避路として地点IからC2の両側に接線を引き、接線上で円C2の半径分だけ行き過ぎた地点を子供ノードの候補とする。この行き過ぎの距離は、子供ノードが円の内部又は周上にないように設けられたもので、円の半径であることに特別な意味はない。次に、このようにして求められた円C2の両側の候補点と地点Iを結ぶ線分が交わる障害物のうち、地点Iに最も近いものを探す。もし、なにも障害物がなければ候補点は真の子供ノードとなる。P1は真の子供ノードである。P1の反対側の接線上の候補点は再び線分L1と交わり、円C1, C2がノードC2の下に再び登録される。残った未展開の円ノードC1についても同様に接線を引き候補点を求めると、新たな障害物線分L2が見いだされ、L2の両側の円C3, C4がノードC1の下に登録される。円C3, C4についても同様な手順を実施すると、真の子供ノードP2, P3が得られ、未展開の円ノードはなくなる。このようにノード展開専用の探索は円の番号をノードと

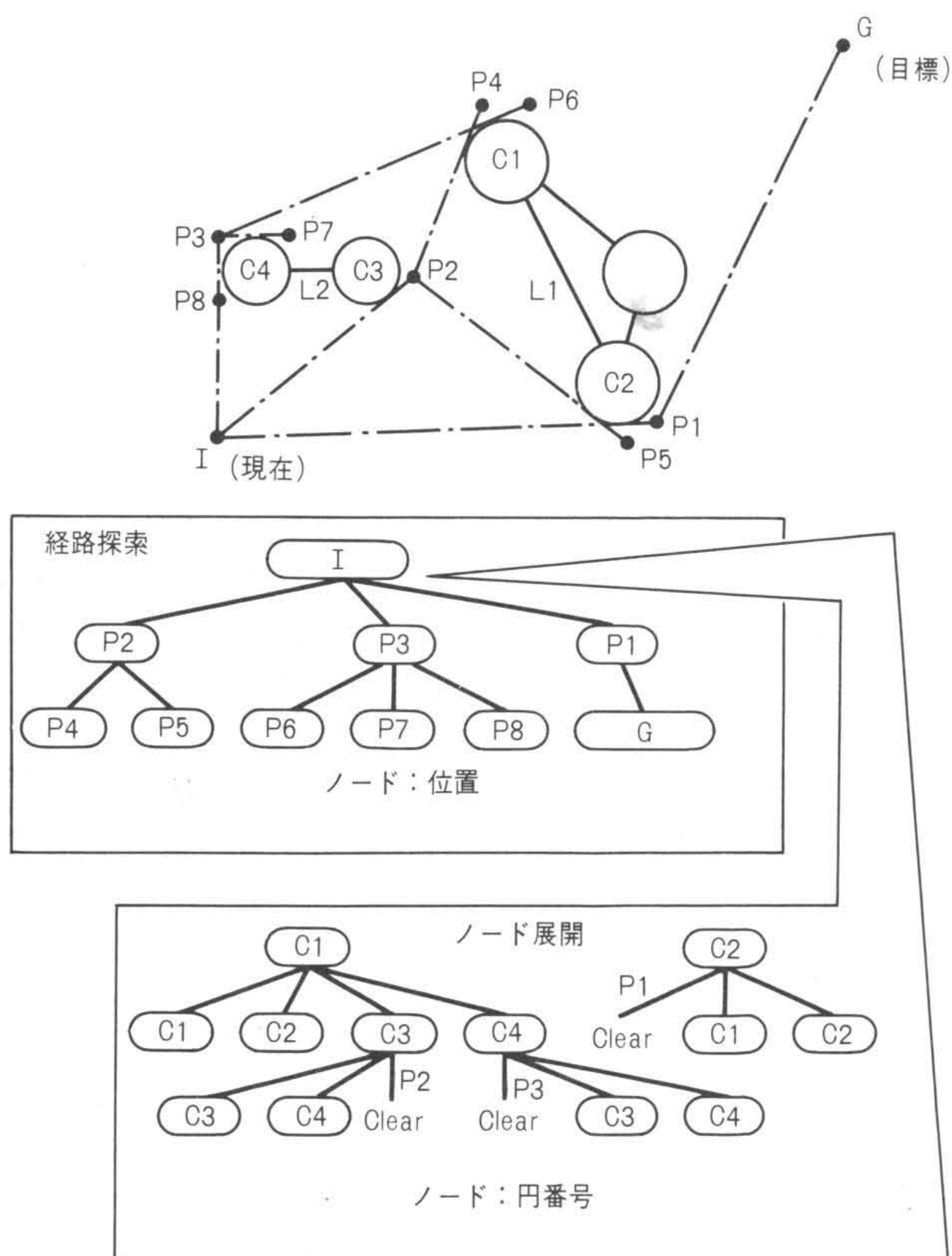


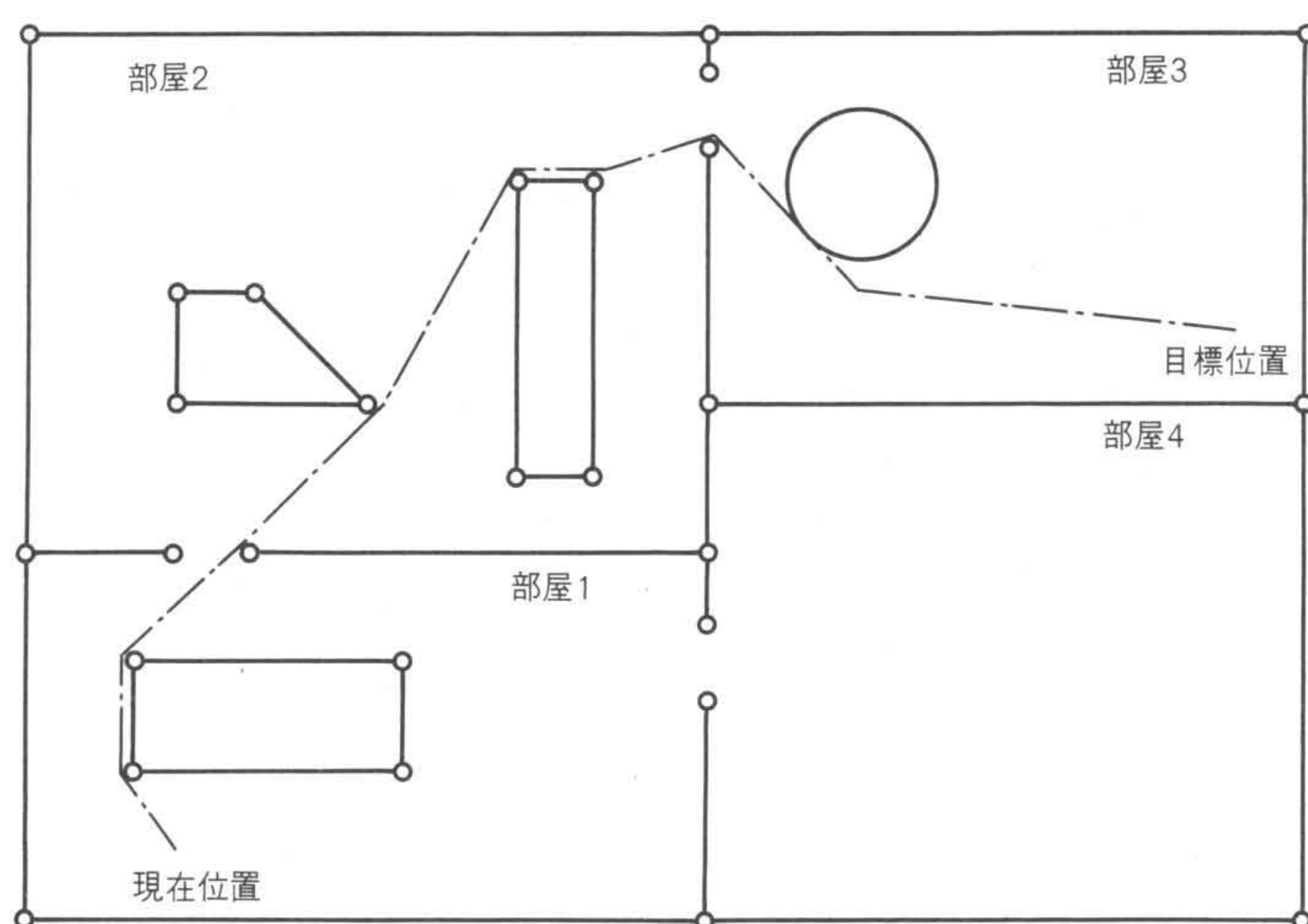
図2 経路探索法 上部の地図で、経路を探索した際の探索木を中央に、第1のノードIを展開する際のヒューリスティックなプロセスを下方に示す。

した木構造で表わされ、経路探索木の枝分かれの部分の各々に対応して構築される。この方法によれば地図の表現が複雑なものであっても、目標地点の方向に無関係な領域の探索が後回しになるため、無駄なノードの生成を抑制できる。

以上述べた経路プランナーは、ヒューリスティックなアルゴリズムを採用しているために、厳密な最短解を求めるものではない。そこで、様々な地図を与えて解の性質を調べたところ、実用上満足できる結果を得た。図3にその一例を示す。部屋4と部屋3を結ぶドアがないことで簡単な「迷路」を構成しており、前記ヒューリスティックが逆効果となる特殊な例であるが、一点鎖線の示すように最短経路に近いものが得られている。

2.3 実行管理プログラム

実行管理プログラムは図4に示すように下位に経路プランナー、移動制御プログラム、プラン修正プログラムをもつ。地図、初期位置、目標位置が人間からの命令によって与えられると、実行管理プログラムはまず経路プランを作成し、次に移動制御を開始する。移動中には、あらかじめ定めた一定距離(以下、安全距離と呼ぶ)進行するごとに停止し、超音波の距離計で周囲を観測する。検出したエコーが地図上に記載した障害物からきたものかどうかの確認を試み、未確認のエコーを見いだしたときにはプラン修正のプログラムを起動する。超音波の距離計は信号処理が簡便であるという長所があるが、傾斜面からの反射が得られないこと、ビームが広がるので方位誤差が大きいという欠点をもつために、位置も形状



注：一点鎖線(経路プラン)
円、実線(障害物)

図3 経路プランニング例 部屋とドアの配置を、円と線分を用いて表わした。一点鎖線で示される経路プランは最短解に近い。

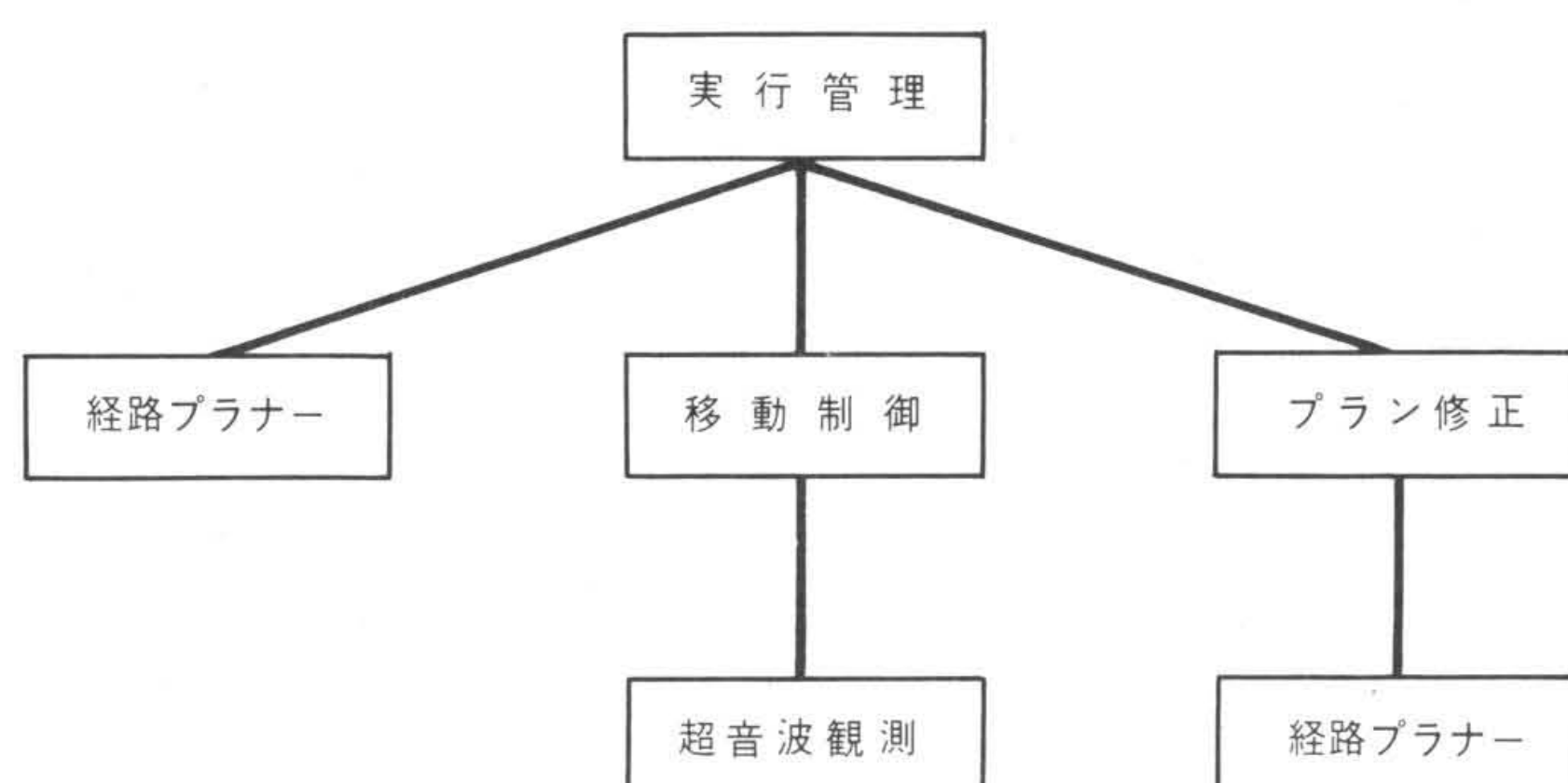


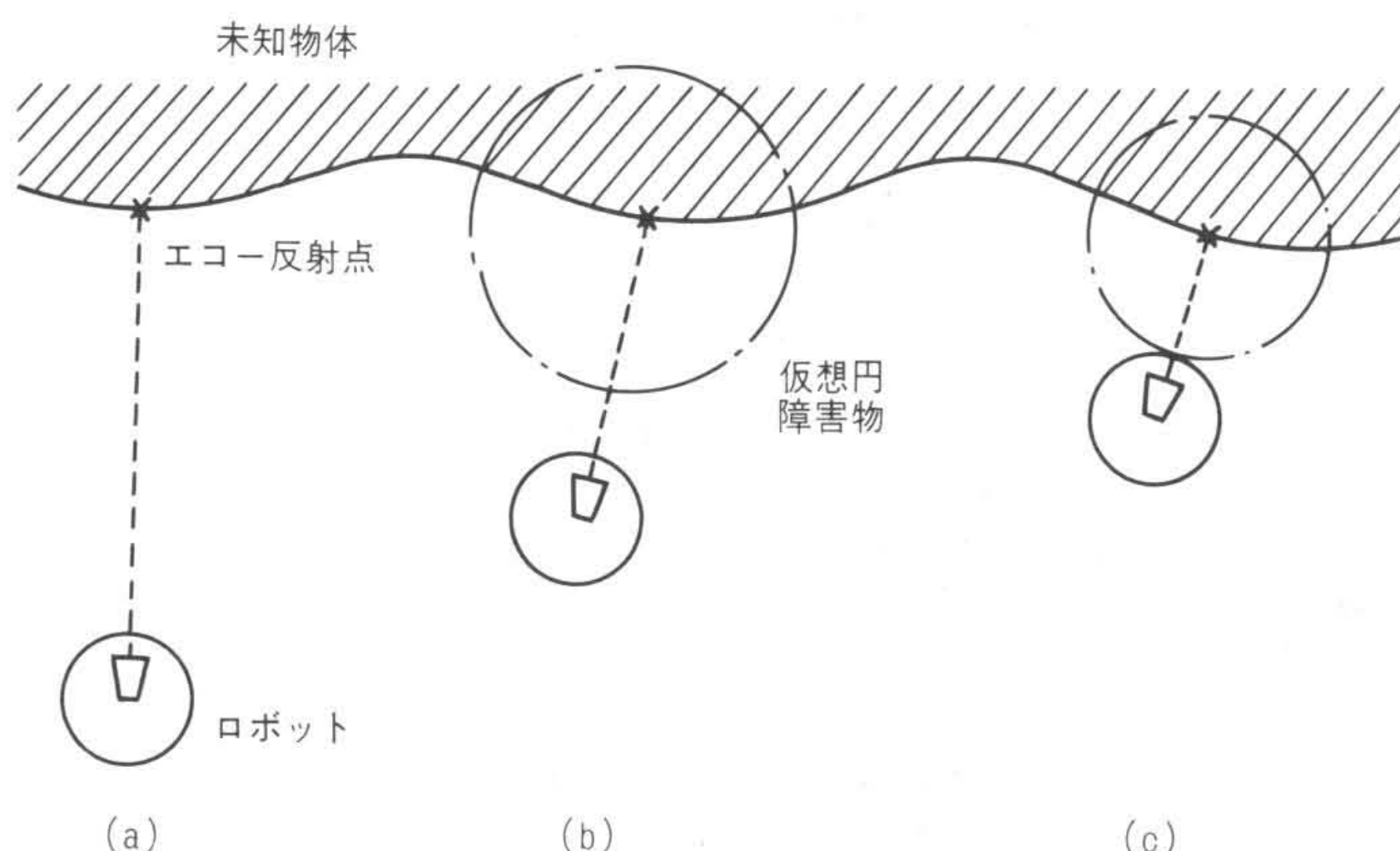
図4 実行機能の構成 プラン修正は、経路プランをやり直すことによって、新たな経路を生成する。

も全く未知な物体に対しては、従来あまり使用されていなかった。そこで日立製作所では、次のように工夫することによってこれらの欠点を補った。すなわち、プラン修正のプログラムは未確認エコーへの距離に応じて、図5に示すような3通りの反応をする。

- (1) エコー反射点への距離が安全距離の2倍より大きいときは、エコーを無視する。
- (2) エコー反射点への距離が安全距離の1倍から2倍の間ときは、エコー反射点を中心として、安全距離を半径とした円を地図に描き加えて、現在の位置からプランを作り直す。
- (3) エコー反射点への距離が安全距離よりも小さいときは、エコー反射点を中心とし、ロボットに接する円を地図に描き加えてプランを作り直す。

(1)は方位誤差が位置決め誤差を拡大することへの対策であり、ある程度信頼の置ける距離からのデータだけ使用するためのものである。(2)、(3)は傾斜面からの反射が得られないことへの対策である。1回の観測では、未知の物体表面のうち、ロボットに対して垂直に面している部分だけが音波を返す。そこで、複数の観測点からのデータを地図に蓄積することによって、徐々に未知障害物の輪郭が明らかになってゆくはずである。複数の観測点を得るためにロボットは移動しなければならないが、なるべく目標地点に近づくように移動することが合理的である。そのため、現在までに得られた限りのデータを用いて、目標地点への経路プランを立てて移動し、再び観測をするという戦略を採った。

このような方法によって未知障害物に関する必要な情報が採取できるかどうか、そして合理的な回避が可能かどうかを確認するために、超音波の反射特性やビームの広がりによる方位誤差を考慮したシミュレーションによって検討した。図6はその一例である。図3のプランに従って進行中に部屋2の内部で、破線で示した未知障害物からの反射を検出している。ロボットのもつ地図の中には、移動しながらの観測によってこれらの反射点(×印)を中心とした幾つもの円が描き加えられ、未知障害物の輪郭を形成している。図7は未知障害物の場所を変えた場合であり、回避する方向も図6とは異なるが、いずれも合理的な滑らかな回避であると言える。図7の回避路を更に妨げるように新たな障害物を配置した場合を図8に示す。この場合、既知障害物の裏に隠れた物体の存在をはじめから知ることはできないので、途中までは図7の移



注：(a) 遠距離(何もしない)
(b) 中距離(一定半径の円障害物を仮想)
(c) 近距離(ロボットに接する円障害物を仮想)

図5 未確認エコーへの対処 超音波距離計のビーム幅による誤差を考慮し、検出した距離に応じて図注記(a)、(b)、(c)のように3通りの対応をする。

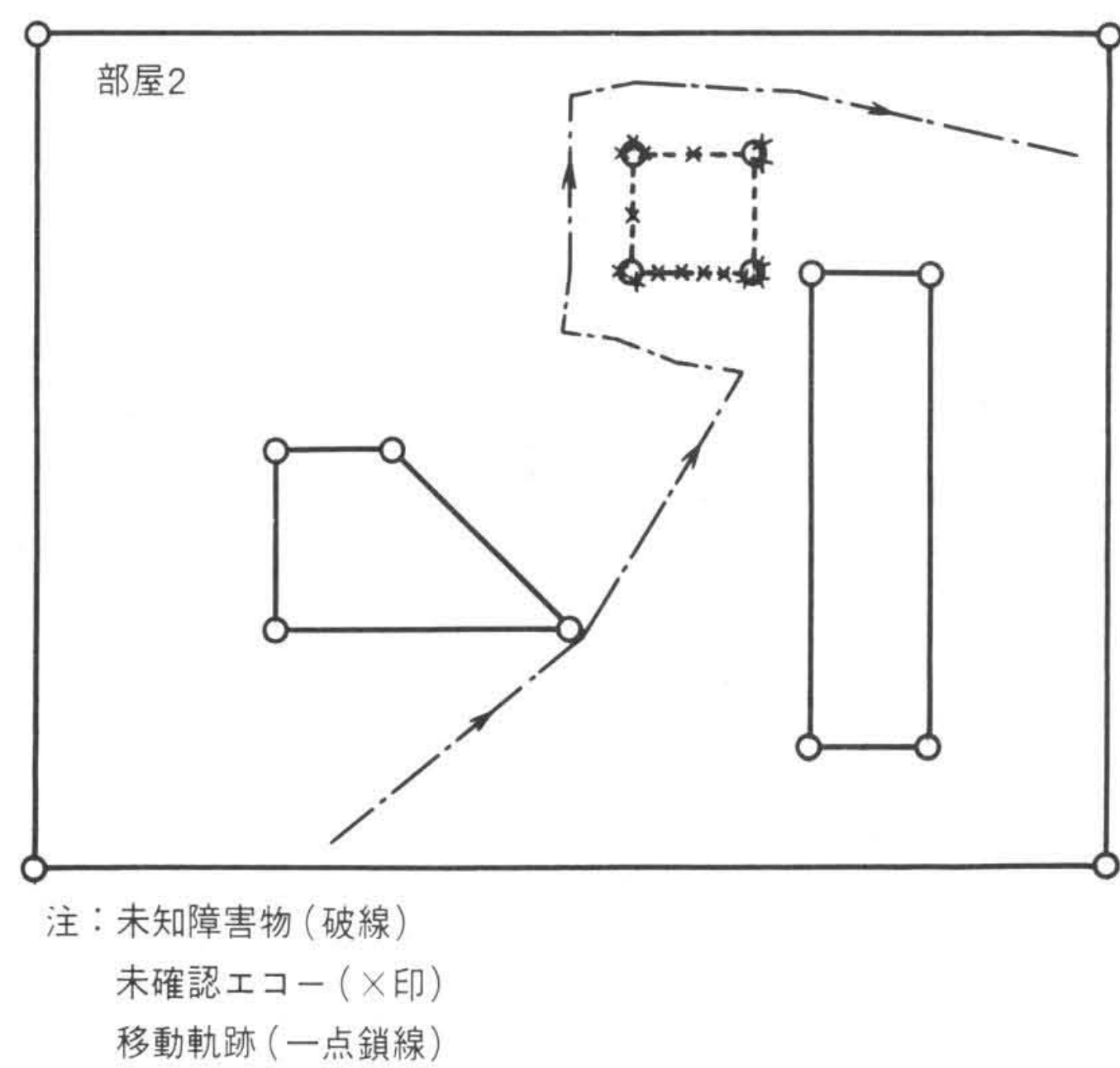


図6 未知障害物回避シミュレーション(1) 超音波エコーの検出される面が限定されるため、1回の観測で未知障害物の全容はとらえられない。移動と観測の繰り返しによって、必要な情報を得て回避を可能とする。

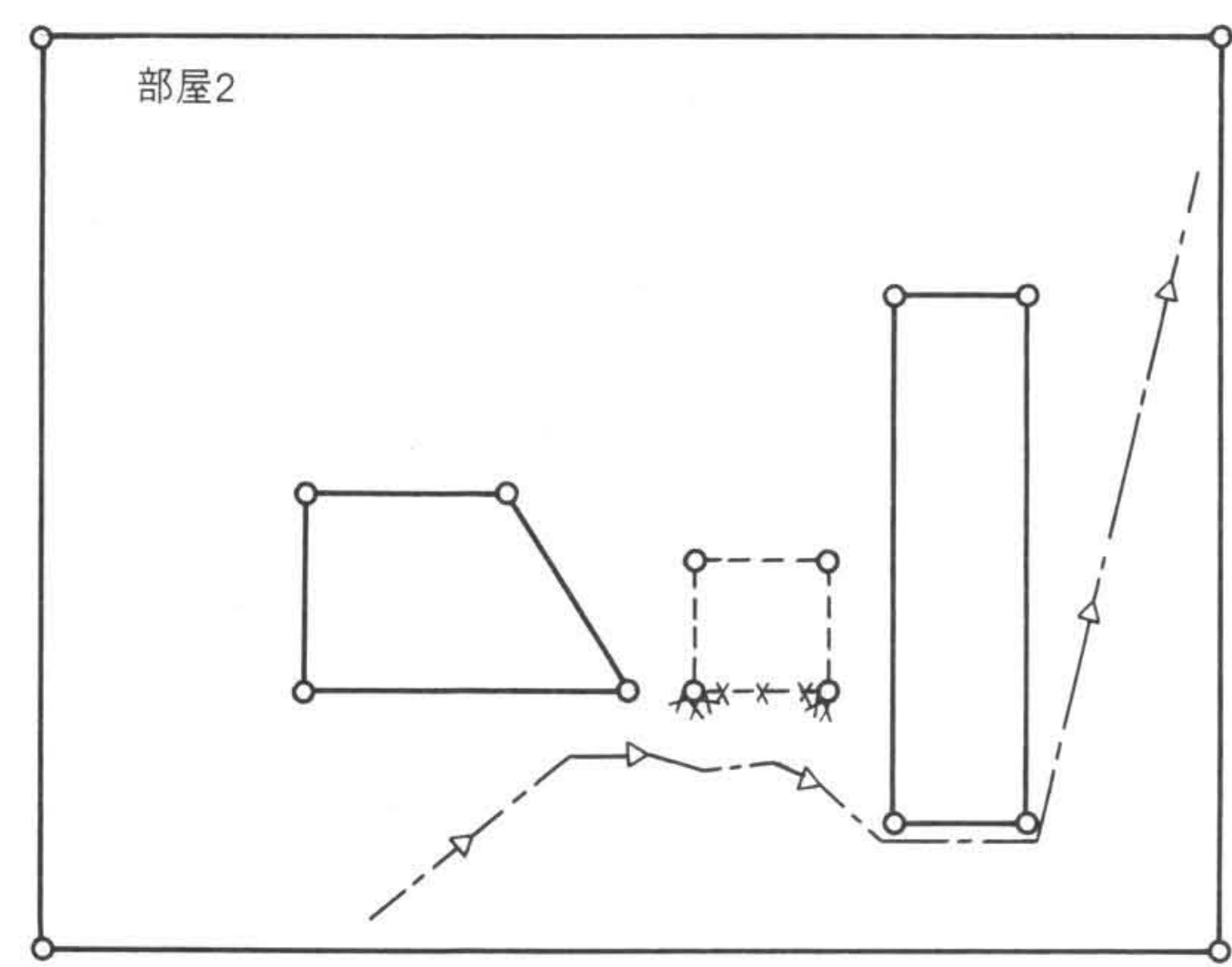


図7 未知障害物回避シミュレーション(2) 図6と同じ未知障害物の位置を変えてみた。回避の軌跡も合理的に変化している。

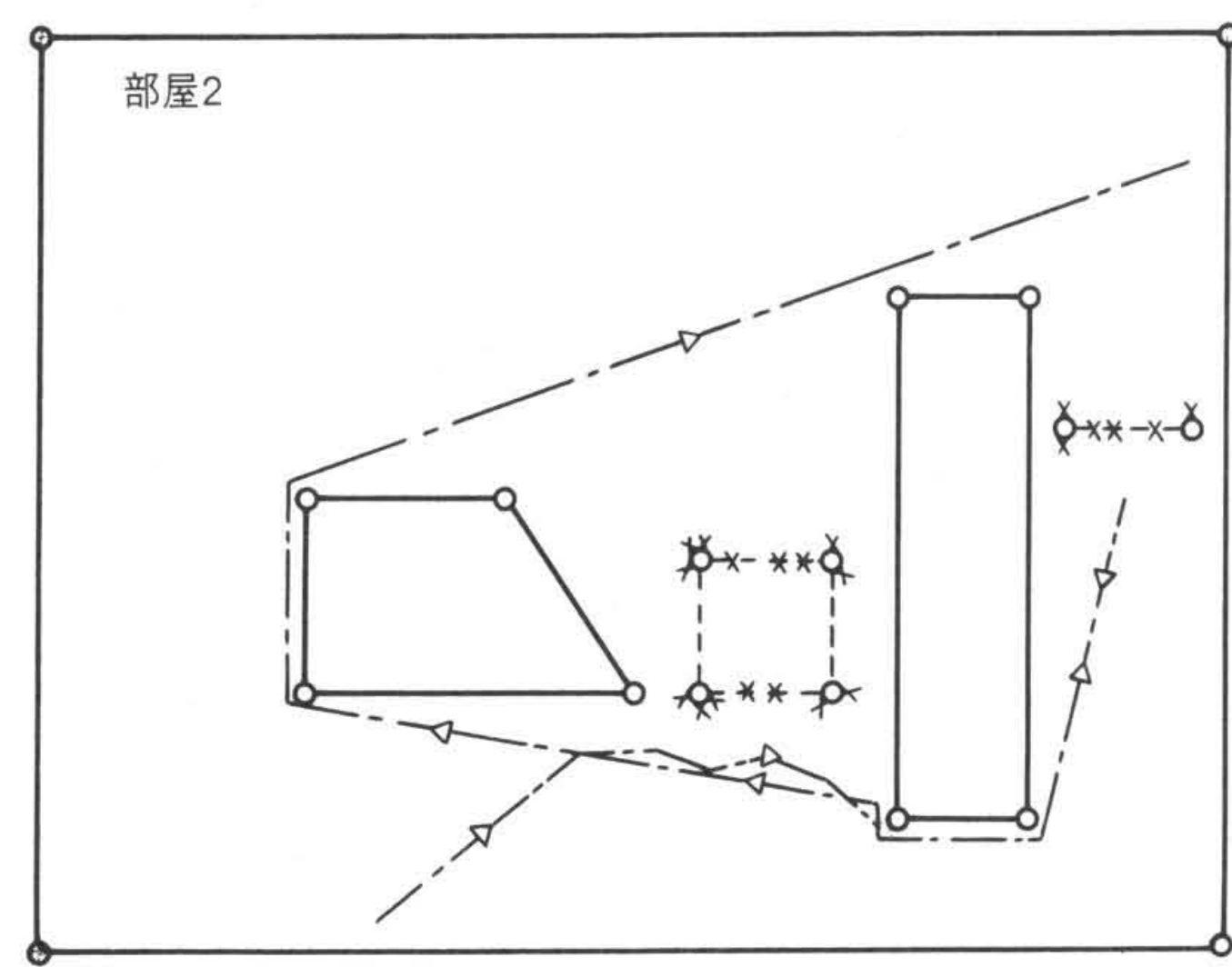


図8 未知障害物回避シミュレーション(3) 図7の未知障害物に加えて、既知障害物の裏に新たな未知障害物を置いた。十分にデータが蓄積された後は、合理的な経路が採られている。

動軌跡と同一である。それ以上先に進めないことを知った後の軌跡は、既に蓄積された情報を用いているために合理的である*2)。

*2) 最終的な移動軌跡は逆戻りをしているが、移動中に作られた個々の経路プランには逆戻りする部分はない。

3 移動機能の構成と制御

試作した移動機構(図9)は、これまでに述べた人工知能を搭載するに適したセンサと制御系を備える。移動に携わる自由度は5本の脚の各々について3自由度あり、車輪回転、ステアリング、脚の伸縮(車輪上下)の動きをする。脚伸縮は能動的なサスペンションや階段の昇降などに使い、他の二つは通常の走行に使用する。五つの車輪を同時に操だすることにより全方向移動が可能である。制御系の構成を図10に示す。共通バスを介して結ばれているSBC(シングルボードコンピュータ)は、脚の制御用に2台、実行管理用、経路プランナー用に各々1台割り当てられている。実行管理用SBCにはディスプレイが接続されていて、経路プランや実行状態、すなわちロボットの思考内容のモニタリングができる。

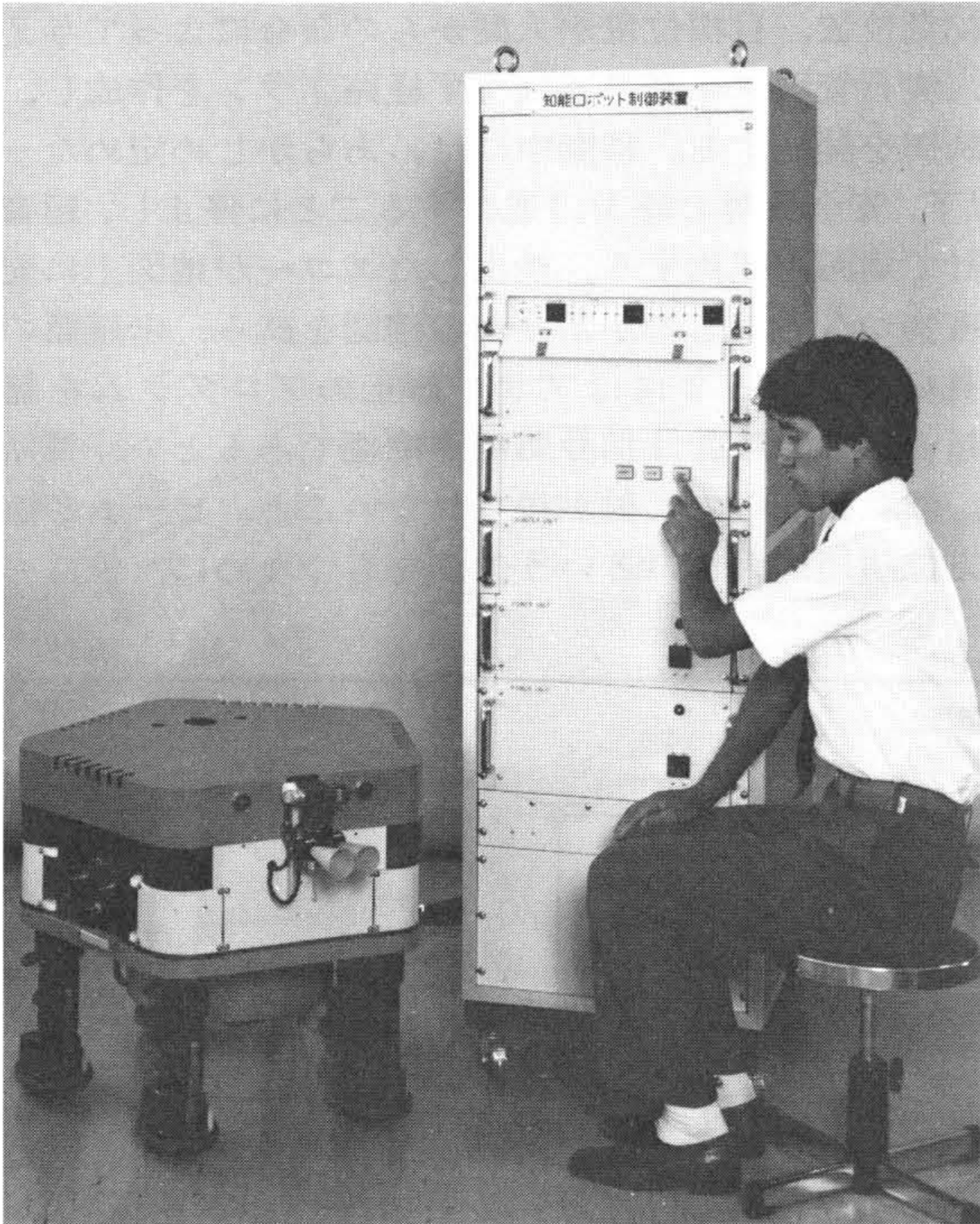


図9 試作移動機構 試作機の寸法は最小幅710mm、高さ500mmであり、重量は60kgである。

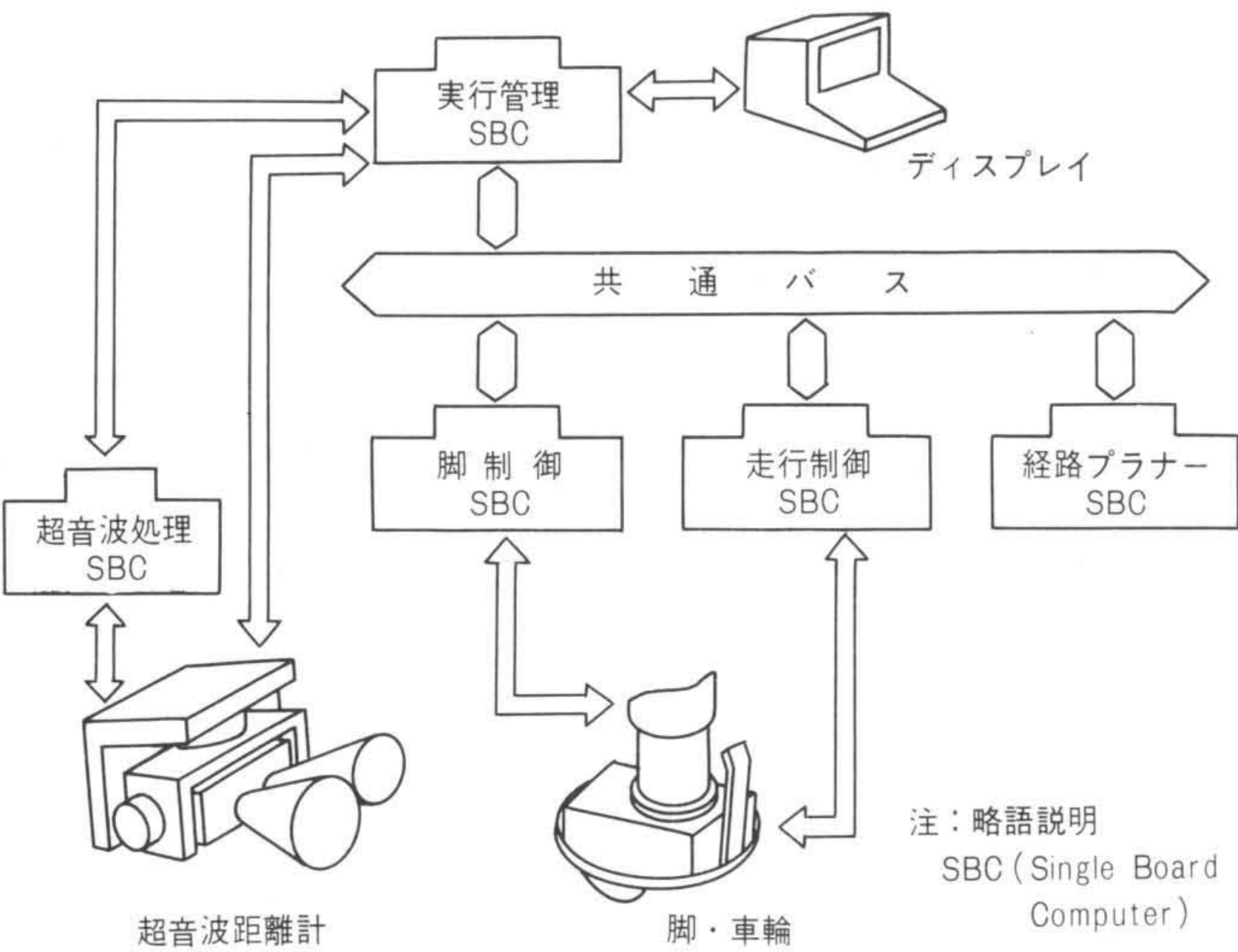


図10 制御系構成図 共通バスで接続された4台の16ビットSBCがシステムの中核である。直流電動機はすべてソフトウェアサーボされる。経路プランナー、実行管理には各々専用ボードを割り当てた。

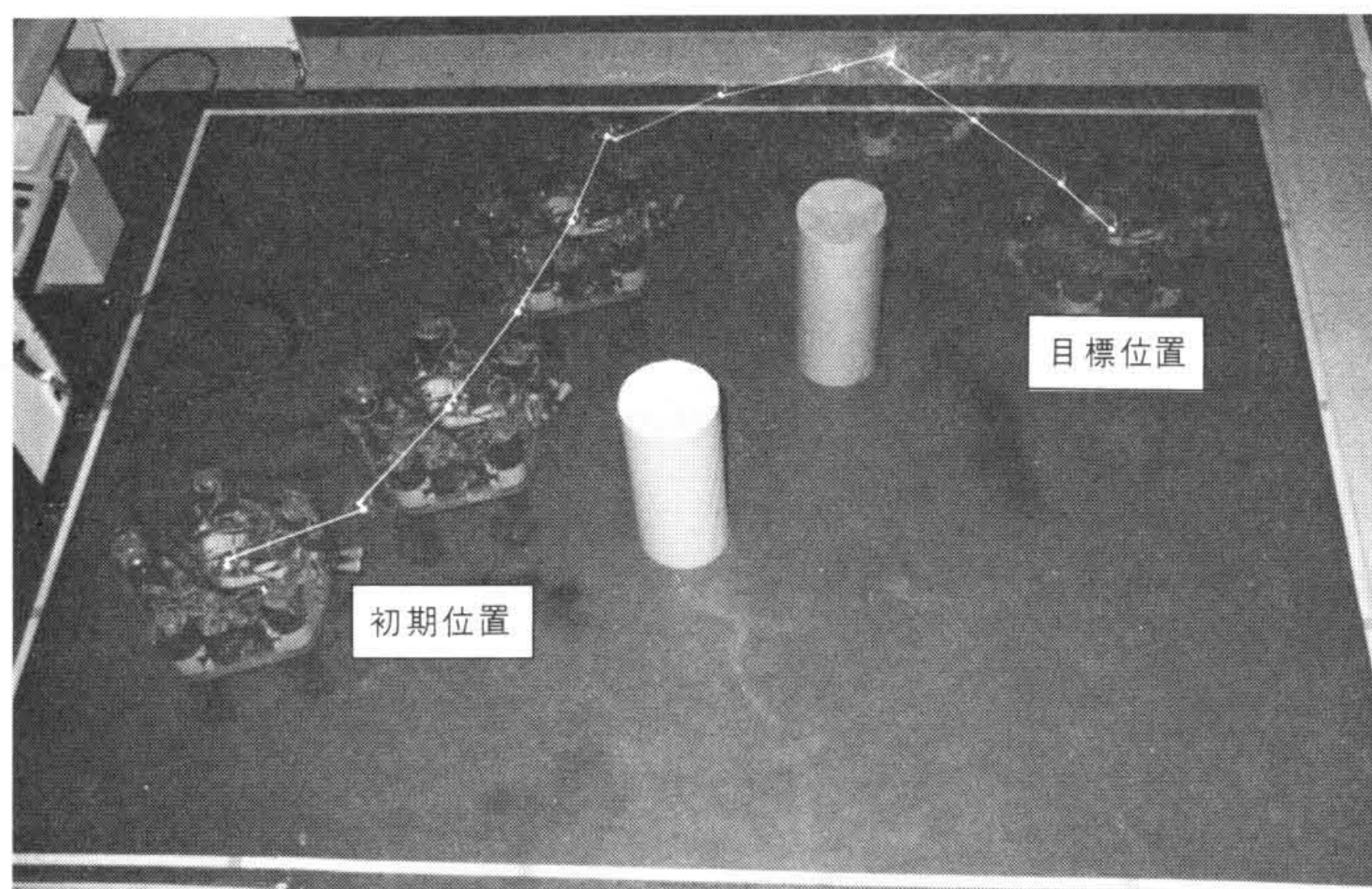


図11 移動軌跡 ロボットは左下から右上へ走行した。中央の二つの円筒の存在は教示していない(移動距離5m, 移動時間100秒)。

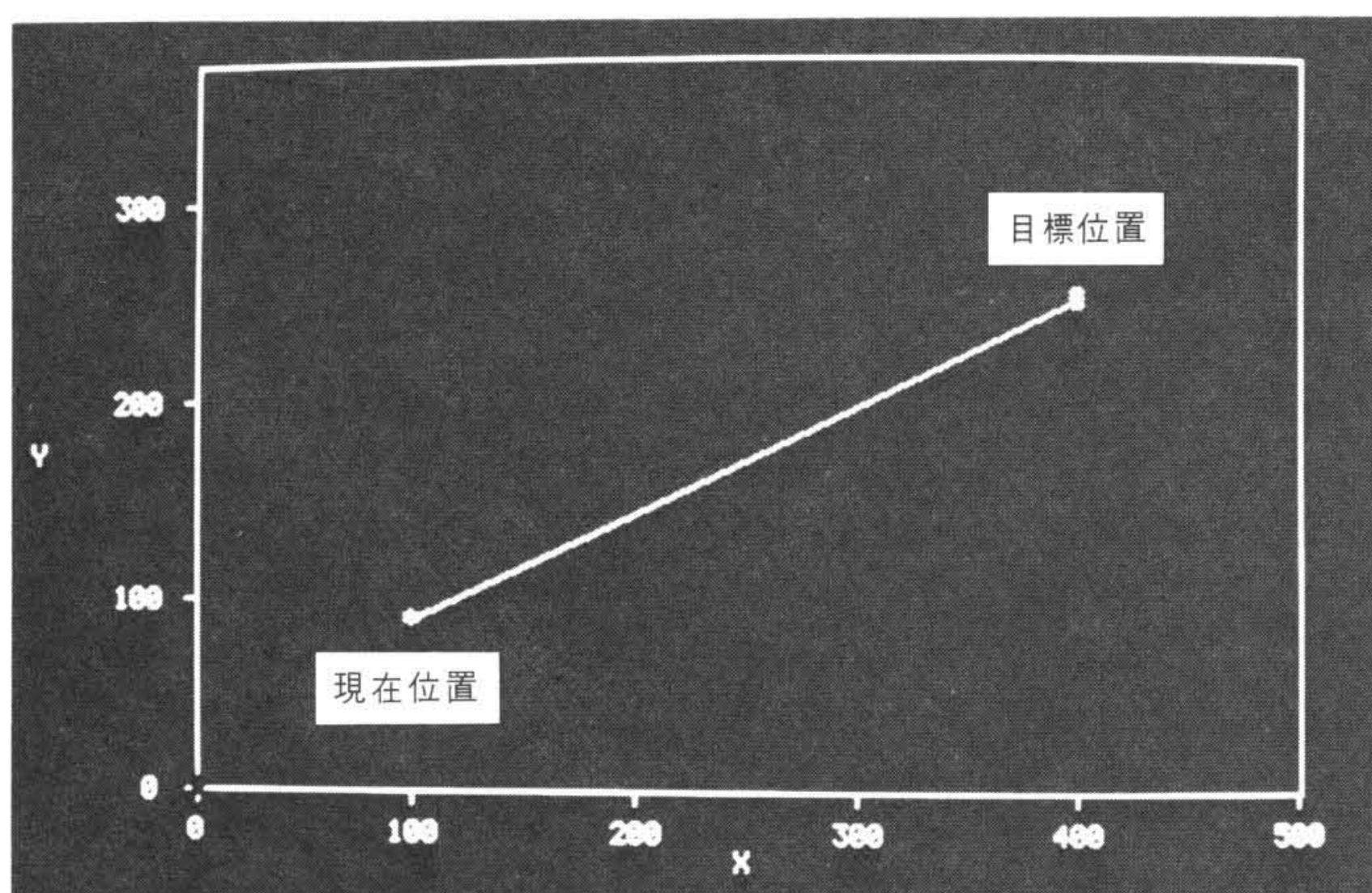


図12 ディスプレイ画面(1) 移動開始時の経路プランを示す(左下がロボットの現在位置, 右上が目標位置)。

超音波の距離計は、水平方向に旋回駆動が可能であり、超音波の発信部、受信部には円すいホーンを取り付け、指向角(半値幅)を ± 10 度程度に絞った。距離の分解能は1cmとした。

4 移動実験

既知の障害物について回避経路を生成する機能は、経路プランナー単独の機能として確認済みであるため、未知の障害物を回避させる実験を行なった。安全距離は60cmとし、ロボットは安全距離だけ進行したときや経路プランの折れ点にきたときに停止し、超音波距離計による10度おきに ± 90 度の測定をする。現在位置は車輪の回転角を積算して求める。

二つの円筒状未知物体を回避した際の移動軌跡を図11に示す。最初に立てた経路プランは図12に示すように、現在位置から目標位置に至る直線である。この直線に沿って進行し周囲を観測すると、第1の物体からのエコーを見だし、図13に示すようにプランを変更した。更に前進した後、第2の物体からのエコーを検出し、図14に示すように再び経路プランを変えた。図13, 14の左下の現在位置が、各々のプランを作成した時点でのロボットの位置を示す。この後、未確認のエコーの数は増加し、それらを検出するごとにプランにわずかな変更が加えられた。走行距離は約5m, 移動に要した時間は100秒, このうち経路プラン作成時間は1回当たり平均4秒であった。未確認エコーの数(最終的には30に達した。)だけ地図中の障害物が増加するために、エコーの数が増えると経路プランニングに要する時間が長くなった。未確認エコーを整理

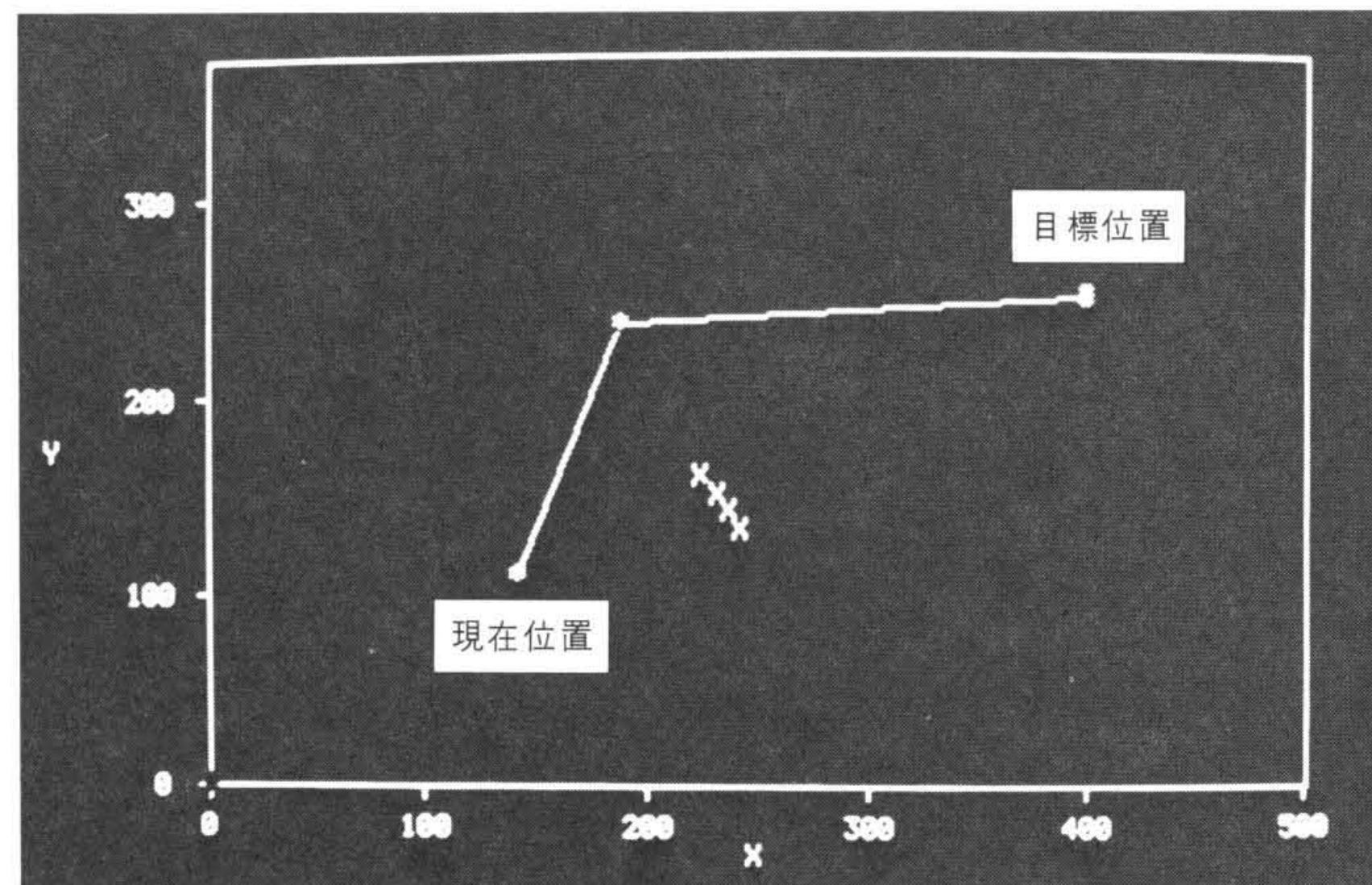


図13 ディスプレイ画面(2) 第1の物体からのエコー(x印)を検出し、作り直した経路プランを示す。

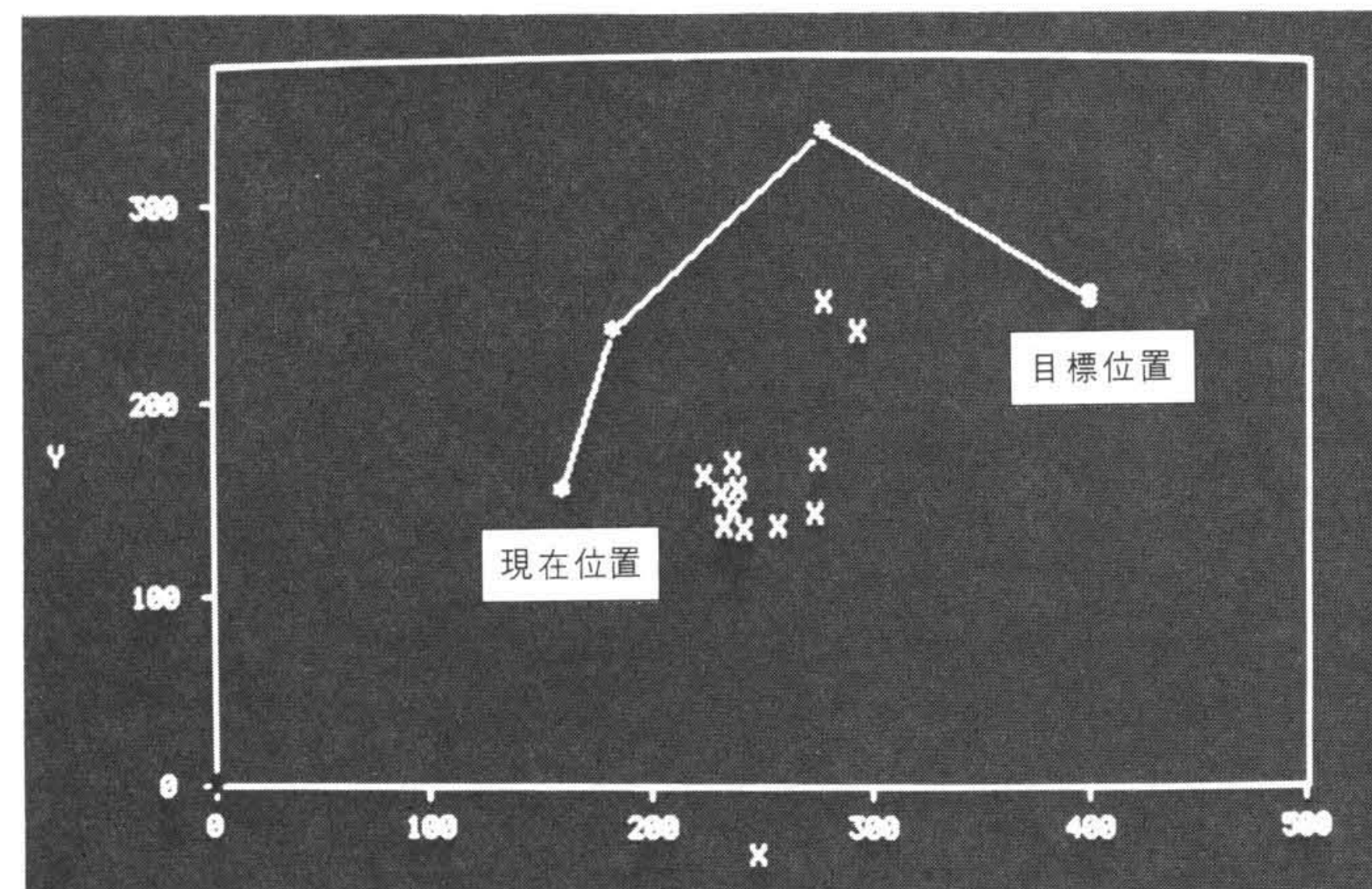


図14 ディスプレイ画面(3) 第2の物体からのエコーを検出し、作り直した経路プランを示す。

して地図を簡略化することは今後の課題である。

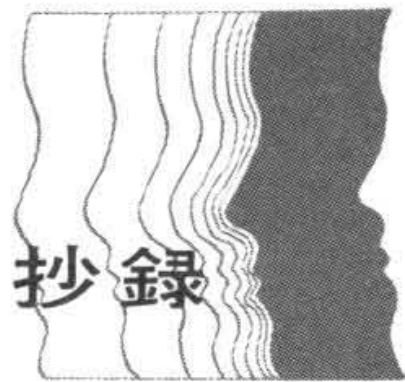
5 結 言

移動ロボット用人工知能として、準最短経路を効率良く探索できる経路プランナーと、超音波の距離計を使って周囲を観測しながらロボットを目的地まで自律的に導く実行機能ソフトウェアを開発した。

シミュレーションによる検討と試作移動機を用いた実験で、ほぼリアルタイムで経路プランが作成できること、未知の障害物を検出しプランの改訂によって合理的に回避できることを確かめた。未確認エコーを整理し、地図への記載を簡略化して処理時間を早めることは今後の課題である。

参考文献

- 1) Y. Ichikawa, et al.: A Hybrid Locomotion Vehicle for Nuclear Power Plants, IEEE Trans. SMC-13, 1089~1093 (1983)
- 2) 中野: 福祉用ロボット, 電子通信学会誌, 65, 443~449(1982-4)
- 3) H. P. Moravec: Rover Visual Obstacle Avoidance, Proc. of 7th IJCAI, 785~790(1981)
- 4) 久保寺, 外: 自立ロボットのための超音波視覚モジュール, 第1回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 63~66(1983)
- 5) 柿倉, 外: 知能ロボットの記憶構成とそのルート探索への適用, 計測自動制御学会論文集, 9, 45~50(1973-1)
- 6) N. J. Nilsson: Principles of Artificial Intelligence, Tioga (1980)



単板カラー固体撮像素子用色フィルタ

日立製作所 笹野 晃・中野寿夫・他 6 名

テレビジョン学会誌 37—7, 553—558 (昭58-7)

固体撮像素子をカラー化するためには、色フィルタアレイと組み合わせることが必要である。その組合せ方として、ガラス板上に製作した色フィルタを接着剤で固体撮像素子に接着する方法と、固体撮像素子を形成したSiウェーハ上に直接色フィルタパターンを形成する方法が考えられる。前者については、単管カラーカメラ用撮像管に使われる色フィルタ技術がそのまま使用できるという利点はあるが、接着時の位置合せ精度に問題があることに加え、量産性に適さないという欠点がある。一方、後者は、色フィルタアレイを固体撮像素子上で形成するプロセス技術の開発が必要となるが、前記のような欠点がなく、特性面及び生産性の面で優れている。

色フィルタ材料として有機材料を使用することとし、染色層として重クロム酸ゼラチンを選んだ。これを染色液で染色して色フィルタパターンとした。各色を分離する

中間層としてPGMA(ポリグリシジルメタクリレート)を選んだ。中間層は色フィルタプロセス終了時にボンディングパッド部などから除去する必要があるが、PGMAは遠紫外線に対して感度があり、露光現像によりパターン化が可能である。これら二つの材料の選択により、色フィルタプロセス全体を通して通常のホトレジストは一切不用となり、工程が単純となった。

色フィルタの種類としては、RGBの三原色を使うものとCy, Yeなどの補色を使うものがあるが、ここでは、光利用率の高い補色形を選び、Cy, Ye, G, Wの4色を組み合わせたパターンとした。まず、Cyフィルタパターンを作製し、その上にYeフィルタパターンを形成した。GはCyとYeの積層部で形成した。

完成した色フィルタの分光透過率はSi基板が可視光線を透過しないため、通常の顕微分光光度計では測定できない。そこで、

反射スペクトルから分光透過率を求めた。その結果は、完成した素子を破壊して色フィルタをはく離し、顕微分光光度計で測定したデータと一致した。

完成した素子の分光感度特性と、色フィルタの分光透過率とSiホトダイオードの分光感度特性の積との間には、最大10%程度の差があり、両者は一致しなかった。この原因は色フィルタ表面の凹凸によって、入射光線が屈折するためであり、色フィルタが凸になっている部分では、本来入射しないはずの光線が集光されて入射し、色フィルタが凹になっている部分では、本来入射するはずの光線が発散して入射しなくなるためであることが判明した。試作した色フィルタではGがCyとYeの積層となっているため、凸レンズ状となり、約10%感度が上昇している。

試作したカラー固体撮像素子を使用したカメラの色一様性は極めて良好であった。

補間画素配置を用いた高解像度MOS形撮像素子

日立製作所 高橋健二・竹本一八男・他 4 名

テレビジョン学会誌 37—10, 812—818 (昭58-10)

固体撮像素子を使用した家庭用ビデオカメラが市販され始め、いよいよ固体撮像素子も実用化の段階に入ったと言えよう。現在、ほとんどの撮像素子が $\frac{2}{3}$ inサイズの受光面積をもち、画素数は水平390×垂直490程度が一般的である。垂直画素数は標準方式(走査線525本)の走査線数で決まるため、現状の値で十分である。しかし、水平方向は画素数が390程度ではアスペクトレシオを考慮すると解像度が280TV本ほどとなり、垂直方向の350～400TV本に比べ不十分である。固体撮像素子は撮像管と違い受光部は独立した画素で構成されており、画素の空間的配置によって2次元的な解像度特性が変化する。更に今回のMOS形撮像素子のように、複数の走査線を同時に読み出すことが可能な素子では、信号の読み出し方式によっても解像度は異なる。

筆者らはこの固体撮像素子特有の条件を

考慮し、水平方向の解像度改善策として画素配置方法とインタレース方式の組合せに着目した。この方法は特に高度な素子製造プロセス技術の開発を必要とせず、現状の技術範囲で対応できる特長をもっている。解像度特性の検討にはサーキュラゾンプレートチャートを用い、空間サンプリング点を図式的に求め、効率の良い組合せを選出した。本論文では、画素配置として画素をます目状に配する通常の整列配置、1走査線ごとに画素の位置を水平方向に半ピッチずらした補間配置を取り上げ、これに組み合わせるインタレース方式は通常のインタレースと2行同時読み出しインタレースとした。

また、実質的な解像度を決定する要因として、インタレース走査によって起こるフィールド周期のモアレ(フィールドフリッカ)を考慮しなければならない。フィールドフ

リッカを考慮すると、最も優れている組合せは補間配置と2行同時読み出しインタレースである。この組合せの場合、水平の限界解像度は整列配置(限界280TV本)と同一の画素数のままで約2倍の500TV本以上が得られる。その他の組合せではフィールドフリッカなどが原因し、実質的な解像度が低く抑えられてしまう。本稿では組合せによるフィールドフリッカ(2次元的な解像度特性)の状態を写真の露出時間を変えて撮影することによって実験的にも検証している。

固体撮像素子は、プロセス技術の進歩によって今後も高集積化・高解像度化が図られると思われるが、高解像度になればなるほど本稿で述べたような素子構造と信号処理の組合せによる方策が、より重要になると考えられる。