

ランドマークとマップを用いる移動機械の誘導法

(機械技術研究所) 館 障・小森谷 清・谷江和雄
大野武房・阿部 稔
(電気通信大学) 清水知和・松田 啓

1. ま え が き

全国 40 万人といわれる盲人の要望の 1 つに自由な単独行動を補助する装置あるいはシステムの開発がある。最近の半導体センサやマイクロプロセッサ等のエレクトロニクス技術を機械やメカニズムに融合させるメカトロニクス・システム技術の進展と相俟って、その展開が大いに期待されている。

機械技術研究所では、昭和 52 年度から 6 年計画で盲導犬を 1 つのモデルとした歩行誘導機械の研究を行っている。これは、ランドマークを利用した移動機械の誘導技術、人と機械の協調による障害物識別技術、環境モデル作成技術といった基礎的な技術の確立を図ることにより前述の盲人の移動 (orientation and mobility) の問題解決への手がかりを与えようとするものである¹⁾。

盲導犬の機能を、(i) 盲人の命令に従って、直進、左折、右折等先導する「服従機能」、(ii) 障害物がある場合には盲人の命令に従わず停止し、そのことを盲人に知らせる「かしこい不服従機能」、(iii) 人間と犬・機械との情報伝達、およびそれらの共同作業の「マンマシンコミュニケーション機能」とに大別し、それらの機械による実現を機械に適した方法で図っている。図 1 は、そのために必要な各サブシステムと全体のシステムを示した研究の概念図であり、そのシステムの具体的な機能仕様は次のとおりである。

(a) 歩行の主導権は主人 (盲人) が持ち、ロボットに有線のスイッチ操作で指令を与えて先導させる。そして交差点ごとのランドマーク上でいったん停止し位置修正を行い、主人からの次の指令 (直進、右折、左折、停止) を待ちそれに従う。

(b) ロボットの走行速度は主人の走行速度に合わ

せ、ロボットと主人の間隔を一定に保つ。ロボットの後方には歩行領域を設定し、もしその領域を出た場合には、それを主人に知らせるための警告を与える。

(c) 路上に歩行通過不能な危険物、障害物のある場合それを検出し、主人の指令には従わず停止し、主人に警告の情報を与える。主人は残存機能や杖のほか、ロボットをもセンサとして使い状況を判断し次の行動を起こす。

(d) 移動している障害物については、その前を同一方向に同じような速度で動いている場合は、その速度に合わせて移動したり、前を横切るところには、それが行きすぎるのを待ったり、またこちらが止っていても衝突の危険がある場合には、相手に対して警告を発するなどの融通性のある行動をとることもできる。

(e) あらかじめランドマークを設置した地域については、その地域のランドマークに関するマップを読み込むことにより、指定された目的地まで自動的に主人を誘導することもできる。

そのうち、(b) についてはすでに盲人の速度に合わせてロボットの速度を調整し、盲人の前方 1[m] の間隔を保つ制御と、盲人があらかじめ設定された許容領域外にコースずれを起こした際に電気刺激を利用して盲人にそのことを伝える機能を実現しており、前報で報告している²⁾。

本報告では、(a) および (e) を実現するための 1 方法を提案する。それは、路上の交差点などの要所にランドマークと呼ぶ目印を離散的に敷設し、機械内に記憶したランドマークに関するマップを利用して盲人の命令を解釈しながら先導し実現する方法であり、交差点でのマーク形状や配置が簡単になること、マークとマークの間の路面に制約を与えないこと、走行径路の容易な変更、径路の自動探索などの特長を有するため、工場内の物品搬送用機械の誘導など^{3)~6)}にも広く

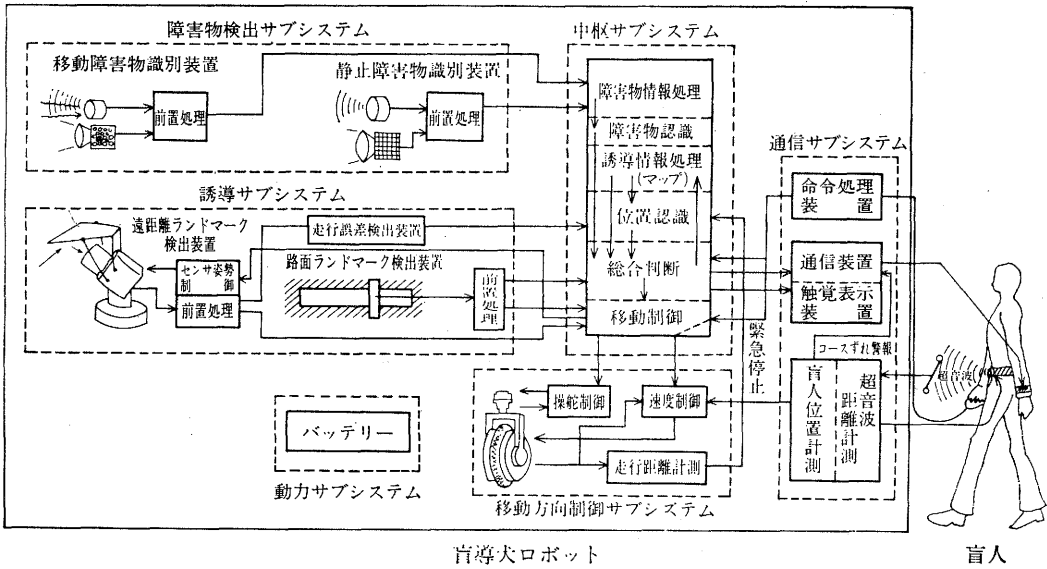


図1 盲導犬ロボットシステムの概念図。

利用される可能性を持つ方式である。

方式について提案し、そのシミュレーション、また実際のハードウェア (MELDOG MARK II) を利用した屋外誘導実験について報告する。

2. ハードウェア構成

前報²⁾で報告したハードウェア MELDOG MARK I を改良した MELDOG MARK II で、離散的なランドマークによる誘導に必要な、(i)ランドマーク間のわたりを正確に行うための同一コース走行の繰り返し精度が良く、(ii)ランドマーク上でロボット自身の姿勢を正確に修正し得るための小回わりがきく機構であることの2点を満足する三輪タイプの前輪駆動・操舵型を踏襲している。ステアリング角は、軸の回転を光学式アブソリュートエンコーダにより検出しデジタル制御することにより再現性を高め、距離は、前輪ドラム内の速度制御用のインクリメンタルエンコーダを積算して求めている。

また、ロボットの前面と後面に、図2に示すような蛍光灯の光を照射して、光ガイドにより指向性を上げ直接反射光を防いだ形で、16個のフォトランジスタアレイにより反射光を受光する型のランドマークセンサを有する。その際、各トランジスタの出力を差動増幅して、エッジを検出するとともに、2値化を行う

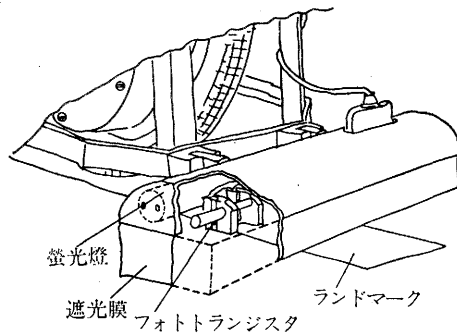


図2 ランドマークセンサ。

ためのコンパレータの基準信号も光量にあわせて自動調節するなどの工夫をしている⁷⁾。

なお、コマンドグリップはコミュニケーションケーブルを介してロボット本体と結ばれ、直進、左折、右折、停止、発進などの命令を送ることができる。

3. ランドマークとマップによる移動機械の誘導

盲導犬ロボットシステムは、それが利用される地域に関するマップを機械内に蓄え、それを適宜利用することにより、機械が自分の位置を知り、自分の次に取るべき行動を決定し、主人に情報を与えたり主人の希

望する場所へ適切に誘導することができる。

マップは、その地域の目標物（ランドマーク）のあるべき場所や、それらの間の関係を機械がアクセスできる形で有機的に結んだものである。ランドマークとしては、実際にある交差点付近の建物、電信柱といった目印を採ることが望ましいが、本研究では、第1段階として、交差点などの要所の路面に離散的に敷設したマークをランドマークとしそれを利用している。

可能性を示すための屋外実験では、一応光学的なセンサにより読み取り可能な幅 15[cm]、長さ 2.5[m]の白色の布テープを利用している。

3.1 マップの構成

図3に路面上のランドマークの配置と、ロボット用マップ作成のためのコードの割当ての例を示す。コード番号は原理的には、ロボットの内部にのみあれば、ランドマーク上にある必要はないし、あるいは、人に分かり機械には分からないようなコードでもよいわけであるが、安全性を考慮して、ロボットが確認するためのコードをランドマークに光学的あるいは磁気的な方法で付与することもできる。

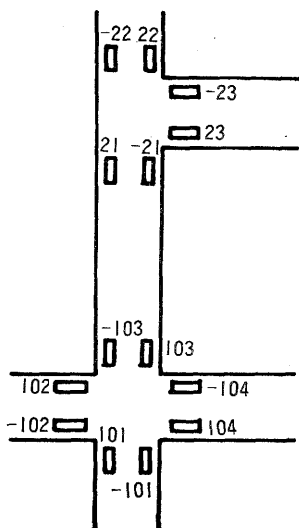


図3 ランドマークの例。

そのようなランドマークに与えたコード番号を有限状態オートマトンのステータスと考え（図4）、その交差点での行動の決定（左折、右折、直進、…）を、そのオートマトンへの入力として、その時に出力としてハードウェアの制御回路へのステアリング角や距離

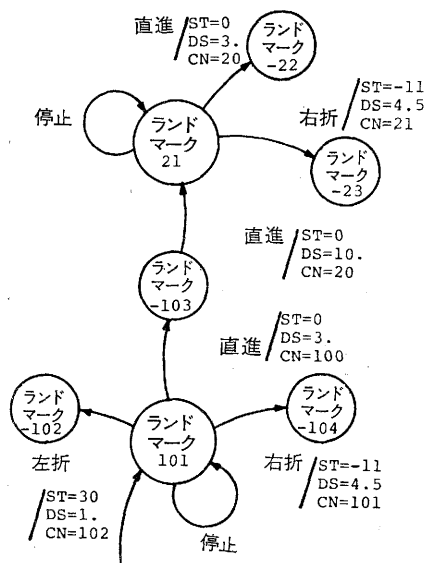


図4 ランドマークのオートマトン表現。

カウンタへの指示値が送られ、そのオートマトンの次のステータスは、次のランドマークのコード番号になるような、有限状態オートマトンの形でマップを構成している。

ロボットは指定されたステアリング角で、指示された距離だけ進んだら、ランドマークセンサを働かせてランドマークに追従することにより、自分の姿勢を正し次のステータスに移る。

上記のマップは具体的には次のようにして構成し、ロボット内のマイクロコンピュータで利用できる形となる。

まずロボットは左側通行し移動するとし、道の左右両側にランドマークを設ける。そのうち、交差点に向かって左側のマークを、そのマーク上でいったん停止し安全を確認するストップマーク（以下 SM）とし、右側のマークをロボットの位置修正のみのためのノンストップマーク（NM）とする。

1組の SM と NM に同一の番号を与え、SM を正に NM を負にし区別する。さらに交差点の種類を (i) 鍵字路 (L型), (ii) T字路 (T型), (iii) 十字路 (+型), (iv) 五叉路 (Y型) に分類し、その交差点にはられた SM に対し、その分類に応じたコード番号を割り当てる（その交差点に関連したマークをそれぞれ L, T, +, Y 型と呼ぶ）。

マップは、1つのランドマークに対して次の4種類の情報が引き出せるように作成する。

- (i) そこから行くことのできる次のマークのコー

ド番号.

(ii) 次のマークのある交差点番号 (誘導には本質的には必要はなく, 盲人の理解のためのオプションである).

(iii) 次のマークまでの距離.

(iv) 次のマークへ渡るためのステアリング角.

(i) の情報に 9[bit], (ii) に 6[bit], (iii) に 8[bit], (iv) に 8[bit] を割り当てることにより, (i) と (ii), (iii) と (iv) で, それぞれ 1[W] になるようにする.

このような方法でマップを作成すると, L型とNM(一型)では, 次のマークの選択が1個しかないので, 2[W] の領域しか必要とせず, 分岐の数につれて, 表1に示すような語数を必要とする. 但し, これは1回のステアリング操作で, 現在のランドマークから次のランドマークへの渡りができると仮定した場合の話で

表1 ランドマークの分類.

マークをそれが置かれている交差点の種類により分類する. それぞれのコード番号と必要語数を示す.

マークの型	コード番号	必要語数
L	1~n ₁	2
T	n ₁ +1~n ₂	4
+	n ₂ +1~n ₃	6
Y	n ₃ +1~n ₄	8
-	-1~-n ₄	2

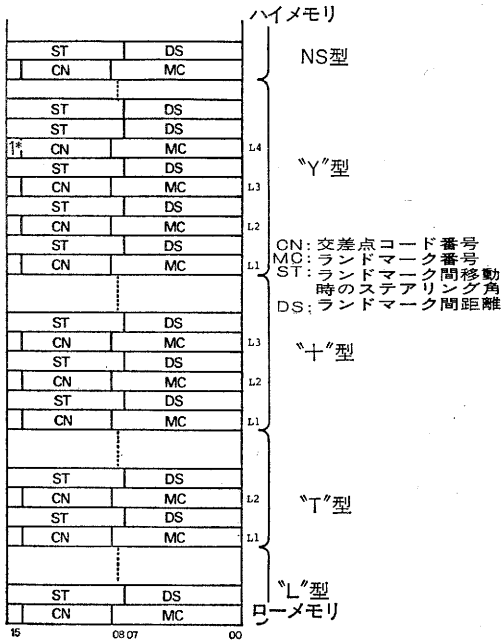


図5 マップの割りつけ.

あるが, 道によっては1回のステアリング操作では行けず2回の操作を必要とする場合もある. そのようなマークでは, (iii), (iv) の情報を1つの分岐について 2[W] ずつ与え, そのマークが特殊マークであることを示すため (i) と (ii) の情報の入っているワードの余りの 1[bit] をセットしている. 図5にマップの割りつけのフォーマットを示す.

さて, 実際にはコード番号は表1のようにその地域の各ランドマークについて分類に従って通し番号でつける. そのコード番号に従って, 次の実際のステータスを受けるためには, メモリ上のアドレスにコード番号を変換する必要がある. そのための変換は次のようにして行えばよい. コード番号をmとした時,

$$\begin{aligned}
 \text{L型} &: 4(m-1) \\
 \text{T型} &: 4(n_1-1)+8(m-n_1-1) \\
 \text{+型} &: 4(n_1-1)+8(n_2-n_1)+12(m-n_2-1) \\
 \text{Y型} &: 4(n_1-1)+8(n_2-n_1)+12(n_3-n_2) \\
 &\quad +16(m-n_3-1) \\
 \text{-型} &: 4(n_1-1)+8(n_2-n_1)+12(n_3-n_2) \\
 &\quad +16(n_4-n_3)+4(|m|-1)
 \end{aligned}$$

特殊コードがあってもおのおの種類のコードの中でまとめておけば, 変換式の係数を変えるだけで, 基本的には同一の方法で変換操作が行え, ロボットのメモリ上に検索可能なマップがロードできる.

3.2 マップによる誘導モード

盲人を誘導する際に次の2つのモードが, この同一のマップを使用して利用できる.

(i) 逐次指令モード 分岐点のある交差点のランドマークに達すると, ロボットはそのランドマークに追従後停止し, 主人(盲人)に交差点に関する情報を伝える. 伝える情報は交差点番号やランドマークコード, その交差点の種類などであり, 伝達方式は例えば定エネルギーパルス列を用いる電気刺激などである⁹⁾⁻¹⁰⁾. 主人は自分の頭の中にあるメンタルマップとロボットからの情報との総合判断にもとづいて次に進むべき方向を決定し, コマンドグリップからそれを指示する. ロボットは指令された方向へ進むための情報をマップにより検索し, その情報に従って走行誘導し次のランドマークへ進む.

(ii) 自動誘導モード 与えられた出発地と目的地のコードから, 動き始める前にそこまでの最適経路をマップにより決定しその経路に従って誘導する. そ

の際、やはり分岐のある交差点では停止するが、それは主人からの進行方向指令を待つためのものではなく、そこが交差点であることや次に進むべき方向をあらかじめ主人に知らせておいて主人がロボットに追従しやすくするためのものである。主人からの指令はスタート信号となる。

3.3 マップによる経路探索

マップによる経路探索は、図6に示すような出発地点を頂点とする tree 構造の中から目的地をノードに持つブランチの鎖を選択する問題となる。ただし、各ノードは各ランドマークコードに対応し、各ブランチは1つのランドマークから次のランドマークへの左折、直進、右折といった経路関係を示している。

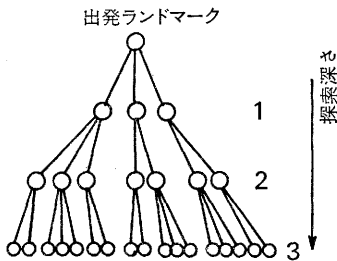


図6 マップの tree 構造化。

そのような対応づけさえつければ、通常の人工知能の方法¹¹⁾で探索を行うことができる。一般にこのような探索では depth-first と breadth-first の2方式が考えられるが、本システムでは出発の時点で問題を解いてしまえば良く、しかも、人が相手であるので多少の時間は許容できる一方、ロボットの内蔵するコンピュータの容量にはおのずと制限があるため、depth-first 方式を多少変形した方式で行う。

すなわち、それを利用する地域に応じた近距離用の探索深さと、遠距離用の探索深さをあらかじめ決めておき(例えば d_1, d_2 とすると)、まず d_1 の深さまで depth-first の探索を行う。その際目的地まで到達し得る解が存在すれば、それを利用し、解が存在しない場合には、もう一度初めから d_2 の深さまで depth-first の探索を行う。その手順を以下に示す。

- ① 与えられた出発地コード番号をマップ上のアドレスに変換する。
- ② 分岐の中の1つを選択し、その経路を選択した時の次のコード番号をストアし、そこまでの距離を距離カウンタに、探索の深さを深さカウンタに

ストアする。

- ③ 次のコード番号が、目的地コード(あるいは、その符号を変えたペアコード)であるか否かを判定する。もし目的地コードであれば、⑤へ飛ぶ。
- ④ 探索の深さが指定値に達したか否かを判定し、達していなければ⑦へ飛ぶ。
- ⑤ 探索の深さを一段戻し、戻った分の距離を距離カウンタから差し引く。
- ⑥ 探索が全部の経路について行われたかを判定する。もし行われていれば、探索を終了する。
- ⑦ 一段戻ったところから未探索の分岐があるか否かを判定する。もしなければ⑥に戻り今までの操作を繰り返す。
- ⑧ その経路に沿って探索を一段増し④へ戻る(未探索分岐の探索)。

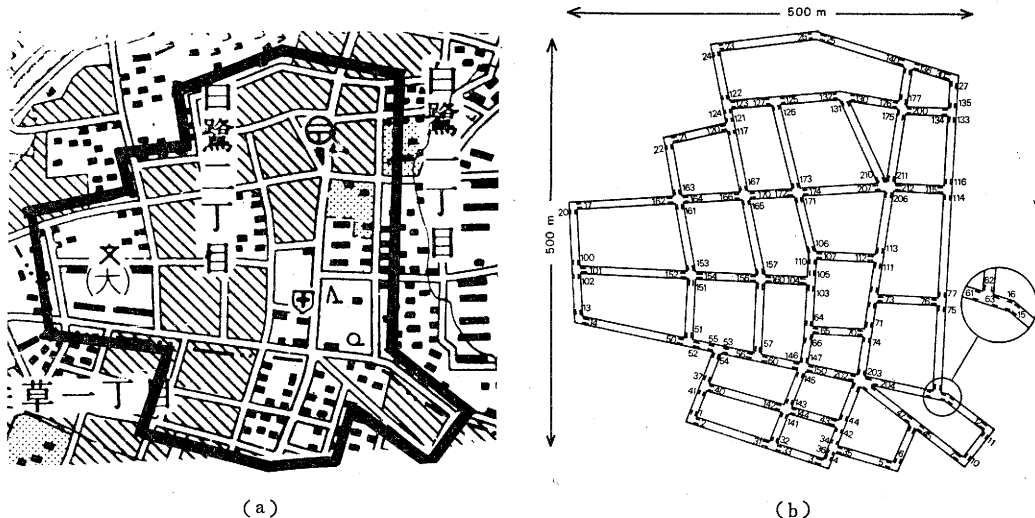
以上の方法により出発地から目的地の経路として通常、複数個の経路が求まる。これから、実際に移動するための1つの経路は、経路の距離、経路を構成する branch の数、曲がりの数を複合せた評価関数を用いて選択する。

4. シミュレーション

シミュレーション用のマップを作成するために、国土地理院発行の1/25000の東京西部地図から、その一部分を図7(a)のように抽出し、その中から点線で囲った部分を図7(b)のごとく単純化して、各交差点のランドマークにコードを割り当て、それに関するロボットが読解可能なマップを作成した。

この地図をもとに、各コードを分類すると、L, T, +, ¥, - コードの番号は、オクタルでそれぞれ、1~30, 31~140, 141~200, 201~212, -1~-212 となる。さらに+については4箇所、¥については全部について特殊コードが必要であり、+マークについては175~200を特殊コード番号に割り当てる。したがって、アドレス変換式は、L: $4(n-1)$; T: $140+10(n-31)$; +: $1240+10(n-141)$; +特殊: $1760+22(n-175)$; ¥: $2070+30(n-201)$; -: $2450+4(|n|-1)$ で、それぞれに実際はさらにオフセット数が加わる。

シミュレーションに使用したマップの一部を図7(c)に示す。上半分に示した表が人に分かりやすい形での表現であり、それが計算機の内部では下半分の形で格納されている。必要メモリ語数は $1[W]=16[\text{bit}]$ と



	左折				直進				右折			
	MC	CN	ST	DS	MC	CN	ST	DS	MC	CN	ST	DS
マップデータA	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	27	-30	12	77	6	0	0	0	-25	11	-25	14
	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	31	-32	13	88	6	-33	13	0	0	0	0	0
	32	-33	13	93	0	0	0	0	-31	13	-82	20
	33	0	0	0	0	-31	13	0	13	-32	13	-94
マップデータB	136	-137	36	98	6	-149	36	0	14	0	0	0
	137	-140	36	82	6	0	0	0	-136	36	-98	20
	140	0	0	0	0	-136	36	0	14	-137	36	-82
	141	-142	37	95	6	-143	37	0	14	-144	37	-85
	142	-143	37	85	6	-144	37	0	13	-141	37	-95

	番地		番地			
26	124	56464	13425	1210	57550	44537
	126	56466	163416	136	1212	57552
	130	56470	14430		1214	57554
27	132	56472	46406		1216	57556
	134	56474	14427		1220	57560
30	136	56476	131420	137	1222	57562
	140	56500	15432		1224	57564
	142	56502	54006		1226	57566
	144	56504	15433		1230	57570
マップデータA	146	56506	15	140	1232	57572
	150	56510	15433		1234	57574
	152	56512	56400		1236	57576
32	154	56514	15431		1240	57600
	156	56516	127024	141	1242	57602
	160	56520	15431		1244	57604
	162	56522	15		1246	57606
	164	56524	15432		1250	57610
	166	56526	121024		1252	57612
					1254	57614
				142	1256	57616
					1260	57620
					1262	57622
					1264	57624
					1266	57626

(c)
 図7 シミュレーション用マップの作成。
 (a) 地域の設定。
 (b) ランドマークコードの割りつけ。
 (c) 作成したマップの一部。

して、1[kW]弱である。

4.1 探索シミュレーションと最適経路評価基準

上記のマップをもとに探索のシミュレーションを行

い、作成した経路探索のアルゴリズムの確認を行った。プログラムは実際のロボットで使用しているマイクロコンピュータ LSI 11/02 のアセンブリ言語で書いてあり、そのままロボットに搭載し利用できるサブルーチンとなっている。したがって、このシミュレーション

は、実際にロボットが利用するプログラムのデバッグの意味も持っている。なお、このサブルーチンの語数は 400[W] 弱である。

最適経路選択のための基準としては次式を利用した。

$$f = ps + qm + rn$$

ただし、 p : 距離に対する重み; $s: a_{ij}d_{ij} + a_{jk}d_{jk} + \dots$; a_{ij} : 1つのランドマーク間距離に対する重みで道路の整備状況や交通量などを反映するための係数である。物理的距離を実質的距離に変換する; d_{ij} : ランドマーク i, j 間の物理的距離; q : ブランチ数に対する重み; m : ブランチ数; r : 曲がりに対する重み; n : 曲がりの数。十字路などほぼ直角の曲がりを 1, 他の直角より小さな曲がりを 0.5 として数える。

本シミュレーションでは $a_{ij}=1$ として、 s が物理的な距離を表わすようにしている。

$p=1, q=0, r=0$ とした場合は、 f が最小となる径路は最短距離の径路であり、 p に走行速度の逆数、 q としては、1つのマークへの追従時に速度が低下することによる時間遅れ、 r としては、曲がり際の走行速度の低下による時間遅れと、交差点で安全などの確認のために立ち止まる時間の和をとれば、 f が最小となる径路は最短移動時間の径路となる。

シミュレーションとしては、出発地コード (ISTA), 目的地コード (IDES), 探索深さ (IDEP) を与え、目的地に至る径路を見つけ、与えられた評価基準 f により、 f の小さい順に径路を求める。

4.2 探索深さの決定

一般に出発地と目的地の場所が近いほど、そこまでの径路に含まれる交差点の数は少なく、したがって探索のための探索深さは浅くても最短径路が求まる。

一方、目的地が遠ければ深い探索が必要となる。

図 8(a) は、近距離の場合、(b) は、遠距離の場合の径路探索の結果を示す。横軸に探索深さを、縦軸にはその時の探索で得られた仮りの最短距離径路の距離 [m] を示している。通常探索深さが極端に浅い場合には、目的地が、みつからず、比較的浅い場合には、目的地は見つかるが、仮りの最短距離は真の最短距離と一致しない。深さを増すにつれ、仮りの最短距離の値は減少し、真の最短距離に到達すると、横軸に平行となり、それ以上の深い探索は無意味である。

さらに、IDEP の上限を求めるため出発地、目的地としてすべてのランドマークを選び、各組の最短径路

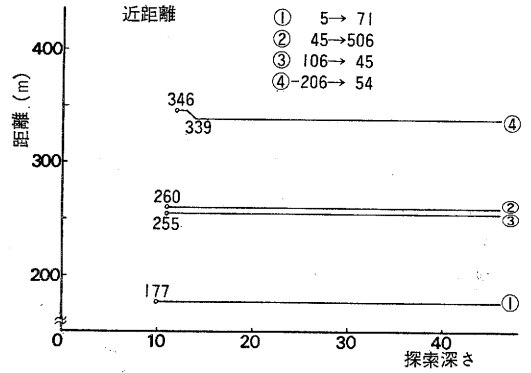


図 8(a) 探索深さと最短径路(近距離の場合)。

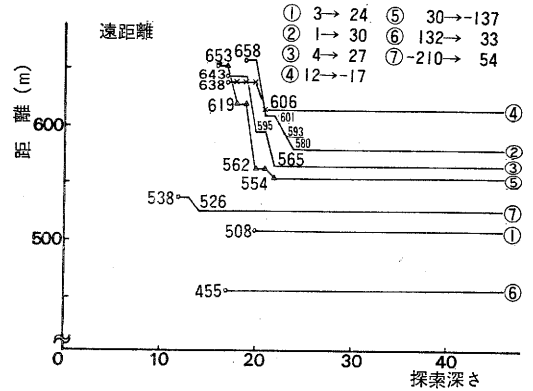


図 8(b) 探索深さと最短径路(遠距離の場合)。

を求め、その最大値および含まれるマークの個数の最大値を求めた。その結果、距離の最大値は 862[m] (ISTA=-122, IDES=14), 必要探索深さの最大は 26 (ISTA=24, IDES=1) である。

これらの結果から、この地域については探索深さ IDEP として 26 を与えれば、すべての出発地と目的地に対して真の最短距離を与える径路が見つかること、また、比較的近い目的地に対しては IDEP=15 程度を与えれば良いことが分かる。

したがって、3章で述べた本システムの探索手順における、この地域に対する d_1, d_2 としては、それぞれ 15, 26 を採用し、それらの値もマップと一緒に格納しておき、実際の問題解決の際に利用する。

なお、探索に要する時間は最長のもので約 6 秒であり、出発する前に探索することを考えれば十分実用的な時間であると思われる。

4.3 評価基準に関する検討

図9に出発地コード(-26)から目的地コード(14)に至る径路について、その物理的距離(s)の短いものから順に求め、A~Lの記号を付けてある。

これらの径路について p, q, r の係数を適当に変えて評価基準を選んだ時、どの程度の最適径路の変更が生じるかを検討した。

物理的距離評価($p=1, q=0, r=0$)は s として求まっているので、次に時間的评价基準を考える。通常のランドマーク間の走行速度を1[m/s]と仮定し、ランドマーク追従時には1/2の速度となり、ランドマーク長を2.5[m]とすれば追従動作のために2.5[s]余分

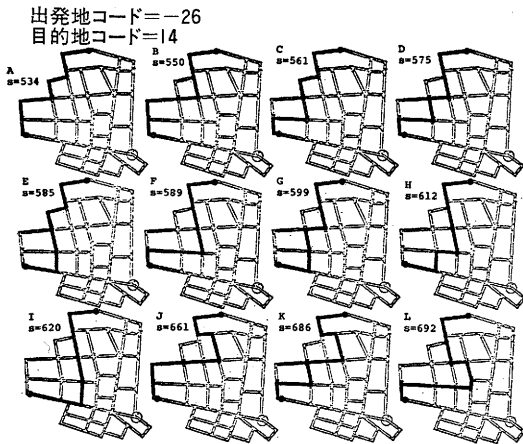


図9 選択された径路の例.

の時間がかかると考えられる。交差点で曲がる場合には安全を確認し3[s]停止し、曲がりの部分で速度を下げるため2[s]遅れるとする。

表2の結果から分かるように、時間評価は距離評価とはほぼ同一の結果を示す。これは、他の同様の実験でも同様であった。

人の心理的な効果も含めた評価法も必要となると思われる。例えば、ランドマークに追従する時や、交差点を曲がる時には、通常の道とは異なるストレスが加わり道が長くなるような気分を持つとすれば、 p, q, r に適当なストレス係数を与えれば評価できる。一例として、このマップにおける平均ランドマーク間距離24[m]を1つの基準量と考え、ランドマーク追従時や交差点を曲がる際に、それに関連した量だけ心理的に長くなったと感じるとして評価した例を表2に示す。

実際には、使用者による実際の歩行と、その際の疲労などの客観的な測定とから、適切な p, q, r および a_{ij} を定める必要があると思われる。

5. マップの接続による走行領域の拡張

前述のマップは、地域の広さ500[m]×500[m]、ランドマーク数276、マップの大きさは約1[kW]であった。現在のビット構成のままでもマーク数にして約1.8倍、地域の長さで約1.4倍まで拡大でき、その場合でも使用するメモリは2[kW]以下であり十分実用的なものである。

しかし、これ以上に拡大するとマップ上の次のコー

表2 評価基準の検討.

	s	m	n	$f=ps+qm+rn$									
				$p=1$		$p=1$		$p=1$		$p=1$		$p=1$	
				$q=12$	$q=24$	$q=12$	$q=24$	$q=12$	$q=24$	$q=12$	$q=24$	$q=12$	$q=2.5$
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[sec]			
A	534	16	6	798	2	990	2	870	3	1062	4	604	1
B	550	16	4	790	1	982	1	838	1	1030	1	610	2
C	561	16	5	813	3,4	1005	4	873	5	1065	5	626	3
D	575	16	6	839	7	1031	8	911	9	1103	9	645	5
E	585	15	4	813	3,4	993	3	861	2	1041	2	642.5	4
F	589	16	4	829	6	1021	7	877	7	1069	7	649	6
G	599	15	4	827	5	1007	5	875	6	1055	3	656.5	7
H	612	15	4	840	8	1020	6	888	8	1068	6	669.5	8
I	620	17	2	848	9	1052	9	872	4	1076	8	672.5	9
J	661	18	6	949	10	1165	10	1021	10	1237	10	736	10
K	686	18	8	998	11	1214	11	1094	12	1310	11	771	11
L	692	21	6	1016	12	1268	12	1088	11	1340	12	774.5	12

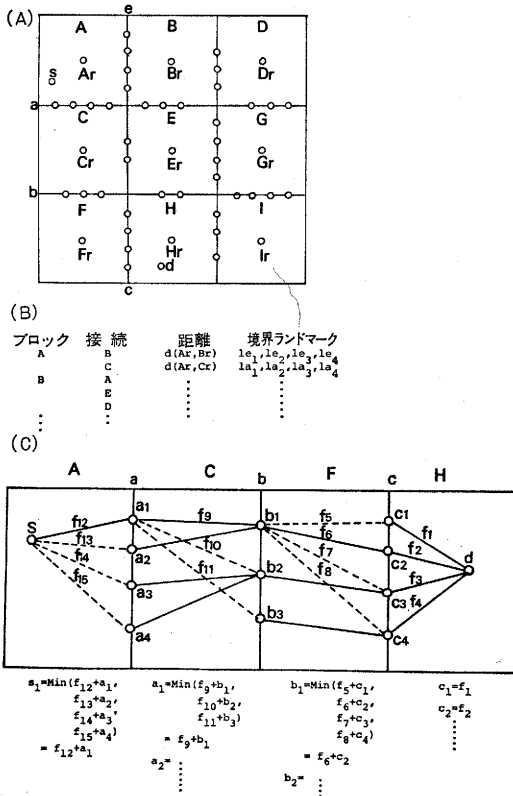


図 10 マップの接続と最適経路探索。

- (A) 地域のブロック化と代表点の設定
- (B) ブロック代表点マップとわたり道のランドマークのマップ
- (C) 接続による最適経路の探索

D番号が交差点番号と合わせて1[W]以内に収まらなくなる等の不都合が生じ、したがって容量も車載のマイクロコンピュータにとっては大きすぎる危険性がある。また、敷設するランドマークの方にもコードをつける場合には、物理的なコード番号の制限も生じてくる。

そのような場合には、次のような方法で、マップを接続し走行領域を拡大することができる。例えば広い全体の領域を図 10(A) のようなブロックに分け、各ブロックごとに同一のコードを利用して前述のようなマップを作成する。それを車載のカセットテープのような大容量記憶装置にしまっておく。また、ブロックの中心にブロックの代表点を設け、どのブロックとどのブロックが境界を接している、その間の距離(代表点間の距離)が、いくらになっているかという図 10(B) のようなブロック間の関係を表わすマップもロ

ボットが利用できるようにしておく。さらに、各ブロックの境界にあるランドマークとしては、どのようなものがあるかという境界点ランドマーク情報もロボットが利用できるようにする(前者をブロック代表点マップ、後者をわたり道のマップと呼ぶ)。

さて、上記の情報を利用して例えばブロック A の s 点から、ブロック H の d 点へ移動する場合の最適経路の探索を考えよう。

(i) 図 10(B) のマップを利用して A から H のブロックへ代表点のみを利用して行く経路を探索する。これは、3章の方法と全く同一の方法で行え、最適なものから例えば次のように求まる。

- (1) A → C → F → H
- (2) A → B → E → H
- (3) A → C → E → H ……

ただし、これは代表点を単純に結んだ時の最適であり、まだ真の意味の最適かは分からない。

(ii) まず(1)のブロックを仮想的に図 10(C) のように連絡してみる。各ブロックの接続点は、先にのべた「わたり道のマップ」を利用して求める。この中から最適の道を選ぶには、D.P. の手法がそのまま利用できる。まず d 点を含む H のマップをカセットからロードし 3章の方法で、F と H のわたり道のランドマークのすべてから d 点へ行く道のうち、最適なものをそれぞれに対し求め、それぞれの評価関数 f の値を、各わたり点に対して印しておく。図 10(c) の場合は $c_i = f_i (i=1, 2, 3, 4)$ 。次に H のかわりに F のマップをロードし、C と F のわたり点すべてから、H と F のわたり点すべての点への f を求め、例えば、図 10(C) の例では、 $b_1 = \text{Min}(f_5 + c_1, f_6 + c_2, f_7 + c_3, f_8 + c_4)$ という形で、その点から目的地まで行った時の最適値を、そのわたり点に与える。そのような操作を繰り返せば、最終的には、図の例のように $s_1 = \text{Min}(f_{12} + a_1, f_{13} + a_2, f_{14} + a_3, f_{15} + a_4) = f_{12} + a_1$ として最終的な最適値(例えば最短距離)が求まる。

(iii) (2)(3) の他の連絡に対しても (ii) の手順で s_2, s_3 を求め $s = \text{Min}(s_1, s_2, s_3)$ を求める。これが真の最適コースをとった時の最適値である。

(iv) s に対応するコースを再現し、それに従って走行する。例えば $s = s_1$ であれば、

$$s \rightarrow a_2 \rightarrow b_1 \rightarrow c_2 \rightarrow d \text{ が求める最適経路である。}$$

以上のようにして、3章のマップとブロック代表点マップ、わたり道のマップを用いれば、自由に領域を拡大し走行誘導が行えることが分かる。

6. 試作ハードウェア (MELDOG MARK II) による誘導実験

本報告で提案した方式の物理的実現性を検証するために、試作したハードウェアを用いて、ごく単純化された地域ではあるが実際の屋外において実験を行い成功した。

この方式の基礎をなす考えは、路上に敷設したランドマークにロボットが追従することにより自分の姿勢を正し、マップで与えられる走行情報と実際の走行との誤差が集積しないようにすることと、ランドマーク情報によりプレイバック操作のみで、右折、左折、直進を行い次のランドマークまで許容誤差範囲で到達することにある。

前者は、ハードウェアのランドマークへの追従性とランドマーク長に関係し、後者は、ハードウェアの走行軌跡の再現性、ランドマークセンサの検出幅、ランドマーク間隔、およびランドマーク幅に関する。以下にそれらに関する基礎実験¹²⁾の一例を示し、その実験データにもとづく屋外実験の結果について報告する。

6.1 ランドマークへの追従

直線のランドマーク中心線とロボットの前方センサアレイの中心とのずれ Δy 、およびマーク中心線とロボットの姿勢角ずれ $\Delta\phi$ を求め、次式で操舵角を決定する。 $\theta = K_1\Delta y + K_2\Delta\phi$ (K_1, K_2 は定数)。

その際のマークの検出は、ロボットの前後に取り付けたフォトランジスタアレイで光学的に行う。センサアレイの配置、 K_1, K_2 の値の決定はシミュレーションで行った。シミュレーションは、実際にロボットに載むのと同じのアセンブリ言語により書かれたサブルーチンを FORTRAN シミュレーションプログラムとリンクして PDP 11/40 システムのグラフィックディスプレイを利用して行った。マークを検出し始めてから与えられた精度でマークに追従するまでの走行距離と、グラフィック上で観察したロボットの安定性を考慮して、 $K_1=3, K_2=2$ を選択している。センサ数は多いほど滑らかに、その位置が前方にあるほど安定であるが、経済性と物理的制約から、センサ数 16 で、位置はロボットの前方向と後方の 2 ヶ所としてある。

図 11 に幅 15[cm] の白色テープのマークへの進入特性の一例を示す。横軸が走行距離で、縦軸が速度と

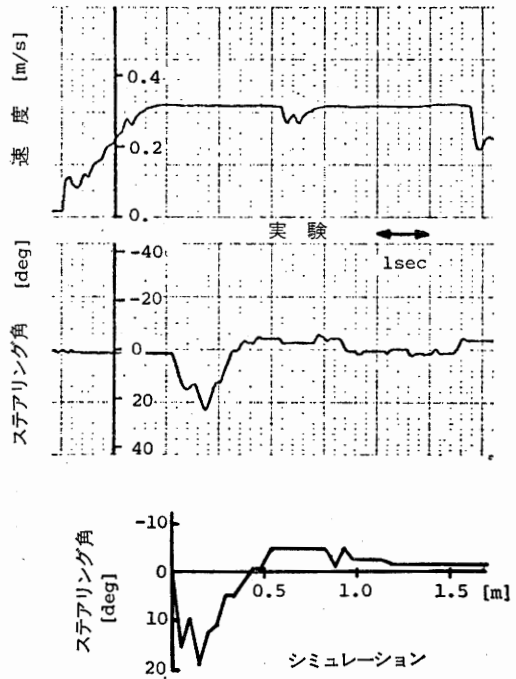


図 11 ロボットのランドマークへの追従実験。

ステアリング角である。この例では進入時の角度偏差は 0 で、位置ずれを 15[cm] にしてある。追従に用いる距離は 1.5[m] 程度であり、その応答の波形はシミュレーションと良く類似している。

6.2 ランドマークのわたり

ハードウェアのコース再現の精度は、(i)ランドマークに追従し姿勢制御した場合に最終的に残った誤差 Δy_0 と $\Delta\phi_0$ が次のランドマークへ行くまでに積算される誤差、(ii)ステアリング角をサーボ制御するための誤差、に影響される。(ii)についてはアブソリュートエンコーダを用いて制御を行うため、設定値のまわりに ± 1 [bit] ずつ細かく首を振りながら進む。道が平坦で路面から雑音が入らないとすれば、首振によるサーボの影響は相殺され、ランドマークへ進入する前のわずかな時間にどちらかへ首を振った量が影響するにすぎず、第 1 近次としては無視し得る。

(i)については、そのうちの Δy_0 はランドマーク間の距離にはよらず、同一の量が次のランドマークに進入する時も残るだけで、これもごく微少の量であり第 1 近次では無視できる。

したがって、 $\Delta\phi_0$ の影響が最も重要となる。いま MELDOG MARK II のランドマークセンサの精度は、光ガイドを介してフォトトランジスタで受ける工夫をしてあり、 $\pm 0.5[\text{cm}]$ に調整されている。ロボットの長さは、 $1[\text{m}]$ であるので最悪の誤差としては、 $\Delta\phi_0 = 0.01[\text{rad}]$ となる。この誤差の影響は $S[\text{m}]$ 進むと $\Delta y = \Delta\phi_0 \cdot S$ として表われる。

実際のハードウェアを用い室内の平坦な場所で Δy を測定した結果も $\Delta y \leq \Delta\phi_0 \cdot S$ となっており、上記の考察を裏づけている。

さて、MARK II のランドマークセンサの検出幅は、 $40[\text{cm}]$ で、ランドマークの幅が $15[\text{cm}]$ であるので、 $\pm 27.5[\text{cm}]$ までの誤差が許容されることになる。これは、ランドマークの後方から次のランドマークの前方まで $27.5[\text{m}]$ 、すなわちランドマーク間隔にして $30[\text{m}]$ にあたる。4章の平均ランドマーク間距離が $24[\text{m}]$ であったことを考えれば、路面の悪環境によ

る走行誤差を全く無視した理想状態では、十分実現性を持った精度を有しているといえる。

6.3 屋外実験

長さ $2.5[\text{m}]$ 、幅 $15[\text{cm}]$ の白色布テープを機械技術研究所構内のアスファルト路上に $9[\text{m}]$ 間隔に 9 箇所 T 字型にはった。路面の状態は、通常の道路に比べかなり程度の悪い舗装ではあったが、マップにもとづいて、直進、左折、右折等を行い、T 字のすべての端から別のすべての端まで自由に走行することができた。写真 1 にその実験風景を示す。

7. 結 論

人の機能を機械で做ることは人類の永遠の興味とも言うべきものであって、一步譲って動物の機能と言えども、たやすく実現されるものではない。

本報告は、機械技術研究所で行っている盲導犬の持つ「服従」と「かしこい不服従」の機能を機械に適した方法で、機械により実現しようとする試みのうち、マップとランドマークを利用しロボット、したがって盲人を誘導する研究に関するものである。

方式を提案し、その可能性をシミュレーションと実際のハードウェア (MELDOG MARK II) を利用した屋外実験とにより示した。

このマップとランドマークによる移動ロボットの誘導は、連続的なマークに比べ、交差点におけるマークの著しい簡易化、マーク間のスペースの解放、走行径路の容易な変更、径路の自動探索などの特長を持つため、工場内の物品搬送用機械の誘導にも広く利用される可能性を持つと思われる。

末筆ながら日頃多大のご支援をいただいている本研究所本 田富士雄所長、木村誠次長、清水嘉重郎システム部長、早稲田大学加藤一郎教授、東京大学藤村貞夫助教授、電気通信大学合田周平教授に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) S. Tachi et al.: "Study on guide dog (Seeing-eye) robot (1)", Bulletin of Mechanical Engineering Laboratory, 32, (1978).
- 2) 舘, 小森谷, 谷江, 大野, 阿部, 細田, 藤村, 中島, 加藤: 人と一定間隔を保つ移動ロボット制御の一方方法, バイオメカニズム 4, (1978), 279-289, 東京大学出版会.
- 3) Y. Anbe et al.: "A computer controlled robot cart", Proc. of 1st International Symposium on Industrial

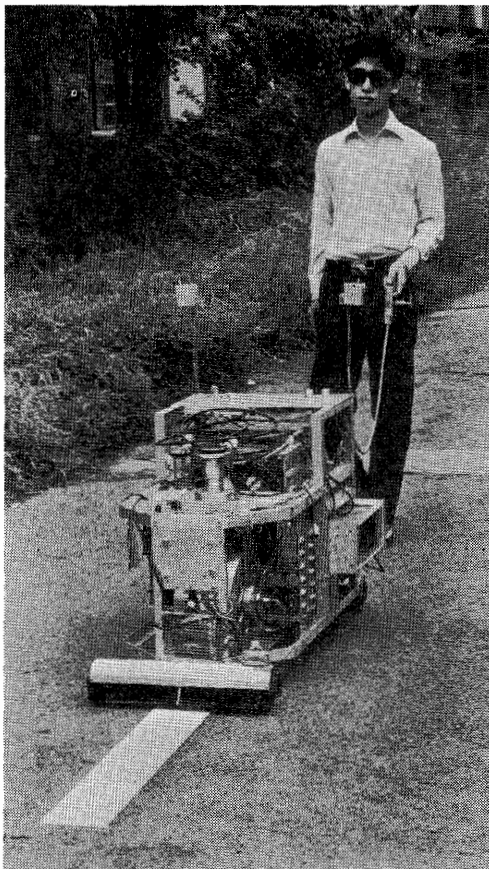


写真 1 盲導犬ロボット (MELDOG MARK II) による屋外誘導実験。

- Robot (ISIR), (1971), 115-126.
- 4) S. Ando et al.: "Unattended travelling vehicle guided by optical means", Proc. of 4th ISIR, (1974), 385-393.
 - 5) J. Pustola et al.: "Unattended travel vehicle driven by step motors", Proc. of 7th ISIR, (1977), 79-85.
 - 6) R. L. French et al.: "Automatic route control system", IEEE trans. on Vehicular Technology, VT-22, (1973), 36-41.
 - 7) 館, 小森谷, 谷江, 阿部, 細田: ランドマークを利用した移動ロボットの誘導, 第2回ビークルオートメーションシンポジウム, (1979), 17-20.
 - 8) 館, 谷江, 阿部: 経皮電気刺激の強度感覚に対するパルス高とパルス幅の効果, 医用電子と生体工学, 15, (1977), 315-320.
 - 9) 谷江, 館, 小森谷, 阿部: 電気パルス刺激エネルギーに対する皮膚の強度感覚と丁度可知差異, 計測自動制御学会論文集, 13, (1977), 595-602.
 - 10) 谷江, 館, 小森谷, 阿部, 三浦: 刺激エネルギーを強度次元パラメータとして用いる定エネルギー型電気パルス刺激情報伝達装置, 医用電子と生体工学, 18, (1980), 40-42.
 - 11) N. J. Nilsson: "Problem-Solving Methods in Artificial Intelligence", (1971), McGraw-Hill, New York.
 - 12) 館, 小森谷: 盲導犬ロボットの研究, ロボット, 22, (1979), 72-83.