〔マイクロコンピュータ応用実例〕

マイクロコンピュータの盲導犬ロボットの研究における応用

舘（たち）　暲（すすむ）†

1. はじめに

暗い部屋に急に入った時や，不意の停電時などに，光がないといかに不安で不便であるかを経験したことがあるに違いない．ゆっくりと注意深く動いてみるけれども，すぐに何か物にぶつかってしまう．そのとき感じたことを盲人は一生の間，感じ続けているのである．どこへ行くにしても，自分たちを導いてくれる何かが必要である．われわれは暖かいまなざしを持ち続けたいと思う．

身体障害者福祉法でいう身体障害者手帳を持つ視覚障害者は，昭和51年3月現在で40万人に達するが，実数はさらにこれを上回るものと思われる．そうした人たちの最も望んでいることは何であろうか．それは，簡単に言えば歩行の問題（Orientation and Mobility）とコミュニケーションの問題（Communicatim）の解決である．

機械技術研究所では，昭和52年度から5ヵ年計画で歩行誘導機械の研究を開始した．これは，ランドマークを利用した機械の誘導技術，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歩行の問題解決への手がかりを与えようとするものである．

歩行の問題を解決するために，現在までに行なわれてきた盲人の歩行誘導手段としては，大別すれば，(1) 杖 (2) 盲導犬 (3) 超音波眼鏡，レーザ杖などの装置の三つに分類できよう．その内 (1) の杖は，盲人が自立するための基礎ともなるべきもので，残存機能の訓練による歩行技術を教える，いわゆる Huber Technique と密接な関係を持つものである．盲人はこの杖を利用し，さらに残存機能を最大限に発揮して，自分なりに頭の中に外界のある種の像（Mental Map）を作り出し．それにしたがって歩行する．どの歩行誘導手段を使うにしても，この種の訓練は必要不可欠である．

また (2) は犬の持つ優れたパターン認識と情報処理能力，臨機応変の判断力などを利用する試みである．本格的な訓練が始まったのは，ドイツのオルテブルクで1916年から，また米国では1929年に，Seeing Eye が設立されてから，さらに日本においては昭和10年代後半の国立第一病院での訓練が始まってからであるが，古来，優秀な犬が人を案内した例は数多い．この方式は動物の持つ優れた能力を使っているため非常に融通性に富み，優れた歩行誘導手段ではあるが，また動物であるがため，その“訓練”，“飼育”に莫大の労力を要する，すなわち，その訓練に耐え得る犬の数は極めて少なく，昭和51年2月現在で登録されている保有盲導犬は全国で172頭にすぎない．また食事，排泄，手入れ，病気などの問題が常にあり，家族が1人ふえた程度の手間がかかり，都市化された環境，とくにマンション，アパート，社宅などの住居では実際問題として利用することができない．

機器を利用して歩行を補助しようとする試みが (3) のレーザー杖や超音波眼鏡であるが，その中には超音波の反射音を盲人の耳に逐次フィードバックの形でかえしているため，盲人に負担を与え，かえって残存機能までも奪う結果となることも少なくない．エレクトロニクスの進展につれて，眼鏡や杖の中に入れた回路で信号処理を行なって，情報を取捨選択して盲人に送れるようにして行くことが，この方向の進展であろう．また，遠い将来を見とおした研究としては，大脳の視覚野に電極をうめ，直接脳を刺激する人工眼球の研究があり，英国や米国では人体を利用して実験しているが，脳のメカニズム等が全く未解決に近い現在では，かなりの危険を含んでおり，実用化にはほど遠いと思われる．

(3) の超音波眼鏡と人工眼球の中間段階の研究として，盲導犬の持つ機能を目標とした機械を開発することは，それなりの意義を有するものである．すなわち，障害物識別用の情報処理機能を持たせることができるため，盲人は障害物に関する情報の逐次フィードバックを受けず，ある程度取捨選択された情報を利用できる．したがって盲人は残存機能を十分に利用した上で，さらに機械からの情報も有効利用できる．また路上に機械が識別するための目印（ランドマーク）を設けるため，ある程度の道案内もできることなどである．さらに，これらの試みは，例えば病院内や工場内の物品運搬用ロボットなどにも役立つであろう．

以下に，この計画の目標とするシステムの機能について説明し，現在汎用実験用に用いているマイクロコンピュータシステムとそのインターフェイスを簡単に紹介す

†機械技術研究所　システム部
（東京都杉並区井草4—12—1）

る．さらに，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おこした際に，電気刺戟を利用して盲人に伝える機能を実現した試作1号機（MELDOG MARK Ⅰ）について，そのハードウェアの概要と実験結果を紹介する．

2. システムの概要

盲導犬の機能を，(i)盲人の命令にしたがって直進，左折，右折などを先導する“服従”機能，(ii)障害物がある場合には盲人の命令にしたがわず停止し，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>との情報伝達や，それらによる共同作業の“マンマシー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図っている．

(i) は具体的には，路上の交差点付近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読しながら先導し実現する．

(ii) は超音波素子や CCD カメラからの入力により障害物等の有無を機械が検出し，盲人に知らせる機構である．

(iii) は人間から機械への命令と，機械から人間への情報伝達，また障害物を検出した際の人間と機械の協力による障害物認識と，それにもとずく障害物回避などを含む．

以上の観点から盲導犬ロボットシステムに求められる機能仕様を整理すると次のようになる．

(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一旦停止し，位置修正を行ない，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．（図1）

(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ち，ロボットの後方に歩行領域を設定し，もしその領域外に出た場合には，それを主人に知らせるための警告を与える．（図2）

(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他，ロボットをもセンサとして使い，状況を判断し，次の行動をおこす．（図3）

(d) あらかじめランドマークを設置した地域については，その地図を読みこ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．

上記機能を満足する移動ロボットは，(A) 移動方向制御サブシステム，(B) 中枢サブシステム，(C) 動力サブシステム，(D) 通信サブシステム，(E) 誘導サブシステム，(F) 障害物検出サブシステムなどのサブシステムを必要とする．

それらをまとめた概念図を図4に示す．誘導サブシステムからのランドマーク情報が前処理回路を通して中枢サブシステムに入り，中枢内の誘導情報処理装置内のマップとてらしあわされ，移動制御装置に送られる．その結果停止すべき時には，通信サブシステムを通して人にその旨伝えられる．障害物検出サブシステムからの出力も前処理され中枢サブシステムに送られ，人に危険な障害物と判断された場合，移動方向制御サブシステムに働らきかけて停止し，通信サブシステムを通して人に停止

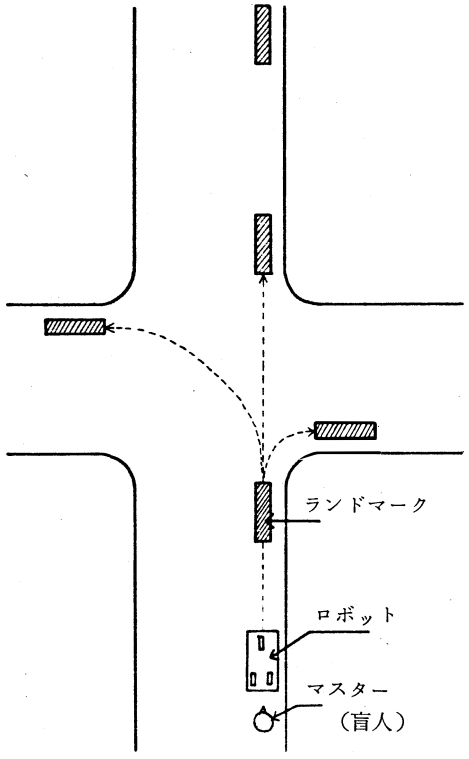


図1　服従の機能

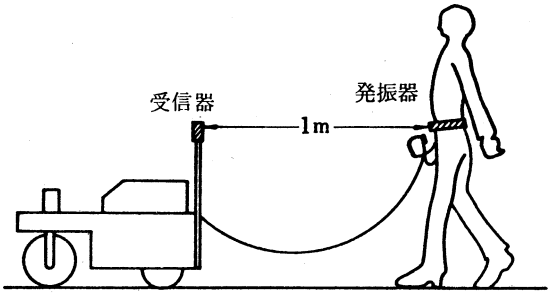


図2　マスターガイド（ハーネスの機能）

を呼びかける．移動方向制御装置は，通常は超音波距離計測により主人の位置を検出し，主人が止っていれば止ったままで，主人が歩くとその速度に合せて進行する．そのモードは中枢サブシステムに負担をかけない形で行なわれる．すなわち，通常はそれ専用の回路が動作し中枢サブシステムがそれを監視し，ランドマーク情報や障害物情報から停止を必要とする時にモードを切りかえて中枢の支配下におくという方式を採っている．

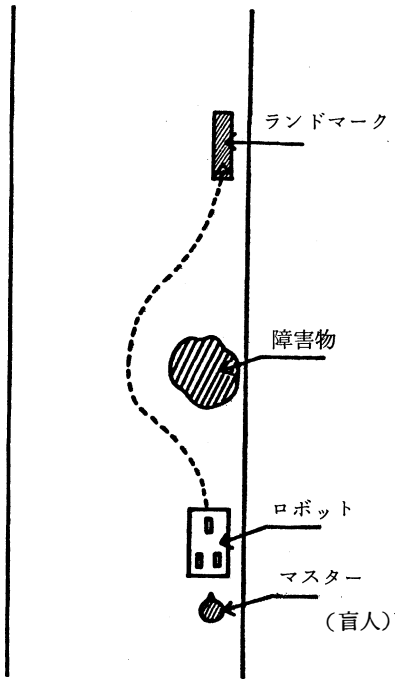


図3　かしこい不服従の機能

3. 盲導犬ロボットにおけるマイクロコンピュータとそのインターフェイス

3.1 マイクロコンピュータ

前述の概念図の中枢サブシステムをマイクロコンピュータで実現することを計画している．その場合，通常の工業製品等の開発と違う大きな点として，(i) 全体のシステムがまだ未踏の部分を多く含み，したがって中枢サブシステムの処理も確定していない．(ii) 開発がサブシステム単位あるいは実現する機能単位で行なわれ，そのタイムスパンが年のオーダーである，(iii) 最終的には多くの機能を持つ多数のサブシステムを中枢サブシステムが統括管理しなければならない点である．

その結果として中枢サブシステムは，ソフトウェアの開発が容易で，しかもそのソフトウェアを簡単に拡張できることを必要とする．また，多数の外部装置と容易にデータの受けわたしができること，また多くのメモリを有することも必要となる．

また騒音を発せず安全であるという盲導犬ロボットとしての制約から，その動力源が現在のところでは蓄電池となるため電力消費が少ないことが望まれる．

これらの条件をすべて満足する最適のマイクロコンピュータは現在のところみあたらないように思われる．電力消費からすれば CMOS を用いたコンピュータがよく，ソフトウェア開発の容易性，またその拡張性からすればミニコンピュータをエミュレートしたマイクロコン

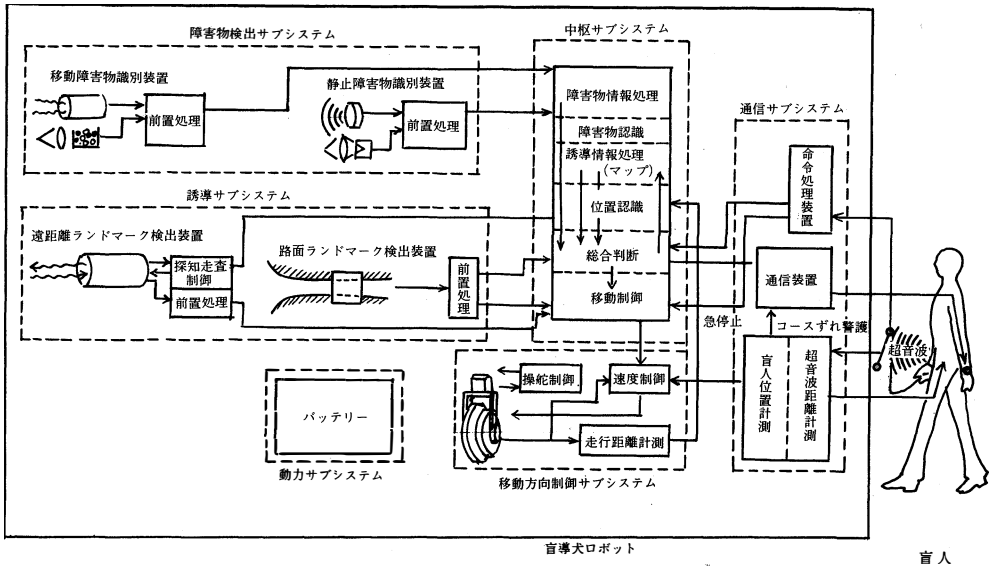


図4　盲導犬ロボットの概念図

ピュータが望ましい．そのようなものの一つに PDP 8 をエミュレートしたインターシルの IM 6100 があるかつてはミニコンの代表として勇名をはせた PDP 8 も，現在の目でみれば，レジスタが一つしかなく，12〔bit〕マシーンで 4〔KW〕単位でしかメモリを扱えなく，しかもその 4〔KW〕も煩雑なページに区分されているなど，欠点が多い．

消費電力を妥協し，プログラム開発の容易さと，著者らのすでに現有するミニコンピュータシステム（PDP 11/40 LABORATORY SYSTEM）との共通性から，現在のところ DEC 社の LSI-11/2 をその中枢システムとして利用している．ただし，メモリとしては，消費電力の低減と不揮発性化とを図って，基板内バッテリーバックアップの CMOS メモリ（理経コンピュータ製）を用いている．

プログラムは PDP11/40 により RT11 モニタのもとにアセンブラで作成し，それを紙テープを媒介として，盲導犬ロボットに搭載した LSI-11/2 に読みこます．そののち電源を切断し，紙テープリーダを切り離し，パワーアップのベクトル割り込みを利用してプログラムをスタートさせて実験を行なっている．勿論プログラム全体が完成した場合には，この部分は ROM になるわけで，その場合にはこの様な手続は不要である．しかし前にも述べた様に，ROM になるまでが本研究の骨子であり，しかも数年の年月を要するため，このような構成となるのである．なお LSI-11 については文献 1 を参照されたい．

3. 2 インターフェイス[2)]

ロボットの各サブシステムと中枢サブシステムのマイクロコン LSI-11/2 とは，DEC 社のパラレルインターフェイスユニット（DRV-11）2 枚と，ADAC 社のアナログインターフェイス（600-LSI-11）1 枚をその中心としたインターフェイス装置によりデータを交換する．

DRV-11 は最高 90〔KW/s〕の転送能力を持つパラレルインターフェイスで，構成はコントロールステータスレジスタ，出力バッファ，入力バッファおよびアドレス／I/O コントロール部からなり，基板上のジャンパ線によりデバイスアドレス，割り込みベクトルアドレスなどが自由に選べる．プログラム実行中，CPU からデータが送られ，出力バッファに出力されると，アドレス／I/O コントロール部は NDR 信号を出し，転送が完了したことを示す．この信号をインターフェイス回路のラッチ信号として用いている．またデータを CPU へ転送するとき，入力バッファのデータを転送し終ると，アドレス／I/O コントロール部は DTR 信号を出し，転送が完了したことを示す．割り込み要求としては，ステータスレジスタの第15ビットと第 7 ビットに同一の機能を持つ二つの割り込みビットを有し，レジスタの INT ENB ビットをセットしておくことにより割り込みが生じる．

600-LSI-11 はアナログ入力としては，通常16チャンネル，最大64チャンネルの入力信号を扱え，マルチプレクサ，プログラマブルゲインアンプ，高速サンプル・アンド・ホールド回路を経て AD 変換器により 12〔bit〕のディジタル信号に変換された後，LSI-11 バスに接続される．また 600-LSI-11 に転送されたデータは，2 チャンネルの DA 変換器により，あらかじめ設定されたレンジのアナログ信号に変換利用できる．（現在は 0 ～ 10〔V〕）

中枢サブシステムは次の入出力情報を管理する．

i）入力情報

①盲人からロボットへのコマンドグリップを介しての命令

②前輪のステアリング角の監視（フィードバックは個別の専用回路による）

③ランドマークコード（現在地点がランドマークを記憶したメモリのバンクの中でどの位置にあたるか）

④次のランドマークまでの距離

⑤ランドマークセンサよりのランドマーク情報

⑥障害物識別装置（CCD カメラなど）からの情報

⑦全体的に，ロボットがどのような状態にあるかを示す状態監視情報

ii）出力情報

①ロボットが盲人の命令を受けつけたことを示す応答信号，およびコースずれなどを知らせる警告信号など盲人へのフィードバック信号

②前輪のステアリング角の指示値

③ランドマークに関するマップ情報

④次のランドマークまでの距離

⑤盲人からの停止命令ないしは異常検出時のブレーキ信号

iii）アナログ情報

①ロボットの速度の指定および監視（ロボットをある速度で走行させる場合の指令と，実際にどのくらいの速度で走行しているか，暴走はしていないかなどの監視）

②盲人とロボットの離れぐあい

③盲人のコースずれ量

以上の入出力情報を管理するためのインターフェイス回路を図 5 に示す．すなわち，入力データは二つのパラレルインターフェイスの入力バッファを用い，出力データはパラレルインターフェイスの出力バッファの一つを用いる．残りの一つの出力バッファは，ブレーキ信号に用いるほか，入力データ，出力データのマルチプレクシ

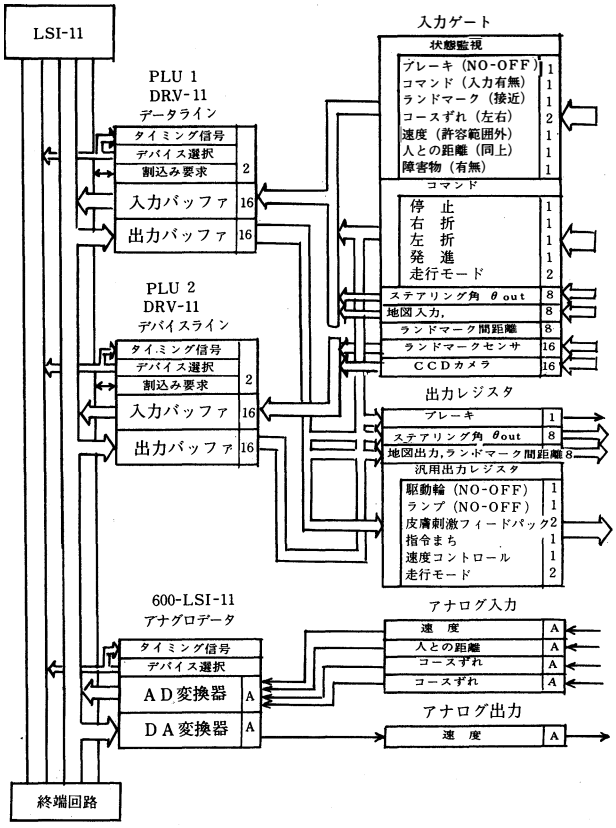


図5　インターフェィスの概略

ング用に用いている．

4.　人と一定位置関係を保つ移動ロボットの制御[3]

4. 1　MELDOG MARK I のハードウェア

各種センサと情報処理装置を運ぶ移動本体は，足移動方式を採ることが環境に対する適応性から好ましいが，現在のところそれは未解決の研究段階にある[4]．したがって，MARK I は車輪移動方式を採用している．移動機構に要求される機能は，離散的なランドマークによる誘導[5]を考えているため (i)速度制御性のよいこと (ii)同一コース走行の繰り返し精度のよいこと (iii)小回りのきくことの3点である．この3点について種々検討した結果，三輪方式前輪駆動操舵型を選択した．写真1に試作したロボットの概観を示す．

4. 1. 1　速度制御部

軽量化のため前輪ドラム内に組み込んだ直流プリントモータをオンオフ制御により駆動する．制御のためモータ軸に取り付けけたエンコーダからの信号と速度指定電圧を v－f 変換した基準信号とを PLL で比較し，それにより加速・減速信号を作り出す．そのブロック図を

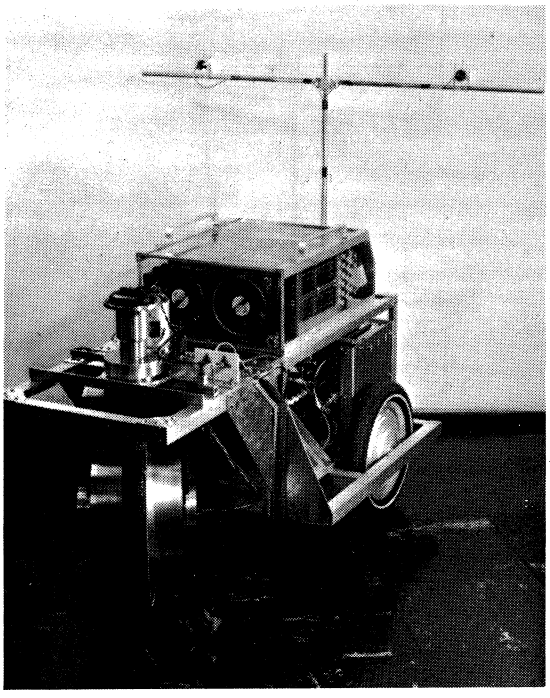


写真1　MELDOG MARK I の概観

図6に，その駆動特性を図7に示す．図7は負荷トルクを種々変えて与えた場合の速度制御特性の実験結果で，平地においては多少の凹凸があっても十分一定速度で走行できることがわかる．

4.1.2　操舵制御部

操舵時の必要トルクを小さくし，操舵性を良くするために，操舵軸は車輪と地面の接点を通る構造とした．駆動は直流プリントモータをオンオフ制御し，減速機を介して前輪を操舵している．軸の回転は光学式のアブソリュートエンコーダにより取り出し，2進コードでディジタル的に与えられた指定値と一致するように操舵角を制御する．図8に制御のブロック図を示す．図9は操舵角を一定に固定して10m 走行させ，その時のコースずれを測定した結果である．指令値の下位1〔bit〕当り，±0.5〔m〕ほどのコースずれであり，その繰り返し精度は±0.3〔m〕に収まっていることがわかる．なおディジタル型の回路としたのは安定性を重んじたためである．

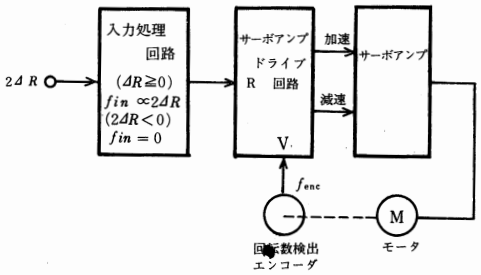


図6　速度制御部

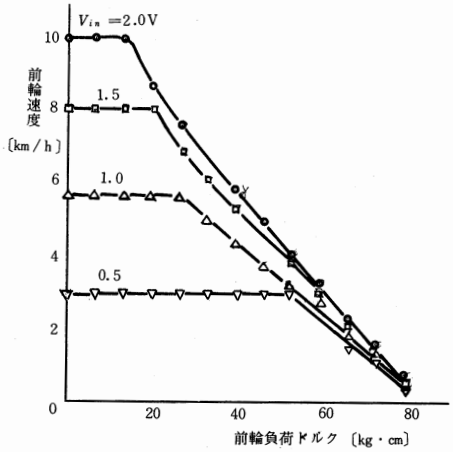


図7　負荷特性

4.2　人間とロボットのコミュニケーション

実際の盲導犬ではハーネスと呼ばれる一種の手綱で人と結ばれ，人の誘導や情報のやりとりが行なわれる．しかし盲導犬を機械で置き換えた場合には，同様な方式を採ることは機械の持つ固さやロボットの制御が難しくなるなどの点から不都合である．

そこで，機械的結合にかわるものとして，超音波を利用した非接触の誘導方式を実現した．写真2に人とロボットの位置関係と実験状況を示す．写真中，人とロボットを結ぶコードは相互の情報伝達に使うコミュニケーションコードである．写真のように実際の盲導犬の場合とは多少異なり，人をロボット後方に誘導する．図10(A)に示す様に，人に取り付けた超音波発振素子から発した超音波をロボットに取り付けた二つの受信素子で受信し，到着までの時間から三角測量により，人のロボットにたいする相対位置を計測する．この測定により人の誘導を進行方向の誘導（人間・ロボット間の距離を一定に保つようロボットの速度を制御する）と，左右方向の誘導

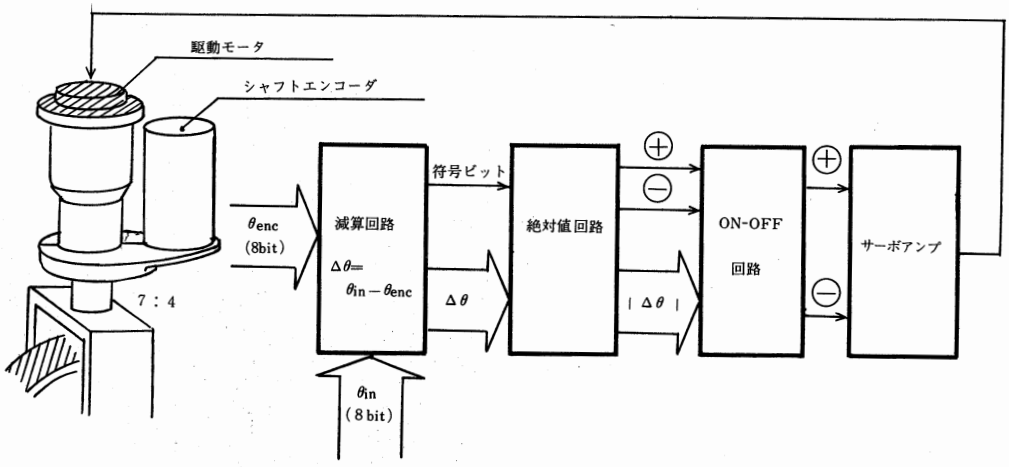


図8　操舵制御部

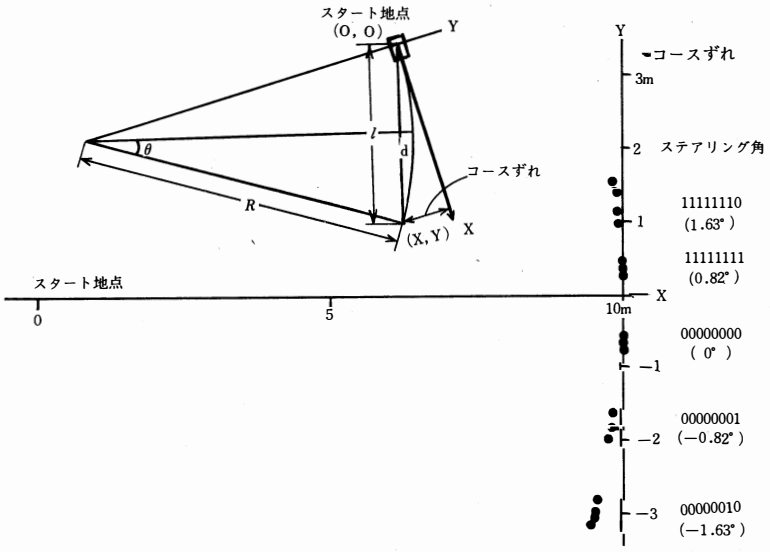


図9　コースずれの評価

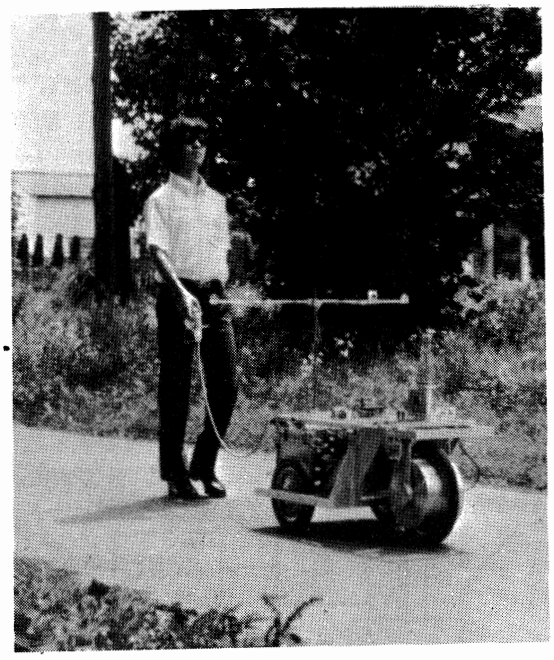


写真2　MARK I による実験

（ロボット後方に設定した歩行領域，図10(B)外に人が出た場合，それにたいする警告を盲人の残存機能を制限しない方式で伝達する）の二つに分けて行なう．この機能を持つ装置をここではマスターガイドと呼ぶ．

4.2.1　マスターガイドの構成

ロボットから発せられた40〔kHz〕のパルスはコミュニケーションコードを通り，盲人のベルトに取り付けられた送信素子で超音波パルスとなる．送信されたパルスが左右受信素子へ到着するまでの時間から，r_1，r_2を測定する．a，r_1，r_2 から次式で R，θ_1，θ_2 に関する情報を得る．

$$\begin{cases} R \fallingdotseq (r_1 + r_2)/2 \\ \cos\theta_1 = (a^2 + r_1^2 - r_2^2)/2r_1a \\ \cos\theta_2 = (a^2 + r_2^2 - r_1^2)/2r_2a \end{cases}$$

したがって，R と基準値との偏差を利用して R が一

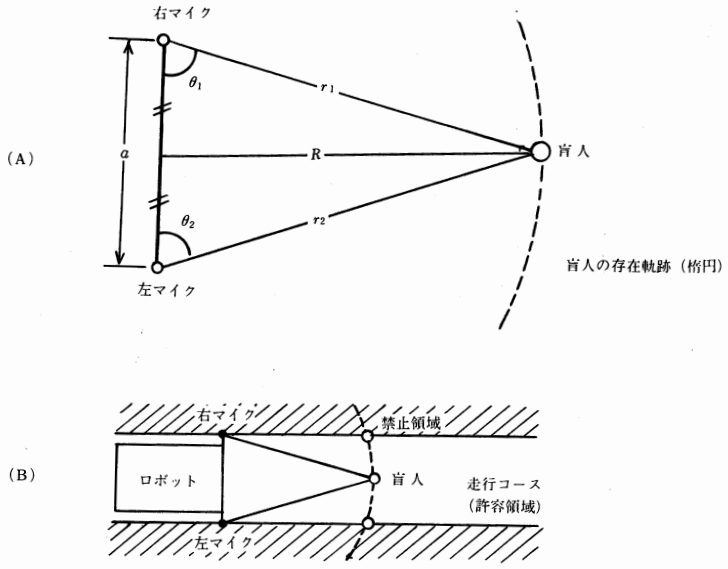


図10 (A)位置測定関係図 (B)走行コースと禁止領域

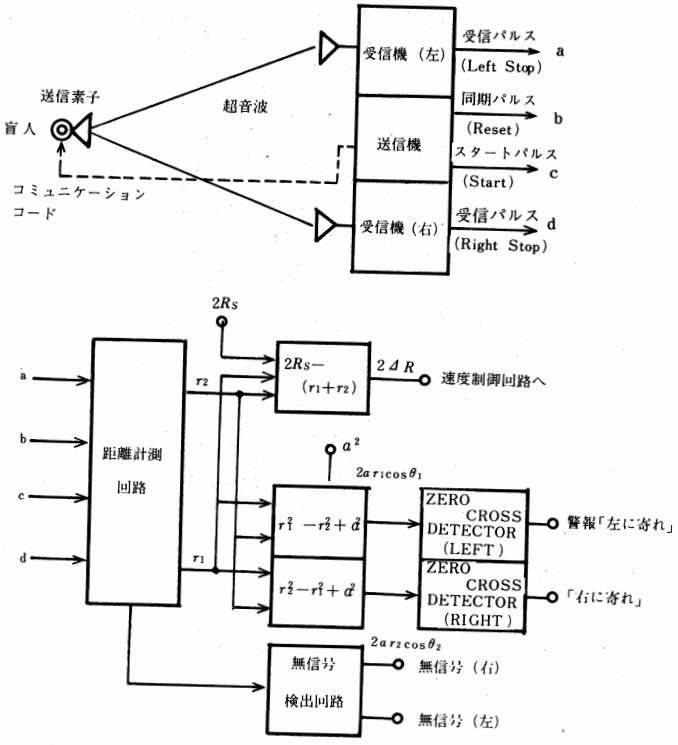
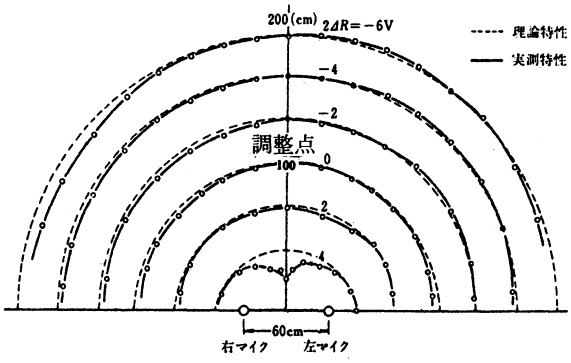
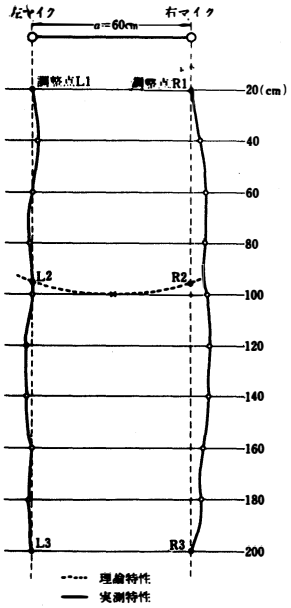


図11 マスターガイドの構成図

定となるように進行方向の制御を行ない，$a^2+r_1^2-r_2^2<0$，$a^2+r_2^2-r_1^2<0$ のそれぞれに応じて左右方向のずれの警報を盲人に与えればよい．この回路の構成を図11に示す．実際の回路はディジタル測定した r_1，r_2 をD/A変換してアナログ IC を使い，実時間処理を行なっている．また図11の無信号（左，右）は盲人のロボットにたいする向きが悪く，超音波パルスが受信できないことを盲人に知らせるためのものであり，これにしたがっ



(A)距離測定



(B)位置測定

図12 マスターガイドの特性

て盲人が左右に体を転回して正しい位置を保つ.

4.2.2 マスターガイドの実験結果

マスターガイドの動作の第一として，人間とロボット間の距離測定の結果を 図12(A) に示す．これは一定間隔として1〔m〕を設定し，1〔m〕との距離の偏差が一定値となる点を送信素子を移動して求めたもので，図の点線の理論特性とは近距離における0〔deg〕付近のへこみと，±90〔deg〕付近のずれを除けばよく一致していることがわかる.

次に図12(B)にロボット後方の歩行領域の評定結果を示す.これは図中の調整点 $L_1 \sim L_3$, $R_1 \sim R_3$ で理想的になるように回路を調整した場合の結果で,最大誤差7〔cm〕以内に領域を設定でき，実用上十分であることを示している.

4.2.3 人の誘導実験

移動本体，マスターガイドを総合して実際の人の誘導の屋外実験を行なった．写真2に示した位置関係でロボットは人の歩行に合わせて一定間隔を保って走行し，また人が歩行領域外に出た場合，コースずれ警報が発せられるのが確認できた．その警報は湿式表面電極による電気刺激を腕に与えることで実験した．写真3は人がゆっくり歩いた時のロボットの速度と偏差2△Rの記録である.人がスタートしたあと，2△Rがプラスの値になるとロボットは走りはじめ,定常走行時2△Rは10±5〔cm〕程度に保たれ,ロボットの速度はほぼ3〔km/h〕となり，一定間隔が保たれている．この時，人とロボットの速度は一致している.

5. おわりに

人の機能を機械で倣ねることは人類の永遠の興味であり，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．本研究は機械は機械としての特徴を生かしながら全体のシステムとして動物，特に盲導犬の持つ，“服

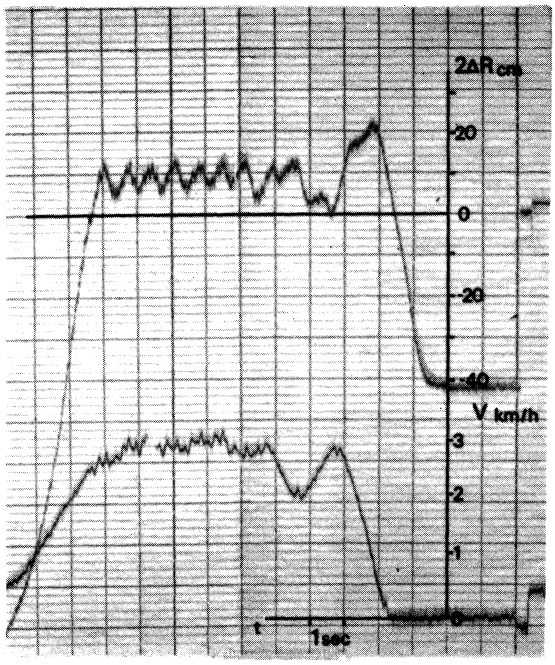


写真3 速度追従実験結果

従”と“かしこい不服従”の機能へ一歩でも近づこうとする努力であり，いままさにその緒についたところである．

マイクロコンピュータの応用される場面はこの研究においても，むしろこれから指数関数的に増大するであろうし，逆い言えばマイクロコンピュータなしでは，この種の研究は不可能であるとも言えそうである．今後また機会があれば現在進行中の MARK Ⅱ を利用したランドマークによる誘導実験について紹介してみたいと考えている．

本研究は工業技術院機械技術研究所で行なわれているものであり，著者以外に以下に示す多くのメンバーの共同による研究成果の一部であることを述べ，また末筆ながら日頃多大の御支援をいただいている本研究所本田冨士雄所長，木村誠システム部長，清水嘉重郎企画室長，電気通信大学　藤村貞夫助教授，合田周平助教授，早稲田大学，加藤一郎教授に厚く御礼申し上げ筆を置く．本研究のメンバー：阿部稔メカニズム課長，小森谷清技官，谷江和雄技官，谷和男技官（工博），大野武房技官，細田祐司（電通大），松田啓（電通大），清水知和（電通大），中島英博（早大）他多数

＜参　考　文　献＞

1) 渡部，“新しいマイクロコンピュータ，LSI－11，”インターフェース，p. 38—46，DEC.，1975.

2) 舘ら，“盲導犬ロボットの研究第3報”，第17回SICE学術講演会予稿，pp. 631–632，1978.

3) 舘ら，“人と一定間隔を保つ移動ロボット制御の一方法”，バイオメカニズム 4，pp. 279–289，東大出版会.

4) 田口ら，“4足移動機械の静力学的解析”機械技術研究所報告第85号，1975.

5) 小森谷ら，“盲導犬ロボットの研究第4報”，第17回SICE 学術講演会予稿，1978.