

移動ロボットの自律誘導の一方法*

小森谷 清** 館 暲** 谷江和雄**

ABSTRACT

This paper presents a navigation method which enables a mobile robot to perform autonomous locomotion. And the feasibility of this method was demonstrated using experimental hardware, a prototype robot with ultrasonic sensors.

This method uses simple shaped objects, such as poles and flat surfaces of walls selected from the environment, as landmarks and a map indicating the relations of these landmarks. The robot moves from a given point to another along a designed path using its own sensors. At each point it measures the position of natural objects selected as landmarks and corrects its path.

The basic problems encountered in realizing this method are discussed. They are path design which connects two points in the environment, control of a mobile robot to move along its path, measurement of objects' positions using an ultrasonic sensor and correction of error from its designed path.

A basic technique necessary to navigate a mobile robot is the ability to control it so that it follows a designed path accurately. Because of the lack of absolute position information, a mobile robot needs to get accurate position data from its surroundings. This method uses natural objects to gain such information. And it has the merits that it can reduce the equipment investment to the environment to supply position data and that it can simplify the object detection problem by giving information about objects.

Key words : autonomous locomotion, navigation, mobile robot, landmark, ultrasonic sensor



本論文では移動ロボットの自律移動を実現するひとつの誘導方式を提案し、その際の問題を試作ハードウェアを用いて実験的に検証する。

この方式は、環境に存在する柱や壁面の平面部など、簡単な形状をもつ対象物をランドマークとして選択し、これらランドマーク、及びその位置関係を示すマップを利用する誘導方式である。ロボットは与えられた地点から他の地点へ内界センサを利用し、設定された経路に沿って移動する。各地点においてはランドマークとして選択された対象物の位置を測定することによって経路からの誤差を知り、それを修正する。

この方式を実現するための基礎的問題として、2地点間を結ぶ経路設計とそれに沿うロボットの移動制御、及び超音波式センサによる対象物の検出と目標経路からの誤差修正法について述べた。

移動ロボットの目的地までの誘導には、目標経路に正確に沿う軌道制御が基礎となるが、基準となる固定点をもたない移動ロボットでは、環境から正確な位置情報を得る必要がある。ここで提案した方式は、環境に存在するものをこの目的に使用するもので、基準位置を示す目印を環境に敷設するための投資をなくせること、対象物の情報をあらかじめ与えておくことで、対象物の検出問題を簡単化できるなどの点に特徴がある。

1. はじめに

移動ロボットを目的地まで導く誘導技術は、移動機構

原稿受付 1984年4月3日

* A Method for Autonomous Locomotion of Mobile Robots

** 機械技術研究所

の構成、及びその制御とならんで、自立的な移動の実現にあたって欠くことのできないものである。この目的のためには、設定された経路を正確にたどる技術が基礎となる。ところが、空間に対して基準となる固定点をもつマニピュレータでの手先の軌道制御とは異なり、移動するために固定点がとれない移動ロボットの経路制御では、

目標経路からの誤差の累積を防ぐため、何等かの方法で環境から基準点を得る必要がある。たとえば今日、工場や倉庫などで実用されている無人搬送車の誘導では、誘導ケーブル¹⁾や反射テープ²⁾が基準となっている。

しかし、これらの方式では常時基準を得られるが、経路が固定されるために移動に柔軟性を持たせにくいこと、経路設定に要する投資が大きくなるなどの問題を持っている。また、車輪に内蔵されたエンコーダなど、内界センサによる誘導は基本的に累積を防ぐことができず、この方式は誤差の許される近距離の誘導のほかは単独では使用できない。一方、自らのセンサによる環境認識から基準点を得ながら移動する、より自立性の高い移動方式^{3)~6)}は理想的ではあるが、パターン認識技術の現状から実用にはほど遠い。

こうした観点から、これまでに筆者らは長方形の単色のランドマークと呼ぶ目印を路面に敷設し、その配置状況を一種の環境情報(マップ)として与えるとともに、光学式センサでランドマークを検出し、走行誤差の修正と、位置の認識に用いる誘導方式⁷⁾を提案した。これは内界センサを利用したランドマーク間の移動制御と、ランドマークを基準点とする目標経路からの走行誤差修正とを組み合わせることで、両者の問題点の解決を図ろうとするものである。しかし、簡単な形状のマークといえども、人工的なものを用いることは環境への投資を依然必要とする。

そこで、本論文ではこの離散マーク方式を発展させ、人工マークのかわりに環境に存在している構造物のなかから円柱形状や平面部を目印として選択し、利用する方式を提案し、内界センサとして操舵角と車輪の回転角を検出するエンコーダをもち、外界センサとして超音波センサを備えた試作ロボットを用いて実験的に検証を試みる。特にこの方式で、重要となる内界センサを利用する2地点間の経路誘導と超音波を用いる円柱や平面部をもつ対象物の検出法、及びそれによる走行誤差の修正について検討する。

2. 離散マークを用いる誘導方式

離散マークを用いる誘導方式は、離れた地点ごとに基準点となるマークを想定する方式である。具体的には通路の交差部など移動環境の要所に経路の通過点を仮定し、さらにその近傍に目印となるマークを設定する。そしてこれら通過点とマークについての情報をマップとして移動ロボットに与える。

通過点の情報としては、その番号とともに環境に設定した固定座標系に対する位置座標、及び通過点での経路のとりうる方向を示すベクトルを与える。さらに、経路

を構成する隣接通過点番号を加える。ここで経路の方向を与える意味では、狭隘な部分の通過のためやマークの検出時に、その検出を容易にするために、移動機械の方向を規定しておくことが必要と考えられるからである。

マークについての情報は、円柱状の柱や建物の壁面の平面部など、マークの属性と固定座標系に対するその位置座標である。

誘導の手順は、ある通過点として与えられる目的地までの通過点列を、まずマップ内の探索から求める。このような樹状の探索で得られる複数の経路候補から、ひとつの経路の選択は適切な評価基準を与えて行う。通過点間の経路は移動開始前に設計し、内界センサを利用してそれに沿う制御を行う。各通過点ではマークの存在が予想される方向を搭載型センサで走査し、得られる情報からマークを同定後、相対位置情報をもとに走行誤差を求め、次の通過点への経路を再設計して走行誤差をキャンセルしていく。

なお、この方法は通過点間に新たな通過点を適切に与えることで、経路を局所的に変更することを許し、障害物回避など自由度の大きい移動実現の可能性を持つ。

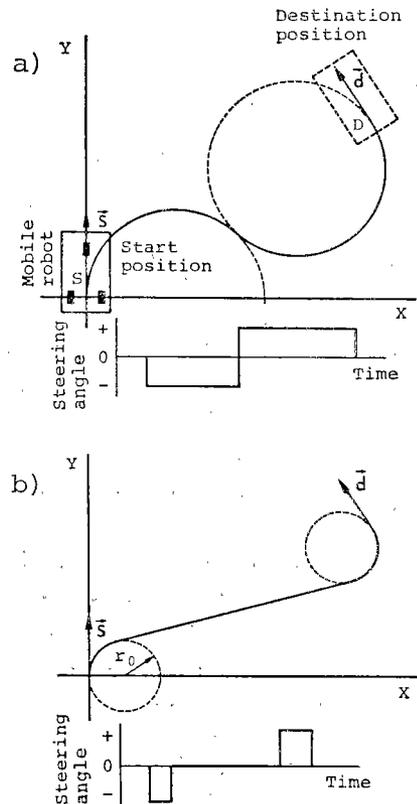


Fig.1 Basic path design

3. 通過点間の経路誘導

3.1 2 地点間の経路設計

2 地点間の経路設計は Fig.1 に示すように、出発点 S でベクトル \vec{s} の方向をもつ移動ロボットを、目標点 D にベクトル \vec{d} で示される向きに移動する経路の設計が基本となる。

ところで、車輪型移動ロボットは車輪配置によって移動経路に制約が生じる。たとえば、移動ロボットでよく用いられる左右 2 輪独立駆動方式では、両輪の回転方向、回転速度を制御することによって、最も自由に経路を与えることができるが、3 輪車機構や自動車のような 4 輪車では、前輪軸と後輪軸の交点を中心とする円弧が基本的な運動で、一般に位置と姿勢を独立に変えることができない。しかし、これらは前・後輪軸間距離をもつため、前者の左右独立駆動方式に比べて軌跡を精度よく制御しやすい。

さらに、Fig.1 に示した \vec{s} から \vec{d} の移動を考えてみると、前者ではまず位置を変えず、SD の方向に姿勢を変え D まで走行し、D で姿勢を \vec{d} に変えれば移動の制御は容易となり、最短距離の移動となる。ところが、姿勢の変更までを含めると移動に要する時間は長くなり、必ずしもこのような経路をとれない後者も、評価基準によっては前者におとるとはいえない。ここではこうした考慮から、軌跡を精度よく制御できる可能性をもつ後者の移動ロボットを対象に経路設計を考える。

さて、後者の基本的な軌跡は、前輪の操舵角を一定に保った場合の円弧である。したがって Fig.1 a) のように \vec{s} 、 \vec{d} にそれぞれ始点で接し、相互にも接する 2 つの円から経路を構成する。ここで 2 つの円の半径を等しくとれば、操舵制御は符号のみ異なる 2 つの操舵角を接点において切り換えればよく、簡単化することができる。しかし、 \vec{d} の配置に応じて操舵角が変わること、 \vec{d} が遠方になるに従い操舵切り換え時点の精度が低下すること、SD からの偏差が大きくなり、移動通路に制約がある場合に問題となるなど欠点をもつ。そこで Fig.1 b) のように経路を円弧・直線の 2 つから構成するように修正を加える。すなわち、 \vec{s} 、 \vec{d} の始点に各々接する半径 r_0 の円と、その共通接線とから経路を構成する。このとき、 r_0 に対応する操舵角を θ_0 とすれば、操舵制御は $\pm\theta_0$ 、0 の 3 つの値を走行距離を計測しながら適切なタイミングで切り換えればよい。また、 θ_0 は \vec{d} の位置によらず走行速度で決まる遠心力の下で、車輪と路面とのすべりが小さくなる値に選ぶことができる。ただし、 r_0 を小さく設定できれば、最短経路 SD からの偏差も小さくすることができる。

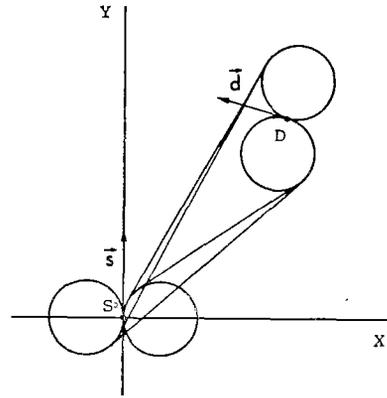


Fig. 2 Possible paths from S to D

次に操舵の切り換え時点の決定について述べる。Fig. 2 のように \vec{s} 、 \vec{d} に接する円は各々 2 個あり、それぞれの組み合わせについて共通路線は 4 本存在する。ところが 4 本のうち、 \vec{s} 、 \vec{d} の向きから可能となるものは 1 本に限られる。そこで 4 つの組み合わせの各々についてこの接線を求め、そのうちのひとつを選択すればよい。この選択には、周囲の環境と干渉を起こさないものを採用する方法も考えられるが、ここでは妥当な方法として、最短距離をもつ経路を選んでいる。操舵切り換え時点は円弧長と接線の線分長から求められる。以上のアルゴリズムで任意の \vec{d} への経路を作ることが可能となる。

ただし、この経路設計は走行系を理想化した場合で、実際には操舵系のおくれ、操舵制御の誤差、走行距離計測誤差で生じる操舵切り換え時点の誤差、慣性力によるすべり、機構的な寸法誤差など、いくつかの要因にもとづく誤差のため、Fig.1 b) の経路をたどることは難しい。ここでは、これら各種の誤差の中で、大きな割合を占める操舵系のおくれを修正することを試みる。その他の原因にもとづく誤差は、通過点でのマーク参照から修正するものとする。

Fig. 3 a) は操舵系の応答の理想状態と実際の場合とを示す。このように、実際には操舵角が目標値に達するまでの立ち上がり部分を含むため、操舵開始時点からの軌跡は円弧とはならない。このときの軌跡は、ここで対象とする移動機械の操舵角 $\alpha(t)$ に対する運動を示す次式を用いて求めることができる。

$$\beta(t) = \beta_0 + \frac{v}{l} \int_0^t \sin \alpha(t) dt \quad (1)$$

$$x(t) = x_0 + v \int_0^t \cos \{ \alpha(t) + \beta(t) \} dt \quad (2)$$

$$y(t) = y_0 + v \int_0^t \sin \{ \alpha(t) + \beta(t) \} dt \quad (3)$$

ただし、ここで v : 走行速度、 l : ホイールベース、 $\beta(t)$: 姿勢角、 $(x(t), y(t))$: 前輪接点 C の座標、添

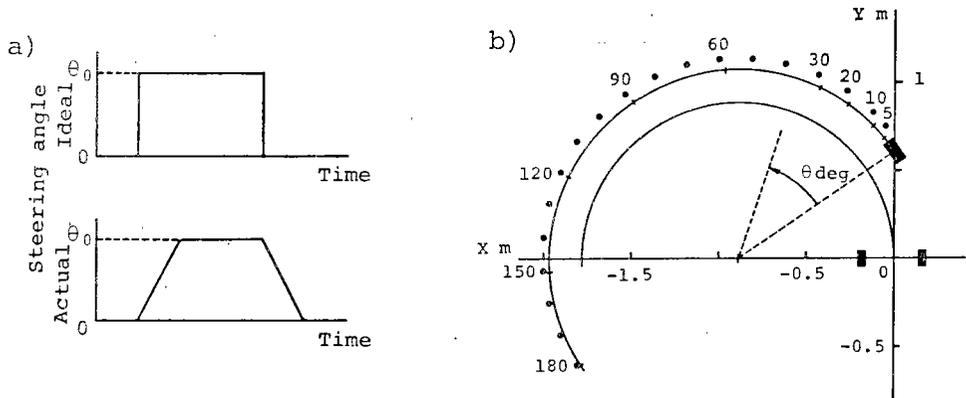


Fig. 3 Steering response and the position error from the basic path

字 0 は初期値を示す。

Fig. 3b) は操舵角 0 の状態から θ_0 切り, また 0 にもどして, 最終的に姿勢を θ 回転させたときの最終の C 点を θ の値に対してプロットしたものである。ただし, 操舵系の応答は Fig. 3a) のように仮定している。ここで姿勢角が θ 変化するのに要する時間を t_θ とすれば理想的な円軌道で姿勢を θ 変化する場合との誤差 $e(\theta)$ は次式となる。

$$\beta(t_\theta) = \theta \tag{4}$$

$$e(\theta) = \begin{bmatrix} e(\theta)_x \\ e(\theta)_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(t_\theta) - r_0(\cos\theta - 1) + l \sin\theta \\ y(t_\theta) - l(\cos\theta - 1) - r_0 \sin\theta \end{bmatrix} \tag{5}$$

この誤差を考慮するため, 前述の経路を Fig. 4) のよ

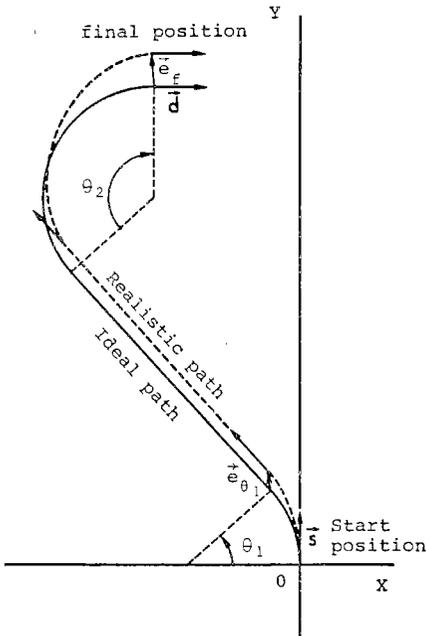


Fig. 4 Correction of the basic path

うに修正する。まず, 第 1 の曲線部分で姿勢角を θ_1 変化させ, 次に直線部分を移動し, さらに第 2 の曲線部分で θ_2 姿勢を回転する。ここで 2 つの曲線部分での誤差をそれぞれ $e(\theta_1)$, $e(\theta_2)$ とすれば, 最終的な誤差は次式で与えられる。

$$e_f = \begin{bmatrix} e_{fx} \\ e_{fy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e(\theta_1)_x + e(\theta_2)_x \cos\theta_1 - e(\theta_2)_y \sin\theta_1 \\ e(\theta_1)_y + e(\theta_2)_x \sin\theta_1 + e(\theta_2)_y \cos\theta_1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

この e_f はあらかじめ求められるので, 通過点を e_f だけ修正し, 経路設計を繰り返す, 通過点に誤差なく到達できる経路を求めることができる。なお, 以上の経路は, 次に述べる試作移動ロボットを想定して設計しているが, 左右 2 輪独立駆動方式などほかの車輪式移動ロボットでも利用可能である。

3.2 走行実験

走行実験に用いた移動ロボットの諸元を Tab. 1 に, 外観を Fig. 5 に示す。これは前輪駆動操舵型の 3 輪車構造でバッテリーを動力源としている。走行は前輪に取り付けられた DC モータの速度制御と, 前輪を鉛直軸まわりに回転させるデジタル位置制御の操舵系で行われる。2 つの後輪は独立に回転でき, 内蔵したエンコーダによる車輪回転角の検出から走行距離を計測している。これら走行系や後述の超音波センサは搭載したマイクロコンピュータ LSI-11 で制御される。

走行実験はオフラインで計算したコースデータにもとづき, 搭載したマイクロコンピュータで走行距離をチェックしながら操舵切り換えを行い, 目標点まで走行させ, 最終位置を計測する。Fig. 6 は一例として 3m 前方右向きに目標ベクトルを与えた場合の経路設計と誘導後の最終位置を示す。a) は理想的な経路とその経路データによる結果を示す。図示のように走行速度に従って目標点からのずれは大きくなっているが, その再現性は高いことが明らかとなった。b) は操舵系のおくれを考慮す

Table 1 Specification of a prototype mobile robot

Size :	length	0.94m
	width	0.555m
	height	0.625m
	wheel base	0.60m
	distance between rear wheels	0.337m
Weight :		69.2 kg
Drive :	front wheel drive and steer	
	computer control	
	drive motor	100 W
	steering motor	30 W
Power :	nickel-cadmium battery	12 V* 35 AH
Computer :	LSI-11	32 kW memory
		4 ch-digital I/O
		16 ch-ADC, 4 ch-DAC
		cassette tape (TU 58)
		terminal (Profort 801)

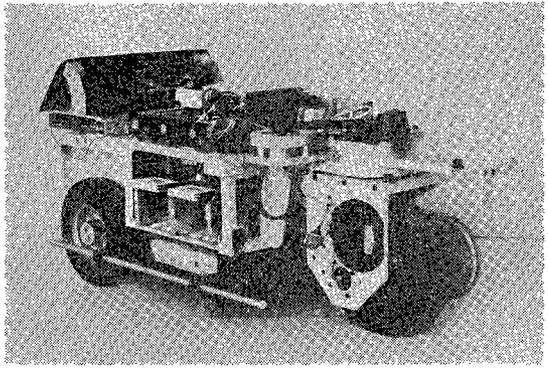


Fig. 5 A prototype mobile robot

クトルに誘導できることがわかる。

る Fig. 4 の点線に沿うよう制御した結果である。速度によって異なる位置に到達しているのがわかる。ただしいずれの場合も、最終の姿勢誤差は2度以下に納まっている。c) は収束計算により、最終位置に誤差なく移動できる経路設計時の結果を示す。収束のための繰り返し回数は5回以下である。速度によらずよい精度で目標ベ

4. 超音波式マーク位置計測手法

4.1 センサの構成と測定原理

センサの対象すなわちマークは、たとえば長方体状の什器や円柱状の柱など、鉛直方向には一様とみなせる柱状体を想定し、その断面形状は円ないしは凸多角形であるとする。この仮定からセンサは平面内で対象物を検出

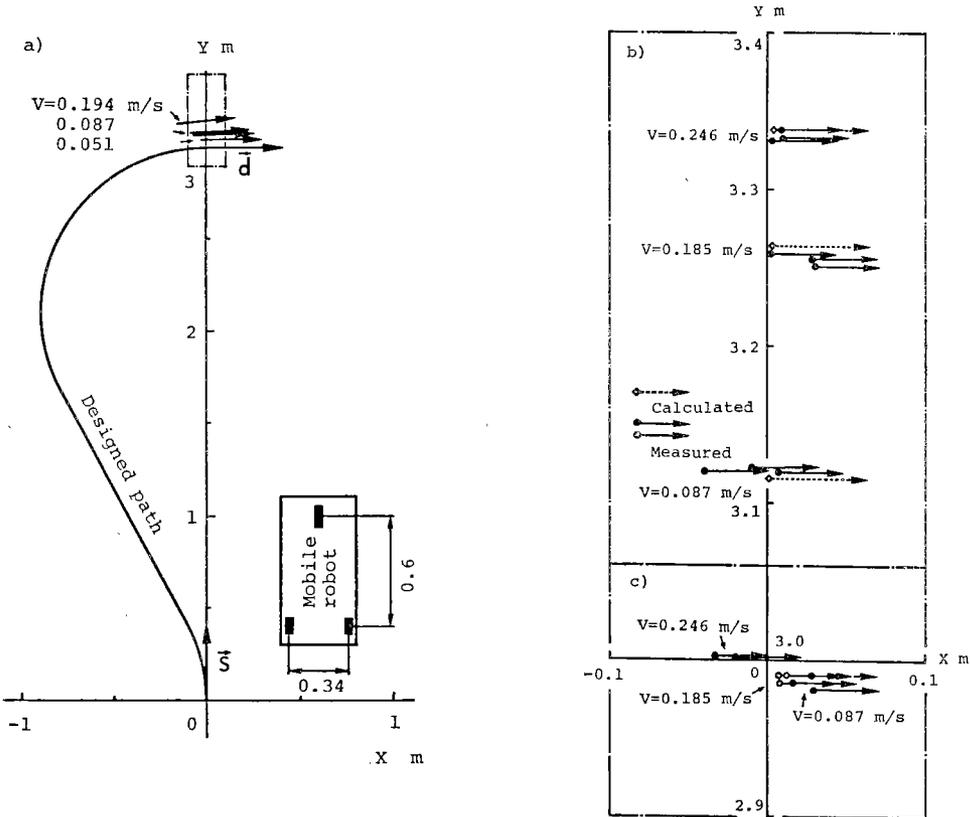


Fig. 6 Experimental results of path following

a) using the basic path design b) using the corrected path design c) using the final path design

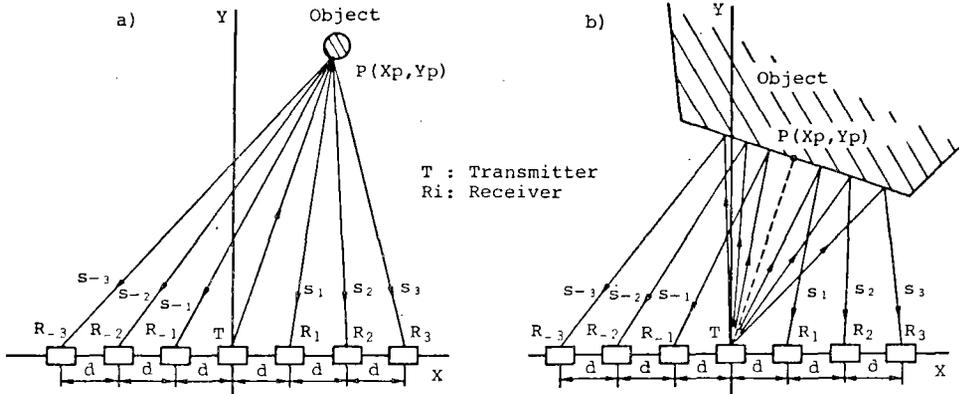


Fig. 7 Construction of an ultrasonic sensor and two-type objects

すればよく、Fig. 7のように送受信素子を配置する。中央のTは送信素子で、その左右には受信素子 R_i を直線上に等間隔に配列する。各送受信素子の軸はセンサの軸に直角、かつ互いに平行になるように取り付ける。各 R_i はTから送信された超音波の対象物からの反射波を受信し、送信から受信までの経過時間から距離 s_i を得る。これらの s_i から、対象物の位置 (x_0, y_0) を求めるには対象物の形状を知らなければならない。ここでは簡単化のため対象物を半径 r の円と仮定するが、正確に r とその中心位置 (x_0, y_0) とを求めるには複雑な演算を要すること、また r は s_i に含まれる誤差からも精度よく求めることが難しいことがわかる。そこで Fig. 7 a), b) に示すように、Tに最も近い物体上の点 $P(x_p, y_p)$ とTPの長さ S を求めることを考える。

(a) 対象物を半径 0 の円すなわち、点と仮定し、以下の式から S と (x_p, y_p) とを求める方法である。

$$s = \frac{i \cdot j(i-j)d^2 - (j \cdot s_i^2 - i \cdot s_j^2)}{2(i \cdot s_j - j \cdot s_i)} \quad (7)$$

$$x_p = \frac{(i^2 s_j - j^2 s_i)d^2 - s_i s_j (s_i - s_j)}{2d(i \cdot s_j - j \cdot s_i)} \quad (8)$$

$$y_p = \sqrt{s^2 - x_p^2} \quad (9)$$

ここで i, j はセンサの番号、 d は素子間隔、 s_i はTから対象物表面を介して R_i までの距離を示す。 (x_p, y_p) は k 個の受信素子を用いた場合最大 kC_2 個得ることができる。そこで信頼性や精度を高めるため平均化処理を加える。平均化には受信強度を重みとする方法、また三角測量の原理で長い基線の場合、精度が向上することから受信素子間隔を重みとする方法とが考えられる。たとえば受信素子 R_i, R_j の受信レベルを I_i, I_j とすれば i, j ペアに対する重みは $I_{ij} = I_i \cdot I_j$ として $W_{ij} = I_{ij} / \sum_{k, l = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm n} I_{kl}$ 、また、後者の重みは $W_{ij} = |i-j| / \sum_{k, l = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm n} |k-l|$ となる。この2種をさらに平均すれば物体位置は、

$$x_{pm} = \alpha(\sum W_{Iij} \cdot x_{p_{ij}}) + \beta(\sum W_{ij} \cdot x_{p_{ij}}) \quad (10)$$

$$y_{pm} = \alpha(\sum W_{Iij} \cdot y_{p_{ij}}) + \beta(\sum W_{ij} \cdot y_{p_{ij}}) \quad (11)$$

$(\alpha + \beta = 1)$

で推定される。ただし、和はすべての i, j ペアについてとる。

(b) 対象物を半径 ∞ の円、すなわち直線と仮定すると各 R_i は、壁面に対するTの鏡像の位置から反射波を受けることになり、次式から S と (x_p, y_p) を求めることができる。

$$(2x_p - i \cdot d)^2 + (2y_p)^2 = s_i^2 \quad (12)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{2n} \left(\sum_{i=-n}^n s_i^2 - \sum_{i=-n}^n i^2 d^2 \right)} \quad (13)$$

$$x_p = \frac{1}{2n(n+1)} \left(\sum_{i=-1}^{-n} s_i^2 - \sum_{i=1}^n s_i^2 \right) \quad (14)$$

$$y_p = \sqrt{s^2 - x_p^2} \quad (15)$$

また、直線の方法は $-x_0/y_0$ と求まる。

4.2 数値計算

以上、2つの演算方式で受信素子の個数、対象物の曲率、各素子の測定距離の誤差が、対象物の位置検出に及ぼす影響を数値計算によって検討した。

対象物の位置は、超音波素子の指向性の考慮から厳しい条件として、Fig. 8のようにY軸と20度をなす直線上に選び、長さはセンサ幅を2として正規化して前方 $y=20$ まで検討した。さらに対象物の曲率として演算の仮定とは大きく異なるものを選択した。すなわち、方式 a) では直線を、方式 b) では半径 $r=0.1$ の円を対象物として選択した。

以上の条件のもとでまず、各素子の測定距離に誤差がないものとして素子の個数の影響を調べた。結果はいずれの方法においても素子数の増加に伴い、対象物の位置検出誤差は減少するが、片側の素子がひとつであっても、 x 方向の誤差は測定値の約0.8%以下、 y 方向は約0.6%以下で、数値的にはほとんど差はみられない。次に各素

子の測定距離に誤差がある場合を検討するため、一様な密度分布をもつ乱数にもとづいて誤差を与え、検出位置の平均値と標準偏差を求めた。ここで誤差の最大振幅は 0.0241 の整数倍 (n) を与えているが、これは後述のハードウェアで用いる超音波の半波長に相当する。Fig. 8 は片側の受信素子 4, $n=1$ の場合の結果のうち標準偏差を 10 倍にして表示したものである。a) は方式 a) を、b) は方式 b) の結果を示している。a) は近距離において b) より標準偏差が小さく、遠方では b) より大きくなることを示しているが、両者の間にはほとんど差はなく、 $y=20$ での a) 方式で x 方向が、測定値の約 1.9% 以下、 y 方向が約 0.25% 以下である。

4.3 試作装置

以上の原理にもとづく超音波式マーク位置計測手法の性能評価のため、Fig. 9 に示すハードウェアを試作した。Fig. 10 a) は装置のブロック図、同図 b) はタイミングチャートである。40 kHz の共振周波数をもつ送信素子 EFR-OSB 40 K 2 を 1 個、受信素子 EFR-RSB 40 K 2 (松下通工製) 8 個を 5 cm 間隔に配列し、センサを構成した。信号の制御はパラレルインタフェースを介してミニコン (PDP-11/44) で行う。このインタフェース部分をマイクロコンピュータ用のものに置き換えると、試

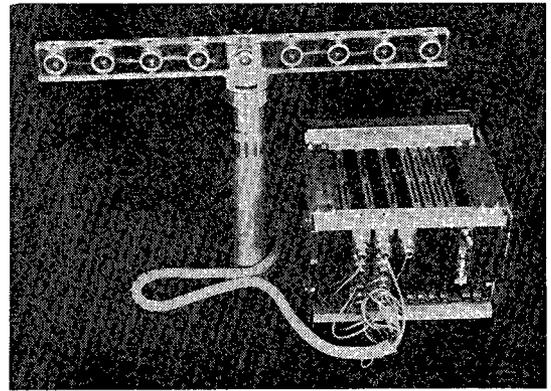


Fig. 9 A prototype ultrasonic sensor

作装置を移動ロボットに容易に搭載することができ、またミニコンで用いた同一のソフトウェアをその上でも使用することができる。装置の動作はまず、パラレルインタフェースの出力バッファからスタートパルスを出し、40 kHz の搬送波のバースト波を作り、送信素子に送る。同時に時間測定用のカウンタをリセットする。受信素子で検出した反射波は増幅・バンドパスフィルタリングを 2 度行い、検波後、コンパレータにより時間測定用カウンタのストップ信号を作る。時間測定用クロックは 226.7 kHz のパルス波であり、12 bit のカウンタで約 3 m までの距離測定が可能である。ストップ信号の生成部では、送信波の直接波による誤動作を防ぐために、送信後一定時間の不応期を設けている。原理的に反射波のうち、最近距離にある物体からのものが計測されるが、反射波が得られないときには、カウンタのオーバーフローでクロック入力を切る方法をとっている。送信後 20 msec 経過後、計算機へ Ready 信号を送り、計算機はマルチプレクサを切り換えながら順次カウンタ内容を読み出し、以後の処理はソフトウェアで実行し、物体位置を求めている。

4.4 位置測定実験

位置測定実験に先だち、予備実験として各素子の測定距離の較正、実時間性のチェックを行った。測定距離の較正には、21 cm 四方の金属平板を対象物として送信素子軸上の数ヶ所に置き、各チャンネルで得られたデータと実際の伝送距離を一次関数で近似して較正した。実時間性のチェックも同一の対象物を用い、同様に送信素子前方で直線運動をさせ、オンラインで位置測定を行いながら、PSD を内蔵した位置計測装置である SELSPOT SYSTEM で、横方向から対象物に取り付けた発光素子の位置を測定し、両者の結果を比較した。運動速度は約 0.3 m/sec で行ったが、十分な応答性と精度が得られた。

次に位置測定実験では、対象物として発泡プラスチックの円柱 ($\phi 16 \times 23$ cm) をその軸を垂直に支持して用

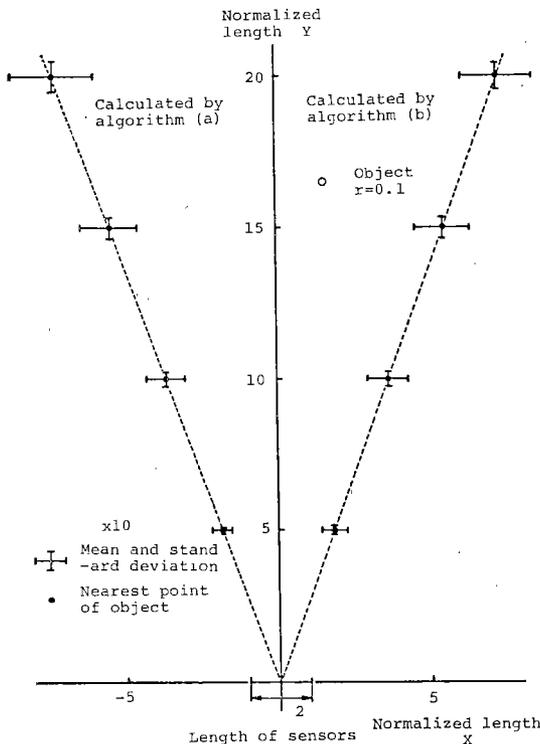


Fig. 8 Simulation of position measurement using the ultrasonic sensor

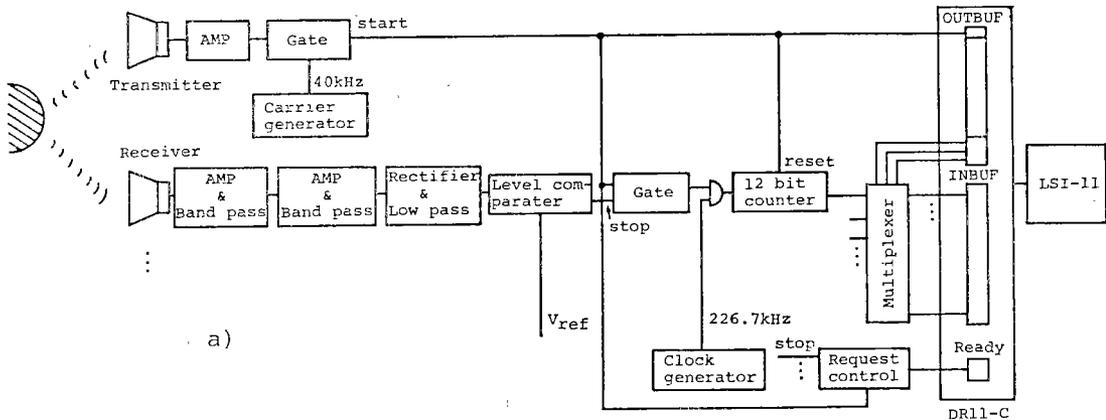


Fig. 10 a) Block diagram of the ultrasonic sensor

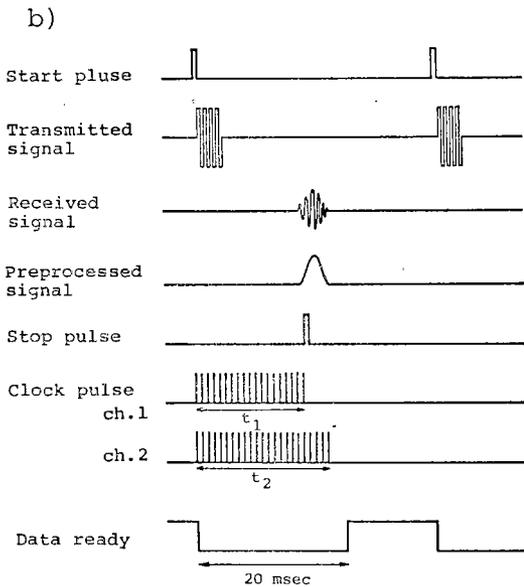


Fig. 10 b) Timing chart of the ultrasonic sensor

い、センサの前方を2次元的に移動し、位置測定を行った。ただし (a) の方法の平均化のうち、信号強度を重みとするものは、何らかの方法による AD 変換が必要となり、装置が複雑化してしまうため、ここでは時系列データを採用して、分散の小さいチャンネルを選び、受信素子間距離を重みとする平均のみを用いた。Fig. 11 a) は平均化の効果を示す。図中黒丸は各センサペアの測定結果であり、×印が平均後の物体位置を示す。図示した2ヶ所とも+印の真の位置に近い。Fig. 11 b) はセンサの指向性から定まる検出領域内での精度を調べた結果である。+印が真の位置、黒丸が測定位置である。図から明らかなように、誤差は遠方に行くに従い増大はしても、幅 1 m, 2.5 m 前方までの範囲においては 10 cm

程度に納まっている。

一方、b) の方法での測定結果を Fig. 11 c) に示す。この場合も a) とほぼ同様な結果が見られ、誤差は図中の測定範囲で 10 cm 以内になっている。なお、円柱対象物の位置測定での対象物の位置は、表面上のセンサへの最近点である。

5. 超音波式マーク位置計測装置による走行誤差修正

環境に存在する物を利用する走行誤差の修正法として、円柱状対象物を 4.1 のセンサで測定し、移動によって生じる走行誤差検出に利用する方法について述べる。

Fig. 12 は測定方法を示す。相対位置演算を容易にするため、測定時の走行経路は直線とし、また測定精度を高めるための複数の測定地点は、経路上に適当に定めた $o-xy$ 座標系の原点に対して対称にかつ等間隔に選び、各地点から対象物までの最短距離 s_i を測定する。ここで $O-XY$ 座標についての対象物の位置 (X_0, Y_0) 及び半径 r は、環境情報の一種としてあらかじめ与えられる。この r を用いると $o-xy$ 座標に対する与象物の位置 (x_m, y_m) は次式から得られる。

$$x_m = \frac{1}{2n(n+1)d} \left\{ \sum_{i=1}^n s_i^2 - \sum_{i=1}^n s_{i+1}^2 - 2r \sum_{i=1}^n (s_i - s_{i+1}) \right\} \quad (16)$$

$$y_m = \sqrt{\frac{1}{2n} \left\{ \sum_{i=1}^n (s_i + r)^2 + \sum_{i=1}^n (s_{i+1} + r)^2 \right\} - \frac{1}{6} (n+1)(2n+1)d^2 - x_m^2} \quad (17)$$

ただし、 n は o の片側の測定点の数である。

前述の超音波式マーク位置計測装置の性能を調べるため、実験を行った。対象物には半径 0.175 m, 高さ 0.43 m の紙製の円柱を用い、3.2 で述べた移動ロボットに搭

載した超音波センサで測定した。Fig. 13 のように、対象物は 走行経路左方約 1 m 離れた位置に置き、Y 軸の正の方向に走行しながら 0.5 m にわたって 40 点 ($n=20$) 測定し、その結果から推定した出発地点を真の出発地点とあわせて 3 種、図に示している。このように比較的簡単なセンサでも、2 cm の誤差内で位置測定が可能であった。

しかし、ここでは走行経路が Y 軸に平行であるという情報を使用しているが、一般には経路の方向も未知で、 (X_0, Y_0) と (x_m, y_m) とからだけでは、移動体の O-XY 座標系に関する位置は決定できず、Fig. 12 に示す対象物を中心とする円弧上に、たとえば直線経路の開始点 S 点の存在が推定されることになる。

次に、この破線上での S の位置の決定法を考察する。

i) 対象物をひとつではなく 2 つ以上選び、各々に対する S の存在する円弧を求め、それらの交点として S の位置を決定する。ただし、複数の対象物を同時に測定できるように選ぶのは実際的ではない。

ii) S 点に至る経路走行における 走行距離 をパラメータとする操舵角情報から S 点到達時の方向を推定し、測定結果を満足するよう S の位置を定める。この方法は操舵角情報から位置・姿勢を推定する際の誤差が問題となる。

iii) ジャイロコンパスなど方位を決定できるセンサ

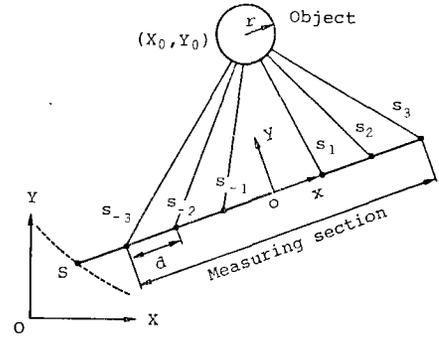


Fig. 12 One method to measure an object as a mark

を併用して、S 地点での走行経路の O-XY 座標系での方向を与え S の位置を決定する。比較的近距离の移動においては、レートジャイロ等でも十分の精度で方向の検出が可能で、この方法が実際的と考えられる。

以上、対象物測定にもとづく移動体の現在位置の決定にはいくつかの方法が考えられるが、測定の結果得られる走行誤差は、次の目的地までの経路を新たに設計することによって修正できる。

6. 結 論

移動ロボットの誘導法として離散マークを用いる方式を提案し、そのために必要な 2 地点間の経路誘導、及び

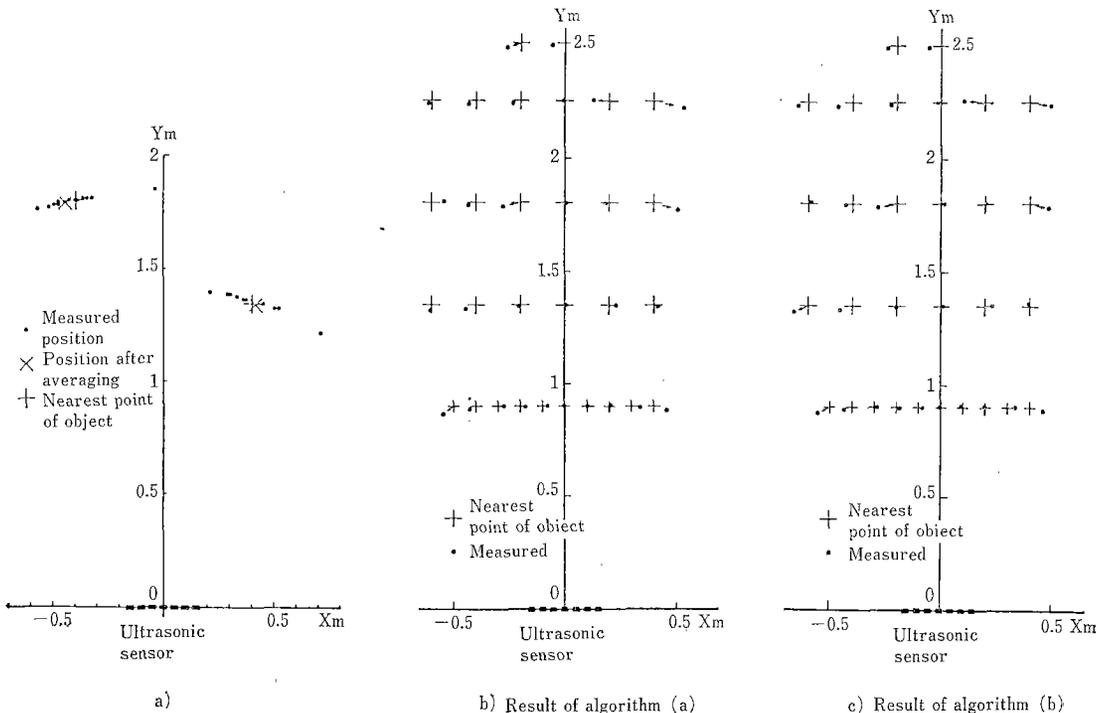


Fig. 11 Experimental results of position measurement using the ultrasonic sensor

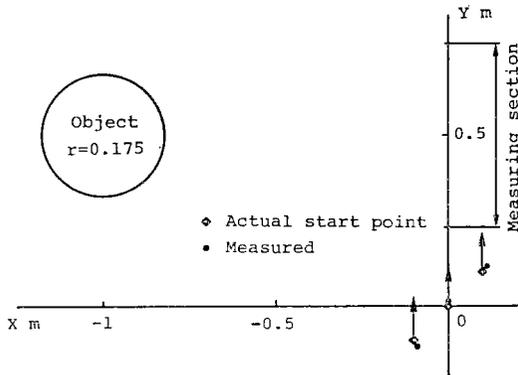


Fig. 13 Experimental results of the error detection from the designed path using an object as a mark

環境に存在する構造物の円柱部や平面部分を目印として利用するためのマーク位置計測手法について述べ、それを利用した走行誤差検出法を提案した。ここではセンサの対象を円柱と平面としたが、これらの形状は環境に通見いだされるもので、十分利用可能なものである。また、センサとして超音波式のかわりに光学的な方法の利用もむろん可能で、いずれの場合でもこの誘導方式の考え方に変わりはない。

目印として円柱状対象物の使用では、ジャイロコンパスなど方位を決定できるセンサの併用が理想的であるが、目印として壁面など方向の測定が可能なものを利用すれば、超音波式センサのみでも、本稿で述べた内界センサ

を用いる経路誘導と組み合わせて、柔軟な移動が実現でき、実際、建物の通路を使用し、曲がりを含む数 10m のループ状経路の誘導実験にも成功している。

最後に、本研究をまとめるにあたっては、日頃お世話いただいている機械技術研究所曾田長一郎機械部長、阿部稔自動車公害安全部長、藤川昭雄メカニズム課長とメカニズム課諸氏に心から感謝したい。また、実験に用いた移動ロボットの製作にあたられた元ダイホー株式会社林 雅則氏に厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) Y. Oshima et al., "Control System for Automatic Automobile driving", Proc. of IFAC, pp. 347-357, 1965
- 2) 米倉, 他, "光学誘導形地上搬送ロボット「ホイバーサ」の開発", 日立評論, Vol. 75, No. 10, pp. 23-28, 1975
- 3) G. E. Forsen, "Processing Visual Data with an Automator Eye", Pictorial Pattern Recognition, pp. 471-502, 1968
- 4) 野崎, "障害物の認識機能をもつ自動車の自動操縦", 計測自動制御学会論文集, Vol. 13, No. 5, pp. 475~481, 1977
- 5) 掛川, 金山, "自立ロボット「山彦9号」における自動地図作成", 第1回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 199-202, 1983
- 6) 松島, 他, "触覚情報による未知環境内の経路探索について", 知能移動ロボットシンポジウム講演論文集, pp. 65~70, 1982
- 7) 館, 他, "ランドマークとマップを用いる移動機械の誘導法", バイオメカニズム 5, pp. 208-219, 東大出版会, 1980



小森谷 清
(Kiyoshi KOMORIYA)

昭和 26 年 7 月 7 日生れ。昭和 51 年 3 月東京大学大学院

工学系研究科修士課程(産業機械)修了。同年 4 月通産省工業技術院機械技術研究所入所。現在機械部メカニズム課主任研究官。電気刺激による情報伝達、歩行誘導機械の研究などに従事。日本機械学会、計測自動制御学会、バイオメカニズム学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)



館 暉
(Susumu TACHI)

昭和 21 年 1 月 1 日生れ。昭和 43 年 東京大学工学部計数

学科卒業。48 年同大学院博士課程修了。工学博士。同年同大工学部助手, 50 年通産省工業技術院機械技術研究所に移り, 現在システム部バイオメカニクス課主任研究官。バイスペクトルなどの統計的信号処理, 電気刺激による情報伝達, 歩行誘導機械の研究などに従事。54~55 年, マサチューセッツ工科大学客員研究員。IEEE, 日本 ME 学会, 日本脳波筋電図学会, バイオメカニズム学会, 応用物理学会, 日本機械学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)



谷江和雄
(Kazuo TANIE)

昭和 21 年 11 月 6 日生れ。昭和 46 年 3 月早稲田大学大学

院理工学研究科修士課程修了。同年 4 月通産省工業技術院機械技術研究所入所。現在システム部バイオメカニクス課主任研究官。昭和 55 年 2 月工学博士。昭和 56 年 8 月から 1 年間 UCLA Biotechnology Laboratory 客員研究員。動力義手, 電気刺激による情報伝達, ロボットのセンサなどの研究に従事。日本機械学会, 計測自動制御学会, バイオメカニズム学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)