

研究

触覚つき移動ロボットに関する基礎的研究 (第2報)*

—その制御と経路探索の基礎的実験—

松島 皓三** 山本 正信*** 大仲 廣行†

On the Fundamental Study of a Moving Robot with the Tactile Sensor (2nd Report)

—Its Control and Fundamental Experiments of Path-finding—

Kozo MATSUSHIMA, Masanobu YAMAMOTO, Hiroyuki ONAKA

This study is on a moving robot with the tactile sensor, which is able to autonomously find the path to move. The function of the tactile sensor which is installed on the moving robot was described in the previous report. This paper describes the control method of the robot and the path-finding algorithm. The algorithm actively uses the information concerning obstacles obtained by the tactile sensor during the movement of the robot. The robot has three control modes; it can move straight forward or backward, or can make a turn on the spot. These modes are commanded by a mini-computer. The path-finding algorithm described here may be called as "Groping method". This algorithm consists of the following three sub-algorithms as "Normal searching", "Decision of steering clear of obstacle" and "Reverse searching". The abilities of the robot are shown by the experimental results.

1. 緒 論

第1報¹⁾では、本研究で試作した移動ロボットの構成の概略、触覚つきバンパの動作原理およびその特性について述べた。ここでは、その触覚つきバンパを付した移動ロボットの走行に関する制御法について述べ、次いで、小型電算機を用いた未知環境内の経路探索に関する実験について報ずる。従来ロボットによる経路探索については、特定の機能を想定した上で、主として電算機用の経路探索アルゴリズムの開発に関する研究^{2)~5)}が多く、実際のハードウェアとの関係において行った実験的研究は少なく、視覚による環境認識を用いたSRIの知能ロボットの研究⁶⁾が著名である。一方、本論文で述べる方法は、前報で述べた触覚を用いて環境内の障害物を知覚しつつ目標地点までの経路を探索するいわば"手さぐり法"ともいうべき方法で、ここでは、それにより実際のロボットを制御した基礎的な実験結果にも触れている。

2. 移動ロボットの構成

本ロボットは触覚によって障害物に関する情報を得つつ、自律的に経路探索を行い目標地点に達し得る機能を

備えたもので、ロボット本体は小型電算機によって指令される動作モードにより前進、後進、その場回転および停止が可能であり、また障害物との接触時に、バンパの受ける力によって非常停止がかけられ、着力点角度検出回路により、ロボット上での接触位置をロボット上に定めた基準線よりの角度として知ることができる。図1に駆動システムの構成を示す。二つの動輪は、それぞれ駆動用直流モータによって駆動される。これら動輪の進行距離は動輪と独立に床面に接して回転する計測輪によって測定される。計測輪は直径6cmの円板であり、円周に沿って等間隔に18個のスリットがあげられており、円板の回転に伴い光電的にスリット1個について2個ずつのバ

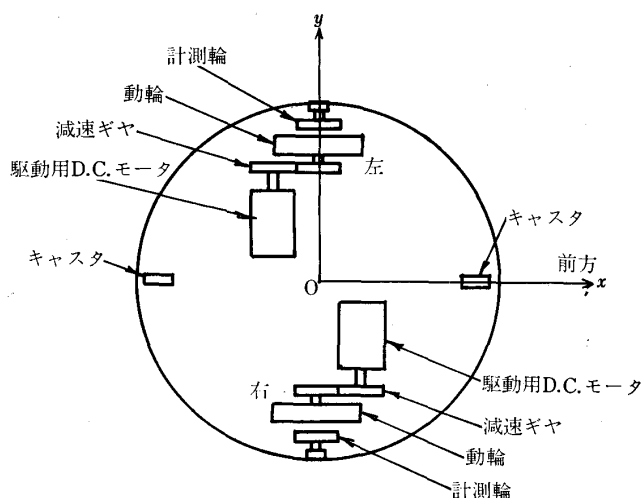


図1 移動ロボット駆動系統

* 原稿受付 昭和52年3月25日。昭和51年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和51年10月12日)にて発表。

** 正会員 東京工業大学精密工学研究所(横浜市緑区長津田町4219)

*** 電子技術総合研究所(東京都千代田区永田町2-6-1)

† 正会員 日本鋳業(株)(倉敷市潮通2-1)

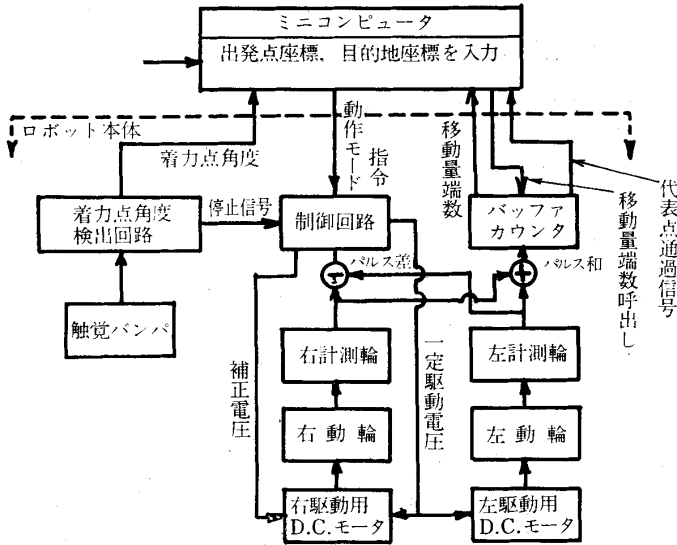


図2 移動ロボット信号系統

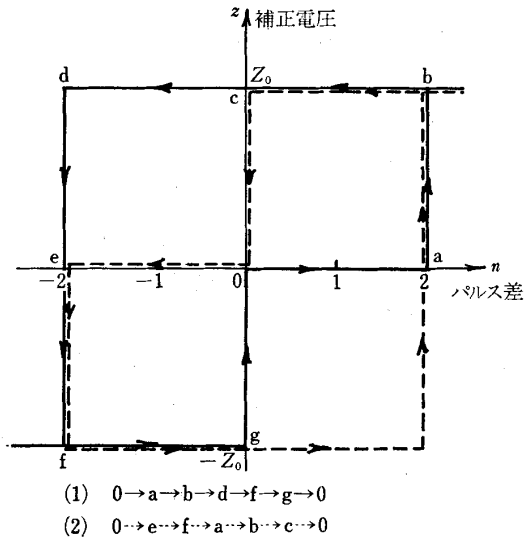


図4 動輪の制御方針

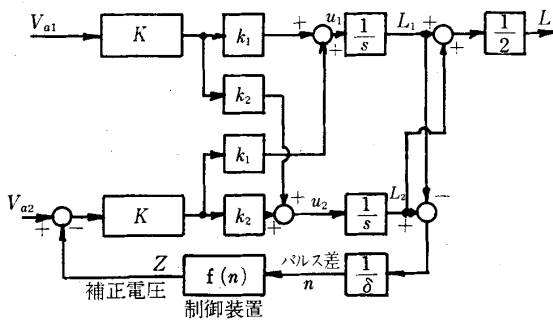


図3 台車制御系のブロック線図

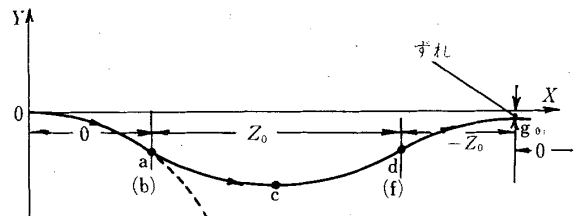


図5 移動ロボット中心の軌跡

- K : サーボ増幅器および駆動用モータのゲイン定数 ($\text{cm/s} \cdot \text{V}$) (ただし, モータの時定数は極めて小さく, ここでは駆動用モータは単に積分要素と考えている.)
- k_1, k_2 : それぞれ両動輪, 両計測輪の間隔によって定まる定数
- δ : 計測輪のパルス間隔 (cm)
- u_1, u_2 : それぞれ左右計測輪の対地線速度 (cm/s)
- L_1, L_2 : それぞれ左右計測輪の移動距離 (cm)
- L : ロボット中心の移動距離 (cm)
- n : 両計測輪のパルス差
- $f(n)$: 制御装置の特性 ($\text{V}/\text{パルス数}$)
- Z : 補正電圧 (V), $Z=f(n)$

ルス信号 (パルス間隔 0.55 cm) が左右交互に得られるようになっている. このパルス列はロボットの進行距離の計測ならびに両動輪の協調制御に利用される.

3. 移動ロボットの制御

本ロボットの制御に関する信号系統図を図2に示す. ここでは小型電算機からの動作指令を受けて, ロボット内で行われる制御について述べる.

3.1 走行制御

ロボットの走行は両駆動用モータを介して両動輪により行われるが, 右動輪の回転角は, 左動輪のそれに追従するように御制され, 直進性が保たれる. すなわち, ロボットが何らかの原因によりコースずれを生じた場合, それは両計測輪のパルス差によって検出される. このパルス差が ± 2 になれば, 右駆動用モータに補正電圧が加えられ, コースの修正が行われる. この制御系のブロック線図を図3に示す.

ただし

V_{a1}, V_{a2} : それぞれ左, 右両駆動用モータに加える一定駆動電圧 (V)

ここで, 制御装置の入, 出力関係 $f(n)$ は図4に, この時のロボットの中心の軌跡を図5に示す. すなわち, 左右駆動系に不平衡 (たとえば, 左動輪の速度が大) があり, 図5のようにロボットは $0 \rightarrow a$ とコースずれを起こしたとする. このとき左右計測輪のパルス差 n が a の地点で $+2$ となったとすれば, 右駆動用モータに $+Z_0$ (V) の補正電圧が加えられ, ロボットは $a \rightarrow c \rightarrow d$ とコースを変え, パルス差は減少し, -2 となると補正電圧は $-Z_0$ (V) に切換えられロボットは $f \rightarrow g$ の軌跡をたどる. そこでパルス差が 0 になった地点 g で補正電圧は

0 V にリセットされる。以後この周期を繰返し、蛇行しつつもロボットは平均的に直進して行く。

ここでロボットが走行中の軌跡を求めるために、図3および図5よりある時点におけるロボット中心の位置を (X, Y) とすれば、次の方程式が成り立つ。

$$\frac{dX}{dt} = \frac{u_1 + u_2}{2} \cos \frac{1}{2a} (L_1 - L_2) \quad (1)$$

$$\frac{dY}{dt} = -\frac{u_1 + u_2}{2} \sin \frac{1}{2a} (L_1 - L_2) \quad (2)$$

ただし、 $2a$ は両計測輪の間隔。

ここで、両駆動電圧にわずかの差がある場合を例としてコースずれを計算すれば次のようになる。すなわち、両計測輪の回転角の差が小さく、それを $L_1 - L_2 = \varepsilon$ とすれば、式(1)、式(2)は近似的に次のようになる。

$(u_1 + u_2)/2$ はロボット中心の走行速度を表し、仮定から $u_1 \approx u_2$ であり、それを U (一定) とすれば、

$$\frac{dX}{dt} = U \quad (3)$$

$$\frac{dY}{dt} = -\frac{U}{2a} \varepsilon \quad (4)$$

となる。また図5より

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = K(k_1 - k_2)(V - Z) \quad (5)$$

ただし、 $V = V_{a1} - V_{a2}$ 。

これら式(3)、式(5)を図4に示した制御方策のもとで解けば、ロボットの蛇行の様子を算出できる。

いま、図5において、 $V > 0$ 、一定、 $t=0$ で $X=0$ 、 $Y=0$ 、 $\varepsilon=0$ 、a点で $\varepsilon=2\delta$ 、d点で $\varepsilon=-2\delta$ 、g点で $\varepsilon=0$ なる条件のもとで式(3)、式(4)、式(5)を解き各点の座標を求めると、

a点では

$$\varepsilon_a = 2\delta$$

$$X_a = \frac{2\delta U}{K(k_1 - k_2)V}$$

$$Y_a = -\frac{\delta^2 U}{K(k_1 - k_2)aV}$$

c点では

$$\varepsilon_c = 0$$

$$X_c = \frac{2\delta U Z_0}{K(k_1 - k_2)V(Z_0 - V)}$$

$$Y_c = -\frac{\delta^2 U Z_0}{K(k_1 - k_2)aV(Z_0 - V)}$$

d点では

$$\varepsilon_d = -2\delta$$

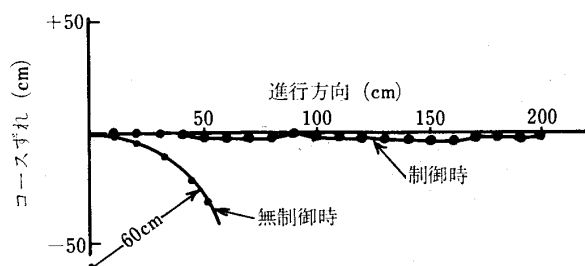


図6 ロボット中心の軌跡の実測例

$$X_d = \frac{2\delta U(Z_0 + V)}{K(k_1 - k_2)(Z_0 - V)V}$$

$$Y_d = -\frac{\delta^2 U}{K(k_1 - k_2)aV}$$

g点では

$$\varepsilon_g = 0$$

$$X_g = \frac{2\delta U Z_0(Z_0 + 3V)}{K(k_1 - k_2)V(Z_0 - V)(Z_0 + V)}$$

$$Y_g = -\frac{\delta^2 U Z_0}{K(k_1 - k_2)aV(Z_0 + V)}$$

となる。この蛇行の1周期後g点におけるずれ Y_g と X 方向の走行距離との比をとり、これをずれ率とすれば、次式のようになる。

$$\alpha = \left| \frac{Y_g}{X_g} \right| = \frac{\delta(Z_0 - V)}{2a(Z_0 + 3V)} \quad (6)$$

また最大ずれ率は

$$\alpha_{\max} = \left| \frac{Y_c}{X_c} \right| = \frac{\delta}{2a} \quad (7)$$

より求まる。

本ロボットでは、 $2a = 38$ cm、 $\delta = 0.55$ cm である。

故意に両駆動電圧に差をもたせ走行制御を行い、実際に走行させた際のロボット中心の軌跡の実測の一例を図6に示す。この場合 $V = 1$ V、 $Z_0 = 3$ V とした。したがって、式(6)によるずれ率は0.5%である。また最大ずれ率は1.5%であり、実測結果もほぼそれ以下におさまっている。一方の駆動電圧の極性を変えることにより、同様の方法で回転制御が行われる。

3.2 動作モード制御

動作モード信号は計算機より指示されるが、走行距離は両計測輪よりのパルス数をロボットの進行方向に従って一度 X 方向、 Y 方向用の2個のバッファカウンタに記憶させ、後述するように、あらかじめ定められた単位量移動するごとに、そのむね計算機に報告される。ここで走行中障害物に接触すると、触覚よりの信号により、ロボットはその場に停止し、着点角度の値が計算機に送られ、同時に単位移動量よりの端数がバッファカウンタより呼び出され、障害物との接触位置を知ることができ

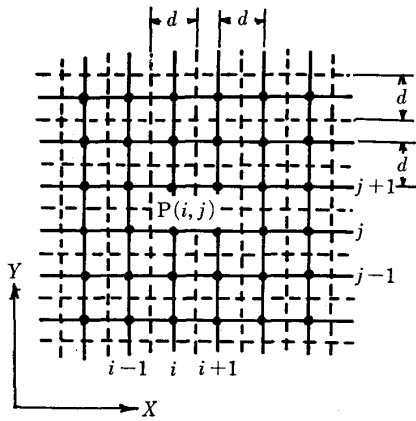


図7 探索面の区画

る。以後計算機はそれらの情報をもとに定まる動作モードの指令を送り、ロボットは次の行動に移る。これらのシーケンスは後述する経路探索アルゴリズムによって行われる。

4. 経路探索の基礎的実験

ここでは上記の機能を有するロボットを用い、未知環境内で出発地点と目標地点の座標が与えられた場合走行経路を触覚機能を積極的に用いて探索しつつ、目標地点に到達させるための経路探索法を述べ、それに基づいて実際に走行させた例について述べる。

4.1 経路探索計画

移動ロボットが出発点より、指令された目標地点まで移動する場合、基本的には、前進→障害物と接触した場合の停止→後進(障害物から離れる)→回転(進路の変更)の動作を繰返しつつ、目標地点に到達すると考えてよい。ここではロボットの移動平面を図7のように格子状に区切り、各格子の中心点をそれぞれ代表点とし、ロボットの通路を実線のように定める。ただしこれは、実際の床面にもうけてあるのではなく、計算機内で処理されている。この格子の一区画の幅 d は、経路探索時の有効探索幅と関係し、本ロボットの触覚パンパの直径にたかだか等しくとれば十分であるが、より密な探索を行うため、計算機との連結を考慮して、ここでは 27 cm にとっている。

ここで用いた経路探索計画は、大別して以下に述べる順方向探索と逆方向探索の二つの動作を基本として構成されている。

4.1.1 順方向探索

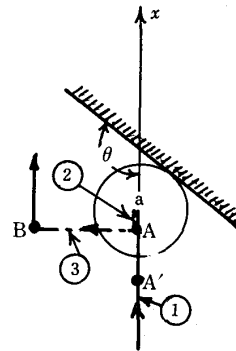


図8 順方向探索

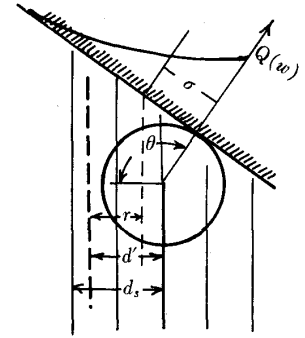


図9 回避幅の決定

ロボットが走行中、障害物に接触した場合、主として行う回避動作に関するものである。すなわち図8のように前進①中 a 点で障害物と接触するとロボットは停止し、接触直前に通過した代表点 A から a 点までの距離 x があらかじめ定められたしきい値 r_t と比較され、 $x > r_t$ ならば A 点へ、 $x < r_t$ ならば一つ手前の代表点 A' 点まで後進する②。次いで 90° 回転を行い回避動作③に移る。障害物回避の自然な方向として、回避の方向は、着力点角度 θ に関する情報を積極的に利用し、 $\theta \geq 90^\circ$ であれば左に、 $\theta < 90^\circ$ であれば右と定めてある。

回避幅 \overline{AB} は後述するように着力点角度 θ によって定められ、 B 点に達すれば再び 90° 回転を行い、以後同様なシーケンスによりロボットの位置の X 座標が目標地点の X 座標に等しくなるまで走行し、次いで Y 方向に向きをかえ目標地点まで同様な探索走行を行う。

4.1.2 回避幅の決定

図8の③に示した回避幅は、次のような仮定のもとに定めた。

[仮定1] 障害物は接触点の接線方向に広がりを持ち、その最大長さを W とする。

[仮定2] 障害物の長さ w はゼロから W まで確率 $1/W$ で一様に分布している。

このようにすると、ロボットが障害物と接触後、それに沿って w だけ横に動いて回避できる確率は、

$$P(w) = \frac{w}{W} (\log W - \log w + 1) \quad (8)$$

と求まる。この時の分散は $\sigma^2 = \frac{7}{144} W^2$ となり、 $\sigma = \frac{\sqrt{7}}{12} W$ を回避幅の決定に用いる。

また障害物の存在確率を $Q(w)$ とすれば、 $Q(w) = 1 - P(w)$ となる。そこで図9のように、着力点角度 θ で障害物と接触したとすれば、その時の回避幅 d_s を σ を用いて次のように定める。

$$d' = \sigma \cos(\theta - 90^\circ) - r \cos \theta + r \quad (9)$$

として(ただし r はパンパの半径)。

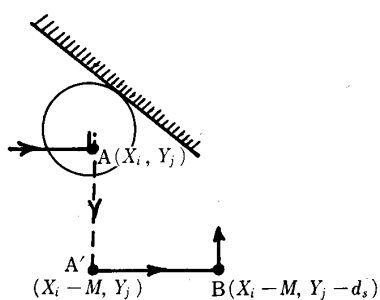
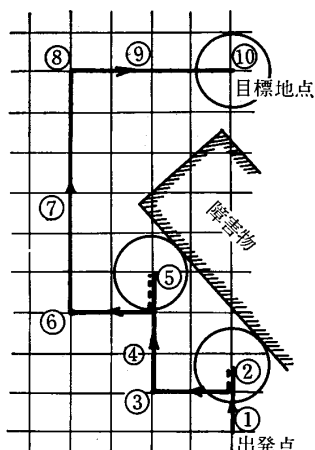


図10 逆方向探索



◀ 図11 経路探索実験例(1)

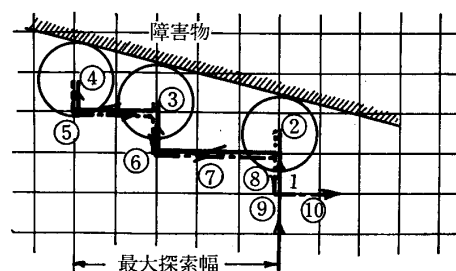


図12 経路探索実験例(2)

$d' \leq d$ のとき $d_s = d$

$(n-1)d < d' < nd$ のとき $d_s = nd$ (n は整数) (10)

4.1.3 逆方向探索

順方向探索において順次通路を探索して行くが、いずれも障害物に接触し、ついに通路を発見出来ない場合を想定し、ここでは、最大探索幅をもうけ、その幅まで順方向探索を行っても障害物に接触する場合は、そこで順方向探索を打ち切り、逆方向の探索を行うようにする。この場合、ロボットは順方向探索を行って来た経路を図10のように逆にたどって、最初の地点Aまでもどり、逆方向探索に移る。この場合も回避幅は最初の接触時の着点角度を用い、式(10)により定めるが、 X 方向の後進距離 M は、 d_s 回避する内に再び障害物と接触することを避けるため

$$M > d_s \tan |\theta - 90^\circ| + r_t \quad (M \text{は整数}) \quad (11)$$

で定まる代表点 $A'(X_i - M, Y_j)$ まで後進し、次いで B 点 $(X_i - M, Y_j - d_s)$ まで回避する。ここで r_t は4.1.1節で定めたしきい値である。

以後は、この動作を繰返す。この探索時でも最大探索幅まで探索を行ってもなお目標地点へ向かう通路を見い出せない場合には、そこで停止し、以後の指示をオペレータに計算機を介してたずねる。

以上の動作中、計算機は通過した代表点の座標(整数値)、着点角度、接触地点(実数値)を記憶している。本研究で使用した計算機はYHP 2100 A 8 K語であり、このアルゴリズムに使用した記憶容量は約2.5 K語、三角関数のサブルーチンとして0.5 K語であった。

5. 経路探索実験の例

以上の経路探索計画を用いた基本的な実験例として図11および図12に示す障害物の回避動作の実例を示す。ここで図11は目標地点までの通路を見い出せた場合の例であり、図12は最大探索幅まで探索しても通路を見

い出せず、最初の接触位置まで復帰し、逆方向探索時の式(11)で定められた位置まで後進した状態を示している。

ここでは、実験室の都合で $W=250$ cm, $\sigma=55.1$ cm, r_t は計測輪のパルス数で5パルス(2.75 cm), 最大探索幅は5区画とした。なおそれぞれの実例のロボットの走行中の写真を図11, 図12と対応させて図13, 図14に示す。

6. 結 論

ここでは、第1報で報じた触覚つきバンパを有する移動ロボットについて、動輪の協調制御による走行制御法を示し、次いで、触覚により得られる障害物との接触情報を積極的に用いた比較的簡単な経路探索法について述べた。

走行制御については、本法で本質的に生ずる蛇行の振幅、コースずれの割合について計算し、それらが実用上ほとんど無視できることを示し、かつそれを実際の走行実験によって確かめた。

さらに、経路探索法では、その基本的動作を確認する意味で、簡単な障害物の配置に対して移動ロボットを走行させた実験を示し、その有効性を確認した。

なお、本実験では、移動ロボットは前進、後進、 $\pm 90^\circ$ 回転の4方向のみの経路を定めて探索計画を立てたが、障害物とロボットとの相対的な角度情報を触覚により推定できるという利点を有することから、例えばほぼ障害物に沿って任意の方向にロボットを移動させることも、原理的には可能で、この機能を考慮した経路探索アルゴリズムの開発が今後の問題として残されている。

最後に本研究に対し、終始ハードウェアの製作の面で協力いただいた東京工業大学精密工学研究所・長井昭夫技官に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 松島皓三: 触覚つき移動ロボットに関する基礎的研究(第

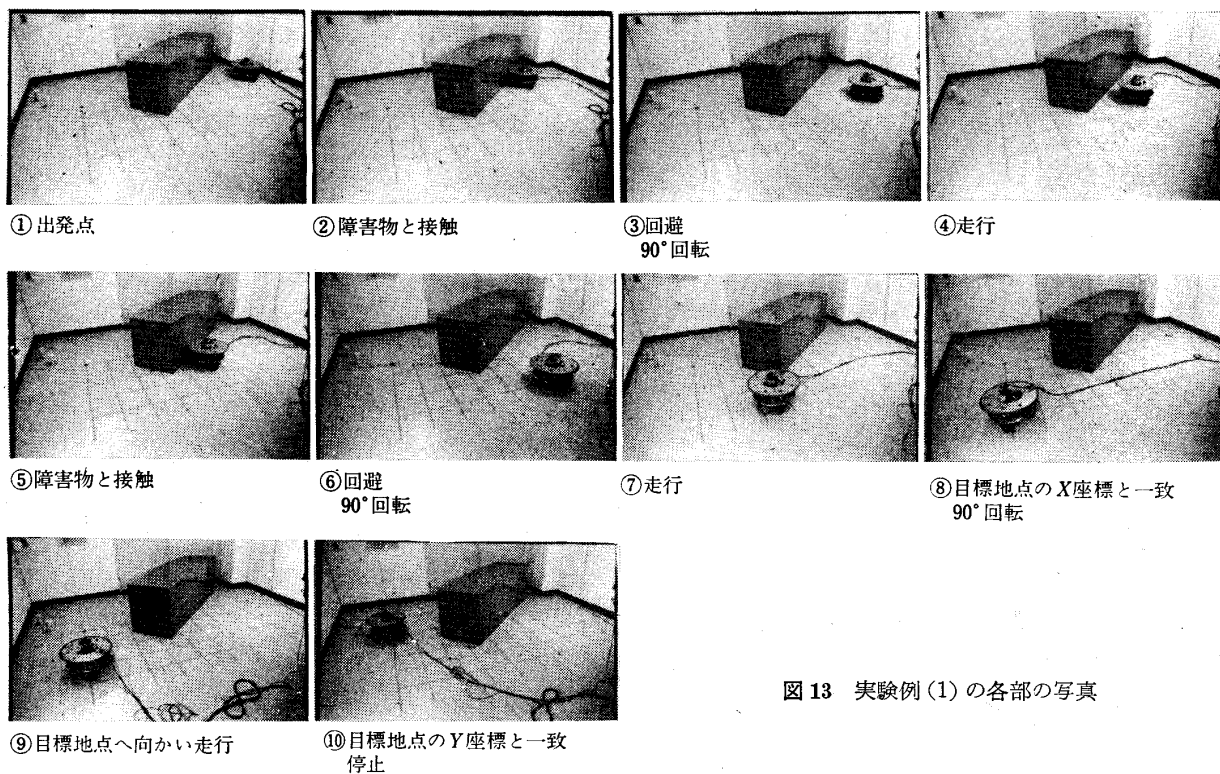


図 13 実験例 (1) の各部の写真

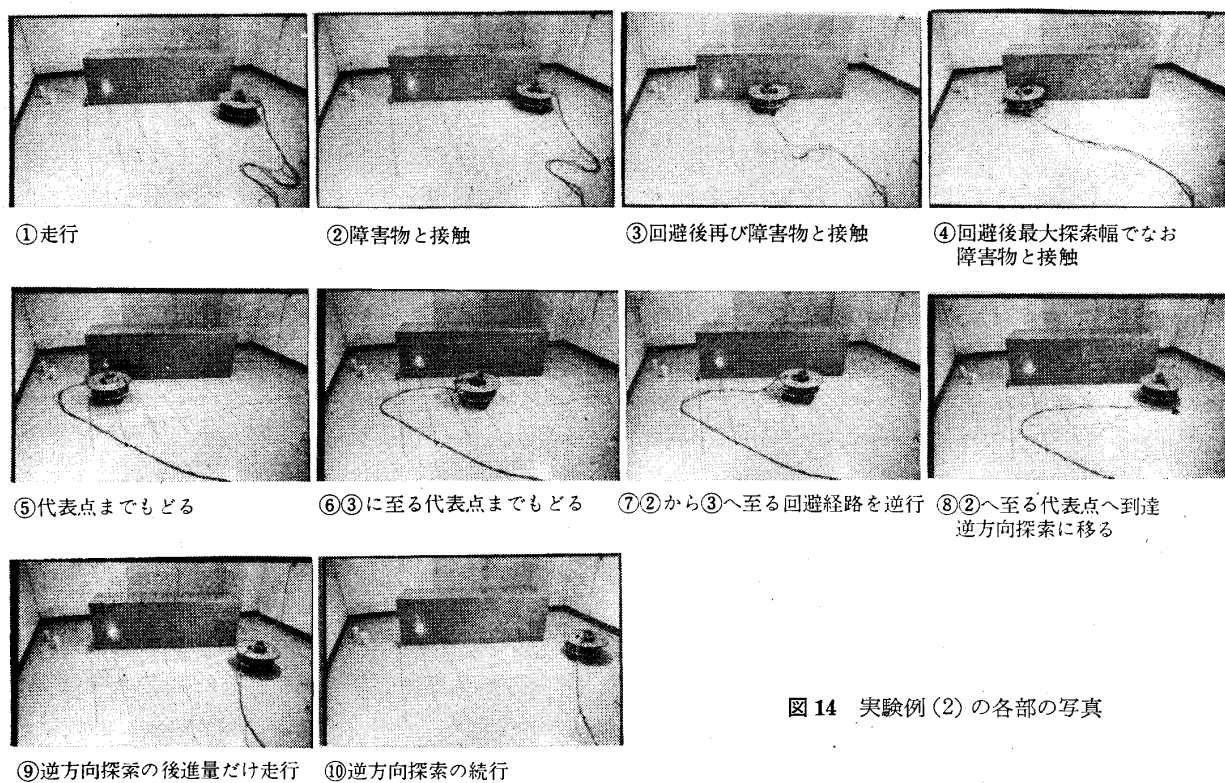


図 14 実験例 (2) の各部の写真

1 報) —— 触覚つきパンパについて, 精密機械, 43, 3 (1977) 300.

2) L.Y.Lim: A Pathfinding Algorithm for a Myopic Robot, JPL Tech, Report, 32, 1288, (1968).

3) R.E.Larson & W.G.Keckler: Optimum Adaptive Control in Unknown Environment, IEEE Trans. AC, Aug. (1968) 438.

4) 藤井 ほか: 知能ロボットの径路探索計画法について, システムと制御, 15, 11 (1971) 978.

5) 柿倉 ほか: 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, 1 (1973) 45.

6) P. Hart et al. : A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths, IEEE Trans. SSC, July (1968) 100.