触覚つき移動ロボットに関する基礎的研究(第1報)*

——触覚つきバンパについて——

松 島 皓 三**

On the Fundamental Study of a Moving Robot with Tactile Sensor (1st Report)

——On the Bumper with Tactile Sensor——

Kozo MATSUSHIMA

This study is on a moving robot which is able to autonomously find the path to move. The robot perceives the information for obstacles on the path to move by its bumper with tactile sensor. This paper describes on the prototype model robot mentioned-above, especially, on the tactile sensor associated with the bumper. When the robot contacts with an obstacle during its movement, the tactile sensor developed here can detect the magnitude of the reaction force and the contact point on the bumper. The functional principle and its construction of the tactile sensor are explained, and the characteristics are shown experimentally. Finally, when the model robot actually contacts with an obstacle during its movement, the function of the tactile sensor is confirmed experimentally.

1. 緒 論

近年産業界の諸分野で、自動化省力化が進み、それに伴い工業ロボットの研究・開発が活発になり、特に工業ロボットに各種の感覚機能を付加し、作業空間での環境適応能力あるいは作業能力を増大させる試みが各所で研究されつつある¹⁾。この種の感覚機能を備えた工業ロボットのひとつとして移動機能を有するロボットがあげられる。これは例えば、倉庫や工場内を障害物を避けながら自律的に走行するもので、この種のものとして、床面に導体を埋込みそこに流れる高周波電流によって生ずる磁場を電磁的に検出して、導体に沿って走行するもの²⁾、あるいは道路に進路を示すテープを貼付け光学的に進路を検出し走行する方式のものが開発されている³⁾。しかし経路の変更がしばしばあるような環境、あるいは未知の環境下で使用する場合問題が多い。本研究は、このような環境で障害物に関する情報を収集しつつ自律的に経路探索を行いうる移動ロボットのひとつのモデルの試作に関するもので、本論文では主として上記の目的のために開発した触覚つきバンパについて報ずる。ここでのべるバンパの持つ触覚としては、実用上の見地から出来るだけ構造が簡単であることに主眼をおき、バンパが障害物に接触した際の障害物に対する情報として、バンパが受

ける力の大きさおよびバンパ上での接触位置を比較的簡単なハードウェアにより知覚しうる機能を備えたものである。

ここではまず、バンパに加わる外力およびその着力点の検出原理をのべ、それにもとづいた試作装置の構造および実験結果についてのべる。

2. 触覚つき移動ロボット

本研究で試作した経路探索用移動ロボットのモデルの概要をのべる。

図1はその写真である。このハードウェアの構成を図2に示す。台車はその場回転を可能とするためにそれぞれ独立の直流モータによって駆動される2個の駆動輪と2個のキャスタをもっている。その駆動方式は、一方の駆動モータ(例えば左動輪用)に指定速度に相当した一定電圧が加えられ、他の駆動用モータ(例えば右動輪用)の回転数は両輪にそれぞれ同軸にもうけられた計測輪より得られるパルス数の差によって左動輪に協調制御され、直進走行時の進路制御、その場回転時の回転角制御を行っている。動作モードは、前進、後進、左右回転が指示できる。また進行距離、回転角は、計測輪よりのパルスによって計数される。一方、触覚バンパが障害物に接触した場合には、バンパの受ける力を検出しているので、これによりインタロック信号が出され台車は停止する。同時にバンパ上での着力点(接触点)が検出される。また着力点の情報は、障害物との接触以後のロボットの進路決定ならびに地図作成に用いられる。

* 原稿受付 昭和50年10月28日。精機学会北陸支部長野地方講演会(昭和49年10月2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4259)

図1 触覚つき移動ロボットの全景

図2 触覚つき移動ロボット構成図

3. 触覚による外力の検出原理

ここで使用するバンパは図3のように円弧状剛体で台車にはばねを介して弾性的に取付けられている。いまここで用いる座標系を図3に示したように定めることにする。すなわち

$x-y$ 座標系： 台車に固定され、台車の前進方向に x 軸をとった直交座標系。ただしその原点は、円弧状バンパに何ら外力が作用しない時にその中心 O' に一致させる (ロボット座標系)。

$x'-y'$ 座標系： バンパに固定され、バンパに何ら外力が作用しない時にはロボット座標系と一致する直交座標系 (バンパ座標系)。

$r-\theta$ 座標系： 原点をロボット座標系の原点と一致させ原線を x 軸にとった極座標系。

いま、バンパに図4に示すような外力が作用し、図のように変位したとする。ここでバンパの中心 O' のロボ

$x-y$ 系： ロボット座標系

$x'-y'$ 系： バンパ座標系

図3 ロボットとバンパの座標系

図4 力および着点角度の検出原理

ット座標系での変位量を $\delta x, \delta y$ とし、これらがバンパの半径 r に比して十分小さく、かつバンパの回転角 $\delta\phi$ も十分小さいとすれば、バンパの x 軸および y 軸上での変位を $\Delta x, \Delta y$ として近似的に $\Delta x \cong \delta x, \Delta y \cong \delta y$ としてよい。また外力の着点 $P(r, \theta_1)$ も $r \gg \delta x, \delta y$ より近似的に $P(r, \theta_1)$ と考えることが出来る。以上のことから外力の大きさ F 、バンパ上での着点角度 θ_1 は、 $\Delta x, \Delta y$ および $\delta\phi$ を用いて次のように求まる。

$$\text{外力の大きさ: } F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \cong K\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad (1)$$

ただし K はバンパを台車に支持しているばねのたわみのばね定数。

着点角度: バンパを台車に支持しているばねのねじれのばね定数を K' として、外力 F によるモーメントのつりあいより、次式を満足する θ_1 を計算する。

$$K'\delta\phi = F_x r \sin \theta_1 - F_y r \cos \theta_1 \\ \cong Kr\Delta x \sin \theta_1 - Kr\Delta y \cos \theta_1 \quad (2)$$

ここで K, K', r はバンパの構造により定まる定数であり、 $\delta\phi, \Delta x, \Delta y$ は実測可能な値である。したがって式(2)を満足する θ が求まれば、それが外力の着点角度 θ_1 を与えることになる。

図5 検出器の配置

しかしながら、式(2)を満足する θ は一意に定まらず、一組の $(F_x, F_y, \delta\phi)$ に対して、 $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ の範囲でも2個の θ の値が対応する場合が生ずる。この場合一つの解は外力がパンパの内側に向かって作用している場合の着力点角度を表し、他の一つは外力がパンパの外側に向かって作用している場合の着力点角度を表している。しかし、台車が障害物に接触する場合にはパンパに作用する外力はすべて図のようにパンパの内側に向かう方向を向いている。したがって式(2)を満足する解が $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ (パンパの前半分)で2個生じた場合は、その内から次のように正解を判別すればよい。すなわち、パンパに作用する力がパンパの内側に向いている条件は、 $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ の範囲で式(2)を満足する解を θ_1 として、解の近傍で次の関係を満たしていればよい。

$$\left\{ \begin{array}{l} |K'\delta\phi| < |F_x r \sin(\theta_1 - \epsilon) - F_y r \cos(\theta_1 - \epsilon)| \\ |K'\delta\phi| > |F_x r \sin(\theta_1 + \epsilon) - F_y r \cos(\theta_1 + \epsilon)| \end{array} \right\} \quad (3)$$

ただし ϵ は正の任意の微小量。(証明は付録参照)

つまり、ロボットが進行中、パンパに加わった力 F があらかじめ定めておいたしきい値 F_t より大となればパンパが何かの障害物に接触したとし、ロボットは停止し、外力の着力点角度が計算される。

4. 触覚の試作装置

以上の原理をもとにパンパおよび式(1)、式(2)を演算する回路を試作した。ここでパンパは並進2自由度、回転1自由度を持った弾性体で台車に支持される必要がある。本装置では、パンパ本体として直径450 mmの円板を用い、これを台車に固定する弾性体として等間隔に配置された径3 mm、長さ100 mmの4本のリン青銅棒を用いた。この場合、曲げのばね定数は約1.66 kgf/mm、ねじりのばね定数は約500 kgf-cm/radと実測された。また、パンパが障害物に接触した際、パンパがすべり、

図6 力および着力点演算回路の構成

着力点角度の測定値が変動することを避けるため、パンパの周上にウレタンラバーを貼付してある。次に、3節でのべたように外力の大きさおよび着力点角度を検出するために、パンパの x 軸方向、 y 軸方向の変位 $\Delta x, \Delta y$ および回転角 $\delta\phi$ を測定する必要がある。そのための検出器として図5に示すような4個の差動変圧器を台車に取付けてある。ここで T_x, T_y はそれぞれ $\Delta x, \Delta y$ 検出用であり、 T_1, T_2 は $\delta\phi$ 検出用である(ここで T_1, T_2 の出力の和が $\delta\phi$ に比例する)。これらの検出器出力を用いて式(1)、式(2)を演算すればよいが、ここではオンライン処理に主眼をおき、かつ出来るだけ簡単な演算回路により、それぞれの値を求める方式をとった。以下ここで採用した力の大きさの演算、着力点角度の演算の方式について述べる。

4.1 力の大きさの演算

ロボットが障害物に接触した際パンパに作用する力は静的には、接触時よりロボットが停止するまでパンパを変位させながら走行した距離によって定まる。しかしながら、移動ロボットにおいては、力の大きさそのものの値はさして問題ではなく、障害物にパンパが接触したかどうかを判別できればこと足る。ここでは、あらかじめ力の大きさにロボットの発進時あるいは走行時の加速度や振動等より定まるしきい値をもうけ、検出された力の大きさが、そのしきい値より大になったとき、障害物に接触したとし、停止信号を出すようにしてある。したがって力の演算(式(1))に現れる自乗・開平演算は、図6に示すように、折線近似によって近似演算させるにとどめた。

4.2 着力点角度の演算

パンパと障害物が接触した際のパンパ上の着力点(接触点)を r - θ 座標で表した角度 θ_1 を求める式(2)の演算について図6、図7により説明する。

図7 着力点演算回路各部の波形

図6に示した回路では $-\pi/2 \leq \theta_1 \leq \pi/2$ の範囲で着力点角度の検出ができる。まず、正弦波・余弦波発振器で $r \sin \theta, r \cos \theta$ (ただし $\theta = (2\pi/T)t$, T は発振周期, ここでは 1 ms としてある) の電圧を発生させ (波形①, ②), それぞれに T_x, T_y で検出された F_x, F_y を乗ずる (波形③, ④)。それより式 (2) の右辺 $F_x r \sin \theta - F_y r \cos \theta$ を求める (波形⑤)。一方バンパの回転角 $\delta\phi$ よりモーメント $M = K'\delta\phi$ が検出され (波形⑥), 波形⑤と波形⑥の電圧を比較する。この時比較器の出力を $K'\delta\phi < KF_x r \sin \theta - KF_y r \cos \theta$ の区間で正, $K'\delta\phi > KF_x r \sin \theta - KF_y r \cos \theta$ の区間で負となるように定める (波形⑦)。次に $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ の範囲で正解を得るために, 余弦波の正の半周期のみを用い (波形⑧) 余弦波の電圧が負より正に変わる時点 (例えば $\theta = -\pi/2$) より式 (3) の関係を満足するまで, つまり比較器の出力が正より負に変わる時点まで解判別回路の出力を正に保ち, この時点から余弦波が正より負に変わる時点まで解判別回路の出力を負にする。ついで余弦波の負の半周期は解判別回路の出力をゼロに保っておく (波形⑨)。このようにすれば, 波

図8 外力の大きさの実測例

図9 着力点角度の実測例

形⑧よりわかるように, 解判別回路の出力は, 着力点角度 θ_1 で変調された一種のパルス幅変調波となる。したがってこれを復調 (この場合単に低域濾波器を用いればよい) すれば, θ_1 に比例したアナログ電圧を得ることが出来る。

5. 試作した触覚の特性

以上のべた触覚の試作装置における外力の大きさおよび着力点角度の実験結果を示す。

まず外力の大きさの検出に関して, バンパに種々の大きさ, 方向の力を着力点を変えて加え, その時の力演算回路の出力を求めた。その結果の例を図8に示す。図9は着力点の測定結果である。

図10は, 前方に図中斜線をほどした位置に障害物を置き, 実際に台車を走行させ, 台車を障害物に接触させた時の着力点角度を検出した実測値を示したものであ

図10 ロボット走行時の着点角度実測例

る。この際はもちろん、接触時にパンパは力を検出し、それにより台車は停止し、着点角度を演算したものである。

6. 結 論

ここでは経路探索用移動ロボットに必要な機能、主としてそのハードウェアについての基礎的資料を得るために試作したモデルについてふれ、特にそのロボットに付加する触覚の原理、構成およびその特性についてのべた。ここで用いた触覚は、ロボットの持つパンパに付加したもので、ロボットが走行中障害物に接触した際パンパが受ける力の着点角度（接触点）を検出し得るものである。一方、力の大きさ、方向の検出は、ここでは必ずしも必要ではなく、単に力の大きさのみを検出し、それをロボットの停止信号に用いている。試作装置の特性として、実際の走行時に障害物に接触した際のロボットの停止および着点角度の検出は十分満足すべき結果を得られた。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、装置の製作、実験等に御協力下さった東京工業大学精密工学研究所長井昭夫技官ならびに武蔵工業大学学生（現在富士重工株式会社）河野通延氏に感謝いたします。

【付 録】

式(3)の証明

付図を参照して、着点Pにおいて外力 F がパンパの内側に向く条件はPの位置ベクトルを r として

付図1

$$r \cdot F < 0$$

これより

$$\cos(\theta_1 - \varphi) < 0$$

(付1)

ただし、 $-\frac{\pi}{2} \leq \theta_1 \leq \frac{\pi}{2}$ とする。

$$\text{したがって } \frac{\pi}{2} \leq (\theta_1 - \varphi) \leq \pi \text{ または } -\pi \leq (\theta_1 - \varphi) \leq -\frac{\pi}{2}$$

また式(2)より

$$M = K' \delta \phi = F_x r \sin \theta_1 - F_y r \cos \theta_1 = F r \sin(\theta_1 - \varphi) \quad (\text{付2})$$

ただし、 $\varphi = \tan^{-1} \frac{F_y}{F_x}$

式(2)を満足する解が着点検出範囲 $-\pi/2 \leq \theta_1 \leq \pi/2$ で2個存在する場合、それらを θ' , θ'' とすれば、 θ' を求める実際上の解 θ_1 として

$$\theta' = \theta_1, \quad \theta'' = \pi + \varphi - (\theta_1 - \varphi)$$

したがって $\pi/2 \leq (\theta' - \varphi) \leq \pi$ であれば $0 \leq \theta'' - \varphi < \pi/2$ となり $\theta'' < \theta'$ なる関係がえられる。

また

$$\theta < \theta'' \text{ なる } \theta \text{ において } \sin(\theta - \varphi) < \sin(\theta'' - \varphi)$$

$$\theta'' < \theta \leq \pi/2 + \varphi \text{ なる } \theta \text{ において } \sin(\theta - \varphi) > \sin(\theta'' - \varphi)$$

$$\pi/2 + \varphi < \theta < \theta' \text{ なる } \theta \text{ において } \sin(\theta - \varphi) > \sin(\theta' - \varphi)$$

$$\theta' < \theta < \pi + \varphi \text{ なる } \theta \text{ において } \sin(\theta - \varphi) < \sin(\theta' - \varphi)$$

一方、 $-\pi \leq (\theta' - \varphi) \leq -\pi/2$ のときは全く逆の関係がえられ、以上を総合すると、 $-\pi/2 \leq \theta_1 \leq \pi/2$ の範囲で式(2)を満足する解が2個ある場合は、式(3)を満たす解が実際上の見地より正解をあたえる。

参 考 文 献

- 1) 加藤一郎ほか：ロボットと応用システム，電気四学会連合大会講演論文集，3分冊21（1975）10.
- 2) 菊地栄一：自動車の無人操縦，計測と制御，11,1(1972) 85.
- 3) S. Ando & E. Maruyama: Unattended Travelling Vehicle Guided by Optical Means, Proc. 4th ISIR, (1974) 385.