移動ロボットによる箱押し作業の制御

大 川 善 邦* 横 山 乾**

Control of the Push-a-Box Operation by a Mobile Robot

Yoshikuni OKAWA Ken YOKOYAMA

We propose a method to make a mobile robot push a box from one place to another. First, we defined the circumferential conditions and derived the equations of motion for a robot and a pushed object. The validity of the proposed dynamic equations have been proved by the experiments. We adopt the simplest goal seeking strategy for robot's motor control. The objective of control is to direct a pushed object toward the goal point. Using a spline curve the robot tries to carry the box toward the goal. Many experiments have been done, which proved the feasibility of our proposals.

Key Words : Push-a-box operation, Mobile robot, Motor control, Robot's skill

1. は じ め に

移動ロボットの経路探索あるいは障害物回避に関して、これまでに多くの研究が報告¹⁾されている。経路探索問題においては、移動ロボットの現在位置と目的位置が与えられ、それらの間を結ぶパスを発見する方法が検討される。これに対して、障害物回避問題においては、障害物の認知あるいは動的な障害物との衝突回避などが取り扱われる。いずれの問題においても、移動ロボットの位置の移動が主たるテーマである。

本研究においては、これまでの移動ロボットに関する研究と違って、移動ロボットに何らかの仕事をさせることを考える。仕事の一つの具体例として、ここでは、ロボットが荷物を押すことによって物体を移動させる問題を取り上げる。荷物を押すという作業は、例をあげると、部屋の模様替えをする時に、家具を押しながら場所を替えるとか、あるいは大型船の接岸時にダグボートが船腹を押すなどある。この作業は、日常生活のいろいろな場面においてひんぱんに見ることができる基本的な作業の一つである。また、力学的にみた場合、荷物を押すという作業は、引っ張るとか、持って運ぶ作業に比べて不安定な作業であり、その制御も複雑になると考えられる。

ロボットのマニピュレータが物体を押す作業に関する研究を最初に行ったのは Mason²⁾である。彼は物体に作用する外力と摩擦力の関係に着目し、押される物体の回転方向が時計方向になるか反時計方向になるかを決定し、そのときの回転中心を求めるアルゴリズムを導いた。Peshkin と Sanderson³⁾ はマニピュレータの押しによって物体をランダムな状態から一定の状態に追い込み、それから物体のつかみに入る方法を提案した。対象物体の初期位置にばらつきがあり、かつまたその状態をセンサ等によって検知すること無しで、マニピュレータによる物体のハンドリングが可能であることを示した。Donald⁴⁾ はマニピュレータを使って物体のアセンブリを行うときに、作業が成功するかあるいは失敗するかを詳しく分析し、押しの動作が作業の結果に大きな影響を与えることを示⁵⁾した。Pham ら⁶⁾ は長方形の物体を押す場合について、物体の回転中心を解析的に求め、既に導出されている Mason の定理がこの場合成立することを証明した。前田ら⁷⁾ は壁に沿った状態で3次元の箱状物体を移動させるための研究を行った。Franchi ら⁸⁾ はマニピュレータを使って物体を押す際に、ビジョンを利用して物体の状態を測定し、制御を行う方法を報告している。Chen と Hwang⁹⁾ は可動物体が存在する環境において、ロボットを移動させる問題を取り扱っている。このとき、移動ロボットは物体を押す、自己の道を開きながら進むことになる。Spreng¹⁰⁾ はロボットが移動するときに、未知の物体

原稿受付 1992 年 5 月 11 日

* 大阪大学工学部

** 富士通研究所

にぶつかったとき、試しに物体を少し押すという動作を行うことによって、物体の性質を推定するという研究を行った。吉川ら¹⁰⁾は、固定された実験装置を使って摩擦力の着点を求める報告を行っている。高木ら¹¹⁾は移動ロボットによる荷物押し作業の問題を取り扱っているが、制御則としてルールベースに基づく制御を採用している。大川ら¹³⁾は与えられた一つの点をゴールとして、これに対して、ロボットが荷物を押すという研究を行っている。

本研究においては、移動ロボットの走行環境として、たとえば体育館の床のように、一様でフラットな平面を仮定する。この環境において、移動ロボットは箱状の物体を与えられ、これを定められた点を経由して、目的の場所まで運ぶとする。ここでは、それらの点列をどのようにして決めるかという計画問題は取り扱わない。ロボットは、スプライン関数を用いて最近の3点を内挿し、それを微分することによって望ましい角度を算出し、その角度と箱の現在の角度の差に比例する制御を実行するという方式を採用した。実際に、移動ロボットを製作し、これに制御則をプログラムし、走行実験を行った。実験の結果はここで提案したアルゴリズムがロボットの制御に有効であることを示している。

2. 移動ロボットによる荷物押し作業の定義

最初に、移動ロボットが作業を行う環境を定義し、次に移動ロボットの構造と機能について述べる。移動ロボットが作業を行う環境に関する制限条件を以下に箇条書きする。

1. 移動ロボットは広い自由な空間（たとえば体育館など）に置かれる。障害物の存在は、今回は、考慮しない。
2. 移動ロボットが作業を行う床は水平と仮定する。すなわち、移動ロボットと荷物の運動は2次元平面運動とする。
3. 移動ロボットは、常時、自己の現在位置を知ることができる。
4. 作業の対象となる荷物は矩形状の箱とする。荷物の重さは一様でその重心は幾何学的な中心と一致し、かつ荷物の側面は床に垂直と仮定する。
5. 荷物に働くクローン摩擦力は一様であり、かつ一定値とする。
- 4と5をまとめて、一様性の条件という。
6. 移動ロボットは荷物から離れることはない。ロボットが荷物から離れ、姿勢を変更した後に再度作業を行うという状況は現実にはよくあることだが、今回の研究においては考慮しない。移動ロボット

Fig. 1 Two coordinate systems for a mobile robot and a pushed box

の運動は連続的に行われると仮定する。これを運動の連続性の条件という。

7. 移動ロボットと荷物の相対的な角度は可観測とする。移動ロボットは自己の進行方向に対して荷物がどの方向を向いているかを知ることができる。連続性の条件により、荷物は接触板から離れることはないので、ロボットは自己の位置と荷物の位置を、常時、知ることになる。
8. 移動ロボットに対して、順序づけられた座標の集合が与えられる。これを経由点集合と呼ぶ。経由点集合の最初の要素をスタート、最後の要素をゴールと呼ぶ。ロボットはそれらの各座標をその順序で経由して、ゴールに到着するものとする。2つの座標を結ぶ軌道はロボットが自由に選択して良い。

次に、ここで用いる移動ロボットの形状と機能について述べる。ここで用いる移動ロボットと荷物の幾何学的な関係を Fig. 1 に示した。移動ロボットは4個の車輪を持ち、それらはダイヤモンド状に配列されている。前後の2輪はフリーなカスターであり、ロボットの運動が滑らかであるかぎり、ロボットの運動に対して力学的な影響は与えない。中央の左右2輪は独立な直流モータによって駆動される駆動輪である。Fig. 1 に2個の駆動輪の取付位置を示した。右と左の駆動輪を W_R , W_L とかく。 W_R と W_L に与える電圧（本システムにおける制御ベクトル）を u_R , u_L とかく。無負荷すなわち荷物がないうち、 $u_R = u_L$ ならばロボットは直進走行（前進、あるいは後退）を行う。 $u_R \neq u_L$ ならばロボットは円運動

を行う。特に、 $u_R = -u_L$ ならば、回転半径ゼロの円運動、すなわち即場回転を行う。もし直進を回転半径が無限大の円運動と考えるならば、ここで用いるロボットは常に円運動を行うと考えてよい。

ロボットは前後、左右対称に作られている。重心 G_1 はロボットの幾何学的な中心 O_1 にある。ロボットの中心 O_1 から駆動輪の着地点までの距離を a とかく。ロボットに固定した座標系を (o_1, x_1, y_1) とかく。 y_1 はロボットの前進方向、 x_1 は前進方向へ向かって右手側にとる。

ロボットの前方に細長い棒を付ける。これ押し棒と呼ぶ。棒の先端に矩形状の板を付ける。これを接触板と呼ぶ。接触板は回転ジョイントにより押し棒に取り付けられる。ロボットが荷物を押すときには、接触板を荷物に密着して押すものとする。ロボットの押し棒と荷物がなす角度を荷物角と呼び、 θ と書く。押し棒の先端、あるいは接触板の中央が箱と接触する点を着力点と呼び、 O_2 とかく。 O_1 から O_2 までの距離は b である。今回は、接触板は荷物から離れること、あるいは荷物の表面に沿って滑ることはないとは仮定し、接触点固定の連続的な動作の解析を行う。 O_2 を原点として、荷物の座標系 (O_2, x_2, y_2) を定める。ただし、 x_2 は接触板に沿った方向、 y_2 はこれと直角な方向へとる。荷物の重心 G_2 の座標を (d_x, d_y) とかく。

以上が、ここで考える移動ロボットによる荷物押し作業の問題定義である。問題を複雑にすることは可能であるが、基本的な問題から順に解決するというのがここで基本的な態度である。

3. 運動方程式の導出

移動ロボットと荷物の運動方程式を導くことを考える。移動ロボットに関する運動方程式の導出については築島ら¹³⁾、Alexander and Maddocks¹⁴⁾、その他多くの研究がある。ここでは前節で述べた状況における、移動ロボットおよび荷物の運動方程式を導く。

ここで考える系に作用する力の幾何学的な配置を Fig. 2 に示した。移動ロボットを剛体と見て、重心 G_1 の線速度成分を v_1 、回転角速度を ω_1 とかく。荷物の重心 G_2 の線速度を v_2 、 O_2 まわりの回転角速度を ω_2 とかく。ロボットに作用する摩擦力はロボットの進行方向に対してはモータの回転に対する摩擦力として作用し、ロボットの回転運動に対しては車輪の接地面に対してロボットの進行方向に対して直角に作用すると仮定する。前者を N_{3L} (左車輪)、 N_{3R} (右車輪) とかき、後者を N_{1xL} 、 N_{1xR} とかく。左右の駆動輪が発生する駆動力を D_L 、 D_R とかく。ロボットが荷物に対して及ぼす力を F_x 、 F_y とかく。作用反作用の法則により、当然、ロボットは荷物

Fig. 2 Symbols for the dynamic equations of motion

から $-F_x$ 、 $-F_y$ の力を受ける。

運動方程式の導出に関連した記号とそれらの簡単な説明を以下に示す。

(1) 移動ロボットに関する記号の説明

D_L, D_R : 左右駆動輪が発生する駆動力

$-F_x, -F_y$: 荷物から受ける力

I_1 : 慣性モーメント

M_1 : 質量

N_{1xL}, N_{1xR} : 車輪と床面に働く摩擦力

N_{1z} : 床面からの垂直反力

v_1 : 重心の並進運動に関する線速度

θ : 荷物角

ω_1 : 重心回りの回転運動の角速度

(2) 荷物に関する記号の説明

F_x, F_y : ロボットから受ける力

I_2 : 慣性モーメント

M_2 : 質量

N_{2z} : 床面からの垂直反力

v_2 : 重心の並進運動に関する線速度

μ_{2z} : 床面から荷物に働く摩擦係数

ω_2 : O_2 まわりの回転角速度

(3) モータと駆動輪に関する記号の説明

I_3 : 駆動輪の慣性モーメント

N_{3L}, N_{3R} : 駆動輪の回転に関する摩擦係数

c : 逆起電力に関する係数

k : 電圧から電流への増幅率

r : 車輪の半径

u_L, u_R : 左右モータへの指令電圧 (制御量)

μ_3 : 駆動輪の回転に働く摩擦係数

3.1 移動ロボットに関する運動方程式

移動ロボットの並進運動と回転運動に関する運動方程式はそれぞれ次式となる。

(i) 並進運動

$$-M_1 v_1 \omega_1 = N_{1xL} + N_{1xR} - F_x \quad (1)$$

$$M_1 \dot{v}_1 = D_L + D_R - F_y \quad (2)$$

$$0 = N_{1z} - g M_1 \quad (3)$$

(ii) 回転運動

$$I_1 \dot{\omega}_1 = a(D_R - D_L) + b F_x \quad (4)$$

3.2 荷物に関する運動方程式

次に、荷物の並進運動と回転運動に関する方程式はそれぞれ次式となる。

(i) 並進運動

$$M_2 \{(-v_1 \omega_1 - b \dot{\omega}_1) \cos \theta + (\dot{v}_1 - b \omega_1^2) \sin \theta - d_y \dot{\omega}_2 - d_x \omega_2^2\} \\ = F_x \cos \theta + F_y \sin \theta - \mu_{2z} N_{2z} \cos \psi \quad (5)$$

$$M_2 \{(-v_1 \omega_1 - b \dot{\omega}_1) \sin \theta + (\dot{v}_1 - b \omega_1^2) \cos \theta + d_x \dot{\omega}_2 - d_y \omega_2^2\} \\ = -F_x \sin \theta + F_y \cos \theta - \mu_{2z} N_{2z} \sin \psi \quad (6)$$

ここで

$$\psi = \tan^{-1} \frac{b \omega_1 \sin \theta + v_1 \cos \theta + d_x \omega_2}{-b \omega_1 \cos \theta + v_1 \sin \theta - d_y \omega_2}$$

である。

$$0 = N_{2z} - g M_2 \quad (7)$$

(iii) 回転運動

$$M_2 \{d_x (\dot{v}_1 - b \omega_1^2) - d_y (-v_1 \omega_1 - b \dot{\omega}_1)\} + I_2 \dot{\omega}_2 \\ = \mu_{2z} N_{2z} \sqrt{d_x^2 + d_y^2} \cos \left(\psi + \tan^{-1} \frac{d_y}{d_x} \right) \quad (8)$$

ここで、左辺の導出にあたり、荷物角 $\theta \approx 0$ と見て、 $\sin \theta = 0$, $\cos \theta = 1$ とおいた。

3.3 系全体の運動方程式

移動ロボットの運動方程式 (1)~(4) と荷物の運動方程式 (5)~(8) より F_x と F_y を消去することによって、移動ロボットおよび荷物を統合した運動方程式を求めることができる。

(i) 並進運動

$$(M_1 + M_2) \dot{v}_1 = D_L + D_R + M_2 b \omega_1^2 \\ + M_2 \{-(d_y \dot{\omega}_2 - d_x \omega_2^2 + \mu_{2z} g \cos \psi) \sin \theta \\ - (d_x \dot{\omega}_2 - d_y \omega_2^2 + \mu_{2z} g \sin \psi) \cos \theta\} \quad (9)$$

(ii) 回転運動

$$I_1 \dot{\omega}_1 = a(D_R - D_L) + M_2 b(-v_1 \omega_1 - b \dot{\omega}_1) \\ + M_2 b \{(-d_y \dot{\omega}_2 - d_x \omega_2^2 + \mu_{2z} g \cos \psi) \cos \theta \\ - (d_x \dot{\omega}_2 - d_y \omega_2^2 + \mu_{2z} g \sin \psi) \sin \theta\} \quad (10) \\ I_2 \dot{\omega}_2 = -M_2 \{d_x (\dot{v}_1 - b \omega_1^2) - d_y (-v_1 \omega_1 - b \dot{\omega}_1)\} \\ + \mu_{2z} M_2 g \sqrt{d_x^2 + d_y^2} \cos \left(\psi + \tan^{-1} \frac{d_y}{d_x} \right) \quad (11)$$

3.4 モータの特性も含めた運動方程式

一般に、直流モータの出力トルクを T 、車輪の回転速度を ω 、指令電圧を u とすると次のような関係式で近似することができる。

$$T + I_3 \dot{\omega} + b \omega = k u \quad (12)$$

ここで、 I_3 は慣性モーメント、 c は逆起電力、 k は増幅率に相当する係数である。トルク T と駆動力 D は次のような関係がある。

$$T = (D + \mu_3 N_3) r \quad (13)$$

また、左右車輪の回転速度 ω_L , ω_R と移動ロボットの速度 v_1 , ω_1 には次の関係がある。

$$r \omega_L = v_1 - a_1 \omega_1 \quad (14)$$

$$r \omega_R = v_1 + a_1 \omega_1 \quad (15)$$

(12)~(15)式を移動ロボットの力学的な運動方程式である (9)~(11) 式に代入すると次式となる。

(i) 並進運動

$$\left(M_1 + M_2 + \frac{2I_3}{r^2} \right) \dot{v}_1 + \frac{2c}{r^2} v_1 = \frac{k}{r} (u_L + u_R) \\ - \mu_3 (N_{3L} + N_{3R}) + M_2 b \omega_1^2 \\ + M_2 \{-(d_y \dot{\omega}_2 - d_x \omega_2^2 + g \mu_{2z} \cos \psi) \sin \theta \\ - (d_x \dot{\omega}_2 - d_y \omega_2^2 + g \mu_{2z} \sin \psi) \cos \theta\} \quad (16)$$

(ii) 回転運動

$$\left(I_1 + \frac{2a^2 I_3}{r^2} \right) \dot{\omega}_1 + \frac{2a^2 c}{r^2} \omega_1 = \frac{k}{r} a (u_R - u_L) \\ - \mu_3 a (N_{3R} - N_{3L}) + M_2 b (-v_1 \omega_1 - b \dot{\omega}_1) \\ + M_2 b \{(-d_x \dot{\omega}_2 - d_x \omega_2^2 + \mu_{2z} g \cos \psi) \cos \theta \\ - (d_x \dot{\omega}_2 - d_y \omega_2^2 + \mu_{2z} g \sin \psi) \sin \theta\} \quad (17) \\ I_2 \dot{\omega}_2 = -M_2 \{d_x (\dot{v}_1 - b \omega_1^2) - d_y (-v_1 \omega_1 - b \dot{\omega}_1)\} \\ + \mu_{2z} M_2 g \sqrt{d_x^2 + d_y^2} \cos \left(\psi + \tan^{-1} \frac{d_y}{d_x} \right) \quad (18)$$

(16)~(18)がモータの動特性を含めた移動ロボットおよび荷物の運動方程式である。

4. 制御則の構成

フィードバック制御の考え方に基づいて、ロボットの荷物押し作業の制御則を導く。最初に1点のゴールを目指す場合について、制御方法の基本を述べ、次に、スプライン関数を用いて多点の場合に拡張する方法を示す。

仮定により、ここではロボットに対して順序づけられた経由点の集合が与えられる。この経由点集合の要素を $g_1, \dots, g_i, \dots, g_n$ とかく。 g_1 はスタート、 g_n はゴール、その他は中間ゴール点である。いま、ロボットは g_{i-1} のゴール点を過ぎ、次のゴール点 g_i に向かって走行しているものとする。このときの状態を Fig. 3 に示した。ここで、着力点 o_2 から中間ゴール g_i に向けて引いた半直線をゴール線と呼ぶ。 o_2 から荷物の重心 G_2 に向けて

Fig. 3 Symbols used in the control

引いた半直線を重心線と呼ぶ。ゴール線と重心線がなす角度をゴール角と呼び、 θ_g とかく。角度は、すべて反時計方向を正とする。 θ は既に定義した荷物角である。

移動ロボットが行う円運動の回転中心を O 、回転半径を R とする。ロボットが円運動を行うことによって、押し棒の先端 o_2 は $O-o_2$ を半径とする円運動を行う。その接線方向を o_2F とかき、これを力線と呼ぶ。力線が重心線となす角度を力角と呼び、 θ_F とかく。

Mason²⁾の定理により、荷物の方向を中間ゴール g_i の方向へ向けるためには、Fig. 3 に示したように、力線とゴール線が重心線をはさんで反対側にある必要がある。力線を重心線から離せば離すほど、それだけ荷物がゴールの方向を向く復元力が大きくなる。そこで、 K をフィードバックのゲインとして

$$\theta_F = -K\theta_g \quad (19)$$

とおく。ここで

$$|\theta_F| \geq \left| \tan^{-1} \frac{dy}{dx} \right|$$

とする。 θ_F の下限は接触板が荷物から離れないために必要である。もし、接触板が荷物の表面に沿って滑る可能性がある場合は、 θ_F の下限はフリクションコーンの傾きと一致する。ここでは、接触板の表面は荷物に密着していると仮定している。荷物の移動方向がゴールの方

向を向くことを理想的な状態とすれば、 θ_g は目標値からの偏差である。このとき、(19) 式は荷物の重心線をゴール線に一致させることを目標として比例制御を行うためのフィードバック則ということになる。

幾何学的な関係により、三角形 $\triangle Oo_1o_2$ において

$$\tan\left(\theta + \tan^{-1} \frac{dy}{dx} + \theta_F\right) = \frac{R}{b} \quad (20)$$

が成立する。(19) 式を (20) 式に代入すると

$$\tan\left(\theta + \tan^{-1} \frac{dy}{dx} - K\theta_g\right) = \frac{R}{b} \quad (21)$$

を得る。直流モーターの過渡応答を無視して、指令電圧と回転半径の関係を求めると

$$\frac{u_L}{u_R} = \frac{R+a}{R+a} \quad (22)$$

を得る。(21) 式と (22) 式から R を消去すると

$$\frac{u_L}{u_R} = \frac{b \tan\left(\theta + \tan^{-1} \frac{dy}{dx} - K\theta_g\right) + a}{b \tan\left(\theta + \tan^{-1} \frac{dy}{dx} - K\theta_g\right) - a} \quad (23)$$

を得る。これが荷物をゴールの方向へ向ける制御を行うための基本式である。これによって、左右の駆動輪へ入力する指令電圧 u_L と u_R の比が決定できる。 u_L と u_R の値の大きさは、ロボットが中間ゴール g_i に到着する時刻、あるいはロボットの線速度に関係している。今回は、ゴールに到着する時刻は任意としたので、 u_L と u_R の大きさは適当に決めるものとした。

実際にロボットを走らせた場合、荷物の重心がゴールの真上を通過する確率は小さい。このために、荷物がある与えられたゴール点に到達したかどうか判定する基準を用意する。与えられた判定基準が満足されたとき、荷物はそのゴール点へ到達したと言う。一つのゴールが満足されたとき、ロボットは経由点集合から次のゴール点を取り出し、今度はそのゴール点に向けて進ことになる。取り出したゴール点がこれまで走行してきた方向と一致しない場合、ロボットがこれまで目指してきた方向と、これから進行する方向がステップ状に変化し、動作の滑らかさが失われる。言ってみれば、ロボットはぎくしゃくした動きを示す。

この対策として、ここではスプライン関数を用いて、ロボットの実軌道を滑らかにする方法を採用した。まず、荷物の重心の現在位置、現在目指しているゴール点、およびその次のゴール点の合計3点を選び、この3点に対して3次のスプライン曲線を当てはめる。次に、その曲線を微分して、荷物の重心位置における接線を計算する。この接線方向を荷物の目標角として(すなわち、Fig. 3 における o_2g_i とする)、(19)式のフィードバック量を計算する。スプライン関数をロボットの軌道へ応用

することについては、既に、小森谷ら¹⁵⁾の研究があるので、ここでその内容を再述することは避ける。ここで採用した方法の特徴はスプライン関数の一端に荷物の現在位置を用い、リアルタイムで計算をするところにある。

フィードバック制御則 (23) 式を導出するに当たって、荷物からの反力および駆動モータの過渡応答を無視した。既に3節において示したように、荷物からの反力が存在する場合のロボットの軌道は必ずしも円軌道になるとは限らない。また、ロボットの駆動モータの過渡応答を無視して良いというルールもない。唯一の基本則は、荷物の重心を境にして、ゴールと反対の方向へ力をかけると、荷物はゴールの方向へ復元するというだけである。ロボットが荷物に対してかける力を、どの方向へ、どれだけにしたら良いかという問題を論理的に解決することは困難である。これは、3節で導いた運動方程式を観察すれば、容易に理解できる。ここでは、物理的な内容にとらわれない比例則を仮定して、制御則を導出した。

一般には、重心 g_2 の場所が不明のケースが多い。たとえば、荷物の重さが偏っていたり、床からの摩擦力の分布が一樣で無い場合は、重心の位置は図形の中心と一致しない。この場合は、荷物の重心がどこにあるかを推定する機構が必要になる。人が作業をする場合は、おそらく、これらのパラメータを学習しながら作業を進めるものと考えられる。

5. 実験の結果

最初に、ワークステーションを用いて (16)(17)(18) 式を計算し、その結果を連続的に CRT ヘッドディスプレイするプログラムを製作した。これを以下でシミュレーションモデルと呼ぶ。次に、実験用の移動ロボットを製作した。製作した移動ロボットの写真を Fig. 4 に示す。この移動ロボットの前方フレームに押し棒を付け、その先端に接触板を取り付けた。接触板は回転ジョイントによって押し棒に接続し、荷物の面に密着したままの状態ですべて自由に角度を変えられるようにした。押し棒と接触板の角度はポテンシオメータによって計測する。押し棒、接触板、ポテンシオメータの取り付け状態を Fig. 5 の写真に示した。左右の車輪は直流モータによって駆動する。車輪の回転角はロータリーエンコーダによって計測する。

移動ロボットは、制御装置として4個のマイクロコンピュータを持つ。これらのマイクロコンピュータは機能別の並列処理を行う。第1のマイクロコンピュータは車輪の回転速度を定値制御する。第2のマイクロコンピュータは車輪の角度情報に基づいて、移動ロボットの現在位置を計算する。第3のマイクロコンピュータは荷物角

Fig. 4 A photograph of a mobile robot

Fig. 5 The pushing rod and the contact plate

θ を観測し、その値と移動ロボットの現在の位置と姿勢情報から (23) 式を計算する。第4のマイクロコンピュータはシステム全体を統括するためのマスターコンピュータである。制御プログラムはワークステーション上で開発し、マスターコンピュータを経由して各コンピュータにダウンロードする。

予備実験として、移動ロボットの左右の駆動輪に一定の指令電圧を与え、直線走行、円走行等の基本的な走行実験を行い、移動ロボットの走行特性に関するデータを採取した。実験結果をシミュレーションモデルの計算結果と比較し、シミュレーションモデルに含まれるパラメータ（例えば、床からの摩擦係数等）を決定した。

実機による実験結果とシミュレーションによる計算結果は完全に一致することはない。例えば、現実の世界において作用する摩擦力は動力学方程式を導く際に仮定した一様性の条件を満足していない。また、使用した直流モータは回転する際に細かな振動を発生するが、このような振動は運動方程式の中に取り入れられていない等、その原因と考えられる要因は多く存在する。ここでは、両者の平均的な特性が一致したところにおいて、シミュレーションモデルのパラメータは同定されたと考えた。最終的に得られた結果の一例を Fig. 6 に示した。図において、シミュレーションモデルから計算した軌道は滑らかな曲線になるのに対して、実機を用いて行った実験の軌道は細かな凹凸をもった曲線になっている。このような細部における差異はあるにしても、両者の大局的な

Fig. 6 An actual trajectory and its simulation

Fig. 7 A robot starts from (0,0), via (2,1), to the goal (4,4)

特性は一致しているので、ここで導出した運動方程式の妥当性は実験的に検証されたと判断した。

次に、移動ロボットの制御に関する実験を行った。結果の一例を Fig. 7 に示した。図において、大きい長方形は移動ロボット、小さい長方形は現在押されている箱を示す。この実験においては、最初に荷物の重心を座標の原点上におき、ロボットは x 軸の正方向に向ける。経由点集合として、 $(0,0)$ 、 $(2,1)$ 、 $(4,4)$ を与える。ただし、点 $(2,1)$ を経過した後は3次のスプライン関数を適用するために、点 $(5,5)$ が与えられているとした。この点は移動ロボットが最終ゴールへ入る角度を指定することと等価である。図から、ロボットは与えられた点を経由して、正しく目標のゴールへ到着していることが分かる。Fig. 8は、この実験における移動ロボットの向き、荷物の向き、ゴールの向きの変化を示したものである。縦軸の角度は、床に固定した絶対座標系から見た角度を

Fig. 8 The variations of three absolute angles during the experiments

示している。図から、荷物の向きはほぼゴールの向きと一致し、ロボットの向きは、少し遅れてゴールの方向を向いていることが分かる。

このようにして、制御のためのパラメータを前もって十分に学習し、かつ実験者がロボットの特性を良く理解したうえで経由点の集合を無理無く与えるならば、移動ロボットは、ほぼ目的の軌道に沿って荷物を押して進むことが可能であることを確認した。

6. 結 論

ここでは移動ロボットが荷物を押して、目的地へ向かって移動するという問題について研究を行った。研究の最初のステップとして、ロボットの環境に対して制御条件を課し、そのもとで制御が実現できることを示した。

マニピュレータによる部品のハンドリング等の場合は、マニピュレータ側が圧倒的なマスを持つので、部品側からの反作用を無視することができる。しかし、移動ロボットによる押しの場合は、荷物が移動ロボットに与える影響を無視することができない。ここでは、移動ロボットと荷物の両者を含めた運動方程式を新しく導いた。この運動方程式は、電動機の動特性も含む。得られた運動方程式の妥当性は実験により確認した。

軌道の制御において、移動ロボットには経由点の集合が与えられるとした。制御系は荷物の現在位置、最も近い2つの中間ゴール点を選び、これらの3点に対して3次のスプライン関数を当てはめ、その傾きをもって目的の方向としフィードバック制御を行うとした。ロボットに対して、いくつかの点を与え、実際に走行実験を行った。妥当な点列を与える限りにおいて、ロボットは荷物

を押して進ことができることを確認した。

ここで考えた状況はあまりにも単純である。これからの研究の方向としては、状況を次第に複雑にして、環境を現実に近いことが必要と考えられる。たとえば

1. 障害物の存在を考慮して制御則を構築する。
2. 床面の摩擦を可変とし、外乱の一つの要因と考える。
3. 荷物を運ぶだけでなく、目的値において整列させるとか、いろいろな仕事を考える。
4. 移動ロボットが荷物から離れ、姿勢を変えて別の角度から押し作業を開始するなど、不連続な制御も考える。
5. もっと高次の目的が与えられるとして、軌道を計画する機能を持つことを考える。

等々ある。この分野には、解決しなければならない研究のテーマが多く存在していることは確かである。

参 考 文 献

- 1) S.S.Iyengar and A.Elfe (ed.), "Autonomous Mobile Robots: Control, Planning, and Architecture," IEEE Computer Society Press, 1991.
- 2) M.T.Mason, "Mechanics and Planning of Manipulator Pushing Operations," Int. J. of Robotics Research, Vol.5, No.3, pp.53-71, 1986.
- 3) M.A.Peshkin and A.C.Sanderson, "The Motion of a Pushed, Sliding Workpiece," IEEE J. of Robotics and Automation, Vol.4, No.6, pp.569-598, 1988.
- 4) B.R.Donald, "Planning Multi-Step Error Detection and Recovery Strategies," Int. J. of Robotics Research, Vol.9, No.1, pp.3-60, 1990.
- 5) D.T.Pham, K.C.Cheung, and S.H.Yeo, "Initial Motion of a Rectangular Object Being Pushed or Pulled," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.3, pp.1046-1050, 1990.
- 6) H.Mayeda, and Y.Wakatsuki, "Strategies for Pushing a 3D Block along a Wall," Proceedings of the IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS '91, Vol.2, pp.461-466, 1991.
- 7) P.Franchi et al, "Preliminary Experiments of Visuo-Motor Integration in Pushing Tasks," IROS '91, Vol.2, pp.535-537, 1991.
- 8) P.C.Chen, and Y.K.Hwang, "Practical Planning among Movable Obstacles," Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.444-449, 1991.
- 9) M.Spreng, "Dealing with Unexpected Situations During the Execution of Robot Motions," Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.64-69, 1991.
- 10) T.Yoshikawa, and M.Kurisu, "Identification of the Center of Friction from Pushing an Object by a Mobile Robot," Proc. of IROS '91, pp.449-454, 1991.
- 11) S.Takagi, and Y.Okawa, "Rule-Based Control of a Mobile Robot for the Push-a-Box Operation, Proceedings of IROS '91, pp.1338-1343, 1991.
- 12) Y.Okawa, and K.Yokoyama, "Control of a Mobile Robot for the Push-a-Box Operation, Proceedings of 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.761-766, 1992.
- 13) 築島, 高野, 佐々木, 井上, "車輪式移動ロボットの運動学および動力学の一般理論に関する研究", 日本ロボット学会誌, Vol.8, No.6, pp.59-71, 1990.
- 14) J.C.Alexander and J.H.Maddocks, "On the kinematics of Wheeled Mobile Robots," International Journal of Robotics Research, Vol.8, No.5, pp.15-27, 1989.
- 15) 小森谷, 谷江, "スプライン曲線による車輪型移動ロボットの軌道制御", 日本ロボット学会誌, Vol.8, No.2, pp.133-143, 1989.

大川善邦 (Yoshikuni OKAWA)

1934年7月7日生。1959年東京大学工学部機械工学科卒業。1964年東京大学大学院数物系研究科博士課程修了。1970年岐阜大学教授, 1985年大阪大学教授, 現在に至る。並列処理, ロボット工学の研究に従事。IEEE Computer Society, AAAI,

ACM 等の会員。工学博士。(日本ロボット学会正会員)

横山 乾 (Ken YOKOYAMA)

1966年1月19日生。1989年大阪大学工学部産業機械工学科卒業。1991年大阪大学大学院工学研究科修了。同年より(株)富士通研究所厚木研究所電子機器研究部門に勤務。現在, パターン認識の研究に従事。