受動的コンプライアンス機構を有する 3 台の移動ロボットを用いた 直方体形物体の押し搬送*

(クロソイド曲線を用いた軌道計画と押し搬送の実験)

小 島 宏 行^{*1}, 楽 燕 群^{*2}

呉 大 鵬^{*2}, 高 田 嘉 之^{*2}

Pushing Transfer of a Rectangular Prism Object by Three Mobile Robots with Passive Compliance Mechanisms

(Trajectory Planning by Clothoid and Experiments of Pushing Transfer)

Hiroyuki KOJIMA^{*3}, Yanqun LE

Dapeng WU and Yoshiyuki TAKADA

^{*3} Department of Mechanical System Engineering, Gunma University,
1-5-1 Tenjincho, Kiryu-shi, Gunma, 376-8515 Japan

In this paper, first, the trajectory planning method of a rectangular prism object with three mobile robots with passive compliance mechanisms is presented. To accomplish the smooth motion control of the rectangular prism object, in the trajectory planning of the rectangular prism object, clothoid is used effectively, and the trajectory of the multiple mobile robots is obtained from the trajectory of the rectangular prism object. Then, the tracking control system of the three mobile robots is constructed. Second, using the three autonomous mobile robots (MK-01X developed by the Fuji Heavy Industries), the experiments of the pushing transfer have been carried out, and it is confirmed experimentally that the rectangular prism object can be transferred.

Key Words: Moving Robot, Motion Control, Measurement and Control, Cooperative Pushing Transfer, Rectangular Prism Object, Clothoid

1. 結 言

ロボットアームや移動ロボットによる作業の一つに、物体の押し作業があり、移動ロボットによる押し作業に関する研究が行われている。例えば、物体を押し力が摩擦中心を通る場合では、その物体が、姿勢変化を伴わず直進運動を行うことを示した研究⁽¹⁾、移動ロボットによる押し作業を行う場合の物体の摩擦力分布及び摩擦中心位置を推定する方法を提案し、実験よりその有用性を示した研究⁽²⁾、経由点と 3 次のスプライン関数を用いて、押し作業を行う移動ロボットの走行制御を行った研究⁽³⁾、物体の押し作業を、摩擦力分布を考慮し、移動ロボットを用いて行った研究⁽⁴⁾等が報告されている。

一方、複数のロボットアームや移動ロボットによる協調作業を行うシステムは、作業の高効率化、高性能化、信頼性の高度化などの利点を有することから、複数のロボットを用いた協調作業に関する研究が報告されている⁽⁵⁾。移動ロボットを用いた押し作業を行う場合、複数の移動ロボットを用いることにより、押し

作業の信頼性の高度化、高性能化などが実現し得るものと考えられるが、このような複数の移動ロボットを用いた押し作業に関する研究は、極めて少ないようである。また、複数指を有するメカニカルハンドを取り付けたロボットアームによる物体の搬送操作が行われているが、このようなメカニカルハンドによる物体の搬送作業においては、物体とメカニカルハンドとの位置の誤差が生じた場合、過度の力が生じ本来の仕事が正しく行われないことから、ロボットアームには比較的高い剛性をもたせ、メカニカルハンドにコンプライアンスを与える場合が多いようである⁽⁶⁾。このようなことから、複数の移動ロボットによる押し作業を行う場合、移動ロボットにコンプライアンスを持たせるとともに、物体を拘束し、微小な移動ロボットの軌道追従制御誤差を吸収しながら押し作業を行うことも、興味ある物体の押し作業の一手法であると思われる。なお、平面内の物体の自由度が 3 であることから、コンプライアンス機構を有する 3 台の移動ロボットを用いて、物体を拘束しながら押し搬送することにより、確実な押し搬送制御が行えるものと考えられる。移動ロボット単独の軌道計画に関して、例えば、円弧と直線⁽⁷⁾、⁽⁸⁾、クロソイド曲線⁽⁹⁾、スプライン曲線⁽¹⁰⁾な

* 原稿受付 2003 年 5 月 12 日。

^{*1} 正員、群馬大学工学部 (〒376-8515 桐生市天神町 1-5-1)。

^{*2} 群馬大学大学院。

E-mail: kojima@me.gunma-u.ac.jp

Fig.1 Coordinate system of transfer manipulation

どを用いた研究が行われているが、複数の移動ロボットを用いた物体の押し搬送作業における複数の移動ロボットの軌道計画に関する資料は極めて少ないように思われる。

本研究は、受動的コンプライアンス機構を有する3台の移動ロボットを用いた直方体形物体の押し搬送システムを構築するとともに、実機の自律型移動ロボットを用いて押し搬送の実験を行い、本システムの有用性を検証したものである。直方体形物体の軌道計画においては、直方体形物体をより滑らかに押し搬送することを目的として、曲率が軌道の長さに比例して連続的に変化するようなクロソイド曲線⁽¹²⁾を用いている。したがって、直方体形物体の全軌道において曲率が連続的に変化する、直方体形物体を搬送するための推力とトルクが有限な値となり、慣性力による衝撃が伴わない直方体形物体の押し搬送が可能となる。次いで、直方体形物体と3台の移動ロボットの相対的位置関係から、3台の移動ロボットの軌道計画が行われている。また、直方体形物体の押し搬送の実験では、3台の移動ロボットに取り付けられている3個の受動的コンプライアンス機構を用いて、直方体形物体を拘束しながら押し搬送を行っている。このため、3台の移動ロボットの高精度な軌道追従制御システムを構築することが重要となる。一方、Kanayamaらは、移動ロボットの進行方向と進行横方向の位置の制御偏差および姿勢角の制御偏差を漸近的に零にするような移動ロボットの非線形安定化走行制御理論⁽¹¹⁾を考案している。本実験では、このKanayamaらの非線形安定化走行制御理論を用いて、3台の移動ロボットの軌道追従制御システムを構築している。

2. クロソイド曲線を用いた軌道計画

図1は、受動的コンプライアンス機構を有する3台

Fig.2 Trajectory planning

Fig.3 Symmetrical clothoid

の移動ロボットを用いた直方体形物体の押し搬送システムを示したものである。図2は、軌道計画の図を示したものであり、直方体形物体のよりスムーズな押し搬送の実現を意図し、まず、直方体形物体の軌道計画を、二つの対称クロソイド曲線と直線を用いて行い、次いで、直方体形物体と3台の移動ロボットの相対的位置関係から、3台の移動ロボットの軌道計画を行っている。

本軌道計画では、図2のように、直方体形物体の初期位置 P_s および目標位置 P_g を通る半径 a_0 の二つの円を描き、この二つの円 (P_{c1}, P_{c2}) の共通接線として直線軌道を求めるとともに、直方体形物体の曲率を連続的に変化させることを意図し、二つの円弧を対称クロソイド曲線に置き換え直方体形物体の軌道計画を行っている。

図2のように、直方体形物体の初期位置 P_s および目標位置 P_g を、

$$P_s = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ \theta_s \end{bmatrix}, \quad P_g = \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ \theta_g \end{bmatrix} \quad (1)$$

とくと、対称クロソイド曲線の角度 ϕ_{o1} , ϕ_{o2} , 直線軌道の角度 ϕ_b および長さ b_o は次式で与えられる。

$$\phi_{o1} = \phi_b - \theta_S \quad (2)$$

$$\phi_{o2} = \phi_b - \theta_G \quad (3)$$

$$\phi_b = \tan^{-1}\left(\frac{2a_o}{b_o}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{y_{k2} - y_{k1}}{x_{k2} - x_{k1}}\right) \quad (4)$$

$$b_o = \left\{ (x_{k1} - x_{k2})^2 + (y_{k1} - y_{k2})^2 - 4a_o^2 \right\}^{1/2} \quad (5)$$

ここに、

$$x_{k1} = x_S - a_o \sin \theta_S \quad (6)$$

$$y_{k1} = y_S + a_o \cos \theta_S \quad (7)$$

$$x_{k2} = x_G + a_o \sin \theta_G \quad (8)$$

$$y_{k2} = y_G - a_o \cos \theta_G \quad (9)$$

図2中の二つの対称クロソイド曲線の曲率は、対称クロソイド曲線における軌道の長さに対し線形的に変化する。クロソイド曲線に関する基礎式⁽¹²⁾を用いると、各対称クロソイド曲線における軌道の長さを σ_i に対する、角度 ϕ_i および座標 ξ_{xi} , ξ_{yi} は、図3中の記号を用いると次式のように書くことができる。

$$(a) \quad 0 \leq \sigma_i \leq \left(\frac{\sigma_{oi}}{2}\right)$$

$$\phi_i(\sigma_i) = f_{\phi ai}(\sigma_i) \quad (10)$$

$$\xi_{xi}(\sigma_i) = f_{xai}(\sigma_i) \quad (11)$$

$$\xi_{yi}(\sigma_i) = f_{yai}(\sigma_i) \quad (12)$$

$$(b) \quad \left(\frac{\sigma_{oi}}{2}\right) \leq \sigma_i \leq \sigma_{oi}$$

$$\phi_i(\sigma_i) = f_{\phi bi}(\sigma_i) \quad (13)$$

$$\xi_{xi}(\sigma_i) = f_{xbi}(\sigma_i) \quad (14)$$

$$\xi_{yi}(\sigma_i) = f_{ybi}(\sigma_i) \quad (15)$$

ここに、

$$f_{\phi ai}(\hat{\sigma}_i) = \frac{\kappa_{oi}}{\sigma_{oi}} \hat{\sigma}_i^2 \quad (16)$$

$$f_{\phi bi}(\tilde{\sigma}_i) = \frac{\kappa_{oi}}{\sigma_{oi}} (\sigma_{oi} - \tilde{\sigma}_i)^2 \quad (17)$$

$$f_{xai}(\hat{\sigma}_i) = \int_0^{\hat{\sigma}_i} \cos\left(\frac{\kappa_{oi}}{\sigma_{oi}} \hat{\sigma}_i^2\right) d\hat{\sigma}_i \quad (18)$$

$$f_{yai}(\hat{\sigma}_i) = \int_0^{\hat{\sigma}_i} \sin\left(\frac{\kappa_{oi}}{\sigma_{oi}} \hat{\sigma}_i^2\right) d\hat{\sigma}_i \quad (19)$$

$$f_{xbi}(\tilde{\sigma}_i) = \xi_{xoi} - f_{xai}(\sigma_{oi} - \tilde{\sigma}_i) \cos \phi_{oi} - f_{yai}(\sigma_{oi} - \tilde{\sigma}_i) \sin \phi_{oi} \quad (20)$$

$$\xi_{ybi}(\tilde{\sigma}_i) = \xi_{yoi} - f_{xai}(\sigma_{oi} - \tilde{\sigma}_i) \sin \phi_{oi} + f_{yai}(\sigma_{oi} - \tilde{\sigma}_i) \cos \phi_{oi} \quad (21)$$

$$\xi_{xoi} = a_o \sin \phi_{oi} \quad (22)$$

$$\xi_{yoi} = a_o (1 - \cos \phi_{oi}) \quad (23)$$

$$\kappa_{oi} = 2\phi_{oi} / \sigma_{oi} \quad (24)$$

Fig.4 Velocity pattern of rectangular object

本研究では、図3から得られる次式の実線形方程式を用いて、長さ a_o および角度 ϕ_{oi} に対する軌道の長さ σ_{oi} および最大曲率 κ_{oi} を定め、二つの対称クロソイド曲線の形状を定めている。

$$f_{xai}\left(\frac{\sigma_{oi}}{2}\right) + \left\{ f_{yai}\left(\frac{\sigma_{oi}}{2}\right) - a_o \right\} \tan\left(\frac{\phi_{oi}}{2}\right) = 0 \quad (25)$$

なお、後述の数値計算では、二つの対称クロソイド曲線の長さ σ_{o1} , σ_{o2} は、式(25)の実線形方程式をはさみ打ち法を用いて数値的に求めている。

したがって、直方体形物体の全軌道の長さ s_{om} は、次式で与えられる。

$$s_{om} = \sigma_{o1} + b_o + \sigma_{o2} \quad (26)$$

図4は、直方体形物体が軌道に沿って押し搬送される場合の速度パターンを示したものであり、本研究では、直方体形物体の移動量 s_o を、時間 t の関数として次式のように設定している。

$$s_o = \frac{v_{om}}{T_\epsilon^2} t^3 - \frac{v_{om}}{2T_\epsilon^3} t^4, \quad \text{if } 0 \leq t \leq T_\epsilon \quad (27)$$

$$s_o = v_{om} \left(t - \frac{T_\epsilon}{2} \right), \quad \text{if } T_\epsilon \leq t \leq (T_m - T_\epsilon) \quad (28)$$

$$s_o = s_{om} - \frac{v_{om}}{T_\epsilon^2} \bar{t}^3 + \frac{v_{om}}{2T_\epsilon^3} \bar{t}^4, \quad \text{if } (T_m - T_\epsilon) \leq t \leq T_m \quad (29)$$

ここに、

$$\bar{t} = T_m - t, \quad T_m = (s_{om} / v_{om}) + T_\epsilon \quad (30)$$

直方体形物体の移動量 s_o が時間 t の関数として式(27)~(29)のように与えられると、直方体形物体の位置

$$P_o = \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \\ \theta_o \end{bmatrix} \quad (31)$$

は、移動量 s_o の関数として次式のように書くことができる。

$$(a) \quad 0 \leq s_o \leq \sigma_{o1}$$

$$x_o = x_S + \xi_{x1}(s_o) \cos \theta_S - \xi_{y1}(s_o) \sin \theta_S \quad (32)$$

Fig.5 Photograph of autonomous mobile robot

$$y_o = y_S + \xi_{x1}(s_o) \sin \theta_S + \xi_{y1}(s_o) \cos \theta_S \quad (33)$$

$$\theta_o = \theta_S + \phi_1(s_o) \quad (34)$$

$$(b) \sigma_{o1} \leq s_o \leq (\sigma_{o1} + b_o)$$

$$x_o = x_{b1} + (s_o - \sigma_{o1}) \cos \phi_b \quad (35)$$

$$y_o = y_{b1} + (s_o - \sigma_{o1}) \sin \phi_b \quad (36)$$

$$\theta_o = \phi_b \quad (37)$$

$$(c) (\sigma_{o1} + b_o) \leq s_o \leq s_{om}$$

$$x_o = x_G - \bar{\xi}_x \sin \bar{\phi}_b - \bar{\xi}_y \cos \bar{\phi}_b \quad (38)$$

$$y_o = y_G - \bar{\xi}_x \cos \bar{\phi}_b + \bar{\xi}_y \sin \bar{\phi}_b \quad (39)$$

$$\theta_o = \phi_b - \phi_2(s_o - \sigma_{o1} - b_o) \quad (40)$$

ここに,

$$x_{b1} = x_S + \xi_{xo1} \cos \theta_S - \xi_{yo1} \sin \theta_S \quad (41)$$

$$y_{b1} = y_S + \xi_{xo1} \sin \theta_S + \xi_{yo1} \cos \theta_S \quad (42)$$

$$\bar{\xi}_x = \xi_{xo2} - \xi_{x2}(s_o - \sigma_{o1} - b_o) \quad (43)$$

$$\bar{\xi}_y = \xi_{yo2} - \xi_{y2}(s_o - \sigma_{o1} - b_o) \quad (44)$$

$$\bar{\phi}_b = \frac{\pi}{2} - \phi_b \quad (45)$$

図1に示されている移動ロボットの位置

$$P_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ \theta_i \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (46)$$

における x_i と y_i は、図1の直方体形物体と各移動ロボットの相互位置関係より求めるとともに、姿勢角 θ_i を次式を用いて定めている。

$$\theta_i = \arctan 2(\Delta y_i, \Delta x_i) \quad (47)$$

また、各移動ロボットの右左の車輪の回転速度 ω_{Ri} および ω_{Li} は、式(43)と周知の移動ロボットの運動学⁽¹⁾を用いて、次式のように記述している。

$$\begin{bmatrix} \omega_{Ri} \\ \omega_{Li} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{a} & \frac{d}{2a} \\ \frac{1}{a} & -\frac{d}{2a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix} \quad (48)$$

Fig.6 Rectangular prism object and mobile robots with passive compliance mechanisms

Fig.7 Method of measurement of compliance

Fig.8 Measurement results of compliance

ここに,

$$v_i = \frac{1}{\Delta t} (\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2)^{1/2}, \quad \omega_i = \frac{\Delta \theta_i}{\Delta t} \quad (49)$$

であり、 a 、 d は各移動ロボットの車輪半径および車輪間距離である。

3. 実験装置の概要

図5は、軌道計画の数値計算と押し搬送の実験において用いた移動ロボットを示したものである。この移動ロボットは、富士重工業株式会社技術研究所が、自律型の卓上小型移動ロボットとして開発した MK-01X であり、光学式エンコーダ、反射式赤外線センサ、ジャイロセンサなどを搭載している。移動ロボットの主な諸元は、 $a = 10 \text{ mm}$ 、 $d = 64 \text{ mm}$ 、 $d_o = 97.6 \text{ mm}$ 、減速比は 130、DC モータに取り付けられた光

Fig.9 Numerical calculation results with circle

Fig.10 Numerical calculation results with clothoid

学式エンコーダの分解能は 18 pulse/revolution, 質量が約 100 g である。

図 6 は, 直方体形物体と, スポンジを削りぬいて作成した受動的コンプライアンス機構を装着した3台の移動ロボットを示したものである。この受動的コンプライアンス機構のコンプライアンス特性を, 図 7 のような測定装置を用いて測定したところ, 図 8 のようなコンプライアンス特性が実測された。直方体形物体は紙製であり, その諸元は, 図 1 中の記号を用いると, $l_{o1} = 120 \text{ mm}$, $l_{o2} = 318 \text{ mm}$, $L_o = 120 \text{ mm}$ のように記述され, 質量は 45 g である。

4. 軌道計画の数値計算結果

図 9 および図 10 は, 初期位置と目標位置を,

$$P_S = \begin{bmatrix} x_S \\ y_S \\ \theta_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad P_G = \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ \theta_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 919 \text{ mm} \\ 464 \text{ mm} \\ 0 \end{bmatrix}$$

とし, 図 1 中のパラメータ a_o を $a_o = 550 \text{ mm}$ とした場合の軌道計画に関する数値計算結果を示したものである。図 9 は, 円弧と直線を用いた場合の軌道計画の数値計算結果を示したものであり, 円弧と直線との曲率の不連続性によって, 直方体形物体の姿勢角 θ_o および移動ロボットの姿勢角 θ_i に不連続性が見られる。移動ロボットの車輪回転速度 ω_{Ri} , ω_{Li} においては, 不連続点で車輪回転速度が限りなく大きな値となっており, 円弧と直線を用いて求めた軌道が, 押し搬送に対し, 不適格であることがわかる。また, 3 個の移動ロボットと直方体形物体の軌跡の図から, 直方体形物体が, 3 台の移動ロボットに取り付けられた 3 個の受動的コンプライアンス機構によって拘束されながら, 押し搬送されることが視覚的に理解できる。これに対し, 対称クロソイド曲線と直線を用いた軌道計画の数値計算結果を示した図 10 においては, 直方体形物体と移動ロボットの姿勢角は連続に変化しており, 移動ロボットの車輪回転速度 ω_{Ri} , ω_{Li} においても, 有限な値となっている。なお, 直方体形物体と移動ロボットの姿勢角の変化の応答が同一でないことから, 本研究で行った軌道計画を用いて押し搬送を行う場合, コンプライアンス表面と直方体形物体の表面との間のところがり接触が生じ, 押し搬送操作に好ましくない運動が生起する可能性があるが, 後述の実験では, この姿勢角の差異が小さいことから, 押し搬送作業がほぼ良好に行い得ることが確かめられている。また, 図 9, 10 の 3 台の移動ロボット直方体形物体の軌跡の図から, クロソイド曲線と直線を用いた場合の姿勢角が,

Fig.11 Perspective drawing of trajectory in Fig.10

(a) $\Delta t_{\text{picture}} = 9 \text{ s}$

(b) $\Delta t_{\text{picture}} = 3 \text{ s}$

Fig.12 Experimental results with trajectory in Fig.10

円弧と直線を用いた場合に比べ, 若干緩やかに変化していることが見受けられ, この点においても, クロソイド曲線と直線を用いた場合の軌道計画の方がより優れているものと考えられる。

5. 押し搬送作業の実験結果

押し搬送操作に実験においては、Kanayama らの移動ロボットの非線形安定化走行制御理論⁽¹¹⁾を用いて、各移動ロボットの進行方向および進行横方向の位置誤差と姿勢角誤差を用いた軌道追従制御システムが構築されている。

各移動ロボットの DC モータの制御則は、PWM コントローラに与える信号を v_{Ri} , v_{Li} とおくと、次式で記述される。

$$v_{Ri} = K_{PRi}e_{Ri} + K_{IRi}\int_0^t e_{Ri}dt, \quad i = 1, 2, 3 \quad (50)$$

$$v_{Li} = K_{PLi}e_{Li} + K_{ILi}\int_0^t e_{Li}dt, \quad i = 1, 2, 3 \quad (51)$$

ここに、

$$e_{Ri} = \omega_{Ri}^d - \omega_{Ri}^c \quad (52)$$

$$e_{Li} = \omega_{Li}^d - \omega_{Li}^c \quad (53)$$

$$\begin{bmatrix} \omega_{Ri}^d \\ \omega_{Li}^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{a} & \frac{d}{2a} \\ \frac{1}{a} & -\frac{d}{2a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i^d \\ \omega_i^d \end{bmatrix} \quad (54)$$

$$v_i^d = v_i \cos e_{\alpha} + K_{xi}e_{xi} \quad (55)$$

$$\omega_i^d = \omega_i + v_i(K_{yi}y_{ei} + K_{\alpha}\sin e_{\alpha}) \quad (56)$$

$$\begin{bmatrix} e_{xi} \\ e_{yi} \\ e_{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i^c & \sin \theta_i^c & 0 \\ -\sin \theta_i^c & \cos \theta_i^c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} p_i - p_i^c \end{pmatrix} \quad (57)$$

であり、 K_{PRi} , K_{PLi} , K_{IRi} , K_{ILi} は PI 制御のフィードバック係数、 K_{xi} , K_{yi} , K_{α} は移動ロボットの軌道の偏差 e_{xi} , e_{yi} , e_{α} に基づく非線形フィードバック制御の係数、 ω_{Ri}^c , ω_{Li}^c は光学式エンコーダにより求めた車輪回転角の実測値である。また、 p_i は、式(46)に示されているように、軌道計画により与えられる各移動ロボットの目標位置を表している。 p_i^c は各移動ロボットの現在位置を示しており、次式で定義されている。

$$p_i^c = \begin{bmatrix} x_i^c \\ y_i^c \\ \theta_i^c \end{bmatrix} \quad (58)$$

なお、本実験では、実験的にこれらのフィードバック係数をチューニングしている。

図11は、図10に示されている、対称クロソイド曲線と直線を用いた軌道の図を、近似的な遠近法により描いたものである。また、図12は、3台の移動ロボットを用いた直方体形物体の協調押し搬送操作に関する実験結果を示したものであり、 $\Delta t_{picture}$ は重ね合わせられている画像間の時間間隔を表している。図より、直方体形物体は、3台の移動ロボットに取り付けられた3個のコンプライアンス機構によって拘束され

ながら、目標軌道に沿って良好な精度で押し搬送されていることがわかる。しかしながら、移動ロボットと3台の移動ロボットとの間の転がり運動が少しだけ認められことから、直方体形物体と移動ロボットの間に転がり運動が生じないような軌道計画の問題を、今後の課題として検討する必要がある。

6. 結 言

本研究は、受動的コンプライアンス機構を有する3台の移動ロボットを用いた直方体形物体の押し搬送における軌道計画を行うとともに、数値計算と実験を行い、本押し搬送システムの有用性を検証したものである。軌道計画においては、よりスムーズな押し搬送の実現を意図し、直方体形物体および3台の移動ロボットの軌道計画を、クロソイド曲線と直線を用いて行った。また、実機の自律型移動ロボットを用いて、押し搬送作業の実験を行ったところ、直方体形物体は、3台の移動ロボットに取り付けられた3個のコンプライアンス機構によって拘束されながら、目標軌道に沿って良好な精度で押し搬送され得ることが確かめられた。

謝 辞

本実験は、富士重工業株式会社技術研究所で開発した卓上小型移動ロボット MK-01X を貸与していただき行われましたことを記し、関係各位に深く謝意を表します。また、卓上小型移動ロボット MK-01X に関して懇篤なご教示をいただきました、同研究所の鳥居毅氏、松田一彦氏、手塚俊氏に心よりお礼申し上げます。

文 献

- (1) M. T. Mason, Mechanics and planning of manipulator pushing operations, The International Journal of Robotics Research, 5-3, (1986), 53-71.
- (2) 吉川恒夫, 来栖正充, 対象物押し操作にもとづく摩擦力分布の推定法, 日本ロボット学会誌, 10-5, (1992), 632-638.
- (3) 大川義邦, 横山乾, 移動ロボットによる箱押し作業の制御, 日本ロボット学会誌, 11-1, (1993), 148-155.
- (4) 来栖正充, 吉川恒夫, 押し作業における対象物の軌道追従制御, 日本ロボット学会誌, 14-8, (1996), 1200-1207.
- (5) J. Liu and J. WuY, Multi-agent robotic systems. CRC Press (2001), 3-9.
- (6) 日本ロボット学会編, ロボット工学ハンドブック (321 ハンドとコンプライアンス), コロナ社, (1990), 298-299.

- (7) 小森谷清, 館暁, 谷江和雄, 移動ロボットの自律誘導の一方法, 日本ロボット学会誌, 2-3, (1984), 222-231.
  - (8) 大内隆夫, 大友照彦, 佐藤伸宏, 山田成英, 2円弧を用いた移動ロボット車の経路制御, 電子情報通信学会論文誌, J70-9, D (1987), 1742-1750.
  - (9) Y. Kanayama and N. Miyake, Trajectory generation for mobile robots, Robotics Research, MIT Press, (1986), 333-340.
  - (10) 小森谷清, 谷江和雄, 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, 8-2, (1990), 133-143.
  - (11) Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki and T. Noguchi, A stable tracking control method for a non-holonomic mobile robot, IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems, (1991), 1236-1241.
  - (12) 佐藤伊助, いろいろな曲線と曲面, 裳華堂, (1979), 49-50.
-