自律移動ロボット搭載型マニピュレータ の位置・姿勢制御

見 浪 護* 藤 原 直 史** 柘 植 広 志***

Position and Orientation Control of Manipulator Mounted on Autonomous Mobile Robot

Mamoru MINAMI Naofumi FUJIWARA Hiroshi TSUGE

This report proposes a method for controlling the position and orientation of a manipulator mounted on an autonomous mobile robot. Experimental results show that the end effector of the manipulator can be maintained in a desired position and orientation. Thus, in practical use, materials can be transferred while the robot is moving, which will contribute to revolutionary enhancement of material handling efficiency.

Key Words : Mobile Robot, Manipulator, Autonomous, Homogeneous Matrix

1. ま え が き

最近の製造業はロボットの活用を抜きにしては成り立たないほどにその利用範囲が広がっており、非製造業においてもニーズが高まってきている。しかし、現在実用化されている産業用ロボットは床に固定されているものがほとんどであり、当然可動範囲は限られている。ロボットが自由な移動機能を持てば可動範囲は無限であり、より有効であることは明白である。有軌道を走行する移動ロボットにマニピュレータを搭載し、移動することで複数の工作機械の脱着作業を行う事例もある。これにより工作機械ごとに加工物取り換え用のロボットを設置する必要がなくなり、設備の効率的運用が図れる。しかしそのようなシステムで用いられる移動ロボットは軌道上を走行するものであり、走行可能範囲は軌道による制約を受ける。

一方、自律移動ロボットは、コースが床に設定されている固定経路方式に比べコース設定等のフレキシビリティに優れている反面、制御方式が難しくなるため多くの

研究が行われてきた。誘導方法¹⁻³⁾、自律位置測定方法⁴⁾、位置・方位補正方法⁵⁻⁹⁾、経路計画¹⁰⁾、衝突回避¹¹⁾等に関する様々な報告がある。その結果、自律移動ロボットは工場内で用いられる無人搬送車として実用化の段階に入ろうとしている。

このような状況の中で、研究報告としてはまだ少ないが移動ロボットとマニピュレータを同一の考え方で取扱う試みがなされている。例えば、移動ロボットの運動学について同次変換行列を用いて表しマニピュレータと同様に取り扱うことを試みた研究^{8,12,13)}、また多様な形態の移動ロボットを平面リンク機構として表現し、さらに車輪の摩擦を含めた動力学についても議論した研究がある¹⁴⁾。本研究も同じ方向を目指したものであり、作業座標系で記述された目標軌道を同次変換行列を用いて移動ロボットに固定した移動座標系で表現し、新たな目標軌道に変換する方法を提案している。また、これをもとに推定された移動ロボットの位置・姿勢を車載マニピュレータのハンドの制御系にフィードバックする自律移動マニピュレータのハンドの制御系を構成し、実験によりその基本的な動作を確認したものである。従って自律移動ロボットの走行軌道が、例えば障害物を避けるために予定していたコースから逸れるような場合でも、移動ロボットの位置・姿勢がマニピュレータの制御系にフィード

原稿受付 1991 年 11 月 8 日

* (株)椿本チエイン研究開発部, 金沢大学工学部大学院

** 金沢大学工学部

*** (株)豊田自動織機製作所

バックされているため車載マニピュレータのハンドの位置・姿勢は影響を受けない。また自律移動ロボットがコース上を走行するように誘導制御されている場合でも、コースの形状によっては指示された速度を維持しながらコースに沿って走行させることは難しい。このような場合でも提案する移動ロボットの位置・姿勢を考慮した車載マニピュレータのハンドの制御系は有効に働く。

マニピュレータの位置・姿勢の制御方法には、ヤコビ行列の逆行列を用いるもの¹⁵⁾、転置行列を用いるもの¹⁶⁾があるが、本報では順運動学と逆運動学を用いる方法^{17,18)}を用いた。提案する方法は、自律移動ロボットの位置・方位の推定値を同次変換形式で表し、マニピュレータの運動学方程式と結合することにより制御する方法である。

搭載されているマニピュレータが移動ロボットに固定された座標系の中で任意の位置・姿勢を実現するために必要なマニピュレータの自由度は6以上である。このようなマニピュレータを2次元平面上を移動する移動ロボットに搭載した場合、移動ロボットとマニピュレータの全自由度は9以上になり、絶対座標系の中でマニピュレータの手先効果器の位置・姿勢を実現するには冗長である。この冗長性を利用して、より効率の良い制御系を考えることもできる。しかし、工場内の移動ロボットは一般的にその走行ルートをあらかじめ決められている。そのため移動ロボットのもつ自由度は、ルートに沿って走行するために用いられてしまう。冗長マニピュレータがその冗長自由度をサブタスクの実行に用いているのと同様な状態である。従って、移動ロボットに搭載されたマニピュレータの制御には、移動というサブタスクとマニピュレータの手先効果の位置・姿勢の制御というメインタスクがあると考えられる。本報では、移動ロボットの位置・方位は既存の誘導システム^{1-3,5,19)}により走行した結果得られるものとして取り扱い、これに基づいてマニピュレータの制御を行うことにした。

2. 移動ロボットの運動学

2次元平面内を2軸独立駆動型式の移動ロボットが走行している状態を考える。移動は非常に低速であり遠心力が作用しないこと、つまり車輪が横滑りしないことを仮定できるものとする。その結果、移動ロボットの走行についての運動学を考えることができる¹⁴⁾。

移動ロボットの中心(左右駆動輪の中点)に原点を持つ座標系を移動ロボット座標系 Σ_v と呼ぶ。床に絶対座標系 Σ_s を固定し、移動ロボットは Σ_s の x - y 平面内を走行することを仮定する。移動ロボットの走行速度を Σ_s の x 軸と y 軸成分に分解したものを $\dot{x}, \dot{y}$ と表し、旋回

角速度を $\dot{\theta}$ と表す。これらをまとめて $\dot{r} = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta}]^T$ と定義する。ここで θ は、 Σ_s の y 軸方向をゼロとし、 z 軸について反時計回りの回転を正としている。また、左右駆動輪の進行速度を $v = [v_L, v_R]^T$ と表す。 v_L, v_R を用いて移動ロボットの走行速度 v は $v = (v_R + v_L)/2$ と求められ、 $\dot{x}, \dot{y}$ は $\dot{x} = -v \sin \theta, \dot{y} = v \cos \theta$ と表される。また、 T をトレッドとすると $\dot{\theta}$ は $\dot{\theta} = \omega = (v_R - v_L)/T$ と求められる。

以上の関係をまとめると、次式を得る。

$$\dot{r} = J_v(\theta)v \quad (1)$$

ただし、

$$J_v(\theta) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \sin \theta & -\frac{1}{2} \sin \theta \\ \frac{1}{2} \cos \theta & \frac{1}{2} \cos \theta \\ -\frac{1}{T} & \frac{1}{T} \end{bmatrix} \quad (2)$$

制御周期を τ とすると、 $i\tau$ 時刻の位置・方位 r^i は r^{i-1} を初期値として(1)式の両辺を積分することにより、

$$r^i = r^{i-1} + \int_0^{\tau} J_v(\theta)v dt = r^{i-1} + \int_0^{\tau} \begin{bmatrix} -v \sin \theta \\ v \cos \theta \\ \omega \end{bmatrix} dt \quad (3)$$

と表される。

時刻 $(i-1)\tau$ より τ 秒間 v_R, v_L をサンプルホールドした値を v_R^i, v_L^i と表すと、 $v^i = (v_R^i + v_L^i)/2, \omega^i = (v_R^i - v_L^i)/T$ と表される。サンプルホールドすることで(3)式の積分を近似的に求めることができ、(4)式を得る³⁾。(4)式には近似誤差が含まれていることを明示するため(4)~(6)式の変数に $\hat{\cdot}$ を付記する。

$$\hat{r}^i = \hat{r}^{i-1} + \Delta \hat{r}^i \quad (4)$$

$$\Delta \hat{r}^i = \begin{bmatrix} -\hat{\theta}^i \tau \sin(\hat{\theta}^{i-1} + \Delta \hat{\theta}^i/2) \\ \hat{\theta}^i \tau \cos(\hat{\theta}^{i-1} + \Delta \hat{\theta}^i/2) \\ \Delta \hat{\theta}^i \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\Delta \hat{\theta}^i = \hat{\omega}^i \tau \quad (6)$$

姿勢ベクトルを n, o, a 、位置ベクトルを p とすると、その位置・姿勢を表す同次変換行列は、

$$H = \begin{bmatrix} n & o & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

と表される。

$\hat{r}^{i-1}$ を同次変換形式で表した時の行列 $\hat{C}^{i-1}$ は、

$$\hat{C}^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \hat{\theta}^{i-1} & -\sin \hat{\theta}^{i-1} & 0 & \hat{x}^{i-1} \\ \sin \hat{\theta}^{i-1} & \cos \hat{\theta}^{i-1} & 0 & \hat{y}^{i-1} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

と表され、 $\hat{C}^i$ も同様に定義すると(4)~(6)式より、

$$\hat{C}^t = \hat{C}^{t-1} \Delta \hat{C}^t \quad (9)$$

ただし,

$$\Delta \hat{C}^t = \begin{bmatrix} \cos \Delta \hat{\theta}^t & -\sin \Delta \hat{\theta}^t & 0 & \Delta \hat{x}^t \\ \sin \Delta \hat{\theta}^t & \cos \Delta \hat{\theta}^t & 0 & \Delta \hat{y}^t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\Delta \hat{x}^t = -\partial^t \tau \sin(\Delta \hat{\theta}^t/2) \quad (11)$$

$$\Delta \hat{y}^t = \partial^t \tau \cos(\Delta \hat{\theta}^t/2) \quad (12)$$

と表される。従って同様に初期位置・方位の推定値を $\hat{C}^0$ で表し、(9)式を用いて時間を遡ると、

$$\hat{C}^t = \hat{C}^0 \sum_{p=1}^t \Delta \hat{C}^p \quad (13)$$

と表される。

Fig. 1 に示すように、時刻 $i\tau$ における Σ_v を Σ_s に変換する行列を ${}^sA_v^i$ と表す。これは(3)式で求められた r^i を同次変換形式で表現したものと一致する。(13)式で求められる移動ロボットの位置・方位を推定する行列 $\hat{C}^i$ と ${}^sA_v^i$ との偏差行列を δC^i と表すと、これらの間には、

$${}^sA_v^i = \hat{C}^i \delta C^i \quad (14)$$

という関係がある。ここで δC^i は、 v, ω をサンプルホールディングして観測していることや路面の影響などに起因して発生する。

δC^i は ${}^sA_v^i$ が観測された場合に限り、 $\delta C^i = (\hat{C}^i)^{-1} {}^sA_v^i$ より算出される。推定誤差が微小であると仮定できる程度の距離の自律走行であれば、 $\delta C^i \approx I$ と近似することができ、

$${}^sA_v^i \approx \hat{C}^i \quad (15)$$

と表される。

Fig. 1 Manipulator placed on a mobile robot

Fig. 2 Co-ordinates of 6 D.O.F. manipulator placed on a mobil robot (when $\hat{C}^0=I$)

3. マニピュレータの運動学

マニピュレータの各リンク間の関係を記述するために、Fig. 2 に示すように各リンクに一つずつ座標系を割り当てる。関節 n における回転角を q_n とした場合、リンク $n-1$ に対するリンク n の位置・姿勢を表す変換行列を ${}^{n-1}A_n(q_n)$ で示す。6 リンクマニピュレータの場合、マニピュレータが固定されている座標系 Σ_v から見た手先効果器の位置・姿勢 Σ_H を表す変換行列は、

$${}^vT_H(q) = {}^vA_1(q_1) {}^1A_2(q_2) \dots {}^5A_6(q_6) \quad (16)$$

と表される²⁰⁾。

Σ_v は移動ロボットに固定されており、走行に伴って Σ_s 内を動く。 Σ_v で表された手先効果器の位置を ${}^vr_p = [r_x, r_y, r_z]^T$ 、その姿勢を ${}^vr_o = [\rho, \phi, \psi]^T$ と定義すると、手先効果器の位置・姿勢は ${}^vr_{p0} = [{}^vr_p^T, {}^vr_o^T]^T$ と表される。ここで ρ は、 Σ_v を手先効果器の位置に平行移動し

た座標系 $\Sigma_{H'}$ の z 軸回りの回転角、 ϕ は新しい $-x$ 軸回り、 ψ はさらに新しい z 軸回りの回転角である。これより手先効果器の位置・姿勢を表す変換行列 ${}^vH_H(r_{p0})$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} {}^vH_H(r_{p0}) &= {}^vP_{H'}({}^v r_p)^{H'} B_H({}^v r_o) \\ &= \begin{bmatrix} \cos \rho \cos \psi - \sin \rho \cos \phi \sin \psi & \sin \rho \cos \psi + \cos \rho \cos \phi \sin \psi & -\sin \phi \sin \psi & 0 \\ -\cos \rho \sin \psi - \sin \rho \cos \phi \cos \psi & -\sin \rho \sin \psi & \cos \rho \sin \psi & r_x \\ -\sin \rho \sin \psi + \cos \rho \cos \phi \cos \psi & \cos \rho \sin \psi & \cos \phi & r_y \\ -\sin \phi \cos \psi & 0 & 0 & r_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &\triangleq G^v(r_{p0}) \end{aligned} \quad (17)$$

ただし、

$${}^vP_{H'}({}^v r_p) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & r_x \\ 0 & 1 & 0 & r_y \\ 0 & 0 & 1 & r_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} {}^{H'}B_H({}^v r_o) &= \text{Rot}(z, \rho) \text{Rot}(-x, \phi) \text{Rot}(z, \psi) \\ &= \begin{bmatrix} \cos \rho \cos \psi - \sin \rho \cos \phi \sin \psi & \sin \rho \cos \psi + \cos \rho \cos \phi \sin \psi & -\sin \phi \sin \psi & 0 \\ -\cos \rho \sin \psi - \sin \rho \cos \phi \cos \psi & -\sin \rho \sin \psi & \cos \rho \sin \psi & 0 \\ -\sin \rho \sin \psi + \cos \rho \cos \phi \cos \psi & \cos \rho \sin \psi & \cos \phi & 0 \\ -\sin \phi \cos \psi & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

(16), (17) 式より、手先効果器の位置・姿勢 ${}^v r_{p0}$ とマニピュレータの各回転関節角 q との関係は次式で与えられる。

$${}^vH_H({}^v r_{p0}) = {}^vT_H(q) \quad (20)$$

(20) 式より、 ${}^v r_{p0} = [r_x, r_y, r_z, \rho, \phi, \psi]^T$ の各要素について解いたものが順変換であり、

$${}^v r_{p0} = F(q) \quad (21)$$

と表され、 $q = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6]^T$ の各要素について解いたものが逆変換であり、

$$q = F^{-1}({}^v r_{p0}) \quad (22)$$

と表される²¹⁾。

4. マニピュレータの位置・姿勢制御

移動ロボットに固定した座標系 Σ_v に対して表された手先効果器の時刻 $i\tau$ における位置・姿勢 ${}^v r_{p0}^i$ は各関節角 q^i を用いて (21) 式の順変換を行うことにより、

$${}^v r_{p0}^i = F(q^i) \quad (23)$$

と表される。そして、この ${}^v r_{p0}^i$ より (17) 式から Σ_v で

表された手先効果器の位置・姿勢を表す同次変換は、

$${}^vH_H^i = G({}^v r_{p0}^i) \quad (24)$$

と表される。作業対象物に対する手先効果器の位置・姿勢は作業座標系 Σ_w で表すと都合がよい。 wA_s を Σ_s から Σ_w への変換行列とすると ${}^vH_H^i$ は 2 章で求められている $\hat{C}^i$ を用いて、

$${}^wH_H^i = {}^wA_s \hat{C}^i {}^vH_H^i \triangleq \begin{bmatrix} {}^w n^i & {}^w o^i & {}^w a^i & {}^w p^i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

と求められる。

前章で定義した ${}^v r_{p0}$ と同様に Σ_w で表された時刻 $i\tau$ における指令位置・姿勢ベクトルを ${}^w r_{pod}^i$ と表す。 Σ_w を基準にした指令位置・姿勢を表す変換行列 ${}^wH_{Ha}^i$ は ${}^w r_{pod}^i$ と (24) 式を用いて、

$${}^wH_{Ha}^i = G({}^w r_{pod}^i) \quad (26)$$

と表される。 ${}^wH_{Ha}^i$ の要素を (25) 式と同様に n, o, a, p を用いて表わし、 ${}^wH_H^i$ と ${}^wH_{Ha}^i$ の差をとると位置・姿勢の誤差ベクトル ${}^w e^i$ は近似的に、

$$\begin{aligned} {}^w e^i &= \begin{bmatrix} {}^w e_p^i \\ {}^w e_o^i \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} {}^w p_d^i - {}^w p^i \\ ({}^w n_d^i \times {}^w n^i + {}^w o_d^i \times {}^w o^i + {}^w a_d^i \times {}^w a^i) / 2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (27)$$

と求められる²²⁾。従って ${}^w e^i$ は、マニピュレータの関節角 q^i と移動ロボットの位置・姿勢推定演算結果に基づいて計算されたものである。 ${}^w e^i$ を考慮した新たな位置・姿勢の指令 ${}^wH_{Hr}^i$ を

$${}^wH_{Hr}^i = {}^wH_H^i + \Delta {}^wH^i \quad (28)$$

ただし、

$$\Delta {}^wH^i = \begin{bmatrix} {}^w n^i \times {}^w e_o^i & {}^w o^i \times {}^w e_o^i & {}^w a^i \times {}^w e_o^i & {}^w e_p^i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

で与える。(25) 式の関係より ${}^wH_{Hr}^i$ を、 Σ_v を基準にした

$${}^vH_{Hr}^i = (\hat{C}^i)^{-1s} A_w {}^wH_{Hr}^i \quad (30)$$

に変換する。そして (17) 式より、

$${}^v r_{por}^i = G^{-1}({}^vH_{Hr}^i) \quad (31)$$

を求める。以上の変換により作業座標系 Σ_w で表わされたハンドの目標軌道 ${}^w r_{pod}^i$ は移動ロボットに固定され、移動ロボットとともに動く座標系 Σ_v で表された目標軌道 ${}^v r_{por}^i$ に変換された。 ${}^v r_{por}^i$ の算出には移動ロボットの位置・姿勢 $\hat{C}^i$ が考慮されており、それらが車載マニピュレータのハンドの制御系にフィードバックされていることがわかる (Fig. 3 参照)。次に (22) 式の逆変換を行うことにより、

$$q_r^i = F^{-1}({}^v r_{por}^i) \quad (32)$$

Fig. 3 Block diagram of control system

Fig. 4 Configuration

と求め、各関節サーボ系に出力する。

5. 実験による制御効果の検証

5.1 実験システムのハードウェア構成

実験システムの構成を Fig. 4 に示す。マニピュレータの第一関節回転軸は移動ロボット上の左右駆動輪の中点を通る垂線と一致している。搭載したマニピュレータは Fig. 2 に示すリンク構造を持つ垂直多関節型マニピュレータである。また、Fig. 2 には 2 章で述べた Σ_s と Σ_v の初期値を一値させた $\hat{C}^0 = I$ の場合について示している。

マニピュレータの各関節および移動ロボットの駆動軸は DC モータおよびサーボアンプを介して回転する。マ

ニピュレータの第 j 軸に関するサーボ系ブロック図を Fig. 5 に示す。図中で A_j は減速比、 K_{pj} はソフトウェアによる位置フィードバックのゲイン、 K_{vj} はサーボアンプゲイン、 K_{fj} は速度フィードバックゲイン、 K_j は駆動系ねじり剛性、 J_j はモータのロータのイナーシャ、 D_j はモータのシャフトの粘性抵抗である。

制御ハードウェアの構成を Fig. 6 に示す。図中の制御 CPU は、Fig. 3 に示した制御ブロック図の中の移動ロボットの位置・方位推定演算以外を担当している。制御周期は 150 ms である。サーボ CPU は、Fig. 5 に示した各軸の速度サーボ系をマイナーループにもつソフトウェア位置サーボループを構成している。すべてのサーボ系にはパルスジェネレータが取り付けられており、カウンタを介して、回転角・回転角速度が計測される。

制御 CPU によって指示される関節角 q_r^i は共有メモリを介してサーボ CPU に指示される。また、サーボ CPU は、 v_L^i, v_R^i を計測して $\hat{C}^i$ と $(\hat{C}^i)^{-1}$ を計算し、同様に共有メモリを介して制御 CPU に伝えている。サーボ CPU の制御周期は 27 ms であり、両 CPU とも 8086 (8MHz) である。制御ソフトウェアは、PASCAL を用いて作成した。

5.2 実験と考察

【実験 1】

移動ロボットを Fig. 2 に示す Σ_v の位置・方位に停止させておき、 Σ_s の原点を x 軸方向に、 -700 mm、 z 軸方向に 924 mm 平行移動した作業座標系 Σ_w で表した位置・姿勢 $w_{r_{pod}} = [100 \text{ mm}, 100 \text{ mm}, 100 \text{ mm}, 100^\circ]$ 、

Fig. 5 Servo system of manipulator

Fig. 6 Control hardware configuration

$100^\circ, 10^\circ]^T$ を入力して整定するまで待ち、初期状態とした。その後、新たな目標位置・姿勢 $[0\text{mm}, 0\text{mm}, 0\text{mm},$

Fig. 7 Step response of position and orientation

$90^\circ, 90^\circ, 0^\circ]$ をステップ的に入力した場合の位置・姿勢偏差 w_e^i ((27) 式にて算出) の応答を調べた。試果を Fig. 7 に示す。すべての偏差は約 1.5s でゼロに収束している。姿勢偏差 w_e^i の初期値が 10° に一致していないのは、(27) 式 w_{e0}^i が微小な姿勢偏差を仮定した近似式であるためである。しかし w_{e0}^i の減少とともに正確な近似になるため、サーボにより誤差はゼロに収束する。

【実験 2】

移動ロボットを直線走行させつつマニピュレータの手先効果器の位置を Σ_w の原点に、姿勢を $[90^\circ, 90^\circ, 0^\circ]$ に制御する実験を行った。Fig. 8 に実験の様子を示す。(a) ではスタート点にて手先効果器を目標位置・姿勢に制御している。移動ロボットは走行を始め、(b) の状態を経過して (c) の状態へと走行した。手先効果器が Σ_w の原点に保持されていることがわかる。この実験中の位置・姿勢偏差を調べるため次の実験 3 を行った。

【実験 3】

初期状態として移動ロボットの位置・姿勢を Fig. 2 の Σ_v に一致させ、マニピュレータの位置・姿勢を Σ_w で $[0\text{mm}, 0\text{mm}, 0\text{mm}, 90^\circ, 90^\circ, 0^\circ]$ とした。これは Fig. 8 (b) の写真の状態と一致している。この初期状態より時刻 0 に移動ロボットの左右駆動系にステップ速度入力を与え、時刻 1.09s に停止させた。その間の w_e^i を計測し Fig. 9 (a), (b) に示す。走行速度が 29mm/s の場合 (Fig. 9 (a)), 58mm/s の場合 (Fig. 9 (b)) ととも定常偏差が発生し、特に y 軸方向の位置偏差 e_{py} と z 軸回りの姿勢偏差 e_{oz} が大きい値をもつ。これは、移動ロボットの走行方向が Σ_w の y 軸と一致しているためである。定速走行時の定常偏差は速度に比例して増大しているが、

Fig. 8 Control result of a manipulator while a mobile robot is moving right

Fig. 9(a) Position and attitude errors
($V=29$ mm/s)

(b) Position and attitude errors
($V=58$ mm/s)

移動ロボットが停止した後は (a), (b) ともゼロに収束している。これは、Fig. 7 に示したマニピュレータの各軸のサーボ系において、入力 q_{rj} は数秒の時間間隔では位置のランプ入力に近似できることと、 $K_{vj} \cdot K_j$ が非常に大きいと仮定した場合には、 q_{rj} より q_j への伝達関数は一次遅れ系となることより説明できる。定常偏差が比較的大きな値であることは、制御周期が 150 ms と長いこと、PUMA 型マニピュレータの減速比が 1/60 程度と一般のマニピュレータに比べて低いことが原因と思わ

れる。

Fig. 9(b) に示した制御中のマニピュレータの各軸角度の時間的変化を Fig. 10 に示す。手先効果器の位置・姿勢を維持するために、主に第 1 軸、第 4 軸が動いたことがわかる。

6. あとがき

固定ルートに沿って走行するのではなく、自律的に走行する移動ロボット上に多関節マニピュレータを搭載し

Fig. 10 Joint Angles

たシステムにおいて、移動ロボットが走行中に絶対座標系で表された目標位置・姿勢に手先効果器を制御する方法を提案した。自律移動ロボットの運動学方程式とマニピュレータの運動学方程式とを結合させた制御システムである。実験システムを構成し、走行実験を行った結果、走行中にマニピュレータを用いて床に固定した荷台に荷物を載脱荷するというような実用的な作業が可能であることがわかった。

参考文献

- 1) 津村, 藤原, 白川, 岡崎: 地図上のコース指示による移動体の自動誘導, システムと制御, Vol.25, No.3, pp. 167-174, 1981.
- 2) 津村, 藤原, 白川, 橋本: メモリに記憶されたコース指示による移動体の自動誘導, 日本ロボット学会誌, Vol.2, No.3, pp. 209-214, 1984.
- 3) 見浪, 簾, 上田, 中野: 同次変換を用いた自律型移動ロボットの任意曲線コース誘導方法, 日本ロボット学会誌, Vol.8, No.4, pp. 421-430, 1990.
- 4) 津村, 藤原, 白川, 岡崎: 移動体の現在位置・進行方向

- の計測の方法, 日本機械学会論文集C編, Vol.47, No.421, pp. 1153-1160, 1984.
- 5) 見浪, 富川, 簾: 磁石補償式自律誘導方法, システムと制御, Vol.31, No.5, pp. 382-391, 1987.
- 6) 津村, 藤原, 白川, 唐: レーザ燈台を用いた二次元移動体の位置・方位測定法, システムと制御, Vol.29, No.3, pp. 188-194, 1985.
- 7) 津村, 藤原, 白川, 田中: レーザとコーナキューブを利用した二次元移動体の位置・方位測定法, システムと制御, Vol.29, No.8, pp. 553-560, 1985.
- 8) 津村, 藤原, 橋本, 唐: レーザ燈台を用いた移動体の位置・方位測定法, 日本ロボット学会誌, Vol.2, No.6, pp. 557-565, 1984.
- 9) 津村, 藤原, 橋本, 唐: 追尾式レーザ燈台を用いた二次元移動体の位置測定法, 日本ロボット学会誌, Vol.3, No.6, pp. 521-530, 1985.
- 10) 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, 1990.
- 11) 齊藤: 移動ロボット群における衝突回避, システム・制御・情報学会誌, Vol.3, No.8, pp. 252-260, 1990.
- 12) P. E. Muir, C. P. Neuman: Kinematic Modeling for Feedback Control of an Omnidirectional Wheeled Mobile Robot, Proc. IEEE Int Conf Rob Autom. pp. 1772-1778, 1987.
- 13) P. E. Muir, C. P. Neuman: Kinematic Modeling of Wheeled Mobile Robots, Journal of Robotic Systems, pp. 281-340, 1987.
- 14) 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. 699-711, 1990.
- 15) D. E. Whitney: Resolved Motion Rate Control of Manipulators and Human Protheses, IEEE Trans. Man-Machine System, MMS-10, pp. 47-53, 1969.
- 16) 美多, 大須賀: ロボット制御工学入門, コロナ社, 1989.
- 17) 新井, 中野, 矢野, 橋本: マニピュレータのハイブリッド制御に関する基礎研究, 機械技術研究所報, Vol.40, No.3, pp. 133-143, 1986.
- 18) M. Ishimi, K. Ito, T. Manabe, K. Itoh: Hybrid Position/Force Control with Sway Disturbance Compensation of Underwater Manipulator, 20th ISIR, pp. 1059-1066, 1988.
- 19) T. Tsumura, N. Fujiwara, T. Shirakawa, M. Hashimoto: An experimental System for Automatic Guidance of Robot Vehicle Following the Route Stored in Memory, 11th ISIR, pp. 187-194, 1981.
- 20) 吉川: ロボットマニピュレータ, コロナ社, 1984.
- 21) 有本: ロボットの力学と制御—VI, システムと制御, Vol.30, No.4, pp. 236-245, 1986.
- 22) J. Y. Luh, M. W. Walker, R. P. Paul: Resolved Acceleration Control of Mechanical Manipulators, IEEE Trans. Automatic Control, Vol. AC-25, No.3, pp. 468-474, 1980.

見 浪 護 (Mamoru MINAMI)

1956 年 4 月 25 日生。1981 年大阪府立大学航空工学科修士課程修了。同年(株)椿本チエイソ入社, 研究開発部勤務。1990年金沢大学工学部博士課程入学, 現在在学中。自動搬送車の開発, 移動ロボット, 移動マニピュレータの研究に従事。

(日本ロボット学会正会員)

柘 植 広 志 (Hiroshi TSUGE)

1967 年 6 月 5 日生。1990 年金沢大学工学部生産精密工学科卒業。1992年同大学院修士課程修了, 同年豊田自動織機製作所入社。

(日本ロボット学会正会員)

藤原直史

(Naofumi FUJIWARA)

1942年11月22日生。1965年3月大阪府立大学工学部航空工学科卒業。1965年4月大阪府立大学助手として勤務。1989年4月金沢大学教授(機械システム工学科)現在に至る。移動体の位置計測, 誘導に関する研究に従事。日本機械学会, 計測自動制御学会, システム制御情報学会, ビークルオートメーション技術研究会会員。

(日本ロボット学会正会員)