移動マニピュレータの軌道計画と動的制御*

栗栖 正 充^{*1}, 吉 川 恒 夫^{*2}

Trajectory Planning and Dynamic Control of a Mobile Manipulator

Masamitsu KURISU and Tsuneo YOSHIKAWA

This paper presents methods of trajectory planning and dynamic control of a mobile manipulator. The proposed trajectory planning method consists of generating a trajectory for the platform from a given trajectory of the arm tip. The main concept of this trajectory planning method is to determine the redundant degrees of freedom of the mobile manipulator in order to minimize the value of performance index defined as a function of traveling distance, driving force, variation of joint velocity, and manipulability. Moreover, for tasks which require both control of the force exerted by the arm tip and control of the arm tip position, e. g., polishing, adding a function to the performance index to evaluate the direction of manipulating force enables generation of the trajectory on which the mobile manipulator has appropriate postures to exert a force on an object surface. Then, we describe a dynamic hybrid control method for the mobile manipulator, to control both the pushing force and the simultaneous positioning of the arm tip and the platform. This control method is based on the dynamic position control method which has already been proposed by [Y. Yamamoto and X. Yun, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1994, 2187-2192]. Numerical examples and experimental results show the effectiveness of the proposed methods.

Key Words: Mobile Manipulator, Trajectory Planning, Dynamic Control

1. 緒 言

マニピュレータを搭載した移動ロボット(移動マニピュレータ)は据置型のマニピュレータよりも作業範囲が広いこと、より多様な作業が実現可能である。しかしその反面多くの移動マニピュレータは、冗長性を有すること、台車にあたる移動ロボットが非ホロノミックな拘束を持つことにより、一般にその制御は複雑になる。また作業効率を高めるためには搭載したマニピュレータが常に操作性の良い姿勢をとれるように台車を移動させる必要があるため、作業内容に応じた台車の軌道計画も重要となる。

移動マニピュレータに関する研究は数多く報告されている。藤原らは手先軌道を台車に固定された座標系から見た軌道に変換することで台車が設定されたコースからずれても手先を目標軌道に追従させる制御法⁽¹⁾を、Yamamotoらは移動する対象物に手先を押し付けながら移動マニピュレータを走行させる制御法⁽²⁾を提案した。これらの制御法は移動マニピュレータの運動学

をもとにしているため、速度制御を基礎としている。しかし搭載したマニピュレータを高速で動かしたりする場合は、マニピュレータの動特性が台車の運動に及ぼす影響が大きくなるため、走行しながら正確な作業を遂行するためにはマニピュレータと台車との間の動的な干渉を考慮する必要がある。このような観点から藤原らは、ニュートンオイラー法による逆動力学解法を用いてマニピュレータの運動による台車への影響や斜面における重力の影響を補償する方法を提案した⁽³⁾⁽⁴⁾。またマニピュレータと台車との動的な干渉を考慮しつつ両者をそれぞれの目標軌道に追従させる制御法がYamamotoらによって提案されている⁽⁵⁾。一方、移動マニピュレータの軌道計画では、冗長性を利用し与えられた作業に対し移動マニピュレータの作業性が高くなるような軌道を車輪の角速度空間で探索する方法が提案されている⁽⁶⁾。しかし移動マニピュレータを動的に制御する場合、その制御性能を十分に発揮するためには駆動力などを考慮できるような加速度の次元での軌道計画が必要と思われるが、そのような移動マニピュレータの軌道計画法はまだ報告されていない。また上述した研究では、手先の位置や姿勢の制御を必要とする作

* 原稿受付 1995 年 8 月 7 日。

^{*1} 京都大学大学院 (〒606 京都市左京区吉田本町)。^{*2} 正員, 京都大学工学部。

業を前提としているものが多く、手先の位置と力、台車の位置を同時に制御することが必要とされる作業、例えば広範囲な研磨作業のようなものを対象としている研究はまだない。

本論文では、移動マニピュレータを動的に制御することを前提とし、加速度の次元での移動マニピュレータの軌道計画法を提案する。またYamamotoらが提案した動的な制御法⁽⁵⁾を拡張することにより、手先の位置と力および台車の位置を同時に制御する動的ハイブリッド制御法を提案する。さらに提案した計画法によって生成した軌道を用いて実験を行うことにより、軌道計画法の有効性ならびに動的ハイブリッド制御法の有効性を確認する。提案する軌道計画法は、与えられた手先の目標軌道から駆動力やマニピュレータの操作性を指標とした評価関数を最少とする台車の軌道を車輪の角加速度空間で探索するものである。またこの手法は、手先の操作力方向を考慮した評価関数を加えることにより、手先を壁などに押し付けて移動するような作業に対して、マニピュレータが拘束面に力を加え易い姿勢をとれるように台車を動かすための台車の目標軌道を生成することができる。

2. 状態方程式

本論文では図1に示すような3次元 n 自由度マニピュレータを搭載した独立二輪駆動型の移動マニピュレータを対象とする。

まず本章では移動マニピュレータの状態方程式を記述しておく。車軸と台車の対称面との交点を台車の中心点とし、中心点を通り床面に平行な平面に XY 平面が一致するように基準座標系 Σ_U をとる。また Σ_U から見た台車の中心点を ${}^U\mathbf{p}_o$ 、台車の姿勢角を θ とする。ただし ${}^U\mathbf{p}_o$ は Z 座標成分を除いた2次元ベクトルである。ここで、左右輪の回転角を表すベクトルを $\mathbf{q}_p = [q_l, q_r]^T$ とし、車輪と床との間には滑りが生じないものとする以下との関係式を得る。

$${}^U\mathbf{p}_o = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos \theta & \frac{r}{2} \cos \theta \\ \frac{r}{2} \sin \theta & \frac{r}{2} \sin \theta \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_p \dots\dots\dots (1)$$

Fig.1 Frame Σ_U

$$\dot{\theta} = \frac{r}{2T}(\dot{q}_r - \dot{q}_l) \dots\dots\dots (2)$$

ただし T は台車の中心から車輪までの距離、 r は車輪の半径である。つぎにマニピュレータの関節角ベクトルを $\mathbf{q}_m = [q_1, \dots, q_n]^T$ とし、 $\mathbf{q} = [{}^U\mathbf{q}_p, \mathbf{q}_m]^T$ に対する駆動力を $\boldsymbol{\tau}$ とすると、移動マニピュレータの運動方程式は次式のように表せる⁽⁵⁾。

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\tau} \dots\dots\dots (3)$$

ここで $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ は慣性行列、 $\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ は遠心力、コリオリ力を表す。

以上より、 $\boldsymbol{\xi} = [{}^U\mathbf{p}_o, \theta, \mathbf{q}_m^T, \dot{\mathbf{q}}^T]^T$ を状態変数とすると、式(1)~(3)より系の状態方程式として次式を得る。

$$\dot{\boldsymbol{\xi}} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2}(\dot{q}_r + \dot{q}_l) \cos \theta \\ \frac{r}{2}(\dot{q}_r + \dot{q}_l) \sin \theta \\ \frac{r}{2T}(\dot{q}_r - \dot{q}_l) \\ \dot{\mathbf{q}}_m \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{h} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1} \end{bmatrix} \boldsymbol{\tau} \dots\dots\dots (4)$$

3. 軌道計画

本章ではマニピュレータの手先の目標軌道が与えられた場合に、これを満足する台車の目標軌道を計画する方法について述べる。先にも述べたように、移動マニピュレータは通常冗長性を持つため、手先の軌道を与えたとしても台車の軌道は一意には定まらずいくらかの自由度が残る。この自由度を作業内容に応じて定めた評価関数の値が小さくなるように決めることが、本論文での軌道計画の基本的な考えである。以下ではまず系に存在する制約条件について述べる。つぎに評価関数を定め、軌道計画問題を最適制御問題として定式化する。

3-1 制約条件

3-1-1 手先の制約 移動マニピュレータでの作業ではその作業内容に応じて、まず先に手先の軌道が与えられることが多いと考えられる。したがって本論文では手先の目標軌道が時間関数 ${}^U\mathbf{p}_e(t)$ として与えられているものとし、さらに ${}^U\mathbf{p}_e(t)$ は時間に関して2回微分可能であるとする。また、手先を壁などに押し付けて移動するような作業を想定した場合は、 ${}^U\mathbf{p}_e(t)$ は壁などを表す拘束面上にあるものとする。手先の位置は台車の位置と姿勢およびマニピュレータの関節角の関数としてと表せ、これを $\mathbf{f}(\boldsymbol{\xi}_p)$ ($\boldsymbol{\xi}_p = [{}^U\mathbf{p}_o, \theta, \mathbf{q}_m^T]^T$)とすると、手先がつねに目標軌道上になければならないことより各時刻において ${}^U\mathbf{p}_e(t)$ と $\mathbf{f}(\boldsymbol{\xi}_p)$ は一致していなければならない。これが手先に関する制約であり、その条件は状態量に関する制約式として以下のように与えられる。

$${}^U\mathbf{p}_e(t) - \mathbf{f}(\xi_p) = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

3.1.2 台車の制約 手先を壁に押し付けて移動するような作業の場合には、壁すなわち手先の拘束面と台車とが接触しないようにする必要がある。以下では、拘束面と台車とが接触しないための台車の位置と姿勢に関する制約を考慮する。まず台車上に代表点を選び、台車に固定した座標系 Σ_P から見たその位置を ${}^P\mathbf{p}_o \in \mathbf{R}^3$ とする。このとき基準座標系 Σ_U から見た代表点の位置 ${}^U\mathbf{p}_o$ は

$${}^U\mathbf{p}_o = {}^UR_P {}^P\mathbf{p}_o + \begin{bmatrix} {}^U\mathbf{p}_o \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。ただし UR_P は Σ_P から Σ_U への回転行列である。さらに安全半径として r_s を定める。ここで拘束面と代表点との距離を表す関数を $d_c({}^U\mathbf{p}_o)$ とすると、拘束面と台車との非接触条件は

$$d_c({}^U\mathbf{p}_o) - r_s \geq 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる(図2)。また、拘束面と代表点との距離が $d_c({}^U\mathbf{p}_o)$ のような形の関数で表せない場合、拘束面を平面や球状の仮想障害物との組み合わせで近似し、それらすべてとの非接触条件で台車に関する制約を表す。以上をまとめると、拘束面と台車との非接触条件は状態量に関する制約式として次式のように表せる。

$$g(\xi_p) \geq 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

Fig.2 Constraint surface and mobile manipulator

3.2 評価関数 評価関数を定める指標としては台車の移動する道のり、関節速度の分散、関節駆動力の分散をそれぞれ小さくすることが挙げられる。また台車の車輪に滑りが生じるのは、台車の姿勢の変化速度や左右輪の駆動力の差の急激な変動にも起因すると考えられるので、それらを抑えることも必要である。さらに手先の操作性を良くするという点でマニピュレータの可操作度が常に大きくなっていることが望ましい。以上の指標が作業時間全体 $([0, t_f])$ を通してなるべく満たされるようにするために、評価関数を次式で定義する。

$$\Psi_p = \int_0^{t_f} \left[W_l^T (q_r + q_l) + \dot{q}^T W_q \dot{q} + \tau^T W_\tau \tau + W_\omega \dot{\theta}^2 + W_n (\tau_r - \tau_l)^2 + W_j (\det \mathbf{J}_{em} \mathbf{J}_{em}^T)^{-\frac{1}{2}} \right] dt \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで τ_r, τ_l は車輪の駆動力、 $\mathbf{W}_q, \mathbf{W}_\tau$ は重みを表す対角行列、 W_l, W_ω, W_n, W_j は重み係数である。また $\mathbf{J}_{em} = \partial {}^U\mathbf{p}_e / \partial \mathbf{q}_m^T$ は $\dot{\mathbf{q}}_m$ の ${}^U\mathbf{p}_e$ に関するヤコビ行列であり、 $(\det \mathbf{J}_{em} \mathbf{J}_{em}^T)^{-\frac{1}{2}}$ はマニピュレータの可操作度である。

さらに力制御を必要とする作業では搭載したマニピュレータが拘束面に力を加え易いような姿勢をとるようにすることを考え、上述の評価に加えて手先が拘束面に加える力の方向を評価する関数を定める。手先の操作力を評価する指標には操作力楕円体というものがある。本来操作力楕円体は手先が静止している場合に用いるのであるが、力の方向を考慮するという意味からここではこれを操作力方向の評価指標に利用する。ただし力を制御する方向は1方向とし手先と拘束面との摩擦はないものとする。マニピュレータの関節駆動力ベクトル τ_m の大きさの上限を決めたとき、手先の出し得る力の大きさが最大となる操作力の方向は、そのときの操作力楕円体のもっとも長い主軸の方向となる(図3)。いまマニピュレータが特異姿勢でないものとする、台車から見たその軸の方向は $\mathbf{J}_{em} \mathbf{J}_{em}^T$ の最少固有値に対する固有ベクトル ${}^P\mathbf{n}_f$ で与えられる。ただし、手先にもっとも近い関節から手先に向かう方向を正の向きとし、 ${}^P\mathbf{n}_f$ の大きさは1とする。このとき基準座標系から見た ${}^P\mathbf{n}_f$ は

$${}^U\mathbf{n}_f = {}^UR_P {}^P\mathbf{n}_f \quad \dots\dots\dots (10)$$

となる。ここで手先が接触している点における拘束面の内向き単位法線ベクトルを ${}^U\mathbf{n}_c$ とし、 ${}^U\mathbf{n}_c$ と ${}^U\mathbf{n}_f$ とのなす角を ϕ_f とすると

$$\cos \phi_f = {}^U\mathbf{n}_c^T {}^U\mathbf{n}_f \quad \dots\dots\dots (11)$$

となる。ただし ${}^U\mathbf{n}_c$ は手先の軌道と同様に時間の関数で与えられるものとする。 $\phi_f = 0$ となるときがもっとも理想的に手先が拘束面に力を加えることになり、力制御を行う場合には、作業時間全体を通してできるだけそのような状態になることが望ましい。これより、手先が拘束面に加える力の方向を評価する関数として次式を定義する。

Fig.3 Manipulating-force ellipsoid

$$\Psi_f = \int_0^{t_f} W_f(1 - \cos \phi_f) dt \quad (12)$$

ただし W_f は重み係数である。

以上より、位置制御のみで手先の力を考慮する必要のない作業に対する軌道計画では評価関数を

$$\Psi = \Psi_p \quad (13)$$

で与え、手先の力を制御する必要があるような作業に対する軌道計画では、評価関数に式(9)と式(12)をたし合わせた次式を用いる。

$$\Psi = \Psi_p + \Psi_f \quad (14)$$

3.3 定式化 軌道計画の問題は、状態方程式(4)、制約式(5),(8)および前節で述べた評価関数により最適制御問題として定式化できる。しかし、状態方程式が非線形でさらに状態量に関する制約がある場合には、解析的に解を求めるのは難しく、計算機により数値的に解を求めることとなる。そのような場合、等式制約式を変形し状態方程式に代入することで式を整理し、問題を解き易くしておくという方法が多く用いられる。本論文でもまず問題を解き易くするために、等式で与えられる制約式(5)を用いて状態方程式(4)を整理する。

式(5)を時間に関して2回微分し $\ddot{q}$ について解くと次式を得る。

$$\ddot{q} = J_e^+ \{ \ddot{p}_e - \dot{J}_e \dot{q} \} + \{ I_{n+2} - J_e^+ J_e \} k \quad (15)$$

ここで $J_e = \partial f / \partial q^T$ は $\dot{q}$ の $\dot{p}_e$ に関するヤコビ行列である。また、右辺第2項が冗長成分であり、 k は $n+2$ 次元任意ベクトルである。ただしここではマニピュレータの関節はすべて回転関節であることを前提としている。ここで k を新たな入力と見なし、式(15)を式(3)に代入したものをさらに式(4)に代入すると次式を得る。

$$\dot{\xi} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2}(\dot{q}_r + \dot{q}_l) \cos \theta \\ \frac{r}{2}(\dot{q}_r + \dot{q}_l) \sin \theta \\ \frac{r}{2T}(\dot{q}_r - \dot{q}_l) \\ \dot{q}_m \\ J_e^+ \{ \ddot{p}_e - \dot{J}_e \dot{q} \} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I_{n+2} - J_e^+ J_e \end{bmatrix} k \quad (16)$$

つぎに、終端時刻 $t = t_f$ における目標状態を ξ_f として終端時刻の状態を評価する関数を以下のように定める。

$$\Phi(\xi(t_f)) = \{ \xi(t_f) - \xi_f \}^T W_p \{ \xi(t_f) - \xi_f \} \quad (17)$$

ただし W_p は重みを表す対角行列である。この関数と式(13)または式(14)より以下のような拡張評価関数を作る。

$$\dot{\Psi} = \Phi + \Psi \quad (18)$$

以上より軌道計画問題は、微分方程式(16)において、初期状態 $\xi(0) = \xi_0$ 、および制約式(8)を満たし、式(18)を最小にする入力 $k(t)$ を求めるという最適制御問題として扱うことができる。本論文ではこの定式化された問題を共役勾配法の一つである Fletcher-Reeves 法にペナルティ法を組み合わせた方法⁽⁷⁾を用いて計算機により数値的に解く。ただし、対象とする作業が手先を壁に押し付けなければならないような作業ではなく、さらに環境や他の対象物と台車との接触を考慮する必要がない作業では、制約式(8)はなくなり、数値計算においてもペナルティ法を組み合わせる必要はない。

4. 数 値 例

本章では前章で述べた軌道計画の数値例を示す。想定する作業は与えられた拘束面に手先を押し付けながら移動マニピュレータを移動させる作業とする。図4に使用する移動マニピュレータのモデルを、表1に各パラメータをそれぞれ示す。搭載するマニピュレータは平面2自由度並列駆動型のものとした。また、拘束面は図5に示すように2つの直線(line 1,2)と3つの円弧(arc 1,2,3)を組み合わせたものとし、手先は各区間(line1,2,arc1,2,3)で拘束面に沿って加速、等速、減速を行うようにした。加速区間、減速区間は拘束面に沿って0.05[m]とし、各両端で加速度が0[m/sec²]となるよう手先の軌道を時間に関する4次の多項式で与えた。作業時間は16[sec]、計算における時間刻み幅は40[msec]とした。このときの拘束面に沿った手先の速度を図6に示す。等速区間での手先速度は約0.155[m/sec]である。評価関数の重みは、 $W_p = \text{diag}[1, 1, 1, 1, 1, 1000, 1000, 1000, 1000]$ 、 $W_q = \text{diag}[1, 1, 1, 1]$ 、 $W_r = \text{diag}[1, 1, 1, 1]$ 、 $W_l = 1$ 、 $W_\omega = 2$ 、 $W_n = 2$ 、 $W_j = 4$ とした。操作力方向の評価に関する重みは、ケース1： $W_f = 20$ 、ケース2： $W_f = 150$ とし、重みの違いによる生成軌道の違いを比較することにする。以上の設定のもとで、移動マニピュレータの初期状態および終端状態をそれぞれ $\xi_0 = [0.346, -0.433, \frac{\pi}{2}, 0, \frac{\pi}{2}, 0, 0, 0, 0]^T$ 、 $\xi_f = [0.346, 1.267, \frac{\pi}{2}, 0, \frac{\pi}{2}, 0, 0, 0, 0]^T$ ([m],[m],[rad],[rad],[rad],[rad/sec],[rad/sec],[rad/sec],[rad/sec])として計算を行った。

ケース1の計算結果を図7に、ケース2の計算結果を図8にそれぞれ示す。図7(a)、図8(a)中で、手先から拘束面の内側に伸びている2つの線分は、点線が拘束面の法線ベクトルを、実線が操作力楕円体の長軸の方向をそれぞれ示す。ケース1とケース2を比較すると、可操作度に関してはケース2の方が操作力方向の

Fig. 4 Model of mobile manipulator

Table 1 Parameters of mobile manipulator

Weight [kg]		Moment of Inertia [kgm ²]	
m_c	7.0500	I_c	2.40×10^{-1}
m_w	0.1000	I_w	4.09×10^{-4}
—	—	I_m	2.04×10^{-4}
m_1	0.0257	I_1	1.06×10^{-4}
m_2	0.0186	I_2	6.03×10^{-5}
m_3	0.0228	I_3	4.98×10^{-5}
m_4	0.1133	I_4	1.24×10^{-3}

Fig. 6 Desired velocity of arm tip along the surface

Fig. 5 Constraint surface used in numerical examples

Fig. 7 Numerical example (case 1 : $W_f = 20$) Fig. 8 Numerical example (case 2 : $W_f = 150$)

評価を良くするために若干小さくなってはいるものの、どちらも作業時間全体をとおしてほぼ最大値に近い値をとっている。しかし操作力の方向に関しては、6.5秒と9.5秒付近で違いが見られる(図7(a), 図8(a)中では太線で示した部分)。ケース1では操作力が拘束面の法線と垂直に近い方向となっており、手先が拘束面に力を加えにくい状態になっているが、ケース2ではケース1に比べてかなり良い評価値を得ている。これより、手先の操作力の方向を考慮することで、拘束面に力を加え易い軌道が得られることがわかる。

5. 位置制御と力制御

本章ではまず、移動マニピュレータの動的な位置制御法を紹介し、つぎに力制御の一手法としてそれを拡張

した動的ハイブリット制御法を示す。

5.1 位置制御 Yamamotoらは台車の位置とマニピュレータの手先の位置を同時にそれぞれの目標軌道に追従させる動的な軌道追従制御法を提案した⁽⁵⁾。この制御法は台車の位置制御に look-ahead cotrol という制御法⁽⁸⁾を用いている。look-ahead cotrol の特徴は台車の前方に参照点を設け、この点を目標軌道に追従させることを目的としている点であり、台車の姿勢を制御できなくなるが非ホロノミックな拘束がなくなるという利点がある。本節ではYamamotoらが提案した軌道追従制御法を紹介する。

Σ_U で表された台車の参照点の位置を表す2次元ベクトルを U_p とし、 $U_r = [U_p^T, U_{p_e}^T]^T$ とすると参照点および手先の速度 U_r と関節角速度 $\dot{q}$ との関係は次式で与

えられる。

$$\dot{U}\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} \quad \dots\dots\dots (19)$$

ただし

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{rp} & \mathbf{0} \\ \mathbf{J}_{ep} & \mathbf{J}_{em} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (20)$$

であり, $\mathbf{J}_{rp} = \partial \mathbf{U}\mathbf{p}_r / \partial \mathbf{q}_p^T$, $\mathbf{J}_{ep} = \partial \mathbf{U}\mathbf{p}_e / \partial \mathbf{q}_p^T$ はそれぞれ $\dot{\mathbf{q}}_p$ の $\dot{\mathbf{U}}\dot{\mathbf{p}}_r$ および $\dot{\mathbf{U}}\dot{\mathbf{p}}_e$ に関するヤコビ行列である。いま $\mathbf{u}_r$ を新たな入力として

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{h} + \mathbf{M}\mathbf{J}^* [-\dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{u}_r] \quad \dots\dots\dots (21)$$

という非線形フィードバック則を考える。ただし

$$\mathbf{J}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{rp}^{-1} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{J}_{em}^+ \mathbf{J}_{ep} \mathbf{J}_{rp}^{-1} & \mathbf{J}_{em}^+ \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (22)$$

であり, $\mathbf{J}^*$ は $\mathbf{J}$ の疑似逆行列である。このフィードバック則を移動マニピュレータに適用すると, 式(3)および式(19)を時間微分した式より

$$\ddot{U}\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{u}_r \quad \dots\dots\dots (23)$$

という $\dot{U}\dot{\mathbf{r}}$ に関する線形かつ非干渉な系を得る。さらに $\mathbf{u}_r$ に適当なサーボ補償器を適用すれば, マニピュレータの手先と台車の参照点を同時に目標軌道に追従させる制御系が構成できる。

5.2 力制御 手先を壁などに押しつけながら移動マニピュレータを動かす作業を考えたとき, 手先に対しては位置制御と力制御を同時に行わなければならない。本節では手先の位置と力および台車の位置をそれぞれの目標軌道に追従させるための移動マニピュレータの動的ハイブリット制御法を示す。ハイブリット制御法⁽⁹⁾は位置を制御すべき方向と力を制御すべき方向とを分離して制御を行う方法で, 拘束面に垂直な方向すなわち法線方向には力制御を行い, 法線と垂直な方向には位置制御を行う。

いま, 手先の拘束数を m とし, 拘束された手先の軌道を表す $(3-m)$ 次元関数を $\mathbf{y}_e = \mathbf{s}(\mathbf{U}\mathbf{p}_e)$ とする。さらに手先の位置制御方向を表す行列を $\mathbf{E}_p = \partial \mathbf{y}_e / \partial \mathbf{U}\mathbf{p}_e^T (\in \mathbf{R}^{(3-m) \times 3})$, 力制御方向を表す行列を $\mathbf{E}_f (\in \mathbf{R}^{m \times 3})$ とする。ただし $\mathbf{E} = [\mathbf{E}_p^T \ \mathbf{E}_f^T]^T$ とするとき以下の2式を満足しているものとする。

$$\mathbf{E}^U \dot{\mathbf{p}}_e = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{y}}_e \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$\mathbf{E}^U \ddot{\mathbf{p}}_e = \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{y}}_e \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} - \dot{\mathbf{E}}^U \dot{\mathbf{p}}_e \quad \dots\dots\dots (25)$$

このとき $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3$ を入力として

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{h} + \mathbf{M}\mathbf{J}^* \left[\begin{array}{c} \mathbf{u}_1 - \mathbf{J}_{rp} \dot{\mathbf{q}}_p \\ \mathbf{E}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{u}_2 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} - \dot{\mathbf{E}} \mathbf{J}_e \dot{\mathbf{q}} \right\} - \mathbf{J}_e \dot{\mathbf{q}} \end{array} \right] + \mathbf{J}_e^T \mathbf{E}_f^T \mathbf{u}_3 \quad \dots\dots\dots (26)$$

という非線形状態フィードバック則を移動マニピュレータに適用すると式(3)および式(19)を時間微分した式より

$$\ddot{U}\dot{\mathbf{p}}_p = \mathbf{u}_1, \quad \ddot{U}\dot{\mathbf{p}}_e = \mathbf{u}_2, \quad {}^C\mathbf{f}_e = \mathbf{u}_3 \quad \dots\dots\dots (27)$$

という線形かつ非干渉化された系を得る。ここで ${}^C\mathbf{f}_e (\in \mathbf{R}^m)$ は $\mathbf{U}\mathbf{p}_e$ に原点を持ち各制御方向に座標軸を持つ座標系で記述された手先が拘束面に加える力である。さらに $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2$ に適当な位置サーボ補償器を, $\mathbf{u}_3$ に適当な力サーボ補償器を加えれば, マニピュレータの手先と台車の参照点を目標位置軌道に, マニピュレータの手先力を目標力軌道にそれぞれ追従させる制御系が構成できる。

6. 実験

本章では前章で示した動的ハイブリット制御法の有効性を実験により検証する。手先の目標軌道は数値例と同じものを用い, 台車の参照点の目標軌道には数値例で得られたケース1およびケース2の軌道をそれぞれ参照点の軌道に変換したものを用いる。この2つの軌道に対する実験結果を比較することにより, 軌道計画で手先の操作力の方向を考慮することの有効性も確認する。

実験に用いた移動マニピュレータは平面2自由度並列駆動型のマニピュレータを搭載した移動ロボットで, 各パラメータは数値例で用いたものと同じである。台車の参照点の位置はマニピュレータの第一関節の位置とした。手先には力覚センサが取り付けられており, 手先の押し付け力を測定できるようになっている。さらに拘束面との摩擦を減らすため, 力覚センサの先にはベアリングを取り付けてある。サーボ補償器は以下のように選んだ。

$$\mathbf{u}_1 = \ddot{U}\dot{\mathbf{p}}_{rd} + \mathbf{K}_{vr}(\dot{U}\dot{\mathbf{p}}_{rd} - \dot{U}\dot{\mathbf{p}}_r) + \mathbf{K}_{pr}(\mathbf{U}\mathbf{p}_{rd} - \mathbf{U}\mathbf{p}_r) \quad \dots\dots\dots (28)$$

$$\mathbf{u}_2 = \ddot{\mathbf{y}}_{ed} + \mathbf{K}_{ve}(\dot{\mathbf{y}}_{ed} - \dot{\mathbf{y}}_e) + \mathbf{K}_{pe}(\mathbf{y}_{ed} - \mathbf{y}_e) \quad \dots\dots\dots (29)$$

$$\mathbf{u}_3 = {}^C\mathbf{f}_{ed} + \mathbf{K}_{pf}({}^C\mathbf{f}_{ed} - {}^C\mathbf{f}_e) + \mathbf{K}_{if} \int_0^t ({}^C\mathbf{f}_{ed} - {}^C\mathbf{f}_e) dt \quad \dots\dots\dots (30)$$

Fig.9 Experimental result (case 1 : $W_f = 20$) Fig.10 Experimental result (case 2 : $W_f = 150$)

ここで添字 d はそれぞれの値に対する目標値を表す。各ゲインは、 $K_{vr} = \text{diag}[2, 2]$, $K_{pr} = \text{diag}[40, 40]$, $K_{ve} = 24$, $K_{pe} = 200$, $K_{pf} = 1.1$, $K_{if} = 14$, とした。以上の設定でサンプリングタイムを 5[msec] として実験を行った。

図9にケース1の軌道に対する結果を、図10にケース2の軌道に対する結果をそれぞれ示す。ケース2では参照点の位置、手先の位置ならびに押し付け力が目標軌道にほぼ追従しており、動的ハイブリッド制御法の有効性があらわれている。しかしケース1では6.5秒付近で力の追従性が悪くなっている。これはその部分でアームが拘束面に力を加えにくい姿勢になっているためであると考えられる。以上より軌道計画で手先の操作力の方向を考慮することが力制御を行う上で有効であることが示された。

7. 結 言

動的な制御に対応するための移動マニピュレータの軌道計画法を提案し、その有効性を数値例で示した。また、手先の位置と力および台車の位置を同時に制御する動的ハイブリッド制御法を示し、提案した計画法によって生成した軌道を用いて実験を行うことにより、動的ハイブリッド制御法の有効性ならびに提案した軌道計画法の有効性を検証した。

文 献

- (1) 藤原, 見浪, 拓植. 移動ロボット搭載型マニピュレータの位置・速度制御. 第9回日本ロボット学会学術講演会予

稿集, (1991), 339-342.

- (2) Y. Yamamoto and X. Yun. Control of mobil manipulators following a moving surface. *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, (1993), 1-6.
- (3) 藤原, 見浪, 神原. 車輪型移動マニピュレータの非線形補償. 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1992), 525-528.
- (4) 藤原, 見浪, 西山. 斜面を走行する移動マニピュレータの重力補償. 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1992), 529-532.
- (5) Y. Yamamoto and X. Yun. Modeling and compensation of the dynamic interaction of a mobile manipulator. *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, (1994), 2187-2192.
- (6) 森, 大隅, 小橋, 新井. 移動マニピュレータの軌道計画. 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1993), 1077-1078.
- (7) 嘉納. システムの最適理論と最適化. コロナ社, (1987).
- (8) X. Yun and Y. Yamamoto. Internal dynamics of a wheeled mobile robot. *Proc. '93 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, (1993), 1288-1294.
- (9) 吉川. ロボット制御基礎論. コロナ社, (1988).