モバイルマニピュレータの位置と力のハイブリッド制御

成 清 辰 生*・中 川 雅 史*・川 西 通 裕*

Hybrid Position/Force Control for Mobile Manipulator

Tatsuo NARIKIYO*, Masashi NAKAGAWA* and Michihiro KAWANISHI*

A mobile manipulator is expected to play an important role both in the production process of factory and in a medical care system of welfare business. To come up to this expectation, a mobile manipulator is required to simultaneously track to both the desired position trajectory and force trajectory. These tracking performances are attained by hybrid position/force control. In this paper, we propose a new adaptive control scheme for a mobile manipulator. The proposed adaptive control scheme consists of adaptive tracking control to desired position/force trajectories and robust control for unknown bounded disturbance. Effectiveness of the proposed control scheme is demonstrated by numerical simulation.

Key Words: mobile manipulator, hybrid position/force control, adaptive control

1. はじめに

移動ロボット（ベースに車輪をもつ台車型ロボット）に多関節マニピュレータを搭載したモバイルマニピュレータは製造工程や福祉の現場で重要な役割が期待されている。この期待に応えるためには、移動ロボットの目標軌道への追従とマニピュレータによる力制御を同時に達成することが要求される。この2つの制御動作は、一方が非ホロノミック拘束、他方がホロノミック拘束という2つの異なる物理的拘束条件によってもたらされるものである。これらの拘束を維持する力が拘束力であり、物理的にはマニピュレータのエンドエフェクターとワークの間に働く反力、車輪に働く横力¹⁾である。

本論文では、モバイルマニピュレータの位置・姿勢とマニピュレータのエンドエフェクターに働く力を同時に制御するハイブリッド制御問題を検討する。このシステムでは、ベースの車輪に加わる非ホロノミック拘束とマニピュレータがワークと接触する際のホロノミック拘束を考慮した制御系設計が要求される。また、実作業を想定したとき、地面やワークから加わる外乱、荷物や工具などによって生じるモデル化誤差なども考慮しなければならない。これまで、外乱やモデル化誤差を考慮した移動ロボットの制御問題に対して、数多くの研究が報告されている^{2),3)}。しかしながら、これらの報告の多くは原点の安定化や目標軌道への追従問題を扱ったものであり、力制御問題を扱った研究例はきわめて少ない。文献^{4)~6)}

では、移動ロボットの位置変数を目標軌道に漸近収束させ、車輪に働く力と目標拘束力との偏差を設計パラメータで定まる大きさ以下に収束させる手法が議論されている。しかし、これらの研究は、ホロノミック拘束に対応する拘束力を考慮していないため、モバイルマニピュレータの位置と力のハイブリッド制御問題へは適用できない。一方、モバイルマニピュレータに対して、位置と力のハイブリッド制御を扱っている研究としては Dong⁷⁾および Li⁸⁾らによる研究が挙げられる。Dong⁷⁾は chained form 変換を用いて適応制御に基づく手法を提案しているが、外乱に対する適応が不可能であり、chained form 変換に伴う座標変換により制御系の構造がきわめて複雑となるなどの問題点がある。また、Li⁸⁾らはロバスト制御手法によるハイブリッド制御を提案しているが、軌道追従の収束性や安定性が保証されない。

これに対して、本論文では、適応制御手法に基づき、未知外乱にも対応できるハイブリッド制御系を提案する。提案手法は、慣性パラメータが未知であり、外乱のノルムの上限のみが既知であるとして設計される。これによりモバイルマニピュレータは目標位置・姿勢軌道と目標力軌道に追従する。数値シミュレーションを行ない、提案する制御系の有効性を示す。

2. モバイルマニピュレータのモデル化

モバイルマニピュレータの概念図を Fig.1 に示す。非ホロノミック拘束を受ける移動ロボット（以後、ベースと称する）の座標を $q_B \in R^n$ 、シリアルリンク機構の全駆動マニピュレータの座標を $q_M \in R^m$ とし、系全体の一般化座標を $q = [q_B^T \ q_M^T]^T \in R^{n+m}$ とする。このとき、ベースに印加される非ホロノミック拘束を

* 豊田工業大学大学院工学研究科 名古屋市中天白区久方 2-12-1

* Graduate School of Engineering, Toyota Technological Institute, 2-12-1 Hisakata, Tenpaku-ku, Nagoya

(Received March 28, 2008)

(Revised September 1, 2008)

Fig. 1 Mobile manipulator

$$J_B(q_B)\dot{q}_B = 0 \quad (1)$$

とする。ただし、 $\dot{q}_B$ は $q_B = [q_{B1}^T \ q_{B2}^T]^T$ として、 $J_B(q_B) = [J_{B1} \ J_{B2}] \in R^{(n-k) \times n}$, $\det J_{B1} \neq 0$ となるように分割する。マニピュレータに印加されるホロノミック拘束を

$$\Phi(q) = 0 \quad (2)$$

とする。ただし、 $\Phi(q) \in R^{m-l}$ とする。また、 $J_M(q) = \partial\Phi/\partial q \in R^{(m-l) \times (n+m)}$, $\text{rank} J_M = m-l$ とすれば、(2) 式は

$$J_M(q)\dot{q} = 0 \quad (3)$$

と書ける。さらに、 $q_M = [q_{M1}^T \ q_{M2}^T]^T$, $q_{M1} \in R^l$, $q_{M2} \in R^{m-l}$ として

$$J_M(q) = \begin{bmatrix} \frac{\partial\Phi}{\partial q_B} & \frac{\partial\Phi}{\partial q_{M1}} & \frac{\partial\Phi}{\partial q_{M2}} \end{bmatrix} = [J_{M0} \ J_{M1} \ J_{M2}]$$

とおく。ただし、 $\det J_{M2} \neq 0$ となるように座標 q_M を分割する。このとき、モバイルマニピュレータの運動方程式は次式で与えられる。

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + d_0(q, t) = J^T(q)\lambda + B(q)\tau \quad (4)$$

$$J(q)\dot{q} = 0 \quad (5)$$

ここで、

$$\begin{aligned} M(q) &= \begin{bmatrix} M_{11}(q) & M_{12}(q) \\ M_{21}(q) & M_{22}(q) \end{bmatrix}, G(q) = \begin{bmatrix} G_{11}(q) \\ G_{21}(q) \end{bmatrix}, \\ C(q, \dot{q}) &= \begin{bmatrix} C_{11}(q, \dot{q}) \\ C_{21}(q, \dot{q}) \end{bmatrix}, B(q) = \begin{bmatrix} B_{11}(q_B) & 0 \\ 0 & I_m \end{bmatrix}, \\ d(q, t) &= \begin{bmatrix} d_{11}(q, t) \\ d_{21}(q, t) \end{bmatrix}, J(q) = \begin{bmatrix} J_B & 0 & 0 \\ J_{M0} & J_{M1} & J_{M2} \end{bmatrix}, \\ \tau &= \begin{bmatrix} \tau_B \\ \tau_M \end{bmatrix}, \lambda = \begin{bmatrix} \lambda_B \\ \lambda_M \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

ただし、添え字 $\{i, j = 1, 2\}$ は座標 q_B, q_M の次元にあわせて分割された行列、ベクトルを意味する。 $d_0(t)$ は未知外乱とする。このとき、(4) 式のモデルはよく知られた以下の性質をもつ。

性質 1: $\dot{M} - 2C$ は skew-symmetric である。

性質 2: 任意の微分可能な変数 ξ に対して、物理パラメータにより構成されるベクトル $p_0 \in R^s$ と、 $q, \dot{q}, \ddot{q}$ により構成される行列 $Y \in R^{(n+m) \times s}$ により、

$$M(q)\ddot{\xi} + C(q, \dot{q})\xi + G(q) = Y(q, \dot{q}, \xi, \dot{\xi})p_0$$

と表わされる。

ここで、 $J_B(q_B)$ の零化空間の基底を $f_B(q_B) = [f_1(q_B), \dots, f_k(q_B)]$ とすると、ベクトル $\eta = [\eta_1, \dots, \eta_k]^T$ が存在して、(1) 式と等価な表現

$$\dot{q}_B = f_B(q_B)\eta \quad (6)$$

を得る。 $f_B(q_B)$ を適当に定めれば、 η はベースの進行方向速度 u と回転角速度 ω となる。すなわち、 $k=2$, $\eta = [\eta_1 \ \eta_2]^T = [u \ \omega]^T$ として、一般性を失わない。また、 η はベースの物理量 (2 輪車両の場合は両車輪の角速度) ν_B と一対一の関係で記述できることから、正則行列 φ が存在して、 $\nu_B = \varphi\eta$ とすることができる。したがって、(6) 式は

$$\dot{q}_B = S_B(q_B)\nu_B \quad (7)$$

と書ける。ただし、

$$S_B(q_B) = f_B(q_B)\varphi^{-1} = \begin{bmatrix} -J_{B1}^{-1}J_{B2} \\ I_2 \end{bmatrix}.$$

さらに、

$$\begin{aligned} S(q_B) &= \text{Blockdiag}\{S_B(q_B), I_m\} \in R^{(n+m) \times (k+m)} \\ \nu &= \begin{bmatrix} \nu_B^T, \dot{q}_{M1}^T, -\{J_{M2}^{-1}(J_{M0}f_B\varphi^{-1}\nu_B + J_{M1}\dot{q}_{M1})\}^T \end{bmatrix}^T \\ &\in R^{k+m} \end{aligned}$$

とすれば、

$$\dot{q} = S(q_B)\nu \quad (8)$$

を得る。(8) 式を微分し、(4) 式に代入し、両辺の左から $S^T(q_B)$ を掛けることで、つぎの次元縮小化系を得る。

$$\begin{aligned} M_1(q)\dot{\nu} + C_1(q, \dot{q})\nu + G_1(q) + d_1(q, t) \\ = B_1(q)\tau + \bar{J}_M^T(q)\lambda_M \end{aligned} \quad (9)$$

ただし、

$$\begin{aligned} M_1(q) &= S^T(q_B)M(q)S(q_B) \\ C_1(q, \dot{q}) &= S^T(q_B)\{M(q)\dot{S}(q_B) + C(q, \dot{q})S(q_B)\} \\ G_1(q) &= S^T(q_B)G(q), d_1(q, t) = S^T(q_B)d(q, t) \\ B_1(q) &= S^T(q_B)B(q), \bar{J}_M = [J_{M0}f_B\varphi^{-1} \ J_{M1} \ J_{M2}] \end{aligned}$$

である。(9) 式に対しても (4) 式と同様の性質が成り立つ。

性質 3: $\dot{M}_1 - 2C_1$ は skew-symmetric である。

性質 4: 任意の微分可能な変数 $\bar{\xi}$ に対して、物理パラメータにより構成されるベクトル $p_1 \in R^r$ と、 $q, \dot{q}, \ddot{q}$ により構成さ

れる行列 $Y_1 \in R^{(k+m) \times r}$ により,

$$M_1(q)\ddot{\xi} + C_1(q, \dot{q})\dot{\xi} + G_1(q) = Y_1(q, \dot{q}, \ddot{\xi})p$$

と表わされる.

ここで, この次元縮小化系に対して, つぎの仮定をおく.

仮定 1: $B_1(q)$ は未知パラメータを含まず, 任意の q に対して正則である. 外乱 d_1 とその微分は有界であり, $\|d_1\| \leq D$ とする. ただし, D は未知パラメータである.

仮定 2: $J_B, J_M, J_{B1}^{-1}, J_{M2}^{-1} \in L_\infty$ であり, また q に関して連続微分可能で, すべて有界であるとする.

3. 位置と力のハイブリッド制御系

本章では, モバイルマニピュレータの一般化座標を目標位置軌道に追従させ, かつ同時にエンドエフェクターに作用する拘束力を目標力軌道に追従させる制御トルクの設計法を導出する. 目標軌道を q^* とすれば,

$$\dot{q}^* = S(q_B^*)\nu^* \quad (10)$$

となる目標速度入力 $\nu^* = [\nu_1^*, \dots, \nu_k^*, \nu_M^*]^T$ が存在する. ここで, $[\nu_1^*, \dots, \nu_k^*]^T$ はベースの目標速度であるから, ベースの進行方向目標速度を u^* , 目標回転角速度を ω^* とすると, $[\nu_1^* \ \nu_2^*]^T = \varphi[u^* \ \omega^*]^T, k=2$ として一般性を失わない. また, $\nu_{M1}^* = \dot{q}_{M1}^*, \nu_{M2}^* = \dot{q}_{M2}^*$ であるから, ホロノミック拘束のもとでは, $\nu_{M2}^* = \dot{q}_{M2}^*$ は ν_{M1}^* や u^*, ω^* によって定まる. これらの物理量に対して, 以下の仮定をおく.

仮定 3: 目標軌道 q^* , 速度 $u^*, \omega^*, \dot{q}^*$, 加速度 $\ddot{u}^*, \ddot{\omega}^*, \ddot{q}^*$, 加加速度 $\ddot{\ddot{u}}^*, \ddot{\ddot{\omega}}^*, \ddot{\ddot{q}}^*$ は大域的に有界であり, かつ, $u^* \neq 0$ とする.

3.1 参照ロボット

Fig. 2 Reference robot and tracking errors

目標軌道との誤差システムをつくるため, 目標軌道を生じる参照ロボット (Fig.2) を導入する. Fig.2 より, ベース座標 $q_B = [x \ y \ \phi]^T$ に対する追従偏差 e_B , マニピュレータ座標 q_{M1} に対する追従偏差 e_{M1} および拘束力に対する追従偏差 $\tilde{\lambda}_M$ は次で与えられる.

$$e_B = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x^* - x) \cos \phi + (y^* - y) \sin \phi \\ -(x^* - x) \sin \phi + (y^* - y) \cos \phi \\ \phi^* - \phi \end{bmatrix}$$

$$e_{M1} = q_{M1}^* - q_{M1}, \tilde{\lambda}_M = \lambda_M - \lambda_M^* \quad (11)$$

Fukao⁹⁾らの結果から, 目標軌道追従のための指令速度 $\nu_c = [\nu_{Bc}^T \ \nu_{M1c}^T \ \nu_{M2c}^T]^T$ をつぎのように定義する.

$$\nu_{Bc} = \varphi u_{Bc}, \quad u_{Bc} = \begin{bmatrix} u_c \\ \omega_c \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} u^* \cos e_3 + K_1 e_1 \\ \omega^* + u^* K_2 e_2 + K_3 \sin e_3 \end{bmatrix}$$

$$\nu_{M1c} = \dot{q}_{M1}^* + K_{M1} e_{M1}$$

$$\nu_{M2c} = -J_{M2}^{-1} (J_{M0} f_B \varphi^{-1} \nu_{Bc} + J_{M1} \nu_{M1c}) \quad (12)$$

ただし, 定数 $K_i > 0, i=1, 2, 3$ および正定行列 K_{M1} は任意に定める. また, つぎの仮定を設ける.

仮定 4: e_3 は追従誤差 e_3 が $|e_3| < \pi$ となる範囲で設定する.

ここで, ベースの運動学 (7) 式に対して, つぎの補題が知られている⁹⁾.

[補題 1] ベースの運動学 (7) 式に対して, $\nu_B = \nu_{Bc}$ とすれば, ベース座標の追従誤差の微分は

$$\dot{e}_1 = -K_1 e_1 + (\omega^* + u^* K_2 e_2 + K_3 \sin e_3) e_2$$

$$\dot{e}_2 = -(\omega^* + u^* K_2 e_2 + K_3 \sin e_3) e_1 + u^* \sin e_3$$

$$\dot{e}_3 = -u^* K_2 e_2 - K_3 \sin e_3 \quad (13)$$

で与えられる. このとき, $\lim_{t \rightarrow \infty} e_B = 0$ となる. $\square$

これは, 正定関数 V_1 を

$$V_1 = \frac{1}{2} (e_1^2 + e_2^2) + \frac{1 - \cos e_3}{K_2} \quad (14)$$

とおき, (13) 式に沿って, 微分すれば,

$$\dot{V}_1 = -K_1 e_1^2 - \frac{K_3}{K_2} \sin^2 e_3 \leq 0$$

となり, 不変集合定理¹⁰⁾を用いて示される.

(注意 1) ベースが前後逆向きに追従することを許せば, 仮定 4 は取り除くことができる. $\blacksquare$

3.2 適応制御系

ハイブリッド制御のための適応制御系を設計するため, Yuan¹¹⁾により導入されたフィルターと同様に, 力偏差を入力とするフィルターを定義する. 任意の正定数 α_1 とフィルター変数 $\beta_M \in R^m$ に対して

$$\dot{\beta}_M = -\alpha_1 \beta_M - \alpha_1 [J_{M1} \ J_{M2}]^T \tilde{\lambda}_M \quad (15)$$

とする. さらに, 以下の変数を定義する.

$$\tilde{\nu} = \nu - \nu_c, \beta = [0_k^T \ \beta_M^T]^T, \tilde{\nu} = R\tilde{s}, \delta = \tilde{\nu} + \beta,$$

$$\chi = \nu_c - \beta, \tilde{s} = [\tilde{\nu}_B^T \ \tilde{\nu}_{M1}^T]^T, e = [e_B^T \ e_M^T]^T. \quad (16)$$

ここで,

$$R = \begin{bmatrix} I_k & 0 \\ 0 & I_l \\ -J_{M2}^{-1}J_{M0}f_B\varphi^{-1} & -J_{M2}^{-1}J_{M1} \end{bmatrix}.$$

また、関数 $\rho(t)$ はつぎの条件を満たす⁸⁾。

- (1) $\rho(t) > 0, \forall t \in [0, \infty)$
- (2) $\lim_{t \rightarrow \infty} \rho(t) = 0$
- (3) $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \rho(\tau) d\tau = a < \infty$

このとき、つぎの定理が成立する。

《定理 1》 (4) 式のシステムに対して、つぎの制御則および適応則を適用する。

$$\begin{aligned} \tau &= B_1^{-1}[-K_d\delta - F + Y_1(q, \dot{q}, \chi, \dot{\chi})\hat{p} \\ &\quad - \left(\frac{\partial V_1}{\partial q}S(q_B)\right)^T + \bar{J}_M^T(-\lambda_M^* + \alpha_2\bar{\lambda}_M)] \\ \dot{\hat{p}} &= -\Gamma Y_1^T(q, \dot{q}, \chi, \dot{\chi})\delta \\ \dot{\hat{D}} &= \gamma\|\delta\| \end{aligned} \quad (17)$$

このとき、閉ループ系の信号は一様に有界であり、偏差信号の定常値は以下ようになる。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \bar{\lambda}_M = 0 \quad (18)$$

ここで、

$$F(t) = \frac{\delta \hat{D}^2}{\|\delta\| \hat{D} + \rho(t)}$$

である。□

(注意 2) $F(t)$ は、 $\lim_{t \rightarrow \infty} \rho(t) = 0$ に伴い原点で不連続な切り換え関数へ漸近するが、 δ に対して $\rho(t)$ の収束の速さを調整することで、チャタリングを防止することができる。また、以下の補題においては、簡単のため有界な関数、ベクトルおよび行列関数の集合を同一記号 L_∞ であらわす。 $L_\infty^{n \times m}$ などの上添字は略す。■

パラメータ推定誤差を $\tilde{p} = \hat{p} - p$, $\tilde{D} = \hat{D} - D$ とおくと、(17) 式によって、閉ループ系は次式となる。

$$\begin{aligned} M_1\dot{\delta} &= -(C_1 + K_d)\delta + Y_1(q, \dot{q}, \chi, \dot{\chi})\tilde{p} - \left(\frac{\partial V_1}{\partial q}S(q_B)\right)^T \\ &\quad + (1 + \alpha_2)\bar{J}_M^T\bar{\lambda}_M - (F + d_1) \\ \dot{\hat{p}} &= -\Gamma Y_1^T(q, \dot{q}, \chi, \dot{\chi})\delta \\ \dot{\hat{D}} &= \gamma\|\delta\| \\ \dot{\beta}_M &= -\alpha_1\beta_M - \alpha_1[J_{M1} \ J_{M2}]^T\bar{\lambda}_M \end{aligned} \quad (19)$$

定理の証明は以下の補題によって示される。

[補題 2] $\delta, \beta \in L_2$, $\tilde{\nu}, R\tilde{s}, \hat{p}, e_{M1}, \dot{e}_{M1}, \nu_c, \chi, q, \dot{q} \in L_\infty$.
かつ、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_1 = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} e_3 = 0.$$

(証明) 正定関数 V_2 を

$$\begin{aligned} V_2 &= V_1 + \frac{1}{2}\delta^T M_1\delta + \frac{1 + \alpha_2}{2\alpha_1}\beta^T\beta + \frac{1}{2}\tilde{p}^T\Gamma^{-1}\tilde{p} \\ &\quad + \frac{1}{2\gamma}\tilde{D}^2 \end{aligned} \quad (20)$$

とする。閉ループ系 (19) 式を用いて、 V_2 を時間微分すれば、

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \frac{\partial V_1}{\partial q}S(q_B)(\nu_c + \tilde{\nu}) + \frac{\partial V_1}{\partial q^*}S(q_B^*)\nu^* \\ &\quad - \delta^T K_d\delta - (1 + \alpha_2)\beta^T\beta - \delta^T S^T(q_B) \left(\frac{\partial V_1}{\partial q}\right)^T \\ &\quad + (1 + \alpha_2)\bar{\lambda}_M^T \bar{J}_M R \tilde{s} - \delta^T (F + d_1) \end{aligned}$$

となる。ここで、 $V_1 = V_1(q_B, q_B^*)$ および δ の定義から、

$$\frac{\partial V_1}{\partial q}S(q_B)\tilde{\nu} = \frac{\partial V_1}{\partial q}S(q_B)\delta$$

であること、さらに、

$$\begin{aligned} \bar{J}_M R &= [J_{M0}f_B\varphi^{-1} \ J_{M1} \ J_{M2}] \\ &\quad \times \begin{bmatrix} I_k & 0 \\ 0 & I_l \\ -J_{M2}^{-1}J_{M0}f_B\varphi^{-1} & -J_{M2}^{-1}J_{M1} \end{bmatrix} \\ &= [0_{(m-l) \times k} \ 0_{(m-l) \times l}] \end{aligned}$$

を用いれば、

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= -K_1 e_1^2 - \frac{K_3}{K_2} \sin^2 e_3 \\ &\quad - \delta^T K_d\delta - (1 + \alpha_2)\beta^T\beta - \delta^T (F + d_1) \end{aligned} \quad (21)$$

となる。(21) 式の右辺を、 $F(t)$ および適応則を用いて整理すると、つぎの関係が導出できる。

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &< -K_1 e_1^2 - \frac{K_3}{K_2} \sin^2 e_3 \\ &\quad - \delta^T K_d\delta - (1 + \alpha_2)\beta^T\beta + \rho(t) \end{aligned} \quad (22)$$

$\rho(t)$ の定義を用いて、両辺を積分すれば、

$$\begin{aligned} V_2(t) - V_2(0) &< -K_1 \int_0^t e_1^2 d\tau - \frac{K_3}{K_2} \int_0^t \sin^2 e_3 d\tau \\ &\quad - \int_0^t \delta^T K_d\delta d\tau - (1 + \alpha_2) \int_0^t \beta^T\beta d\tau + a < \infty \end{aligned} \quad (23)$$

を得る。明らかに

$$V_2(t) < V_2(0) + a < \infty. \quad (24)$$

したがって、 $V_2(t)$ は有界である。すなわち、 $e_1, e_2, \delta, \beta, \tilde{p}, \tilde{D} \in L_\infty$ 。かつ、 $e_1, \sin e_3, \delta, \beta \in L_2$ 。また、変数の定義より、 $\tilde{\nu}, R\tilde{s}, \hat{p}, \hat{D} \in L_\infty$ である。 ν および ν_c の定義 (12) 式より、 $\tilde{\nu}_{M1} = -\dot{e}_{M1} - K_{M1}e_{M1} \in L_\infty$ であるから、 $e_{M1}, \dot{e}_{M1} \in L_\infty$ である。さらに、(12) 式と仮定 3 より $\nu_c, \chi \in L_\infty, e_{M1}, \dot{e}_{M1} \in L_\infty$ および仮定 2 より、 $q_M, \dot{q}_M \in L_\infty$ であることがわかる。また、 $\tilde{\nu}, \nu_c \in L_\infty$ および仮定 2 より、 $\dot{q}_B, \dot{e}_B \in L_\infty$ 。したがって、 $q, \dot{q} \in L_\infty$ 。さらに、 $e_1, \sin e_3 \in L_2$ であるから、Barbalat's Lemma より、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_1 = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} e_3 = 0$$

である. $\square$

[補題3] $\hat{M}_1$ を推定パラメータ $\hat{p}$ により構成された行列 M_1 とする. このとき,

$$\{\alpha_1 \hat{M}_1 \text{Blockdiag}(0_k, I_m) + (1 + \alpha_2) I_{k+m}\}$$

を正則とする α_1, α_2 が存在すれば, $\tilde{\lambda}_M \in L_\infty$ となる.

(証明) (19) 式より,

$$(1 + \alpha_2) \bar{J}_M^T \tilde{\lambda}_M = M_1(R\dot{\tilde{s}} + \dot{R}\tilde{s}) + M_1\dot{\tilde{\beta}} + (C_1 + K_d)\delta - Y_1(q, \dot{q}, \chi, \dot{\chi})\tilde{p} + (F + d_1).$$

ここで,

$$Y_1(q, \dot{q}, \chi, \dot{\chi})\tilde{p} = Y_1(q, \dot{q}, \chi, \dot{\chi} + \dot{\beta})\tilde{p} - \{\hat{M}_1(q) - M_1(q)\}\dot{\beta}$$

であるから,

$$\begin{aligned} & \{\alpha_1 \hat{M}_1 \text{Blockdiag}(0_k, I_m) + (1 + \alpha_2) I_{k+m}\} \bar{J}_M^T \tilde{\lambda}_M \\ &= M_1(R\dot{\tilde{s}} + \dot{R}\tilde{s}) + (C_1 + K_d)\delta \\ & - Y_1(q, \dot{q}, \chi, \dot{\chi} + \dot{\beta})\tilde{p} - \alpha_1 \hat{M}_1\dot{\beta} + (F + d_1) \end{aligned} \quad (25)$$

である. (25) 式に左から $\bar{J}_M M_1^{-1}$ をかけると,

$$\begin{aligned} & \bar{J}_M M_1^{-1} \{\alpha_1 \hat{M}_1 \text{Blockdiag}(0_k, I_m) + (1 + \alpha_2) I_{k+m}\} \\ & \times \bar{J}_M^T \tilde{\lambda}_M = \bar{J}_M [\dot{R}\tilde{s} + M_1^{-1} \{(C_1 + K_d)\delta \\ & - Y_1(q, \dot{q}, \chi, \dot{\chi} + \dot{\beta})\tilde{p} - \alpha_1 \hat{M}_1\dot{\beta} + (F + d_1)\}] \end{aligned} \quad (26)$$

を得る. また, (12) 式および仮定3より, $\dot{\nu}_c \in L_\infty$ となり, $\dot{\chi} + \dot{\beta} = \dot{\nu}_c$ であるから,

$$Y_1(q, \dot{q}, \chi, \dot{\chi} + \dot{\beta}) \in L_\infty$$

となることがわかる. ゆえに,

$$\{\alpha_1 \hat{M}_1 \text{Blockdiag}(0_k, I_m) + (1 + \alpha_2) I_{k+m}\}$$

が正則となるよう α_1, α_2 を選べば, $\tilde{\lambda}_M \in L_\infty$ となる. $\square$

[補題4]

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e = 0.$$

(証明) 変数の定義, (19) 式の閉ループの関係式および補題2, 3より, $\dot{\delta}, \dot{\beta}, \dot{\tilde{s}}, \dot{\tilde{\nu}}, \dot{\chi}, \dot{F} \in L_\infty$. $\delta, \beta \in L_2$ であるから,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \delta = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \beta_M = 0.$$

これは,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\nu} = 0$$

を意味する. ゆえに (13) 式の $\dot{e}_3 = -u^* K_2 e_2 - K_3 \sin e_3$ が成立する. 補題2より, $e_3 \rightarrow 0$. また, $\dot{e}_B \in L_\infty$ であるから, Barbalat's Lemma より

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{e}_3 = 0.$$

したがって, $u^* \neq 0$ であるから

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_2 = 0.$$

すなわち, 補題2より

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_B = 0.$$

一方, $\tilde{\nu} \rightarrow 0$ であるから, $\tilde{\nu}_{M1} = -\dot{e}_{M1} - K_{M1} e_{M1}$ において, e_{M1} は有界な極限をもつ. また, $\dot{e}_{M1} \in L_\infty$ である. したがって, Barbalat's Lemma より,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{e}_{M1} = 0$$

が成り立つ. これより,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_{M1} = 0$$

である. $\Phi(q) = 0$ はホロノミック拘束であるから,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_M = 0$$

を得る. したがって,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e = 0.$$

$\square$

[補題5] $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\lambda}_M = 0.$

(証明) J_{B1}, J_{M2} の正則性, $\ddot{q} \in L_\infty$ から $\ddot{R} \in L_\infty$. 仮定3より, $\dot{\nu}_c \in L_\infty$. これより, $\dot{Y}_1(q, \dot{q}, \chi, \dot{\chi} + \dot{\beta}) \in L_\infty$. さらに, (26) 式の微分を行なえば, $\dot{\tilde{\lambda}}_M \in L_\infty$ を得る. ここで, (15) 式の両辺を微分すれば,

$$\begin{aligned} \dot{\beta}_M &= -\alpha_1 \left\{ \dot{\beta}_M + [J_{M1} \ J_{M2}]^T \dot{\tilde{\lambda}}_M \right. \\ & \quad \left. + [J_{M1} \ J_{M2}]^T \tilde{\lambda}_M \right\} \in L_\infty \end{aligned}$$

となる. したがって, β_M は一様連続であり, $\beta_M \rightarrow 0$ であることから, Barbalat's Lemma より,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\beta}_M = 0.$$

ここで, $[J_{M1} \ J_{M2}]^T$ が列フルランクであることから,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\lambda}_M = 0$$

を得る. $\square$

以上の補題2~5により, 定理が証明された.

4. シミュレーション

4.1 モデル化

Fig.3 にシミュレーションで用いるモバイルマニピュレータを示す. ベースは3輪をもち, 左右の2輪が駆動輪 (θ_l, θ_r) である. 先頭の車輪は非駆動のキャスタである. マニピュレータは2リンクからなり, 第1リンクは鉛直軸周りの回転 (θ_1), 第2リンクは鉛直軸と直交する軸周りの回転 (θ_2) を行なう. ベースの位置姿勢は2つの車輪の軸の中心 (x, y, ϕ) で表わす. 駆動トルクは両輪を駆動する (τ_l, τ_r), マニピュレータの

Fig. 3 Mobile manipulator used for simulations

各軸に働く (τ_{M1}, τ_{M2}) である。ベースの幅 $2b$ 、車輪の半径 r 、車輪軸中心とマニピュレータ間の距離 d 、マニピュレータのアーム長 L_1, L_2 、マニピュレータ軸からリンク重心までの長さ l_1, l_2 、ベースと車輪の質量 m_B, m_W 、マニピュレータのアームの質量 m_1, m_2 、ベースの慣性モーメント I_B 、車輪の軸についての車輪の慣性モーメント I_W 、車輪の回転についての慣性モーメント I_m 、マニピュレータのアームの慣性モーメント I_1, I_2 とする。

このシステムに作用する非ホロノミック拘束は

$$\begin{aligned}\dot{x} \sin \phi - \dot{y} \cos \phi &= 0 \\ \dot{x} \cos \phi + \dot{y} \sin \phi + b \dot{\phi} &= r \dot{\theta}_r \\ \dot{x} \cos \phi + \dot{y} \sin \phi - b \dot{\phi} &= r \dot{\theta}_r\end{aligned}$$

である。一方、マニピュレータに作用するホロノミック拘束は

$$\Phi(q) = L_1 + L_2 \sin \theta_2 - L = 0$$

とする。これは、マニピュレータの先端が一定の高さの天井に常に接触するという状況を表わしている。上記の表現では、一般化座標は $q = [x, y, \phi, \theta_r, \theta_1, \theta_2]^T$ であるが、 (θ_r, θ_1) は進行方向速度 u 、角速度 ω と

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} & \frac{b}{r} \\ \frac{1}{r} & -\frac{b}{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \omega \end{bmatrix} \quad (27)$$

なる関係があり、 (u, ω) を一般化速度とすることで、 (θ_r, θ_1) を運動方程式から除くことができる。また、 θ_2 はホロノミック拘束より除かれる。したがって、一般化座標 $q = [x, y, \phi, \theta_1]^T$ に対して、運動学 (8) 式をつくると

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos \phi & \frac{r}{2} \cos \phi & 0 \\ \frac{r}{2} \sin \phi & \frac{r}{2} \sin \phi & 0 \\ \frac{r}{2b} & -\frac{r}{2b} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_r \\ \nu_l \\ \nu_{M1} \end{bmatrix} \quad (28)$$

となる。この座標系に対して (11) 式の偏差系と (12) 式の目標速度入力を構成する。(9) 式の各要素の詳細は付録に示す。

4.2 シミュレーション

モバイルマニピュレータの物理パラメータをつぎのように与える。既知パラメータとして、 $b = r = d = 1, l_1 = l_2 =$

Fig. 4 Trajectory on (x, y) plane

$0.5, L = 1.5$ を与える。未知パラメータとして、 $m_B = m_W = m_1 = m_2 = 1, I_B = I_W = I_m = I_1 = I_2 = 1$ を与える。単位は MKS 単位系とする。

マニピュレータの目標軌道に

$$q_{M1}^* (= \theta_1^*) = -0.2 \left\{ \cos \left(\frac{t}{2} \right) - 1 \right\}$$

なる周期的な軌道を与え、マニピュレータの先端に働く目標力 λ_M^* には $\lambda_M^* = 10$ の一定値を与える。これはモバイルマニピュレータが目標位置軌道に沿って移動しながら、天井を一定の力で磨く作業を想定している。

ベースの目標軌道 $q_B^* = [x^* \ y^* \ \phi^*]^T$ を参照ロボットが生成する軌道とする。これは

$$\dot{q}^* = f_B(q_B^*) \eta^* \quad (29)$$

により生成される。直線と曲線からなる混成軌道を得るため、目標速度 $\eta^* = [u^* \ \omega^*]^T$ は以下のように与える。

$$\begin{cases} u^* = 0.25 \left(1 - \cos \frac{\pi}{5} t \right) + 0.1 \\ \omega^* = 0 & (0 \leq t < 5) \\ u^* = 0.5 + 0.1 \\ \omega^* = 0 & (5 \leq t < 10) \\ u^* = 0.25 \left\{ 1 + \cos \frac{\pi}{5} (t - 10) \right\} + 0.1 \\ \omega^* = 0 & (10 \leq t < 15) \\ u^* = 0.15\pi \left\{ 1 - \cos \frac{\pi}{5} (t - 15) \right\} + 0.1 \\ \omega^* = -(u^* - 0.1)/2.5 & (15 \leq t < 25) \\ u^* = 0.15\pi \left\{ 1 - \cos \frac{\pi}{5} (t - 25) \right\} + 0.1 \\ \omega^* = (u^* - 0.1)/2.5 & (25 \leq t < 35) \\ u^* = 0.25 \left\{ 1 - \cos \frac{\pi}{5} (t - 35) \right\} + 0.1 \\ \omega^* = 0 & (35 \leq t < 40) \\ u^* = 0.5 + 0.1 \\ \omega^* = 0 & (40 \leq t < 45) \\ u^* = 0.25 \left(1 - \cos \frac{\pi}{5} t \right) + 0.1 \\ \omega^* = 0 & (45 \leq t < 50) \end{cases}$$

Fig. 5 Position tracking errors

Fig. 6 Velocity tracking errors

Fig. 7 Force tracking error

モバイルマニピュレータの初速度を $\dot{q}(0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, 初期座標を $q(0) = [-1 \ 4 \ -\pi/18 \ -\pi/4]^T$, 未知パラメータの初期値を $\hat{p}(0) = [0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5]^T$ とする。ただし, 未知パラメータベクトル $p \in R^7$ は

$$p = \left[\frac{r^2(m_B + m_1 + m_2 + 2m_W)}{4}, \frac{r^2 \{ (m_B + m_1 + m_2)d^2 + 2m_W b^2 + I_B + 2I_W \}}{4b^2}, I_m, I_1, I_2, m_2 l_2, \frac{r^2(m_B + m_1 + m_2)}{2b} d \right]^T$$

である。外乱は $d_1(q) = [5, 4, 3, 2]^T$ とした。このシステムに対して, 設計パラメータ $K_d = I_4, \Gamma = I_7, \alpha_1 = 0.2, \alpha_2 = 5, K_1 = K_2 = K_3 = K_{M1} = 1$,

$$\rho(t) = \frac{1}{(1 + \frac{t}{10})^2}$$

としてシミュレーションを行なった。

Fig.4 はベースの目標軌道と追従軌跡を示す。破線が参照ロボットによる目標軌道, 実線がモバイルロボットの追従軌道の軌跡である。大きく離れた初期位置から十分な精度で追従しているようすが示されている。Fig.5 は各座標の目標軌道との偏差の時間応答を示している。どの座標も 10 秒前後には偏差を十分小さくすることができた。Fig.6 は目標速度に対する追従誤差を示す。Fig.7 には, 力の目標値との偏差の時間応答を示す。いずれも制御開始直後に偏差が生じるが, 直ちに収束するようすが見て取れる。このように, シミュレーションにおいて提案する制御系の有効性を示すことができた。

5. おわりに

本研究では, 動力学パラメータが未知で, 外乱の影響を受けるモバイルマニピュレータの位置と力のハイブリッド制御系の提案を行なった。提案手法は, 全座標の軌道追従偏差および力偏差が設計パラメータによって定まる収束領域に収束することを保証した。収束は漸近収束であるため, 収束速度は設定できないが, シミュレーションでは, 十分な速さで収束することが確認できた。筆者の知る限り, 同様の問題を扱った研究は, Dong⁷⁾およびLi⁸⁾らの研究以外存在しない。しかし, これらの先行研究の手法では, 本研究で設定した制御問題に対応することはできない。この意味で, 本研究で提案した制御系は外乱に対してロバストでかつ未知パラメータへも対応可能な新たな位置と力のハイブリッド制御系であるといえる。ただし, 運動学的パラメータが未知な場合, 特に, 入力変換行列 $B(q)$ に未知パラメータが含まれる場合など, 検討しなければならない課題も残されている。

本研究は, 文部科学省科学研究費補助金(課題番号:(B)19360110)およびハイテクリサーチセンター整備事業の助成を受けて実施された。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 安部正人: 自動車の運動と制御, 山海堂 (2003)
- 2) 成清辰生: 未知ダイナミクスを含む非ホロノミック力学系の制御系設計, 計測と制御, **45-7**, 574/581 (2006)
- 3) 深尾隆則: 非ホロノミック移動ロボットの適応制御, 計測と制御, **45-7**, 602/607 (2006)
- 4) Y.C. Chang and B.S. Chen: Adaptive Tracking Control for Nonholonomic Caplygin Systems, IEEE Trans. Control Systems Technology, **10-1**, 96/104 (2002)
- 5) M. Oya, C.Y. Su and R. Katoh: Robust Adaptive Motion/Force Tracking Control of Uncertain Nonholonomic Mechanical Systems, IEEE Trans. Robotics and Automation, **19-1**, 175/181 (2003)
- 6) C.Y. Su, Y. Stepanenko and A.A. Goldenberg: Reduced Order Model and Robust Control Architecture for Mechanical Systems with Nonholonomic Pfaffian Constraints,

- IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics-Part A, **29**-3, 307/313 (1999)
- 7) W. Dong: On trajectory and force tracking control of constrained mobile manipulators with parameter uncertainty, *Automatica*, **38**, 1475/1484 (2002)
- 8) Z. Li, C. Yang, J. Luo, Z. Wang and A. Ming: Robust motion/force control of nonholonomic mobile manipulators using hybrid joints, *Advanced Robotics*, **21**-11, 1231/1252 (2007)
- 9) T. Fukao, H. Nagasawa and N. Adachi: Adaptive Tracking Control of a Nonholonomic Mobile Robot, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, **16**-5, 609/615 (2007)
- 10) J.-J.E. Slotine, W. Li: *Applied Nonlinear Control*, 123/126, Prentice Hall (1991)
- 11) J. Yuan: Adaptive Control of a Constrained Robot-Ensuring Zero Tracking and Zero Force Errors, *IEEE Trans. Automatic Control*, **42**-12, 1709/1714 (1997)

《付 録》

ここでは, Fig.3 のシステムに対する (9) 式の各要素の詳細を示す. $\nu = [\nu_r \ \nu_l \ \dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2]^T$ とすれば, $M_1(q) = [M_{ij}^1(q)] \in R^{4 \times 4}$, $C_1(q, \dot{q}) = [C_{ij}^1] \in R^{4 \times 4}$, $G_1(q) = [0 \ 0 \ 0 \ m_2 g l_2 \cos \theta_2]^T$, $B_1 = I_{4 \times 4}$, $\bar{J}_M(q) = [0 \ 0 \ 0 \ l_2 \cos \theta_2]$ となる. ここで, M_0 を

$$M_0^1 = \frac{r^2}{4b^2}(m_B + m_1 + m_2) + 2m_w b^2 + I_B + 2I_w + m_2 l_2 \cos \theta_2 (2d \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2) + I_m$$

とおくと, $M_{ij}^1(q)$ はつぎのように与えられる.

$$\begin{aligned} M_{11}^1 &= \frac{r^2}{4}(m_B + m_1 + m_2 + 2m_w) \\ &\quad - \frac{r^2}{2b} m_2 l_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + M_0^1 + I_m \\ M_{12}^1 &= \frac{r^2}{4}(m_B + m_1 + m_2 + 2m_w) - M_0^1 \\ M_{13}^1 &= -\frac{r}{2} m_2 l_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \\ &\quad + \frac{r}{2b} m_2 l_2 \cos \theta_2 (d \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2) \\ M_{14}^1 &= -\frac{r}{2} m_2 l_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 - \frac{r}{2b} m_2 l_2 d \sin \theta_1 \sin \theta_2 \\ M_{22}^1 &= \frac{r^2}{4}(m_B + m_1 + m_2 + 2m_w) \\ &\quad + \frac{r^2}{2b} m_2 l_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + M_0^1 + I_m \\ M_{23}^1 &= -\frac{r}{2} m_2 l_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \\ &\quad - \frac{r}{2b} m_2 l_2 \cos \theta_2 (d \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2) \\ M_{24}^1 &= -\frac{r}{2} m_2 l_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 + \frac{r}{2b} m_2 l_2 d \sin \theta_1 \sin \theta_2 \\ M_{33}^1 &= I_1 + m_2 l_2^2 \cos^2 \theta_2 \\ M_{34}^1 &= M_{43}^1 = 0, M_{44}^1 = I_2 + m_2 l_2^2 \end{aligned}$$

$C_{ij}^1(q, \dot{q})$ は $c_{ij}^1(q, \dot{q})$ の置換により, つぎで与えられる.

$$\begin{aligned} c_1^1 &= \frac{1}{2} m_2 l_2^2 \dot{\theta}_2 \sin 2\theta_2, c_2^1 = \frac{1}{2} m_2 l_2^2 (\dot{\phi} + \dot{\theta}_1) \sin 2\theta_2, \\ c_3^1 &= m_2 l_2 \{ (2\dot{\phi} + \dot{\theta}_1) \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \dot{\theta}_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \}, \\ c_4^1 &= m_2 l_2 d \dot{\phi} \sin \theta_1 \cos \theta_2, c_5^1 = m_2 l_2 d \dot{\phi} \cos \theta_1 \sin \theta_2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_6^1 &= m_2 l_2 \dot{\phi} \sin \theta_1 \sin \theta_2, c_7^1 = m_2 l_2 \dot{\phi} \cos \theta_1 \cos \theta_2, \\ c_8^1 &= m_2 l_2 d (\dot{\theta}_1 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + \dot{\theta}_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2), \\ c_9^1 &= m_2 l_2 (\dot{\theta}_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \dot{\theta}_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2), \\ c_{10}^1 &= m_2 l_2 \{ (\dot{\phi} + \dot{\theta}_1) \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \dot{\theta}_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \}, \\ c_{11}^1 &= m_2 l_2 d \{ (\dot{\phi} + \dot{\theta}_1) \sin \theta_1 \cos \theta_2 + \dot{\theta}_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 \}, \\ c_{12}^1 &= m_2 l_2 \{ (\dot{\phi} + \dot{\theta}_1) \sin \theta_1 \sin \theta_2 - \dot{\theta}_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \}, \\ c_{13}^1 &= m_2 l_2 d \{ (\dot{\phi} + \dot{\theta}_1) \cos \theta_1 \sin \theta_2 + \dot{\theta}_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \}, \\ c_{14}^1 &= 2(m_B + m_1 + m_2) d \dot{\phi} + c_3^1, c_{15}^1 = c_1^1 + c_8^1, \\ c_{16}^1 &= c_1^1 + c_{11}^1, c_{17}^1 = c_2^1 + c_{13}^1, \\ c_{18}^1 &= c_4^1 - c_1^1, c_{19}^1 = c_2^1 + c_5^1. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{11}^1 &= -\frac{r^2}{4b} c_9^1 - \frac{r^2}{4b^2} c_{15}^1, C_{12}^1 = \frac{r^2}{4b} c_{14}^1 + \frac{r^2}{4b^2} c_{15}^1, \\ C_{13}^1 &= -\frac{r}{2} c_{10}^1 - \frac{r}{2b} c_{16}^1, C_{14}^1 = \frac{r}{2} c_{12}^1 - \frac{r}{2b} c_{17}^1, \\ C_{21}^1 &= -\frac{r^2}{4b} c_{14}^1 + \frac{r^2}{4b^2} c_{15}^1, C_{22}^1 = \frac{r^2}{4b} c_9^1 - \frac{r^2}{4b^2} c_{15}^1, \\ C_{23}^1 &= -\frac{r}{2} c_{10}^1 + \frac{r}{2b} c_{16}^1, C_{24}^1 = \frac{r}{2} c_{12}^1 + \frac{r}{2b} c_{17}^1, \\ C_{31}^1 &= \frac{r}{2} c_7^1 + \frac{r}{2b} c_{18}^1, C_{32}^1 = \frac{r}{2} c_7^1 - \frac{r}{2b} c_{18}^1, \\ C_{33}^1 &= -c_1^1, C_{34}^1 = -c_2^1, C_{41}^1 = -\frac{r}{2} c_6^1 + \frac{r}{2b} c_{19}^1, \\ C_{42}^1 &= -\frac{r}{2} c_6^1 - \frac{r}{2b} c_{19}^1, C_{43}^1 = c_2^1, C_{44}^1 = 0. \end{aligned}$$

[著 者 紹 介]

成 清 辰 生 (正会員)

1978 年名古屋大学応用物理学卒業. 83 年名古屋大学大学院情報工学専攻単位取得退学. 同年通産省工業技術院九州工業技術試験所入所. 90 年豊田工業大学助教授, 98 年同教授. 93 年理化学研究所バイオミメティック・コントロール研究センターフロンティア研究員 (非常勤) 併任. 制御工学, ロボット工学の研究と教育に従事. 工学博士.

中 川 雅 史

2006 年豊田工業大学卒業. 2008 年豊田工業大学大学院修士課程修了. 同年 (株) デンソー入社. 在学中, モバイルマニピュレータの制御系設計の研究に従事.

川 西 通 裕 (正会員)

1996 年京都大学大学院工学研究科応用システム科学専攻博士課程中途退学. 同年神戸大学工学部機械工学科助手, 2006 年豊田工業大学工学部先端工学基礎学科准教授, 現在に至る. 制御理論と数値最適化およびその応用に関する研究に従事. 博士 (工学). システム制御情報学会, 日本機械学会, 日本ロボット学会, IEEE の会員.