本体姿勢変動を抑える3リンク宇宙ロボットの運動制御*

(二自由度制御による実験的検証)

翁 志 強^{*1}, 西 村 秀 和^{*2}
高 橋 伸 也^{*3}, 田 村 嘉 章^{*4}

Motion Control of a Three-Link Space Robot to Reduce the Base Attitude Disturbance

(Experimental Verification by Using Two-Degree-of-Freedom Control)

Zhiqiang WENG, Hidekazu NISHIMURA^{*5},
Shinya TAKAHASHI and Yoshiaki TAMURA

^{*5} Department of Electronics and Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiba University,
1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba, 263-8522 Japan

In this paper, we deal with a three-link space robot moving in planar space without controls for the base attitude. Our experimental setup of the three-link space robot can levitate by use of compressed air. Using d'Alembert principle, it is shown that the state equation of the three-link space robot can be reconstructed as a first-order nonholonomic system with the constraint condition that the rotational velocity of the base is set to be zero. The suitable final postures corresponding to the desired position of the end effector can be determined using the concept of the enhanced disturbance map. Based on the state equation, the feedforward torque inputs can be obtained by the final-state control in order to bring the end effector from an initial position to the desired position. The torque inputs and trajectories obtained are smooth. We designed a two-degree-of-freedom control to follow the obtained trajectory. It is verified from simulation and experiment that the proposed method of motion control is useful.

Key Words: Space Robot, Final-State Control, d'Alembert Principle, Enhanced Disturbance Map, Nonholonomic Constraint, Linear Parameter Varying System

1. はじめに

軌道上サービス,あるいは宇宙ステーションの建設や,その実験利用などに際して,マニピュレータの利用は必要不可欠である^(1, 2, 3, 4).しかし,宇宙空間において外力が作用しない宇宙ロボットは,角運動量保存則が成り立つためマニピュレータを動かすとそれを搭載する本体も運動してしまう.そのため,角運動量保存則による拘束条件を生かした姿勢制御⁽⁵⁾や,本体に及ぼす反力を打ち消すための装置を搭載する^(6, 7)などの宇宙ロボットに関する研究が活発に行われている.

角運動量保存則による角速度拘束条件,つまり,1階の非ホロノミック拘束条件の問題は,時間不変のなめらかな状態フィードバック制御では漸近安定化不可能な問題であるため,三平らは時間軸状態制御形を用いた制御を提案している⁽⁸⁾.梅谷らは角運動量保存則を利用して手先速度と関節角速度を関連付け一般化ヤコビ行列を定義した⁽⁹⁾.吉田らは姿勢安定アーム

を追加することで,その冗長性を利用する協調制御法を提案した⁽¹⁰⁾.そこでは,本体姿勢を作業変数とし,一般化ヤコビ行列を用い,本体姿勢角速度,手先速度と関節角速度の関係式の微分を利用している.しかしながら,制御トルクの二乗和を瞬時最適化し,手先軌道を予め直線として与えているため,トルク入力滑らかになっておらず,また,本体姿勢をゼロに保つためリアクションホイールを用いる必要があった.軽量化された宇宙構造物は振動しやすく,減衰にくいので,滑らかなトルク入力を得ることが望ましい.

一方, Dubowsky らは本体姿勢が姿勢制御装置によって完全に制御されるものとして,本体姿勢擾乱が少ない Enhanced Disturbance Map(拡張擾乱マップ, EDM)を利用し,関節角軌道を計画する方法を提案している⁽¹¹⁾.しかしながら,たとえばガスジェット装置による宇宙ロボット本体の姿勢制御の場合,搭載されるガスには限界がある⁽¹²⁾.そこで,大久保らは文献⁽¹¹⁾と異なり,本体の姿勢制御を行わない場合について,作業空間上において手先を目標位置に持って行く関節角の操作方向を逐次計算するアルゴリズムを提案した⁽¹³⁾.また,吉田らはマニピュレータが本体に

* 原稿受付 2003年5月20日.

^{*1} 正員,千葉大学大学院自然科学研究科(☎263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33).

^{*2} 正員,千葉大学工学部.

^{*3} 千葉大学大学院自然科学研究科.

^{*4} 東京大学大学院工学系研究科(☎113-8656 東京都文京区本郷7-3-1).

E-mail: nism@faculty.chiba-u.jp

及ぼす反力を除去するために反動ゼロ空間法を提案しているが、軌道計画は行われていない⁽¹⁴⁾。

このような背景のもとで、著者らはガス噴射、リアクションホイールなどの本体姿勢制御装置を用いずに、本体姿勢を保ちながら、関節角の軌道計画を行うための一手法を提案する。まず、二次元平面上で冗長自由度をもつ空気浮上式3リンク宇宙ロボットを設計・製作し、ラグランジュ-ダランベール原理を用いてトルクを入力とする運動方程式を導出する。次に、角運動量保存則に、さらに本体姿勢角速度0の拘束条件を加えることにより、ダランベール原理を用いて運動方程式を再構成している。そして、導出された本体姿勢変動なしの線形パラメータ変動(LPV)システムに対し、誤差学習を取り入れた終端状態制御(FSC)^(15, 16, 17)を適用することで、手先のある初期位置から目標位置へ持つて行くためのトルク入力が必要であることを示す。そのとき、EDMの概念を利用して適切な終端状態姿勢を決定している。得られたトルク入力は文献⁽¹⁰⁾とは異なり、滑らかとなる。最後に、求められた軌道に追従するよう二自由度制御実験を行い、シミュレーション結果と整合することから提案手法の有効性を示している。

2. モデリング

2.1 実験装置の緒元 本論文で制御実験の対象とする二次元平面上に運動する3リンク宇宙ロボットを図1に示す。この3リンク宇宙ロボットは各関節にモータを有する。ガス噴射などによる本体の姿勢制御を行わないので、この宇宙ロボットは1階の非ホロノミック拘束条件を有するシステムとなる。

Fig. 1 Dynamical model of three-link space robot

Table 1 Specifications of three-link space robot

Mass [kg]	m_0	m_1	m_2	m_3
Inertia [kg m ²]	i_0	i_1	i_2	i_3
Gravity center [m]	l_0	l_1	l_2	l_3
Length [m]		L_1	L_2	L_3
Damping [N m s/rad]		d_1	d_2	d_3
		0.084	0.0055	0.0043

本論文で用いる記号は以下に示すとおりである。

- m_0 (kg) 本体の質量
- m_j (kg) リンク j の質量 ($j=1, 2, 3$)
- i_0 (kg m²) 本体の質量中心まわりの慣性モーメント
- i_j (kg m²) リンク j の質量中心まわりの慣性モーメント
- x_e (m) 慣性系における手先の X 軸座標
- y_e (m) 慣性系における手先の Y 軸座標
- θ_0 (rad) 慣性系における本体姿勢角
- ϕ_j (rad) リンク j の相対関節角
- l_0 (m) 本体質量中心からリンク1回転軸までの距離
- l_j (m) リンク j 質量中心からその回転軸までの距離
- L_j (m) リンク j の長さ
- u_j (N m) モータ j が発生するトルク
- d_j (N m s) 関節 j の減衰係数

パラメータ同定の結果から得られた実験装置の緒元を表1に示す。

2.2 角運動量保存則が成り立つ運動方程式 角運動量保存則から式(1)のような非ホロノミック拘束条件を導出することができる。

$$\dot{\theta}_0 = f_1 \dot{\phi}_1 + f_2 \dot{\phi}_2 + f_3 \dot{\phi}_3 = \mathbf{f} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし、 $\mathbf{f} = [f_1 \ f_2 \ f_3]$ 、 f_1 、 f_2 、 f_3 は相対関節角 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 の関数である。

ラグランジュ-ダランベール原理により、運動方程式は式(2)のように表すことができる。

$$\left\langle \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right)^T - \left(\frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}} \right)^T + \left(\frac{\partial V}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right)^T, \delta \mathbf{q} \right\rangle = \langle \mathbf{u}, \delta \mathbf{q} \rangle \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{q} = [\theta_0 \ \phi_1 \ \phi_2 \ \phi_3]^T$ 、 $L = T - P$ 、 T は運動エネルギー、 P はポテンシャルエネルギー、 V は散逸エネルギー、 $\delta \mathbf{q}$ は $\mathbf{q}$ の変分、 $\langle, \rangle$ は内積である。

式(2)より、 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 に関する運動方程式は

$$\mathbf{M}_s(\Phi) \ddot{\Phi} + \mathbf{D}_s \dot{\Phi} + \mathbf{H}_s(\Phi, \dot{\Phi}) \Phi_s = \mathbf{u} \quad (3)$$

となる。ただし、

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{bmatrix}, \quad \Phi_s = \begin{bmatrix} \sin \phi_1 \\ \sin \phi_2 \\ \sin \phi_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}$$

である。

式 (3) のまま状態方程式表現すると非線形項が残ってしまうので、近似を行わずに非線形項を状態方程式の係数行列に取り込むため、式 (4) の拡張線形化を用いて LPV システムに変換する。

$$p \times \sin \phi_i = p \times \frac{\sin \phi_i}{\phi_i} \times \phi_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (4)$$

ただし、 p は多項式を表し、 $\phi_i = 0$ のとき $\sin \phi_i / \phi_i = 1$ である。式 (4) を利用して、次式を満たす $G_s(\Phi, \dot{\Phi})$ を得る。

$$H_s(\Phi, \dot{\Phi})\Phi_s = G_s(\Phi, \dot{\Phi})\Phi \quad (5)$$

式 (5) を利用して、 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 に関する運動方程式 (3) は式 (6) に変換できる。

$$M_s(\Phi)\ddot{\Phi} + D_s\dot{\Phi} + G_s(\Phi, \dot{\Phi})\Phi = u \quad (6)$$

2.3 本体姿勢変動のない拘束条件を与えた運動方程式
 本体姿勢変動がない拘束条件 $\theta_0 = 0$ のもとでは、本体姿勢角速度は $\dot{\theta}_0 = 0$ となり、これを非ホロノミック拘束条件式 (1) に代入すると式 (7) となる。

$$\dot{\phi}_1 = -\frac{f_2}{f_1}\dot{\phi}_2 - \frac{f_3}{f_1}\dot{\phi}_3 \quad (7)$$

式 (7) は新たに導入された速度の拘束条件であり、これにより独立な一般化速度の数はひとつ減り、一般化速度を $\dot{\Phi}_h = [\dot{\phi}_2 \ \dot{\phi}_3]^T$ にすることができる。 $\dot{\Phi}$ と $\dot{\Phi}_h$ 、 $\ddot{\Phi}$ と $\ddot{\Phi}_h$ の関係はそれぞれ式 (8)、(9) となる。

$$\dot{\Phi} = V_h \dot{\Phi}_h \quad (8)$$

$$\ddot{\Phi} = V_h \ddot{\Phi}_h + \dot{V}_h \dot{\Phi}_h \quad (9)$$

ただし、

$$V_h = \begin{bmatrix} -\frac{f_2}{f_1} & -\frac{f_3}{f_1} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\dot{V}_h = \begin{bmatrix} \frac{\dot{f}_1 f_2 - f_2 \dot{f}_1}{f_1^2} & \frac{\dot{f}_1 f_3 - f_3 \dot{f}_1}{f_1^2} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

である。式 (7) は積分できないため、一階の非ホロノミック拘束条件である。ダランベール原理から、運動方程式 (6) は式 (12) で表すことができる。

$$\langle M_s(\Phi)\ddot{\Phi} + D_s\dot{\Phi} + G_s(\Phi, \dot{\Phi})\Phi, \delta\Phi \rangle = \langle u, \delta\Phi \rangle \quad (12)$$

ここで、本体姿勢変動なしの拘束条件式 (7) が新たに加えられたとき、各関節のトルク入力 u_1, u_2 と u_3 は独立ではないことに注意されたい。すなわち、たとえば式 (6) より関節 1 のトルク入力 u_1 は式 (13) で表すことができる。

$$u_1 = M_{s1}\ddot{\Phi} + D_{s1}\dot{\Phi} + G_{s1}\Phi \quad (13)$$

ただし、 M_{s1}, D_{s1} と G_{s1} はそれぞれ M_s, D_s と G_s の一行目の要素からなる行列である。

$\dot{\Phi}$ と $\dot{\Phi}_h$ の関係式 (8) から、変分の関係式 (14) を得る。

$$\delta\dot{\Phi} = V_h \delta\dot{\Phi}_h \quad (14)$$

式 (8)、(9)、(13)、(14) を式 (12) に代入し、整理すると、式 (15) が導出できる。

$$M_h(\Phi)\ddot{\Phi}_h + D_h(\Phi)\dot{\Phi}_h + G_h(\Phi, \dot{\Phi})\Phi = u_h \quad (15)$$

ただし、

$$M_h(\Phi) = V_h^T M_s(\Phi) V_h - V_{h1}^T M_{s1}(\Phi) V_h$$

$$D_h(\Phi) = V_h^T D_s V_h + V_h^T M_s(\Phi) \dot{V}_h - V_{h1}^T D_{s1} V_h - V_{h1}^T M_{s1}(\Phi) \dot{V}_h$$

$$G_h(\Phi, \dot{\Phi}) = V_h^T G_s(\Phi, \dot{\Phi}) - V_{h1}^T G_{s1}(\Phi, \dot{\Phi})$$

$$u_h = [u_2 \ u_3]^T \quad (16)$$

である。なお、 V_{h1} は V_h の一行目の要素からなる行列である。

式 (7) と (15) より、本体姿勢変動なしの状態方程式は式 (17) となる。

$$\dot{x}_h = A_h(x_h)x_h + B_h(x_h)u_h \quad (17)$$

ただし、

$$A_h(x_h) = \begin{bmatrix} O_{3 \times 3} & V_h \\ -M_h^{-1}(\Phi)G_h(\Phi, \dot{\Phi}) & -M_h^{-1}(\Phi)D_h(\Phi) \end{bmatrix},$$

$$B_h(x_h) = \begin{bmatrix} O_{3 \times 2} \\ M_h^{-1}(\Phi) \end{bmatrix}, \quad x_h = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \Phi_h \\ \dot{\Phi}_h \end{bmatrix}$$

である。なお、式 (13) を u_2 あるいは u_3 に置き換えれば、 u_h は $[u_1 \ u_3]^T$ 、あるいは $[u_1 \ u_2]^T$ とすることができる。本論文では LPV システム式 (17) に対して FSC を施し、初期状態から終端状態へ持つて行くためのトルク入力 u_h を算出し、式 (13) から u_1 を求める。

3. 制御手法

3.1 EDM の概念を利用した FSC サンプルング周期 ΔT で離散化された時不変の線形システムに対し、初期状態 $x_h(0)$ から、 N ステップ目の目標状態 $x_h^*(N)$ へ持つて行くための入力ベクトル V_{nl} は、可到達行列 U_{nl} を用いて求められる。LPV システムに対しては、終端誤差ベクトル e が収束するように学習係数 $\gamma (0 < \gamma \leq 1)$ を用いて入力 V_{nl} の更新を

$$V_{nl} + \gamma U_{nl}^T (U_{nl} U_{nl}^T)^{-1} e \rightarrow V_{nl} \quad (18)$$

と繰り返すことによって、終端誤差の二乗和が十分小さくなるような入力 V_{nl} が求められる^(16, 17)。ただし、FSC を適用するには、適切な終端状態姿勢（関節角）を与える必要がある。

3 リンク宇宙ロボットの手先をある目標位置に持っていくための運動制御を行う。手先速度 $\dot{x}_e = [\dot{x}_e \ \dot{y}_e]^T$ は相対関節角速度 $\dot{\Phi}$ と一般化ヤコビ行列 J の積で表現でき⁽⁹⁾、手先微小移動量 δx_e と関節角の微小操作量 $\delta \Phi$ の関係は一般化ヤコビ行列 J を用いて、式 (19) で表すことができる。

$$\delta x_e = J \delta \Phi \quad (19)$$

EDM の概念⁽¹¹⁾により、三次元 (ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3) 関節空間において、本体姿勢角 θ_0 に擾乱を与えないゼロ空間は二次元曲面となる。文献⁽¹³⁾でそのゼロ空間の基底に $[-f_2 \ f_1 \ 0]^T$, $[-f_3 \ 0 \ f_1]^T$ を採用すると、手

(a) Different motion between Eq(6) and Eq(17)

(b) Trajectory of the end effector

Fig. 2 Simulation result

Table 2 Learning condition

Sampling time [s]	$\Delta T = 0.001$
Control time [s]	$T = 1$
Initial state [°]	$x_h(0) = [0.1 \ 0.1 \ 0.1 \ 0 \ 0]^T$
Initial input [N m]	$u_h(0) = [0.05 \ 0.02]^T$
Final state [°]	$x_h^o = [-25.3 \ 51.1 \ 0.2 \ 0 \ 0]^T$
Learning times	30

先微小移動量 δx_e を実現する関節角の微小操作量 $\delta \Phi$ は、ヤコビ行列 J_{ab} の逆行列 J_{ab}^{-1} を利用して、

$$\delta \Phi = \begin{bmatrix} -f_2 & -f_3 \\ f_1 & 0 \\ 0 & f_1 \end{bmatrix} J_{ab}^{-1} \delta x_e \quad (20)$$

のように決定できる。そのとき、本体姿勢の変動は

$$\delta \theta_0 = f \delta \Phi = 0 \quad (21)$$

になることがわかる。ただし、

$$J_{ab} = J \begin{bmatrix} -f_2 & -f_3 \\ f_1 & 0 \\ 0 & f_1 \end{bmatrix}$$

の行列式が 0 ではないという条件が必要である。

スプライン補間を利用して手先の軌道を決め、式 (20) より、その軌道を実現するための関節角の遷移を求め、終端状態姿勢を決定する。得られた終端の各リンクの相対関節角から、FSC により各関節に設置されたモータに与える制御入力を学習させ、初期状態と終端状態を結ぶ軌道計画を行う。その際、運動方程式 (6) ではなく、本体姿勢変動なしの状態方程式 (17) で、 u_h を求め、式 (13) から u_1 を決めている。

表 2 に示すとおり学習条件のもとに、提案手法の有効性を検証する。なお、学習条件の詳細については 4.1 節で述べる。本体姿勢変動なしの状態方程式 (17) に対して FSC を施し、30 回繰り返し学習の結果、得られたトルク入力を運動方程式 (6) に入れて、得られた運動を式 (17) による結果と比較する。図 2(a) に実線で本体姿勢角 θ_0 、点線、鎖線と破線で各リンクの相対関節角 ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 の差を示す。逆動力学により式 (13) から u_1 を決めているため、誤差を生じ、その結果本体姿勢は変動するものの、その角度は 10^{-3} オーダ程度である。図 2(b) に手先の軌道を示す。矢印は手先の進行方向を示しており、滑らかに目標位置に向うことがわかる。以上のことから、提案手法では、本体姿勢の極微小な変動が生じるものの、マニピュレータを目標位置まで持っていくことができる。

3.2 二自由度制御 マニピュレータは FSC で求めた軌道のとおりに動かなければ、手先は目標位置に達しない上、本体まで回転してしまう。宇宙ロボットの

図 5(a), (b), (c) に示す。破線はフィードフォワード入力 (F_f) を、実線は二自由度制御を施した際のトルク入力 (F_f+F_b) を表す。FSC により得られたトルク入力 u_1 , u_2 , u_3 はともに滑らかであることがわかる。FSC では、運動方程式が線形である場合、トルク入力の時間微分の二乗積分が最小になるように最適化されるため、誤差学習を行う場合にも滑らかなトルク入力と軌道が求められる^(16, 17)。

得られた実験結果を図 6 と図 7 に示す。点線は FSC により得られた目標軌道、破線はフィードフォワード入力のみによる結果、実線は二自由度制御入力による結果を表している。図 6(a), (c), (e) と図 7 にそれぞれ各リンクの相対関節角 ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 と本体姿勢角 θ_0 を示す。 ϕ_1 と ϕ_3 はエンコーダにより検出しているが、 ϕ_2 と θ_0 は CCD カメラと画像処理により検出されるため、仕様により 1/30s ごとのサンプルデータとなる。また、画像処理時間およびデータを DSP ボードに送り込む時間などにより検出された角度信号には約 0.08s の遅れがあり、図 6(c) に示される結果となった。さらに、検出された角度信号から微分器を用いて、角速度を求めた。図 6(b), (d), (f) にそれぞれ各リンクの相対関節角速度 $\dot{\phi}_1$, $\dot{\phi}_2$, $\dot{\phi}_3$ を示す。 $\dot{\phi}_2$ の信号は滑らかではないため、折点角周波数 10rad/s の 1 次遅れ系のローパスフィルタを通して微分している。その結果、図 6(d) に示すとおり $\dot{\phi}_2$ に約 0.23s の遅れが生じている。軌道追従制御を行うに際して、この遅れは無視できる大きさではないため、 $\dot{\phi}_2$ のフィードバックゲインを 0 にしている。なお、図 6(e) から、本体から一番離れているリンク 3 は微小であるが振動していることがわかる。その原因は関節に設置されたモータに接続されたケーブルの剛性によるものと考えられる。

図 6(a), (c), (e) よりフィードフォワード入力のみによる結果では、 ϕ_3 については軌道から大きく外れ、2 s 付近では、 ϕ_1 , ϕ_2 がともに行き過ぎていることがわかる。これに対し二自由度制御により、 ϕ_3 については大幅に改善され、 ϕ_1 , ϕ_2 についてはともに目標軌道に追従できている。図 7 の本体姿勢角 θ_0 は 2.5 s 付近では 0.5° 程度、2 s まで約 0.3° 軌道から外れ、二自由度制御はフィードフォワード制御の結果とほぼ変わらない。これは二自由度制御がケーブルの剛性の影響を補償できたためである。

検出された ϕ_2 , θ_0 をもとに、スプライン補間により 1 ms ごとのデータを生成し、時間軸を 0.08 s 進ませるデータ処理を行い、手先の軌道の推定を行った。2 s までの結果を図 8 に示す。点線は目標軌道、破線

Fig. 5 Experimental result of control input

(a) ϕ_1

(b) $\dot{\phi}_1$

(c) ϕ_2

(d) $\dot{\phi}_2$

(e) ϕ_3

(f) $\dot{\phi}_3$

Fig. 6 Comparison between simulation and experimental result of the joint angles

Fig. 7 Experimental result of θ_0

Fig. 8 Trajectory of the end effector

はフィードフォワードのみ、実線は二自由度制御の結果を表している。○は手先の初期位置、□は目標位置、左向き△はフィードフォワード入力のみ、右向き△は二自由度制御の結果を示す。二自由度制御により点線の目標軌道とのずれが小さくなり、目標位置の近いところに到達できていることがわかる。

5. まとめ

空気圧浮上式3リンク宇宙ロボットを設計・製作し、本体姿勢制御装置を用いずに、本体姿勢変動を抑えるための運動制御の一手法を提案した。結論を以下にまとめる。

- (1) 本体姿勢角速度0の拘束条件を追加し、ダランベール原理を用いて運動方程式を再構成した。
- (2) EDMの概念を利用して適切な終端状態姿勢を決め、終端状態制御を適用することにより、手先を目標位置へ持つて行くための滑らかなトルク入力と軌道が得られた。
- (3) 二自由度制御実験を行い、得られた軌道に追従できることから提案手法の有効性を示した。

今後の課題としては、画像データの処理時間遅れを

考慮したフィードバック制御や、三次元運動方程式の汎用生成プログラムの開発などが必要となる。

最後に、実験装置の設計時に東京工業大学三平満司教授より適切なご助言を頂きましたことに深く謝意を表します。

文 献

- (1) 狼, 吉田, 宇宙開発のシナリオと宇宙ロボット, 日本ロボット学会誌, 14-7, (1996), 916-918.
- (2) 土井, 小田, 若田, 宇宙開発事業団技術報告(若田宇宙飛行士によるETS-VII搭載ロボットの遠隔操作制御), 宇宙開発事業団, (2000).
- (3) 松永, 軌道上サービス実現に向けた萌芽的課題, システム/制御/情報, 45-10, (2001), 586-592.
- (4) 泉田, 宇宙ロボットによる自律作業へのアプローチ, システム/制御/情報, 45-10, (2001), 593-599.
- (5) 土屋, 宇宙工学における力学と制御, システム/制御/情報, 45-10, (2001), 553-555.
- (6) Oda, M., Coordinated Control of Spacecraft Attitude and its Manipulator, *Proc. of 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Minneapolis, USA, (1996), 732-738.
- (7) 小田, 衛星搭載ロボットアームと衛星姿勢の協調制御(ロボットアーム動作時の衛星の姿勢安定の保証), 日本ロボット学会誌, 15-4, (1997), 590-600.
- (8) 三平, 非ホロノミック系のフィードバック制御, 計測と制御, 36-6, (1997), 396-403.
- (9) Umetani, Y. and Yoshida, K., Continuous Path Control of Space Manipulators Mounted on OMV, *Acta Astronautica*, 15-12, (1987), 981-986.
- (10) 吉田, 倉爪, 梅谷, 宇宙ロボットの多腕協調制御(スタビライジング・アームの利用による制御トルクの最適化), 日本ロボット学会誌, 9-6, (1991), 718-726.
- (11) Dubowsky, S. and Torres, M., Path Planning for Space Manipulators to Minimize Spacecraft Attitude Disturbances, *Proceedings of 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Sacramento, CA, 3, (1991), 2522-2528.
- (12) 木田, 小松, 川口, 人工衛星と宇宙探査機, コロナ社, (2001), 211-225.
- (13) 大久保, 永野, 小松, 本体の姿勢変動を抑える宇宙マニピュレータの軌道計画, 機論C編, 65-637, (1999), 3678-3685.
- (14) Yoshida, K., Nenchev, D. N. and Uchiyama, M., Moving Base Robotics and Reaction Management Control, *Robotics Research: The Seventh International Symposium*, Ed. by G. Giralt and G. Hirzinger, Springer Verlag, (1996), 100-109.
- (15) Lewis, Frank L., *Optimal Control*, (1986), 127-134, John Wiley & Sons.
- (16) Totani, T. and Nishimura, H., Final-State Control Using Compensation Input, *Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers*, 30-3, (1994), 253-260.
- (17) Weng, Z. and Nishimura, H., Final-State Control of a Two-link Cat Robot, *Advanced Robotics*, 16-4, (2002), 325-343.
- (18) 本田, 清田, 三平, 空気圧浮上系を用いた2自由度宇宙ロボット姿勢制御シミュレータの製作, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, (1997), 823-824.