宇宙ロボットの力制御則とその物体捕捉後の制御への適用†

山田 克彦*・土屋 和雄**

Force Control Law of a Space Robot and Its Application to Control after Capturing a Target

Katsuhiko YAMADA* and Kazuo TSUCHIYA**

The subject of this paper is a space robot that has a manipulator arm mounted on a satellite body. When the space robot works on a target, it needs to exert force to the target. In this paper, we first derive a force control law of the space robot in case where the space robot and the target are flying freely. Then we apply the force control law to a control scheme after the space robot captures the target. The purpose of the control scheme is to decrease the relative velocity of the target to the space robot without yielding excessive force. The control scheme consists of 2 steps: a step to obtain the desired force and torque exerted on the target from the manipulator hand and a step to obtain the manipulator joint torques to realize the desired force and torque by the force control law. The obtained control scheme is simple, and simulation results show that the control scheme is effective to decrease the relative velocity of the target.

Key Words: space robot, manipulator, target control, virtual coordinates, generalized Jacobian

1. ま え が き

マニピュレータをもち宇宙空間を自由飛行しながら作業を行う宇宙ロボットは、宇宙開発の重要な要素として近年さかんに研究されている^{1)~4)}。宇宙ロボットが組立などの作業を行うときには、対象物体に対して力を及ぼすことが必要になることがある。このとき宇宙ロボットが対象物体にドッキングして作業を行うのであれば、そのときの制御則は地上のロボットと変らない。しかし浮遊物体を捕捉する場合のように、宇宙ロボットと対象物体が固定されることなくマニピュレータが物体をつかむときには、宇宙ロボットと対象物体の慣性力をも考慮した力制御則が必要になる。

宇宙ロボットが対象物体に力を及ぼす場合については、吉川らが複腕による協調作業を検討している⁵⁾。この

場合には、対象物体の運動を規定してそれを実現するアームの関節駆動トルクを求めているが、本論文では力を直接に制御する場合を対象とする。

本論文では、まず、宇宙ロボットと対象物体が浮遊した状態のままでマニピュレータが対象物体に力を及ぼすときの力制御則を導く。つぎにこの力制御則を宇宙ロボットが浮遊物体（ターゲット）を捕捉した後の宇宙ロボットの制御に対して適用する。

ふつうターゲットは宇宙ロボットに対して相対速度を有するので、宇宙ロボットがターゲットを捕捉した後は、この相対速度を0にして宇宙ロボットとターゲットが全体として一様な運動をするように制御する必要が生じる。この場合の制御則の目標は、(i)ターゲットの宇宙ロボットに対する相対運動をとめること、(ii)ハンドとターゲットの間に働く力が過大にならないようにすること、の2点である。この目標に対して、ここで提案する手法では、まず宇宙ロボットがターゲットに加えるべき力を求め、つぎに力制御則を用いてこの力を実現するための宇宙ロボットの各関節駆動トルクを求める。制御系をこのような2段階で構成することにより、ターゲットの運動を推測することが可能になり、ハンドとターゲットとの間に働く力を見積ることも容易になる。本稿で

† ロボティクス・メカトロニクス講演会'91で発表
(1991・6)

* 三菱電機(株)中央研究所 尼崎市塚口本町 8-1-1

** 大阪大学工学部 吹田市山田丘 2-1

* Central Research Laboratory, Mitsubishi Electric Corporation, Amagasaki

** Faculty of Engineering, Osaka University, Suita
(Received September 24, 1991)

(Revised January 22, 1992)

は、まず宇宙ロボットのモデリングを行い、つぎにモデリングに基づいて制御系を構成し、シミュレーションによりその効果を検証する。

2. 宇宙ロボットのモデリング

本章では、1本のマニピュレータをもつ宇宙ロボットの運動方程式の導出について簡単に述べる。ただし、マニピュレータの各関節は回転1自由度をもち、全部で n_m 自由度とする。このような宇宙ロボットは、一般的にはいくつかのボディがヒンジで結合された剛体多体システムとしてとらえることができる。いまシステムを構成する各ボディに対して、人工衛星本体をボディ0とし、マニピュレータの各リンクについても人工衛星本体の側から順にボディ1〜ボディ n_m の番号をつける。またボディ j とボディ $(j-1)$ を結合するヒンジを関節 j とし、人工衛星本体の質量中心を関節0とする。さらにボディ j を含んでボディ j より外側(人工衛星本体と反対側)にあるボディの集合をボディ j の外集合と呼び、記号 $\hat{j}$ ($=\{j, j+1, \dots, n_m\}$) で表わす。さらにつぎのように記号を定義する (Fig. 1)。

p_j : 関節 j の位置

r_j : 関節 j からボディ j の質量中心をさすベクトル

$\bar{p}_j$: 外集合 $\hat{j}$ の質量中心の位置

$\bar{r}_j$: 関節 j から外集合 $\hat{j}$ の質量中心をさすベクトル ($\bar{r}_j = \bar{p}_j - p_j$)

v_0 : 人工衛星本体の質量中心速度

ω_j : ボディ j の角速度

p_h : ハンドの位置

v_h : ハンドの速度

ω_h : ハンドの角速度

p_c : システム全体の質量中心位置 ($p_c = \bar{p}_0$)

v_c : システム全体の質量中心速度

r_s : システム全体の質量中心から衛星本体質量中心をさすベクトル ($r_s = -\bar{r}_0$)

Fig. 1 Kinematical relation

r_h : システム全体の質量中心からハンドをさすベクトル ($r_h = p_h - p_c$)

m_j : ボディ j の質量

I_j : ボディ j の質量中心回りの慣性テンソル

$\bar{m}_j$: 外集合 $\hat{j}$ の質量 ($\bar{m}_0$ は宇宙ロボット全体の質量)

$\bar{I}_j$: 外集合 $\hat{j}$ のその質量中心回りの慣性テンソル ($\bar{I}_0$ は宇宙ロボット全体のその質量中心回りの慣性テンソル)

θ_j : 関節 j におけるボディ j のボディ $(j-1)$ に対する相対回転角

Θ : $[\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n_m}]^T$

z_j : 関節 j の回転軸方向の単位ベクトル

τ_j : 関節 j でボディ j に働く z_j 軸回りの制御トルク

τ : $[\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n_m}]^T$

f_0 : 衛星本体に働く外力

n_0 : 衛星本体の質量中心回りに働く外トルク

I_k : $k \times k$ 単位行列

これらのベクトル量に $\cdot$ をつけた場合には、そのベクトル量の慣性空間における時間微分を表わす。またベクトル量に $\sim$ をつけた場合はそのベクトルとの外積操作に等価なマトリクスを意味するものとする。

まずシステムの質量中心速度を v_c を用いると、システム全体の運動量 l は次式で表わされる。

$$l = \bar{m}_0 v_c \quad (1)$$

一方システムの質量中心まわりの角運動量を h_c とすると h_c は次式となる⁴⁾。

$$h_c = \bar{I}_0 \omega_0 + \sum_{i=1}^{n_m} \bar{I}_i z_i \dot{\theta}_i \quad (2)$$

ただし

$$\bar{I}_i = \bar{I}_i + \bar{m}_i \{ (\bar{p}_i - p_c) \cdot \bar{r}_i I_3 - \bar{r}_i (\bar{p}_i - p_c)^T \} \quad (3)$$

ここでつぎの関係を満たす角速度 ω_c を定義する。

$$h_c = \bar{I}_0 \omega_c \quad (4)$$

本体の速度 v_0 , ω_0 と v_c , ω_c との関係は次式で表わされる。

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ \omega_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_c + \omega_c \times r_s \\ \omega_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dots & -\frac{\bar{m}_i}{\bar{m}_0} (z_i \times \bar{r}_i) - x_i \times r_s \dots \\ \dots & -x_i & \dots \end{bmatrix} \dot{\Theta} \quad (5)$$

ただし $\dot{\Theta}$ の係数マトリクスはその第 i 行を示している。また x_i はつぎの関係を満たすベクトルである。

$$\bar{I}_0 x_i = \bar{I}_i z_i \quad (6)$$

(5)式の $\dot{\Theta}$ の係数マトリクスを J_s とおく。すなわち

$$J_s = \begin{bmatrix} J_{st} \\ J_{sr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots & -\frac{\bar{m}_i}{\bar{m}_0} (z_i \times \bar{r}_i) - x_i \times r_s \dots \\ \dots & -x_i & \dots \end{bmatrix} \quad (7)$$

宇宙ロボットの運動方程式を v_c , ω_c , $\dot{\Theta}$ を一般化速度

にとって表わすと(5)式を用いてつぎようになる。

$$\begin{bmatrix} m_s I_3 \\ i_s \\ M_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_c \\ \dot{\omega}_c \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ d_\omega \\ d_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_c \\ n_c \\ \tau_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

(8)式の各成分はつぎのように表わされる。

$$m_s = \bar{m}_0 = \text{宇宙ロボット全質量} \quad (9)$$

$$i_s = \hat{i}_0 \quad (10)$$

$$M_{\theta ij} = z_i \cdot \left[\hat{i}_i + \bar{m}_i \{ (\hat{p}_i - p_j) \cdot \hat{r}_i I_3 - (\hat{p}_i - p_j) \hat{r}_i^T \} \right] z_j \\ - z_i \cdot \frac{\bar{m}_i \bar{m}_j}{\bar{m}_0} (\hat{r}_i \cdot \hat{r}_j I_3 - \hat{r}_j \hat{r}_i^T) z_j - x_i \cdot \hat{i}_0 x_j \quad (i \geq j) \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} f_c \\ n_c \\ \tau_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_3 & 0 \\ \hat{r}_s & I_3 \\ J_{st}^T & J_{sr}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_0 \\ n_0 \\ \tau \end{bmatrix} \quad (12)$$

f_c, n_c, τ_c は一般化速度 $v_c, \omega_c, \dot{\theta}$ に対する一般化力であり、 n_c は宇宙ロボット全体の質量中心回りに働く外トルクとなる。(11)式の $M_{\theta ij}$ は対称マトリクス M_θ の (i, j) 成分を意味する。また d_ω, d_θ は遠心力、コリオリ力などの項である。本稿では、 d_ω や d_θ の速度の2乗に依存する項は微小なものとみなす。(9)～(12)式は文献5)と同様の方法で導くことができる。また、 d_ω や d_θ の計算法については付録1に示す。

ハンドの速度 v_h と角速度 ω_h は、 v_c, ω_c を用いて次式となる。

$$\begin{bmatrix} v_h \\ \omega_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_c + \omega_c \times r_h \\ \omega_c \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} \cdots & z_i \times \left\{ p_h - \left(p_i + \frac{\bar{m}_i}{\bar{m}_0} \hat{r}_i \right) \right\} - x_i \times r_h \cdots \\ \cdots & z_i - x_i & \cdots \end{bmatrix} \dot{\theta} \quad (13)$$

ここで(13)式における $\dot{\theta}$ の係数行列はハンドの速度に対する一般化ヤコビ行列¹⁾である。これを J_h とおく。すなわち

$$J_h = \begin{bmatrix} J_{ht} \\ J_{hr} \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} \cdots & z_i \times \left\{ p_h - \left(p_i + \frac{\bar{m}_i}{\bar{m}_0} \hat{r}_i \right) \right\} - x_i \times r_h \cdots \\ \cdots & z_i - x_i & \cdots \end{bmatrix} \quad (14)$$

このモデリングの意味することはつぎのとおりである。宇宙ロボットの運動方程式では、 v_c, ω_c と $\dot{\theta}$ を一般化速度にとって記述することにより質量マトリクスをブロック対角化することができる。いま質量中心に原点をもち、角速度 ω_c で回転するような仮想的な座標系（この座標系のことを本稿では仮想座標系と呼ぶ）を考えると、(13)式は仮想座標系上のハンドの速度が一般化ヤコビ行列

J_h に角速度 $\dot{\theta}$ をかけた $J_h \dot{\theta}$ で表わされることを意味している。（もしも運動量、角運動量が0で保存される場合を考えると、仮想座標系は慣性空間に静止していることになるので、 $J_h \dot{\theta}$ は慣性空間上の速度を表わす。）この関係と(8)式の運動方程式によって、宇宙ロボットの運動は、仮想座標系の運動で表わされる全体的なものと、この仮想座標系上におけるマニピュレータの運動に分離できることがわかる。この場合、仮想座標系の運動にマニピュレータの関節駆動トルクは直接的な影響をもたないので、宇宙ロボットの制御を考えるうえで都合がよい。3章以降ではこのモデリングを用いて宇宙ロボットの制御則を考察する。

3. 宇宙ロボットの力制御則

ここでは宇宙ロボットとターゲットが浮遊状態にあるときに宇宙ロボットからターゲットにある力を作用させるとき、その力を実現するような関節駆動トルク τ を求める。まずターゲットに対してつぎの量を定義する。

m_p : ターゲットの質量

i_p : ターゲットの慣性モーメント

v_p : ターゲットの質量中心速度

ω_p : ターゲットの角速度

r_p : ターゲットの質量中心位置から接触点をさすベクトル

f : ハンドからターゲットに加える力

n : ハンドからターゲットに加えるトルク

宇宙ロボットの運動方程式は、ハンドがターゲットに加える力の影響を含めてつぎのように表わすことができる。

$$\begin{bmatrix} m_s I_3 \\ i_s \\ M_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_c \\ \dot{\omega}_c \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ d_\omega \\ d_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_c \\ n_c \\ \tau_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_3 & 0 \\ \hat{r}_h & I_3 \\ J_{ht}^T & J_{hr}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ n \end{bmatrix} \quad (15)$$

すなわち、 f, n の反作用としてターゲットからハンドに $-f, -n$ が働き、この力の $v_c, \omega_c, \dot{\theta}$ に対する一般化力が(8)式に付加された形になる（一般化力の導出はたとえば文献5)）。一方、ターゲットの運動方程式は次式となる。

$$\begin{bmatrix} m_p I_3 \\ i_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_p \\ \dot{\omega}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_p \times i_p \omega_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_3 & 0 \\ \hat{r}_p & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ n \end{bmatrix} \quad (16)$$

またハンドとターゲットの間で、物体を捕捉しているという拘束条件から次式が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} v_h \\ \omega_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_3 - \hat{r}_h J_{ht} \\ 0 & I_3 \end{bmatrix} J_{hr} \begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_3 - \hat{r}_p \\ 0 & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p \\ \omega_p \end{bmatrix} \quad (17)$$

いま、 f, n が目標力 f_d, n_d となるような宇宙ロボット

の関節駆動トルクを求めよう。この制御則を求めるために、(17)式の時間微分と(15)、(16)式から加速度項を消去すると次式が得られる。ただし衛星本体に作用する力 f_0 , n_0 は 0 とする。

$$J_h M_\theta^{-1} \tau - (N + J_h M_\theta^{-1} J_h^T) \begin{bmatrix} f \\ n \end{bmatrix} + d_1 = 0 \quad (18)$$

ここで

$$\begin{aligned} N &= R_h M_s^{-1} R_h^T + R_p M_p^{-1} R_p^T \\ M_s &= \begin{bmatrix} m_s I_3 \\ i_s \end{bmatrix}, \quad M_p = \begin{bmatrix} m_p I_3 \\ i_p \end{bmatrix} \\ R_h &= \begin{bmatrix} I_3 & -\tilde{r}_h \\ 0 & I_3 \end{bmatrix}, \quad R_p = \begin{bmatrix} I_3 & -\tilde{r}_p \\ 0 & I_3 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

N は宇宙ロボット（仮想座標系）とターゲットとの接触点における逆慣性マトリクスであり、 d_1 は速度の 2 乗に依存する微小項を表わしている。以下の式においても $d_i (i=1, 2, \dots)$ で表わす項は速度の 2 乗に依存する微小項を示すものとする。

いまマニピュレータの自由度が $n_m \geq 6$ の場合を考えよう。(18)式を、 J_h がフルランクであるとし、 f, n に目標値 f_d, n_d を代入して d_1 を省略して τ について解くと次式となる。

$$\tau = \{J_h^T + (J_h M_\theta^{-1})^{-1} N\} \begin{bmatrix} f_d \\ n_d \end{bmatrix} + y \quad (19)$$

ただし $(J_h M_\theta^{-1})^{-1}$ は $J_h M_\theta^{-1}$ の任意の一般化逆マトリクス⁶⁾であり、 y は $J_h M_\theta^{-1}$ の零空間に属する任意のベクトルである。本稿では $(J_h M_\theta^{-1})^{-1}$ として $M_\theta J_h^+ (J_h^+ \text{ は } J_h \text{ の擬似逆マトリクス})$ をとることにすると、 τ は次式となる。

$$\tau = (J_h^T + M_\theta J_h^+ N) \begin{bmatrix} f_d \\ n_d \end{bmatrix} + y \quad (20)$$

(20)式は地上のロボットの力制御則と類似の式であるが、 f_d, n_d に対する係数マトリクスに $M_\theta J_h^+ N$ という付加項が加わっている。この付加項は、 f_d, n_d による宇宙ロボット（仮想座標系）とターゲットとの相対運動を接触点で 0 にするために必要な項であり、この項から得られる関節角加速度 $\ddot{\theta}$ によって生ずるハンドの加速度を、 f_d, n_d から得られる仮想座標系の加速度 $\dot{v}_c, \dot{\omega}_c$ によって生ずるハンドの加速度に加えれば、 f_d, n_d によるターゲットの接触点の加速度と等しくなる。

また(20)式の制御則を力センサを用いたフィードバック制御則の形でつぎのようにかくこともできる。ただしフィードバックゲインを k_f (スカラ) とする。

$$\tau = (J_h^T + M_\theta J_h^+ N) \left(\begin{bmatrix} f_d \\ n_d \end{bmatrix} + k_f \begin{bmatrix} f_d - f \\ n_d - n \end{bmatrix} \right) + y \quad (21)$$

この力制御則の一巡伝達関数のゲインは k_f となる。系に無駄時間のような位相遅れ要素がある場合にも安定性

を保証するためには $0 < k_f < 1$ であることが必要である。

4. 物体捕捉後の宇宙ロボットの制御

本章では、ハンドがターゲットを捕捉したあとターゲットの宇宙ロボットに対する相対運動を減衰させるための制御則について考察しよう。最初にハンドからターゲットに加えるべき力を求める。ここでつぎの速度 ξ_p, η_p を定義する。

$$\begin{bmatrix} \xi_p \\ \eta_p \end{bmatrix} = J_h \dot{\theta} \quad (22)$$

これを(13)式に代入すると、ハンドの速度 v_h, ω_h は次式で表わされる。

$$\begin{bmatrix} v_h \\ \omega_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_c + \omega_c \times r_h + \xi_p \\ \omega_c + \eta_p \end{bmatrix} \quad (23)$$

ξ_p, η_p は前述のように仮想座標系上のハンドの速度と角速度である。ここでの制御の目標はターゲットの宇宙ロボットに対する相対運動を減衰させることであるが、仮想座標系の運動は宇宙ロボットの全体的な運動を表わしているから、この目標を仮想座標系におけるハンドの速度を 0 にすることを考える。すなわち $\xi_p, \eta_p \rightarrow 0$ とすることが制御の目標である。(17)式と(22)式を用いると、ターゲットの運動方程式を v_p, ω_p のかわりに ξ_p, η_p で表現することができる。このときの運動方程式は仮想座標系自体の運動とターゲットの運動とが質量マトリクスのうえで干渉してつぎの形になる。

$$\begin{bmatrix} M_s + R_h^T R_p^{-T} M_p R_p^{-1} R_h & R_h^T R_p^{-T} M_p R_p^{-1} \\ R_p^{-T} M_p R_p^{-1} R_h & R_p^{-T} M_p R_p^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_c \\ \dot{\omega}_c \\ \xi_p \\ \eta_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_c \\ n_c \\ f \\ n \end{bmatrix} + d_2 \quad (24)$$

(24)式では $\dot{v}_c$ と $\dot{\omega}_c$, ξ_p と η_p , f_c と n_c , f と n をそれぞれひとまとめにした形で乗算を行うものとする。また R_p^{-T} は R_p^{-1} の転置マトリクスを示す。この方程式ではマニピュレータの関節駆動トルク τ が直接的には現れないので、これからターゲットに加えるべき力 f_d, n_d を定めることができる。上式に左から質量マトリクスの逆をかけると運動方程式はつぎの形になる。

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_c \\ \dot{\omega}_c \\ \xi_p \\ \eta_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_s^{-1} & -M_s^{-1} R_h^T \\ -R_h M_s^{-1} & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_c \\ n_c \\ f \\ n \end{bmatrix} + d_3 \quad (25)$$

さて、ここでは人工衛星本体に対する制御力 f_0, n_0 が 0 である場合を考えよう。このとき f_c, n_c は 0 となるので (25) 式から ξ_p, η_p はつぎようになる。

$$\begin{bmatrix} \xi_p \\ \eta_p \end{bmatrix} = N \begin{bmatrix} f \\ n \end{bmatrix} + d_4 \quad (26)$$

(26) 式は、 ξ_p, η_p の運動が、ほぼハンドがターゲットに加える力 f, n と N により決まることを意味している。このようにターゲットの運動に宇宙ロボットの慣性が影響を与えるのは、 ξ_p, η_p がターゲットの宇宙ロボットに対する相対的な速度を意味するからである。(26) 式から、 ξ_p, η_p を (22) 式により検出して、 f, n の目標値 f_d, n_d をつぎのように設定することが考えられる。

$$\begin{bmatrix} f_d \\ n_d \end{bmatrix} = -k_d N^{-1} \begin{bmatrix} \xi_p \\ \eta_p \end{bmatrix} \quad (27)$$

ここで k_d は制御ゲイン(スカラ)である。このとき ξ_p, η_p は指数的に減衰し、ハンドの仮想座標系上の移動距離 δ_i が、ほぼ

$$\delta_i \approx \frac{\xi_{p0}}{k_d} \quad (28)$$

で与えられる。ここで ξ_{p0} は ξ_p の初期値を意味している。同様にハンドの仮想座標系でみた回転角をある回転軸のまわりの角度 $\delta_r (> 0)$ の回転とすれば δ_r は次式で与えられる。

$$\delta_r \approx \frac{\|\eta_{p0}\|}{k_d} \quad (29)$$

ここで η_{p0} は η_p の初期値である ((29) 式の導出は付録 2)。

一方、 ξ_p, η_p が減衰することから、ハンドがターゲットに加える力の最大値 $f_{\max}, n_{\max}$ もほぼ初期値で定まり

$$\begin{bmatrix} f_{\max} \\ n_{\max} \end{bmatrix} \approx -k_d N^{-1} \begin{bmatrix} \xi_{p0} \\ \eta_{p0} \end{bmatrix} \quad (30)$$

となる。このようにターゲットが宇宙ロボットに対して静止するまでのハンドの移動距離は k_d に反比例し、ターゲットに働く力は k_d に比例する。これらはともに小さい方が望ましいので、(28)、(29) 式と (30) 式から k_d の値を決めることになる。

ハンドからターゲットに作用させる力の目標値が (27) 式のように定まると、つぎにこの力を実現するようなマニピュレータの関節トルクを求めることが必要となる。このためには 3 章で導いた力制御則を用いればよい。(27) 式の目標値を (20) 式の力制御則に代入すると次式が得られる。

$$\tau = -k_d (J_h^T N^{-1} J_h + M_0) \dot{\theta} \quad (31)$$

ただしここでは (20) 式の y をつぎのようにとった。

$$y = -k_d M_0 (I_{nm} - J_h^+ J_h) \dot{\theta} \quad (32)$$

マニピュレータに冗長性がない場合には $y=0$ となる

が、その場合にも (31) 式は成立する。(31) 式の $\dot{\theta}$ の係数マトリクスは負定なので、この制御則は速度の 2 乗に依存する項があっても安定である。実際、宇宙ロボットとターゲットのもつ運動エネルギーを T とすると

$$\dot{T} = \tau^T \dot{\theta} = -k_d \dot{\theta}^T (J_h^T N^{-1} J_h + M_0) \dot{\theta} \leq 0 \quad (33)$$

となって (31) 式の安定性がわかる。この場合は $\xi_p, \eta_p \rightarrow 0$ だけではなく、 $\dot{\theta} \rightarrow 0$ となることが保証される。また (21) 式のフィードバック則を適用するときには、 y として (32) 式を用いることにすると、(31) 式のかわりに

$$\begin{aligned} \tau = & -k_d (J_h^T N^{-1} J_h + M_0) \dot{\theta} - k_r (J_h^T + M_0 J_h^+ N) \begin{bmatrix} f \\ n \end{bmatrix} \\ & + \frac{k_r k_d}{1+k_r} M_0 (I_{nm} - J_h^+ J_h) \dot{\theta} \end{aligned} \quad (34)$$

となる。ただし $k_d' = k_d(1+k_r)$ 。いま、マニピュレータに冗長性がなく (34) 式の右辺第 3 項が 0 になる場合を考えると、このときの制御則は、みかけ上、速度の減衰項とハンドに働く力を緩和する項から成り立っている。(31) 式の k_d と (34) 式の k_d' を等しくとると、(34) 式では力を緩和する項の影響で速度が減衰するまでの時間は長くなる。なお (34) 式を用いる場合の安定性については付録 3 で述べる。

5. シミュレーション結果

ここでは宇宙ロボットがターゲットを捕捉した後の制御則として (31) 式を適用した場合のシミュレーション結果について示す。宇宙ロボットは Fig. 2 に示すように 6 自由度マニピュレータをもつものとし、また宇宙ロボットとターゲットは Table 1 に示すようなパラメータ値をとるものとする。ここで L1~L6 はマニピュレータの各リンクを表わし、リンクに平行な軸の回りの慣性モーメントを他の軸に比べて小さく設定している。制御ゲインを $k_d=1[1/s]$ 、ターゲットの初期速度を $v_p=[0, 0.05, 0][m/s]$ 、 $\omega_p=[0, 0, 0.1][rad/s]$ としたときのハンドがターゲットに及ぼす力 f とハンドの速度 ξ_p を Fig. 3 に示す (いずれも慣性系表現)。この図に示すように ξ_p および f について望ましい減衰特性の得られていること

Fig. 2 Configuration of a space robot

Table 1 Simulation parameters

	Satellite	Manipulator						Target
		L1	L2	L3	L4	L5	L6	
Length [m]	2×2×2	0.2	1	0.5	0.5	0.1	0.2	0.5×0.5×0.5
Mass [kg]	1500	20	40	20	20	20	30	200
Moments of Inertia [kgm ²]	1000	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	20
	1000	0.1	3	0.5	0.5	0.1	0.1	20
	1000	0.1	3	0.5	0.5	0.1	0.1	20

Fig. 3 Simulation results by Eq.(31)
(upper... ξ_p , lower... f) Fig. 5 Simulation results by Eq.(35)
(upper... ξ_p , lower... f)

Fig. 4 Motion of a space robot at every 2 seconds

がわかる。また Fig. 4 には宇宙ロボットとターゲットの動きを 2 秒ごとに示す。ターゲットの相対的な運動が減衰し、宇宙ロボット全体の運動の生じることがわかる。また比較のために Fig. 5 には (31) 式の制御則のかわりに

$$\tau = -k_d^* M_0 \dot{\theta} \quad (35)$$

としたときの ξ_p と f のシミュレーション結果を示す。ここで制御ゲイン k_d^* は、ハンドがターゲットに及ぼす

力の最大値が Fig. 3 ((31) 式) の場合とほぼ等しくなるように設定した。この例では $k_d^* = 1.68 [1/s]$ となる。Fig. 5 より、力 f は減衰しているがターゲットの相対速度 ξ_p の減衰は悪く、ターゲットが宇宙ロボットに対して静止するまでにはかなり長い時間を要することがわかる。このことから (31) 式の制御則の有効性は明らかである。

6. ま と め

本論文では宇宙ロボットが浮遊状態で同じく浮遊状態のターゲットに力を及ぼすときの力制御則を導いた。またこの力制御則を用いて、宇宙ロボットがターゲットを捕捉した際のマニピュレータの制御について考察した。宇宙ロボットが浮遊するターゲットを捕捉する場合には、ターゲットが宇宙ロボットに対して相対速度を有するので、これを減衰させることが必要になる。ここで提案した制御系はターゲットの運動に効果的な減衰を与えるもので、ターゲットの移動量やターゲットに加わる力を見積ることができる。この制御則の効果を数値シミュレーションによって確認した。

なお、本論文の宇宙ロボットやターゲットの種々のパラメータに依存しているので、これらに誤差が含まれる

と制御性能は当然影響をうける。ただし(31)式の制御則では $\dot{\theta}$ の係数マトリクスの負定性は保たれるので、安定性が損なわれることはない。パラメータ誤差の制御性能に対する影響の検討については今後の課題としたい。

また、本論文の制御則はマニピュレータの各関節を用いた内力制御なので、ターゲットの宇宙ロボットに対する相対運動が停止した後にも仮想座標系の運動で表わされる全体的な運動は残る。この運動を減衰させるためには、相対運動を停止させた後、スラストのような外力により制御を行うことが必要になる。

参 考 文 献

- 1) 梅谷, 吉田: 一般化ヤコビ行列を用いた宇宙用ロボットマニピュレータの分解速度制御, 日本ロボット学会誌, 7-4, 327/337 (1989)
- 2) 升谷, 宮崎: 宇宙用マニピュレータのセンサフィードバック制御, 日本ロボット学会誌, 7-6, 647/655 (1989)
- 3) 吉川, 横小路, 豊嶋: 宇宙用多腕型マニピュレータの運動制御のための効率的計算法, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '91, 273/278 (1991)
- 4) 山田, 土屋: 宇宙ロボットのマニピュレータ制御における効率的計算法, 計測自動制御学会論文集, 26-7, 765/772 (1990)
- 5) 山田, 土屋: 宇宙における剛体多体システムの定式化, 日本機械学会論文集, 53-491(C), 1598/1606 (1987)
- 6) 児玉, 須田: システム制御のためのマトリクス理論, 325, 計測自動制御学会 (1981)

《付 録》

[付録 1] (8)式の d_{ω} , d_{θ} の計算法について

(8)式では v_c , ω_c の各成分を一般化速度にとっているが v_c , ω_c のかわりに v_0 , ω_0 の各成分を一般化速度にとる場合には各項の計算は比較的容易に行うことができる。このとき(8)式の左辺第 2 項の速度の 2 乗に依存する項は, $\dot{v}_0$, $\dot{\omega}_0$, $\dot{\theta}$ に依存しないような各リンクの慣性力から求められる (ただしベクトルの $\cdot$ は慣性系における時間微分を表わす)。同様に d_{ω} , d_{θ} を求めるためには $\dot{v}_c$, $\dot{\omega}_c$, $\dot{\theta}$ に依存しないような各リンクの慣性力を求めればよいが, 慣性力を求めるにはそのときの $\dot{v}_0$, $\dot{\omega}_0$ が必要になるので計算が面倒になる。以下その手順について簡単に記す。

(1), (4)式を慣性系で時間微分すると次式が得られる。

$$\dot{l} = \dot{m}_0 \dot{v}_c \quad (a1)$$

$$\dot{h}_c = \dot{i}_0 \omega_c + \dot{i}_0 \dot{\omega}_c \quad (a2)$$

ここで求めたいのは $\dot{v}_c$, $\dot{\omega}_c$, $\dot{\theta}$ に依存しないような各リンクの慣性力である。そこでこれらの項を 0 とみなして $\dot{l}$, $\dot{h}_c$ と $\dot{v}_0$, $\dot{\omega}_0$ との関係を求めることにしよう。 $\dot{l}$, $\dot{h}_c$ は v_0 , ω_0 , $\dot{\theta}$ に関して線形だから, $\dot{l}$, $\dot{h}_c$ は $\dot{v}_0$, $\dot{\omega}_0$, $\dot{\theta}$ に依存しない項 $\dot{l}_l$, $\dot{h}_{cl}$ とそれ以外の項 $\dot{l}_D$, $\dot{h}_{cD}$ にわけて表わす

ことができる。さらに, $\dot{v}_0$, $\dot{\omega}_0$, $\dot{\theta}$ に依存しない外集合 $\hat{i}$ の慣性力を $\hat{f}_i^*$, 質量中心回りの慣性トルクを $\hat{n}_i^*$ とする。 $\hat{f}_i^*$, $\hat{n}_i^*$ はハンドの側から漸化式を用いて効率的に求めることができる⁵⁾, $\dot{l}_l$, $\dot{h}_{cl}$ は次式となる。

$$\dot{l}_l = -\hat{f}_i^* \quad (a3)$$

$$\dot{h}_{cl} = -\hat{n}_i^* \quad (a4)$$

一方, $\dot{l}_D$, $\dot{h}_{cD}$ は次式で表わされる。ただし $\dot{\theta}$ は 0 とおく。

$$\dot{l}_D = \dot{m}_0 (\dot{v}_0 + \dot{\omega}_0 \times \hat{r}_0) \quad (a5)$$

$$\dot{h}_{cD} = \dot{i}_0 \dot{\omega}_0 \quad (a6)$$

$\dot{l} = \dot{l}_l + \dot{l}_D$, $\dot{h}_c = \dot{h}_{cl} + \dot{h}_{cD}$ であることから, (a1)~(a6)式より $\dot{v}_c = 0$, $\dot{\omega}_c = 0$ となるような $\dot{v}_0$, $\dot{\omega}_0$ は次式をみたす。

$$\dot{m}_0 (\dot{v}_0 + \dot{\omega}_0 \times \hat{r}_0) = \hat{f}_i^* \quad (a7)$$

$$\dot{i}_0 \dot{\omega}_0 = \hat{i}_0 \omega_c + \hat{n}_i^* \quad (a8)$$

ところで $p_{ci} = p_i + r_i - p_c$ とおくと $\hat{i}_0$ はその定義から

$$\hat{i}_0 = \sum_{i=0}^{n_m} \{ \hat{i}_i + m_i (p_{ci} \cdot p_{ci} I_3 - p_{ci} p_{ci}^T) \} \quad (a9)$$

これよりボディ i の質量中心速度を v_i とおいて $\hat{i}_0$ は次式となる。

$$\hat{i}_0 = \sum_{i=0}^{n_m} \{ \hat{\omega}_i \hat{i}_i - \hat{i}_i \hat{\omega}_i + m_i (2 p_{ci} \cdot v_i I_3 - p_{ci} v_i^T - v_i p_{ci}^T) \} \quad (a10)$$

(a10)式を用いて(a7), (a8)式を $\dot{v}_0$, $\dot{\omega}_0$ について解けば, $\dot{v}_c = 0$, $\dot{\omega}_c = 0$ をみたすような $\dot{v}_0$, $\dot{\omega}_0$ が得られる。

(8)式の d_{ω} , d_{θ} を求めるにはこの $\dot{v}_0$, $\dot{\omega}_0$ から外集合 $\hat{i}$ の慣性力 $\hat{f}_i^*$, $\hat{n}_i^*$ を求めるとよい。これらは次式で表わされる。

$$\hat{f}_i^* = \hat{f}_i^* - \dot{m}_i \{ \dot{v}_0 + \dot{\omega}_0 \times (\hat{p}_i - p_0) \} \quad (a11)$$

$$\hat{n}_i^* = \hat{n}_i^* - \hat{i}_i \dot{\omega}_0 \quad (a12)$$

上式で得られた $\hat{f}_i^*$, $\hat{n}_i^*$ を用いることによって(8)式の d_{ω} , d_{θ} の i 番目の成分 $d_{\omega i}$, $d_{\theta i}$ はつぎのように求めることができる。ここで $d_{\theta i}$ を求める際には(5)式から $\dot{\theta}_i$ の v_0 , ω_0 への影響を考慮しておく必要がある。

$$d_{\omega i} = -\hat{n}_i^* \cdot e_i \quad (a13)$$

$$d_{\theta i} = -\left\{ \hat{n}_i^* + \hat{r}_i \times \left(\hat{f}_i^* - \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_0} \hat{f}_0^* \right) \right\} \cdot z_i + \hat{n}_0^* \cdot x_i \quad (a14)$$

ただし e_i は慣性系の座標軸方向の単位ベクトルである。以上をまとめて d_{ω} , d_{θ} を求める手順はつぎのとおりである。

(i) (a10)式を用いて(a7), (a8)式から $\dot{v}_0$, $\dot{\omega}_0$ を求める。

(ii) $\dot{v}_0$, $\dot{\omega}_0$ を用いて(a11), (a12)式から $\hat{f}_i^*$, $\hat{n}_i^*$ を求める。

(iii) d_{ω} , d_{θ} の各成分は(a13), (a14)式から求められる。

[付録2] (29)式の導出について

いま仮想座標系においてハンドの姿勢を示す方向余弦行列を U_h とする。ハンドの仮想座標系に対する角速度は η_p だから

$$\dot{U}_h = \tilde{\eta}_p U_h \quad (\text{a } 15)$$

ただしここでは η_p は仮想座標系で表現されているものとする。一方、(26), (27)式から時刻 t におけるハンドの角速度 $\eta_p(t)$ は、仮想座標系自体の回転を無視するとほぼ次式となる。

$$\eta_p(t) \approx e^{-k_d t} \eta_{p0} \quad (\text{a } 16)$$

(a 16)式を(a 15)式に代入して U_h について解くと

$$U_h \approx \exp\left\{\frac{1}{k_d}(1 - e^{-k_d t})\tilde{\eta}_{p0}\right\} U_{h0} \quad (\text{a } 17)$$

ただし U_{h0} は U_h の初期値とする。ハンドの初期姿勢に対する方向余弦行列は $U_{h0}^T U_h$ となるので $t \rightarrow \infty$ の極限においては

$$U_{h0}^T U_h \approx U_{h0}^T \exp\left(\frac{1}{k_d} \tilde{\eta}_{p0}\right) U_{h0} \quad (\text{a } 18)$$

いま $U_{h0}^T U_h$ がある回転軸のまわりの角度 δ_r の回転で表現されるとすれば、その固有値は $1, \cos \delta_r \pm i \sin \delta_r$ となる。一方 $\tilde{\eta}_{p0}$ の固有値は $0, \pm i \|\eta_{p0}\|$ となるので、 δ_r は次式で与えることができる。

$$\delta_r \approx \frac{\|\eta_{p0}\|}{k_d} \quad (\text{a } 19)$$

[付録3] (34)式を用いる場合の安定性について

ここでは速度の2乗に依存する微小項は省略して考える。また J_h はフルランクとし、ゲイン k_f は(21)式より

$0 < k_f < 1$ を満たすものとする。さらに(34)式の制御則を実行するときの無駄時間は系の時定数に比べて十分に短く無視できるものとする。

さて(18)式と(34)式を連立させれば拘束力 f, n は次式となる。

$$\begin{bmatrix} f \\ n \end{bmatrix} = -\frac{k'_d}{1+k_f}(N + J_h M_\theta^{-1} J_h^T)^{-1} J_h M_\theta^{-1} (J_h^T N^{-1} J_h + M_\theta) \dot{\theta} \quad (\text{a } 20)$$

この結果を(34)式に代入すれば τ として次式が得られる。

$$\begin{aligned} \tau &= -k'_d(J_h^T N^{-1} J_h + M_\theta) \dot{\theta} + \frac{k_f k'_d}{1+k_f}(J_h^T N^{-1} J_h \\ &\quad + M_\theta J_h^+ J_h) \dot{\theta} + \frac{k_f k'_d}{1+k_f} M_\theta (I_{nm} - J_h^+ J_h) \dot{\theta} \\ &= -\frac{k'_d}{1+k_f}(J_h^T N^{-1} J_h + M_\theta) \dot{\theta} \end{aligned} \quad (\text{a } 21)$$

したがって上式は(33)式の場合と同様にエネルギー散逸的となり、(34)式の制御則は安定となる。

[著 者 紹 介]

山 田 克 彦 (正会員)

(Vol. 28, No. 3 参照)

土 屋 和 雄 (正会員)

(Vol. 28, No. 3 参照)