

宇宙ロボットの適応制御

泉田 啓^{*1} 長岡 秀行^{*2} 室津 義定^{*1}

Adaptive Control of Space Robots

Kei Senda^{*1}, Hideyuki Nagaoka^{*2} and Yoshisada Murotsu^{*1}

This paper is concerned with an adaptive control of free-flying space robots with uncertain inertial parameters of payloads. It is applicable to control all of the position and attitude of the satellite vehicle as well as that of the manipulator hand if the satellite has position/attitude control devices, e.g., thrusters and control momentum gyros. The proposed adaptive control realizes high control performance by estimating unknown parameters even if a control model has an error to the real plant caused by the payload. Asymptotic stability of the adaptive control is proven by Lyapunov's second method. The effectiveness is examined by numerical simulations for a hardware experimental system.

Key Words: Space Robot, Adaptive Control, Asymptotic Stability, Unknown Payload, Position/Attitude Control

1. 緒 論

将来の宇宙開発において、人間の代わりに船外作業を行うフリーフライングロボット（以下、宇宙ロボット）が求められている。宇宙ロボットは作業対象物まで移動するための衛星と、物体を把持し実際に作業をするためのマニピュレータから構成される。多様な作業要求により、宇宙ロボットは軌道上で様々な物体を把持して作業を行う必要があるため、把持物体の質量、慣性モーメントおよび質量中心位置の慣性パラメータが未知の物体を扱わねばならない場合が生じる。しかし、宇宙ロボットは地上のロボットと異なり固定端を持たないため、マニピュレータの動作時に衛星とマニピュレータとの相互作用により衛星の姿勢が変化してしまうため、慣性パラメータが未知の物体を把持して作業する場合には、著しく制御性能が劣化することがある[1]。したがって、未知物体を把持した場合でも作業が行える制御系の開発が必要である。

宇宙ロボットに関する研究としては、Vafa and Dubowsky [2] による仮想マニピュレータの提案、Umetani and Yoshida の一般化ヤコビ行列 [3] の提案、さらに一般化ヤコビ行列を用いて地上のマニピュレータ用の制御法を宇宙用に拡張したセンサフィードバック制御 [4]、分解速度制御 [5]、分解加速度制御 [6] [7] などの研究がある。これらはすべてマニピュレータが何も持っ

ていない場合に適用されており、物体を把持している場合については、把持物体の慣性パラメータが既知の場合の研究がなされている。また、宇宙ロボットの制御に必要な一般化ヤコビ行列を計算するには、宇宙ロボットを構成するすべてのリンクの慣性パラメータが必要である。さらに、対象物体の慣性パラメータが既知の場合でもあらかじめ予定した位置/方向で正確に物体を把持できないと、モデルと実システムで把持物体の質量中心位置および慣性テンソルに誤差が現れ、一般化ヤコビ行列にそれらの影響が現れる。これは把持物体の慣性パラメータが運動学に影響を及ぼすことを示している。それゆえ、宇宙ロボットの作業においては対象物体の慣性パラメータを同定することが極めて重要である。

室津ら [1] は、慣性パラメータの同定方法を示したが、まずパラメータ同定を行い、その後で推定パラメータを用いて制御を行う必要があった。このような非合理性を排除するために、把持物体の慣性パラメータを推定しつつ制御を行う適応制御が望まれる。未知物体を把持した地上マニピュレータの制御として、Slotine ら [8] により適応制御法が提案されているが、宇宙ロボットには直ちに適用できない。宇宙ロボットの適応制御に関する研究として、中塚らは、系の運動量と角運動量が保存される場合に対して、運動学に基づく適応制御を検討している [9]。宇宙ロボットでは、通信用アンテナを一定方向に保つ、センサの視野や作業時の位置姿勢を指定する、などのために衛星本体の位置姿勢も同時に制御することが望まれる。しかし、中塚らの方法は位置姿勢制御系を搭載し、系の運動量や角運動量が変化する宇宙ロボットには適用できない。また、大きな質量の物

原稿受付 1997年10月6日

^{*1}大阪府立大学工学部

^{*2}大阪府立大学大学院

^{*1}College of Engineering, Osaka Prefecture University

^{*2}Graduate Student, Osaka Prefecture University

体を操作したり、素早い操作が必要な場合には、分解加速度制御 (RAC: Resolved Acceleration Control) [6] のような動力学に基づく制御が望まれる。岩田ら [10] は、位置姿勢制御系をもつ宇宙ロボットに対して、未知パラメータの推定則を併合した分解加速度制御を提案し、数値シミュレーションにより有効性を示しているが、制御則の安定性は保証されていない。

本論文では、スラスタと CMG (Control Momentum Gyro) のような位置姿勢制御系を搭載した宇宙ロボットが未知物体を把持した場合に対して、動力学に基づく適応制御を提案している。提案手法は、ハンドと衛星本体の位置姿勢のすべて、または任意の変数を作業変数として選び、総合的に制御できる適応制御である。制御則の安定性をリアプノフの第 2 の方法で証明するとともに、数値シミュレーションを行っている。その結果、分解加速度制御では未知把持物体によって制御性能が劣化するが、適応制御では良好な制御結果が得られることが示される。

2. 運動方程式

宇宙ロボットの運動方程式は次のように表される。

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{h} = \mathbf{n} \quad (1)$$

ここで

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_0 \\ \boldsymbol{\omega}_0 \\ \boldsymbol{\theta} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{n} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_0 \\ \boldsymbol{\tau}_0 \\ \boldsymbol{\tau}_\theta \end{bmatrix}$$

であり、 \mathbf{M} は質量行列、 \mathbf{h} は中心コリオリ力を表す。また、 \mathbf{v}_0 , $\boldsymbol{\omega}_0$, $\boldsymbol{\theta}$ は、それぞれ衛星本体の速度、衛星本体の角速度、ジョイント角であり、 \mathbf{f}_0 , $\boldsymbol{\tau}_0$, $\boldsymbol{\tau}_\theta$ は、それぞれ衛星本体に働く並進力、衛星本体に働くトルク、ジョイントトルクである。

衛星本体の姿勢を記述する変数 ϕ_0 が $\boldsymbol{\omega}_0 = \dot{\phi}_0$ の関係を満たす場合、 $\mathbf{u} = \dot{\mathbf{q}}$ とすると式 (1) は

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{n} \quad (2)$$

のように表すことができる。ここで、 \mathbf{C} は中心コリオリ力に関する行列であり、ラグランジュ法より求まる。またこのとき、 $\dot{\mathbf{M}} - 2\mathbf{C}$ は歪対称行列となる。

3. パラメータに関する線形化

宇宙ロボットが未知物体を把持している場合、ハンドがあるリンクと未知物体を合わせた慣性パラメータが未知パラメータとなる。この未知パラメータを $\boldsymbol{\beta}$ とすると、式 (2) の左辺は

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{P}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})\boldsymbol{\beta} + \mathbf{Q} \quad (3)$$

のように未知パラメータに関して線形分離できる。ここで、 $\mathbf{P}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})$ は回帰子行列と呼ばれ、 \mathbf{q} , $\dot{\mathbf{q}}$, $\ddot{\mathbf{q}}$ で構成される。 \mathbf{P} の中の二つの $\dot{\mathbf{q}}$ は区別し、前者は \mathbf{C} の中に含まれる $\dot{\mathbf{q}}$ であり、後者は \mathbf{C} にかかる $\dot{\mathbf{q}}$ である。また、 \mathbf{Q} は既知パラメータと状態変数から構成される行列である。

いま、未知パラメータの推定値を $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ 、推定値を用いて計算された \mathbf{M} , \mathbf{C} を $\hat{\mathbf{M}}$, $\hat{\mathbf{C}}$ とすると

$$\hat{\mathbf{M}}\dot{\mathbf{q}} + \hat{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{P}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})\hat{\boldsymbol{\beta}} + \mathbf{Q} \quad (4)$$

となる。式 (3)(4) の両辺の差をとることにより、既知パラメータの項 \mathbf{Q} は次のように消去できる。

$$\tilde{\mathbf{M}}\dot{\mathbf{q}} + \tilde{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{P}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})\tilde{\boldsymbol{\beta}} \quad (5)$$

ただし

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{M}} &= \hat{\mathbf{M}} - \mathbf{M} \\ \tilde{\mathbf{C}} &= \hat{\mathbf{C}} - \mathbf{C} \\ \tilde{\boldsymbol{\beta}} &= \hat{\boldsymbol{\beta}} - \boldsymbol{\beta} \end{aligned} \quad (6)$$

4. 適応制御

4.1 基本となる適応制御

適応制御則を導くために次のリアプノフ関数を考える。

$$V = \frac{1}{2}(\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M}\dot{\mathbf{q}} + \tilde{\boldsymbol{\beta}}^T \boldsymbol{\Gamma}\tilde{\boldsymbol{\beta}}) \quad (7)$$

ここで、 \mathbf{q}_r を \mathbf{q} の参照入力とすると、 $\dot{\mathbf{q}}$ は

$$\dot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_r \quad (8)$$

のように定義される。 V を時間微分すると

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M}\dot{\mathbf{q}} + \frac{1}{2}\dot{\mathbf{q}}^T \dot{\mathbf{M}}\dot{\mathbf{q}} + \tilde{\boldsymbol{\beta}}^T \boldsymbol{\Gamma}\dot{\tilde{\boldsymbol{\beta}}} \\ &= \dot{\mathbf{q}}^T \left[\mathbf{M}(\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_r) + \frac{1}{2}\dot{\mathbf{M}}\dot{\mathbf{q}} \right] + \tilde{\boldsymbol{\beta}}^T \boldsymbol{\Gamma}\dot{\tilde{\boldsymbol{\beta}}} \\ &= \dot{\mathbf{q}}^T \left[\mathbf{n} - \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{M}\dot{\mathbf{q}}_r + \frac{1}{2}\dot{\mathbf{M}}\dot{\mathbf{q}} \right] + \tilde{\boldsymbol{\beta}}^T \boldsymbol{\Gamma}\dot{\tilde{\boldsymbol{\beta}}} \\ &= \dot{\mathbf{q}}^T \left[\mathbf{n} + \frac{1}{2}(\dot{\mathbf{M}} - 2\mathbf{C})\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}}_r - \mathbf{M}\dot{\mathbf{q}}_r \right] + \tilde{\boldsymbol{\beta}}^T \boldsymbol{\Gamma}\dot{\tilde{\boldsymbol{\beta}}} \\ &= \dot{\mathbf{q}}^T [\mathbf{n} - \mathbf{M}\dot{\mathbf{q}}_r - \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}}_r] + \tilde{\boldsymbol{\beta}}^T \boldsymbol{\Gamma}\dot{\tilde{\boldsymbol{\beta}}} \end{aligned} \quad (9)$$

となる。ここでは、 $\dot{\mathbf{M}} - 2\mathbf{C}$ が歪対称行列であることを用いている。次に、制御則を

$$\mathbf{n} = \hat{\mathbf{M}}\dot{\mathbf{q}}_r + \hat{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{q}}_r - \mathbf{K}_D\dot{\tilde{\mathbf{q}}} \quad (10)$$

とおき、式 (9) に代入すると

$$\dot{V} = \dot{\mathbf{q}}^T [\tilde{\mathbf{M}}\dot{\mathbf{q}}_r + \tilde{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{q}}_r - \mathbf{K}_D\dot{\tilde{\mathbf{q}}}] + \tilde{\boldsymbol{\beta}}^T \boldsymbol{\Gamma}\dot{\tilde{\boldsymbol{\beta}}} \quad (11)$$

となる。このうち、 \mathbf{M} と \mathbf{C} は未知パラメータに関して線形なので、次のように表すことができる。

$$\tilde{\mathbf{M}}\dot{\mathbf{q}}_r + \tilde{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{q}}_r = \mathbf{P}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}_r, \ddot{\mathbf{q}}_r)\tilde{\boldsymbol{\beta}} \quad (12)$$

そこで、式 (12) を式 (11) に代入すると

$$\dot{V} = -\dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T \mathbf{K}_D\dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \tilde{\boldsymbol{\beta}}^T [\boldsymbol{\Gamma}\dot{\tilde{\boldsymbol{\beta}}} + \mathbf{P}^T\dot{\tilde{\mathbf{q}}}] \quad (13)$$

となる。 $\dot{\tilde{\boldsymbol{\beta}}} = \dot{\boldsymbol{\beta}}$ なので、適応則を

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\beta}}} = -\boldsymbol{\Gamma}^{-1}\mathbf{P}^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}_r, \ddot{\mathbf{q}}_r)\dot{\tilde{\mathbf{q}}} \quad (14)$$

とすると

$$\dot{V} = -\dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T \mathbf{K}_D\dot{\tilde{\mathbf{q}}} \leq 0 \quad (15)$$

となり、 $t \rightarrow \infty$ のとき $\dot{\mathbf{q}} \rightarrow \mathbf{0}$ となる。そこで、目標関節変数 \mathbf{q}_d 、関節変数誤差 $\mathbf{q}_e = \mathbf{q} - \mathbf{q}_d$ 、正定対称ゲイン行列 \mathbf{A}_q を用いて、参照入力を $\dot{\mathbf{q}}_r = \dot{\mathbf{q}}_d - \mathbf{A}_q \mathbf{q}_e$ と与えると、 $t \rightarrow \infty$ のとき $\dot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{q}}_e + \mathbf{A}_q \mathbf{q}_e \rightarrow \mathbf{0}$ となる。 $\dot{\mathbf{q}}_e + \mathbf{A}_q \mathbf{q}_e = \mathbf{0}$ の定常解は $\mathbf{q}_e \equiv \mathbf{0}$ なので、 $t \rightarrow \infty$ のとき $\mathbf{q}_e \rightarrow \mathbf{0}$ 、 $\dot{\mathbf{q}}_e \rightarrow \mathbf{0}$ となる。推定値 $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ が真値に収束することは保証できないが、上の結果は成立する。

上の制御則は、関節変数に対する制御則であるが、宇宙ロボットの制御においては作業変数に対する制御則を構成する必要がある。ここでは、作業変数をハンドの位置姿勢と衛星本体の位置姿勢として制御則を導く。ハンドの位置姿勢だけを制御すればよい場合のように、制御しない作業変数があるときも、以下で導く制御則を適用できる。作業変数 $\boldsymbol{\psi}$ は、関節変数 \mathbf{q} とヤコビ行列 \mathbf{J} により、次のように関係づけられる。

$$\dot{\boldsymbol{\psi}} = \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}} \quad (16)$$

ただし

$$\dot{\boldsymbol{\psi}} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_0 \\ \boldsymbol{\omega}_0 \\ \dot{\mathbf{x}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{E} & \mathbf{0} \\ \mathbf{J}_v & \mathbf{J}_\omega & \mathbf{J}_\theta \end{bmatrix} \quad (17)$$

また、 $\dot{\mathbf{x}}$ はハンドの位置姿勢の速度ベクトルである。目標作業変数 $\boldsymbol{\psi}_d$ と正定対称ゲイン行列 \mathbf{A} を用いて、 $\dot{\mathbf{q}}_r$ 、 $\ddot{\mathbf{q}}_r$ を

$$\dot{\mathbf{q}}_r = \mathbf{J}^{-1}(\dot{\boldsymbol{\psi}}_d - \mathbf{A}\boldsymbol{\psi}_e) \quad (18)$$

$$\ddot{\mathbf{q}}_r = \mathbf{J}^{-1}(\ddot{\boldsymbol{\psi}}_d - \mathbf{A}\dot{\boldsymbol{\psi}}_e - \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}}) \quad (19)$$

のように与えると、式 (15) より

$$\dot{V} = -(\dot{\boldsymbol{\psi}}_e + \mathbf{A}\boldsymbol{\psi}_e)^T \mathbf{J}^{-T} \mathbf{K}_D \mathbf{J}^{-1} (\dot{\boldsymbol{\psi}}_e + \mathbf{A}\boldsymbol{\psi}_e) \leq 0 \quad (20)$$

となる。ここで、 $\boldsymbol{\psi}_e = \boldsymbol{\psi} - \boldsymbol{\psi}_d$ は作業変数誤差である。よって、 \mathbf{J} が正則であれば $t \rightarrow \infty$ のとき $\dot{\boldsymbol{\psi}}_e + \mathbf{A}\boldsymbol{\psi}_e \rightarrow \mathbf{0}$ となり、 $\boldsymbol{\psi}_e \rightarrow \mathbf{0}$ かつ $\dot{\boldsymbol{\psi}}_e \rightarrow \mathbf{0}$ となる。

したがって、式 (18)(19) で $\dot{\mathbf{q}}_r$ 、 $\ddot{\mathbf{q}}_r$ を与え、制御則を式 (10)、適応則を式 (14) で与えると、作業変数を制御できる。

4.2 適応制御の変更

宇宙ロボットの作業中には、通信アンテナの指向制御等のため衛星本体の姿勢制御を行うが、対象物体を汚染するためスタが使えない等の理由により衛星本体の位置制御を行わない場合も考えられる。また、特に必要性がなく衛星本体の姿勢制御も行わない場合も考えられる。このような場合にも、先の適応制御則を用いることができる。変更は、作業変数 $\boldsymbol{\psi}$ 中の制御しない変数の目標値として、その瞬間に実現されている値を用い、制御しない変数に対応する制御入力を零とするだけでよい。以下、衛星本体の位置を制御しない場合について、具体的に制御則の変更方法及び安定性を示すが、同様の変更により、衛星本体の位置や姿勢、ハンドの位置や姿勢のうち、任意の変数を作業変数に選んで制御することができる。

衛星本体の位置を制御しない場合には、衛星本体の並進加速度、並進速度、位置の目標値として、

$$\mathbf{r}_{0d} \equiv \mathbf{r}_0, \quad \mathbf{v}_{0d} \equiv \mathbf{v}_0, \quad \dot{\mathbf{v}}_{0d} \equiv \dot{\mathbf{v}}_0 \quad (21)$$

を用い、同時に衛星本体の位置に対する制御入力を

$$\mathbf{f}_0 \equiv \mathbf{0} \quad (22)$$

とする。以上の変更と後述の式 (25) のように \mathbf{A} にわずかな制約を加えると、前節で示した制御則を使用することができる。

次に、この制御系の安定性を示す。上述の変更により

$$\boldsymbol{\psi}_d = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_0 \\ \boldsymbol{\phi}_{0d} \\ \dot{\mathbf{x}}_d \end{bmatrix}, \quad \dot{\boldsymbol{\psi}}_d = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_0 \\ \boldsymbol{\omega}_{0d} \\ \dot{\mathbf{x}}_d \end{bmatrix}, \quad \ddot{\boldsymbol{\psi}}_d = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_0 \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_{0d} \\ \ddot{\mathbf{x}}_d \end{bmatrix} \quad (23)$$

となり、 $\boldsymbol{\psi}_e = \boldsymbol{\psi} - \boldsymbol{\psi}_d$ より

$$\boldsymbol{\psi}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\phi}_{0e} \\ \mathbf{x}_e \end{bmatrix}, \quad \dot{\boldsymbol{\psi}}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\omega}_{0e} \\ \dot{\mathbf{x}}_e \end{bmatrix}, \quad \ddot{\boldsymbol{\psi}}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_{0e} \\ \ddot{\mathbf{x}}_e \end{bmatrix} \quad (24)$$

を満たす。式 (18) と式 (19) において、制御変数の誤差フィードバックが非制御変数の目標値 $\dot{\boldsymbol{\psi}}_d$ 、 $\ddot{\boldsymbol{\psi}}_d$ に干渉しないように正定対称ゲイン行列 \mathbf{A} を次式のようにブロック対角にする。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_v & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & & \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_{\omega x} & \end{bmatrix} \quad (25)$$

さらに、式 (17) より、

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{J}_v & \mathbf{J}_\omega & \mathbf{J}_\theta \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\mathbf{J}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{E} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{J}_\theta^{-1} \mathbf{J}_v & -\mathbf{J}_\theta^{-1} \mathbf{J}_\omega & \mathbf{J}_\theta^{-1} \end{bmatrix} \quad (27)$$

である。式 (23) から式 (27) を式 (18) と式 (19) に用いることにより、

$$\dot{\mathbf{q}}_r = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_0 \\ \boldsymbol{\omega}_{0r} \\ \dot{\mathbf{x}}_r \end{bmatrix}, \quad \ddot{\mathbf{q}}_r = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_0 \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_{0r} \\ \ddot{\mathbf{x}}_r \end{bmatrix} \quad (28)$$

となり、式 (8) より

$$\dot{\mathbf{q}} = (\mathbf{0}^T, \dot{\boldsymbol{\omega}}_0^T, \dot{\boldsymbol{\theta}}^T)^T \quad (29)$$

となる。ゆえに、式 (14) の適応則を用いると、式 (11) の右辺第一項中、 $\dot{\mathbf{q}}$ の零が乗せられる部分がどのようなものであっても、その後の論理展開には影響しない。このことより、式 (10) の \mathbf{n} 中、非制御変数に対する制御力 \mathbf{f}_0 をどのように与えても、式 (15) および式 (20) が成り立ち、制御則の漸近安定性が示される。ここでは、衛星本体の位置を制御しない場合を考えているので、式 (22) のように $\mathbf{f}_0 \equiv \mathbf{0}$ とすることにより、目的の制御が実現できる。なお、適応則と制御則中、 $\dot{\mathbf{q}}_r$ 、 $\dot{\mathbf{q}}$ などの一部分は必ず零となるので、そのことを考慮して $\mathbf{f}_0 \equiv \mathbf{0}$ 専用の制御器を構築することにより、制御のための計算量を減らすことができる。

同様に、衛星本体の姿勢を制御しない場合にも、提案する制御則を用いて安定な適応制御を実現することができる。

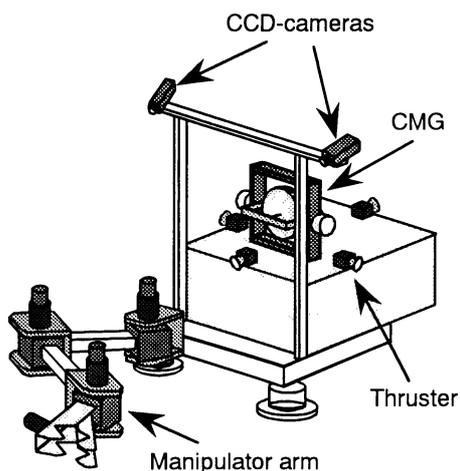


Fig. 1 Hardware space robot model

5. 数値シミュレーション

5.1 モデルとシミュレーション条件

提案した適応制御の有効性を確認するために数値シミュレーションを行う。開発中の宇宙ロボットの二次元地上模擬実験装置 (Fig. 1) [11] を制御対象と想定し、衛星本体と3リンクのマニピュレータから構成されるモデルを用いる。ハンドにペイロードを持った状態で、宇宙ロボットモデルの仕様を Table 1 に示す。ここで、 m_i , l_i , a_i , I_i は、link i の質量、link i の長さ、joint i から link i の質量中心までの距離、link i の質量中心まわりの慣性モーメントを示す。リンクと関節は、衛星本体からマニピュレータ先端へ順に番号を付け、衛星本体をリンク0とし、マニピュレータハンドをリンク3とする。リンク3のパラメータは、ハンドとペイロードを合わせて計算される慣性パラメータである。

未知パラメータは、物体を把持したリンク3に関する以下の慣性パラメータになる。

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_3 \\ m_3 a_{3x} \\ m_3 a_{3y} \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (30)$$

ここで、 a_{3x} , a_{3y} は把持物体を持った状態におけるリンク3固定座標系での質量中心の x , y 座標である。物体を把持していないときのリンク3の慣性パラメータを推定値 $\hat{\beta}$ の初期値として用い、リンク3と把持物体とを合わせて計算される慣性パラメータを β の真値とする。 $\hat{\beta}$ の初期値と β の真値は Table 2 に表される値を用いる。

宇宙ロボットのモデルは、Fig. 2 に示される初期状態をとる。以下に示す、いづれの数値シミュレーションでも、ハンドは3秒間で、初期位置から x 方向に -0.2 [m], y 方向に $+0.2$ [m] 直線移動し、 $+60^\circ$ 姿勢変更する。この間の作業変数の目標経路は、七次関数で補間している。

また、シミュレーションには実験装置に含まれる量子化や時間遅れなどの条件を考慮している。例えば、 0.1 [deg/sec] で量

Table 1 Specification of space robot model

Link i	Mass m_i [kg]	Length l_i [m]	Mass center a_i [m]	Inertia I_i [kg·m ²]
Link 0	46.94	0.459	0.000	1.413
Link 1	2.75	0.300	0.206	0.031
Link 2	1.62	0.260	0.138	0.017
Link 3	3.29	0.095	0.047	0.042

Table 2 Initial values of $\hat{\beta}$ and real values of β

	β_1	β_2	β_3	β_4
Initial values	1.34	0.060	0.0189	0.0047
Real values	3.29	0.245	0.0189	0.0419

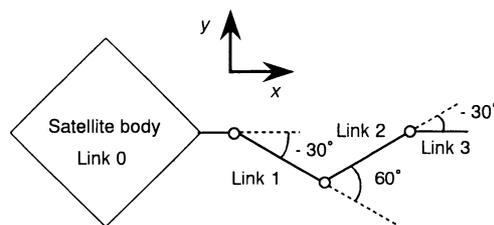


Fig. 2 Initial state of space robot model

子化されたレートジャイロで衛星本体の角速度を計測するものとし、制御系のサンプリングタイムを 1 [ms] としている。

いづれの数値シミュレーションでも、適応制御のゲインを

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_D &= \text{diag}[6.0 \ 6.0 \ 6.0 \ 6.0 \ 6.0 \ 6.0] \\ \mathbf{A} &= \text{diag}[160 \ 160 \ 20 \ 160 \ 160 \ 20] \\ \mathbf{\Gamma} &= \text{diag}[0.001 \ 0.1 \ 1.0 \ 1.0] \end{aligned}$$

としている。また、制御性能を比較するために、分解加速度制御 (RAC) のシミュレーションを行う。制御則は

$$\mathbf{n} = \mathbf{M}\dot{\mathbf{u}}_r + \mathbf{h} \quad (31)$$

である。ここで

$$\dot{\mathbf{u}}_r = \mathbf{J}^{-1} \{ \ddot{\boldsymbol{\psi}}_d - \mathbf{G}_D \dot{\boldsymbol{\psi}}_e - \mathbf{G}_P \boldsymbol{\psi}_e - \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}} \}$$

分解加速度制御の比例ゲイン \mathbf{G}_D , 微分ゲイン \mathbf{G}_P を

$$\begin{aligned} \mathbf{G}_P &= \text{diag}[160 \ 160 \ 120 \ 160 \ 160 \ 120] \\ \mathbf{G}_D &= \text{diag}[3.0 \ 3.0 \ 2.0 \ 3.0 \ 3.0 \ 2.0] \end{aligned}$$

とする。作業変数 $\boldsymbol{\psi}$ の中に制御しない変数がある場合には、その変数に対応する一般化力を零として、その変数の目標加速度を計算する必要がある。ここでは、山田らのアルゴリズム [6] に基づいて計算を行っている。

5.2 ハンドと衛星姿勢の制御 (#1)

遠隔操作される宇宙ロボットでは、衛星本体に搭載された通信用アンテナを一定方向に保つことが不可欠である。また、太陽電池パネルの方向も保持する必要があるし、衛星に搭載された視覚センサの視野もぶれないようにする必要があるかもしれない。それらの状況に相当する、衛星本体の姿勢を変えずにハ

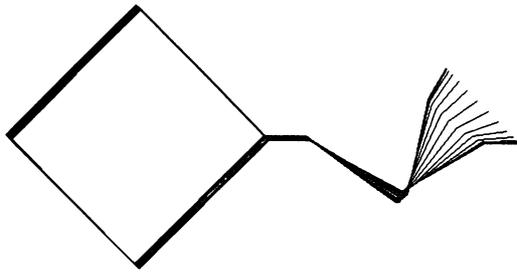


Fig. 3 Motion of robot controlled by adaptive control (#1)

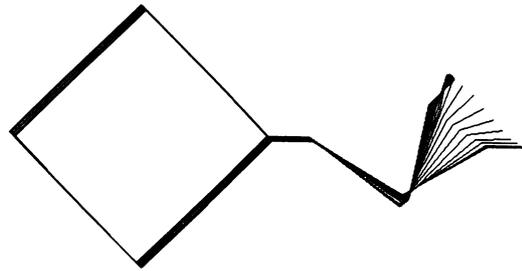


Fig. 6 Motion of robot controlled by RAC (#1)

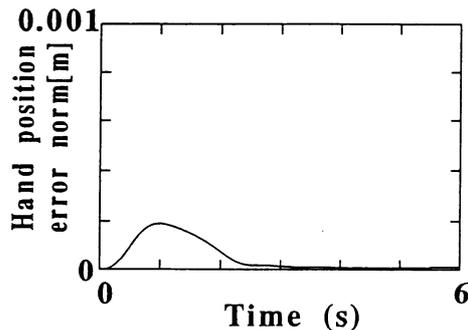


Fig. 4 Error norm controlled by adaptive control (#1)

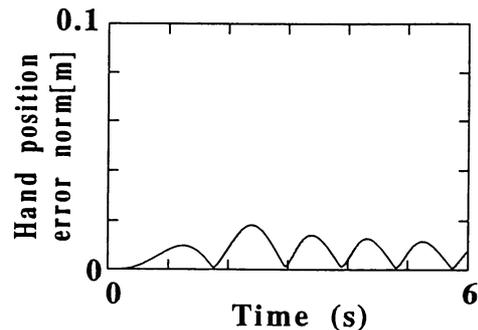


Fig. 7 Error norm controlled by RAC (#1)

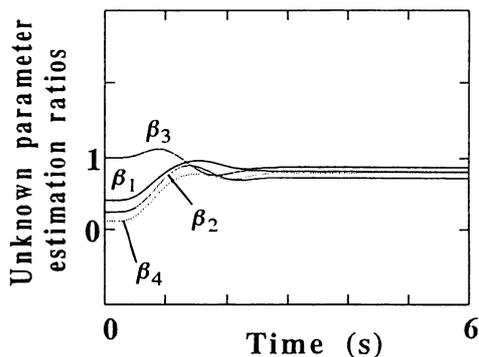


Fig. 5 Parameter estimation (estimated/real) in adaptive control (#1)

ンドの経路制御を行うシミュレーションを示す。この状況は、実際のオペレーションにおいて最も頻繁に現れると予想される。衛星本体の姿勢を保つために、実験装置ではCMGでトルクを発生する。

適応制御を用いた場合に対して、Fig. 3 がロボットの挙動、Fig. 4 がハンドの位置誤差ノルム、Fig. 5 が未知パラメータの収束状況を示している。Fig. 5 では、未知パラメータの推定値を真値で割った値 ($\hat{\beta}/\beta$) を表示している。これらの値が1に近いほど推定値が真値に近い。また、分解加速度制御の場合に対して、Fig. 6 がロボットの挙動、Fig. 7 がハンドの位置誤差ノルムである。

5.3 ハンドの制御 (#2)

提案する制御法が、その他の状況でも使用できることを示すために、ハンドの経路制御だけ行う場合の数値シミュレーションを示す。ここでは、衛星本体の位置姿勢制御系を用いず、関節トルクのみを制御入力とする。宇宙ロボットが自律的に動

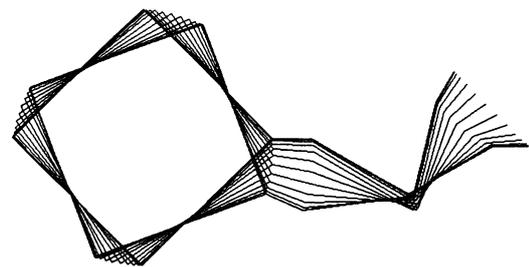


Fig. 8 Motion of robot controlled by adaptive control (#2)

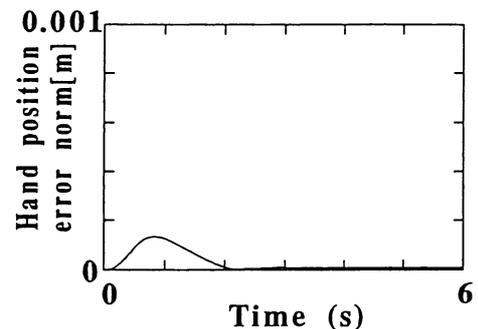


Fig. 9 Error norm controlled by adaptive control (#2)

作し、通信リンクを確保する必要がなく、衛星本体の位置姿勢を制御する必要がない状況では、この制御で十分である。

適応制御を用いたシミュレーション結果として、Fig. 8 がロボットの挙動、Fig. 9 がハンドの位置誤差ノルム、Fig. 10 が未知パラメータの収束状況を示している。また、分解加速度制御の場合に対して、Fig. 11 がロボットの挙動、Fig. 12 がハンドの位置誤差ノルムである。

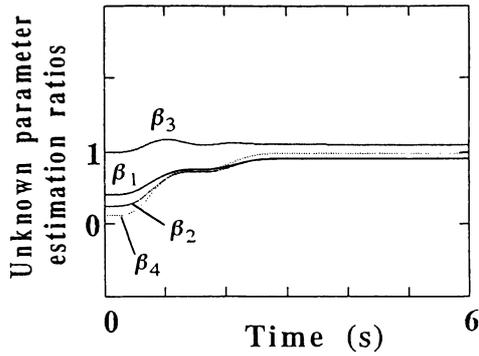


Fig. 10 Parameter estimation (estimated/real) in adaptive control (#2)

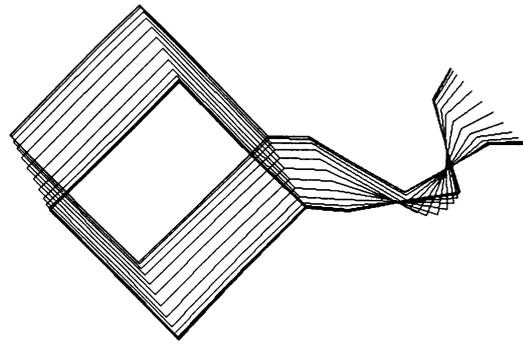


Fig. 13 Motion of robot controlled by adaptive control (#3)

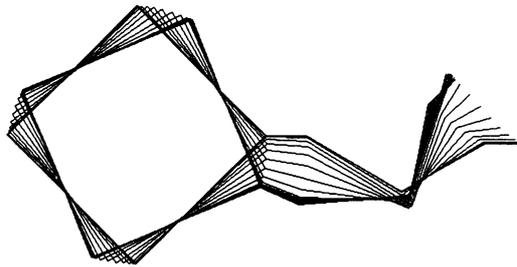


Fig. 11 Motion of robot controlled by RAC (#2)

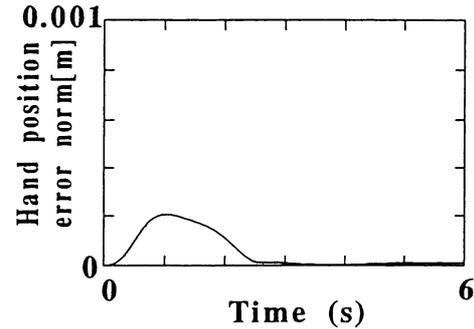


Fig. 14 Error norm by adaptive control (#3)

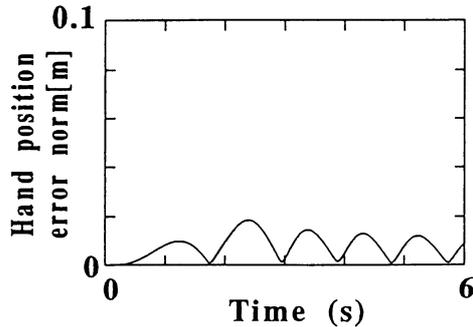


Fig. 12 Error norm controlled by RAC (#2)

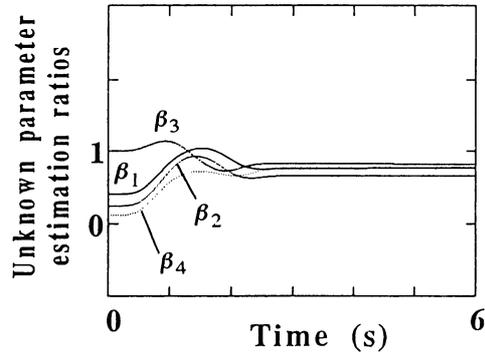


Fig. 15 Parameter estimation (estimated/real) in adaptive control (#3)

5.4 ハンドと衛星位置姿勢の制御 (#3)

センサの視野や作業時の衛星本体の位置姿勢を指定する場合、衛星本体の位置姿勢も同時に制御することも必要になる。その状況に相当する、衛星本体の位置姿勢とハンドの経路を同時に制御するシミュレーションを示す。ハンドの経路はこれまでと同じであるが、本体は姿勢を初期姿勢に保ちつつ、位置を x 方向に $+0.1$ [m]、 y 方向に -0.2 [m] 移動する。また、ここでは本体搭載の位置制御装置が任意の大きさの推力を発生できると想定している。ON/OFFの制御力しか発生できないスラスタのような位置制御装置を用いる場合、PWM制御を行うなど、なんらかの工夫が必要になる。

適応制御を用いたシミュレーション結果として、Fig. 13 がロボットの挙動、Fig. 14 がハンドの位置誤差ノルム、Fig. 15 が未知パラメータの収束状況を示している。また、分解加速度制御の場合に対して、Fig. 16 がロボットの挙動、Fig. 17 がハンドの位置誤差ノルムである。

5.5 議論

適応制御と分解加速度制御の制御性能を比較すると、いずれのシミュレーションにおいても、適応制御の方が良好な制御性能を示し、未知物体を把持した場合に有効であることが分かる。提案する制御法では、推定パラメータが真値に収束することは保証されていないが、Fig. 5, 10, 15 に示されているように、3秒の動作の間に適応制御の推定パラメータは真値近くに収束している。シミュレーション例を示してはいるが、これらの収束値を初期値として同じシミュレーションを行うと、すべてのパラメータはほぼ真値に収束した。ゆえに、より長い継続動作により、推定パラメータは真値に近づくものと思われる。

6. 結 論

未知物体を把持した宇宙ロボットの制御のために、未知慣性

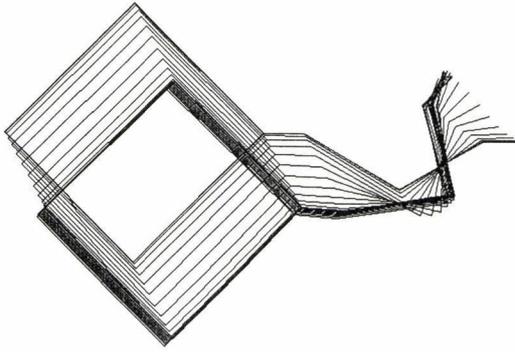


Fig. 16 Motion of robot controlled by RAC (#3)

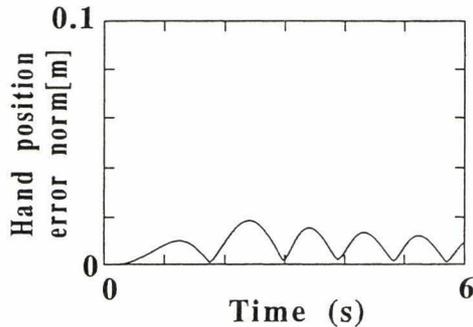


Fig. 17 Error norm controlled by RAC (#3)

パラメータを推定しつつマニピュレータハンドと衛星本体の位置姿勢を制御する適応制御を提案した。提案した基本的な制御法は、衛星本体の位置姿勢とハンドの位置姿勢のすべてを作業変数として制御できる。また、基本的な制御法をわずかに変更し、衛星本体の位置姿勢やハンドの位置姿勢のうち、任意の変数を作業変数を選んで制御することもできる。そのため、衛星本体の位置制御を停止した状態で、姿勢を一定に保ちながらマニピュレータを操作するといったミッションを可能にする。リアブノフの第2の方法により、提案した制御則の漸近安定性が保証できる。未知物体を把持した宇宙ロボットに対する数値シ

ミュレーション例を示し、提案する適応制御が分解加速度制御に比べ良好な制御性能であるという結果を得た。

なお、本研究は文部省科学研究費補助に関連してなされたことを付記する。

参考文献

- [1] 室津, 辻尾, 泉田, 尾崎: “宇宙作業ロボットの未知把持物体のパラメータ同定”, システム制御情報学会論文誌, vol.6, no.1, pp.26-36, 1993.
- [2] Z. Vafa and S. Dubowsky: “On the Dynamics of Manipulators in Space Using the Virtual Manipulator Approach,” Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Raleigh, NC, pp.579-585, 1987.
- [3] Y. Umetani and K. Yoshida: “Continuous Path Control of Space Manipulators Mounted on OMV,” Acta Astronautica, vol.15, no.12, pp.981-986, 1987.
- [4] Y. Masutani, F. Miyazaki and S. Arimoto: “Sensory Feedback Control for Space Manipulators,” Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Scottsdale, AZ, pp.1346-1351, 1989.
- [5] Y. Umetani and K. Yoshida: “Resolved Motion Rate Control of Space Manipulators with Generalized Jacobian Matrix,” IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.5, no.3, pp.303-314, 1989.
- [6] 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, vol.26, no.7, pp.765-772, 1990.
- [7] T. Yoshikawa, Y. Yokokohji and T. Toyoshima: “Efficient Computational Algorithms for Trajectory Control of Multi-Arm Space Manipulators,” Proceedings of International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, Kobe, Japan, pp.303-306, 1990.
- [8] J-J. E. Slotine and W. Li: “On the Adaptive Control of Robot Manipulators,” The International Journal of Robotics Research, vol.6, no.3, pp.49-59, 1987.
- [9] 山本, 小林, 大川, 加藤: “宇宙用マニピュレータのデジタル適応制御”, 日本機械学会論文集 (C編), vol.62, no.593, pp.168-174, 1996.
- [10] 岩田, 町田, 戸田: “浮遊物体捕捉マヌーバに用いる自由飛行型ロボットの統一的制御”, 日本航空宇宙学会誌, vol.43, no.502, pp.634-640, 1995.
- [11] K. Senda, Y. Murotsu and H. Adachi: “Control Experiment for Space Robot with Visual Information,” AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, San Diego, CA, AIAA-96-3900, 1996.



泉田 啓 (Kei Senda)

1963年8月17日生。1988年大阪府立大学大学院博士前期課程修了。同年4月大阪府立大学工学部助手, 1994年同助教授, 1996-1997年ミシガン州立大学客員研究員。1992年最優秀発表論文賞(米国航空宇宙学会 GNC), 1994年システム制御情報学会賞など受賞。宇宙ロボット, 柔軟マニピュレータなどの研究に従事。博士(工学)。AIAAなどの会員。

(日本ロボット学会正会員)



長岡秀行 (Hideyuki Nagaoka)

1970年4月18日生。1994年大阪府立大学工学部航空工学科卒業。宇宙ロボットの研究に従事し, 1996年大阪府立大学大学院博士前期課程(航空工学専攻)修了。同年4月より日本電信電話株式会社に勤務。



室津義定 (Yoshisada Murotsu)

1940年3月20日生。1968年大阪府立大学大学院博士課程単位取得退学。同年4月大阪府立大学工学部助手, 1982年同助教授。1992年最優秀発表論文賞(米国航空宇宙学会 GNC), 1994年システム制御情報学会賞など受賞。構造信頼性工学, 宇宙ロボットなどの研究に従事。工学博士。AIAA, ASME

などの会員。