宇宙ロボットの姿勢制御*
(第1報, スラスターによる制御)小林 信之*¹, 斉藤 修*¹, 野波 健蔵*²Attitude Control of A Free-Flying Space Robot
(1st Report, Feedforward Control with Thruster)

Nobuyuki KOBAYASHI, Osamu SAITO and Kenzo NONAMI

An attitude control algorithm of a free-flying space robot with thrusters is proposed. It is known that the motion of the manipulator attached to the main body of a space robot causes the attitude deviation of the main body because of dynamic interaction, and an effective attitude control algorithm is desired. An equation of motion for the attitude of the space robot is derived using the Lagrange equation. The proposed disturbed-torque compensation algorithm, which is a kind of feedforward control, is as follows. The inertia force, which is calculated from the equation of motion, is considered as the disturbance torque for the main body. Thrusters act to compensate the impulse of the disturbance torque. The proposed algorithm is compared with the time optimal control and time-fuel optimal control algorithms. Simulation results of attitude deviations and input energy are discussed.

Key Words: Space Robot, Robot, Attitude Control, Thruster Control, Fuel Optimal Control

1. 緒 言

将来実用化が期待されている空間浮遊形宇宙ロボット(以下, ロボットと略称する)が宇宙空間で物資の補給, 交換などの作業を行うためにアームを動かすと, その反力によりロボット本体(以下, 本体と略称する)に姿勢変動が生じることが知られており, 近年, 動力学的性質や制御方式についての研究が盛んに行われている^{(1)~(4)}.

ロボットの姿勢制御に対する考え方は,

- (a) 本体の姿勢変動を制御して小さくすることにより, 手先姿勢を実現する,
- (b) 多少の本体姿勢変動を許容しながらも, 手先姿勢を実現する,

の2とおりが考えられる⁽³⁾. (a)は, スラスターやリアクションホイール(RW)などの姿勢制御用アクチュエータによりエネルギーを注入する方式であり, (b)はアームの軌道制御に一般化ヤコビ行列などを用いる方式である.

遠隔操作によりアームの動きが逐次変わるロボット

では, 地上との通信確保などの制約から許容できる姿勢変動は0.02 rad以下の場合もあり, (a)の方式が有効であると考えられる. ただし, スラスターをアクチュエータとして用いる場合, 大きな制御力が得られる反面その推薬が有限なことから注入するエネルギーなるべく少なくする必要がある.

本研究では, (a)の立場から以下の制御方式を考え, その有効性を検討する. それはアーム関節角, 角速度などからアームの運動量を推定し, ある値を越えたときにスラスターを作動させるフィードフォワード制御(以下, 外乱トルク補償制御と呼ぶ)と推定誤差を補償するRWによるフィードバック制御を組合せた制御方式である.

本報では, まず, D-H (Denavit-Hartenberg) 変換とラグランジュの方程式を用いてロボットの運動方程式を姿勢角のみの常微分方程式として導出する. 次に, スラスター制御則として姿勢角変動量と消費燃料なるべく少なくする立場から, 外乱トルク補償制御と本体姿勢に関する最短時間・最小燃料制御などのフィードバック制御とのシミュレーション結果の比較を行う.

なお, スラスターによる制御性の検討を目的としているのでRWによる制御との組合せた制御方式につ

* 原稿受付 平成4年8月6日.

*¹ 正員, 石川島播磨重工業(株)技術研究所(〒135 東京都江東区豊洲3-1-15).

*² 正員, 千葉大学工学部(〒260 千葉市稲毛区弥生1-33).

いては省略したが、別途報告する予定である。

2. 運動方程式

図1に示すように、関節*i*上に固定されたリンク座標系 Σ_i で表された運動にD-H変換を用いて慣性座標系に変換し、ラグランジュ方程式を用いて運動方程式を求める。慣性座標系 Σ_A の原点は運動前の宇宙ロボット本体の重心位置にとる。また、本体の回転はロボット座標系 Σ_0 でオイラー角変換の一種であるロール(γ)、ピッチ(β)、ヨー(α)で与えるものとする。

運動方程式を導くために以下の仮定を設けた。

- (1) 各リンクは単腕 n 自由度の回転関節形であり、系はすべて剛体である。
- (2) 各リンクの質量は、関節または手先ハンド質量に較べて小さいものとし、リンクの質量およびリンク重心回りの回転慣性質量は無視できる。解析モデルの主要な記号は以下のとおりである。

I_i ; m_i の重心回りの慣性行列

l_i ; リンク i の長さ

m_i ; リンク i 先端の関節またはハンドの質量

$\{r_i\}$; リンク i 先端の関節またはハンドの重心位置ベクトル

$\{u_i\}$; 関節 i の回転軸方向を示す単位ベクトル

$\{x\}$; 慣性座標系で表現された並進変位ベクトル

α, β, γ ; 本体の姿勢角 (ヨー, ピッチ, ロール)

$\{\phi\}$; 本体の姿勢角ベクトル $\{\alpha, \beta, \gamma\}^T$

θ_i ; 関節 i の回転角

$\{\omega_i\}$; m_i の重心回りの回転角速度ベクトル

リンク座標系 Σ_i のロボット座標系 Σ_0 への変換はD-H変換を用いて式(1)のように表される。

$${}^0\{r_i\} = T_0^1 T_1^2 \cdots T_{i-1}^i \{r_i\} = T_0^i \{r_i\} \quad \cdots (1)$$

ここで、 $\{r_i\} = \{x_i, y_i, z_i, 1\}^T$ であり、左肩の添え字⁰はロボット座標系での表示を示す。また、 T_{i-1}^i は以下の式で与えられる。

$$T_{i-1}^i = \begin{bmatrix} C_{\theta_i} & -S_{\theta_i} C_{\alpha_i} & S_{\theta_i} S_{\alpha_i} & l_i C_{\theta_i} \\ S_{\theta_i} & -C_{\theta_i} C_{\alpha_i} & C_{\theta_i} S_{\alpha_i} & l_i S_{\theta_i} \\ 0 & S_{\alpha_i} & C_{\alpha_i} & H_{ii} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \cdots (2)$$

ただし、 C_θ は $\cos \theta$ を、 S_θ は $\sin \theta$ を表す。

式(1)で与えた ${}^0\{r_i\}$ は (4×1) のベクトルであるので、 x, y, z 方向成分のみの (3×1) ベクトルを新たに ${}^0\{r_i\}$ とし、慣性座標系で表すと式(3)となる。

$${}^A\{r_i\} = {}^A A_0 {}^0\{r_i\} + \{x\} \quad \cdots (3)$$

ロボット座標系 Σ_0 表示されているベクトルを慣性座標系に変換する座標変換行列 ${}^A A_0$ はロール、ピッチ、ヨー変換であり、式(4)で与えられる。

$${}^A A_0 = \begin{bmatrix} C_\beta C_\gamma & S_\alpha S_\beta C_\gamma & C_\alpha S_\beta C_\gamma \\ & -C_\alpha S_\gamma & +S_\alpha S_\gamma \\ C_\beta S_\gamma & S_\alpha S_\beta S_\gamma & C_\alpha S_\beta S_\gamma \\ & +C_\alpha C_\gamma & -S_\alpha C_\gamma \\ -S_\beta & S_\alpha C_\beta & C_\alpha C_\beta \end{bmatrix} \quad \cdots (4)$$

慣性座標系での並進速度は式(3)を時間微分して

$${}^A\{\dot{r}_i\} = {}^A \dot{A}_0 {}^0\{r_i\} + {}^A A_0 {}^0\{\dot{r}_i\} + \{\dot{x}\} \quad \cdots (5)$$

リンク i 先端の Σ_i における角速度 ω_i は、

$$\{\omega_i\} = A\{\dot{\phi}\} + \sum_{j=0}^i ({}^A A_0 {}^0 u_j) \quad \cdots (6)$$

ここで ${}^0 u_j$ は $T_0^j \{\dot{\theta}_j\}$ の x, y, z 方向成分のみのベクトルである。また、 A は次式で与えられる。

$$A = \begin{bmatrix} C_\beta C_\gamma & -S_\gamma & 0 \\ C_\beta S_\gamma & -C_\gamma & 0 \\ -S_\beta & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \cdots (7)$$

式(5)、式(6)より系全体の運動エネルギーは

$$T = 1/2 \sum_{i=0}^n (m_i^A \{\dot{r}_i\}^T \cdot {}^A\{\dot{r}_i\} + I_i \{\omega_i\}^T \cdot \{\omega_i\}) \quad \cdots (8)$$

式(8)をラグランジュの方程式に代入してロボットの運動方程式を求めることができる。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dT}{d\dot{q}_i} \right) - \frac{dT}{dq_i} = Q_i \quad \cdots (9)$$

運動方程式は数式処理プログラムを用いて比較的容易に導出できる。式(9)において一般化座標 q_i に $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$ をとり、一般化外力 Q_i をゼロと置けば、並進と回転が連成した六つの方程式が得られる。なお、 $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ は指令値として与えられるものとした。

今、本体の姿勢変動のみに着目して x, y, z を消去し、姿勢角 α, β, γ に関する3元の運動方程式に縮約すると式(10)となり、容易に数値積分できる。

$$M(\theta, \phi) \ddot{\phi} + C(\theta, \dot{\theta}, \phi) \dot{\phi} + d_1(\theta, \dot{\theta}, \phi) \dot{\phi}_1$$

図1 宇宙ロボットのモデル化

$$+d_2(\theta, \dot{\theta}, \phi)\dot{\phi}=F(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \quad \cdots \cdots \cdots (10)$$

ここで,

$$\begin{aligned} \{\phi\} &= \{\alpha, \beta, \gamma\}^T \\ \{\dot{\phi}_1\} &= \{\dot{\alpha}^2, \dot{\beta}^2, \dot{\gamma}^2\}^T \\ \{\dot{\phi}_2\} &= \{\dot{\alpha}\dot{\beta}, \dot{\beta}\dot{\gamma}, \dot{\gamma}\dot{\alpha}\}^T \end{aligned}$$

3. 姿勢制御アルゴリズム

3・1 外乱トルク補償制御 各関節の動きがわかれば姿勢角変動は式(10)から求めることができるので、式(10)の左辺第1項以外を右辺に移項して右辺を外乱トルク推定値 d と考える。

$$M(\theta, \phi)\ddot{\phi}=d(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}, \phi, \dot{\phi})+u \quad \cdots \cdots \cdots (11)$$

d を補償するようにスラスタ発生トルク u を与えれば姿勢変動を抑えることができる。 d はコンピュータ制御系および姿勢制御系からアームの動作情報、姿勢情報をそれぞれ得ることにより、三角関数を用いた代数計算で求めることができる。

スラスタは $-u_0, 0, u_0$ なる値のみをとる ON-OFF 制御であるので、その作動時間と発生トルクの積で与えられる力積を制御量として選ぶ。一方、補償すべき運動量は式(11)右辺の d を時間積分することによって得られるので、式(12)に示すように運動量が α, β, γ 軸まわりのそれぞれの設定運動量に達した時にスラスタが一定時間作動し、設定運動量と等しい力積を与えるようにすればアーム動作に伴う外乱トルクを補償できる。すなわち、スラスタ作動時間は式(13)で与えられる。

$$J(\text{外乱トルク推定値})dt \geq \text{設定運動量} \quad \cdots \cdots (12)$$

$$\text{作動時間} = \frac{\text{設定運動量}}{\text{スラスタ発生トルク}} \quad \cdots \cdots (13)$$

設定運動量は許容される最大姿勢角速度、スラスタ一推力などから決めることができ、それが小さいほど姿勢角変動は少なくなる。ここでは、本制御アルゴリズムを外乱トルク補償制御と呼ぶことにする。

本制御アルゴリズムの予想される問題点として、

- (1) 外乱トルク推定値の積分値が設定運動量以下の値で残った場合、微小な偏差が生じること、
 - (2) モデル化誤差がある場合、それに伴う制御力誤差のために姿勢変動が生じること、
- が考えられる。これらの補償は RW のような発生トルクの比較的小さいアクチュエータによるフィードバック制御で可能である。

3・2 最短時間・最小燃料制御 アームの運動によるロボット本体姿勢変動抑制に最短時間・最小燃料制御を適用することを考える。本制御法は ON-OFF 制御であり、スラスタのように制御力一定の拘束条件

がついたときに用いられる。姿勢変動がある設定角度を越えた時に最短時間問題または最小燃料問題としての Bang-zero-Bang 制御によりスラスタを作動させる。

式(10)の d_1, d_2 を右辺に移項し F との和を新たに F_0 として、スラスタ制御力 u を加え、状態方程式で表すと式(14)になる。

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & M^{-1}C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \cdot F_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix} u \quad \cdots \cdots \cdots (14)$$

最短時間・最小燃料制御アルゴリズムを設計するに当たって式(14)から $M^{-1}F_0$ の項を省略し、さらに M と C を定数として線形化したモデルは式(15)となる。

$$\{\dot{x}\} = F\{x\} + gu \quad \cdots \cdots \cdots (15)$$

制御燃料と制御時間を同時に最適化するための評価関数 J は、 R を重み係数として式(16)で与えられる。

$$J = \int_0^{t_f} \{R + |u(t)|\} dt \quad \cdots \cdots \cdots (16)$$

初期条件と終端条件が、

$$\left. \begin{aligned} \phi(t_0) &= \phi_0, & \dot{\phi}(t_0) &= \dot{\phi}_0 \\ \phi(t_f) &= 0, & \dot{\phi}(t_f) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad \cdots \cdots \cdots (17)$$

のように与えられ、スラスタ制御力に

$$-u_0 \leq u \leq u_0 \quad \cdots \cdots \cdots (18)$$

なる拘束を与えられる最適制御則は、文献(5)(6)を参照して、終端自由の拘束条件付変分原理から以下のように得ることができる。

λ を随伴変数とすれば、ハミルトニアン H は式(19)で与えられる。

$$H = R + |u(t)| + \lambda^T [Fx + gu] \quad \cdots \cdots \cdots (19)$$

λ に関する微分方程式を解き、制御入力最適性の条件にポントリャギンの原理を用いることにより、ON-OFF 制御のシーケンスは $\{-u_0, 0, u_0\}, \{u_0, 0, -u_0\}$ の2とおりになることがわかる。最適トラジェクトリに沿って H が0である条件を使えば、切替曲線は ϕ の積分から求め、面内運動では、式(20)で与えられる。

$$\begin{aligned} F_1(y) &= -(M/C)\dot{y} + \text{sgn}(\dot{y})(u_0/M)(M/C)^2 \\ &\quad \times \ln(1 + C|\dot{y}|/u_0) \\ F_2(y) &= -(M/C)\dot{y} + \text{sgn}(\dot{y})(u_0/M)(M/C)^2 \\ &\quad \times \ln(1 + R/C|\dot{y}|/u_0/(R + 2C|\dot{y}|/M)) \quad \cdots (20) \end{aligned}$$

F_1 は最短時間制御における切替曲線に一致しており、 R を大きくすると F_2 は F_1 に近づく。 F_1 と F_2 の間では制御力 u はゼロとなる。

4. 計算例

4・1 計算モデル 図2に示す単腕3リンクの宇

宙ロボットについてシミュレーションを行う。その主要諸元を図中にあわせて示す。

アームを伸ばしきった姿勢 ($\theta_1=0$, $\theta_2=1.57$, $\theta_3=0$) から想定した作業位置 ($\theta_1=1(\text{rad})$, $\theta_2=2.57(\text{rad})$, $\theta_3=1.5(\text{rad})$) まで、図3に示すような台形速度パターンにより15 sec間で動くとした。計算は20 sec間行った。なお、スラスターは推力10Nが各軸2基設置されていると仮定し、発生トルクを20 Nmとした。

4.2 外乱トルク補償制御 姿勢制御を行わない場合、アーム動作の反作用により本体に生じる回転変位は図4のようになる。本体の姿勢角変動はアーム動作とともに大きくなり、アーム動作停止と同時に一定値となる。本計算例では最大姿勢角変動は β 軸回りで約0.115(rad)であった。

外乱トルク補償制御による3軸制御シミュレーションの結果を図5に示す。観測量は各関節の $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ および本体の姿勢角、姿勢変動角速度である。スラスター作動時間は0.2 secとした。

図より、最終的な姿勢変動角は姿勢制御を行わない場合最も大きかった β 軸回りで0.0066(rad)と約20分の1に姿勢変動を抑えることができていことがわ

かる。ただし、 α 軸回りでは小さな速度偏差が生じており、姿勢角変動が増加している。これは、設定運動量を小さくするか、RWによるフィードバック制御を行

図4 非姿勢制御時の本体の姿勢変動角(3軸)

図5 外乱トルク補償制御による本体の姿勢変動角(3軸)

図2 単腕3リンク宇宙ロボットの計算モデル

図3 各関節の速度指令値

(a) 本体の姿勢変動角

(b) スラスター作動タイミング

図6 外乱トルク補償制御による本体の姿勢変動角(1軸)

えば改善される。

4・3 最短時間・最小燃料制御との比較 上述の例で最も姿勢変動が大きかった β 軸回りの面内運動 ($\theta = 0$: 一定) に対して外乱トルク補償制御と最短時間・

(a) 本体の姿勢変動角

(b) スラスター作動タイミング

図 7 最短時間制御による本体の姿勢変動角 (1 軸)

(a) 本体の姿勢変動角

(b) スラスター作動タイミング

図 8 最短時間・最小燃料制御による本体の姿勢変動角 (1 軸)

最小燃料制御との比較を行った。計算結果は省略したが、制御力を加えない場合の姿勢変動は $0.156(\text{rad})$ であった。

図 6 に外乱トルク補償制御を、図 7 に重み係数 R を 10^{12} として最短時間制御を、図 8 に R を 10^6 として最短時間・最小燃料制御をそれぞれ行った結果のうち、姿勢角、角速度およびスラスター作動時間を示す。最短時間・最小燃料制御の観測量は本体の姿勢角および姿勢角角速度であり、本体の姿勢角が $0.0052(\text{rad})$ を越えるとスラスターが作動するとした。

いずれの場合も制御を加えない場合の姿勢変動角 $0.156(\text{rad})$ に比べ、姿勢変動角は 10 分 1 以下に小さくなっている。また、姿勢角速度依存項やアームの運動による外乱があっても最短時間・最小燃料制御がうまく作動していることがわかる。すなわち、式(15)では式(14)における $M^{-1}F_0$ を省略したが、その影響はその時間における外乱として処理することができる。

表 1 には各制御方法の最大姿勢変動偏差とスラスター作動力積をまとめて示す。外乱トルク補償制御がスラスター作動力積がもっとも小さく、ほかの方法の約半分である。また、姿勢角変動もほかの方法より小さい。したがって、本計算結果からは外乱トルク補償制御が一番良い制御結果を与える。

なお、最短時間・最小燃料制御で重み係数を小さくするにつれて作動力積も小さくなるが、姿勢角変動が急速に増大する。

5. 結 論

空間浮遊形宇宙ロボットの作業時における姿勢制御について、以下の知見を得た。

- (1) アームの運動を考慮した宇宙ロボットの 3 次元運動方程式を姿勢角のみを未知数として導いた。
- (2) アームの運動を宇宙ロボット本体への外乱として考える外乱トルク補償制御を姿勢制御アルゴリズムとして提案した。
- (3) 最短時間・最小燃料制御アルゴリズムを宇宙ロボット姿勢制御問題に適用し、姿勢変動角および燃料消費の立場から外乱トルク補償制御法と比較し、後者の方が必要なスラスターの力積は小さいこ

表 1 最大姿勢変動偏差とスラスター作動力積

Control Algorithm	Max. Att. Angle(rad)	Action Times	Impulse (Nmsec)
Present	5.87×10^{-3}	24	96.0
Time Opt.	-1.10×10^{-2}	12	193.9
Time-Fuel Opt.	-1.10×10^{-2}	7	165.2

とを示して, その有効性を確認した。

本研究は宇宙開発事業団の宇宙ロボット技術の研究として実施した外乱トルク補償制御に検討を追加するとともに, 最短時間・最小燃料制御に関する知見を追加したものである。関係各位に謝意を表す。

文 献

(1) Longman, R. W., ほか2名, *Int. J. of Robotics Research*,

6-3(1987), 87-103.

(2) Yamada, K., ほか2名, *Proc. 13th ISTS*, (1982), 993-998.

(3) 梅谷・吉田, 日本ロボット学会誌, 7-4 (1989), 63-73.

(4) 山田・土屋, 計測自動制御学会論文集, 27-5 (1990-5), 585-592.

(5) 加藤, 工学的最適制御, (1988), 131-141, 東京大学出版会.

(6) Athans, M., Falb, P., *Optimal Control*, (1966), 710-719, McGraw-Hill.