コントロールモーメントジャイロによる トルクユニットマニピュレータの制御*

外 本 伸 治^{*1}

Torque-Unit-Manipulator Driven by Control Moment Gyros

Shinji HOKAMOTO

This paper deals with a space manipulator which is called Torque-Unit-Manipulator (TUM): TUM separates its actuator called torque unit from its joints; i.e., torque unit is placed on an arbitrary place on a link, and each rotational joint is a free joint. The TUM proposed in the previous work, however, is driven by reaction wheels, and thus it has a problem to be solved: the angular velocity of the reaction wheel may saturate when external force disturbs the posture of the TUM repeatedly. The reason is that the reaction wheels accumulate angular momentum during the maneuver because of non-holonomic constraint for the free joints. Therefore, TUM driven by Control Moment Gyros (CMGs) is proposed in this paper. For the proposed TUM, an asymptotically stable controller can be designed through Lyapunov's approach, and besides the gimbal angular velocity of the CMG returns to zero after each maneuver. The dynamics of the proposed TUM is computed in numerical simulation, and the effectiveness of the designed controller is shown.

Key Words: Space Robot, Manipulator, Nonlinear Control, Free Joint, Control Moment Gyro, Lyapunov Function, Non-Holonomic Constraint

1. ま え が き

宇宙空間での作業を、より安全に、より効率よく遂行するために、宇宙用マニピュレータの研究が進められている。宇宙空間では修理・交換が容易でないため、宇宙用マニピュレータには、軽量化や安全性の要求とともに、優れた保守性が望まれる。

最近提案されたトルクユニットマニピュレータ (Torque-Unit-Manipulator: TUM) は、トルク発生部を関節から分離することにより、保守が容易である、冗長アクチュエータ系が容易に実現できる、などの特長をもつ⁽¹⁾。その一方で、回転関節が自由関節となるために、積分不可能な非ホロミック拘束を受ける⁽²⁾⁽³⁾。その結果、リアクションホイールをトルク発生ユニットとする従来の TUM では、制御の前後でリアクションホイールの回転角速度が異なるという現象が生じる。このことは、TUM を同一方向に繰返し制御する場合、やがてリアクションホイールの回転角速度が飽和し制御できなくなることを意味する。

本論文では、上記の問題点を回避するために、コン

trol Moment Gyro (CMG) により、制御トルクを発生する TUM を提案する。提案する TUM に対しては、Lyapunov の方法に基づき漸近安定な制御系を構成できる。さらに、制御終了時点で CMG のジンバル角速度は 0 に戻るため、リアクションホイール駆動の場合と異なり、角速度の飽和は生じない。

本論文では、まず TUM の基本的な機構について簡単に説明し、その特長と問題点について述べる。次に、CMG により駆動される TUM の機構を示し、その運動方程式を導出する。その後、Lyapunov の方法を用いて漸近安定な制御系を設計する。最後に、計算機シミュレーションを用いて、提案する CMG 駆動の TUM ならびに導出した制御則の有効性を示す。

2. TUM の機構と特長・問題点

2・1 TUM の機構と特長⁽¹⁾ 図 1 は、大須賀らによって提案された TUM を従来のマニピュレータと比較し、その違いを模式的に描いたものである。従来のマニピュレータでは、回転関節は関節に配置されたサーボモータにより駆動される。これに対し、TUM の回転関節は回転機構だけをもつ自由関節であり、制御モーメントはトルクユニットと呼ばれるトル

* 原稿受付 1997 年 8 月 22 日。

^{*1} 正員, 九州大学工学部 (☎ 812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

Fig. 1 Mechanism of conventional manipulator and Torque Unit Manipulator (TUM)

ク発生ユニットにより与えられる。

このように、トルクユニットを関節から分離することにより、以下のような特長が得られる。

- 保守の容易性
トルクユニットはリンクに脱着できるので、故障したトルクユニットは、ユニットごと交換すればよい。また、回転関節はベアリングだけの簡単な構造となる。したがって、全体として信頼性が高くなる。
- 冗長アクチュエータ系の構成
各関節角は、最低1個のトルクユニットにより制御可能であるが、各リンクに複数のトルクユニットを装着することもできる。したがって、冗長アクチュエータ系を容易に実現できる。
- 動特性の変更可能性
トルクユニットはリンク上の任意の位置に装着可能である。装着位置を変えれば、マニピュレータの動特性を変更することも可能である。

2.2 従来のTUMの問題点⁽²⁾ 文献(1)のTUMは、リアクションホイールの反動トルクを用いて駆動トルクを発生する。図2は、リアクションホイールを関節部に配置したTUMの模式図である。制御モータ*i*がリアクションホイール*i*を時計まわりに加速すると、モータ本体は反時計まわりに反動トルクを受ける。モータ本体はリンクに固定されているため、リンク*i*も反時計まわりに加速する。

このリンク*i*の運動は隣接するリンクにとって外部トルクとなり、関節が自由関節であるために、隣接するリンクの運動を引き起こす。ここで、自由関節では外部からのトルクは常に0であり、このことは一般化座標の2階微分、すなわちリンク角加速度とホイール角加速度を含む積分不可能な非ホロノミック拘束として表現される。したがって、リンク角の制御を行う場

Table 1 Specification of the 2-link TUM with reaction wheels

Link 1		
Mass	1.30	[kg]
Moment of inertia	3.22×10^{-2}	[kg-m ²]
Length	0.24	[m]
Link 2		
Mass	1.08	[kg]
Moment of inertia	8.22×10^{-3}	[kg-m ²]
Length of the link 2	0.15	[m]
Reaction wheel 1		
Mass	1.20	[kg]
Moment of inertia	1.41×10^{-3}	[kg-m ²]
Reaction wheel 2		
Mass	0.71	[kg]
Moment of inertia	0.87×10^{-3}	[kg-m ²]

Fig. 2 Schematic mechanism of TUM driven by reaction wheel

合、リアクションホイールの角速度は、制御トルクの時間履歴に依存する。すなわち、制御終了時点において、一般にはリアクションホイールの角速度が制御前の角速度に戻らない。

非ホロノミック現象を例示するため、リアクションホイール駆動の2リンクTUMを考える。二つのリンクは水平面内の運動のみが可能であるとし、その物理量を表1⁽⁴⁾のようにする。リアクションホイールによる駆動では、反動トルクとリンクの回転軸が同じ方向であるために単純なPD制御で制御できる。すなわち、リンク*i*の角度を θ_i 、その目標角度を θ_i^c とするとき、リアクションホイールにより、次式のような制御トルク τ_i を発生させれば、リンク角を制御できる。

$$\tau_i = k_{pi}(\theta_i^c - \theta_i) + k_{di}(\dot{\theta}_i^c - \dot{\theta}_i) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 k_{pi} 、 k_{di} はリンク*i*に対する比例ゲインと微分

ゲインである。一例として、

$$\text{初期状態: } \theta_1(0)=\theta_2(0)=0 \quad \text{deg}$$

$$\dot{\theta}_1(0)=\dot{\theta}_2(0)=0 \quad \text{deg/s}$$

$$\dot{\phi}_1(0)=\dot{\phi}_2(0)=0 \quad \text{deg/s}$$

$$\text{目標状態: } \theta_1^c=\theta_2^c=60 \quad \text{deg}$$

$$\dot{\theta}_1^c=\dot{\theta}_2^c=0 \quad \text{deg/s}$$

$$\text{制御ゲイン: } k_{p1}=k_{p2}=1 \quad \text{Nm}$$

$$k_{d1}=k_{d2}=1 \quad \text{Nms}$$

とした場合のシミュレーション結果を図3に示す。図3(a)よりリンク角の制御はできているが、図3(b)よりリアクションホイールの角速度が零に戻っていないことがわかる。したがって、同じ方向に繰返し制御する場合には、やがてリアクションホイールの回転角速度が飽和し制御できなくなる。

この対策として、リアクションホイールの角運動量の蓄積が小さくなるような軌道計画の必要性を指摘する研究⁽⁴⁾がある。すなわち、軌道をうまく計画すれば、制御終了時点においてリアクションホイールの角速度を0に戻すことは可能であると推測できる。しかし、そのような軌道を求めることは、理論的にはもちろん数値的にも容易ではない。しかも、非ホロノミックな拘束に支配されているため、初期姿勢や目標姿勢が変われば軌道計画をやり直すことが必要となる。さ

らに、得られた軌道はモデルのパラメータに敏感であり、モデルが誤差を含む場合、リアクションホイールの角速度を元に戻す軌道を求めることはほとんど不可能である。

そこで本研究では、駆動トルクの発生機構を、リアクションホイールではなくコントロールモーメントジャイロに変更し、Lyapunovの方法により、漸近安定な制御系を設計する。

3. CMG 駆動の TUM と Lyapunov 型の制御則

コントロールモーメントジャイロ (CMG) は、エネルギー放出型ではなく、しかも高出力・高精度制御が可能であるため、人工衛星の姿勢制御装置としてしばしば使用される^{(5)~(7)}。特に、1個のジンバルをもつ自由度コントロールモーメントジャイロ (Single Gimbal CMG: SG-CMG) は、機構も簡単であり、トルクユニットとして適している。図4は、関節部に SG-CMG を配置した TUM の概念図である。

定式化を簡単にするため、以下では CMG 駆動の水平2リンク TUM を取扱う。運動方程式は、Lagrangeの方法により導出する。リンク i の角度と角速度を θ_i と $\dot{\theta}_i$ 、ジンバル i の角度と角速度を ϕ_i と $\dot{\phi}_i$ とする。また、モーメントムホイール i の角運動量を h_{wi} と表記すれば、運動方程式は次式のように表記できる。

$$M(x)\ddot{x} + h(x, \dot{x}) = \tau \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

$$M(x) = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & 0 & 0 \\ M_2 & a_2 + a_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_6 \end{bmatrix}$$

$$M_1 = a_1 + a_2 + a_4 + 2a_7 \cos \theta_2$$

(a) Time history of the joint angles

(b) Time history of the joint angular velocities of the reaction wheels

Fig. 3 Simulation result of the TUM driven by reaction wheels

Fig. 4 TUM driven by control moment gyro

$$\begin{aligned}
 M_2 &= a_2 + a_4 + a_7 \cos \theta_2 \\
 \mathbf{h}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) &= \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \dot{\theta}_1 \{h_{w1} \cos \phi_1 - b_1 \dot{\theta}_1\} \\ (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \{h_{w2} \cos \phi_2 - b_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\} \end{bmatrix} \\
 h_1 &= -a_7 (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \\
 &\quad - \dot{\phi}_1 \{h_{w1} \cos \phi_1 - 2b_1 \dot{\theta}_1\} \\
 &\quad - \dot{\phi}_2 \{h_{w2} \cos \phi_2 - 2b_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\} \\
 &\quad - \dot{h}_{w1} \sin \phi_1 - \dot{h}_{w2} \sin \phi_2 \\
 h_2 &= a_7 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 - \dot{\phi}_2 \{h_{w2} \cos \phi_2 - 2b_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\} \\
 &\quad - \dot{h}_{w2} \sin \phi_2 \\
 \mathbf{x} &= [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \phi_1 \quad \phi_2]^T \\
 \boldsymbol{\tau} &= [0 \quad 0 \quad \tau_{\phi 1} \quad \tau_{\phi 2}]^T
 \end{aligned}$$

であり、定数 $a_1 \sim a_7$, b_1 , b_2 は以下のように定義される。

$$\begin{aligned}
 a_1 &= m_1 L_{G1}^2 + (m_2 + m_{g2} + m_{w2}) L_1^2 + I_{1z} \\
 a_2 &= m_2 L_{G2}^2 + I_{2z} \\
 a_3 &= I_{g1y} \sin^2 \phi_1 + I_{g1z} \cos^2 \phi_1 + I_{w1y} \sin^2 \phi_1 \\
 &\quad + I_{w1z} \cos^2 \phi_1 \\
 a_4 &= I_{g2y} \sin^2 \phi_2 + I_{g2z} \cos^2 \phi_2 + I_{w2y} \sin^2 \phi_2 \\
 &\quad + I_{w2z} \cos^2 \phi_2 \\
 a_5 &= I_{g1x} + I_{w1x} \\
 a_6 &= I_{g2x} + I_{w2x} \\
 a_7 &= m_2 L_1 L_{G2} \\
 b_1 &= (I_{g1y} - I_{g1z} + I_{w1y} - I_{w1z}) \cos \phi_1 \sin \phi_1 \\
 b_2 &= (I_{g2y} - I_{g2z} + I_{w2y} - I_{w2z}) \cos \phi_2 \sin \phi_2
 \end{aligned}$$

ただし、 m : 質量, L : 長さ, I : 慣性モーメントであり、下添字の g, w はそれぞれジンバルとモーメントムホイールを意味する。さらに、 x, y, z は慣性モーメントの軸方向を表し、 L_G は関節からリンクの重心までの長さを表す。

ここで、モータによりモーメントムホイールの回転角速度を一定に保つことができるとすれば、 $\dot{h}_{wi} \rightarrow 0$ となる。さらに、その回転角速度は一般に非常に高速であることを考慮すれば、

$$\begin{aligned}
 h_{w1} \cos \phi_1 - 2b_1 \dot{\theta}_1 &\rightarrow h_{w1} \cos \phi_1, \\
 h_{w2} \cos \phi_2 - 2b_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) &\rightarrow h_{w2} \cos \phi_2
 \end{aligned}$$

と近似できる。以下では、議論を簡単にするため、これらの微小量を省略した式を使用し、 b_i に関する微小量の影響は数値シミュレーションにより検討する。

制御系は、Lyapunov の方法に基づき設計する。まず、Lyapunov 関数の表現を容易にするため、次式のような写像 $T(\theta_i)$ を考え、慣性行列 $\mathbf{M}(\mathbf{x})$ を対角化する。

$$T(\theta_i): \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \tilde{\theta}_1 \\ \tilde{\theta}_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

このとき、運動方程式は次のように表現できる。

$$\begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\tilde{\theta}}_1 \\ \ddot{\tilde{\theta}}_2 \\ \ddot{\phi}_1 \\ \ddot{\phi}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \tau_{\phi 1} \\ \tau_{\phi 2} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、写像 $T(\theta_i)$ は各時刻における関節角度 θ_i に対して定義することに注意されたい。

写像された角度 $\tilde{\theta}_i$ を用いて、リンクの角度と角速度を目標値に漸近収束させるために、Lyapunov 関数の候補を次のように定める。

$$V = \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{1}{2} A_{ii} (\dot{\tilde{\theta}}_i - \dot{\tilde{\theta}}_i^c)^2 + \frac{1}{2} k_{pi} (\tilde{\theta}_i - \tilde{\theta}_i^c)^2 \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 $k_{pi} > 0$ であり、上添字 c は制御終了時点での目標量であることを意味する。この関数の時間微分を考えると

$$\begin{aligned}
 \dot{V} &= \sum_{i=1}^2 (\dot{\tilde{\theta}}_i - \dot{\tilde{\theta}}_i^c) \{ \tilde{A}_{ii} (\ddot{\tilde{\theta}}_i - \ddot{\tilde{\theta}}_i^c) + k_{pi} (\tilde{\theta}_i - \tilde{\theta}_i^c) \} \\
 &= \sum_{i=1}^2 (\dot{\tilde{\theta}}_i - \dot{\tilde{\theta}}_i^c) \{ -B_i - \tilde{A}_{ii} \ddot{\tilde{\theta}}_i^c + k_{pi} (\tilde{\theta}_i - \tilde{\theta}_i^c) \} \dots\dots\dots (6)
 \end{aligned}$$

なので、 $k_{di} > 0$ を用いて

$$-B_i - \tilde{A}_{ii} \ddot{\tilde{\theta}}_i^c + k_{pi} (\tilde{\theta}_i - \tilde{\theta}_i^c) = -k_{di} (\dot{\tilde{\theta}}_i - \dot{\tilde{\theta}}_i^c) \dots\dots\dots (7)$$

とすれば、目標姿勢では $\dot{V} = 0$ であり、その点を除いて $\dot{V} < 0$ となる。ここで、 B_i を式(2)~(4)より具体的に計算すると、ジンバルの角速度を次式のように制御すれば、 V は Lyapunov 関数となり、リンク角を目標値に漸近収束させることができる。

$$\dot{\phi}_1^d = \frac{-\alpha_1 + \alpha_2}{h_{w1} \cos \phi_1}, \quad \dot{\phi}_2^d = \frac{-\alpha_2}{h_{w2} \cos \phi_2} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_7 (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \\ a_7 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 \end{bmatrix} + T(\theta_i) \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (9)$$

$$\beta_i = -\tilde{A}_{ii} \ddot{\tilde{\theta}}_{if} + k_{pi} (\tilde{\theta}_i - \tilde{\theta}_{if}) + k_{di} (\dot{\tilde{\theta}}_i - \dot{\tilde{\theta}}_{if}) \dots\dots\dots (10)$$

であり、式(9)の右辺第2項は括弧内の量をその時刻での関節角度 θ_i に対応する $T(\theta_i)$ により写像することを意味する。ここで、式(9)と(10)より、リンクが目標角度に到達して静止したとすれば、 $\alpha_i = 0$ となることに注意されたい。つまり、制御終了時点で、ジンバルの目標角速度 $\dot{\phi}_i^d$ は0となる。

次に、ジンバルの角速度を目標角速度 $\dot{\phi}_i^d$ に漸近させるために、次の Lyapunov 関数の候補を考える。

$$V_\phi = \sum_{i=1}^2 \frac{1}{2} \tilde{A}_{i+2, i+2} (\dot{\phi}_i - \dot{\phi}_i^d)^2 \quad \cdots \cdots (11)$$

前述の場合と同様に、式(11)の時間微分を考えると次のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{V}_\phi &= \sum_{i=1}^2 \tilde{A}_{i+2, i+2} (\dot{\phi}_i - \dot{\phi}_i^d) (\ddot{\phi}_i - \ddot{\phi}_i^d) \\ &= \sum_{i=1}^2 (\dot{\phi}_i - \dot{\phi}_i^d) (\tau_{\phi i} - B_{i+2} - \tilde{A}_{i+2, i+2} \ddot{\phi}_i^d) \quad \cdots (12) \end{aligned}$$

したがって、次式のように制御トルクを与えると、目標値以外では $\dot{V}_\phi < 0$ となり、 V_ϕ は Lyapunov 関数となる。

$$\tau_{\phi i} = B_{i+2} + \tilde{A}_{i+2, i+2} \ddot{\phi}_i^d - k_{\phi i} (\dot{\phi}_i - \dot{\phi}_i^d) \quad \cdots \cdots (13)$$

ここに、 $k_{\phi i} > 0$ である。また、 $\ddot{\phi}_i^d$ はジンバルの目標角加速度であり、式(8)を時間で微分することにより得られる。なお後述のシミュレーション計算によると、一般に式(13)の右辺第2項は、ジンバルを急に加減速する制御初期の僅かな時間を除いて他の項に比べて十分小さく、実用上は省略してもほとんど影響がない。この項を省略すれば、より簡単に制御系を構成できる。

非ホロノミックな運動に対しては、Brockett の定理⁽⁸⁾が重要である。これは、対称アフィンシステムでは状態空間の一点に漸近安定化するような滑らかなフィードバック則が存在しないことを意味している。本論文で提案する CMG 駆動の TUM では、式(8)に示されるような運動する点を目標とすることで、フィードバック不可能性を回避していることに注意されたい。

[補足] ここでは、簡単のため2リンク水平 TUM を取扱った。これに対し、 n リンクの水平 TUM では $\theta_i (i=1 \sim n)$ に対して(3)のような写像を用いることにより、また回転軸が平行ではない n リンク TUM では $\theta_i (i=1 \sim n)$ と $\phi_i (i=1 \sim n)$ に対して(3)に対応する写像を考えることにより、慣性行列 $M(x)$ を対角化できる。慣性行列を対角化した運動方程式に対して、式(5)と(11)に対応する Lyapunov 関数の候補を定義すれば、ここで示した制御系と同様の制御系を構成できる。

4. 計算機シミュレーション

導出した Lyapunov 関数に基づく制御系の有効性を確認するために、計算機シミュレーションを行う。モデルは CMG により駆動される2リンクの TUM であり、そのおもな諸元を表2に示す。物理量は、現在製作中の実験機に対応しており、二つのリンク・ジ

Table 2 Specification of 2-Link TUM with CMG

Link i		
Mass	0.809	[kg]
Moment of inertia	8.51×10^{-3}	[kg-m ²]
Length	0.30	[m]
Momentum wheel i		
Mass	0.632	[kg]
Angular momentum	0.106	[kg-m ²]
Gimbal i		
Mass	0.143	[kg]
Moment of inertia		
About x axis (I_{gix})	1.12×10^{-4}	[kg-m ²]
About y axis (I_{giy})	1.12×10^{-4}	[kg-m ²]
About z axis (I_{giz})	2.24×10^{-4}	[kg-m ²]

ンバル・モーメントホイールの諸元を同じとした。

一例として、次のようなシミュレーションを考える。

初期状態: $\theta_1(0) = \theta_2(0) = 0 \quad \text{deg}$

$\dot{\theta}_1(0) = \dot{\theta}_2(0) = 0 \quad \text{deg/s}$

$\phi_1(0) = \phi_2(0) = 0 \quad \text{deg}$

$\dot{\phi}_1(0) = \dot{\phi}_2(0) = 0 \quad \text{deg/s}$

目標状態: $\theta_1^c = 20 \quad \text{deg}, \theta_2^c = 30 \quad \text{deg}$

$\dot{\theta}_1^c = \dot{\theta}_2^c = 0 \quad \text{deg/s}$

また、フィードバックゲインは、リンク角の時間履歴が行き過ぎ量をもたないように、試行錯誤により、次のように設定した。

$k_{p1} = k_{p2} = 0.6 \quad \text{Nm}$

$k_{d1} = k_{d2} = 2.0 \quad \text{Nms}$

$k_{\phi 1} = k_{\phi 2} = 1.0 \quad \text{Nms}$

結果を図5に示す。図5(a), (b)はリンクの角度と角速度の時間履歴であり、目標どおりに制御できている。図5(c), (d)はジンバルの角度と角速度の時間履歴であり、最終状態においてジンバルが静止していることがわかる。また図5(e)は目標となるジンバル角速度の履歴であり、図5(d)と比較すれば、ジンバル角速度が目標どおりに制御できていることが明らかである。図5(f)は制御トルクの時間履歴を示す。

このシミュレーションの場合、図5(d)に示されるジンバル角速度は最大でも $100 \text{ deg/s} (=16.7 \text{ rpm})$ より小さい。このような角速度は、制御モータと減速機を適切に組合せることにより、容易に実現できる。

なお、このシミュレーションでは、モーメントホイールの回転角速度は一定に保たれるとして $\dot{h}_{wi} = 0$ とした。一方、 b_i を含む微小項は省略せず、その影響を考慮している。先に述べたように、 b_i を含む項の大

Fig. 5 Simulation result of 2-link TUM driven by control moment gyros

きさは、高速回転するモーメントホイールの角運動量の大きさに比べて一般に非常に小さい。そのため、ジンバルロックが生じる角度から離れていれば、その影響はほとんど無視できる。この例では、制御トルクへの影響は、最大でも1%未満であり、応答はほとんど影響を受けない。

5. ま と め

リアクションホイールで駆動されるトルクユニットマニピュレータにおいては、制御終了後にリアクションホイールの回転角速度が初期の角速度に戻らないと

いう問題がある。そこで本論文では、トルクユニットとして、リアクションホイールではなくコントロールモーメントジャイロを採用するトルクユニットマニピュレータを提案した。提案したTUMは、リアクションホイール駆動のTUMがもつ特長を維持したまま、Lyapunovの方法に基づき漸近安定な制御系を構成することができ、しかも最終状態でジンバル角速度を0に戻すことが可能になる。導出した運動方程式ならびに制御則の有効性は、計算機シミュレーションにより確認した。

文 献

- (1) 大須賀公一・吉田浩治・小野敏郎, トルクユニットマニピュレータの提案, 日本ロボット学会誌, **14**-7(1996), 1018-1025.
 - (2) 荒井裕彦, 非駆動関節を有する3自由度マニピュレータの非ホロノミック拘束下における可制御性, 日本ロボット学会誌, **14**-5(1996), 751-758.
 - (3) 中村仁彦, 非ホロノミックロボットシステム第1回～第5回, 日本ロボット学会誌, **11**-4-7(1993), **12**-2, (1994).
 - (4) Nenchev, D. N., ほか5名, 反動駆動宇宙用マニピュレータの設計, モデル, 制御について, ロボティクスメカトロニクス講演会'96論文集, (1996), 363-366.
 - (5) Oh, H. S. and Vadali, S. R., Feedback Control and Steering Laws for Spacecraft Using Single Gimbal Control Moment Gyros, *J. Astronautical Sciences*, **39**-2 (1991), 183-203.
 - (6) Krishnan, S. and Vadali, S. R., An Inverse-Free Technique for Attitude Control of Spacecraft Using CMGs, *Acta Astronautica*, **39**-6 (1996), 431-438.
 - (7) 泉田啓・室津義定・ほか3名, 宇宙ロボットの位置姿勢制御実験, ロボティクスメカトロニクス講演会'95論文集, (1995), 975-978.
 - (8) Brockett, R. W., Asymptotic Stability and Feedback Stabilization, *Differential Geometric Control Theory*, (1983), 181-191.
-