回転自由な物体をもつ振り子の姿勢と動揺の同時制御*

吉田 靖夫^{*1}, 森 康祐^{*2}Simultaneous Control of Attitude and Swing of A Pendulum Having
a Rotational Free Body

Yasuo YOSHIDA and Kousuke MORI

This paper describes simultaneous control of attitude and swing of a pendulum having a rotational free body which is a simple lifting load model using two inertia rotors. Rotor torques controlling the free body's rotational attitude and the pendulum's swing are obtained by the computed torque method which is based from linear feedback accelerations of sliding mode control and the coupling characteristics of system's dynamics. Simultaneous control of attitude and swing is clarified to be possible from the experiments of position and sin trajectory following attitude controls under swing disturbance. But, from the experiments, simultaneous control cannot be performed in the case of large swing disturbance due to the motor's angular velocity saturation of the attitude inertia rotor. To avoid the velocity saturation, increasing moment of inertia or using high rotational motor are considered and these are related with estimating value of swing disturbance.

Key Words: Pendulum, Lifting Load, Attitude, Swing, Sliding Mode, Inertia Rotor, Computed Torque Method

1. 緒 言

組立作業用のつり荷は運搬移動や風などの外乱を受け回転と揺れを生じやすいが、その姿勢保持と動揺防止は組立作業上重要である。コンテナクレーンの揺れ止めは白井ら⁽¹⁾の報告にあるように走行クレーンを操作する事によってなされる。つり荷支持点が停止中の場合や簡単かつ有効に操作できないようなクレーンにおいては、なんらかの揺れ止め機構がつり荷に必要である。揺れ止め機構は、ジャイロ、動吸振器、慣性ロータなどを用いた装置が考えられる。ジャイロに関しては、船舶のローリング減揺装置として用いられたことが Den Hartog⁽²⁾ により記述されている。最近では、神吉ら⁽³⁾によりコントロールモーメントジャイロを用いたクレーンつり荷姿勢制御装置が開発され、ビル建設現場にて実用されている。しかしながら、ジャイロは高速回転フライホイールとその回転軸を傾ける動力を必要とし、その機構は簡単ではなく大型となるきらいがある。動吸振器に関しては、松久ら⁽⁴⁾はばね質量形で円弧軌道のものをゴンドラの揺れ防止用に関

発実用化しているが、大きなストロークが必要であり、さらに装置の取付け位置はゴンドラの重心位置より離す必要がある。慣性ロータは、トルク反力を利用するので機構は簡単であり、自由ベクトルであるので取付け位置によらない長所があるが、小型では大きなトルクが発生しにくく、回転数変化を基にしているのでトルク発生後の回転が残留することや飽和すると効かなくなる欠点があり、揺れ止めの実用化にはいたっていないようである。ロボットの研究では、小林ら⁽⁵⁾は宇宙ロボット、辻田・土屋⁽⁶⁾は2脚歩行ロボットの本体の安定化制御に慣性ロータを使用している。さらに、安定化だけでなく慣性ロータを姿勢制御に積極的に活用する研究があり、神崎ら⁽⁷⁾は支持点が回転自由な鉛直1リンクの先端に慣性ロータを使用した振上げ実験を行っている。

ここでは、吊り荷を簡易化した回転自由な物体をもつ振り子を取上げ、慣性ロータを用いて物体の回転姿勢と振り子の動揺防止の同時制御を実験およびシミュレーションにて行った。すなわち、モデルは4自由度(振り子と物体の2自由度と慣性ロータの2自由度)で、そのうちの振り子の動揺と物体の回転姿勢の2自由度を2個の慣性ロータ駆動でもって動的干渉による部分フィードバック制御を試みた。制御方式は離散時

* 原稿受付 1997年3月26日。

^{*1} 正員, 中部大学工学部(〒487 8501 春日井市松本町1200)。^{*2} 学生員, 中部大学大学院。

間系のスライディングモードを用いた計算トルク法とし、揺れ外乱に対する安定化と姿勢の同時制御ロバスト性および慣性ロータの有効性を明らかにすることを目的とした。

2. 運動方程式

対象モデルを図1に示す。関節1,2は自由関節、関節3はトルク τ_1 により駆動される関節、関節4はトルク τ_2 により駆動される関節である。 $\theta_i (i=1\sim4)$ は関節角度を示す。

運動方程式は下記のように表せる。

$$\begin{bmatrix} M_{11}(\theta_2, \theta_3) & M_{12}(\theta_2) & 0 & M_{14} \\ M_{21}(\theta_2) & M_{22} & M_{23} & 0 \\ 0 & M_{32} & M_{33} & 0 \\ M_{41} & 0 & 0 & M_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3) \\ h_2(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dot{\theta}_1) \\ h_3(\theta_2, \theta_3, \dot{\theta}_1) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (1)$$

さらに、次のように表すことにする。

$$\hat{M}(\theta_2, \theta_3)\ddot{\theta} + \hat{H}(\theta, \dot{\theta}) = \hat{\tau} \quad \dots\dots\dots (2)$$

慣性行列は、 $M_{ij} = M_{ji}$ の対称行列である。

$$\begin{aligned} M_{11}(\theta_2, \theta_3) &= \bar{m}_2 l_1^2 + \bar{m}_4 l_4^2 + m_{g1} l_{g1}^2 \\ &\quad + m_{g3}(l_1 - d)^2 + \bar{I}_{1z} \\ &\quad + (A + \bar{I}_{2x}) \sin^2 \theta_2 + \bar{I}_{2z} \cos^2 \theta_2 \\ &\quad + I_{g3z} \cos^2(\theta_2 + \theta_3) + I_{g3x} \sin^2(\theta_2 + \theta_3) \\ M_{12}(\theta_2) &= B \cos \theta_2, M_{14} = M_{44} = I_{g4z} \end{aligned}$$

Fig. 1 Model of a pendulum having a rotational free body with inertia rotors

$$M_{22} = A + \bar{I}_{2y}, M_{23} = M_{33} = I_{g3y}$$

$$\begin{aligned} h_1(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3) &= -B(\sin \theta_2) \dot{\theta}_2^2 \\ &\quad + 2E(\sin \theta_2 \cos \theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\quad + 2F\{\sin(\theta_2 + \theta_3)\cos(\theta_2 + \theta_3)\} \dot{\theta}_1(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \\ &\quad + \{C \sin \theta_1 + (D + m_{g3}l_2)\cos \theta_1 \sin \theta_2\}g \end{aligned}$$

$$h_2(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dot{\theta}_1) = -\{E \sin \theta_2 \cos \theta_2$$

$$+ F \sin(\theta_2 + \theta_3)\cos(\theta_2 + \theta_3)\} \dot{\theta}_1^2$$

$$+ (D + m_{g3}l_2)(\sin \theta_2 \cos \theta_2)g$$

$$h_3(\theta_2, \theta_3, \dot{\theta}_1) = -F\{\sin(\theta_2 + \theta_3)\cos(\theta_2 + \theta_3)\} \dot{\theta}_1^2$$

ただし、

$$\bar{m}_2 = m_2 + m_{g2} + m_c + m_{g2} + m_3, \bar{m}_4 = m_4 + m_{g4}$$

$$\bar{I}_{1z} = I_{1z} + I_{g1z} + I_{4z} + I_{g4z}$$

$$\bar{I}_{2j} = I_{2j} + I_{g2j} + I_{3j} + I_{g3j} + I_{cj} + I_{gcj}, (j = x, y, z)$$

$$A = m_{g2}l_{g2}^2 + m_3l_2^2 + m_{g3}l_2^2 + m_cl_c^2 + m_{gc}l_{gc}^2$$

$$B = Dl_1 + m_{g3}l_2(l_1 - d)$$

$$C = m_{g1}l_{g1} + \bar{m}_2l_1 + \bar{m}_4l_4 + m_{g3}(l_1 - d)$$

$$D = m_{g2}l_{g2} + m_3l_2 - m_{gc}l_{gc} - m_cl_c$$

$$E = A + \bar{I}_{2x} - \bar{I}_{2z}, F = I_{g3x} - I_{g3z}$$

l_i は長さ, m_i は質量, I_i は慣性モーメントを示す。

添字 c はカウンタウェイト, リンクを示す。これらは各関節での値を示し、リンク重心においては添字に g を付加している。なお、慣性モーメントについては、すべての関節角度がない場合を基準として、 x, y, z の添字を付加して各軸まわりの主慣性モーメントとする。 d は G_3J_3 間の長さである。

3. スライディングモードによる計算トルク制御

得られた運動方程式から、制御量の加速度に対する線形化と線形化補償器を構成する。制御量 θ_1, θ_2 に関して u_1, u_2 を入力とする線形系を考える。 $i=1, 2$ とする。

$$\ddot{\theta}_i = u_i \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(2), (3)からモータへの入力であるトルク τ_1, τ_2 は次式のように得られる。これが線形化補償器となり、動的モデルを元にした計算トルク制御となる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} m_{13} & m_{14} \\ m_{23} & m_{24} \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \right. \\ &\quad \left. + \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \end{bmatrix} \hat{H}(\theta, \dot{\theta}) \right\} \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ただし、 m_{ij} は $\hat{M}(\theta_2, \theta_3)$ の逆行列成分である。このときの指令トルク $\tau (= \tau_1 \text{ または } \tau_2)$ の大きさは軸出力トルクの指令値である。モータの軸出力トルクは、以下に示す DC モータの特性より、角速度が飽和すると発生できなくなり、また、最大値を越えることはできない。

i_a を電流, K_g をギア比, K_m をトルク定数 (逆起電力定数), ξ をギアの摩擦トルクを考慮したギアヘッド効率とすると, 軸出力トルク τ は次式となる.

$$\tau = \xi K_g K_m i_a \quad \dots\dots\dots (5)$$

モータの端子間電圧 v_a は, R_a をモータの端子間抵抗とし, 回路のインダクタンスを小さいとして省略すると, 電圧の釣合いから次式となる.

$$v_a = R_a i_a + K_g K_m \dot{\theta} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式(5), (6)より軸出力トルク τ , 端子間電圧 v_a および角速度 $\dot{\theta}$ の関係が得られる.

$$\tau = \left\{ \frac{K_g K_m}{R_a} v_a - \frac{K_g^2 K_m^2}{R_a} \dot{\theta} \right\} \xi \quad \dots\dots\dots (7)$$

式(7)の軸出力トルクがゼロとなるとき, 端子間電圧の最大値より最大角速度が制限される. すなわち, 149 rpm で角速度が飽和すると軸出力トルクは発生しない. また, 式(5)の電流の最大値より最大軸出力トルクが制限されるが, 減速ギアの許容トルク (断続) の方が低い値なので, この値 3.37 Nm を軸発生トルクの最大値とした. 式(3)の線形系をもとに制御量 $\theta (= \theta_1$ または $\theta_2)$ が目標値 $\theta_d (= \theta_{1d}$ または $\theta_{2d})$ にそれぞれ追従するようなサーボコントローラを作成する. サンプルングタイムを T , タイムステップを $k = 0, 1, 2 \dots$ とし, 目標値と制御量の偏差に対する離散化状態式を求める.

$$E_{k+1} = P E_k - q \bar{u}_k \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで,

$$E_k = \begin{bmatrix} e_k \\ \dot{e}_k \end{bmatrix}, \quad P = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad q = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} T^2 \\ T \end{bmatrix}$$

$$e_k = \theta_{dk} - \theta_k, \quad \dot{e}_k = \dot{\theta}_{dk} - \dot{\theta}_k, \quad \bar{u}_k = u_k - \ddot{\theta}_{dk}$$

偏差をゼロとするようなスライディングモードによるコントローラを求める. スカラーベクトル $S = [s_1 \ s_2]$ を用いて切換関数 σ_k を定義する. σ_k はゼロのとき切換線, ゼロに向かうとき滑り線となる.

$$\sigma_k = S E_k \quad \dots\dots\dots (9)$$

入力 $\bar{u}_k$ を次の形とする. $\bar{u}_{eqk}$ は切換線における等価入力であり, $\bar{u}_{nlk}$ は滑り線に到達するように作動する非線形入力である.

$$\bar{u}_k = \bar{u}_{eqk} + \bar{u}_{nlk} \quad \dots\dots\dots (10)$$

スライディングモード状態では, 切換線上にあるので, $\sigma_k = \sigma_{k+1}$ となり, これより等価入力 $\bar{u}_{eqk}$ が求まる.

$$\bar{u}_{eqk} = (S q)^{-1} S (p - I) E_k \quad \dots\dots\dots (11)$$

滑り線を行き過ぎずに滑り状態に到達させるには, $\sigma_k > 0$ のとき $0 \leq \sigma_{k+1} \leq \sigma_k$, $\sigma_k < 0$ のとき $\sigma_k \leq \sigma_{k+1} \leq 0$ の条件が必要であり, これより非線形入力 $\bar{u}_{nlk}$ が求

まる.

$$\bar{u}_{nlk} = \eta (S q)^{-1} \sigma_k, \text{ for } 0 < \eta < 1 \quad \dots\dots\dots (12)$$

コントローラは, 以上の式(8)から(12)までの関係を使用してスライディングモードゲイン K_{S1} , K_{S2} の形で求めることができる.

$$u_k = K_{S1} e_k + K_{S2} \dot{e}_k + \ddot{\theta}_{dk} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ただし,

$$K_{S1} = \frac{(\eta/T)}{0.5T + (s_2/s_1)}, \quad K_{S2} = \frac{1 + (\eta/T)(s_2/s_1)}{0.5T + (s_2/s_1)}$$

4. 実験結果

振り子の長さ ($= l_1$) 0.5 m, 物体の張出し長さ ($= l_2$) 0.2 m の実験モデル写真を図2に示す. 姿勢制御用ロータの張出し長さは 0.15 m, 質量 ($= m_{g3}$) 1.5 kg, 動揺制御用ロータの張り出し長さは 0.14 m, 質量 ($= m_{g4}$) 1.2 kg であり, それぞれ 10 W モータにて駆動される.

θ_1 の目標値はゼロで安定化をはかり, θ_2 は目標値 θ_{2d} に追従するように制御する. とともに同じスライディングモードゲインを使用し, サンプルングタイム 0.01 秒, $\eta = 1$, $s_2/s_1 = 0.1$ とした. 算出されたスライディングモードゲインは $K_{S1} = 952.38$, $K_{S2} = 104.76$ である. 入力 u_{1k} , u_{2k} は次式となる.

$$\begin{aligned} u_{1k} &= -K_{S1} \theta_{1k} - K_{S2} \dot{\theta}_{1k} \\ u_{2k} &= K_{S1} e_{2k} + K_{S2} \dot{e}_{2k} + \ddot{\theta}_{2dk} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ただし,

$$e_{2k} = \theta_{2dk} - \theta_{2k}, \quad \dot{e}_{2k} = \dot{\theta}_{2dk} - \dot{\theta}_{2k}$$

上式の入力により, トルク τ_1 , τ_2 を計算し, モーター指令電圧を実験モデルに与える. その結果ポテンシオメータにより θ_1 , θ_2 , DC タコにより $\dot{\theta}_3$, $\dot{\theta}_4$ が計測される. 計算に使用した角速度の推定値 $\hat{\theta}_{1k}$, $\hat{\theta}_{2k}$, 角度の推定値 $\hat{\theta}_{3k}$, $\hat{\theta}_{4k}$ は次のようにした.

Fig. 2 Photograph

(a) Swing control

(b) Attitude position control

Fig. 3 Control for various swing disturbances

$$\begin{aligned}\hat{\theta}_{ik} &= \frac{1}{T}(\theta_{ik} - \theta_{i,k-1}) + \frac{1}{2}Tu_{i,k-1}, \text{ for } i=1, 2 \\ \hat{\theta}_{ik} &= \hat{\theta}_{i,k-1} + \hat{\theta}_{ik}T, \text{ for } i=3, 4\end{aligned}\quad \dots\dots\dots (15)$$

以下に実験結果を述べる。図3は、 θ_2 の姿勢30度位置決めと θ_1 の動揺安定化で揺れ外乱の大きさを10, 20, 30度と変えたときの同時制御結果である。揺れ外乱は実験開始から約5秒後に与えている。 θ_1 は、最初の頃は θ_2 の姿勢変化に関わらず安定しており、揺れ外乱が加わるとその値が大きくなるほど減衰振動の回数が増加し、安定化までの時間がかかる。 θ_2 は約1秒で目標値30度に達し、その後、揺れ外乱の大きさが10, 20度のときは外乱に関わりなく姿勢を維持しているが、外乱の大きさが30度のときは、目標角からはずれ制御できなくなっている。動揺防止との同時フィードバックにより、図4に示すように、姿勢制御用ロータの角速度が飽和したためである。すなわち、揺れ外乱が大きいと安定化に時間がかかり、式(14)のフィードバック加速度により式(4)のトルク τ_1 が発生し続け、その結果、角速度が飽和することになる。このとき、式(7)から軸出力トルクは零となり、式(4)の指令トルクは出せない状態となる。揺れ外乱が20度の

Fig. 4 Angular velocity change of attitude control rotor (swing disturbance 30 deg.)

ときの姿勢維持定常状態での姿勢用慣性ロータの角速度 $\dot{\theta}_3$ は約600 deg/sであり、揺れ外乱が30度の図4の飽和角速度約800 deg/sと比較すれば、この実験での揺れ外乱は27度付近が制御できる限界と思われる。したがって、揺れが安定化するまでの間に姿勢制御用ロータの角速度が飽和しないことが同時制御に必要であり、飽和させないためには、慣性モーメント増加による回転数低下または最大回転数の増加が考えられるが、これらは揺れ外乱の大きさに関係する。そこで、姿勢制御用ロータの角速度の飽和が生じる条件と対象モデルの主要なパラメータとの関係を検討するため、運動方程式の式(1)を下記のように簡単化する。

$$\left. \begin{aligned}\bar{M}_{11}\ddot{\theta}_1 + \bar{M}_{44}\ddot{\theta}_4 + \bar{h}_1 &= 0 \\ \bar{M}_{22}\ddot{\theta}_2 + \bar{M}_{33}\ddot{\theta}_3 + \bar{h}_2 &= 0 \\ M_{33}(\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) &= \tau_1 \\ M_{44}(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_4) &= \tau_2\end{aligned}\right\} \dots\dots\dots (16)$$

ただし、

$$\begin{aligned}\bar{M}_{11} &= \bar{m}_2 l_1^2 + (A + \bar{I}_{2x})\sin^2 \theta_2 + \bar{I}_{2x} \cos^2 \theta_2 \\ \bar{M}_{22} &= A + \bar{I}_{2y} \\ \bar{h}_1 &= 2E(\sin \theta_2 \cos \theta_2)\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \bar{m}_2 l_1 (\sin \theta_1)g \\ \bar{h}_2 &= -E(\sin \theta_2 \cos \theta_2)\dot{\theta}_1^2\end{aligned}$$

$\bar{M}_{11}$ は振り子揺れ角 θ_1 回転軸、 $\bar{M}_{22}$ はつり荷姿勢角 θ_2 回転軸、 M_{33} は姿勢用慣性ロータ角 θ_3 回転軸、 M_{44} は姿勢用慣性ロータ角 θ_4 回転軸の各軸まわりの慣性モーメントであり、 $\bar{h}_1$ はコリオリ力と重力、 $\bar{h}_2$ は揺れの遠心力成分である。さらに、式(16)において、 $\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 \approx \ddot{\theta}_3$ 、 $\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_4 \approx \ddot{\theta}_4$ とし、線形系の式(3)を考慮すると次式となる。

$$\bar{M}_{11}u_1 + \bar{h}_1 = -\tau_2 = -M_{44}\ddot{\theta}_4 \dots\dots\dots (17)$$

$$\bar{M}_{22}u_2 + \bar{h}_2 = -\tau_1 = -M_{33}\ddot{\theta}_3 \dots\dots\dots (18)$$

式(17)は揺れ、式(18)は姿勢の運動方程式とロータ反力との釣合いをそれぞれ表す。式(14)のフィードバック入力 u_1 と u_2 をこれらの式に与えれば制御が

行われる。式(17)から、揺れは $\bar{M}_{11}$ の慣性モーメントと $\bar{h}_1$ のコリオリ力にてつり荷姿勢と関係し、姿勢の変化に応じて揺れを制御する必要がある。一方、式(18)から、姿勢は $\bar{h}_2$ の揺れの遠心力成分と関係しており、 $\dot{\theta}_1$ は姿勢制御のときの揺れ外乱となる。 $\bar{h}_2$ の式の形から、 θ_2 が零または90度の整数倍のときには遠心力成分はないが、45度のとき最大となること、およびつり荷形状が直方体のごとく θ_2 回転面内の2つの慣性モーメント主軸に差があるときに生じることがわかる。よって、大きな回転慣性を有する直方体形状つり荷が、大きな揺れ外乱を受けながら揺れ方向に斜めの姿勢を取ろうとすると、姿勢用慣性ロータの角速度の飽和が生じ、制御ができなくなると考えられる。図5は、揺れ外乱20度のときの制御偏差の位相平面である。姿勢角 θ_2 に関する偏差位相平面から、スライディングモードに到達し滑って行くようすがよくわかる。図6は、 θ_2 の正弦波軌道の姿勢追従と θ_1 の動揺安定化で、揺れ外乱が20度のときの同時制御結果である。正弦波軌道は振幅45度、周期16秒とし、揺れ外乱は実験開始から約5秒後に与えている。図6には動揺安定化用ロータを効かせない場合も示している。動揺安定化用のロータを効かせたとき、 θ_1 は外乱

により揺れが生じるが、数回の減衰動揺後、安定化している。 θ_2 は揺れ外乱に関わらず正弦波軌道に追従している。動揺安定化用ロータのモータ電源をオフにして効かせないときは、 θ_1 は揺れ外乱によっていつまでも動揺し、 θ_2 は揺れ外乱を与えてから2秒後に姿勢制御用ロータの角速度が飽和したため目標軌道からはずれ制御できず、同時制御においては、動揺安定化用ロータは姿勢制御用ロータと関係していることがわかる。

5. ま と め

つり荷を簡易化した回転自由な物体をもつ振り子の回転姿勢と動揺防止の同時制御について、2つの慣性ロータを用いた実験およびシミュレーションを行った。この結果を以下にまとめる。

(1) 物体の回転姿勢と振り子の動揺について、スライディングモードによる線形フィードバック角加速度をもとに慣性ロータの計算トルク制御を行い、位置決めと正弦波軌道追従の回転姿勢と揺れ外乱に対する動揺防止の同時制御が可能であることを示した。

(2) 振り子の揺れ外乱の大きさを変えた実験から、大きな揺れ外乱に対しては同時制御ができないこ

(a) Swing angle error

(b) Attitude angle error

Fig. 5 Error phase plane (swing disturbance 20 deg.)

(a) Swing control

(b) Attitude sin trajectory control

Fig. 6 Control with and without anti-swing rotor

とがわかった。これは動揺防止制御が間に合わず揺れが姿勢制御に影響したため、姿勢制御用の慣性ロータの回転速度が飽和するからである。

(3) 形状が直方体のごとく、姿勢回転面内の2つの主慣性モーメントに差があるつり荷が、揺れ方向に斜めの姿勢を取ろうとするとき、揺れの遠心力成分が姿勢制御に作用することを明らかにした。

(4) 揺れが安定化するまでの間に姿勢制御用の慣性ロータの回転速度が飽和しないことが同時制御に必要なである。

なお、今回は揺れが1方向に限定した簡易モデルとしたが、これからは2方向動揺成分を有するつり荷モデルの姿勢と動揺の同時制御を行う予定である。

文 献

- (1) 白井潤二・ほか7名, コンテナクレーンの振れ止め制御技術の実用化, 機論, **59**-561, C(1993), 1443-1447.
- (2) Hartog, Den., J. P., 機械振動論, 改訂版, 谷口修・藤井澄二訳, (1960), 115, コロナ社.
- (3) 神吉博・ほか5名, CMG クレーン用吊荷制御装置の開発, 機講論, No. 95-8, B(1995-8), 34-37.
- (4) 松久寛・ほか4名, 索道搬器の動吸振器による制振, 機論, **59**-562, C(1993), 1717-1722.
- (5) 小林信之・ほか3名, 宇宙ロボットの姿勢制御, 機論, **60**-577, C(1994), 3138-3143.
- (6) 辻田勝吉・土屋和雄, ホイールを用いた二脚歩行機械の動力学解析と歩行制御, 機論, **60**-578, C(1994), 3452-3459.
- (7) Kanzaki, K., ほか2名, Swinging-Up Motion and Upside-Down Standing of Pendulum with Inertia Rotor, *Proc. Int. Sym. on Meas. and Cont. in Robotics* (1993), TC 17 Cm., **19**-24. Workshop on Intelligent Robots and Systems (1994), 314-321.
- (8) 高橋安人, デジタル制御, (1987), 97, 岩波書店.
- (9) 古田勝久・森貞雅博, 離散系のスライディングモードコントロール, 計測自動制御学会論文集, **25**-5(1989), 574-578.
- (10) 野波健蔵・田宏奇, スライディングモード制御, (1994), 191, コロナ社.
- (11) Craig, J. J., Introduction to ROBOTICS-mechanics and control (2nd ed.), (1989), 332-359, Addison-Wesley.
- (12) 川崎晴久, ロボット工学の基礎, (1991), 22, 森北出版.