慣性ロータを用いた剛体吊り荷の回転と揺れの防止制御*

吉田靖夫^{*1}, 矢島三代佳^{*2}

Control of Rotation and Swing of a Rigid Body Suspended Load Using Inertia Rotors

Yasuo YOSHIDA^{*3} and Miyoka YAJIMA^{*3} Department of Mechanical Engineering, Chubu University,
1200 Matsumoto-cho, Kasugai-shi, Aichi, 487-8501 Japan

This paper describes rotational control and swing suppression of a crane suspended load model. A rotational free rigid body suspended by a single rope is controlled using three inertia rotors. Fiber optical gyros installed on the suspended load are used to measure the load orientation angles. Controlling angles and angular velocities are obtained from measured data using the conversion between zxy and zxz Euler angles and the driving system of the inertia rotors are developed based on the coupling dynamics. Experiments and simulations show that the rotational orientation is controlled without problems, but swing control is possible under some limit conditions of the load mass size and the rope length, since the gravity force act on the swing motion.

Key Words: Swing, Rotation, Suspended Load, Regulator Control, Pole Assignment, Inertia Rotor, Crane, Dynamic Coupling, Rigid Body

1. 結 言

クレーンの吊り荷は、ブーム移動や風などの外乱を受け回転と揺れを生じ易い。その回転姿勢保持と揺れ防止は組立作業上重要である。揺れに関してはクレーン操作により揺れをある程度小さくできるが、熟練操作可能なオペレータは限定される。また姿勢制御に関しては、コントロールモーメントジャイロを用いたクレーン吊り荷姿勢制御装置^①が開発されているが、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。従って、簡単な機構で精度の良い高効率な姿勢制御と揺れ止め機構が吊り荷に必要である。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り付け位置によらない長所がある。筆者ら^{②~④}は、吊り荷を簡易化した回転自由な物体をもつ振り子に関して、慣性ロータを用いた振り子の回転姿勢と動揺防止の同時制御が可能であることを明らかにしている。

ここでは、一本のロープに吊り下げられた吊り荷の剛体を取り上げ、吊り荷に設置した慣性ロータを駆動することにより、吊り荷の姿勢と揺れを制御する。モデルは6自由度（吊り荷の3自由度と慣性ロータの3自由度）で、そのうちの吊り荷の動揺2自由度と回転姿勢の1自由度を3個の慣性ロータ駆動でもって動的干渉によるフィードバック制御を試みる。棒を用いた振り子モデルでは2次元面内揺れおよび先端剛体回転の制御を行い、それらの制御量は直接計測可能であった。本論文では、ロープで吊られた吊り荷モデルを対象として、その3次元揺れおよび吊り荷剛体の回転姿勢制御の課題に対して、ポテンショメータによる直接的な計測が困難であるため、制御を行うための計測値として吊り荷に設けたファイバージャイロを用いる。吊り荷の制御量はファイバージャイロの計測値と直接対応せず、制御量はオイラー角の変換を用いて求め、得られた制御量とロータの動的干渉を考慮して慣性ロータを駆動するシステムの開発を目的とする。

2. 吊り荷モデルと運動方程式

図1は吊り荷モデルと角度変数である。図1は、上端で支持された一本のロープに剛体吊り荷が吊り下げられた静止状態を示す。吊り荷にはピッチ、ロール

* 原稿受付 2001年8月29日。

^{*1} 正員、中部大学工学部(☎487-8501 春日井市松本町1200)。^{*2} (株)山田ドビー(☎494-8511 尾西市玉野下新田35)。

E-mail: yyoshida@isc.chubu.ac.jp

揺れ用, ヨー回転姿勢用の慣性ロータが設置されており, それぞれ x, y, z 軸まわりに回転駆動される。

図2は, 吊り荷の角度変数を示す。 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ は xy オイラー角を表し, 制御変数である。 θ_1 の目標値は回転姿勢角 θ_{1d} で, θ_2, θ_3 の目標値は揺れ角ゼロである。 $\bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2, \bar{\theta}_3$ は zxz オイラー角を表し, $\bar{\theta}_2$ は揺れ振幅角を表す。 $\theta_4, \theta_5, \theta_6$ は慣性ロータ角である。 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ は吊り荷の角速度を示す。 慣性ロータはヨー, ピッチ, ロールの各軸まわりのトルク τ_1, τ_2, τ_3 により駆動され, 角速度は $\omega_z + \dot{\theta}_4, \omega_x + \dot{\theta}_5, \omega_y + \dot{\theta}_6$ である。 運動方程式は下記のように表せる。

$$\begin{bmatrix} M_{cc} & M_{cf} \\ M_{fc} & M_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_c \\ \ddot{q}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_c \\ h_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{0} \\ \bar{\tau} \end{bmatrix} \quad \cdots(1)$$

ここで,

$$q_c = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T, \quad q_f = [\theta_4 \ \theta_5 \ \theta_6]^T,$$

$$h_c = [h_1 \ h_2 \ h_3]^T, \quad h_f = [h_4 \ h_5 \ h_6]^T,$$

$$\bar{0} = [0 \ 0 \ 0]^T, \quad \bar{\tau} = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T,$$

q_c は制御角, q_f は自由角ベクトルで, 添字 c は制御, f は自由を表す。 また, q_c は非駆動角, q_f は駆動角ベクトルである。

$M_{cc}, M_{cf} (= M_{fc}^T), M_{ff}$ はそれぞれ 3×3 の慣性行列で, M_{ff} 以外は θ_2, θ_3 の関数である。 なお, 下記にて C_i と S_i は $\cos \theta_i$ と $\sin \theta_i$ ($i = 1, 2, 3$) を表す。

$$M_{cc} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{12} & m_{22} & 0 \\ m_{13} & 0 & m_{33} \end{bmatrix}, \quad M_{cf} = M_{fc}^T = \begin{bmatrix} m_{14} & m_{15} & m_{16} \\ m_{24} & m_{25} & 0 \\ 0 & 0 & m_{36} \end{bmatrix},$$

$$M_{ff} = \begin{bmatrix} m_{44} & 0 & 0 \\ 0 & m_{55} & 0 \\ 0 & 0 & m_{66} \end{bmatrix},$$

$$m_{11} = ml^2(S_2^2 C_3^2 + S_3^2) + (I_x + I_{R1})C_2^2 S_3^2 + (I_y + I_{R2})S_2^2 + (I_z + I_{R3})C_2^2 C_3^2,$$

$$m_{12} = -(ml^2 + I_x + I_{R1} - I_z - I_{R3})C_2 C_3 S_3,$$

$$m_{13} = (ml^2 + I_y + I_{R2})S_2, \quad m_{14} = I_{R3}C_2 C_3, \quad m_{15} = -I_{R1}C_2 S_3,$$

$$m_{16} = I_{R2}S_2, \quad m_{22} = -(ml^2 + I_x + I_{R1} - I_z - I_{R3})C_2 C_3 S_3,$$

$$m_{24} = I_{R3}S_3, \quad m_{25} = I_{R1}C_3, \quad m_{33} = ml^2 + I_y + I_{R2},$$

$$m_{36} = m_{66} = I_{R2}, \quad m_{44} = I_{R3}, \quad m_{55} = I_{R1}.$$

h_c, h_f はコリオリ力, 遠心力, 重力を含むベクトルで, $\theta_2, \theta_3, \dot{\theta}_i$ ($i = 1 \sim 6$) の関数である。

$$h_1 = \alpha_{12}\dot{\theta}_2^2 + \beta_{11}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \beta_{12}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 + \beta_{16}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 + \beta_{17}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_4 + \beta_{18}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_5, \\ + \beta_{19}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_6 + \beta_{110}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_4 + \beta_{111}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_5,$$

$$h_2 = \alpha_{21}\dot{\theta}_1^2 + \beta_{22}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 + \beta_{23}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_4 + \beta_{24}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_5 + \beta_{25}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_6 + \beta_{26}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3, \\ + \beta_{210}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_4 + \beta_{211}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_5 + mglC_3S_2,$$

$$h_3 = \alpha_{31}\dot{\theta}_1^2 + \alpha_{32}\dot{\theta}_2^2 + \beta_{31}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \beta_{33}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_4 + \beta_{34}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_5 + \beta_{37}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_4, \\ + \beta_{38}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_5 + mglC_2S_3,$$

$$h_4 = \beta_{41}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \beta_{42}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 + \beta_{46}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3,$$

$$h_5 = \beta_{51}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \beta_{52}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 + \beta_{56}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3, \quad h_6 = \beta_{61}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2,$$

$$\alpha_{12} = (ml^2 + I_x + I_{R1} - I_z - I_{R3})C_3S_2S_3,$$

$$\alpha_{21} = \{(I_x + I_{R1})S_3^2 - I_y - I_{R2} + (-ml^2 + I_z + I_{R3})C_3^2\}C_2S_2,$$

$$\alpha_{31} = -(ml^2 + I_x + I_{R1} - I_z - I_{R3})C_2^2C_3S_3,$$

$$\alpha_{32} = (ml^2 + I_x + I_{R1} - I_z - I_{R3})C_3S_3,$$

$$\beta_{11} = -\{(I_x + I_{R1})S_3^2 - I_y - I_{R2} + (-ml^2 + I_z + I_{R3})C_3^2\}2C_2S_2,$$

$$\beta_{12} = (ml^2 + I_x + I_{R1} - I_z - I_{R3})2C_2^2C_3S_3,$$

Fig.1 Suspended load model using inertia rotors

Fig.2 Coordinates and angles of the suspended load model

$$\begin{aligned}
\beta_{16} &= \{(ml^2 + I_x + I_{R1} - I_z - I_{R3})(S_3^2 - C_3^2) + ml^2 + I_y + I_{R2}\}C_2, \\
\beta_{17} &= \beta_{41} = -I_{R3}C_3S_2, \beta_{18} = \beta_{51} = I_{R1}S_2S_3, \beta_{19} = I_{R2}C_2, \\
\beta_{110} &= \beta_{33} = -\beta_{42} = I_{R3}C_2S_3, \beta_{111} = -\beta_{34} = \beta_{52} = -I_{R1}C_2C_3, \\
\beta_{22} &= \{(ml^2 + I_x + I_{R1} - I_z - I_{R3})(S_3^2 - C_3^2) - ml^2 - I_y - I_{R2}\}C_2, \\
\beta_{23} &= I_{R3}C_3S_2, \beta_{24} = -I_{R1}S_2S_3, \beta_{25} = -\beta_{61} = -I_{R2}C_2, \\
\beta_{26} &= -(ml^2 + I_x + I_{R1} - I_z - I_{R3})2C_3S_3, \\
\beta_{210} &= -\beta_{37} = \beta_{46} = I_{R3}C_3, \beta_{211} = -\beta_{38} = \beta_{56} = -I_{R1}S_3, \\
\beta_{31} &= \{-(ml^2 + I_x + I_{R1} - I_z - I_{R3})(S_3^2 - C_3^2) + ml^2 + I_y + I_{R2}\}C_2.
\end{aligned}$$

3. 制 御 方 法

ここでは、制御角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ が目標値 $\theta_{1d}, \theta_{2d}, \theta_{3d}$ に追従するような制御角加速度（サーボコントローラ） $\ddot{\theta}_1, \ddot{\theta}_2, \ddot{\theta}_3$ を用い、モータ駆動角 $\theta_4, \theta_5, \theta_6$ の角速度 $\dot{\theta}_4, \dot{\theta}_5, \dot{\theta}_6$ をモータに与える速度指令形のサーボシステムとした。この場合、モータ駆動角 $\theta_4, \theta_5, \theta_6$ は制御量ではないため、運動方程式から計算して推定角加速度 $\ddot{\theta}_4, \ddot{\theta}_5, \ddot{\theta}_6$ を求め、これを積分して指令角速度 $\dot{\theta}_4, \dot{\theta}_5, \dot{\theta}_6$ を得ることができる。このとき用いる運動方程式は、制御角とモータ駆動角との動的干渉性をあらわす右辺トルクが零の(1)式の上半分である。なお、トルク制御の場合は、運動方程式のトルクを計算しモータ指令トルクとしてモータに与えることになるが、速度制御の場合は上半分のみ用いることになる。以下に具体的に示す。

はじめに、制御角 q_c を新しい制御入力 u_c を用いて線形化する。

$$\ddot{q}_c = u_c = [u_1 \quad u_2 \quad u_3]^T \quad \cdots(2)$$

この線形系をもとに、制御角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ が目標値 $\theta_{1d}, \theta_{2d}, \theta_{3d}$ に追従するようなデジタルサーボコントローラを作成する。

$$u_{ik} = K_{1i}e_{ik} + K_{2i}\dot{e}_{ik} + \ddot{\theta}_{idk} \quad (\text{for } i=1\sim 3) \quad \cdots(3)$$

ここで $e_{ik} = \theta_{idk} - \theta_{ik}$ は $k=1,2,\dots$ の時系列に対する目標値と制御角との偏差、 K_{1i}, K_{2i} は極指定デジタルレギュレータゲインである。つぎに、自由角である慣性ロータ駆動角 q_f の推定角加速度を $\hat{u}_f$ とする。

$$\ddot{q}_f = \hat{u}_f = [\hat{u}_{4k} \quad \hat{u}_{5k} \quad \hat{u}_{6k}]^T \quad \cdots(4)$$

(2), (4) 式を(1)式に代入して、右辺のトルクがゼロである運動方程式上半分の関係式を示す。

$$M_{cc}u_c + M_{cf}\hat{u}_f + h_c = \bar{0} \quad \cdots(5)$$

(5)式は制御角 q_c と自由角 q_f との動的干渉性を示し、線形化補償となる。これを利用して、推定角加速度 $\hat{u}_f$ を求める。

$$\hat{u}_f = -M_{cf}^{-1}(M_{cc}u_c + h_c) \quad \cdots(6)$$

q_f は駆動角であるので、(6)式を積分して指令速度 $\dot{q}_f = \bar{v}_k = [v_{4k} \quad v_{5k} \quad v_{6k}]^T$ を求める。

$$\bar{v}_k = \bar{v}_{k-1} + \hat{u}_f T \quad \cdots(7)$$

吊り荷内に搭載されたファイバージャイロを2つ使用して計測する。1つは $\bar{\theta}_{13}$ について $\pm 180^\circ$ 範囲を計測し、もう1つは θ_2, θ_3 について $\pm 45^\circ$ 範囲と角速度 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ を計測する。(3)式のコントローラで使用する制御量 $\theta_i, \dot{\theta}_i (i=1\sim 3)$ は、ファイバージャイロにて直接計測できないので、次のような手順にて求めた。制御角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ は zxy オイラー角、 $\bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2, \bar{\theta}_3$ は zxz オイラー角であるので相互に変換することができる。

$$\begin{aligned}
\bar{\theta}_1 &= \bar{\theta}_{13} - \bar{\theta}_3 \\
\bar{\theta}_2 &= \cos^{-1}(C_2C_3) \\
\bar{\theta}_3 &= A \tan 2(-C_2S_3, S_2)
\end{aligned} \quad \cdots(8)$$

θ_2, θ_3 はファイバージャイロによって計測されている。 θ_1 は(8)式を用いて求めることができる。

$$\theta_1 = A \tan 2(\bar{C}_1\bar{S}_3 + \bar{S}_1\bar{C}_2\bar{C}_3, -\bar{S}_1\bar{S}_3 + \bar{C}_1\bar{C}_2\bar{C}_3) \quad \cdots(9)$$

ただし、 $\bar{C}$ は $\cos$, $\bar{S}$ は $\sin$, 添字 i は $\bar{\theta}_i$ を表す。角速度 $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3$ は $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ および θ_2, θ_3 より求める。 T_2 は $\tan \theta_2$ である。

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -S_3/C_2 & 0 & C_3/C_2 \\ C_3 & 0 & S_3 \\ T_2S_3 & 1 & -T_2C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad \cdots(10)$$

(8), (9) 式をコントロールシステムに使用することによって、 $\bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2, \bar{\theta}_3$ および状態量 θ_1 が不安定とならない条件は、

- ① $\theta_2 = \theta_3 = 0$ のとき
 $\bar{\theta}_1 = \bar{\theta}_{13}, \bar{\theta}_2 = 0, \bar{\theta}_3 = 0, \theta_1 = \bar{\theta}_{13}$
- ② $\theta_2 = 0$ のとき
 $\bar{\theta}_1 = \bar{\theta}_{13} \pm \pi/2, \bar{\theta}_2 = \pm \theta_3, \bar{\theta}_3 = \mp \pi/2, \theta_1 = \bar{\theta}_{13}$
- ③ $\theta_3 = 0$ のとき
 $\bar{\theta}_1 = \bar{\theta}_{13}, \bar{\theta}_2 = \theta_2, \bar{\theta}_3 = 0, \theta_1 = \bar{\theta}_{13}$

である。すなわち、 θ_2, θ_3 が小さな値のとき不安定になり易く、これらの条件を考慮する必要がある。なお、(10)式においては、 θ_2 が $\pm 45^\circ$ 範囲内であるので角速度は不安定にならない。

図3に制御方式を示す。

Fig.3 Control system

4. 実験およびシミュレーション結果

実験装置写真を図4に示す。

Fig.4 Experimental suspended model's photograph

ロープ支持点から吊り荷重心点までの長さ $l = 1.71\text{m}$, 質量 $m = 19.2\text{kg}$, 吊り荷慣性モーメントが $I_x = 4.27\text{kgm}^2$, $I_y = 0.92\text{kgm}^2$, $I_z = 1.21\text{kgm}^2$, ロータ慣性モーメントが $I_{R1} = I_{R2} = I_{R3} = 0.05\text{kgm}^2$ である。モータの最大回転数は $\dot{\theta}_4 = 128\text{rpm}$, $\dot{\theta}_5 = \dot{\theta}_6 = 46\text{rpm}$ である。 θ_1 は目標値 θ_{id} に追従するように制御し、 θ_2 と θ_3 の目標値はゼロで安定化をはかる。 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ の極指定は、連続時間の極 $s_1 = -10 \pm j70$, $s_2 = -7 \pm j56$, $s_3 = -1 \pm j5$ とし、サンプリングタイム T を 0.05 秒とする離散時間に変換してデジタルゲインを求めた。シミュレーションは刻み時間 0.005 秒のルンゲクッタ法を用いた。初期状態は吊り荷を手動にて与えたため、制御ありとなしでは正確に同じ値を与えることは困難

(a) Experiment

(b) Calculation

Fig.5 Time response of θ_1

(a) Experiment

(b) Calculation

Fig.6 Time response of θ_2

(a) Experiment

(b) Calculation

Fig.7 Time response of θ_3

(a) Experiment

(b) Calculation

Fig.8 Time response of $\bar{\theta}_2$

であったが、 zxy オイラー角では、制御なしのときは $\theta_1 = 16^\circ$, $\theta_2 = 6^\circ$, $\theta_3 = 4^\circ$, 制御ありのときは, $\theta_1 = 18^\circ$, $\theta_2 = 7^\circ$, $\theta_3 = 4^\circ$ として, ほぼ同等の値とした. なお, zxx オイラー角では, 制御なしで, $\bar{\theta}_1 = 49^\circ$, $\bar{\theta}_2 = 8^\circ$, $\bar{\theta}_3 = -33^\circ$, 制御ありで, $\bar{\theta}_1 = 49^\circ$, $\bar{\theta}_2 = 8^\circ$, $\bar{\theta}_3 = -31^\circ$ に相当する. 制御角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ の目標値はすべてゼロとした. 図 5 (a), (b) は, 姿勢角 θ_1 の 3.5 秒間における実験とシミュレーションの時系列変化を示す. 実線の細線は制御なし, 太線は制御ありを示し, シミュレーションは用いた吊り荷モデルおよびその制御方法の妥当性を検証するために実験と併記しており, 以下の図も同様である. 図 5(a)の実験で制御なしの細線は初期値 16° から大きくプラス側に回転し, 8秒にて最大 46° まで達した後, 35° を中心に変動している. これは吊り荷の慣性主軸まわりの慣性モーメント I_x と I_y の差が揺れの遠心力によるヨー回転トルクを生じさせるためである⁹⁾. 図 5(b)のシミュレーションで制御なしの細線は減衰を考慮していないため実験のそれより大きく変動している. 図 5 (a), (b)の実験・シミュレーションにおいて, 慣性ロータを効かせた制御ありの太線は初期値 16° からマイナス側に回転し 0.8 秒にて目標値ゼロに到達しゼロの値を保っていることがわかる. 図 6 (a), (b)の実験・シミュレーションは, 揺れ角 θ_2 を示し, 制御なしのときはほとんど振動振幅 8° は減衰しないが, 制御ありではゼロへと収束していくことがわかる. 図 7 (a), (b)の実験・シミュレーションは, 揺れ角 θ_3 を示し, 制御ありの方が制御なしのときより少し振動振幅が大きい. しかしながら, θ_2 と θ_3 は揺れの成分であり, 揺れ振幅を直接表すのは, 図 8 における揺れ振幅 $\bar{\theta}_2$ であり, 時間と共に減少しているのがわかる. 図 8 の制御なしで揺れ振幅 $\bar{\theta}_2$ の最小値がゼロとならないのは xy 投影平面にて楕円軌道を描いているためである. 以上の結果は, 吊り荷の揺れと姿勢を慣性ロータによって制御していることを示している. 図 5 の回転姿勢では 1 秒たらずで制御されるが, 図 6~8 の揺れ制御では 30 秒以上を要している. 本実験で用いたモータの最大発生トルクは約 10Nm であり, 実験モデルの静的揺れ角に換算すると 2° 程度となるため, 初期値 8° を制御するのに時間を要したためである. 従って, 本方式の実用性からは, 回転姿勢制御に対しては問題ないと思われるが, 揺れ制御では, 重力が作用するため大きな慣性モーメント駆動可能なロータを用いるか, 質量やロープ長さが制限される吊り荷が制御対象となると考えられる.

5. 結 言

一本のロープに吊り下げられた吊り荷の剛体を取り上げ、吊り荷に設置した慣性ロータを駆動することにより、吊り荷の姿勢と揺れの制御実験とシミュレーションを行った。

(1) ロープで吊られた吊り荷モデルでは3次元揺れおよび吊り荷剛体の回転の直接的な計測が困難であるため、制御を行うための計測値として吊り荷に設けたファイバージャイロを用いた。吊り荷の制御量はファイバージャイロの計測値と直接対応せず、制御量はオイラー角の変換を用いて求め、得られた制御量とロータの動的干渉を考慮して慣性ロータを駆動するシステムを開発した。

(2) 慣性ロータ駆動方式による吊り荷制御では、回転姿勢制御は問題なく制御可能であるが、揺れ制御で

は重力が作用するため、制御対象として質量とロープ長さが制限される吊り荷となる。

なお、実際問題を想定してロープ支持点を強制変位で与える実験を予定している。

参 考 文 献

- (1) 神吉ほか5名, 機講論, 95-8(I), B, (1995-8), 34-37.
- (2) 吉田, 森, 機講論(東海支部), 973-1(1997-3), 313-314.
- (3) 吉田, 森, 機講論(東海支部), 973-1(1997-3), 313-314.
- (4) 吉田, 矢島, 機講論(東海支部), 993-1(1999-3), 97-98.
- (5) Y. Yoshida, M. Yajima, Proc. of 1999 ASME, DETC99/MONIC-8418, 1-6.
- (6) 吉田, 若松, 機論, 65-632, C(1999), 1519-1523.
- (7) 吉田, 今井, 機論, 66-642, C(2000), 561-566.