

貨物コンテナの揺れ・回転連成振動解析と制御

吉田 靖夫*, 深尾 達也**

Swing-Rotation Coupling Vibration Analysis and Control of Cargo Container

Yasuo YOSHIDA* and Tatuya FUKAO**

(Received September 15, 2000)

This paper addresses swing-rotation coupling vibration analysis and control of cargo container. The cargo container is modeled as a rectangular rigid body suspended by four ropes from the trolley traveling to the target position. Swing-rotation coupling vibration suppression is analyzed and controlled using the trolley with feedback traveling and an inertia rotor mounted on the cargo container. Velocities controlling the trolley and the inertia rotor are obtained by integrating the computed accelerations based from feedback accelerations of regulator control and the coupling characteristics of system's dynamics. Simulation results show that swing-rotation coupling vibration suppression is possible using above proposed control system.

Keywords: Swing, rotation, Coupling vibration, Cargo container, Regulator control, Inertia rotor

1. はじめに

リフトオンオフ方式のコンテナ船では、陸上のコンテナクレーンによって貨物コンテナを荷役する。船倉内にはセルガイドと称するアングル材で組み立てられたガイドレールが設けられ、貨物コンテナはセルガイドに沿って積み木を重ねるように船倉内に格納される。貨物コンテナは長さ20フィートまたは40フィートの直方体である。陸上にて、その上面4隅をクレーン治具（スプレッダ、ヘッドブロック）を介して、ロープで吊り上げられる。コンテナクレーンにてコンテナ船の上に移動後、セルガイド頂部のラッパ状のエントリーガイドにその下面4隅をあわせるよう吊り下げられた後、セルガイドに沿って船倉内に格納される。エントリーガイドにコンテナを正確に位置決めするため、揺れ止め制御技術が重要であり、これまでコンテナ吊り荷を質点単振り子モデルとした揺れ止め制御技術の研究が多くなされている^{1,2)}。しかしながら、コンテナ吊り荷の揺れに加えて回転振動³⁾に起因する荷役作業の遅れが荷役作業現場で大きな問題となっている。コンテナ吊り荷の揺れと回転の連成振動に関する研究はこれまで見受けられない。

ここでは、連成振動を正確に捉えられる解析モデルとするため、単振り子モデルではなく、コンテナ吊り荷を4本ロープで吊り下げられた直方体剛体モデルとして取り扱い、剛体吊り荷の揺れと回転を同時に防止するようなコンテナクレーン操作と慣性ロータを併用した揺れと回転の同時防止制御技術を開発することを目的とする。

2. 理 論

2.1 モデルと運動方程式

図1に貨物コンテナのモデルを示す。 $A_1-A_2-A_3-A_4$ を上面とする貨物コンテナ（質量 m 、対角線長さ b 、慣性モーメント I_x, I_z ）は、 $S_1-S_2-S_3-S_4$ を下面とする走行トロリー（質量 M ）から4本ロープ（長さ l ）にて吊り下げられている。座標系 $\hat{x}\hat{y}\hat{z}$ の原点 O は静止状態での貨物コンテナ上面中央にあり、 $\hat{z}$ 軸は重力と反対方向である。コンテナ上面中央には $\hat{z}$ 軸まわりに回転角 ρ とする慣性ロータを設置し、慣性モーメントは I_R である。トロリーは $\hat{x}$ 方向に外力 F を受けて x 変位する。コンテナは揺れ角 ψ を生じて $A_1'-A_2'-A_3'-A_4'$ の位置へ並進移動する。コンテナ上面中央 O' とトロリー下面中央 S_0' との距離はロープ長さ l である。次に、コンテナがトルク τ を受けて $\hat{K}$ 軸（ OS_0' 方向単位ベクトル）まわ

*機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

**機械工学専攻大学院学生 (Graduate Student, Department of Mechanical Engineering)

りに回転角 ϕ を生じると $A_1'' \cdot A_2'' \cdot A_3'' \cdot A_4''$ へと回転する。図中の $\hat{x}_B \hat{y}_B \hat{z}_B$ はコンテナ固定の座標系を示す。中央 O' は O_B へと回転軸方向変位 δ を生じる。図2はコンテナ上面の対角線 $A_1 \cdot O \cdot A_4$ の回転変形で、回転角 ϕ による回転軸方向変位 δ を示す。図中の θ はロープ $S_1' A_1'$ と $S_1' A_1''$ のなす角度で回転角 ϕ によって定まる。図2の二等辺三角形 $O_B \cdot A_{10}' \cdot A_1''$ で余弦定理を適用する。

$$\sin \theta = \lambda \sin \frac{\phi}{2} \quad \dots (1)$$

ここで、 $\lambda = \frac{b}{l}$ である。(1)式より、回転軸方向変位 δ が求まる。

$$\begin{aligned} \delta &= l(1 - \cos \theta) \\ &= l \left(1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \frac{\phi}{2}} \right) \approx \frac{1}{8} l \lambda^2 \phi^2 \quad \dots (2) \end{aligned}$$

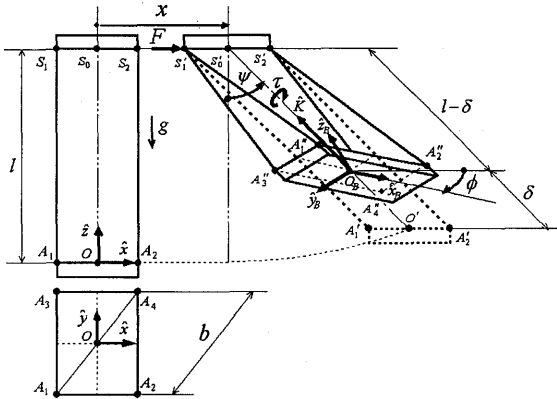


図1 モデル

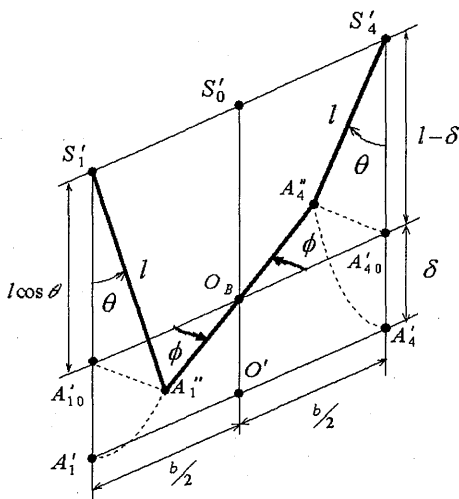


図2 回転 ϕ によるコンテナ回転軸方向変位 δ

運動エネルギー T は、トロリー移動、コンテナの移動と回転、慣性ロータの回転より成る。

$$T = \frac{1}{2} \{ M \dot{x}^2 + m v^2 + (I_z \cos^2 \psi + I_x \sin^2 \psi) \dot{\phi}^2 + I_R (\dot{\rho} + \dot{\phi} \cos \psi)^2 \} \quad \dots (3)$$

ここで、コンテナ移動速度の2乗 v^2 は下記となる。

$$v^2 = \dot{x}^2 + (l - \delta)^2 \dot{\psi}^2 + \delta^2 + 2 \dot{x} \{ (l - \delta) \dot{\psi} \cos \psi - \dot{\delta} \sin \psi \}$$

ポテンシャルエネルギー U はコンテナ上昇位置より求まる。

$$U = mg \{ l - (l - \delta) \cos \psi \} \quad \dots (4)$$

以上の(3)式の運動エネルギー T 、(4)式のポテンシャルエネルギー U に(2)式の関係を用いてラグランジュの運動方程式を求める。なお、揺れ角 ψ と回転角 ϕ の値は大きくないとして高次の微少量は省略している。

$$\begin{bmatrix} ml^2 & 0 & ml & 0 \\ 0 & I_z + I_R & 0 & I_R \\ ml & 0 & M + m & 0 \\ 0 & I_R & 0 & I_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\psi} \\ \ddot{\phi} \\ \ddot{x} \\ \ddot{\rho} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_\psi \\ h_\phi \\ h_x \\ h_\rho \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F \\ \tau \end{bmatrix} \quad \dots (5)$$

ここで、

$$h_\psi = (I_z - I_x + I_R) \psi \dot{\phi}^2 - \frac{1}{2} m b^2 \phi \dot{\psi} \dot{\phi} + I_R \psi \dot{\phi} \dot{\rho} + m g l \psi$$

$$\begin{aligned} h_\phi &= \frac{1}{4} m b^2 \phi \dot{\psi}^2 + \frac{\lambda^2}{16} m b^2 \phi \dot{\phi}^2 - 2(I_z - I_x + I_R) \psi \dot{\psi} \dot{\phi} \\ &\quad - I_R \psi \dot{\psi} \dot{\rho} + \frac{\lambda^2}{4} m g l \phi \end{aligned}$$

$$h_x = -m l \psi \dot{\psi}^2 - \frac{\lambda^2}{4} m l \psi \dot{\phi}^2 - \frac{\lambda^2}{2} m l \phi \dot{\psi} \dot{\phi}$$

$$h_\rho = -I_R \psi \dot{\psi} \dot{\phi}$$

非線形項の $h_\psi, h_\phi, h_x, h_\rho$ は、遠心力、コリオリ力、重力を含み $\psi, \phi, \dot{\psi}, \dot{\phi}, \dot{\rho}$ の関数である。

2.2 制御方法

制御量は、 ψ, ϕ, x の3変数である。それぞれの目標値は $\psi = \phi = 0$, $x = x_d$ とする。制御操作は、トロリーと慣性ロータに指令速度 $\dot{x}, \dot{\rho}$ を与える方式とする。

2.2.1 コンテナ回転の制御

コンテナ回転角 ϕ の角加速度について制御入力 u_ϕ を用いて線形化する。

$$\ddot{\phi} = u_{\phi} \quad \dots(6)$$

この(6)式に対して、閉ループ系S平面での安定極 $s = \sigma(1 \pm j\bar{k})$, ($\sigma < 0$) を指定して回転角 ϕ がゼロとなる連続時間のレギュレータ制御が考えられるが、ここではサンプリングタイムを T , タイムステップを $k = 0, 1, 2, \dots$ とし、離散時間のレギュレータ制御 $u_{\phi k}$ を行う。

$$u_{\phi k} = -K_{\phi 1}\phi_k - K_{\phi 2}\dot{\phi}_k \quad \dots(7)$$

ここで、 $K_{\phi 1} = \{1 - 2e^{\sigma T} \cos(\sigma \bar{k} T) + e^{2\sigma T}\} / T^2$

$$K_{\phi 2} = \{3 - 2e^{\sigma T} \cos(\sigma \bar{k} T) - e^{2\sigma T}\} / 2T$$

次に、慣性ロータ回転角 ρ の角加速度を u_{ρ} とする。

$$\ddot{\rho} = u_{\rho} \quad \dots(8)$$

(6),(8)式を運動方程式(5)式の第2式に代入して角加速度 u_{ρ} を求める。第2式は右辺のトルクがゼロである回転角 ϕ 方向の運動方程式で動的連成を示す。タイムステップでの値は次式となる。

$$u_{\rho k} = -\frac{1}{I_R} \{ (I_z + I_R) u_{\phi k} + h_{\phi k} \} \quad \dots(9)$$

(9)式に(7)式を適用することにより、 $u_{\rho k}$ は慣性ロータの制御加速度となる。指令速度 $v_{\rho k}$ は、 $u_{\rho k}$ を積分することにより得られる。

$$v_{\rho k} = v_{\rho, k-1} + u_{\rho k} T \quad \dots(10)$$

2.2.2 トロリー位置とコンテナ揺れの制御

トロリー変位 x の加速度について制御入力 u_x を用いて線形化する。

$$\ddot{x} = u_x \quad \dots(11)$$

(11)式を(5)式の第1式に代入する。第1式は右辺のトルクがゼロである揺れ角 ψ 方向の運動方程式で動的連成を示す。これより、トロリー変位 x とコンテナ揺れ角 ψ に関する状態式となる。

$$\frac{d}{dx} \bar{x} = \bar{A} \bar{x} + \bar{b} u_x \quad \dots(12)$$

$$\text{ここで、} \quad \bar{x} = [x \quad \psi \quad \dot{x} \quad \dot{\psi}]^T \\ \bar{b} = [0 \quad 0 \quad 1 \quad -1/l]^T$$

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & 0 & a_2 \end{bmatrix}$$

$$\text{ただし、} \quad a_1 = -\frac{I_z - I_x + I_R}{ml^2} \dot{\phi}^2 - \frac{I_R}{ml^2} \dot{\phi} \dot{\rho} - \frac{g}{l}$$

$$a_2 = \frac{1}{2} \lambda^2 \phi \dot{\phi}$$

(11)式から目標値との偏差に関する状態式が得られる。

$$\frac{d}{dx} \bar{e} = \bar{A} \bar{e} + \bar{b} \bar{u} \quad \dots(13)$$

$$\text{ここで、} \quad \bar{e} = [x_d - x \quad -\psi \quad -\dot{x} \quad -\dot{\psi}]^T$$

$$\bar{u} = -u_x$$

(13)式に対して、偏差をゼロとする連続時間レギュレータ制御が考えられる。

$$\bar{u} = -u_x = -G_a \bar{e} \quad \dots(14)$$

$$\text{ここで、} \quad G_a = [K_{a1} \quad K_{a2} \quad K_{a3} \quad K_{a4}]$$

(14)式を(13)式に代入すれば連続時間閉ループ系が得られる。連続時間ゲイン G_a は、閉ループ系S平面での極指定により得られる。次に、連続時間系(13)式をもとに近似的な離散時間系を再設計する。

$$\bar{e}_{k+1} = \bar{p} \bar{e}_k + \bar{q} \bar{u}_k \quad \dots(15)$$

$$\text{ここで、} \quad \bar{p} = \left(I - \frac{T}{2} \bar{A} \right)^{-1} \left(I + \frac{T}{2} \bar{A} \right)$$

$$\bar{q} = T \left(I - \frac{T}{2} \bar{A} \right)^{-1} \bar{b}$$

離散時間系(15)式に対しての離散時間レギュレータ制御を行う。

$$\bar{u}_k = -u_{xk} = -G_d \bar{e}_k \quad \dots(16)$$

$$\text{ここで、} \quad G_d = [K_{d1} \quad K_{d2} \quad K_{d3} \quad K_{d4}]$$

(16)式を(15)式に代入すれば離散時間閉ループ系が得られる。その離散時間閉ループ系再設計の特性から、離散時間ゲイン G_d は連続時間ゲイン G_a より求めることができる⁵⁾。

$$G_d = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{2} G_a \bar{q} \right)^{-1} G_a (I + \bar{p}) \quad \dots(17)$$

(17)式を(16)式に適用すれば, u_{xk} はトロリーの制御加速度となる。指令速度 v_{xk} は, u_{xk} を積分することにより得られる。

$$v_{xk} = v_{x,k-1} + u_{xk} T \quad \dots(18)$$

3. シミュレーション結果

想定した実機計算モデルを図3に示す。

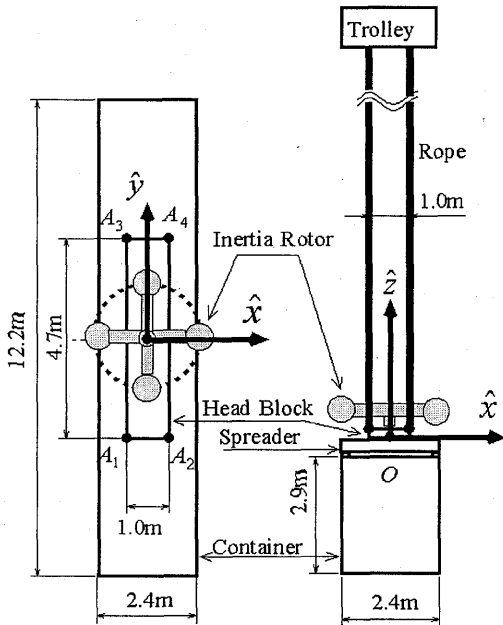


図3 実機想定モデル

トロリーから4本のロープ, ヘッドブロック (3t), スプレッド (10t) を介して 40 フィートコンテナ (最大 30t) を吊り下げている。慣性ロータは直径 3m で 500kg のマス 4 個を想定した。下記を計算に用いた。

$$l = 30m, b = 4.8m, m = 40 \times 10^3 kg$$

$$I_x = 49.6 \times 10^4 kgm^2, I_z = 51.5 \times 10^4 kgm^2$$

$$I_R = 0.45 \times 10^4 kgm^2$$

シミュレーション⁶⁾はきざみ時間 10ms のルンゲクッタ法を用い, サンプルタイムは 100ms, 計算時間は 20 秒とした。トロリーの目標位置は 10m, 初期値はコンテナの回転角 5deg とし, その他はゼロである。ロータ回転制御には $s = -0.5(1 \pm 2j)$, トロリー変位制御には $s = -0.5, -1.0, -0.5(1 \pm 2j)$ の極を指定した。トロリーの走行速度は最大 3.0m/s とした。以下において, 制御なしは慣性ロータを効かさずトロリーに強制変位を与える場合, 制御ありは慣性ロータとトロリー

を制御する場合である。図4は, トロリー変位 x の 20 秒間の変化を示す。実線の細線は制御なし, 太線は制御ありを示し, 以下の図も同様である。制御なしではトロリーは 5 秒で目標値 10m に達するよう強制変位される。制御ありでは 1.7 秒で目標値の半分である 5m に達し, 少し後退した後 5 秒程度から再度前進し 10 秒で目標値近くに達している。図5は, トロリー速度 $\dot{x}$ を示し, 制御なしでは 5 秒間で加速・等速・減速し, その後停止する。制御ありでは 1.7 秒間最大速度で走行した後, 制御に伴う速度変動を生じている。図6は, コンテナ揺れ角 ψ を示し, 制御なしでは周期 9 秒前後, 振幅 16deg の大きな振動で揺れている。一方, 制御ありでは 8 秒間の 1 回の振動後, 揺れなしの状態となり良く制御されている。図7は, コンテナ回転角 ϕ を示し, 制御なしでは周期 16 秒, 振幅 5deg の回転振動が続いている。制御ありでは 6 秒後に回転なしの状態となっている。

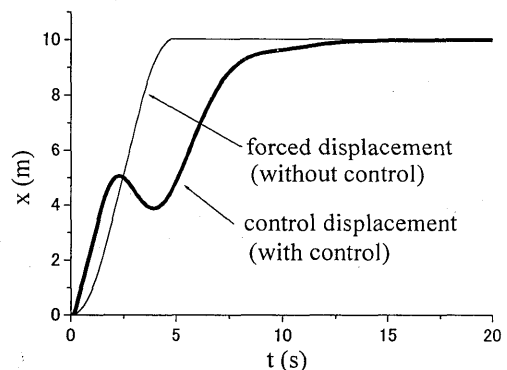


図4 トロリー変位 x

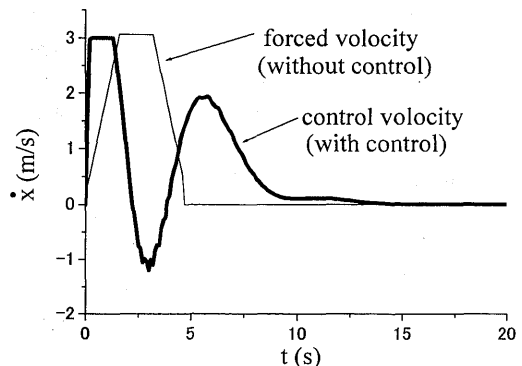


図5 トロリー速度 $\dot{x}$

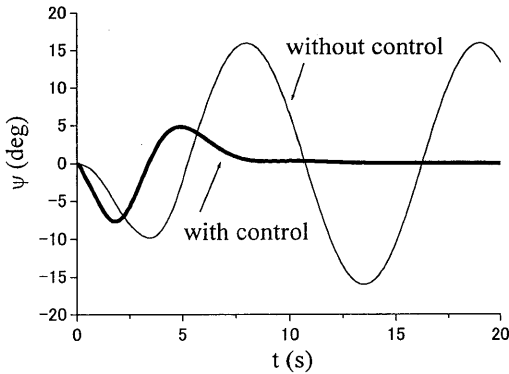


図6 コンテナ揺れ角 ψ

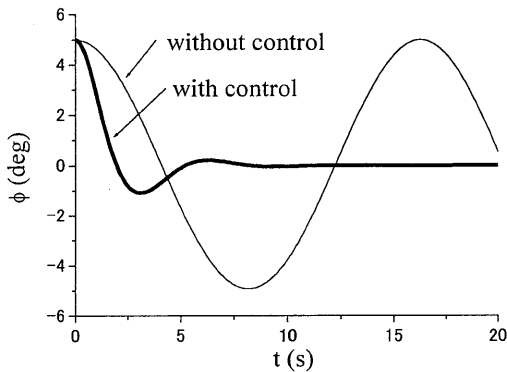


図7 コンテナ回転角 ϕ

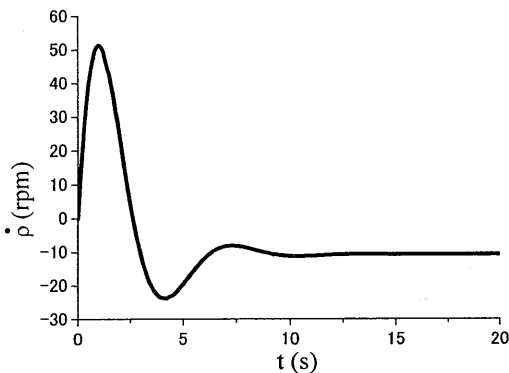


図8 ロータ回転数 $\dot{\rho}$

図8にロータ回転数 $\dot{\rho}$ を示す。回転数は 50rpm 最大のゆっくりしたものであり、6秒間制御のために変動した後、 -10rpm の一定回転となっている。

4. まとめ

貨物コンテナの解析モデルとして、単振子モデルではなく、コンテナ吊り荷をトロリーから4本ロープで吊り下げられた直方体剛体モデルとした。剛体吊り荷の揺れと回転を同時に防止するようなコンテナクレーン操作と慣性ロータを併用した揺れと回転の同時防止制御技術を開発し、実機想定モデルのシミュレーションを行いその有効性を示した。現在実験にて検証中である。また、今回はロープ長さを一定としたが変動ロープ長さの場合について研究実施予定である。

参考文献

- 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，日本機械学会論文集（C編），vol. 59, no. 561, pp. 1443-1447, 1993.
- 2) 村田五雄ほか3名：横行クレーンのサーボ形ふれ止め制御，日本機械学会論文集（C編），vol. 61, no. 582, pp. 513-518, 1995.
- 3) 佐藤勇一ほか3名：回転円板によるクレーン吊り荷のねじり振動の制振，日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2000, no. 144, 2000.9, 東京.
- 4) 吉田靖夫，今井俊一：慣性ロータを用いた2関節鉄棒ロボットの振り上げと倒立の連続動作制御，日本機械学会論文集（C編），vol. 66, no. 642, pp. 561-566, 2000.
- 5) 古田勝久：デジタルコントロール，pp. 208-210, 1989, コロナ社.
- 6) 吉田靖夫，若松宗一：先端に慣性ロータを用いた自由関節を有する平面2リンクアームの軌道制御，日本機械学会論文集（C編），vol. 65, no. 632, pp. 1519-1523, 1999.