

巻き上げ式貨物コンテナの揺れ回転防止非線形制御

吉田 靖夫*

Swing-Rotation Suppressing Nonlinear Control of Cargo Container with Hoisting Motion

Yasuo YOSHIDA*

(Received November 30, 2001)

Positioning and swing-rotation vibration suppression of cargo container with hoisting motion are studied using nonlinear control. The cargo container is modeled as a rectangular rigid body suspended by four ropes which are same variable length from the trolley. The ropes and the trolley have their target positions. Positioning and vibration suppression are controlled with variable digital feedback gains using the trolley 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 on the coupling characteristics of system's dynamics. Simulation results show that positioning and swing-rotation vibration suppression are possible using proposed control system.

Keywords: Swing, Rotation, Cargo container, Inertia rotor, Hoisting motion, Nonlinear control

1. はじめに

コンテナ船では、コンテナクレーンによって貨物コンテナを荷役する。コンテナを正確に位置決めするため、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。しかしながら、揺れに加えて回転振動^②に起因する荷役作業の遅れが問題となっている。このため、著者はコンテナ吊り荷を均一長さの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、コンテナクレーン操作と慣性ロータを併用した貨物コンテナの搬送位置決めと揺れ・回転連成振動防止の制御についての実機シミュレーション結果を報告^③した。ここでは、更に実際の搬送状態を想定して、巻き上げ装置によってロープ長が変動する場合の貨物コンテナについてのシミュレーションを行ったので、その結果を報告する。

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。 $A_1A_2A_3A_4$ 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、 $S_1S_2S_3S_4$ を下面とする走行トロリー(質量 M)から4本ロープにて吊り下げられている。ロープの

長さ l は巻き上げ装置の力 F_l にて可変する。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_x 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。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)まわりに回転角 ϕ を生じると $A_1''A_2''A_3''A_4''$ 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。

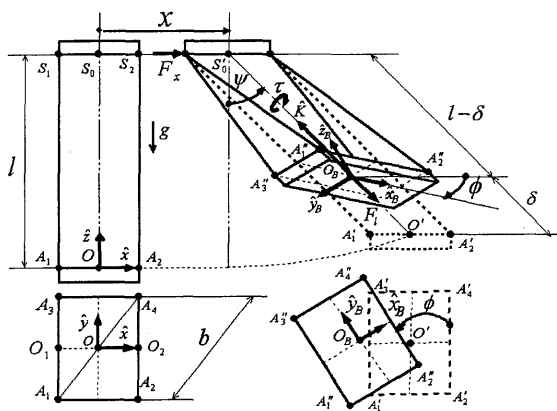


図1 モデル

*機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

中央 O' は O_B へと回転軸方向変位 δ を生じ、コンテナ上面中央点の座標 x_m, y_m は時式となる⁽³⁾。

$$\begin{aligned} x_m &= x + (l - \delta) \sin \psi \\ y_m &= l_0 - (l - \delta) \cos \psi \end{aligned} \quad \dots (1)$$

ただし、 $\delta \approx \left(\frac{b^2}{8l} \right) \phi^2$

運動エネルギー T を求める。

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

ここで、コンテナ移動速度の2乗は $v^2 = \dot{x}_m^2 + \dot{y}_m^2$ である。

更に、ポテンシャルエネルギー U を求める。

$$U = m g y_m \quad \dots (3)$$

以上より、運動方程式が求まる。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量量は省略している。

$$\begin{bmatrix} ml^2 & 0 & ml & 0 \\ I_z + I_R & 0 & -\frac{mb^2}{4l} \phi & I_R \\ & M+m & m\psi & 0 \\ & & m & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\psi} \\ \ddot{\phi} \\ \ddot{\rho} \\ \ddot{\rho} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_\psi \\ h_\phi \\ h_\rho \\ h_\rho \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F_x \\ F_l \\ \tau \end{bmatrix} \quad \dots (4)$$

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

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

$$h_x = -ml \psi \dot{\psi}^2 - \frac{1}{4} m \frac{b^2}{l} \psi \dot{\phi}^2 - \frac{1}{2} m \frac{b^2}{l} \phi \dot{\psi} \dot{\phi} + 2m \dot{\psi} \dot{l}$$

$$h_l = -\frac{1}{4} m \frac{b^2}{l} \dot{\phi}^2 - ml \dot{\psi}^2 + \frac{1}{2} m \frac{b^2}{l^2} \phi \dot{\phi} \dot{l} - mg$$

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

2.2 制御方法

制御量は、 ψ, ϕ, x, l の4変数であり、それぞれの目標値は $\psi = \phi = 0, x = x_d, l = l_d$ とする。制御操作は、トロリー、巻き上げ装置および慣性ロータに駆動指令速度 $\dot{x}, \dot{l}, \dot{\rho}$ を与える方式とする。

2.2.1 ロープ長さの制御

コンテナロープ長さ l の加速度についての制御入力を $u_l = \ddot{l}$ とする。閉ループ系 S 平面での安定極

$s = \sigma(1 \pm j\bar{k})$, ($\sigma < 0$) を指定してロープ長さ l と目標値 l_d との偏差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を行う。

$$u_{lk} = K_{l1}(l_{dk} - l_k) - K_{l2} \dot{l}_k \quad \dots (5)$$

ここで、 $K_{l1} = \{1 - 2e^{\sigma T} \cos(\sigma \bar{k} T) + e^{2\sigma T}\} / T^2$

$$K_{l2} = \{3 - 2e^{\sigma T} \cos(\sigma \bar{k} T) - e^{2\sigma T}\} / 2T$$

u_{lk} を積分して指令速度 $v_{lk} = v_{l,k-1} + u_{lk} T$ が得られる。

2.2.2 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 $u_\phi = \ddot{\phi}$ を用いて線形化し、離散時間のレギュレータ制御を行う。

$$u_{\phi k} = -K_{\phi 1} \phi_k - K_{\phi 2} \dot{\phi}_k \quad \dots (6)$$

ここで、ゲイン $K_{\phi 1}, K_{\phi 2}$ は K_{l1}, K_{l2} と同形の式である。

次に、慣性ロータ回転角 ρ の角加速度を $u_\rho = \ddot{\rho}$ とし、運動方程式(5)式で回転角 ϕ 方向の動的連成を示す第2式を用いて角加速度 u_ρ を求める。

$$u_{\rho k} = -\frac{1}{I_R} \left\{ (I_z + I_R) u_{\phi k} - \frac{1}{4} m \frac{b^2}{l_k} \phi_k u_{lk} + h_{\phi k} \right\} \quad \dots (7)$$

(7)式に(5),(6)式を適用し、 $u_{\rho k}$ を積分することにより、指令速度 $v_{\rho k} = v_{\rho,k-1} + u_{\rho k} T$ が得られる。

2.2.3 トロリー位置とコンテナ揺れの制御

トロリー変位 x の加速度についての制御入力 $u_x = \ddot{x}$ を用いて線形化し、運動方程式(5)式で揺れ角 ψ 方向の動的連成を示す第1式を用いて、トロリー変位 x とコンテナ揺れ角 ψ に関する状態式を求める。

$$\frac{d}{dx} \bar{x} = \bar{A} \bar{x} + \bar{b} u_x \quad \dots (8)$$

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

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

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

$$a_2 = \frac{b^2}{2l^2} \phi \dot{\phi} - \frac{2\dot{l}}{l}$$

(8)式から目標値との偏差に関する状態式が得られる。

$$\frac{d}{dx} \bar{e} = \bar{A} \bar{e} + \bar{b} \bar{u} \quad \dots (9)$$

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

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

(9)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 $\bar{u} = -u_x = -G_a \bar{e}$ が考えられる。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(9)式をもとに近似的な離散時間系を再設計する。

$$\bar{e}_{k+1} = \bar{p}\bar{e}_k + \bar{q}\bar{u}_k \quad \dots(10)$$

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

(10)式に対しての離散時間レギュレータ制御を行う。

$$\bar{u}_k = -u_{xk} = -G_d \bar{e}_k \quad \dots(11)$$

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

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 より求められる⁽⁴⁾。

$$G_d = \frac{1}{2} \left(I + \frac{1}{2} G_a \bar{q} \right)^{-1} G_a (I + \bar{p}) \quad \dots(12)$$

(12)式を(11)式に適用し、 u_{xk} を積分することによりトロリーの指令速度 $v_{xk} = v_{x,k-1} + u_{xk} T$ が得られる。

3. シミュレーション結果

想定した実機計算モデルを図2に示す。

$$b = 4.8m, \quad m = 40 \times 10^3 kg, \quad I_x = 49.6 \times 10^4 kgm^2, \\ I_z = 51.5 \times 10^4 kgm^2, \quad I_R = 0.45 \times 10^4 kgm^2$$

シミュレーションはきざみ時間 $20ms$ のルンゲクッタ法を用い、サンプリングタイムは $100ms$ 、計算時間は 40 秒とした。初期値はロープ長さ $30m$ 、コンテナの回転角 $5deg$ 、トロリー目標位置は $30m$ 、ロープ長さ目標値は $10m$ とし、その他はゼロである。ロープ長さおよび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。ロープ巻き上げ速度およびトロリーの走行速度は最大 $3.0m/s$ 、ロータの最大回転数は $400rpm$ 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り、いずれの場合もロープ巻き上げ制御を行う。図3はロープ長さ l の 20 秒間の変化を示し、初期値 $30m$ から約 10 秒後に目標値 $10m$ に達し、その値を保つよう制御されている。図4はトロリー変位 x であり、実線の細線は制御なし、太線は制御ありを示す。制御なしではトロリーは 12 秒で

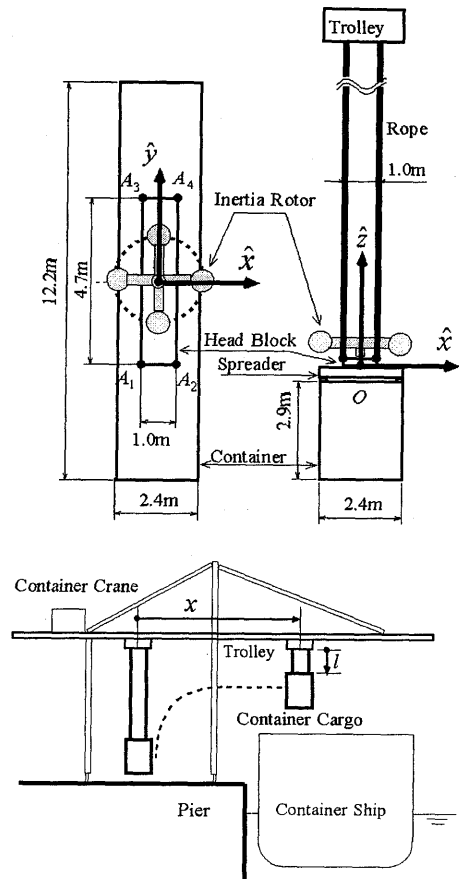


図2 実機想定モデル

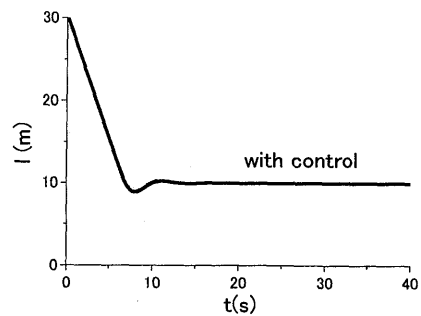


図3 ロープ長さ l

目標値 $30m$ に達するよう強制変位される。制御ありでは約 15 秒で目標値に達している。図5は、トロリー速度 $\dot{x}$ を示し、制御なしでは 12 秒間で加速・等速・減速し、その後停止する。制御ありでは最初に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。

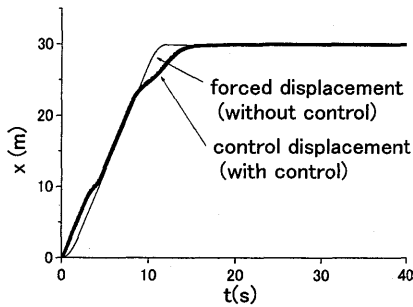
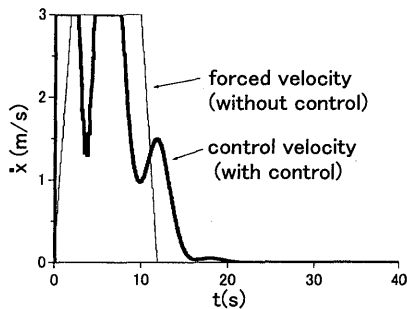
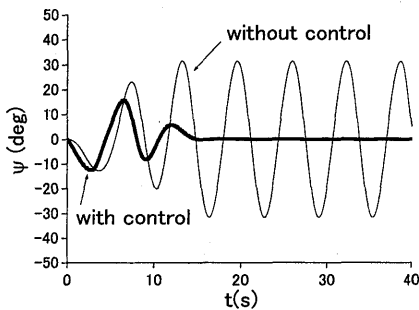
図4 トロリー変位 x 図5 トロリー速度 $\dot{x}$ 図6 コンテナ揺れ角 ψ

図6は、コンテナ揺れ角 ψ を示し、制御なしでは周期6.3秒前後、振幅31degの大きな振動で揺れている。一方、制御ありでは15秒間で2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8.7秒、振幅3.5degの回転振動が続いている。制御ありでは約10秒後に回転なしの状態となっている。図8は、(11)式のトロリー制御デジタルゲイン変化を示す。指定極を保つため10秒間はかなりの変化を生じていることが分かる。

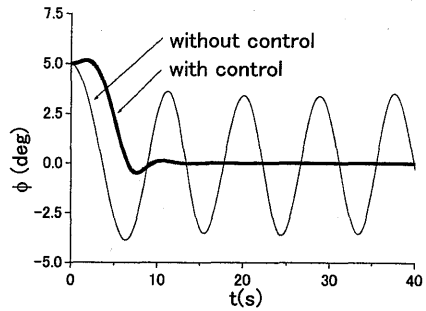
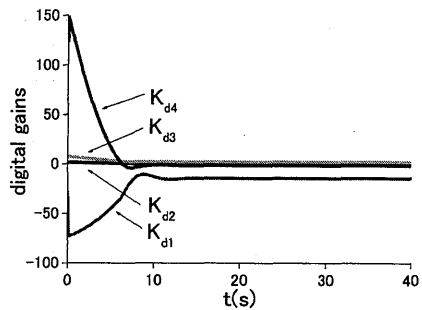
図7 コンテナ回転角 ϕ 

図8 デジタルゲインの変化

4. まとめ

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、コンテナクレーン操作と慣性ロータを併用した貨物コンテナの搬送位置決めと揺れ・回転連成振動防止の制御システムを開発し、巻き上げ装置によってロープ長が変動する場合の実機想定貨物コンテナの搬送と制振制御のシミュレーションを行い、制御システムの有効性を示した。なお、本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金（基盤研究(C)一般(2)、課題番号12650238）の援助によって行われたものである。

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) 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.
- 3) 吉田靖夫、深尾達也：貨物コンテナの揺れ・回転連成振動解析と制御、中部大学工学部紀要、36巻, pp. 57-61, 2000.
- 4) 古田勝久：デジタルコントロール、pp. 208-210, 1989, コロナ社.