

可変長ロープを有する旋回クレーンの制御シミュレーション

田畑 晴久*, 吉田 靖夫**

Simulation of the Control of a Rotary Crane with a Rope of Variable Length

Haruhisa TABATA* and Yasuo YOSHIDA**

(Received August 31, 2007)

A crane suspended load must be transported with swing suppression and positioned in the target location precisely. The control of a rotary crane with hoisting motion is not easy because of its nonlinearity and there are some studies using gain scheduled control or fuzzy control etc. In this paper, we present simulation results of the rotary crane positioning and swing suppression within motions of rotating/boom hoisting/rope hoisting which is controlled by velocity command system with variable feedback digital gains, based on digitizing the regulator controller of continuous-time system.

Keywords: rotary crane, nonlinear control, positioning, swing suppression, variable digital

1. 研究目的

クレーンを用いた作業においては、吊り荷が大きく揺れないような搬送や目標位置で荷揺れが残らずに位置決めをすることが望ましい。ここでは、可変長ロープを有する旋回クレーンを取りあげ、その制御シミュレーションを行った。可変ロープ長を有する旋回クレーンの制御は非線形性のため容易ではなく、ゲインスケジュールド制御¹⁾や、ファジー制御²⁾などが研究されている。ここでは、連続時間系のレギュレータコントローラをディジタル再設計で離散化³⁾して求めた可変ディジタルゲインを用い、速度指令方式によるクレーンの旋回・起伏およびロープ長変化時の吊り荷の位置と揺れ制御のシミュレーション結果を報告する。

2. モデルと運動方程式

旋回クレーンの運動方程式は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} A_{\theta_1} & B_{\theta_1} & C_{\theta_1} & D_{\theta_1} & E_{\theta_1} \\ A_{\theta_2} & B_{\theta_2} & C_{\theta_2} & D_{\theta_2} & E_{\theta_2} \\ A_{\alpha} & B_{\alpha} & C_{\alpha} & 0 & 0 \\ A_{\beta} & B_{\beta} & 0 & C_{\beta} & 0 \\ A_l & B_l & 0 & 0 & C_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\alpha} \\ \ddot{\beta} \\ \ddot{l} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_{\theta_1} \\ h_{\theta_2} \\ h_{\alpha} \\ h_{\beta} \\ h_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ 0 \\ 0 \\ F_l \end{bmatrix} \quad \dots (1)$$

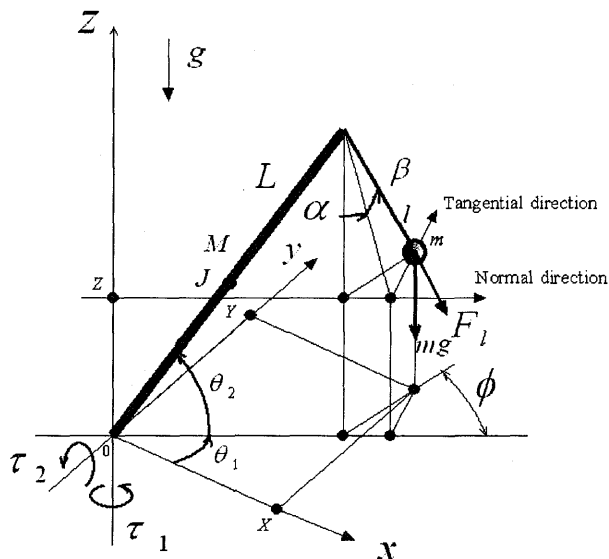


Fig.1 Rotary crane model

- | | |
|---------------------|--------------------|
| θ_1 : 旋回角 | θ_2 : 起伏角 |
| α : 法線方向の揺れ角 | β : 接線方向の揺れ角 |
| l : ロープ長 | ϕ : 揺れ方向角 |
| ψ : 揺れ角 | τ_1 : 旋回トルク |
| τ_2 : 起伏トルク | F_l : ロープ長変化力 |
| L : ブーム長さ | M : ブームの質量 |
| J : ブームのモーメント | |

* 機械工学専攻大学院生 (Graduate student, Department of Mechanical Engineering)

** 機械工学科 (Department of Mechanical engineering)

A_{θ_1} などは、加速度に比例する慣性力の係数、 h_{θ_1} などは遠心力、コリオリ力、重力をあらわす項でいずれも変数 $\theta_1, \theta_2, \alpha, \beta, l$ とその微分値の関数となっている。角度 α, β を微小として $\alpha^2, \beta^2, \alpha\beta$ などを省略した場合について、運動方程式の右辺外力項がゼロである第3式と第4式は次式となる。

$$\begin{aligned} & \ddot{\alpha} - \beta \ddot{\theta}_1 + L(\alpha \cos \theta_2 - \sin \theta_2) \ddot{\theta}_2 / l \\ & - (L \cos \theta_2 / l - \alpha) \dot{\theta}_1^2 - L(\cos \theta_2 + \alpha \sin \theta_2) \dot{\theta}_2^2 / l \\ & - 2\dot{\theta}_1 \dot{\beta} - 2\beta \dot{\theta}_1 \dot{l} / l + 2\dot{\alpha} \dot{l} / l + g \alpha / l = 0 \quad \dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \ddot{\beta} + (\alpha + L \cos \theta_2 / l) \ddot{\theta}_1 + L \cos \theta_2 \ddot{\theta}_2 / l - \beta \dot{\theta}_1^2 \\ & + L \beta \sin \theta_2 \dot{\theta}_2^2 / l + \beta \dot{\alpha}^2 - 2L \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 / l \\ & + 2\dot{\theta}_1 \dot{\alpha} + 2\alpha \dot{\theta}_1 \dot{l} / l + 2\dot{\beta} \dot{l} / l + g \beta / l = 0 \quad \dots (3) \end{aligned}$$

3. 制御方法

ロープ長 l が目標値 l_d に追従するような巻下げ指令速度 v_l を考える。 $\dot{l} = v_l$ をもとに、デジタルコントローラを求める。

$$v_{lk} = k_{ld}(l_d - l) \quad \dots (4)$$

ここで、 k_{ld} はデジタルゲインである。次に、 θ_1, θ_2 の位置決めと揺れ防止を考える。ロープ長 l とロープ速度 $\dot{l}$ が与えられているとき (2) 式は θ_2 と α 、(3) 式は θ_1 と β の動的連成をあらわすものと理解し線形化を行う。 $\dot{\theta}_1 = u_{\theta_1}$ 、 $\dot{\theta}_2 = u_{\theta_2}$ とし、 $u_{\theta_1}, u_{\theta_2}$ をフィードバック制御時の加速度とする。

$$\dot{\bar{\theta}}_i = A_i \bar{\theta}_i + b_i u_{\theta_i} \quad (i=1,2) \quad \dots (5)$$

ここで、

$$\bar{\theta}_1 = [\theta_1 \quad \beta \quad \dot{\theta}_1 \quad \dot{\beta}]^T, \quad \bar{\theta}_2 = [\theta_2 \quad \alpha \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\alpha}]^T$$

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{g}{l} & 0 & -2\frac{\dot{l}}{l} \end{bmatrix}, \quad b_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ -\delta_i / l \end{bmatrix}$$

$$\delta_1 = L \cos \theta_2, \quad \delta_2 = -L \sin \theta_2$$

これらをもとに、クレーン角度 θ_1, θ_2 の目標値 θ_{1d}, θ_{2d} 、揺れ角 β, α の目標値ゼロとの偏差に関する状態式が得られる。

$$\dot{\bar{e}}_i = A_i \bar{e}_i + b_i \bar{u}_i \quad (i=1,2) \quad \dots (6)$$

ここで、 $\bar{e}_i = \bar{\theta}_{id} - \bar{\theta}_i$ 、 $\bar{u}_i = \dot{\theta}_{id} - u_{\theta_i}$

次に (6) 式をもとにデジタルサーボコントローラを求める。ただし、 $k = 0.1, 2 \dots$ である。

$$u_{\theta 1k} = G_{d1} [\theta_{1dk} - \theta_{1k} \quad -\beta_k \quad \dot{\theta}_{1dk} - \dot{\theta}_{1k} \quad -\dot{\beta}_k]^T \quad \dots (7)$$

$$u_{\theta 2k} = G_{d2} [\theta_{2dk} - \theta_{2k} \quad -\alpha_k \quad \dot{\theta}_{2dk} - \dot{\theta}_{2k} \quad -\dot{\alpha}_k]^T \quad \dots (8)$$

ここで、 $G_{di} = [k_{1di} \quad k_{2di} \quad k_{3di} \quad k_{4di}]$ ($i=1,2$) はデジタルゲインであり、連続時間系から離散時間系へデジタル再設計を行って、連続時間系での極指定により求めたアナログレギュレータゲイン G_a から求めることができる。

$$G_{ai} = [k_{1ai} \quad k_{2ai} \quad k_{3ai} \quad k_{4ai}] \quad \dots (9)$$

$$G_{di} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{2} G_{ai} q_i \right)^{-1} G_{ai} (I + p_i) \quad \dots (10)$$

ここで、 $i=1,2$ である。

$$p_i = \left(I - \frac{T}{2} A_i \right)^{-1} \left(I + \frac{T}{2} A_i \right)$$

$$q_i = T \left(I - \frac{T}{2} A_i \right)^{-1} b_i \quad \dots (11)$$

クレーンの指令速度は (7)、(8) 式を積分して得られる。

$$\dot{\theta}_{ik} = \dot{\theta}_{i,k-1} + u_{\theta i} T \quad (i=1,2) \quad \dots (12)$$

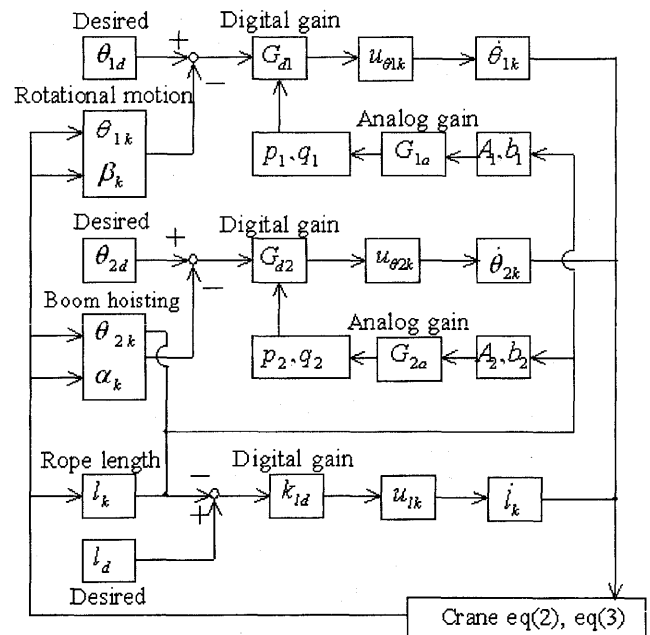


Fig.2 Block diagram

4. シミュレーション結果

サンプリングタイム $T=0.2s$ で制御なしと制御ありのシミュレーションを行った。

4.1 制御なしの場合

図3は旋回角 θ_1 を 0° から 45° への変化させた場合である。旋回によって接線方向の揺れ β が生じ、遠心力によって法線方向の揺れ α が生じているのがわかる。図4は起伏角 θ_2 を 30° から 75° へ変化させた場合である。起伏によって、法線方向の揺れ α のみ生じている。

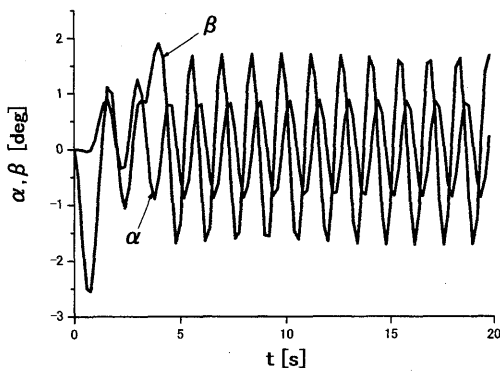
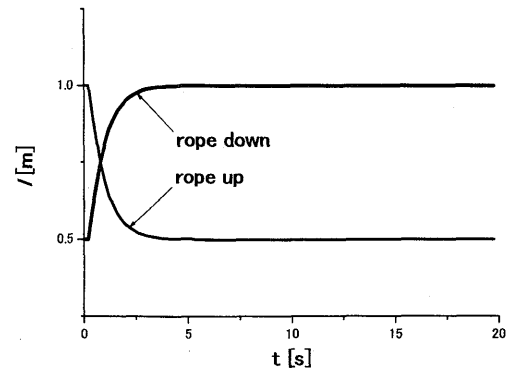


Fig.3 Responses of α, β in rotational motion $\theta_1 = 0^\circ \sim 45^\circ$ ($\theta_2 = 30^\circ, l = 0.5m$)



(b) Changes of l

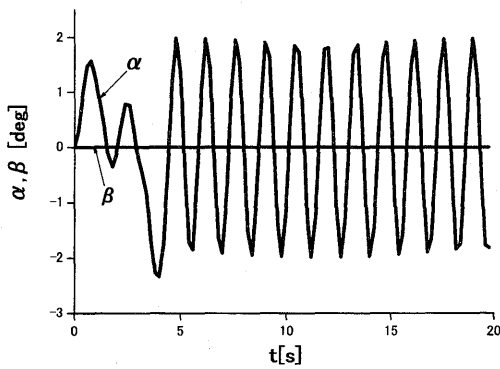
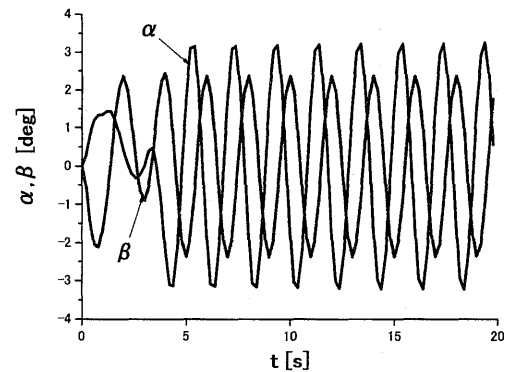
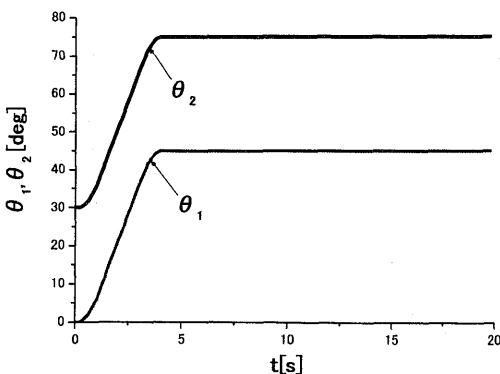


Fig4 Responses of α, β in rotational motion $\theta_2 = 30^\circ \sim 75^\circ$ ($\theta_1 = 0^\circ, l = 0.5m$)

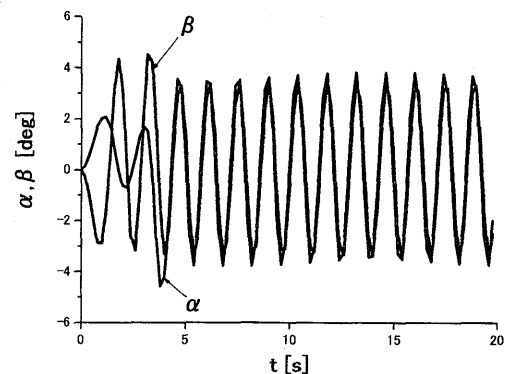


(c) Responses of α, β (in case of rope down)

図 5 は旋回, 起伏, ロープ長のすべてを変化させたときの吊り荷の揺れ応答結果である。図 5 (a) は, 旋回角 θ_1 を 0° から 45° へ, 起伏角 θ_2 30° から 75° へ変化を示し, 図 5 (b) は, ロープ長 l を $0.5m$ から $1.0m$ へ down, $1.0m$ から $0.5m$ へ up の変化を示す。図 5 (c) はロープ down の場合, 図 5 (d) はロープ up の場合の揺れ角 α, β をそれぞれ示す。



(a) Changes of θ_1, θ_2



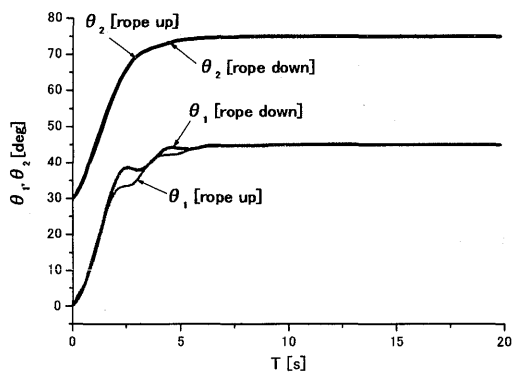
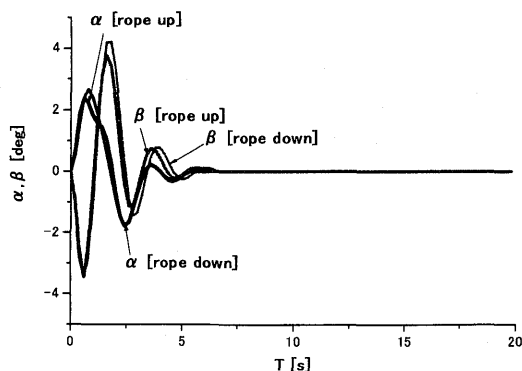
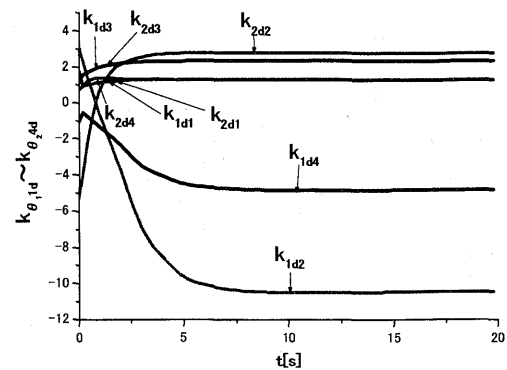
(d) Responses of α, β (in case of rope up)

Fig5 Changes of rotational motion θ_1 , boom hoisting θ_2 , rope hoisting l and responses of swing angle α, β

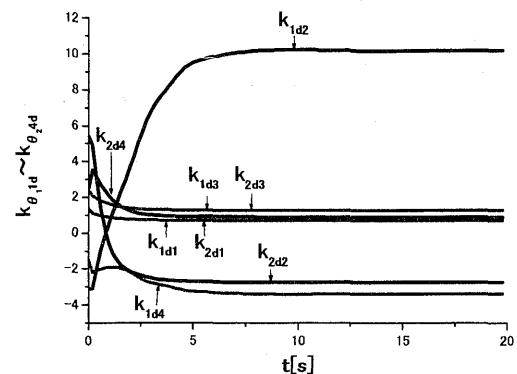
4.2 制御ありの場合

揺れ α, β を 0 としつつ, 旋回角 θ_1 , 起伏角 θ_2 を目標角 θ_{1d} , θ_{2d} へと位置決めするため制御を行った。ただし, このときのロープ長は図 5 (b) の up, down の制御を行っている。図 6 は旋回角 θ_1 を初期値 0° から,

目標値 45° 、起伏角 θ_2 を初期値 30° から、目標値 75° へと制御したときを示す。起伏角 θ_2 は目標値にスムーズに達しているが、旋回角 θ_1 はロープ長の up, down にかかわらずともに途中で変化している。これは旋回に伴う遠心力による α 方向の揺れを制御しているためとも考えられる。図7は接線方向と法線方向の揺れ角 β, α の応答である。このとき初め α はプラス方向に、 β はマイナス方向に揺れが生じたのち約5秒で揺れなしとなっている。ロープ長変化によって差は生じていない。図8は、デジタルゲイン G_d の変化を示す。図8(a)は、ロープ長 down のとき、図8(b)はロープ長 up のときを示す。図8(a)ではロープ長が長くなるにつれて β と $\dot{\beta}$ のゲイン k_{1d2}, k_{1d4} は値を大きく減少させ、 α のゲイン k_{2d2} は、値を増加させるような変化を示し、他のゲインはあまり変化していない。図8(b)ではロープ長が短くなるにつれて β のゲイン k_{1d2} は値を大きく増加させ、 $\dot{\beta}$ のゲイン k_{1d4} は、値を減少させるような変化を示している。 α のゲイン k_{2d2} はほとんど動いていない。

Fig6 Control of θ_1, θ_2 Fig7 Response of α, β 

(a) Change of digital gains in case of rope down



(b) Change of digital gains in case of rope up

Fig8 Digital gains for rotary crane control

5. 結論

クレーンの起伏・旋回と巻き上げ・巻き下げ制御操作による吊り荷位置決めと揺れ防止の制御シミュレーションを行い、可変デジタルゲインを用いた制御手法が有効であることを示した。今後は旋回クレーンのフィードバック制御を行うためのセンサーとして、視覚装置を搭載し、視覚フィードバックによる吊り荷制御実験を行う予定である。

参考文献

- 1) 高木, 西村, “タワークレーンの吊り荷ロープ長変動を考慮したゲインスケジュールド制御”, 日本機械学会論文集 C 編, 64-626, (1998), 113-120
- 2) 日野, 藤田, 芳村, “旋回および起伏操作時のトラッククレーンの吊り荷のフィジィ制御”, 日本機械学会論文集 C 編, 64-626, (1998), 106-112
- 3) 吉田, 平野, 富田, 手嶋, “走行クレーンの視覚フィードバック制御”, 計測自動制御学会論文集, 41-6, (2005), 527-532