クレーンの適応制御*

相 良 慎 一^{*1}, 大 川 不 二 夫^{*2}

Adaptive Control for Crane

Shinichi SAGARA and Fujio OHKAWA

This paper presents position and vibration control methods of a crane in the air and under the water. In general, dynamic characteristics of a crane are changed by a load, hoist motion and other factors. In addition, they have many unidentifiable parameters under the water. We use a model reference adaptive control system (MRACS) as our control policy. Using a discrete time model, we can design a discrete MRACS by simple algorithms and structures. The experimental study has been carried out using a crane composed of a linear pulse motor for the traverse motion and a small pulse motor for the hoist motion. A CCD camera and an image processor are used to measure the position of the load. Experimental results have shown that the crane in the air and under the water can be controlled effectively by the proposed adaptive algorithms.

Key Words: Adaptive Control, Computer Control, Vibration Control, Discrete Time, MRACS, under the water, Linear Pulse Motor

1. 結 論

海洋は宇宙と並んで人間が開拓しつつある巨大な対象である。しかし、海洋はその大部分が未知・変動要素である潮流、水圧等の影響を受ける極限環境である。そのため従来の制御方式で水中作業等を行うには非常に困難な状況にあり、開発はあまり進んでいない。

このような環境下においては、適応制御が有効な制御方式のひとつとして考えられる。

そこで海洋における適応制御の有効性を確認するための第一歩として水中クレーンの実験装置を構成し、位置制御、振動抑制制御にモデル規範形適応制御系(Model Reference Adaptive Control System: MRACS)を適用して実験を行った⁽¹⁾⁽²⁾。

本論文では、この水中クレーン実験装置を用いて、ロープで吊した荷が空中と水中にあるクレーンの位置制御の実験を行った結果について述べる。

水中クレーンの研究は今まで行われていない。また、空中の場合にはほとんどが最適制御を用いた研究であ

り^{(3)~(5)}、適応制御を用いた研究は連続時間系では見られるが⁽⁶⁾、離散時間系では見当たらない。

MRACSを設計し実験を行った結果、良好な制御性能が得られ、設計したMRACSが有効であることが確認できた。

2. 数 式 モ デ ル

ここでは、台車はリニアパルスモータで駆動するので、その動特性を考慮しない数式モデルを誘導する。

鉛直面内に図1のような直交座標系 $O-xy$ をとり、ロープの長さを l 、ロープが鉛直線となす角を θ 、台車の変位を x とすると、質量 m の荷重の直交座標 (x_1, y_1) は

$$x_1 = x + l \sin \theta \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

$$y_1 = l \cos \theta \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

となる。

まず、台車の変位 x とロープの振れ角 θ の関係を求める。

重力加速度を g 、粘性摩擦係数を D_θ とし、 θ 座標に着目すると、Lagrange の運動方程式は、

$$ml^2 \ddot{\theta} + ml \ddot{x} \cos \theta + D_\theta \dot{\theta} = -mgl \sin \theta \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

となり、式(3)を $\theta \approx 0$ のまわりで線形近似すると、

* 平成2年3月13日 九州支部第43期総会講演会において講演、原稿受付 平成元年4月21日。

^{*1} 准員、水産大学校 (〒759-65 下関市永田本町2-7-1)。

^{*2} 九州工業大学工学部 (〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)。

$$ml^2 \ddot{\theta} + ml\ddot{x} + mgl\theta + D_\theta \dot{\theta} = 0 \quad (4)$$

となる。

x, θ の Laplace 変換をそれぞれ $X(s), \Theta(s)$ とし、式(4)を Laplace 変換すると、伝達関数 $G(s)$ は次式となる。

$$G(s) = \frac{\Theta(s)}{X(s)} = \frac{-s^2}{l(s^2 + ps + q)} \quad (5)$$

ただし

$$p \equiv \frac{D_\theta}{ml^2}, q \equiv \frac{g}{l}$$

とする。

次に、 $G(s)$ を零次ホールドを用い、サンプリング周期 T で離散化したパルス伝達関数を $W_1(z)$ とすると次式となる。

$$W_1(z) = \frac{\theta(k)}{x(k)} = Z \left\{ \frac{1 - e^{-Ts}}{s} G(s) \right\} = -\frac{z^2 + b_1 z + b_2}{l(z^2 + a_1 z + a_2)} \quad (6)$$

ただし、 $\theta(k), x(k)$ はサンプリング時間 $t = kT$ における $\theta(t), x(t)$ の値とする。また

$$a_1 = -2e^{-\alpha T} \cos \beta T, a_2 = e^{-2\alpha T}$$

$$b_1 = -1 - e^{-\alpha T} (\cos \beta T + \gamma \sin \beta T)$$

$$b_2 = e^{-\alpha T} (\cos \beta T + \gamma \sin \beta T)$$

$$\alpha = \frac{1}{p}, \beta = \left(q - \frac{p^2}{4} \right)^{1/2}, \gamma = \frac{\alpha}{\beta}$$

である。

ここでは吊荷の位置制御を目的とするので、台車と吊荷の位置関係を求める。式(1)より $\theta \approx 0$ のまわりでは

$$x_1(k) = x(k) + l\theta(k) \quad (7)$$

図1 クレーンモデル

であるので、式(6)、(7)より台車の変位から吊荷の位置までのパルス伝達関数 $W_2(z)$ は次式となる。

$$W_2(z) = \frac{x_1(k)}{x(k)} = 1 + lW_1(z) = \frac{b_3 z + b_4}{z^2 + a_1 z + a_2} \quad (8)$$

ただし

$$b_3 = 1 - e^{-\alpha T} (\cos \beta T - \gamma \sin \beta T)$$

$$b_4 = e^{-2\alpha T} - e^{-\alpha T} (\cos \beta T + \gamma \sin \beta T)$$

である。

3. 適応制御系⁽⁷⁾

式(8)に演算時間遅れを考慮した次式に対して MRACS の設計を行う。

$$x_1(k+1) = -a_1 x_1(k) - a_2 x_1(k-1) + b_3 x(k-1) + b_4 x(k-2) \quad (9)$$

式(9)はむだ時間を含んでいるので、逐次代入すると次式が得られる。

$$x_1(k+1) = -a_1 \{-a_1 x_1(k-1) - a_2 x_1(k-2) + b_3 x(k-2) + b_4 x(k-3)\} - a_2 x_1(k-1) + b_3 x(k-1) + b_4 x(k-2) = \sum_{j=1}^3 \{\alpha_j x_1(k-j) + \beta_j x(k-j)\} \quad (10)$$

ただし、

$$\alpha_1 = a_1^2 - a_2, \alpha_2 = a_1 a_2, \alpha_3 = 0$$

$$\beta_1 = b_3, \beta_2 = b_4 - a_1 b_3, \beta_3 = a_1 b_4$$

である。

式(9)は2次式であったが、式(10)では3次式となっている。

式(10)における入力を

$$x(k) = \left\{ c(k+2) - \sum_{j=1}^3 f_j(k) x_1(k+1-j) - \sum_{j=2}^3 g_j(k) x(k+1-j) \right\} / g_1(k) \quad (11)$$

で合成する。ここで $c(k)$ は規範応答、 $f_j(k)$ と $g_j(k)$ ($j=1, 2, 3$) は適応ゲインである。

式(11)を規範応答に関して表現すると

$$c(k+1) = \sum_{j=1}^3 \{f_j(k-1) x_1(k-j) + g_j(k-1) x(k-j)\} \quad (12)$$

となるので、誤差方程式は次式となる。

$$e(k+1) = c(k+1) - x_1(k+1) = \sum_{j=1}^3 [\{f_j(k-1) - \alpha_j\} x_1(k-j) + \{g_j(k-1) - \beta_j\} x(k-j)] = \Phi(k-1) W(k-1) = \Phi(k) W(k-1) + \delta(k) \quad (13)$$

ここで

$$\Phi(k) = [f_1(k) - \alpha_1, f_2(k) - \alpha_2, f_3(k) - \alpha_3, \\ g_1(k) - \beta_1, g_2(k) - \beta_2, g_3(k) - \beta_3]$$

$$W(k) = [x_1(k), x_1(k-1), x_1(k-2), \\ x(k), x(k-1), x(k-2)]^T$$

$$\delta(k) = \{\Phi(k-1) - \Phi(k)\} W(k-1)$$

である。

次に

$$\varepsilon(k+1) = e(k+1) - \delta(k) \quad \dots\dots\dots (14)$$

とすると、式(13)より

$$\varepsilon(k+1) = \Phi(k) W(k-1) \quad \dots\dots\dots (15)$$

となるので、 $\Phi(k)$ の適応アルゴリズムを

$$\Phi(k+1) = \Phi(k) - \Omega(k) W(k-1) \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$\Omega(k) = \frac{\rho \varepsilon(k+1)}{\gamma + W(k-1)^T W(k-1)} \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$\text{for } 0 < \rho < 2, 0 < \gamma$$

とすると、 $e(k)$ の0への収束性が保証される。

4. 実験装置

システムの構成、ブロック図をそれぞれ図2、図3に示す。図に示されているように、計算機で入力パルス数を求め、パルスモータ駆動装置で水槽の上に取付けたリニアパルスモータを駆動して吊荷を左右に移動させる。また、このリニアパルスモータに小形パルスモータを取付けてあり、このモータでロープの巻上げを行う。

吊荷の位置はCCDカメラを通してX-Yトラッカにより検出される。

各要素の規格を以下に示す。

水槽：縦0.5m×横3m×高さ1m

リニアパルスモータ：可動域2m

分解能0.4mm/pulse

吊荷重量：270g

パルスモータ：分解能1.8°/pulse

X-Yトラッカ：分解能512×512

処理速度1/60s

計算機：PC-9801vm

5. 適応制御実験

ここでは、3章で設計したMRACSを適用した実験結果、およびその考察について述べる。

まず、水中、空中のステップ応答を図4に示す。サンプリング周期は0.4秒、ロープの長さは80cmである。

二つを比較すると、水中では水の粘性摩擦抵抗が大きく作用するため、振幅減衰は空中よりも大きい。2

章で得られた数式モデル式(8)のパラメータは粘性摩擦係数 D_0 を含んでおり、水中と空中ではパラメータの値が異なることがわかる。

実際のクレーンの作業ではロープの長さが変化するので、ロープの長さ l を変えて実験を行う。この l も D_0 と同様に式(8)のパラメータに含まれており、 l が変わるとパラメータも変動する。

一般の制御系設計では制御対象の動特性が変化すると再度設計をしなければならないが、適応制御ではそのまま適用可能である。よって、水中と空中の規範モデルの次数、適応ゲインの初期値、むだ時間等の諸条件を同じにして適応制御実験を行った。その条件を次に示す。

次数： $n=3$

適応ゲインの初期値： $f_j(0)=0$ ($j=1, 2, 3$)

$g_1(0)=1, g_j(0)=0$ ($j=2, 3$)

$\rho=1, \gamma=1$

むだ時間： $d=2$

サンプリング周期： $T=0.4$ 秒

吊荷が水中にある場合、空中にある場合の実験結果をそれぞれ図5、図6に示す。二つの図で $u(k)$ 、 $x_1(k)$ 、 $y(k)$ はそれぞれ台車への入力パルス数、吊荷の水平方向の位置、水槽底部からの高さである。また、 $f_j(k)$ 、 $g_j(k)$ ($j=1, 2, 3$)は適応ゲインである。

図より水中の結果と空中の結果はほとんど同じであることがわかる。

図2 システムの構成

図3 システムのブロック図

(a) 吊荷が水中にある場合

(b) 吊荷が空中にある場合

図 4 ステップ応答

まず $30 \leq k \leq 310$ ではロープの長さを一定にし、吊荷を左右に移動させた。 $140 \leq k$ で適応ゲインを調整しながら吊荷は規範応答に追従しており、 $240 \leq k$ では吊荷はほとんど振動せずに静止している。吊荷が静止すると式(13)の誤差 $e(k)$ が零になり、適応ゲインは変化していない。

次に $310 \leq k$ では、ロープの長さを変化させながら吊荷を左右に移動させた。 $k \leq 310$ で規範応答に追従していたが、 $310 \leq k \leq 430$ ではロープの長さが短くなりクレーンの動特性が変化すると、 $30 \leq k \leq 310$ における適応ゲインが一定値に収束していなかったために振動している。しかし、 $430 \leq k$ では適応ゲインの調整が十分にできており、ロープの長さが変化しても大きく振動せずに規範応答に良く追従している。また、吊荷を静止させる場合にも同様にほとんど振動は見られず、良好な結果が得られた。

吊荷を左右に動かすときと静止させるときを見ると、ロープが長いときに適応ゲインが大きく変化して

図 5 吊荷が水中にある場合の実験結果

図 6 吊荷が空中にある場合の実験結果

おり、短いときよりも位置制御が難しいことを示している。

また、水中と空中の結果を比較してみると、適応ゲインは同様な変化をしているが、空中のほうが入力パルスに振動が多く見られ、水中と空中とでは制御対象の動特性が異なることがわかる。しかし、適応制御を用いることにより、水中、空中のどちらも良好な制御結果が得られた。

以上より、設計した MRACS が有効であることが確認できた。

6. 結 論

クレーンについて解析し、適応制御系を設計して実験を行い、設計した MRACS の有効性を確認した。

吊荷が水中にある場合と空中にある場合について実験を行った。水中と空中では粘性摩擦抵抗等が異なる

が、MRACS を適用することによりどちらも同様な応答を得ることができ、また、十分な振動抑制も可能であることがわかった。

ロープの長さを変化させた場合にも、どちらも良好な制御性能が得られ、設計した MRACS が有効に動作していることが確認された。

文 献

- (1) 大川・澤田・相良・黒須, 計測自動制御学会第8回適応制御シンポジウム資料, (1988), 27.
- (2) Ohkawa, F., Sagara, S., Kurosu, K. and Yonezawa, Y., *China-Japan Symposium on Mechatronics*, Chengdu, China, (1988), 87.
- (3) 森下, 計測自動制御学会論文集, 14-6(1978), 127.
- (4) 美多・金井, 計測自動制御学会論文集, 15-6(1979), 125.
- (5) 田村・常川・小林, 機論, 54-504, C(1988), 1795.
- (6) Fukuda, T. and Mitsuoka, T., *Proc. 3rd Colloquium of Cyanes*, (1980), 304.
- (7) 米澤・大川, 計測自動制御学会論文集, 16-6(1980), 831.