

二つの外乱を考慮したクレーンの制御

—外乱オブザーバ，H 制御理論—

M2010MM037

清水健貴

指導教員：高見勲

1 はじめに

世間には，線形化されて作られたシステムは多く存在する．線形化されているとモデル化誤差というものが生じるため，システムでは良いシミュレーション結果を得られるかもしれないが，実際に用いた後の結果は，シミュレーションどおりの結果が得られないことが多い．それは，外乱や非線形要素を正しく考慮してないからである．機械システムでの実験には大変な費用がかかり，良い実験結果がでるまで何回も繰り返すと，ハイコストになりがちである．さらに，システムの外乱を考慮していなければ，クレーンを動かしている間に吊り荷が人の上に落ちる可能性も考えられる．そして，吊り荷の移動作業の多くは操縦者がついており，完璧な自動化がされているところは少ない．そういった面でも事故を未然に防ぐため，より安全性の高いシステムを作る必要性が求められる．そのためには，外乱要素を考慮することが大事になってくる．

外乱を対処する方法として，外乱オブザーバという制御方法がある．外乱オブザーバとはシステムに侵入する外乱をシステムの状態の一部として推定し，補償することにより安全性の高いシステムを作ることができる制御方法である．さらに，外乱オブザーバはコストの削減にもつながる．例えば，外乱を推定するためにセンサーを新たに付け加える必要がないので，センサーの費用も削減できるためコストにやさしい．また，クレーンのような吊り荷を運搬する道具は効率が重視される．港湾でのクレーンの使用料は時間に比例するので，吊り荷の回転と横揺れを抑制し積み下ろしなどの作業を効率化できればコスト削減にもつながる．西村らは，センサなしでのフライホイールと外乱オブザーバを用いて外乱抑制を行っている [1]．他にも外乱を対処する方法で挙げられるものとして，H 制御理論がある．これは外乱信号の影響を抑制する制御系を設計をすることができる．大内らは 1993 年に H 制御理論に基づく制振制御を行っている [2]．

外乱を考慮に入れてある論文は多くあるが，複数の外乱を考慮している論文は外乱を単体で考えてある論文よりも少ない．より安全性の高いシステムを作るためには，多くの危険性を考慮しておいた方がよい．多くの危険性を考慮しておくことで人々の安全をより確実に補償することができる．

1.1 研究内容

本研究では二つの外乱を考慮し，クレーン実験機をモデルにシミュレーションで理論を検証する．本研究で使う実験機の写真を図 1 に示す．今回，クレーンシステム

で使用する制御理論は外乱オブザーバと H 制御理論である．まず，最適レギュレータ理論に基づいて外乱オブザーバシステムを設計し，摩擦外乱を抑制するシステムを作る．さらに H 制御理論に基づいて制御系設計をほどこした風の外乱抑制のシステムを作り，前者の外乱オブザーバと後者の H 制御で分割制御をする．そして，シミュレーション結果から理論の有用性を検討する．最後は実験を行い，理論の有用性を確認する．本研究のポイントは外乱オブザーバを用いて一つの外乱（摩擦）を補償し，H 制御理論で外乱（風）に強いゲインを作り，分散制御を行うことにある．

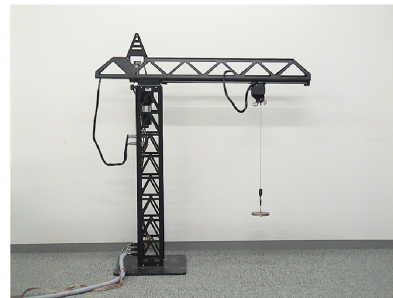


図 1 クレーン

2 ジブシステムの制御

ジブシステムは吊り荷の運搬に使うシステムで，前後の運搬を担うシステムである．そこでジブシステムの簡略図を下に示す．

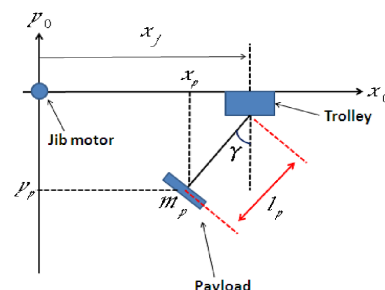


図 2 ジブモデル

ここで， $x_p(t)$:吊り荷のx方向の位置， $y_p(t)$:吊り荷のy方向の位置， $x_j(t)$:滑車の位置， $\gamma(t)$:吊り荷の角度， m_p :吊り荷の質量， l_p :ワイヤの長さである．

図2から数値化モデルを導出し、オイラーラグランジュの運動方程式を導き出す。

2.1 摩擦と風の外乱を考慮した設計

まず、図2から吊り荷の位置の式を導出すると以下になる。

$$x_p(t) = x_j(t) - l_p \sin(\gamma(t)) \quad (1)$$

$$y_p(t) = -l_p \cos(\gamma(t)) \quad (2)$$

そして、オイラーラグランジュの運動方程式により、摩擦と風の外乱を含めた微分方程式を導出すると下式のようになる [4][5].

$$\ddot{x}_j(t) = \frac{-m_p g r_{j,p}^2}{H_j} \gamma(t) + \frac{r_{j,p} K_{j,d}}{H_j} u_j(t)$$

$$- \frac{r_{j,p}^2}{H_j} (F_{j,c}(t) + f_{j,v} \dot{x}_j(t)) + \frac{r_{j,p}^2 \tau_i}{H_j l_p}$$

$$\ddot{\gamma}(t) = \frac{-g(m_p r_{j,p}^2 + m_t r_{j,p}^2 + J_\psi k_{g,j}^2)}{H_j l_p} \gamma(t) + \frac{r_{j,p} k_{j,d}}{H_j l_p} u_j(t)$$

$$- \frac{r_{j,p}^2}{H_j l_p} (F_{j,c}(t) + f_{j,v} \dot{x}(t)) + \frac{\tau_i (m_p r_{j,p}^2 + H_j)}{(m_p r_{j,p}^2 + H_j) m_p l_p^2}$$

$$H_j = J_\psi k_{g,j}^2 + m_t r_{j,p}^2$$

$u_j(t)$:ジブモータの入力電流, m_t :滑車の質量, g :重力加速度, $r_{j,p}$:ジブモータのギヤの半径, J_ψ :ジブモータの等価慣性モーメント, $K_{j,d}$:ジブモータのトルク定数, $F_{j,c}(t)$:摩擦力, $f_{j,v}$:粘性摩擦係数, τ_i :ペイロードに加わる風による力

ここで、最大静止摩擦力を $F_{j,static}$, 動摩擦力を $F_{j,sliding}$ として、 $u(t)$ を滑車に加えられた力とすると、 $F_{j,c}$ は下式で与えられる。

$$F_{j,c} = \begin{cases} \text{sgn}(\dot{x}_j(t)) F_{j,sliding} & \dot{x}_j(t) \neq 0 \\ u(t) & \dot{x}_j(t) = 0, |u(t)| < F_{j,static} \\ \text{sgn}(u_j(t)) F_{j,static} & \dot{x}_j(t) = 0, |u(t)| \geq F_{j,static} \end{cases}$$

そして、風の外乱は次のように示す。

$$\tau_i = \frac{1}{2} \rho v^2 S l_p \quad (3)$$

τ_i :ペイロードに加わる力, ρ :空気密度, v :風速, S :受風面積, l_p :ワイヤの長さ

このときジブの並進運動を、先端の方へ移動することを正の移動とし逆方向を負の移動とする。このとき、外乱である風は向かい風であるとする [3]。

2.2 H 制御理論による風の補償

H 制御理論に基づいて設計していく。H 制御理論とは、外乱信号の影響を抑制する制御系を構築するための制御理論である。H 制御は下式に基づいて設計する。

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_1 w(t) + B_2 u(t) \quad (4)$$

$$z(t) = C_1 x(t) + D_{11} w(t) + D_{12} u(t) \quad (5)$$

$$e(t) = C_2 x(t) + D_{21} w(t) + D_{22} u(t) \quad (6)$$

そして、一般化制御対象 $G(s)$ は次のようになっている。

$$G(s) = \left[\begin{array}{ccc|ccc} A_j & 0 & 0 & D_j & B_j & \\ -C_j & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W_u \\ W_{x1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_{x2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{array} \right]$$

一般化制御対象のブロック線図はの次のようになっている。

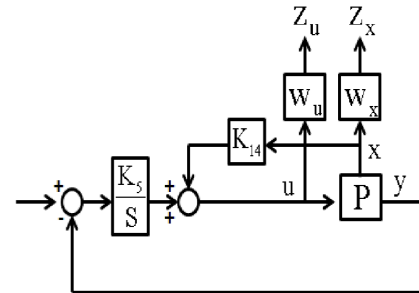


図3 ブロック線図：一般化制御対象

図3の W_u と W_x はそれぞれ入力と状態の重みであり、 W_x の重みは二つにしている。それぞれ実験機のクレーンのセンサでデータを採取できる、 x_j と γ である。 K はゲインであり、 K_{14} が H 制御で求めた最初の4つのゲインベクトル、 K_5 が5つ目のゲインである。

次に H 制御によって風を抑制できているかを確認する。本来風は非線形なものであるが、本研究では簡単化のためにステップ入力を風の外乱として加えることにする。

以下にそれを示す．

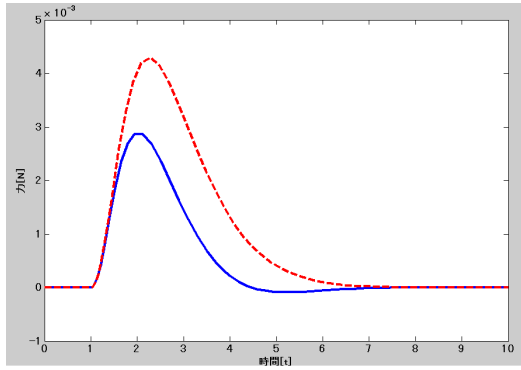


図 4 風外乱の考慮，有と無

図 4 の風外乱は 1 秒後に 0.108[N] を入れてシミュレーションを行っている．0.108 という数字は 4 節にある，風外乱の式に $\rho=1.2$, $v=15$, $S=0.001$, $l_p=0.8$ を入れて計算したものである．受風面積は現在実験機に搭載してあるペイロードの横の面積である．この受風面積の計算も簡単化のため剛体として考えてある．図 8 は点線が風の外乱を考慮して設計してないもの，実線が風の外乱を考慮してあるものになる．グラフを見てわかるとおり，風外乱を考慮してあるほうが外乱を抑えることができていることが分かる．次の節では本節の H 制御と前節の外乱オブザーバを組み合わせ，二つの外乱である摩擦と風に強い設計をする．

2.3 外乱オブザーバによる摩擦の補償

外乱オブザーバはシステムに侵入する外乱をシステムの状態の一部として推定するものである．本研究では，外乱オブザーバで二つの外乱を抑制しようとしていたが，無理であった．その経緯も含め本節では説明する．外乱オブザーバは下式に基づいて構成する [6] ．

$$\dot{\hat{x}}_{j,e}(t) = A_{j,e}\hat{x}_{j,e}(t) + B_{j,e}u_j(t) - G_j\varepsilon_j(t) \quad (7)$$

$$\hat{y}_j(t) = C_{j,e}\hat{x}_{j,e}(t) \quad (8)$$

$$\varepsilon_j = \hat{y}_j(t) - y_j(t) \quad (9)$$

ここで， $y_j(t)$ は吊り荷の位置を表し， $\hat{x}_{j,e}(t)$, $\hat{y}_j(t)$ はそれぞれ， $x_{j,e}(t)$, $y_j(t)$ の推定値であり， G_j はオブザーバゲインであり，同一次元状態オブザーバ理論を使い求めている． $\hat{x}_{j,e}(t)$ の拡大系の状態として入れてある外乱はシステムに侵入する外乱ベクトルで摩擦と風を入れてある．外乱オブザーバで推定した外乱を電流に変換し，フィードバックすることで，外乱の影響をモデルから除去する．その際，フィードバックする電流 $u_{j,d}(t)$ は以下である．

$$u_{j,d}(t) = -\frac{r_{j,p}}{K_{j,d}} \quad (10)$$

$r_{j,p}$ がジブのギヤの半径， $K_{j,d}$ はジブモータのトルク定数である．しかし，ここでは摩擦しか補償をしてない．外乱には，風と摩擦の二つの外乱が入っているが，クレーンの入力の一つである．入力一つで二つのものを制御するという事は，車で例えると，アクセル一つで方向と速度を同時調整しようとしているのと同じである．よって，二つの摩擦を相殺するようなフィードバックゲインを見つけるのは困難であることがわかった．そのため，一つの制御方式で一つの外乱を補償することにした．外乱オブザーバを用いた制御方法では摩擦の補償だけをし，H 制御で風外乱の補償をする．初めに，外乱である摩擦を推定しているかを確認するため，10 秒間のシミュレーションで 1 秒後に 2.2[N] の摩擦の外乱をステップ入力に入れ，外乱オブザーバ内で摩擦を推定できているかを確認する．それを次に示す．

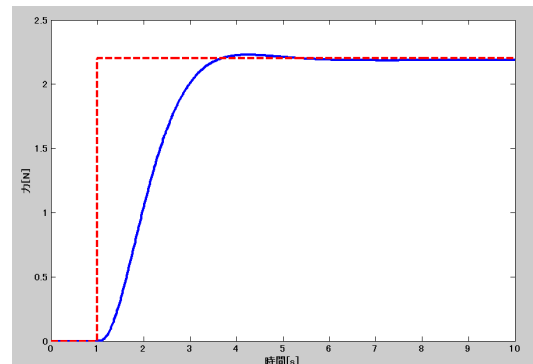


図 5 摩擦

図 5 の点線がステップ入力で入れた摩擦，実線が外乱オブザーバで推定した摩擦である．グラフからもわかる通り，2.2[N] に追従していることが確認できた為，外乱オブザーバで外乱を正確に推定できていることがわかる．次に非線形で設計した摩擦と，外乱オブザーバ内で推定している摩擦が一致しているかを確認する．以下にそれを示す．

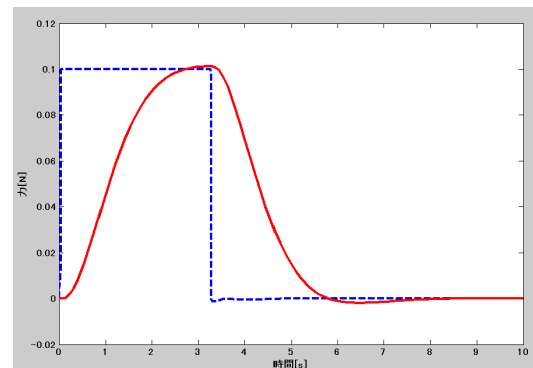


図 6 摩擦の比較

図 6 の点線が非線形摩擦で，実線が外乱オブザーバで

推定した摩擦である．グラフを比較すると，少々の誤差はあるが追従しているので摩擦を推定できていることがわかる．最後に外乱オブザーバが働いているかを確認することにした．目標値を 1[m] に設定し，外乱オブザーバ有のときと無のときで調べた図を以下に示す．

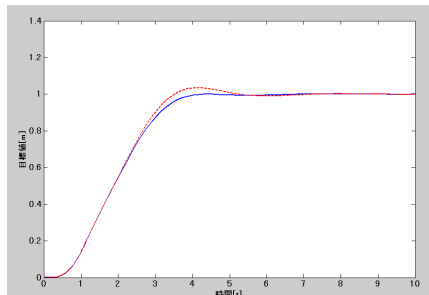


図 7 外乱オブザーバ有と無

図 7 のグラフは実線で示したほうが外乱オブザーバで推定した摩擦を相殺するためのフィードバックゲインを返したときのグラフ，点線のほうが外乱オブザーバを考慮していないグラフである．外乱オブザーバを考慮したほうがオーバーシュートなく，目標値に追従していることがわかる．そのことから，外乱オブザーバの有用性を確認することができた．

3 外乱オブザーバと H 制御理論による二つの外乱の補償

本節では，外乱オブザーバと H 制御で分散制御を行い，二つの外乱が入ったとしても良い制御ができることを確認する．そのため，ブロック線図は図 3 の外乱の部分を二つに分け， $K1-4$ ， $K5$ のゲインを H 制御理論に基づいて設定したものになる．つまり，外乱オブザーバで推定した摩擦を，入力である電流に変換して足すものをフィードバックし，摩擦外乱を相殺する．そして，H

制御で設計した風に強いゲインを加えて分散制御とする．そのときのシミュレーションと実験結果を以下に示す．

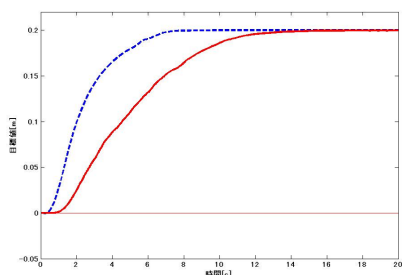


図 8 実験とシミュレーション

図 8 のグラフは点線がシミュレーション結果で実線が実験結果である．このとき，目標値を 0.2 m に設定し，20 秒間のシミュレーションと実験を行った．風の外乱は実際は非線形であるが，今回は簡単化のために 1 秒後にステップ入力では 0.108N を入れてある．風外乱の実験では市販の扇風機（風速 10[m/s] 前後）を使い 1 秒後に風をペイロードに当てて行った．このときの H 制御のゲインは $[-2.843, -0.3098, -1.4023, 0.6406, 3.0347]$ になっている．

4 終わりに

本研究では，外乱オブザーバと H 制御理論を混合し，クレーンの制御を行った．その際，外乱を摩擦だけではなく風も考慮に入れてシミュレーションを行った．外乱を考慮するにあたって，二つの理論をうまく組み合わせで分散制御を行った．そして，本研究の成果を以下に示す．

*二つの外乱を考慮して，良いシミュレーション結果を得られた．

*二つの理論をうまく組み合わせ，二つの外乱を抑制できた．

*シミュレーションと実験で，どちらも 0.2m に追従した．

5 参考文献

- [1] 西村公一，辻俊明，大西公平：『フライホイールによる吊り荷のセンサレス振動制御』電気学会論文誌 D，Vol. 126, No. 8, pp.1119-1125 (2006)
- [2] 大内茂人，美多勉，矢野浩司：『H 制御理論に基づく電動機の制振制御』電気学会論文誌 D，産業応用部門誌 113(3), 325-332, 1993
- [3] 本田：『H 制御によるクレーンの外乱抑制制御』南山大学，2011
- [4] 青木，高見：『2 乗和多項式に基づくクレーンのゲインスケジュールド制御』計測自動制御学会論文集，45-4, 208/214 (2009)
- [5] 長谷川：『消散性に基づく 2 自由度クレーンの制御』南山大学，2008
- [6] 安江：『摩擦と特性変動を補償したクレーンの制御』南山大学，2010