

Matlab を利用したシーソー倒立振子の安定化制御

宮澤 武*・荒井 誠*・西坂 卓**

Stabilization control of seesaw headstand pendulum by MATLAB

Takeshi MIYAZAWA・Makoto ARAI・Suguru NISHIZAKA

Abstract - Two rails are mounted on one seesaw, and the truck that keeps the headstand pendulum vertical on the other rail is set. The truck that is the balance of the seesaw is set on the other rail, and the control system of an unstable seesaw headstand pendulum is constructed. In this paper, it aims to attempt the stabilization control of the constructed seesaw headstand pendulum by using control system design software MATLAB.

Key words ; MATLAB , Seesaw , Headstand Pendulum , Stabilization control

1. はじめに

近年、コンピュータの性能向上に伴い二足歩行ロボットが開発され、複雑なバランス制御が可能となってきた。このように外部から制御力を加えなければ不安定となるシステムの安定化制御には状態方程式に基づく多入力多出力の現代制御理論¹⁾が必要となる。現代制御理論を用いた制御系設計の基礎を学ぶための対象として一般に倒立振子を用いた実験が行われている。

本研究室では、過去の卒業研究において回転型、直動型、回転振上げ型など多くの倒立振子システムを設計・製作し、その安定化制御プログラムを開発²⁾³⁾⁴⁾してきた。今回シーソー上に二つのレールを載せ、一方にはシーソーを水平を保つバランス台車を、他方のレールには振子を垂直に立てる倒立振子台車をセットする。振子を垂直に立てるためには、倒立振子台車を左右に適切に移動させる必要があり、シーソーのバランスを崩すことになる。ここでシーソーバランス台車を振子台車と反対方向へ移動することにより、シーソーのバランスをとりながら、倒立振子も垂直に保つシステムを構築する。このような不安定な制御系を安定させるためには、二つの台車駆動モーターを同時に適切にコントロールする必要がある。

近年制御系設計ソフトとして MATLAB が広く用いられている。本校においても学内 LAN を利用して MATLAB を使用できる環境が整っている。

本研究は、シーソー倒立振子を製作し、MATLAB の制御系ツール Simulink を用いて理論シミュレーションを行い最適制御係数の理論値を得る。それらの理論値を基にシ - ソ - のバランスと振子の倒立状態を維持する制御実験を行って最適実装プログラムを作成することにより、シーソー倒立振子の安定化制御システムを構築することを目的とする。

2. シーソー倒立振子の概要

2.1 シーソー倒立振子の数学モデル

Fig. 2.1 にシーソー倒立振子のモデルを示す。

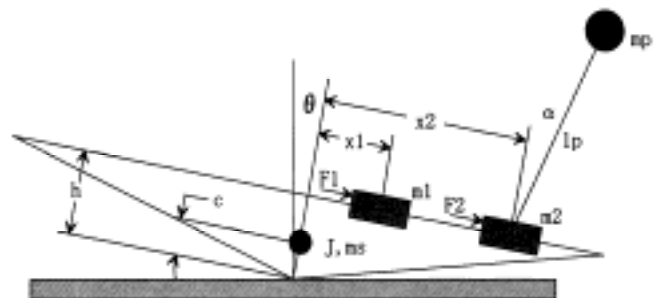


Fig. 2.1 Seesaw headstand pendulum model

* 釧路高専機械工学科

** 北見工業大学 機械システム工学科

ここで,

- m_1 : バランス台車の質量(kg)
- m_2 : 振り子と台車の質量(kg)
- m_p : 振り子の質量(kg)
- m_s : シーソーの質量(kg)
- J : 2台のシーソーと重心の回転モーメント(N・m)
- l_p : 振り子長さ L_p の 1/2 長さの位置 (質量位置)(m)
- h : ピボットからガイドシャフトまでの距離 (m)
- c : シーソーの質量の中心位置 (m)
- x_1 : バランス台車の変位 (m)
- x_2 : 倒立振り子台車の変位 (m)
- : 垂直方向からのシーソーの傾き (rad)
- : 振り子の倒れ角 (rad)
- F_1 : バランス台車に掛かる力 (N)
- F_2 : 倒立振り子台車に掛かる力 (N)

2.2 シーソー倒立振り子の運動方程式

この系の位置エネルギーに関する式は

$$PE_p = m_p g (h \cos \theta - x_2 \sin \theta + l_p \cos(\theta + \alpha)) \quad (2.1)$$

$$PE_{m_2} = m_2 g (h \cos \theta - x_2 \sin \theta) \quad (2.2)$$

$$PE_{m_1} = m_1 g (h \cos \theta - x_1 \sin \theta) \quad (2.3)$$

$$PE_s = m_s g c \cos \theta \quad (2.4)$$

この系の運動エネルギーに関する式は

$$KE_p = 0.5 m_p ((h \cos \theta - x_2 \sin \theta + l_p \cos(\theta + \alpha))^2 \dot{\theta}^2 + \dot{x}_2^2 \cos^2 \theta + (-h \sin \theta - x_2 \cos \theta - l_p \sin(\theta + \alpha))^2 \dot{\theta}^2 - \dot{x}_2^2 \sin^2 \theta - l_p^2 \dot{\theta}^2 \sin^2(\theta + \alpha)) \quad (2.5)$$

$$KE_{m_1} = 0.5 m_1 (\dot{x}_1^2 + h^2 \dot{\theta}^2 + x_1^2 \dot{\theta}^2) \quad (2.6)$$

$$KE_{m_2} = 0.5 m_2 (\dot{x}_2^2 + h^2 \dot{\theta}^2 + x_2^2 \dot{\theta}^2) \quad (2.7)$$

$$KE_s = 0.5 J \dot{\theta}^2 \quad (2.8)$$

トータルの運動エネルギー T と位置エネルギー V は次のようになる。

$$T = KE_{m_1} + KE_{m_2} + KE_s + KE_p \quad (2.9)$$

$$V = PE_{m_1} + PE_{m_2} + PE_s + PE_p \quad (2.10)$$

また, ラグランジェ方程式より

$$L = T - V \quad (2.11)$$

一般式を応用して運動方程式を求めると次式になる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_1} = F_1 \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_2} = F_2 \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha} = 0 \quad (2.15)$$

微分を続けると次の4つの非線形微分方程式が得られる。

$$G_1(x_1, x_2, \alpha, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{\theta}, \dot{\alpha}, F_1, F_2) = F_1 \quad (2.16)$$

$$G_2(x_1, x_2, \alpha, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{\theta}, \dot{\alpha}, F_1, F_2) = F_2 \quad (2.17)$$

$$G_3(x_1, x_2, \alpha, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{\theta}, \dot{\alpha}, F_1, F_2) = 0 \quad (2.18)$$

$$G_4(x_1, x_2, \alpha, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{\theta}, \dot{\alpha}, F_1, F_2) = 0 \quad (2.19)$$

2階微分の項を求める為に, 次の式に置き換える

$$\dot{x}_1 = D_1(x_1, x_2, \alpha, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{\theta}, \dot{\alpha}, F_1, F_2) \quad (2.20)$$

$$\dot{x}_2 = D_2(x_1, x_2, \alpha, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{\theta}, \dot{\alpha}, F_1, F_2) \quad (2.21)$$

$$\dot{\theta} = D_3(x_1, x_2, \alpha, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{\theta}, \dot{\alpha}, F_1, F_2) \quad (2.22)$$

$$\dot{\alpha} = D_4(x_1, x_2, \alpha, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{\theta}, \dot{\alpha}, F_1, F_2) \quad (2.23)$$

振り子とシーソーの傾きが0(ゼロ)付近の $\theta_1, \theta_2, \alpha_1, \alpha_2$

をそれぞれ, $\delta\theta_1, \delta\theta_2, \delta\alpha_1, \delta\alpha_2$ とすると, (2.24)式

で表すことが出来る。

$$\begin{bmatrix} \dot{\alpha}_1 \\ \dot{\alpha}_2 \\ \dot{\alpha}_3 \\ \dot{\alpha}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial D_1}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial D_1}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial D_1}{\partial \alpha_3} & \frac{\partial D_1}{\partial \alpha_4} & \frac{\partial D_1}{\partial \dot{\alpha}_1} & \frac{\partial D_1}{\partial \dot{\alpha}_2} & \frac{\partial D_1}{\partial \dot{\alpha}_3} & \frac{\partial D_1}{\partial \dot{\alpha}_4} \\ \frac{\partial D_2}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial D_2}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial D_2}{\partial \alpha_3} & \frac{\partial D_2}{\partial \alpha_4} & \frac{\partial D_2}{\partial \dot{\alpha}_1} & \frac{\partial D_2}{\partial \dot{\alpha}_2} & \frac{\partial D_2}{\partial \dot{\alpha}_3} & \frac{\partial D_2}{\partial \dot{\alpha}_4} \\ \frac{\partial D_3}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial D_3}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial D_3}{\partial \alpha_3} & \frac{\partial D_3}{\partial \alpha_4} & \frac{\partial D_3}{\partial \dot{\alpha}_1} & \frac{\partial D_3}{\partial \dot{\alpha}_2} & \frac{\partial D_3}{\partial \dot{\alpha}_3} & \frac{\partial D_3}{\partial \dot{\alpha}_4} \\ \frac{\partial D_4}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial D_4}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial D_4}{\partial \alpha_3} & \frac{\partial D_4}{\partial \alpha_4} & \frac{\partial D_4}{\partial \dot{\alpha}_1} & \frac{\partial D_4}{\partial \dot{\alpha}_2} & \frac{\partial D_4}{\partial \dot{\alpha}_3} & \frac{\partial D_4}{\partial \dot{\alpha}_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \dot{\alpha}_1 \\ \dot{\alpha}_2 \\ \dot{\alpha}_3 \\ \dot{\alpha}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial D_1}{\partial F_1} & \frac{\partial D_1}{\partial F_2} \\ \frac{\partial D_2}{\partial F_1} & \frac{\partial D_2}{\partial F_2} \\ \frac{\partial D_3}{\partial F_1} & \frac{\partial D_3}{\partial F_2} \\ \frac{\partial D_4}{\partial F_1} & \frac{\partial D_4}{\partial F_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

この計算で求めた $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ を使ってシステムの状態方程式を求めると、

$$\dot{x} = Ax + BF \quad (2.25)$$

となる。ここで A: システム行列, B: 配分行列である。

$$x = [x_1 \ \theta \ x_2 \ a \ \dot{x}_1 \ \dot{\theta} \ \dot{x}_2 \ \dot{a}]^T$$

$$x = [x_1 \ \theta \ x_2 \ a \ \dot{x}_1 \ \dot{\theta} \ \dot{x}_2 \ \dot{a}]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ a & b & c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ d & e & f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ g & h & i & j & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k & l & m & n & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ o & p \\ q & r \\ s & t \\ u & v \end{bmatrix}$$

$$F = [F_1 \ F_2]^T \quad (2.26)$$

$a \sim v$ はラグランジェの運動方程式によって求められたシステムパラメータである。x は状態変数マトリクス, F は制御量マトリクスで各台車にかかる力である。

ここで、

- V : モーターに掛かる電圧 (V)
- K_m : モーターの逆起電力定数 = 0.023V/(rad/sec)
- K_g : モーター内部のギア比
- R : モーターコイルの抵抗 ()
- r : モーターギアの半径 [ピニオン] (m)
- ω_m : モーター軸の角速度 (rad/s)
- ω_g : ピニオンの角速度 (rad/s)
- \dot{x} : 台車速度 (m/s)
- F : 台車にかかる力 (N)
- M : 台車の質量 (kg)
- I : モーターコイルの電流 (A)
- T : モータートルク (N)

として、

F をモーターに掛かる電圧 V に置き換える。

電気的には

$$V = IR + K_m \omega_g = IR + K_m K_g I \quad (2.27)$$

機械的には

$$T = Fr = K_m K_g I \quad \& \quad \dot{x}' = r \omega_g \quad (2.28)$$

(2.27), (2.28) より、

$$F = \frac{K_m K_g}{Rr} V - \frac{K_m^2 K_g^2}{Rr^2} x' \quad (2.29)$$

実際の値を代入すると

$$F_1 = 1.68V_1 - 7.34\dot{x}_1 \quad (2.30)$$

$$F_2 = 1.68V_2 - 7.34\dot{x}_2 \quad (2.31)$$

更にシーソー角度とのバランスをとる台車に積分器を追加すると

$$\dot{\alpha} = x_2 \quad (2.32)$$

$$\dot{\xi} = \quad (2.33)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{\theta} \\ \dot{x}_2 \\ \dot{a} \\ \ddot{x}_1 \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{a} \\ \dot{\sigma} \\ \dot{\xi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{m_1 g}{J} & -\frac{m_1 g c}{J} & -g h \frac{m_2 m_g}{J} & 0 & -7.34 \frac{J m_1 b^2}{J m_1} & 0 & -7.34 \frac{b^2}{J} & 0 & 0 & 0 \\ g \frac{m_1}{J} & g c \frac{m_1}{J} & g \frac{m_2 m_g}{J} & 0 & 7.34 \frac{b^2}{J} & 0 & 7.34 \frac{b^2}{J} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{m_1 g}{J} & -\frac{m_1 g c}{J} & -g h \frac{m_2 m_g}{J} & -m_p \frac{g}{m_2} & -7.34 \frac{b^2}{J} & 0 & -7.34 \frac{J m_2 b^2}{J m_2} & 0 & 0 & 0 \\ -m_1 \frac{g}{J} & -m_1 g \frac{c}{J} & -g \frac{m_2 m_g}{J} & g \frac{m_2 m_g}{m_2} & -7.34 \frac{b^2}{J} & 0 & -7.34 \frac{J m_2 b^2}{J m_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \theta \\ x_2 \\ a \\ \dot{x}_1 \\ \dot{\theta} \\ \dot{x}_2 \\ \dot{a} \\ \sigma \\ \xi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1.68 \frac{J m_1 b^2}{J m_1} & 1.68 \frac{b^2}{J} \\ -1.68 \frac{b^2}{J} & -1.68 \frac{b^2}{J} \\ 1.68 \frac{b^2}{J} & 1.68 \frac{J m_2 b^2}{J m_2} \\ 1.68 \frac{b^2}{J} & 1.68 \frac{J m_2 b^2}{J m_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

従って、F を V に置き換えた状態方程式は、(2.34)となる。

2.3 状態フィードバック

状態フィードバックとは、状態変数 X が x_1 : バランス台車の変位 (m), x_2 : 倒立振り台車の変位 (m), θ : 垂直方向からのシーソーの傾き (rad), α : 振子の倒れ角 (rad) 及びそれらの微分 (速度) からなり、これらが測定できるという仮定のもとでフィードバックをかけることである。制御量 V を n 個の状態変数 X にある定数 (フィードバック係数) をかけて次のように与える。

$$V = -K \cdot X \quad (2.35)$$

このシステムのフィードバックによる制御力 V は、状態変数 X のそれぞれに 10 個の係数をかけたものの和として表される。

$$V = (k_a x_1 + k_b \theta + k_c x_2 + k_d \alpha + k_e \dot{x}_1 + k_f \dot{\theta} + k_g \dot{x}_2 + k_h \dot{\alpha} + k_i \sigma + k_j \xi) \quad (2.36)$$

シーソー倒立振子のシーソーを水平に保ち、倒立振子を垂直に立て、2 つの台車をそれぞれ基準の位置に保つためには、フィードバック係数行列 K の要素をそれぞれどのように選ぶかが問題となる。これを計算するツールが MATLAB の LQR コマンドである

2.4 最適レギュレータ⁵⁾

最適レギュレータ理論とは、制御対象が式 (2.25) で表せるとき、次に示す評価関数

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + R F^2) dt \quad (Q \geq 0, R > 0) \quad (2.37)$$

を最小にするような設計変数 Q, R を選定し、フィードバック係数行列 K を求める方法である。このとき、 Q は対角行列で表すと

$$Q = \text{diag}\{q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7, q_8, q_9, q_{10}\} \quad (2.38)$$

となり、式 (2.37) に代入すると次式になる。

$$J = \int_0^{\infty} (q_1 x_1^2 + q_2 x_2^2 + q_3 x_3^2 + q_4 x_4^2 + q_5 x_5^2 + q_6 x_6^2 + q_7 x_7^2 + q_8 x_8^2 + q_9 x_9^2 + q_{10} x_{10}^2 + R F^2) dt \quad (2.39)$$

式 (2.39) より、 q_i は x_i の収束を早めようという要求と、 R は制御力 F を過大にしたくないという要求の妥協を図っている。可制御な制御対象に対して、 J を最小化するフィードバックゲイン K は唯一つに定まり、

$$K = -R^{-1} B^T P \quad (2.40)$$

で与えられる。ただし、 P はリカッティ方程式

$$PA + A^T P - R^{-1} P B B^T P + Q = 0 \quad (2.41)$$

の解である。

2.5 フィードバック係数

最適レギュレータ理論より、MATLAB の Control System Tool の LQR (Linear Quadratic Regulator) コマンドを利用して、状態フィードバックゲイン K を求めて状態フィードバックを行えば任意の初期状態にある系を平衡状態にできる。すなわち、すべての状態変数 $x_1, \theta, x_2, \alpha, \dot{x}_1, \dot{\theta}, \dot{x}_2, \dot{\alpha}, \sigma, \xi$ をゼロの状態へ落ち着かせることができる。

これは、初期状態によるものや外乱による振子やシーソーの傾き、それぞれの台車を基準位置に保つことができることを意味している。

平衡状態からのずれをどの程度速く修正するかは、それぞれの指定する制御 Q, R 変数の値に依存する。 q_i の値を操作することで台車の動きを早くすることや、制御力に対する制御変数 R を大きくすることで制御力に制限を加えることも容易に行えるようになる。

しかし、重要なのは Q と R の比重であり、応答性を高めて操作量を少なくしたからといって、 Q, R をともに大きくしても最適点は変わらないので結果として意味を持たない。このことを考慮して制御系にあった。最適フィードバック係数を求める。

倒立振子・シーソー・それぞれの台車系の状態フィードバック係数に対して、最適フィードバック係数を適用したとき、シーソーの角度や振子の角度、それぞれの台車の位置が時間的にどのような挙動を示して平衡状態に落ち着くかについて実験を行い、その実験データをグラフ化して確認する。

3. 理論シミュレーション

MATLAB による LQR 法を使用してフィードバック係数行列 K を求めるために、振り子・台車系の理論シミュレーションを行って、概略パラメータを決める。シミュレーション条件は台車がシーソー中央から 10 cm 離れ、角度が 0.05rad 倒れた状態を設定し、安定状態に戻る過程を調べた。この条件下でシミュレートすることでフィードバック係数 K に対する制御の傾向を調べることができる。

シミュレーションのブロック線図を Fig. 3.1 に示す。

・シミュレーション例として

制御変数 Q, R を, $Q_1 = 1000, Q_2 = 3, Q_3 = 0, Q_4 = 0, R = 0.0001$, としたときの LQR 法によるフィードバック係数 $K (\times 10^3)$ は,

$K_1 = -3.1623, K_2 = -2.4700, K_3 = -1.2569, K_4 = -0.4370$, となり、そのシミュレーション結果を Fig. 3.2 に示す。

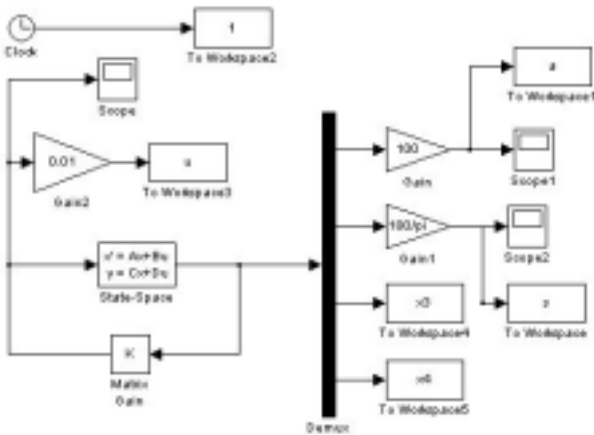


Fig. 3.1 Block Diagram of Simulation

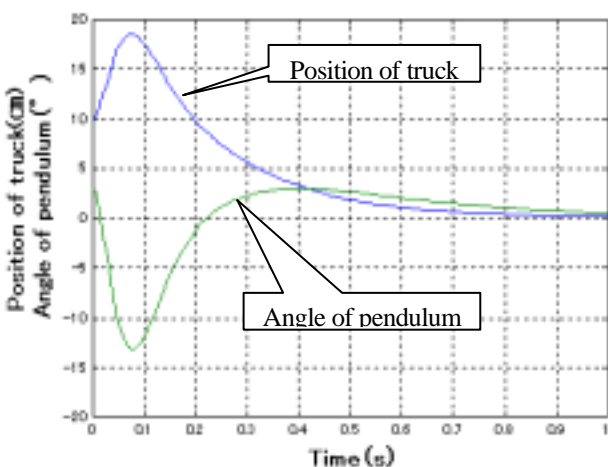


Fig. 3.2 Result of simulation

4. 制御実験

4.1 実験装置の構造



Photo 4.1 Experimental device

実験装置の全容を Photo 4.1 に示す。

4.2 制御システム

実験装置の信号の流れを Fig. 4.1 に示す。

4.3 制御実験

理論シミュレーションの傾向を参考に、MATLAB を使用して式(2.26)におけるシステム行列 A , 配分行列 B の各パラメータ $a \sim v$ を計算し、LQR 法によってフィードバック係数 K を求め、Simulink によって制御ブロック線図を作成して実験を行った。

1) 制御実験例

理論シミュレーションの Q, R を参考に、制御変数 Q
 $q(1,1) = 100, q(2,2) = 10000, q(3,3) = 100,$
 $q(4,4) = 10000, q(5,5) = 100, q(6,6) = 100, q(7,7)$
 $= 100, q(8,8) = 60, q(9,9) = 0.5, q(10,10) = 3$
 制御変数 R

$R(1,1) = 0.00015, R(2,2) = 0.00003$

を選定すると、このとき、状態フィードバック係数 $K (\times 10^3)$ は,

$K_a = 1.9456, K_b = 0.4018, K_c = 0.0123,$

$K_d = 0.0022 + 0.0036i, K_e = 0.0022 \quad 0.0036i,$

$K_f = 0.0043, K_g = 0.0020, K_h = 0.0011, K_i = \pm 0.000,$
 $K_j = \pm 0.000,$

となる。この実験結果を Fig. 4.2 に示す。

制御を開始してから、15秒でシーソーのストップをはずした。それから約10秒で、振り子・シーソーの角度ともに収束し、各台車の動きも小刻みな動きとなって安定していることがわかる。

バランス台車と振り子台車の位置が同じ方向へ移動し

ているように記録されているが、各台車モータを対面させて取り付けられているので、実際の移動方向は、反対方向となる。

実験ビデオは <http://www.kushiro-ct.ac.jp/comp/mech/mep1/sotuken/study16.htm> に掲載されている。

5. まとめ

1) MATLAB を利用した制御系設計は、現代制御理論のマトリックス計算を容易に実行することができ、数回のパラメータの変更と実験を繰り返せば最適制御係数が得られる。

2) シーソー倒立振り子のような微妙なバランスシステムでは、オーバーシュートは極力避けるべきである。

即ち、振り台車、バランス台車ともに少ない移動量でシーソー・振り子を安定させるようなフィードバック係数 K の選定が望ましいといえる。

参考文献

- 1) 白石著：入門現代制御理論 第3章 pp19-56
日刊工業新聞社出版 '95,03
- 2) 宮澤武・荒井誠：釧路高専紀要第26号 pp1-6
- 3) 宮澤武・荒井誠：釧路高専紀要第28号 pp5-10
- 4) 宮澤武・荒井誠：釧路高専紀要第31号 pp1-6
- 5) 川田昌克・西岡勝博共著：MATLAB/Simulinkによるわかりやすい制御工学 第8章 pp159-176
森北出版 '02,09

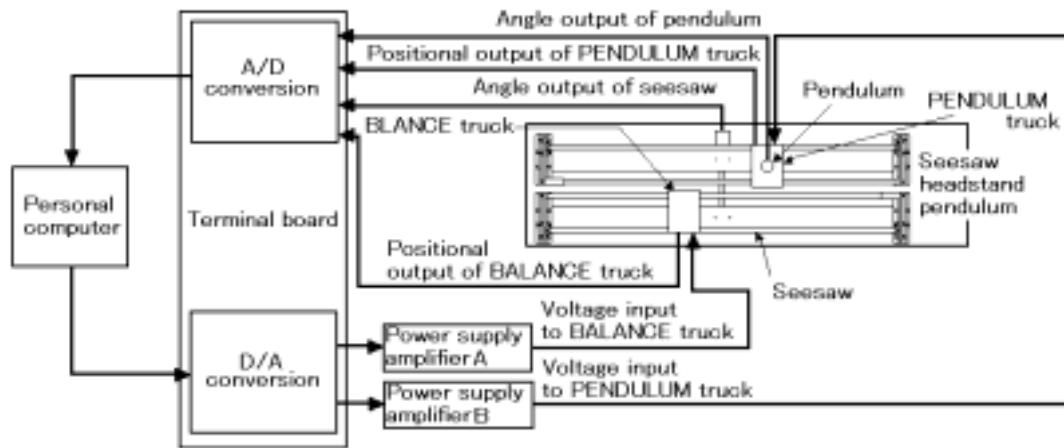


Fig. 4.1 Control system

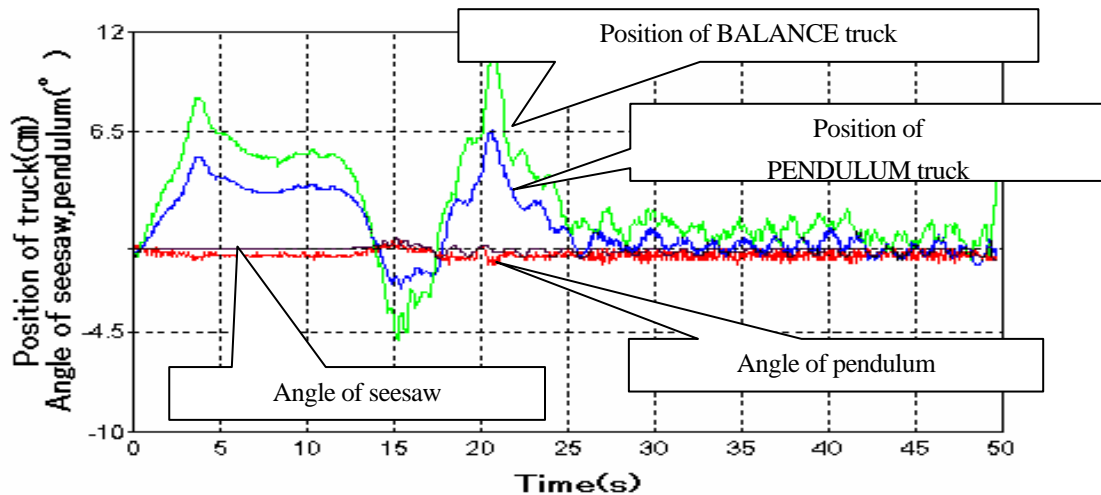


Fig. 4.2 Result of experiment