アドバンスト制御の学習

- 外乱オブザーバ
- FRIT によるデータ駆動制御
- 量子化制御

学習できる
内容の一例

アドバンスト制御の学習

- ▶ **外乱オブザーバ**
- ▶ FRIT によるデータ駆動制御
- ▶ 量子化制御

▶ 外乱オブザーバ

$$\xi = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} \begin{matrix} \cdots\cdots \text{観測可} \\ \cdots\cdots \textbf{観測不可} \end{matrix}$$

制御対象

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_1 \\ \dot{\xi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} v$$

$$\eta = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} \ (= \xi_1) \quad \cdots\cdots \text{観測量}$$

最小次元オブザーバ (Gopinath 形式)

$$\begin{cases} \dot{\hat{\eta}} = A_{11}\eta + A_{12}\hat{\xi}_2 + B_1 v \\ \dot{\hat{\xi}}_2 = A_{21}\eta + A_{22}\hat{\xi}_2 + B_2 v - G(\dot{\eta} - \dot{\hat{\eta}}) \end{cases}$$

$\hat{\xi}_2$：ξ_2 の推定値

G：オブザーバゲイン

▶ 外乱オブザーバ

$$\xi = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ d \end{bmatrix} \begin{matrix} \cdots\cdots \text{観測可} \\ \cdots\cdots \textbf{観測不可} \end{matrix}$$

アーム駆動系

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_1 \\ \dot{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix} v$$

$$\eta = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ d \end{bmatrix} \; (= \omega_1) \quad \cdots\cdots \text{観測量}$$

$$\dot{\omega}_1 + a\omega_1 = bv - d$$

$$\omega_1 := \dot{\theta}_1$$

$$\ddot{\theta}_1 + a\dot{\theta}_1 = bv - d$$

外乱オブザーバ

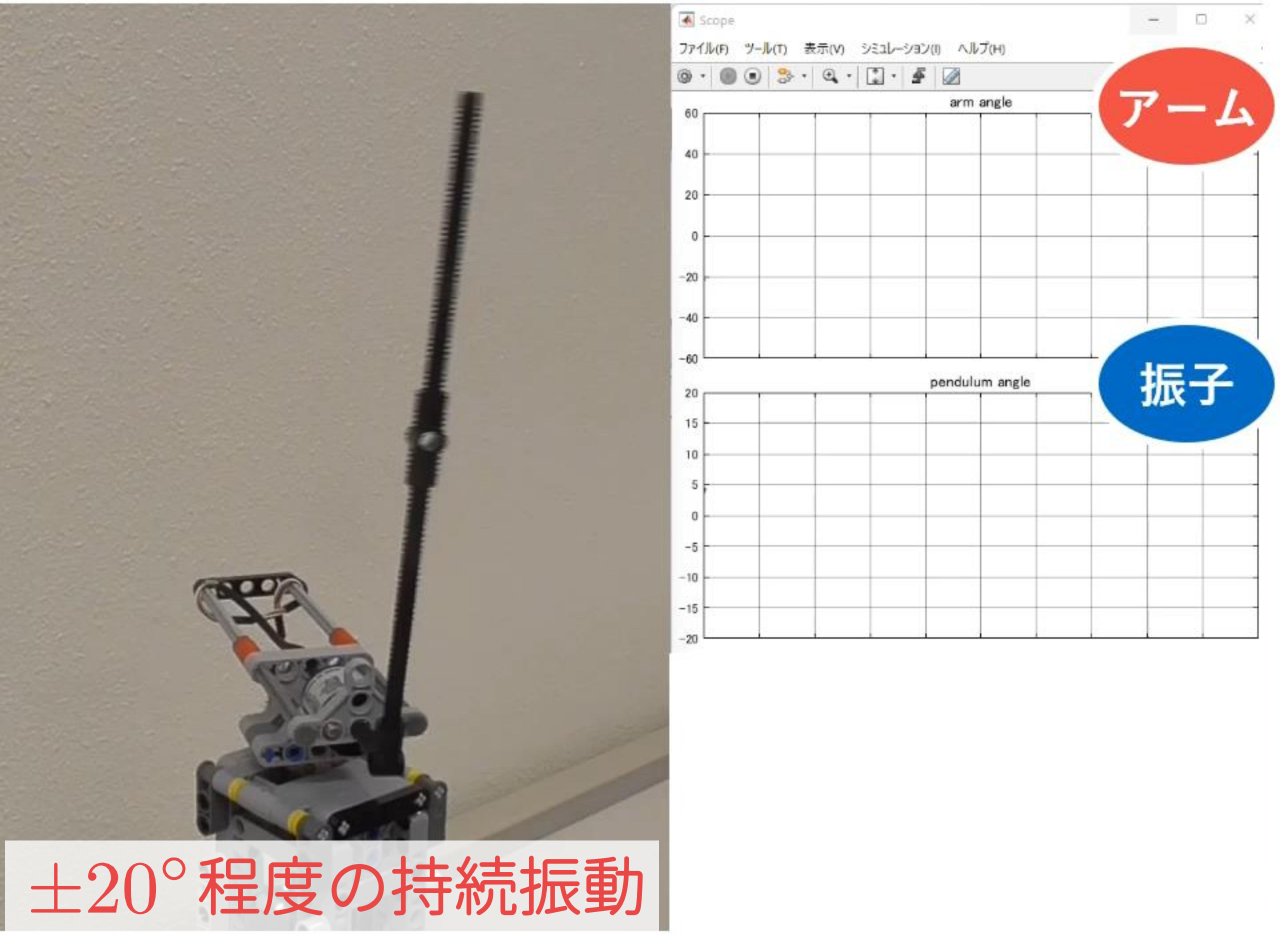
$$\begin{cases} \dot{\widehat{\omega}}_1 = -a\omega_1 - 1 \cdot \widehat{d} + bv \\ \dot{\widehat{d}} = 0 \cdot \omega_1 + 0 \cdot \widehat{d} + 0 \cdot v - G(\dot{\omega}_1 - \dot{\widehat{\omega}}_1) \end{cases}$$

$$\widehat{d} = \frac{1}{1+Ts}\{-(s+a)\omega_1 + bv\}, \quad T = \frac{1}{G}$$

▶ 外乱オブザーバ

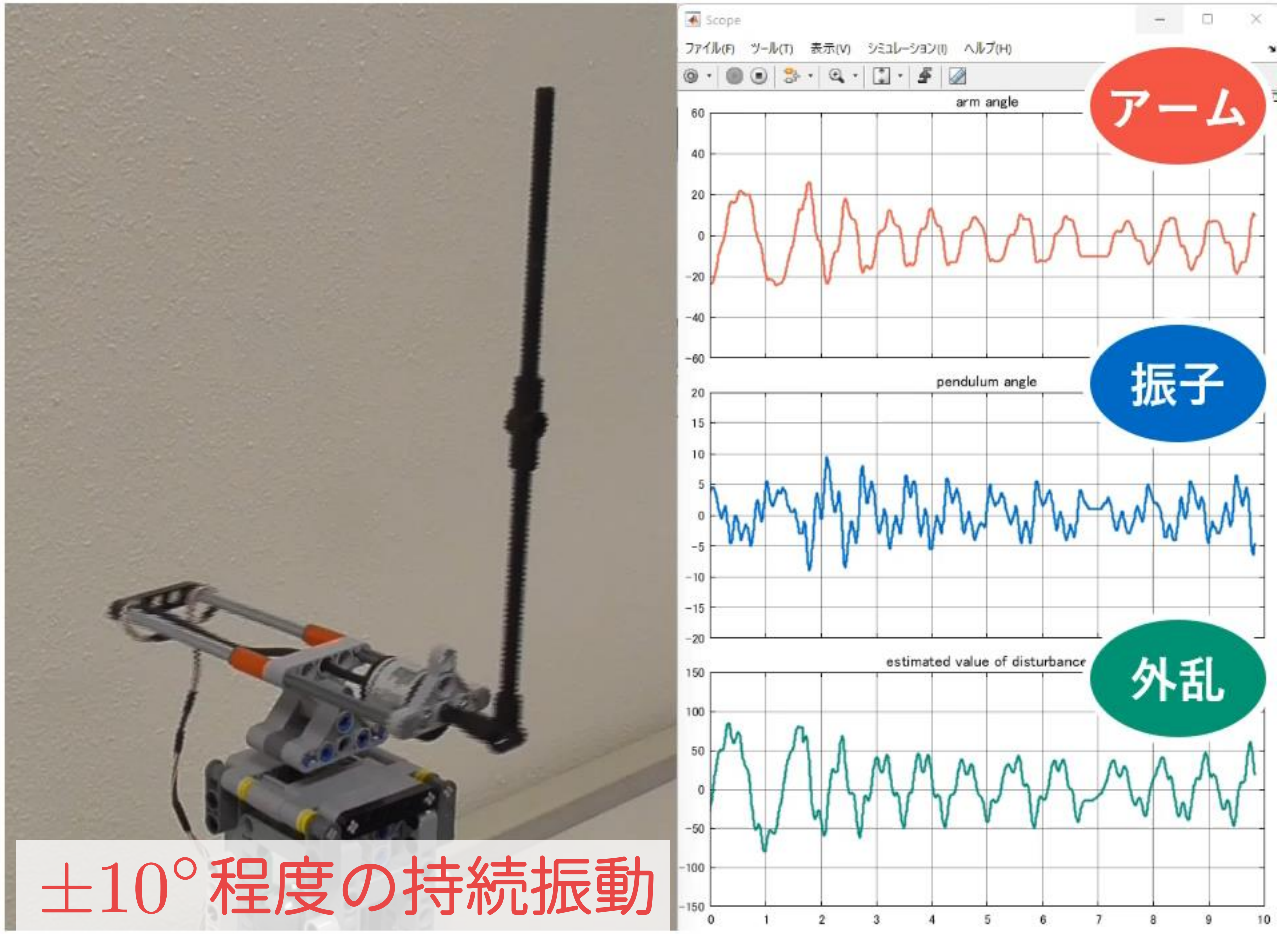
$$v = Kx$$

外乱オブザーバによる補償なし



$$v = u + \frac{1}{b}\hat{d}, \quad u = Kx$$

外乱オブザーバによる補償あり



アドバンスト制御の学習

- ▶ 外乱オブザーバ
- ▶ **FRIT によるデータ駆動制御**
- ▶ 量子化制御

▶ FRIT によるデータ駆動制御

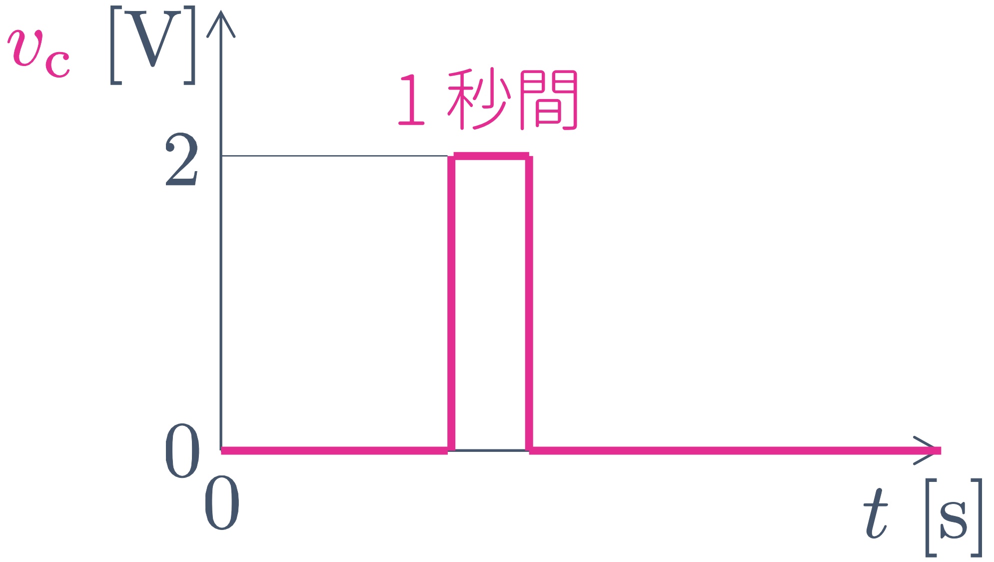
金子ら：Trans. of SICE, Vol. 49, No. 6, pp. 632-638 (2013)

回転型倒立振子の状態方程式

$\dot{x} = Ax + Bv$ …… ノミナルモデル

コントローラ

$v = K_0 x$



ステップ 1

パルス外乱を加えたコントローラ

$$v = K_0 x + v_c$$

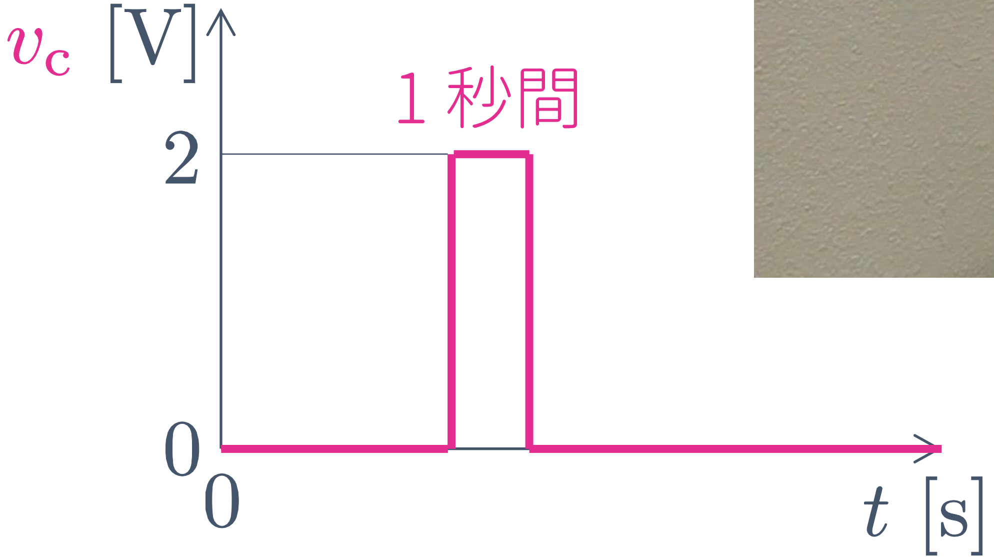
を用いた**予備実験**を行い、**制御入力**および**状態変数**の**実験データ**

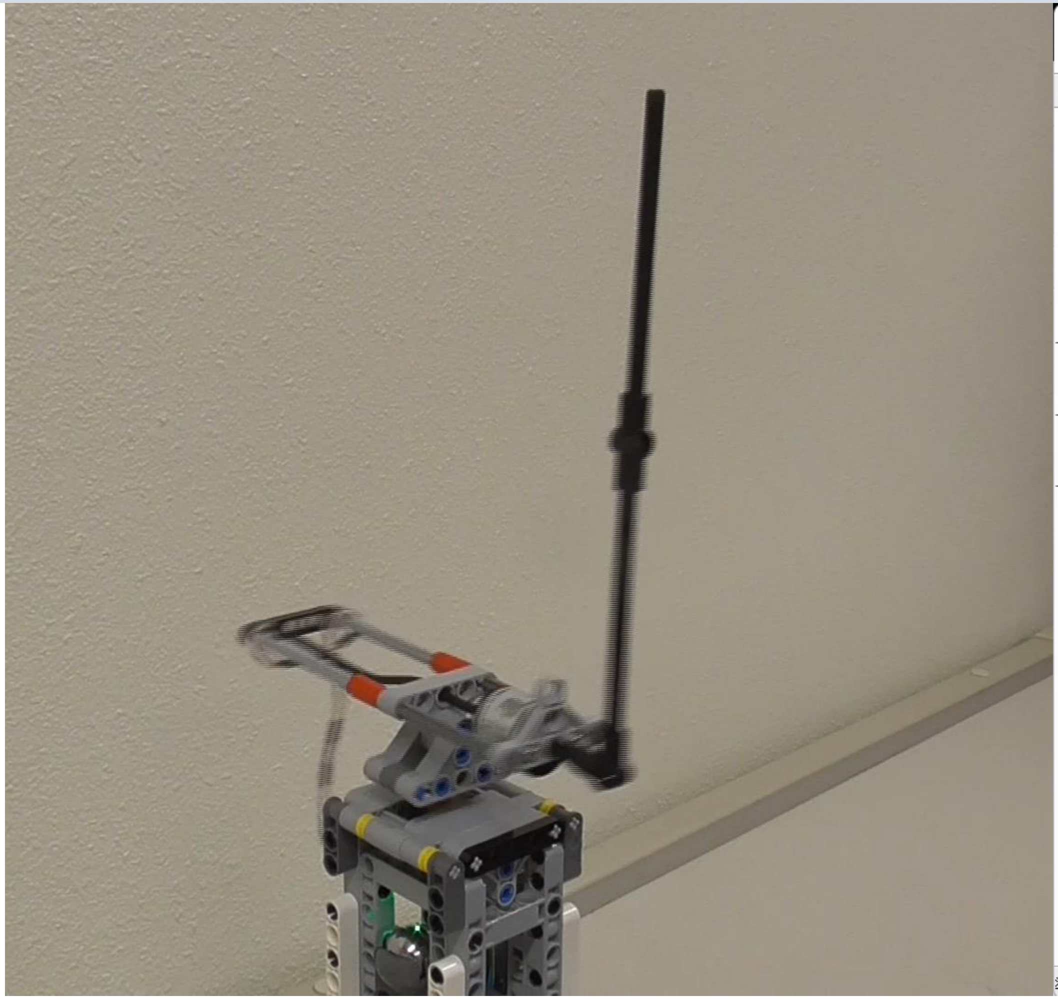
$$v_0[n] = v[n],\ x_0[n] = x[n]$$

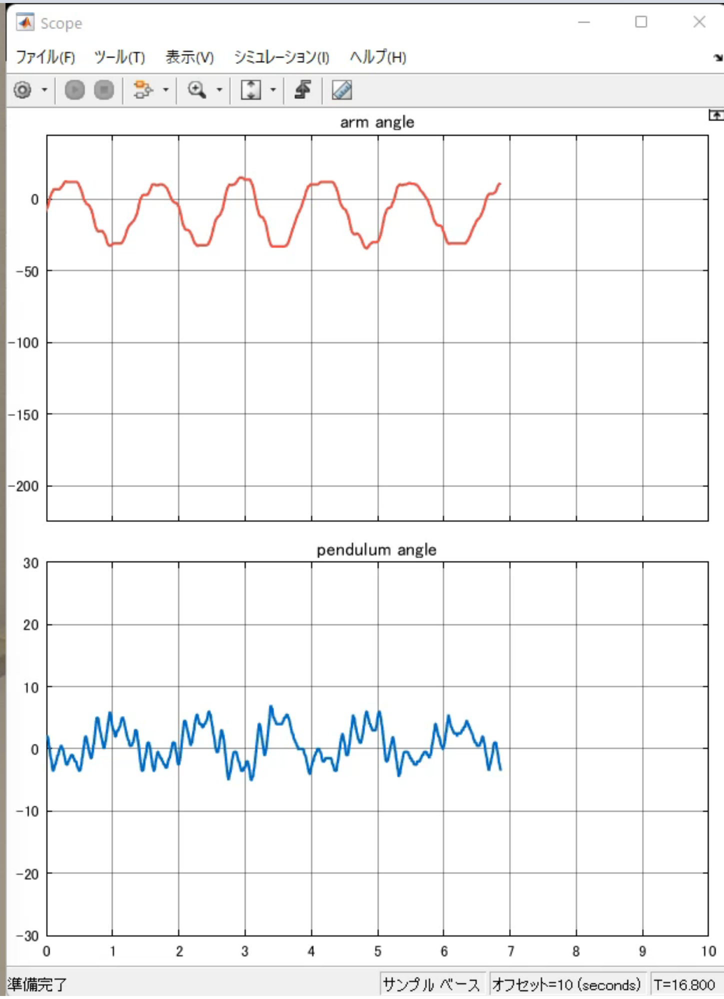
を取得

▶ FRIT によるデータ駆動制御

ステップ1







▶ FRIT によるデータ駆動制御

ステップ 2

評価関数が

$$E = \sum_{n=1}^{k} e[n]^\top e[n]$$

→ **min**

$$e[n] = x_0[n] - \widetilde{x}[n]$$

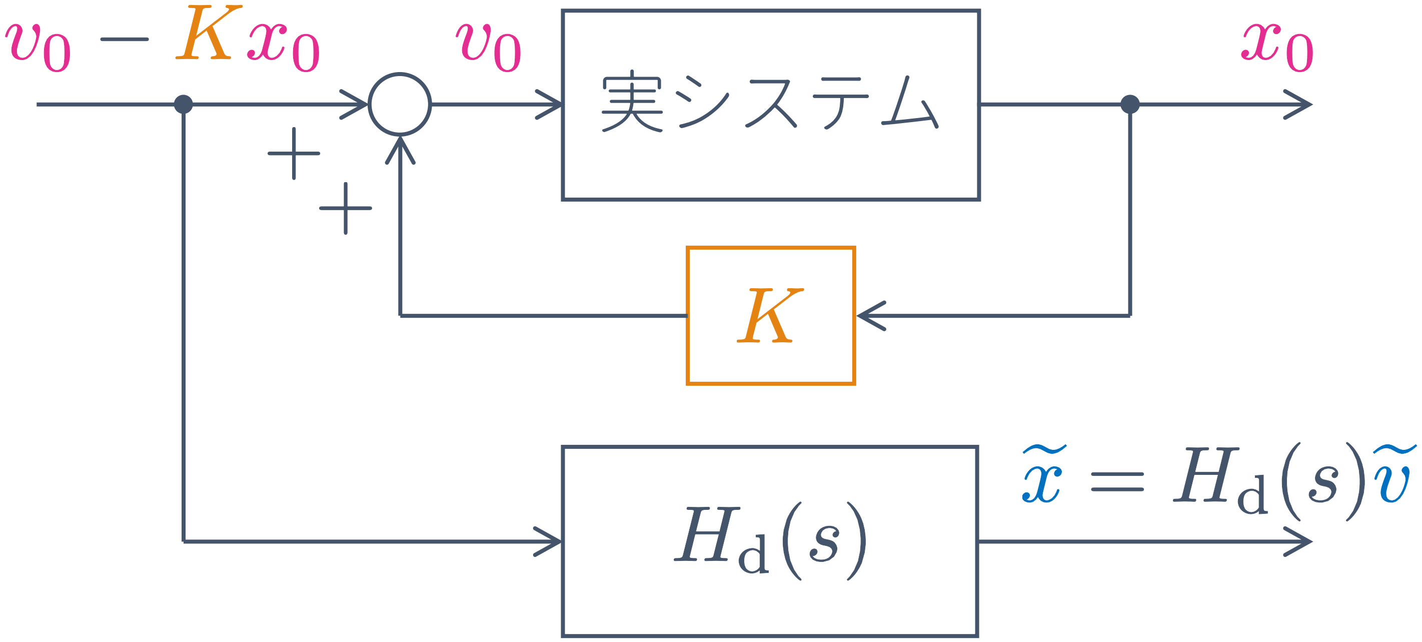
となるように**ゲイン**

$$K := K_{\mathrm{FRIT}}$$

を決定 …… **最小 2 乗法**

擬似外生信号

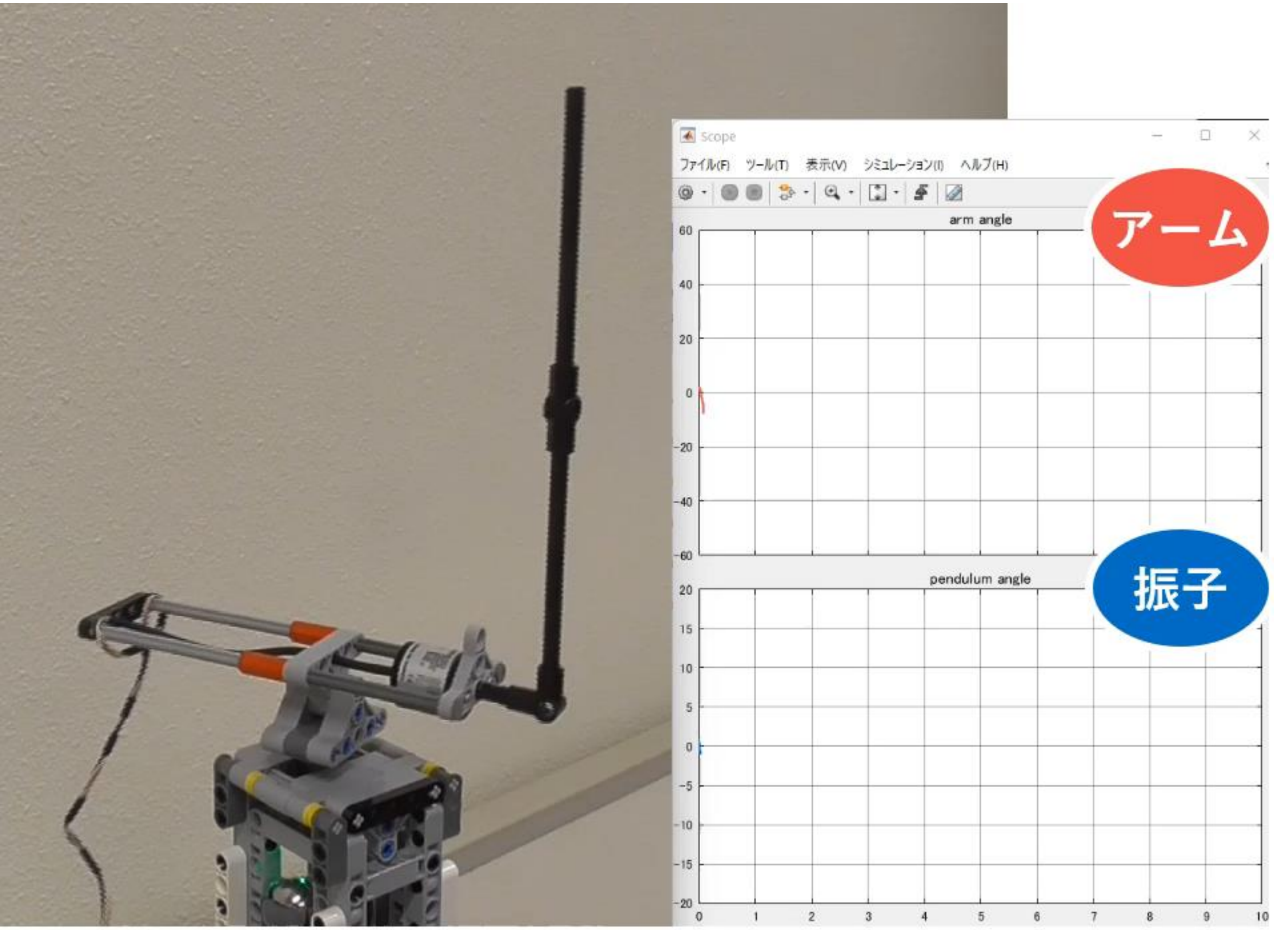
$$\widetilde{v} = v_0 - Kx_0$$



$$H_\mathrm{d}(s) = \left\{sI - \left(A + BK_0\right)\right\}^{-1} B$$

▶ FRITによるデータ駆動制御

最適レギュレータ (LQR)



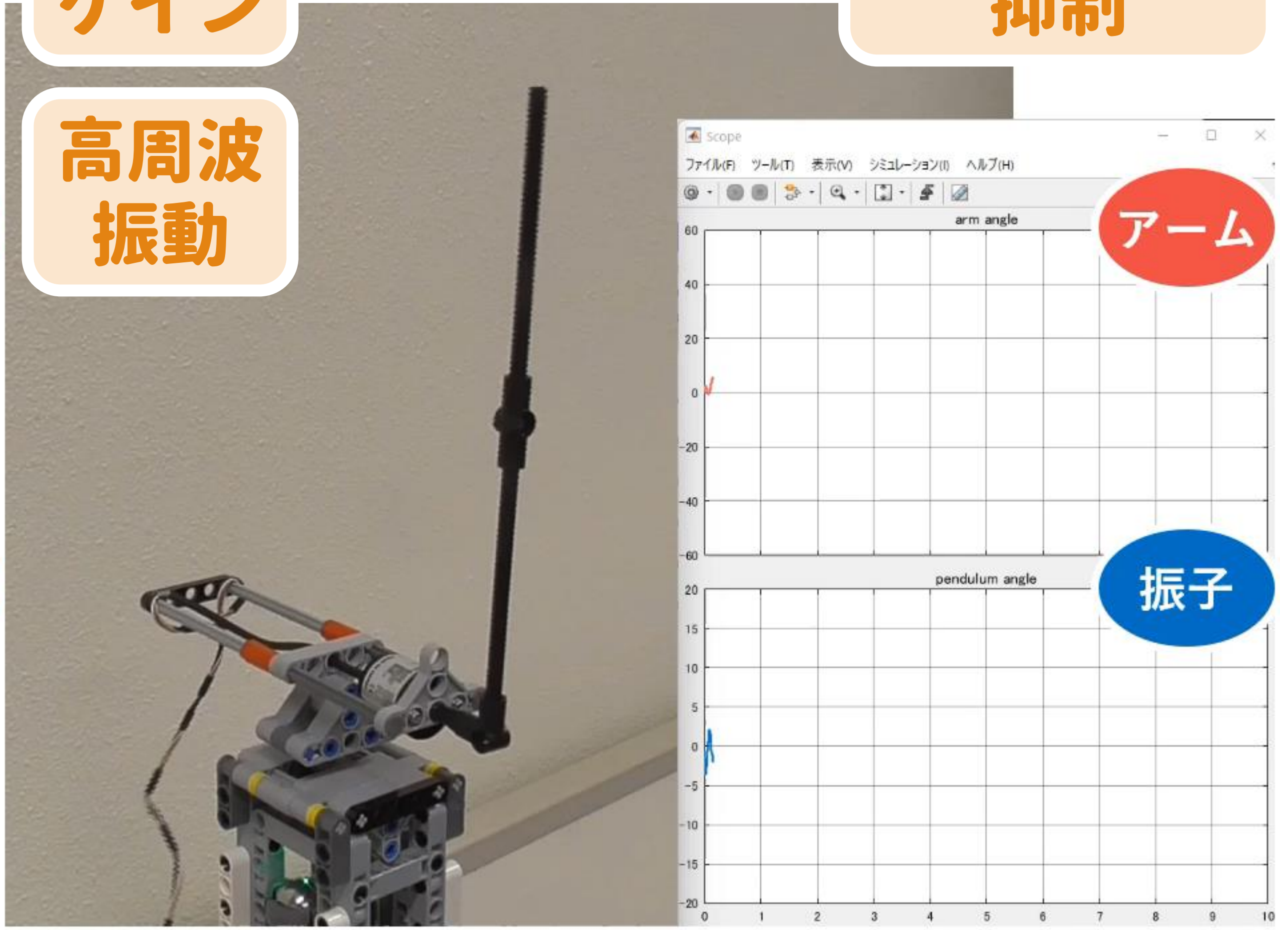
$$K_0 = \begin{bmatrix} 0.7071 & 0.6013 & 12.7347 & 1.3278 \end{bmatrix}$$

ハイゲイン

高周波振動

FRIT

低周波振動抑制



$$K_{\mathrm{FRIT}} = \begin{bmatrix} 1.3898 & 0.9032 & 21.9858 & 1.6673 \end{bmatrix}$$

▶ FRIT によるデータ駆動制御 …… LPF の時定数も調整

$$x_0 = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \omega_{\mathrm{f},1} \\ \theta_2 \\ \omega_{\mathrm{f},2} \end{bmatrix}$$

…… エンコーダで検出
…… 不完全微分 (後退差分近似＋**LPF**) により算出
…… エンコーダで検出
…… 不完全微分 (後退差分近似＋**LPF**) により算出

$$\omega_{\mathrm{f},i} = \frac{s}{1 + T_{\mathrm{f},i} s} \theta_i$$

数値シミュレーションを行い、
差分進化 (DE) により**評価関数**が

$$E = \sum_{n=1}^{k} e[n]^\top e[n] \longrightarrow \boxed{\mathrm{min}}$$

$$e[n] = x_0[n] - \tilde{x}[n]$$

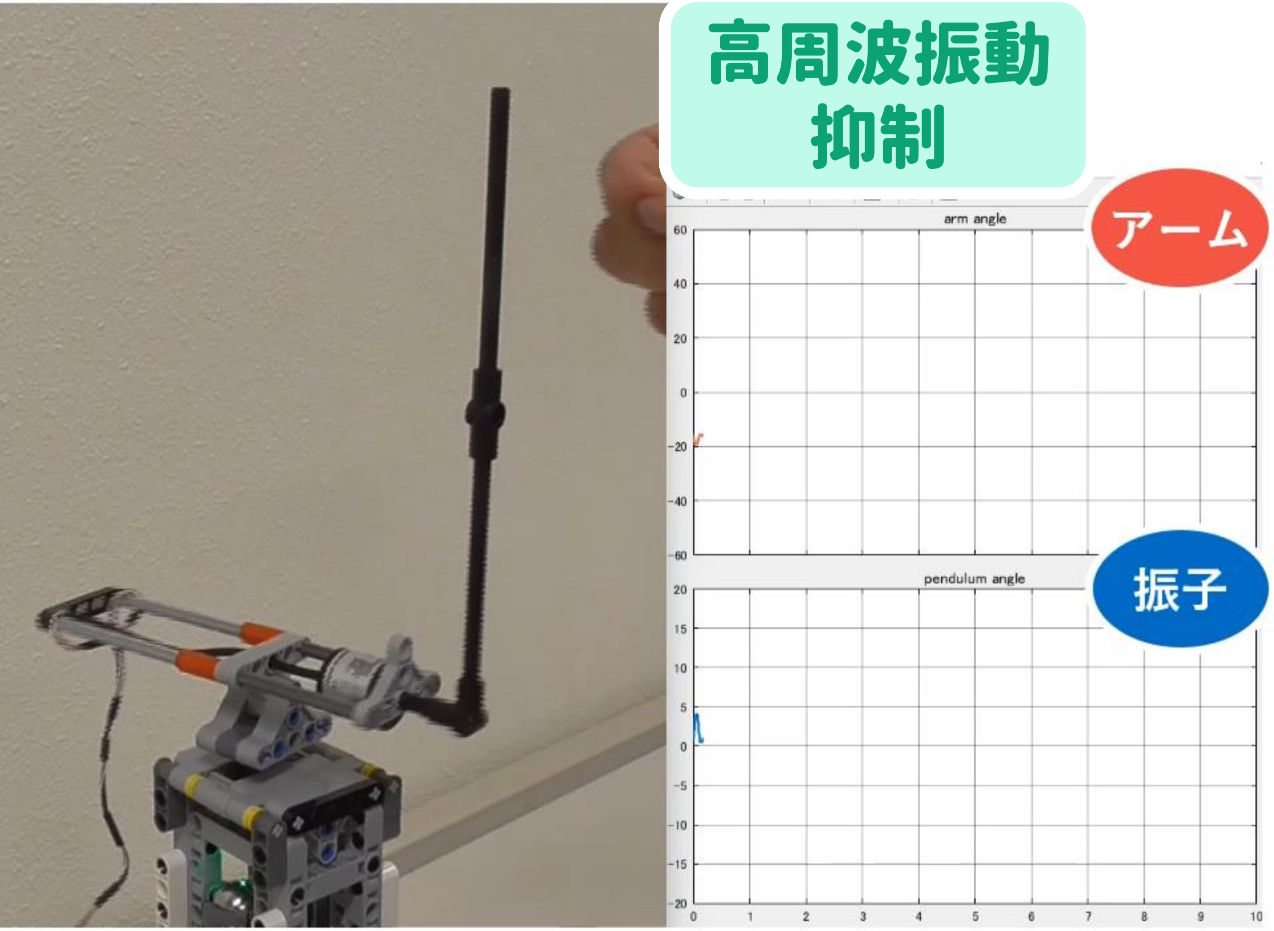
となるように**ゲイン**および
LPF の時定数

$$K := K_{\mathrm{FRIT}},\ T_{\mathrm{f},i}$$

を決定

▶ FRIT によるデータ駆動制御 …… LPF の時定数も調整

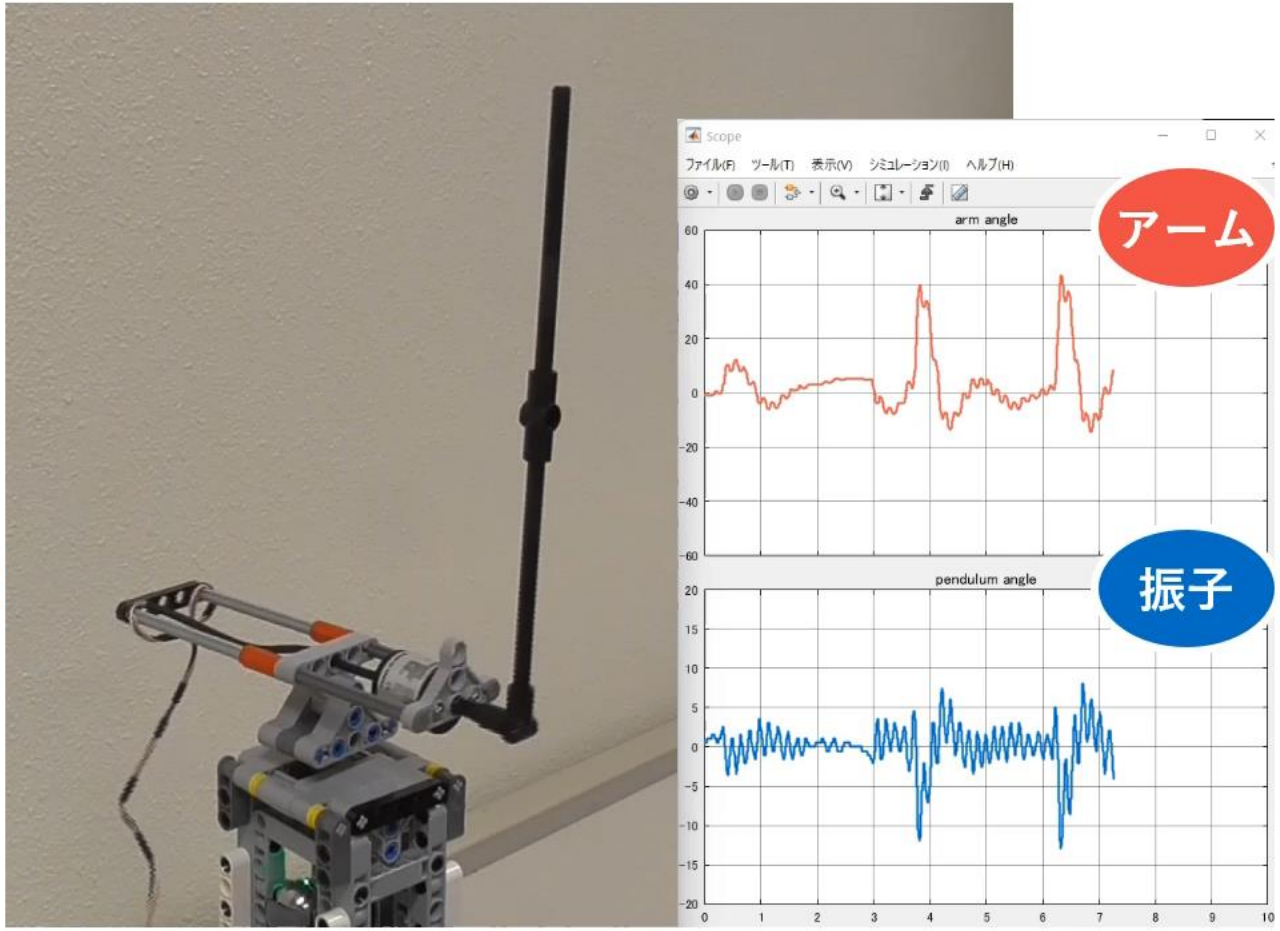
FRIT (LPF：時定数の調整あり)



$$K_{\mathrm{FRIT}} = \begin{bmatrix} 1.3755 & 0.9334 & 24.3330 & 1.2253 \end{bmatrix}$$

$$T_{\mathrm{f},1} = 0.1218,\ \ T_{\mathrm{f},2} = 0.1163$$

FRIT (LPF：時定数の調整なし)



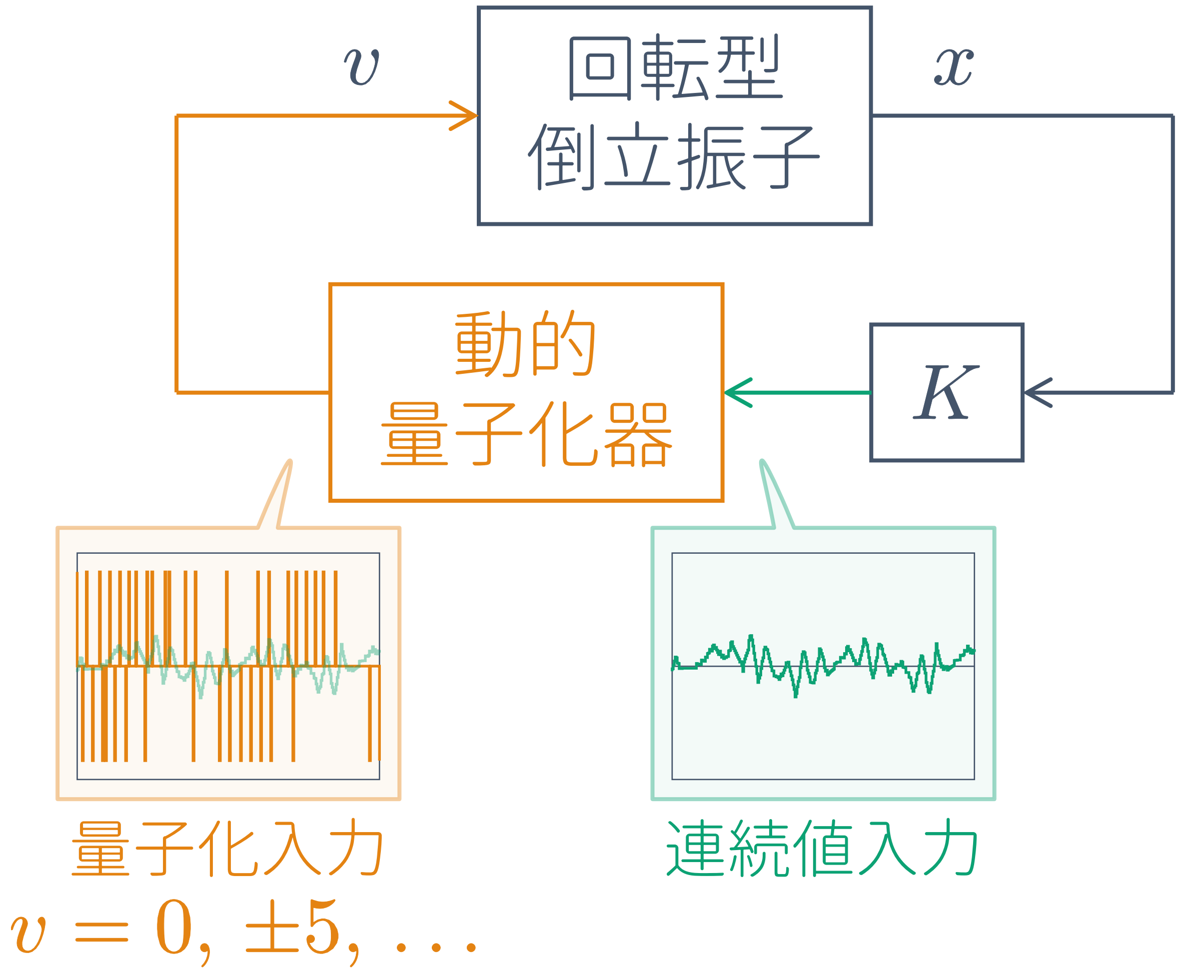
$$K_{\mathrm{FRIT}} = \begin{bmatrix} 1.3898 & 0.9032 & 21.9858 & 1.6673 \end{bmatrix}$$

$$T_{\mathrm{f},1} = T_{\mathrm{f},2} = 0.08$$

アドバンスト制御の学習

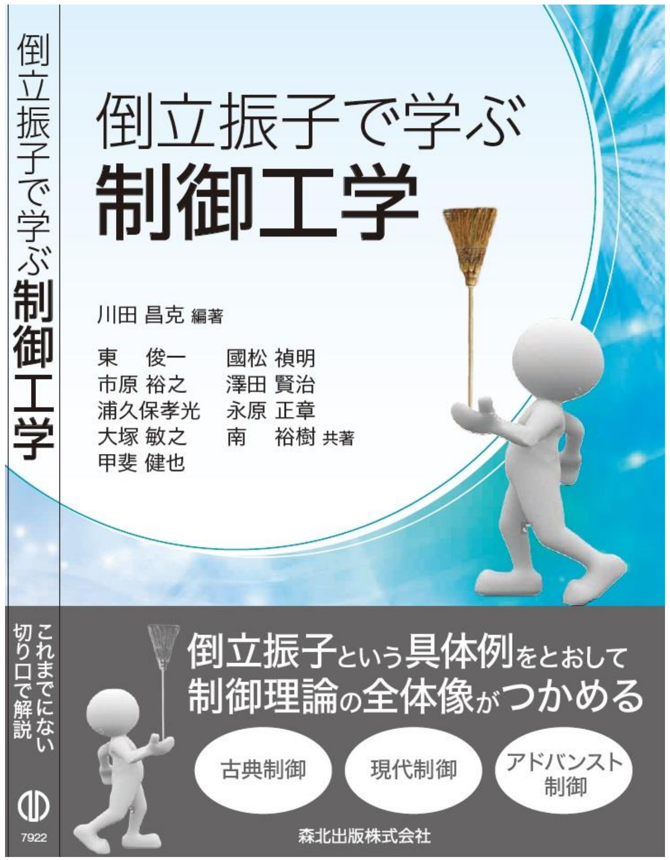
- 外乱オブザーバ
- FRIT によるデータ駆動制御
- **量子化制御**

▶ 量子化制御



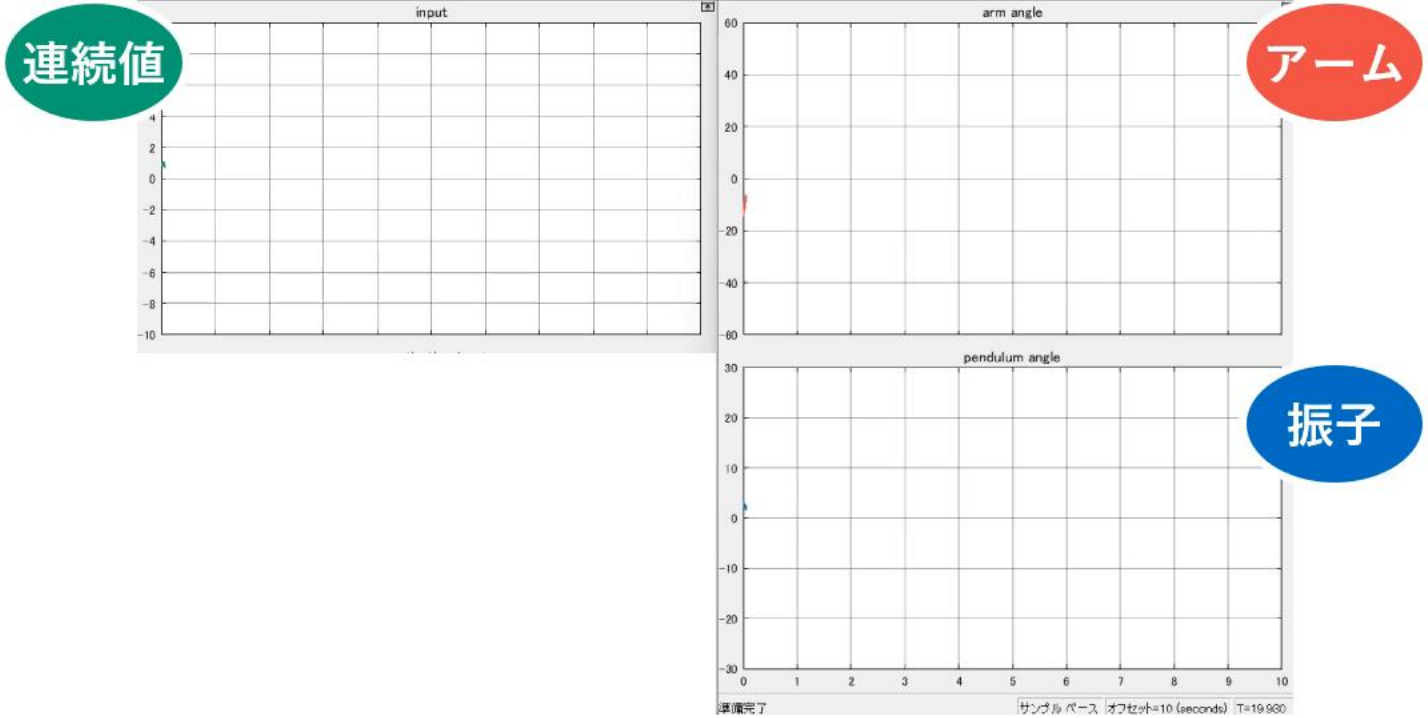
東，杉江：ISCIE,
Vol.20, No.3, pp. 122-129 (2007)

東，森田，南，杉江：ISCIE,
Vol.21, No.12, pp. 408-416 (2008)

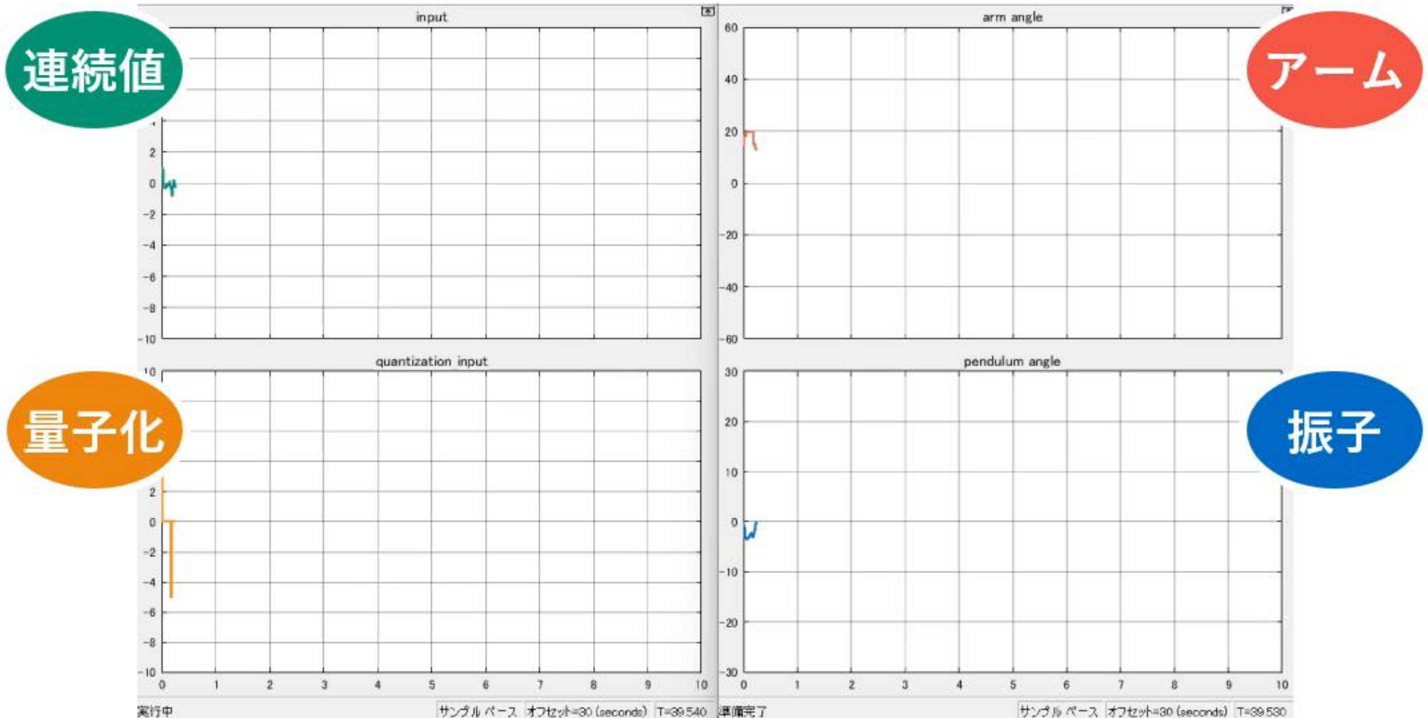


応用編：第２章

LQR


連続値
input
arm angle
アーム
pendulum angle
振子

量子化制御

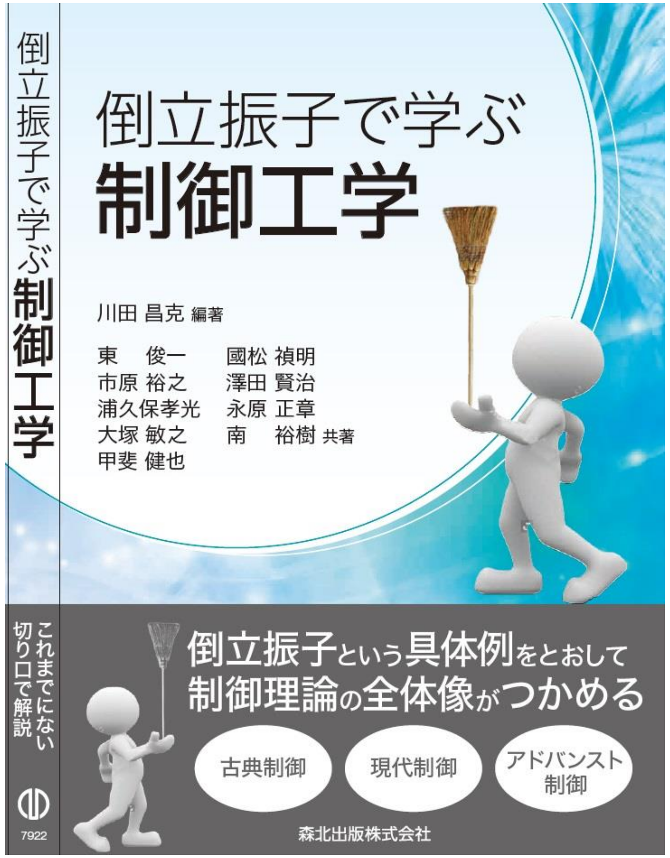

連続値
input
arm angle
アーム
量子化
quantization input
pendulum angle
振子

アドバンスト制御の学習

- 外乱オブザーバ
- FRIT によるデータ駆動制御
- 量子化制御
- **エネルギー法による振り上げ安定化制御**

▶ エネルギー法による振り上げ安定化制御

応用編：第３章　非線形制御
3.2.1　エネルギー法



Simulink の分岐処理を利用して
『回転型 LEGO 倒立振子』を
振り上げ安定化！

▶ エネルギー法による振り上げ安定化制御

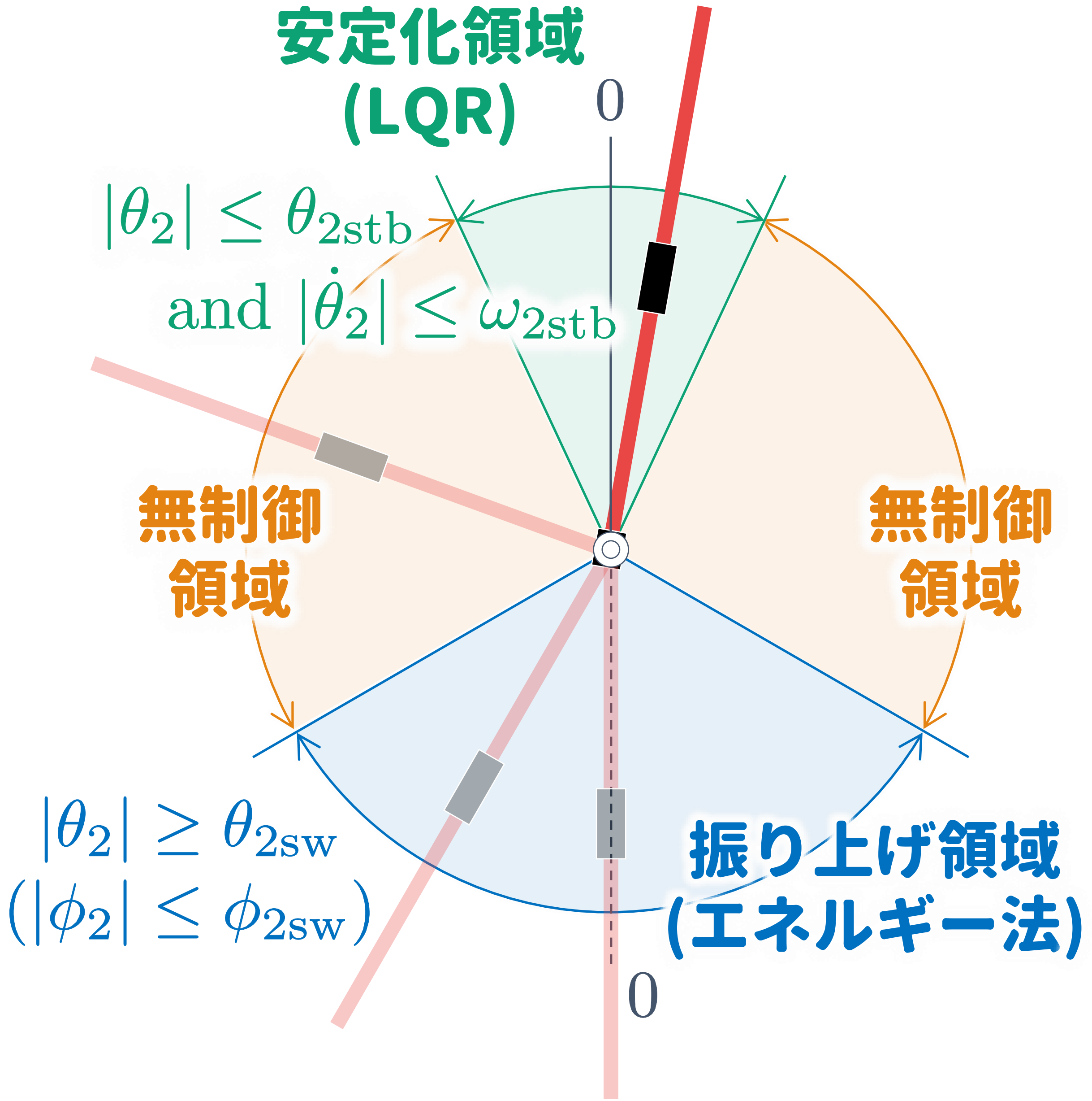
振子が真下にある状態

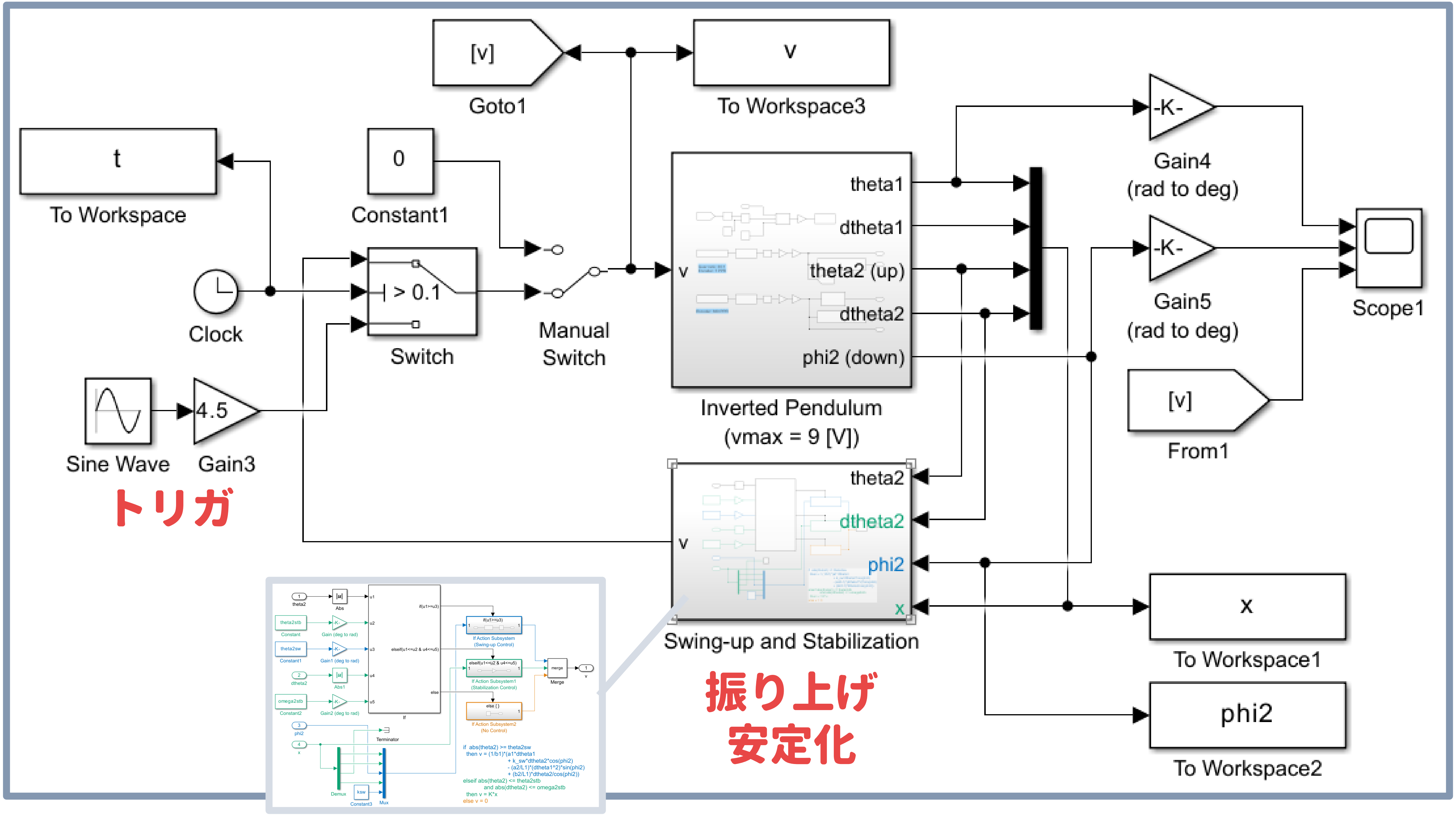
トリガを入れて振子を動かす

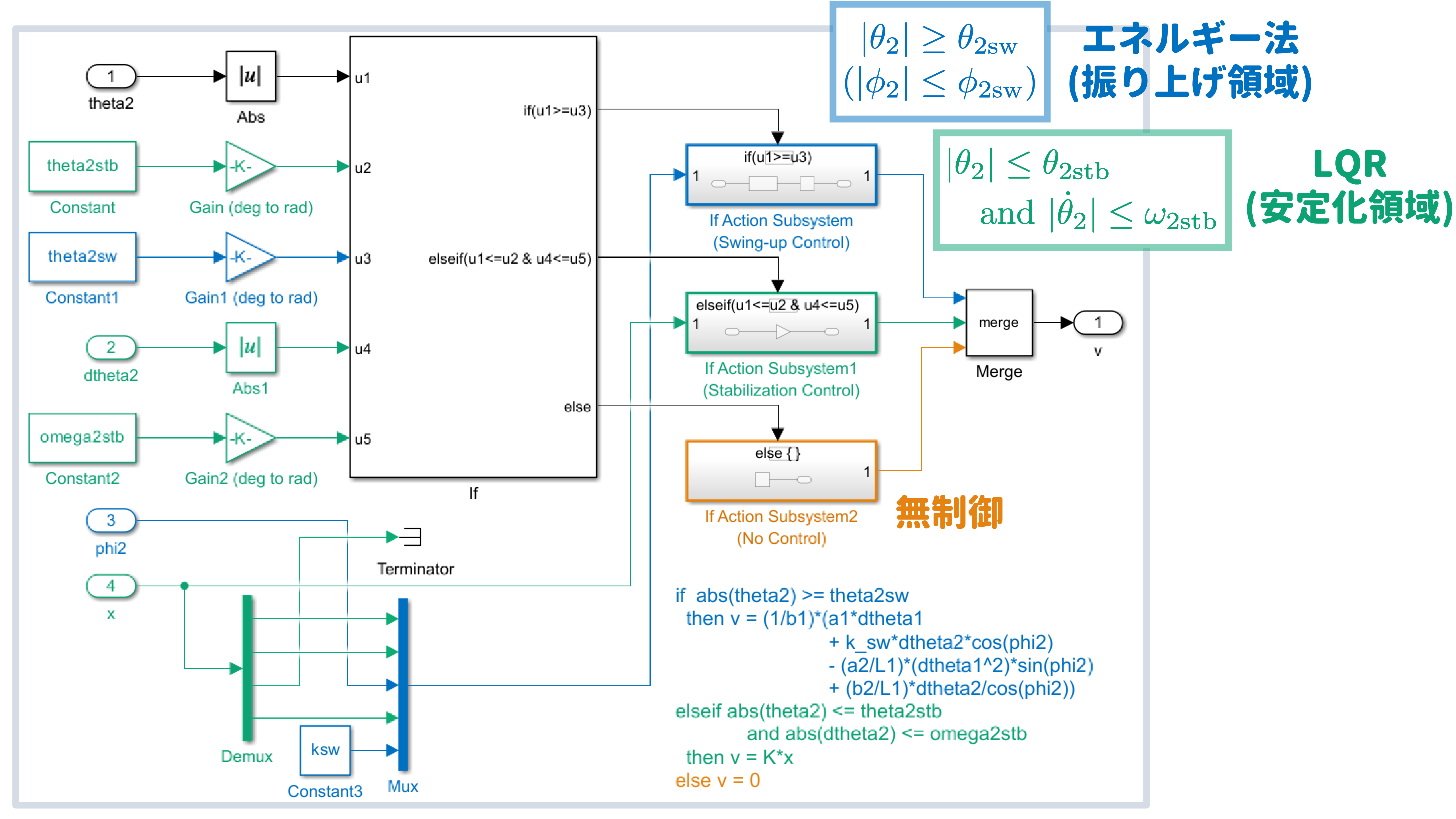
振子の力学的エネルギーが増大
するように指令電圧を加える

無制御 **無制御**

真上付近まで振り上がったときに
振子の角速度が小さいのであれば
安定化コントローラに切り替える




[v]
Goto1
v
To Workspace3
t
To Workspace
0
Constant1
Clock
> 0.1
Switch
Manual
Switch
Sine Wave
4.5
Gain3
トリガ
v
theta1
dtheta1
theta2 (up)
dtheta2
phi2 (down)
Inverted Pendulum
(vmax = 9 [V])
-K-
Gain4
(rad to deg)
-K-
Gain5
(rad to deg)
Scope1
[v]
From1
theta2
dtheta2
phi2
x
v
Swing-up and Stabilization
振り上げ
安定化
x
To Workspace1
phi2
To Workspace2



|θ2| ≥ θ2sw
(|φ2| ≤ φ2sw)
エネルギー法
(振り上げ領域)
|θ2| ≤ θ2stb
and |θ̇2| ≤ ω2stb
LQR
(安定化領域)
無制御
theta2
Abs
theta2stb
Constant
Gain (deg to rad)
theta2sw
Constant1
Gain1 (deg to rad)
dtheta2
Abs1
omega2stb
Constant2
Gain2 (deg to rad)
phi2
x
Terminator
Demux
ksw
Constant3
Mux
u1
u2
u3
u4
u5
if(u1>=u3)
elseif(u1<=u2 & u4<=u5)
else
If
If Action Subsystem
(Swing-up Control)
If Action Subsystem1
(Stabilization Control)
else { }
If Action Subsystem2
(No Control)
merge
Merge
v
if abs(theta2) >= theta2sw
then v = (1/b1)*(a1*dtheta1
+ k_sw*dtheta2*cos(phi2)
- (a2/L1)*(dtheta1^2)*sin(phi2)
+ (b2/L1)*dtheta2/cos(phi2))
elseif abs(theta2) <= theta2stb
and abs(dtheta2) <= omega2stb
then v = K*x
else v = 0

振子が真下にぶら下がった状態を基準とした力学的エネルギー

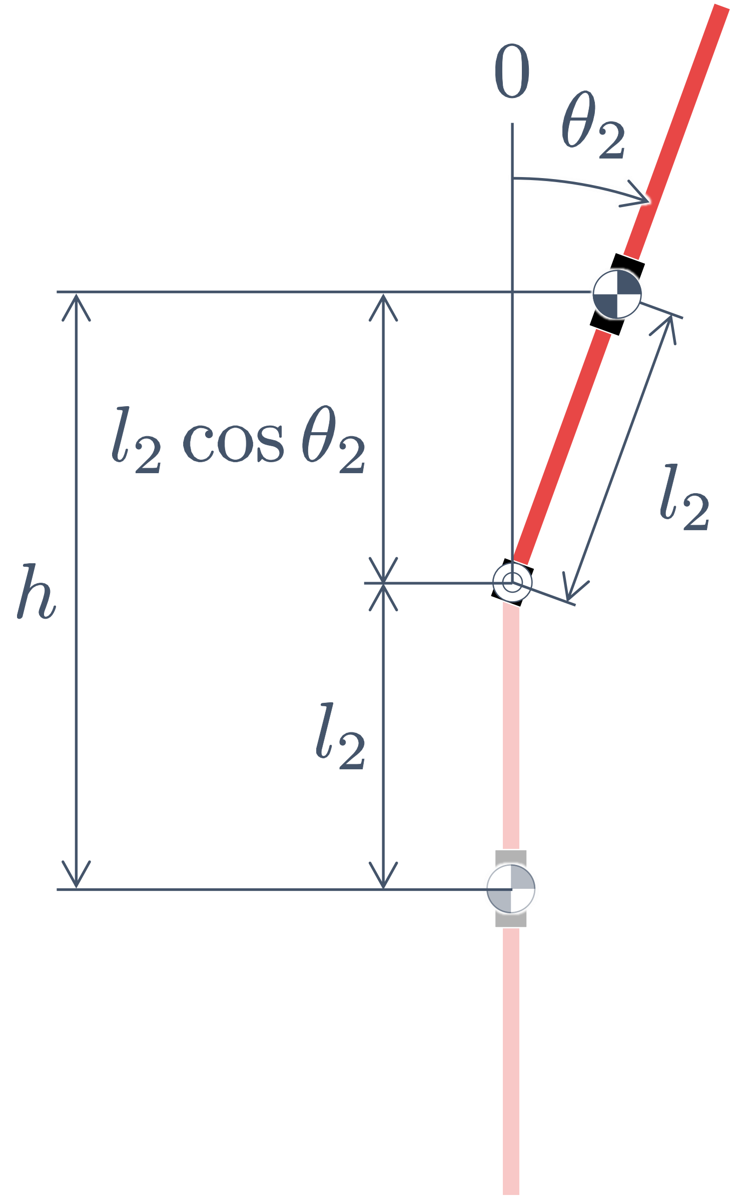
$$E = \frac{1}{2}J_2\dot{\theta}_2^2 + m_2 g h > 0$$
$$(\theta_2 \neq \pm\pi \ \text{and}\ \dot{\theta}_2 \neq 0)$$

が**増大**するように指令電圧を加える！

→ **時間微分**が

$$\dot{E} = \dot{\theta}_2\left(J_2\ddot{\theta}_2 - m_2 g l_2 \sin\theta_2\right) > 0$$

となるように**指令電圧を決定！**



回転型倒立振子の非線形モデル

$$\ddot{\theta}_1 = -\alpha_1\dot{\theta}_1 + \beta_1 v$$

$$m_2 L_1 l_2 \cos\theta_2 \cdot \ddot{\theta}_1 + J_2\ddot{\theta}_2 = J_2\dot{\theta}_1^2 \sin\theta_2 \cos\theta_2 + m_2 g l_2 \sin\theta_2 - c_2\dot{\theta}_2$$

振子が真下にぶら下がった状態を基準とした力学的エネルギー

$$E = \frac{1}{2}J_2\dot{\theta}_2^2 + m_2 g h > 0$$

→ **時間微分**

$$\begin{aligned}\dot{E} &= \dot{\theta}_2\left(J_2\ddot{\theta}_2 - m_2 g l_2 \sin\theta_2\right)\\ &= \dot{\theta}_2\left\{J_2\dot{\theta}_1^2 \sin\theta_2\cos\theta_2 - c_2\dot{\theta}_2 - m_2 L_1 l_2 \cos\theta_2 \cdot \left(-\alpha_1\dot{\theta}_1 + \beta_1 v\right)\right\}\\ &= k_{\mathrm{sw}} m_2 L_1 l_2 (\dot{\theta}_2 \cos\theta_2)^2 > 0 \quad (\dot{\theta}_2 \neq 0 \text{ and } \cos\theta_2 \neq 0)\end{aligned}$$

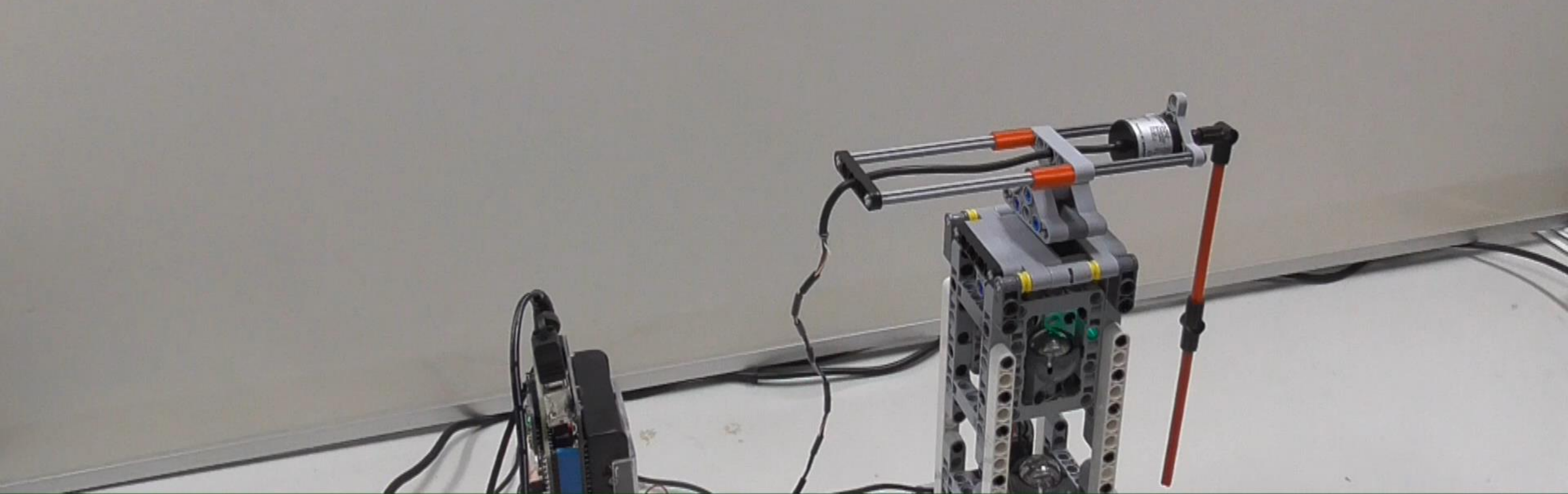
となるように**指令電圧を決定！**

振り上げコントローラ

$$v = \frac{1}{\beta_1}\left(\alpha_1\dot{\theta}_1 - k_{\mathrm{sw}}\dot{\theta}_2\cos\theta_2 + \frac{\alpha_2}{L_1}\dot{\theta}_1^2\sin\theta_2 - \frac{\beta_2}{L_1}\frac{\dot{\theta}_2}{\cos\theta_2}\right)$$

$$\alpha_2 = \frac{J_2}{m_2 l_2},\ \beta_2 = \frac{c_2}{m_2 l_2}$$

回転型LEGO倒立振子の振り上げ安定化制御



このスライドは終了です。