

オートチューニング機能を有する車輪型倒立振子の安定化制御系

下山 修* 平田 弘志

キーワード 車輪型倒立振子, 倒立振子, VSS適応制御, LQ制御

研究の概要

倒立振子の中で二つの車輪を持つタイプの応用研究が盛んであり、セグウェイに代表されるパーソナルモビリティと荷役目的の自律走行ロボットに分けられる。議論の中心は安定化制御と二輪移動体の位置姿勢制御に関するものが殆どで、対象の重量変化を考慮した場合の未知パラメータ系の議論が少ないのが現状である。そこで、本研究では車輪型倒立振子を構成し、未知パラメータに対して有効なVSS適応制御系を提案する。

研究成果

制御対象

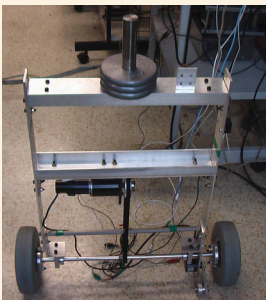


Fig.1 実験機

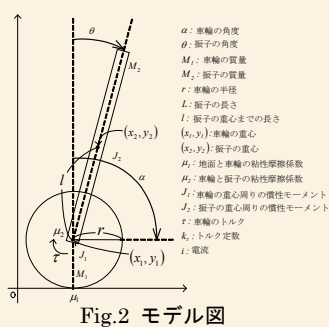


Fig.2 モデル図

$$\text{車輪系 } A\ddot{\alpha} + B(\ddot{\theta}\cos\theta - \dot{\theta}^2\sin\theta) + \mu_1\dot{\alpha} + d_1\text{sgn}(\dot{\alpha}) = \tau$$

$$\text{振り子系 } D\ddot{\theta} + B\ddot{\alpha}\cos\theta - Eg\sin\theta + \mu_2\dot{\theta} = 0$$

$$A = J_1 + (M_1 + M_2)r^2, B = M_2r\ell, D = J_2 + M_2\ell^2, E = M_2\ell, \tau = k_r * i$$

VSS適応制御による振り子系の安定化

$$-\frac{\det M}{Bk_r}\ddot{\theta} - \frac{A\mu_2}{Bk_r}\dot{\theta} + \frac{AEg}{Bk_r}\theta + \frac{\mu_1}{k_r}\dot{\alpha} + \frac{d_1}{k_r}\text{sgn}(\dot{\alpha}) = i, \det M = AD - B^2$$

$$e := \theta - r_f, \dot{\theta}_r := \dot{r}_f - h e, (h > 0), s_c := \dot{\theta} - \dot{\theta}_r = \dot{e} + h e$$

$$Y^T \alpha + H s_c = i + w$$

$$\begin{cases} Y^T = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_r & \dot{\theta}_r & \theta & \dot{\alpha} & \text{sgn}(\dot{\alpha}) \end{bmatrix} \\ \alpha^T = \begin{bmatrix} -\frac{\det M}{Bk_r} & -\frac{A\mu_2}{Bk_r} & \frac{AEg}{Bk_r} & \frac{\mu_1}{k_r} & \frac{d_1}{k_r} \end{bmatrix} \\ \ddot{\theta}_r := \ddot{r}_f - h\dot{e} \end{cases}$$

r_f : 目標角, e : 誤差, $\dot{\theta}_r$: 参照速度, s_c : 切換関数

VSS適応制御

VSS適応制御操作量

$$\begin{cases} i = Y^T \hat{\alpha} - k_r \text{sat}(s_c / \delta), (k_r > 0) \\ \hat{\alpha}^T := [\hat{\alpha}_1 \quad \hat{\alpha}_2 \quad \hat{\alpha}_3 \quad \hat{\alpha}_4 \quad \hat{\alpha}_5] \end{cases}$$

パラメータ適応則

$$\dot{\hat{\alpha}} = -\Gamma^{-1} Y s_c, (\Gamma > 0)$$

k_r : VSSゲイン, Γ : 適応側ゲイン

目標角 r_f が安定に与えられるとき, $t \rightarrow \infty$ で $s_c \rightarrow 0$ となり、振り子角 θ

は目標角 r_f に追従する。

まとめ

車輪型倒立振子の基本パラメータを未知としたVSS適応制御系を設計し、シミュレーションにてその有効性を確認した。今後は実験機に対して、このシステムを適用し検証することを考えている。

基本パラメータ

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) + B\dot{\theta} + D(\dot{\theta}) = \Phi^T(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})\zeta$$

$$\Phi^T(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) = \begin{bmatrix} \ddot{\alpha} & 0 & rc\ddot{\theta} - rs\dot{\theta}^2 & \dot{\alpha} & 0 & \text{sgn}(\dot{\alpha}) \\ 0 & \ddot{\theta} & rc\ddot{\alpha} - gs & 0 & \dot{\theta} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\zeta^T = [\zeta_1 \quad \zeta_2 \quad \zeta_3 \quad \zeta_4 \quad \zeta_5 \quad \zeta_6]$$

$$\zeta_1 = J_1 + (M_1 + M_2)r^2, \zeta_2 = J_2 + M_2\ell^2, \zeta_3 = M_2\ell$$

$$\zeta_4 = \mu_1, \zeta_5 = \mu_2, \zeta_6 = d_1$$

$$i = \Phi^T \sigma$$

$$\sigma^T = [\sigma_1 \quad \sigma_2 \quad \sigma_3 \quad \sigma_4 \quad \sigma_5 \quad \sigma_6]$$

$$\sigma_1 = \frac{\zeta_1}{k_r}, \sigma_2 = \frac{\zeta_2}{k_r}, \sigma_3 = \frac{\zeta_3}{k_r}, \sigma_4 = \frac{\zeta_4}{k_r}, \sigma_5 = \frac{\zeta_5}{k_r}, \sigma_6 = \frac{\zeta_6}{k_r}$$

車輪系の安定化

$$\ddot{\alpha} = \frac{g}{r}r_f - \frac{M_2}{M_2rl}\dot{r}_f - \frac{D}{M_2rl}\ddot{r}_f$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{\alpha} \\ \ddot{\alpha} \\ \dot{r}_f \\ \ddot{r}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g/r & \beta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \dot{\alpha} \\ r_f \\ \dot{r}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \beta_2 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{r}_f$$

$$\beta_1 = -\frac{\mu_2}{M_2rl} = -\frac{\zeta_5}{\zeta_3 r} = -\frac{k_r \sigma_5}{k_r \sigma_3 r} = -\frac{\sigma_5}{\sigma_3 r}$$

$$\beta_2 = -\frac{D}{M_2rl} = -\frac{\zeta_2}{\zeta_3 r} = -\frac{k_r \sigma_2}{k_r \sigma_3 r} = -\frac{\sigma_2}{\sigma_3 r}$$

$$J = \int_0^\infty (x^T Q x + \dot{r}_f^T R \dot{r}_f) dt, (Q \geq 0, R > 0), x^T := [\alpha \quad \dot{\alpha} \quad r_f \quad \dot{r}_f]$$

$$\ddot{r}_f = F_o^T x, F_o^T := [f_1 \quad f_2 \quad f_3 \quad f_4]$$

シミュレーション

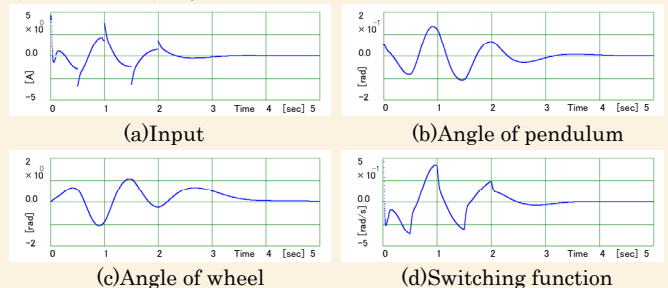


Fig.3 シミュレーション結果