به نام آن‌که جان را فکرت آموخت

چارچوب کلی برای کنترل مود لغزشی مرتبه بالاتر با تغییر وضعیت و بهره متغیر

A General Framework for Switched and Variable-Gain Higher-Order Sliding Mode Control

دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر

پروژه‌ی پایانی درس کنترل غیرخطی

استاد: آقای دکتر ازگلی

استادیار: آقای مهندس طیبی

دانشجو: مهسا کلام جوقان (۴۰۳۶۱۶۶۱۰۰۵)

زمستان ۱۴۰۳

فهرست مطالب

مقدمه

یکی از جدی‌ترین **معایب** این روش، وجود پدیده **وز وز کردن** (Chattering)

به دلیل **تطبیق‌پذیری** و **سادگی پیاده‌سازی**

کنترل مود لغزشی یک روش **پرکاربرد** در حوزه‌های مختلف و کنترل طیف وسیعی از **سیستم‌های غیرخطی** تحت تأثیر **عدم قطعیت‌ها**

افزایش **انعطاف‌پذیری** در طراحی کنترل‌کننده و **بهبود** عملکرد

امکان کنترل سیستم‌هایی با **درجه نسبی بالا**

روش‌های کنترل مود لغزشی **مرتبه بالاتر**

شامل یک کنترل‌کننده مود لغزشی با **مرتبه عمومی r** و تغییرات **پیوسته** و **گسسته** پارامترهای کنترل‌کننده

توسعه رویکردهای **تغییر وضعیت** و **بهره متغیر** برای کنترل‌کننده‌های مود لغزشی مرتبه اول و دوم

مقدمه

۱

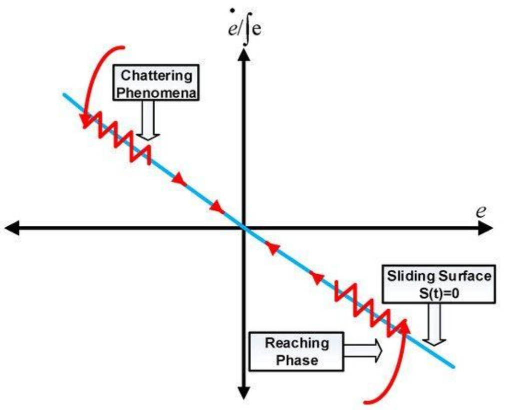
مشکل وز وز

۲

قدرت سیگنال کنترلی

۳

سطوح مختلفی از عدم قطعیت
و یا اهداف کنترلی متفاوت



چارچوب کلی

$$\dot{x}(t) = a(x,t) + b(x,t)u(t)$$
$$y(t) = f(x(t))$$

سیستم‌های غیرخطی نامعین **SISO پیوسته زمان** با ساختار خروجی مشخص

$$y^{(r)}(t) = h(x,t) + g(x,t)u(t)$$

درجه نسبی سیستم r در نظر گرفته می‌شود

$$|h(x,t)| \leq C(x,t)$$
$$g(x,t) \in [K_m(x,t), K_M(x,t)] \subseteq [\bar{K}_m, \bar{K}_M]$$

توابع h و g **نامعین**، اما **کراندار** می‌باشند

$$y^{(0)}(t) = y^{(1)}(t) = \ldots = y^{(r-1)}(t) = 0$$

هدف قانون کنترلی مود لغزشی مرتبه بالاتر
رسیدن به خمینه مشخص‌شده در **زمان محدود**

$$\sigma_{i+1}(t) \triangleq y^{(i)}(t) \rightarrow \begin{cases} \dot{\sigma}_1(t) &= \sigma_2(t) \\ & \vdots \\ \dot{\sigma}_{r-1}(t) &= \sigma_r(t) \\ \dot{\sigma}_r(t) &= h(x,t) + g(x,t)u(t) \end{cases}$$

$$\dot{\zeta}(t) = \psi(\sigma(t), \zeta(t))$$
$$\lim_{t \to t_e} \|\zeta(t)\| = \infty$$
$$t_0 < t_e < \infty$$

دینامیک داخلی سیستم پدیده **زمان فرار محدود** را نشان نمی‌دهد

$$\sigma \triangleq [\sigma_1 \quad \sigma_2 \quad \ldots \quad \sigma_r]'$$

قانون کنترلی به عنوان یک **تابع ناپیوسته** از **متغیرهای سامانه** تعریف می‌شود

چارچوب کلی

$$K_m(x,t)U(x,t) - C(x,t) \geq \epsilon,$$
$$U(x,t) \leq \bar{U},$$
$$\bar{U} \in \mathbb{R}_{>0} \; \epsilon \in \mathbb{R}_{>0}$$

شرط روی **کران‌ها**

$$u(t) = -U(x,t) \cdot \operatorname{sgn}(s(\sigma))$$

قانون کنترلی کلی

$$\sigma \in \mathbb{R}^1 \Rightarrow s(\sigma) = \sigma_1$$
$$\sigma \in \mathbb{R}^2 \Rightarrow s(\sigma) = \sigma_1 + \frac{\sigma_2|\sigma_2|}{2\epsilon}$$
$$\sigma \in \mathbb{R}^3 \Rightarrow s(\sigma) = \sigma_1 + \frac{\sigma_3^3}{3\epsilon^2} + \operatorname{sgn}\left(\sigma_2 + \frac{\sigma_3^2 \operatorname{sgn}(\sigma_3)}{2\epsilon}\right) \times$$
$$\times \left[\frac{1}{\sqrt{\epsilon}}\left(\operatorname{sgn}\left(\sigma_2 + \frac{\sigma_3^2 \operatorname{sgn}(\sigma_3)}{2\epsilon}\right)\sigma_2 + \frac{\sigma_3^2}{2\epsilon}\right)^{\frac{3}{2}} + \frac{\sigma_2\sigma_3}{\epsilon}\right].$$

بررسی **سطوح لغزش** متناسب با **درجه نسبی**

$$\dot{\sigma}_r(t) = \bar{h}(x,t) + h(x,t) + g(x,t)u(t)$$

در صورت اضافه شدن **تابع مشخص** دیگر،
معادلات صادق هستند

توسعه رویکردهای تغییر وضعیت و بهره متغیر برای کنترل‌کننده‌های مود لغزشی مرتبه اول و دوم

کنترل مود لغزشی مرتبه بالاتر با بهره متغیر

$$U(x,t) \triangleq \frac{C(x,t)}{K_m(x,t)} + \delta$$

کنترل مود لغزشی مرتبه بالاتر با تغییر وضعیت

$$\bigcup_{i=1,\dots,k} \mathcal{S}_i = \mathcal{S}$$

فرض می‌کنیم که **فضای حالت سیستم** به k زیر مجموعه **ناهمپوشان** تقسیم شده است. همچنین فرض می‌کنیم که در هر یک از این زیرمجموعه‌ها می‌توان کران‌های **بالا** و **پایین** متفاوتی برای **عدم قطعیت‌ها** تعریف کرد.

مثال عددی و شبیه‌سازی

$$\dot{x}_1 = -x_1 + e^{2x_2}(u+d)$$
$$\dot{x}_2 = 2x_1x_2 + \sin x_2 + \frac{1}{2}(u+d)$$
$$\dot{x}_3 = x_2$$

اغتشاش

$$a(x,t) = \begin{bmatrix} -x_1 + e^{2x_2}d \\ 2x_1x_2 + \sin(x_2) + \frac{1}{2}d \\ x_2 \end{bmatrix}, \quad b(x,t) = \begin{bmatrix} e^{2x_2} \\ \frac{1}{2} \\ 0 \end{bmatrix}.$$

$$y = \sigma_1 = x_3, \rightarrow \begin{aligned} \dot{\sigma}_1 &= \sigma_2 = 2x_2 \\ \dot{\sigma}_2 &= \bar{h} + h + gu = 2(2x_1x_2 + \sin(x_2)) + d + u \end{aligned} \rightarrow$$

درجه نسبی ۲

$$\mathcal{S} = \{(\sigma_1, \sigma_2) \; : \; |\sigma_1| \leq 1, \; |\sigma_2| \leq 1\}$$

مثال عددی و شبیه‌سازی

$$\Phi(x) = \begin{pmatrix} x_3 \\ 2x_2 \\ 1 + x_1 - e^{2x_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \zeta \end{pmatrix}$$

$$\dot{\zeta} = \psi(\sigma, \zeta) = (1 - \zeta - e^{\sigma_2})(1 + 2\sigma_2 e^{\sigma_2}) - 2\sin\left(\frac{\sigma_2}{2}\right) e^{\sigma_2}$$

$$\dot{\zeta} = \psi(0, \zeta) = -\zeta$$

کنترل مود لغزشی مرتبه بالاتر با بهره متغیر

$$d = \nu(1 + \sin(t) + |x_3 + 4x_2^2|) \quad \nu \subseteq [-1,\ 1]$$

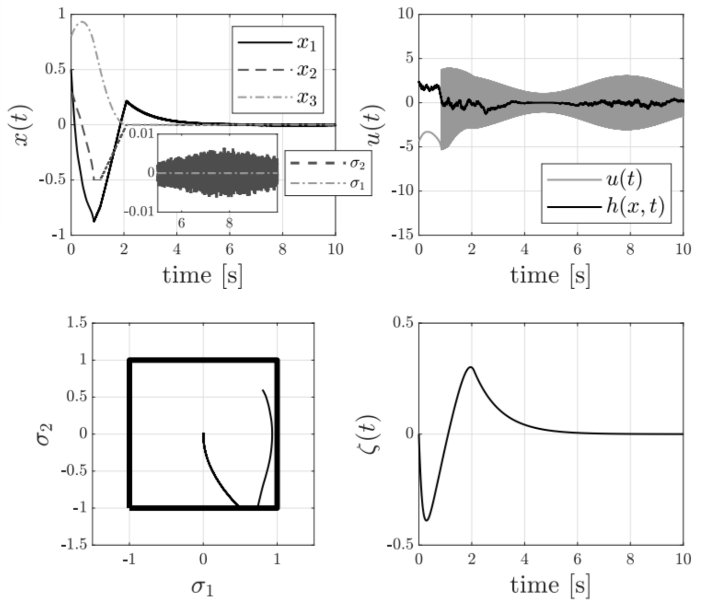
$$|h(x,t)| \leq 1 + \sin(t) + |x_3 + 4x_2^2| = C(x,t) \leq \bar{C} = 4,$$

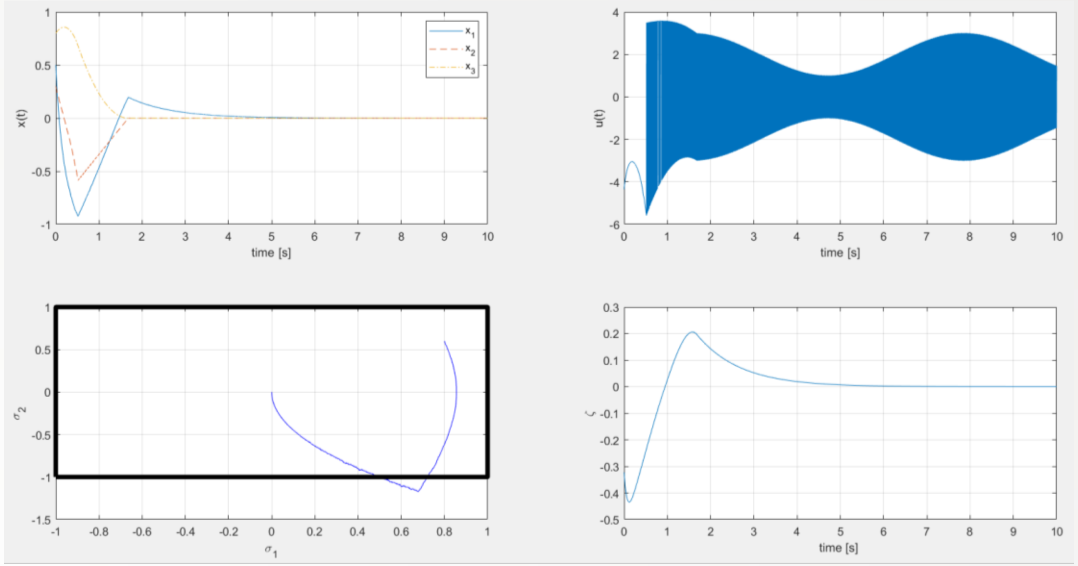
$$g(x,t) = 1 = K_m$$

$$U(x,t) = 1 + \sin(t) + |x_3 + 4x_2^2| + 1$$

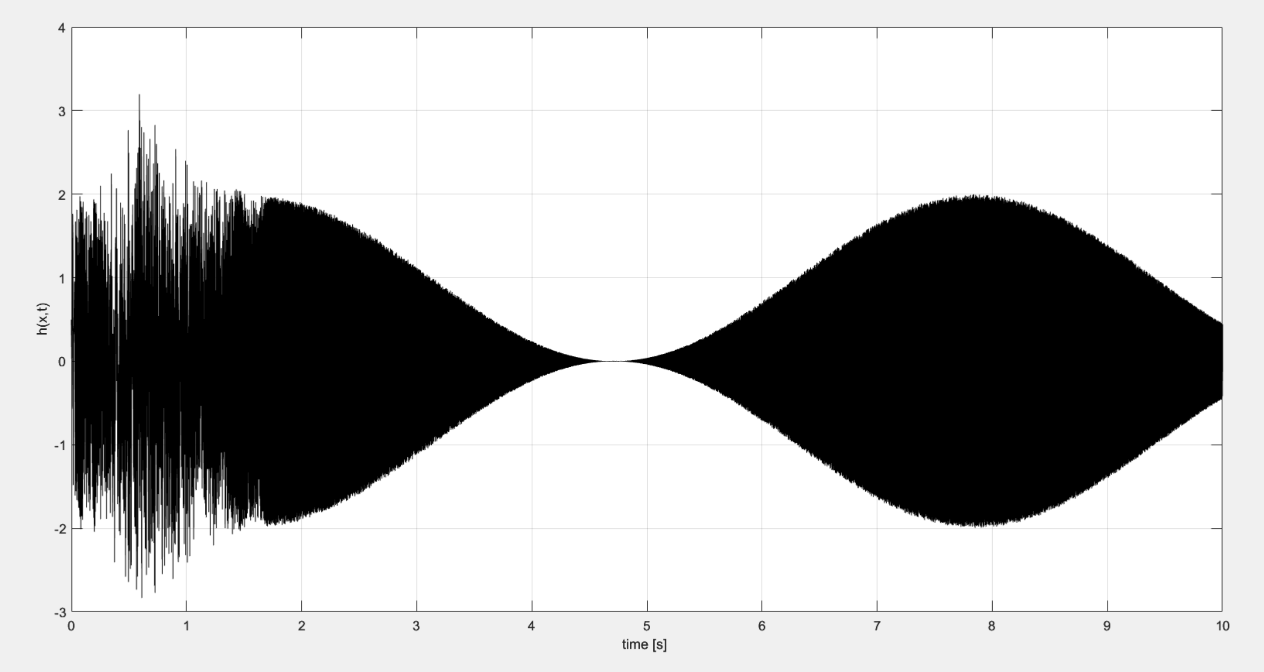
$$u = -2(2x_1x_2 + \sin(x_2)) - U(x,t)\,\mathrm{sgn}\left(\sigma_1 + \frac{\sigma_2|\sigma_2|}{2\epsilon}\right)$$

کنترل مود لغزشی مرتبه بالاتر با بهره متغیر





کنترل مود لغزشی مرتبه بالاتر با بهره متغیر



کنترل مود لغزشی مرتبه بالاتر با تغییر وضعیت

$$\mathcal{S}_1 \triangleq \{(\sigma_1, \sigma_2) \ : 0.3 \leq \sigma' M \sigma \leq 0.7\}$$
$$\mathcal{S}_2 \triangleq \{(\sigma_1, \sigma_2) \ : \sigma' M \sigma \leq 0.3\} \ ,$$

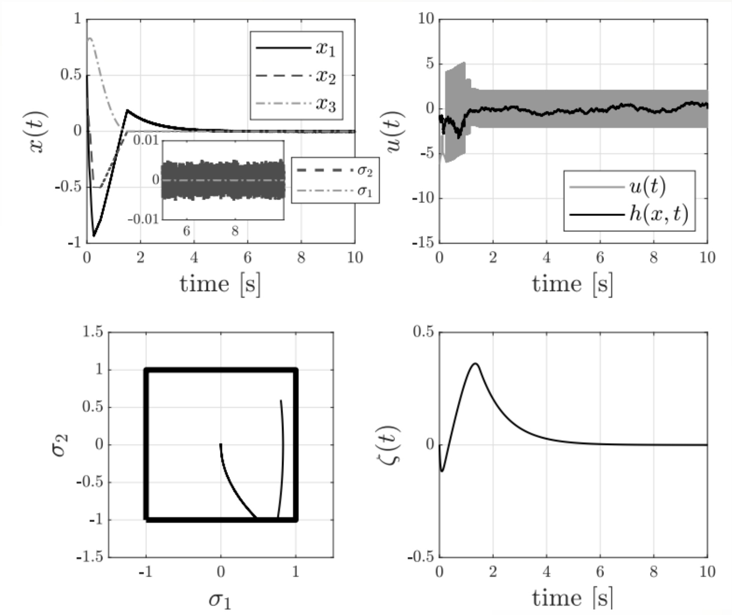
$$M = \mathrm{diag}\{1,\, 2\}$$

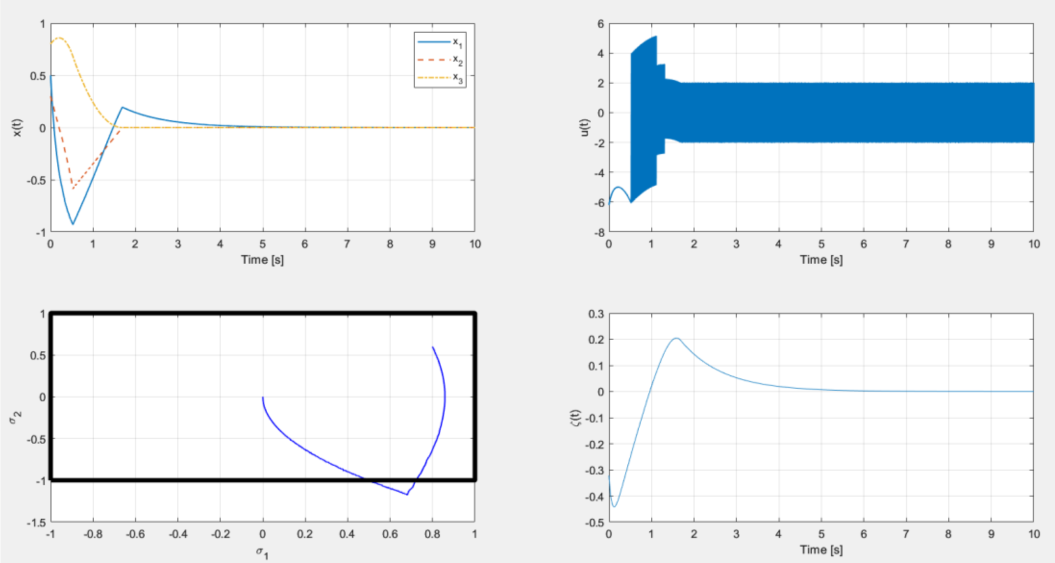
$$|h(x,t)| \leq \begin{cases} 1 & \text{if } \sigma \in \mathcal{S}_2 \\ 2 & \text{if } \sigma \in \mathcal{S}_1 \\ 4 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\delta = 1$$

$$U(x,t) = \begin{cases} 2 & \text{if } \sigma \in \mathcal{S}_2 \\ 3 & \text{if } \sigma \in \mathcal{S}_1 \\ 5 & \text{otherwise} \end{cases}$$

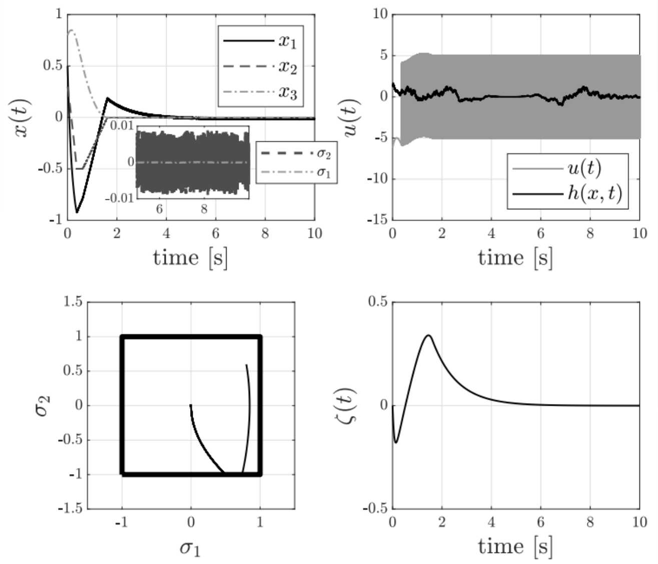
کنترل مود لغزشی مرتبه بالاتر با تغییر وضعیت

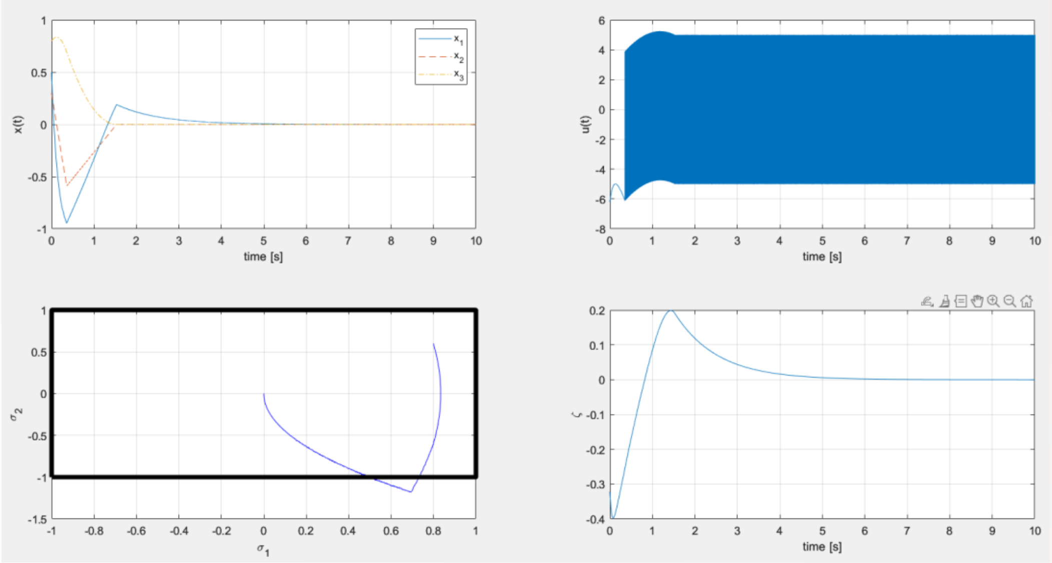




کنترل مود لغزشی مرتبه بالاتر با بهره ثابت

$$\bar{U} = 5$$





منابع

G. P. Incremona, M. Rubagotti, M. Tanelli and A. Ferrara, "A General Framework for Switched and Variable Gain Higher Order Sliding Mode Control," in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 66, no. 4, pp. 1718-1724, April 2021, doi: 10.1109/TAC.2020.2996423.

keywords: {Switches;Uncertainty;Manifolds;Convergence;Sliding mode control;Aerospace electronics;Higher order sliding mode (HOSM);sliding mode (SM) control;switched control},

با تشکر از توجه شما