

Adaptive Control

التحكم التكيفي

قسم هندسة التحكم والأتمتة، السنة الخامسة
كلية الهندسة الكهربائية والإلكترونية - جامعة حلب

التحكم التكيفي - المحاضرة الثالثة والرابعة

Adaptive Low	Update Rule			قاعدة التحديث	قانون التكيف
MRAC					
Mathematical model	Model			الموديل	النموذج الرياضي
Feedback				التغذية العكسية	التغذية الراجعة
Estimator					مقدّر

What is Adaptive Control?

ماهو التحكم التكيفي

هو مزيج من عملية تقدير البارامترات مع عملية تصميم قانون التحكم من أجل التحكم في العمليات التي تكون معاملاتها غير معروفة تمامًا و/أو يمكن أن تتغير بمرور الوقت بطريقة غير متوقعة. يؤدي اختيار مقدر المعاملات، واختيار قانون التحكم، والطريقة التي يتم بها الجمع بينهما إلى أنواع مختلفة من مخططات التحكم التكيفي.

كما أن عملية التحكم تولد قانون يدعى قانون التحكم كذلك إن عملية تقدير البارامترات يشار إليها بقانون التكيف حيث أنه يوجد قانون تكيف خاص لتقدير كل معلمة.

التصنيفات العامة لمخططات التحكم التكمي

التحكم التكمي القائم على تقدير البارامترات

تتميز مخططات التحكم التكمي القائمة على تقدير البارامترات بالجمع بين عملية تقدير المعلمات، والذي يوفر تقديرات للمعلمات غير المعروفة في كل لحظة من الزمن، مع قانون التحكم.

التحكم التكمي بدون تقدير البارامترات

- في هذه الفئة من المخططات، يتم استبدال مقدار المعلمات بطرق البحث والمقارنة لاختيار معلمات وحدة التحكم من مجموعة من المعلمات المحتملة.
- أو تتضمن التبديل بين وحدات تحكم ثابتة مختلفة، على افتراض أن واحدة على الأقل تعمل على استقرار النظام.

التحكم التكميفي القائم على تقدير البارامترات

إن الطريقة التي يتم بها دمج القانون التكميفي مع قانون التحكم تؤدي إلى نهجين مختلفين.

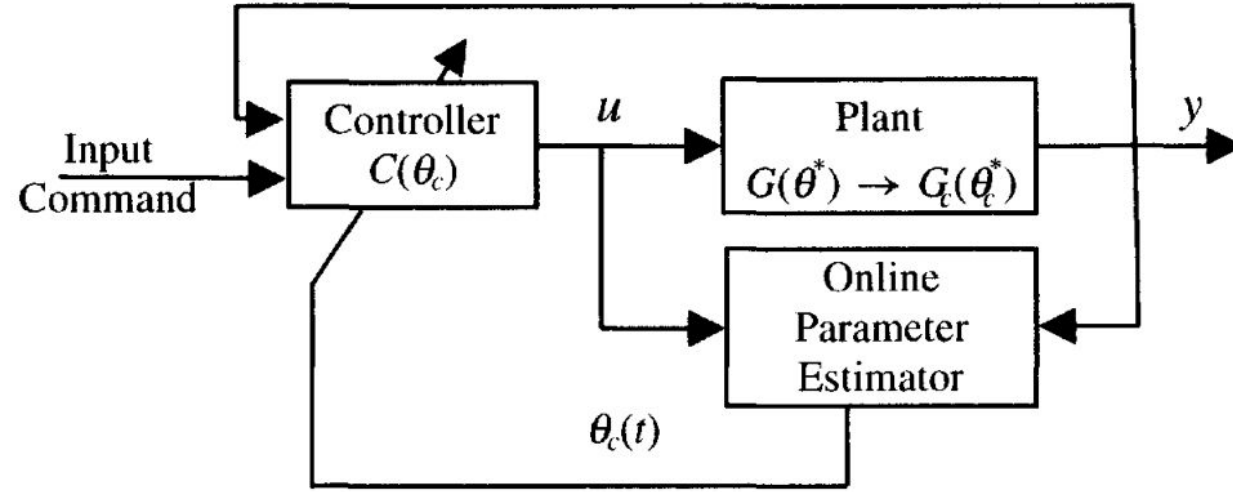
التحكم التكميفي غير المباشر

يتم تقدير معلمات العملية بشكل لحظي واستخدامها لحساب معلمات وحدة التحكم. بعبارة أخرى، في كل مرة t ، يتم تشكيل المصنع المقدّر ومعاملته كما لو كان المصنع الحقيقي في حساب معلمات وحدة التحكم. تمت الإشارة إلى هذا النهج أيضًا باسم التحكم التكميفي الصريح، لأن تصميم وحدة التحكم يعتمد على نموذج صريح للنظام.

التحكم التكميفي المباشر

يتم التعبير عن بارامترات نموذج العملية في بارامترات المتحكم، ثم يتم تقدير بارامترات المتحكم بعد ذلك مباشرةً دون حسابات وسيطة تتضمن تقديرات لمعلمات العملية. تتم الإشارة إلى هذا النهج أيضًا باسم التحكم التكميفي الضمني لأن التصميم يعتمد على تقدير نموذج ضمني للنظام.

التحكم التكيفي المباشر

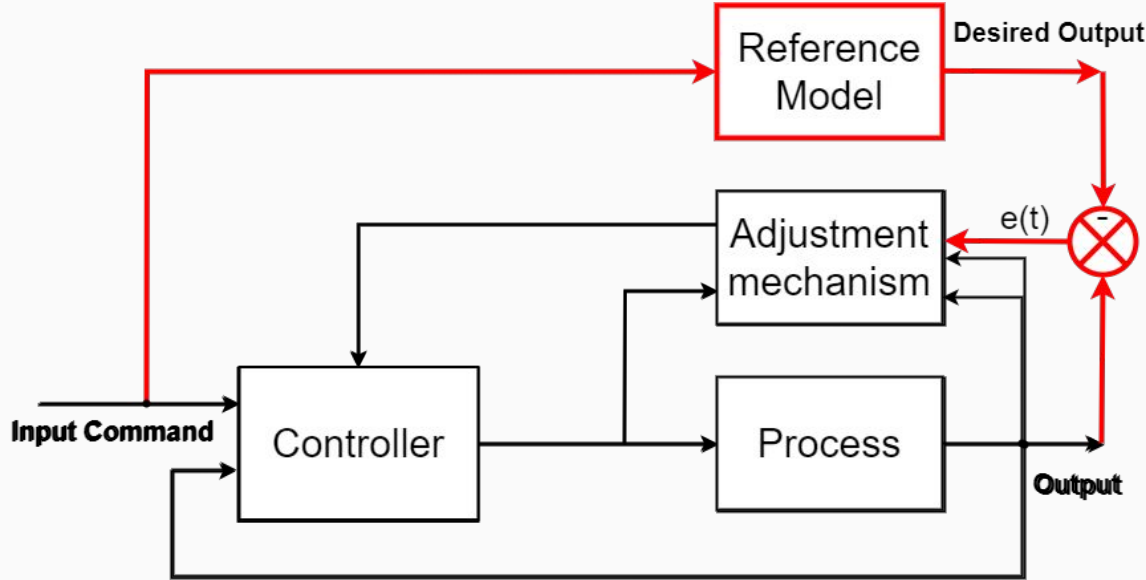


- يتم نمذجة العملية وفقا للبارامترات غير المعروفة θ^* للمتحكم ونحصل على النموذج $G_c(\theta^*)$ والذي يطابق تماما خصائص الدخل/الخرج للنموذج $G(\theta^*)$
- يتم عمل تقدير لهذه البارامترات للحصول على بارامترات المتحكم بشكل مباشر.

من أهم طرق التحكم التكيفي المباشر هي طريقة
التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي

Model Reference Adaptive Control (MRAC)

التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC)



- تقوم آلية التكيف (آلية الضبط) بضبط بارامترات المتحكم والتي تكون متعلقة بالبارامترات المتغيرة في العملية.

- يتم التعبير عن الأداء المرغوب للعملية ذات البارامترات المتغيرة بواسطة نموذج مرجعي والذي يعطي الأداء المرغوب لنفس الأمر على الدخل.

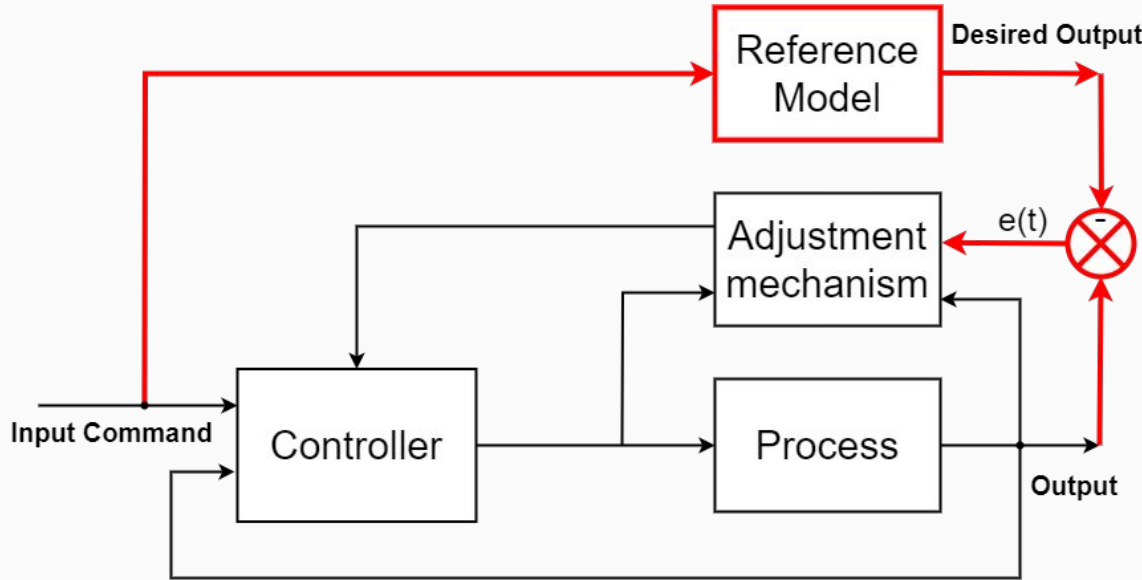
التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC)

يحتوي مخطط التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC) على حقتين:

- حلقة تغذية عكسية للعملية مع المتحكم.

- حلقة خارجية لضبط

بارامترات المتحكم بحسب الخطأ بين خرج العملية وخرج الموديل المرجعي

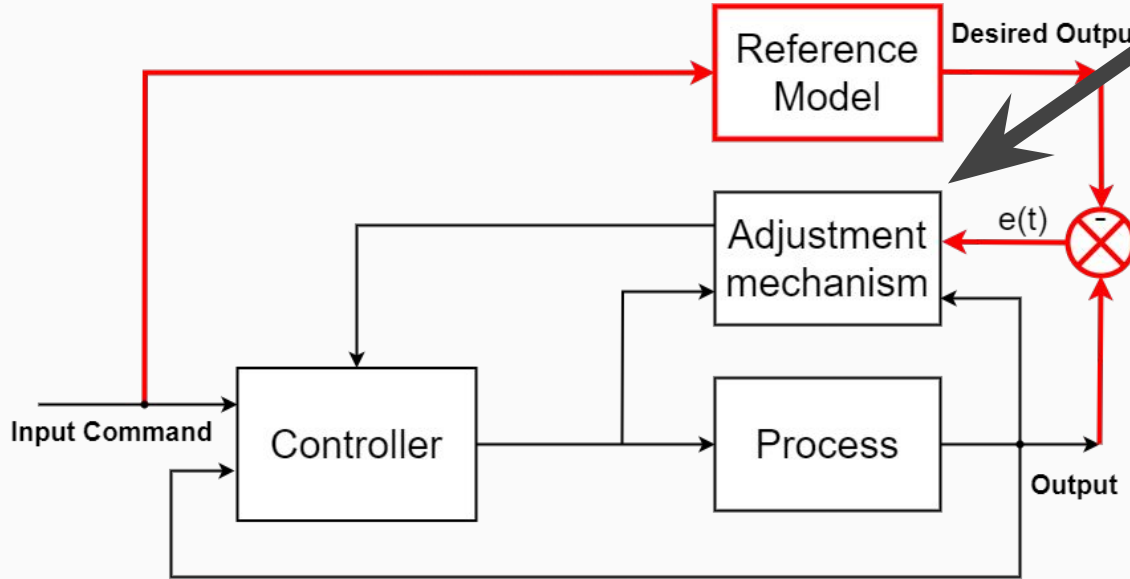


التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC)

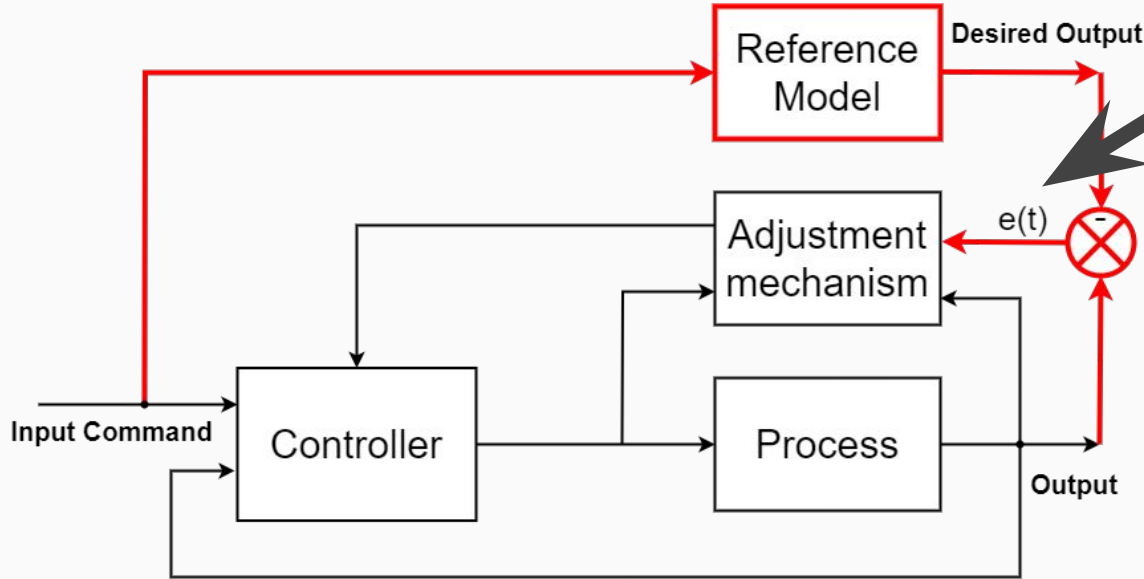
يوجد طريقتين للحصول على آلية ضبط البارامترات:

1. MIT Rule وهي طريقة تعتمد على النزول التدرجي.

2. طريقة تعتمد على نظرية لياپونوف للاستقرار.



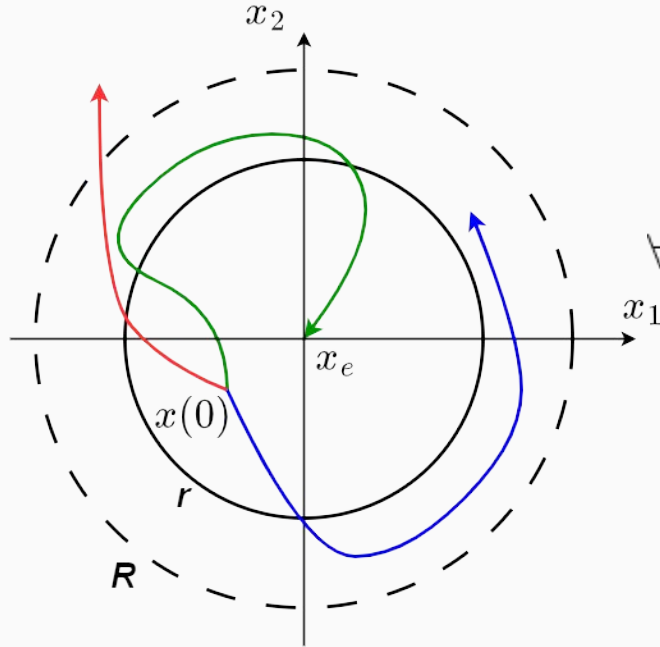
التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC) - طريقة لياپونوف



تقوم هذه الطريقة بتحقيق تقارب الخطأ إلى الصفر مع ضمان استقرار النظام وفق نظرية لياپونوف للاستقرار.

التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC) - طريقة لياپونوف

استقرار الأنظمة وفق طريقة لياپونوف غير المباشرة



ليكن النظام اللاخطي الموصوف بالمعادلة $\dot{x} = f(x)$
نقول بأن نقطة التوازن x_e لهذا النظام مستقرة **استقرار لياپونوف**
إذا كان:

$$\forall R > 0, \exists r > 0, \|x(0) - x_e\| < r \Rightarrow \forall t \geq 0, \|x(t) - x_e\| < R$$

ونقول بأن نقطة التوازن x_e لهذا النظام مستقرة **استقرار تقاربي** إذا كان:

$$\exists r > 0, \|x(0) - x_e\| < r \Rightarrow \|x(t) - x_e\| \rightarrow 0 \text{ as } t \rightarrow \infty$$

بينما إذا انتهت حلول النظام خارج مجال محدد R نقول عندها بأن
نقطة التوازن **غير مستقرة**

في العديد من التطبيقات إن استقرار لياپونوف غير كاف لتحقيق شروط التشغيل المطلوبة

التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC) - طريقة ليابونوف

استقرار الأنظمة وفق طريقة ليابونوف المباشرة

إن التعريف السابق للاستقرار وفق طريقة ليابونوف غير المباشرة يتطلب إيجاد جميع حلول النظام اللاخطي وهذا قد يكون صعباً أو مستحيلاً

في طريقة ليابونوف المباشرة للاستقرار:

- ❖ أظهر ليابونوف أنه يمكن استخلاص استقرار النظام من خلال فحص دالة سلمية واحدة.
- ❖ هذه الدالة تدعى دالة ليابونوف وتشبه دالة الطاقة للنظام.
- ❖ بينما دالة الطاقة للنظام هي دالة فريدة إن دالة ليابونوف قد تكون أي دالة معرفة موجبة مشتقها الزمني معرف أو نصف معرف سالب.
- ❖ إن الطريقة المباشرة للاستقرار هي طريقة فعالة لدراسة استقرار نقاط التوازن للنظام اللاخطي بشكل مباشر دون الحاجة لحل المعادلة الديناميكية للنظام.

التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC) - طريقة ليابونوف

استقرار الأنظمة وفق طريقة ليابونوف المباشرة

تعريف: لأجل النظام الموصوف بالمعادلة $\dot{x} = f(x)$ نقول عن الدالة $V(x)$ أنها دالة ليابونوف إذا حققت الشروط التالية:

- ❖ أنها دالة معرفة موجبة، أي أن

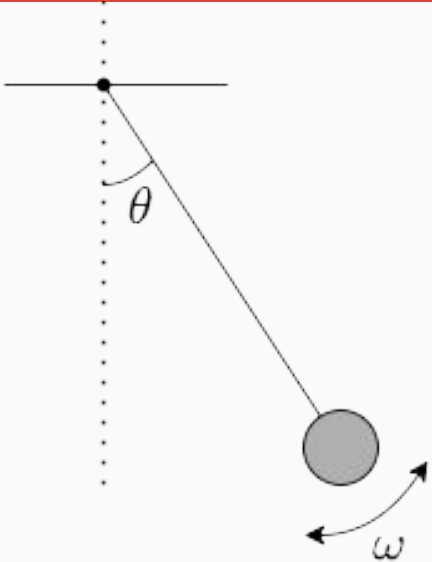
$$V(x) > 0 \quad \text{for all } x \neq 0$$

- ❖ مشتقها الزمني معرف أو نصف معرف سالب

$$\dot{V}(x) = \frac{\partial V}{\partial x} \dot{x} = \frac{\partial V}{\partial x} f(x) \leq 0 \quad \text{for all } x \neq 0$$

التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC) - طريقة ليابونوف

استقرار الأنظمة وفق طريقة ليابونوف المباشرة



مثال 1: نواس بسيط بدون احتكاك الموصوف بالمعادلات التالية

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = -a \sin x_1$$

نقطة التوازن لهذا النظام هي نقطة الأصل $(0,0)$
بفرض الدالة السلمية

$$V(x) = a(1 - \cos x_1) + \frac{1}{2}x_2^2$$

من الواضح أن

$$V(x) > 0 \quad \text{for all} \quad x \neq 0$$

نوجد مشتق الدالة $V(x)$

التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC) - طريقة ليابونوف

استقرار الأنظمة وفق طريقة ليابونوف المباشرة

مثال 1: نواس بسيط بدون احتكاك الموصوف بالمعادلات التالية

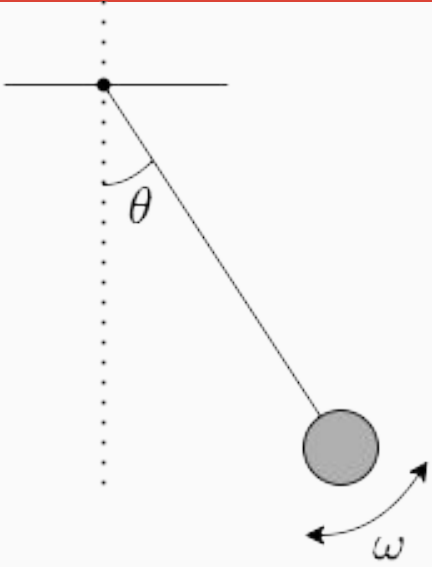
$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = -a \sin x_1$$

نوجد مشتق الدالة $V(x)$

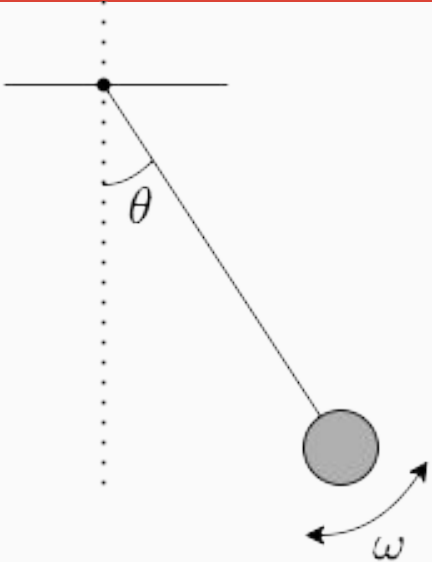
$$\dot{V}(x) = a\dot{x}_1 \sin x_1 + x_2\dot{x}_2 = ax_2 \sin x_1 - ax_2 \sin x_1 = 0$$

بما أن المشتق $\dot{V}(x) = 0$ فهو نصف معرف سالب، بالتالي إن نقطة التوازن للنظام مستقرة (هذا يكافئ استقرار ليابونوف وليس استقرار تقاربي)



التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC) - طريقة ليابونوف

استقرار الأنظمة وفق طريقة ليابونوف المباشرة



مثال 2: نواس بسيط مع احتكاك الموصوف بالمعادلات التالية

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = -a \sin x_1 - bx_2$$

نقطة التوازن لهذا النظام هي نقطة الأصل $(0,0)$
بفرض الدالة السلمية

$$V(x) = a(1 - \cos x_1) + \frac{1}{2}x_2^2$$

من الواضح أن

$$V(x) > 0 \quad \text{for all} \quad x \neq 0$$

نوجد مشتق الدالة $V(x)$

التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC) - طريقة لياپونوف

تصميم MRAC وفق طريقة لياپونوف المباشرة

مثال 2: نواس بسيط مع احتكاك الموصوف بالمعادلات التالية

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -a \sin x_1 - bx_2\end{aligned}$$

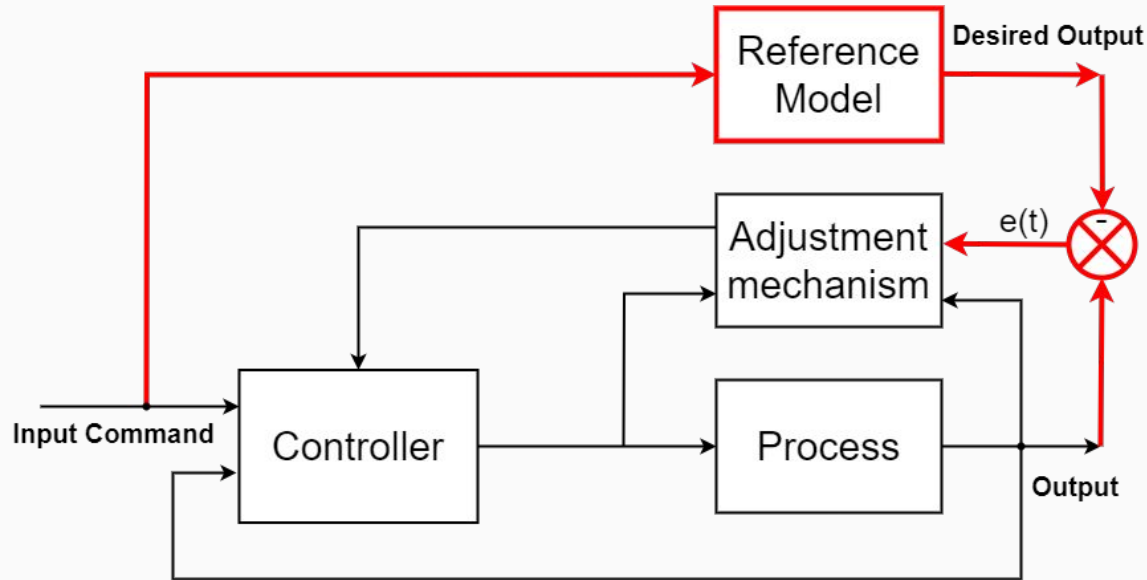
نوجد مشتق الدالة $V(x)$

$$\dot{V}(x) = a\dot{x}_1 \sin x_1 + x_2\dot{x}_2 = ax_2 \sin x_1 - ax_2 \sin x_1 - bx_2^2 = -bx_2^2$$

بما أن المشتق $\dot{V}(x) \leq 0$ فهو نصف معرف سالب، بالتالي إن نقطة التوازن للنظام مستقرة (استقرار لياپونوف أم استقرار تقاربي؟)

التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC) - طريقة لياپونوف

تصميم MRAC وفق طريقة ليابونوف المباشرة



إن طريقة ليابونوف للاستقرار يمكن أن تستخدم للحصول على آلية ضبط البارامترات في أنظمة التحكم التكيفي وفق الخطوات التالية

التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC) - طريقة ليابونوف

خطوات تصميم MRAC وفق طريقة ليابونوف المباشرة

- بفرض نظام التحكم التكيفي السابق يحتوي المتحكم فيه على بارامتر واحد قابل للضبط

- نُعرّف الخطأ: $e = y - y_m$

- نوجد المعادلة التفاضلية للخطأ e والتي تحتوي بدورها على البارامترات القابلة للضبط

$$\frac{de}{dt} = f(e, \theta)$$

- بعدها نحاول العثور على دالة ليابونوف $V(e, \theta)$ التي تجعل الخطأ ينتهي إلى الصفر

عند استخدام نظرية ليابونوف في أنظمة التحكم التكيفية فإننا نجد أن مشتق دالة ليابونوف هو عادةً نصف معرف سالب فقط

التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC) - طريقة ليابونوف

خطوات تصميم MRAC وفق طريقة ليابونوف المباشرة

عند استخدام نظرية ليابونوف في أنظمة التحكم التكيفية فإننا نجد أن مشتق دالة ليابونوف هو عادةً نصف معرف سالب فقط

بالتالي إن نظرية ليابونوف تعطي دليل على استقرار النظام (أي تقارب خطأ الملاحظة e إلى قيمة محدودة) ولكن لا يمكننا من برهان تقارب الخطأ إلى الصفر أو محدودية جميع بارامترات المتحكم التكيفي، لبرهان ذلك نحتاج إلى المبرهنة التالية

التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC) - طريقة ليابونوف

خطوات تصميم MRAC وفق طريقة ليابونوف المباشرة

مبرهنة Lyapunov-Like لبرهان تقارب خطأ الملاحقة إلى الصفر بحال كان مشتق دالة ليابونوف نصف معرف سالب

إذا كانت الدالة $V(x)$ المعرفة الموجبة تحقق الشروط التالية:

- محدودة من الأسفل
- مشتقها الزمني $\dot{V}(x)$ نصف معرف سالب
- مشتقها الزمني $\dot{V}(x)$ مستمر بشكل منتظم

عندها فإن $\dot{V} \rightarrow 0$ as $t \rightarrow \infty$

نقول عن دالة بأنها مستمرة بشكل منتظم إذا كان مشتقها الزمني محدود

التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC) - طريقة لياپونوف

مثال - نظام تحكم حلقة مغلقة

بفرض عملية موصوفة بالمعادلة

$$\frac{dy}{dt} = -ay + bu$$

حيث أن البارامترات a, b غير معروفة ولكن إشارة b معروفة وأن u هو دخل التحكم و y هو الخرج المقاس. بفرض أننا نريد استجابة حلقة مغلقة مكافئة للنموذج المعروف بالشكل

$$\frac{dy_m}{dt} = -a_m y_m + b_m u_c$$

بفرض متحكم يعطى بالعلاقة

$$u(t) = \theta_1 u_c(t) - \theta_2 y(t)$$

التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC) - طريقة ليابونوف

مثال - نظام تحكم حلقة مغلقة

- نعرف إشارة الخطأ $e = y - y_m$
- نوجد المعادلة التفاضلية للخطأ

$$\frac{de}{dt} = -a_m e - (b\theta_2 + a - a_m)y + (b\theta_1 - b_m)u_c$$

- نقوم بالعثور على دالة ليابونوف والتي يمكننا من استنتاج آلية ضبط للبارامترات θ_1, θ_2
- لذلك سوف نفترض أن $b\gamma > 0$ (ندعو γ سرعة التكيف) ونقدم الدالة التربيعية التالية:

$$V(e, \theta_1, \theta_2) = \frac{1}{2} \left(e^2 + \frac{1}{b\gamma} (b\theta_2 + a - a_m)^2 + \frac{1}{b\gamma} (b\theta_1 - b_m)^2 \right)$$

هذه الدالة تساوي إلى الصفر عندما يكون الخطأ e والبارامترات θ_1, θ_2 تساوي قيمها المرغوبة لكن من وجهة نظر تصميم المتحكم فإننا لانعلم القيم المرغوبة للبارامترات θ_1, θ_2

التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC) - طريقة ليابونوف

مثال - نظام تحكم حلقة مغلقة

- كي نقول أن الدالة التربيعية $V(e, \theta_1, \theta_2)$ هي دالة ليابونوف فإن مشتقتها الزمنية يجب أن يكون سالبة

$$\begin{aligned}\frac{dV}{dt} &= e \frac{de}{dt} + \frac{1}{\gamma} (b\theta_2 + a - a_m) \frac{d\theta_2}{dt} + \frac{1}{\gamma} (b\theta_1 - b_m) \frac{d\theta_1}{dt} \\ &= -a_m e^2 + \frac{1}{\gamma} (b\theta_2 + a - a_m) \left(\frac{d\theta_2}{dt} - \gamma y e \right) \\ &\quad + \frac{1}{\gamma} (b\theta_1 - b_m) \left(\frac{d\theta_1}{dt} + \gamma u_c e \right)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{d\theta_1}{dt} &= -\gamma u_c e, \quad \frac{d\theta_2}{dt} = \gamma y e && \text{إذا اخترنا تحديث البارامترات بالشكل:} \\ \frac{dV}{dt} &= -a_m e^2 && \text{عندها يكون}\end{aligned}$$

التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC) - طريقة لياپونوف

مثال - نظام تحكم حلقة مغلقة

المشتق الزمني $\frac{dV}{dt} = -a_m e^2$ نصف معرف سالب وليس معرف سالب بالتالي إن الخطأ e يتقارب إلى قيمة محدودة ولا يوجد دليل أنه يتقارب إلى الصفر.

التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC) - طريقة ليابونوف

مثال - نظام تحكم حلقة مغلقة

مناقشة نوع الاستقرار حسب مبرهنة Lyapunov-Like

أولاً: الدالة V معرفة موجبة ومشتقتها $\frac{dV}{dt}$ نصف معرف سالب. بالتالي إن الدالة V محدودة من الأسفل وهذا يعني أن

المتغيرات المكونة لها e, θ_1, θ_2 محدودة وهذا يعني أن y محدود لأن $y = e + y_m$

ثانياً: المشتق $\frac{dV}{dt}$ نصف معرف سالب.

ثالثاً: لمعرفة إذا كان المشتق $\frac{dV}{dt}$ مستمر بشكل منتظم نقوم بإيجاد المشتق الثاني

$$\frac{d^2V}{dt^2} = -2a_me \frac{de}{dt} = -2a_me(-a_me - (b\theta_2 + a - a_m)y + (b\theta_1 - b_m)u_c)$$

التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC) - طريقة ليابونوف

مثال - نظام تحكم حلقة مغلقة

مناقشة نوع الاستقرار حسب مبرهنة Lyapunov-Like

حتى تتحقق كل شروط مبرهنة Lyapunov-Like نحتاج أن نبرهن أن المشتق $\frac{d^2V}{dt^2}$ محدود.

$$\frac{d^2V}{dt^2} = -2a_m e \frac{de}{dt} = -2a_m e (-a_m e - (b\theta_2 + a - a_m)y + (b\theta_1 - b_m)u_c)$$

وجدنا أن e, θ_1, θ_2 و y جميعها محدودة وبما أن إشارة الدخل u_c محدودة فهذا يعني أن المشتق $\frac{d^2V}{dt^2}$ محدود

بسبب محدودية جميع مكوناته وهذا يؤدي إلى أن المشتق $\frac{dV}{dt}$ مستمر بشكل منتظم ومنه وفقا لمبرهنة Lyapunov-Like

يكون $\dot{V} \rightarrow 0$ بينما $t \rightarrow \infty$

التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC) - طريقة لياپونوف

مثال - نظام تحكم حلقة مغلقة

وجدنا أن $\dot{V} \rightarrow 0$ بينما $t \rightarrow \infty$

بما أن $\frac{dV}{dt} = -a_m e^2$ فهذا يعني أن $e \rightarrow 0$ بينما $t \rightarrow \infty$ بالتالي إن استقرار النظام تقاربي أي

بحال حدوث انزياح بين خرج النظام والخرج المرغوب فإن المتحكم التكيفي سوف يولد إشارة التحكم بحيث يتناهى الخطأ بينهما إلى الصفر

ماذا بخصوص تقارب بارامترات المتحكم إلى القيم الحقيقية؟

سنقوم باختبار نظام التحكم مع قيم عددية

التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC) - طريقة لياپونوف

مثال - نظام تحكم حلقة مغلقة

في هذا المثال لنفترض أن العملية موصوفة بالشكل

$$\dot{y} = y + 3u$$

حيث نفترض أن $a = 1, b = 3$ غير معلومات

وأن النموذج المرجعي المرغوب

$$\dot{y}_m = -4y_m + 4u_c$$

ومن أجل معدل تكيف $\gamma = 2$. سوف نفترض أن القيم الابتدائية لبارامترات المتحكم تساوي الصفر

أي أنه نفترض أن لا يوجد أي معرفة مسبقة نعتمد عليها لاختيار البارامترات

ماهي القيم الحقيقية لبارامترات المتحكم؟

$$\theta_1, \theta_2$$

$$\theta_1^* = \frac{b_m}{b} = 1.33 \quad \text{هي:}$$

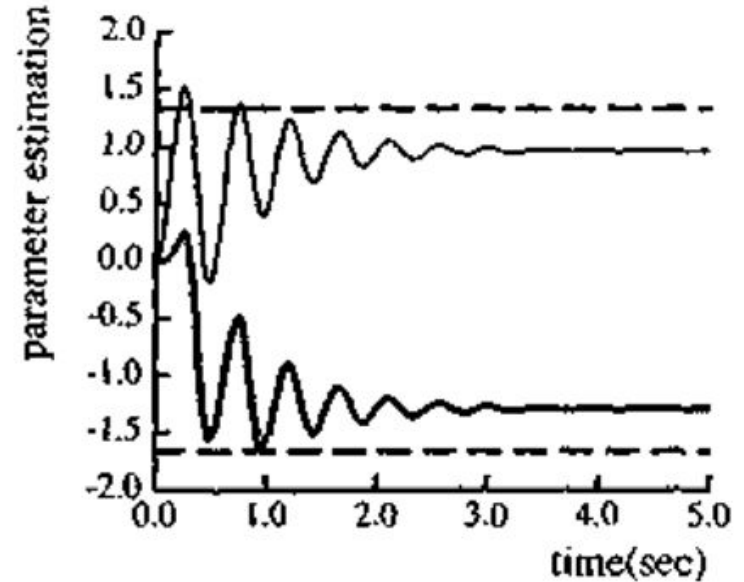
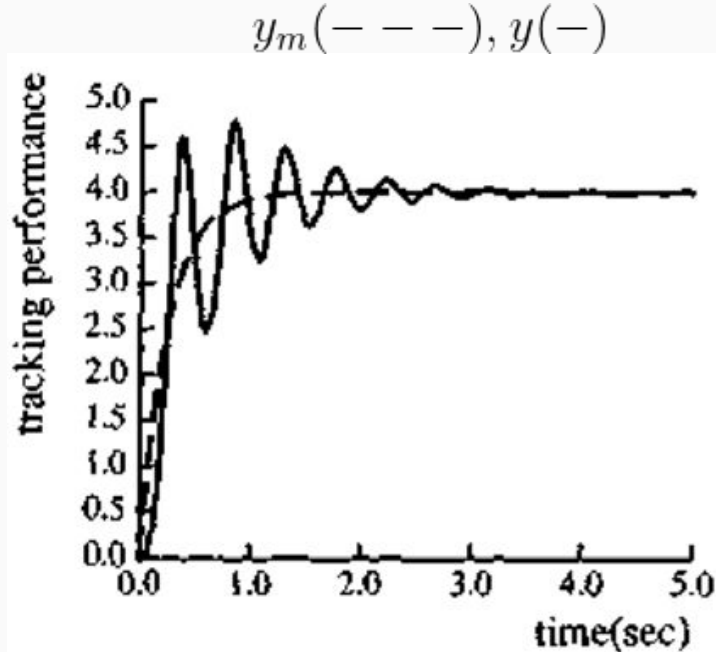
$$\theta_2^* = \frac{a_m - a}{b} = -1.667$$

التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC) - طريقة ليابونوف

مثال - نظام تحكم حلقة مغلقة

أولاً: من أجل إشارة الدخل $u(t) = 4$

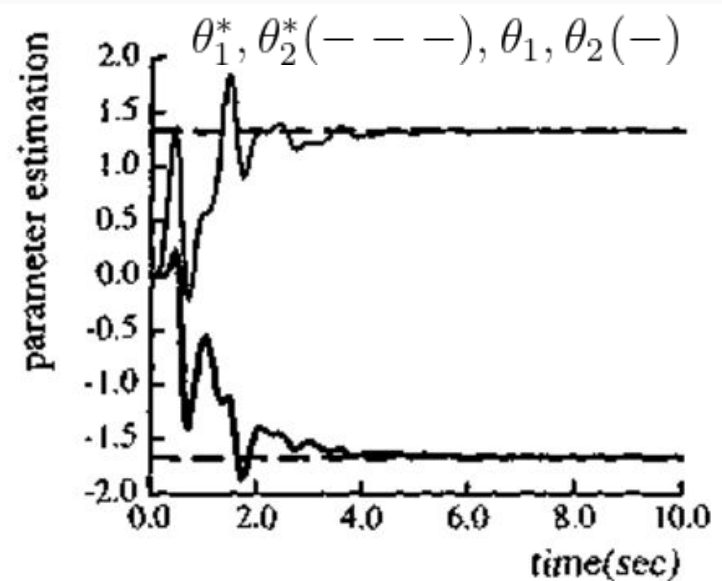
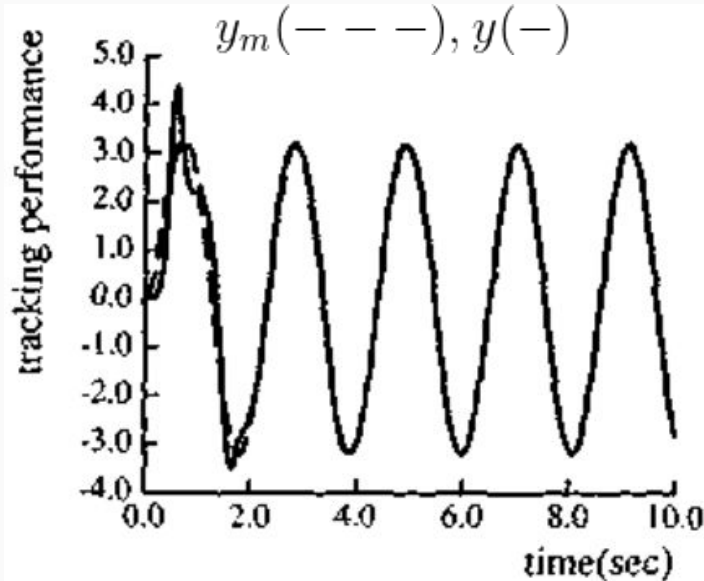
$\theta_1^*, \theta_2^* (---), \theta_1, \theta_2 (-)$



التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC) - طريقة لياونوف

مثال - نظام تحكم حلقة مغلقة

ثانياً: من أجل إشارة الدخل $u(t) = 4 \sin(3t)$



التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC) - طريقة ليابونوف

مثال - نظام تحكم حلقة مغلقة

من أجل تقارب البارامترات إلى القيم الحقيقية لها يجب أن يتحقق شرط **persistent excitation** أي النشاط أو الحماس الدائم لإشارة الدخل وهذا يعني أن تكون إشارة الدخل نشطة بشكل كافي.

الإشارة الأولى لم تحقق هذا الشرط بينما الإشارة الثانية تحقق هذا الشرط