

Adaptive Control

التحكم التكيفي

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

التحكم التكيفي - المحاضرة الثانية

Process	System	Plant	جملة التحكم	النظام	العملية
Parameters			المعلومات	المعاملات	البارامترات
Mathematical model	Model			الموديل	النموذج الرياضي
Feedback				التغذية العكسية	التغذية الراجعة
Estimator					مقدّر

في محاضرة سابقة ...

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.

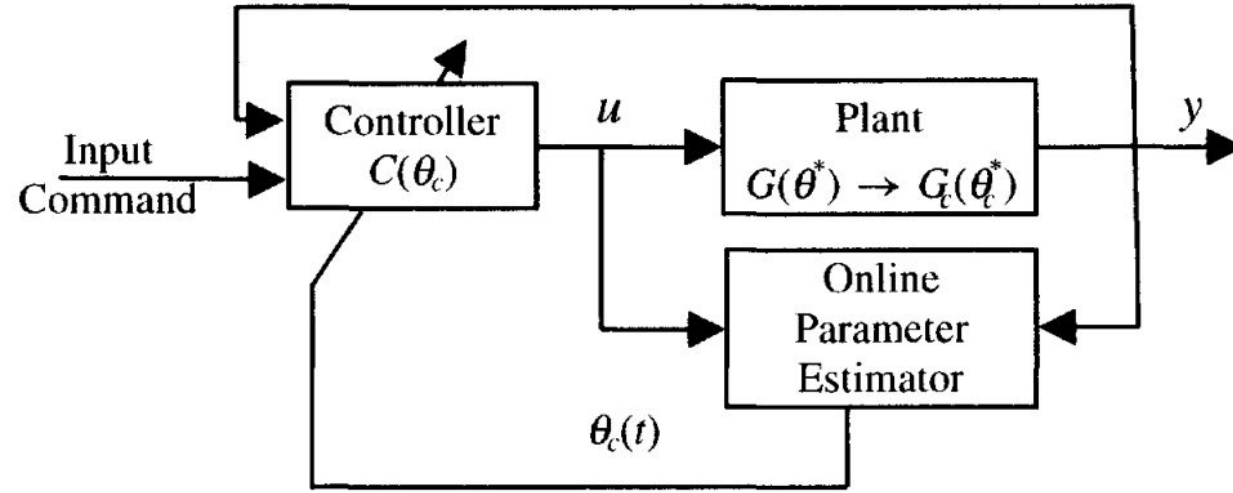
التحكم التكميفي غير المباشر

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

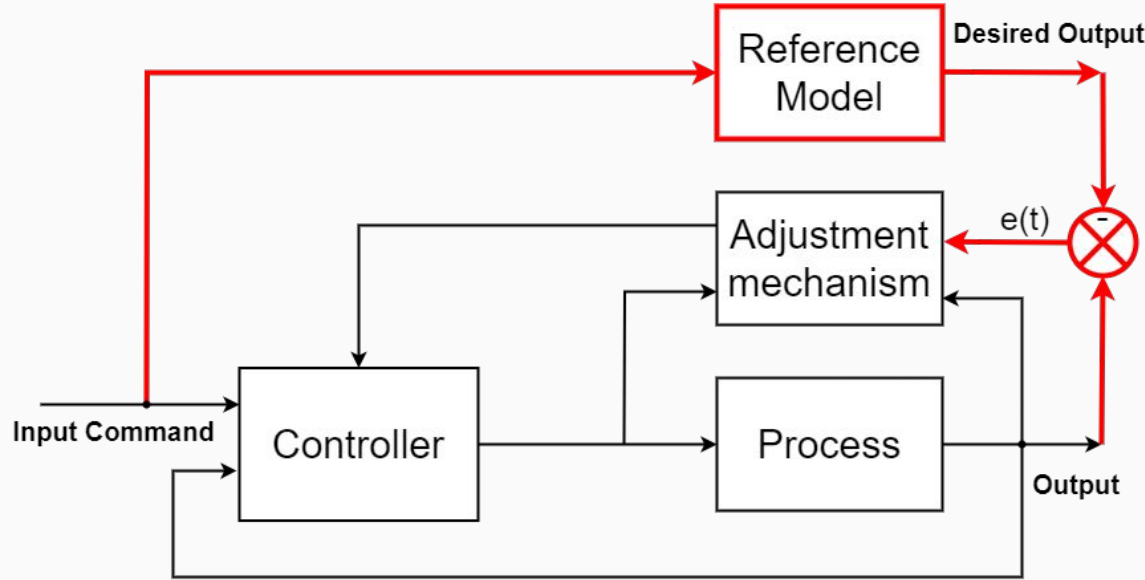


- يتم نمذجة العملية وفقا للبارامترات غير المعروفة θ^* للتحكم ونحصل على النموذج $G_c(\theta^*)$ والذي يطابق تماما خصائص الدخل/الخرج للنموذج $G(\theta^*)$
- يتم عمل تقدير لهذه البارامترات للحصول على بارامترات المتحكم بشكل مباشر.

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.

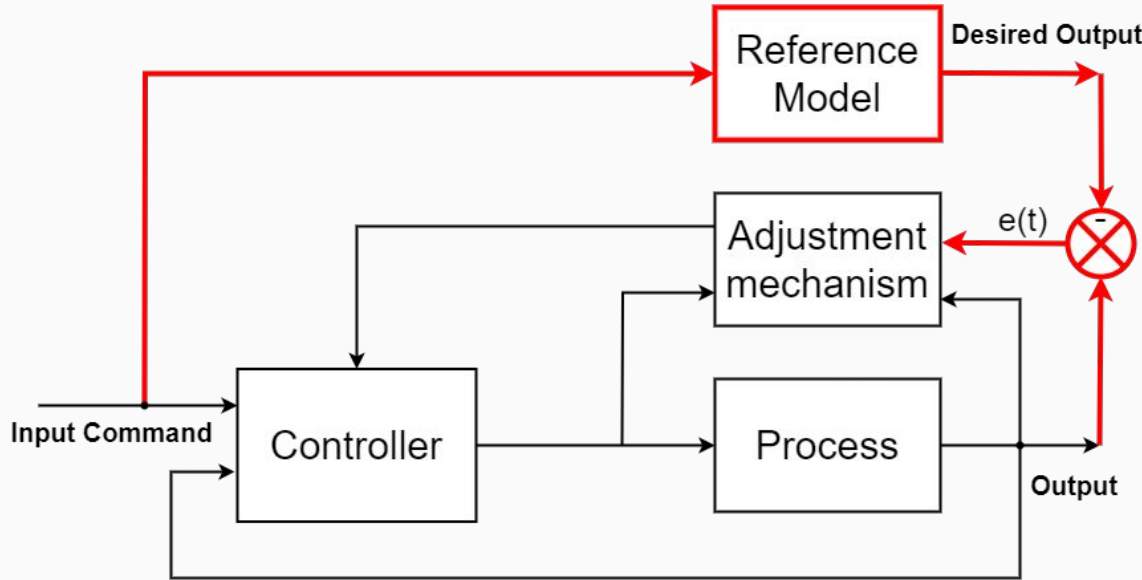
التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC)

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

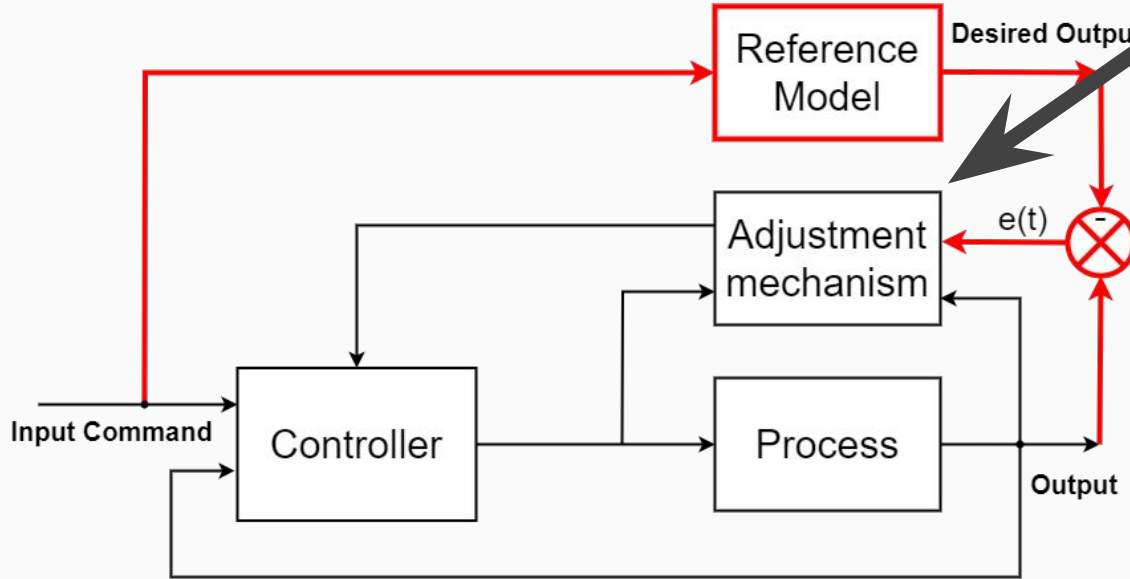


التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC)

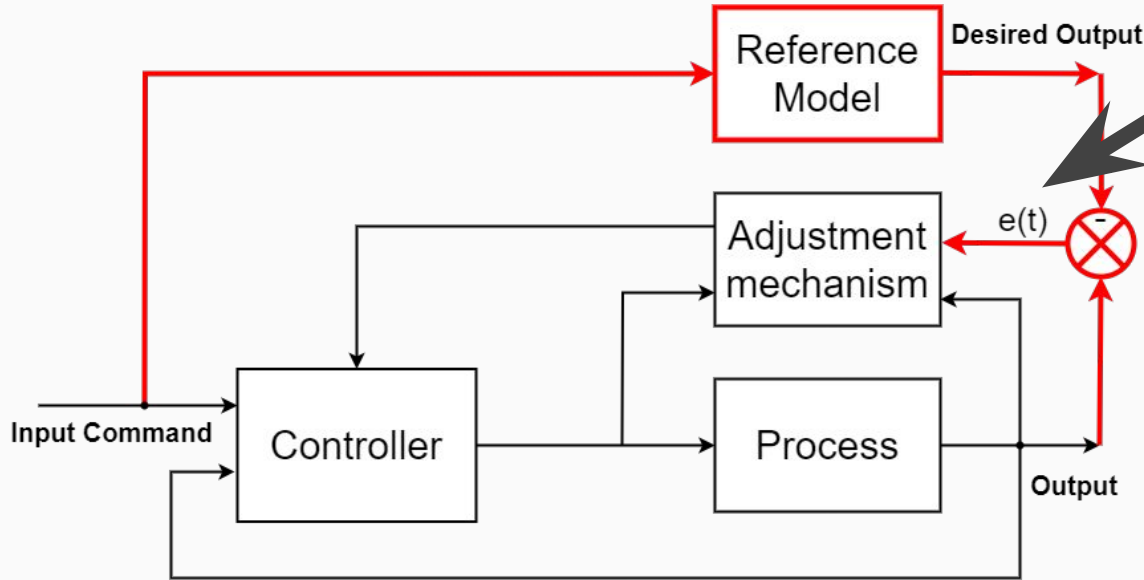
يوجد طريقتين للحصول على آلية ضبط البارامترات:

1. MIT Rule وهي طريقة تعتمد على النزول التدرجي.

2. طريقة تعتمد على نظرية لياپونوف للاستقرار.



التحكم التكيفي القائم على النموذج المرجعي (MRAC) - طريقة MIT Rule



تقوم هذه الطريقة بتصغير الخطأ e بين خرج العملية والخرج المرغوب وفقا لطريقة النزول التدرجي.

طريقة MIT Rule

- بفرض نظام التحكم التكيفي السابق يحتوي المتحكم فيه على بارامتر واحد قابل للضبط θ
- بفرض أن u_c دخل نظام التحكم y هو خرج العملية
- وأن y_m هو خرج الموديل المرجعي المرغوب،
- نُعرّف الخطأ:

$$e = y - y_m$$

- نقوم بضبط بارامتر المتحكم بحيث يتم جعل دالة الكلفة التالية أصغر مايمكن.

$$J(\theta) = \frac{1}{2}e^2$$

- لجعل $J(\theta)$ أصغر، نقوم بتغيير θ في الإتجاه التدرجي المعاكس لتغيرات $J(\theta)$ أي:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta}$$

طريقة MIT Rule

العلاقة السابقة تدعى قانون التكيف للبارامتر
Update Rule أو قاعدة تحديث البارامتر

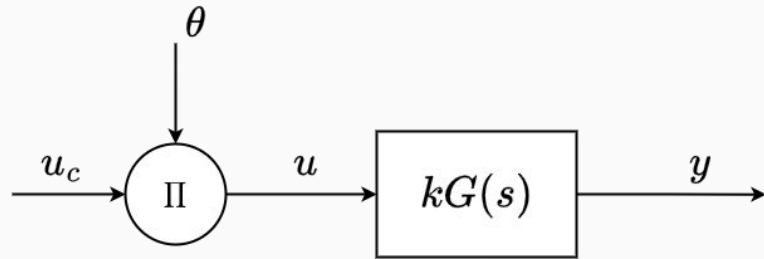
المشتق $\frac{\partial e}{\partial \theta}$ يدعى مشتق الحساسية أو تابع الحساسية للنظام ويخبرنا
بمدى تعلق الخطأ بالبارامتر القابل للضبط.

يوجد العديد من التوابع البديلة لتابع الكلفة المستخدم والتي يمكن اختيارها

مثال - الربح الأمامي المتكيف

بفرض عملية خطية موصوفة بتابع النقل $kG(s)$ حيث أن التابع $G(s)$ معلوم و k هو بارامتر غير معلوم. نقوم بإيجاد متحكم تغذية أمامية يعطي استجابة مكافئة للموديل المرجعي

$$G_m(s) = k_0 G(s) \quad \text{حيث أن } k_0 \text{ هو ثابت معلوم.}$$



يعطى متحكم التغذية الأمامية لهذا النظام بالعلاقة

$$u = \theta u_c$$

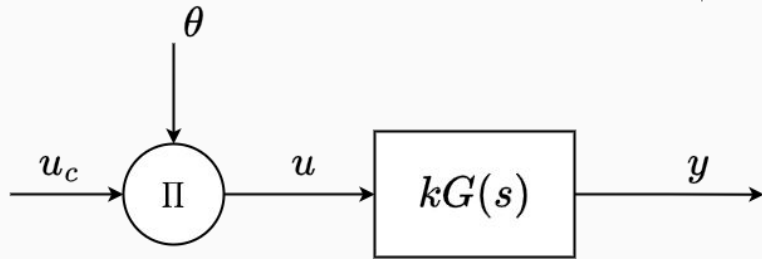
حيث أن u هي إشارة التحكم و u_c هي إشارة الدخل للنظام.

مثال - الربح الأمامي المتكيف

تابع النقل من إشارة الدخل حتى خرج العملية يعطى بالعلاقة

$$\theta k G(s)$$

هذا التابع يكافئ تابع النقل للموديل المرجعي $G_m(s)$ إذا تم اختيار البارامتر θ بالشكل



$$\theta = \frac{k_0}{k}$$

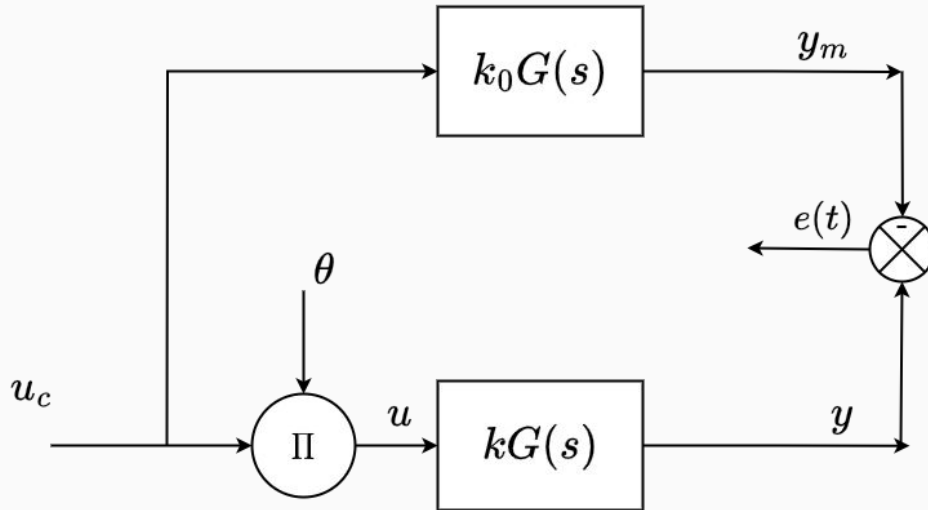
ولكن البارامتر k غير معلوم

طريقة MIT Rule

مثال - الربح الأمامي المتكيف

سوف نقوم الآن باستخدام قاعدة MIT للحصول على آلية ضبط البارامتر θ عندما يكون k غير معلوم. نحسب الخطأ بين خرج العملية وخرج الموديل المرجعي

$$e = y - y_m = kG(s)\theta u_c - k_0G(s)u_c$$



حيث أن y_m هو خرج الموديل المرجعي. يعطى مشتق الحساسية لهذا النظام بالعلاقة

$$\frac{\partial e}{\partial \theta} = kG(s)u_c = \frac{k}{k_0}y_m$$

طريقة MIT Rule

مثال - الربح الأمامي المتكيف

ومنه ووفقا لقاعدة تحديث البارامتر في طريقة MIT فإن قاعدة تحديث البارامتر θ تعطى بالشكل:

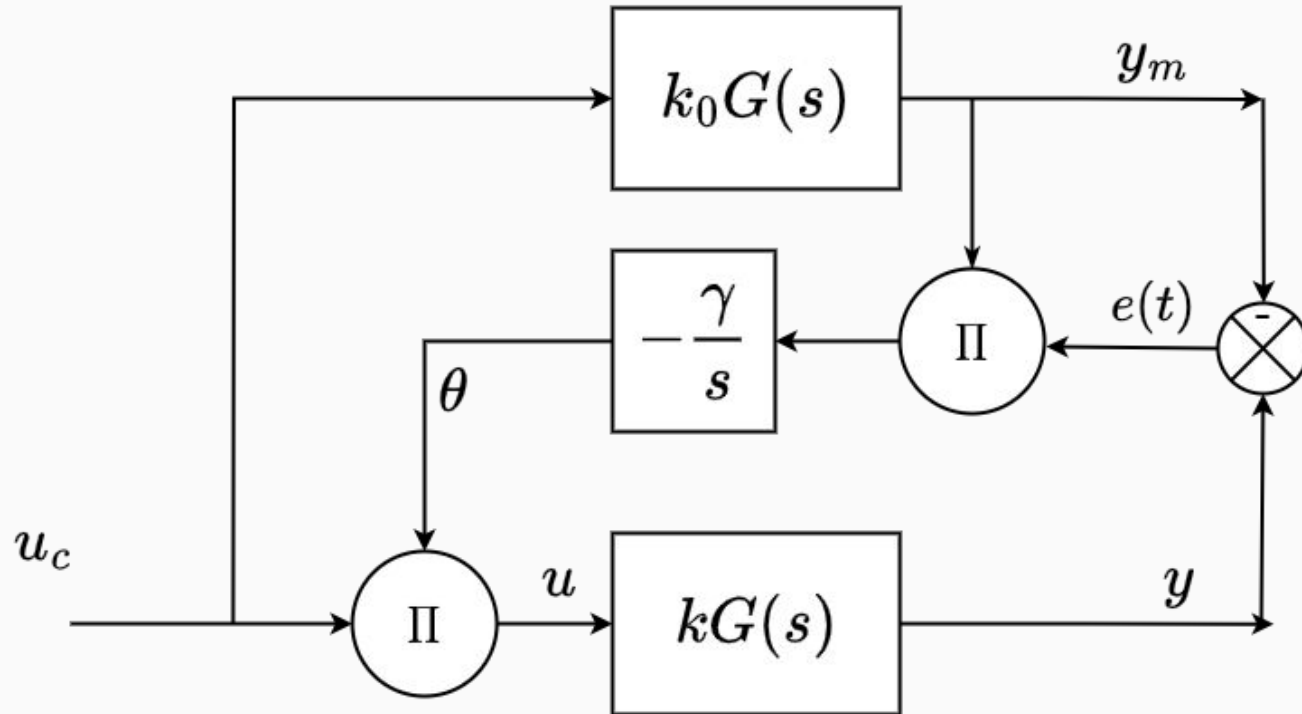
$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma' \frac{k}{k_0} y_m e = -\gamma y_m e$$

حيث أن $\gamma = \gamma' \frac{k}{k_0}$ يعني أننا قمنا بدمج الربح غير المعلوم k بالربح التكيفي γ

حتى تكون إشارة الربح γ صحيحة يجب أن تكون إشارة البارامتر المجهول k معلومة.

طريقة MIT Rule

مثال - الربح الأمامي المتكيف



مثال - الربح الأمامي المتكيف

$$G(s) = \frac{1}{s+1}$$

بفرض لأجل نفس المثال تابع نقل العملية يعطى بالشكل

وإشارة الدخل u_c هي إشارة جيبية

بتردد 1 راديان بالثانية. والبارامترات

$$k = 1, k_0 = 2$$

يبين الشكل المجاور (الأعلى) استجابة

النموذج المرجعي y_m واستجابة

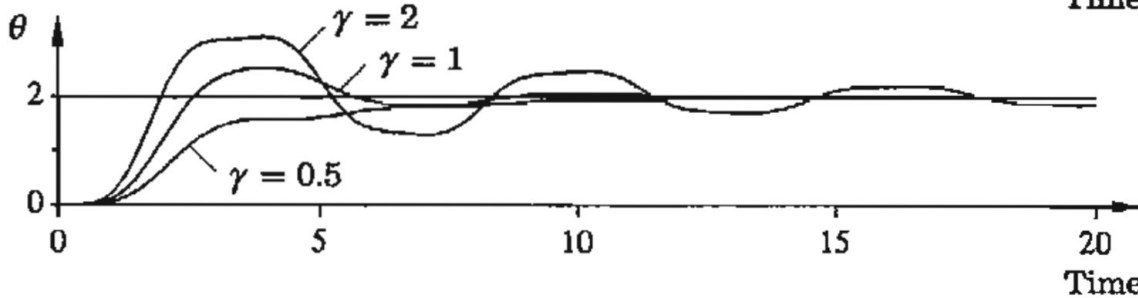
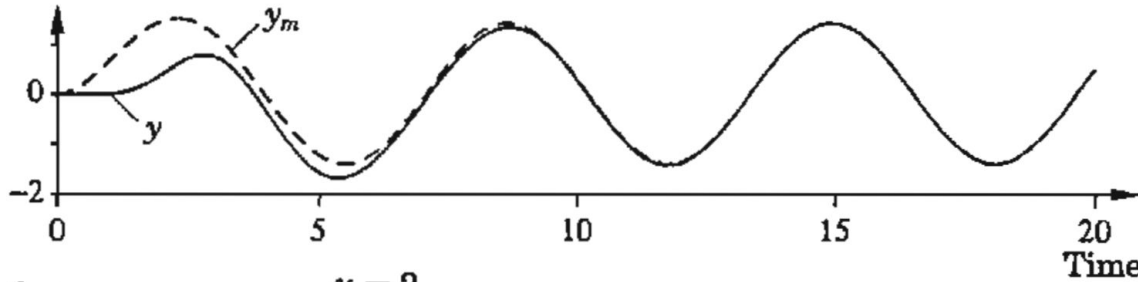
العملية y من أجل الربح التكيفي

$$\gamma = 1$$

يبين الشكل الأسفل تقارب قيمة

البارامتر من قيمته الحقيقية من أجل

أرباح تكيفية مختلفة.



مثال - نظام تحكم حلقة مغلقة

بفرض عملية موصوفة بالمعادلة

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

حيث أن البارامترات a, b غير 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

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

مثال - نظام تحكم حلقة مغلقة

إذا تم اختيار بارامترات المتحكم بالشكل:

$$\theta_1 = \theta_1^* = \frac{b_m}{b}, \quad \theta_2 = \theta_2^* = \frac{a_m - a}{b}$$

عندها سوف تتطابق استجابة الدخل - الخرج للعملية مع النموذج المرجعي. ولكن بما أن قيم البارامترات a, b غير معروفة سوف نطبق قاعدة MIT لإيجاد قواعد تحديث (القوانين التكيفية) بارامترات المتحكم.

$$e = y - y_m \quad \text{- نعرف إشارة الخطأ}$$

- نوجد قواعد تحديث البارامترات وفقاً للعلاقات:

$$\frac{d\theta_1}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta_1} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta_1} \quad \text{و} \quad \frac{d\theta_2}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta_2} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta_2}$$

مثال - نظام تحكم حلقة مغلقة

- لحساب مشتقات الحساسية $\frac{\partial e}{\partial \theta}$ نقوم بإيجاد العلاقة التي تربط إشارة الخطأ e مع بارامترات المتحكم.

- نعوض قانون التحكم في معادلة العملية

$$\frac{dy}{dt} = -ay + b(\theta_1 u_c - \theta_2 y) = -(a + \theta_2)y + \theta_1 u_c$$

- للسهولة في اشتقاق توابع الحساسية $\frac{\partial e}{\partial \theta}$ نعرف المتغير $p = \frac{d}{dt}$ بالتالي

$$y = \frac{b\theta_1}{p+a+b\theta_2} u_c$$

مثال - نظام تحكم حلقة مغلقة

- بالتالي:

$$e = \frac{b\theta_1}{p+a+b\theta_2}u_c - y_m$$

- بالتالي إن مشتقات الحساسية للبارامترات تعطى بالشكل:

$$\frac{\partial e}{\partial \theta_1} = \frac{b}{p+a+b\theta_2}u_c$$

$$\frac{\partial e}{\partial \theta_2} = \frac{-b^2\theta_1}{(p+a+b\theta_2)^2}u_c = -\frac{b}{p+a+b\theta_2}y$$

مثال - نظام تحكم حلقة مغلقة

- لا يمكن استخدام مشتقات الحساسية السابقة لتحديث بارامترات المتحكم بسبب احتوائها على بارامترات العملية a, b غير المعروفة.
- لأجل حساب هذه المشتقات (وفقا للعلاقة السابقة) نحن بحاجة لعمل التقريب التالي: في الواقع وفي الحالة المثالية يجب أن تنتهي قيم البارامترات θ_1, θ_2 إلى القيم θ_1^*, θ_2^* والتي تجعل استجابة العملية مكافئة لاستجابة النموذج المرجعي. أي أنه في هذه الحالة المثالية يكون

$$a_m = a + b\theta_2^* \approx a + b\theta_2$$

- بالتالي يمكن استعمال هذا التقريب لتقريب قيم البارامترات غير المعلومة في مقام مشتقات الحساسية أي

$$\frac{\partial e}{\partial \theta_1} \approx \frac{b}{p+a_m} u_c \quad \frac{\partial e}{\partial \theta_2} \approx -\frac{b}{p+a_m} y$$

مثال - نظام تحكم حلقة مغلقة

- ومنه تعطى قواعد تحديث البارامترات بالشكل

$$\frac{d\theta_1}{dt} = -\gamma' b \frac{1}{p+a_m} u_c e, \quad \frac{d\theta_2}{dt} = -\gamma' b \frac{1}{p+a_m} y e$$

- نقوم بعمل نورمة لمرشح التمرير المنخفض الموجود في العلاقة بالشكل:

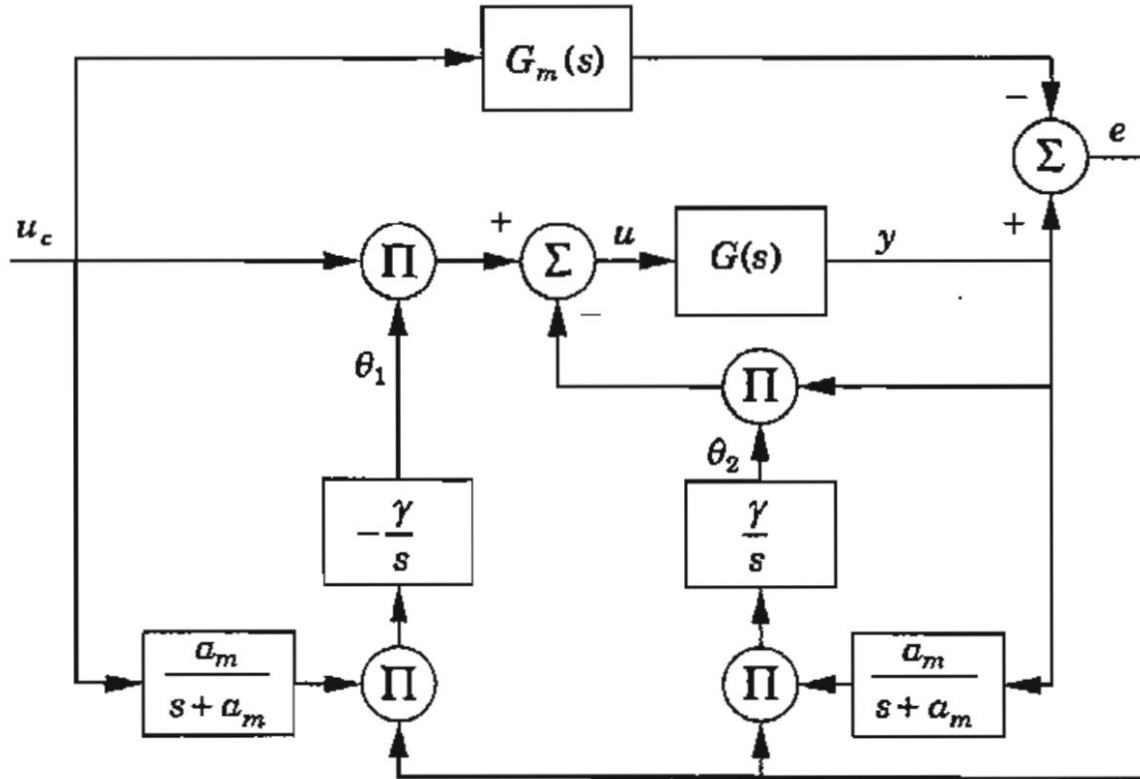
$$\frac{d\theta_1}{dt} = -\gamma' \frac{b}{a_m} \frac{a_m}{p+a_m} u_c e, \quad \frac{d\theta_2}{dt} = -\gamma' \frac{b}{a_m} \frac{a_m}{p+a_m} y e$$

- أخيراً نقوم بدمج الربح غير المعلوم b بالربح التكميلي بالشكل التالي

$$\frac{d\theta_1}{dt} = -\gamma \frac{a_m}{p+a_m} u_c e, \quad \frac{d\theta_2}{dt} = -\gamma \frac{a_m}{p+a_m} y e$$

طريقة MIT Rule

مثال - نظام تحكم حلقة مغلقة



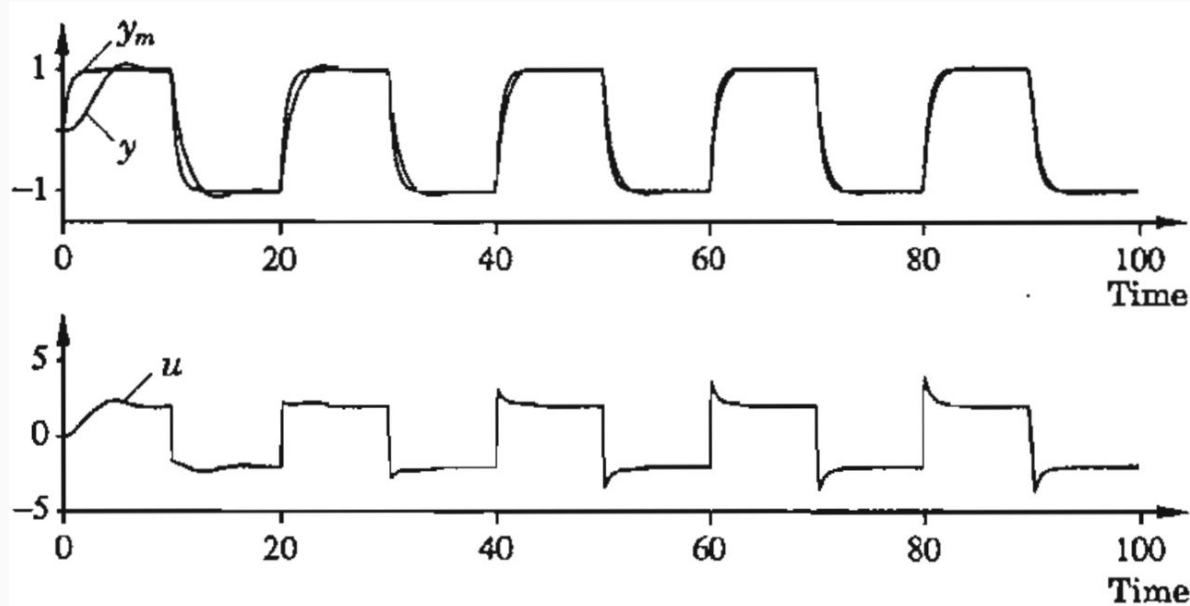
$$\frac{d\theta_1}{dt} = -\gamma \frac{a_m}{p+a_m} u_c e,$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = -\gamma \frac{a_m}{p+a_m} y e$$

طريقة MIT Rule

مثال - نظام تحكم حلقة مغلقة

يوضح الشكل استجابة النظام من أجل قيم بارامترات $a = 1, b = 0.5, a_m = b_m = 2$ وذلك من أجل إشارة دخل مربعة بمطال $= 1$ ورجح تكيفي $\gamma = 1$

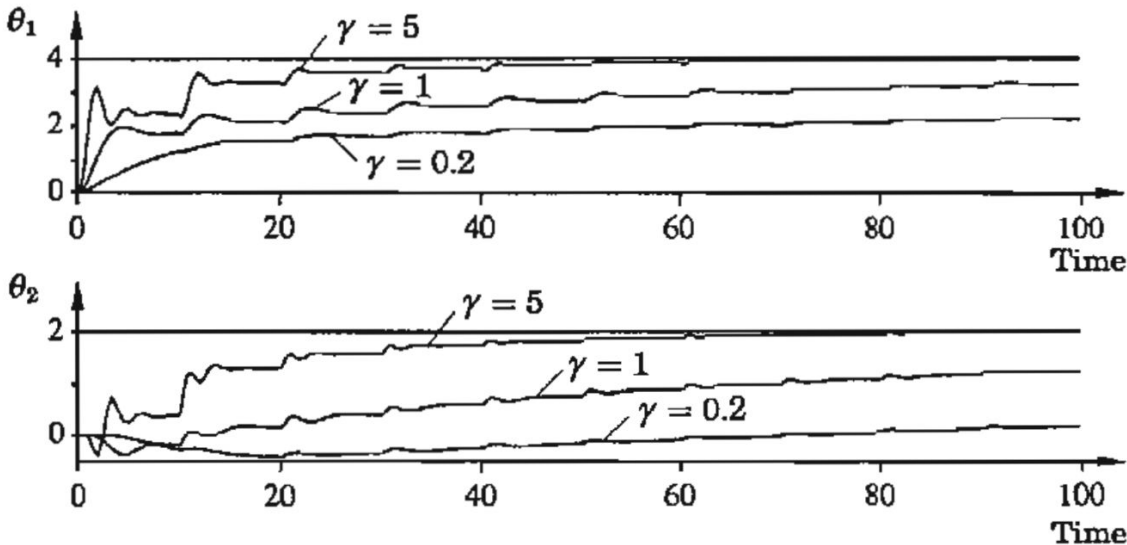


طريقة MIT Rule

مثال - نظام تحكم حلقة مغلقة

القيم الحقيقية للبارامترات θ_1, θ_2 التي من أجلها تتقارب استجابة النظام إلى الموديل المرجعي هي:

$$\theta_1^* = 4, \theta_2^* = 2$$



يوضح الشكل تقارب قيم البارامترات من القيم الحقيقية من أجل أرباح تكيفية مختلفة $\gamma = 0.2, 1, 5$

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