Automatique

Correcteurs standards et leurs réglages

Hugues Garnier hugues.garnier@univ-lorraine.fr

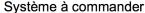
Version du 8 décembre 2024

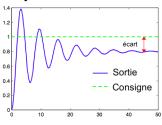
Automatique

Plan du cours

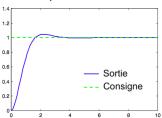
- Chapitre 1 Introduction à l'Automatique et modélisation des systèmes
- Chapitre 2 Analyse des systèmes
- Chapitre 3 Stabilité des systèmes
- Chapitre 4 Systèmes bouclés : stabilité et performances
- Chapitre 5 Correcteurs standards et leurs réglages
 - Correcteurs TOR
 - Correcteurs PID et leurs réglages
 - Effets des actions PID
 - Correcteurs avancés : cascade, par anticipation, hybride,...

Objectifs d'un contrôle





Comportement désiré

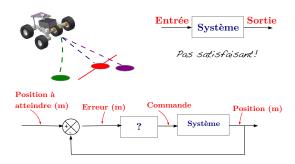


- Réponse mal amortie
- Ecart avec l'entrée en régime établi

- Réponse bien amortie
- Erreur statique nulle

Pour modifier le comportement du système : insertion d'une boucle de rétro-action et d'un correcteur

Objectifs d'un contrôle

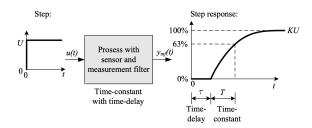


Le correcteur va générer automatiquement le signal de commande à partir du signal d'erreur?

→ Quelle forme choisir pour le correcteur ?

Choix du type de correcteur

Pour les systèmes ayant une réponse indicielle apériodique avec un faible retard



La dynamique du système peut être modélisée par :

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{1 + Ts}$$

avec

- \bullet τ : le retard pur
- T : la constante de temps dominante

Choix du type de correcteur

Pour les systèmes ayant une réponse indicielle apériodique retardée décrit par :

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{1 + Ts}$$

Le type de correcteur peut être choisi en fonction de la valeur de T par rapport à τ à l'aide du tableau suivant

Constante de temps / retard	Correcteur le mieux adapté
<u>T</u> > 20 τ	TOR
$10 \tau \leq T \leq 20 \tau$	P
$5 \tau \leq T \leq 10 \tau$	PI
$2 \tau \leq T \leq 5 \tau$	PID
<u>T</u> ≤2 τ	Limite des PID Prédicteur de Smith,

Correcteurs TOR

Principe

Un contrôle Tout Ou Rien (TOR) (bang-bang control ou on-off control) ne peut générer que deux états pour l'actionneur : marche-arrêt. Dans un contrôle TOR ou assimilés (TOR à hystérésis, avec zone morte ou non), la valeur de la sortie n'est prise en compte que lors du franchissement de seuils.

Principales caractéristiques

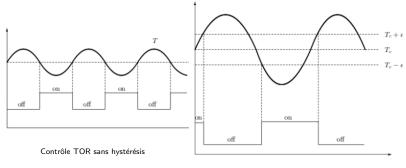
- simple et bon marché
- ne nécessite pas un modèle très précis de la dynamique du système
- malgré sa simplicité, la commande TOR est difficile à analyser à cause de sa non-linéarité

Domaines d'application

- systèmes ayant une grande inertie où la précision de régulation n'est pas cruciale
- applications de la vie quotidienne : système de chauffage, four, système de climatisation, réfrigérateur,...

Correcteurs TOR

Pour éviter de passer très souvent de "On" à "Off", et inversement, dès que l'erreur change de signe et ainsi réduire le nombre de commutations on/off et par là l'usure de l'organe de commande, on introduit souvent une hystérésis de largeur 2 ϵ



Contrôle TOR avec hystérésis

Correcteurs TOR

Rappel: un contrôle est souvent implanté dans un programme

Exemple d'algorithme

```
Le fonctionnement d'un four piloté par une commande TOR (avec hystérésis)
peut être décrit par l'algorithme ci-dessous :
Données: T(t): température du four
Données: Tmin (seuil mini); Tmax (seuil max)
Résultat : Chauffage : valeur binaire (vrai/faux)
début
tant que le four fonctionne
faire
Lire T(t)
si T(t) > Tmax alors
Chauffage = faux
fin
si T(t) < Tmin alors
Chauffage = vrai
fin
fin
fin
```

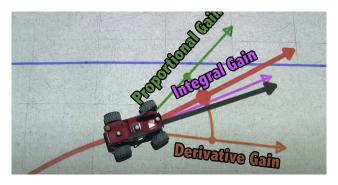


Figure: Suivi de trajectoire d'une voiture autonome : youtu.be/4Y7zG48uHRo

Principe

Un contrôle PID (*PID control*) exploite la mesure continue de la sortie pour ajuster la commande en exploitant l'une ou l'ensemble des trois actions : proportionnelle, intégrale et dérivée.

Principales caractéristiques

- bon marché
- très apprécié, bien qu'assez rudimentaire
- simple à régler
- offre souvent de bonnes performances avec des propriétés de robustesse que beaucoup d'autres correcteurs leur envient

Domaines d'application

- installations industrielles
- aujourd'hui encore, plus de 80% des régulations de pression, de débit, de température, de vitesse, de position, ... sont réalisées à l'aide de correcteurs PID ou assimilés

Exemple d'algorithme

Le fonctionnement d'un four piloté par un correcteur proportionnel peut être décrit par l'algorithme ci-dessous :

Données : Tc : température de consigne du four

Données : T(t) : température du four **Données** : K (gain du correcteur)

Résultat : Chauffage(t) : commande du four

début

tant que le four fonctionne faire

Lire T(t)

 $\mathsf{Chauffage}(\mathsf{t}) {=} \ \mathsf{K} \ (\mathsf{Tc}\text{-}\mathsf{T}(\mathsf{t}))$

fin



Understanding PID Control, Part 1: What is PID control?



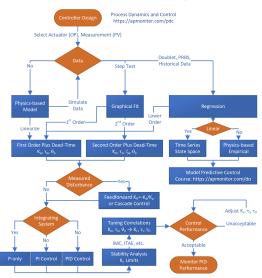
 $\label{line:pure:www.youtube.com/watch?v=wkfEZmsQqiA\&list=PLn8PRpmsu08pQBgjxYFXSsODEF3Jqmm-yatch?v=wkfEZmsQqiA\&list=PLn8PRpmsu08pQBgjxYFXSsODEF3Jqmm-yatch?v=wkfEZmsQqiA&list=PLn8PRpmsu08pQBgjxYFXSsODEF3Jqmm-yatch?v=wkfEZmsQqiA&list=PLn8PRpmsu08pQBgjxYFXSsODEF3Jqmm-yatch?v=wkfEZmsQqiA&list=PLn8PRpmsu08pQBgjxYFXSsODEF3Jqmm-yatch?v=wkfEZmsQqiA&list=PLn8PRpmsu08pQBgjxYFXSsODEF3Jqmm-yatch?v=wkfEZmsQqiA&list=PLn8PRpmsu08pQBgjxYFXSsODEF3Jqmm-yatch?v=wkfEZmsQqiA&list=PLn8PRpmsu08pQBgjxYFXSsODEF3Jqmm-yatch?v=wkfEZmsQqiA&list=PLn8PRpmsu08pQBgjxYFXSsODEF3Jqmm-yatch?v=wkfEZmsQqiA&list=PLn8PRpmsu08pQBgjxYFXSsODEF3Jqmm-yatch?v=wkfEZmsQqiA&list=PLn8PRpmsu08pQBgjxYFXSsODEF3Jqmm-yatch?v=wkfEZmsQqiA&list=PLn8PRpmsu08pQBgjxYFXSsODEF3Jqmm-yatch?v=wkfEZmsQqiA&list=PLn8PRpmsu08pQBgjxYFXSsODEF3Jqmm-yatch?v=wkfEZmsQqiA&list=PLn8PRpmsu08pQBgjxYFXSsODEF3Jqmm-yatch?v=wkfEZmsQqiA&list=PLn8PRpmsu08pQBgjxYFXSsoDEF3Jqmm-yatch?v=wkfEZmsQqiA&list=PLn8PRpmsu08pQBgjxYFXSsoDEF3Jqmm-yatch?v=wkfEZmsQqiA&list=PLn8PRpmsu08pQBgjxYFXSsoDEF3Jqmm-yatch?v=wkfEZmsQqiA&list=PLn8PRpmsu08pQBgjxYFXSsoDEF3Jqmm-yatch?v=wkfEZmsQqiA&list=PLn8PRpmsu08pQBgjxYFXSsoDEF3Jqmm-yatch?v=wkfEZmsQqiA&list=PLn8PRpmsu08pQBgjxYFXSsoDEF3Jqmm-yatch?v=wkfEZmsQqiA&list=PLn8PRpmsu08pQBgjxYFXSsoDEF3Jqmm-yatch?v=wkfEZmsQqiA&list=PLn8PRpmsu08pQBgyxQfyA&list=PLn8PRpmsu08pQBgyxQfyA&list=PLn8PRpmsu08pQBgyxQfyA&list=PLn8PRpmsu08pQBgyxQfyA&list=PLn8PRpmsu08pQBgyxQfyA&list=PLn8PRpmsu08pQBgyxQfyA&list=PLn8PRpmsu08pQBgyxQfyA&list=PLn8PRpmsu08pQBgyxQfyA&list=PLn8PRpmsu08pQBgyxQfyA&list=PLn8PRpmsu08pQBgyxQfyA&list=PLn8PRpmsu08pQBgyxQfyA&list=PLn8PRpmsu08pQBgyxQfyA&list=PLn8PRpmsu08pqAqAdpyA&list=PLn8PRpmsu08pqAqAdpyA&list=PLn8PRpmsu08pqAqAdpyA&list=PLn8PRpmsu08pqAdpyA&list=PLn8PRpmsu08pqAdpyA&list=PLn8PRpmsu08pqAdpyA&list=PLn8PRpmsu08pqAdpyA&list=PLn8PRpmsu08pqAdpyA&list=PLn8PRpmsu08pqAdpyA&list=PLn8PRpmsu08pqAdpyA&list=PLn8PRpmsu08pqAdpyA&list=PLn8PRpmsu08pqAdpyA&list=PLn8PRpmsu08pqAdpyA&list=PLn8PRpmsu08pqAdpyA&list=PLn8PRpmsu08pqAdpyA&list=PLn8PRpmsu08pqAdpyA&list=PLn8PRpmsu08pqAdpyA&list=P$

Le tableau ci-dessous constitue un premier guide au choix du correcteur PID en fonction du modèle du comportement dominant du système.

Modèle du comportement dominant	Type de correcteur PID
$G(s) = \frac{K}{s}$	Р
$G(s) = \frac{K}{1 + Ts}$	PI
$G(s) = \frac{1}{s(1+Ts)}$	P ou PD
$G(s) = \frac{\dot{K}e^{-\tau s}}{1 + Ts}$	PI ou PID $(2 \le \frac{\tau}{\tau} \le 10)$
$G(s) = \frac{K}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)}$	PID

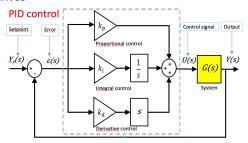
Table: Guide au choix du correcteur PID en fonction du modèle du comportement dominant du système. Ce guide peut être affiné en fonction du niveau de performances attendues.

Un guide au choix plus complet du type de correcteur (de John Hedengren)



Ils sont caractérisés par 3 actions possibles :

- Action Proportionnelle
- Action Intégrale
- Action Dérivée



Voir transparents sur Effects of PID terms

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Comment déterminer les 3 paramètres : K_p , T_i et T_d du correcteur PID ?

Il n'existe pas de méthode universelle de réglage !! voir vidéo Brian Douglas

A PID Tuning Guide — Understanding PID Control, Part 4

www.youtube.com/watch?v=sF0EsA0Irjs&list=PLn8PRpmsu08pQBgjxYFXSs0DEF3Jqmm-y&index=5

On peut exploiter l'une des méthodes suivantes :

- Méthode de réglage (totalement) empirique
- Méthodes de réglage semi-empirique (à base de modèle)
- Méthode du modèle de référence (à base de modèle)
- Méthode par minimisation d'un critère (à base de modèle)
- ...

1. Méthode empirique

Principe : procédure par essais/erreurs pour déterminer les 3 paramètres : K_p , T_i et T_d du correcteur suivant :

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Avantage : pas besoin de modèle du système

Inconvénient : long et fastidieux, essais sur site nécessaires

Procédure itérative d'après l'observation de la réponse indicielle du système bouclé

Action proportionnelle

Fixer $T_d = 0$ et $T_i = \infty$.

Appliquer un échelon sur la consigne.

Choisir K_p faible puis l'augmenter progressivement tant que les oscillations et dépassements restent tolérables.

2 Action dérivée

Augmenter T_d jusqu'à ce que la réponse soit suffisamment amortie. Réajuster K_P si nécessaire.

Action intégrale

Diminuer T_i jusqu'à ce que la sortie rattrape la consigne de façon suffisamment rapide.

Si la réponse oscille de trop, diminuer K_p ou augmenter T_d .

2. Méthode de Ziegler-Nichols (si objectif du contrôle : régulation)

 Identifier un modèle du 1er ordre retardé à partir de la réponse indicielle en boucle ouverte

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{1 + Ts}$$

Exploiter le tableau proposé par Ziegler-Nichols pour le réglage des actions d'un correcteur PID de forme idéale

$$C(s) = \mathcal{K}_p \left(1 + rac{1}{T_i s} + rac{T_d s}{1 + rac{T_d}{M} s}
ight) \quad M ext{ entier } (3 \geq M \geq 20)$$

Controller type	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{K\tau}$		
PI	$0.9 \frac{T}{K\tau}$	3τ	
PID	$1.2\frac{T}{K\tau}$		0.5τ

- 3. Méthode de Chien-Redwick-Hrones (si objectif : asservissement)
 - Identifier un modèle du 1er ordre retardé à partir de la réponse indicielle en boucle ouverte

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{1 + Ts}$$

Exploiter le tableau proposé par Chien-Redwick-Hrones pour le réglage des actions d'un correcteur PID de forme idéale

$$C(s) = \mathcal{K}_p \left(1 + rac{1}{T_i s} + rac{T_d s}{1 + rac{T_d}{M} s}
ight) \quad M ext{ entier } (3 \geq M \geq 20)$$

Controller type	K_p	T_{i}	T_d
P	$0.3rac{T}{ au}$		
PI	$0.35 \frac{T}{ au}$	1.2T	
PID	$0.6\frac{T}{\tau}$	Т	0.5T

4. Méthode du modèle de référence (à base de modèle)

Principe

Imposer que la fonction de transfert en boucle fermée tende vers une fonction de transfert de référence (ou désirée) $F_{ref}(s)$

- 1 Déterminer un modèle G(s) par identification ou modélisation
- ② Déterminer la fonction de transfert du système en boucle fermée $F_{BF}(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)}$
- **3** Déterminer les paramètres du correcteur pour que $F_{BF}(s) = F_{ref}(s)$:

$$C(s) = \frac{F_{ref}(s)}{G(s)(1 - F_{ref}(s))}$$

Remarques

- Choix trop contraignant de F_{ref}(s) peut conduire à un correcteur non réalisable!
- Dynamique trop rapide de F_{ref}(s) entraîne des commandes de trop grandes amplitudes, dommageables pour le matériel

- 4. Méthode du modèle de référence (ou de placement des pôles)
- a) Comportement désiré du système bouclé = modèle du 1er ordre

Fonction de transfert du processus :

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

Fonction de transfert désirée en boucle fermée :

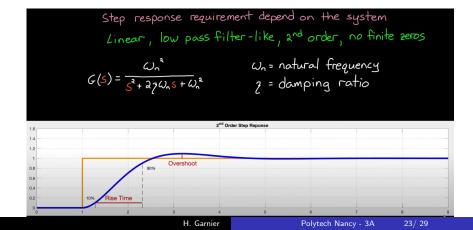
$$F_{ref}(s) = \frac{1}{1 + T_{ref}s}$$

Correcteur:

$$C(s) = \frac{F_{ref}(s)}{G(s)(1 - F_{ref}(s))} = \frac{T}{KT_{ref}} \frac{1 + Ts}{Ts}$$

 \Rightarrow Correcteur PI de fonction de transfert $K_p \frac{1+T_i s}{T_i s}$ avec $K_p = \frac{T}{KT_{ref}}$ et $T_i = T$

- 4. Méthode du modèle de référence (ou de placement des pôles)
- b) Comportement désiré du système bouclé = modèle du 2e ordre Cahier des charges : la réponse indicielle du système bouclé doit satisfaire à des contraintes exprimées dans le domaine temporel.



- 4. Méthode du modèle de référence (ou de placement des pôles)
- b) Comportement désiré du système bouclé = modèle du 2e ordre

Exemple de spécifications : erreur statique nulle, un premier dépassement $D_1=0.1$ et un temps de réponse à 5% $t_r^{5\%}=5$ s

• Fonction de transfert désirée en boucle fermée (2e ordre standard) :

$$F_{ref}(s) = rac{1}{rac{s^2}{\omega_0^2} + rac{2z}{\omega_0}s + 1}$$

• Gain statique = $1 \Rightarrow$ erreur statique = 0

• Dépassement souhaité :
$$D_1 = e^{\frac{-\pi z}{\sqrt{1-z^2}}} \Rightarrow z = \sqrt{\frac{(\ln(D_1))^2}{\pi^2 + (\ln(D_1))^2}}$$

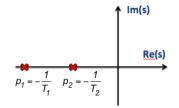
- Caractéristique souhaitée. Exemple : $t_r^{5\%} \approx \frac{3}{\omega_0 z} \Rightarrow \omega_0 = \frac{3}{t_r^{5\%} z}$ \rightarrow Correcteur calculé pour obtenir z et ω_0
- Remarque. Imposer les valeurs de z et ω_0 , revient à placer/imposer les pôles de la fonction de transfert en boucle fermée.

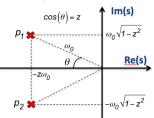
Diagramme des pôles d'un système du 2e ordre - Rappels

Imposer les valeurs de z et ω_0 , revient à placer/imposer les pôles de la fonction de transfert en boucle fermée \(\Rightarrow\) méthode de placement de pôles

$$G(s) = \frac{K\omega_0^2}{s^2 + 2z\omega_0 s + \omega_0^2} = \frac{K}{\frac{s^2}{\omega_0^2} + \frac{2z}{\omega_0} s + 1}$$

si $z \ge 1$, $p_{1,2} = -z\omega_0 \pm \omega_0 \sqrt{1-z^2}$ si z < 1, $p_{1,2} = -z\omega_0 \pm j\omega_0 \sqrt{1-z^2}$





- Si les pôles se déplacent verticalement

$$T_r^{5\%} \approx \frac{3}{\omega_0 z}$$
 reste constant

- Si les pôles se déplacent horizontalement $T_{D_1} = \frac{\pi}{(100\sqrt{1-\sigma^2})^2}$ reste constant

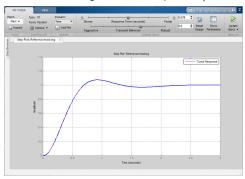
$$\Gamma_{D_1} = \frac{\pi}{\omega_0 \sqrt{1-z^2}}$$
 reste constant

5. Méthode de minimisation d'un critère

 On définit un critère pour donner une mesure objective de l'évolution de l'erreur en réponse à un échelon de consigne. Un exemple de critère est :

$$J(K_p, T_i, T_d) = \int_0^{+\infty} \varepsilon^2(t) dt$$

- Les paramètres K_p , T_i et T_d du correcteur sont ceux qui minimisent le critère choisi (utilisation d'un algorithme d'optimisation)
- Voir, par exemple, l'outil PID Tuner, disponible dans Matlab et Simulink (exploitation lors du TP de régulation de température)



6. Autres méthodes de réglage

- Autres méthodes de réglage empirique et semi-empirique
- Méthodes de réglage par placement de pôles
- Méthodes de réglage dans le domaine fréquentiel
- ...

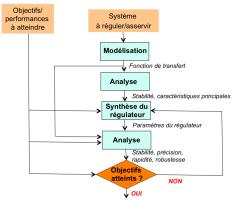
4. Autres méthodes de contrôle/commande - Voir transparents More advanced PID based control

- Commande par anticipation (feedforward control)
- Commande cascade (cascade control)
- Commande hybride (hybrid control)
- Correcteur de Smith (pour les systèmes à retard important)
- Commande prédictive (predictive control)
- Commande par retour d'état (pour les systèmes multivariables et/ou comportant plusieurs pôles instables)
- ...

Rappel des objectifs du cours :

Maîtrise des outils pour modéliser, analyser et contrôler un système dynamique

Etapes de conception d'une commande en boucle fermée



Pour aller plus loin et réviser

Télécharger sur votre tablette ou téléphone portable l'application développée par la société canadienne Quanser: *Experience controls* https://www.quanser.com/products/experience-controls-app/

Parcourez les résumés de cours et testez vos connaissances avec les quiz à la fin de chaque chapitre

