

Le lévrier et le lapin, ou comment fonctionne un pid dans une régulation de position

Le lapin est la consigne qui se déplace suivant la trajectoire demandée horizontale

La fraise qui fait office de lévrier se déplace sur une trajectoire imposée pour essayer d'être le plus proche possible du lapin à croquer.

Le lapin accélère ou décélère pour changer sa vitesse.

Le lévrier utilise ses yeux comme capteur d'information.

Il utilise son cerveau comme régulateur PID, pour adapter la vitesse de sa course.

Quels sont les éléments dont à besoin le lévrier pour se porter et rester le plus prêt possible du lapin, sachant qu'il peut Contrôler la vitesse de ces pattes en y appliquant la force nécessaire (le couple)?

Quand il était petit, le lévrier a été entraîné à simplement courir, avant de se mêler à la tâche autrement plus complexe de courir après un lapin. On va voir comment alors son cerveau a été conditionné pour la course. En voici la démarche et le résultat.

On sait que l'animal doit demander une force motrice à ces pattes pour se maintenir à une vitesse donnée à cause de frottements divers (fendre l'air). Quand il accélère pour augmenter, sa vitesse il doit effectuer un effort supplémentaire pour vaincre son inertie. Ces 2 efforts se font dans la direction du déplacement. Lors d'une décélération, il doit également fournir un effort pour atteindre une vitesse plus basse, cet effort est dans le sens opposé aux efforts précédents.

Donc quand il reçoit de son maître une consigne de vitesse, son cerveau, traite l'information de la façon suivante:

Sachant que je me déplace à la vitesse $V1$, et que mon maître me demande par exemple de passer le plus rapidement possible à une vitesse $V2$ supérieur à $V1$, j'envoie l'ordre à mes muscles de repasser à un nouvel effort suffisant pour maintenir la nouvelle vitesse $V2$. Si on n'est pas trop regardant sur la vitesse, un traitement simple peut être effectué: il suffit que l'effort demandé soit proportionnel à la différence entre la vitesse demandée et la vitesse réelle. Bien sur, un lévrier conditionné de cette façon n'ira jamais tout à fait à la bonne vitesse, car pour une vitesse donnée, ou un effort est à produire, il restera une erreur car cet effort est précisément proportionnel à l'erreur entre les vitesses. Par contre à l'arrêt, si il n'y a pas d'effort, (c'est-à-dire pas de vent pour mon lévrier) l'erreur est nulle, donc le lévrier stoppera si on lui demande une consigne nulle. S'il y a du vent, c'est une autre histoire, qui sera résolue par un entraînement supplémentaire, donc à voir après...

Première digression de l'histoire pour les amateurs de CNC qui aiment travailler avec des servos.

Pour faire une régulation de position on a intérêt tout d'abord, comme pour notre lévrier, à passer par un régulateur /limiteur de couple et un régulateur de vitesse qui assure une proportionnalité entre la consigne vitesse qui sera demandée par le régulateur de position et la vitesse développée effectivement par le moteur.

Si on pilote directement un moteur courant continu par une source de tension variable, la vitesse du moteur, en gros est proportionnelle à cette tension. Il suffirait donc de disposer d'un circuit avec une source de puissance dont la tension serait proportionnelle à la consigne de vitesse. Malheureusement cela serait trop simple pour 2 raisons:

- Il faut une tension minimum pour décoller le moteur. C'est un effet d'hystérésis catastrophique pour une régulation de position. Pour les mécaniciens, cela revient par exemple à essayer de déplacer précisément un objet dans un système à frottement sec important.

-Si on demande un changement de consigne rapide, le moteur courant continu à une demande de courant important (et un couple important) non directement maîtrisable. C'est donc mauvais pour l'électronique ainsi que pour la mécanique. On préfère donc maîtriser la chose sous forme de 2 boucles de régulation : une régulation de couple pilotée par un régulateur de vitesse.

La régulation de couple est une régulation proportionnelle qui peut être approximative. On utilise le fait que le couple développé par un moteur courant continu est proportionnel au courant qui traverse son induit. On fait donc une régulation de courant pour faire une régulation de couple. En pratique on combine cette régulation avec l'alimentation à découpage ; C'est pourquoi on trouve souvent dans ces alimentations au moins une résistance qui mesure le courant dans le moteur, pour comparer le courant mesuré via la chute de tension), avec une tension représentant le courant de consigne demandé (le couple demandé). L'électronique est alors conçue pour régler le courant suivant une méthode dite à découpage. En limitant la consigne courante, on limite le courant maximum dans le moteur. En bref, le couple est proportionnel à la consigne courante, et le couple maximum disponible est proportionnel à la limite appliquée à cette même consigne. C'est un paramètre généralement réglable avec un potentiomètre. (Attention, contrairement aux moteurs pas à pas, le courant dans le moteur varie en fonction du couple demandé).

La consigne courante est elle-même pilotée par le régulateur de vitesse (2eme boucle). Le régulateur de vitesse compare la vitesse demandée, avec la vitesse réelle du moteur. Le résultat de cette comparaison n'est autre que la consigne couple à appliquer au moteur.

La comparaison peut consister simplement à prendre la différence entre la vitesse de consigne et la vitesse réelle, c'est-à-dire l'erreur de vitesse. On multiplie cette erreur par un coefficient pour obtenir la consigne de couple qui est généralement un paramètre réglable. On est alors en face d'un régulateur de vitesse du type P (proportionnel). Naturellement si la vitesse de consigne est inférieure à la vitesse du moteur, l'erreur est négative, et le couple change de sens (freinage)

Malheureusement, il faudra encore une erreur pour avoir un couple (car c'est proportionnel). On se retrouvera alors dans la

situation problématique lorsque le moteur à l'arrêt doit développer un couple. (Cas habituel CNC pour garder la position). Pour limiter cette erreur, on augmentera le coefficient proportionnel (c'est le potentiomètre de régulation P). Mais on est limité dans cette augmentation pour des raisons de stabilité qui ne sont pas développées ici). C'est ici que va être bien venu l'élément intégrateur I d'un régulateur PI.

Comment fonctionne l'élément intégrateur dans un régulateur PI ?

Prenons notre régulateur de vitesse qui fournit une consigne au régulateur de couple.

Avec l'élément P seul on a en sortie du régulateur de vitesse une consigne couple proportionnel à l'erreur entre la vitesse de consigne et la vitesse réelle.

Avec un élément I seul (intégral), on aurait une consigne «couple» proportionnelle à l'intégrale dans le temps de l'erreur de vitesse. ...Mais encore faut-il savoir ce que cela veut dire. L'intégrale dans le temps d'une valeur, est cette valeur multipliée par le temps. Dans notre exemple cette valeur est une vitesse (la différence entre 2 vitesses est une vitesse). Donc l'intégrale dans le temps est vitesse fois le temps = une distance. Comme on part d'une erreur de vitesse, on parlera d'une erreur de distance c'est-à-dire de position.

Notre régulateur PI fournira donc une consigne proportionnelle à l'erreur de vitesse auquel s'ajoute une erreur proportionnelle à une position. On peut comprendre cela simplement en voyant comment se comporte le régulateur PI de vitesse lorsque le moteur est à l'arrêt (c'était là qu'il y avait un problème). A l'arrêt, la consigne de vitesse est égale à 0. 2 cas se présentent:

- il n'y a pas de couple qui tend à faire tourner le moteur, on se retrouve dans la situation du régulateur P décrite précédemment.

-Supposons qu'un couple tend à faire tourner le moteur. La partie I du régulateur va réagir. En effet le moteur va se déplacer, c'est-à-dire subir une vitesse pendant un certain temps. L'élément I en quelque sorte calcul la distance de ce déplacement (l'intégrale de la vitesse mesurée est une distance). La sortie du régulateur de vitesse va donc recevoir une valeur proportionnelle à ce déplacement. Hors cette sortie est la consigne «couple» du moteur, on aura donc une demande de couple au moteur. Ce couple s'opposera au couple qui avait pour tendance de faire tourner le moteur. Après une certaine rotation l'équilibre sera atteint et le moteur s'arrêtera. En bref le moteur sera bien arrêté lorsque la consigne vitesse est égale à 0, Seul un petit déplacement à lieu pendant les variations de couple de la charge (réglable à l'aide du potentiomètre «intégral»).

On a maintenant un lévrier bien adapté à la course développant les efforts nécessaires pour obtenir une vitesse demandée (vitesse qui peut être nulle même s'il y a du vent). Faut-il maintenant lui apprendre à suivre le lapin.

Via son organe de vision il peut connaître la distance instantanée qui le sépare du lapin pour essayer que cette distance tende vers 0.

Premier réglage : ajuster la vitesse de façon à ce qu'elle soit proportionnelle à la distance séparant le lapin du lévrier.

Un simple régulateur P suffit. A l'entrée du régulateur on dispose de la distance séparant le lapin du lévrier, à la sortie on a une consigne de pilotage du régulateur de vitesse de ce même animal. Si l'animal à un régulateur de vitesse bien réglé (à consigne nulle, vitesse nulle quel que soit le vent) quand le lapin s'arrêtera, le lévrier s'arrêtera exactement prêt du lapin. En effet pour avoir la vitesse nulle il faut que l'erreur de position soit nulle, puisque c'est proportionnel.

Malheureusement, cela va moins bien pendant le parcours, car on aura une erreur de position proportionnelle à la vitesse du lapin. On appelle cela une erreur de traînage.

Bien sûr on peut diminuer cette erreur en augmentant fortement le coefficient de proportionnalité, de sorte qu'une erreur faible suffit pour obtenir la vitesse désirée. Mais alors, si on ne prend pas de précaution, on risque de se retrouver avec un lévrier mécontent, entraîné par son inertie, freinent avec son effort maximum, pour ne pas dépasser un lapin arrêtant brusquement. Bref pour éviter cela on a intérêt à entraîner notre lévrier à contrôler la différence de vitesse entre le lapin et lui pour mieux contrôler sa propre vitesse.

Prenons l'exemple simple ou le lapin est à l'arrêt. Je lâche mon lévrier pour qu'il atteigne au plus vite le lapin.

S'il est conditionné avec un régulateur proportionnel, il va courir en 2 phases. Dans une première phase l'erreur entre le lapin et le lévrier étant grande, la vitesse demandée sera au maximum, elle ne sera pas atteinte car limitée par la vitesse que peut fournir l'animal. Dans la 2eme phase, la distance qui reste à parcourir est tel, que la vitesse décroît proportionnellement à la distance qui reste à parcourir. Si j'ai un facteur de proportionnalité du régulateur faible, cette phase débutera tôt et risque de durer longtemps. Par contre si j'ai un facteur grand, sur les derniers mètres, la diminution de vitesse demandée sera tel que l'effort de freinage demandé par le régulateur de vitesse au régulateur d'effort atteint sa limite. L'animal penaud aura dépassé le lapin et devra entamer une marche arrière.

Bref pour éviter cela on a intérêt à entraîner notre lévrier à contrôler la différence de vitesse entre son lapin et lui pour mieux contrôler sa propre vitesse. On aura alors affaire à un lévrier équipé PD.

Comment entraîner l'animal ?

En plus de mesurer la distance entre le lapin et lui, on lui demande de mesurer la vitesse relative entre eux deux, (cela s'appelle une dérivation : = variation de distance = vitesse) et de tenir compte de cette vitesse pour contrôler son effort.

Supposons que le lapin est de nouveau arrêté, et que le lévrier équipé PD le rejoint avec un coefficient P élevé. Si on n'a que le coefficient P en service on sait que l'on a un dépassement du lapin, car le freinage est trop tardif. C'est la partie D qui va

prendre sur les derniers mètres les choses en main. En effet pendant que le lévrier se rapproche du lapin, sa distance diminue, c'est-à-dire varie à une vitesse donnée négative (par exemple si le lévrier se rapproche de 2 m/sec, la vitesse entre le lapin et le lévrier est de -2 m/sec). Une valeur constante négative est repérée par l'élément D du régulateur. Cette valeur vient donc se soustraire au coefficient P pour constituer la consigne vitesse que le lévrier devrait prendre. Celle-ci diminue progressivement pendant la phase d'approche (l'erreur de position diminue). À un moment donné (suivant le réglage de P et de D) les valeurs s'annulent. Donc une diminution de vitesse est demandée avant que le lévrier ne soit attrapé. La vitesse réelle dépassant cette nouvelle consigne, entraîne un changement de sens dans le régulateur d'effort avec comme conséquence un freinage anticipé. Par ce biais, si les 2 coefficients sont bien réglés, on augmente les performances (diminution du traînage et arrêt plus rapide sans dépassement).

A noter que cela marche pour toutes variations de vitesses du lapin.

Par exemple quand le lapin démarre, la variation de vitesse est alors positive, l'élément D ajoute alors son effet à l'élément proportionnel, ce qui fait une demande d'augmentation instantanée de la vitesse du lévrier.

Retournons maintenant à nos servos.

Donc on est équipé d'un régulateur/limiteur de couple/courant, piloté par un régulateur de vitesse du type PI

On mesure l'erreur de position entre la position instantanée désirée et la position réelle. L'erreur multipliée par un coefficient P. (sortie du régulateur de position) constitue la consigne vitesse du régulateur de vitesse.

Pour augmenter les performances en augmentant le coefficient de P au maximum, on doit ajouter un réglage du type D afin d'anticiper les variations de vitesses entre les positions. En jouant sur ces 2 paramètres on peut atteindre le meilleur des performances. Sachons qu'en augmentant P on diminue le traînage et on augmente les risques d'instabilités. Par contre D permet par anticipation de regagner de la stabilité en anticipent les réactions du moteur aux démarrages et aux arrêts (c'est-à-dire pendant les variations de vitesses).