

Initiation à la pratique de l'électronique

Les capteurs de position (3)

(SUITE – PREMIERE PARTIE VOIR LE HAUT-PARLEUR N°1832 PAGE 88 – DEUXIEME PARTIE N°1834 PAGE 96)

Pour en finir avec le « resolver » dispositif évoqué le mois dernier, nous allons en découvrir les ultimes applications. Mais la capture de position angulaire fait désormais souvent appel aux procédés optiques, plus ou moins sophistiqués, dont un particulièrement abouti et connu des lecteurs sous forme finie : le codeur incrémental/décémental.

Transformation de coordonnées

Le resolver n'est pas au bout de ses possibilités. Il va nous permettre de transformer des coordonnées « polaires » en coordonnées « cartésiennes ». Rappelons brièvement leurs définitions respectives.

Si l'on considère (fig. 17) un ensemble de deux axes de coordonnées, perpendiculaires entre eux, Ox et Oy , on peut définir la position d'un point M dans le plan xOy de deux façons :

1° On appelle « abscisse » du point, la mesure algébrique de OH sur l'axe orienté Ox et « ordonnée » de ce point, la mesure algébrique de OK sur l'axe orienté Oy .

Les points H et K sont respectivement les projections orthogonales de M sur les axes Ox et Oy . Cet ensemble des deux valeurs constitue ce que l'on nomme les « coordonnées cartésiennes » de M ;

2° On appelle « rayon vecteur » de M la longueur $OM = r$ et « angle polaire » de M l'angle a de la direction OM avec la direction Ox . L'ensemble de a et r constitue ce que l'on nomme les « coordonnées polaires » d'un point.

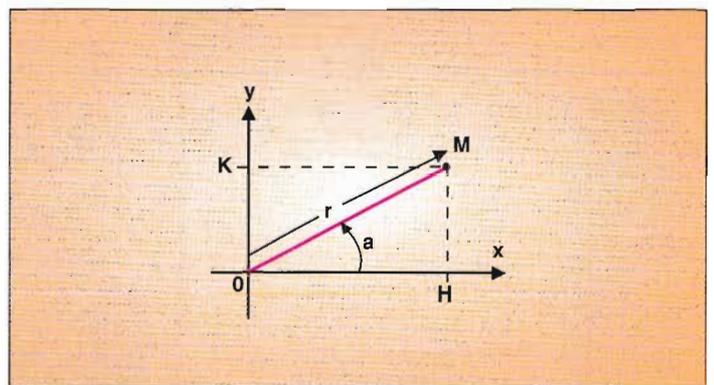


Fig. 17. – Pour repérer la position du point M , on peut le faire par son abscisse x et son ordonnée y (coordonnées cartésiennes), ou par la distance $OM = r$ et la direction angulaire, a , de OM (coordonnées polaires).

Pour passer « mathématiquement » des coordonnées polaires aux cartésiennes, il suffit de remarquer que :

$$x = r \cos(a)$$

et :

$$y = r \sin(a)$$

Pour le passage inverse, nous avons :

$$r^2 = x^2 + y^2$$

et :

$$a = \text{Arctg}(y/x)$$

Maintenant, comment pouvons-nous utiliser un resolver pour faire la conversion des coordonnées polaires en coordonnées cartésiennes ? Par exemple, si nous utilisons un radar pour repérer un objet à faible altitude, nous aurons sa direction a dans le plan (prise par rapport au nord, par exemple) et sa distance r .

Imaginons que nous appliquions au rotor d'un resolver une tension alternative dont l'amplitude soit proportionnelle à la distance r et que nous orientions l'axe du rotor suivant l'angle a : les tensions induites dans les enroulements S et C seront respectivement proportionnelles aux valeurs x et y des coordonnées cartésiennes (il faudra, pour les utiliser, les appliquer à un système de démodulation cohérente, car les coordonnées sont des valeurs algébriques).

Signalons aussi, sans insister trop, que le resolver peut également servir de moteur déphasé. Il suffit d'appliquer aux enroulements S et C deux tensions alternatives déphasées de 90° (comme nous l'avons fait

sur le montage de la figure 16) et d'alimenter le rotor par un courant continu, et voici notre resolver transformé en moteur. En « anticipant » un peu (comme disent les auteurs de romans-feuilletons), nous pouvons dire, pour terminer, que nous retrouverons le resolver comme capteur de vitesse de rotation et également comme capteur d'accélération angulaire. Bref, c'est une machine qui peut servir à bien des choses.

Cas d'une rotation « monotone »

Quand nous qualifions une rotation de « monotone », nous ne voulons pas dire par là que ladite rotation est « ennyeuse comme la pluie », mais le mot est pris à son sens mathématique : une fonction est dite « monotone » si elle varie toujours dans le même sens. Donc, la rotation dont il est question peut très bien se faire avec une vitesse variable, même avec des arrêts, mais il ne doit jamais y avoir de retours en arrière.

Ce sera le cas, par exemple, de l'antenne d'un radar panoramique, qui explore toute la région située autour de lui par un mouvement tournant de son antenne. La vitesse de rotation de ladite antenne n'est pas forcément constante, mais le sens de rotation ne change jamais.

Nous allons, dans ce cas, utiliser un capteur de position numérique.

Il est extrêmement simple, comme on va le voir. Il se compose (fig. 18) de deux disques optiques et d'un compteur binaire.

Le disque D comporte n fentes (n étant une puissance de 2, par exemple 1 024 ou 2 048), chaque fente pouvant permettre à la lumière d'une lampe L d'atteindre une diode photosensible PHD. Au lieu

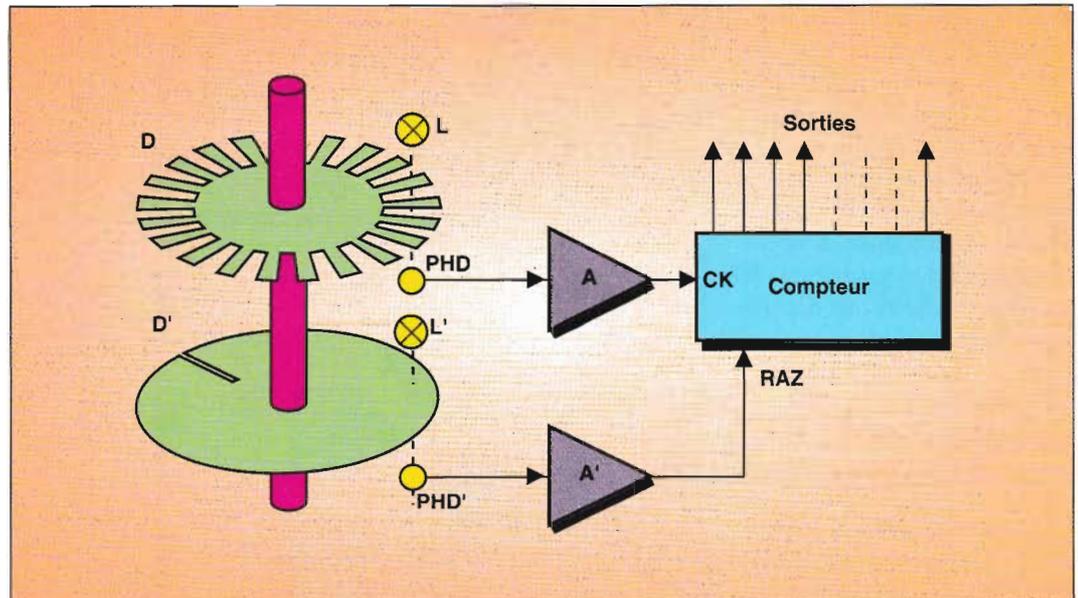


Fig. 18. – Si l'axe qui porte les deux disques tourne toujours dans le même sens (mais en ayant éventuellement des variations de vitesse), un bon moyen pour connaître la position de cet axe est de compter les tops fournis par le disque D, le compteur étant remis à zéro par le disque D'.

de « fentes », le disque peut être réalisé par voie photographique et comporter de fines zones radiales transparentes sur un fond opaque. Quand l'axe portant les disques (c'est l'axe dont on veut connaître la position angulaire) fait un tour, il provoque l'envoi, par l'amplificateur de mise en route, de n tops au compteur binaire.

Le second disque, D', ne comporte qu'une seule fente. Donc, à chaque tour de l'axe, il n'envoie qu'une seule impulsion au sortir de l'amplificateur A'.

Supposons que $n = 1\,024$, le compteur binaire comportant alors dix étapes (soit un compteur pouvant compter de 0 à 1 023 inclus). A chaque tour du disque D, il « recycle », puisque l'impulsion n° 1 024 le remet à zéro.

Comme on ne peut prévoir dans quelle position se trouve l'axe portant les deux disques lors de la mise en route du système, on utilise le top unique donné par le disque D' pour remettre à zéro le compteur binaire.

Dès que l'axe, dans sa rotation, est passé au moins une fois par la position pour laquelle un

top sort de A', la commande de remise à zéro est « redondante ».

En effet, elle se produit au moment où le compteur « recycle » par lui-même et se met au zéro, puisqu'il a reçu 1 024 impulsions depuis la dernière remise au zéro. Cette commande par le disque D' n'agit qu'une fois, au début de la mise en route de l'axe.

Les dix sorties du compteur binaire donnent donc, en code binaire, un nombre, de 0 à 1 023, qui indique la position de l'axe, l'unité étant 1/1024 de tour.

Perfectionnements

On objectera qu'une unité de 1/1024 de tour n'est pas pratique. Qu'à cela ne tienne : il est facile de réaliser un compteur qui, par exemple, compte en binaire normal jusqu'à 3 599 et, recevant l'impulsion n° 3 600, revient au zéro. Avec 3 600 fentes sur le disque D, la valeur donnée par le compteur exprimera alors la position de l'axe en degrés et dixième de degrés.

En effet, il est à noter que, si le degré est une unité fort com-

mode pour noter les angles (beaucoup plus agréable que le grade, qui donne une valeur de 66,666... gr pour un sixième de tour, soit 60°), on apprécie de moins en moins sa subdivision en minutes (ces dernières étant subdivisées en secondes, que nos grands-pères ont connues subdivisées à leur tour en « tierces » !). La preuve en est que les calculatrices actuelles comptent toujours en degrés « décimaux » (la fraction de degré est exprimée dans le système décimal).

La réalisation d'un disque comportant 3 600 fentes peut sembler très ardue. Heureusement, il y a des moyens pour tourner la difficulté : on peut utiliser un train de pignons qui, à partir de l'axe, multiplie la rotation de ce dernier par 36 et commande un disque qui ne comporte que 100 fentes.

La difficulté que l'on rencontre alors tient dans la réalisation du train de pignons : il ne faut pas que l'un d'eux soit excentré ni qu'il ait une denture irrégulière. Mais les mécaniciens sont experts dans la réalisation de trains de pignons capables de répondre aux cahiers des charges les plus exigeants.

Evidemment, le système indiqué sur la figure 18 exige une rotation absolument monotone : si l'axe avait un petit « retour en arrière » retranchant ainsi quelques degrés à sa position précédente, les impulsions précédentes seraient ajoutées dans le compteur et le nombre affiché sur ce dernier serait faux.

Pour une rotation quelconque

Le système de la figure 18 peut être perfectionné pour s'adapter au cas d'une rotation qui n'est plus monotone, autrement dit, dans le cas d'un axe qui peut repartir en arrière. Nous utiliserons alors, à la place du compteur binaire ordinaire, un compteur « réversible ».

On désigne sous ce nom un compteur qui a, par exemple, deux entrées, classiquement désignées (que M. Toubon nous pardonne) par CKUP (*Clock Up* = horloge d'incrémentement, et CKDWN (*Clock Down* = horloge de décrémentation). Chaque impulsion appliquée à l'entrée CKUP fait augmenter d'une unité le nombre affiché sur le compteur.

A l'opposé, quand on envoie des impulsions sur l'entrée CKDWN, le nombre affiché sur les sorties du compteur diminue à chaque fois d'une unité. Il compte dans le genre « Kourou » : « 4, 3, 2... », mais on n'est pas obligé de faire partir une Ariane chaque fois qu'on arrive à zéro !

Il nous faut donc, en plus, disposer d'un système qui puisse déceler dans quel sens le disque tourne. On n'y arrivera pas avec une seule diode photosensible : quel que soit le sens de rotation, elle donnera toujours des signaux rectangulaires.

Nous allons donc, comme le montre la figure 19, utiliser

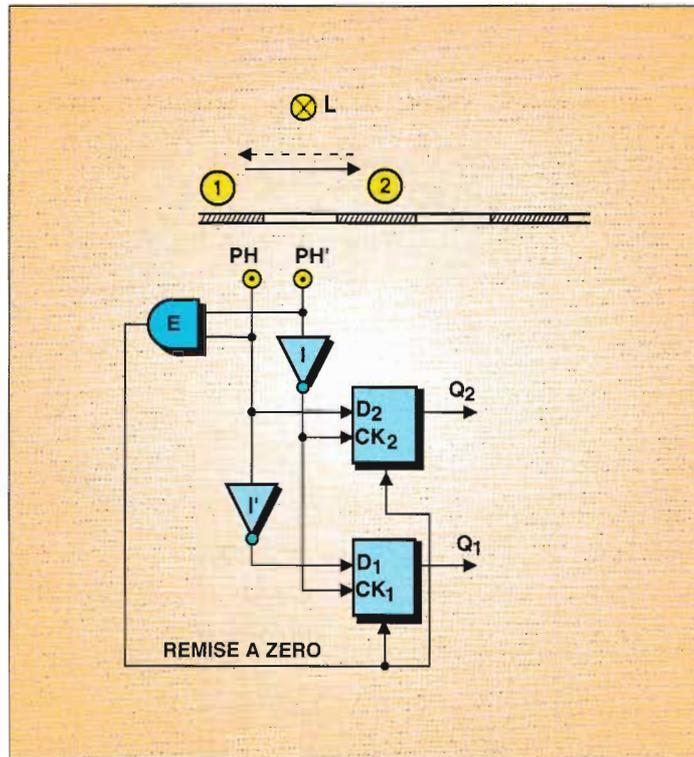


Fig. 19. - Avec deux diodes photosensibles, il est possible, par une circuiterie logique très simple, utilisant deux basculeurs D, deux inverseurs et un circuit « et », de disposer de deux voies différentes sur lesquelles on envoie des tops, Q_1 si le disque tourne dans le sens de la flèche en trait plein, Q_2 pour la rotation en sens opposé.

deux diodes photosensibles. On les place de telle manière que la lumière de la lampe L puisse les éclairer toutes les deux par une même fente du disque, l'une sur le bord de la zone éclairée, l'autre au milieu de cette zone.

Supposons que le disque se déplace de gauche à droite (dans le sens de la flèche en trait plein). La diode PH sera occultée la première par la zone sombre (1) du disque, puis cette zone sombre occultera PH'. Le masquage de PH', se traduisant, à la sortie de cette photodiode (ou, plus exactement, de l'amplificateur de mise en forme du signal de PH', non représenté ici), par un flanc descendant, aura lieu, avec le sens de déplacement considéré, alors que la sortie de PH est au niveau bas.

A l'opposé, si le déplacement du disque a lieu dans le sens indiqué par la flèche en pointillé, la zone (2) du disque viendra occulter PH' alors que PH est éclairée.

Une circuiterie logique très simple

Les flancs descendants de PH' sont transformés en flancs montants par l'inverseur I et appliqués aux entrées « horloges » (CK) de deux basculeurs de type D. On sait que, dans ces basculeurs, un flanc montant sur l'entrée CK fait passer la sortie Q dans l'état où se trouve, au moment du flanc, l'entrée de commande D (à moins, évidemment, que la sortie D ne soit déjà dans cet état).

Donc, les flancs montants sortant de l'inverseur I commanderont la montée de Q_1 pour un déplacement du disque dans le sens de la flèche en trait plein, puisqu'alors la sortie de l'inverseur I sera haute (PH non éclairée) lors de l'occultation de PH'.

A l'opposé, lorsque le disque tournera dans le sens indiqué par la flèche pointillée, le flanc

montant sortant de I commandera la montée de Q_2 , puisque, à ce moment, PH étant éclairée, l'entrée D₂ sera haute.

Il reste donc à faire redescendre les sorties Q_1 et Q_2 . Il suffit pour cela d'appliquer aux commandes CLR (remise à zéro) des deux basculeurs D la sortie du circuit « ET » E, qui est haute quand les deux diodes sont éclairées en même temps.

Nous aurons donc une série de tops sur Q_1 , un par passage de fente du disque, lorsque le disque tournera dans le sens indiqué par la flèche en trait plein (et il n'y aura rien sur Q_2).

Si le disque tourne dans l'autre sens, nous obtiendrons une série de tops sur Q_2 et rien sur Q_1 . Les sorties Q_1 et Q_2 seront donc reliées aux entrées CKUP et CKDWN du compteur réversible qui doit nous indiquer la position de l'axe. Là aussi, il faudra, si le disque part dans n'importe quelle position, disposer, comme dans le cas de la figure 18, d'un disque à fente unique, remettant le compteur à zéro pour une position donnée (position « zéro ») de l'axe.

Le codage de position

Les capteurs que nous avons décrits plus haut, nécessitant un système de remise au zéro pour le compteur sur lequel s'affiche la position, ont l'immense avantage d'être relativement simples et de ne pas nécessiter de réalisations coûteuses. Mais la nécessité de passer par une position repère peut être une contrainte prohibitive.

C'est ce qui a conduit les réalisateurs de capteurs à créer les « encodeurs numériques de position », instruments remarquables, mais généralement d'un prix extrêmement élevé. L'idée est la suivante : on place

sur un disque des « pistes » concentriques, chacune divisée en secteurs opaques et en secteurs transparents. Pour chaque piste, une lampe et une diode photosensible permettent de savoir si l'endroit de la piste où arrive le rayon lumineux est transparent ou opaque.

Une réalisation possible est indiquée par le groupe de pistes de la figure 20, sur laquelle nous nous sommes limités à quatre pistes, pour ne pas surcharger le tracé.

On voit que la première piste, P₁, la plus près de l'axe, comporte deux secteurs, un opaque et un transparent, chacun correspondant à 180°. La piste P₂ comporte quatre secteurs, deux opaques et deux transparents, correspondant chacun à 90°. Pour la piste P₃, on arrive à huit secteurs et à seize pour P₄.

Si la ligne le long de laquelle sont disposés les ensembles de lampes et diodes photosensibles est celle qui est représentée en pointillés sur la figure, aucune diode ne reçoit de lumière. Si l'on tourne le disque d'un seizième de tour dans le sens horaire (sens de la flèche), seule la piste P₄ laissera passer de la lumière vers la diode photosensible correspondante.

On désigne les niveaux des signaux produits par les diodes par 0 (diode non éclairée) et 1 (diode éclairée). En donnant, de droite à gauche, les quatre chiffres binaires qui correspondent aux états d'éclairage des quatre diodes, on obtient un nombre binaire à quatre chiffres, allant de 0000 à 1111 (zéro à quinze). Ce nombre indique la position du disque.

Bien entendu, avec quatre pistes seulement, on ne pourrait préciser la position du disque qu'à un seizième de tour près.

Donc, on utilisera plus de pistes, pour augmenter la pré-

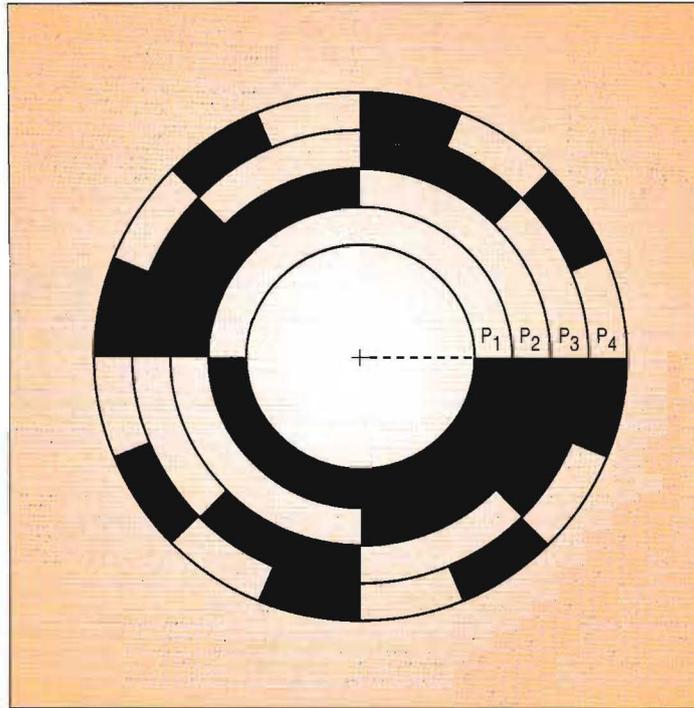


Fig. 20. - Dans l'encodeur de position, un disque lié à l'axe porte une série de « pistes » concentriques, comportant respectivement 1, 2, 4, 8... secteurs opaques et autant de secteurs transparents. Des lampes et des diodes photosensibles permettent ainsi d'exprimer, sous forme codée binaire, le « numéro » de la position du disque.

cision du repérage. Avec huit pistes, il y a 256 positions possibles, donc une définition de la position avec une incertitude de l'ordre de 1,4°. Avec dix pistes, soit 1 024 positions, on repère la position du disque avec une incertitude proche du tiers de degré.

Cela semble très simple mais...

Avec un capteur aussi simple, on peut se dire que le tout va être la solution idéale. Mais, si l'on y regarde de près, on voit que les ennuis commencent. D'abord, évidemment, la zone éclairée par chaque lampe sur la piste correspondante doit être d'autant plus petite (et placée avec précision) que le nombre de pistes est élevé. Pour obtenir de bons résultats, on utilise souvent, comme sources de lumière, des diodes laser, qui permettent de concentrer leur faisceau en une image minuscule sur chaque piste.

Plutôt qu'un point unique, on préfère, en utilisant une lentille cylindrique, obtenir sur chaque piste un trait lumineux, extrêmement fin, dirigé radialement.

Ensuite, nous rencontrons le problème des « franchissements simultanés ». Supposons un codeur à dix pistes et examinons-le au moment où il passe de la position 127 à la position 128. En binaire à dix chiffres, 127 est :

[127] : 0001111111

et 128 est :

[128] : 0010000000

Donc, quand le codeur passe de la position 127 à la position 128, les pistes de P₄ à P₁₀ inclus doivent occulter ensemble les faisceaux lumineux qui les traversent, alors que la piste P₃ doit devenir transparente. Nous supposons, en effet, que nous avons nommé P₁ la piste qui comporte 180° de secteur opaque et 180° de secteur transparent, en allant jusqu'à P₁₀, qui comporte 512 secteurs opaques et 512 secteurs transparents.

La précision absolue n'est pas de ce monde...

Or, si bien calés que soient les ensembles de lampes et diodes photosensibles, il y aura toujours une petite erreur quelque part. Supposons qu'un minuscule décalage de la lampe qui éclaire la piste P₃ fasse qu'elle arrive dans la zone transparente alors que les pistes de P₄ à P₁₀ y sont encore. Le nombre envoyé par les diodes sera alors :

0011111111, soit [257]

Bien entendu, en faisant encore tourner un tout petit peu le disque, le nombre envoyé par les diodes redeviendra 128, mais, au lieu de passer de 127 à 128, il sera passé de 127 à 257, puis à 128. Nous aurons eu une fausse lecture, entachée d'une erreur considérable.

Autrement dit, chaque fois que l'on passera d'une position n à une position n + 1, n étant une puissance de 2, comme nous devrions avoir, alors, des franchissements simultanés sur différentes pistes, il pourra se produire des erreurs, puisque certains franchissements seront forcément un peu en avance (ou en retard) sur les autres.

Est-ce sans espoir ? Bien sûr que non. La solution, extrêmement ingénieuse, tient dans l'utilisation d'un code qui, n'employant que des 0 et des 1, n'est pas le code binaire classique, mais le code dit « reflex » (ou code Gray).

Ce code offre trois avantages essentiels :

- quel que soit le nombre n, quand on passe de la position n à la position n + 1, il y a un chiffre qui change (passant de 0 à 1 ou de 1 à 0) et un seul ;
- le passage du code binaire au code reflex est très simple ;
- le passage du code reflex au code binaire est non moins simple.

(à suivre)

J.P. Ehmichen