

Chapitre 4

Timers Et Compteurs (2 semaines)

4.1 Introduction aux modules de temporisation

Les timers et compteurs constituent des périphériques matériels fondamentaux au sein d'un microcontrôleur, jouant un rôle central dans la gestion du temps et la mesure d'événements externes. Contrairement aux boucles d'attente logicielle qui consomment inutilement des cycles processeur et manquent de précision, les timers fonctionnent de manière autonome en arrière-plan, permettant au processeur de vaquer à d'autres tâches tout en maintenant une exactitude temporelle liée à la fréquence de l'horloge système. Ce chapitre explore en profondeur ces modules, en distinguant d'abord les concepts fondamentaux de temporisation et de comptage, avant d'aborder leurs modes de fonctionnement avancés. L'objectif est de maîtriser pleinement ces ressources pour générer des signaux temporels précis, mesurer des grandeurs physiques et piloter efficacement des actionneurs. La compréhension de ces mécanismes est d'autant plus cruciale qu'ils constituent la base sur laquelle reposent de nombreuses fonctionnalités essentielles, telles que les systèmes d'exploitation temps réel, les protocoles de communication ou les boucles de régulation automatique.

4.2 Fondamentaux des timers – comptage simple et mode CTC

4.2.1 Architecture générale d'un timer

Avant d'aborder la programmation concrète des timers, il est indispensable d'en comprendre l'architecture interne. Un timer est essentiellement un registre de comptage (TCNTn – Timer/Counter Register) qui s'incrémente à chaque front d'horloge, que cette horloge provienne de l'horloge système du microcontrôleur (divisée ou non) ou d'une source externe connectée à une broche dédiée. La largeur de ce registre détermine la capacité maximale de comptage : un timer 8 bits compte de 0 à 255 avant de revenir à zéro (débordement ou overflow), tandis qu'un timer 16 bits autorise des comptages jusqu'à 65535, offrant ainsi des plages de temporisation beaucoup plus étendues. Autour de ce registre central gravitent des registres de configuration essentiels : le registre de contrôle (TCCRn – Timer/Counter Control Register) qui définit la source d'horloge et le mode de fonctionnement, et le registre de masque d'interruption (TIMSKn) qui active ou désactive les interruptions associées aux différents événements du timer. La maîtrise de ces registres est la clé pour exploiter pleinement les capacités des modules de temporisation.

4.2.2 Mode comptage simple et gestion du débordement

Le mode de fonctionnement le plus élémentaire est le mode comptage simple, également appelé mode normal. Dans ce mode, le registre de comptage s'incrémente jusqu'à atteindre sa valeur maximale (0xFF pour un timer 8 bits, 0xFFFF pour un timer 16 bits), puis il déborde en revenant à zéro et positionne un drapeau de débordement (TOVn – Timer Overflow Flag). Ce drapeau peut être exploité de deux manières : soit par une attente active en lecture dans une boucle logicielle, soit, de manière beaucoup plus élégante et efficace, par la génération d'une interruption. L'utilisation de l'interruption de débordement permet d'exécuter une routine de service d'interruption (ISR) à chaque cycle de comptage complet, libérant ainsi le processeur pour d'autres tâches entre deux événements. Cette approche est particulièrement adaptée pour réaliser des temporisations longues, par exemple en cumulant plusieurs débordements successifs via un compteur logiciel, ou pour déclencher des actions périodiques comme l'actualisation d'un afficheur ou l'échantillonnage d'un capteur à une fréquence définie.

4.2.3 Mode CTC (Clear Timer on Compare Match) – précision et flexibilité

Si le mode comptage simple offre une grande simplicité, il souffre d'une limitation majeure : la période de temporisation est fixée par la capacité maximale du timer, ce qui ne permet pas d'obtenir des intervalles arbitraires. Le mode CTC (Clear Timer on Compare Match) répond précisément à cette contrainte en introduisant un registre de comparaison (OCRn – Output Compare Register). Dans ce mode, le compteur s'incrémente jusqu'à ce que sa valeur atteigne celle préchargée dans le registre de comparaison. À cet instant, le compteur est automatiquement remis à zéro et un drapeau de comparaison (OCFn – Output Compare Flag) est levé, pouvant également déclencher une interruption. Ainsi, la période de temporisation devient indépendante de la capacité maximale du timer et peut être réglée finement par la valeur écrite dans OCRn. Ce mode offre une flexibilité considérable : il permet de générer des interruptions à des intervalles réguliers parfaitement maîtrisés, allant de quelques microsecondes à plusieurs millisecondes selon le prédiviseur d'horloge utilisé. Les applications sont multiples : réalisation de bases de temps pour un ordonnanceur coopératif, échantillonnage périodique de voies analogiques, ou encore génération de trames de communication à des débits spécifiques. La configuration du mode CTC nécessite une attention particulière au choix du prédiviseur (prescaler) qui divise l'horloge système pour ajuster la plage de temporisation disponible.

4.3 Modes avancés – PWM et capture d'événements

4.3.1 Principe de la modulation de largeur d'impulsion (PWM)

La modulation de largeur d'impulsion, communément désignée par son acronyme PWM (Pulse Width Modulation), est une technique permettant de générer un signal logique périodique dont le rapport cyclique (ratio entre la durée à l'état haut et la période totale) est variable. Ce rapport cyclique, exprimé en pourcentage, permet de contrôler la quantité

moyenne d'énergie délivrée à une charge, ouvrant ainsi la voie à de nombreuses applications telles que la variation de luminosité d'une LED, le contrôle de vitesse d'un moteur à courant continu, ou encore le positionnement d'un servomoteur. L'intérêt d'utiliser les timers matériels pour générer ce type de signal réside dans leur autonomie totale : une fois configuré, le timer produit le signal PWM en continu sans aucune intervention du processeur, ce qui garantit une stabilité temporelle parfaite et libère la charge de calcul pour d'autres traitements.

4.3.2 Modes PWM rapide et phase correcte

Les microcontrôleurs modernes proposent plusieurs modes de génération PWM, chacun présentant des caractéristiques spécifiques adaptées à différents types d'applications. Le mode PWM rapide (Fast PWM) génère un signal où la fréquence est déterminée par la valeur maximale du compteur (soit 0xFF en mode 8 bits, soit une valeur définie par le registre ICRn ou OCRn en mode plus avancé). Dans ce mode, le compteur s'incrémente jusqu'à sa valeur maximale, puis retourne brutalement à zéro, produisant un signal asymétrique. Ce mode offre l'avantage de permettre des fréquences de découpage élevées, ce qui est recherché pour le contrôle de convertisseurs statiques ou d'alimentations à découpage. À l'opposé, le mode PWM à phase correcte (Phase Correct PWM) utilise un compteur qui s'incrémente puis se décréméte en alternance (comptage en peigne), créant un signal symétrique autour du centre de la période. Cette symétrie réduit les transitions brutales et améliore la qualité spectrale du signal, ce qui est particulièrement apprécié pour le contrôle de moteurs où les à-coups doivent être minimisés. La configuration de ces modes implique une manipulation précise des bits de configuration (WGMn – Waveform Generation Mode) dans les registres TCCRn, ainsi que la définition des valeurs de comparaison pour les voies haute et basse lorsque le timer intègre plusieurs canaux de sortie.

4.3.3 Configuration pratique pour le contrôle d'actionneurs

La mise en œuvre concrète de la PWM pour le pilotage d'actionneurs nécessite de combiner la configuration matérielle du timer avec une logique logicielle adaptée. Pour une LED, il suffit de faire varier progressivement le rapport cyclique entre 0% et 100% pour obtenir un effet de fondu (fade) linéaire. Pour un moteur à courant continu, l'utilisation d'un pont en H associé à deux voies PWM complémentaires permet de contrôler à la fois la vitesse et le sens de rotation, en veillant à l'insertion d'un temps mort (dead time) pour éviter les courts-circuits de puissance. Pour un servomoteur de modélisme, le principe est différent : la position angulaire est déterminée par la largeur d'une impulsion (généralement entre 1 ms et 2 ms) répétée toutes les 20 ms, ce qui nécessite une génération précise d'une impulsion unique plutôt qu'un signal PWM continu. La maîtrise des registres de comparaison et la compréhension des modes de fonctionnement permettent d'adapter la configuration à chaque type d'actionneur, avec des critères de choix basés sur la fréquence de découpage souhaitée, la résolution (nombre de niveaux de puissance distincts) et les ressources matérielles disponibles sur le microcontrôleur cible.

4.4.4 Mode capture d'événements – mesurer le monde extérieur

Au-delà de la génération de signaux, les timers intègrent également un mode de capture d'événements (Input Capture) qui constitue un outil puissant pour la mesure de grandeurs physiques externes. Ce mode utilise une broche dédiée (ICPn – Input Capture Pin) sur laquelle un changement d'état (front montant ou descendant) déclenche une opération de capture : la valeur instantanée du compteur est immédiatement transférée dans un registre de capture (ICRn – Input Capture Register) sans intervention logicielle, et une interruption peut être générée pour signaler l'événement. Ce mécanisme permet de mesurer avec une très grande précision des grandeurs temporelles externes, telles que la période d'un signal (en capturant deux fronts successifs de même type), la largeur d'une impulsion (en capturant un front montant puis un front descendant), ou encore la fréquence d'un signal périodique (par calcul à partir de la période mesurée). La précision de ces mesures est directement liée à la fréquence d'horloge du timer : plus celle-ci est élevée, plus la résolution temporelle est fine.

4.4.5 Applications pratiques de la capture d'événements

Les applications de la capture d'événements sont nombreuses et variées dans le domaine des systèmes embarqués. Pour les capteurs de distance à ultrasons (comme le HC-SR04), la mesure de la largeur de l'impulsion d'écho permet de calculer la distance parcourue par l'onde sonore. Pour les codeurs incrémentaux utilisés en robotique pour le suivi de position de moteurs, la capture des fronts sur les deux voies en quadrature permet de déterminer à la fois le sens de rotation et le nombre de pas effectués. En tachymétrie, la mesure de la période d'un signal issu d'un capteur à effet Hall ou d'un capteur optique permet de calculer une vitesse de rotation avec une excellente réactivité. La mise en œuvre de ces mesures nécessite une configuration minutieuse des sensibilités de front, une gestion adéquate des interruptions de capture, et parfois l'utilisation de filtres anti-rebond matériels intégrés pour éliminer les parasites. En combinant ces techniques avec les modes PWM vus précédemment, il devient possible de réaliser des boucles de contrôle fermées où la mesure (via la capture) sert à ajuster en temps réel la commande (via la PWM) – une compétence essentielle pour les applications d'automatique et de robotique qui seront approfondies dans les derniers chapitres de ce cours.

4.5 Synthèse et perspectives

La maîtrise des timers et compteurs constitue une compétence fondamentale pour tout développeur de systèmes embarqués, car ces périphériques sont au cœur de la gestion temporelle des applications. Les modes simples (comptage et CTC) fournissent les bases pour réaliser des temporisations précises et structurer le temps dans une application, que ce soit pour de l'échantillonnage périodique ou de l'ordonnancement coopératif. Les modes avancés (PWM et capture) ouvrent quant à eux la voie à des fonctionnalités beaucoup plus sophistiquées, en permettant d'interagir avec le monde extérieur de manière autonome et précise, que ce soit pour piloter des actionneurs ou mesurer des signaux. La compréhension approfondie de ces mécanismes est d'autant plus cruciale qu'ils constituent la couche matérielle sur laquelle reposent des concepts plus abstraits comme les systèmes d'exploitation

Université Djilali BOUNAAMA, Khemis Miliana

مليانة خميس بونعامه جيلالي جامعة

Faculté des Sciences et de la Technologie

والتكنولوجيا العلوم كلية



temps réel (RTOS) et les applications d'automatique, qui seront abordés dans les chapitres suivants. En associant la théorie des registres et des modes de fonctionnement à une pratique intensive de programmation sur le microcontrôleur cible, ce chapitre vise à donner aux apprenants une autonomie complète dans l'exploitation des ressources de temporisation, leur permettant ainsi d'aborder sereinement la conception de systèmes embarqués complexes et performants