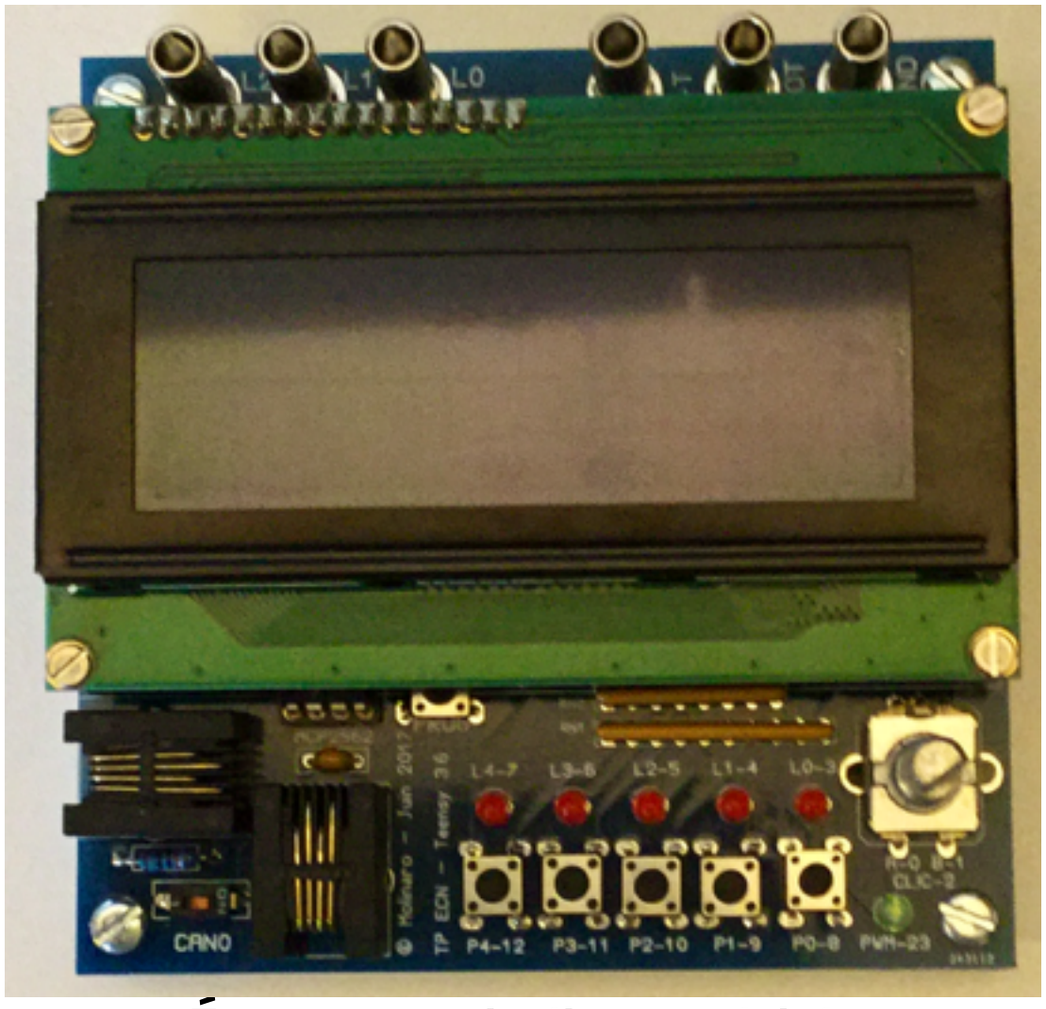
Temps Réel



Étape 08-volatile--systick-isr

Pierre Molinaro

Juin 2018

Description de cette partie

Objectif : cette étape a un double objectif :

- comment inscrire des fonctions pour qu'elles soient exécutées à chaque occurrence de l'interruption SysTick ;
- montrer pourquoi les variables partagées doivent être déclarées avec le qualificatif **volatile.**

CENTRALE NANTES

Exécution d'une fonction par l'interruption SysTick (1/4)

La routine exécutée lors du déclenchement de l'interruption SysTick a été écrite lors de l'étape précédente (fichier **time.cpp**) :

```
void systickInterruptServiceRoutine (SECTION_MODE) {
  gUptime += 1 ;
}
```

Dans cette étape, nous voulons pouvoir disposer d'un mécanisme similaire à MACRO_BOOT_ROUTINE et MACRO_INIT_ROUTINE, de façon que l'on puisse facilement inscrire une fonction pour qu'elle soit exécutée à chaque occurrence de l'interruption SysTick.

CENTRALE NANTES

Exécution d'une fonction par l'interruption SysTick (2/4)

Le script de l'édition des liens **dev-files/teensy-3-6.ld** rassemble toutes les sections **real.time.interrupt.routine.array**, à l'image de ce qui a été fait pour les sections **boot.routine.array** et **init.routine.array** :

```
SECTIONS {
  .text : {
    ......................
    . = ALIGN (4) ;
    __real_time_interrupt_routine_array_start = . ;
    KEEP (*(real.time.interrupt.routine.array)) ;
    . = ALIGN (4) ;
    __real_time_interrupt_routine_array_end = . ;
    ......................
  } > flash
}
```

Dans cette étape, nous voulons pouvoir disposer d'un mécanisme similaire à `MACRO_BOOT_ROUTINE` et `MACRO_INIT_ROUTINE`, de façon que l'on puisse facilement inscrire une fonction pour qu'elle soit exécutée à chaque occurrence de l'interruption `SysTick`.

CENTRALE NANTES

Exécution d'une fonction par l'interruption SysTick (3/4)

Pour exploiter les sections **real.time.interrupt.routine.array**, on ajoute dans le fichier time.h la définition de la macro MACRO_REAL_TIME_ISR, similaire à MACRO_BOOT_ROUTINE et MACRO_INIT_ROUTINE :

```
#define MACRO_REAL_TIME_ISR(ROUTINE) \
  static void (* UNIQUE_IDENTIFIER) (SECTION_MODE_ const uint32_t inUptime) \
  __attribute__ ((section ("real.time.interrupt.routine.array"))) \
  __attribute__ ((unused)) \
  __attribute__ ((used)) = ROUTINE ;
```

Et il faut ajouter à la fonction **systickInterruptServiceRoutine** le parcours du tableau débutant à __real_time_interrupt_routine_array_start et l'exécution des fonctions qu'il contient :

```
void systickInterruptServiceRoutine (SECTION_MODE) {
  const uint32_t newUptime = gUptime + 1 ;
  gUptime = newUptime ;
//--- Run real.time.interrupt.routine.array section routines
  extern void (* __real_time_interrupt_routine_array_start) (SECTION_MODE_ const uint32_t inUptime) ;
  extern void (* __real_time_interrupt_routine_array_end) (SECTION_MODE_ const uint32_t inUptime) ;
  void (* * ptr) (SECTION_MODE_ const uint32_t) = & __real_time_interrupt_routine_array_start ;
  while (ptr != & __real_time_interrupt_routine_array_end) {
    (* ptr) (MODE_ newUptime) ;
    ptr ++ ;
  }
}
```

CENTRALE NANTES

Exécution d'une fonction par l'interruption SysTick (4/4)

Voici un exemple d'utilisation de la macro `MACRO_REAL_TIME_ISR` :

```
static void rtISR (SECTION_MODE_ const uint32_t inUptime) {
  ..............
}

MACRO_REAL_TIME_ISR (rtISR) ;
```

Remarquer que la fonction présente l'argument `inUptime`, qui contient la valeur de l'instant courant.

CENTRALE NANTES

Règle d'utilisation du qualificatif `volatile`

Toute variable globale partagée en une routine d'interruption et une routine de la tâche de fond (fonctions dans le mode USER) doit être déclarée `volatile`.

Si cette règle n'est pas respectée, le programme pourra peut-être fonctionner correctement (ou pas).

Dans la suite de cette étape, on propose un exemple de programme qui illustre cette règle.

Le programme d'exemple (1/3)

Remplacer le fichier **setup-loop.cpp** par celui-ci (dans l'archive **08-files.tar.bz2**) :

```
#include "all-headers.h"

static uint32_t gCount ; // Volontairement, volatile est absent, c'est un bug

static void rtISR (SECTION_MODE_ const uint32_t inUptime) {
  gCount += 1 ;
}

MACRO_REAL_TIME_ISR (rtISR) ;

void setup (USER_MODE) {
  printString (MODE_ "Hello!") ;
}

void loop (USER_MODE) {
  gCount += 500 ;
  gotoLineColumn (MODE_ 1, 0) ;
  printUnsigned (MODE_ gCount) ;
  busyWaitDuring (MODE_ 500) ;
}
```

Volontairement, le programme ci-dessus est bogué : la variable globale **gCount** est partagée entre la routine d'interruption **rtISR** et la routine de fond **loop**, et n'a pas été déclarée **volatile**.

Exécutez le programme, et constatez qu'il fonctionne correctement, malgré l'oubli de **volatile**.

CENTRALE NANTES

Le programme d'exemple (2/3)

Modifier maintenant la fonction **setup** en ajoutant la ligne écrite en bleu :

```
#include "all-headers.h"

static uint32_t gCount ; // Volontairement, volatile est absent

static void rtISR (SECTION_MODE_ const uint32_t inUptime) {
  gCount += 1 ;
}

MACRO_REAL_TIME_ISR (rtISR) ;

void setup (USER_MODE) {
  printString (MODE_ "Hello!") ;
  while (gCount < 3000) {}
}

void loop (USER_MODE) {
  gCount += 500 ;
  gotoLineColumn (MODE_ 1, 0) ;
  printUnsigned (MODE_ gCount) ;
  busyWaitDuring (MODE_ 500) ;
}
```

Exécutez le programme, et constatez qu'il ne fonctionne plus correctement : en fait, l'exécution est bloquée sur la ligne qui a été ajoutée.

Le programme d'exemple (3/3)

Ajouter le qualificatif **volatile** à la déclaration de **gCount** :

```
#include "all-headers.h"

static volatile uint32_t gCount ; // Correct !

static void rtISR (SECTION_MODE_ const uint32_t inUptime) {
  gCount += 1 ;
}

MACRO_REAL_TIME_ISR (rtISR) ;

void setup (USER_MODE) {
  printString (MODE_ "Hello!") ;
  while (gCount < 3000) {}
}

void loop (USER_MODE) {
  gCount += 500 ;
  gotoLineColumn (MODE_ 1, 0) ;
  printUnsigned (MODE_ gCount) ;
  busyWaitDuring (MODE_ 500) ;
}
```

Exécutez le programme, et constatez qu'il fonctionne correctement.

CENTRALE NANTES

Discussion : code engendré en présence de `volatile`

Le cœur du problème est le code engendré par la compilation de la fonction **setup**.

```
static volatile uint32_t gCount ; // Correct !
..............
void setup (USER_MODE) {
  printString (MODE_ "Hello!") ;
  while (gCount < 3000) {}
}
```

Le code engendré est (appeler **1-build-as.py** pour l'obtenir), les commentaires en vert ont été ajoutés :

```
setup.function:
    push{r3, lr}  @ Sauvegarde de R3 et de LR dans la pile
    ldr  r0, .L7              @ R0 <- adresse de la chaîne "Hello!"
    bl   _Z11printStringPKc  @ Appel de la fonction printString
    ldr  r1, .L7+4 @ R1 <- Adresse de gCount
    movw r3, #2999 @ R3 <- 2999
.L5:
    ldr  r2, [r1] @ R2 <- valeur de gCount (lecture mémoire)
    cmp  r2, r3   @ Comparaison entre R2 et R3
    bls .L5       @ Branch unsigned Lower or Same : if (r2 <= r3) goto .L5
    pop {r3, pc}     @ Restauration de R3 et retour
```

CENTRALE NANTES

Discussion : code engendré sans `volatile`

Maintenant, en enlevant le qualificatif **volatile** :

```
static uint32_t gCount ; // Bug
..............
void setup (USER_MODE) {
  printString (MODE_ "Hello!") ;
  while (gCount < 3000) {}
}
```

Le code engendré est (appeler **1-build-as.py** pour l'obtenir), les commentaires en vert ont été ajoutés :

```
setup.function:
    push{r3, lr}  @ Sauvegarde de R3 et de LR dans la pile
    ldr  r0, .L7              @ R0 <- adresse de la chaîne "Hello!"
    bl   _Z11printStringPKc   @ Appel de la fonction printString
    ldr  r3, .L7+4 @ R3 <- Adresse de gCount
    ldr  r2, [r3]  @ R2 <- valeur de gCount (lecture mémoire)
    movw r3, #2999 @ R3 <- 2999
.L5:
    cmp  r2, r3   @ Comparaison entre R2 et R3
    bls  .L5      @ Branch unsigned Lower or Same : if (r2 <= r3) goto .L5
    pop {r3, pc}     @ Restauration de R3 et retour
```

Dans la boucle `.L5`, la valeur de `gCount` n'est pas rechargée par une lecture mémoire : la variable est lue une fois avant la boucle, et si le test est vrai le bouclage est infini.

CENTRALE NANTES

La nécessité de `volatile`

Toute variable globale partagée en une routine d'interruption et une routine de la tâche de fond (fonctions dans le mode USER) doit être déclarée `volatile`.

Voir le document suivant (page 42) :

https://users.ece.cmu.edu/~koopman/pubs/koopman14_toyota_ua_slides.pdf

CENTRALE NANTES