Laboratory Exercise 11

Interrupts & IO programming

Goals

After this laboratory exercise, you should understand the basic principles of interrupts and how interrupts can be used for programming. You should also know the difference between polling and using interrupts and the relative merits of these methods.

Literature

■ Patterson and Hennessy: Chapter 2.7, 2.9, 2.10, 2.13, 5.7, Appendix A.6, A.7, A.10

Polling or Interrupts

A computer can react to external events either by polling or by using interrupts. One method is simpler, while the other one is more systematic and also more efficient. You will study the similarities and differences of these methods using a simple "toy" example program.

Each pheriperal device connects to the CPU via a few ports. CPU uses address to find out the respective port, and after that, CPU could read/write the new value to these port to get/control the device.

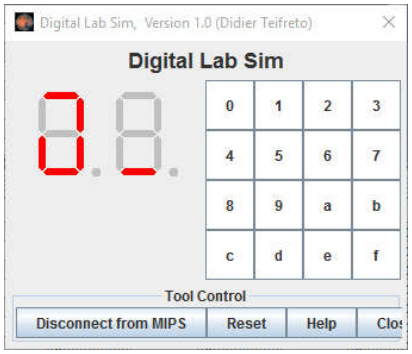
Preparation

Study literature and these home assignments before coming into the class.

Assignments at Home and at Lab

Home Assignment 1 - POOLING

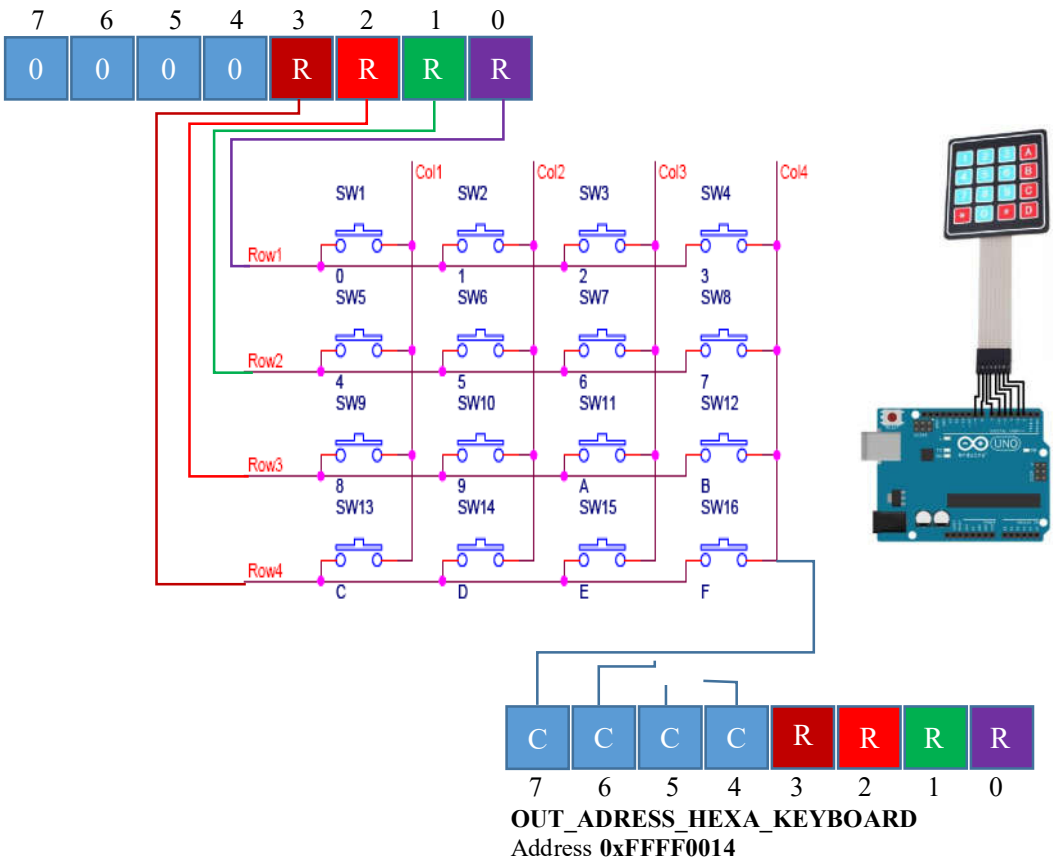
Write a program using assembly language to detect key pressed in Digi Lab Sim and print the key number to console.



The program has a unlimited loop, to read the scan code of key button. This is POLLING.

In order to use the key matrix[4], you should
1.assign experted row index into the byte at the address 0xFFFF0012
2.read byte at the address 0xFFFF0014, to detect which key button was pressed

[4] Key matrix animation: http://hackyourmind.org/public/images/keypad12keys_anim.gif




```
#-------------------------------------------------------
#            col 0x1    col 0x2    col 0x4     col 0x8
#
#  row 0x1      0          1          2           3
#              0x11       0x21       0x41        0x81
#
#  row 0x2      4          5          6           7
#              0x12       0x22       0x42        0x82
#
#  row 0x4      8          9          a           b
#              0x14       0x24       0x44        0x84
#
#  row 0x8      c          d          e           f
#              0x18       0x28       0x48        0x88
#
#-------------------------------------------------------
# command row number of hexadecimal keyboard (bit 0 to 3)
# Eg. assign 0x1, to get key button 0,1,2,3
#     assign 0x2, to get key button 4,5,6,7
# NOTE must reassign value for this address before reading,
# eventhough you only want to scan 1 row
.eqv IN_ADRESS_HEXA_KEYBOARD       0xFFFF0012

# receive row and column of the key pressed, 0 if not key pressed
# Eg. equal 0x11, means that key button 0 pressed.
# Eg. equal 0x28, means that key button D pressed.
.eqv OUT_ADRESS_HEXA_KEYBOARD      0xFFFF0014
```

```
.text
main:             li    $t1,   IN_ADRESS_HEXA_KEYBOARD
                  li    $t2,   OUT_ADRESS_HEXA_KEYBOARD
                  li    $t3,   0x08       # check row 4 with key C, D,
E, F

polling:          sb    $t3,   0($t1 )    # must reassign expected row
                  lb    $a0,   0($t2)     # read scan code of key button
    print:        li    $v0,   34         # print integer (hexa)
                  syscall
    sleep:        li    $a0,   100        # sleep 100ms
                  li    $v0,   32
                  syscall
back_to_polling: j      polling           # continue polling
```

Home Assignment 2 - INTERRUPT

Study the following assembly program, which **waits for an interrupt from keyboard matrix, and prints out a simple message**. Go over the code in detail and make sure that you understand everything, especially how to write and install an interrupt routine, how to enable an interrupt, and what happens when an interrupt is activated.

Vietnamese support:
Cũng như các bộ xử lý khác, MIPS có 3 service với cùng một nguyên lý, nhưng khác nhau về mục đích sử dụng

- *Exception: xảy ra khi có lỗi trong quá trình chạy, chẳng hạn tham chiếu bộ nhớ không hợp lệ.*
- *Trap: xảy ra bởi cách lệnh kiểm tra*
- *Interrupt: do các thiết bị bên ngoài kích hoạt*

Cả 3 cơ chế trên đều được gọi chung là Exception.
***Cách thức hoạt động:** khi một exception xảy ra*

- *Khi có một Exception xảy ra, MIPS sẽ luôn nhảy tới địa chỉ cố định 0x80000180 để thực hiện chương trình con phục vụ ngắt. Để viết chương trình con phục vụ ngắt, sử dụng chỉ thị **.ktext** để viết code ở địa chỉ 0x80000180 nói trên.*
- *Bộ đồng xử lý C0, thanh ghi $12 (status) sẽ bật bit 1*
- *Bộ đồng xử lý C0, thanh ghi $13 (cause) sẽ thay đổi các bit 2~6 cho biết nguyên nhân gây ra ngắt*
- *Bộ đồng xử lý C0, thanh ghi $14 (epc) sẽ chứa địa chỉ kế tiếp của chương trình chính, để quay trở về sau khi xử lý các đoạn mã Exception xong. (giống như thanh ghi $ra)*
- *Trường hợp thanh ghi $13 (cause) cho biết nguyên nhân làm tham chiếu địa chỉ bộ nhớ không hợp lệ, thanh ghi $8 (vaddr) sẽ chứa địa chỉ lỗi đó.*
- *Nếu không có mã lệnh nào ở địa chỉ 0x80000180 (**.ktext**), chương trình sẽ hiện thông báo lỗi và tự kết thúc.*
- *Sau khi kết thúc chương trình con, sử dụng lệnh **eret** để quay trở lại chương btrình chính. Lệnh **eret** sẽ gán nội dung thanh ghi PC bằng giá trị trong thanh ghi $14 (epc).*

Tuy nhiên, lưu ý rằng, trong MARS, thanh ghi PC vẫn chứa địa chỉ của lệnh mà ngắt xảy ra, tức là lệnh đã thực hiện xong, chứ không chứa địa chỉ của lệnh kế tiếp. Bởi vây phải tự lập trình để tăng địa chỉ chứa trong thanh ghi epc bằng cách sử dụng 2 lệnh mfc0 (để đọc thanh ghi trong bộ đồng xử lý C0) và mtc0 (để ghi giá trị vào thanh ghi trong bộ đồng xử lý C0)

```
mfc0    $at, $14        # $at <=  Coproc0.$14 = Coproc0.epc
addi    $at, $at, 4     # $at = $at + 4   (next instruction)
mtc0    $at, $14        # Coproc0.$14 = Coproc0.epc <= $at
```

- *Các bit 8-15 của thanh ghi Cause, $13 được sử dụng để xác định nguyên nhân gây ra ngắt. Hãy đọc thanh ghi này, kết hợp với thông tin chi tiết trong hướng dẫn sử dụng của từng thiết bị giả lập để biết được nguồn gốc gây ra ngắt.*

Cách thức viết chương trình phục vụ ngắt: *để viết chương trình con phục vụ ngắt khi có sự kiện ngắt xảy ra, có thể dùng một trong các phương pháp sau:*

1. *Viết chương trình con phục vụ ngắt trong cùng một file nguồn*
2. *Viết chương trình con phục vụ ngắt trong file nguồn độc lập, và lưu trữ trong cùng một thư mục với chương trình chính. Sau đó, sử dụng tính năng trong mục Setting là "Assemble all files in directory"*
3. *Viết chương trình con phục vụ ngắt trong file nguồn độc lập, và lưu trữ trong cùng một thư mục bất kì. Sau đó, sử dụng tính năng trong mục Setting là "Exception Handler.."*

BUG: Ghi nhận các lỗi của công cụ MARS

1. *Giữa 2 lệnh syscall và lệnh jump, branch cần bổ sung thêm lệnh nop. Nếu không việc ghi nhận giá trị của thanh ghi PC vào EPC sẽ bị sai*
2. *Với các công cụ giả lập, nên bấm nút "Connect to MIPS" trước khi chạy giả lập. Nếu không, việc phát sinh sự kiện ngắt sẽ không xảy ra.*

```
.eqv IN_ADRESS_HEXA_KEYBOARD       0xFFFF0012

.data
Message: .asciiz "Oh my god. Someone's presed a button.\n"
#~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
# MAIN Procedure
#~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
.text
main:
        #-------------------------------------------------------
        # Enable interrupts you expect
        #-------------------------------------------------------
        # Enable the interrupt of Keyboard matrix 4x4 of Digital Lab
Sim
        li    $t1,   IN_ADRESS_HEXA_KEYBOARD
        li    $t3,   0x80  # bit 7 of = 1 to enable interrupt
```

```
        sb    $t3,   0($t1)

        #-------------------------------------------------------
        # No-end loop, main program, to demo the effective of
interrupt
        #-------------------------------------------------------
Loop:   nop
        nop
        nop
        nop
        b       Loop            # Wait for interrupt
end_main:

#~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~ ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
# GENERAL INTERRUPT SERVED ROUTINE for all interrupts
#~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
.ktext 0x80000180
        #-------------------------------------------------------
        # Processing
        #-------------------------------------------------------
IntSR:  addi    $v0, $zero,  4  # show message
        la      $a0, Message
        syscall
        #-------------------------------------------------------
        # Evaluate the return address of main routine
        # epc  <= epc + 4
        #-------------------------------------------------------
next_pc:mfc0    $at, $14        # $at <=  Coproc0.$14 = Coproc0.epc
        addi    $at, $at, 4     # $at = $at + 4   (next instruction)
        mtc0    $at, $14        # Coproc0.$14 = Coproc0.epc <= $at

return: eret                    # Return from exception
```

Home Assignment 3 – INTERRUPT & STACK

Study the following assembly program, in which

1. Main program enables 1 interrupt: from key matrix in Data Lab Sim
2. Main program only print a sequence number to console
3. Connect Data Lab Sim. Whenever user press a key button C, D, E, or F, an interrupt raises and print key scan-code to console

```
.eqv IN_ADRESS_HEXA_KEYBOARD       0xFFFF0012
.eqv OUT_ADRESS_HEXA_KEYBOARD      0xFFFF0014

.data
Message: .asciiz "Key scan code "

#~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
# MAIN Procedure
#~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
.text
main:
        #-------------------------------------------------------
        # Enable interrupts you expect
        #-------------------------------------------------------
        # Enable the interrupt of Keyboard matrix 4x4 of Digital Lab
Sim
        li    $t1,   IN_ADRESS_HEXA_KEYBOARD
        li    $t3,   0x80      # bit 7 = 1 to enable
        sb    $t3,   0($t1)
```

```
        #---------------------------------------------------------
        # Loop an print sequence numbers
        #---------------------------------------------------------
        xor     $s0, $s0, $s0  # count = $s0 = 0
Loop:   addi    $s0, $s0, 1    # count = count + 1
prn_seq:addi    $v0,$zero,1
        add     $a0,$s0,$zero  # print auto sequence number
        syscall
prn_eol:addi    $v0,$zero,11
        li      $a0,'\n'       # print endofline
        syscall
sleep:  addi    $v0,$zero,32
        li      $a0,300        # sleep 300 ms
        syscall
        nop                    # WARNING: nop is mandatory here.
        b       Loop           # Loop
end_main:

#~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
# GENERAL INTERRUPT SERVED ROUTINE for all interrupts
#~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
.ktext 0x80000180
        #---------------------------------------------------------
        # SAVE the current REG FILE to stack
        #---------------------------------------------------------
IntSR:  addi  $sp,$sp,4    # Save $ra  because we may change it later
        sw    $ra,0($sp)
        addi  $sp,$sp,4    # Save $ra  because we may change it later
        sw    $at,0($sp)
        addi  $sp,$sp,4    # Save $ra  because we may change it later
        sw    $v0,0($sp)
        addi  $sp,$sp,4    # Save $a0, because we may change it later
        sw    $a0,0($sp)
        addi  $sp,$sp,4    # Save $t1, because we may change it later
        sw    $t1,0($sp)
        addi  $sp,$sp,4    # Save $t3, because we may change it later
        sw    $t3,0($sp)
        #---------------------------------------------------------
        # Processing
        #---------------------------------------------------------
prn_msg:addi    $v0, $zero,  4
        la      $a0, Message
        syscall
get_cod:li      $t1,   IN_ADRESS_HEXA_KEYBOARD
        li      $t3,   0x88      # check row 4 and re-enable bit 7
        sb      $t3,   0($t1)    # must reassign expected row
        li      $t1,   OUT_ADRESS_HEXA_KEYBOARD
        lb      $a0,   0($t1)
prn_cod:li      $v0,34
        syscall
        li      $v0,11
        li      $a0,'\n'        # print endofline
        syscall
        #---------------------------------------------------------
        # Evaluate the return address of main routine
        # epc  <= epc + 4
        #---------------------------------------------------------
next_pc:mfc0    $at, $14        # $at <=  Coproc0.$14 = Coproc0.epc
        addi    $at, $at, 4     # $at = $at + 4   (next instruction)
        mtc0    $at, $14        # Coproc0.$14 = Coproc0.epc <= $at
        #---------------------------------------------------------
        # RESTORE the REG FILE from STACK
        #---------------------------------------------------------
```

```
restore:lw      $t3, 0($sp)     # Restore the registers from stack
        addi    $sp,$sp,-4
        lw      $t1, 0($sp)     # Restore the registers from stack
        addi    $sp,$sp,-4
        lw      $a0, 0($sp)     # Restore the registers from stack
        addi    $sp,$sp,-4
        lw      $v0, 0($sp)     # Restore the registers from stack
        addi    $sp,$sp,-4
        lw      $ra, 0($sp)     # Restore the registers from stack
        addi    $sp,$sp,-4

return: eret                    # Return from exception
```

Home Assignment 4 – MULTI INTERRUPT

Vietnamese support:

Thanh ghi số 13, status trong bộ đồng xử lý C0, chứa các thiết lập về tình trạng ngắt.

	15	14	13	12	11	10			6	5	4	3	2	1	0
					KM	TC			Exception Code					K/U	IE
IE = 1 cho phép ngắt. IE = 0 vô hiệu hóa mọi hoạt động ngắt															
K/U=1 hoạt động ở chế độ Kernel. K/U=0 hoạt động ở chế độ User															
Ngoại lệ do syscall, overflow, lệnh tạo ngắt mềm như teq teqi…															
Time Counter bộ đếm thời gian															
Key Matrix															

1 1 0 1 0 0

Study the following assembly program, in which

1. Main program enables 2 interrupts simultaneously: from key matrix and time counter in Data Lab Sim
2. Main program do nothing with a deadloop
3. Connect Data Lab Sim. Whenever user press any key or time interval reachs, an interrupt raises and print key scan-code to console.

```
.eqv  IN_ADRESS_HEXA_KEYBOARD       0xFFFF0012
.eqv  COUNTER          0xFFFF0013          # Time Counter

.eqv  MASK_CAUSE_COUNTER   0x00000400      # Bit 10: Counter interrupt
.eqv  MASK_CAUSE_KEYMATRIX 0x00000800      # Bit 11: Key matrix
interrupt

.data
msg_keypress: .asciiz "Someone has pressed a key!\n"
msg_counter: .asciiz "Time inteval!\n"

#~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
# MAIN Procedure
#~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
.text
main:
        #-------------------------------------------------------
        # Enable interrupts you expect
        #-------------------------------------------------------
        # Enable the interrupt of Keyboard matrix 4x4 of Digital Lab
Sim
        li    $t1,   IN_ADRESS_HEXA_KEYBOARD
        li    $t3,   0x80      # bit 7 = 1 to enable
        sb    $t3,   0($t1)
```

```
        # Enable the interrupt of TimeCounter of Digital Lab Sim
        li    $t1,   COUNTER
        sb    $t1,   0($t1)

        #---------------------------------------------------------
        # Loop an print sequence numbers
        #---------------------------------------------------------
Loop:   nop
        nop
        nop
sleep:  addi    $v0,$zero,32   # BUG: must sleep to wait for Time
Counter
        li      $a0,200        # sleep 300 ms
        syscall
        nop                    # WARNING: nop is mandatory here.
        b       Loop
end_main:

#~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
# GENERAL INTERRUPT SERVED ROUTINE for all interrupts
#~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
.ktext 0x80000180
IntSR:  #---------------------------------------------------------
        # Temporary disable interrupt
        #---------------------------------------------------------
dis_int:li    $t1,   COUNTER   # BUG: must disable with Time Counter
        sb    $zero,   0($t1)
        # no need to disable keyboard matrix interrupt
        #---------------------------------------------------------
        # Processing
        #---------------------------------------------------------
get_caus:mfc0  $t1, $13              # $t1 = Coproc0.cause
IsCount:li    $t2, MASK_CAUSE_COUNTER# if Cause value confirm
Counter..
        and   $at, $t1,$t2
        beq   $at,$t2, Counter_Intr
IsKeyMa:li    $t2, MASK_CAUSE_KEYMATRIX # if Cause value confirm Key..
        and   $at, $t1,$t2
        beq   $at,$t2, Keymatrix_Intr
others: j     end_process           # other cases

Keymatrix_Intr: li      $v0, 4      # Processing Key Matrix Interrupt
        la      $a0, msg_keypress
        syscall
        j     end_process
Counter_Intr: li      $v0, 4        # Processing Counter Interrupt
        la    $a0, msg_counter
        syscall
        j     end_process
end_process:
        mtc0  $zero, $13            # Must clear cause reg
en_int: #---------------------------------------------------------
        # Re-enable interrupt
        #---------------------------------------------------------
        li    $t1,   COUNTER
        sb    $t1,   0($t1)
        #---------------------------------------------------------
        # Evaluate the return address of main routine
        # epc  <= epc + 4
        #---------------------------------------------------------
next_pc:mfc0    $at, $14        # $at <=  Coproc0.$14 = Coproc0.epc
        addi    $at, $at, 4     # $at = $at + 4   (next instruction)
        mtc0    $at, $14        # Coproc0.$14 = Coproc0.epc <= $at
```

```
return: eret                        # Return from exception
```

Home Assignment 5 – KEYBOARD

Vietnamese support:

- *Bộ xử lý MIPS cho phép tạo ra ngắt mềm, bằng lệnh teq, hoặc teqi*
- *Thiết bị Keyboard không tự động tạo ra ngắt khi có một phím được bấm, mà người lập trình phải tự tạo ngắt mềm.*

```
.eqv KEY_CODE   0xFFFF0004        # ASCII code from keyboard, 1 byte
.eqv KEY_READY  0xFFFF0000        # =1 if has a new keycode ?
                                  # Auto clear after lw

.eqv DISPLAY_CODE   0xFFFF000C    # ASCII code to show, 1 byte
.eqv DISPLAY_READY  0xFFFF0008    # =1 if the display has already to do
                                  # Auto clear after sw

.eqv  MASK_CAUSE_KEYBOARD   0x0000034     # Keyboard Cause

.text
            li   $k0,  KEY_CODE
            li   $k1,  KEY_READY

            li   $s0, DISPLAY_CODE
            li   $s1, DISPLAY_READY

loop:       nop
WaitForKey: lw   $t1, 0($k1)            # $t1 = [$k1] = KEY_READY
            beq  $t1, $zero, WaitForKey # if $t1 == 0 then Polling
MakeIntR:   teqi $t1, 1          # if $t0 = 1 then raise an Interrupt
            j loop

#---------------------------------------------------------------
# Interrupt subroutine
#---------------------------------------------------------------
.ktext 0x80000180
get_caus:   mfc0  $t1, $13              # $t1 = Coproc0.cause
IsCount:    li    $t2, MASK_CAUSE_KEYBOARD# if Cause value confirm
Keyboard..
            and   $at, $t1,$t2
            beq   $at,$t2, Counter_Keyboard
            j    end_process

Counter_Keyboard:
ReadKey:    lw   $t0, 0($k0)            # $t0 = [$k0] = KEY_CODE

WaitForDis: lw   $t2, 0($s1)            # $t2 = [$s1] = DISPLAY_READY
            beq  $t2, $zero, WaitForDis # if $t2 == 0 then Polling

Encrypt:    addi $t0, $t0, 1           # change input key

ShowKey:    sw $t0, 0($s0)             # show key
            nop

end_process:
next_pc:    mfc0    $at, $14       # $at <= Coproc0.$14 = Coproc0.epc
            addi    $at, $at, 4    # $at = $at + 4 (next instruction)
            mtc0    $at, $14       # Coproc0.$14 = Coproc0.epc <= $at
return:     eret                   # Return from exception
```

Assignment 1

Create a new project, type in, and build the program of Home Assignment 1. Upgrade the source code so that it could defect all 16 key buttons, from 0 to F.

Assignment 2

Create a new project, type in, and build the program of Home Assignment 2. Upgrade the source code so that it could defect all 16 key buttons, from 0 to F.

Assignment 3

Create a new project, type in, and build the program of Home Assignment 3. Upgrade the source code so that it could defect all 16 key buttons, from 0 to F.

Assignment 4

Create a new project, type in, and build the program of Home Assignment 4. Upgrade the source code so that it could defect all 16 key buttons, from 0 to F.

Assignment 5

Create a new project, type in, and build the program of Home Assignment 5.

Conclusions

Before you finish the laboratory exercise, think about the questions below:

- What is polling?
- What are interrupts?
- What are interrupt routines?
- What are the advantages of polling?
- What are the advantages of using interrupts?
- What are the differences between interrupts, exceptions and traps?