

Lab3

练习1：完善中断处理（需要编程）

如下是我们编程实现的时钟中断处理代码，我将在下面使用注释的形式解释。

```
// Code/kern/trap/trap.c
case IRQ_S_TIMER:
    // "All bits besides SSIP and USIP in the sip register are
    // read-only." -- privileged spec1.9.1, 4.1.4, p59
    // In fact, call sbi_set_timer will clear STIP, or you can clear it
    // directly.
    // cprintf("Supervisor timer interrupt\n");
    /* LAB3 EXERCISE1 2313815_段俊宇_2313485_陈展_2310591_李相儒 */
    /* (1) 设置下次时钟中断- clock_set_next_event()
    * (2) 计数器 (ticks) 加一
    * (3) 当计数器加到100的时候，我们会输出一个`100ticks`表示我们触发了100次时钟中
    断，同时打印次数 (num) 加一
    * (4) 判断打印次数，当打印次数为10时，调用<sbi.h>中的关机函数关机
    */
    ;
    int num = 0;    // 设置打印次数计数器
    while(1)        // 进入循环
    {
        clock_set_next_event(); // 设置下次时钟中断函数
        ticks++;              // 时钟中断次数加一
        if(ticks==TICK_NUM)   // TICK_NUM为宏定义的常量100，当时钟中断次数达
到100的时候输出100ticks
        {
            cprintf("100ticks\n");
            ticks = 0;          // ticks计数器清零
            num++;              // 打印次数计数器加一
        }
        if(num == 10)          // 当打印次数达到10次时，调用关机函数关机
            sbi_shutdown();    // 关机函数，需要在最上面添加#include<sbi.h>
进行声明
    }
    break;
```

使用 `make qemu` 命令运行上面的代码，发现成功输出了10次100ticks，之后系统就停止了，说明关机成功

```
tom@ubuntu: ~/Downloads/riscv64-unknown-elf-toolchain-1...
entry 0xffffffffc0200054 (virtual)
etext 0xffffffffc0201f2e (virtual)
edata 0xffffffffc0206028 (virtual)
end   0xffffffffc0206498 (virtual)
Kernel executable memory footprint: 26KB
memory management: default_pmm_manager
physical memory map:
  memory: 0x0000000008000000, [0x0000000008000000, 0x0000000087ffffff].
check_alloc_page() succeeded!
satp virtual address: 0xffffffffc0205000
satp physical address: 0x00000000080205000
++ setup timer interrupts
100ticks
100ticks
100ticks
100ticks
100ticks
100ticks
100ticks
100ticks
100ticks
100ticks
100ticks
100ticks
tom@ubuntu:~/Downloads/riscv64-unknown-elf-toolchain-10.2.0-2020.12.8-x86_64-linux-ubuntu14/labcode/labcode/lab3$
```

扩展练习 Challenge1: 描述与理解中断流程

当 CPU 发生异常或中断时，系统会进入统一的入口 `__alltraps`，随后保存上下文、调用 C 层处理函数，最终恢复现场返回。

1. 异常与中断的产生

当 CPU 检测到中断或异常时：

- 自动保存当前指令地址到寄存器；
- 切换至内核态；
- 跳转至内核中断入口 `__alltraps`。

该入口在 `trapentry.S` 中定义，用于统一处理所有 trap。

2. `__alltraps`: 保存现场 (SAVE_ALL)

在进入 `__alltraps` 后，CPU 仍处于中断现场。

此时，系统必须立即保存寄存器状态，以免在执行 C 函数时被破坏。

```
__alltraps:
    SAVE_ALL
    mov a0, sp
    jal trap
```

`SAVE_ALL` 宏会：

- 在当前内核栈上分配一块空间；
- 按固定顺序将所有通用寄存器以及关键信息保存到栈中；
- 栈顶指针 `sp` 最终指向一个完整的中断帧 `trapframe`。

3. trap() 函数处理

在该函数中，系统会根据 `trapframe` 中的标志判断中断或异常类型，并调用相应的处理例程，例如时钟中断、系统调用或页错误。

```
void exception_handler(struct trapframe *tf) {
    switch (tf->cause) {
        case CAUSE_MISALIGNED_FETCH:
            break;
        case CAUSE_FAULT_FETCH:
            break;
        case CAUSE_ILLEGAL_INSTRUCTION:
            // 非法指令异常处理
            /* LAB3 CHALLENGE3 YOUR CODE : */
            /* (1)输出指令异常类型 ( illegal instruction)
            * (2)输出异常指令地址
            * (3)更新 tf->epc寄存器
            */
            break;
        case CAUSE_BREAKPOINT:
            //断点异常处理
            /* LAB3 CHALLENGE3 YOUR CODE : */
            /* (1)输出指令异常类型 ( breakpoint)
            * (2)输出异常指令地址
            * (3)更新 tf->epc寄存器
            */
            break;
        case CAUSE_MISALIGNED_LOAD:
            break;
        case CAUSE_FAULT_LOAD:
            break;
        case CAUSE_MISALIGNED_STORE:
            break;
        case CAUSE_FAULT_STORE:
            break;
        case CAUSE_USER_ECALL:
            break;
        case CAUSE_SUPERVISOR_ECALL:
            break;
        case CAUSE_HYPERVISOR_ECALL:
            break;
        case CAUSE_MACHINE_ECALL:
            break;
        default:
            print_trapframe(tf);
            break;
    }
}

static inline void trap_dispatch(struct trapframe *tf) {
    if ((intptr_t)tf->cause < 0) {
        // interrupts
        interrupt_handler(tf);
    } else {
        // exceptions
    }
}
```

```

        exception_handler(tf);
    }
}

/* *
 * trap - handles or dispatches an exception/interrupt. if and when trap()
 * returns,
 * the code in kern/trap/trapentry.S restores the old CPU state saved in the
 * trapframe and then uses the iret instruction to return from the exception.
 * */
void trap(struct trapframe *tf) {
    // dispatch based on what type of trap occurred
    trap_dispatch(tf);
}

```

4.恢复现场与返回

在中断或异常处理完成后，程序会进入恢复阶段：

```

__trapret:
    RESTORE_ALL
    sret

```

其中：

- `RESTORE_ALL` 宏将先前保存在 `trapframe` 中的寄存器值重新装载回 CPU；
- `sret`（或 `eret/mret`）指令将控制权返回到异常发生前的程序地址。

`mov a0, sp` 的目的

`mov a0, sp` 的作用是：

- 将当前栈指针作为参数传递给 C 函数 `trap(struct trapframe *tf)`；
- 在 RISC-V/MIPS 调用约定中，`a0` 是第一个函数参数寄存器，因此这条指令实现了 `trap()` 的参数传递。
- `trap()` 函数接收 `trapframe` 指针作为参数，用于区分并分发异常类型。

寄存器在栈中的保存位置

`SAVE_ALL` 的保存位置由 `trapframe` 结构体的定义顺序决定：

```

struct pushregs {
    uintptr_t zero; // Hard-wired zero
    uintptr_t ra;   // Return address
    uintptr_t sp;   // Stack pointer
    uintptr_t gp;   // Global pointer
    uintptr_t tp;   // Thread pointer
    uintptr_t t0;   // Temporary
    uintptr_t t1;   // Temporary
    uintptr_t t2;   // Temporary
    uintptr_t s0;   // Saved register/frame pointer
    uintptr_t s1;   // Saved register
    uintptr_t a0;   // Function argument/return value
    uintptr_t a1;   // Function argument/return value
    uintptr_t a2;   // Function argument

```

```

uintptr_t a3;    // Function argument
uintptr_t a4;    // Function argument
uintptr_t a5;    // Function argument
uintptr_t a6;    // Function argument
uintptr_t a7;    // Function argument
uintptr_t s2;    // Saved register
uintptr_t s3;    // Saved register
uintptr_t s4;    // Saved register
uintptr_t s5;    // Saved register
uintptr_t s6;    // Saved register
uintptr_t s7;    // Saved register
uintptr_t s8;    // Saved register
uintptr_t s9;    // Saved register
uintptr_t s10;   // Saved register
uintptr_t s11;   // Saved register
uintptr_t t3;    // Temporary
uintptr_t t4;    // Temporary
uintptr_t t5;    // Temporary
uintptr_t t6;    // Temporary
};

struct trapframe {
    struct pushregs gpr;
    uintptr_t status;
    uintptr_t epc;
    uintptr_t badvaddr;
    uintptr_t cause;
};

```

每个寄存器的存储顺序由结构体定义而固定，偏移量也由结构体定义而固定。

对于任何中断，`__alltraps` 中都需要保存所有寄存器吗？

需要，理由如下：

1. 统一入口设计

所有异常和中断共用同一个入口 `__alltraps`。

在进入时 CPU 并不知道当前是哪类 trap，因此必须无条件保存所有寄存器以确保安全。

2. 保护上下文

后续的 C 语言函数调用会使用调用约定中允许修改的寄存器，例如 t0-t6、a0-a7。

如果不保存全部寄存器，返回时原程序的上下文可能被破坏。

3. 简化恢复逻辑

保存所有寄存器后，恢复阶段可以统一使用 `RESTORE_ALL`，无需区分不同中断类型，逻辑简洁可靠。

扩增练习 Challenge2：理解上下文切换机制

1. *trapentry*. S 中汇编代码 `csrw sscratch, sp; csrrw s0, sscratch, x0` 实现了什么操作，目的是什么？

```

csrw sscratch, sp;    #将当前sp存入 sscratch，作为临时保存
csrrw s0, sscratch, x0; #取sscratch到 s0，同时将sscratch设为 0

```

我们知道，用户态下 *sp* 指向用户栈，而内核处理中断时需要切换到内核栈，否则会覆盖用户栈内容。

所以，进入中断处理时，必须安全地保存用户态 *sp* 并切换到内核栈。

对于以上两条指令，单纯从实现的操作来说，*csw sscratch*，*sp* 是将当前栈指针 *sp* 的值写入 *CSR sscratch*，*crrw s0, sscratch, x0* 是把 *sscratch* 的值读入通用寄存器 *s0*，同时将 *sscratch* 写入 *x0* (*x0* 恒为 0)，因此等同于将 *sscratch* 清为 0。

而其目的主要有两点：一是将用户态的 *sp* 安全放入寄存器 *s0*，避免在尚未调整 *sp* 前将新 *sp* 覆盖或干扰保存过程，以便稍后保存到 *trapframe* 中；同时将 *sscratch* 清零，作为处于内核模式或处理中断的一个标志。

2. *save all* 里面保存了 *stval*、*scause* 这些 *CSR*，而在 *restore all* 里面却不还原它们？那这样 *store* 的意义何在呢？

```
struct trapframe {
    struct pushregs gpr;
    uintptr_t status; //sstatus
    uintptr_t epc; //sepc
    uintptr_t badvaddr; //sbadvaddr
    uintptr_t cause; //scause
};
```

其中 *sstatus* 和 *sepc* 属于可读写的状态寄存器，*sstatus* 包含中断使能、特权级等状态，*sepc* 包含异常返回地址，用于 *sret* 返回。*scause*、*sbadvaddr* (*stval*) 为只读的事件寄存器，其中 *scause* 为异常原因寄存器，*sbadvaddr* 为错误地址寄存器。

所以将 *stval*、*scause* 等 *CSR* 保存到 *trapframe*，目的是让上层的 *C* 函数 *trap(struct trapframe *tf)* 能够读取这些值以判断异常类型、错误地址等，并据此作出打印、异常处理、进程终止等操作。保存它们只是为了“上报”，而不是为了在返回时恢复原值。

同时，*scause*、*stval* 等寄存器由硬件表示本次异常或中断的原因与相关信息，在处理完成后这些寄存器的值对继续执行被中断的程序没有影响，且写回它们没有任何必要。出于安全性考虑，一般只读取这些寄存器供内核进行决策，而不进行写回，因此使用这种 *store* 方法。

扩展练习Challenge3：完善异常中断

处理异常中断时，我们在 *exception_handler()* 函数中编写输出信息的代码，我将使用注释来进行解释。

```
// Code/kern/trap/trap.c
case CAUSE_ILLEGAL_INSTRUCTION:
    // 非法指令异常处理
    /* LAB3 CHALLENGE3 2313815_段俊宇_2313485_陈展_2310591_李相儒 */
    /* (1)输出指令异常类型 ( Illegal instruction)
    * (2)输出异常指令地址
    * (3)更新 tf->epc寄存器
    */
    // 输出指令异常类型为非法指令
    cprintf("Exception type: Illegal instruction\n");
```

```

        // 输出异常指令地址，epc是异常程序计数器，用于保存中断发生时正在执行的指令的地址，在处理完成后恢复执行
        cprintf("Illegal instruction caught at 0x%08x\n", tf->epc);
        // 更新tf->epc寄存器，跳过非法指令，RISC-V中一条指令占4字节，因此需要加4
        tf->epc += 4;
        break;
    case CAUSE_BREAKPOINT:
        //断点异常处理
        /* LAB3 CHALLENGE3    2313815_段俊宇_2313485_陈展_2310591_李相儒    */
        /*(1)输出指令异常类型 ( breakpoint)
        *(2)输出异常指令地址
        *(3)更新 tf->epc寄存器
        */
        // 输出指令异常类型为断点
        cprintf("Exception type: Breakpoint\n");
        // 输出异常指令地址
        cprintf("Breakpoint at 0x%08x\n", tf->epc);
        // 更新tf->epc寄存器，跳过断点
        tf->epc += 2;
        break;

```

还需要在`Code/kern/init/init.c`中`intr_enable()`函数下面加入下面两行指令进行测试

```

asm("mret");
asm("ebreak");

```

最后使用`make qemu`命令运行结果如下所示，说明成功处理了非法指令和断点指令

```

sbi_emulate_csr_read: hartid0: invalid csr_num=0x302
Exception type: Illegal instruction
Illegal instruction caught at 0xc020009c
Exception type: Breakpoint
Breakpoint at 0xc02000a0
100ticks
100ticks
100ticks
100ticks
100ticks
100ticks
100ticks
100ticks
100ticks
100ticks

```

遇到的问题

在处理断点指令的时候遇到了一个问题，通过查看RV硬件简要手册发现`ebreak`是4字节的指令，但是当`epc`加4的时候，按照`init.c`中的指令顺序，接下来应当什么都不做，进入死循环，然后输出时钟中断；然而输出结果如下所示，进入到了`default`分支，调用了`print_trapframe()`函数，如下图所示，最终经过实验发现改为2的时候可以正确输出，但是不知道原因，届时需要询问助教。

```
tom@ubuntu: ~/Downloads/riscv64-unknown-elf-toolchain-1...
end 0xffffffffc0207498 (virtual)
Kernel executable memory footprint: 30KB
memory management: default_pmm_manager
physical memory map:
  memory: 0x0000000008000000, [0x0000000008000000, 0x0000000087ffffff].
check_alloc_page() succeeded!
satp virtual address: 0xffffffffc0206000
satp physical address: 0x00000000080206000
++ setup timer interrupts
sbi_emulate_csr_read: hartid0: invalid csr_num=0x302
Exception type: Illegal instruction
Illegal instruction caught at 0xc020009c
Exception type: Breakpoint
Breakpoint at 0xc02000a0
♦trapframe at 0xffffffffc0205ec0
  zero 0x00000000
  ra    0xc02000b0
  sp    0xc0205fe0
  gp    0x00000000
  tp    0x8001be00
  t0    0x00000000
  t1    0xc0205fb8
  t2    0x00000001
  s0    0x00000000
```