

lab6 用户进程

一、实验概述

本次实验中，我们将完成用户进程的创建，并使相应的程序代码在用户特权级执行。执行过程中，用户通过系统调用实现具体功能。

因为我们的操作系统中没有编译器，这里我们的选择是把一个编译好的用户程序（可执行文件）运行起来。

二、实验目的

1. 掌握用户进程的创建过程
2. 掌握用户进程特权级切换以及执行过程
3. 掌握系统调用过程

三、实验项目整体框架概述

// Week10

```
|— kern
|   |— debug
|   |— driver
|   |— fs
|   |— init
|   |   |— entry.S
|   |   └─ init.c
|   |— libs
|   |   |— readline.c
|   |   └─ stdio.c
|   |— mm
|   |— process
|   |   |— entry.S
|   |   |— proc.c //修改和增添了部分内容
|   |   |— proc.h
|   |   └─ switch.S
|   |— schedule
|   |   |— sched.c
|   |   └─ sched.h
|   |— sync
|   |   └─ sync.h
|   |— syscall
|   |   |— syscall.c // 处理对应的系统调用
|   |   └─ syscall.h
|   └─ trap
|       |— trap.c
|       └─ trapentry.S
```

```
|   └─ trap.h
|── libs
|   ├── atomic.h
|   ├── defs.h
|   ├── elf.h //elf文件的相关内容
|   ├── error.h
|   ├── hash.c
|   ├── list.h
|   ├── printfmt.c
|   ├── rand.c
|   ├── riscv.h
|   ├── sbi.h
|   ├── stdarg.h
|   ├── stdio.h
|   ├── stdlib.h
|   ├── string.c
|   ├── string.h
|   └─ unistd.h
|── Makefile
|── tools
|   ├── function.mk
|   ├── kernel.ld
|   └─ user.ld//用户程序的链接文件
└─ user用户程序
    ├── hello.c
    └─ libs
        ├── initcode.S
        ├── panic.c
        ├── stdio.c
        ├── syscall.c
        ├── syscall.h
        ├── ulib.c
        ├── ulib.h
        └─ umain.c
```

四、实验内容

1. 创建用户进程
2. 用户进程通过exec()切换至用户特权级，并执行程序（可执行文件）
3. 用户程序通过系统调用打印信息

五、实验内容

第一步. 用户进程的创建

上节课的手册中，我们在 `proc_init()` 函数里初始化进程的时候，认为启动时运行的ucore程序，是一个内核进程("第0个"内核进程)，并将其初始化为 `idleproc` 进程。然后我们新建了一个内核进程执行 `init_main()` 函数。

我们比较两次手册的 `init_main()` 有何不同。

```

// kern/process/proc.c (week9)
static int init_main(void *arg) {
    cprintf("this initproc, pid = %d, name = \"%s\"\n", current->pid,
get_proc_name(current));
    cprintf("%s.\n", (const char *)arg);
    return 0;
}

// kern/process/proc.c (week10)
static int init_main(void *arg) {
    size_t nr_free_pages_store = nr_free_pages();
    size_t kernel_allocated_store = kallocated();

    int pid = kernel_thread(user_main, NULL, 0);
    if (pid <= 0) {
        panic("create user_main failed.\n");
    }

    while (do_wait(0, NULL) == 0) {
        schedule();
    }

    cprintf("all user-mode processes have quit.\n");
    assert(initproc->cptr == NULL && initproc->yptr == NULL && initproc->optr ==
NULL);
    assert(nr_process == 2);
    assert(list_next(&proc_list) == &(initproc->list_link));
    assert(list_prev(&proc_list) == &(initproc->list_link));

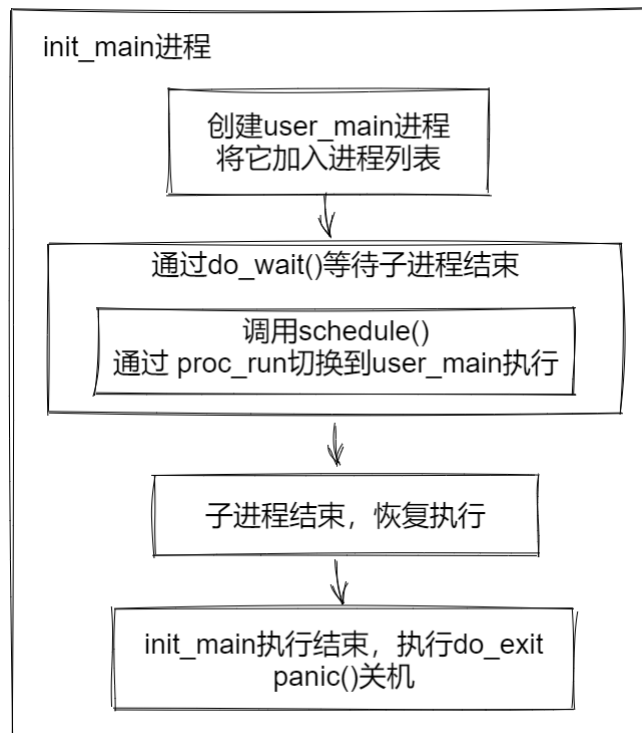
    cprintf("init check memory pass.\n");
    return 0;
}

```

注意到，本次实验代码中新建了一个进程执行函数 `user_main()`，这个进程里我们将通过 `exec()` 实现用户进程的执行。在这一步中，我们为新的进程创建了 `proc_struct`，并将其加入进程链表，但此时我们仅进行了进程的创建（fork，即复制了父进程的副本），用户进程资源的分配是在之后进程执行是通过 `exec` 完成的。

第二步. 用户进程的执行

接下来，`init_main` 作为管理者，调用 `do_wait()` 等待子进程的结束。等待的过程中通过 `schedule()` 调度 `user_main` 执行。



我们来看下user_main()做了些什么：

```
// kern/process/proc.c
#define __KERNEL_EXECVE(name, binary, size) ({
    cprintf("kernel_execve: pid = %d, name = \"%s\".\n",
        current->pid, name);
    kernel_execve(name, binary, (size_t)(size));
})

#define KERNEL_EXECVE(x) ({
    extern unsigned char _binary_obj__user_##x##_out_start[], \
        _binary_obj__user_##x##_out_size[];
    __KERNEL_EXECVE(#x, _binary_obj__user_##x##_out_start, \
        _binary_obj__user_##x##_out_size);
})

// user_main - kernel thread used to exec a user program
static int
user_main(void *arg) {
    KERNEL_EXECVE(hello);
    panic("user_main execve failed.\n");
}
```

`_binary_obj__user_##x##_out_start` 和 `_binary_obj__user_##x##_out_size` 都是编译的时候自动生成的符号。注意这里的 `##x##`，按照C语言宏的语法，会直接把x的变量名代替进去。

于是，我们在 `user_main()` 所做的，就是执行了

```
kern_execve("hello",
    _binary_obj__user_hello_out_start, _binary_obj__hello_exit_out_size)
```

这么一个函数。

如果你熟悉 `exec()` 函数，或许已经猜到这里我们做了什么。

实际上，就是加载了存储在这个位置的程序 `hello` 并在 `user_main` 这个进程里开始执行。这时 `user_main` 就从内核进程变成了用户进程。

第三步. 用户进程通过exec执行用户程序

接下来，让我们了解 `user_main` 是如何通过 `exec` 执行用户程序的。

在内核中我们实现了 `do_execve()` 函数，在 `do_execve()` 函数中，我们调用 `load_icode()` 为用户进程分配新的资源，包括 `mm`、页表、用户栈等等，更重的是下面两行代码：

```
tf->epc = elf->e_entry;
tf->status = sstatus & ~(SSTATUS_SPP | SSTATUS_SPIE);
```

第一行，将**进程中断帧的epc寄存器**内写入了可执行文件的程序入口。

第二行，将 `sstatus` 的 `SPP` 域置0，使得中断处理结束 `sret` 返回时返回至 `Umode`。

将 `tf` 内容改写后，中断帧的上下文发生了变化，当**中断结束返回（sret）**时，会切换上下文把 `epc` 的值写入 `pc`，从而下一步执行可执行文件的程序；并且 `sret` 还会根据 `SPP` 的值（它认为是触发中断时的原始权限），**返回到原本的权限，此时 `SPP` 为0，所以会从 `S` 态切换到用户态。**

这样我们就通过**中断返回**实现了用户进程的切换和执行。

等等？？？

我们触发中断了吗？没有啊

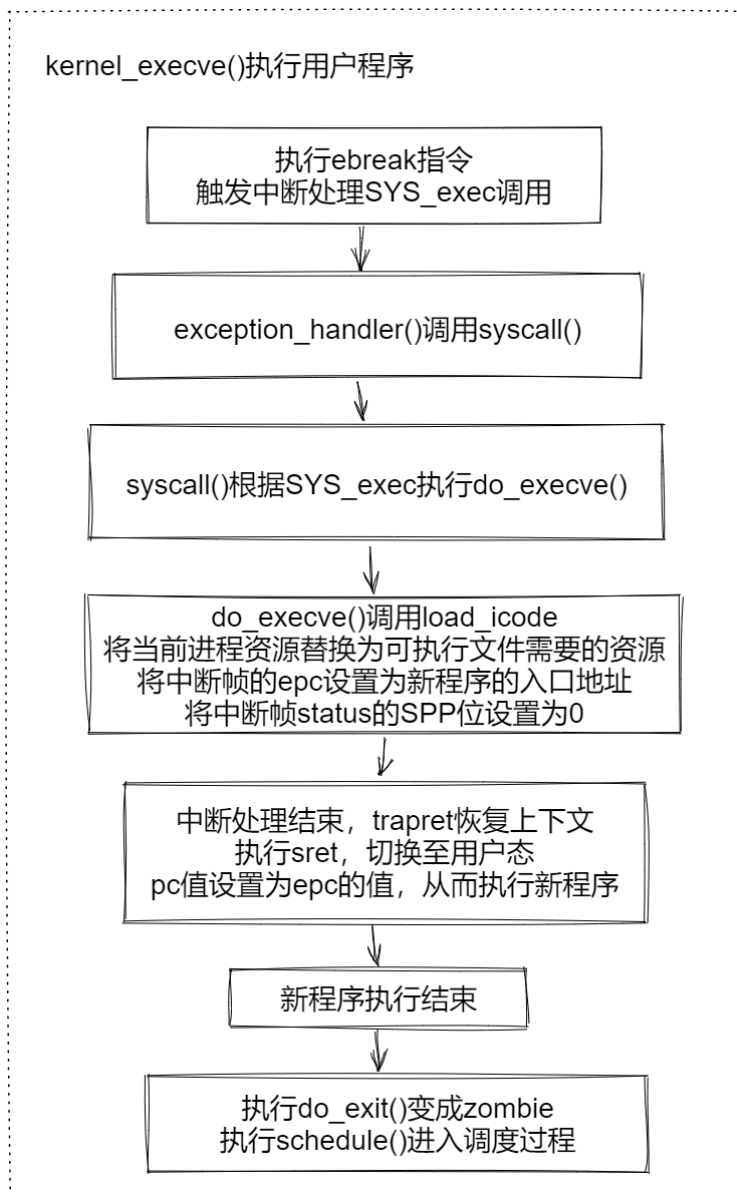
那怎么会有中断返回的操作？

回想一下，我们目前想要做的是让 `user_main()` 调用 `kernel_execve()` 实现 `exec` 的功能。而内核中我们是实现的是 `do_execve()`。 `kernel_execve()` 执行时是处于 `Smode` 的，因此他有足够的权限调用 `do_execve()` 执行对应的功能，但是直接执行只是更改了中断帧，如果没有发生中断返回（`sret` 指令）那么就不会恢复上下文，不会切换至 `Umode`，并跳转至 `epc` 继续执行。

这里，我们可以人为的触发中断：

```
// kernel_execve - do SYS_exec syscall to exec a user program called by
user_main kernel_thread
static int
kernel_execve(const char *name, unsigned char *binary, size_t size) {
    int64_t ret=0, len = strlen(name);
    asm volatile(
        "li a0, %1\n"
        "lw a1, %2\n"
        "lw a2, %3\n"
        "lw a3, %4\n"
        "lw a4, %5\n"
        "li a7, 10\n"
        "ebreak\n"
        "sw a0, %0\n"
        : "=m"(ret)
        : "i"(SYS_exec), "m"(name), "m"(len), "m"(binary), "m"(size)
        : "memory");
    //cprintf("ret = %d\n", ret);
    return ret;
}
```

我们**通过ebreak指令进入trap处理**，再通过trap.c中的处理函数转发至do_execve()执行，这样do_execve()就是在中断中更改了中断帧，可以使得trap返回时完成我们想要的效果：切换至用户态，执行用户程序。



SPP

sstatus中的SPP域用于保存trap发生时的权限模式（即处于什么态），trap结束后sret指令会根据SPP的值恢复权限模式。**0为Umode，1为Smode。**

第四步. 用户程序通过cprintf调用系统调用输出信息

本次实验的用户程序在 user/hello.c 中实现，代码如下：

```
#include <stdio.h>
#include <ulib.h>

int main(void) {
    cprintf("Hello world!!.\n");
    cprintf("I am process %d.\n", getpid());
    cprintf("hello pass.\n");
    return 0;
}
```

hello应用程序只是输出一些字符串，并通过系统调用 `sys_getpid`（在 `getpid` 函数中调用）输出代表hello应用程序执行的用户进程的进程标识-- `pid`。

在用户程序里使用的 `cstdio` 也是在 `user/libs/stdio.c` 重新实现的，和之前比最大的区别是，打印字符的时候需要经过系统调用 `sys_putc()`，而不能直接调用 `sbi_console_putchar()`。这是自然的，因为只有在Supervisor Mode才能通过 `ecall` 调用Machine Mode的OpenSBI接口，而在用户态(U Mode)就不能直接使用M mode的接口，而是要通过系统调用。

如何能够找到hello应用程序

这需要分析ucore和hello是如何编译的。然后在本实验源码目录下执行 `make v=`，在最下面可得到如下输出：

```
...
+ cc user/hello.c
riscv64-unknown-elf-gcc -Iuser/ -mcmodel=medany -O2 -std=gnu99 -wno-unused
-fno-builtin -Wall -nostdinc -fno-stack-protector -ffunction-sections -
fdata-sections -Ilibs/ -Iuser/include/ -Iuser/libs/ -c user/hello.c -o
obj/user/hello.o
+ cc user/libs/panic.c
riscv64-unknown-elf-gcc -Iuser/libs/ -mcmodel=medany -O2 -std=gnu99 -wno-
unused -fno-builtin -Wall -nostdinc -fno-stack-protector -ffunction-
sections -fdata-sections -Ilibs/ -Iuser/include/ -Iuser/libs/ -c
user/libs/panic.c -o obj/user/libs/panic.o
+ cc user/libs/syscall.c
riscv64-unknown-elf-gcc -Iuser/libs/ -mcmodel=medany -O2 -std=gnu99 -wno-
unused -fno-builtin -Wall -nostdinc -fno-stack-protector -ffunction-
sections -fdata-sections -Ilibs/ -Iuser/include/ -Iuser/libs/ -c
user/libs/syscall.c -o obj/user/libs/syscall.o
+ cc user/libs/ulib.c
riscv64-unknown-elf-gcc -Iuser/libs/ -mcmodel=medany -O2 -std=gnu99 -wno-
unused -fno-builtin -Wall -nostdinc -fno-stack-protector -ffunction-
sections -fdata-sections -Ilibs/ -Iuser/include/ -Iuser/libs/ -c
user/libs/ulib.c -o obj/user/libs/ulib.o
+ cc user/libs/initcode.S
riscv64-unknown-elf-gcc -Iuser/libs/ -mcmodel=medany -O2 -std=gnu99 -wno-
unused -fno-builtin -Wall -nostdinc -fno-stack-protector -ffunction-
sections -fdata-sections -Ilibs/ -Iuser/include/ -Iuser/libs/ -c
user/libs/initcode.S -o obj/user/libs/initcode.o
+ cc user/libs/stdio.c
riscv64-unknown-elf-gcc -Iuser/libs/ -mcmodel=medany -O2 -std=gnu99 -wno-
unused -fno-builtin -Wall -nostdinc -fno-stack-protector -ffunction-
sections -fdata-sections -Ilibs/ -Iuser/include/ -Iuser/libs/ -c
user/libs/stdio.c -o obj/user/libs/stdio.o
+ cc user/libs/umain.c
```

```

riscv64-unknown-elf-gcc -Iuser/libs/ -mcmmodel=medany -O2 -std=gnu99 -wno-
unused -fno-builtin -Wall -nostdinc -fno-stack-protector -ffunction-
sections -fdata-sections -Ilibs/ -Iuser/include/ -Iuser/libs/ -c
user/libs/umain.c -o obj/user/libs/umain.o
riscv64-unknown-elf-ld -m elf64lriscv -nostdlib --gc-sections -T
tools/user.ld -o obj/__user_hello.out obj/user/libs/panic.o
obj/user/libs/syscall.o obj/user/libs/ulib.o obj/user/libs/initcode.o
obj/user/libs/stdio.o obj/user/libs/umain.o obj/libs/string.o
obj/libs/printfmt.o obj/libs/hash.o obj/libs/rand.o obj/user/hello.o
+ ld bin/kernel
riscv64-unknown-elf-ld -m elf64lriscv -nostdlib --gc-sections -T
tools/kernel.ld -o bin/kernel obj/kern/init/entry.o obj/kern/init/init.o
obj/kern/libs/stdio.o obj/kern/libs/readline.o obj/kern/debug/panic.o
obj/kern/debug/kdebug.o obj/kern/debug/kmonitor.o obj/kern/driver/ide.o
obj/kern/driver/clock.o obj/kern/driver/console.o obj/kern/driver/picirq.o
obj/kern/driver/intr.o obj/kern/trap/trap.o obj/kern/trap/trapentry.o
obj/kern/mm/pmm.o obj/kern/mm/vmm.o obj/kern/mm/swap.o
obj/kern/mm/kmalloc.o obj/kern/mm/swap_fifo.o obj/kern/mm/default_pmm.o
obj/kern/fs/swapfs.o obj/kern/process/entry.o obj/kern/process/switch.o
obj/kern/process/proc.o obj/kern/schedule/sched.o
obj/kern/syscall/syscall.o obj/libs/string.o obj/libs/printfmt.o
obj/libs/hash.o obj/libs/rand.o --format=binary obj/__user_hello.out --
format=default
riscv64-unknown-elf-objcopy bin/kernel --strip-all -O binary bin/ucore.bin

```

从中可以看出，hello应用程序不仅仅是 `hello.c`，还包含了支持hello应用程序的用户态库：

- `user/libs/initcode.S`：所有应用程序的起始用户态执行地址“`_start`”，调用 `umain` 函数。
- `user/libs/umain.c`：实现了 `umain` 函数，这是所有应用程序执行的第一个C函数，它将调用应用程序的 `main` 函数，并在 `main` 函数结束后调用 `exit` 函数，而 `exit` 函数最终将调用 `sys_exit` 系统调用，让操作系统回收进程资源。
- `user/libs/ulib.[ch]`：实现了最小的C函数库，除了一些与系统调用无关的函数，其他函数是对访问系统调用的包装。
- `user/libs/syscall.[ch]`：用户层发出系统调用的具体实现。
- `user/libs/stdio.c`：实现 `cprintf` 函数，通过系统调用 `sys_putc` 来完成字符输出。
- `user/libs/panic.c`：实现 `__panic`/`__warn` 函数，通过系统调用 `sys_exit` 完成用户进程退出。

除了这些用户态库函数实现外，还有一些 `libs/*.ch` 是操作系统内核和应用程序共用的函数实现。这些用户库函数其实在本质上与UNIX系统中的标准libc没有区别，只是实现得很简单，但hello应用程序的正确执行离不开这些库函数。

在make的最后一步执行了一个ld命令，把hello应用程序的执行码 `obj/__user_hello.out` 连接在了 `ucore kernel` 的末尾。且ld命令会在kernel中会把 `__user_hello.out` 的位置和大小记录在全局变量 `_binary_obj__user_hello_out_start` 和

`_binary_obj__user_hello_out_size` 中，这样这个hello用户程序就能够和ucore内核一起被OpenSBI加载到内存里中，并且通过这两个全局变量定位hello用户程序执行码的起始位置和大。在后面的与文件系统相关的实验后，ucore会提供一个简单的文件系统，那时所有的用户程序就都不再用这种方法进行加载了，而可以用大家熟悉的文件方式进行加载了。

用户进程的虚拟地址空间

在tools/user.ld描述了用户程序的用户虚拟空间的执行入口虚拟地址：


```
SECTIONS {
    /* Load programs at this address: "." means the current address */
    . = 0x800020;
```

在tools/kernel.ld描述了操作系统的内核虚拟空间的起始入口虚拟地址：

```
BASE_ADDRESS = 0xFFFFFFF0200000;

SECTIONS
{
    /* Load the kernel at this address: "." means the current address */
    . = BASE_ADDRESS;
```

这样ucore把用户进程的虚拟地址空间分了两块，一块与内核线程一样，是所有用户进程都共享的内核虚拟地址空间，映射到同样的物理内存空间中，这样在物理内存中只需放置一份内核代码，使得用户进程从用户态进入核心态时，内核代码可以统一应对不同的内核程序；另外一块是用户虚拟地址空间，虽然虚拟地址范围一样，但映射到不同且没有交集的物理内存空间中。这样当ucore把用户进程的执行代码（即应用程序的执行代码）和数据（即应用程序的全局变量等）放到用户虚拟地址空间中时，确保了各个进程不会“非法”访问到其他进程的物理内存空间。

那么，如何在用户程序调用系统调用 `sys_putc()` 呢？

我们可以在用户态为程序提供一个调用的接口，真正的处理都在内核态进行。

系统调用

操作系统应当提供给用户程序一些接口，让用户程序使用操作系统提供的服务。这些接口就是**系统调用**。用户程序在用户态运行(U mode)，系统调用在内核态执行(S mode)。这里有一个CPU的特权级切换的过程，要用到 `ecall` 指令从U mode进入S mode。想想我们之前用 `ecall` 做过什么？在S mode调用OpenSBI提供的M mode接口。当时我们用 `ecall` 进入了M mode，剩下的事情就交给OpenSBI来完成，然后我们收到OpenSBI返回的结果。

现在我们用 `ecall` 从U mode进入S mode之后，对应的处理需要我们编写内核系统调用的代码来完成。

另外，我们总不能让用户程序里直接调用 `ecall`。通常我们会把这样的系统调用操作封装成一个一个的函数，作为“标准库”提供给用户使用。例如在linux里，写一个C程序时使用 `printf()` 函数进行输出，实际上是要进行 `write()` 的系统调用，通过内核把输出打印到命令行或其他地方。

对于用户进程的管理，有四个系统调用比较重要。

`sys_fork()`：把当前的进程复制一份，创建一个子进程，原先的进程是父进程。接下来两个进程都会收到 `sys_fork()` 的返回值，如果返回0说明当前位于子进程中，返回一个非0的值（子进程的PID）说明当前位于父进程中。然后就可以根据返回值的不同，在两个进程里进行不同的处理。

`sys_exec()`：在当前的进程下，停止原先正在运行的程序，开始执行一个新程序。PID不变，但是内存空间要重新分配，执行的机器代码发生了改变。我们可以用 `fork()` 和 `exec()` 配合，在当前程序不停止的情况下，开始执行另一个程序。

`sys_exit()`：退出当前的进程。

`sys_wait()`：挂起当前的进程，等到特定条件满足的时候再继续执行。

系统调用转发

首先我们在头文件里定义一些**系统调用的编号**。

```

// libs/unistd.h
#ifndef __LIBS_UNISTD_H__
#define __LIBS_UNISTD_H__

#define T_SYSCALL          0x80

/* syscall number */
#define SYS_exit            1
#define SYS_fork            2
#define SYS_wait            3
#define SYS_exec            4
#define SYS_clone           5
#define SYS_yield           10
#define SYS_sleep           11
#define SYS_kill            12
#define SYS_gettime         17
#define SYS_getpid          18
#define SYS_brk              19
#define SYS_mmap             20
#define SYS_munmap           21
#define SYS_shmem            22
#define SYS_putc             30
#define SYS_pgdir            31

/* SYS_fork flags */
#define CLONE_VM              0x00000100 // set if VM shared between processes
#define CLONE_THREAD          0x00000200 // thread group

#endif /* !__LIBS_UNISTD_H__ */

```

我们注意系统调用需要在S mode执行，因此我们需要进行模式的切换。在用户态进行系统调用的核心操作是，通过内联汇编进行 `ecall` 环境调用。这将产生一个trap, 进入S mode进行异常处理。

```

// user/libs/syscall.c
#include <defs.h>
#include <unistd.h>
#include <stdarg.h>
#include <syscall.h>
#define MAX_ARGS            5
static inline int syscall(int num, ...) {
    //va_list, va_start, va_arg都是C语言处理参数个数不定的函数的宏
    //在stdarg.h里定义
    va_list ap; //ap: 参数列表(此时未初始化)
    va_start(ap, num); //初始化参数列表, 从num开始
    //First, va_start initializes the list of variable arguments as a va_list.
    uint64_t a[MAX_ARGS];
    int i, ret;
    for (i = 0; i < MAX_ARGS; i++) { //把参数依次取出
        /*Subsequent executions of va_arg yield the values of the additional
        arguments
        in the same order as passed to the function.*/
        a[i] = va_arg(ap, uint64_t);
    }
    va_end(ap); //Finally, va_end shall be executed before the function returns.
    asm volatile (
        "ld a0, %1\n"

```

```

        "ld a1, %2\n"
        "ld a2, %3\n"
        "ld a3, %4\n"
        "ld a4, %5\n"
        "ld a5, %6\n"
        "ecall\n"
        "sd a0, %0"
        : "=m" (ret)
        : "m"(num), "m"(a[0]), "m"(a[1]), "m"(a[2]), "m"(a[3]), "m"(a[4])
        : "memory");
    //num存到a0寄存器, a[0]存到a1寄存器
    //ecall的返回值存到ret
    return ret;
}
int sys_exit(int error_code) { return syscall(SYS_exit, error_code); }
int sys_fork(void) { return syscall(SYS_fork); }
int sys_wait(int pid, int *store) { return syscall(SYS_wait, pid, store); }
int sys_yield(void) { return syscall(SYS_yield); }
int sys_kill(int pid) { return syscall(SYS_kill, pid); }
int sys_getpid(void) { return syscall(SYS_getpid); }
int sys_putc(int c) { return syscall(SYS_putc, c); }

```

我们下面看看trap.c是如何转发这个系统调用的。

```

// kern/trap/trap.c
void exception_handler(struct trapframe *tf) {
    int ret;
    switch (tf->cause) { //通过中断帧里 scause寄存器的数值, 判断出当前是来自USER_ECALL
        的异常
        case CAUSE_USER_ECALL:
            //cprintf("Environment call from U-mode\n");
            tf->epc += 4;
            //sepc寄存器是产生异常的指令的位置, 在异常处理结束后, 会回到sepc的位置继续执行
            //对于ecall, 我们希望sepc寄存器要指向产生异常的指令(ecall)的下一条指令
            //否则就会回到ecall执行再执行一次ecall, 无限循环
            syscall(); // 进行系统调用处理
            break;
        /*other cases .... */
    }
}

// kern/syscall/syscall.c
#include <unistd.h>
#include <proc.h>
#include <syscall.h>
#include <trap.h>
#include <stdio.h>
#include <pmm.h>
#include <assert.h>
//这里把系统调用进一步转发给proc.c的do_exit(), do_fork()等函数
static int sys_exit(uint64_t arg[]) {
    int error_code = (int)arg[0];
    return do_exit(error_code);
}
static int sys_fork(uint64_t arg[]) {
    struct trapframe *tf = current->tf;
    uintptr_t stack = tf->gpr.sp;
    return do_fork(0, stack, tf);
}

```

```

}
static int sys_wait(uint64_t arg[]) {
    int pid = (int)arg[0];
    int *store = (int *)arg[1];
    return do_wait(pid, store);
}
static int sys_exec(uint64_t arg[]) {
    const char *name = (const char *)arg[0];
    size_t len = (size_t)arg[1];
    unsigned char *binary = (unsigned char *)arg[2];
    size_t size = (size_t)arg[3];
    //用户态调用的exec(), 归根结底是do_execve()
    return do_execve(name, len, binary, size);
}
static int sys_yield(uint64_t arg[]) {
    return do_yield();
}
static int sys_kill(uint64_t arg[]) {
    int pid = (int)arg[0];
    return do_kill(pid);
}
static int sys_getpid(uint64_t arg[]) {
    return current->pid;
}
static int sys_putc(uint64_t arg[]) {
    int c = (int)arg[0];
    cputchar(c);
    return 0;
}
//这里定义了函数指针的数组syscalls, 把每个系统调用编号的下标上初始化为对应的函数指针
static int (*syscalls[])(uint64_t arg[]) = {
    [SYS_exit]          sys_exit,
    [SYS_fork]          sys_fork,
    [SYS_wait]          sys_wait,
    [SYS_exec]          sys_exec,
    [SYS_yield]         sys_yield,
    [SYS_kill]          sys_kill,
    [SYS_getpid]        sys_getpid,
    [SYS_putc]          sys_putc,
};

#define NUM_SYSCALLS      ((sizeof(syscalls)) / (sizeof(syscalls[0])))

void syscall(void) {
    struct trapframe *tf = current->tf;
    uint64_t arg[5];
    int num = tf->gpr.a0; //a0寄存器保存了系统调用编号
    if (num >= 0 && num < NUM_SYSCALLS) { //防止syscalls[num]下标越界
        if (syscalls[num] != NULL) {
            arg[0] = tf->gpr.a1;
            arg[1] = tf->gpr.a2;
            arg[2] = tf->gpr.a3;
            arg[3] = tf->gpr.a4;
            arg[4] = tf->gpr.a5;
            tf->gpr.a0 = syscalls[num](arg);
            //把寄存器里的参数取出来, 转发给系统调用编号对应的函数进行处理
            return ;
        }
    }
}

```

```

}
//如果执行到这里，说明传入的系统调用编号还没有被实现，就崩掉了。
print_trapframe(tf);
panic("undefined syscall %d, pid = %d, name = %s.\n",
      num, current->pid, current->name);
}

```

这样我们就在U mode通过ecall触发trap进入S mode，在trap中实现了系统调用的执行。

系统调用的处理流程



第五步. 了解用户进程的退出和等待

退出

在进程执行完工作后，需要退出，释放资源，正我们在 `do_execve` 函数末尾看到的一样，退出进程是调用 `do_exit` 函数来实现的。

```

execve_exit:
    do_exit(ret);
    panic("already exit: %e.\n", ret);

```

1.如果是内核线程则不需要回收空间

2.如果是用户进程，就开始回收，首先执行 `1cr3(boot_cr3)`；切换到内核的页表上，这样用户进程就只能在内核的虚拟地址空间上执行，因为内核权限高。如果当前进程的被调用数减一后等于0，那么就没有其他进程在使用了，就可以进行回收，先回收内存资源，调用 `exit_mmap` 函数释放 `mm` 中的 `vma` 描述的进程合法空间中实际分配的内存，然后把对应的页表项内容清空，最后把页表项和页目录表清空。然后调用 `put_pgdir` 函数释放页目录表所占用的内存。最后调用 `mm_destroy` 释放 `vma` 与 `mm` 的内存。把 `mm` 置为 `NULL`，表示与当前进程相关的用户虚拟内存空间和对应的内存管理成员变量所占的内核虚拟内存空间已经回收完毕；

3.设置进程的状态为 `PROC_ZOMBIE` 表示该进程要死了，等待父进程来回收资源，回收内核栈和进程控制块。当前进程的退出码为 `error_code` 表示该进程已经不能被调度。

4.如果当前进程的父进程处于等待子进程的状态，则唤醒父进程让父进程回收资源。

5.如果该进程还有子进程，那么就指向第一个孩子，把后面的孩子全部置为空，然后把孩子过继给内核线程 `initproc`，把子进程插入到 `initproc` 的孩子链表中，如果某个子进程的状态时要死的状态，并且 `initproc` 的状态时等待孩子的状态，则唤醒 `initproc` 来回收子进程的资源。

6.然后开启中断，执行 `schedule` 函数，选择新的进程执行

等待

那么父进程如何完成对子进程的最后回收工作呢？这要求父进程要执行 `wait` 用户函数或 `wait_pid` 用户函数，这两个函数的区别是，`wait` 函数等待任意子进程的结束通知，而 `wait_pid` 函数等待进程id号为 `pid` 的子进程结束通知。这两个函数最终访问 `sys_wait` 系统调用接口让 `ucore` 来完成对子进程的最后回收工作，即回收子进程的内核栈和进程控制块所占内存空间，具体流程如下：

1.首先进行检查

2.若 `pid` 等于0，就去找对应的孩子进程，否则就任意的一个快死的孩子进程。如果此子进程的执行状态不为 `PROC_ZOMBIE`，表明此子进程还没有退出，则当前进程只好设置自己的执行状态为 `PROC_SLEEPING`，睡眠原因为 `WT_CHILD`（即等待子进程退出），调用 `schedule()` 函数选择新的进程执行，自己睡眠等待，如果被唤醒，则重复该步骤执行；

3.如果此子进程的执行状态为 `PROC_ZOMBIE`，表明此子进程处于退出状态，需要当前进程（即子进程的父进程）完成对子进程的最终回收工作，即首先把子进程控制块从两个进程队列 `proc_list` 和 `hash_list` 中删除，并释放子进程的内核堆栈和进程控制块。自此，子进程才彻底地结束了它的执行过程，消除了它所占用的所有资源。

六、本节知识点回顾

在本次实验中，你需要了解以下知识点：

1. 进程的创建
2. `exec`执行用户进程
3. 系统调用的转发和实现
4. 进程的退出和等待

七、下一实验简单介绍

下一次实验，我们将进行进程调度。