# 操作系统实验

# lab1 内核、Boot和printf

# 内容提要

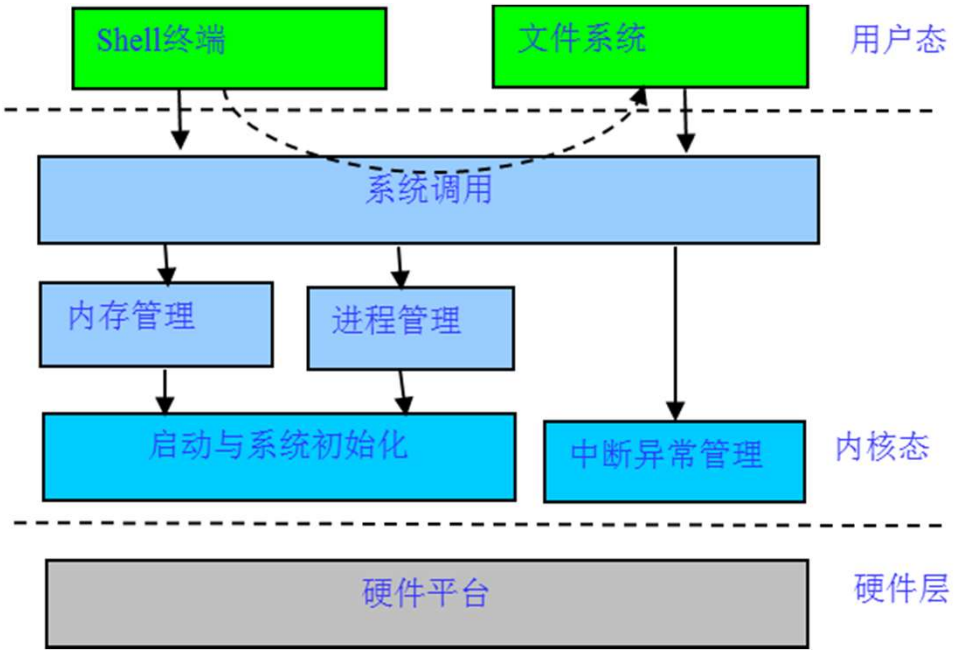
- 实验概述
- 实验内容
  - 修改交叉编译器的路径
  - 解析ELF文件
  - 调整内核到正确位置
  - 设置栈指针并跳转到主函数
  - 实现printf字符输出
- 测试结果
- Lab1-extra

# 实验概述

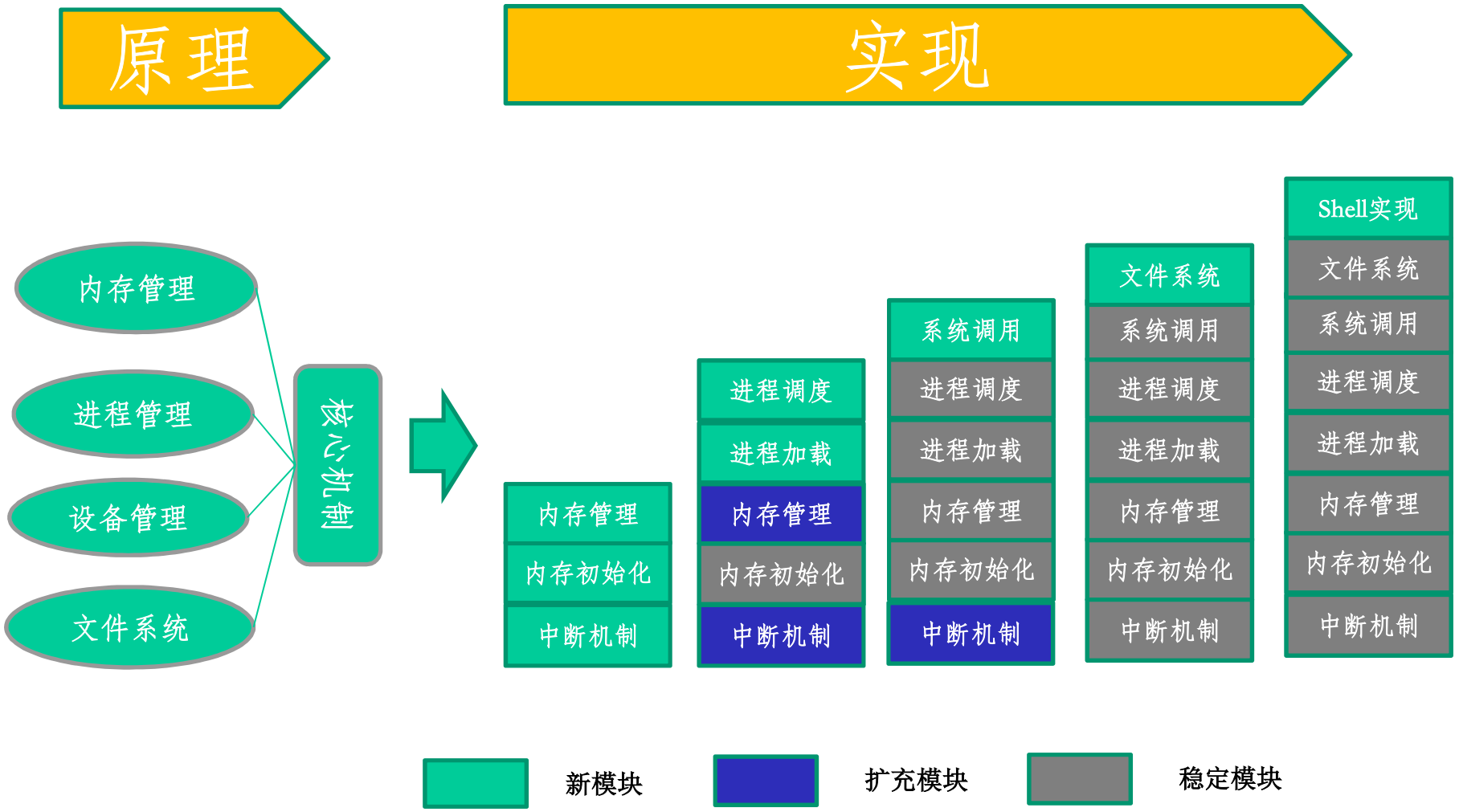
- 操作系统的启动
  - 了解操作系统的启动原理及流程
- 修改内核并实现一些自定义的功能
  - 了解Makefile——内核代码的地图
  - 了解ELF——深入探究编译与链接
  - 了解MIPS 内存布局——寻找内核的正确位置
  - 了解Linker Script——控制加载地址
- MIPS 汇编与 C 语言
- 实战 printf

# 小操作系统实验的各个部分及相互关系

- 实验设计（七个实验都已在MIPS仿真器上实现）
  - 基础知识
  - 启动和系统初始化
  - 内存管理
  - 进程管理和中断异常机制
  - 系统调用
  - 文件系统
  - 命令解释程序



# 增量式实现方法


原理
实现
内存管理
进程管理
设备管理
文件系统
核心机制
内存管理
内存初始化
中断机制
进程调度
进程加载
内存管理
内存初始化
中断机制
系统调用
进程调度
进程加载
内存管理
内存初始化
中断机制
文件系统
系统调用
进程调度
进程加载
内存管理
内存初始化
中断机制
Shell实现
文件系统
系统调用
进程调度
进程加载
内存管理
内存初始化
中断机制
新模块
扩充模块
稳定模块

# 操作系统的启动原理及流程

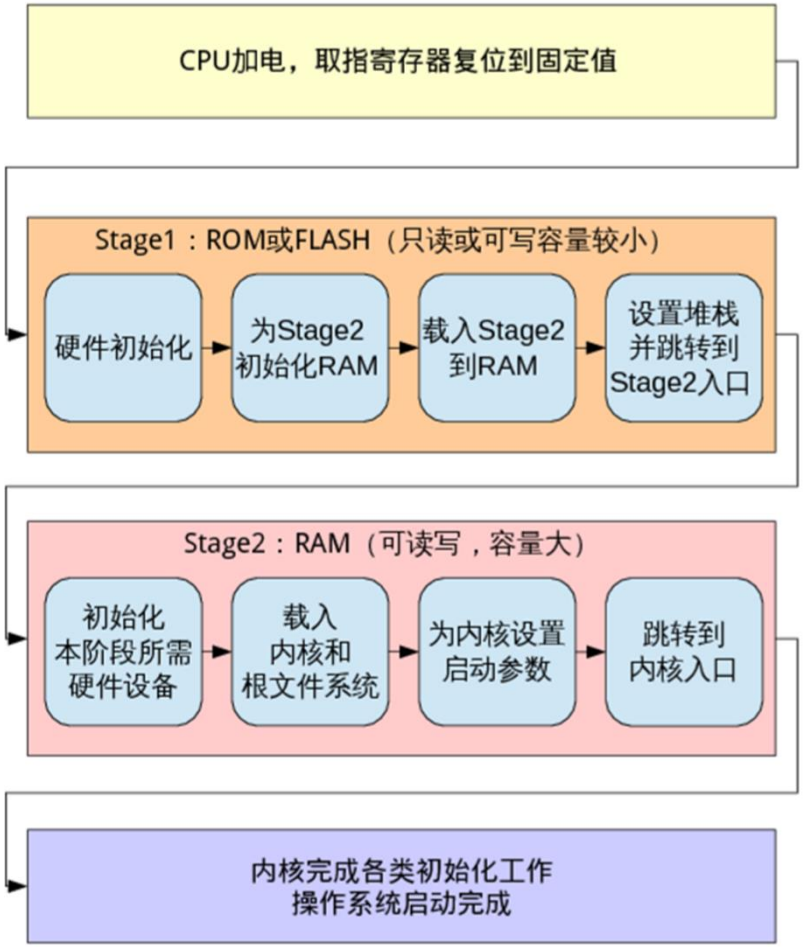
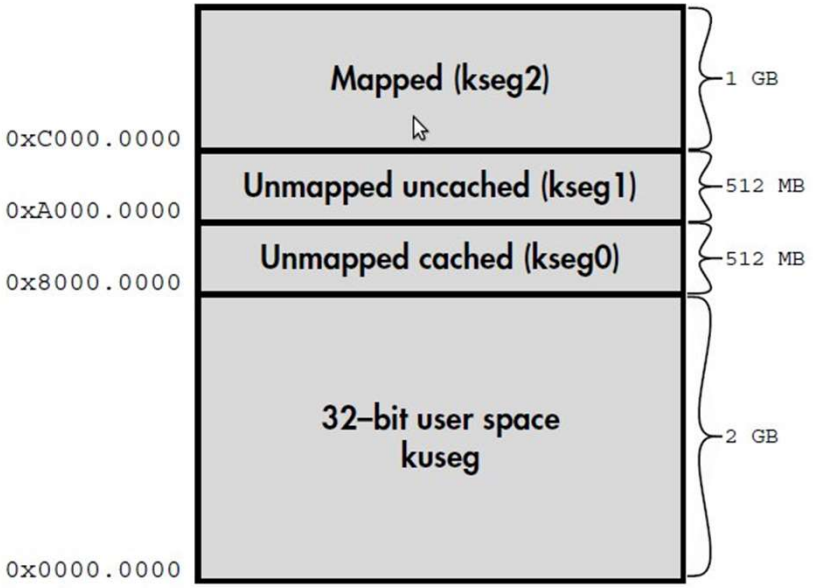



图 1.1: 启动的基本步骤

# gxemul 中的启动流程

- gxemul 仿真器支持直接加载elf 格式的内核
  - gxemul 已经提供了bootloader
- 启动流程被简化为加载内核到内存，之后跳转到内核的入口。
- 整个启动过程非常简单



# 代码导读

- User Space(kuseg) 0x00000000~0x7FFFFFFF(2G)：
  - 用户模式下可用，通过MMU 映射到实际的物理地址上。
- Kernel Space Unmapped Cached(kseg0) 0x80000000~0x9FFFFFFF(512MB)：
  - 只需要将地址的高3 位清零，就被转换为物理地址。一般情况下，都是通过cache 对这段区域的地址进行访问。
- Kernel Space Unmapped Uncached(kseg1) 0xA0000000~0xBFFFFFFF(512MB)：
  - 通过将高3 位清零的方法将地址映射为相应的物理地址，然后映射到物理内存中512MB 大小的低字段。
- Kernel Space Mapped Cached(kseg2) 0xC0000000~0xFFFFFFFF(1GB)：
  - 这段地址只能在内核态下使用并且需要MMU 的转换。

# Makefile——内核代码的地图

- make 工具一般用于 维护工程。

```
target: dependencies
    command 1
    command 2
    ...
    command n
```

- 其中，target 是我们构建 (Build) 的目标，而 dependencies 是构建该目标所需的其 它文件或其他目标。

# 代码导读

- Makefile
  - 代码链接顺序
  - 环境变量

Listing 1: 顶层 Makefile

```
# Main makefile
#
# Copyright (C) 2007 Beihang University
# Written by Zhu Like ( zlike@cse.buaa.edu.cn )
#

drivers_dir          := drivers
boot_dir          := boot
init_dir          := init
lib_dir                  := lib
tools_dir          := tools
vmlinux_elf          := gxemul/vmlinux

link_script    := $(tools_dir)/scse0_3.lds

modules                  := boot drivers init lib
objects                  := $(boot_dir)/start.o                          \
                                $(init_dir)/main.o                          \
                                $(init_dir)/init.o                          \
                                   $(drivers_dir)/gxconsole/console.o \
                                $(lib_dir)/*.o                                  \

.PHONY: all $(modules) clean

all: $(modules) vmlinux

vmlinux: $(modules)
        $(LD) -o $(vmlinux_elf) -N -T $(link_script) $(objects)

$(modules):
        $(MAKE) --directory=$@

clean:
        for d in $(modules);        \
                do                                          \
                        $(MAKE) --directory=$$d clean; \
                done; \
        rm -rf *.o *~ $(vmlinux_elf)

include include.mk
```

# Exercise 1.1 修改交叉编译器的路径

Listing 2: include.mk

```
1  # Common includes in Makefile
2  #
3  # Copyright (C) 2007 Beihang University
4  # Written By Zhu Like ( zlike@cse.buaa.edu.cn )
5
6
7  CROSS_COMPILE := /opt/eldk/usr/bin/mips_4KC-
8  CC          := $(CROSS_COMPILE)gcc
9  CFLAGS          := -O -G 0 -mno-abicalls -fno-builtin -Wa,-xgot -Wall -fPIC -Werror
10 LD          := $(CROSS_COMPILE)ld
```

- 阅读顶层Mackfile文件后，会发现还有几个关键的变量没有定义，即LD、MAKE 等出现在编译指令中的变量。观察其最后一行引用了include.mk文件，显然这些未定义的变量是被定义在了这个文件中，其文件内容如上图所示。
- CROSS_COMPILE 变量是在定义编译和连接等指令的前缀，是交叉编译器的具体位置。但该路径是错误的，将其修改为正确路径，并执行 make 指令使其在 gxemul 目录下生成 vmlinux 的内核文件。

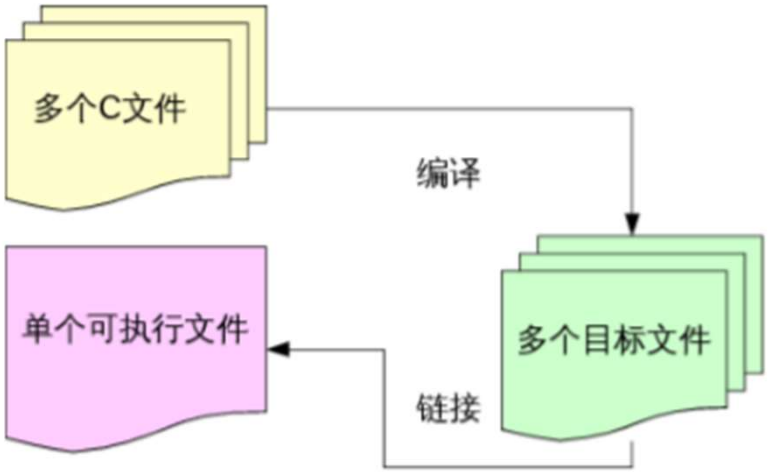
# Exercise 1.1 修改交叉编译器的路径

```
user3@ubuntu14:~/user3-lab$ make
make --directory=boot
make[1]: Entering directory `/home/user3/user3-lab/boot'
bin/mips_4KC-gcc -O -G 0 -mno-abicalls -fno-builtin -Wa,-xgot -Wall
 -fPIC -I../include/ -c start.S
make[1]: bin/mips_4KC-gcc: Command not found
make[1]: *** [start.o] Error 127
make[1]: Leaving directory `/home/user3/user3-lab/boot'
make: *** [boot] Error 2
```

```
user3@ubuntu14:~/user3-lab$ make
make --directory=boot
make[1]: Entering directory `/home/user3/user3-lab/boot'
make[1]: Nothing to be done for `all'.
make[1]: Leaving directory `/home/user3/user3-lab/boot'
make --directory=drivers
make[1]: Entering directory `/home/user3/user3-lab/drivers'
make --directory=gxconsole
make[2]: Entering directory `/home/user3/user3-lab/drivers/gxconsole'
make[2]: Nothing to be done for `all'.
make[2]: Leaving directory `/home/user3/user3-lab/drivers/gxconsole'
make[1]: Leaving directory `/home/user3/user3-lab/drivers'
make --directory=init
make[1]: Entering directory `/home/user3/user3-lab/init'
make[1]: Nothing to be done for `all'.
make[1]: Leaving directory `/home/user3/user3-lab/init'
make --directory=lib
make[1]: Entering directory `/home/user3/user3-lab/lib'
make[1]: Nothing to be done for `all'.
make[1]: Leaving directory `/home/user3/user3-lab/lib'
/opt/eldk/usr/bin/mips_4KC-ld -o gxemul/vmlinux -N -T tools/scse0_3.lds boot/start.
o init/main.o init/init.o drivers/gxconsole/console.o lib/*.o
user3@ubuntu14:~/user3-lab$ ls gxemul/
elfinfo  r3000  r3000_test  test  vmlinux
user3@ubuntu14:~/user3-lab$
```

# ELF——深入探究编译与链接

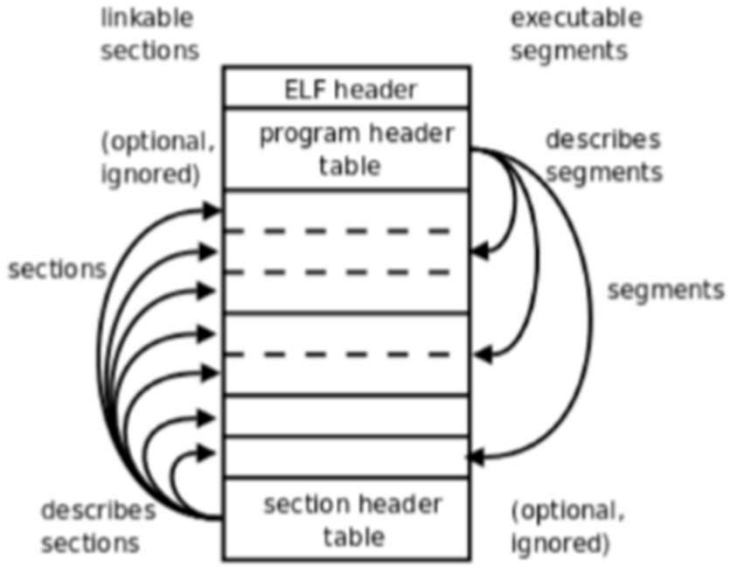
- 对于拥有多个 c 文件的工程来说，编译器会首先将所有的 c 文件以文件为单位，编 译成.o 文件。最后再将所有的.o 文件以及函数库连接在一起，形成最终的可执行文件，整个过程如右图所示。




- 在目标文件（也就是我们通过-c选项生成的.o文件）中，记录了代码各个段的具体信息。连接器通过这些信息来将目标文件链接到一起。而ELF(Executable and Linkable Format)正是 Unix 上常用的一种目标文件格式。其实，不仅仅是目标文件，可执行文件也是使用 ELF 格式记录的。这一点通过 ELF 的全称也可以看出来。

# ELF——深入探究编译与链接

- ELF文件大体结构如右图所示，其包括5个部分：
  - ELF Header
  - Program Header Table
  - Section Header Table
  - Segments
  - Sections

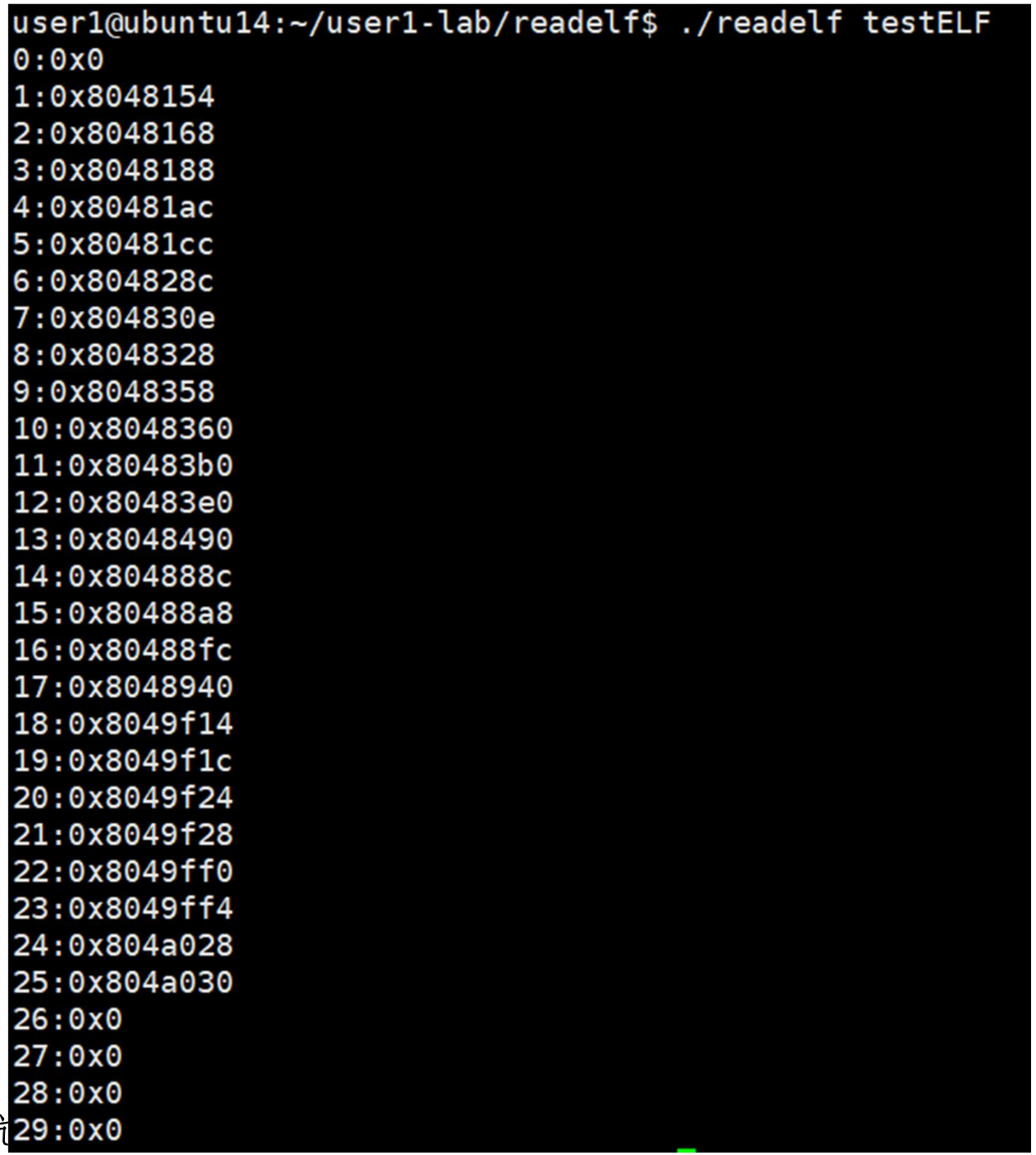



- 观察上图我们可以发现，Program Header Table 和 Section Header Table 指向 了同样的地方，这就说明两者所代表的内容是重合的，这意味着什么呢？意味着两者只 是同一个东西的不同视图！产生这种情况的原因在于 ELF 文件需要在两种场合使用：
  - 组成可重定位文件，参与可执行文件和可共享文件的链接
  - 组成可执行文件或者可共享文件，在运行时为加载器提供信息。

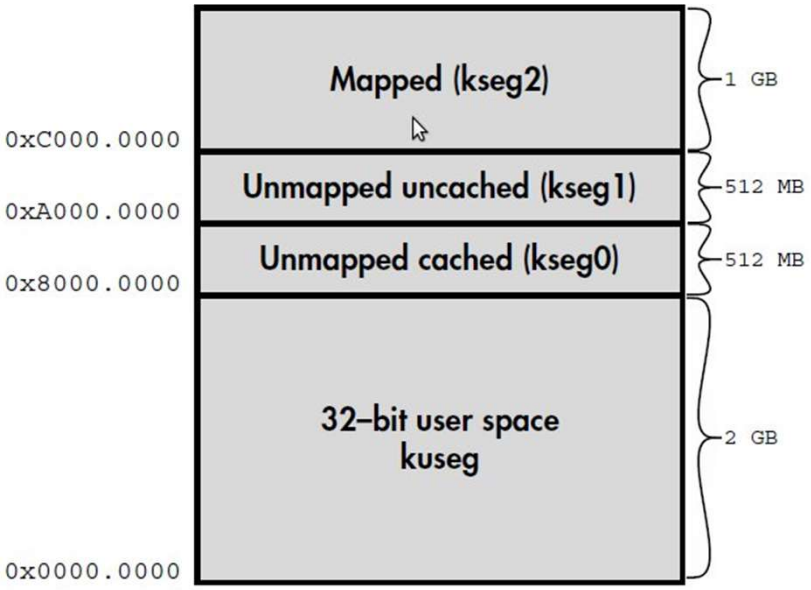
# Exercise 1.2 解析ELF文件

- 了解ELF文件大体结构之后，阅读一个简易的对 32bitELF 文件 (little endian) 的解析程序
- 完成部分代码以了解 ELF 文件各个部分的详细结构。
- 阅读./readelf 文件夹中 kerelf.h、readelf.c 以及 main.c 三个文件中的 代码，并完成 readelf.c 中缺少的代码
- readelf 函数需要输出 elf 文件的所有 section header 的序号和地址信息，对每个 section header，输出格式为 :”%d:0x%x\n”，两个标识符分别代表序号和地址。

```c
typedef struct
{
  // some identification informtion, including magic number
  unsigned char e_ident[EI_NIDENT];
  // file type, including relocatable file, executable file and shared object
  Elf32_Half e_type;
  // architecture, like MIPS
  Elf32_Half e_machine;
  // version info
  Elf32_Word e_version;
  // addr of entry point
  Elf32_Addr e_entry;
  // program header table offset
  Elf32_Off  e_phoff;
  // section header table offset
  Elf32_Off  e_shoff;
  // relating to processor
  Elf32_Half e_flags;
  // elf header size
  Elf32_Half e_ehsize;
  // program header entry size
  Elf32_Half e_phentsize;
  // program header entry number
  Elf32_Half e_phnum;
  // section header entry size
  Elf32_Half e_shentsize;
  // section header entry number
  Elf32_Half e_shnum;
}Elf32_Ehdr;
```


user1@ubuntu14:~/user1-lab/readelf$ ./readelf testELF
0:0x0
1:0x8048154
2:0x8048168
3:0x8048188
4:0x80481ac
5:0x80481cc
6:0x804828c
7:0x804830e
8:0x8048328
9:0x8048358
10:0x8048360
11:0x80483b0
12:0x80483e0
13:0x8048490
14:0x804888c
15:0x80488a8
16:0x80488fc
17:0x8048940
18:0x8049f14
19:0x8049f1c
20:0x8049f24
21:0x8049f28
22:0x8049ff0
23:0x8049ff4
24:0x804a028
25:0x804a030
26:0x0
27:0x0
28:0x0
29:0x0

# MIPS 内存布局——寻找内核的正确位置




Listing 5: include/mmu.h 中的内存布局图

```
/*
 o     4G ----------->  +------------------------------+----------0x100000000
 o                      |             ...              |  kseg3
 o                      +------------------------------+----------0xe000 0000
 o                      |             ...              |  kseg2
 o                      +------------------------------+----------0xc000 0000
 o                      |   Interrupts & Exception     |  kseg1
 o                      +------------------------------+----------0xa000 0000
 o                      |      Invalid memory          |   /|\
 o                      +------------------------------+----|-------Physics Memory Max
 o                      |             ...              |  kseg0
 o  VPT,KSTACKTOP-----> +------------------------------+----|-------0x8040 0000--------end
 o                      |       Kernel Stack           |    | KSTKSIZE            /|\
 o                      +------------------------------+----|------                |
 o                      |       Kernel Text            |    |                    PDMAP
 o     KERNBASE -----> +------------------------------+----|-------0x8001 0000    |
 o                      |   Interrupts & Exception     |   \|/                    \|/
 o     ULIM     -----> +------------------------------+-------------0x8000 0000--------
 o                      |         User VPT             |     PDMAP                /|\
 o     UVPT     -----> +------------------------------+-------------0x7fc0 0000    |
 o                      |         PAGES                |     PDMAP                |
 o     UPAGES   -----> +------------------------------+-------------0x7f80 0000    |
 o                      |         ENVS                 |     PDMAP                |
 o  UTOP,UENVS  -----> +------------------------------+-------------0x7f40 0000    |
 o  UXSTACKTOP -/       |     user exception stack     |     BY2PG                |
 o                      +------------------------------+-------------0x7f3f f000    |
 o                      |       Invalid memory         |     BY2PG                |
 o     USTACKTOP ----> +------------------------------+-------------0x7f3f e000    |
 o                      |     normal user stack        |     BY2PG                |
 o                      +------------------------------+-------------0x7f3f d000    |
 a                      |                              |                          |
 a                      ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~                          |
 a                      .                              .                          |
 a                      .                              .                       kuseg
 a                      .                              .                          |
 a                      |------------------------------|                          |
 a                      |                              |                          |
 o       UTEXT  -----> +------------------------------+                          |
 o                      |                              |     2 * PDMAP           \|/
 a     0 ------------>  +------------------------------+ ------------------------
 o
*/
```

# Linker Script——控制加载地址

- 在链接过程中，目标文件 被看成 section 的集合，并使用 section header table 来描述各个 section 的组织。section 记录了在连接过程中所需要的必要信息。其中最为重要的三个段为 .text、 .data、.bss。这三种段的意义是必须要掌握的：

  .text 保存可执行文件的操作指令。

  .data 保存已初始化的全局变量和静态变量。

  .bss 保存未初始化的全局变量和静态变量。

# Linker Script——控制加载地址

- (https://www.sourceware.org/binutils/docs/ld/Simple-Example. html#Simple-Example) 该例子的完整代码如下所示：

```
SECTIONS
{
    . = 0x10000;
    .text : { *(.text) }
    . = 0x8000000;
    .data : { *(.data) }
    .bss : { *(.bss) }
}
```

- 在第三行的“.”是一个特殊符号，用来做定位计数器，它根据输出段的大小增长。在 SECTIONS 命令开始的时候，它的值为 0。通过设置“.”即可设置接下来的 section 的其实地址。“*”是一个通配符，匹配所有的相应的段。例如“.bss:{*(.bss)}”表示将 所有输入文件中的.bss 段（右边的.bss）都放到输出的.bss 段（左边的.bss）中。

# Exercise 1.3 调整内核到正确位置

- 控制连接器的连接过程让内核被加载到该位置。
- Linker Script 记录了各个 section 应该如何映射到 segment，以及各个 segment 应该被加载到的位置。在使用了我们自定义的 Linker Script 后，生成的程序各个 section 的 位置就被调整到了我们所指定的地址上，其用例如右图所示。

```
1  SECTIONS
2  {
3      . = 0x10000;
4      .text : { *(.text) }
5      . = 0x8000000;
6      .data : { *(.data) }
7      .bss : { *(.bss) }
8  }
```

- 理解并仿照用例，填写 tools/scse0_3.lds 中空缺的部分，将内核调整到正确的位置上。

# Exercise 1.3 调整内核到正确位置

```
user1@ubuntu14:~/user1-lab$ readelf -S gxemul/vmlinux
There are 14 section headers, starting at offset 0x90ac:

Section Headers:
  [Nr] Name              Type            Addr     Off    Size   ES Flg Lk Inf Al
  [ 0]                   NULL            00000000 000000 000000 00      0   0  0
  [ 1] .text             PROGBITS        80010000 000080 000a80 00 WAX  0   0 16
  [ 2] .reginfo          MIPS_REGINFO    80010a80 000b00 000018 18   A  0   0  4
  [ 3] .rodata.str1.4    PROGBITS        80010a98 000b18 0000a2 01 AMS  0   0  4
  [ 4] .rodata           PROGBITS        80010b40 000bc0 000210 00   A  0   0 16
  [ 5] .data             PROGBITS        80010d50 000dd0 000000 00  WA  0   0 16
  [ 6] .data.stk         PROGBITS        80010d50 000dd0 008000 00  WA  0   0  1
  [ 7] .bss              NOBITS          80018d50 008dd0 000000 00  WA  0   0 16
  [ 8] .pdr              PROGBITS        00000000 008dd0 0001a0 00      0   0  4
  [ 9] .mdebug.abi32     PROGBITS        00000000 008f70 000000 00      0   0  1
  [10] .comment          PROGBITS        00000000 008f70 0000c8 00      0   0  1
  [11] .shstrtab         STRTAB          00000000 009038 000072 00      0   0  1
  [12] .symtab           SYMTAB          00000000 0092dc 000250 10     13  24  4
  [13] .strtab           STRTAB          00000000 00952c 0000c2 00      0   0  1
```

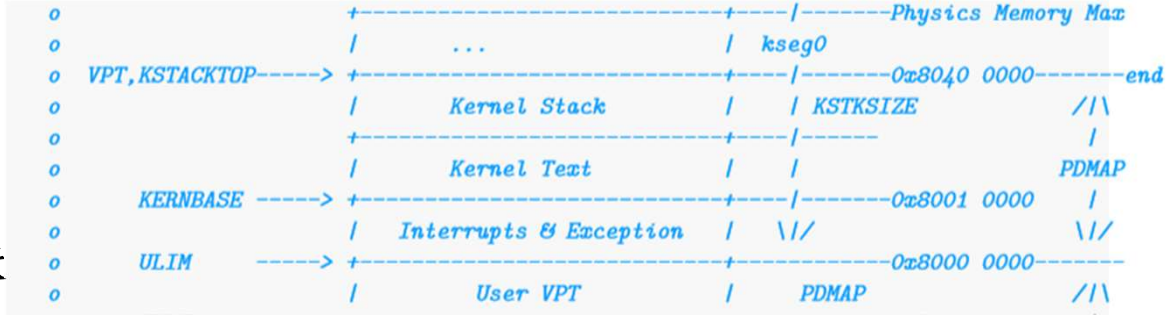
```
Simple setup...
    net: simulating 10.0.0.0/8 (max outgoing: TCP=100, UDP=100)
        simulated gateway: 10.0.0.254 (60:50:40:30:20:10)
            using nameserver 202.112.128.51
    machine "default":
        memory: 64 MB
        cpu0: R3000 (I+D = 4+4 KB)
        machine: MIPS test machine
        loading gxemul/vmlinux
        starting cpu0 at 0x80010000
```

# MIPS汇编与C语言

- 函数调用
  - 压栈 (push) 和弹栈 (pop) 的操作
  - 参 数存放在 a0-a3 寄存器、返回值会被保存在 v0-v1 寄存器
- 循环与判断
  - 将循环等高级结构，用判断加跳转的方式替代。
  - 判断和循环主要采用 slt、slti 判断两数间的 大小关系，再结合 b 类型指令根据对应条件跳转。以这些指令为突破口，我们就能大致 识别出循环结构、分支结构了。

# Exercise 1.4 设置栈指针跳转到主函数

- 链接后的程序执行的第一条指令称为 entry point，在 Linker Script 中已经通过 ENTRY(_start) 指令来设置了程序入口：
  - _start函数。该入口函数定义在 boot/start.S 文件中，补全其空缺的部分。设置栈指针，跳转到 main 函数。
- 在调用 main 函数之前，我们需要将 sp 寄存器设置到内核栈空间的位置上。
  - 设置完栈指针后，具备了执行 C 语言代码的条件，因此接下来的工作就可以交给 C 代码来完成了。所以在 start.S 的最后，我们调用 C 代码的主函数，正式进入内核的 C 语言部分。
- 使用 gxemul – E testmips – C R3000 – M 64 elf-file 运行 (其中 elf-file 是你编译生成的 vmlinux 文件的路径)。



# Exercise 1.5 实现printf字符输出

- Printf 函数全部由 C 语言的标准库提供，而 C 语言的标准库建立在操作系统基础之上，当我们开发操作系统的时候就失去了 C 语言标准库的支持。所以，要在内核中实现一个 printf 函数，需要用到的几乎所有功能性函数都需要我们自己来实现。
- 阅读下列三个文件中的代码：
  - lib/printf.c
  - lib/print.c
  - drivers/gxconsole/console.c

  以及指导书中对于函数规格的说明，补全lib/print.c中lp_Print() 函数缺失的部分来实现字符输出。

# Exercise 1.5 实现printf字符输出

- 阅读下列三个文件中的代码：
  - lib/printf.c
  - lib/print.c
  - drivers/gxconsole/console.c

  以及指导书中对于函数规格的说明，补全lib/print.c中lp_Print() 函数缺失的部分来实现字符输出。

# Exercise 1.5 实现printf字符输出

```
for(;;) {
    /* scan for the next '%' */
    /* flush the string found so far */
    //*****************************************
    if ((*fmt != '\0') && (*fmt != '%'))
    {
        OUTPUT(arg, fmt, 1);
        fmt++;
        continue;
    }
    /*****************************************/

    /* are we hitting the end? */
    //*****************************************
    if (*fmt == '\0')
        break;
    /*****************************************/
```

# Exercise 1.5 实现printf字符输出

```
/* we found a '%' */
/* format specifiers: %[flags][width][.precision][length]specifier */
//************************************
fmt++;

longFlag=0;
negFlag=0;
width=0;
prec=0;
ladjust=0;
padc=' ';
length=0;
```

# Exercise 1.5 实现printf字符输出

- 格式符的原型为：

%[flags][width][.precision][length]specifier

| flag | 描述 |
| --- | --- |
| - | 在给定的宽度 (width) 上左对齐输出，默认为右对齐 |
| 0 | 当输出宽度和指定宽度不同的时候，在空白位置填充 0 |

```
if(*fmt=='-')
{
    ladjust=1;
    fmt++;
}
else if(*fmt=='0')
{
    padc=*fmt;
    fmt++;
}
```

# Exercise 1.5 实现printf字符输出

- 格式符的原型为：

%[flags][width][.precision][length]specifier

| width | 描述 |
| --- | --- |
| 数字 | 指定了要打印数字的最小宽度，当这个值大于要输出数字的宽度，则对多出的部分填充空格，但当这个值小于要输出数字的宽度的时候则不会对数字进行截断。 |

```
while(IsDigit(*fmt))
{
    width=width*10+Ctod(*fmt);
    fmt++;
}
```

# Exercise 1.5 实现printf字符输出

| .precision | 描述 |
| --- | --- |
| . 数字 | 指定了精度，不同标识符下有不同的意义，但在我们实验的版本中这个值只进行计算而没有具体意义，所以不赘述。 |

```
if (*fmt == '.')
{
    fmt ++;
    if (IsDigit(*fmt))
    {
        prec = 0;
        while (IsDigit(*fmt))
        {
            prec = prec * 10 + Ctod(*fmt++);
        }
    }
}
```

# Exercise 1.5 实现printf字符输出

- 格式符的原型为：

%[flags][width][.precision][length]specifier

| length | Specifier | |
|---|---|---|
| | d D | b o O u U x X |
| l | long int | unsigned long int |

```
if(*fmt == 'l')
{
    longFlag = 1;
    fmt++;
}
```

# Exercise 1.5 实现printf字符输出

- 格式符的原型为：

%[flags][width][.precision][length]specifier

| Specifier | 输出 | 例子 |
|---|---|---|
| b | 无符号二进制数 | 110 |
| d D | 十进制数 | 920 |
| o O | 无符号八进制数 | 777 |
| u U | 无符号十进制数 | 920 |
| x | 无符号十六进制数，字母小写 | 1ab |
| X | 无符号十六进制数，字母大写 | 1AB |
| c | 字符 | a |
| s | 字符串 | sample |

# 测试结果

- 如果你正确地实现了前面所要求的全部内容，你将在 gxemul 中观察到如下输出，这标志着你顺利完成了 lab1 实验。

```
GXemul 0.4.6    Copyright (C) 2003-2007  Anders Gavare
Read the source code and/or documentation for other Copyright messages.

Simple setup...
    net: simulating 10.0.0.0/8 (max outgoing: TCP=100, UDP=100)
        simulated gateway: 10.0.0.254 (60:50:40:30:20:10)
            using nameserver 202.112.128.51
    machine "default":
        memory: 64 MB
        cpu0: R3000 (I+D = 4+4 KB)
        machine: MIPS test machine
        loading gxemul/vmlinux
        starting cpu0 at 0x80010000
------------------------------------------------------------------------

main.c: main is start ...

init.c: mips_init() is called

panic at init.c:24: ^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^
```

# Lab1-extra

- 由于这学期情况特殊，我们将为lab1以后的每个实验增加一个附加任务，会在每个实验的第二周发布，在课下完成。
- 评分规则：
  - lab1课下实验满分仍是100分，学生做了60分就可以获得lab2的分支，继续往下做。例如lab1课下实验得了100分，即获得下表中的15分基础分。
  - lab1-extra完成后，会得到课上测试附加分。例如，如果lab1-extra得了100分，即得到下表中的1分课上测试附加分。
  - 回校后还会组织课上测试，需要通过lab1课上测试，才能最终确认获得上述得分。

**分值安排及考核时间：**

| 实验 | 基础分 | 课上测试加分 | 报告加分 | 课上测试时间 |
|---|---|---|---|---|
| Lab0 | 5 | 0.5 | 0.5 | 待定 |
| Lab1 | 15 | 1 | 1 | 待定 |
| Lab2 | 20 | 1.5 | 1.5 | 待定 |
| Lab3 | 20 | 1.5 | 1.5 | 待定 |
| Lab4 | 5 | 1 | 1 | 待定 |
| Lab5 | 5 | 1 | 1 | 待定 |
| Lab6 | 5 | 0.5 | 0.5 | 待定 |