# 并行编译与优化
# Parallel Compiler and Optimization

计算机研究所编译系统室

# Lab Three: Code Generation

# 实验三：代码生成

# 内容

1. 实验介绍
2. ARMv7指令集架构
3. ARM汇编基础
4. 实验步骤

# 1 实验介绍

- 实验任务
  - 实现SysY编译器后端，完成代码生成功能
  - 从中间语言生成ARMv7汇编指令
- 实验目标
  - 通过实验，掌握编译后端代码生成的基本方法
- 实验原理
  - 基于宏扩展的指令选择方法
  - 自顶向下逐条翻译

# 1 实验介绍

- 实验内容
  - 实现SysY编译器后端的代码生成
    - 从IR Module开始，自顶向下遍历
    - 构建相关符号表，逐条翻译生成ARM汇编代码
- 实验要求
  - 能够生成SysY测试程序对应的汇编文件
  - 利用gcc汇编链接生成二进制文件，在Qemu模拟器/树莓派上运行，结果正确
  - 按分组完成实验
- 实验资料
  - https://gitee.com/hardcookie/sysy-backend-student.git

# 内容

1. 实验介绍
2. ARMv7指令集架构
3. ARM汇编基础
4. 实验步骤

# 2.1 ARMv7指令集架构

- 32位RISC架构 (load/store架构)
  - 大部分指令处理寄存器中的数据，结果写回寄存器
  - 只有load/store指令可以访问内存
- 两个基本指令集
  - ARM指令集： 32bits
  - Thumb指令集：16bits / 32bits

# 2.1 ARMv7指令集架构

## 指令分类

| | | |
|---|---|---|
| 流控指令 | → | Branch instructions |
| 数据处理指令 | → | Data-processing instructions |
| 程序状态寄存器访问指令 | → | Status register access instructions |
| 访存指令 | → | Load and store instructions |
| | | Load Multiple and Store Multiple instructions |
| | | Miscellaneous instructions |
| 异常产生指令 | → | Exception-generating instructions |
| 协处理器指令 | → | Coprocessor instructions |
| | | Floating-point load and store instructions |
| | | Floating-point register transfer instructions |
| 浮点数据处理指令 | → | Floating-point data-processing instructions |

# 2.2 常用指令

- 数据处理指令

```
add r2, r0, r1          //r2<-r0+r1
sub sp, sp, #32         //sp<-sp-#32
mla r3, r0, r1, r2      //r3<-r0*r1+r2
cmp r0, r1              //比较r0和r1
```

- 访存指令

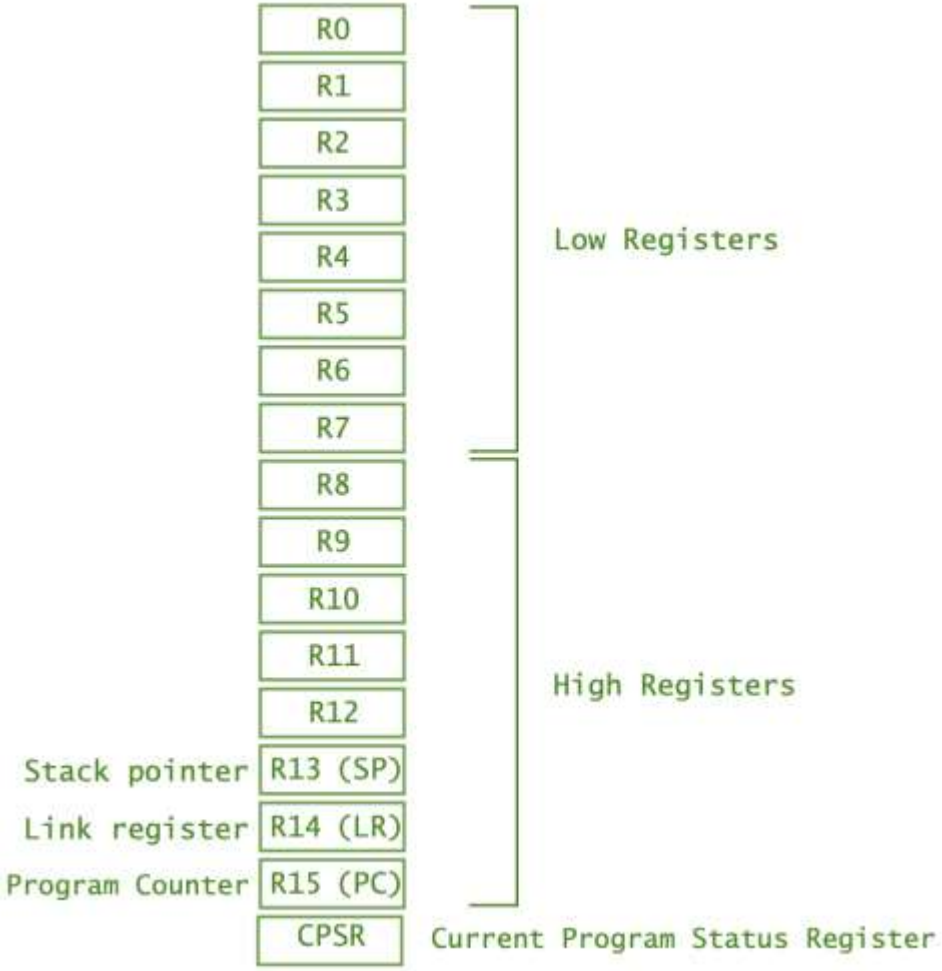
```
ldr r2, [r1, #4]        //r2<-mem(r1+4)
str r2, [r1, #-8]       //mem(r1-8)<-r2
push  {fp}              //fp压栈
pop   {fp}              //fp弹栈
```

- 流控指令

```
b  func                 //跳转到func
bl func                 //跳转到func, 保存返回地址到lr
bx lr                   //跳转到lr指定返回地址处
```

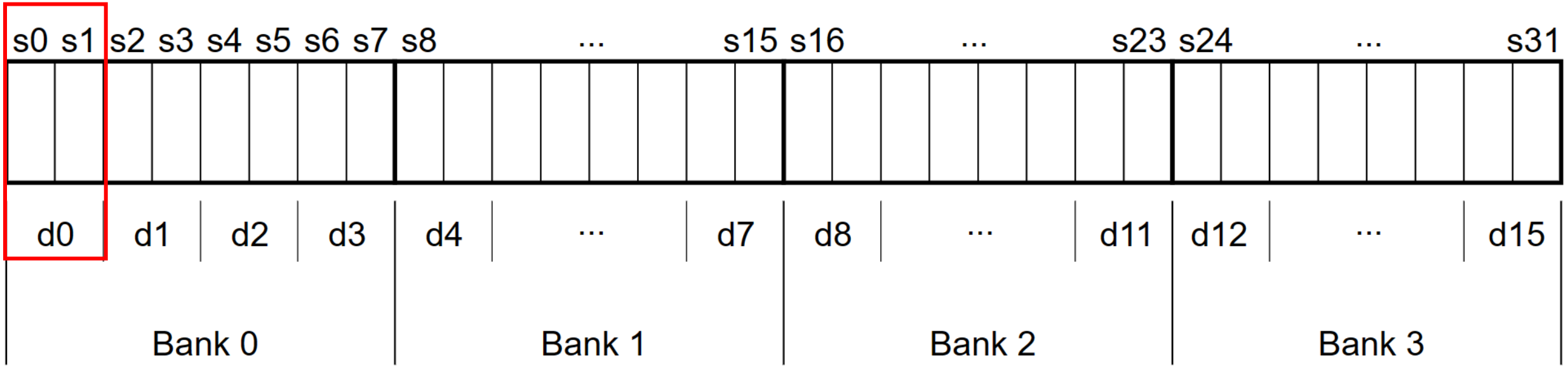
# 2.3 寄存器

- 通用寄存器
  - R0-R3: 传递函数参数和传出函数返回值
  - R4-R10: 通用寄存器
  - R11: FP (栈帧指针寄存器，指向栈底)
  - R12: IP (内部调用暂时寄存器)
  - R13: SP (栈指针寄存器，指向栈顶)
  - R14: LR (链接寄存器，保存返回地址)
  - R15: PC (程序计数器)



# 2.3 寄存器

- 浮点寄存器
  - 32个单精度浮点寄存器(single-precision registers): s0 to s31
  - 16个双精度浮点寄存器(double-precision registers): d0 to d15



# 2.3 寄存器

## CPSR(当前程序状态寄存器)


### 条件标志位

- N：正负标志，N=1表示运算结果为负数，N=0表示运算结果为正数或零
- Z：零标志，Z=1表示运算结果为零，Z=0表示运算结果为非零
- C：进位标志，产生进位C=1，否则C=0
- V：溢出标志，V=1表示有溢出，V=0表示无溢出
- Q：DSP运算指令是否发生溢出

# 2.4 条件执行

- 如果CPSR的N|Z|C|V位与指令条件码匹配，则执行指令，否则不执行

| cond | Mnemonic extension | Meaning (integer) | Meaning (floating-point) [a] | Condition flags |
|---|---|---|---|---|
| 0000 | EQ | Equal | Equal | Z == 1 |
| 0001 | NE | Not equal | Not equal, or unordered | Z == 0 |
| 0010 | CS [b] | Carry set | Greater than, equal, or unordered | C == 1 |
| 0011 | CC [c] | Carry clear | Less than | C == 0 |
| 0100 | MI | Minus, negative | Less than | N == 1 |
| 0101 | PL | Plus, positive or zero | Greater than, equal, or unordered | N == 0 |
| 0110 | VS | Overflow | Unordered | V == 1 |
| 0111 | VC | No overflow | Not unordered | V == 0 |
| 1000 | HI | Unsigned higher | Greater than, or unordered | C == 1 and Z == 0 |
| 1001 | LS | Unsigned lower or same | Less than or equal | C == 0 or Z == 1 |
| 1010 | GE | Signed greater than or equal | Greater than or equal | N == V |
| 1011 | LT | Signed less than | Less than, or unordered | N != V |
| 1100 | GT | Signed greater than | Greater than | Z == 0 and N == V |
| 1101 | LE | Signed less than or equal | Less than, equal, or unordered | Z == 1 or N != V |
| 1110 | None (AL) [d] | Always (unconditional) | Always (unconditional) | Any |

默认为AL(无条件执行)

# 内容

1. 实验介绍
2. ARMv7指令集架构
3. ARM汇编基础
4. 实验步骤

# 3.1 汇编指令格式

- 格式和助记符 (mnemonic)

```
<opcode>{cond}{s} <Rd>, <Rn>, {,<op2>}
```

  - <opcode>: 操作码
  - {<cond>}: 指令条件执行的条件域，满足条件则执行指令，否则不执行 (可选)
  - {s}: s后缀，依据指令执行的结果更新CPSR，否则不更新 (可选)
  - <Rd>: 目的寄存器
  - <Rn>: 第一操作数，为寄存器
  - {<op2>}：第二操作数，可以是立即数、寄存器和寄存器移位操作数(可选)

# 3.1 汇编指令格式

- cond后缀
  - 测试条件标志位：测试指令执行前的标志位
- S后缀
  - 更新条件标志位：依据指令执行的结果改变标志位
  - 既有条件后缀又有S后缀，书写时S排在后面
- !后缀
  - 指令中的地址表达式有!后缀，基址寄存器中的地址值更新
  - 指令执行后基址寄存器中的地址值 = 指令执行前的值 + 偏移量

```
addeqs R0, R1, R2    @当Z=1时执行指令(R1+R2->R0)，同时更新条件标志位
bne .Loop            @当Z=0时跳转到标号.Loop
str fp, [sp, #-4]!   @执行str指令后，sp=sp-4
```

# 3.2 GNU汇编语法

- 汇编由一系列语句组成，每条语句包括三个可选部分

```
label: instruction @ comment
```

- label
  - 标号指示指令或数据(如const变量)的地址
  - 由点、字母、数字、下划线等组成
- instruction
  - 可以是汇编指令或伪指令
- 书写规范
  - ARM指令、伪指令、寄存器名可以全部为大写字母或全部为小写字母，但不可大小写混用

# 3.2 GNU汇编语法

- 伪指令(assembler directives)
  - .arch：指示目标架构
  - .arm, .thumb: 表示随后的代码是32位arm指令集或16位thumb指令集
  - .byte, .word, .long, .float, .string/.asciz/.ascii <expr>: 定义某种类型的数据
  - .align <n>, .p2align <n>: 通过填充字节，使当前位置按$2^n$字节对齐
  - .global <symbol>: 定义一个全局的符号
  - .local <symbol>: 定义一个局部的符号(未声明为.global的符号默认为局部的)
  - .type <symbol> <@function/@object>:指定一个符号的类型是函数类型或者是数据对象类型
  - .size <symbol> <size>: 指定一个符号的大小

# 3.2 GNU汇编语法

- 段 (sections)
  - 每个段以段名开始，以下一段名或者文件结尾结束
  - .text: 代码段
  - .data: 初始化数据段
    - 存放初始化的全局变量和静态变量
  - .bss: 未初始化数据段
    - 存放未初始化的全局变量和静态变量，以及初始化为0的全局变量和静态变量
    - 编译器会默认初始化为0
  - .rodata: 只读数据段
    - 存放const修饰的全局变量
  - .section <section_name> {,"<flag>" }: 定义一个段，指定段属性

```
14      .text
15      .global a
16      .data
17      .align  2
18      .type   a, %object
19      .size   a, 4
20  a:
21      .word   1
22      .text
```

# 3.2 GNU汇编语法

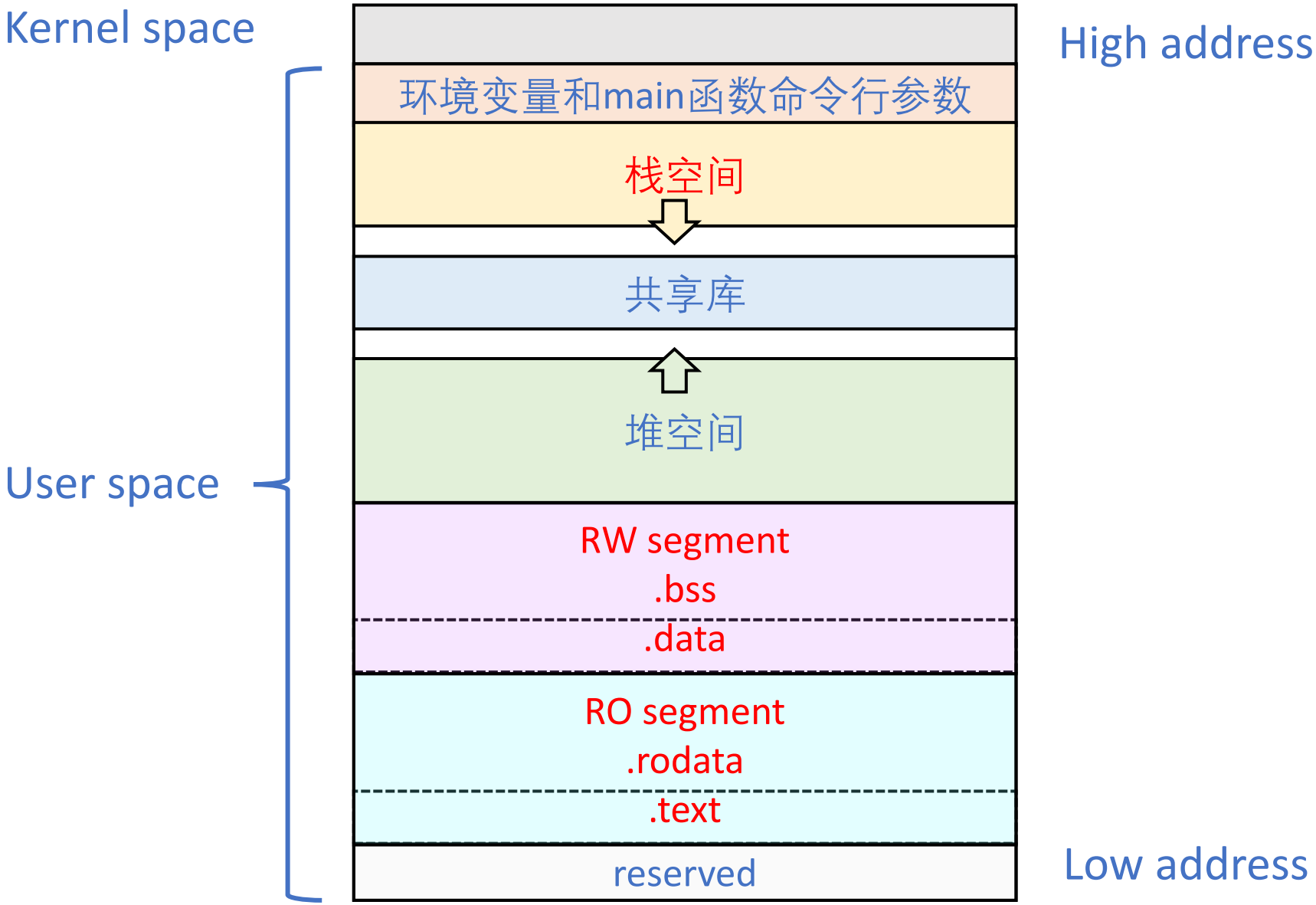
- 寄存器命名约定
  - FP: R11, SP: R13, LR: R14, PC: R15
- 函数定义

<FUNC_NAME>:

<FUNC_BODY>

```
22      .text
23      .align  2
24      .global main
25      .syntax unified
26      .arm
27      .type   main, %function
28  main:
29      @ Function supports interworking.
30      @ args = 0, pretend = 0, frame = 0
31      @ frame_needed = 1, uses_anonymous_args = 0
32      @ link register save eliminated.
33      str fp, [sp, #-4]!
34      add fp, sp, #0
35      ldr r3, .L3
36      ldr r3, [r3]
37      add r3, r3, #1
38      ldr r2, .L3
39      str r3, [r2]
40      mov r3, #0
41      mov r0, r3
42      add sp, fp, #0
43      @ sp needed
44      ldr fp, [sp], #4
45      bx  lr
46  .L4:
47      .align  2
48  .L3:
49      .word   a
50      .size   main, .-main
```

# 3.3 进程内存空间


Kernel space
User space
High address
环境变量和main函数命令行参数
栈空间
共享库
堆空间
RW segment
.bss
.data
RO segment
.rodata
.text
reserved
Low address

# 3.4 函数调用栈

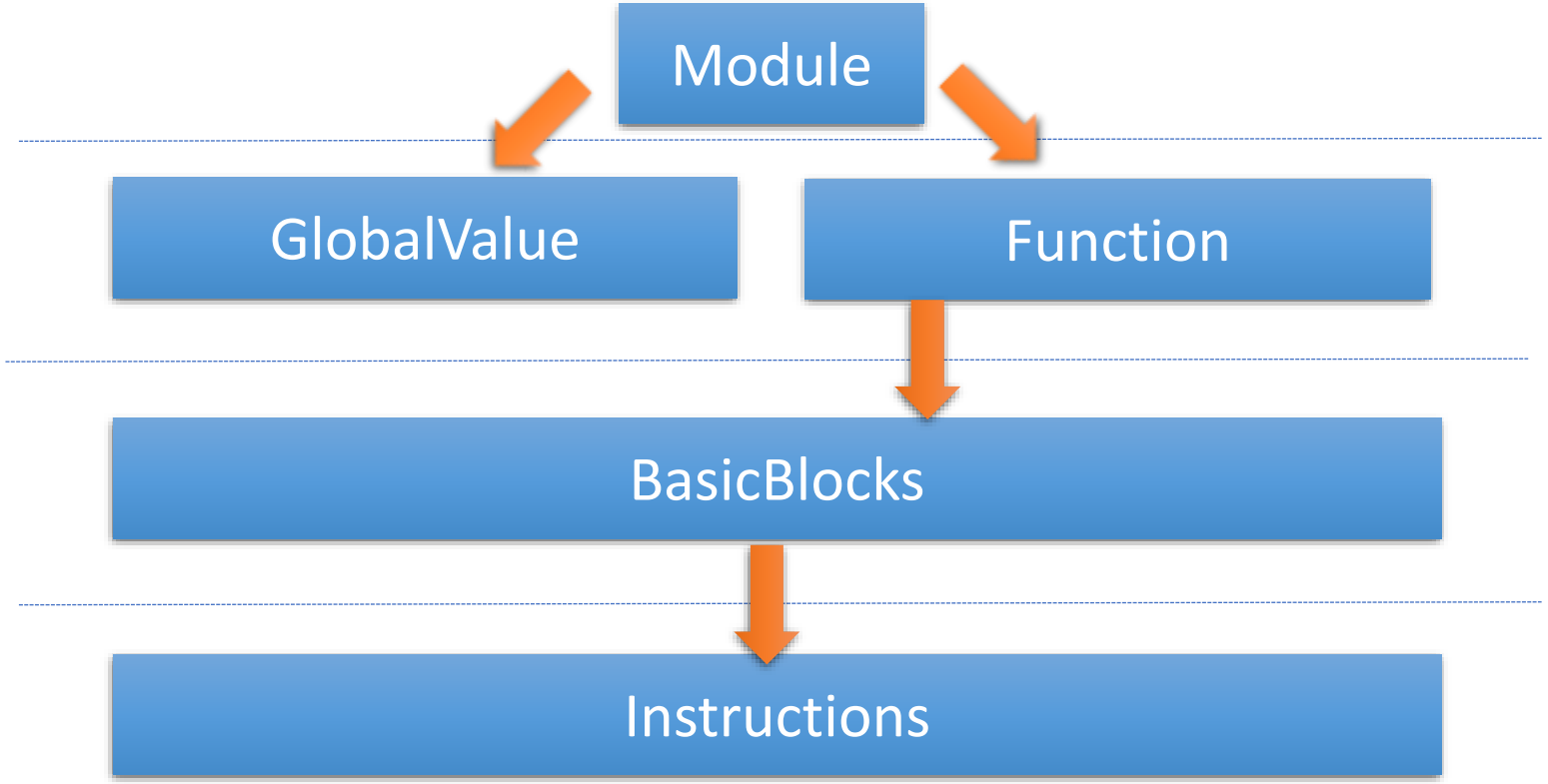
- ARM采用满减栈FD(Full Descending)，栈由高地址向下增长
- 每个函数对应一个栈帧，使用两个指针维护
  - FP：指向栈底
  - SP：指向栈顶 (指向最后一个入栈的数据)

# 内容

1. 实验介绍
2. ARMv7指令集架构
3. ARM汇编基础
4. 实验步骤

# 4.1 实验思路

- 从IR Module开始，自顶向下遍历
- 将IR逐条翻译成对应的汇编代码（宏扩展的指令选择方法）
- 遍历过程中构建相关符号表



# 4.2 为所有GlobalValue生成代码

- 遍历所有GlobalValue，不同类型的GlobalValue放在不同的段
  - 已初始化全局变量：.data
  - 未初始化全局变量：.bss
  - const全局变量：.rodata
- 构建GlobalValueTable符号表
  - 记录每个GlobalValue被哪些Instruction使用
  - 在Function内加载GlobalValue需要2条ldr指令
    - 第1条ldr：取GlabalValue的GlobalLabel(全局地址)
    - 第2条ldr：取GlobalValue的值

```
49  @@@extract part asmcode for demo@@@
50      @...
51      .global a
52      .data
53      .align  2
54      .type   a, %object
55      .size   a, 4
56  a:
57      .word   4660
58          @...
59  main:
60      @...
61      ldr r3, .L3
62      ldr r3, [r3]
63
64  .L3:
65      .word   a
```

# 4.3 为所有Function生成代码

- 遍历所有Function, 在每个Function内部
  - 做寄存器分配(本实验不考虑)
  - 为该Function使用的每个GlobalValue建立LocalLabel
  - 检查该Function是否有子函数调用，获取参数个数(本实验不考虑)
  - 完成该Function头部工作
  - 遍历该Function的所有BasicBlock
  - 完成该Function尾部工作

# 4.3.1 简化的寄存器模型

- 所有LocalValue的最新副本保存在栈上
- 维护StackTable符号表，记录每个LocalValue在栈上的位置
- LocalValue的使用和定值
  - 每次使用前，从栈上加载到寄存器
  - 每次定值后，从寄存器存储回栈上，然后所占用的寄存器立即释放

# 4.3.2 Function头部工作

- Function头部工作
  - 在.text段生成该Function的FunctionLabel以及.type等汇编伪指令
  - 进入该Function后，保存上一级Function的FP
  - 通过上一级Function的SP设置该Function的FP
  - 更新该Function的SP (即开辟栈空间)

```
20  main:
21      @ Function supports interworking.
22      @ args = 0, pretend = 0, frame = 16
23      @ frame_needed = 1, uses_anonymous_args = 0
24      @ link register save eliminated.
25      str fp, [sp, #-4]!
26      add fp, sp, #0
27      sub sp, sp, #20
28      mov r3, #1
29      str r3, [fp, #-8]
30      ldr r3, .L3
31      str r3, [fp, #-12]
32      mov r3, #2
33      str r3, [fp, #-16]
34      ldr r3, .L3+4
35      str r3, [fp, #-20]
36      ldr r3, [fp, #-8]
37      mov r0, r3
38      add sp, fp, #0
39      @ sp needed
40      ldr fp, [sp], #4
41      bx  lr
```

# 4.3.3 开辟函数栈空间

- 开辟栈空间
  - 通过SP做减法开辟栈空间

    SUB SP, SP, #N
  - 需要要考虑开辟多大栈空间
- 访问栈
  - 函数FP不变，因此后续栈访问操作可以基于FP执行

```
20  main:
21      @ Function supports interworking.
22      @ args = 0, pretend = 0, frame = 16
23      @ frame_needed = 1, uses_anonymous_args = 0
24      @ link register save eliminated.
25      str fp, [sp, #-4]!
26      add fp, sp, #0
27      sub sp, sp, #20
28      mov r3, #1
29      str r3, [fp, #-8]
30      ldr r3, .L3
31      str r3, [fp, #-12]
32      mov r3, #2
33      str r3, [fp, #-16]
34      ldr r3, .L3+4
35      str r3, [fp, #-20]
36      ldr r3, [fp, #-8]
37      mov r0, r3
38      add sp, fp, #0
39      @ sp needed
40      ldr fp, [sp], #4
41      bx  lr
```

# 4.3.4 Function尾部工作

- Function尾部工作
  - 恢复上一级Function的FP和SP
  - 返回上一级Function (生成bx lr指令)

```
20  main:
21      @ Function supports interworking.
22      @ args = 0, pretend = 0, frame = 16
23      @ frame_needed = 1, uses_anonymous_args = 0
24      @ link register save eliminated.
25      str fp, [sp, #-4]!
26      add fp, sp, #0
27      sub sp, sp, #20
28      mov r3, #1
29      str r3, [fp, #-8]
30      ldr r3, .L3
31      str r3, [fp, #-12]
32      mov r3, #2
33      str r3, [fp, #-16]
34      ldr r3, .L3+4
35      str r3, [fp, #-20]
36      ldr r3, [fp, #-8]
37      mov r0, r3
38      add sp, fp, #0
39      @ sp needed
40      ldr fp, [sp], #4
41      bx  lr
```

# 4.4 为所有BasicBloack生成代码

- 遍历一个Function内所有BasicBlock，在每个BasicBlock内部
  - 生成该BasicBlock的Label
  - 遍历该BasicBlock里的每一条IR，生成对应汇编代码
  - 采用宏扩展的指令选择方法 (one-by-one translation)

# 4.5 为每一条指令生成代码

- UnaryInst和BinaryInst
  - 获得指令的Operand和指令类型，生成相应指令
- AllocaInst
  - 根据指令的Operand分配栈空间，将基于FP的偏移记录在StackTable符号表中
- LoadInst
  - 以FP为基址，根据符号表中的偏移，生成1条ldr指令
- StoreInst
  - 以FP为基址，根据符号表中的偏移，生成1条str指令

# 4.5 为每一条指令生成代码

- UncondBrInst
  - 获得跳转目标BasicBlock的Label，生成一条无条件跳转指令(B <BBLabel>)
- CondBrInst
  - 该指令一定位于CMP指令之后，因此首先获得条件码
  - 生成对应的条件跳转指令跳转到Then Block (B<Cond> <ThenLabel>), 之后需要生成无条件跳转指令跳转到Else Block (B <ThenLabel>)
  - SSA：通过内存读写(ldr/str)来解决
- ReturnInst
  - 当本函数有返回值时，生成将返回值保存到R0的相关指令

# 4.6 初始化局部变量和常数

- ARMv7指令为32位, 不能够编码任意32位常数
- 常数在指令可表示立即数范围内
  - 通过mov指令加载常数（方法一）
  - mov r3, #10
- 常数超出可表示立即数范围
  - 通过movw, movt指令加载常数（方法二）
  - movw r3, #:lower16:label　//加载低16位
    movt r3, #:upper16:label　//加载高16位
- 无论是否超出立即数取值范围
  - 在text段构建常量池放置常数，使用时从常量池加载，需要1次ldr指令（方法三）
  - ldr <LocalLabel> //在LocalLabel处存放了常量，<LocalLabel>需在ldr的寻址范围内（4KB）

```
49  @@@extract part asmcode for demo@@@
50  main:
51      @...
52      @use mov #imm
53      mov r3, #1
54      @use ldr LocalLabel
55      ldr r3, .L3
56      mov r0, r3
57      @...
58  .L3:
59      .word   4660
```

# 4.7 测试

- 生成汇编文件
  - sysyc  test.sy  > test.s
- 生成二进制并测试
  - @笔记本上安装模拟器 (课程)
    - arm-none-linux-gnueabihf-gcc  test.s -o test.out
    - qemu-arm ./test.out
    - echo $?
  - @树莓派 (竞赛)
    - gcc  test.s -o test.out
    - ./test.out