

# 设计思路

## 读入流程

流程为：

- 首先，使用 `mem_read_32` **取出指令**，按照 R 型、I 型和 J 型三种类型的指令格式提取出指令对应部分字段的值，进而判断指令的类型。
- 根据指令的类型，以及其中的 opcode（R 型还有 funct 字段，特殊 I 型指令还有 rt 字段），**识别具体的指令，执行对应指令的操作。**
- 更新 PC 的值。

流程中最难的部分为根据指令中的 opcode（和 funct、rt 字段）判断是哪一种指令。为了判断具体的指令，应当**首先区分 R 型、I 型和 J 型指令。**

## R 型、I 型和 J 型的区分

本次实验需要实现的指令有：

J	JAL	BEQ	BNE	BLEZ	BGTZ
ADDI	ADDIU	SLTI	SLTIU	ANDI	ORI
XORI	LUI	LB	LH	LW	LBU
LHU	SB	SH	SW	BLTZ	BGEZ
BLTZAL	BGEZAL	SLL	SRL	SRA	SLLV
SRLV	SRAV	JR	JALR	ADD	DDU
SUB	SUBU	AND	OR	XOR	NOR
SLT	SLTU	MULT	MFHI	MFLO	MTHI
MTLO	MULTU	DIV	DIVU		SYSCALL

下面，对 R 型、I 型和 J 型三种类型的指令进行区分。MIPS 的手册上写得比较清楚：

## A.2 Instruction Formats

Every CPU instruction consists of a single word (32 bits) aligned on a word boundary and the major instruction formats are shown in Figure A-1.

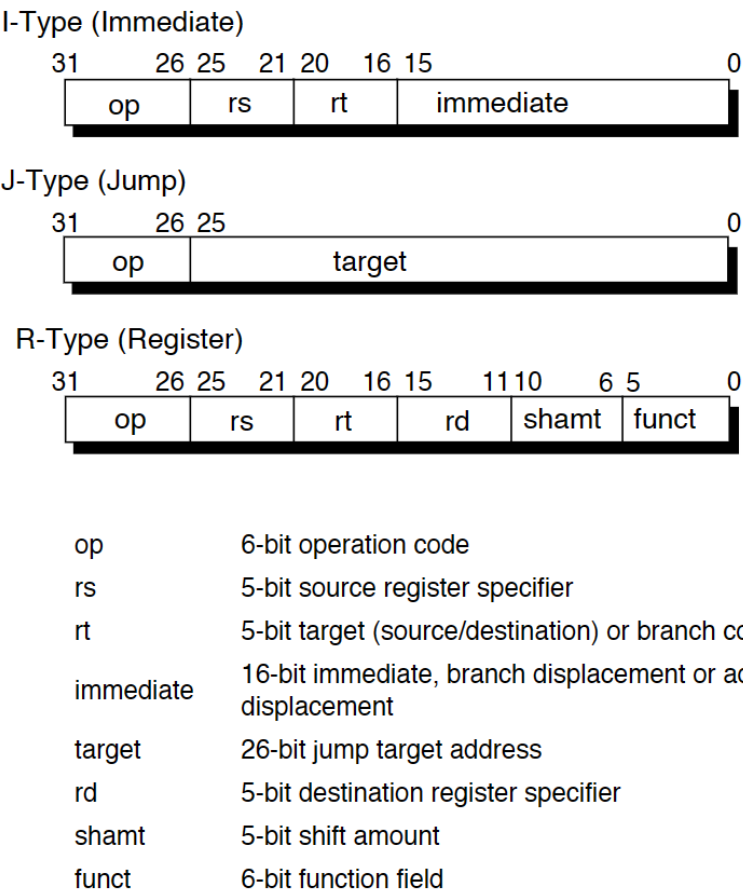


Figure A-1 CPU Instruction Formats

注意到 R 型指令的操作码也就是 opcode 都是 0（经过查阅 MIPS 手册，本次仿真实验所需要实现的 R 型指令中的 opcode 都为 0），也就是说无法通过 opcode 区分 R 型指令，还需要借助 R 型指令的 funct 字段进行区分；而其他的 I 型指令（除了 BLTZ、BGEZ、BLTZAL、BGEZAL 四个指令以外，这四个指令的区分在下面介绍）和 J 型指令都可以通过 opcode 进行区分。

根据实验指导：

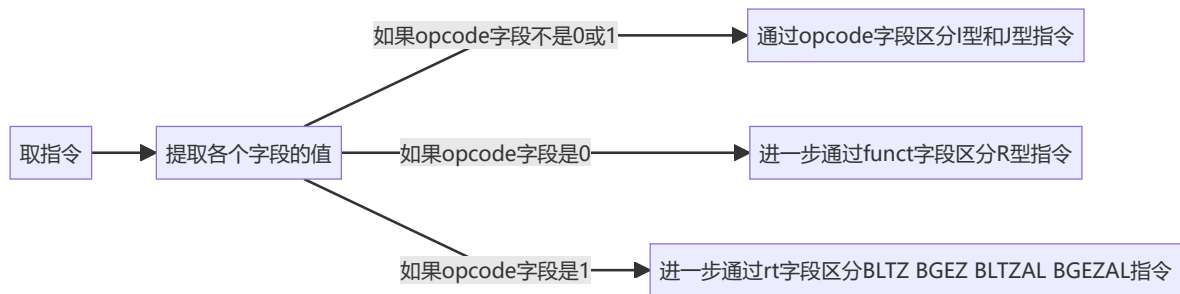
Finally, note that your simulator does not have to handle instructions that we do not include in the table above, or any other invalid instructions. We will only test your simulator with valid code that uses the instructions listed above.

故本模拟器并不需要判断指令是否非法。

### 进一步的细分

需要注意，根据 MIPS 手册，BLTZ、BGEZ、BLTZAL、BGEZAL 四个指令的 opcode 也是 1，需要再进一步地根据 rt 字段细分。

因此，总的判断流程为：



## 代码的实现框架

### 宏定义

在代码中，由于我主要通过 **switch-case 语句** 实现这些判断流程，为了使代码更加清晰易懂，我使用了宏定义：

```
// R 型指令操作码：0
#define OP_RTYPE 0x00

// I 型指令
#define OP_BEQ 0x04
#define OP_BNE 0x05
#define OP_BLEZ 0x06
#define OP_BGTZ 0x07
#define OP_ADDI 0x08
#define OP_ADDIU 0x09
#define OP_SLTI 0x0A
#define OP_SLTIU 0x0B
#define OP_ANDI 0x0C
#define OP_ORI 0x0D
#define OP_XORI 0x0E
#define OP_LUI 0x0F
#define OP_LB 0x20
#define OP_LH 0x21
#define OP_LW 0x23
#define OP_LBU 0x24
#define OP_LHU 0x25
#define OP_SB 0x28
#define OP_SH 0x29
#define OP_SW 0x2B

// BLTZ BGEZ BLTZAL BGEZAL 这几个指令特殊，它们也没法通过 opcode 区分
#define OP_BSPECIAL 0x01

// J 型指令
#define OP_J 0x02
#define OP_JAL 0x03
```

上面是各指令 opcode 字段的定义，因为在本次实验中 R 型指令的 opcode 字段均为 0，所以统一进行宏定义。其他是查阅手册得到的指令 opcode 字段。

那么，对于 R 型指令，还需要进一步宏定义各种 R 型指令的 funct 字段：

```
// R 型指令：funct 段
```

```

#define FUNCT_SLL 0x00
#define FUNCT_SRL 0x02
#define FUNCT_SRA 0x03
#define FUNCT_SLLV 0x04
#define FUNCT_SRLV 0x06
#define FUNCT_SRAV 0x07
#define FUNCT_JR 0x08
#define FUNCT_JALR 0x09
#define FUNCT_ADD 0x20
#define FUNCT_ADDU 0x21
#define FUNCT_SUB 0x22
#define FUNCT_SUBU 0x23
#define FUNCT_AND 0x24
#define FUNCT_OR 0x25
#define FUNCT_XOR 0x26
#define FUNCT_NOR 0x27
#define FUNCT_SLT 0x2A
#define FUNCT_SLTU 0x2B
#define FUNCT_MULT 0x18
#define FUNCT_MFHI 0x10
#define FUNCT_MFLO 0x12
#define FUNCT_MTHI 0x11
#define FUNCT_MTLO 0x13
#define FUNCT_MULTU 0x19
#define FUNCT_DIV 0x1A
#define FUNCT_DIVU 0x1B
#define FUNCT_JR 0x08
#define FUNCT_JALR 0x09
#define FUNCT_SYSCALL 0x0C

```

针对 4 个特殊的 I 型指令，还需要先宏定义其 rt 字段的值：

```

// 特殊的跳转指令：rt 字段
#define RT_BLTZ 0x00
#define RT_BGEZ 0x01
#define RT_BLTZAL 0x10
#define RT_BGEZAL 0x11

```

这样，后续的 case 语句就好写很多了。

细节部分有：

- 提取指令时，需要**按符号扩展立即数**至 32 位。

## 主体框架

代码的主体部分框架为：

```

void process_instruction()
{
    /* execute one instruction here. You should use CURRENT_STATE and modify
     * values in NEXT_STATE. You can call mem_read_32() and mem_write_32() to
     * access memory. */
    uint32_t instruction = mem_read_32(CURRENT_STATE.PC);

```

```

// 计算字段 op rs rt rd shamt funct imm target 等
uint8_t op = instruction >> 26 & 0x3F;
uint8_t rs = instruction >> 21 & 0x1F;
uint8_t rt = instruction >> 16 & 0x1F;
uint8_t rd = instruction >> 11 & 0x1F;
uint8_t shamt = instruction >> 6 & 0x1F;
uint8_t funct = instruction & 0x3F;
int16_t imm = instruction & 0xFFFF;
uint32_t target = (instruction & 0x3FFFFFF) << 2;
int32_t extended_imm = (int32_t)imm;
uint32_t address = CURRENT_STATE.REGS[rs] + imm;
int32_t offset = extended_imm << 2;

/* 更新 PC, 就连 SYSCALL 也一定会增加 4
 * "No registers are modified in either case,
 * except that PC is incremented to the next instruction as usual." */
NEXT_STATE.PC = CURRENT_STATE.PC + 4;

// 按 opcode 区分
switch (op)
{

// R 型指令
case OP_RTYPE:

    uint32_t funct = instruction & 0x3F;

    // 按 funct 字段区分
    switch (funct)
    {
    case FUNCT_SLL:
        // 省略...
    }
    break;

// 其他 I 型和 J 型指令的 opcode 以及具体更新操作
case OP_J:
    // 省略...

// 特殊的跳转指令
case OP_BSPECIAL:
    switch (rt)
    {
    case RT_BLTZ:
        // Branch on less than zero
        if ((int32_t)CURRENT_STATE.REGS[rs] < 0)
        {
            NEXT_STATE.PC += offset;
        }
        break;

    case RT_BGEZ:
        // Branch on greater than or equal to zero
        printf("%d: %x\n", rs, CURRENT_STATE.REGS[rs]);
        if ((int32_t)CURRENT_STATE.REGS[rs] >= 0)
        {

```

```

        NEXT_STATE.PC += offset;
    }
    break;

case RT_BLTZAL:
    NEXT_STATE.REGS[31] = CURRENT_STATE.PC + 4;
    if ((int32_t)CURRENT_STATE.REGS[rs] < 0)
    {
        NEXT_STATE.PC += offset;
    }
    break;

case RT_BGEZAL:
    NEXT_STATE.REGS[31] = CURRENT_STATE.PC + 4;
    if ((int32_t)CURRENT_STATE.REGS[rs] >= 0)
    {
        NEXT_STATE.PC += offset;
    }
    break;
}
break;

default:
    // 非法指令，什么也不做
}
}

```

其中各个 case 语句内部主要是使用指令字段值、CURRENT\_STATE 的各个寄存器和内存，更新 NEXT\_STATE 的各个寄存器和内存。

这样，逐一完善各个 case 语句，即可实现 process\_instruction 函数。中间由于涉及到字节、半字的读取和写入，我还自己实现了 mem\_read\_8 等函数，这些函数主要调用了 shell.c 文件中实现的 mem\_read\_32() 和 mem\_write\_32() 来访问内存。

完整 sim.c 的代码见文件夹中的 src 目录，也可参考 [natsunoshion/Computer-Architecture \(github.com\)](https://github.com/natsunoshion/Computer-Architecture)。

## 其他改进

首先，QtSpim 并不好用，我在尝试后发现频频报错。经过查阅报错资料，我在 Stack Overflow 上了解到 **Mars 更适合将 MIPS 汇编语言转为机器码**。（参考：[assembly - How to get the machine code from Mars simulator - Stack Overflow](https://stackoverflow.com/questions/1044224/assembly-how-to-get-the-machine-code-from-mars-simulator)）首先，在官网上下载 Mars4\_5.jar，安装 Java，然后将此 jar 文件复制到 inputs 文件夹下，并新建文件 MarsCompiler.java：

```

import mars.*;
import java.util.*;

public class MarsCompiler
{
    public static void main(String... args) throws Exception
    {
        if (args.length != 1)
        {
            System.err.println("Usage: java MarsCompiler input");
            System.exit(1);
        }
    }
}

```

```

    }

    Globals.initialize(false);

    MIPSprogram program = new MIPSprogram();
    program.readSource(args[0]);

    ErrorList errors = null;

    try
    {
        program.tokenize();
        errors = program.assemble(new ArrayList(Arrays.asList(program)), true,
true);
    }
    catch (ProcessingException e)
    {
        errors = e.errors();
    }

    if (errors.errorsOccurred() || errors.warningsOccurred())
    {
        for (ErrorMessage em :
(ArrayList<ErrorMessage>)errors.getErrorMessages())
        {
            System.err.println(String.format("[%s] %s@%d:%d %s",
em.isWarning() ? "WRN" : "ERR",
em.getFilename(), em.getLine(), em.getPosition(),
em.getMessage()));
        }
        System.exit(2);
    }

    for (ProgramStatement ps :
(ArrayList<ProgramStatement>)program.getMachineList())
        System.out.println(String.format("%08x %08x", ps.getAddress(),
ps.getBinaryStatement()));

    }
}

```

然后在 inputs 文件夹下打开终端，输入 `javac -cp Mars4_5.jar MarsCompiler.java`，即可安装 MarsCompiler。最后，使用命令 `java -cp Mars4_5.jar MarsCompiler xxx.s` 即可。

由于输入命令（还涉及到切换文件目录）太麻烦，我在 lab1 文件夹目录下又创建了一个 **Makefile**，内容为：

```

sim:
    gcc -g -O2 ./src/shell.c ./src/sim.c -o ./src/sim

as:
    java -cp ./inputs/Mars4_5.jar MarsCompiler ./inputs/$(arg1).s

run:
    src/sim inputs/$(arg1).x

.PHONY: clean
clean:
    rm -rf ./src/*.o ./src/*~ ./src/sim

```

这样，以 `addiu.s` 为例，我们只需要在 lab1 文件夹下打开终端，输入 `make sim` 生成 `sim` 可执行文件（ELF 格式），然后输入 `make as arg1=addiu` 生成机器码，最后输入 `make run arg1=addiu` 即可运行。

## 结果验证

### 额外编写的程序

由于手册要求：

also write one or more programs using all of the required MIPS instructions that are listed in the table above

所以这里为了进一步验证结果，我自己编写了另一个汇编代码文件 `extratest.s`，**该汇编代码包括了表中所有的 53 条指令**。代码如下：（更细节的控制流在下面的测试部分解释）

```

.text
main:
    addi $1, $0, 1 # $1 = 1
    addi $2, $0, 2 # $2 = 2
    slti $3, $1, 5 # $3 = 1, $1 < 5
    bne $3, $0, L2 # 跳转执行, 因为$3!=0

L1:
    addi $1, $1, 3 # 第一次$1 = 4, 第二次$1 = 7
    sltiu $4, $1, 5 # 第一次$4 = 1, $1 unsigned < 5, 第二次$4 = 0, $1 unsigned >= 5
    beq $4, $0, L3 # 第一次不跳转执行, 因为$4==1, 第二次跳转执行, 因为$4==0

L2:
    andi $5, $1, 2 # 第一次第二次都相当于$5 = 0, $1和2按位与($1第一次为1, 第二次为4)
    beq $5, $0, L1 # 第一次第二次都跳转执行, 因为$5==0

L3:
    ori $6, $1, 1 # $6 = 7, $1和1按位或
    xor $7, $6, $1 # $7 = 0, $6和$1按位异或
    bne $7, $0, L5 # 不跳转执行, 因为$7==0

L4:
    lui $2, 0x1000 # 设置基址
    lui $8, 0x1234 # $8 = 0x12340000
    li $9, 0x13 # $9 = 0x13, li是伪指令

```



```

li $10, 0x14 # $10 = 0x14
li $12, 0x12 # $12 = 0x12
sb $9, 1($2) # 存储字节
sh $10, 2($2) # 存储半字
sw $12, 4($2) # 存储字
lb $9, 1($2) # 加载字节
lbu $11, 1($2) # 无符号加载字节
lh $10, 2($2) # 加载半字
lhu $13, 2($2) # 无符号加载半字
lw $12, 4($2) # 加载字
bltzal $1, L5 # 如果$1<0调用L5
addi $1, $1, 1 # $1加1

```

L5:

```

jal L6 # 跳转连接调用L6
li $v0, 10 # $v0 = 10
syscall

```

L6:

```

mult $1, $2 # 乘法,$1 = 8
mflo $3 # 取乘法结果
mfhi $4 # 取乘法高位结果
div $3, $1 # 除法
mflo $5 # 取除法结果
add $6, $1, $2 # 加法
addu $7, $1, $2 # 无溢出加法
sub $8, $1, $2 # 减法
subu $9, $1, $2 # 无溢出减法
sllv $10, $1, $2 # 逻辑左移变址
srlv $11, $1, $2 # 逻辑右移变址
sra v $13, $1, $2 # 算术右移变址
sll $12, $1, 10 # 逻辑左移立即数
srl $15, $1, 5 # 逻辑右移立即数
sra $16, $1, 3 # 算术右移立即数
and $17, $1, $2 # 按位与
or $18, $1, $2 # 按位或
xor $19, $1, $2 # 按位异或
nor $19, $1, $2 # 按位或非
slt $19, $1, $2 # 设置小于
sltu $19, $1, $2 # 无符号设置小于
multu $1, $2 # 无符号乘法
divu $1, $2 # 无符号除法
xori $1, $1, 1 # $1和1按位异或立即数
mthi $3 # 设置乘法高位寄存器
mtlo $4 # 设置乘法低位寄存器

```

L7:

```

addiu $3, $31, 0 # 保存此前$31的值
bgez $1, L9 # 跳转执行,因为$1 >= 0

```

L8:

```

bgezal $1, L8 # 如果$1 >= 0,跳转链接执行

```

L9:

```

blez $1, L10 # 如果$1 <= 0,跳转执行
addiu $1, $1, -1 # $1 -= 1

```

```

b L9 # 跳转至L9,循环

L10:
    bgtz $1, L12 # 不跳转执行,因为$1 = 0

L11:
    bltz $1, L10 # 不跳转执行,因为$1 = 0

L12:
    la $2, L13 # 将L13地址加载到$2,这是一个伪指令
    jalr $2 # 跳转寄存器链接

L13:
    addiu $31, $3, 0 # 还原$31
    jr $31 # 返回

```

## 测试

出于篇幅考虑，上面的程序已经写得非常详细了，因此**以上述程序为例进行测试验证**。已有样例的执行结果不再放出。同时，不可能把所有的执行过程和 `rdump` 结果全部放在实验报告中，因此这里**主要给出每一个基本块的运行结果**，实际测试流程为依次 `run 1` 并通过命令 `rdump` 观察寄存器。首先运行 L1 前的代码：

```

Registers:
R0: 0x00000000
R1: 0x00000001
R2: 0x00000002
R3: 0x00000001
R4: 0x00000000

```

接着，逐步 `run 1` 并 `rdump` 观察寄存器，在第二次执行到 L1 的末尾时，寄存器如下：

```

Registers:
R0: 0x00000000
R1: 0x00000007
R2: 0x00000002
R3: 0x00000001
R4: 0x00000000

```

可以看到 `$1` 已经为 7 了。再 `run 1` 就到 L3 处的指令了。

逐步执行 L3 中的指令：

```

Registers:
R0: 0x00000000
R1: 0x00000007
R2: 0x00000002
R3: 0x00000001
R4: 0x00000000
R5: 0x00000000
R6: 0x00000007
R7: 0x00000000

```

看出 `$6 = 7` 且 `$7 = 0`。

接下来执行 L4 部分，注意，编写的汇编代码中有伪指令 `li` 和 `la`，分别是加载立即数和加载地址，**它们在经过 MARS 汇编之后会翻译为已经实现的其他指令**（如 `addiu` 等），所以无需担心。L4 部分较长，先运行 `sw` 部分：

```
Registers:
R0: 0x00000000
R1: 0x00000007
R2: 0x10000000
R3: 0x00000001
R4: 0x00000000
R5: 0x00000000
R6: 0x00000007
R7: 0x00000000
R8: 0x12340000
R9: 0x00000013
R10: 0x00000014
R11: 0x00000000
R12: 0x00000012
R13: 0x00000000
```

可以看出 `li` 伪指令生效，且应当将数据存放在了内存中。接下来运行后半部分：（到 `bltzal` 指令前）

```
Registers:
R0: 0x00000000
R1: 0x00000007
R2: 0x10000000
R3: 0x00000001
R4: 0x00000000
R5: 0x00000000
R6: 0x00000007
R7: 0x00000000
R8: 0x12340000
R9: 0x00000013
R10: 0x00000014
R11: 0x00000013
R12: 0x00000012
R13: 0x00000014
R14: 0x00000000
```

这样，刚刚的几个寄存器值没变化，且 `$11` 和 `$13` 中也从内存中加载出数据了，因此正确。

现在再执行两条语句，看出没有跳转，因为 `$1>0`，合理。现在 `$1` 自增 1 后变为 8 了：

```
Registers:
R0: 0x00000000
R1: 0x00000008
R2: 0x10000000
R3: 0x00000001
R4: 0x00000000
R5: 0x00000000
R6: 0x00000007
R7: 0x00000000
R8: 0x12340000
R9: 0x00000013
R10: 0x00000014
R11: 0x00000013
R12: 0x00000012
R13: 0x00000014
R14: 0x00000000
```

然后程序跳转至 L5，随后 `jal` 到了 L6。L6 包括很多算术运算，运行结束后寄存器如下：

Registers:  
R0: 0x00000000  
R1: 0x00000009  
R2: 0x10000000  
R3: 0x80000000  
R4: 0x00000000  
R5: 0x00000000  
R6: 0x10000008  
R7: 0x10000008  
R8: 0xf0000008  
R9: 0xf0000008  
R10: 0x00000008  
R11: 0x00000008  
R12: 0x00002000  
R13: 0x00000008  
R14: 0x00000000  
R15: 0x00000000  
R16: 0x00000001  
R17: 0x00000000  
R18: 0x10000008  
R19: 0x00000001  
R20: 0x00000000  
R21: 0x00000000  
R22: 0x00000000  
R23: 0x00000000  
R24: 0x00000000  
R25: 0x00000000  
R26: 0x00000000  
R27: 0x00000000  
R28: 0x00000000  
R29: 0x00000000  
R30: 0x00000000  
R31: 0x00400070  
HI: 0x80000000  
LO: 0x00000000

由于篇幅有限，这里对结果进行简要分析：

1. `mult $1, $2` 进行有符号乘法,此时  $\$1=8$ ,  $\$2=10$ , 所以得到结果 64,存入 LO 寄存器。
2. `mfhi $4` 取出高 32 位存入  $\$4$ ,因为结果小于 32 位,所以  $\$4 = 0$ 。
3. `mflo $3` 取出低 32 位存入  $\$3$ ,所以  $\$3 = 64$ 。
4. `div $3, $1` 进行有符号除法, $64 / 8 = 8$ ,商存入 LO,余数存入 HI。所以  $LO = 8$ ,  $HI = 0$ 。
5. `mflo $5` 取出商 8 存入  $\$5$ 。
6. `add $6, $1, $2` 有符号加法, $8 + 10 = 18$ ,所以  $\$6 = 18$ 。
7. `addu $7, $1, $2` 无符号加法,也是  $8 + 10 = 18$ ,所以  $\$7 = 18$ 。
8. `sub $8, $1, $2` 有符号减法, $8 - 10 = -2$ ,但以补码表示,所以  $\$8 = 0xfffffffffe$ 。
9. `subu $9, $1, $2` 无符号减法, $8 - 10 = fffffff8$ ,所以  $\$9 = 0xfffffffff8$ 。
10. 位移指令将  $\$1$  的值按  $\$2$  指定的位数进行位移,所以结果正确。
11. 逻辑与或指令将  $\$1$  和  $\$2$  进行位运算,结果正确。
12. 比较指令比较  $\$1$  和  $\$2$  的大小,设置结果标志,所以  $\$19 = 1$  表示  $\$1 < \$2$ 。
13. 乘除指令同理,进行无符号运算。
14. `xori` 按位异或立即数,将  $\$1$  异或 1 得到反码结果 9。
15. `mtli` 和 `mtlo` 设置 HI 和 LO 寄存器的值, 分别为  $\$3$  和  $\$4$ , 与实际相符。

说明结果无误。

执行 L7 中的指令 `addiu $3, $31, 0`:

```
Registers:
R0: 0x00000000
R1: 0x00000009
R2: 0x10000000
R3: 0x00400070
R4: 0x00000000
R5: 0x00000000
R6: 0x10000008
R7: 0x10000008
R8: 0xf0000008
R9: 0xf0000008
R10: 0x00000008
R11: 0x00000008
R12: 0x00002000
R13: 0x00000008
R14: 0x00000000
R15: 0x00000000
R16: 0x00000001
R17: 0x00000000
R18: 0x10000008
R19: 0x00000001
R20: 0x00000000
```

成功。然后程序会跳转到 L9 不断循环，一直将 `$1` 减到 0：（为了方便观察，我将指令机器码打印了出来）

```
MIPS-SIM> run 3

Simulating for 3 cycles...

18200002
2421ffff
401fffd
MIPS-SIM> run 3

Simulating for 3 cycles...

18200002
2421ffff
401fffd
MIPS-SIM> run 3

Simulating for 3 cycles...

18200002
2421ffff
401fffd
MIPS-SIM> run 3

Simulating for 3 cycles...

18200002
1c200001
420fffe
MIPS-SIM> □
```

最后，由于 `$1==0`，跳转到了 L10，然后 L10 和 L11 都不会跳转。在 L12 中指令 `la $2, L13`:

```
87  L11:
88  | bltz $1, L10 # 不跳转执行,因为$1 = 0
89
90  L12:
91  | la $2, L13 # 将L13地址加载到$2,这是一个伪指令
92  | jalr $2 # 跳转寄存器链接
93
```

---

PROBLEMS   OUTPUT   DEBUG CONSOLE   TERMINAL   PORTS

Registers:

R0: 0x00000000  
R1: 0x00400000  
**R2: 0x0040010c**  
R3: 0x00400070  
R4: 0x00000000  
R5: 0x00000000  
R6: 0x10000008  
R7: 0x10000008  
R8: 0xf0000008  
R9: 0xf0000008  
R10: 0x00000008  
R11: 0x00000008  
R12: 0x00002000  
R13: 0x00000008  
R14: 0x00000000




地址也成功地加载了。L13 还会把 \$31 还原:

```
94  L13:
95  | addiu $31, $3, 0 # 还原$31
96  | jr $31 # 返回
```

---

PROBLEMS   OUTPUT   DEBUG CONSOLE   TERMINAL   PORTS

R16: 0x00000001  
R17: 0x00000000  
R18: 0x10000008  
R19: 0x00000001  
R20: 0x00000000  
R21: 0x00000000  
R22: 0x00000000  
R23: 0x00000000  
R24: 0x00000000  
R25: 0x00000000  
R26: 0x00000000  
R27: 0x00000000  
R28: 0x00000000  
R29: 0x00000000  
R30: 0x00000000  
**R31: 0x00400070**  
HI: 0x80000000  
LO: 0x00000000



最后程序返回到 `li $v0, 10` 和 `syscall`, 结束运行:

```
Simulating for 1 cycles...

2402000a
MIPS-SIM> run 1

Simulating for 1 cycles...

c
MIPS-SIM> run 1

Can't simulate, Simulator is halted

MIPS-SIM> rdump

Current register/bus values :
-----
Instruction Count : 98
PC                : 0x00400078
Registers:
R0: 0x00000000
R1: 0x00400000
R2: 0x0000000a
R3: 0x00400070
R4: 0x00000000
R5: 0x00000000
R6: 0x10000008
R7: 0x10000008
R8: 0xf0000008
R9: 0xf0000008
R10: 0x00000008
```

综上，结果正确。