Lab1 指令级 MIPS 模拟器

姓名：王茂增
学号：2113972
代码：https://github.com/mzwangg/ComputerArchitecture

sim.c 整体设计

1. **process_instruction()**：处理当前指令
    1. **读取当前指令**：通过`mem_read_32(CUR_PC)`读取
    2. **解析当前指令**：通过位运算，解析出`op、rs、rt、rd、immediate、target、shamt、funct`对应的值，并保存在全局变量中
    3. **PC 加 4**：将 NEXT_PC 设为 CUR_PC + 4
    4. **分发并执行指令**：根据`op`的值，判断不同指令的类型并分别处理
        1. **0p == 0x01**：R 型指令，调用`r_fmt_ins_exec()`进行处理
            1. **r_fmt_ins_exec()**：通过`switch(funct)`，解析出不同指令，并实现相应功能
        2. **op == 0x01**: I 型分支指令
            1. **i_fmt_br_ins_exec()**：通过`switch (rt)`解析出不同指令，并实现相应功能
        3. **op == 0x02 || op == 0x03**: J 型指令
            1. **j_fmt_ins_exec()**：通过`switch (op)`解析出不同指令，并实现相应功能
        4. **else**: I 型指令
            1. **i_fmt_ins_exec()**：通过`switch (op)`解析出不同指令，并实现相应功能

具体实现

逻辑运算指令

and、or、xor、nor 指令

```
// 可直接调用c++中的逻辑运算符，将rs和rt寄存器的值进行逻辑运算，将结果存放在rd中
NEXT_REG(rd) = CUR_REG(rs) & CUR_REG(rt); //AND
NEXT_REG(rd) = CUR_REG(rs) | CUR_REG(rt); //OR
NEXT_REG(rd) = CUR_REG(rs) ^ CUR_REG(rt); //XOR
NEXT_REG(rd) = ~(CUR_REG(rs) | CUR_REG(rt)); //NOR
```

andi、ori、xori 指令指令

```
//可直接调用c++中的逻辑运算符，将rs寄存器的值与经无符号拓展的立即数进行逻辑运算，将结果存放在rt中
NEXT_REG(rt) = CUR_REG(rs) & (uint32_t)immediate;; //ANDI
NEXT_REG(rt) = CUR_REG(rs) | (uint32_t)immediate; //ORI
NEXT_REG(rt) = CUR_REG(rs) ^ (uint32_t)immediate;; //XORI
```

lui 指令

```
// 加载立即数的高16位，低16位用0填充，加载到rt寄存器中
NEXT_REG(rt) = (uint32_t)immediate << 16; //LUI
```

移位指令

sll、sllv，sra、srav、srl、srlv 指令

```
// 逻辑左移、右移指令，直接使用<<或>>即可，对rt进行运算，结果储存在rd中
NEXT_REG(rd) = CUR_REG(rt) << shamt; //SLL
NEXT_REG(rd) = CUR_REG(rt) >> shamt; //SRL

// 算数右移指令，先将数据转为有符号整数，再右移即可，对rt进行运算，结果储存在rd中
NEXT_REG(rd) = (int32_t)CUR_REG(rt) >> shamt; //SRA

// 算数左移、右移，移动位数为rs寄存器的后五位，所以通过& 0x1F得到低五位的值，结果保存在
rd寄存器中
NEXT_REG(rd) = CUR_REG(rt) << (CUR_REG(rs) & 0x1F); //SLLV
NEXT_REG(rd) = (int32_t)CUR_REG(rt) >> (CUR_REG(rs) & 0x1F); //SRLV

// 类似SRLV指令，不过是算数右移，所以将rt寄存器的值转为有符号整数
NEXT_REG(rd) = (int32_t)CUR_REG(rt) >> (CUR_REG(rs) & 0x1F); // SRAV
```

算数操作指令

add、addu、sub、subu、slt，sltu 指令

```
// add与addu、sub与subu的区别在于是否进行溢出检测，由于Lab1暂时不实现，所以两者的命令一
样
// rs寄存器的值 +/- rt寄存器的值，结果保存在rd中
NEXT_REG(rd) = CUR_REG(rs) + CUR_REG(rt); //ADD
NEXT_REG(rd) = CUR_REG(rs) + CUR_REG(rt); //ADDU
NEXT_REG(rd) = CUR_REG(rs) - CUR_REG(rt); //SUB
NEXT_REG(rd) = CUR_REG(rs) - CUR_REG(rt); //SUBU


// SLT和SLTU的区别在于处理的是有符号数还是无符号数
// 所以SLT要是用(int32_t)进行类型转换
// 如果rs寄存器的值小于rt寄存器的值则将rd寄存器置为1，否则置为0
NEXT_REG(rd) = (int32_t)CUR_REG(rs) < (int32_t)CUR_REG(rt); //SLT
NEXT_REG(rd) = CUR_REG(rs) < CUR_REG(rt); //SLTU
```

addi，addiu、slti、sltiu 指令

```
// addi与addiu的区别在于是否进行溢出检测，由于Lab1暂时不实现，所以两者的命令一样
// 对于符号拓展，由于immediate为uint16_t类型，我们要先将其转为int16_t，再转为int32_t
// 将rs寄存器的值加上符号拓展的立即数再保存在rt中
NEXT_REG(rt) = CUR_REG(rs) + (int32_t)(int16_t)immediate; //ADDI
NEXT_REG(rt) = CUR_REG(rs) + (int32_t)(int16_t)immediate; //ADDIU

// slti、sltiu的区别在于处理的是有符号数还是无符号数
// 两者均需要进行符号拓展，所以对于SLTIU，需要进行(uint32_t)(int32_t)(int16_t)的转换，
先转为符号拓展的32位有符号整数，再转为无符号
// 如果rs寄存器的值小于符号拓展的立即数，则将rt寄存器置为1，否则置为0
NEXT_REG(rt) = (int32_t)CUR_REG(rs) < (int32_t)(int16_t)immediate; //SLTI
NEXT_REG(rt) = CUR_REG(rs) < (uint32_t)(int32_t)(int16_t)immediate; //SLTIU
```

multu、mult 指令

```
// MULT
// 有符号乘法指令，将结果的低32位保存在NEXT_LO，高32位保存在NEXT_HI
NEXT_HI = ((int64_t)CUR_REG(rs) * (int64_t)CUR_REG(rt)) >> 32;
NEXT_LO = ((int64_t)CUR_REG(rs) * (int64_t)CUR_REG(rt)) & 0xFFFFFFFF;

//MULTU
// 无符号乘法指令，将结果的低32位保存在NEXT_LO，高32位保存在NEXT_HI
NEXT_HI = ((uint64_t)CUR_REG(rs) * (uint64_t)CUR_REG(rt)) >> 32;
NEXT_LO = ((uint64_t)CUR_REG(rs) * (uint64_t)CUR_REG(rt)) & 0xFFFFFFFF;
```

divu、div 指令

```
// DIV为有符号除法指令，NEXT_LO保存除数，NEXT_HI保存余数
if (CUR_REG(rt) != 0) {
    NEXT_LO = (int32_t)CUR_REG(rs) / (int32_t)CUR_REG(rt);
    NEXT_HI = (int32_t)CUR_REG(rs) % (int32_t)CUR_REG(rt);
} else {
    printf("除数不能为0! ");
}

// DIVU为无符号除法指令，NEXT_LO保存除数，NEXT_HI保存余数
if (CUR_REG(rt) != 0) {
    NEXT_LO = CUR_REG(rs) / CUR_REG(rt);
    NEXT_HI = CUR_REG(rs) % CUR_REG(rt);
} else {
    printf("除数不能为0! ");
}
```

转移指令

jr、jalr、j、jal（跳转指令）

```
// JR为跳转指令，将下一个PC设置为rs寄存器的值
NEXT_PC = CUR_REG(rs);

// JALR使用rd保存下一PC的值，然后跳转到rs寄存器指定的地址
NEXT_REG(rd) = NEXT_PC;
NEXT_PC = CUR_REG(rs);

// J为无条件跳转，PC的高四位不变，低28位由target给出，其中NEXT_PC已经PC+4
NEXT_PC = (NEXT_PC & 0xF0000000) | (target << 2);


// 对于JAL指令，首先将PC+4的值保存在$31寄存器
NEXT_REG(31) = CUR_PC + 4;
// 无条件跳转，PC的高四位不变，低28位由target给出，其中NEXT_PC已经PC+4
NEXT_PC = (NEXT_PC & 0xF0000000) | (target << 2);
```

beq、bne、bgez、bgezal、bltz、bltzal、bgtz、blez（分支指令）

```
//分支指令的目标地址均为立即数符号拓展并左移两位的地址+PC+4，其中PC+4已经在其他地方实现

//BEQ和BNE分别在rs和rt寄存器的值相等时分支
if (CUR_REG(rs) == CUR_REG(rt)) { //BEQ
    NEXT_PC += ((int32_t)(int16_t)immediate << 2);
}
if (CUR_REG(rs) != CUR_REG(rt)) { //BNE
    NEXT_PC += ((int32_t)(int16_t)immediate << 2);
}

// BGEZ指令和BGEZAL指令均在寄存器值大于等于0时分支，不过BGRZAL会同时将下一PC写入寄存器
$31
if ((int32_t)CUR_REG(rs) >= 0) //BGEZ
    NEXT_PC += ((int32_t)(int16_t)immediate << 2);
if ((int32_t)CUR_REG(rs) >= 0) { //BGEZAL
    NEXT_REG(31) = NEXT_PC;
    NEXT_PC += ((int32_t)(int16_t)immediate << 2);
}

// BLTZ和BLTZAL与BGEZ指令和BGEZAL指令类似，不过是在小于0时分支
if ((int32_t)CUR_REG(rs) < 0) //BLTZ
    NEXT_PC += ((int32_t)(int16_t)immediate << 2);
if ((int32_t)CUR_REG(rs) < 0) {
    NEXT_REG(31) = NEXT_PC; //BLTZAL
    NEXT_PC += ((int32_t)(int16_t)immediate << 2);
}

// BGTZ为大于则分支，立即数符号拓展并左移两位,其中NEXT_PC已经PC+4
if ((int32_t)CUR_REG(rs) > 0)
    NEXT_PC += ((int32_t)(int16_t)immediate << 2);
break;
```

```
// BLEZ为小于等于则分支，立即数符号拓展并左移两位,其中NEXT_PC已经PC+4
if ((int32_t)CUR_REG(rs) <= 0)
    NEXT_PC += ((int32_t)(int16_t)immediate << 2);
```

加载存储指令

对于加载存储指令，都需要读取和写入数据到内存中。但是我们要保证读取和写入的地址 4 字节对齐，所以我们首先定义如下变量：

- address: 写入或读取的地址，通过符号拓展的 immediate 再加上 rs 寄存器的值计算
- address_aligned: 在 address 之前且最近的四字节对齐地址，我们读取和写入都要针对这个地址进行
- address_data: 上述对齐地址处的值

```
uint32_t address = (uint32_t)(int32_t)(int16_t)immediate + CUR_REG(rs); // 计算
address
uint32_t address_aligned = address & 0xfffffffc; // address & 0xfffffffc使address4
字节对齐
uint32_t address_data = mem_read_32(address_aligned); // 读取对齐后address的位置
```

lb、lbu、Lh、Lhu、lw 指令

对于上述指令，我着重介绍一下 LB 指令是如何实现的，其他指令的实现方法类似。

对于 LB 指令，可以读取任意地址处的字节，不过我们只能读取四字节对齐地址的值，所以需要进行处理。我们首先通过`(address & 0x3) << 3`计算得到 LB 指令读取位置相对于四字节对齐地址的偏移量，然后通过`(address_data & (0xff << shift_lb))`取出目标地址的数据，并通过`>> shift_lb)`将该数据移到最低位，最后进行符号拓展得到对应位置的值。

```
// LB指令
int16_t shift_lb = (address & 0x3) << 3;
NEXT_REG(rt) = (int32_t)(int8_t)(((address_data & (0xff << shift_lb)) >>
shift_lb));
```

```
//LBU指令
int16_t shift_lbu = (address & 0x3) << 3;
NEXT_REG(rt) = (uint32_t)(((address_data & (0xff << shift_lbu)) >> shift_lbu));

//LH指令
if (address & 0x1) { // 当地址的最低位不是零时发生地址错误
    printf("地址错误!\n");
} else {
    int16_t shift_lh = (address & 0x2) << 3;
    NEXT_REG(rt) = (int32_t)(int16_t)(((address_data & (0xffff << shift_lh)) >>
shift_lh));
}
```

```
//LHU指令
if (address & 0x1) { // 当地址的最低位不是零时发生地址错误
    printf("地址错误!\n");
} else {
    int16_t shift_lhu = (address & 0x2) << 3;
    NEXT_REG(rt) = (uint32_t)(((address_data & (0xffff << shift_lhu)) >>
shift_lhu));
}

//LW指令
if (address & 0x3) { // 当地址的低两位不是零时发生地址错误
    printf("地址错误!\n");
} else {
    NEXT_REG(rt) = mem_read_32(address);
}
```

sb、sh、sw 指令

同样的，对于上述指令，我们需要写入一个不一定四字节对齐的位置，下面我以 SB 指令为例进行介绍。

对于 SB 地址，我们， 仍然通过`(address & 0x3) << 3`计算得到 SB 指令写入位置相对于四字节对齐地址的偏移量，然后通过`address_data &= ~(0xFF << shift_sb)`清除原始数据的相应 8 位位置， 然后通过指令`address_data |= ((CUR_REG(rt) & 0xff) << shift_sb)`对这八位地址进行写入，最后`mem_write_32(address_aligned, address_data)`写到内存的相应位置。

```
// SB指令
// 计算要加载位置的偏移量
int16_t shift_sb = (address & 0x3) << 3;
// 清除原始数据的相应8位位置
address_data &= ~(0xFF << shift_sb);
// 将rt寄存器的低8位值存储到原始数据的相应位置
address_data |= ((CUR_REG(rt) & 0xff) << shift_sb);
// 将修改后的数据写回到内存
mem_write_32(address_aligned, address_data);
```

```
// SH指令
if (address & 0x1) { // 当地址的最低位不是零时发生地址错误
    printf("地址错误!\n");
} else {
    // 计算要加载位置的偏移量
    int16_t shift_sh = (address & 0x2) << 3;
    // 清除原始数据的相应16位位置
    address_data &= ~(0xFFFF << shift_sh);
    // 将rt寄存器的低16位值存储到原始数据的相应位置
    address_data |= ((CUR_REG(rt) & 0xffff) << shift_sh);
    // 将修改后的数据写回到内存
    mem_write_32(address_aligned, address_data);
}
```

```
// SW指令
if (address & 0x3) { // 当地址的低两位不是零时发生地址错误
    printf("地址错误!\n");
} else {
    mem_write_32(address, CUR_REG(rt));
}
```

实验验证

验证方法

Mars 模拟器是一个用于 MIPS 架构汇编语言和机器码的模拟和调试工具。这个模拟器主要用于教育目的，帮助学生和程序员理解计算机体系结构和汇编语言编程。

在实验中，我使用 Mars 将`inputs`文件夹中的.s 文件转为.x 文件，并逐步执行代码与本项目的结果进行对照，本项目逐步执行结果可在`dumpsim`文件夹中找到。通过逐步对照，结果表明，本项目的实现完全正确。

增加测试程序

除此之外，本项目还编写了一个测试文件`my_test.s`，包含了逻辑运算、算术运算、跳转指令、加载存储指令等，从而更全面地验证了程序的正确性。下面是`my_test.s`文件内容：

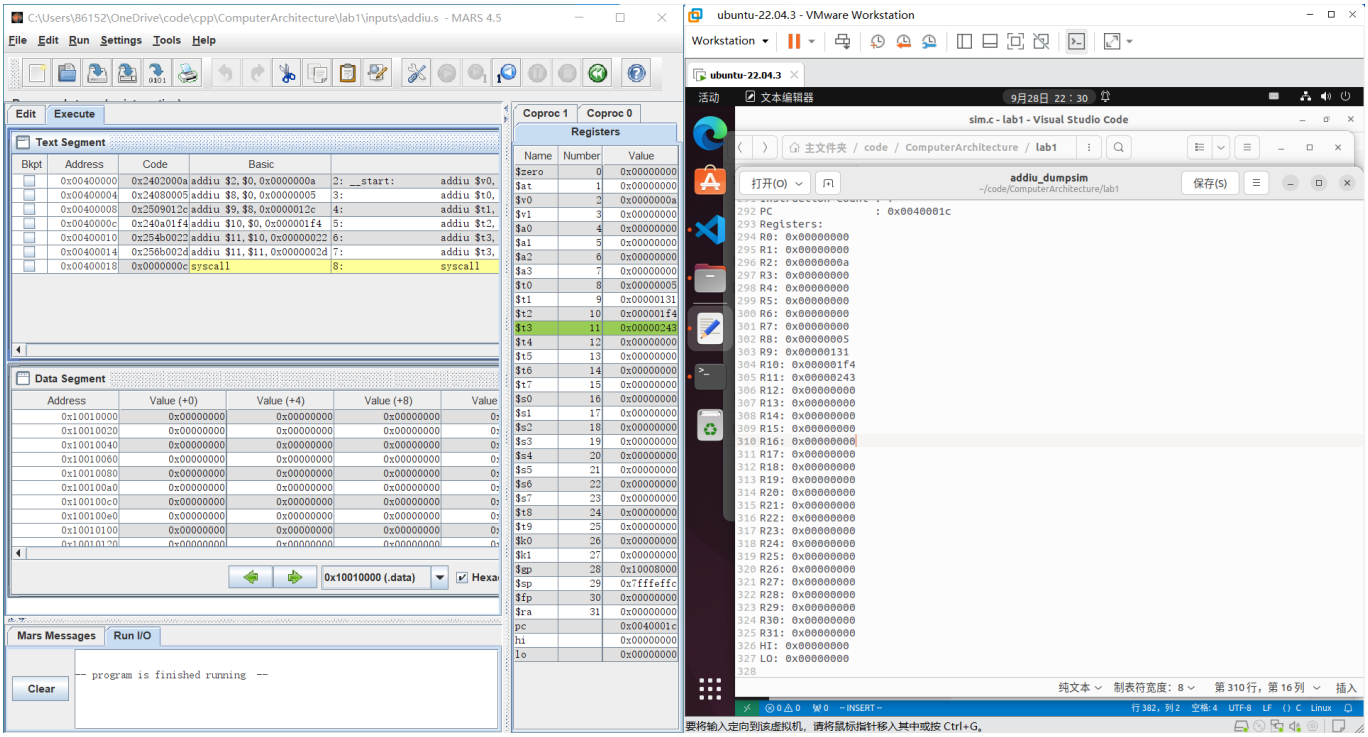
```
.data
    array: .space 16  # 用于存储数据的数组
    result: .word 0   # 用于存储计算结果的变量

.text
    main:
        # 初始化数据
        ori $t0, $zero, 10  # 将寄存器$t0初始化为10
        ori $t1, $zero, 3   # 将寄存器$t1初始化为3
        sw $t0, array       # 存储$t0的值到数组
        sw $t1, array + 4   # 存储$t1的值到数组的下一个位置

        # 加法
        lw $t2, array       # 从数组加载数据到$t2
        add $t3, $t0, $t1   # 计算$t0 + $t1
        add $t4, $t2, $t3   # 计算$t2 + $t3

        # 减法
        sub $t5, $t4, $t2   # 计算$t4 - $t2

        # 乘法
        mult $t5, $t1   # 计算$t5 * $t1

        # 除法
        div $t7, $t5, $t0   # 计算$t6 / $t0

        # 分支跳转
        beq $t7, $t1, equal
```

```
        bne $t7, $t1, not_equal

    equal:
        ori $t8, $zero, 1
        j end

    not_equal:
        ori $t8, $zero, 0

    end:
        # 存储计算结果到result变量
        sw $t8, result

        # 终止程序
        addiu $v0, $zero, 10
        syscall
```

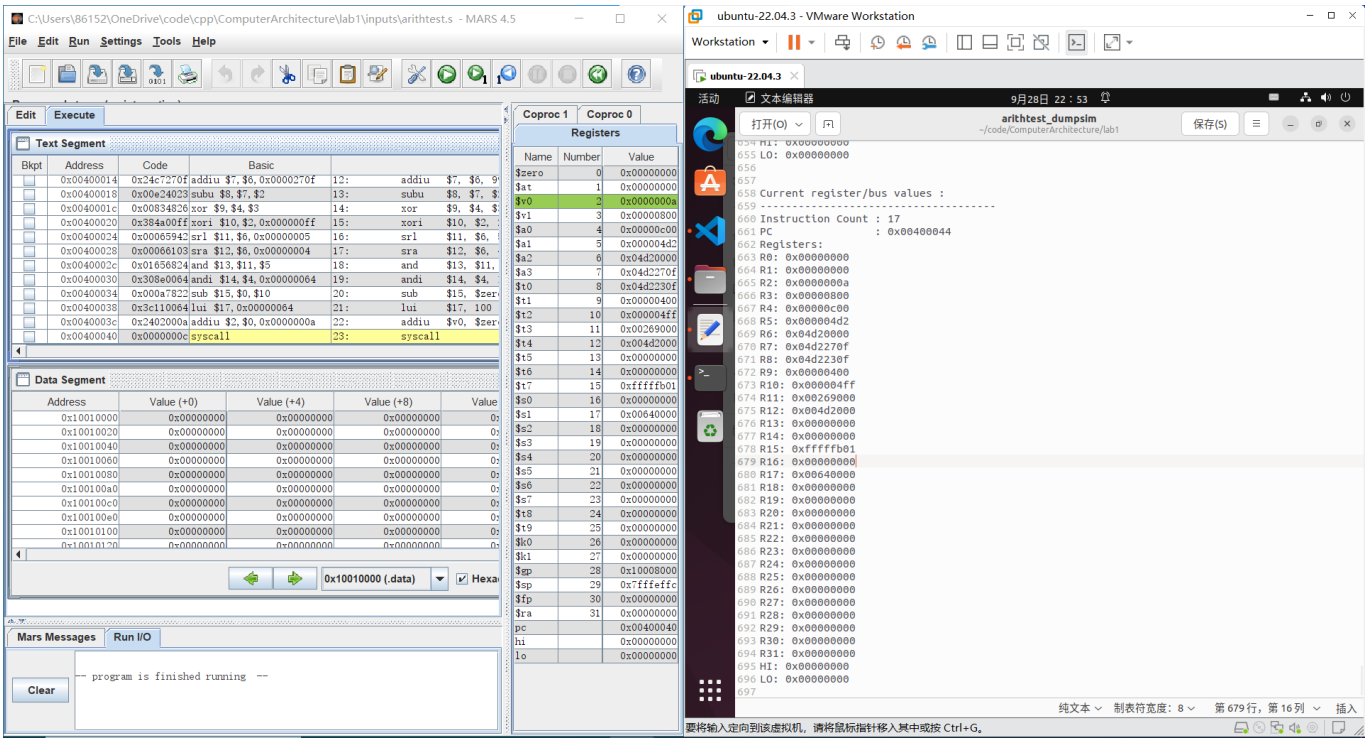
验证结果

最后，我将附上每一个实验最后的寄存器和内存结果与 Mars 运行结果的对照图，以说明程序的正确性。可以看到，寄存器和内存与 Mars 的运行结果一致。

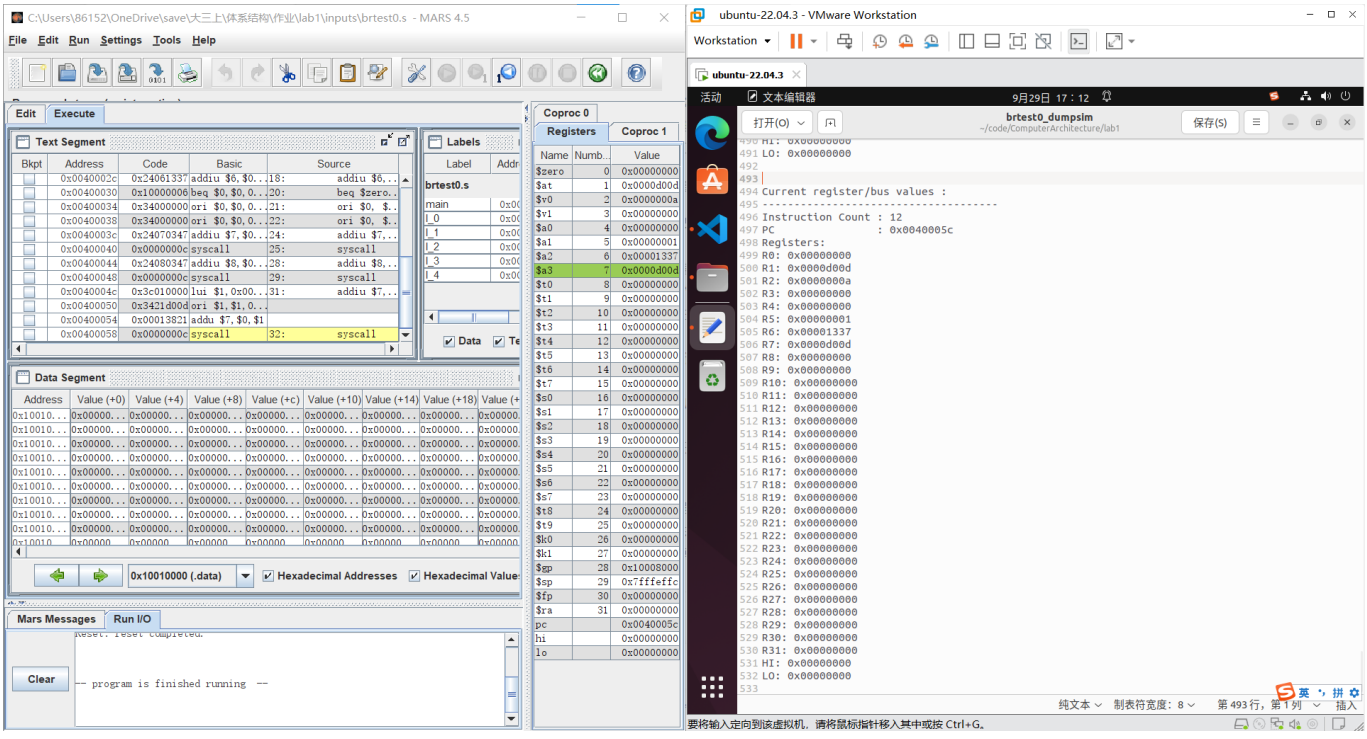
daddiu



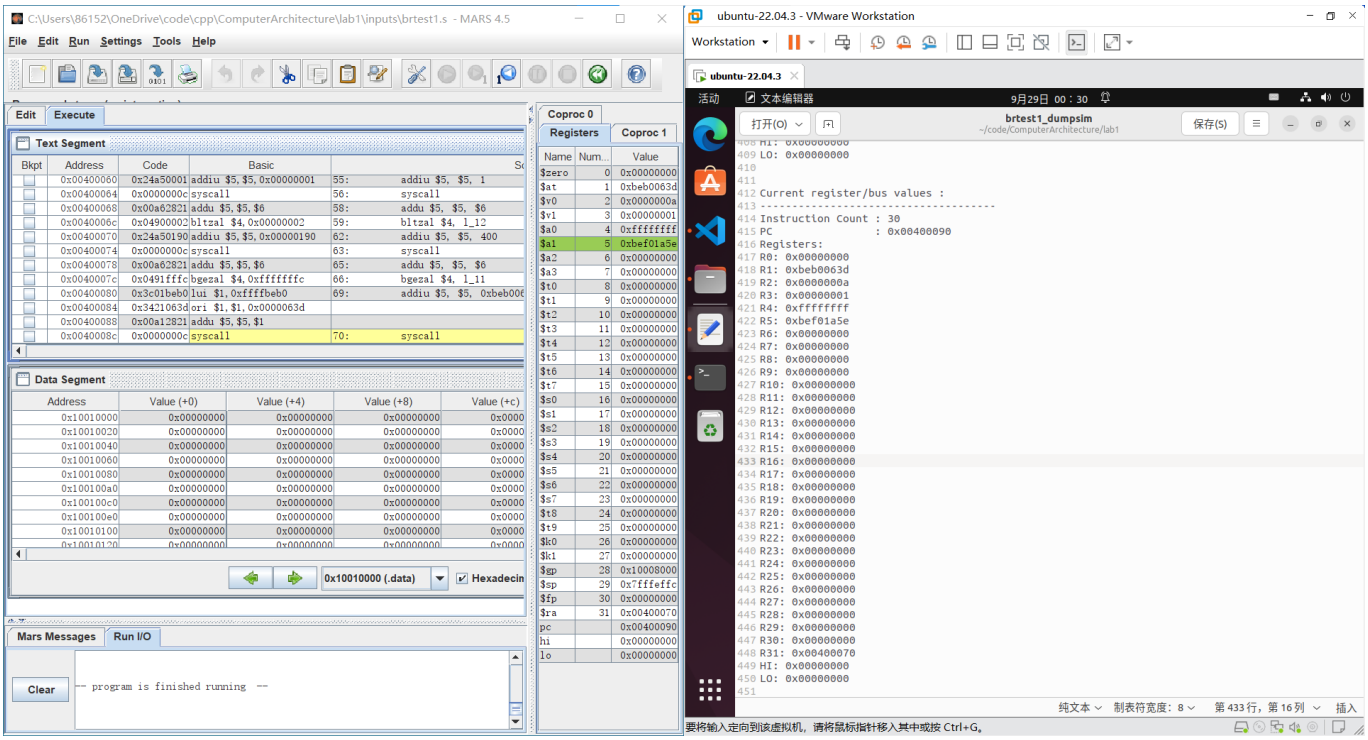
arithtest



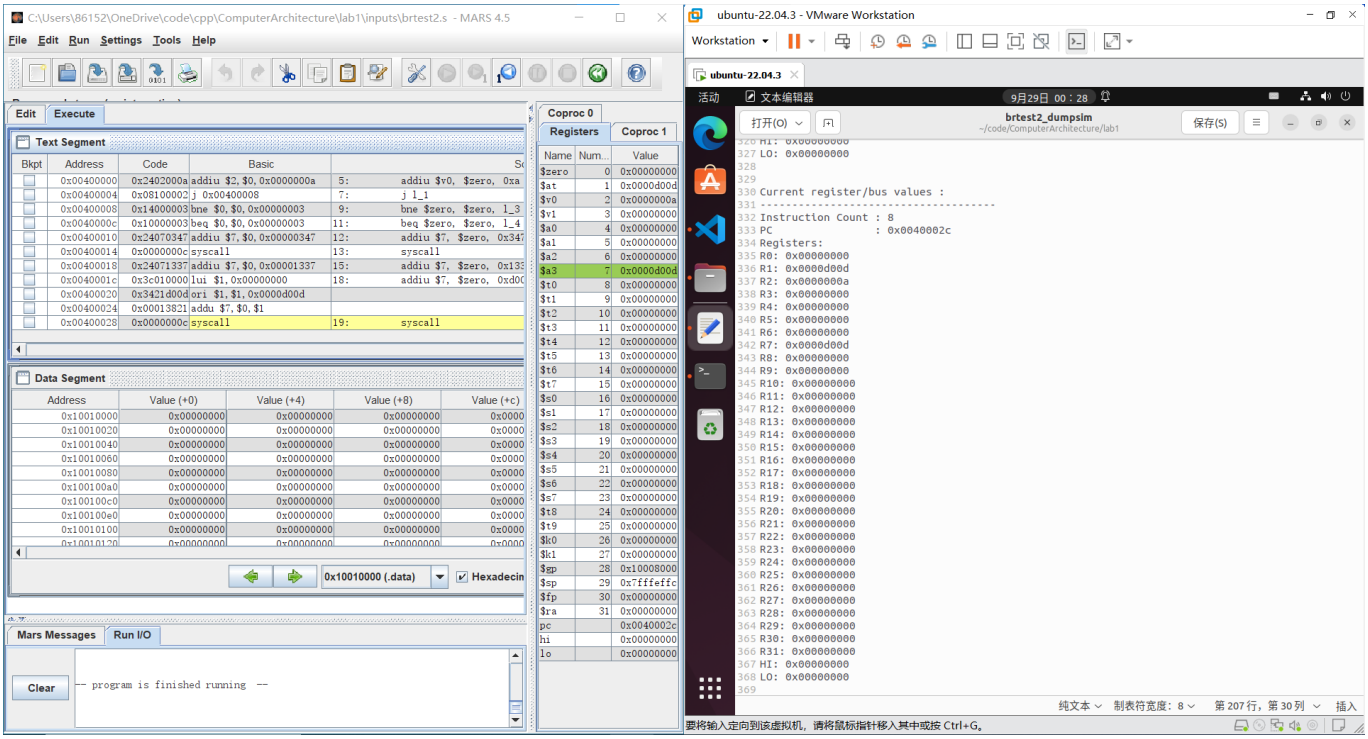
brtest0



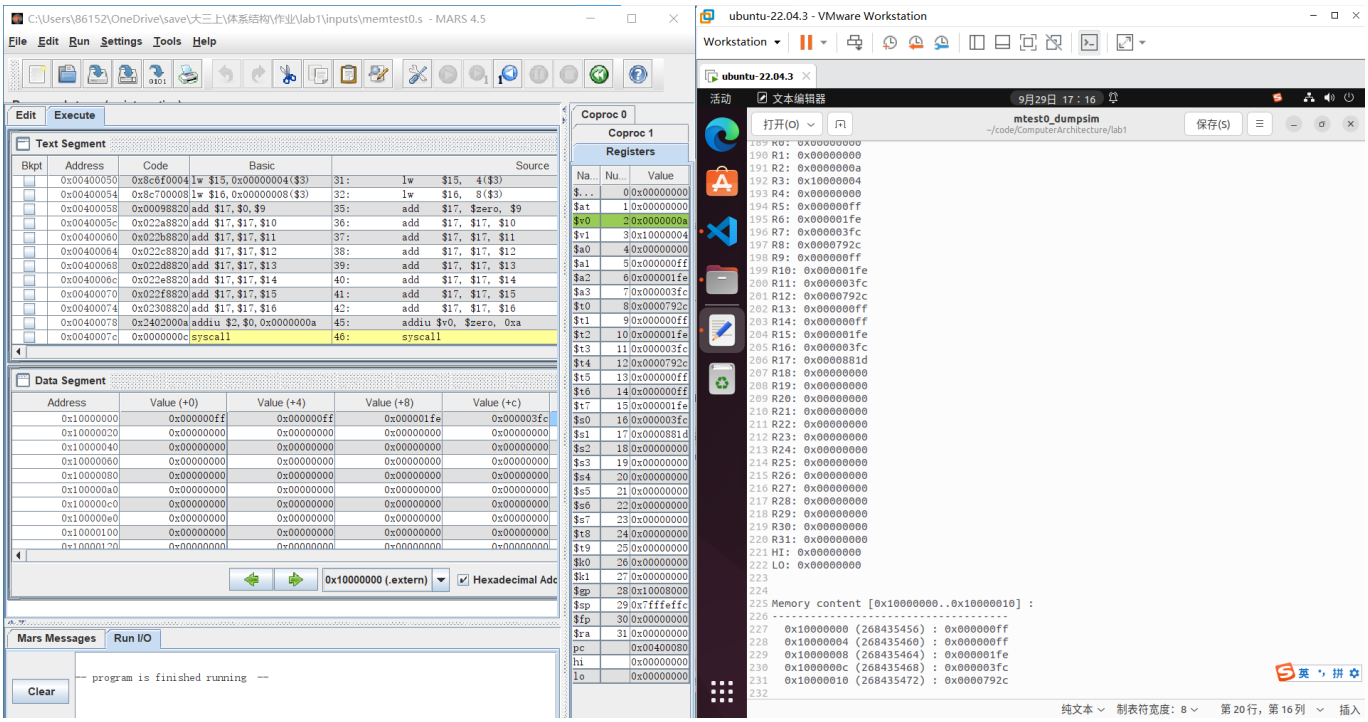
brtest1



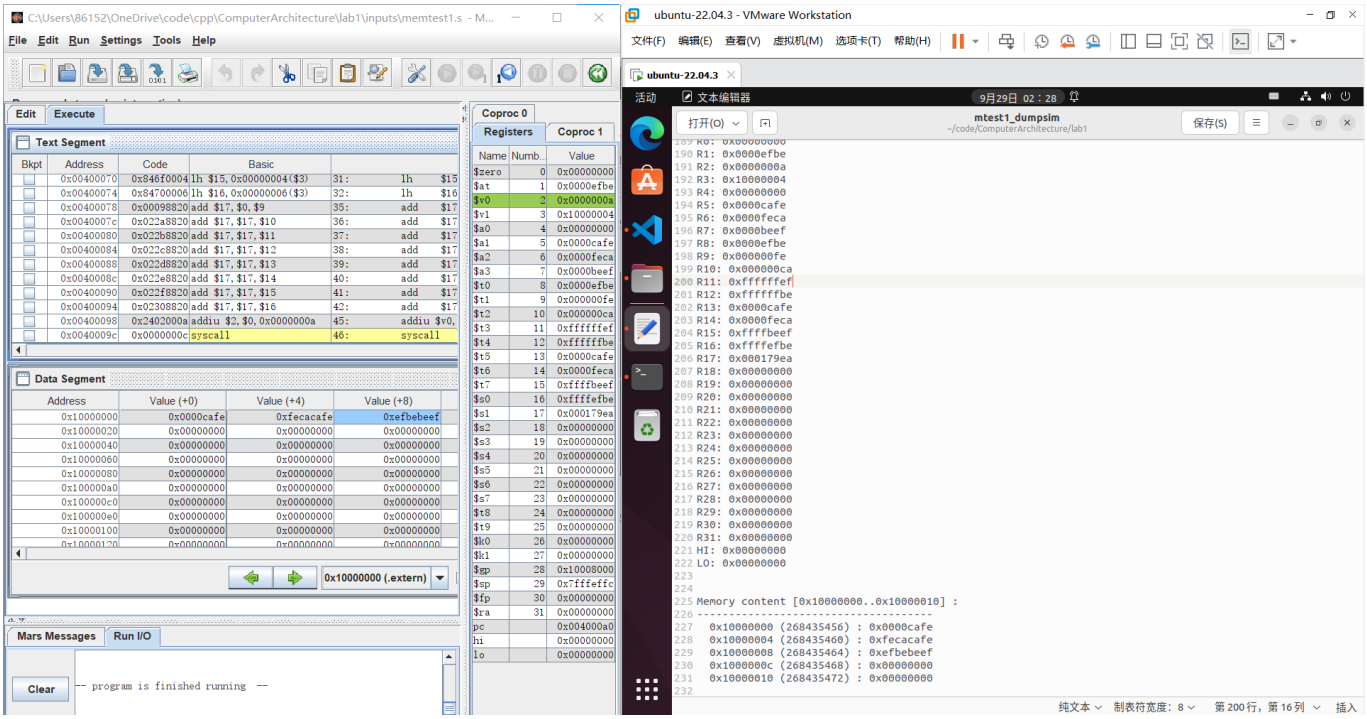
brtest2



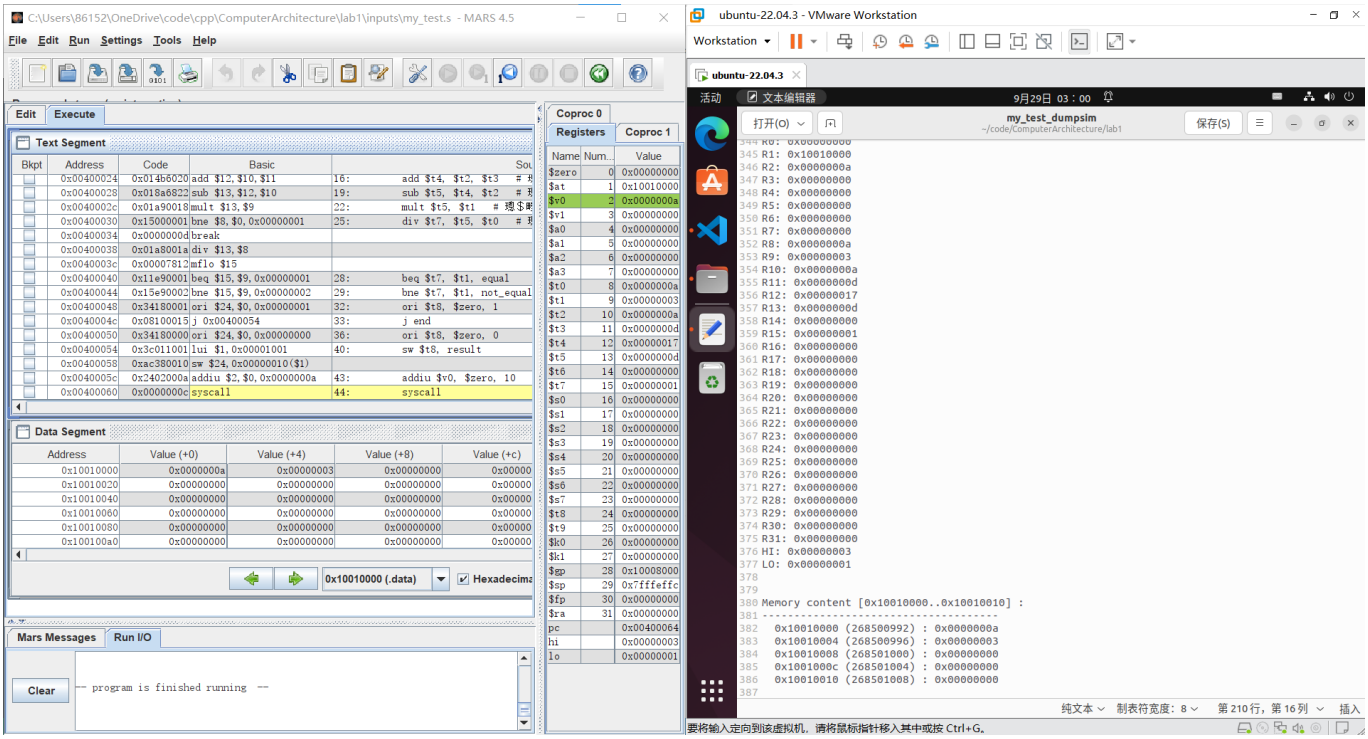
mtest0



mtest1



my_test


C:\Users\86152\OneDrive\code\cpp\ComputerArchitecture\lab1\inputs\my_test.s - MARS 4.5
File Edit Run Settings Tools Help
Edit Execute
Text Segment
Bkpt Address Code Basic
0x00400024 0x014b6020 add $12, $10, $11
0x00400028 0x018a6822 sub $13, $12, $10
0x0040002c 0x01a90018 mult $13, $9
0x00400030 0x15000001 bne $8, $0, 0x00000001
0x00400034 0x0000000d break
0x00400038 0x01a8001a div $13, $8
0x0040003c 0x00007812 mflo $15
0x00400040 0x11e90001 beq $15, $9, 0x00000001
0x00400044 0x15e90002 bne $15, $9, 0x00000002
0x00400048 0x34180001 ori $24, $0, 0x00000001
0x0040004c 0x08100015 j 0x00400054
0x00400050 0x34180000 ori $24, $0, 0x00000000
0x00400054 0x3c011001 lui $1, 0x00001001
0x00400058 0xac380010 sw $24, 0x00000010($1)
0x0040005c 0x2402000a addiu $2, $0, 0x0000000a
0x00400060 0x0000000c syscall
Data Segment
Address Value (+0) Value (+4) Value (+8) Value (+c)
0x10010000 0x0000000a 0x00000003 0x00000000 0x00000
0x10010020 0x00000000 0x00000000 0x00000000 0x00000
0x10010040 0x00000000 0x00000000 0x00000000 0x00000
0x10010060 0x00000000 0x00000000 0x00000000 0x00000
0x10010080 0x00000000 0x00000000 0x00000000 0x00000
0x100100a0 0x00000000 0x00000000 0x00000000 0x00000
0x10010000 (.data)
Hexadecima
Mars Messages Run I/O
Clear
-- program is finished running --
Coproc 0
Registers Coproc 1
Name Num... Value
$zero 0 0x00000000
$at 1 0x10010000
$v0 2 0x0000000a
$v1 3 0x00000000
$a0 4 0x00000000
$a1 5 0x00000000
$a2 6 0x00000000
$a3 7 0x00000000
$t0 8 0x0000000a
$t1 9 0x00000003
$t2 10 0x0000000a
$t3 11 0x0000000d
$t4 12 0x00000017
$t5 13 0x0000000d
$t6 14 0x00000000
$t7 15 0x00000001
$s0 16 0x00000000
$s1 17 0x00000000
$s2 18 0x00000000
$s3 19 0x00000000
$s4 20 0x00000000
$s5 21 0x00000000
$s6 22 0x00000000
$s7 23 0x00000000
$t8 24 0x00000000
$t9 25 0x00000000
$k0 26 0x00000000
$k1 27 0x00000000
$gp 28 0x10008000
$sp 29 0x7fffeffc
$fp 30 0x00000000
$ra 31 0x00000000
pc 0x00400064
hi 0x00000003
lo 0x00000001
ubuntu-22.04.3 - VMware Workstation
Workstation
ubuntu-22.04.3
活动 文本编辑器 9月29日 03：00
打开(O) my_test_dumpsim ~/code/ComputerArchitecture/lab1 保存(S)
R1: 0x10010000
R2: 0x0000000a
R3: 0x00000000
R4: 0x00000000
R5: 0x00000000
R6: 0x00000000
R7: 0x00000000
R8: 0x0000000a
R9: 0x00000003
R10: 0x0000000a
R11: 0x0000000d
R12: 0x00000017
R13: 0x0000000d
R14: 0x00000000
R15: 0x00000001
R16: 0x00000000
R17: 0x00000000
R18: 0x00000000
R19: 0x00000000
R20: 0x00000000
R21: 0x00000000
R22: 0x00000000
R23: 0x00000000
R24: 0x00000000
R25: 0x00000000
R26: 0x00000000
R27: 0x00000000
R28: 0x00000000
R29: 0x00000000
R30: 0x00000000
R31: 0x00000000
HI: 0x00000003
LO: 0x00000001
Memory content [0x10010000..0x10010010] :
0x10010000 (268500992) : 0x0000000a
0x10010004 (268500996) : 0x00000003
0x10010008 (268501000) : 0x00000000
0x1001000c (268501004) : 0x00000000
0x10010010 (268501008) : 0x00000000
纯文本 制表符宽度：8 第 210 行，第 16 列 插入
要将输入定向到该虚拟机，请将鼠标指针移入其中或按 Ctrl+G。