编译实习课程文档

MiniC

V1.0

2018 年 3 月

目录

MiniC 相关说明

1 概述

MiniC是C语言的一个子集，对C语言语法进行了大量删减，以产生一种适用于编译实习课程的语言。

MiniC是为了取代原先编译实习课程使用的MiniJava语言而设计的，目的是更好地配合编译原理课程进度，在一定程度上减轻任务量。MiniC基础语法高度精炼，使同学们无论能力如何，都能完成编译器编写的过程。

同时，对于能力较强的同学，实习课程可以提供一些MiniC语法扩展内容，把从C 语言中删除的一些语法加回MiniC，来提升MiniC语言的易用程度和表达能力，对完成扩展内容的同学提供一定程度的加分。

2 语法描述

- MiniC 取消了C 语言中的宏。
- MiniC 中的变量有两种类型，int 和一维int 数组。
- MiniC 中函数返回值只有int，参数可以是int 或int 数组，程序从main 函数开始执行。同时，MiniC 不会给函数默认返回值，如果执行完一个函数而没有return，会导致未知行为。
- 单目运算符有'!' 和'-'
- 双目运算符有'+','-','*','/','%','&&','||','<','>','==','!='
- 合法的表达式参考BNF。
- 允许使用函数前置声明（参见样例中getint 函数）。
- MiniC 程序中允许C 风格的单行注释。
- MiniC 只保留if-else 条件分支语句和while 循环语句。
- 为了使MiniC 更容易实现，限定if,while 后面的括号里和逻辑运算符两边的运算分量只会出现如下两种形式：

  x>y||(a+b)!=c 这样的逻辑表达式；

  x或f(x)或a[x]这样的单个变量或函数。

总之，不会出现类似if (a+b)或(b+c)||d这样的语句。

3 BNF

⟨ *Goal*⟩ ::= (VarDefn | FuncDefn | FuncDecl)* MainFunc

⟨ *VarDefn*⟩ ::= Type Identifier ';'

| Type Identifier'[' ⟨ *INTEGER*⟩ ']' ';'

⟨ *VarDecl*⟩ ::= Type Identifier

| Type Identifier'[' ⟨ *INTEGER*⟩ ']'

⟨ *FuncDefn*⟩ ::= Type Identifier '(' (VarDecl (',' VarDecl)*)? ')' '{' (FuncDecl | Statement)* '}'

⟨ *FuncDecl*⟩ ::= Type Identifier '(' (VarDecl (',' VarDecl)*)?')' ';'

⟨ *MainFunc*⟩ ::= 'int' 'main' '(' ')' '{' (FuncDecl | Statement)* '}'

⟨ *Type*⟩ ::= 'int'

⟨ *Statement*⟩ ::= '{' (Statement)* '}'

| 'if' '(' Expression ')' Statement ('else' Statement)?

| 'while' '(' Expression ')' Statement

| Identifier '=' Expression ';'

| Identifier '[' Expression ']' '=' Expression ';'

| VarDefn

| 'return' Expression ';'

⟨ *Expression*⟩ ::= Expression ('+' | '-' | '*' | '/' | '%') Expression

| Expression ('&&' | '||' | '<' | '==' | '>' | '!=') Expression

| Expression '[' Expression ']'

| ⟨ *INTEGER*⟩

| Identifier

| ('!' | '-') Expression

| Identifier '(' (Identifier (',' Identifier)*)? ')'

| '(' Expression ')'

⟨ *Identifier*⟩ ::= ⟨ *IDENTIFIER*⟩

4 示例

```
int getint(); // 前置函数声明，getint 函数是MiniC 内置函数，返回一个读入的整数
int putchar(int c); // 内置函数，用于输出字符(参数为ascii 码)，返回值无意义
// 注意！base 语法集不包括形如int putchar(int); 这种参数名没有具体给出的函数声明
int putint(int i); // 内置函数，用于输出整数，返回值无意义
int getchar(); // 内置函数，返回一个读入的字符的ascii 码(此程序未使用到该函数)
int a;
a = 0;
int b;
b = 0;
int f(int x){ /* 该函数以递归方式计算Fibonacci 数*/
    if (x < 2) /* if-else 语句*/
        return 1;
    else
        a = x - 1;
        b = x - 2;
        return f(a) + f(b); /* 递归函数调用*/
}
int g(int x){ /* 该函数以数组和循环语句计算Fibonacci 数*/
int a[40]; /* int 数组声明
注意！base 中数组大小必须是常数，不可写成int a[x]; 或int a[10+30]; 这样*/
a[0] = 1;
a[1] = 1;
int i;
i = 2; /* 注意！base 语法集不包括初始化赋值语句int i = 2; */
while (i < x + 1) { /* while 循环是base 语法集唯一的循环语句*/
    a[i] = a[i - 1] + a[i - 2];
    i = i +1
}
return a[x];
}
int n; // 声明了一个全局变量
int main() {
    n = getint();
    if (n < 0 || n > 30) /* 不带else 的if 语句*/
    return 1;
    putint(f(n));
    putchar(10); // 输出换行符
    putint(g(n));
    putchar(10);
    return 0;
}
```

5 MiniC 语法扩展

MiniC设计者们亲身实践了MiniC大部分语法扩展，深切体会到实现一些复杂语法扩展的不易。

对MiniC语法进行扩展时，应尽量遵循“细致”的原则，避免涉及范围过大的扩展。

比如，整数数据类型扩展：加入8 位，16 位，32 位，64 位的有符号和无符号整数。这个扩展涉及的范围就有些大，可以考虑分解成多个扩展：带符号整数扩展、不同长度的整数运算扩展、char 字符串扩展（8 位有符号整数组成的数组）、字符与字符串表示扩展(加入"abc",'\n' 这样的表达式)。

具体可以扩展内容，按教学通知为准。

Eeyore 相关说明

1 概述

Eeyore /'ɪ:juə(r)/是一种三地址码，用为MiniC语法分析后的输出格式。Eeyore的设计同样遵循简洁的原则，使代码易读易调试。

2 语法描述

Eeyore 要求**每条语句单独占一行**。

2.1 变量

• Eeyore中的变量有三种：原生变量，临时变量，函数参数。这三种变量分别以'T','t','p'开头，后面跟随一个整数编号，编号从0开始，每个函数内部单独编号。如p0,p1,t0,T0。

• Eeyore的变量声明形如 var t0 和 var 8 T0，前者声明了一个int 型临时变量，后者声明了有2个元素的原生int 数组。

• **注意！函数参数不需要声明。**

• 除函数参数变量外，其余变量不允许重名。

• 函数内声明的变量作用域为变量声明语句到函数结束语句，函数外声明的变量作用域为变量声明语句到程序最后。

• 所谓原生变量，是指MiniC中使用的变量转到Eeyore中对应的变量。相应地，临时变量是指MiniC中没有显式对应变量的变量。

其实这两种变量在语义上**没必要做如此区分**，Eeyore 区分二者是为了方便用户调试。用个例子来说明，把左边的MiniC 语句翻译到Eeyore：

MiniC	Eeyore

`int a;`
`int b;`
`int c;`
`a = b + 2 * c;`
	`var T0`
	`var T1`
	`var T2`
	`var t0`

	t0 = 2 * T2 var t1 t1 = T1 + t0 T0 = t1

上面T0,T1,T2 是原生变量，分别对应MiniC中的a,b,c。t0,t1是临时变量，分别对应中间运算结果2*c, b+2*c。

2.2 表达式

Eeyore 表达式有以下特点:

- 允许直接把整数用作运算符（如t0 = 2 * T2）。
- Eeyore 表达式支持的单目运算符有'!','-'
- 支持的双目运算符有'!=','==','>','<','&&','||','+','-','*','/','%'，前6 个是逻辑运算符。
- 数组操作语句形如T0 [t0] = t1 和t0 = T0 [t1]。
- 注意！因为MiniC的base语法集只有int和int数组类型，数组操作语句中括号内的数应当是4的倍数。

2.3 函数

- Eeyore 中的函数以'f_' 开头，后接函数名，如f_main,f_getint。
- 函数定义语句形如f_putint [1]，中括号内的整数表示该函数的参数个数，函数结束处应有函数结束语句，形如end f_xxx。
- 函数外的变量声明语句被视为全局变量声明，函数内的视为局部变量声明。
- 函数调用语句形如：t0 = call f_xxx。
- 传参数指令形如：param t1，所有传参都是**传值**，多个参数需依次传入。
- 作为参数的变量，在param Variable 语句之后，到函数调用前，不可修改。（这样限制的目的是使寄存器分配时避免繁琐的分类讨论）
- 函数返回语句形如return t0。

2.4 标号与跳转

• Eeyore中的标号以小写字母 ‘l’ 开头，后接整数编号，编号从0开始，如l0,l1。标号用来指明跳转语句的跳转地点，标号声明语句形如l0:。

• 跳转语句分两种：无条件跳转、条件跳转。如goto l1和if t0 < 1 goto l0。

2.5 缩进

Eeyore没有缩进要求，但是允许缩进，为了之后代码调试的便利，我们建议正确使用缩进。

2.6 注释

Eeyore 允许单行注释，与 C 语言注释类似使用//，处理时自动忽略改行从//之后所有内容。

2.7 系统库支持

Eeyore模拟器提供对输入输出的系统调用支持，对应的函数原型如下：

• int getint() //从标准输入读取一个整数

• int putint(int x) //输出x 到标准输出

• int getchar() //从标准输入中读取一个字符

• int putchar(int x) //输出ASCII 为x 的字符

具体对应的 MiniC 代码和 Eeyore 代码用法参见章节 “**示例**”

3 BNF

⟨ *Declaration* ⟩ ::= 'var' ⟨ *INTEGER* ⟩? Variable

⟨ *FunctionDecl* ⟩ ::= Function '[' ⟨ *INTEGER* ⟩ ']' '\n' ((Expression | Declaration)'\n')*'end'
Function

⟨ *RightValue* ⟩ ::= Variable | ⟨ *INTEGER* ⟩

⟨ *Expression* ⟩ ::= Variable '=' RightValue OP2 RightValue
| Variable '=' OP1 RightValue
| Variable '=' RightValue
| Variable '[' RightValue ']' = RightValue
| Variable = Variable '[' RightValue ']'
| 'if' RightValue LogicalOP RightValue 'goto' Label
| 'goto' Label
| Label ':'
| 'param' RightValue
| Variable '=' 'call' Function
| 'return' RightValue

⟨ *Identifier* ⟩ ::= ⟨ *IDENTIFIER* ⟩

⟨ *Variable* ⟩ ::= ⟨ *VARIABLE* ⟩

⟨ *Label* ⟩ ::= ⟨ *LABEL* ⟩

⟨ *Function* ⟩ ::= ⟨ *FUNCTION* ⟩

4 示例

MiniC	Eeyore

int getint();
int putint(int x);
int n;
int a[10];
int main(){
  n = getint();
  if (n > 10)
  return 1;
  int s;
  int i;
  i = 0;
  s = i;
  while (i < n) {
  a[i] = getint();
  s = s + a[i];
  //++i;
  i = i + 1
  }
  putint(s);
  return 0;
}
	var T0
	var 40 T1
	f_main [0]
	  T0 = call f_getint
	  var t0
	  t0 = T0 - 10
	  var t1
	  t1 = t0 > 0
	  if t1 == 0 goto l0
	  return 1
	l0:
	  var T2
	  var T3
	  T3 = 0
	  T2 = T3
	l1:
	  var t2
	  t2 = T3 < T0
	  if t2 == 0 goto l2
	  var t3
	  t3 = 4 * T3
	  var t4
	  t4 = call f_getint
	  T1 [t3] = t4
	  var t5
	  t5 = T1 [t3]
	  T2 = T2 + t5
	  T3 = T3 + 1
	  goto l1
	l2:
	  param T2
	  call f_putint
	  return 0
	end f_main

5 Eeyore 模拟器使用方式

Usage ./ Eeyore [-d] <filename >

-d : enable debug mode

- e.g. ./ Eeyore -d test.in

出现"> " 提示符表示进入debug 模式， 支持如下指令：

+ p <pc/symbol/label/funciton name >

- e.g. p pc , p c1 , p t1

- Print the value of the symbol

+ s <number >

- e.g. s 10

- Run n Step

+ n

- e.g. n

- Run 1 Step

+ u <number/function/label >

- e.g. u 10, u f_g , u l1

- Run until pc equal to number or until the function or label.

+ r

- e.g. r

- Disable the debug mode and run until the program exit.

Tigger 相关说明

1 概述

Tigger /'tɪgə(r)/ 是面向 RISC-V 的一种中间表示，用作寄存器分配的输出格式。为了让同学们快速熟悉 Tigger 语法，Tigger 遵循一贯的简洁易读风格，被设计得与 Eeyore 很像。

2 语法描述

2.1 寄存器

Tigger 共有 28 个可用的寄存器，这些寄存器的名称与 RISC-V 保持一致（相比 RISC-V，删去了一些不需要编译器管理寄存器）。

• x0：该寄存器恒等于 0，不可更改

• s0-s11：没什么特殊之处，被调用者保存。

• t0-t6：没什么特殊之处，调用者保存。

• a0-a7：用来传递函数参数，调用者保存。其中 a0 和 a1 也被用作传递函数返回值，但因为 MiniC 中所有函数返回值都是 int，所以实际上只有 a0 被用作传递返回值。可以看出，最多只能通过寄存器传递 8 个参数。简单起见，限定所有函数参数个数不超过 8 个。

2.2 表达式、标号、跳转语句

• 所有的表达式计算都在寄存器上进行。

• 所有在 Eeyore 中支持的运算符，在 Tigger 中都支持。

• 注意！因为 MiniC 里只有 int 和 int 数组类型，所以形似数组赋值语句的赋值语句中括号内的数是 4 的倍数。

• 注意 !由于 RISC-V 某些规则的原因，Tigger 中只有'+'和'<'运算符允许作为 Reg = Reg OP2 <INTEGER> 语句中的 OP2。

• 标号与跳转语句和 Eeyore 中的语法相同，标号是全局的。

2.3 函数

- 函数定义语句形如 f_xxx [2] [3]，第一个中括号内是参数个数，第二个是该函数需要用到的栈空间的大小（除以 4 之后）。
- 函数结束语句和 Eeyore 中的一样，形如 end f_xxx。
- 函数必须以返回语句返回。返回值通过寄存器传递。
- 函数调用语句形如 call f_xxx。

2.4 栈内存操作

程序运行时，每个被调用的函数都会维护一个连续的栈空间，大小为函数定义语句中的第二个参数。

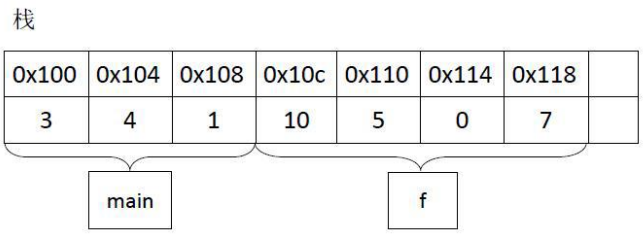
局部变量都可以在栈中找到，因此 Tigger 中不再有局部变量了。

• store Reg <INTEGER> 语句中，<INTEGER> 是一个小于函数定义语句第二个系数的非负整数。该语句会把寄存器<Reg> 的值存入当前函数栈空间第<INTEGER> 个位置。

• load <INTEGER> Reg 语句中，<INTEGER> 是一个小于函数定义语句第二个系数的非负整数。该语句会把当前函数栈空间第<INTEGER> 个整数存入寄存器<Reg>

• loadaddr <INTEGER> Reg 语句中，<INTEGER> 是一个小于函数定义语句第二个系数的非负整数。该语句会把当前函数栈空间第<INTEGER> 个位置的内存地址存到寄存器<Reg>。

举个例子，假设某个时刻函数调用关系是 main[0][3] -> f[0][4]，正在执行函数 f，假设此时的栈如下图所示：



栈计数从 0 开始，此时语句 load 2 s0，会使 s0 = 0；语句 loadaddr 2 s0，会使 s0 = 0x114；语句 store s0 2 会把图中的 0 改成 s0 的值。

2.5 全局变量

- 全局变量名称以 v 开头，后接一个整数编号，编号从 0 开始，比如 v0,v1。
- <VARIABLE> = <INTEGER> 用来声明一个初始值为<INTEGER> 的全局变量<VARIABLE>，即<VARIABLE> 这个名称表示的内存地址上 4 字节的内容为<INTEGER>。
- <VARIABLE> = malloc <INTEGER> 用来声明数组，<VARIABLE> 这个名称表示的内存地址之后的<INTEGER> 字节的内容为一个数组。注意！<INTEGER> 是 4 的倍数。
- load <VARIABLE> Reg 表示把<VARIABLE> 这个全局变量对应内存地址上 4 字节的内容加载到寄存器 Reg。
- loadaddr <VARIABLE> Reg 表示把<VARIABLE> 这个全局变量对应内存地址加载到寄存器

Reg。

- 注意！由于 RISC-V 汇编的原因，没有 store Reg <VARIABLE> 语句。该语句可以通过 loadaddr 语句与数组访问语句结合来完成。

2.6 注释

Tigger 允许单行注释，与 C 语言注释类似使用//，处理时自动忽略改行从//之后所有内容。

2.7 系统库支持

与 MiniC 和 Eeyore 中的输入输出函数原型相同。

四种输入输出函数都通过 a0 寄存器传递参数和返回值。

3 BNF

⟨*Goal*⟩ ::= (FunctionDecl | GlobalVarDecl)*

⟨*GlobalVarDecl*⟩ ::= ⟨*VARIABLE*⟩ '=' ⟨*INTEGER*⟩

| ⟨*VARIABLE*⟩ '=' 'malloc' ⟨*INTEGER*⟩

⟨*FunctionDecl*⟩ ::= Function '[' ⟨*INTEGER*⟩ ']' '[' ⟨*INTERGER*⟩ ']' (Expression)* 'end'

Function

⟨*Expression*⟩ ::= Reg '=' Reg OP2 Reg

| Reg '=' Reg OP2 ⟨*INTEGER*⟩

| Reg '=' OP1 Reg

| Reg '=' Reg

| Reg '=' ⟨*INTEGER*⟩

| Reg '[' ⟨*INTEGER*⟩ ']' = Reg

| Reg = Reg '[' ⟨*INTEGER*⟩ ']'

| 'if' Reg LogicalOP Reg 'goto' Label

| 'goto' Label

| Label ':'

| 'call' Function

| 'store' Reg ⟨*INTEGER*⟩

| 'load' ⟨*INTEGER*⟩ Reg

| 'load' ⟨*VARIABLE*⟩ Reg

| 'loadaddr' ⟨*INTEGER*⟩ Reg

| 'loadaddr' ⟨*VARIABLE*⟩ Reg

| 'return'

⟨*Reg*⟩ ::= 'x0' | 's0' | 's1' | 's2' | 's3' | 's4' | 's5' | 's6' | 's7' | 's8'

| 's9' | 's10' | 's11' | 'a0' | 'a1' | 'a2' | 'a3' | 'a4' | 'a5'

| 'a6' | 'a7' | 't0' | 't1' | 't2' | 't3' | 't4' | 't5' | 't6'

⟨*Label*⟩ ::= ⟨*LABEL*⟩

⟨*Function*⟩ ::= ⟨*FUNCTION*⟩

4 示例

```
f_fac [1] [3]
    a0 = a0 + -1
    if a0 <= x0 goto l1
    store a0 0
    call f_fac
    store a0 1
    store s0 2
    loadaddr 0 s0
    a0 = s0[0]
    a0 = a0 + -1
    call f_fac
    a1 = s0[4]
    load 2 s0
    a0 = a0 + a1
    goto l2
l1:
    a0 = 1
l2:
    return
end f_fac
f_main [0] [0]
    call f_getint
    call f_fac
    call f_putint
    a0 = 10
    call f_putchar
    a0 = 0
    return
end f_main
```

5 Tigger 模拟器使用方式

Usage ./ Tigger [-d] <filename >

-d : enable debug mode

e.g. ./ Tigger -d test.in

出现"> " 提示符表示进入debug 模式， 支持如下指令：

+ l

- Print current line number

+ n

- Run one step

+ pr <Reg >

- e.g. pr a0 , pr s0

- Print register value

+ prx <Reg >

- e.g. prx a0 , prx s0

- Print register value as hexadecimal

+ ps <stacknum >

- e.g. ps 0, ps 1

- Print the value of stack memory

+ psx <stacknum >

- e.g. psx 0, psx 1

- Print the value of stack memeory as hexadecimal

+ pg <variable >

- e.g. pg v0 , pg v1

- Print the value of global variable

+ b <number >

- e.g. b 10

- Set a breakpoint at a certain line

+ d <number >

    - e.g. d 10

    - Delete the breakpoint at a certain line

+ c

    - Run until meet a breakpoint

+ q

    - Quit Tigger simulator

RISCV 汇编手册

1.寄存器

Register	ABI Name	Desctiption	Saver
X0	zero	Hard-wired zero	---
X1	ra	Return address	Caller
X2	sp	Stack pointer	Callee
X3	gp	Global pointer	---
X4	tp	Thread pointer	---
X5	t0	Temporary/alternate link register	Caller
X6-7	t1-2	Temporaries	Caller
X8	s0/fp	Saved register/frame pointer	Callee
X9	s1	Saved register	Callee
X10-11	a0-1	Function arguments/return values	Caller
X12-17	a2-7	Function arguments	Caller
X18-27	s2-11	Saved registers	Callee
X28-31	t3-6	Temporaries	Caller
f0-7	ft0-7	FP temporaries	Caller
f8-9	fs0-1	FP saved registers	Callee
f10-11	fa0-1	FP arguments/return values	Caller
f12-17	fa2-11	FP arguments	Caller
f18-27	fs2-11	FP saved registers	Callee
f28-31	ft8-11	FP temporaries	Caller

2.伪指令

ops

reg = integer	li reg,integer
reg1 = reg2 op reg3	----------
reg1 = reg2 + reg3	add reg1,reg2,reg3
reg1 = reg2 - reg3	sub reg1,reg2,reg3
reg1 = reg2 * reg3	mul reg1,reg2,reg3
reg1 = reg2 / reg3	div reg1,reg2,reg3
%	rem reg1,reg2,reg3

<	slt reg1,reg2,reg3
>	sgt reg1,reg2,reg3
&&	seqz reg1,reg2 add reg1,reg1,-1 and reg1,reg1,reg3 snez reg1,reg1
||	or reg1,reg2,reg3 snez reg1,reg1
!=	xor reg1,reg2,reg3 snez reg1,reg1
==	xor reg1,reg2,reg3 seqz reg1,reg1
reg1 = reg2 op integer	----------
+	add reg1,reg2,integer
<	slti reg1,reg2,integer
reg1 = reg2	mv
reg1 [int] = reg2	sw
reg1 = reg2 [int]	lw
if reg1 op reg2 goto Label	----------
<	blt reg1,reg2,.label
>	bgt reg1,reg2,.label
!=	bne reg1,reg2,.label
==	beq reg1,reg2,.label
<=	ble reg1,reg2,.label
>=	ble reg2,reg1,.label
goto label	j label
label :	.label:
call function	call finction
store reg int	sw reg,int*4(sp)

load int reg	lw reg,int*4(sp)
load global_var reg	lui reg,%hi(global_var) lw reg,%lo(global_var)(reg)
loadaddr int reg	add reg,sp,int*4
loadaddr global_var reg	lui reg,%hi(global_var) add reg,reg,%lo(global_var)

return	lw ra,stk-4(sp)
	add sp,sp,stk
	jr ra

3.Bss

在 BSS 段中，我们需要处理函数声明和全局变量声明，格式如下：

Function_declare:

function [int1] [int2]	.text .align 2 .global function .type function,@function function: add sp,sp,-stk sw ra stk-4(sp)
	stk = (int2 / 4 +1) * 16
end function	.size function, .-function
	stk = 0
f_main [0] [17] …… end f_main	.size f, .-f .text .align 2 .global main .type main, @function

	main:
	add sp,sp,-80
	sw ra,76(sp)
	.....
	.size main, .-main

	stk = (17 / 4 + 1) * 16 = 80

Global_var_declare:

global_var = malloc int	.comm global_var,int*4,4
v2 = malloc 800012	.comm v2,3200048,4
v2 = malloc 800012	.comm v2,800012,8
	.global global_var .section .sdata .align 2 .type global_var, @object .size global_var, 4 global_var: .word int
v0 = 0	.global v0 .section .sdata .align 2 .type v0, @object .size v0, 4 v0: .word 0

RISCV-工具链-模拟器

RISC-V GNU Compiler Toolchain

安装 RISC-V GNU Compiler Toolchain

官方网站 https://github.com/riscv/riscv-gnu-toolchain

git clone --recursive https://github.com/riscv/riscv-gnu-toolchain

Ubuntu 依赖软件安装命令

```
sudo apt-get install autoconf automake autotools-dev curl libmpc-dev
libmpfr-dev libgmp-dev gawk build-essential bison flex texinfo gperf
libtool patchutils bc zlib1g-dev
```

Fedora/CentOS/RHEL OS 依赖软件安装命令

```
sudo yum install autoconf automake libmpc-devel mpfr-devel gmp-devel gawk
bison flex texinfo patchutils gcc gcc-c++ zlib-devel
```

OS X 依赖软件安装命令

```
brew install gawk gnu-sed gmp mpfr libmpc isl zlib
```

安装（使用 Newlib 库）

```
./configure --prefix=/opt/riscv
make
```

安装（使用 Glibc 库）

64 位：

```
./configure --prefix=/opt/riscv
make linux
```

32 位：

```
./configure --prefix=/opt/riscv --with-arch=rv32gc --with-abi=ilp32d
make linux
```

Linux Multilib：

```
./configure --prefix=/opt/riscv --enable-multilib
make linux
```

使用

```
riscv64-unknown-linux-gnu-gcc hello.c -o hello
```

riscv-qemu

安装 riscv-qemu

官方网站 https://github.com/riscv/riscv-qemu

Qemu 有系统模式和用户模式两种，单独执行文件需要用户模式。

下载 QEMU：

```
git clone https://github.com/riscv/riscv-qemu
cd riscv-qemu
git submodule update --init dtc
git submodule update --init pixman
```

安装：

依赖软件

```
sudo apt-get install gcc libc6-dev pkg-config bridge-utils uml-utilities
zlib1g-dev libglib2.0-dev autoconf automake libtool libsdl1.2-dev
```

安装用户模式

```
./configure --target-list=riscv64-linux-user,riscv32-linux-user [--
prefix=INSTALL_LOCATION]
make
[make install] # if you supplied prefix above
```

使用

```
riscv64-unknown-linux-gnu-gcc hello.c -o hello
./riscv64-linux-user/qemu-riscv64 -L $RISCV/sysroot hello
```