编译实习 MiniC 报告

罗昊　1700010686

2018 年 12 月 30 日

hcc(Hao miniC Compiler) is a simple compiler for MiniC.
It contains 2 parts: eeyore and tigger.
eeyore convert MiniC code to Eeyore code (a kind of three-address code)
tigger convert eeyore code to Tigger code || Riscv64 asm || Riscv32 asm.
Get source code from https://github.com/vangohao/hcc

1 supported additional C rules besides MiniC

1. 支持空语句 (;)
2. 支持逻辑表达式与算术表达式互相自动转换.
3. 支持无返回值调用函数.
4. 支持调用函数时使用表达式作为参数.
5. 支持在程序体内声明函数.
6. 支持 C 风格多行注释和 C++ 风格单行注释.

2 error report

1. 报告语法错误和词法错误及其行号, 并给出该处正确的 token 类型提示.
2. 检查标识符使用, 如果使用了未定义的标识符会报错.
3. 检查标识符重复, 对于重复定义的报错, 函数名与变量名冲突的报错, 如果在 {} 程序块内使用与程序块外同名的变量, 则不会报错.

4. 检查函数参数表, 对于重复声明但参数表不一致, 或定义与声明参数表不一致, 或调用时所用的参数表与声明的类型不一致时报错.

5. 检查 +,-,*,/,% 运算符对于数组类型变量的不合法操作给出错误提示, 这些操作中除了 (int[])+(int), (int)+(int[]), (int[])-(int), 外涉及数组的运算都是不合法的.

6. 检查对数组变量的赋值, 无法将数值赋给数组变量.

7. 检查 a[b] 使用, 如果 a 不是数组变量, 会报错.

3 warning report

1. 控制流到达函数结尾 (Control reaches end of function)

4 Eeyore

4.1 简介

1. 使用 flex,bison 和 C++ 构建, 将输入的 MiniC 代码转换为 Eeyore 三地址代码.

2. 使用 STL 的 map 模板制作符号表, 使用链表串联内外层程序块的符号表.

3. 使用回填法构建 eeyore 中的标号及 goto 语句.

4.2 代码结构

代码由 symbol.cpp/h node.cpp/h gotolist.cpp/h fault.cpp/h main.cpp parser.y lexer.l 构成

1. symbol.cpp/h 包含两个类的定义:

   (1) Symbol 类, 即符号类, 每个 Symbol 对象对应一个符号 (包括函数, 常数, 原生变量和临时变量)

   (2) SymbolTable 类, 即符号表.

2. node.cpp/h 包含两个类的定义:

   (1) Node 类, 即语法树节点.

(2) Label 类,goto 语句后面的标识 (对于非 M 语句) 或标号 (对于 M 语句) , 用于建立跳转关系

3. gotolist.cpp/h 包含 Gotolist 类的定义,gotolist 就是跳转表, 用于建立跳转关系.
4. fault.cpp/h 包含用于报错的函数.
5. main.cpp 主程序
6. parser.y 语法分析器, 进行语法制导翻译.
7. lexer.l 词法分析器, 进行词法分析并传递 token 及其基本属性给语法分析器

,

4.3 BNF

下面给出删除了所有处理语句的 parser.y 代码

```
%code requires{
    typedef struct{
        int number;
        char* name;
        SymbolType type;
        Node* node;
    } foryystype;
    #define YYSTYPE foryystype
}
%{
    #define YYERROR_VERBOSE 1
%}


%token EQUAL NOTEQUAL LAND LOR T_INT MAIN IF ELSE WHILE RETURN IllegalCharacter
%token<number> INTEGER
%token<name> IDENTIFIER
%type<node> Goal BeforeMainStatement VarDefn VarDecls VarDecl FuncDefn FuncCreateIdTable Ifhead
%type<node> InsideFuncStatements FuncDecl MainFunc Statements Statement Expression Params Identifier
%type<node> M N
%type<type> Type
%right '='
%left LOR
%left LAND
%left EQUAL NOTEQUAL
%left '<' '>'
%left '+' '-'
%left '*' '/' '%'
%right NEGA '!'
%right '['

```

```
%%
Goal: BeforeMain MainFunc
;
BeforeMain: BeforeMain BeforeMainStatement
|   %empty
;
BeforeMainStatement: VarDefn | FuncDefn | FuncDecl | ';'
;
VarDefn: Type Identifier ';'
| Type Identifier'['INTEGER']' ';'
;
VarDecls:VarDecls ',' VarDecl
| VarDecl
| %empty
;
VarDecl: Type Identifier
| Type Identifier '[' INTEGER ']'
| Type Identifier '[' ']'
;
FuncCreateIdTable: Type Identifier '('
;
FuncDefn: FuncCreateIdTable VarDecls ')'
'{'
InsideFuncStatements M
'}'
;
InsideFuncStatements: InsideFuncStatements M FuncDecl
| InsideFuncStatements M Statement
| FuncDecl
| Statement
;
FuncDecl: FuncCreateIdTable VarDecls ')' ';'
;
MainFunc: T_INT MAIN '(' ')'
 '{' InsideFuncStatements M'}'
;
Type: T_INT
;
Statements: Statements M Statement
| Statement
;
M: %empty
;
N: %empty
}
;
Ifhead:  IF '('  Expression ')'
;
Statement: '{' Statements '}'
| ';'
| Ifhead M Statement
| Ifhead M Statement N ELSE M Statement
| WHILE M '(' Expression ')'  M Statement
| Identifier '=' Expression ';'
```

```
| Identifier '[' Expression ']' '=' Expression ';'
| Identifier '(' Params ')' ';'
| VarDefn
| RETURN Expression ';'
| error ';'
;
Expression:  Expression '+' Expression
| Expression '-' Expression
| Expression '*' Expression
| Expression '/' Expression
| Expression '%' Expression
| Expression '<' Expression
| Expression '>' Expression
| Expression EQUAL Expression
| Expression NOTEQUAL Expression
| Expression LAND M Expression
| Expression LOR  M Expression
| Expression '[' Expression ']'
| INTEGER
| Identifier
| '!' Expression
| '-' Expression %prec NEGA
| Identifier '(' Params ')'
| '(' Expression ')'
;
Params: Params ',' Expression
| Expression
| %empty
;
Identifier: IDENTIFIER

%%
```

对以上 BNF 的说明:

(1) 使用 bison 编译时会报一个 Shift/reduce 冲突, 这是因为 If 和 IfElse 有所冲突, 但由于 Bison 的规则是冲突时优先选择移入, 所以在保留此冲突的情况下编译的语法分析器仍然是正确的. 例如下面这段代码:

```
if (x < 5)   if (x<3)  y = 1; else y = 2;
```

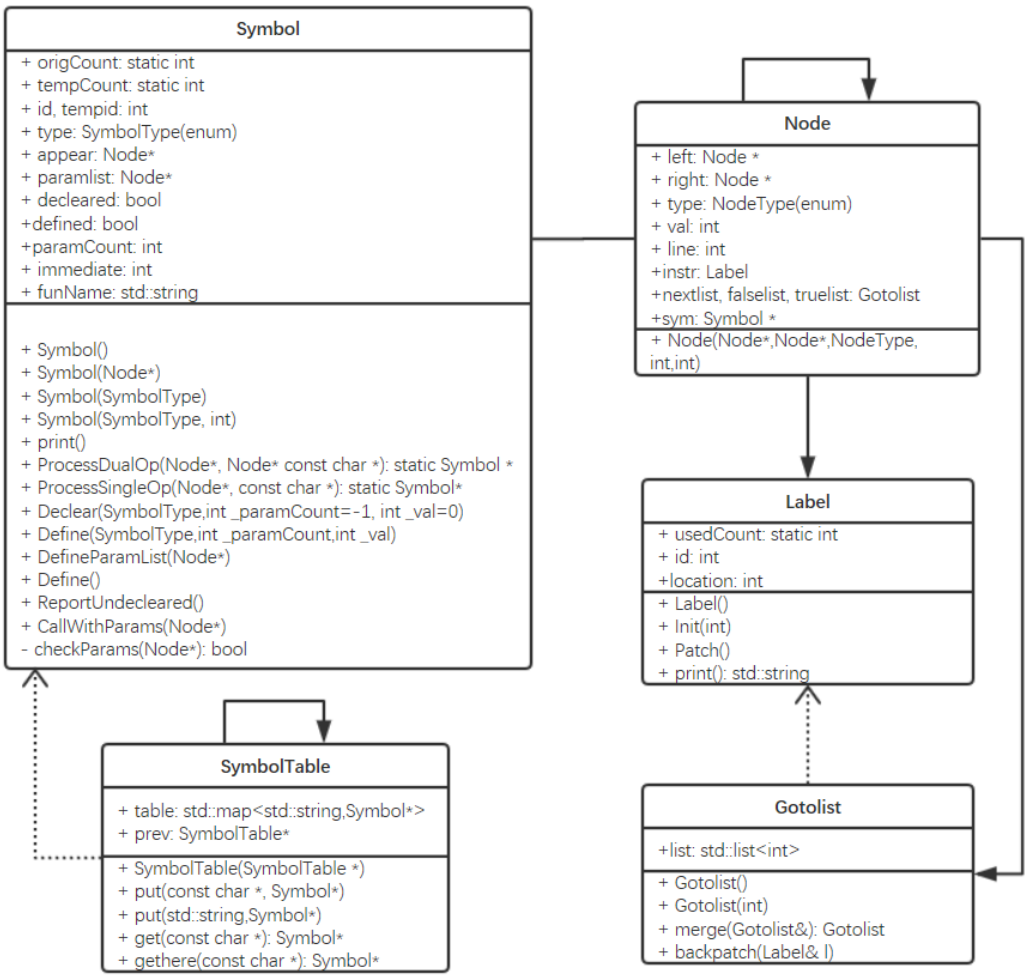
其中的 else 应该与第二个 if 构成 IfElse, 而第一个 if 是单独的 If, 没有 Else 与其配对.

所以, 对于 x == 4 运行结果应该是 y = 2;

(2) FuncCreateIdTabel 非终结符是 FuncDefn 和 FuncDecl 的公共部分, 由于程序需要在这部分之后首先为函数创建符号, 所以需要加上控制代码, 为了避免冲突, 所以将这部分单独拿出来加上控制代码; 类似的, Ifhead 非终结符对 if 的条件表达式先做处理, 为了避免冲突, 所以将这部分单独拿出来加上控制代码.

(3) 对 M 和 N 的说明: M 和 N 是用于流程控制的占位符, 其中 M 将成为语句标号. 本 MiniC 转 Eeyore 编译器使用回填法 [1] 处理 while 语句,if 语句以及逻辑运算符涉及的条件跳转. 具体作用后面会讲.

4.4 类结构



下面简要介绍一下以上几个类的组成和作用

4.4.1 Symbol 类

Symbol 类是符号类.

符号的类型定义在 enum SymbolType 中:

```
enum SymbolType //符号类型
{
    Int=0,          //整形变量
    IntPtr=1,       //整形数组
    FunPtr=2,       //函数
    Immediate=3,    //直接数
    Logic=4,        //逻辑表达式
    Error=5,
};
```

符号类主要功能是处理表达式运算和函数调用

(1) 两个静态方法 ProcessDualOp 和 ProcessSingleOp 传入两个 Node* 类型节点, 返回一个 Symbol 指针, 指向运算所得的临时变量, eeyore 在翻译每个运算时都会创建一个临时变量, 将运算结果赋给临时变量.

(2) Declear 方法配合 decleared 属性, 由于 parser 第一次遇到一个令牌 IDENTIFIER 并不是在 VarDefn 非终结符中, 而是在 identifier 终结符中, 因此在此时就会将新遇到的符号插入当前符号表 top 中, 而在 VarDefn 中, 调用 Declear 方法将 decleared 属性设为 true. 在 Expression 中遇到相应符号时, 需要检查符号的 decleared 属性, 必须是 true, 否则会报错. 对于函数,Declear 方法会存入参数表.

(3) Define 方法, 适用于函数, 作用是声明函数已定义, 若此函数已被声明, 则还需检查此处传入的参数表是否与声明时使用的参数表相匹配, 若不匹配则会报错. 但函数声明和定义都不是调用的必要条件, 没有声明的函数也可以直接调用, 但已经声明或定义的函数在调用时会通过 checkParams 方法检查参数表是否匹配.

(4) CallWithParams 方法,parser 在遇到函数调用语句时调用, 作用是按照函数的声明或定义状态检查参数表并给出相应的报错.

(5) checkParams 方法, 这是个 private 方法, 作用是检查传入的参数表是否与 paramList 相匹配. 参数表的类型是 Node* , 也就是 VarDecl 对应的语法树节点. 检查的方法是遍历链表, 检查节点的 sym 属性的 type 属性是否对应或可以隐式转换, 不匹配的给出错误提示.

4.4.2 SymbolTable 类

SymbolTable 类是符号表, 有两个属性, 分别是 std::map<std::string,Symbol*> 类型的 table 表和 SymbolTable* 类型的 prev, 指向上一个符号表, 所以 SymbolTable 实际是一个链式栈.

下面介绍 SymbolTable 支持的主要方法

(1) put 方法, 参数为一个字符串和一个 Symbol 指针, 作用是将该符号插入符号表.

(2) get 方法, 参数是一个字符串, 返回值是一个 Symbol 指针, 将首先在当前符号表中查找该符号, 如果没有, 则调用 prev 即上一级符号表的该方法, 如果整个符号表中都找不到该符号, 则返回 null

(3) gethere 方法, 在当前符号表中查找该符号, 如果没有就返回 null, 不会递归查找上一级符号表.

4.4.3 Node 类

Node 类是语法树的节点类, 实质是一个结构体, 没有实质性的方法.
Node 节点的种类用 enum NodeType 类型定义如下:

```
enum NodeType //语法树节点所对应语句类型
{
ExprArith=0,            //数值表达式
ExprLogic=1,            //逻辑表达式
Assign=2,               //赋值语句
If=5,                   //If语句
IfElse=6,               //IfElse语句
While=7,                //While语句
Return=9,               //Return语句
Vardfn=10,              //变量定义语句
Fundcl=11,              //函数声明语句
Fundfn=12,              //函数定义语句
MainFun=13,             //main函数
ArrayAssign=14,         //数组赋值语句
Symbol1 = 15,           //未定类型的临时符号
Params=16,              //参数表(调用时)
Funcall=18,             //函数调用语句
VarDcl = 20,            //参数表(定义或声明时)
Empty = 21,             //空类型
Stmts = 22,             //程序体
};
```

Node 类包含的属性如下:

(1) left, right Node 指针, 指向左子节点和右子节点

(2) type, NodeType 类型, 节点类型.

(3) val int 类型, 用于储存属性值, 例如函数节点的参数个数, Params 节点的当前参数个数等, 此外, 在 identifier 中, 该属性还指示该符号是在最顶层符号表中找到的还是上级符号表中找到的, 以便后续必要时进行覆盖定义. 该属性为综合属性.

(4) line int 类型, 储存该节点在源文件中的代码行号

(5) instr Label 类型,goto 语句后面的标识 (对于非 M 语句) 或标号 (对于 M 语句) , 用于跳转

(6) nextlist, truelist, falselist, 是 Gotolist 类型指针, 实际是跳转表, 分别储存跳转到当前语句结尾、当前语句为真位置、当前语句为假位置的 goto 指令, 用于回填。该属性为综合属性.

(7) sym 是 Symbol 指针类型, 保存当前节点对应的符号.

4.4.4 Label 类

Label 类是 goto 语句后面的标识 (对于非 M 语句) 或标号 (对于 M 语句) . 属性如下:

(1) int 类型 id 是标号的编号 (对于 M 语句), 对于其他语句则为-1

(2) static int 类型 usedCount 是 Label 的计数, 用于编号.

(3) int 类型 location 是该 goto 语句或标号在生成代码序列中的编号, 用于回填

下面是方法

(1) Init(int) 方法, 初始化当前 Label, 传入的参数为 location

(2) Patch() 方法, 只有标号会调用, 作用是在生成的代码序列中补充显示该标号.

4.4.5 Gotolist 类

属性只有一个, 是 std::list<int>, 储存的是 goto 语句在生成代码序列中的编号.
方法如下:

1. Gotolist(int) 初始化, 构造函数, 使 list 属性初始化为一个值的列表
2. merge(Gotolist&) 返回值是 Gotolist, 用于合并两个 Gotolist
3. backpatch(Label* l) 这个函数非常重要, 用于回填, 作用是对于 list 中的每个元素 i, 对于其每个元素调用全局函数 Output::patch(int i,Label & l); 对于非空的 list, 一并调用 l 的 Patch() 函数显示标号.

4.5 对于回填法和逻辑运算的说明

回填法用于解决语法制导翻译过程中生成的 goto 语句跳转到的编号不确定的问题.[1]
下面分几个部分说明:

(1) M 占位符的作用:

M 占位符是标号位置, 翻译到 M 占位符时会在该位置初始化一个标号.

(2) N 占位符的作用:

N 占位符是 goto 语句, 翻译到 N 占位符时会将该 Node 的 instr 属性初始化为一个 goto 语句, 也就是说, 该处必有跳转. 这只用于含有 else 的 if 语句, 因为执行完 true 的代码块以后必须跳过后面的 else 代码块;

(3) Gotolist 的作用, 每个逻辑表达式都有他的 nextlist, truelist 和 falselist(实质是综合属性); 分别对应于一个标号 (也即 M 占位符), 内容是这三个标号对应的 goto 语句的集合 (在生成代码序列中的编号)

(4) 对于比较运算符, 对其生成 eeyore 中的 if 语句, 并初始化两个 goto 语句对应 true 和 false, 初始化 truelist 和 falselist 包含分别包含对应的 goto 语句, 对于比较运算符表达式, nextlist 为空.

(5) 对于逻辑运算符 (包括与, 或, 非), 对应的调用 merge 函数由子节点的三个 list 计算出父节点的三个 list. 很显然, 这一步过程同时能够完成所谓的短路现象.

(6) 对于回填过程整个 If,IfElse 或 While 程序块处理完后即可进行调用三个 gotolist 的 backpatch 函数进行回填操作, 该函数调用全局函数 Output::patch(int i, Label & l); 这个全局函数找到生成代码序列中的第 i 项 (必然以 goto 结尾), 在其后添加上跳转到的标号 l, 即完成了标号回填的过程.

4.6 对于逻辑表达式和算术表达式互相转化的说明

本编译器将比较表达式以及或与非表达式视为逻辑表达式, 五则运算表达式视为算术表达式, 支持逻辑表达式和算术表达式的自动转化.

(1) 逻辑表达式转算术表达式: 生成一个临时变量 x 表示结果, 将逻辑表达式的 truelist 指向运行 x=1, 然后跳过后面一句 x=0; 将逻辑表达式的 falselist 指向运行 x=0.

(2) 算术表达式转逻辑表达式: 设算数表达式对应的符号为 x, 则将该语句翻译为和逻辑比较表达式 x==0 相同的翻译结果. 即为其生成 if-goto-goto 语句, 并将 truelist 初始化为第一个 goto 对应的序号, 将 falselist 初始化为第二个 goto 对应的序号.

5 Tigger

5.1 代码结构

代码由 analyz.cpp/h lexer.l tigger.y tigger.cpp/h main.cpp 构成

analyz.cpp: 包含三个类的定义:

1.Expression 类, 每个 Expression 对象对应一条 Tigger/RiscV 指令;

2.Func 类, 每个 Func 对象对应一个函数;

3.Analyz 类, 单例类, 负责整体处理工作以及函数间优化工作.

analyz.h: 包含上述三个类的声明.

lexer.l: 词法分析器, 负责词法分析, 其中对于变量, 区分全局变量, 局部变量和形参, 使用 Analyz 中的 vcount 属性为变量分配 id, 并包含在 yylval 中.

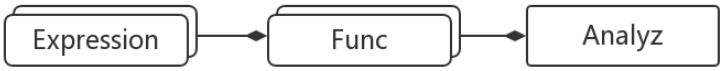
tigger.y: 语法分析器, 负责语法分析, 负责将 Eeyore 语句转换为 Expression 对象, 以及负责 Func 类对象创建, Func 类对象负责 tigger 的主要函数体内工作.

tigger.cpp: 包含一些公共函数.

tigger.h: 公共头文件.

main.cpp: 主程序函数和少量全局变量.

5.2 类结构



5.2.1 Expression 类

```
class Expression
{
public:
    ExprType type;          //类型
    bool isMove;            //是否为传送指令
    bool dead;              //是否为死代码
    bool visited;           //是否被访问过(用于活性分析)
    vector<int> left;       //左值变量
    vector<int> right;      //右值变量
    vector<int> imm;        //直接数
    vector<int> use;        //使用的变量集合
    vector<int> def;        //定义的变量集合
    set<int> in;            //入口活跃集合
    set<int> out;           //出口活跃集合
    list<Expression*> nexts;//下一条指令集合
    list<Expression*> prevs;//上一条指令集合
    map<int,int> constant;  //常数变量表,用于常数传播
    string funtocall;       //仅用于call语句
     //构造函数,用于创建Expression并自动将指针加入当前所在函数的exprs表
    Expression(ExprType _type,vector<int> _left,
```

```
    vector<int> _right,vector<int> _imm,
    string _funtocall="",bool push=true);
};
```

5.2.2 Func 类

```
class Func
{
public:
    Func(int _paramCount,string _name); //构造函数
    void Processor();                   //主函数
    int insert(int s,int v);            //向栈空间添加变量,s为大小,
                                        //v为变量id,返回值为栈上的编号
    void ReturnFunc(int v,int t);       //处理Return语句,v为变量id或常数值,
                                        //t为选项(0表示常数,1表示变量)
    void CallParam(int v,int t);        //处理Param语句,v和t的含义同上
    void CallFunc(int v,string f);      //处理call语句,v为存返回值变量,f为函数名称
    int getParamVar(int r);             //获取形参对应的局部变量编号
    friend class Expression;            //将Expression声明为友元
private:
    int paramCount;                     //参数数量
    int paramToCallWithCount;           //调用参数计数器
    int frameSize;                      //栈空间大小(不含保存调用者保存寄存器的临时空间)
    int frameMaxSize;                   //栈空间大小
    unordered_map<int,int> frameSaveTable;  //记录被调用者保存寄存器的保存位置
    unordered_map<int,int> frameArrayTable; //从栈上数组变量id映射到栈上位置
    string name;                        //函数名称
    vector<int> offset;                 //栈上数据位置
    vector<int> size;                   //栈上数据大小
    vector<int> paramTable;             //形参对应局部变量表
    list<Expression*> exprs;            //语句表
    vector<int> spilledVariableFrameMap; //由变量id映射到上面的offset和size数组的下标


    //Color Algorithm图染色算法
    static int colorNumber;             //颜色数
    list<int> initial;                  //待初始化的节点表
    list<int> simplifyWorklist;         //低度数传送无关节点表
    list<int> freezeWorklist;           //低度数传送相关节点表
    list<int> spillWorklist;            //高度数节点表
    list<int> spilledNodes;             //溢出节点
    list<int> coalescedNodes;           //已合并节点
    list<int> coloredNodes;             //已染色节点
    list<int> selectStack;              //栈
    list<Expression*> coalescedMoves;   //已合并传送指令
    list<Expression*> constrainedMoves; //已约束传送指令
    list<Expression*> frozenMoves;      //已冻结传送指令
    list<Expression*> worklistMoves;    //待合并的传送指令
    list<Expression*> activeMoves;      //活跃的传送指令
    vector<vector<int>> adjMatrix;      //邻接矩阵
    vector<list<int>> adjList;          //邻接表
```

```
    vector<int> degrees;                //度
    vector<int> alias;                  //别名
    vector<int> color;                  //颜色
    vector<NodeStatus> status;          //顶点状态
    vector<list<Expression*>> useList;  //使用该变量的指令表
    vector<list<Expression*>> defList;  //定义该变量的指令表
    vector<list<Expression*>> moveList; //与该变量有关的传送指令表


    void ColorAlgorithmMain();          //图染色主函数
    void AddEdge(int x,int y);          //建图添加边
    void livelyAnalyz();                //活性分析
    void InitColorAlgorithm();          //初始化
    void DecrementDegree(int m);        //顶点度数减1
    bool MoveRelated(int n);            //n是否是传送相关的
    list<Expression*>& NodeMoves(int n);//与n相关的传送指令(未冻结的)
    list<int>& Adjacent(int n);         //n的邻点集
    void Simplify();                    //简化
    void Coalesce();                    //合并
    int GetAlias(int x);                //获取别名(由合并产生)
    void AddWorklist(int u);            //加入工作表
    bool TestPrecoloredCombine(int u/*precolored*/,int v); //测试预着色节点相关传送指令是否可以合并
    bool TestConservative(int u,int v); //测试传送指令是否可以保守合并
    void Combine(int u,int v);          //合并
    void EnableMoves(int m);            //将m相关的传送指令设为待合并的
    void FreezeMoves(int u);            //将u相关的传送指令冻结
    void FreezeAction();                //冻结
    void SelectSpill();                 //选择高度数节点溢出
    void AssignColors();                //分配颜色
    void RewriteProgram();              //重写程序,对于有真实溢出的情况
    void InsertExprForWrite(Expression* e,int v);   //插入栈内存写入
    void InsertExprForRead(Expression* e,int v);    //插入栈内存读取
    int GenTempVariable();              //获取一个新临时变量的id

    //程序流处理及优化
    void InitializeVectorSpace();       //初始化
    void InitFunEnv();                  //函数入口形参处理
    int insert();                       //添加一个int变量到栈中
    void frameFree();                   //释放栈的最后一个空间
    void SaveReg();                     //call语句出保存调用者保存的寄存器
    void OptimizeFlow();                //优化程序流(常数传播)
    void OptimizeDead();                //死代码消除
    void OptimizeLoadStore();           //优化
    void genFlow();                     //生成程序流

    //生成代码
    string opstring(int op);            //获得op对应的运算符
    string opinstruct(int op);          //获得op对应的RiscV指令
    void OutputArithRIMul(int reg1,int reg2,unsigned imm);  //处理ArithRI指令的RiscV输出(将乘以2的幂改为左移)
    void GenCode();                     //生成tigger代码
    void GenRiscv64();                  //生成RiscV64代码
    void GenRiscv32();                  //生成Riscv32代码
    void checkReturn();                 //检查函数退出前是否有返回指令
};
```

5.3 程序流生成

Parser 分析到函数体结尾 end func 时会生成一个 Empty 类型语句表示函数体的结束.

程序流分析过程对 Expression 对象的 nexts 属性和 prevs 属性赋值, 使其分别指向 e 的所有前驱和所有后继.

除 Goto,If 类,Return,Empty 语句外, 所有语句在 vector<Expression*> exprs 中的后继都是其程序流中的后继 (称为默认后继).

对于 Goto 语句, 其后继为 Goto 所指向标号对应的 Label 语句;

对于 If 类语句, 其后继为默认后继以及所指向标号对应的 Label 语句;

对于 Return 语句, 其后继为表示函数体结束的 Empty 语句.

5.4 return 语句检查

如果函数结尾处的 Empty 语句有不是 return 语句的前驱, 则说明程序控制流到了函数末尾, 会给出警告;

并会自动在函数结尾处添加一条 return 0;

5.5 活性分析

以语句为基本块进行自下而上的活性分析. 使用队列进行宽度优先搜索, 递推式为:

$$e.in = e.use \cup (e.out - e.def)$$

$$e.out = \cup_{x \in e.nexts}(x.in)$$

如果进行上述计算后 e.in 和 e.out 有所改变, 则将 e 的前驱加入队列.

迭代直到队列为空.

5.6 死代码消除

此处处理的死代码分为两种:

(1)$e.def \bigcap \left(\bigcup_{x \in e.nexts} x.in\right) == \Phi$ 即该语句定义的变量在这条语句的所有后继中都不是入口活跃的.

(2) 不可达语句, 即在活性分析时未处理的语句.

对于第 (1) 情行, 未定义变量的语句和控制流跳转类语句为例外排除.

5.7 常数传播

每个 Expression 语句对象都有一个 constant 属性, 他是一个 map 表, 从变量 id 映射到该处 (出口处) 的变量常数值. 此表只会储存此处为常数值的变量.

按顺序遍历所有语句, 对于每个语句, 计算一个 mp(map 表)

$$mp = \bigcap_{x \in e.prevs} x.constant$$

即 mp 为 e 的所有前驱的 constant 表中项的交集, 也即对于所有前驱语句都具有相同常数值的变量.

对于非跳转类或访存类语句, 如果 $x \in mp \forall x \in e.use$ 成立, 也即所有被 x 使用的变量在此处均为常数, 则可说明此语句定义的变量也为常数. 调用 calcarith 函数计算此算术运算. 并将该语句的类型改为 MoveRI(即将直接数赋值给变量的语句)

对于上面公式不成立的语句, 以及跳转类和访存类语句, 令

$$mp = mp - e.def$$

即此处被定义的变量标记为不是常数.

最后令 $e.constant = mp$ 记录此语句处的常量表

5.8 访存优化

死代码消除和常数传播的优化是在寄存器分配之前就完成的, 而访存优化主要是优化对局部变量的访存指令. 考虑这两种情况: (1) 当寄存器不够用时, 图染色算法将局部变量溢出至栈帧, 然后 RewriteProgram 过程会为每次对该局部变量的读取增加 FrameLoad 指令, 对修改增加 FrameStore 指令.(2) 连续的 call 语句时, 调用者保存的寄存器会被连续存取但却不会改变.

以上两种情况可能产生一些冗余的访存指令.

此处使用两种规则优化:

(1) 设本条语句 FrameLoad n x. 若当前寄存器 x 在上一句 FrameLoad n x 后未改变, 且上条语句和本条语句之间没有跳转类语句, 标号或者数组写入语句, 则当前 FrameLoad 语句可被优化.

(2) 设本条语句 FrameStore n x. 若当前寄存器 x 在上一句 FrameLoad n x 后未改变, 且上条语句和本条语句之间没有跳转类语句, 标号或者数组写入语句, 则当前 FrameStore 语句和之前的 FrameLoad 语句都可被优化.

举例:

(1)

```
//此处设a保存在栈帧中
c = a + b;
d = a + c;
e = c + d;
```

优化前的 tigger 代码:

```
load  0 a0
a1 = a0 + a1
load  0 a0
a1 = a0 + a1
a1 = a1 + a1
```

优化后的 tigger 代码

```
load  0 a0
a1 = a0 + a1
a1 = a0 + a1
a1 = a1 + a1
```

(2)

```
b = a + 2;
d = func(1);
d = func(2);
return b;
```

优化前的 tigger 代码:

```
a1 = a0 + 2
a0 = 1
store a1 0
call func
load 0 a1
a0 = 2
store a1 0
call func
load 0 a1
a0 = a1
return
```

优化后的 tigger 代码

```
a1 = a0 + 2
a0 = 1
store a1 0
call func
a0 = 2
call func
load 0 a1
a0 = a1
return
```

5.9 寄存器分配

使用图着色算法进行寄存器分配.[1]

利用活性分析的结果构造冲突图, 兼用邻接表和邻接矩阵表示冲突图.

图染色有四种操作:

1. 简化: 对于度数小于 k 的传送无关的点, 将其从图中删除并放入栈中.

2. 合并: 对于一条传送指令, 对其关联的两个点在保守规则下合并.

3. 冻结: 冻结一条传送指令, 将他当作非传送指令.

4. 溢出: 将图中度数最大的点放入栈中, 并从图中删除.

操作按 1.2.3.4 的优先级进行, 直到图中不再有点.

将栈中元素依次弹出, 并为其分配颜色, 如果无颜色可用, 则将该顶点真实溢出.

若有真实溢出发生, 则重写程序, 为溢出的变量分配栈空间, 加入 load 语句和 store 语句来读取和写回, 并创建临时变量进行运算.

5.10 其他说明

Tigger 不再创建符号表, 因为其中所有变量名称的作用域都是全局, 所以直接由词法分析器为其分配一个 id(>27). 全局变量和栈数组不分配寄存器, 直接存到内存中.

5.11 预着色节点的处理

Tigger 有 28 个寄存器, 给其确定 id 为 0-27, 以作为预着色节点, 在活性分析中与其他变量处于同等地位. 在图着色时也可与与其相关的传送节点合并. 但两个不同色的预着色节点无法合并.

5.12 形参的处理

函数参数及返回值需要预着色, 函数体的开头会创建临时变量, 使用传送指令将预着色节点传送到临时变量作为形参, 以避免形参长期占用 a 开头寄存器.

[1] 寄存器分配的算法参考了《现代编译原理-C 语言描述（修订版）》第 11 章

5.13 调用函数

该部分 tigger.y 代码:

```
Expression:
| ...
| PARAM Symbol                                {AnalyzInstance.currentFunc().CallParam($2,1);}
| PARAM INTEGER                                 {AnalyzInstance.currentFunc().CallParam($2,0);}
| Symbol '=' CALL FUNCTION                    {AnalyzInstance.currentFunc().CallFunc($1,$4);}
| ...
```

该部分 analyz.cpp 代码:

```
void Func::CallParam(int v,int t)
{
    if(t == 1)
    {
    new Expression(MoveRR,{(int)(a0)+paramToCallWithCount},{v},{});
    }
    else
    {
    new Expression(MoveRI,{(int)(a0)+paramToCallWithCount},{},{v});
    }
    paramToCallWithCount++;
}
void Func::CallFunc(int v,string f)
{
    vector<int> paramvec;
    paramvec.push_back(int(a0));
    for(int i = 1; i<paramToCallWithCount;i ++)
    {
        paramvec.push_back((int)(a0) + i);
    }
    new Expression(Call,{(int)(a0)},paramvec,{},f);
    new Expression(MoveRR,{v},{(int)(a0)},{});
    paramToCallWithCount = 0;
}
```

Func 类设置了一个计数器计数当前传入参数的个数. 计数器初始化为 0, 每扫描并处理一个 Param 语句, 将计数器值加一. 对于 'Param x'语句, 将其处理为 'a0 = x'(对应 Expression 的类型为 MoveRR), 其中 0 可能为 0-7, 是传参计数器的当前值. 由 Eeyore 的构成, 在 Param 语句和对应的 Call 语句之间不会有其他会改变参数寄存器值的语句, 而 Call 语句的 right 属性会被设置成 a0,a1,..,at, 其中 t 为参数的个数-1; 因此活性分析的结果会阻止 Param 语句和 Call 语句之间的其他无关变量被分配为 a0-at 寄存器.

5.14 合并预着色点相关传送节点的例子

MiniC 代码

```
int v0;
```

```
v0 = getint();
int v1;
v1 = func(v0);
int v2;
v2 = putint(v1+1);
return v2;
```

tigger 代码

```
call getint
call func
a0 = a0 + 1
call putint
return
```

riscv64 代码

```
main:
        add     sp,sp,-16
        sd      ra,8(sp)
        call    getint
        call    func
        addiw   a0,a0,1
        call    putint
        ld      ra,8(sp)
        addi    sp,sp,16
        jr      ra
        .size   main, .-main
```

变量大量合并, 只用了 a0, 没有一条 move 指令.