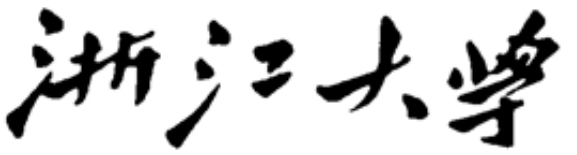


本科实验报告

课程名称： 编译原理

作业名称： Pascal编译器

组内成员： 缪晨露 3170102668

陈益扬 3170101503

连佳宜 3170104169

指导老师： 李莹

Pascal Compiler

序言

本项目旨在使用lex、YACC、llvm等工具和分析方法，实现Pascal语言语法的编译器。本Pascal编译器包含了词法分析、语法分析、语义分析、代码生成、代码优化、运行环境等阶段和环节，最终编译Pascal源代码并生成目标汇编代码以及可执行文件。

文件说明

在`code`文件夹下包含了工程的所有源代码，具体组织如下：

- `src`文件夹下包含运行所需的源代码
  - `pascal.l` 为词法分析的lex代码，经过lex编译后生成`scanner.cpp`
  - `pascal.y` 为文法分析的YACC代码，经过YACC编译后生成`parser.cpp`，`parser.hpp`
  - `ast`文件夹用于构建和维护抽象语法树
  - `analyze.cpp` 和 `analyze.h` 用于语义分析中构建符号表和类型检查
  - `symTab.h` 和 `symTab.cpp` 用于维护符号表和作用域的结构和内容
  - `gen` 文件夹用于代码生成，其中`Env` 用于维护信息环境，`llvm` 用于获取llvm相应的变量的接口
- `test` 文件夹中包含工程的测试代码

在`exec`文件夹下包含了工程的可执行文件，分成Linux和MacOS两个操作系统，具体执行方式请见6.2章。

`pascal.xmind`是我们进行词法分析时绘制的思维导图。

运行环境

工程使用 cmake 构建，依赖环境

- cmake >= 3.10
- g++： C++14标准
- llvm 10.0.0

- flex
- bison

分工

缪晨露：词法分析、语法分析

陈益扬：符号表、类型检查

连佳宜：代码生成、优化处理

一、 Scanner

1.1 一些约定

- Pascal Reserved Words

DIV	MOD	OR	AND	NOT	ARRAY	PROGRAM	PROCEDURE	FUNCTION	CONST
TYPE	OF	RECORD	BEGIN	END	VAR	IF	THEN	ELSE	REPEAT
UNTIL	WHILE	DO	FOR	TO	DOWNTO	CASE	GOTO		

- Pascal符号

.	..	;	,	:	(	)
[	]	=	<>	>=	>	<=
<	+	-	*	/	%	:=

- Pascal基本类型

  INTEGER, REAL, CHAR, STRING , BOOLEAN
- Pascal字面量

  整数，浮点数，字符，字符串，布尔字面量 (true, false)
- Identifier

  Pascal 的 Identifier 是以字母或下划线开头，后接若干字母、数字与下划线的字符串
- Pascal注释

  约定"{"和"}"标识了注释的开始于结束

1.2 Scanner实现

A. Pascal保留字和符号

对于Pascal保留字和符号，我们直接返回对应的token，如下代码所示

```
"."             {return DOT;}
".."            {return DOTDOT;}
";"             {return SEMI;}
"ARRAY"         {return ARRAY;}
"PROGRAM"       {return PROGRAM;}
"PROCEDURE"     {return PROCEDURE;}
```

B. Pascal基本类型

对于Pascal基本类型，我们首先设置yylval.astTypeKind， 然后返回的token为SYS_TYPE

```
"BOOLEAN"   {yylval.astTypeKind = ast::TypeKind::BOOLEANtype; return
SYS_TYPE; }
"CHAR"      {yylval.astTypeKind = ast::TypeKind::CHARtype; return
SYS_TYPE; }
"INTEGER"   {yylval.astTypeKind = ast::TypeKind::INTtype; return SYS_TYPE;
}
"REAL"      {yylval.astTypeKind = ast::TypeKind::REALtype; return
SYS_TYPE; }
"STRING"    {yylval.astTypeKind = ast::TypeKind::STRINGtype; return
SYS_TYPE; }

```

C. Pascal字面量

对于Pascal字面量，我们首先根据yytext里面的内容设置对应的yylval，然后返回对应类型的token

```
{number} {yylval.astint = atoi(yytext); return INTEGER;}
\'.\'    {yylval.astchar = yytext[1]; return CHAR;}
'([^']|'')+'  {dealwithString(yytext); yylval.aststring = strdup(yytext);
return STRING;}
[0-9]+"."[0-9]+  {yylval.astreal = atof(yytext); return REAL;}
[a-zA-Z_]([_a-zA-Z0-9])*     {setUpperCase(yytext); yylval.aststring =
strdup(yytext); return ID;}
```

D. identifier

根据我们对identifier的约定，给出正则表达式`[a-zA-Z_]([_a-zA-Z0-9])*`

匹配到identifer后，首先将yytext的内容复制到yylval的string类型中，然后返回token ID.

```
[a-zA-Z_]([_a-zA-Z0-9])*     {yylval.aststring = strdup(yytext); return ID;}
```

E. Pascal注释

每次读到"{"后，就一直读入后续字符，直到读到"}", 结束注释

```
"{"             {
                    char c;
                    do {
                        c = yyinput();
                        if (c == '\n') lineno++;
                        if (termin == 1) { cout << "ERROR: Line " << lineno << ": comment doesn't end" << endl; break;}
                    } while (c != '}' && c != EOF);
                }
```

如果一直读不到"}"就应该报错，因此，我们设置当遇到end of file后调用yywrap()函数使得原本为0的termin变量置1。注释处理由此判断遇到文档结尾，然后报错

```
int yywrap() {
        termin = 1;
        return 1;
}
```

1.3 其他

Pascal是大小写不敏感的语言，我们在pascal.l中使用了

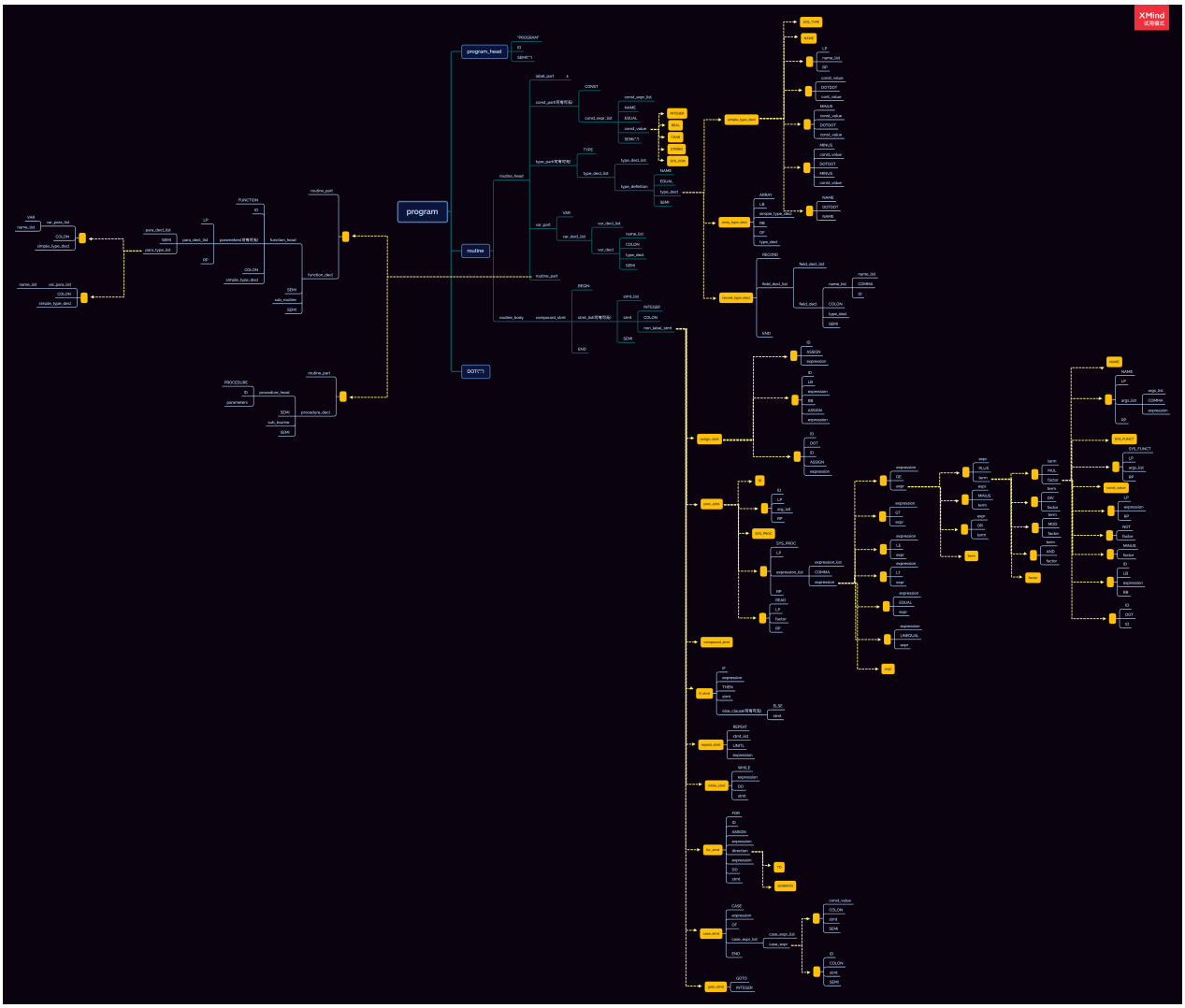
```
%option caseless
```

二、 Parser

2.1 文法分析

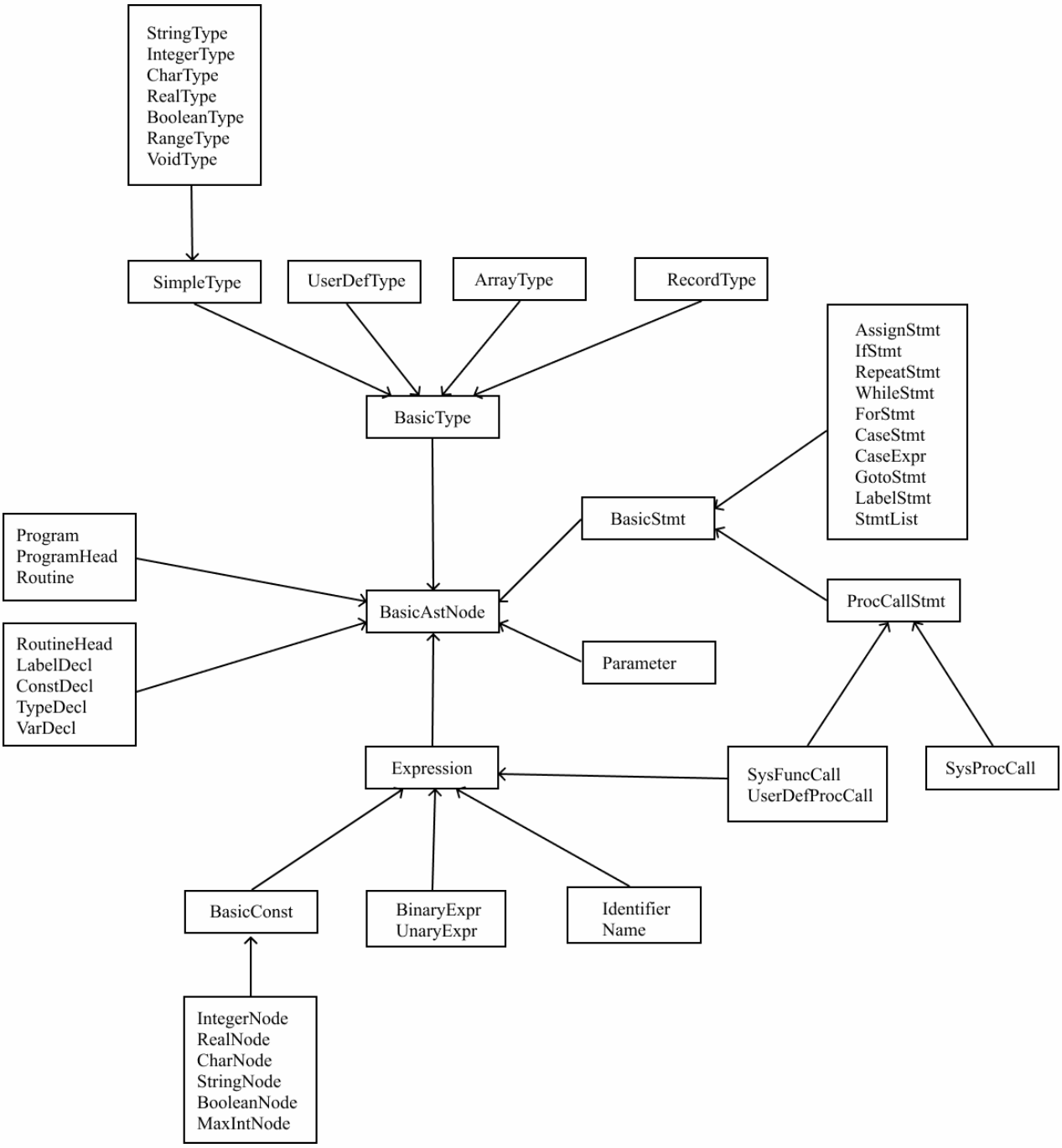
根据给出的文法，我们绘制了下图来更清楚的观察结构

（由于篇幅限制图片清晰度较差，可以在pascal.xmind文件中看到完整结构）



2.1 语法树节点定义

根据文法规则，我们设计了语法树结构



基类	BasicAstNode	所有节点的基类
	Expression	所有表达式的基类
	BasicConst	所有字面量的基类
	BasicType	所有类型的基类
	BasicStmt	所有语句的基类
Expression	BinaryExpr	二元表达式
	UnaryExpr	一元表达式
ID	Identifier	identifier(内容可修改)

		Name	name(内容不可修改)
program		Program	语法树的根节点
		ProgramHead	程序头
		Routine	子程序
		RoutineHead	子程序头
program head		Parameter	函数/过程参数
routine head		ConstDecl	const定义
		TypeDecl	类型定义
		VarDecl	变量定义
const value		IntegerNode	integer类型字面量
		RealNode	real类型字面量
		CharNode	char类型字面量
		StringNode	string类型字面量
		BooleanNode	boolean类型字面量
		MaxIntNode	maxint字面量
Type	type	SimpleType	SimpleType基类
		ArrayType	数组类型
		RecordType	Record类型
		UserDefType	用户定义类型
	SimpleType	CharType	char类型
		IntegerType	integer类型
		RealType	real类型
		StringType	string类型
		BooleanType	boolean类型
		RangeType	range类型
		VoidType	void类型
Statement	statement	AssignStmt	赋值语句

		ProcCallStmt	过程/函数调用语句
		IfStmt	if语句
		RepeatStmt	repeat语句
		WhileStmt	while语句
		ForStmt	for语句
		CaseStmt	case语句
		CaseExpr	case中的条件选择语句
		GotoStmt	goto语句
		LabelStmt	带label语句
		StmtList	语句集合
	proc/func call	SysProcCall	调用系统过程
		SysFuncCall	调用系统函数
		UserDefProcCall	调用用户定义函数/过程

2.3 Parser实现

A. Expression

对于左结合的运算符，我们通过左递归来处理左结合以及表达式的优先级。

```
1  expression      :  expression  GE  expr {
2                      $$ = new ast::BinaryExpr($1,
   ast::BinaryOperator::GEop, $3);
3                  }
4                  |  ...(略去)
5                  |  expr {
6                      $$ = $1;
7                  }
8  ;
9  expr            :  expr  PLUS  term  {
10                     $$ = new ast::BinaryExpr($1,
   ast::BinaryOperator::PLUSop, $3);
11                 }
12                 | ...(略去)
13                 |  term {
14                     $$ = $1;
15                 }
16 ;
```

```
17
18  term            :  term  MUL  factor {
19                      $$ = new ast::BinaryExpr($1,
    ast::BinaryOperator::MULop, $3);
20                  }
21                  | ...(略去)
22                  }
23  ;
24
25  factor          :  NAME {
26                      $$ = new ast::Name($1);
27                  }
28                  |  NAME  LP  args_list  RP  {
29                      $$ = new ast::UserDefProcCall(new ast::Name($1), $3);
30                  }
31                  |  SYS_FUNCT {
32                      $$ = new ast::SysFuncCall($1);
33                  }
34                  |  SYS_FUNCT  LP  args_list  RP  {
35                      $$ = new ast::SysFuncCall($1, $3);
36                  }
37                  |  const_value  {
38                      $$ = $1;
39                  }
40                  |  LP  expression  RP {
41                      $$ = $2;
42                  }
43                  |  NOT  factor  {
44                      $$ = new ast::UnaryExpr(ast::UnaryOperator::NOTop,
    $2);
45                  }
46                  |  MINUS  factor {
47                      $$ = new ast::UnaryExpr(ast::UnaryOperator::NEGop,
    $2);
48                  }
49                  |  ID  LB  expression  RB {
50                      $$ = new ast::ArrayElementRef(new
    ast::Identifier($1), $3);
51                  }
52                  |  ID  DOT  ID {
53                      $$ = new ast::RecordElementRef(new
    ast::Identifier($1), new ast::Identifier($3));
54                  }
55  ;
```

B. Statement

```
stmt_list       : stmt_list  stmt  SEMI {
                    $$ = $1;
                    for(auto s : *($2))
                        $$->push_back(s);
                }
                |  {
                    $$ = new ast::StmtList();
                }
;
```

```
stmt            : assign_stmt {
                    $$ = new ast::StmtList();
                    $$->push_back((ast::Stmt*)$1);
                }
                | proc_stmt {
                    $$ = new ast::StmtList();
                    $$->push_back((ast::Stmt*)$1);
                }
                | ...(略去)
;
```

Assign语句

```
assign_stmt     : ID  ASSIGN  expression {
                    $$ = new ast::AssignStmt(new ast::Identifier($1), $3);
                }
                | ID LB expression RB ASSIGN expression {
                    $$ = new ast::AssignStmt(new ast::ArrayElementRef(new ast::Identifier($1), $3), $6);
                }
                | ID  DOT  ID  ASSIGN  expression {
                    $$ = new ast::AssignStmt(new ast::RecordElementRef(new ast::Identifier($1), new ast::Identifier($3)), $5);
                }
;
```

其他语句同理

C. Type

```
type_decl_list  : type_decl_list  type_definition {
                    $$ = $1;
                    $1->push_back($2);
                }
                |  type_definition {
                    $$ = new ast::TypeDeclList();
                    $$->push_back($1);
```

```
                }
;

type_definition : NAME  EQUAL  type_decl  SEMI {
                    $$ = new ast::TypeDecl(new ast::Name($1), $3);
                }
;

type_decl       : simple_type_decl  { $$ = $1; }
                | array_type_decl   { $$ = $1; }
                | record_type_decl  { $$ = $1; }
;

simple_type_decl: SYS_TYPE {
                    if($1 == ast::TypeKind::INTtype) {
                        $$ = new ast::IntegerType();
                    } else if($1 == ast::TypeKind::REALtype) {
                        $$ = new ast::RealType();
                    } else if($1 == ast::TypeKind::CHARtype) {
                        $$ = new ast::CharType();
                    } else if($1 == ast::TypeKind::BOOLEANtype) {
                        $$ = new ast::BooleanType();
                    } else if($1 == ast::TypeKind::STRINGtype) {
                        $$ = new ast::StringType();
                    }
                }
                |  NAME  {
                    $$ = new ast::UserDefType(new ast::Name($1));
                }
                |  const_value  DOTDOT  const_value {
                    $$ = new ast::RangeType($1, $3);
                }
                |  MINUS  const_value  DOTDOT  const_value {
                    $$ = new ast::RangeType(new
ast::UnaryExpr(ast::UnaryOperator::NEGop, $2), $4);
                }
                |  MINUS  const_value  DOTDOT  MINUS  const_value {
                    $$ = new ast::RangeType(new
ast::UnaryExpr(ast::UnaryOperator::NEGop, $2), new
ast::UnaryExpr(ast::UnaryOperator::NEGop, $5));
                }
                |  NAME  DOTDOT  NAME {
                    $$ = new ast::RangeType(new ast::Name($1), new
ast::Name($3));
                }
;


array_type_decl : ARRAY  LB  simple_type_decl  RB  OF  type_decl {
                    $$ = new ast::ArrayType($3, $6);
                }
;
```

```
56
57 record_type_decl: RECORD  field_decl_list  END {
58                     $$ = new ast::RecordType($2);
59                 }
60 ;
```

D. 字面量

对字面量，只需新建 一个对应的语法树节点，并将字面量的值传给其构造函数。

```
1 const_value     :  INTEGER          {$$ = new ast::IntegerNode($1);}
2                 |  MINUS INTEGER    {$$ = new ast::IntegerNode(-$2);}
3                 |  REAL             {$$ = new ast::RealNode($1);}
4                 |  MINUS REAL       {$$ = new ast::RealNode(-$2);}
5                 |  CHAR             {$$ = new ast::CharNode($1);}
6                 |  STRING           {$$ = new ast::StringNode($1);}
7                 |  BOOLEAN          {$$ = new ast::BooleanNode($1);}
8                 |  SYS_CON          {$$ = new ast::MaxIntNode();}
9 ;
```

2.4 error handling

我们可以使用称作错误产生式 (error production)的方法。错误产生式就是一个包括了伪记号error作为它的右边的唯一符号的产生式。错误产生式标志着一个上下文， 直到看到恰当的同步记号时，在其中的错误记号才被删除，而此时又可重新开始分析。错误产生式是在Yacc中用于错误恢复的主要方法。

1) 当分析程序在分析中检测到错误时，它会从分析栈中弹出状态直至到达一个其中的error伪记号是合法的先行的状态。

2) 一旦分析程序找到了栈上的一个状态，在该状态中的 error就是一个合法的先行，它以正常的风格继续移进和归约。

3) 如果分析程序在一个错误发生之后发现了更多的错误，则直到将 3个成功的记号合法地移进到分析栈中之后为止，引起错误的输入记号才会被无声地丢弃掉。此时认为分析程序是位于一个“错误状态”之中。将这个行为设计用来避免由相同错误引起的错误信息级联。但这样就会导致在分析程序退出错误状态之前丢掉大量的输入 (同在应急方式中一样)。可以利用Yacc宏yyerrork将分析程序从错误状态中删除掉以不考虑这个行为， 所以在没有新的错误校正的情况下就不会丢掉更多的输入了。

以下是我们处理error的部分代码

```
program_head    : PROGRAM  ID  SEMI {
                    $$ = new ast::ProgramHead(new ast::Identifier($2), new ast::ParamList(), new ast::VoidType());
                }
                | PROGRAM ID error SEMI{
                    $$ = new ast::ProgramHead(new ast::Identifier($2), new ast::ParamList(), new ast::VoidType());
                    yyerrok;
                }
                | error PROGRAM ID  SEMI{
                    $$ = new ast::ProgramHead(new ast::Identifier($3), new ast::ParamList(), new ast::VoidType());
                    yyerrok;
                }
;
```

2.5 测试

Test Expression, Test Statement, Type Test均通过，这里展示Test Proc/Func

Test Proc/Func

pascal代码

```
PROGRAM procTest;
{routine head}

{const part}
CONST
    cn = 2;
    dn = 123.23;
{var part}
VAR
    k : INTEGER;

{routine part}
PROCEDURE outer;
{subroutine var part}
VAR
    res : INTEGER;
    added : INTEGER;
{subroutine routine part}
FUNCTION inner1(a , b : INTEGER) : INTEGER;
BEGIN
    inner1 := a + b;
END;
```

```
23
24  PROCEDURE inner2(aa : INTEGER; b :INTEGER);
25  BEGIN
26      aa := inner1(aa , b);
27      k := k + 10;
28  END;
29
30  BEGIN
31      k := 0;
32      inner2(k , 10);
33  END;
34
35  {routine body}
36  BEGIN
37      outer;
38  END.
```

输出语法树

```
1   Program
2   |---ProgramHead
3   |   |---Identifier:procTest
4   |   |---VOID
5   |---Routine
6   |   |---RoutineHead
7   |   |   |---ConstDecl
8   |   |   |   |---Name:cn
9   |   |   |   |---IntegerNode: 2
10  |   |   |---ConstDecl
11  |   |   |   |---Name:dn
12  |   |   |   |---ReadNode: 123.23
13  |   |   |---VarDecl
14  |   |   |   |---Identifier:k
15  |   |   |   |---Integer
16  |   |   |---Program
17  |   |   |   |---ProgramHead
18  |   |   |   |   |---Identifier:outer
19  |   |   |   |   |---VOID
20  |   |   |   |---Routine
21  |   |   |   |   |---RoutineHead
22  |   |   |   |   |   |---VarDecl
23  |   |   |   |   |   |   |---Identifier:res
24  |   |   |   |   |   |   |---Integer
25  |   |   |   |   |   |---VarDecl
26  |   |   |   |   |   |   |---Identifier:added
27  |   |   |   |   |   |   |---Integer
28  |   |   |   |   |   |---Program
29  |   |   |   |   |   |   |---ProgramHead
30  |   |   |   |   |   |   |   |---Identifier:inner1
31  |   |   |   |   |   |   |   |---Parameter
32  |   |   |   |   |   |   |   |   |---Identifier:a
```

```
|   |   |   |   |   |   |   |   |---Integer
|   |   |   |   |   |   |   |---Parameter
|   |   |   |   |   |   |   |   |---Identifier:b
|   |   |   |   |   |   |   |   |---Integer
|   |   |   |   |   |   |   |---Integer
|   |   |   |   |   |   |---Routine
|   |   |   |   |   |   |   |---RoutineHead
|   |   |   |   |   |   |   |---AssignStmt
|   |   |   |   |   |   |   |   |---Identifier:inner1
|   |   |   |   |   |   |   |   |---BinaryExpr:+
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |---Name:a
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |---Name:b
|   |   |   |   |   |---Program
|   |   |   |   |   |   |---ProgramHead
|   |   |   |   |   |   |   |---Identifier:inner2
|   |   |   |   |   |   |   |---Parameter
|   |   |   |   |   |   |   |   |---Identifier:aa
|   |   |   |   |   |   |   |   |---Integer
|   |   |   |   |   |   |   |---Parameter
|   |   |   |   |   |   |   |   |---Identifier:b
|   |   |   |   |   |   |   |   |---Integer
|   |   |   |   |   |   |   |---VOID
|   |   |   |   |   |   |---Routine
|   |   |   |   |   |   |   |---RoutineHead
|   |   |   |   |   |   |   |---AssignStmt
|   |   |   |   |   |   |   |   |---Identifier:aa
|   |   |   |   |   |   |   |   |---UserDefProcCall: inner1
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |---Name:aa
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |---Name:b
|   |   |   |   |   |   |   |---AssignStmt
|   |   |   |   |   |   |   |   |---Identifier:k
|   |   |   |   |   |   |   |   |---BinaryExpr:+
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |---Name:k
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |---IntegerNode: 10
|   |   |   |   |---AssignStmt
|   |   |   |   |   |---Identifier:k
|   |   |   |   |   |---IntegerNode: 0
|   |   |   |   |---UserDefProcCall: inner2
|   |   |   |   |   |---Name:k
|   |   |   |   |   |---IntegerNode: 10
|   |---UserDefProcCall: outer
```

经过验证，该语法树是正确的

三、 语义分析

语义分析(semantic analysis)的任务是计算编译过程所需的附加信息。因为编译器完成的分析是静态(在执行之前发生)定义的，语义分析也可以称为静态语义分析(static semantic analysis)。

一般的，语义分析包括了构造符号表、记录声明中建立的名字的含义、在表达式和与剧中进行类型推断和类型检查以及在语言的类型规则作用域内判断它们的正确性。

在Pascal语言的语义分析中，主要包括了符号表的建立和类型检查两部分，类型检查可以检测出大部分错误类型并作出相应的error report。

3.1 符号表设计

符号表是语义分析中较为重要的数据结构，存储了整个程序中各个区域的所有符号信息，在符号表中维护了符号名、符号类型、数据类型、内存虚拟地址、行号等信息。符号表将在类型检查、目标代码生成等过程中用作类型查找、分配变量内存空间等。

在本项目中，以哈希表来维护符号表的结构，定义哈希表的大小为571，用571个桶来组成。其中使用类似于分离链表的方式来处理哈希表冲突，即每个桶都是一个线性的容器（用STL中的vector来存储），新的项将会被放置在对应的桶中容器的末尾。

哈希函数：$h = (\sum_{i=1}^{n} \alpha^{n-i} c_i) \ mod \ size$，其中$c_i$为变量/函数名字符串第$i$个字符的数字值

3.1.1 数据结构

Class BucketListRec

BucketListRec作为符号表每一项内容的索引，用于维护表中的记录。结构如下：

```
class BucketListRec {
public:
    string id;
    vector<int> lines;
    int memloc;
    string recType;
    string dataType;
    int order;

    BucketListRec(string _id, int _lineno, int _memloc, string _recType,
string _dataType, int _order) {
        id = _id;
        memloc = _memloc;
        lines.push_back(_lineno);
        recType = _recType;
        dataType = _dataType;
    }
};
```

其中各成员含义如下：

- `id`：变量/函数名称

- `lines`：变量/函数出现的行号信息
- `memloc`：内存地址

  在符号表内为所有符号分配虚拟内存地址，便于生成目标代码时分配内存空间
- `recType`：符号类型

  Function / Const / Variable
- `dataType`：数据类型

  变量的数据类型 / 函数返回的数据类型

  Void / Integer / Char / Real / String / Array / Record ..
- `order`：变量被定义的顺序（从0开始）

Class arrayRec

由于Pascal文法中数组变量的特殊性，定义一个类来单独用于记录数组类型变量的信息。

结构如下：

```
class arrayRec {
public:
    string arrayName;
    int arrayBegin;
    int arrayEnd;
    string arrayType;

    arrayRec(string _arrayName, int _arrayBegin, int _arrayEnd, string
_arrayType) {
        arrayName = _arrayName;
        arrayBegin = _arrayBegin;
        arrayEnd = _arrayEnd;
        arrayType = _arrayType;
    }

    arrayRec(string newName, arrayRec rec) {
        arrayName = newName;
        arrayBegin = rec.arrayBegin;
        arrayEnd = rec.arrayEnd;
        arrayType = rec.arrayType;
    }
};
```

各成员含义如下：

- `arrayName`：变量名称
- `arrayBegin`：数组起始下标
- `arrayEnd`：数组结束的下标
- `arrayType`：数组内元素的数据类型
- 两个构造函数分别用于新建并初始化Array变量，以及用户自定义数据类型中有Array的情况

Class ScopeRec

由于Pascal中的函数和变量存在作用域限制，并且Pascal语言具有能够嵌套定义函数的功能，我们在符号表的基础上定义了表示作用域的类ScopeRec，在每个作用域内维护一张符号表，而每张符号表之间也继承了作用域之间的拓扑关系。

同时，由于Pascal中Record数据类型的特殊性，Record也将使用作用域类来维护。

作用域类的结构定义如下所示：

```
class ScopeRec {
public:
    string scopeName;
    int depth;
    ScopeRec *parentScope;
    BucketList hashTable[TABLE_SIZE];
    map<string, string> userDefType;
    vector<arrayRec> arrayList;
    vector<recordRec> recordList;
    int order;

    ScopeRec(string _scopeName) {
        scopeName = _scopeName;
        order = 0;
    }

    ScopeRec(string _scopeName, ScopeRec* oriScope) {
        scopeName = _scopeName;
        depth = oriScope->depth;
        parentScope = oriScope->parentScope;
        for (int i = 0; i < TABLE_SIZE; i++) {
            hashTable[i] = oriScope->hashTable[i];
        }
        userDefType = oriScope->userDefType;
        arrayList = oriScope->arrayList;
        order = 0;
    }
};
```

各成员的含义如下：

- `scopeName`：作用域名称

  全局的作用域`scopeName`是global，以函数为单位的作用域`scopeName`一般是函数名称
- `depth`：作用域深度

  定义全局作用域（global）的深度为0，在此基础上每嵌套一层depth增加1
- `parentScope`：指向父作用域的指针

  指向上一层作用域，用于查找上一层作用域定义的变量
- `hashTable`：该作用域内维护的符号表
- `userDefType`：用于存储Type中用户定义的数据类型
- `arrayList`：用于存储当前作用域中的所有Array类型的变量

- `recordList`：用于存储当前作用域中的所有Record类型的变量
- `order`：最后一个被定义变量的编号
- 两个构造函数分别用于新建并初始化作用域，和维护用户自定义数据类型中的Record变量

3.1.2 符号表操作实现

根据语义分析的需求，为符号表维护了插入、查找、打印三个方法。

- `void st_insert(string id, int lineNo, int size, string recType, string dataType)`

  在语法树中检测到有新的变量或者函数被声明时，将该变量/函数插入对应作用域的符号表中。如果同名的变量/函数已经被声明过，则报出对应的语法错误，退出程序。

- `string st_lookup(string id)`

  根据函数/变量名在符号表中搜索，返回该函数/变量的数据类型（可用于类型检查）。考虑到作用域的特性，子作用域可以覆盖父作用域中的声明，且子作用域能够使用父作用域中定义的函数/变量，因此在检索时利用到作用域定义时候指向父作用域的指针。首先在当前作用域搜索，如果没有找到则进入上一层作用域，直到进入全局作用域。

- `void st_print()`

  依次打印所有的作用域以及作用域中符号表的如下信息：

  - 作用域名称、作用域深度
  - 符号名称、符号类型、数据类型、虚拟地址位置、定义顺序、行号信息

  示例如下：

```
================================================================================
Scope Name: global <depth: 0>
procTest    Function    Void        0           0           1
================================================================================
Scope Name: procTest <depth: 1>
k           Variable    Integer     6           2           10
outer       Function    Void        8           3           13
cn          Const       Integer     0           0           6
dn          Const       Real        2           1           7
================================================================================
Scope Name: outer <depth: 2>
res         Variable    Integer     8           0           16
inner1      Function    Integer     12          2           19
inner2      Function    Void        14          3           24
added       Variable    Integer     10          1           17
================================================================================
Scope Name: inner1 <depth: 3>
a           Variable    Integer     14          0           19
b           Variable    Integer     16          1           19
================================================================================
Scope Name: inner2 <depth: 3>
b           Variable    Integer     16          1           24
aa          Variable    Integer     14          0           24
================================================================================
```

3.1.3 作用域操作实现

根据语言特性，作用域类通过类似栈的操作方式进行维护，在进入子作用域时，将子作用域入栈，退出时将其出栈。维护了入栈、出栈、返回栈顶作用域的方法，除此之外维护作用域的创建和查找方法。

- `void sc_pop()`

  将栈顶的作用域pop出栈

- `void sc_push(string name)`

  根据作用域名将对应作用域push入栈

- `Scope sc_top()`

  返回栈顶的作用域（即当前子作用域）

- `Scope sc_find(string name)`

  根据作用域名称找到并返回对应作用域（用于用户自定义数据类型中Record类型的维护）

- `Scope sc_create(string scopeName)`

  在当前父作用域下创建新的子作用域，以scopeName作为作用域名称

- `Scope sc_create(string scopeName, Scope oriScope)`

  重载作用域创建函数，用于用户自定义数据类型中Record类型的维护

3.2 语义分析

语义分析的过程即根据抽象语法树生成作用域和符号表的过程。

由于Pascal语法中作用域的特性，在遇到标志函数和Record的节点时，要新建一个作用域并将其入栈，退出时要将该作用域出栈。

可以看出来，由于作用域结构的嵌套关系，作用域和符号表的创建将是从根节点到叶节点前序遍历的过程，而与之对应，作用域出栈的过程将是后序遍历。为了操作方便，通过traverse函数对语法树进行相应遍历。定义如下：

```
1  static void traverse(ast::BasicAstNode * node, void(*preProc)
   (ast::BasicAstNode *), void(*postProc) (ast::BasicAstNode *)) {
2      ast::childrenList* children = node->getChildrenList();
3      if (children->size()) {
4          for (auto child : *children) {
5              if (child != NULL) {
6                  preProc(child);
7                  traverse(child, preProc, postProc);
8                  postProc(child);
9              }
10         }
11     }
12 }
```

在这个函数中，可以实现对preProc指向的函数的前序遍历和对postProc指向的函数的后序遍历。

在遍历过程中对作用域栈和符号表的操作分为以下几种情况：

- 函数声明：在原作用域的符号表中插入函数的记录，创建新的作用域并入栈，在新的作用域的符号表中插入参数对应的记录
- 常量/变量声明：向栈顶作用域的符号表中插入对应常量/变量的记录
- 用户定义数据类型声明：向栈顶作用域的`userDefType`中插入对应记录
- Array类型：向栈顶作用域的符号表中插入对应常量/变量，记录数据类型为Array。同时将数组起点、终点、元素数据类型等信息记录在对应作用域的`arrayList`中
- Record类型：在原符号表中插入对应常量/变量，记录数据类型为Record，创建新的作用域并入栈，在新作用域的符号表中记录Record的成员信息
- 声明的数据类型为用户定义类型：从当前作用域的`userDefType`中找到该用户定义类型对应的数据类型，用新的类型记录到符号表中

3.3 类型检查

类型检查即属性计算的过程。在该过程中，需要在抽象语法树中维护各节点的类型信息，同时检查是否具有语义层面上的类型错误，如果有错则打印报错信息。

错误信息包括赋值时的类型匹配错误、不适当的左值类型（Record、Array等）、函数返回值类型错误、Array和Record的非法访问、重复/冲突定义、for循环语句条件错误、case语句选择条件和常量表达式类型不匹配、表达式计算时类型错误等等。

类型检查也通过遍历语法树的方式来进行。由于需要查找符号表，在进行属性计算时需要让子作用域入栈，然后再进行对应的属性计算和错误检查。很显然，作用域入栈是一个前序遍历的过程，而属性计算和错误检查将是后序遍历的过程。因此我们依然会用到上一节所提到的`traverse`函数来对语法树进行遍历。

3.4 测试

3.4.1 符号表测试

多层嵌套

```
PROGRAM procTest;
CONST
    cn = 2;
    dn = 123.23;
VAR
    k : INTEGER;

PROCEDURE outer;
VAR
    res : INTEGER;
    added : INTEGER;

FUNCTION inner1(a , b : INTEGER) : INTEGER;
BEGIN
```

```
    inner1 := a + b;
END;

PROCEDURE inner2(aa : INTEGER; b :INTEGER);
BEGIN
    aa := inner1(aa , b);
    k := k + 10;
END;

BEGIN
    k := 0;
    inner2(k , 10);
END;

BEGIN
    outer;
END.
```

输出符号表如下：

```
================================================================================
Scope Name: global <depth: 0>
procTest    Function    Void        0           0           1
================================================================================
Scope Name: procTest <depth: 1>
k           Variable    Integer     6           2           10
outer       Function    Void        8           3           13
cn          Const       Integer     0           0           6
dn          Const       Real        2           1           7
================================================================================
Scope Name: outer <depth: 2>
res         Variable    Integer     8           0           16
inner1      Function    Integer     12          2           19
inner2      Function    Void        14          3           24
added       Variable    Integer     10          1           17
================================================================================
Scope Name: inner1 <depth: 3>
a           Variable    Integer     14          0           19
b           Variable    Integer     16          1           19
================================================================================
Scope Name: inner2 <depth: 3>
b           Variable    Integer     16          1           24
aa          Variable    Integer     14          0           24
================================================================================
```

特殊数据类型

```
PROGRAM arrayRecord;
CONST
    a = FALSE;
    b = 10;
    c = 2.2;
    d = 't';
```

```
TYPE
    test = INTEGER;
    atype = ARRAY [1..4] OF REAL;
    rtype = RECORD
        a : INTEGER;
        b,c : REAL;
    END;
VAR
    f : test;
    h : STRING;
    i : BOOLEAN;
    j : ARRAY [0..3] OF INTEGER;
    k : rtype;
    r : atype;
    e : INTEGER;
    rrrr : RECORD
        ra : INTEGER;
        rb : REAL;
    END;

BEGIN
    f := 1;
    h := 'string';
    i := FALSE;
    j[0] := 0 + 1 + 2;
    e := j[0] + j[1] * j[2];
    k.a := j[0] + b - c * 4 DIV 3 * 3;
    k.b := 1.3;
END.
```

输出符号表如下：

```
================================================================
Scope Name: global <depth: 0>
arrayRecord Function    Void        0           0           1
================================================================
Scope Name: arrayRecord <depth: 1>
a           Const       Boolean     0           0           3
b           Const       Integer     1           1           4
c           Const       Real        3           2           5
d           Const       Char        7           3           6
e           Variable    Integer     292         10          21
f           Variable    Integer     8           4           15
h           Variable    String      8           5           16
i           Variable    Boolean     263         6           17
j           Variable    Array       264         7           18  <Array: range [0:3], type Integer >
k           Variable    Record      270         8           19
r           Variable    Array       280         9           20  <Array: range [1:4], type Real >
rrrr        Variable    Record      294         11          22
================================================================
Scope Name: rtype <depth: 2>
a           Variable    Integer     8           0           11
b           Variable    Real        10          1           12
c           Variable    Real        14          2           12
================================================================
Scope Name: k <depth: 2>
a           Variable    Integer     8           0           11
b           Variable    Real        10          1           12
c           Variable    Real        14          2           12
================================================================
Scope Name: rrrr <depth: 2>
ra          Variable    Integer     294         0           23
rb          Variable    Real        296         1           24
================================================================
```

3.4.2 类型检查报错测试

变量未定义

```
Error in line[29]: Undefined expression: 'str'.
```

赋值类型错误

```
VAR
    f : INTEGER;
BEGIN
    f := 'test';
END
```

```
Error in line[30]: Assignment type does not match <Integer, String>.
```

不适当的左值类型

```
VAR
    j : ARRAY [0..3] OF INTEGER;
BEGIN
    j := 2;
END
```

```
Error in line[33]: Assignment type does not match <Array, Integer>.
```

数组越界

```
VAR
    j : ARRAY [0..3] OF INTEGER;
BEGIN
    j[4] := 2;
END
```

```
Error in line[33]: Array reference out of bounds.
```

Record成员不存在

```
CONST
    a = FALSE;
    d = 't';
VAR
    k : RECORD
        a : INTEGER;
        b,c : REAL;
    END;
BEGIN
    k.d := 1.3;
END.
```

```
Error in line[36]: No member named 'd' in 'k'.
```

重复/冲突定义

```
VAR
    e : INTEGER;
    e : STRING;
```

```
Error in line[23]: Variable 'e' is already defined.
```

for循环条件错误

```
VAR
    b, c : INTEGER;
    d : REAL;
    str: STRING;
BEGIN
    FOR d:=1.1 TO 10 DO BEGIN
        c := c + 1;
        WHILE c <= 5 DO BEGIN
            d := 0;
            d := 0;
```

```
11          END;
12
13          REPEAT
14              d := 0;
15          UNTIL c > 5;
16      END;
17  END.
```

```
Error in line[13]: Condition in 'For' statement must be integer.
```

case条件类型不匹配

```
1   VAR
2       b, c, d : INTEGER;
3       str: STRING;
4
5   BEGIN
6       CASE str OF
7           0: BEGIN str := 'A1'; c := 1; END;
8           1: str := 'B2';
9           2: str := 'C3';
10          3: str := 'D4';
11      END;
12  END.
```

```
Error in line[30]: Case type does not match <String, Integer>.
```

表达式计算类型错误

```
1   VAR A : INTEGER;
2       str : STRING;
3   BEGIN
4       str := A;
5   END.
```

```
Error in line[26]: Assignment type does not match <String, Integer>.
```

四、 代码生成

使用了LLVM库，将 AST 转化为 LLVM IR 中间代码。

为了实现 AST 到中间代码的转换，需要维护一个运行环境，维护当前的变量，函数等信息。

4.1 LLVM

LLVM 设计了 **LLVM IR** 的中间代码， 并以库**(Library)** 的方式提供一系列接口， 提供生成、操作IR，生成目标平台代码等功能。

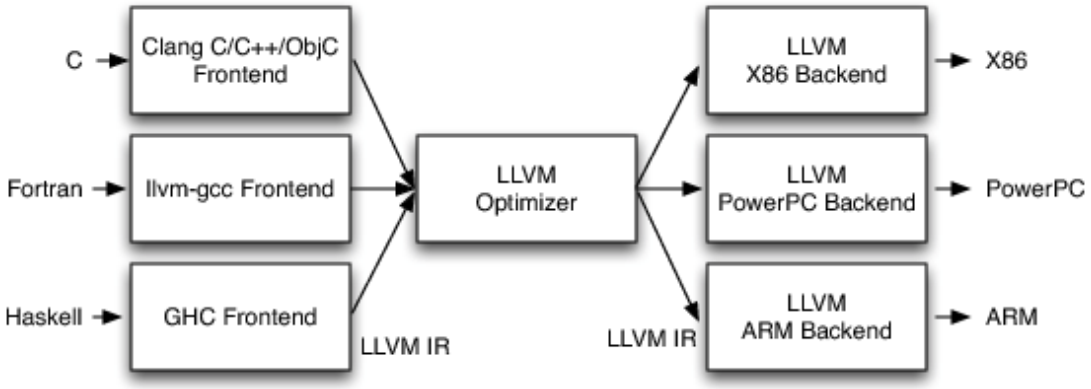


Figure 11.3: LLVM's Implementation of the Three-Phase Design

LLVM IR 有三种不同的形式：内存中的编译中间语言（IR），保存在硬盘上的 bitcode（`.bc` 文件，适合快速地被一个 JIT 编译器加载），一个可读性的汇编语言表示 (`.ll` 文件)。LLVM项目提供不同代码之间的相互转换。

从 AST 到 LLVM IR 的部分主要使用了 <llvm/IR/...> 中的内容，简单介绍如下

4.1.1 Module

LLVM 程序由 Module 组成，每个程序模块都是输入程序的翻译单元。每个模块由函数，全局变量和符号表条目组成。

在项目中，实现对简单单文件程序的编译，我们创建一个 Module 完成整个编译工作。

首先在 Module 中创建函数，再往函数中放入表达式的 IR，最后将所有的 IR 输出。

4.1.2 Function

LLVM 中的函数指针主要有两个部分：函数类型和函数体。

函数类型由函数的输入和输出组成，其中输入是一个由 llvm::Type组成的容器，而输出是一个 llvm::Type，可以使用 FunctionType 类型。

函数体由 BasicBlock 构成，通过 IRBuilder 往 BasicBlock 中加入指令。

4.1.3 BasicBlock

IR 是一种抽象的汇编语言，它使用有条件和无条件的跳转（称为分支）来表示控制流。分支之间的依次运行的代码序列称为 BasicBlock，或简称为块。

llvm 要求所有的 BasicBlock 最后一条语句为跳转语句或结束语句。

4.1.4 IRBuilder

用于创建指令并将其附加到块末尾的便捷接口，其中提供了多种不同的指令。

4.1.5 Value

value 类用来 LLVM 中的表示具有类型的值。在表达式代码生成时通过传递 value 表示变量。通过 IRBuilder::CreateAlloca 可以在环境中创建一个局部变量，此时返回的是一个指向变量的指针变量，需要用 CreateLoad 获得变量的值，用 CreateStore 向变量赋值。

4.1.6 Name 和 Identity

抽象语法树中的变量名节点，在语法分析是分成了两种： Name 和 Identity，从而区分开了变量的性质。

如赋值语句中，赋值左端为 identity， 而右端出现的变量名为 name。WRITE 函数的参数为name类型，READ 函数的参数为 identity类型。 对 name 类型的代码生成，会在得到指针变量后直接进行 Load 操作，而对 identity 则不会。

4.2 环境维护

代码生成中的环境维护主要分为几个方面：变量信息环境，函数信息环境，类型信息环境和标签信息环境。环境均通过一个由 map 构成的堆栈组成，在 map 中形成名字与 llvm 中变量的对应关系。

实现中通过在函数定义和函数调用等不同部分间接地实现 access link 和 control link

4.2.1 变量信息维护

变量维护通过一个栈实现，栈的每一层都是一个 map，map中用变量名对应一个 llvm::Value

当进入函数定义时，往栈中加入一层，出现变量申明时往 map 中新建 Value；查找变量时从栈顶往下依层查询，从而得到变量正确的引用。离开函数定义时，压入栈的层出栈。实现了 access link 的功能。

对于全局变量，则是用 llvm::Module 中的全局变量定义。

4.2.2 函数信息维护

函数信息维护与变量信息相似。在初始化是，会将系统函数需要调用的函数压入栈中。

出现函数调用时，搜索函数信息的栈，通过函数名得到的 llvm::Function 指针调用函数。

直接通过 llvm 中的调用操作即可转换为中间代码。函数调用一般都用过命令跳转实现。通过 LLVM 可以完成调用完函数后返回原 Basiclock，从而无需实现 control link。

4.2.3 类型信息维护

类型栈主要保存用户定义的结构体与定义的类型别名。保存定义的名称与 llvm::Type 的映射。

对于 Record 的结构体，创建 llvm::StructType 类型保存。

4.2.4 标签信息维护

标签信息主要用于 goto 语句，只有 label 语句中的标签名是用户定义的，会被加入到标签栈中。由于 goto 语句可能会前往还未定义的标签，当出现goto语句时若标签未定义，会先定义出该标签，在之后进行标签内语句的定义。

4.3 llvm 变量生成

4.3.1 类型生成

LLVM 提供了不同位数的 int 整数类型，double 浮点数类型，void 类型，数组类型与结构类型等。

程序中使用 32位 int 类型表示 INTEGER，用 8位 int 类型表示 CHAR，用 1位 int 类型表示 BOOLEN。STRING 则用由 255 个8位 int 类型组成的 array 表示。

TYPE in Pascal	**TYPE in LLVMIR**
BOOLEN	getInt1Ty
INT	getInt32Ty
REAL	getDoubleTy
VOID	getVoidTy
CHAR	getInt8Ty
STRING	ArrayType::get(getInt8Ty(llvmContext), 255);
ARRAY	ArrayType
RECORD	StructType

4.3.2 常量生成

LLVM 提供了获得不同常量的接口，得到的 Value 属于 Constant 类型，可以用来进行常量优化。同时，对于全为 Constant 类型的表达式运算，LLVM会自动进行运算优化，保存最终结果。

对于 STRING 类型的常量，则建立一个全局String变量再进行加载。

常量类型	**LLVM类型**	**位数**
INT	ConstantInt	32
CHAR	ConstantInt	8
BOOL	ConstantInt	1
REAL	ConstantFP	64
STRING	irBuilder.CreateGlobalString	×8

4.4 代码生成

4.4.1 数组/结构体元素代码生成

LLVM中所有的变量创建均返回指针。当用创建的数组/结构体类型创建变量时，llvm会建立一个含多个指针的变量。

每个指针的大小都是相同的，因此无需管结构体中不同变量的所需空间的大小，只需知道它是结构体/数组中的第几个元素，即可用 CreateGEP 函数得到相应的Value。

```
    llvm::Value *ast::RecordElementRef::codeGen() {
        llvm::Value* llvmRecordName = recordName->codeGen();
        llvm::Function *nowFunc = irBuilder.GetInsertBlock()->getParent();
        int index = sym::getRecordNo(recordName->name, field->name,
nowFunc->getName());
        std::vector<llvm::Value* >array;
        array.emplace_back(gen::getLLVMConstINT(0));
        array.emplace_back(gen::getLLVMConstINT(index));
        return irBuilder.CreateGEP(llvmRecordName, array,
"RecordElementRef");
    }
```

4.4.2 表达式生成

irBuilder 的函数接口会返回表达式结果的 Value，因此只需要递归的获取参数的 Value 指针，调用函数接口即可。如整数加法为：

```
llvm::Value* lval = leftOperand->codeGen();
llvm::Value* rval = rightOperand->codeGen();
irBuilder.CreateAdd(lval, rval, "iadd");
```

对于双目运算，当其中一个变量为实数类型时，会进行实数运算。由于 LLVM是强类型的，在进行运算前需要将整数类型转化为实数：

```
if (lval->getType()->isDoubleTy() || rval->getType()->isDoubleTy()) {
    if(lval->getType()->isIntegerTy())
        lval = irBuilder.CreateSIToFP(lval,
llvm::Type::getDoubleTy(llvmContext));
    if(rval->getType()->isIntegerTy())
        rval = irBuilder.CreateSIToFP(rval,
llvm::Type::getDoubleTy(llvmContext));

    switch (bOp) {
        case BinaryOperator::GEop:
            return irBuilder.CreateFCmpOGE(lval, rval, "fge");
        case ...
    }
}
```

4.4.3 Statement 语句生成

Statement 语句的代码生成主要为 BasicBlock 之间的跳转。

以 While语句为例，分为条件块和循环体块，以及结束 While循环之后的 continueBasicBlock。

1. LLVM 要求所有块最后一句均为跳转语句或结束语句，因此在进入条件块时先加入无条件跳转到条件块的语句。
2. 进入条件块生成条件中包含的语句，创建条件调整语句，满足条件是进入循环块，否则进入continueBlock。
3. 将代码生成移到循环快中进行循环体中语句的代码生成，无条件跳转至条件块
4. 将代码生成的插入点移到 continueBlock

```
llvm::Value* ast::WhileStmt::codeGen() {
    llvm::Function *llvmFunc = irBuilder.GetInsertBlock()->getParent();
    llvm::BasicBlock *beginBlock = llvm::BasicBlock::Create(llvmContext, "whileBegin", llvmFunc);
    llvm::BasicBlock *loopBlock = llvm::BasicBlock::Create(llvmContext, "WhileLoop", llvmFunc);
    llvm::BasicBlock *continueBlock = llvm::BasicBlock::Create(llvmContext, "WhileContinue", llvmFunc);

    irBuilder.CreateBr(beginBlock);
    irBuilder.SetInsertPoint(beginBlock);
    llvm::Value *llvmCond = cond->codeGen();
    irBuilder.CreateCondBr(llvmCond, loopBlock, continueBlock);
    irBuilder.SetInsertPoint(loopBlock);
    loopStmt->codeGen();
    irBuilder.CreateBr(beginBlock);
    irBuilder.SetInsertPoint(continueBlock);

    return nullptr;
}
```

其余语句与之相似。

对于函数调用语句，只需从函数栈中找到调用的函数，将参数传如即可，函数调用的返回值会通过函数接口返回。

```
llvm::Function *func = genEnv.getFuncEnv().getFunc(procName->name);
std::vector<llvm::Value*> llvmarg;
if(args)
    for (auto arg: *args)
        llvmarg.emplace_back(arg->codeGen());
return irBuilder.CreateCall(func, llvmarg);
```

4.4.4 函数定义代码生成

函数定义通过创建新的函数完成，需要提供函数的参数类型列表与返回值。

Pascal语言规定函数中函数名可以作为一个变量使用。函数名所表示的变量几位函数的返回值。因此，也需要将函数名加入变量栈中。

此外，需要将参数作为一个变量加入当前的变量栈中。并将传入的参数存储到参数变量中。

```
llvm::FunctionType *funcType = llvm::FunctionType::get(retype, parameterVector, false);
func = llvm::Function::Create(funcType, llvm::Function::ExternalLinkage, name->name,&llvmModule);
genEnv.getFuncEnv().setFunc(name->name, func);

for (auto para : *parameters) {
      llvm::Type *paraType = gen::getLLVMType(para->type);
      llvm::Value *val = irBuilder.CreateAlloca(paraType, nullptr, para->name->name);
      genEnv.getValueEnv().setValue(para->name->name, val);
}
auto arg_it = func->arg_begin();
for (auto para : *parameters) {
    arg_it->setName(para->name->name);
    irBuilder.CreateStore(arg_it, genEnv.getValueEnv().getValue(para->name->name));
    arg_it++;
}
```

4.4.5 系统函数生成

Pascal 提供了一些系统函数，程序中通过直接转化为代码/调用c语言中的函数实现。

- CHR/ORD 函数，由于 CHAR 和 INTEGER类型都是使用 int保存，可以使用提供的 `CreateIntCast` 函数改变 int 类型的位数实现。
- PRED / SUSS 函数，则将 CHAR 或 INTEGER 均视为 int 类型，进行加1或减1操作即可。
- SQR函数 则是调用乘法运算
- ODD函数，通过整数除法除以 2 之后与 1 进行比较。
- ABS 函数 和 SQRT 函数，WRITE / WRITELN 函数，READ 函数则通过调用 c语言中的函数实现。

```
void GenFuncEnv::setWRITE() {
    std::vector<llvm::Type *> argType = {llvm::Type::getInt8PtrTy(llvmContext)};
    llvm::FunctionType *funcType = llvm::FunctionType::get(llvm::Type::getInt32Ty(llvmContext), argType, true);
    llvm::Function *func = llvm::Function::Create(funcType, llvm::Function::ExternalLinkage, "printf", &llvmModule);
    func->setCallingConv(llvm::CallingConv::C);
    (funcStack.back())["WRITE"] = func;
}
```

其中对 WRITE / WRITELN 函数，READ 函数，会先对传入参数进行分析，在参数前加入格式化字符串。如

```
if(readElement->nodeType == "Name") {
    llvm::Function *nowFunc = irBuilder.GetInsertBlock()->getParent();
    string type = sym::getIDType(((Name*)readElement)->name, nowFunc->getName());
    if(type == "Integer") printString+="%d";
    else if (type == "Char")printString+="%c";
    else if (type == "Real")printString+="%lf";
    else if (type == "String")printString+="%s";
    else if (type == "Boolean")printString+="%d";

argVector.emplace_back(genEnv.getValueEnv().getValue(((Name*)readElement)->name));
}
```

4.5 测试

文件名	测试用途
arrayRecordTest.pas	测试ARRAY和RECORD
arraytest.pas	测试ARRAY
comment.pas	测试comment
comment_error.pas	测试comment_error
exprTest.pas	测试EXPRESSTION
optimizeTest.pas	测试优化
procTest.pas	测试PROCEDURE, FUNCTION
readWriteTest.pas	测试READ, WRITE等函数
stmtTest.pas	测试各种statement, 如if, for, while, goto, case
typeTest.pas	测试type定义
fibonacci.pas	测试fibonacci数列计算
error_handling.pas	测试error handling

4.5.1 函数定义与调用测试

同时测试了有函数与过程，参数传递，全局变量读取等方面：/test/procTest.pas

```
PROGRAM procTest;
{routine head}

{var part}
VAR
    k : INTEGER;
{routine part}
FUNCTION inner1(a , b : INTEGER) : INTEGER;
BEGIN
    WRITELN('IN inner1: (a,b)');
    inner1 := a + b;
    WRITELN('return (a+b)');
END;

PROCEDURE inner2(aa : INTEGER; b :INTEGER);
BEGIN
    WRITELN('IN inner2: (a,b)');
    WRITELN('a = call inner1: (a,b)');
    aa := inner1(aa , b);
    k := k + 5;
    WRITE('a: shoule be a+b = k+2');
    WRITELN(aa);
    WRITELN('global k:');
    WRITE('k+5: shoule be k+5');
    WRITE(k);
END;
PROCEDURE outer;
{subroutine var part}
VAR
    added : INTEGER;
{subroutine routine part}
BEGIN
    WRITELN('IN outer: define added = 1; read k');
    added := 1;
    READ(k);
    WRITELN('call inner2: (k+1, added)');
    inner2(k+1 , added);
END;

{routine body}
BEGIN
    WRITELN('main: define k;');
    WRITELN('call outer');
    outer;
END.
```

```
~/desktop/Co/group5/exec/MacOS ./out
main: define k;
call outer
IN outer: define added = 1; read k
233
call inner2: (k+1, added)
IN inner2: (a,b)
a = call inner1: (a,b)
IN inner1: (a,b)
return (a+b)
a: shoule be a+b = k+2 235
global k:
k+5: shoule be k+5 238
```

4.5.2 控制语句测试

生成llvm中间代码可以看到控制语句有不同 BasicBlock 组成：/test/stmtTest.pas

```
PROGRAM stmtTest;
VAR
    a, b, c, d : INTEGER;

BEGIN
    READ(a);
    b := 1;
    c := 0;
    1: IF a = 1 THEN BEGIN
        FOR d:= 1 TO 10 DO BEGIN
            c := c + 1;
        END;
    END
    ELSE
    BEGIN
        d := 0;
    END;
    WRITELN(d);

    CASE b + 1 OF
        0: c := 1;
        1: c := 2;
        2: c := 3;
        3: c := 4;
    END;

    WRITELN(c);
END.
```

```
define void @main() {
STMTTEST:
  %0 = load i32, i32* @0
  %read = call i32 (i8*, ...) @scanf(i8* getelementptr inbounds ([3 x
i8], [3 x i8]* @scanfstring, i32 0, i32 0), i32* @0)
```

```
  store i32 1, i32* @1
  store i32 0, i32* @2
  br label %"1"

"1":                                              ; preds = %STMTTEST
  %1 = load i32, i32* @0
  %ieq = icmp eq i32 %1, 1
  br i1 %ieq, label %ifThen, label %ifElse

ifThen:                                           ; preds = %"1"
  store i32 1, i32* @3
  br label %ForLoop

ifElse:                                           ; preds = %"1"
  store i32 0, i32* @3
  br label %ifContinue

ifContinue:                                       ; preds = %ifElse,
%ForContinue
  %2 = load i32, i32* @3
  %write = call i32 (i8*, ...) @printf(i8* getelementptr inbounds ([5 x
i8], [5 x i8]* @printstring, i32 0, i32 0), i32 %2)
  %3 = load i32, i32* @1
  %iadd1 = add i32 %3, 1
  br label %Casecond

ForLoop:                                          ; preds = %ForLoop,
%ifThen
  %4 = load i32, i32* @2
  %iadd = add i32 %4, 1
  store i32 %iadd, i32* @2
  %5 = load i32, i32* @3
  %6 = add i32 %5, 1
  store i32 %6, i32* @3
  %7 = load i32, i32* @3
  %8 = icmp eq i32 %7, 10
  br i1 %8, label %ForContinue, label %ForLoop

ForContinue:                                      ; preds = %ForLoop
  br label %ifContinue

Casecond:                                         ; preds = %ifContinue
  %9 = icmp eq i32 %iadd1, 0
  br i1 %9, label %Casecase, label %Casecond2

Casecase:                                         ; preds = %Casecond
  store i32 1, i32* @2
  br label %CaseContinue

Casecond2:                                        ; preds = %Casecond
  %10 = icmp eq i32 %iadd1, 1
  br i1 %10, label %Casecase3, label %Casecond4
```

```
...

CaseContinue:                                     ; preds = %Casecase7, %Casecond6, %Casecase5, %Casecase3, %Casecase
  %13 = load i32, i32* @2
  %write8 = call i32 (i8*, ...) @printf(i8* getelementptr inbounds ([5 x i8], [5 x i8]* @printstring.1, i32 0, i32 0), i32 %13)
  ret void
}
```

4.5.3 数组/结构体/类型别名测试

/test/arrayRecordTest.pas

```
PROGRAM arrayRecordTest;
CONST
    b = 10;
    c = 2.2;
TYPE
    test = INTEGER;
    rtype = RECORD
        a : INTEGER;
        b,c : REAL;
    END;

VAR
    f : test;
    i : INTEGER;
    j : ARRAY [0..3] OF INTEGER;
    k : rtype;

BEGIN
    FOR i:= 0 TO 2 DO BEGIN
        j[i] := i * i;
    END;
    f := b;
    WRITELN(f);
    WRITELN(j[1]);
    WRITELN(j[2]);
    k.a := j[0] + j[1] * j[2];
    k.b := 1.3;
    WRITELN(k.a);
    WRITELN(k.b);
END.
```

```
; ModuleID = 'Module'
source_filename = "Module"

@0 = internal global i32 zeroinitializer
@1 = internal global i32 zeroinitializer
```

```
@2 = internal global [4 x i32] zeroinitializer
@3 = internal global { i32, double, double } zeroinitializer
@printstring = private unnamed_addr constant [5 x i8] c"%d \0A\00"
@printstring.1 = private unnamed_addr constant [5 x i8] c"%d \0A\00"
@printstring.2 = private unnamed_addr constant [5 x i8] c"%d \0A\00"
@printstring.3 = private unnamed_addr constant [5 x i8] c"%d \0A\00"
@printstring.4 = private unnamed_addr constant [6 x i8] c"%lf \0A\00"

declare i32 @printf(i8*, ...)

define void @main() {
ARRAYRECORDTEST:
  store i32 0, i32* @1
  br label %ForLoop

ForLoop:                                          ; preds = %ForLoop, %ARRAYRECORDTEST
  %0 = load i32, i32* @1
  %1 = sub i32 %0, 0
  %arrayElementRef = getelementptr [4 x i32], [4 x i32]* @2, i32 0, i32 %1
  %2 = load i32, i32* @1
  %3 = load i32, i32* @1
  %imul = mul i32 %2, %3
  store i32 %imul, i32* %arrayElementRef
  %4 = load i32, i32* @1
  %5 = add i32 %4, 1
  store i32 %5, i32* @1
  %6 = load i32, i32* @1
  %7 = icmp eq i32 %6, 2
  br i1 %7, label %ForContinue, label %ForLoop

ForContinue:                                      ; preds = %ForLoop
  store i32 10, i32* @0
  %8 = load i32, i32* @0
  %write = call i32 (i8*, ...) @printf(i8* getelementptr inbounds ([5 x i8], [5 x i8]* @printstring, i32 0, i32 0), i32 %8)
  %array = load i32, i32* getelementptr inbounds ([4 x i32], [4 x i32]* @2, i32 0, i32 1)
  %write1 = call i32 (i8*, ...) @printf(i8* getelementptr inbounds ([5 x i8], [5 x i8]* @printstring.1, i32 0, i32 0), i32 %array)
  %array2 = load i32, i32* getelementptr inbounds ([4 x i32], [4 x i32]* @2, i32 0, i32 2)
  %write3 = call i32 (i8*, ...) @printf(i8* getelementptr inbounds ([5 x i8], [5 x i8]* @printstring.2, i32 0, i32 0), i32 %array2)
  %load = load i32, i32* getelementptr inbounds ([4 x i32], [4 x i32]* @2, i32 0, i32 1)
  %load4 = load i32, i32* getelementptr inbounds ([4 x i32], [4 x i32]* @2, i32 0, i32 2)
  %imul5 = mul i32 %load, %load4
  %load6 = load i32, i32* getelementptr inbounds ([4 x i32], [4 x i32]* @2, i32 0, i32 0)
```

```
  %iadd = add i32 %load6, %imul5
  store i32 %iadd, i32* getelementptr inbounds ({ i32, double, double }, { i32, double, double }* @3, i32 0, i32 0)
  store double 1.300000e+00, double* getelementptr inbounds ({ i32, double, double }, { i32, double, double }* @3, i32 0, i32 1)
  %record = load i32, i32* getelementptr inbounds ({ i32, double, double }, { i32, double, double }* @3, i32 0, i32 0)
  %write7 = call i32 (i8*, ...) @printf(i8* getelementptr inbounds ([5 x i8], [5 x i8]* @printstring.3, i32 0, i32 0), i32 %record)
  %record8 = load double, double* getelementptr inbounds ({ i32, double, double }, { i32, double, double }* @3, i32 0, i32 1)
  %write9 = call i32 (i8*, ...) @printf(i8* getelementptr inbounds ([6 x i8], [6 x i8]* @printstring.4, i32 0, i32 0), double %record8)
  ret void
}
```

4.5.4 系统函数测试

测试了系统函数的功能：/test/sysFuncTest.pas

```
~/desktop/Co/group5/exec/MacOS ./out
Test sys Function
Read b: CHAR, a: REAL, c: INTEGER
c
b: c
-12.2
a: -12.200000
2
c: 2
abs(a):  12.200000
sqr(a):  148.840000
ord(b):  99
chr(ord(b)):  c
pred(b):  b
succ(b):  d
odd(c):  0
```

4.5.4 fibonacci测试

```
PROGRAM FIB;
VAR
    MESSAGE: STRING;
    a : INTEGER;

FUNCTION F(n : INTEGER): INTEGER;
BEGIN
    IF n <= 1 THEN
    BEGIN
        F := 1;
    END
    ELSE IF n = 1 THEN
    BEGIN
```

```
14          F := 1;
15      END
16      ELSE BEGIN
17          F := F(n - 1) + F(n - 2);
18      END;
19  END;
20  BEGIN
21      WRITELN('---Calculate Fibonacci ---');
22      WRITELN('Please give a number: ');
23      READ(a);
24      WRITE('Result:');
25      WRITELN(F(a));
26  END.
```

```
~/desktop/Co/group5/exec/MacOS ./out
---Calculate Fibonacci ---
Please give a number:
4
Result: 5
```

五、 优化处理

5.1 常量叠加优化

llvm 中若需要产生两个常量之间操作的中间代码，会自行进行优化，因此无需手动进行常量叠加的优化。

5.2 冗余代码优化

程序对 `if` 语句和 `case` 语句进行了冗余代码的优化。

对 `if` 语句，当判断条件为 llvm::Constant 类型时，判断它为 1 则编译 `then` 部分，为 0 则编译 `else` 部分。

对 `case` 语句，若判断条件为常量，则依次判断每个case，对常量的case，不等时不编译，遇到相等的case则只编译该 case，后面的 case 均不编译。若遇到不为常量的case，则对该case和后续case都进行编译。

5.3 效果展示

/test/optimizeTest.pas

```
1  PROGRAM stmtTest;
```

```
CONST
    a = 1;
    b = 1;
VAR
    c: INTEGER;
BEGIN

    IF a = 1 THEN BEGIN
        WRITELN('a=1');
    END
    ELSE BEGIN
        WRITELN('a!=1');
    END;
    CASE b + 1 OF
        0: c := 1+2;
        1: c := 2+3;
        2: c := 3+4;
    END;
    WRITELN(c);
END.
```

```
; ModuleID = 'Module'
source_filename = "Module"

@0 = internal global i32 zeroinitializer
@1 = private unnamed_addr constant [6 x i8] c"'a=1'\00"
@printstring = private unnamed_addr constant [5 x i8] c"%s \0A\00"
@printstring.1 = private unnamed_addr constant [5 x i8] c"%d \0A\00"

declare i32 @printf(i8*, ...)

declare i32 @scanf(i8*, ...)

define void @main() {
STMTTEST:
  %write = call i32 (i8*, ...) @printf(i8* getelementptr inbounds ([5 x i8], [5 x i8]* @printstring, i32 0, i32 0), [6 x i8]* @1)
  store i32 7, i32* @0
  %0 = load i32, i32* @0
  %write1 = call i32 (i8*, ...) @printf(i8* getelementptr inbounds ([5 x i8], [5 x i8]* @printstring.1, i32 0, i32 0), i32 %0)
  ret void
}
```

六、构建与运行

6.1 构建工程

工程使用cmake进行构建，在工程目录下

```
mkdir ./build
cd ./build
cmake ..
make
```

`./build/src` 目录下的 Pascal_Compiler 即为目标编译器的可执行文件

6.2 编译器运行

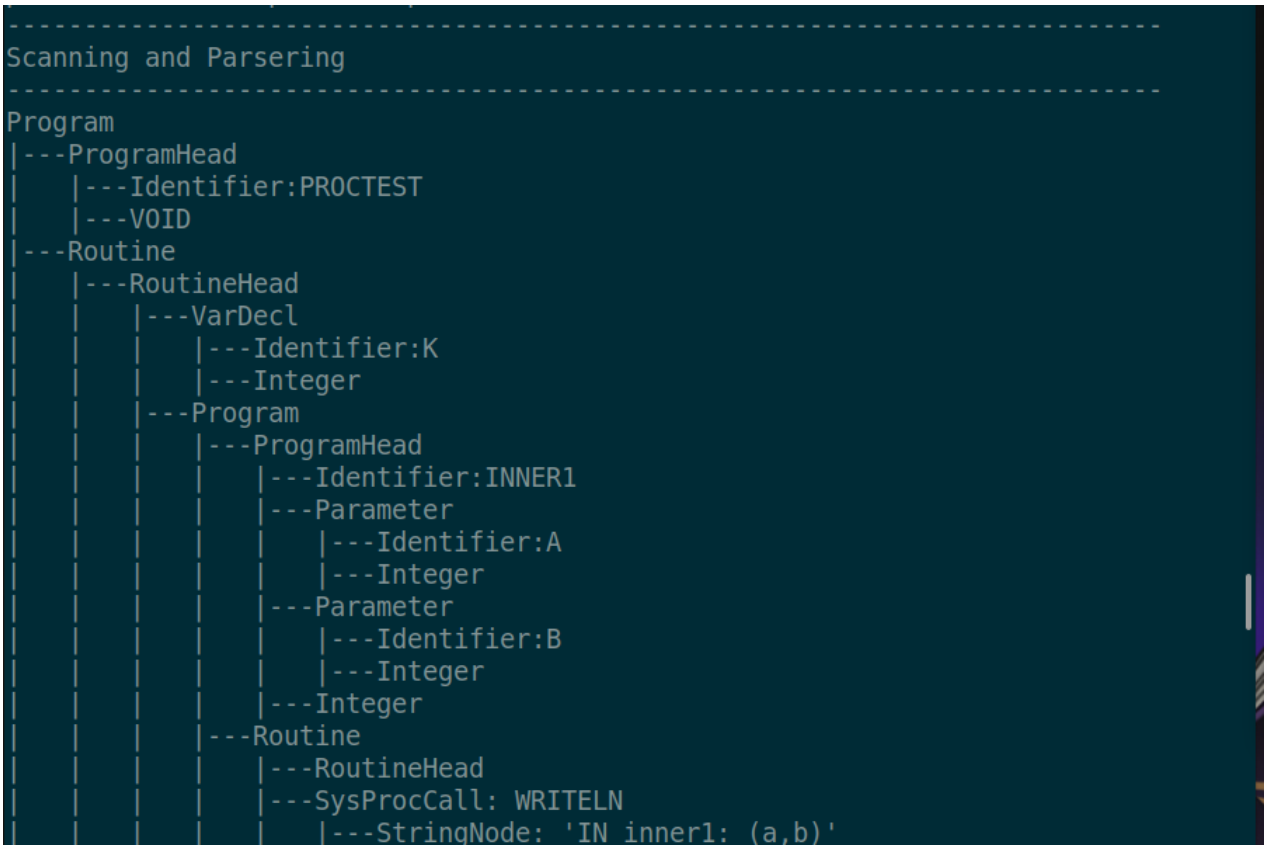
运行 Pascal_Compiler 即可看到使用说明。编译器支持输出 `.ll` 的 llvm 中间代码文件，`.s` 汇编代码文件， `.o` 的 obj文件 以及可执行文件 (默认)。

```
Pascal_Compiler [-l/-s/-c] [-o outfile] sourefile
    [-l/-s/-c] : file type
        -l : llvm IR code
        -s : assembly language
        -c : native object file
    [-o outfile] : Rename output file
```

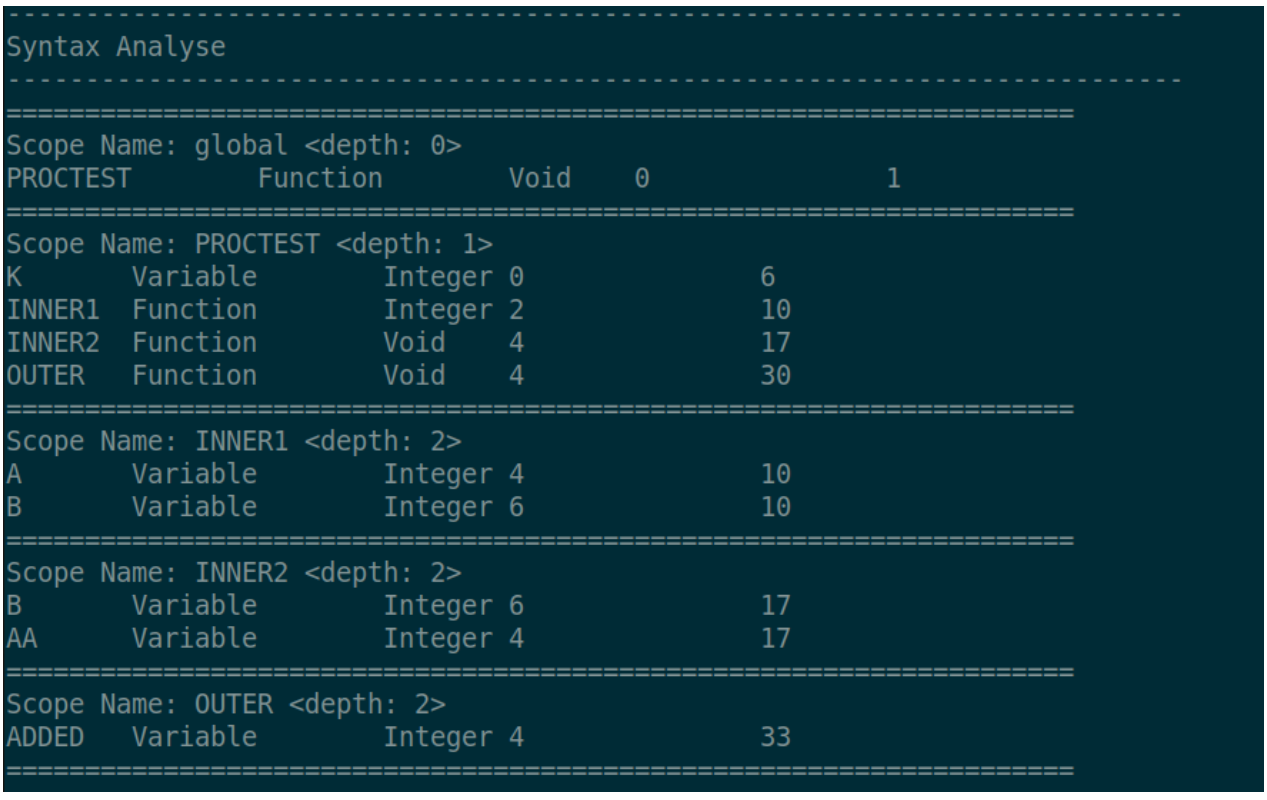
6.2.1 生成树 & 符号表显示

程序编译过程中会输出生成树与符号表。

生成树：



符号表:



6.2.2 生成 llvm 中间代码

在编译中加入 `-l` 参数即可生成 llvm 中间代码

```
define void @main() {
PROCTEST:
  %write = call i32 (i8*, ...) @printf(i8* getelementptr inbounds ([5 x i8], [5 x i8]* @printstring.11, i
  %write1 = call i32 (i8*, ...) @printf(i8* getelementptr inbounds ([5 x i8], [5 x i8]* @printstring.12, 
  call void @OUTER()
  ret void
}

define i32 @INNER1(i32 %A2, i32 %B3) {
INNER1:
  %INNER11 = alloca i32
  %A = alloca i32
  %B = alloca i32
  store i32 %A2, i32* %A
  store i32 %B3, i32* %B
  %write = call i32 (i8*, ...) @printf(i8* getelementptr inbounds ([5 x i8], [5 x i8]* @printstring, i32 
  %0 = load i32, i32* %A
  %1 = load i32, i32* %B
  %iadd = add i32 %0, %1
  store i32 %iadd, i32* %INNER11
  %write4 = call i32 (i8*, ...) @printf(i8* getelementptr inbounds ([5 x i8], [5 x i8]* @printstring.1, i
  %2 = load i32, i32* %INNER11
  ret i32 %2
}

define void @INNER2(i32 %AA1, i32 %B2) {
INNER2:
  %AA = alloca i32
  %B = alloca i32
  store i32 %AA1, i32* %AA
```

6.2.3 生成汇编代码

在编译中加入 -s 参数即可生成汇编代码

```
        .text
        .file   "Module"
        .globl  main                    # -- Begin function main
        .p2align        4, 0x90
        .type   main,@function
main:                                   # @main
        .cfi_startproc
# %bb.0:                                # %PROCTEST
        pushq   %rax
        .cfi_def_cfa_offset 16
        leaq    .Lprintstring.11(%rip), %rdi
        leaq    .L__unnamed_1(%rip), %rsi
        xorl    %eax, %eax
        callq   printf@PLT
        leaq    .Lprintstring.12(%rip), %rdi
        leaq    .L__unnamed_2(%rip), %rsi
        xorl    %eax, %eax
        callq   printf@PLT
        callq   OUTER@PLT
        popq    %rax
        retq
.Lfunc_end0:
        .size   main, .Lfunc_end0-main
        .cfi_endproc
                                        # -- End function
        .globl  INNER1                  # -- Begin function INNER1
        .p2align        4, 0x90
```

6.2.4 生成可执行文件

默认参数会生成可执行文件，直接运行。

```
~/desktop/Co/group5/exec/MacOS ./out
Test sys Function
Read b: CHAR, a: REAL, c: INTEGER
c
b: c
-12.2
a: -12.200000
2
c: 2
abs(a):  12.200000
sqr(a):  148.840000
ord(b):  99
chr(ord(b)):  c
pred(b):  b
succ(b):  d
odd(c):  0
```