中山大學 SUN YAT-SEN UNIVERSITY

计算机学院 COMPUTER SCIENCE AND ENGINEERING

国家超级计算广州中心 NATIONAL SUPERCOMPUTER CENTER IN GUANGZHOU

DCS292：编译器构造实验(Compiler Construction)

Task3：中间代码生成

Yat Compiler Construction with AI

yatcc-ai.com

YatCC团队

中山大学 计算机学院

国家超级计算广州中心

2026.4.19

OUTLINE

目　录

中山大学计算机学院

School of Computer Science & Engineering

- Task1 ➔ Task3 实验概述

clang -cc1 -dump-tokens

复活机制

clang -cc1 -ast-dump=json

复活机制

```
const int a = 10;
int b = 5;

int main() {
    if(b < a)
        return 1;
    return 0;
}
```

源代码

Task1

```
const 'const'     [StartOfLine]  Loc=</YatCC/test/di
int 'int'     [LeadingSpace] Loc=</YatCC/test/diy-ca
identifier 'a'    [LeadingSpace] Loc=</YatCC/test/di
equal '='     [LeadingSpace] Loc=</YatCC/test/diy-ca
numeric_constant '10'     [LeadingSpace] Loc=</YatCC
semi ';'          Loc=</YatCC/test/diy-cases/diy-case
int 'int'     [StartOfLine]  Loc=</YatCC/test/diy-ca
identifier 'b'    [LeadingSpace] Loc=</YatCC/test/di
equal '='     [LeadingSpace] Loc=</YatCC/test/diy-ca
numeric_constant '5'      [LeadingSpace] Loc=</YatCC
semi ';'          Loc=</YatCC/test/diy-cases/diy-case
int 'int'     [StartOfLine]  Loc=</YatCC/test/diy-ca
```

Token 流

Task2

```
{
  "id": "0x55838f2ec680",
  "kind": "VarDecl",
  "loc": {
    "offset": 10,
    "file": "/YatCC/test/diy-case
    "line": 1,
    "col": 11,
    "tokLen": 1
  },
  "range": {
    "begin": {
      "offset": 0,
      "col": 1,
      "tokLen": 5
```

JSON 格式的抽象语法树

INCOMPLETE

Task3 流程：JSON AST ➔ ASG ➔ LLVM IR

(亲自做过 Task2 的同学应该很熟悉了)

Json2Asg.hpp/cpp
class Json2Asg;

ASG

EmitIR.hpp/cpp
class EmitIR;

助教

同学们仅需编写此处代码，足够完成 Task3

```
@a = dso_local constant i32 10, align 4
@b = dso_local global i32 5, align 4

; Function Attrs: noinline nounwind optnone uwtable
define dso_local i32 @main() #0 {
entry:
  %retval = alloca i32, align 4
  store i32 0, ptr %retval, align 4
  %0 = load i32, ptr @b, align 4
  %cmp = icmp slt i32 %0, 10
  br i1 %cmp, label %if.then, label %if.end
```

LLVM IR

OUTLINE

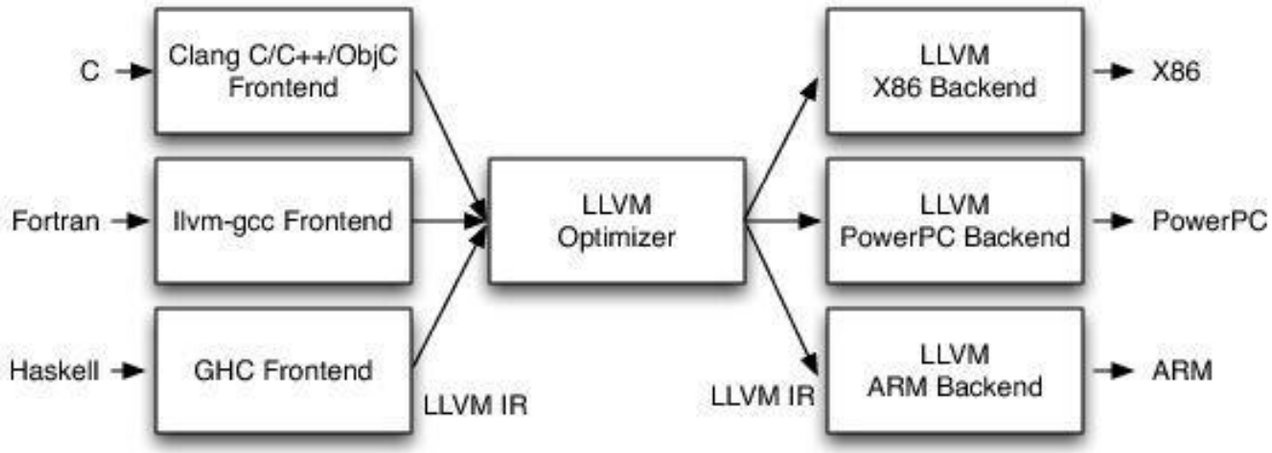
目　录

中山大学计算机学院
School of Computer Science & Engineering

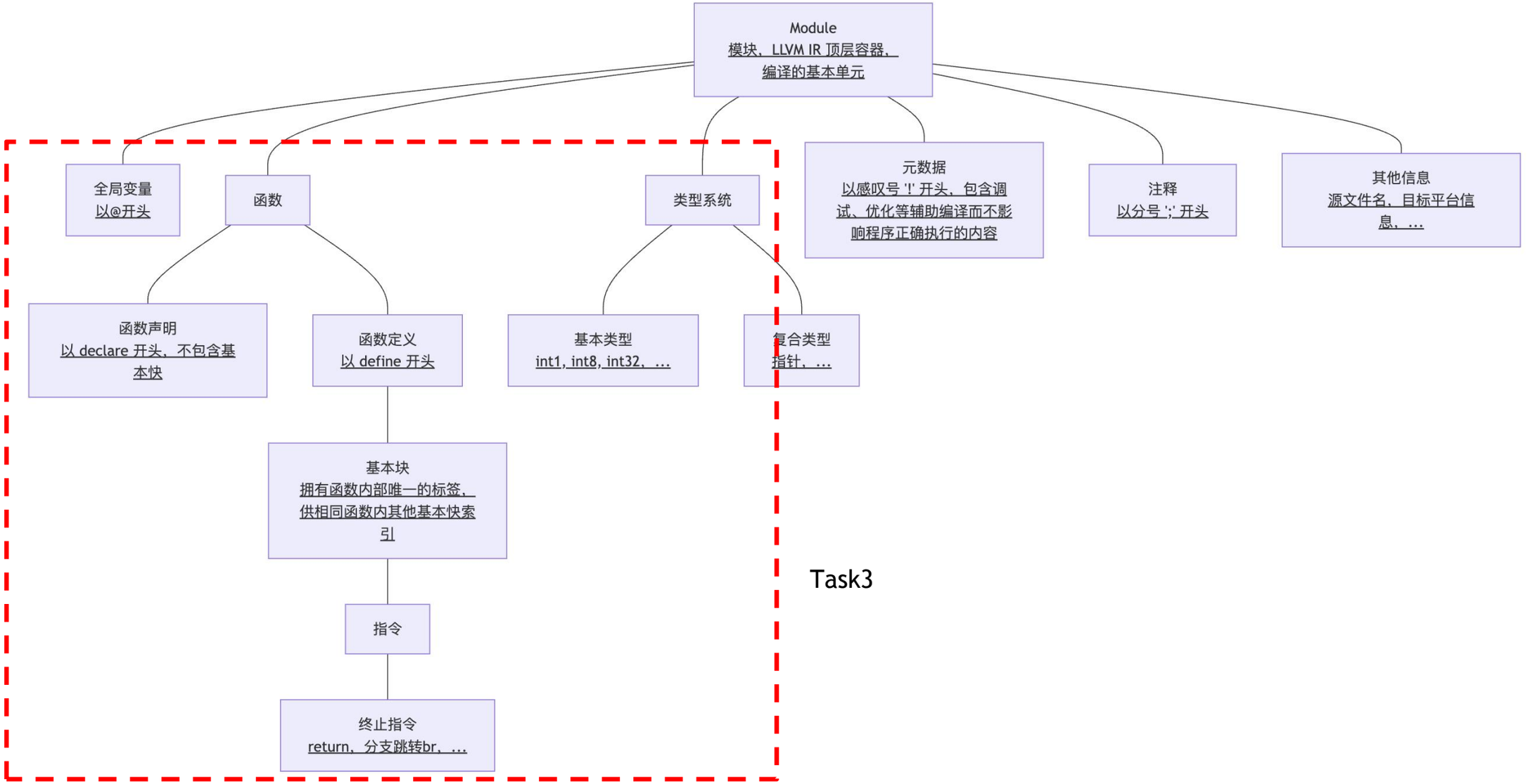
- LLVM IR（LLVM Intermediate Representation）是什么？
  - 三种表现形式
    - 处于内存中（In-Memory）的编译内部中间表示
    - 位于磁盘中的位码/二进制表示，文件后缀为 .bc（Bitcode）：clang -emit-llvm
    - 人类可读的汇编语言表示，文件后缀为 .ll （Task3）：clang -emit-llvm -S
- 为什么需要 LLVM IR？假设有 M 种编程语言，N 种目标平台
  - 不统一中间表示
    - 分别单独实现 M * N 个编译器，很多重复性工作
  - 统一中间表示
    - 只需实现 M 个前端 和 N 个后端
    - 中端优化器可以复用
    - Rust 基于LLVM：Rust Code ➔ LLVM IR ➔ LLVM Optimizer ➔ LLVM Backend

.ll：rustc -emit-llvm

.bc：rustc -emit-llvm-bc



- LLVM IR 结构简介


Module
模块，LLVM IR 顶层容器，
编译的基本单元
全局变量
以@开头
函数
类型系统
元数据
以感叹号 '!' 开头，包含调
试、优化等辅助编译而不影
响程序正确执行的内容
注释
以分号 ';' 开头
其他信息
源文件名，目标平台信
息，...
函数声明
以 declare 开头，不包含基
本快
函数定义
以 define 开头
基本类型
int1, int8, int32，...
复合类型
指针，...
基本块
拥有函数内部唯一的标签，
供相同函数内其他基本快索
引
指令
终止指令
return，分支跳转br，...
Task3

- 源文件名/模块名
- 数据布局：
  - 大小端、对齐方式等
- 目标平台三元祖

- LLVM IR 示例

```
const int a = 10;
int b = 5;

int main() {
    if(b < a)
        return 1;
    return 0;
}
```

源代码

clang -emit-llvm -S

```
; ModuleID = '/YatCC/test/diy-cases/diy-case1.sysu.c'
source_filename = "/YatCC/test/diy-cases/diy-case1.sysu.c"
target datalayout = "e-m:e-p270:32:32-p271:32:32-p272:64:64-i64:64-i128:128-f8
target triple = "x86_64-unknown-linux-gnu"

@a = dso_local constant i32 10, align 4
@b = dso_local global i32 5, align 4

; Function Attrs: noinline nounwind optnone uwtable
define dso_local i32 @main() #0 {
entry:
  %retval = alloca i32, align 4
  store i32 0, ptr %retval, align 4
  %0 = load i32, ptr @b, align 4
  %cmp = icmp slt i32 %0, 10
  br i1 %cmp, label %if.then, label %if.end

if.then:                                          ; preds = %entry
  store i32 1, ptr %retval, align 4
  br label %return

if.end:                                           ; preds = %entry
  store i32 0, ptr %retval, align 4
  br label %return

return:                                           ; preds = %if.end, %if.then
  %1 = load i32, ptr %retval, align 4
  ret i32 %1
}

attributes #0 = { noinline nounwind optnone uwtable "frame-pointer"="all" "min-

!llvm.module.flags = !{!0, !1, !2, !3, !4}
!llvm.ident = !{!5}

!0 = !{i32 1, !"wchar_size", i32 4}
!1 = !{i32 8, !"PIC Level", i32 2}
!2 = !{i32 7, !"PIE Level", i32 2}
!3 = !{i32 7, !"uwtable", i32 2}
!4 = !{i32 7, !"frame-pointer", i32 2}
!5 = !{!"clang version 18.1.8 (https://github.com/arcsysu/YatCC.git bd2a794f50
```

全局变量定义与初始化

类型

函数定义

指令

基本块
- entry为标签
- 函数入口基本块

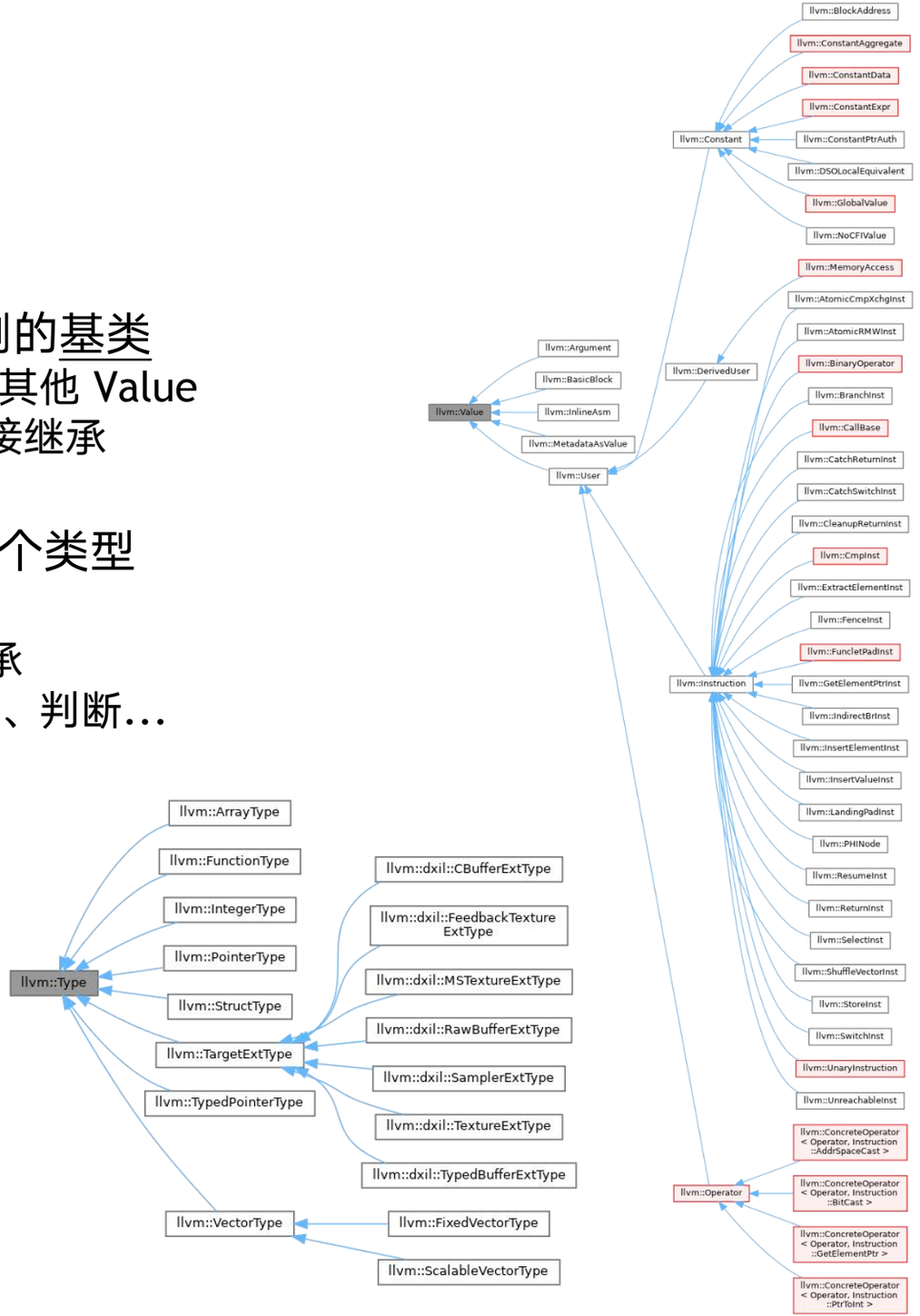
终结指令：跳转

注释

终结指令：返回

元数据

- LLVM IR C++ API 核心类
  - llvm::Value
    - LLVM IR 中一切“能被当作值使用”的实例的基类
      - 可以被程序拿来做计算，作为操作数产生其他 Value
      - 指令、函数、常量、基本块...都直接/间接继承
  - llvm::Type
    - LLVM IR 是强类型的，每一个 Value 都有一个类型
    - 所以类型的基类
      - 数组、函数、指针类型...都直接/间接继承
      - 提供了丰富的接口来进行类型操作：创建、判断...



- LLVM IR C++ API 核心类
  - llvm::LLVMContext
    - 拥有和管理许多核心 LLVM 数据结构，例如类型和常量值表
    - 不需要详细了解，只需将一个该类型的实例传递给需要它的 API 即可
  - llvm::Module
    - 所有其他 LLVM IR 对象的顶层容器
    - 包含了全局变量、函数、该模块所依赖的库/其他模块、符号表和有关目标平台的各种数据
    - Task3 生成的所有 LLVM IR 都会储存在这里
  - llvm::IRBuilder
    - 顾名思义，提供了统一的 API 来创建和插入 IR 指令到基本块中
    - 可以设置/修改 IR 插入点

- 更多 LLVM IR 的介绍，可以查阅
  - 【权威、最新】官方文档
    - 文档首页 -- About LLVM
      - 【中文】关于 LLVM
    - LLVM Lanaguage Reference Manual
      - 【中文】LLVM 语言参考手册
    - LLVM Programmers Manual
      - 【中文】LLVM 程序员手册
    - LLVM Doxygen 文档
      - 查阅 LLVM 的实现，寻找 API 参考
  - YatCC 文档
    - Task3 -- 生成 LLVM IR
    - 对于 Task3 可能已经足够
    - **以 LLVM 官方文档为准**，如果 YatCC 文档有误，请联系我们或贡献你的智慧！
  - **AI 大模型，快捷、易懂**

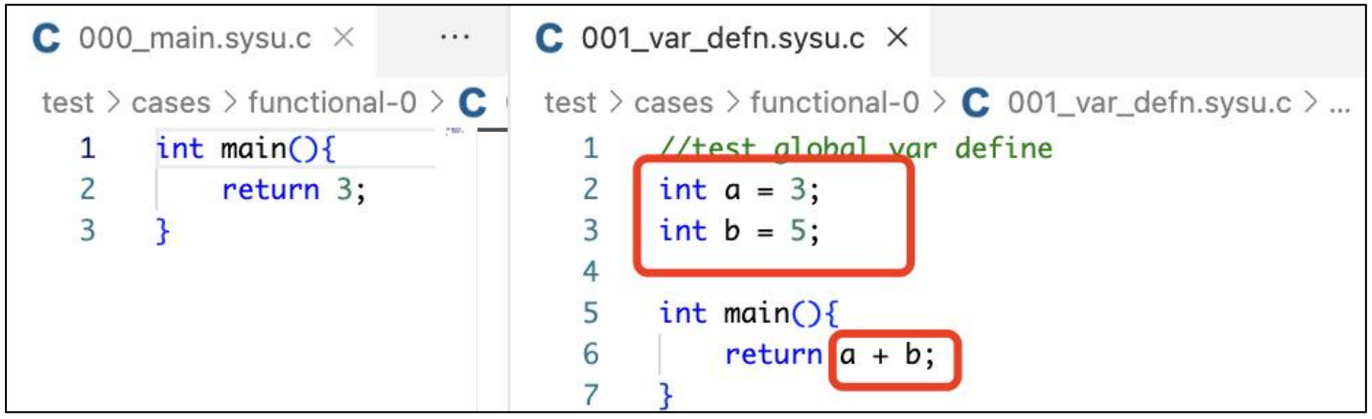
OUTLINE

目　录

中山大学计算机学院

School of Computer Science & Engineering

- 工欲善其事，必先利其器，Task3 会频繁查阅 LLVM IR C++ API
  - 借助文档
  - VSCode 扩展提供的代码补全、错误提示、跳转等代码开发服务
  - AI 大模型，Task3 系统提示词参考
  - ……
- Task3 示例代码能够通过第一个测例 000_main
  - 以第二个测例 001_var_defn 为例，介绍如何进行 Task3
  - 观察源代码
    - 发现多了全局变量的声明以及对于变量的使用



- 体现在 AST 中
  - 观察 Task2 对应测例的 answer 输出
    - 变量声明 VarDecl：int a = 3，int b = 5
    - 二元表达式 BinaryOperator，加法 +：a+b
    - 声明引用表达式 DeclRefExpr： a + b 表达式中的 a 和 b
    - 隐式类型转换 ImplicitCastExpr： 在加法运算前将左值转换为右值
- 多出来对四个节点的处理
  - 在 EmitIR.hpp 中添加函数声明（如果没有的话）
  - 在 EmitIR.cpp 中添加函数定义和补充函数定义

```
struct VarDecl : Decl
{
  Expr* init{ nullptr };

private:
  void __mark__(Mark mark) override;
};
```

```
struct DeclRefExpr : Expr
{
  Decl* decl{ nullptr };

private:
  void __mark__(Mark mark) override;
};
```

```
struct BinaryExpr : Expr
{
  enum Op
  {
    kINVALID,
    kMul,
    kDiv,
    kMod,
    kAdd,
    kSub,
    kGt,
    kLt,
    kGe,
    kLe,
    kEq,
    kNe,
    kAnd,
    kOr,
    kAssign,
    kComma,
    kIndex,
  };

  Op op{ kINVALID };
  Expr *lft{ nullptr }, *rht{ nullptr };
```

```
struct ImplicitCastExpr : Expr
{
  enum
  {
    kINVALID,
    kLValueToRValue,
    kIntegralCast,
    kArrayToPointerDecay,
    kFunctionToPointerDecay,
    kNoOp,
  } kind{ kINVALID };
  Expr* sub{ nullptr };
```

answer.txt

build > test > task2 > functional-0 > 000_main.sysu.c > answer.txt

```
16  `-FunctionDecl 0x5555556b9628 </workspaces/YatCC/test/cases/fur
17    `-CompoundStmt 0x5555556b9748 <col:11, line:3:1>
18      `-ReturnStmt 0x5555556b9738 <line:2:5, col:12>
19        `-IntegerLiteral 0x5555556b9718 <col:12> 'int' 3
20
```

answer.txt

build > test > task2 > functional-0 > 001_var_defn.sysu.c > answer.txt

```
16  |-VarDecl 0x5555556b9440 </workspaces/YatCC/test/cases/functional-0/001_var_defn.sysu.c:2:
17  | `-IntegerLiteral 0x5555556b94f0 <col:9> 'int' 3
18  |-VarDecl 0x5555556b9528 <line:3:1, col:9> col:5 used b 'int' cinit
19  | `-IntegerLiteral 0x5555556b9590 <col:9> 'int' 5
20  `-FunctionDecl 0x5555556b9608 <line:5:1, line:7:1> line:5:5 main 'int ()'
21    `-CompoundStmt 0x5555556b9750 <col:11, line:7:1>
22      `-ReturnStmt 0x5555556b9740 <line:6:5, col:16>
23        `-BinaryOperator 0x5555556b9720 <col:12, col:16> 'int' '+'
24          |-ImplicitCastExpr 0x5555556b96f0 <col:12> 'int' <LValueToRValue>
25          | `-DeclRefExpr 0x5555556b96b0 <col:12> 'int' lvalue Var 0x5555556b9440 'a' 'int'
26          `-ImplicitCastExpr 0x5555556b9708 <col:16> 'int' <LValueToRValue>
27            `-DeclRefExpr 0x5555556b96d0 <col:16> 'int' lvalue Var 0x5555556b9528 'b' 'int'
28
```

- EmitIR.hpp：在头文件中，重载 operator( ) 函数，添加对新节点的处理

```
//====================================================================================
// 表达式
//====================================================================================
llvm::Value* operator()(asg::BinaryExpr* obj);
llvm::Value* operator()(asg::DeclRefExpr* obj);
llvm::Value* operator()(asg::ImplicitCastExpr* obj);
```

```
//====================================================================================
// 声明
//====================================================================================
void operator()(asg::VarDecl* obj);
```

- 首先实现对 VarDecl 节点的处理，此时是全局变量声明
  - 翻阅文档
  - 全局变量在声明时就要初始化，a 和 b 初始值均为整数字面量，可采用第一种方法

001_var_defn.sysu.c

test > cases > functional-0 > 001_var_def

```
1   //test global var define
2   int a = 3;
3   int b = 5;
4
```

```
#include <llvm/IR/GlobalVariable.h>

/// M:            llvm::Module实例，包含所有 LLVM IR 的顶层容器
///               全局变量创建完成后将会自动插入 M 的符号表中
/// Ty:           全局变量的类型
/// isConstant:   是否是常量
/// Linkage:      全局变量的链接类型，如是否被外部函数可见
/// Initializer:  初始值
/// Name:         全局变量的名字
/// 其他参数在本次实验中可以不用关注
GlobalVariable(Module &M, Type *Ty,
               bool isConstant, LinkageTypes Linkage,
               Constant *Initializer, const Twine &Name="",
               GlobalVariable *InsertBefore=nullptr,
               ThreadLocalMode=NotThreadLocal,
               std::optional< unsigned > AddressSpace=std::nullopt,
               bool isExternallyInitialized=false);
```

方法一 ¶

在创建全局变量前，我们已经求得了其初始值，那么直接调用 `llvm::GlobalVariable` 的构造函数，将初始值作为参数传入即可：

```
// 例如: int a = 10

llvm::Type *ty = llvm::Type::getInt32Ty(TheContext);
llvm::Constant *initVal =
    llvm::ConstantInt::get(llvm::Type::getInt32Ty(TheContext), 10);

llvm::GlobalVariable *gloVar = new llvm::GlobalVariable(
    TheModule, ty, false, /* Not constant */
    llvm::GlobalValue::ExternalLinkage, initVal, "glolVar");
```

生成的 LLVM IR 如下：

```
@glolVar = global i32 10
```

- EmitIR.cpp：按照文档中所查阅到的内容，实现 operator(VarDecl* obj)
  - 获得类型 llvm::Type
  - 获得初始值 llvm::Value，需要通过 llvm::dyn_cast 转换为 llvm::Constant
    - 因为全局变量的初始值需要为常量
  - 获得类型和通过整数字面量获得初始值的 operator( ) 函数均已实现，无需修改

```
void
EmitIR::operator()(VarDecl* obj)
{
  // 类型
  llvm::Type* type = self(obj->type);

  // 初始值
  llvm::Value* val = self(obj->init);

  // 全局变量声明
  new llvm::GlobalVariable(mMod,
                           type,
                           false, /* Not constant */
                           llvm::GlobalValue::ExternalLinkage,
                           llvm::dyn_cast<llvm::Constant>(Val: val),
                           obj->name);
}
```

```
llvm::Type*
EmitIR::operator()(const Type* type)
{
  if (type->texp == nullptr) {
    switch (type->spec) {
      case Type::Spec::kInt:
        return llvm::Type::getInt32Ty(&C: mCtx);
      // TODO: 在此添加对更多基础类型的处理
      default:
        ABORT();
    }
```

i32

```
llvm::Value*
EmitIR::operator()(Expr* obj)
{
  // TODO: 在此添加对更多表达式处理的跳转
  if (auto p: asg::IntegerLiteral * = obj->dcst<IntegerLiteral>())
    return self(p);
  ABORT();
}

llvm::Constant*
EmitIR::operator()(IntegerLiteral* obj)
{
  return llvm::ConstantInt::get(Ty: self(obj->type), V: obj->val);
}
```

处理整型字面量

- EmitIR.cpp：注意点，EmitIR 从 TranslationUnit 开始，遍历 Decl 节点
  - 添加了对 VarDecl 节点的处理，因此，在处理 Decl 节点时，需要添加对 VarDecl 的跳转

```
void
EmitIR::operator()(Decl* obj)
{
  // TODO: 添加变量声明处理的跳转
  if (auto p: asg::VarDecl * = obj->dcst<VarDecl>())
    return self(p);

  if (auto p: asg::FunctionDecl * = obj->dcst<FunctionDecl>())
    return self(p);

  ABORT();
}
```

- EmitIR.cpp：按照对 Decl 节点的遍历顺序，处理完全局变量后，就会开始处理函数声明
  - 获得函数类型
  - 创建函数
  - 为函数创建入口基本块（标签为 entry），设置 IR 插入点
  - 处理函数体

```
void
EmitIR::operator()(FunctionDecl* obj)
{
  // 获得函数类型
  auto fty = llvm::dyn_cast<llvm::FunctionType>(self(obj->type));
  // 创建函数
  auto func = llvm::Function::Create(
    fty, llvm::GlobalVariable::ExternalLinkage, obj->name, mMod);

  obj->any = func;

  // 没有函数体则为函数声明
  if (obj->body == nullptr)
    return;

  // 为函数创建入口基本块（标签为 entry），设置 IR 插入点
  auto entryBb = llvm::BasicBlock::Create(mCtx, "entry", func);
  mCurIrb->SetInsertPoint(entryBb);
  auto& entryIrb = *mCurIrb;

  // TODO: 添加对函数参数的处理

  // 翻译函数体
  mCurFunc = func;
  self(obj->body);
  auto& exitIrb = *mCurIrb;

  if (fty->getReturnType()->isVoidTy())
    exitIrb.CreateRetVoid();
  else
    exitIrb.CreateUnreachable();
}
```

- EmitIR.cpp：函数体是 CompoundStmt，在处理 CompoundStmt 节点的函数中会跳转到对 Stmt 的处理
  - 在 001_var_defn 测例中，只有一条 return 语句，所以会跳转到处理 ReturnStmt 节点的函数中

```
//test global var define
int a = 3;
int b = 5;

int main(){
    return a + b;
}
```

```
struct FunctionDecl : Decl
{
  std::vector<Decl*> params;
  CompoundStmt* body{ nullptr };
private:
  void __mark__(Mark mark) override;
};
```

函数体为 CompundStmt

```
void
EmitIR::operator()(CompoundStmt* obj)
{
  // TODO: 可以在此添加对符号重名的处理
  for (auto&& stmt: asg::Stmt *& : obj->subs)
    self(stmt);
}
```

依次遍历 CompoundStmt 中的所有 Stmt

```
void
EmitIR::operator()(Stmt* obj)
{
  // TODO: 在此添加对更多Stmt类型的处理的跳转

  if (auto p: asg::CompoundStmt * = obj->dcst<CompoundStmt>())
    return self(p);

  if (auto p: asg::ReturnStmt * = obj->dcst<ReturnStmt>())
    return self(p);

  ABORT();
}
```

跳转到处理 ReturnStmt 的节点中

- EmitIR.cpp：在处理 ReturnStmt 节点的函数中，需要获得返回值，因此进入处理 Expr 节点的函数中

```
void
EmitIR::operator()(ReturnStmt* obj)
{
  auto& irb: llvm::IRBuilder<> & = *mCurIrb;

  llvm::Value* retVal;
  if (!obj->expr)
    retVal = nullptr;
  else
    retVal = self(obj->expr);

  mCurIrb->CreateRet(V: retVal);

  auto exitBb: llvm::BasicBlock * = llvm::BasicBlock::Create(&Context: mCtx, Name: "return_exit", Parent: mCurFunc);
  mCurIrb->SetInsertPoint(TheBB: exitBb);
}
```

获得返回值

根据返回值，创建 ReturnStmt

- EmitIR.cpp：根据 Task2 的 answer，此时的 Expr 是一个二元表达式，加法操作
  - 添加对处理 BinaryExpr 节点的函数的跳转
  - 顺便添加对 ImplicitCastExpr 和 DeclRefExpr 节点的函数的跳转

```
`-FunctionDecl 0x5555556b9608 <line:5:1, line:7:1> line:5:5 main 'int ()'
  `-CompoundStmt 0x5555556b9750 <col:11, line:7:1>
    `-ReturnStmt 0x5555556b9740 <line:6:5, col:16>
      `-BinaryOperator 0x5555556b9720 <col:12, col:16> 'int' '+'
        |-ImplicitCastExpr 0x5555556b96f0 <col:12> 'int' <LValueToRValue>
        | `-DeclRefExpr 0x5555556b96b0 <col:12> 'int' lvalue Var 0x5555556b9440 'a' 'int'
        `-ImplicitCastExpr 0x5555556b9708 <col:16> 'int' <LValueToRValue>
          `-DeclRefExpr 0x5555556b96d0 <col:16> 'int' lvalue Var 0x5555556b9528 'b' 'int'
```

这三个都是表达式

```
llvm::Value*
EmitIR::operator()(Expr* obj)
{
  // TODO: 在此添加对更多表达式处理的跳转
  if (auto p: asg::IntegerLiteral * = obj->dcst<IntegerLiteral>())
    return self(p);
  if (auto p: asg::BinaryExpr * = obj->dcst<BinaryExpr>())
    return self(p);
  if (auto p: asg::ImplicitCastExpr * = obj->dcst<ImplicitCastExpr>())
    return self(p);
  if (auto p: asg::DeclRefExpr * = obj->dcst<DeclRefExpr>())
    return self(p);
  ABORT();
}
```

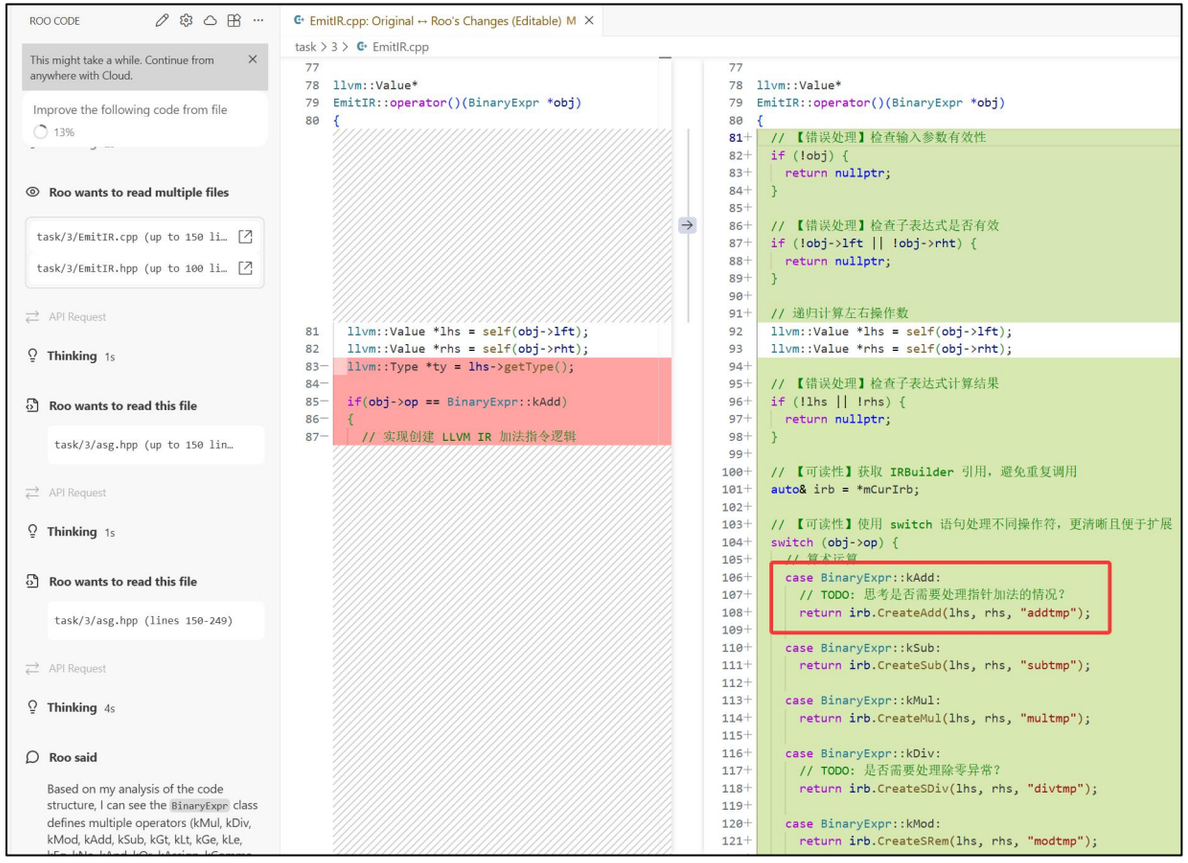
- EmitIR.cpp：实现 operator(BinaryExpr* obj) 函数
  - 翻阅 文档，或者询问 AI，获得创建整数加法操作的 API：CreateAdd
    - 获得左操作数
    - 获得右操作数
    - 创建加法指令

```cpp
llvm::Value*
EmitIR::operator()(BinaryExpr* obj)
{
  // 获得左操作数
  llvm::Value* lftVal = self(obj->lft);

  // 获得右操作数
  llvm::Value* rhtVal = self(obj->rht);

  // 获得负责创建 IR 的实例
  auto &irb: llvm::IRBuilder<> & = *mCurIrb;

  switch (obj->op) {
    case BinaryExpr::kAdd:
      return irb.CreateAdd(LHS: lftVal, RHS: rhtVal);
    default:
      ABORT();
  }
}
```

整数加法 + ¶

```cpp
/// LHS + RHS

/// LHS:        加号左边操作数
/// RHS:        加号右边操作数
/// Name:       结果分配的寄存器的名字
/// NUW和NSW标志位:    NUW表示No Unsigned Wrap，NSW表示No Signed Wrap
///          如果设置了NUW和/或NSW，则分别保证了指令操作不会发生无符号/有符号溢出。
///          这种情况下，如果有溢出发生，则指令的结果为poison value。
///          如果没设置NUW和/或NSW，则LLVM会分别对无符号/有符号的溢出情况进行处理。
Value *CreateAdd (Value *LHS, Value *RHS,
                  const Twine &Name="",
                  bool HasNUW=false, bool HasNSW=false);
```

YatCC 文档



Roo Code 自动创建加法指令，并添加其他二元表达式类型的处理

- EmitIR.cpp：由 Task2 的 answer 可知，左右操作数都是隐式类型转换表达式
  - 此时，需要实现 operator(ImplicitExpr *obj) 函数，前文已经增加了对该函数的跳转
    - 获得被转换的操作数
    - 进行转换
      - 左值 ➔ 右值的转换，需要用到 Load 指令，可以通过多种方式知道，API 为 CreateLoad

```
`-BinaryOperator 0x5555556b9720 <col:12, col:16> 'int' '+'
  |-ImplicitCastExpr 0x5555556b96f0 <col:12> 'int' <LValueToRValue>
  | `-DeclRefExpr 0x5555556b96b0 <col:12> 'int' lvalue Var 0x5555556b9440 'a' 'int'
  `-ImplicitCastExpr 0x5555556b9708 <col:16> 'int' <LValueToRValue>
    `-DeclRefExpr 0x5555556b96d0 <col:16> 'int' lvalue Var 0x5555556b9528 'b' 'int'
```

```
llvm::Value*
EmitIR::operator()(ImplicitCastExpr* obj)
{
  // 获得需要 被转换 的操作数
  auto sub: llvm::Value * = self(obj->sub);

  auto& irb: llvm::IRBuilder<> & = *mCurIrb;

  switch (obj->kind) {
    case ImplicitCastExpr::kLValueToRValue: {
      auto type: llvm::Type * = self(obj->sub->type);
      // 左指到右值的转换，需要用到 Load 指令
      auto loadVal: llvm::LoadInst * = irb.CreateLoad(Ty: type, Ptr: sub);
      return loadVal;
    }

    default:
      ABORT();
  }
}
```

- EmitIR.cpp：由 Task2 的 answer 可知，被转换的操作数为 DeclRefExpr 节点
  - 此时，实现 operator(DeclRefExpr *obj) 函数，前文已经增加了对该函数的跳转
    - 此函数的功能为返回引用的声明
    - 可以使用查阅模块符号表的功能，通过变量名，来找到引用的全局变量
    - 翻阅 文档，可知查阅模块符号表的 API 为 getGlobalVariable
    - DeclRefExpr 为左值，直接返回找到的变量即可

```
`-BinaryOperator 0x5555556b9720 <col:12, col:16> 'int' '+'
  |-ImplicitCastExpr 0x5555556b96f0 <col:12> 'int' <LValueToRValue>
  | `-DeclRefExpr 0x5555556b96b0 <col:12> 'int' lvalue Var 0x5555556b9440 'a' 'int'
  `-ImplicitCastExpr 0x5555556b9708 <col:16> 'int' <LValueToRValue>
    `-DeclRefExpr 0x5555556b96d0 <col:16> 'int' lvalue Var 0x5555556b9528 'b' 'int'
```

在模块符号表中查找全局变量 ¶

```
/// gloVarName 表示全局变量的名字
llvm::GlobalVariable *gloVar = TheModule.getGlobalVariable(gloVarName);
```

```
llvm::Value*
EmitIR::operator()(DeclRefExpr* obj)
{
  // 在 LLVM IR 层面，左值体现为返回指向值的指针
  // 在 ImplicitcastExpr::kLValueToRValue 中发射 load 指令从而变成右值
  llvm::Value* ret = nullptr;
  auto& irb: llvm::IRBuilder<> & = *mCurIrb;
  // 查阅符号表
  ret = mMod.getGlobalVariable(Name: obj->decl->name);
  // 判断是否找到
  ASSERT(ret);
  return ret;
}
```

- 至此，测例 001_var_defn 所需的功能以全部实现
  - 此时，运行 task3-score，测例已通过

```
[build] /workspaces/YatCC/build/test/task3/functional-0/000_main.sysu.c/score.txt ... [PASS]
[build] /workspaces/YatCC/build/test/task3/functional-0/001_var_defn.sysu.c/score.txt ... [PASS]
```

build > test > task3 > functional-0 > 001_var_defn.sysu.c > score.txt

```
1  00 代码执行用时：0 us
2  YatCC 代码执行用时：0 us
3
4  得分：100.00/100.00
```

- **注意**
  - 本节所述上手教程并非 Task3 的最佳实践，仅作参考
  - YatCC 文档 提供了更为详细的指导，也可翻阅 LLVM 官方文档
  - 鼓励大家借助 AI 工具**学习** LLVM IR C++ API 并完成实验

- Task3 评分
  - 不要求 Task3 生成的 LLVM IR 与 clang 生成的完全一致
  - 将 Task3 生成的 LLVM IR 进行链接后执行，对比程序**返回值**与**输出**
    - 与 clang 的运行结果一致 ➔ 测例通过，满分

谢 谢！

yatcc-ai.com