



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY



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

Compilation Principle 编译原理

第0讲：课程介绍、概述

张献伟

xianweiz.github.io

DCS290, 2/25/2021



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY



任课教师



博士，2011 – 2017， University of Pittsburgh



学士，2007 – 2011， 西北工业大学

中山大学

副教授，2020.10 – 今



工程师/研究员，2017.08 – 2020.09



实习研究员，2016.05 – 2016.08

计算机体系结构
高性能及智能计算
软硬件设计及优化



学院个人主页: <http://sdcs.sysu.edu.cn/content/5592>

课时安排

- 编译原理（3学分，54学时）

- 排课：1-19周

- 周二：2-9，11-19周

- 周四：1-9，11-19周

- 每次授课包括2个课时

- 第五节：14:20 – 15:05，第六节：15:15 – 16:00

- 地点：教学大楼 C303

- 编译器构造实验（1学分，36学时）

- 排课：1-19周

- 周四：1-9，11-19周

- 每次授课包括2个课时

- 第七节：16:20 – 17:05，第八节：17:15 – 18:00

- 地点：实验中心 E401

考核要求

- 编译原理

- 课堂参与（10%） - 点名、提问、测试
- 课程作业（20%） - 4次左右，理论
- 期中考查（10%） - 课下习题
- 期末考试（60%） - 闭卷

- 编译器构造实验

- Project 1（25%） - Lexical Analysis
- Project 2（25%） - Syntax Analysis
- Project 3（25%） - Semantic Analysis
- Project 4（25%） - Code Generation

- 课堂

- 随机点名
 - 缺席优先
- 随机提问
 - 后排优先
- 随机测试

- 实验

- 个人完成
 - 杜绝抄袭
- 按时提交
 - 硬性截止
- 侧重代码实现
 - 无需报告

课件及答疑

- 课件
 - xianweiz.github.io/teach/dcs290/s2021.html
 - 课后上传更新
- **课程QQ群： 905213666**
- 教师
 - 张献伟（超算中心）
 - Email: zhangxw79@mail.sysu.edu.cn
 - 实验课答疑，其他时间需预约
- 助教
 - 理论：莫泽威
 - Email: mozw5@mail2.sysu.edu.cn
 - 研究方向：GCC/LLVM优化
 - 实验：王子彦
 - Email: wangzy75@mail2.sysu.edu.cn
 - 研究方向：区块链编译优化

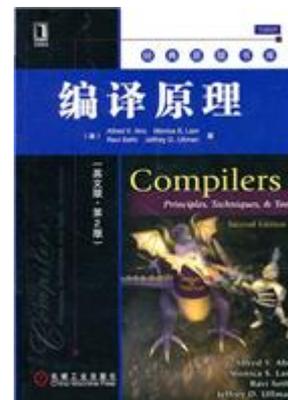
关于课程

- 年级专业
 - 18级计科（专必，38人）
 - 18级保密管理（专选，9人）
- 先修课程
 - 计算机体系结构/组成原理、汇编语言
 - 离散数学、数据结构、C/C++或其他编程语言
- 编译原理
 - 高级编程语言（如C）是如何转换为机器语言（0/1）的？
 - 介绍编译器设计与实现的主要理论和技术
 - 包括词法分析、语法分析、语义分析、代码生成、代码优化等
- 编译器构造实验
 - 单独课程，分阶段实现一个小型编译器
 - 词法分析、语法分析、语义分析等

课程教材

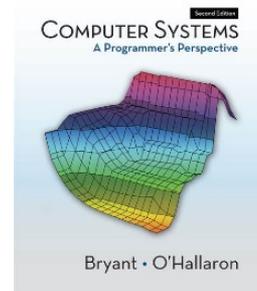
- 主要教材

- 编译原理（Compilers: Principles, Techniques, and Tools, 2nd Edition）, By Alfred V. Aho, Monica S. Lam, and *et al.*



- 参考资料

- Computer Systems: A Programmer's Perspective (CSAPP), Bryant and O'Hallaron
- 编译原理, 陈鄞 (哈工大)
- 编译原理, 王挺 (国防科大)
- COMS 4115, Baishakhi Ray (Columbia U.)
- CS 143, Fredrik Kjolstad (Stanford U.)
- CS 411, Jan Hoffmann (Carnegie Mellon U.)
- CS 2210, Wonsun Ahn (U. of Pittsburgh)



教学安排

| 周次 | 课程内容 | 周次 | 课程内容 |
|----------------------|--|-----------------|---------------|
| 第1周 (02.25) | 四：课程介绍、编译概述 | 第11周 (05.06) | 四：中间代码 – IR表示 |
| 第2周 (03.02/04) | 二：词法分析 – 过程、正则表达 四：词法分析 – NFA、DFA (1) | 第12周 (05.13) | 四：中间代码 – 生成 |
| 第3周 (03.09/11) | 二：词法分析 – NFA、DFA (2) 四：语法分析 – 语法、语言、CFG | 第13周 (05.20) | 四：运行时管理 |
| 第4周 (03.16/18) | 二：语法分析 – 自顶向下、文法 (1) 四：语法分析 – 自顶向下、文法 (2) | 第14周 (05.27) | 四：运行时代码生成 |
| 第5周 (03.23/25) | 二：语法分析 – 自底向上、LR分析 (1) 四：语法分析 – 自底向上、LR分析 (2) | 第15周 (06.03) | 四：代码优化 |
| 第6周 (03.30/04.01) | 二：语法分析 – 更多LR分析 四：语法分析 – YACC工具 | 第16周 (06.10) | 四：控制流、数据流分析 |
| 第7周 (04.06/08) | 二：语义分析 – 符号表 四：语义分析 – 类型检查 | 第17周 (06.17) | 四：目标代码生成 |
| 第8周 (04.13/15) | 二：语法制导翻译 (1) 四：语法制导翻译 (2) | 第18周 (06.24) | 四：前沿编译技术 |
| 第9周 (04.20/22) | 二：回顾 – 编译前端 四：介绍 – 编译后端 | 第19周 (07.01) | 四：总结 – 编译前后端 |
| 第10周 | (期中：课下考查) | 第20周 | (期末：闭卷考试) |

编译器的发展

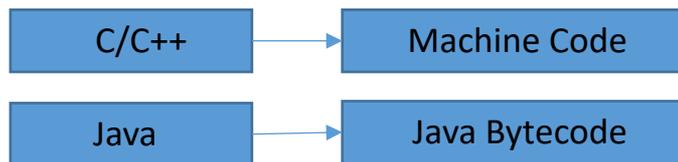
- Compiler History
 - 1952: A-0, term ‘compiler’ (Grace Hopper)
 - 1957: FORTRAN, first commercial compiler (John Backus)
 - 1962: LISP, self-hosting and GC (Tim Hart and Mike Levin)
 - 1984: GNU Compiler Collection (Stallman)
- Turing Awards (see [link](#))
 - Compiler: 1966, 1987, 2006
 - Programming Language: 1972, 1974, 1977-1981, 1984, 2001, 2003, 2005, 2008
- Compilers Today
 - Modern compilers are complex (gcc has 7M+ LOC)
 - There is still a lot of compiler research (LLVM, ...)
 - There is still a lot of compiler development in industry

为什么要学习编译？

- 计算机生态一直在改变
 - 新的硬件架构（通用GPU、AI加速器等）
 - 新的程序语言（Rust、Go等）
 - 新的应用场景（DL、IoT等）
- 了解编译程序的实现原理与技术
 - 掌握编译程序/系统设计的基本原理
 - 理解高级语言程序的内部运行机制
 - 提高编写和调试程序的能力
 - 培养形式化描述和抽象思维能力
- 大量专业工作与编译技术相关
 - 高级语言实现、软硬件设计与优化、软件缺陷分析
- 硕博士阶段从事与编译相关的研究
 - 尽管可能并不是直接的编译或程序设计方向

什么是编译？

- 高级语言编写程序，但计算机只理解0/1
 - 自然语言翻译：“This is a sentence” → “这是一个句子”
 - 计算机语言翻译：源程序 → 目标程序
 - 编程人员专注于程序设计，无需过多考虑机器相关的细节
- 不同语言有不同的实现方式
 - “底层”语言通常使用编译
 - C, C++
 - “高级”语言通常是解释性的
 - Python, Ruby
 - 有些使用混合的方式
 - Java: 编译 + 即时编译 (JIT, Just-in-Time)

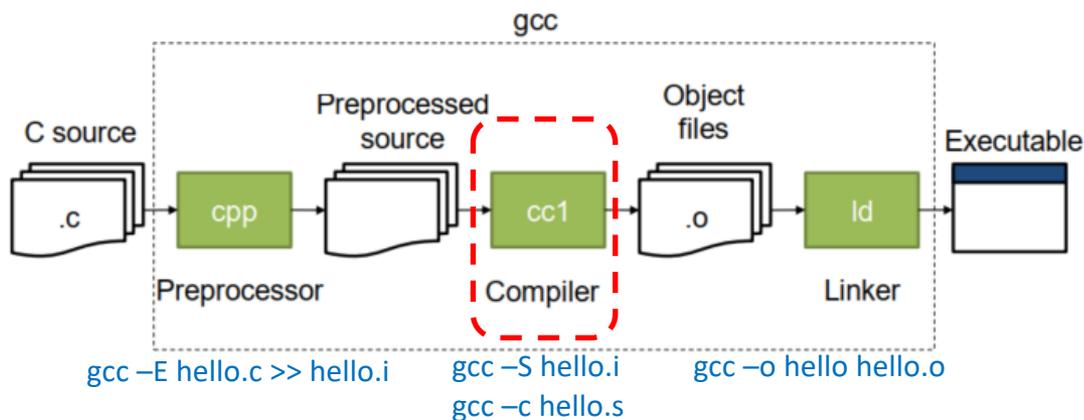


C语言编译

- 源程序 (hello.c) → 可执行文件(./hello)
 - 预处理阶段 (preprocessor)
 - 汇合源程序, 展开宏定义, 生成.i文件 (另一个C文本文件)
 - 编译阶段 (compiler)
 - .i文件翻译为.s文件 (汇编代码)
 - 汇编阶段 (assembler)
 - .s文件转为.o可重定位对象 (relocatable object) 文件 (机器指令)
 - 连接阶段 (linker/loader)
 - 连接库代码从而生成可执行 (executable) 文件 (机器指令)

```
#include <stdio.h>

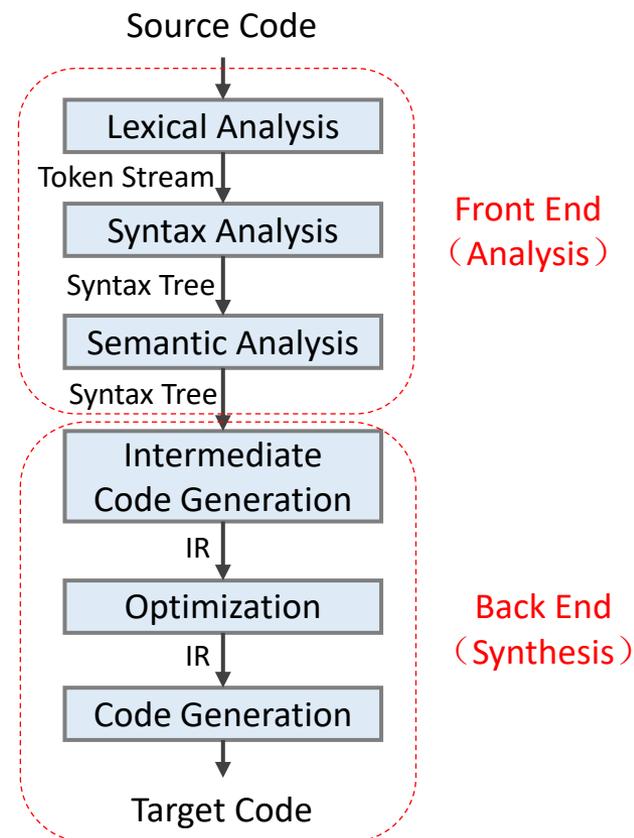
int main()
{
    printf("Hello World!\n");
    return 0;
}
```



```
55
48 89 e5
bf d0 05 40 00
e8 d5 fe ff ff
b8 00 00 00 00
5d
c3
```

编译过程

- **前端（分析）**：对源程序，识别语法结构信息，理解语义信息，反馈出错信息
 - 词法分析（Lexical Analysis）
 - 语法分析（Syntax Analysis）
 - 语义分析（Semantic Analysis）
- **后端（综合）**：综合分析结果，生成语义上等价于源程序的目标程序
 - 中间代码生成（Intermediate Code Generation）
 - Intermediate representation (IR)
 - 代码优化（Code Optimization）
 - 目标代码生成（Code Generation）

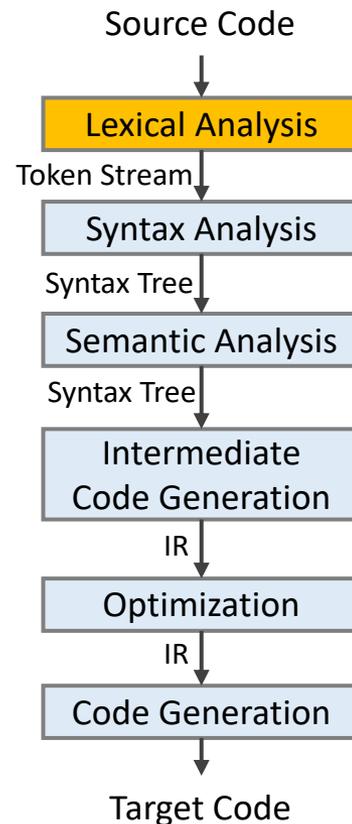


词法分析

- 扫描源程序字符流，识别并分解出有词法意义的单词或符号（**token**）
 - 输入：源程序，输出：**token**序列
 - **token**表示：<类别，属性值>
 - 保留字、标示符、常量、运算符等
 - **token**是否符合词法规则?
 - `0var`, `$num`

```
void main()
{
    int arr[10], i, x = 1;
    for (i = 0; i < 10; i++)
        arr[i] = x * 5;
}
```

keyword(`for`) id(`i`) sym(`=`) num(`0`) sym(`;`) id(`i`) sym(`<`) num(`10`) sym(`;`) id(`i`) sym(`++`)
id(`arr`) sym(`[`) id(`i`) sym(`]`) sym(`=`) id(`x`) sym(`*`) num(`5`) symbol(`;`)



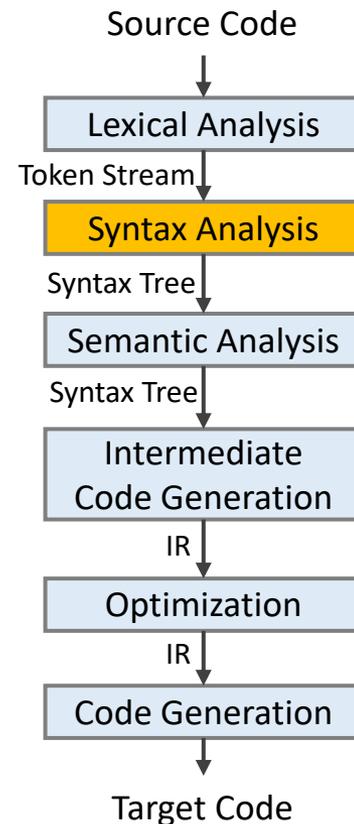
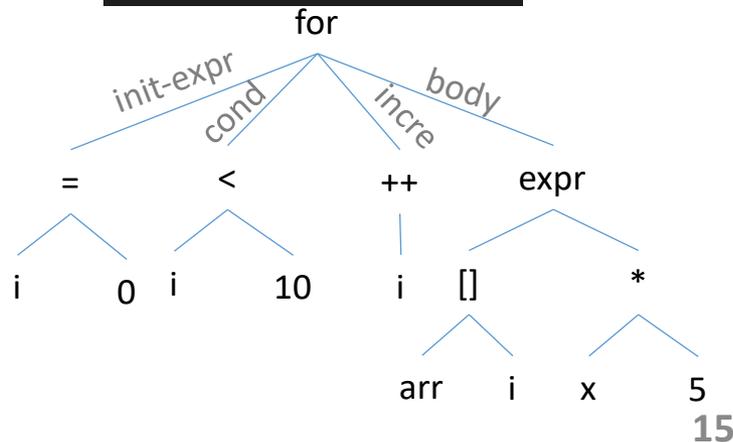
语法分析

- 解析源程序对应的token序列，生成语法分析结构（语法分析树）

- 输入：单词流，输出：语法树
- 输入程序是否符合语法规则？

- x^*+
- `a += 5;`

```
void main()  
{  
    int arr[10], i, x = 1;  
    for (i = 0; i < 10; i++)  
        arr[i] = x * 5;  
}
```

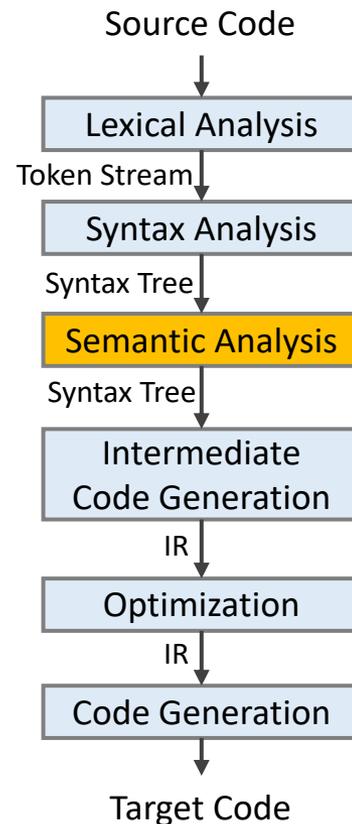
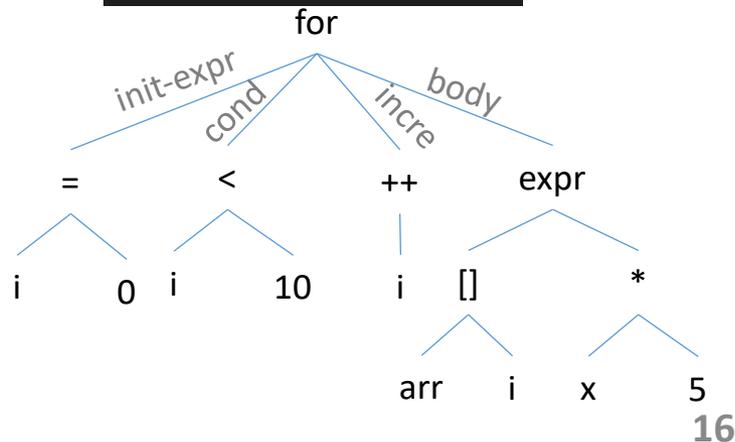


语义分析

- 基于语法结果进一步分析语义

- 输入：语法树，输出：语法树+符号表
- 收集标识符的属性信息（**type, scope**等）
- 输入程序是否符合语义规则?
 - 变量未声明即使用，重复声明
 - `int x; y = x(3);`

```
void main()  
{  
    int arr[10], i, x = 1;  
    for (i = 0; i < 10; i++)  
        arr[i] = x * 5;  
}
```

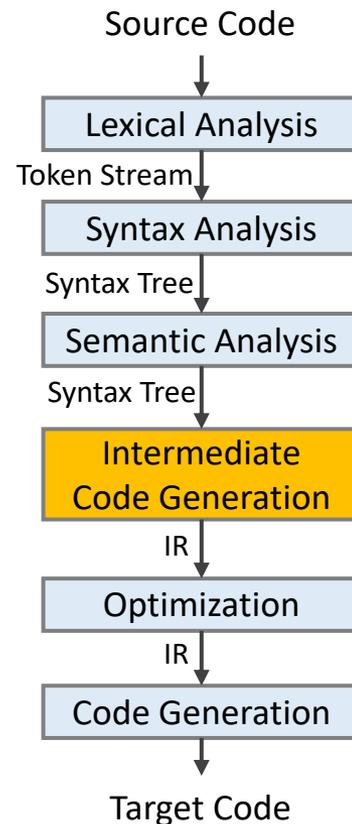


中间代码生成

- 初步翻译，生成等价于源程序的中间表示（IR）
 - 输入：语法树，输出：IR
 - 建立源和目标语言的桥梁，易于翻译过程的实现，利于实现某些优化算法
 - IR形式：例如三地址码（TAC, Three-Address Code）

```
void main()  
{  
    int arr[10], i, x = 1;  
    for (i = 0; i < 10; i++)  
        arr[i] = x * 5;  
}
```

```
i := 0  
loop:  
    t1 := x * 5  
    t2 := &arr  
    t3 := sizeof(int)  
    t4 := t3 * i  
    t5 := t2 + t4  
    *t5 := t1  
    i := i + 1  
    if i < 10 goto loop
```

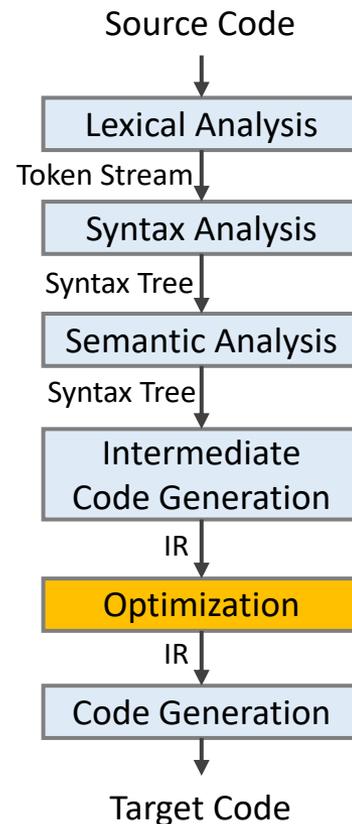


代码优化

- 加工变换中间代码使其更好（代码更短、性能更高、内存使用更少）
 - 输入：IR，输出：（优化的）IR
 - 机器无关（machine independent）
 - 例如：设别重复运算并删除；运算操作替换；使用已知量

```
void main()  
{  
    int arr[10], i, x = 1;  
    for (i = 0; i < 10; i++)  
        arr[i] = x * 5;  
}
```

```
i := 0  
loop:  
    t1 := x * 5  
    t2 := &arr  
    t3 := sizeof(int)  
    t4 := t3 * i  
    t5 := t2 + t4  
    *t5 := t1  
    i := i + 1  
    if i < 10 goto loop
```

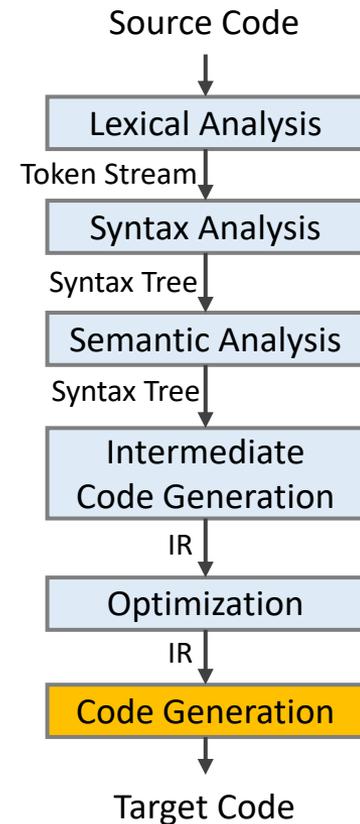


目标代码生成

- 为特定机器产生目标代码（e.g., 汇编）
 - 输入：（优化的）IR，输出：目标代码
 - 寄存器分配：放置频繁访问数据
 - 指令选取：确定机器指令实现IR操作
 - 进一步的机器有关优化
 - 例如：寄存器及访存优化

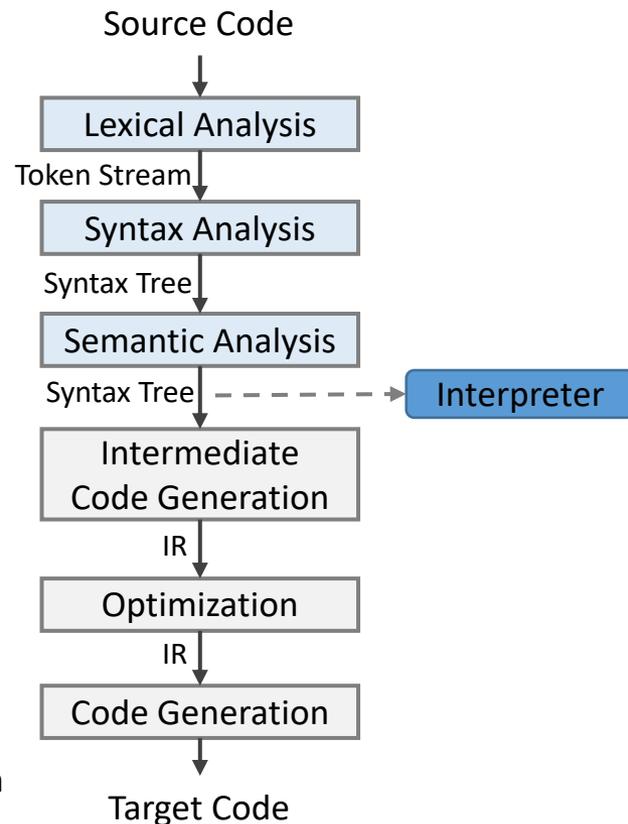
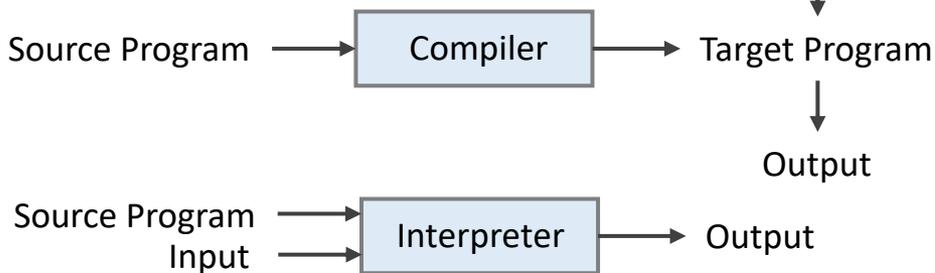
```
void main()  
{  
    int arr[10], i, x = 1;  
    for (i = 0; i < 10; i++)  
        arr[i] = x * 5;  
}
```

```
... ..  
14: 8b 55 f8      mov  -0x8(%rbp),%edx    // edx = x  
17: 89 d0          mov  %edx,%eax          // eax = x  
19: c1 e0 02      shl  $0x2,%eax          // eax = (x << 2)  
1c: 01 c2          add  %eax,%edx          // edx = (x << 2) + x  
1e: 8b 45 fc      mov  -0x4(%rbp),%eax    // eax = i  
21: 48 98          cltq  
23: 89 54 85 d0    mov  %edx,-0x30(%rbp,%rax,4) // arr[i] = 5x  
27: 83 45 fc 01    addl $0x1,-0x4(%rbp)    // i++  
2b: 83 7d fc 09    cmpl $0x9,-0x4(%rbp)    // i <= 9  
2f: 7e e3          jle  14 <main+0x14>     // loop end?  
... ..
```



解释 vs. 编译

- 编译：翻译成机器语言后方能运行
 - 目标程序独立于源程序（修改 → 再编译 → 运行）
 - 分析程序上下文，易于整体性优化
 - 性能更好（核心代码通常C/C++）
- 解释：源程序作为输入，边解释边执行
 - 不生成目标程序，可迁移性高
 - 逐句执行，很难进行优化
 - 性能通常不会太好



即时编译 (JIT)

- 即时编译 (Just-In-Time Compiler) : 运行时执行程序编译操作
 - 弥补解释执行的不足
 - 把翻译过的机器代码保存起来, 以备下次使用
 - 传统编译 (AOT, Ahead-Of-Time) : 先编译后运行
- JIT vs. AOT
 - JIT具备解释器的灵活性
 - 只要有JIT编译器, 代码即可运行
 - 性能上基本和AOT等同
 - 运行时编译操作带来一些性能上的损失
 - 但可以利用程序运行特征进行动态优化

