并行编译与优化
Parallel Compiler and Optimization

计算机研究所编译系统室

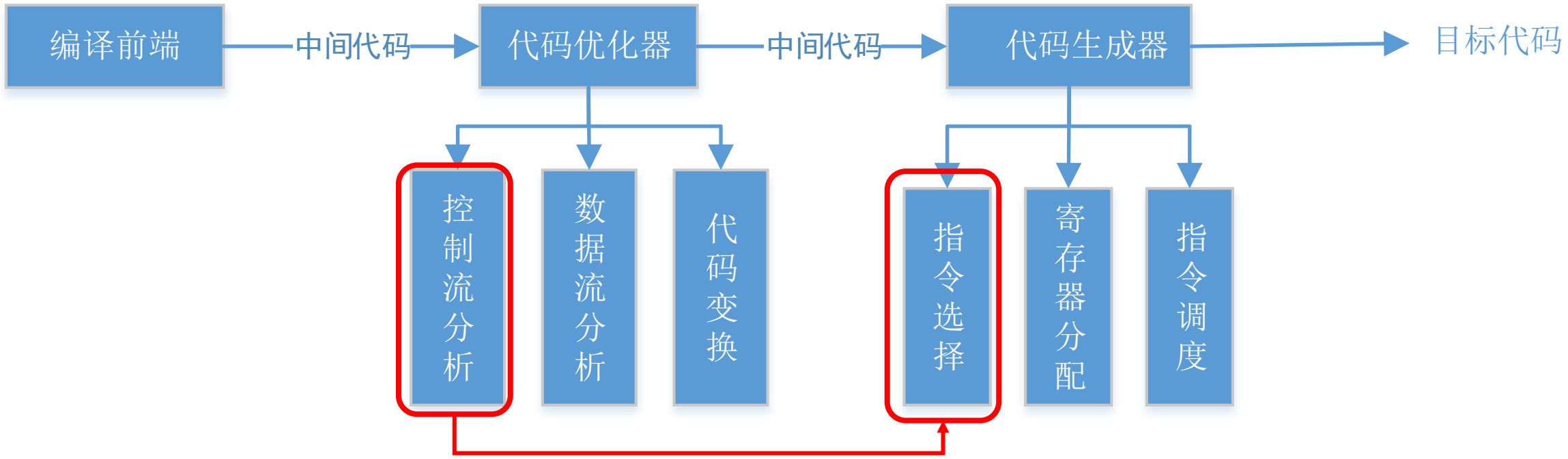
Lecture 5: Instruction Selection

第五课：指令选择

回顾

COMP CCRG Open MP

编译流程



填空题 1分

设置

考虑中间表示代码 $rj \leftarrow ri$，将寄存器ri的值(整型)复制到rj，将其翻译成目标指令

一种翻译方式是使用寄存器到寄存器mov指令:

mov rj，ri

还有其他方式吗？ [填空1]

作答

指令选择示例

- 考虑中间表示代码 $rj \leftarrow ri$，将寄存器ri的值(整型)复制到rj，将其翻译成目标指令

- 一种翻译方式是使用寄存器到寄存器mov指令：

  mov rj, ri

- 其他方式

  - add rj, ri, 0
  - sub rj, ri, 0
  - mul rj, ri,1
  - and rj, ri, ri
  - or rj, ri, 0
  - xor rj, ri, 0
  - store M, ri
  - load rj, M

指令选择：从备选指令中选择最佳指令

学习内容

5.1 指令选择概述

5.2 低层次中间表示

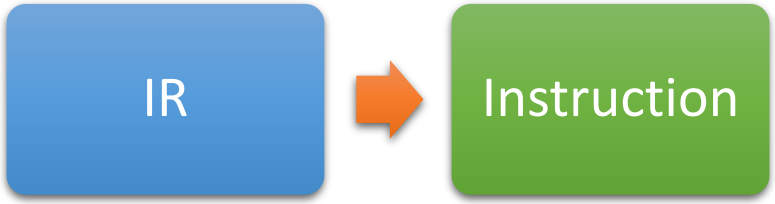
5.3 指令选择方法

学习目标

- 掌握低层次中间表示的基本形式、基于树模式匹配的指令选择方法和基于窥孔优化的指令选择方法
- 理解指令选择的基本概念和目标

5.1.1 指令选择的基本概念

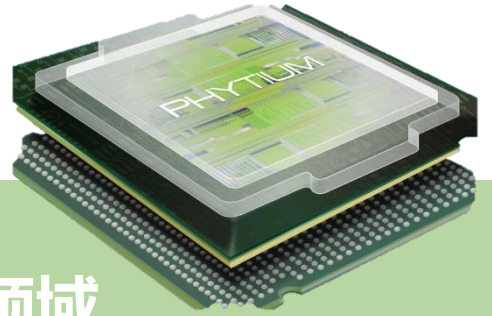
- 将中间表示(IR)翻译成等价的目标机指令集(ISA)指令序列的过程
  - 编译中端代码优化器是运行在代码的IR形式上
  - IR代码必须翻译成ISA指令序列，才能在目标机上执行
  - 指令选择实现IR到目标机指令的翻译



5.1.2 指令选择的目标

- 生成代价(成本)最小的指令序列
  - 执行时间最短
  - 代码长度最短
  - 能耗最低
  - …

飞腾编译器
(Aquila)



■ DSP芯片
应用于国防、航空领域
对程序的实时性、代码大小、功耗均有要求
天河编译团队研发面向DSP芯片的编译系统
突破多尺度编译优化和代码生成技术

5.1.3 指令选择的复杂性

- 指令选择的搜索空间巨大
  - 目标机ISA有大量备选指令序列可达到同一语义效果
    - x86上设置eax寄存器为0 `mov eax,0` `xor eax,eax` `sub eax,eax` `imul eax,0`
    - RISCV上计算r=r*2 `muli x5,x5,#2` `add x5,x5,x5` `sll x5,x5,#1`
    - RISC机器：每个IR操作对应1~2条指令
    - CISC机器：可能需要将几个IR操作汇聚为一条指令
  - 灵活的寻址模式使搜索空间变大
    - 一条指令可以同时完成地址计算、访存操作和寄存器算术运算 `str fp, [sp, #-4]!`
  - 某些ISA对特定操作增加了附加约束
    - 如多字访存指令需要连续的寄存器对
- 获得全局最优的指令选择是NP完全问题

学习内容

COMP
CCRG Open MP

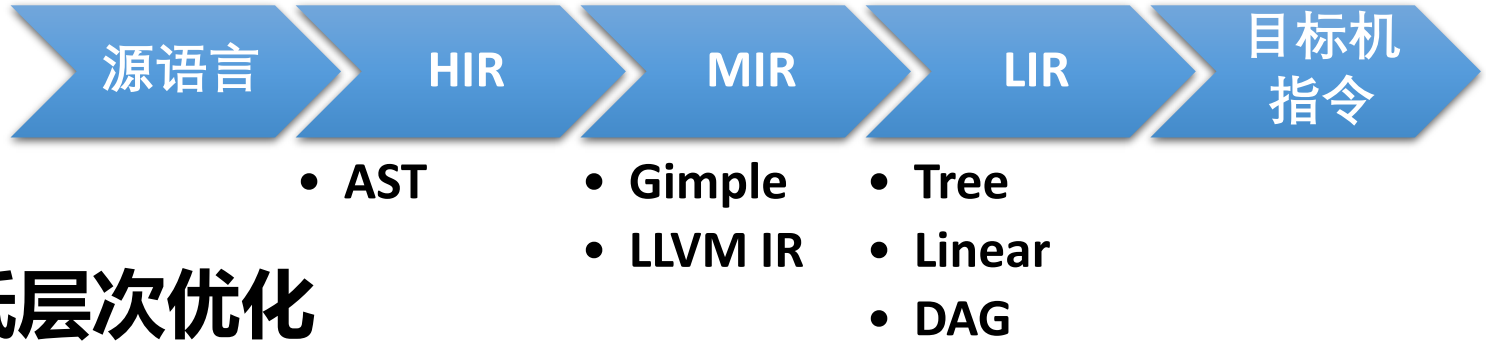
5.1 指令选择概述

5.2 低层次中间表示

5.3 指令选择方法

5.2.1 低层次中间表示

- 高层次中间表示(HIR)
  - 靠近源语言，更多上下文信息用于进行高层次优化
- 中层次中间表示 (MIR)
  - 中端编译优化
- 低层次中间表示(LIR)
  - 靠近机器，用于进行低层次优化
  - 更容易翻译为目标机指令



- 在指令选择之前，可以将中间代码转换为更底层的表示

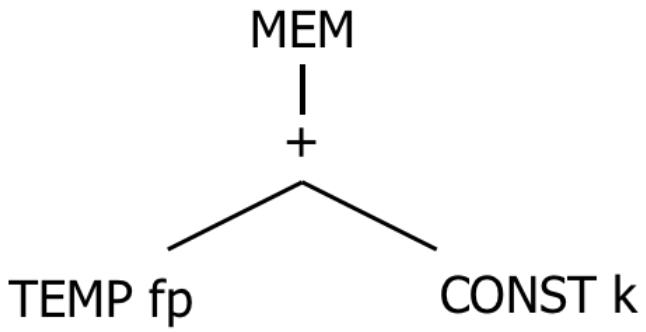
5.2.1 低层次中间表示

- LLVM在指令选择之前，将LLVM IR转换为SelectionDAG
  - 与目标机无关的低层次IR
  - 每个基本块对应一个DAG，DAG中的结点对应指令或者一个操作数，DAG中的边描述了指令间存在数据依赖关系
  - 基于SelectionDAG采用模式匹配进行指令选择
- 针对不同形式的低层次中间表示，有不同的指令选择方法

5.2.2 LIR示例

一个化简的LIR示例

- 假设目标机为RV32IM指令集架构（RISC机器）
- 该目标机包含寄存器-寄存器指令 + load/store指令
- 两种形式的LIR：树结构IR和线性IR



MEM(BINOP(PLUS, TEMP fp, CONST k))

5.2.2 LIR示例

- 支持的表达式 (Expressions)
  - CONST(i) – 整型常量i
  - TEMP(t) – 临时变量t (符号寄存器)
  - BINOP(op,e1,e2) – 执行二元操作e1 op e2
  - MEM(e) – 地址e处的内存内容
  - CALL(f,args) – 调用函数f，参数列表为args

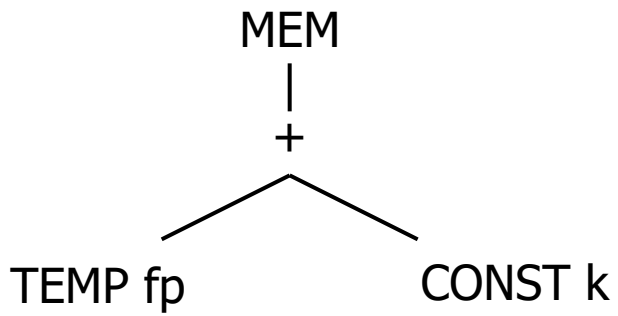
5.2.2 LIR示例

COMP CCRG Open MP

- 支持的语句 (Statements)
  - MOVE(TEMP t, e) – 将表达式e的值存储到临时变量t中
  - MOVE(MEM(e1), e2) – 将表达式e2的值存储到表达式e1指示的内存中
  - EXP(e) – 执行表达式e，忽略结果
  - SEQ(s1,s2) – 先执行语句s1，再执行语句s2
  - NAME(n) – 汇编指令的标号n
  - JUMP(e) – 无条件跳转到e处, e可以是一个NAME标号或更复杂的情况(如switch)
  - CJUMP(op,e1,e2,t,f) – 条件跳转，执行e1 op e2; 若结果为真则跳转到标号t, 否则跳转到标号f
  - LABEL(n) – 确定标号n在代码处的位置

5.2.2 LIR示例

- **读取栈上，栈帧指针fp+偏移k处的变量**
  - **树IR**

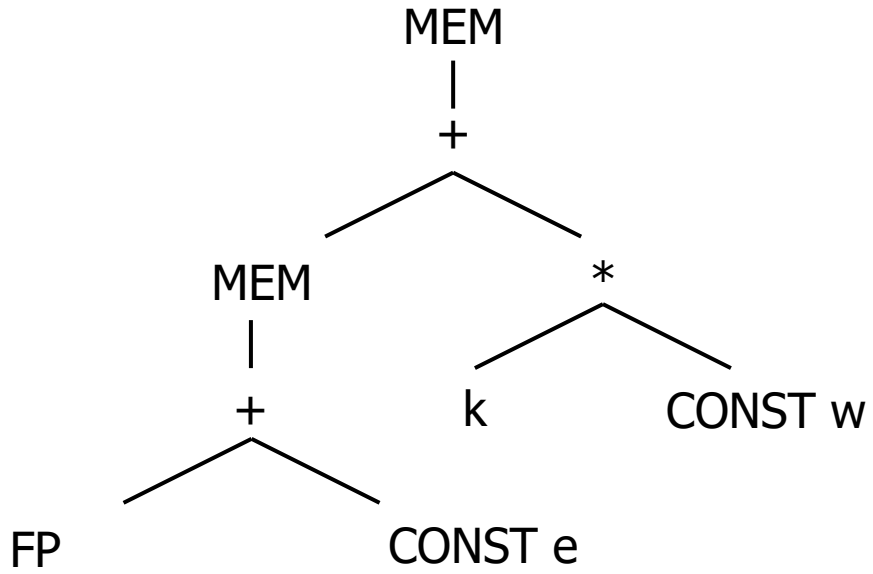


  - **线性IR**

MEM(BINOP(PLUS, TEMP fp, CONST k))

5.2.2 LIR示例

- 读取栈上，数组e下标为k的元素e[k]，假设存储每个元素需要w个字节
  - 树IR



  - 线性IR

MEM(BINOP(PLUS, MEM(BINOP(PLUS, TEMP fp, CONST e)), BINOP(MUL, k, CONST w)))

学习内容

COMP
CCRG Open MP

5.1 指令选择概述

5.2 低层次中间表示

5.3 指令选择方法

Alan J. Perlis

- 首届图灵奖获得者 (1966)

"For his influence in the area of advanced programming techniques and compiler construction." --Turing Award Citation

Any noun can be verbed (任何名词都可以变为动词)
--by Alan J. Perlis

5.3.1 指令选择的基本思想

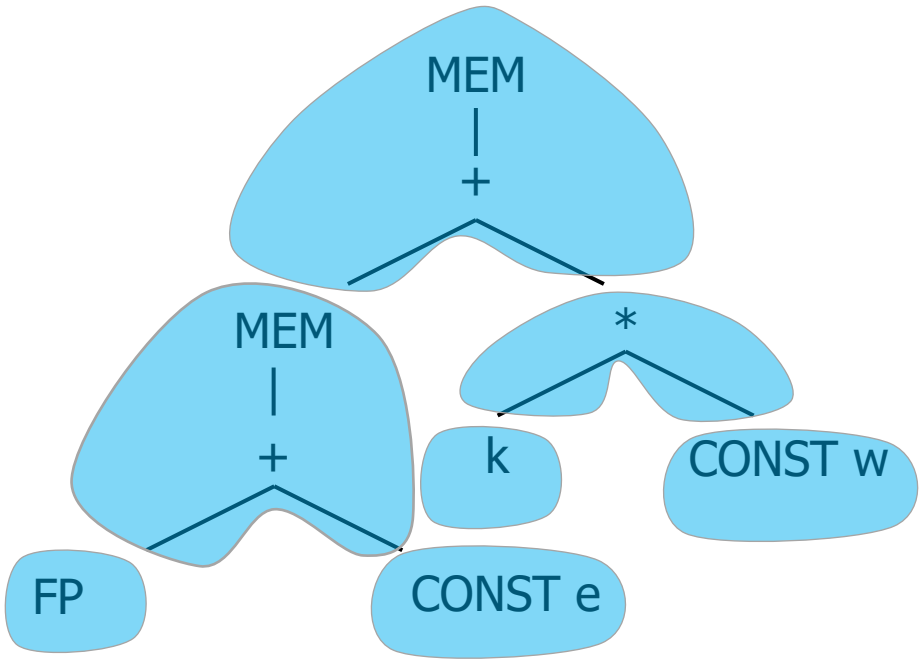
- 基于宏扩展(Macro-expansion)的指令选择
  - 自顶向下将LIR逐一翻译为指令序列 (one-by-one translation)
  - ☺ 简单，易于实现
  - ☹ 难以考虑代码整体质量，不能够利用指令集强大的寻址模式

5.3.1 指令选择的基本思想

- 基于模式模式匹配(Pattern-matching)的指令选择
  - 利用模式匹配技术选择与一段LIR匹配的指令
  - 直到得到覆盖全部LIR的指令序列
  - 基于模式匹配的指令选择方法包括
    - 基于树模式匹配的指令选择方法
    - 基于窥孔优化的指令选择方法
- 指令选择阶段假设有足够多的符号寄存器
  - 到寄存器分配阶段再考虑符号寄存器到物理寄存器的分配

5.3.2 树模式匹配方法

- IR树
  - IR树中的一段树枝，称之为树型 (tree pattern)
  - 树型可以看成是树中的一个节点及其子节点

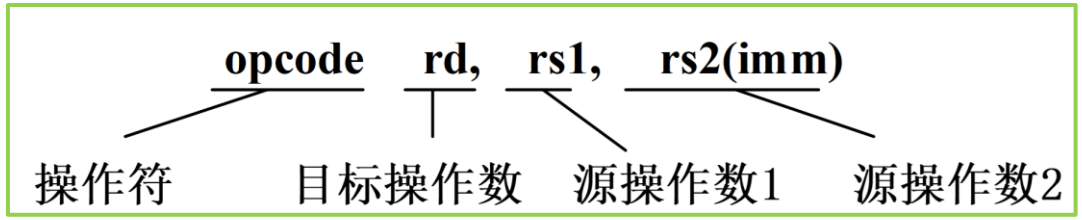


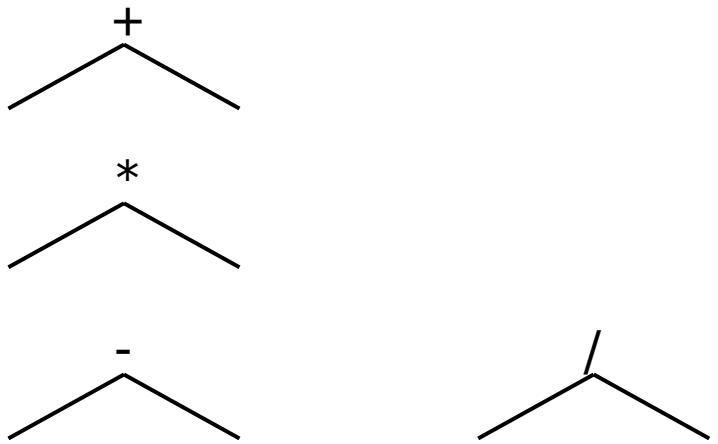
5.3.2 树模式匹配方法

- 操作树
  - 为了方便进行模式匹配，把目标机指令也表示为树，称之为操作树或瓦片 (tile)
- 基于树模式匹配的指令选择
  - 给定一个IR树和一组操作树，将操作树平铺(tiling)到IR树上
    - 为每个树型找到一个操作树来覆盖它，操作树与操作树相连接，不重叠
    - 用操作树的最小集合来平铺一个IR树，以提升代码质量

(1) 操作树

- 为将指令选择转换为树模式匹配问题，目标机指令表示为操作树
- 寄存器
  - ri　　TEMP　　TEMP结点作为寄存器ri使用
- 算术运算指令
  - add rd1, rs1, rs2
  - mul rd1, rs2, rs2
  - SUB和DIV类似





(1) 操作树

立即数指令

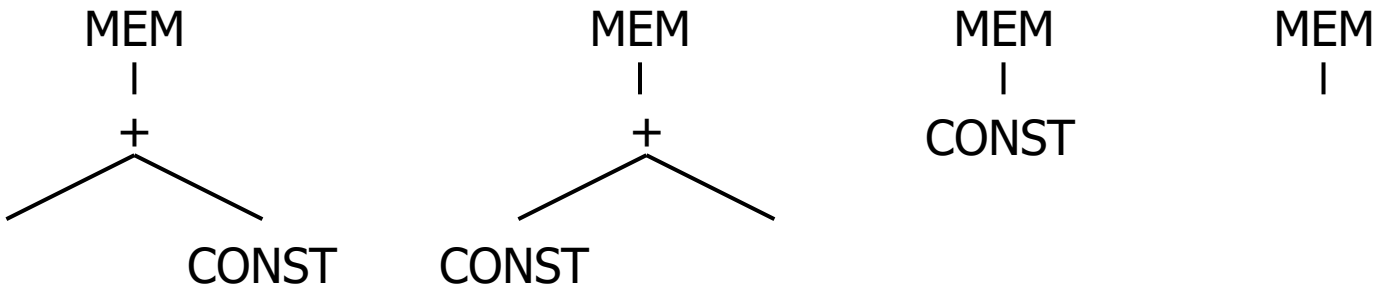
- addi rd1, rs1, imm

- muli rd1, rs1, imm

(1) 操作树

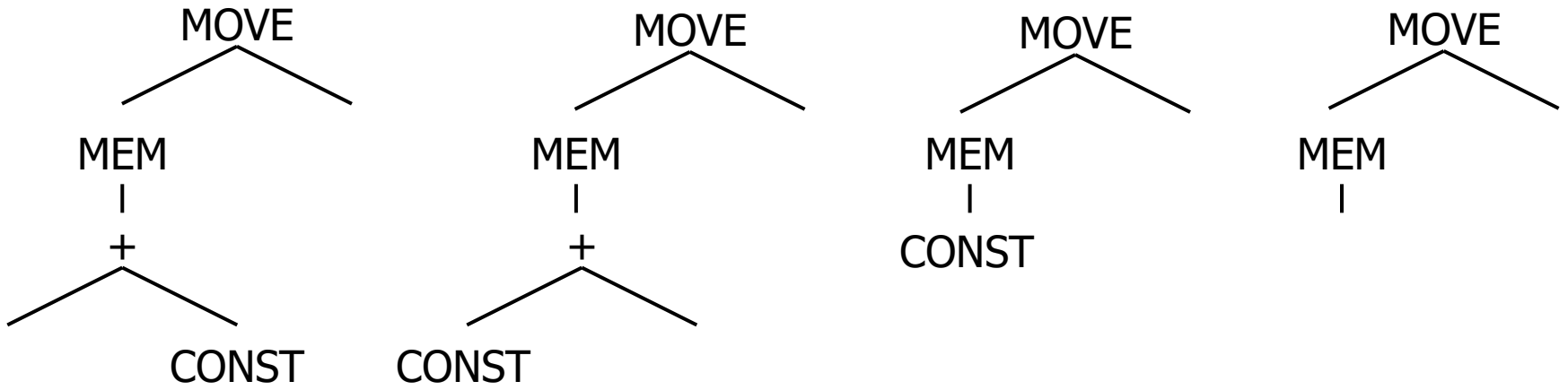
- 访存指令(包含寻址)
  - ld r1, offset(r2)

r1 = MEM(r2+offset)



(1) 操作树

- 访存指令(包含寻址)
  - st r1, offset(r2)
    - MEM[r2 + offset] = r1



(2) 平铺方案

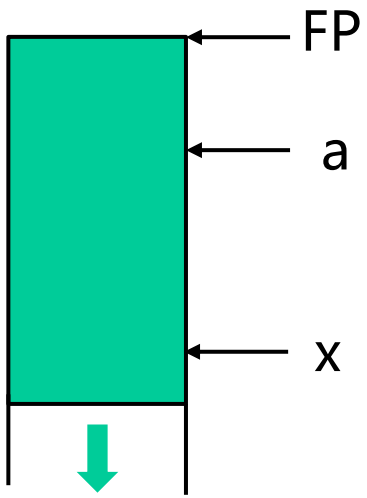
- 平铺方案是一组<node,op>对集合
  - node是IR树中的一个结点
  - op是一个操作树（瓦片）
  - 一个<node,op>对表示，op对应的目标机指令可以覆盖以node为根的子树
- 如果一个平铺方案覆盖了一个IR树中的每一个node，并且每个op树(瓦片)都与其邻居op树相连接，则该平铺方案实现对该IR树的覆盖

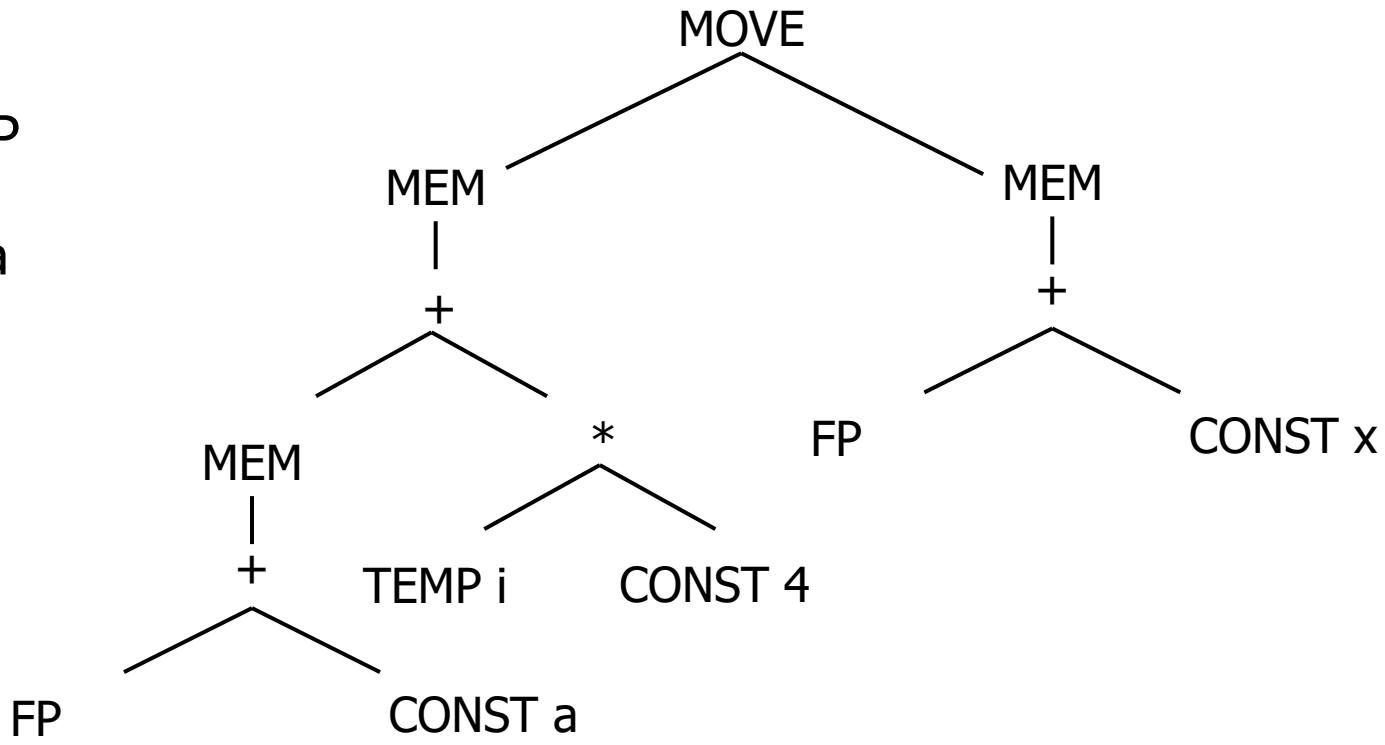
(2) 平铺方案

- 两个瓦片**相连接**：对于一个<node,op>对，如果其node被平铺方案中另一个op树的一个叶结点涵盖，那么称该op树与其邻居op树相连接
- 当两个op树相连接时，两者公共结点的存储类别必须一致，否则无法将正确的值从较低的树传到较高的树
  - 例如都存储于寄存器中

(2) 平铺方案

- 示例: a[i]=x, 假设a是栈上的整型数组，i是寄存器变量，x是栈上的变量（a实际是指向数组的指针的栈帧偏移，x实际是x的栈帧偏移）

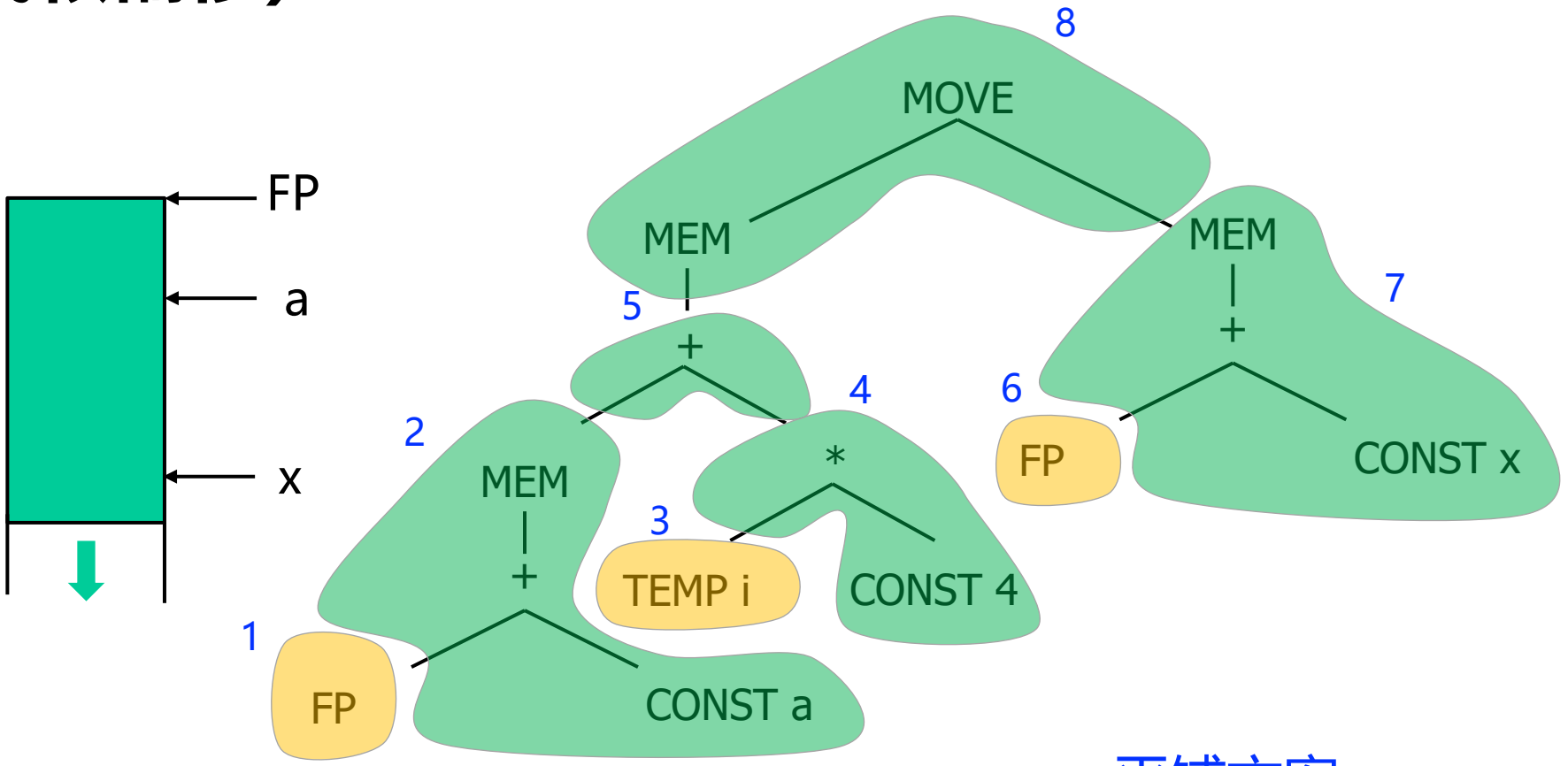




IR树

(2) 平铺方案

- 示例: a[i]=x, 假设a是栈上的整型数组，i是寄存器变量，x是栈上的变量（a实际是指向数组的指针的栈帧偏移，x实际是x的栈帧偏移）



平铺方案

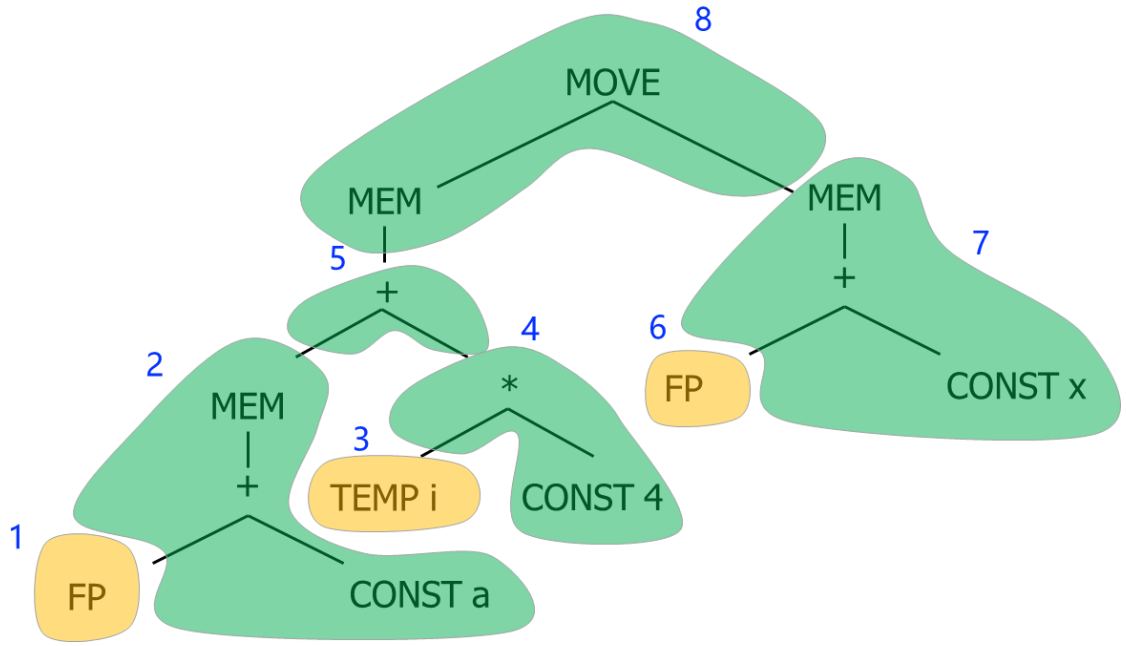
(3) 代码生成

- 获得基于IR树的平铺方案后，代码生成器可以进行代码生成
  - 后根次序的自底向上遍历瓦片
  - 按瓦片顺序，基于重写规则，生成目标机指令序列
  - 使用相同寄存器名将相连瓦片在重叠位置连接在一起
- 重写规则
  - 一条重写规则由瓦片，指令模板和相关成本组成

规则	瓦片	指令模板	成本
(1)	Reg → +(Reg1, Reg2)	add r_{new}, r1, r2	1
(2)	Reg → MEM(+(Reg1,offset))	ld r_{new}, offset(r1)	2

(3) 代码生成

- 基于重写规则生成指令序列 (通过相同寄存器名连接瓦片)
  - 子树1、3、6不对应任何指令，因为是已经含有正确值的寄存器




```
2 ld      r1, a(fp)    //读取数组a的地址
4 muli    r2, ri, 4    //临时变量i的值在ri中
5 add     r3, r1, r2   //计算a[i]的地址
7 ld      r4, x(fp)    //读取x
8 st      r4, (r3)     //a[i] = x
```

(4) 找出平铺方案

- IR树的每个结点可能有多个与之匹配的瓦片，可以生成多个平铺方案
- 关键是如何快速找到一个良好的平铺方案，满足指令选择的目标(如程序执行时间最短)
- 从两个层次看这个问题
  - 通过树遍历，找到所有的平铺方案
  - 将瓦片与成本关联，通过累加成本，找到在每个结点处最低成本的匹配

(4) 找出平铺方案

Tile(node n)算法

- 为IR树中以n为根结点的子树找到平铺方案
- Label(n)标注与结点n匹配的所有瓦片的集合(即与结点n匹配的所有重写规则的集合)
- 假设IR树中每个结点至多有两个子结点，且一个重写规则的右侧至多有一个操作
- 按后跟次序遍历IR树，确保标注结点n之前先标注其子结点

(4) 找出平铺方案

Tile(node n)算法

```
Label(n) <- empty;   //按后根次序遍历IR树，Label集合初始为空
if n has two children then //二元操作
    Tile(left(n))     //遍历左子树
    Tile(right(n))    //遍历右子树
    for each rule r that implements n //对能够实现结点n指定的操作的每个规则r
        if left(r) ∈ Label(left(n)) and right(r) ∈ Label(right(n))
            Label(n) <- Label(n) ∪ {r} //如左右子树均匹配，则r属于Label(n)
else if n has one child then //一元操作原理同二元操作
    Tile(left(n))
    for each rule r that implements n
        if left(r) ∈ Label(left(n))
            Label(n) <- Label(n) ∪ {r}
else //n是叶子结点
    Label(n) <- { all rules that implement n }
```

(4) 找出平铺方案

- Tile算法可以从整个操作树集合(重写规则集合)中找到所有可能的平铺方案
- 如何快速找到最低成本的平铺方案?
  - 从所有匹配的平铺方案中找到最低成本匹配（低效）
  - 利用动态规划方法找到最低成本匹配（高效）

(4) 找出平铺方案

- 利用动态规划方法找到最低成本匹配
  - 在Tile算法的基础上考虑每个瓦片(重写规则)的成本
  - 在自底向上遍历中，计算每个结点的成本，选择最低成本的匹配
    - 成本=与结点n匹配的规则的成本 + n的所有子树的成本之和
    - 要考虑操作数的存放位置（如寄存器，内存或常量立即数）
  - 通过累加成本并在每个结点处选择最低成本的匹配，保证生成**局部最优，全局低成本**的平铺方案

5.3.3 窥孔优化方法

- 是基于线性IR的指令选择优化方法
- 窥孔优化(Peehole Matching)基本思想
  - 编译器使用滑动窗口(也称为窥孔)在代码上移动
  - 每次仅考察窥孔中的指令序列(一小段相邻指令序列)
  - 寻找可以改进的特定模式
  - 识别出一个模式时，使用更好的指令序列重写该模式
- 快速高效：有限的模式集合+有限的关注区域

填空题 1分

设置

利用窥孔优化技术，将下列代码改写为更有的指令 [填空1]

```
str  r1, [fp, #-4]
ldr  r1, [fp, #-4]
```

以ARMv7指令集为例

作答

(1) 窥孔优化示例

- 调用store指令后调用load指令, 或调用push调用pop

original	improved
str r1, [fp, #-4] ldr r1, [fp, #-4]	str r1, [fp, #-4]
push {fp} pop {fp}	---

以ARMv7指令集为例

(1) 窥孔优化示例

简单的代数恒等式

original	improved
add r1, r1, #0	---
mul r2, r1, #2	add r2, r1, r1
mul r2, r1, #4	lsl r2, r1, #2

以ARMv7指令集为例

(1) 窥孔优化示例

跳转指令

original

```
        B .L1
.L1:
        B .L2
```

improved

```
B   .L2
```

以ARMv7指令集为例

(2) 窥孔优化实现

- 早期实现
  - 一组有限的手工编码模式
  - 窗口很小（通常只有2、3条指令）
  - 通过穷举搜索进行模式匹配
  - 有限的模式+小窗口，保证了算法的高效运行
- 现代实现
  - 日益复杂的指令集驱动更系统化的处理方法
  - 处理过程划分为三个任务：展开、简化和匹配
  - 使用符号解释(symbolic interpretation)和简化的系统化应用

(2) 窥孔优化实现

- 展开程序
  - 识别IR形式的输入代码，重写为一系列底层IR(LLIR, Low-Level IR)操作
  - 该LLIR需表示原IR操作的所有直接影响
    - 如设置add操作的条件码
  - 基于模板进行重写，各操作逐一展开，无需考虑上下文

(2) 窥孔优化实现

COMP CCRG Open MP

- 简化程序
  - 通过一个小滑动窗口对LLIR进行一趟处理
  - 以系统化方式进行局部优化
    - 前向替换
    - 代数化简（x+0 => x)
    - 常量传播
    - 死代码消除
  - 简化程序是处理过程的核心

(2) 窥孔优化实现

匹配程序

- 对着模式库比较简化过的LLIR，寻找能够以最低成本保留住LLIR中所有效应的模式
  - 保证正确性的效应必须保留
  - 可以有新的不影响正确性的效应
- 输出目标机指令(通常是汇编码)

本讲小结

- 指令选择概述
  - 指令选择实现从IR到指令的映射
  - 目标是生成成本最小的指令序列
  - 指令选择的复杂性
- 低层次中间表示
  - 在指令选择之前，可以将中间代码转换为更底层的中间表示
  - 不同形式的低层次中间表示：树IR和线性IR

本讲小结

- 指令选择方法
  - 基于宏扩展的指令选择方法
  - 基于树模式匹配的指令选择方法
    - 用操作树表示目标机指令
    - 用操作树去平铺IR树，找到平铺方案
    - 基于重写规则进行代码生成
  - 基于窥孔优化的指令选择方法
    - 快速高效：小滑动窗口+有限的匹配模式

作业

- 写出表达式x <- a[i] * b * t 对应的低层次IR树，基于课件中给出的目标机操作树(瓦片)，进行指令选择，包括生成一种平铺方案(画出所有的瓦片覆盖)，以及给出对应的目标机指令序列。
  - 其中，a实际是整型数组的指针的栈帧偏移，x实际是x的栈帧偏移，b实际是b的栈帧偏移，t和i是临时变量(其值已位于寄存器中)

参考资料

- 《现代编译原理C语言描述》(虎书) 第9章
- 《编译器设计》第二版 第11章