编译原理

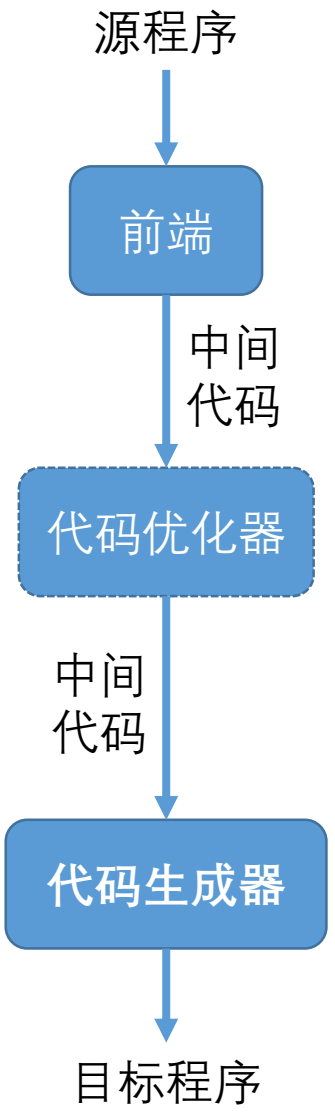
第九章 目标代码生成

方徽星
扬州大学 信息工程学院(505)
fanghuixing@yzu.edu.cn

2018年春季学期

本章主要内容

1. 代码生成器设计中的问题
2. 目标语言
3. 目标代码中的地址
4. 基本块和流图(Flow Graph)
5. 基本块的优化
6. 一个简单的代码生成器
7. 窥孔优化(Peephole Optimization)



第一节 代码生成器设计中的问题

1 代码生成器设计中的问题

- 代码生成器的输入
  - 由前端生成的源程序的**中间表示形式 + 符号表信息**
  - **用来确定**数据对象的运行时刻**地址**

IR
- 三地址表示方式：四元式、三元式、间接三元式
- 虚拟机表示方式：字节代码、堆栈代码
- 线性表示方式：后缀表示
- 图形表示方式：抽象语法树、$\boldsymbol{DAG}$

IR: Intermediate Representation

1 代码生成器设计中的问题

- 目标程序
  - 构造代码生成器会受**目标机器**的**指令集体系结构**影响

常见的目标机体系结构
- RISC：精简指令集计算机
- CISC：复杂指令集计算机
- 基于堆栈的结构

RISC	CISC	基于堆栈的结构
大量的通用寄存器 三地址指令 寻址方式简单 指令集体系结构简单	较少的寄存器 两地址指令 寻址方式复杂多样 寄存器种类多 可变长度的指令 具有副作用的指令	运算通过运算分量压栈 再对栈顶运算分量进行 运算来完成 栈顶元素常在寄存器中 操作限制多

1 代码生成器设计中的问题

- 目标程序
  - 构造代码生成器会受**目标机器**的**指令集体系结构**影响

机器语言程序

使用绝对地址：程序在内存中某个固定位置，可快速编译执行

可重定位：
- 可将各个子程序分别编译，使用链接加载器；
- 灵活；
- 如果目标机没有自动处理重定位，编译器需要向加载器提供重定位信息

输出汇编程序可以简化代码生成过程

生成符号指令，使用宏机制帮助生成代码

1 代码生成器设计中的问题

- 指令选择
  - 从IR程序到目标机代码序列的映射复杂性由如下因素决定
    - **IR的层次**
    - 指令集体系结构本身特性
    - 期望代码质量

IR是高层次的	IR是低层次的
使用代码模板把每个IR语句翻译成机器指令序列，会产生质量不佳的代码	代码生成器可以使用低层次信息来生成更加高效的代码序列

1 代码生成器设计中的问题

- 指令选择
  - 从IR程序到目标机代码序列的映射复杂性由如下因素决定
    - IR的层次
    - **指令集体系结构本身特性**
    - 期望代码质量

如果目标机没有统一方式来支持每种数据类型
则总体规则的每个例外都需要进行特别处理

1 代码生成器设计中的问题

- 指令选择
  - 从IR程序到目标机代码序列的映射复杂性由如下因素决定
    - IR的层次
    - 指令集体系结构本身特性
    - **期望代码质量**

      如果不考虑目标程序的效率，则指令选择是简单的
      对于每一种三地址语句，可以生成一个代码骨架

如：

三地址语句：
x = y + z

汇编代码：
LD R0, y
ADD R0, R0, z
ST x, R0

但常常会产生冗余的加载和存储运算

1 代码生成器设计中的问题

- 指令选择

```
a = b + c
d = a + e
```

```
LD   R0, b        // R0 = b
ADD  R0, R0, c    // R0 = R0 + c
ST   a, R0        // a = R0
LD   R0, a        // R0 = a
ADD  R0, R0, e    // R0 = R0 + e
ST   d, R0        // d = R0
```

✓第四个语句是冗余的
✓如果a以后不再被使用，则第三个与语句也是冗余的

1 代码生成器设计中的问题

- 指令选择
  - 一个给定的IR程序可以用**多种不同的目标代码**序列来实现，不同的实现代码**差异可能显著**
  - 如果目标机有“加一”指令(**INC**)，三地址语句**a = a + 1**

INC a *vs*

```
LD   R0, a          // R0 = a
ADD  R0, R0, #1     // R0 = R0 + 1
ST   a, R0          // a = R0
```

1 代码生成器设计中的问题

- 寄存器分配
  - 资源有限：通常没有足够的寄存器来存放所有的值
  - 有效利用很重要
    - 寄存器分配：选择一组变量，待存放入寄存器
    - 寄存器指派：选择一个寄存器安放某个变量
- 求值顺序
  - 计算执行的顺序会影响目标代码的效率
  - 某些计算顺序对用于存放中间结果的寄存器需求更少
  - 一般情况下，找到最好的顺序是一个NP完全问题

第二节　目标语言

2 目标语言

- 三地址机器目标机模型
  - 内存按照字节寻址
  - 具有n个通用寄存器R0,…,Rn-1
- 可用指令
  - 加载操作：指令LD dst, addr把位置addr上的值加载到位置dst,
    - 该指令表示赋值 dst = addr
    - LD r, x把位置x中的值加载到寄存器r中
    - LD r_1, r_2把寄存器r_2的内容复制到寄存器r_1
  - 保存操作：指令ST x, r 把寄存器r 中的值保存到位置x
    - 该指令表示赋值 x = r

2 目标语言

- 可用指令
  - 计算操作：形如OP dst, src_1, src_2，其中
    - OP是运算符，如：ADD、SUB
    - dst、src_1和 src_2是位置
    - 把运算作用在位置src_1和 src_2中的值上，然后把结果放在位置dst中
    - SUB r_1, r_2, r_3计算了$r_1 = r_2 - r_3$
    - 单目运算没有src_2

2 目标语言

- 可用指令
  - 无条件跳转：
    - 指令BR L使得控制流转向标号为L的机器指令
  - 条件跳转：Bcond r, L，其中
    - r是一个寄存器，
    - L是一个标号
    - cond代表了对寄存器r中的值所做的测试
    - 如：当寄存器r中的值小于0时，BLTZ r, L使得控制流跳转到标号L；否则，控制流传递到下一个机器指令

2 目标语言

- 寻址模式，指令中的位置可以是：
  - **变量名x**，指向分配给**x**的内存位置，即**x**的左值
  - 带有下标的形如$a(r)$的地址，其中
    - a是一个变量，
    - r是一个寄存器
    - $a(r)$所表示的内存地址 = a的左值 + r中的值
    - **LD R1, a(R2)**的效果是

      R1 = contents(a + contents(R2))，

      contents(x)表示**x**所代表的寄存器或内存位置中存放的内容

2 目标语言

- 寻址模式，指令中的位置可以是：
  - **以寄存器为下标的整数**
    - LD R1, **100(R2)**的效果是

      R1 = **contents**(**100** + **contents**(R2))

      ✓首先计算寄存器R2中的值加上100得到的和，
      ✓然后把这个和所指向的位置中的值加载到R1中
  - **直接常数寻址**
    - LD R1, **#100**把整数100加载到R1中，
    - ADD R1, R1, **#100**把100加到寄存器R1中去

2 目标语言

- 寻址模式，指令中的位置可以是：
  - ***r***表示在寄存器***r***的内容所表示的位置上存放的内存位置
  - ****100(r)***表示***r***中内容加上**100**的和所代表的位置上的内容所代表的位置
  - **LD R1, *100(R2)**的效果是把**R1**设置为

    contents(contents(100 + contents(R2)))

2 目标语言

- 三地址代码$x = y - z$可以使用下面的机器指令序列实现：

```
LD R1, y          //R1 = y
LD R2, z          //R2 = z
SUB R1, R1, R2    //R1 = R1 – R2
ST x, R1          //x = R1
```

可能的优化：

- 如果y或z已经存放在寄存器中，则可以避免相应的LD步骤
- 如果x的值被使用时都存放在寄存器中，且之后不会再被用到，则不需要把值保存回x

2 目标语言

- 假设a是数组，下标从0开始，每个元素占8字节
  如下指令序列实现三地址语句**b = a[i]**:

```
LD R1, i              //R1 = i
MUL R1, R1, 8         //R1 = R1×8
LD R2, a(R1)          //R2 = contents(a + contents(R1))
ST b, R2              //b = R2
```

2 目标语言

- 三地址指令 **a[j] = c**可以实现为:

```
LD R1, c          //R1 = c
LD R2, j          //R2 = j
MUL R2, R2, 8     //R2 = R2×8
ST a(R2), R1      //contents(a + contents(R2)) = R1
```

2 目标语言

- 三地址指令 **x = *p**可以实现为:

```
LD R1, p          //R1 = p
LD R2, 0(R1)      //R2 = contents(0+contents(R1))
ST x, R2          //x = R2
```

- 三地址指令 ***p = y**可以实现为:

```
LD R1, p          //R1 = p
LD R2, y          //R2 = y
ST 0(R1), R2      //contents(0+contents(R1)) = R2
```

2 目标语言

- 带条件跳转的三地址指令 **if x < y goto L**可以实现为:

```
LD R1, x          //R1 = x
LD R2, y          //R2 = y
SUB R1, R1, R2    //R1 = R1 – R2
BLTZ R1, M        // if R1 < 0 jump to M
```

M是从标号为L的三地址指令所产生的机器指令序列中的第一个指令的标号

2 目标语言

- **指令的代价**
  - 指令的代价 = 1 + 运算分量寻址模式相关代价
  - 寄存器寻址模式具有附件代价为0
  - 内存位置或常数的寻址方式的附件代价为1
  - LD R0, R1把寄存器R1中的内容复制到寄存器R0中，指令**代价为1**
  - LD R0, M把内存位置M中的内容加载到寄存器R0中，指令**代价为2**
  - LD R1, *100(R2)把值

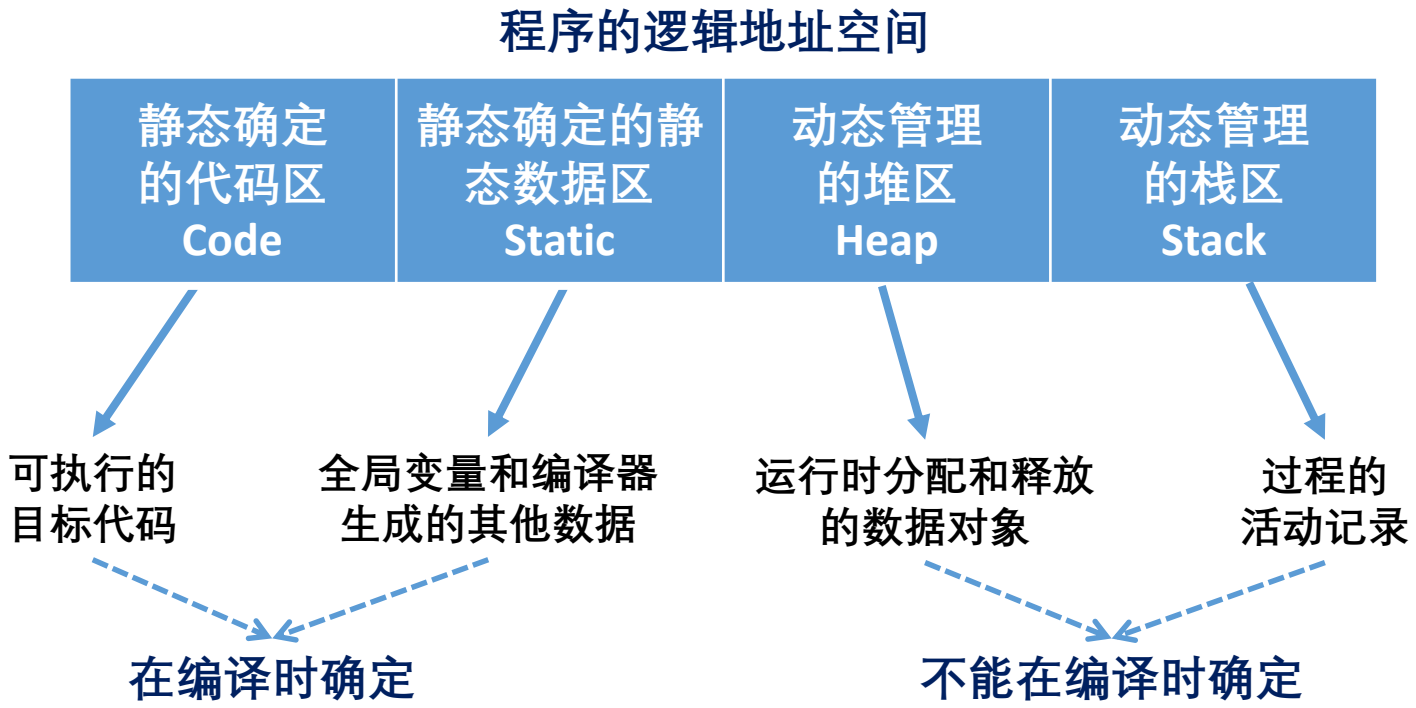
    contents(contents(100+contents(R2)))

    加载到寄存器R1中，**代价为3**

第三节　目标代码中的地址

3 目标代码中的地址

- 如何使用静态和栈式内存分配为简单的**过程调用和返回**生成代码？



3.1 静态分配

- 假设活动记录的开始位置存放返回地址
- 关注如下三地址语句
  - **call** *callee*、**return** 、**halt** 和 **action**

```
ST   callee.staticArea, #here+20
BR   callee.codeArea
```

✓ **ST**把返回地址保存在***callee***的活动记录开始处

✓ **BR**把控制传递到被调用过程***callee***的目标代码上

✓ *staticArea*是活动记录的开始地址

✓ *codeArea*是指向***callee***的第一个指令的地址

3.1 静态分配

- 假设活动记录的第一位置存放返回地址
- 关注如下三地址语句
  - **call** *callee*、**return** 、**halt** 和 **action**

BR ***callee.staticArea***

把控制流转到保存在*calle*的活动记录开始地址上

3.1 静态分配

- 例：三地址代码及静态分配的目标代码

//过程c的代码
$action_1$
call p
$action_2$
halt
//过程p的代码
$action_3$
return

```
                          // code for c
100:  ACTION1             // code for action1
120:  ST 364, #140        // save return address 140 in location 364
132:  BR 200              // call p
140:  ACTION2
160:  HALT                // return to operating system
      ...
                          // code for p
200:  ACTION3
220:  BR *364             // return to address saved in location 364
      ...
                          // 300-363 hold activation record for c
300:                      // return address
304:                      // local data for c
      ...
                          // 364-451 hold activation record for p
364:                      // return address
368:                      // local data for p
```

3.2 栈分配

- 在保存活动记录时使用相对地址
- 在寄存器SP中维护一个指向栈顶的活动记录的开始处的指针，偏移量为正数
  - 发生**过程调用**时，**增加SP的值**，并把控制传递到被调用过程
  - 控制**返回**到调用者时，**减少SP的值**，释放被调用过程的活动记录

3.2 栈分配

- 第一个过程的代码把寄存器SP设置为内存中栈区的开始位置，完成对栈的初始化

1. **LD SP，#stackStart　//初始化栈**
2. **Code for the first procedure**
3. **HALT　//结束执行**

3.2 栈分配

- 一个过程调用指令序列增加SP的值，保存返回地址，并把控制传递到被调用过程

1. **ADD SP，SP，#caller.recordSize　　//增加栈指针**
2. **ST　0(SP)，#here+16　　//保存返回地址**
3. **BR　callee.codeArea　　//转移到被调用过程**

➢运算分量#caller.recordSize表示一个活动记录的大小

➢运算分量#here+16是跟随在BR之后的指令的地址

3.2 栈分配

- 返回指令序列
  - **被调用过程**使用如下指令把控制流传递到返回地址

BR　*0(SP)　　//控制返回给调用者

➢**0(SP)是活动记录的第一个字所在的位置**

➢***0(SP)是存放在该位置上的返回地址**

  - **调用者**恢复SP

SUB　SP，SP，#caller.recordSize

➢ **该指令指向后，SP指向调用者活动记录开始处**

3.2 栈分配

- 例：假设过程m、p和q的活动记录大小已经确定，分别是msize、psize和qsize

```
                    // code for m
action1
call q
action2
halt
                    // code for p
action3
return
                    // code for q
action4
call p
action5
call q
action6
call q
return
```

```
100：LD SP，#600          //初始化栈
108：ACTION1              //action1的代码
128：ADD SP，SP，#msize
136：ST 0(SP)，#152       //返回地址入栈
144：BR 300               //调用q
152：SUB SP，SP，#msize       //恢复SP
160：ACTION2
180：HALT
.....
200：ACTION3
220：BR *0(SP)
.....
300：ACTION4
.....
```

3.2 栈分配

- 例：假设过程m、p和q的活动记录大小已经确定，分别是msize、psize和qsize

```
                    // code for m
action1
call q
action2
halt
                    // code for p
action3
return
                    // code for q
action4
call p
action5
call q
action6
call q
return
```

```
300：ACTION4
320：ADD SP, SP, #qsize
328：ST 0(SP), #344        //返回地址入栈
336：BR 200                //调用p
344：SUB SP, SP, #qsize
352：ACTION5
372：ADD SP, SP, #qsize
380：ST 0(SP), #396        //返回地址入栈
388：BR 300                //调用q
…
432：ST 0(SP), #448        //返回地址入栈
440：BR 300                //调用q
448：SUB SP, SP, #qsize
456：BR *0(SP)             //返回
…
600：                      //栈区的开始处
```

第四节　基本块和流图

4 基本块和流图

- **用图表示中间代码：**
  - 把中间代码划分为**基本块(basic block)**，每个基本块满足如下条件的**最大**的**连续三地址指令序列**：
    - 控制流**只能从**基本块中的**第一个指令**进入
    - 除了基本块的最后一个指令，控制流在**离开**基本块之**前不会停机或跳转**
  - 基本块形成**流图(flow graph)**的结点，结点之间的**边**指明可能的执行次序

4.1 基本块

- 把三地址指令序列划分为基本块（算法）：
  - **输入：**一个三地址指令序列
  - **输出：**输入序列对应的一个基本块列表，其中每个指令恰好被分配给一个基本块
  - **方法：**
    - 首先，**确定首指令**：某个基本块的第一个指令；
    - 然后，**确定基本块**：**从首指令开始**，直到**下一个首指令**(不含)或者中间程序的**结尾指令**之间的所有指令

4.1 基本块

- **选择首指令的规则：**
  - 中间代码的**第一个三地址指令**是一个首指令
  - 任意一个条件或无条件**转移**指令的**目标指令**是一个首指令
  - 紧跟在一个条件或无条件**转移指令之后**的指令是一个首指令

4.1 基本块

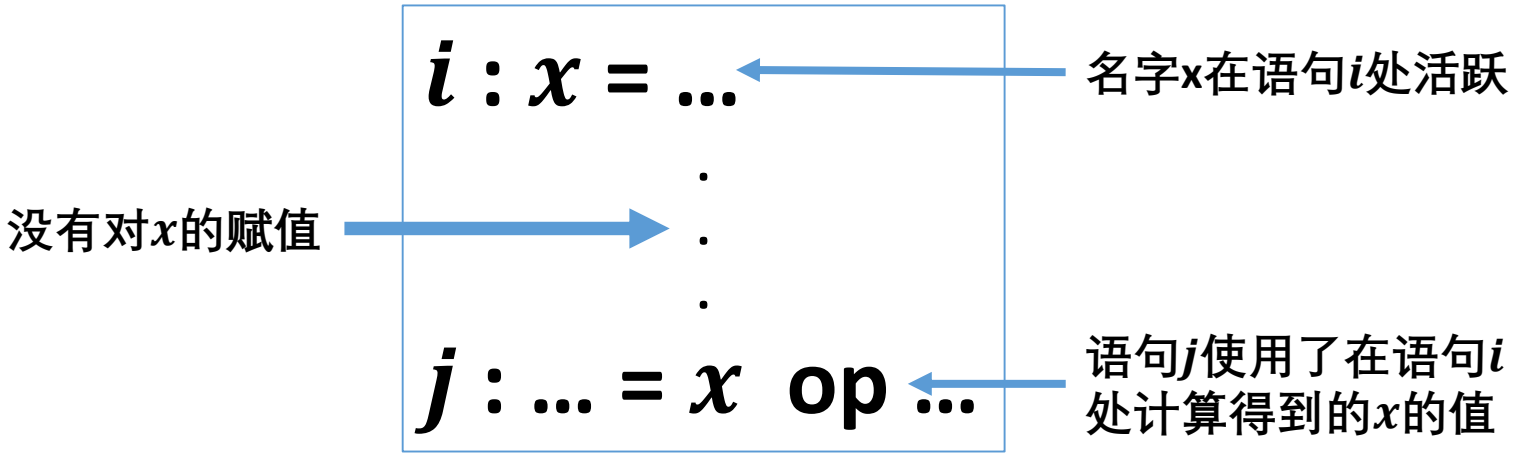
```
 1)   i = 1
 2)   j = 1
 3)   t1 = 10 * i
 4)   t2 = t1 + j
 5)   t3 = 8 * t2
 6)   t4 = t3 - 88
 7)   a[t4] = 0.0
 8)   j = j + 1
 9)   if j <= 10 goto (3)
10)   i = i + 1
11)   if i <= 10 goto (2)
12)   i = 1
13)   t5 = i - 1
14)   t6 = 88 * t5
15)   a[t6] = 1.0
16)   i = i + 1
17)   if i <= 10 goto (13)
```

确定首指令：

- 第一个三地址指令：
  - **指令1**
- 转移目标指令：
  - **指令3**
  - **指令2**
  - **指令13**
- 转移指令的下一条指令：
  - **指令10**
  - **指令12**

4.2 后续使用信息

- 名字的后续使用信息可用于优化
- 三地址语句中对名字的使用：

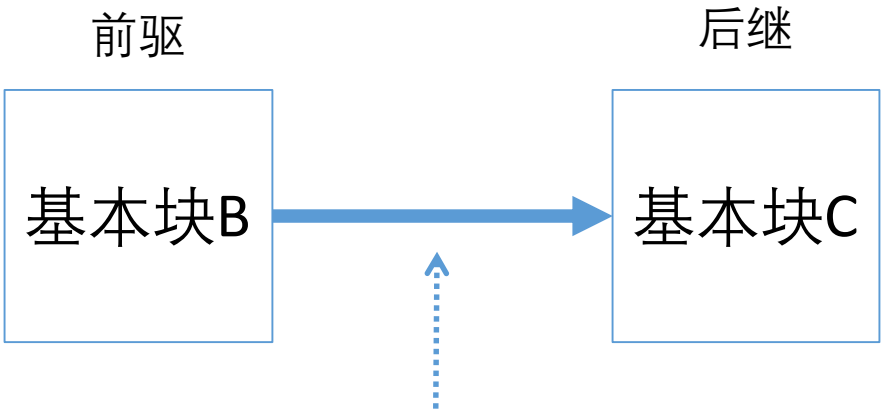


如果名字x的值在某点之后还要被引用，则x在该点是活跃的

4.2 后续使用信息

- **确定基本块中活跃与后续使用信息(算法)**
  - **输入：**基本块B，假设在开始的时候符号表显示B中的所有非临时变量都是活跃的
  - **输出：**对于B的每个语句$i: x = y + z$，将x、y及z的活跃性信息及后续使用信息关联到i
  - **方法：**从B的最后一个语句开始，反向扫描到B的开始处，对于每个语句$i: x = y + z$：
    1. 把符号表中x、y及z的当前后续使用和活跃性信息与语句i关联起来
    2. 在符号表中，设置x为“不活跃”和“无后续使用”
    3. 在符号表中，设置y和z为“活跃”，把把它们的下一次使用设置为语句i

4.3 流图



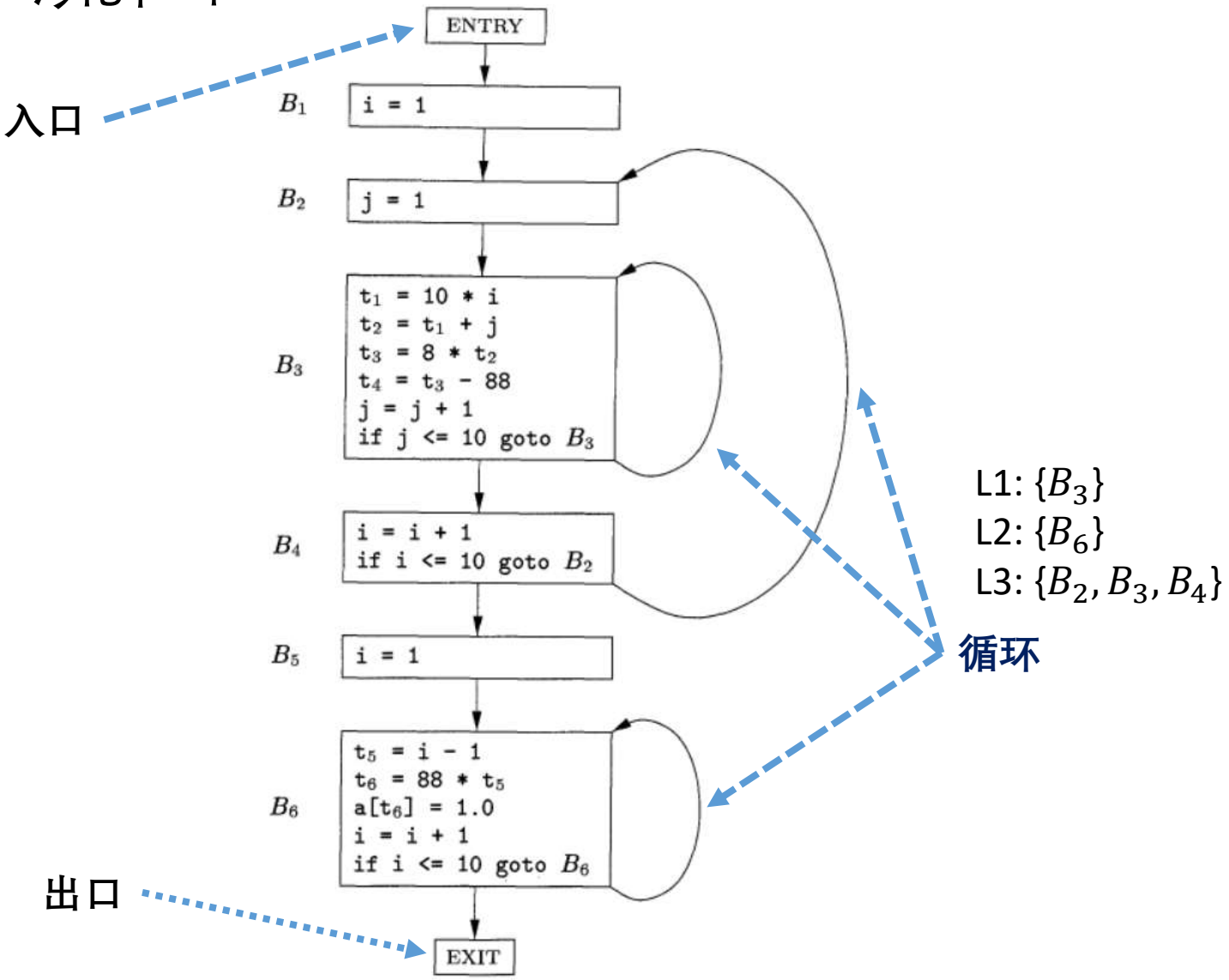
C的第一个指令可能紧跟在B的最后一个指令之后执行，两种情况：

- ✓ 有一个**从B的结尾跳转到C的开头**的条件或无条件**跳转语句**，或者
- ✓ **C紧跟在B之后**，且B的结尾**不存在无条件跳转**语句

4.3 流图

- 流图**入口**结点
  - 从入口到第一个可执行结点有一条边
- 流图**出口**结点
  - 从任何包含了可能是程序的最后执行指令的基本块到出口有一条边
  - 如果程序的最后指令不是无条件转移指令，则相应的基本块是出口结点的一个前驱
  - 任何包含跳转到程序之外的跳转指令的基本块是出口结点的前驱

4.3 流图


入口
ENTRY
B_1
i = 1
B_2
j = 1
B_3
t1 = 10 * i
t2 = t1 + j
t3 = 8 * t2
t4 = t3 - 88
j = j + 1
if j <= 10 goto B_3
B_4
i = i + 1
if i <= 10 goto B_2
B_5
i = 1
B_6
t5 = i - 1
t6 = 88 * t5
a[t6] = 1.0
i = i + 1
if i <= 10 goto B_6
出口
EXIT
L1: $\{B_3\}$
L2: $\{B_6\}$
L3: $\{B_2, B_3, B_4\}$
循环

4.3 流图

- 循环L的入口结点E
  - 是唯一的，前驱可能在L之外的结点
  - 从流图入口到L中任何结点必经E
  - E不是流图入口结点
  - L中每个结点都能够到达E，且路径全部在L中

第五节　基本块的优化

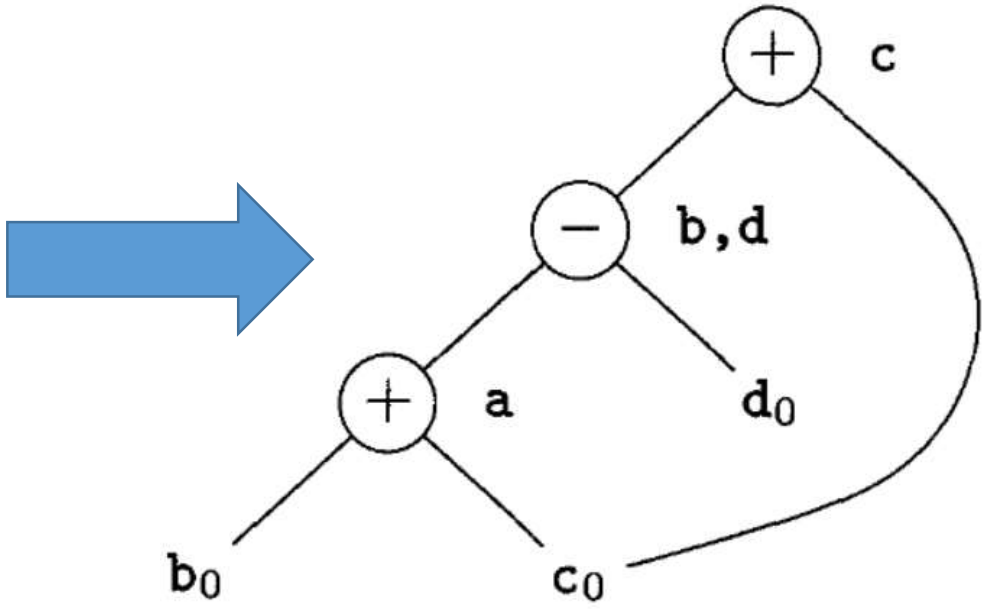
5.1 基本块的DAG表示

- **为基本块构造DAG(有向无环图)：**
  - 块中每个变量v有结点，代表初始值v_0
  - 每个语句s有一个结点N，其标号是s的运算符
  - N的子结点i对应于其他语句t_i，语句t_i在s之前对s的某个运算分量p_i进行定值，且是最晚的
  - **N关联一组变量x_i，表示语句s是在此基本块内最晚对x_i定值的语句**
  - **输出结点：**相关变量在基本块出口处**活跃**

5.2 局部公共子表达式

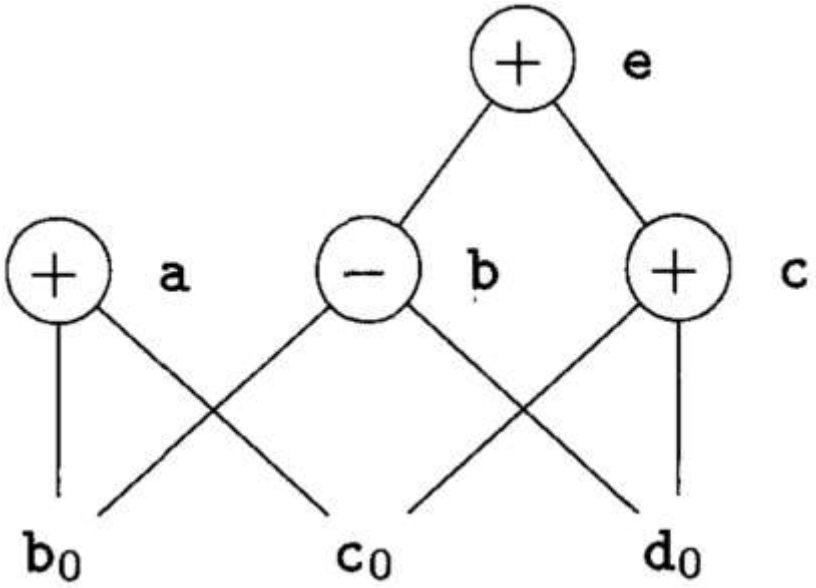
- 建立某个结点M之前，首先检查是否存在一个结点N，它和M具有相同的运算符和子结点（顺序也相同）
- 如果存在，则不需要生成新的结点，用N代表

1. **a = b + c**
2. **b = a – d**
3. **c = b + c**
4. **d = a – d**



5.3 消除死代码

- 在DAG上消除没有附加活跃变量的根结点



如果图中c、e不是活跃变量，则可以删除标号为e、c的结点

5.4 使用代数恒等式

- 代数恒等式表示基本块的另一类重要的优化方法

消除计算步骤

$$x + 0 = 0 + x = x \quad x - 0 = x$$
$$x \times 1 = 1 \times x = x \quad x/1 = x$$

强度消减

$$x^2 = x \times x$$
$$2 \times x = x + x$$
$$x/2 = x \times 0.5$$

常量合并

$$2 \times 3.14 = 6.28$$

其他：条件表达式和算术表达式、结合律、交换律

5.5 数组引用的表示

- 考虑三地址指令序列
  1. $x = a[i]$
  2. $a[j] = y$
  3. $z = a[i]$

  如果把$a[i]$看作一个公共子表达式，可能会把

  $$z = a[i]$$

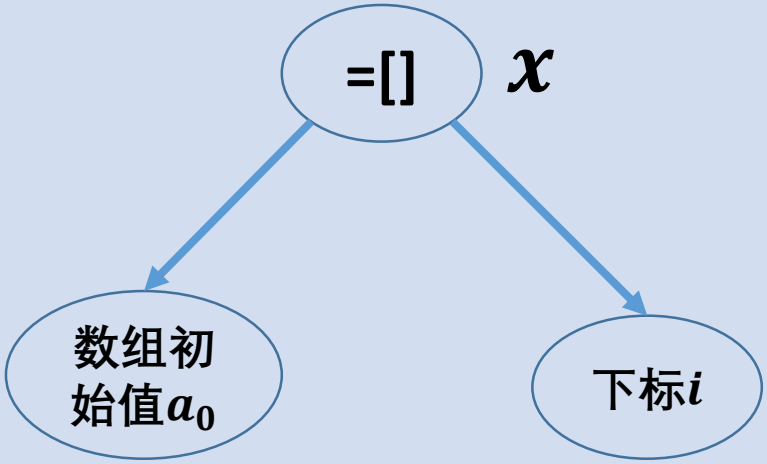
  优化为

  $$z = x$$

但是，a[j] = y可能会改变a[i]的值，因此优化不合法

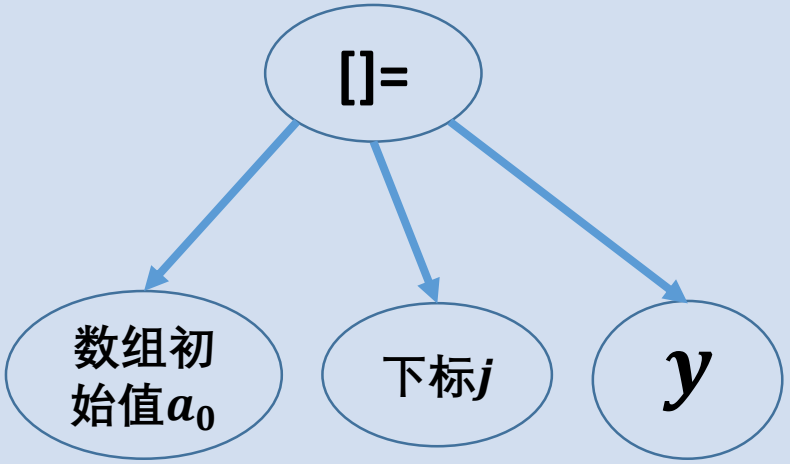
5.5 数组引用的表示

- 在有向无环图中，表示数组访问的正确方法如下：

运算	方法
$\mathbf{1}.\boldsymbol{x} = \boldsymbol{a}[\boldsymbol{i}]$	

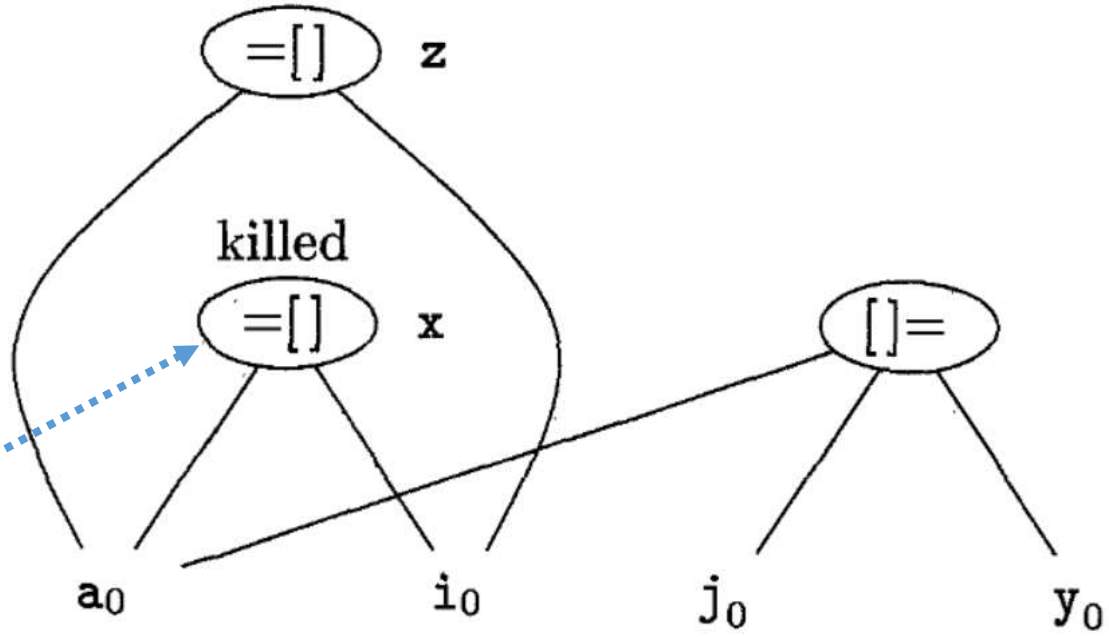
5.5 数组引用的表示

- 在有向无环图中，表示数组访问的正确方法如下：

运算	方法
$2.\ a[j] = y$	

5.5 数组引用的表示

- 考虑三地址指令序列
  1. $x = a[i]$
  2. $a[j] = y$
  3. $z = a[i]$

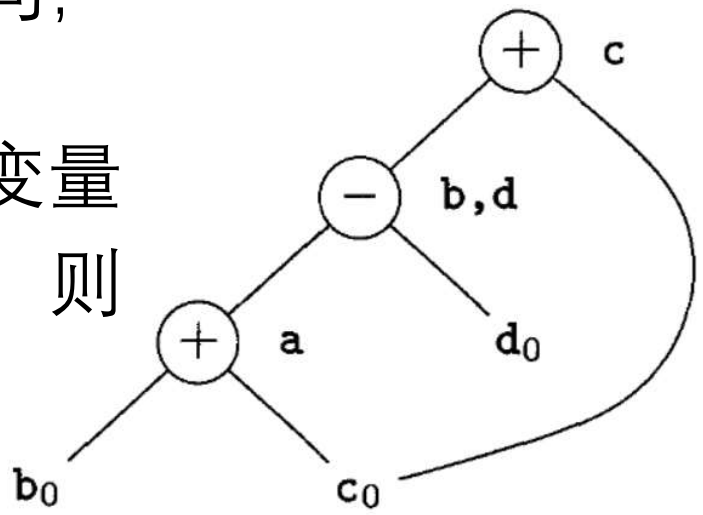


被杀死后，不能作为公共子表达式

有向无环图

5.6 从DAG到基本块的重组

- 每个结点构造一个三地址语句，计算对应的值
- 结果应该尽量赋给一个活跃变量
- 如果结点有多个关联的变量，则需要用复制语句进行赋值



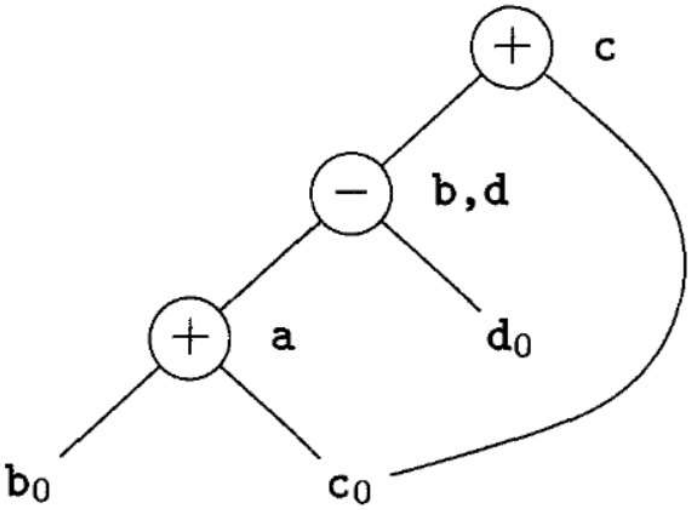
1. a = b + c
2. b = a – d
3. c = b + c
4. d = a – d

如果b在基本块出口不活跃

1. a = b + c
2. d = a – d
3. c = d + c

5.6 从DAG到基本块的重组

- 如果b和d都在基本块出口处活跃



1. a = b + c
2. b = a – d
3. c = b + c
4. d = a – d

1. a = b + c
2. d = a – d
3. b = d
4. c = d + c

5.6 从DAG到基本块的重组

- 重组时应该注意求值的顺序
  - 指令顺序必须遵守DAG中结点的顺序
  - 数组**赋值**必须跟在所有**原来**在它之前的**赋值/求值**操作之后
  - 数组元素**求值**必须跟在所有**原来**在它之前的**赋值**指令之后
  - **变量使用**必须跟在所有**原来**在它之前的**过程调用**和指针**间接赋值**之后
  - **过程调用**或者指针**间接赋值**必须跟在**原来**在它之前的任何**变量求值**之后

第六节　一个简单的代码生成器

6 一个简单的代码生成器

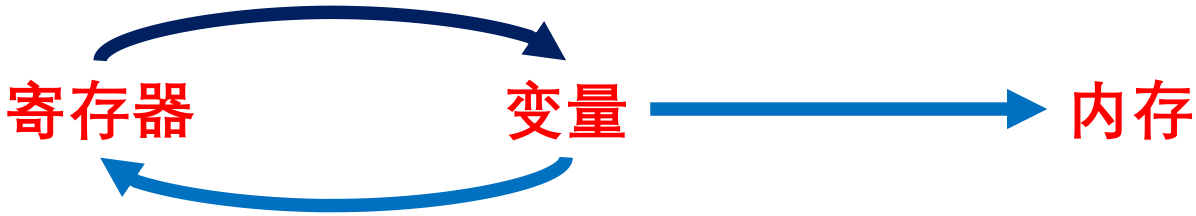
- 如何最大限度地利用寄存器资源？
- 寄存器的四种主要使用方法
  - 执行运算时，运算分量必须放在寄存器中
  - 用于存放临时变量
  - 用于存放全局的值，值被跨块使用时
  - 用于运行时存储管理

6 一个简单的代码生成器

- 尽可能把值存入寄存器，减少寄存器/内存之间的数据交换
- 为三地址指令生成机器指令时
  - 仅当运算分量不在寄存器中时，才从内存载入
  - 仅当寄存器中的值没用时，才覆盖它

6 一个简单的代码生成器

- 有必要维护值与位置之间的联系信息
  - **寄存器描述符：**跟踪各个寄存器都存放了哪些变量的当前值
  - **地址描述符：**某个变量的当前值存放在哪个或哪些位置(包括内存位置和寄存器)



6 一个简单的代码生成器

- 代码生成算法框架
  - 遍历三地址指令
    - 利用getReg(I)函数选择合适的寄存器
    - 根据可用寄存器资源生成机器指令
- 函数getReg(I)
  - 根据寄存器描述符和地址描述符、数据流信息，为指令I选择最佳的寄存器
  - 机器指令质量依赖于寄存器的选取算法

6 一个简单的代码生成器

- **运算的机器指令**

考虑三地址指令：**x = y + z**

- 调用**getReg(x=y+z)**，选择寄存器**Rx, Ry, Rz**
- 检查**Ry**的寄存器描述符，如果**y**不在**Ry**中则生成指令

  LD Ry y'　　（**y'**表示存放**y**值的当前位置）
- 类似地，确定是否生成：**LD Rz, z'**
- 最后，生成指令：**ADD Rx, Ry, Rz**

6 一个简单的代码生成器

- 复制语句的机器指令

考虑三地址指令： **x=y**

  - **getReg(x=y)**总是为**x**和**y**选择**相同的寄存器**
  - 如果**y**不在**Ry**中，生成机器指令**LD Ry, y**
  - 修改**Ry**的寄存器描述符， 表明**Ry**中也存放了**x**的值

- 基本块的收尾
  - 如果变量**x**在出口处活跃，且**x**现在不在内存，那么生成指令**ST x, Rx**

6 一个简单的代码生成器

- 修改寄存器和地址描述符的规则

规则1：指令 LD R x

- **R**的寄存器描述符只包含**x**
- **x**的地址描述符：**R**作为新位置加入到**x**的位置集合中
- 从其他变量的地址描述符中删除**R**

6 一个简单的代码生成器

- 修改寄存器和地址描述符的规则

规则2： ST x, R

- 修改**x**的地址描述符，包含自己的内存位置

规则3： ADD Rx, Ry, Rz

- **Rx**的寄存器描述符只包含**x**
- **x**的地址描述符只包含**Rx**（不含**x**的内存位置）
- 从其他变量的地址描述符中删除**Rx**

6 一个简单的代码生成器

- 修改寄存器和地址描述符的规则

规则4：处理x=y时

- 如果生成**LD Ry y**，按照**规则1**处理，然后
- 把**x**加入到**Ry**的寄存器描述符中（**Ry**存放了**x**和**y**的当前值）
- 修改**x**的地址描述符，使它**只包含Ry**

6 一个简单的代码生成器

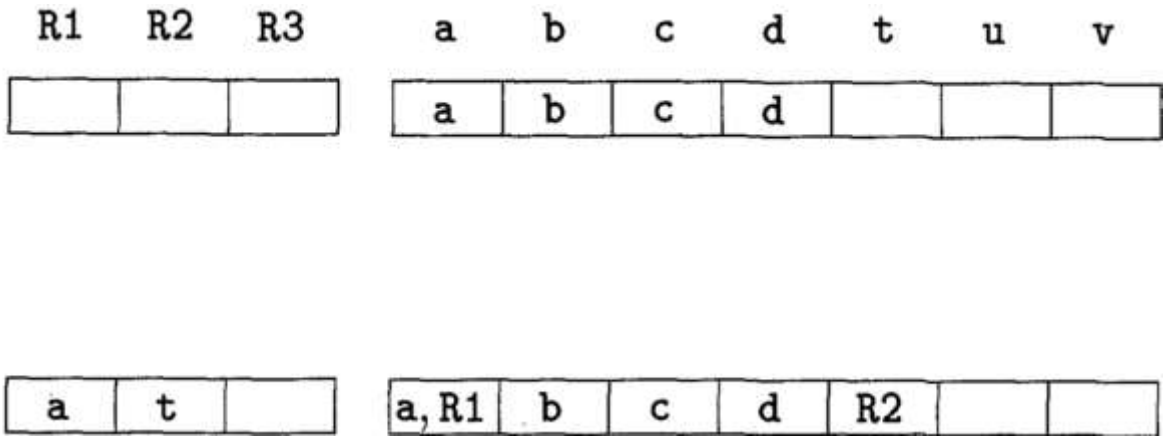
- 把如下基本块翻译成机器代码
  1. **t = a - b**
  2. **u = a – c**
  3. **v = t + u**
  4. **a = d**
  5. **d = v + u**

其中a、b、c、d在出口处活跃，t、u、v是局部临时变量

6 一个简单的代码生成器

处理第一条三地址指令

```
t = a - b
    LD R1, a
    LD R2, b
    SUB R2, R1, R2
```

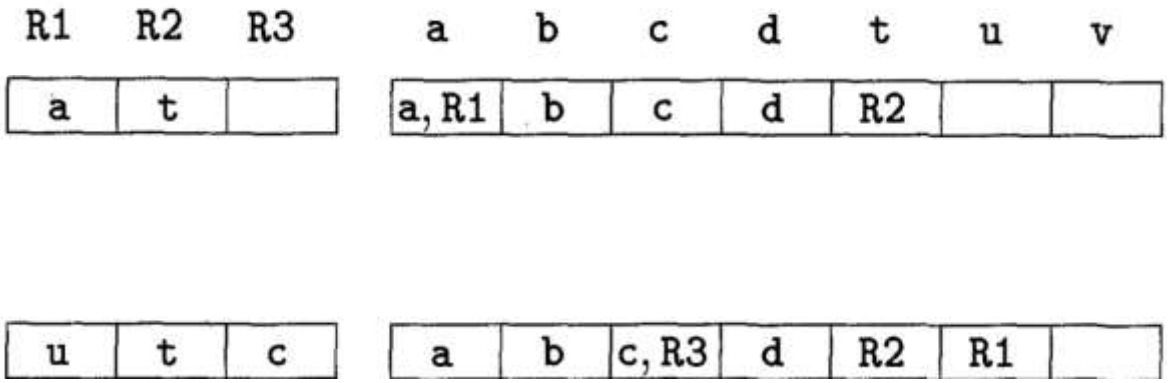


b的值在基本块内不再使用，所以可以使用R2来存放t的值

6 一个简单的代码生成器

处理第二条三地址指令

```
u = a - c
    LD R3, c
    SUB R1, R1, R3
```



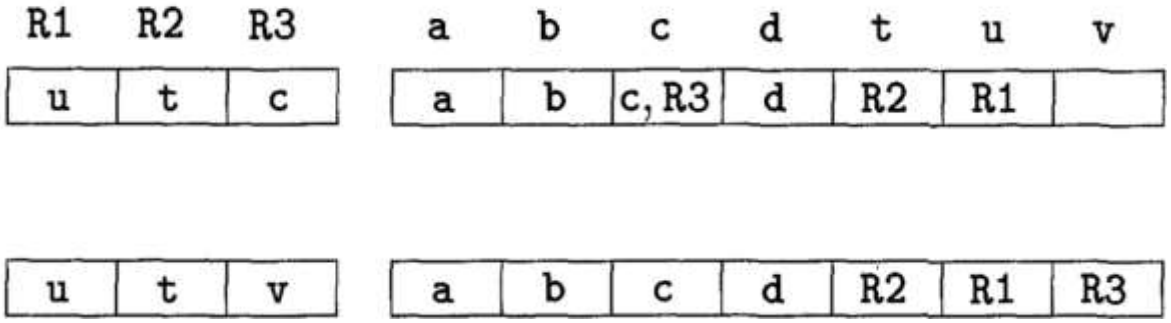
a的值在基本块内不再使用，所以可以使用R1来存放u的值

a的地址描述符被修改了，a不在R1中，但仍在内存中

6 一个简单的代码生成器

处理第三条三地址指令

```
v = t + u
    ADD R3, R2, R1
```

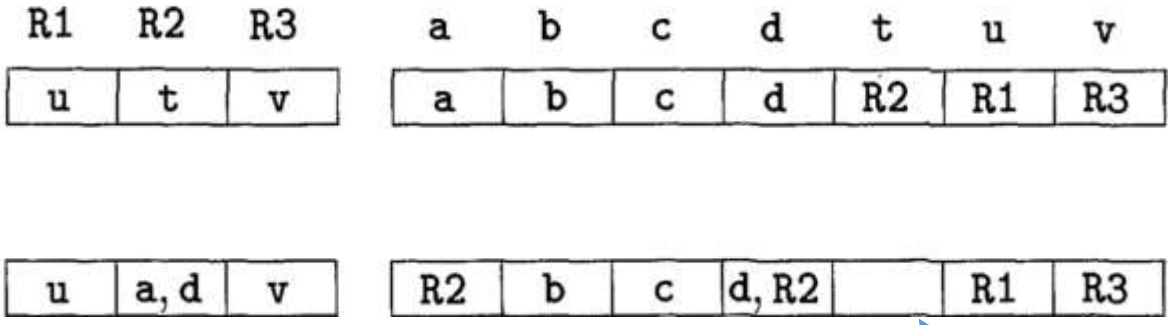


c的值在基本块内不再使用，所以可以使用R3来存放v的值

6 一个简单的代码生成器

处理第四条三地址指令

```
a = d
    LD R2, d
```



把a加入到R2的描述符中是处理复制语句的结果，不是指令自动处理的

t不再使用

6 一个简单的代码生成器

处理第五条三地址指令

```
d = v + u
    ADD R1, R3, R1
```

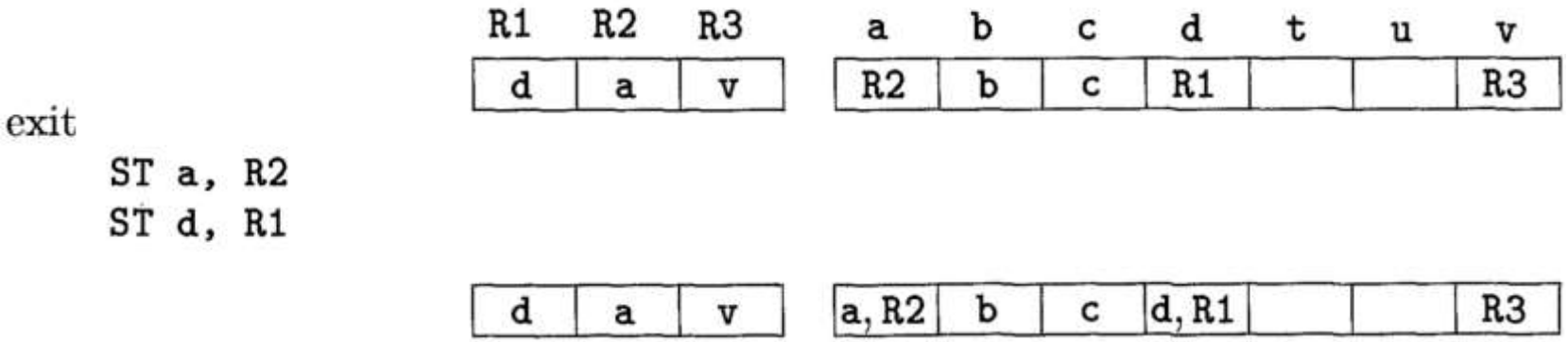
R1	R2	R3
u	a, d	v
d	a	v

a	b	c	d	t	u	v
R2	b	c	d, R2		R1	R3
R2	b	c	R1			R3

u不再使用

6 一个简单的代码生成器

收尾



将在出口处活跃的变量a和d的值保存回它们的内存位置

a、b、c、d在出口处活跃

第七节　窥孔优化

7 窥孔优化

- 使用一个滑动窗口(窥孔)来检查**指令**，在窥孔内实现优化
  - 冗余指令消除
  - 控制流优化
  - 代数简化
  - 机器特有指令的使用

7 窥孔优化

- 同一个基本块内多余的LD/ST指令
  - **LD R0，a**
  - **ST a，R0**

  可以删除其中的保存指令

7 窥孔优化

- 级联跳转代码

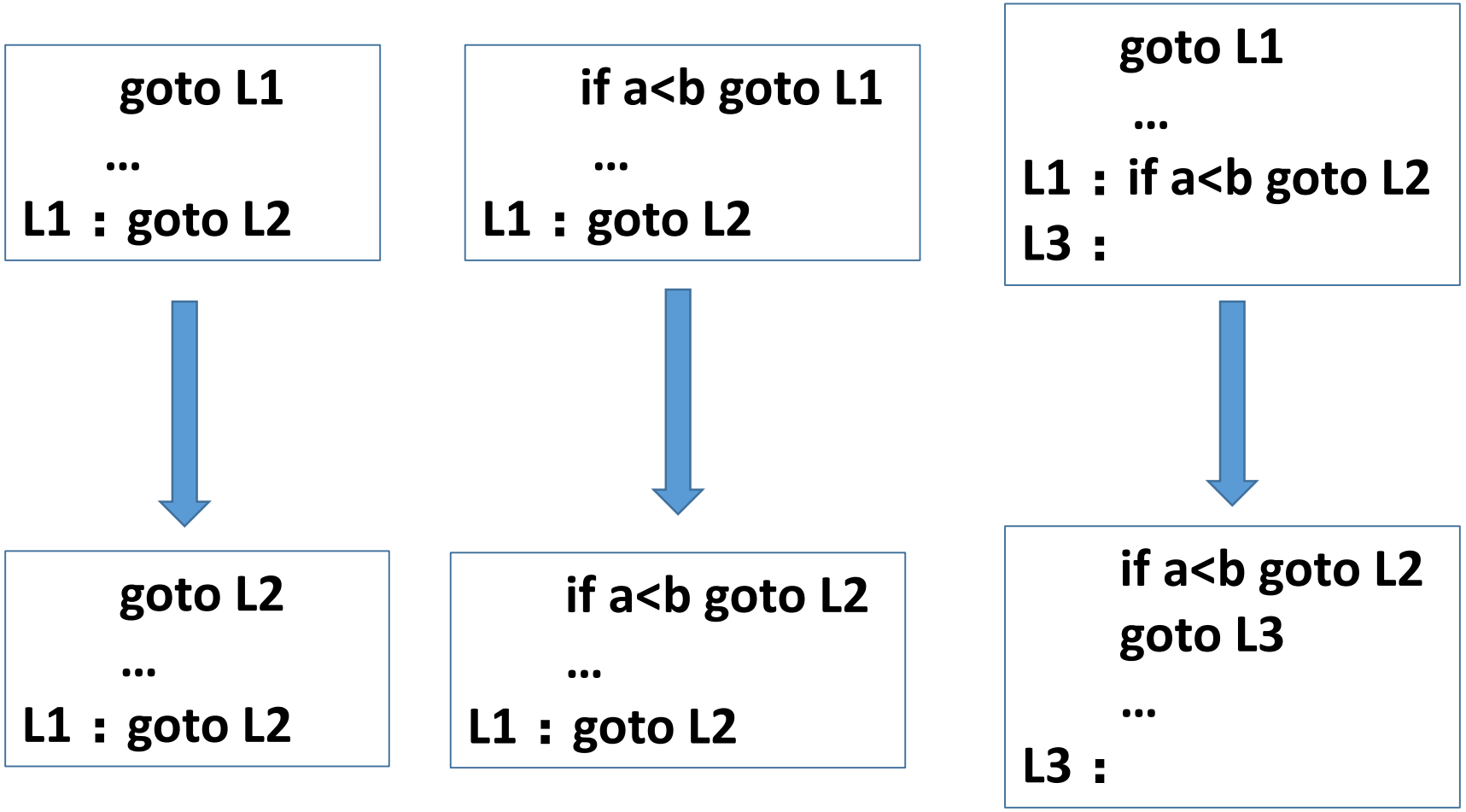
1. if debug==1 goto L1
2. goto L2

1. if debug!=1 goto L2

如果已知debug一定是0，那么替换成为goto L2

7 窥孔优化

- 控制流优化


goto L1
…
L1 : goto L2
goto L2
…
L1 : goto L2
if a<b goto L1
…
L1 : goto L2
if a<b goto L2
…
L1 : goto L2
goto L1
…
L1 : if a<b goto L2
L3 :
if a<b goto L2
goto L3
…
L3 :

7 窥孔优化

- 应用代数恒等式进行优化
  - 消除$x = x + 0$、 $x = x * 1$等
  - 使用$x * x$替换x^2
- 使用机器特有指令：INC，DEC等

小结

- 目标机器指令、寻址方式
- 基本块和流图的概念
- 基本块的局部优化
- 代码生成，维护寄存器和地址描述符
- 窥孔优化