10 过程内优化

徐辉，xuh@fudan.edu.cn

本章学习目标：

- 掌握常量分析优化方法
- 掌握冗余代码优化方法
- 掌握循环优化方法

过程内优化指的是以函数为对象进行的优化，与之相对的是过程间优化。

10.1 基于常量分析的优化

10.1.1 常量分析

常量分析指的是分析在某一程序点，某一变量或寄存器的值是否为固定不变的数值。该分析可以通过前向数据流分析完成，如果遇到合并节点取交集即可。

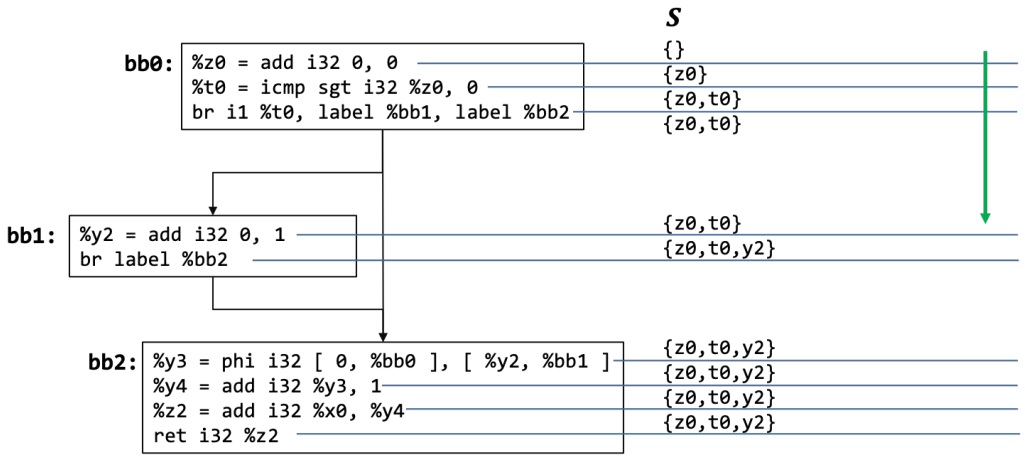


图 10.1: 面向 LLVM IR 的常量分析

以图 10.1中 SSA 形式的 LLVM IR 为例，我们可以采用表 10.1中的定义的 Transfer 函数分析每一个程序节点的常量集合。SSA 形式的常量分析比较简单，一个临时寄存器`%t0` 一旦被识别为常量，则不会变为变量；而非 SSA 形式的代码还需要考虑该寄存器或变量是否会被重新赋值的情况。

表 10.1: 常量分析 Transfer 函数定义

IR	举例	Transfer 函数
binOp 指令	`%t2 = add i32, %t0, %t1`	$S = S \cup \{t2\}$, `if` $t0 \in S$ `and` $t1 \in S$

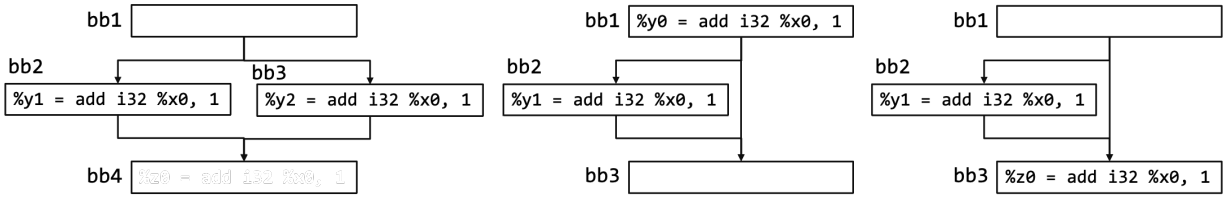
10.1.2 优化应用

基于常量分析的结果使用具体数值替换临时寄存器，从而在编译时完成一些计算，避免运行时开销，该过程称为常量传播。对于二元运算中仅有一个运算数为常量的情况，可以考虑是否存在指令合并的可能性。指令合并最简单的情况是：指令 1 的一个运算数为常量，另一个为变量；指令 2 的一个运算数为常量，另一个为指令 1 的运算结果，则可以对指令 2 的运算数进行优化。代码 10.1展示了这种情况和优化方式。

```
%y0 = add i32 %x0, 1
%y1 = add i32 %y0, 2 // 优化：%y1 = add i32 %x0, 3
```

代码 10.1: 指令合并

10.2 冗余代码优化



(a) 繁忙表达式　(b) 公共表达式　(c) 弱公共表达式

图 10.2: 基于 GVN 的优化

冗余代码一般分为以下几类：

- 死代码：即不会被执行的代码，如不可达的冗余代码块。以图 10.1为例，对其进行常量优化以后，发现 bb1 是不可达的，应当删除。
- 重复出现的代码：同一段代码在函数中出现多次，增大了代码体积。如对于相同的代码块可以合并，通过修改控制流实现等价的代码语义；另外一种情况是繁忙表达式，即同一表达式在不同的分支出现，并且其操作数值相同。图 10.2a展示了一个繁忙表达式的例子。
- 重复计算的代码：典型的情况是在操作数值未发生变化的情况下，对同一表达式其进行多次求值。以图 10.2b为例，`%y0` 和`%y1` 的计算方式相同，由于 bb1 支配 bb2，因此`%y1` 的求值运算是多余的，可以直接采用`%y0` 的结果，这种情况称为公共表达式。如果这两个表达式不存在支配关系也存在优化的可能性，即图 10.2c所示的弱公共表达式情况，可将表达式提前（hoist）至 bb1。

繁忙表达式和公共表达式本质上是对代码中的表达式进行 GVN（global value numbering）分析，从而优化表达式的位置和计算次数。

10.3 循环优化

循环优化是对于提升代码运行效率效果最显著的优化手段之一，其核心思想是将循环内重复执行的代码提前至循环外的支配节点，避免代码被重复执行。下面先介绍代码控制流图中的循环检测方法，再介绍具体的循环优化技巧。

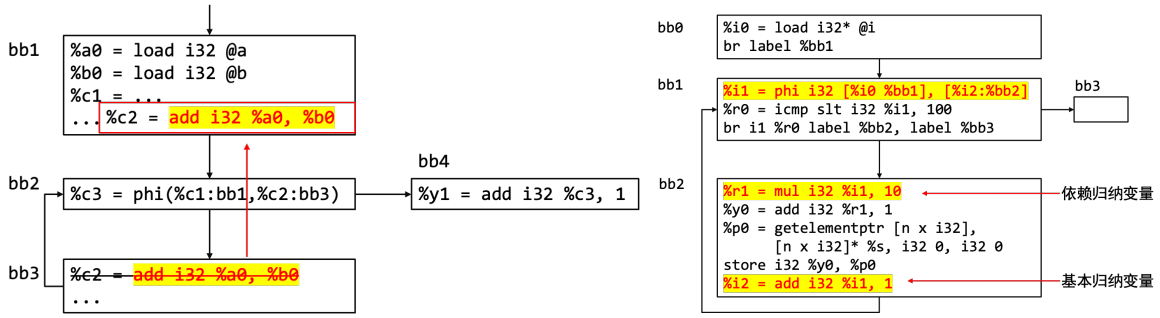
10.3.1 循环检测算法

由于 TeaPL 中只有 `if-else`、`while` 和逻辑运算语句会引入控制流，使得其对应 IR 中的每个循环都只会有一个入口节点，该节点支配循环中的所有其它节点，这种循环称为自然循环。因此，控制流图中的循环都是自然循环，这种都是自然循环的图是可规约图。

算法 1 自然循环搜索算法

```
1: s ← ∅; // s is an empty stack
2: Loop ← ∅; // an empty set of loops
3: procedure FindLoops(v)
4:     s.push(v);
5:     for each w in v.next()) do
6:         if s.contains(w) then
7:             AddLoop(w, v);
8:         else
9:             FindLoops(w);
10:        end if
11:    end for
12:    s.pop(v);
13: end procedure
14: procedure AddLoop({v, w})
15:    if !Loop.exists(v, w) then
16:        l ← CreateLoop(top n items of s untill w);
17:        Loop.add(l, v, w);
18:    else
19:        l ← CreateLoop(top n items of s untill w);
20:        Loop.merge(l, v, w);
21:    end if
22: end procedure
```

10.3.2 优化应用



(a) 循环不变代码优化　　(b) 归纳变量优化

图 10.3: 循环优化

本节介绍三种典型的循环优化应用：

- 循环不变代码：与公共表达式类似，该方法检测在循环体内被多次重复执行的表达式（运算数未发生变化）。图 10.3a，展示了一个示例，将 bb3 中的语句`%c2 = add i32 %a0, %b0` 前移至 bb0 可以避免重复计算。

- 归纳变量优化：这种优化一般与循环的条件变量相关。图 10.3b展示了一个例子，其中`%i1` 是循环体的条件变量，bb2 中`%r1 = mul i32 %i1, 10` 和该变量有关，并且`%i1` 每轮循环增加 1。因此可以将 bb2 中`%r1` 和`%y0` 的计算合并为`%y0 = add i32 %t1, 10` 的形式。这种思想在对循环内的数组寻址（如 `a[i]` 的地址是 `a + i * sizeof(a[0])`）优化时使用机会比较多。
- 标量替换：如果由于循环导致需要多次存取某个内存地址上的标量数据，应当使用寄存器替换该内存存取操作。代码 10.3展示了一个典型矩阵乘法标量替换优化案例。

```
for i in 0..rowA {
    for j in 0..colB {
        ; // 优化：增加t = R[i][j]
        for k in 0..colA {
            R[i][j] = R[i][j] + A[i][k]*B[k][j];  //优化：改为t = t +
                A[i][k]*B[k][j];
        }
        ; // 优化：增加R[i][j] = t
    }
}
```

代码 10.2: 标量替换示例