Lecture 5.2

常用代码优化技术

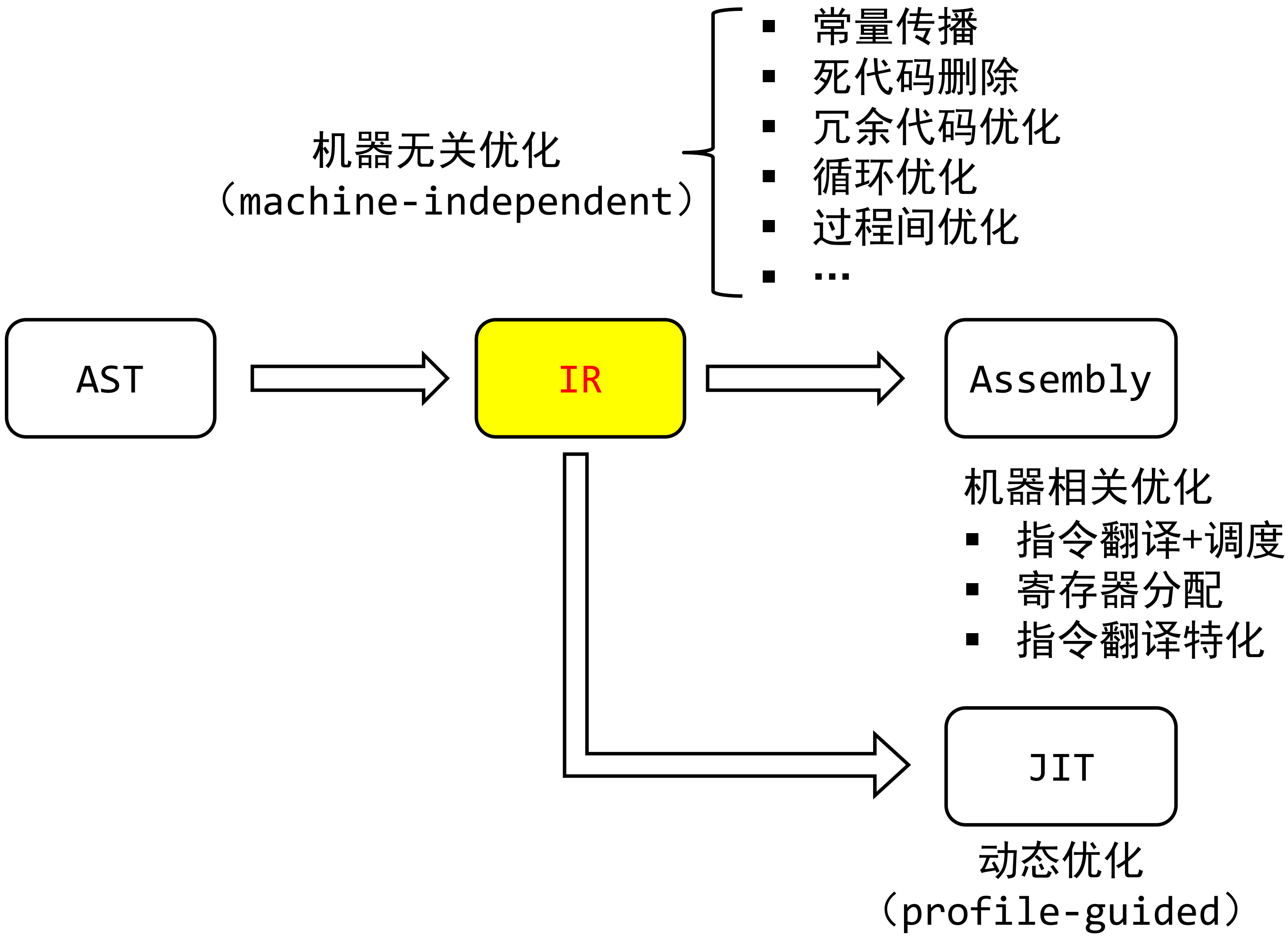
徐 辉

xuh@fudan.edu.cn

大纲

- 一、冗余代码优化
- 二、循环优化
- 三、过程间优化
- 四、指令翻译特化

优化策略


常量传播
死代码删除
冗余代码优化
循环优化
过程间优化
…
机器无关优化
（machine-independent）
AST
IR
Assembly
机器相关优化
指令翻译+调度
寄存器分配
指令翻译特化
JIT
动态优化
（profile-guided）

死代码

- 无用代码块：代码块不可达
  - 条件跳转语句对应的谓词（predicate）为恒真或恒假
- 无用计算：计算的值def缺少对应的use
- 无用参数：IR中没有load该参数（局部变量）
- 无用局部变量：IR中没有load该局部变量
- 无用全局变量：IR中没有load该全局变量
- 无用类型声明：代码中没有声明新类型相关的对象

无用代码块检测：谓词predicate分析

```
fn foo (x:int) {
    if(x != -1) {
        ...
    }
    else {
        ...
    }
}

foo(1)
```

```
fn foo (x:int) {
    if(x*x = -1) {
        ...
    }
    else {
        ...
    }
}
```

```
fn foo (x:int) {
    while (x>0) {
        if(x != -1) {
            ...
        }
        else {
            ...
        }
    }
}
```

match-case类似

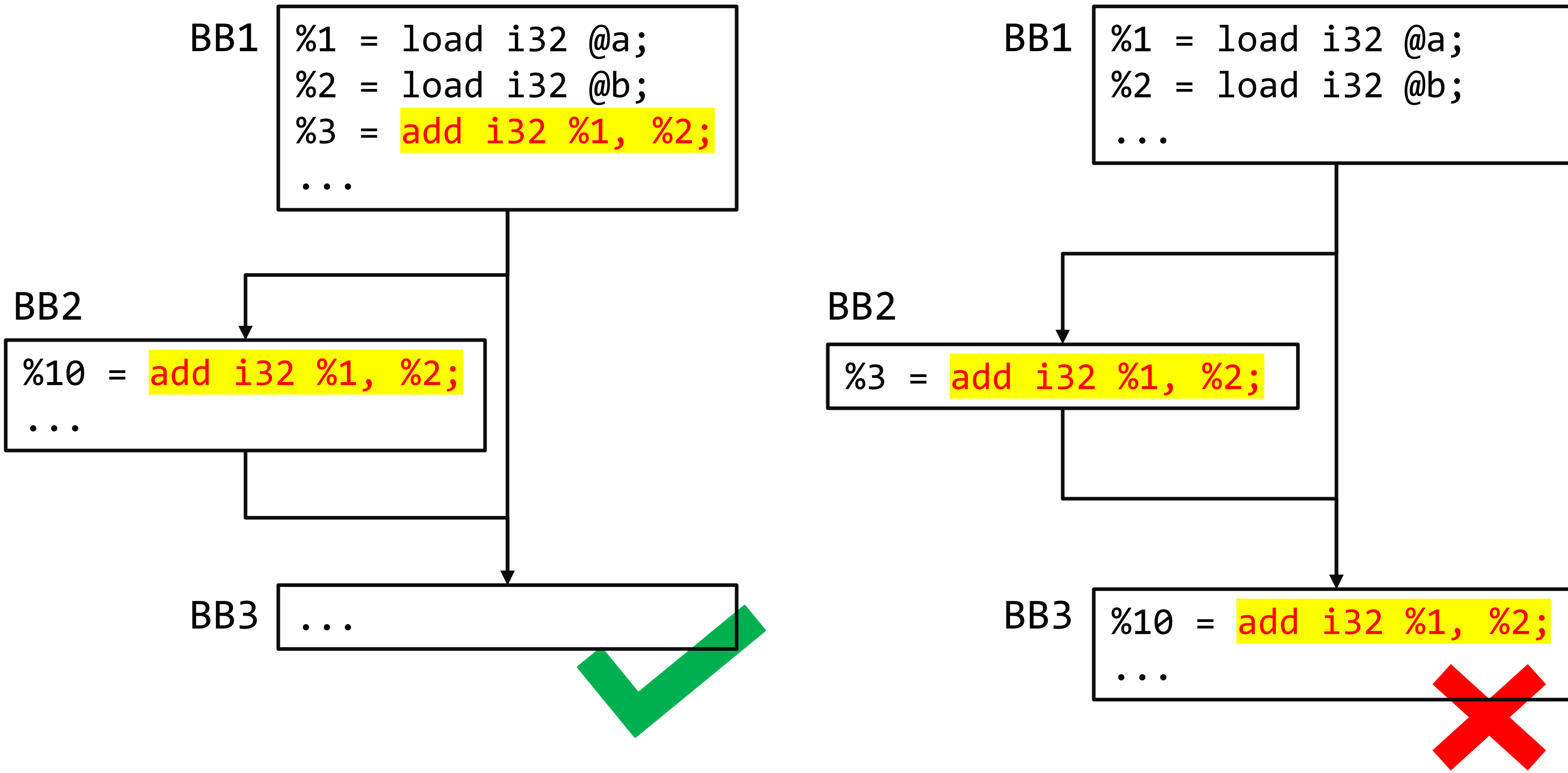
```
match(x*x){
    -1: => { x = 0; }
    0: => { x = 1; }
    _: => { x = -1; }
}
```

```
%0 = load i32 %x;
%1 = mul i32 %1, %1;
match i32 %1, %BB3 [
    i32 -1, %BB1
    i32 0, %BB2
  ]
%BB1:
  store i32 0, %x;
  jmp %BB4
%BB2:
  store i32 1, %x;
  jmp %BB4
%BB3:
  store i32 -1, %x;
  jmp %BB4
%BB4:
  ...
```

冗余代码优化

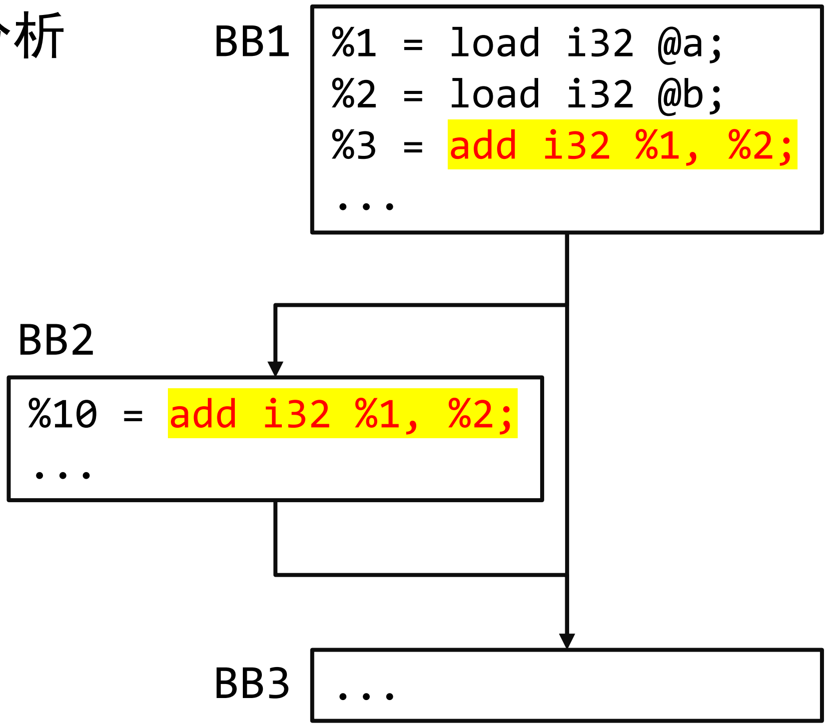
- 公共子表达式
  - 同一个表达式出现多次，且存在支配关系
- 弱公共子表达式
  - 部分路径存在公共子表达式
- 代码提升
  - 同一个表达式在不同路径中出现多次，不存在先后关系

公共子表达式：SSA

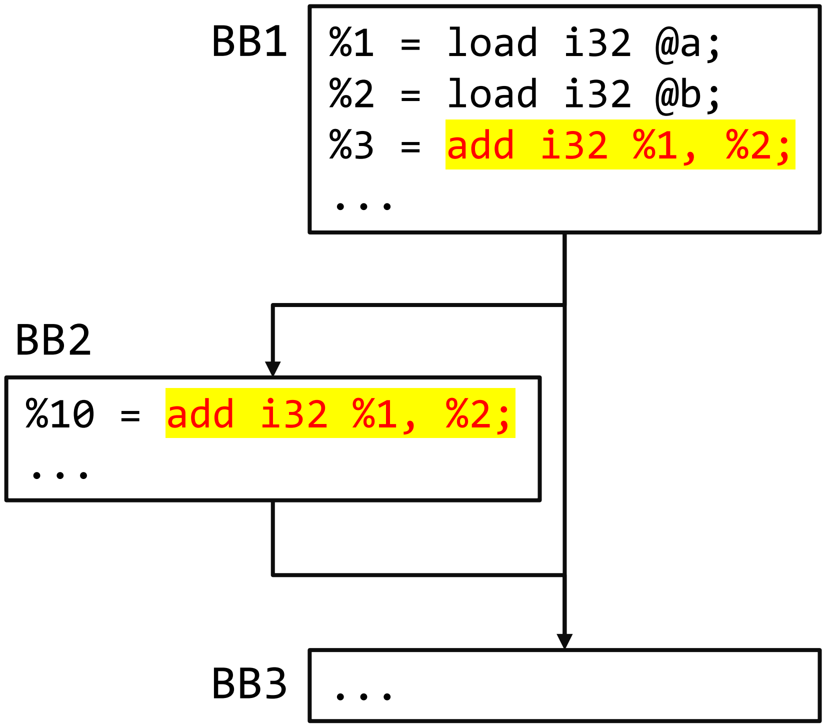

BB1
%1 = load i32 @a;
%2 = load i32 @b;
%3 = add i32 %1, %2;
...
BB2
%10 = add i32 %1, %2;
...
BB3
...
BB1
%1 = load i32 @a;
%2 = load i32 @b;
...
BB2
%3 = add i32 %1, %2;
BB3
%10 = add i32 %1, %2;
...

可用表达式分析

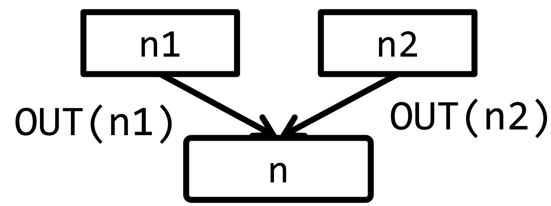
- 该表达式在存在支配关系的两条指令中重复出现
- 且其操作数都未被重新赋值
  - SSA形式一定未被重新赋值
- 可用表达式 vs 可达性分析



可用表达式分析：SSA形式

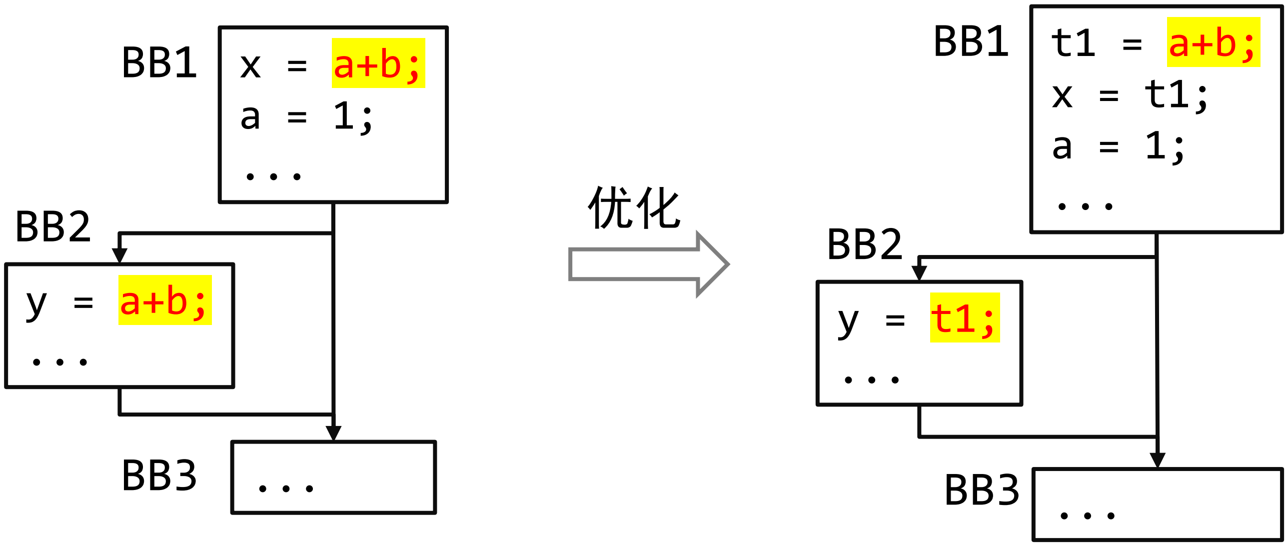


- 正向遍历控制流图
  - 如遇到指令：%3 = add i32 %1, %2
    - $\mathrm{Gen(n)} = \{<\mathrm{add\ i32, \%1\ \%2}>\}$
  - …
  - $\mathrm{OUT(n)} = \mathrm{IN(n)} \cup \mathrm{Gen(n)}$



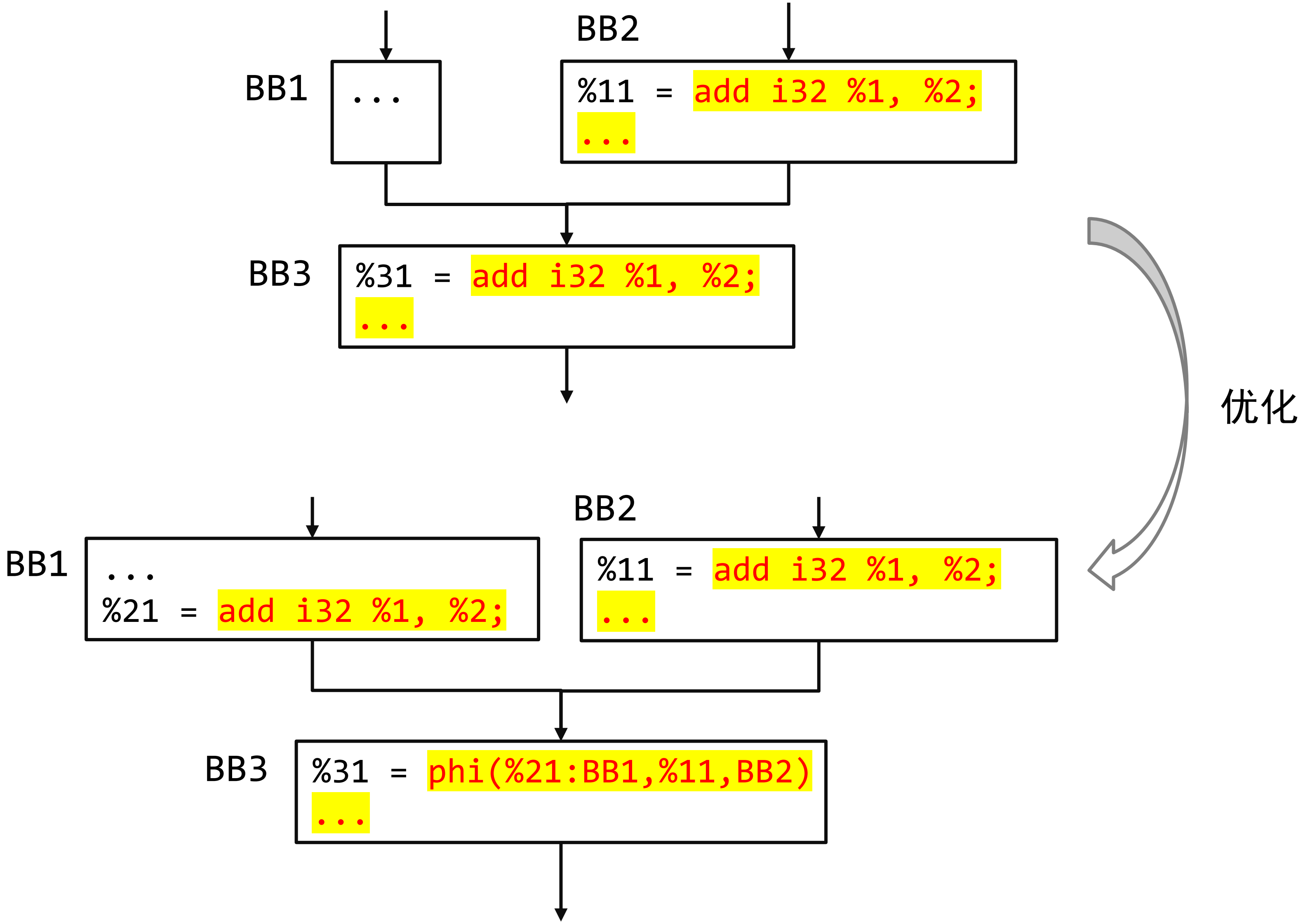
$$\mathrm{IN}(n) = \bigcap_{n' \in \mathrm{predecessor}(n)} \mathrm{OUT}(n')$$

可用表达式分析：非SSA形式



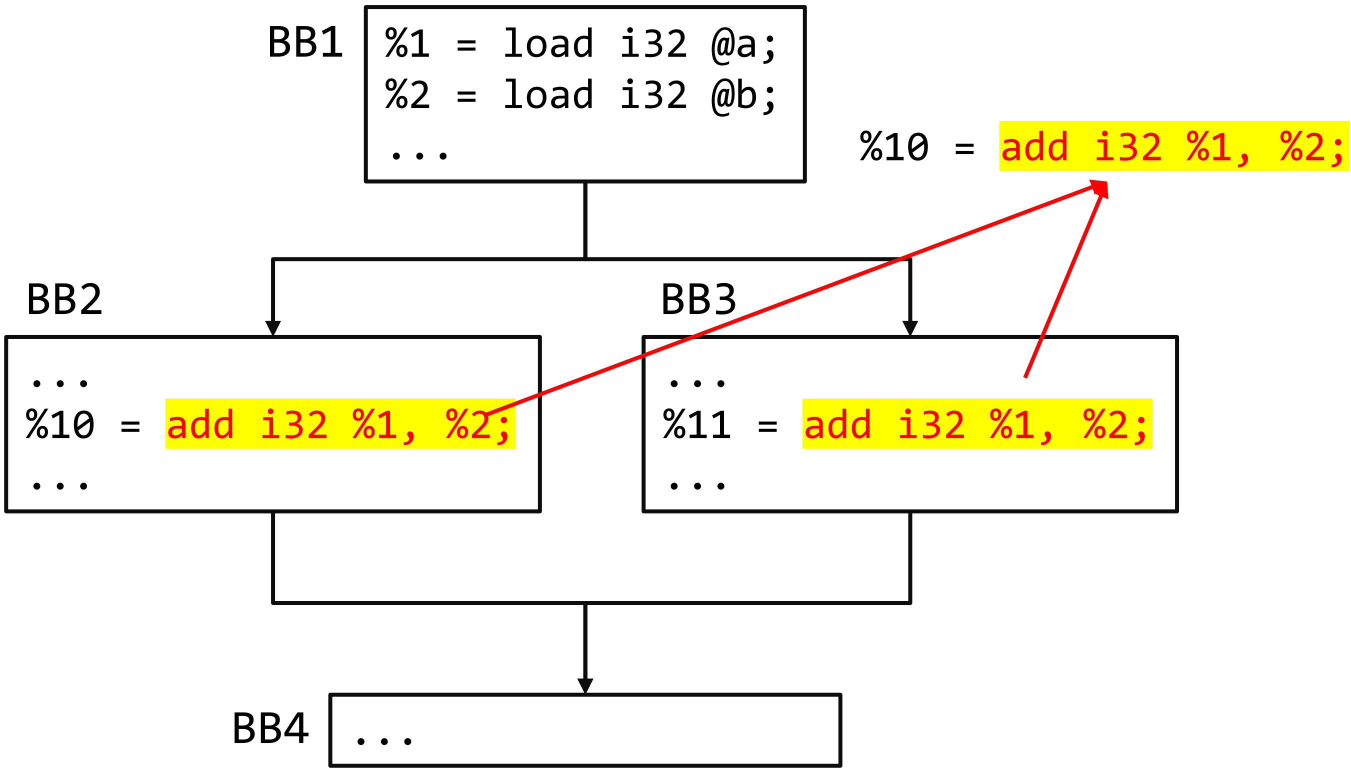
- 正向遍历控制流图
  - 如遇到指令：x = a + b
    - $\mathrm{Gen(n)} = \{< \mathrm{a} + \mathrm{b} >\}$
    - $\mathrm{KILL(n)} = \{< \varepsilon >: \text{表达式}\varepsilon\text{包含}x\}$
  - ...
  - $\mathrm{OUT(n)} = (\mathrm{IN(n)} - \mathrm{KILL(n)}) \cup \mathrm{Gen(n)}$

部分路径存在可用表达式



代码提升：繁忙表达式分析

- 多个代码块中都存在的公共表达式，其操作数被重新赋值
- 分析方法：逆向数据流分析
- 不能提升代码运行性能，但可以优化代码体积



数据流分析方法小节

- 可达性分析
- 活跃变量分析
- 可用表达式分析
- 繁忙表达式分析

$\boxed{\quad\quad}$ [n] = ($\boxed{\quad\quad}$[n] - KILL[n]) ∪ GEN[n]

$\boxed{\quad\quad}$ [n] = $\boxed{\quad\quad}$ $\boxed{\quad\quad}$[n’]

n’∈ $\boxed{\quad\quad}$(n)

$\boxed{\quad}$ $\boxed{\quad}$ = IN or OUT

$\boxed{\quad}$ = ∪ (may) or ∩ (must)

$\boxed{\quad}$ = predecessors or successors

大纲

- 一、冗余代码优化
- 二、循环优化
- 三、过程间优化
- 四、指令翻译特化

循环优化

- 循环不变代码
  - 同一个表达式在循环体内被多次执行
- 归纳变量优化
  - 数组下标计算
- 条件语句外移
- 其它优化

循环中的不变代码

- 出现位置：循环条件、循环体中都可能出现

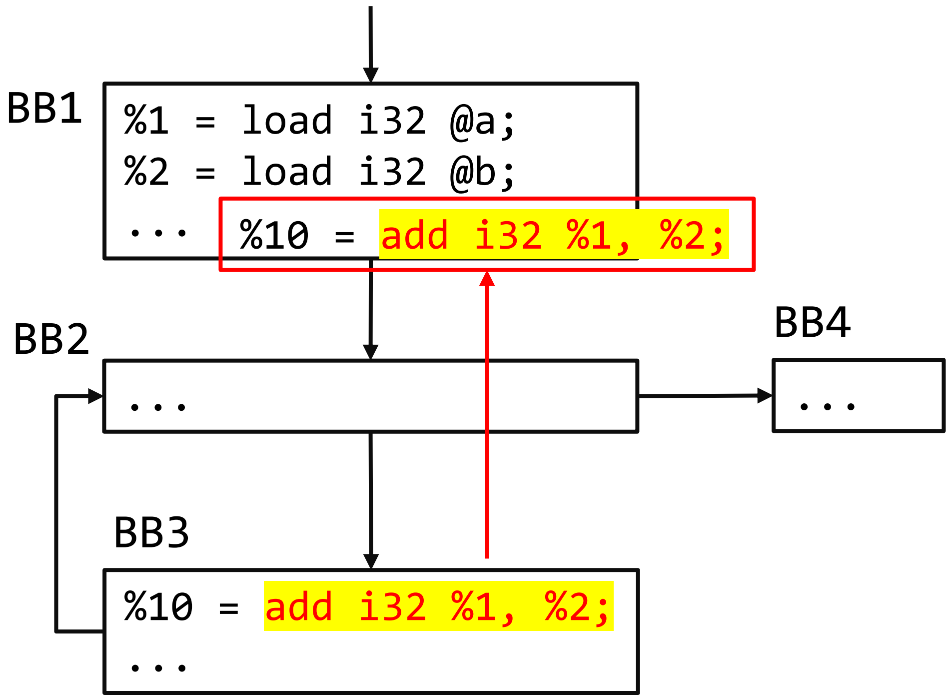
```
let a = ...;
let b = ...;
let s:list<int> = ...;
for i in 1..100{
    let t = (a + b)*i;
    s.push(t);
}
```

```
let a = ...;
let b = ...;
let s:list<int> = ...;
for i in 1..s.len(){
    let t = (a + b)*i;
    s[i] = t;
}
```

```
let a = ...;
let b = ...;
let s:list<int> = ...;
for i in 1..100{
    let t = foo();
    s.push(t);
}
```

```
let a = ...;
let b = ...;
let s:list<int> = ...;
for i in 1..s.len(){
    let t = s.pop();
    s[i] = t;
}
```

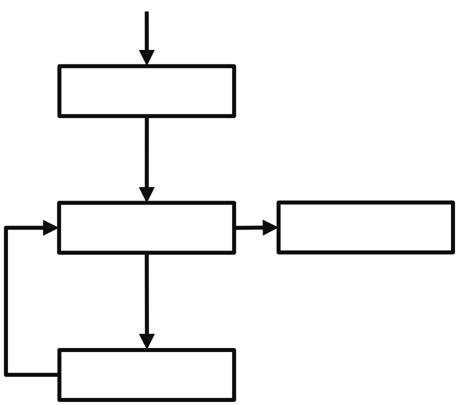
循环不变代码



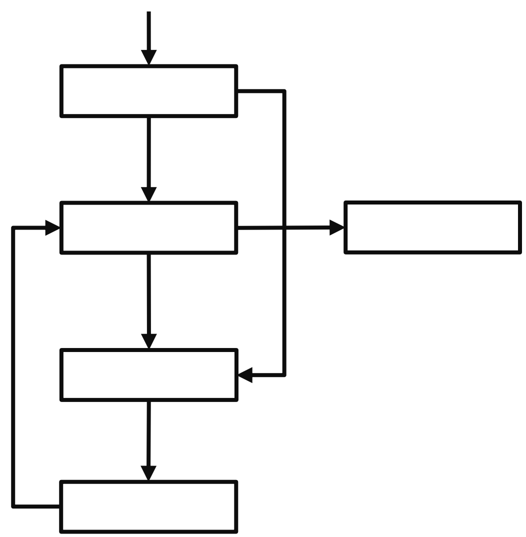
- 检测循环不变代码
  - 操作数定义自循环外部
  - 如何检测循环？
- 前移到循环外部
  - 支配节点

自然循环natural loop

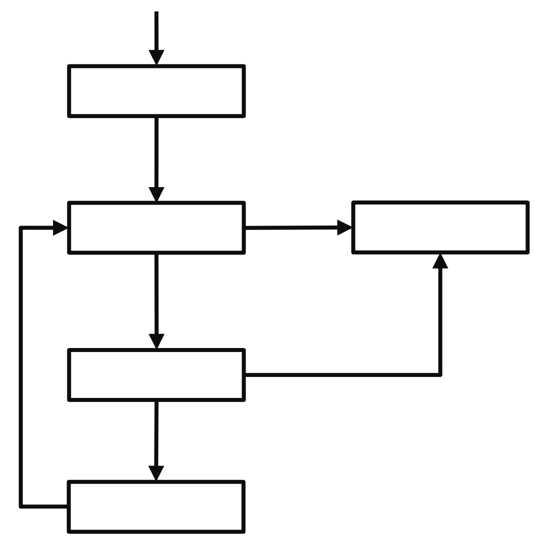
- 一个循环是自然循环的条件：
  - 有唯一的入口
  - 返回入口节点的回边
    - B->A为回边的条件：A支配B
- 一般正常的控制流语句形成的环：while、for、if-else
  - goto语句会造成非自然循环



自然循环

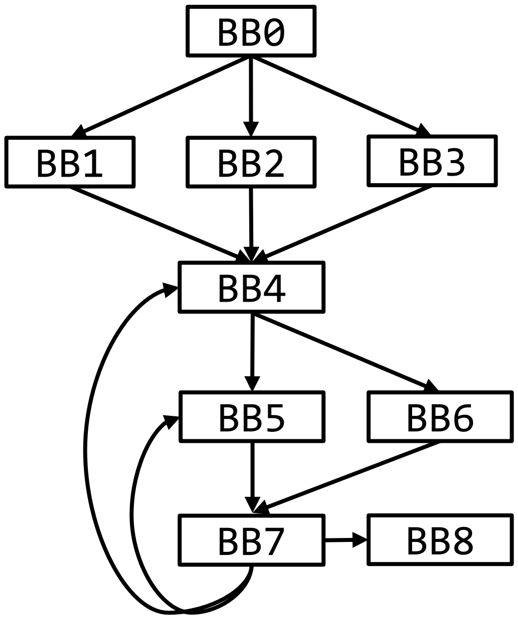


非自然循环



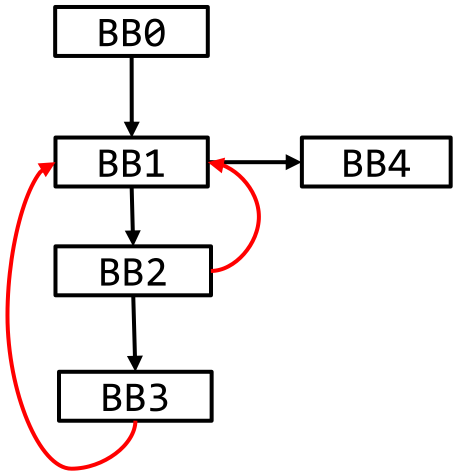
自然循环

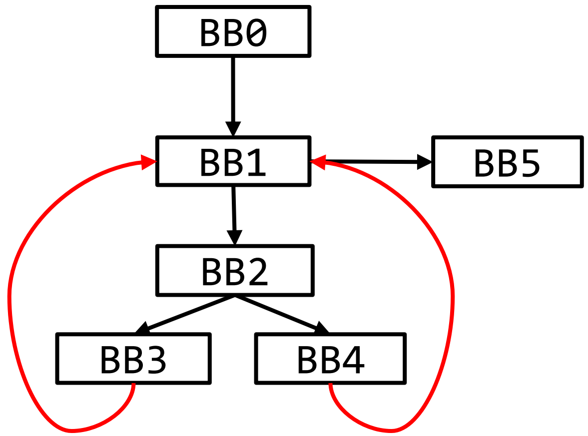
下图是否包含非自然循环？

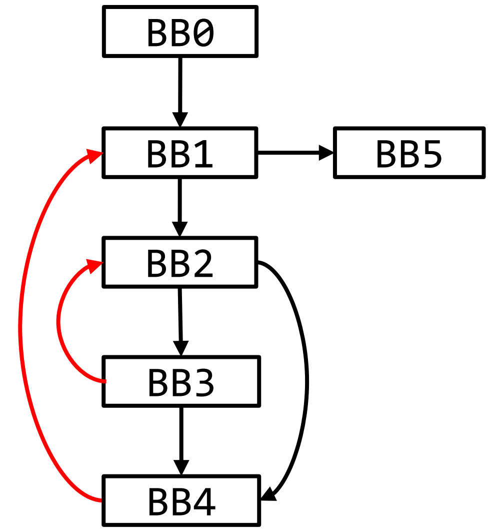


自然循环识别

- 每条回边对应一个自然循环







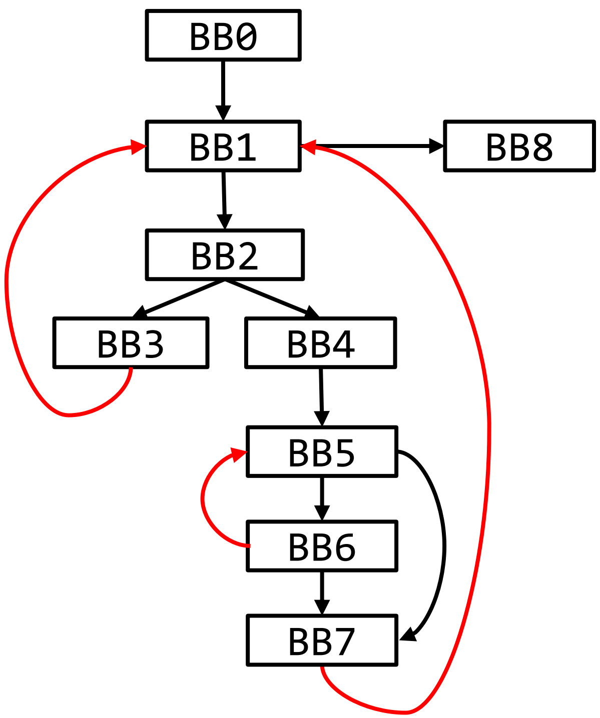
BB2->BB1：1-2
BB3->BB1：1-2-3

BB3->BB1：1-2-3
BB4->BB1：1-2-4

BB3->BB2：2-3
BB4->BB1：1-2-3-4

自然循环的性质

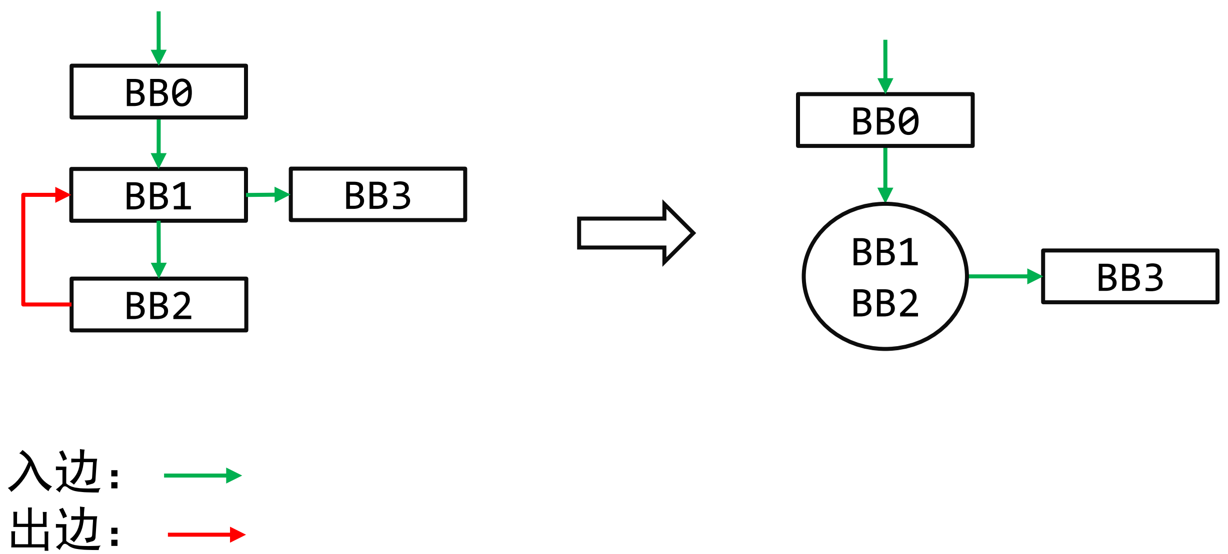
- 两个自然循环之间不相交：相切、嵌套、分离
- 两个首节点相同的自然循环：嵌套、相切



BB3->BB1: 1-2-3
BB6->BB5: 5-6
BB7->BB1: 1-2-4-5-6-7

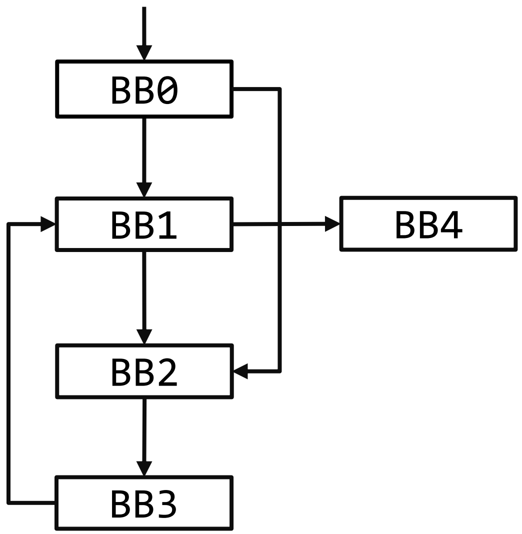
可规约控制流图：Reducible CFG

- 可规约CFG的所有循环都是自然循环
- 边可以分为前进边和回边两个不交集=>可以缩环

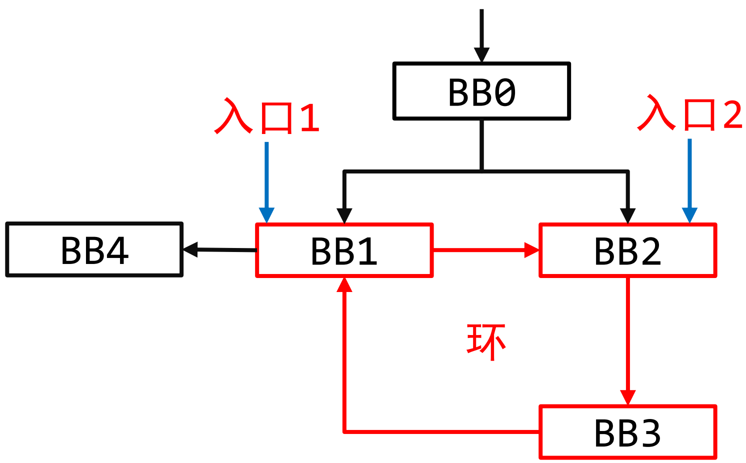


不可规约控制流图

- 无法确定回边
  - BB3->BB1? 但BB1不支配BB3



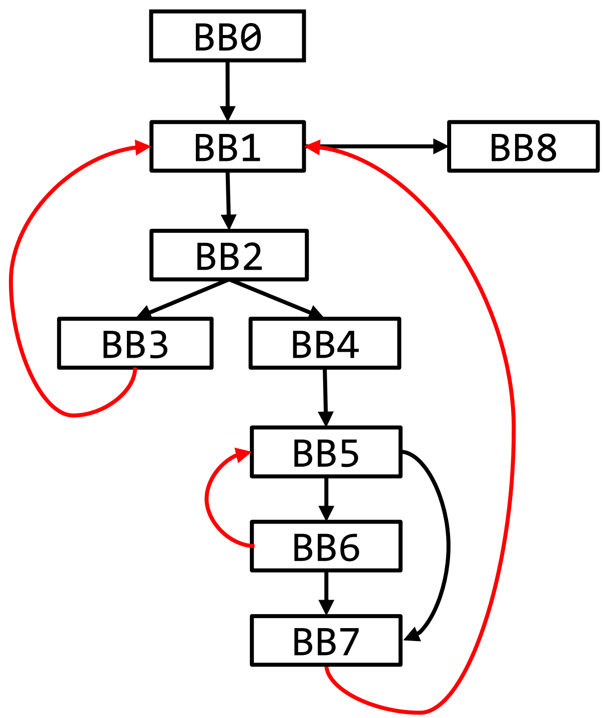
非自然循环



同态图
isomorphic

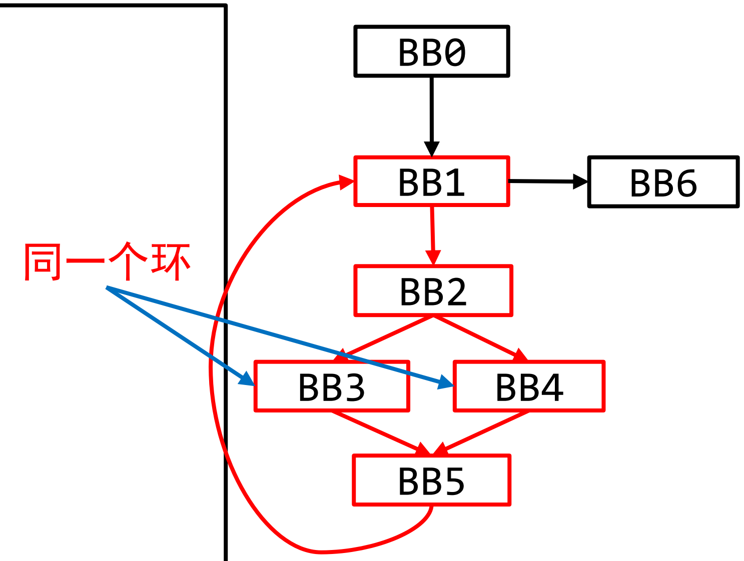
自然循环检测算法

- 基本思路：
  1) 遍历CFG=>支配关系矩阵M1
  2) 比对图邻接表M2=>检测回边
  3) 识别每一条回边对应的环
- DFS
  - 如果栈中已存在节点=>回边
  - 若干栈顶元素组成环
  - 相同回边的环需要merge



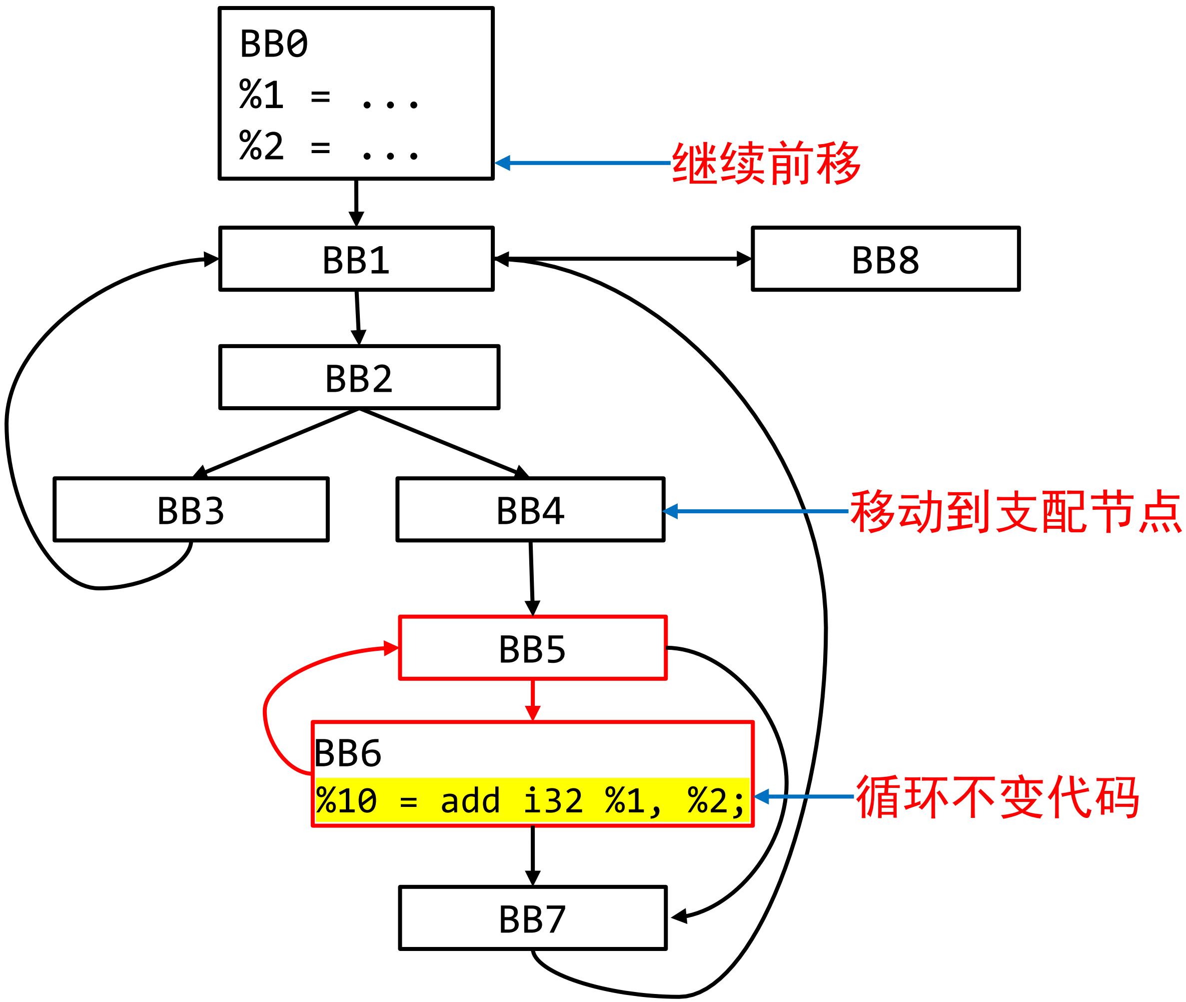
DFS检测环

```
stack s;
DFSVisit(v) {
    s.push(v);
    for each w in OUT(v) {
        if s.contains(w) {//找到回边
            AddLoopback(w,v);
        }  else {
            DFSVisit(w);
        }
    }
}
AddLoopback(v,w) {
    new = CreateLoop(top n items of s untill w);
    old = Findloop(v-w)
    merge(old,new)
}
```



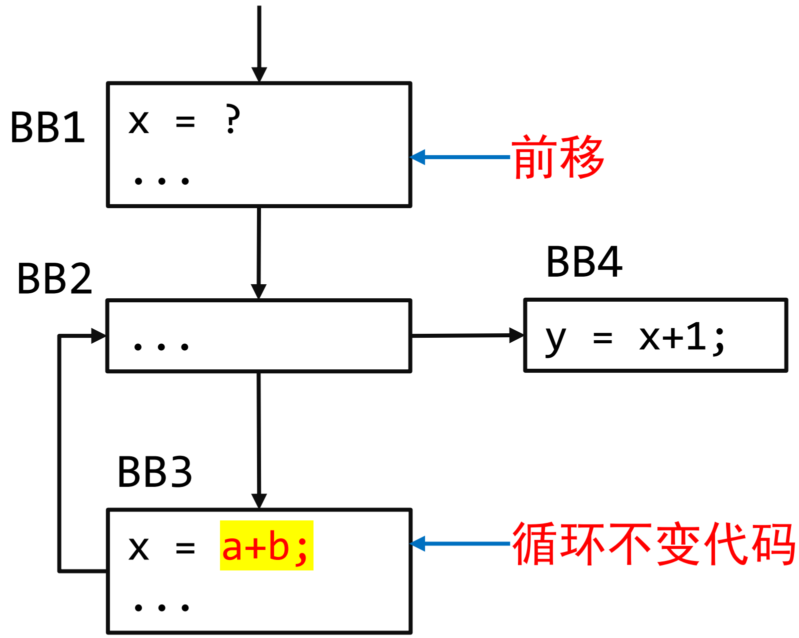
前移位置

- 单层循环：前移到最近的支配节点
- 多层循环：前移至不能移动为止

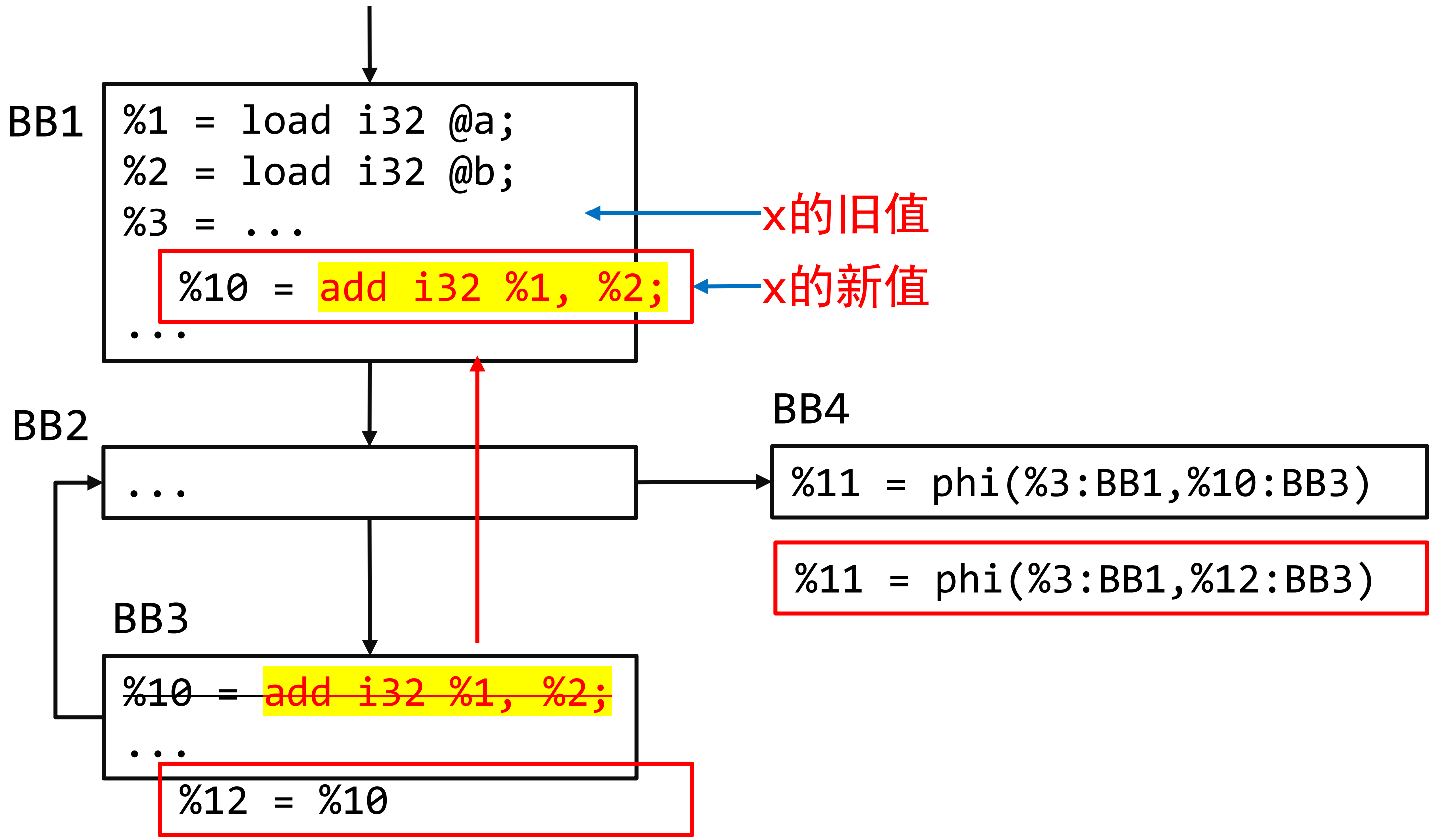


可能会有side effect

- 如未进入循环，会错误修改x的值



消除side effect



归纳变量

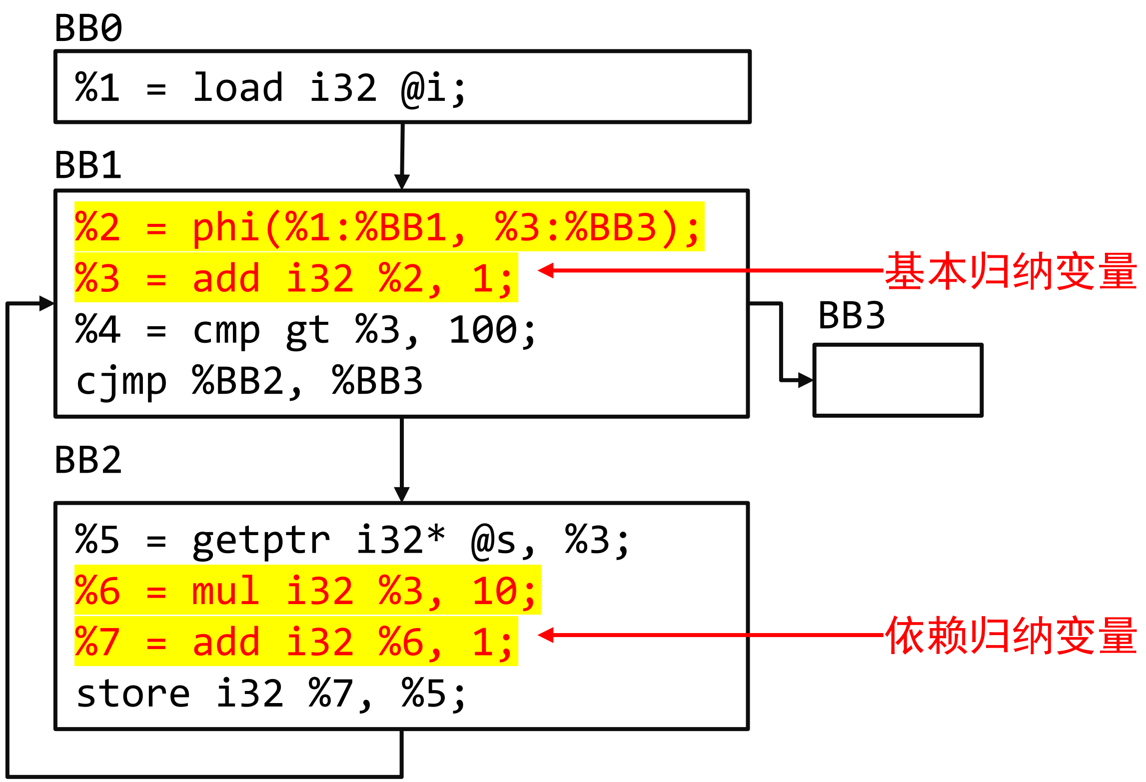
- 变量x的值每轮循环增加固定值，则称x为归纳变量
  - 基本归纳变量x
  - 依赖归纳变量y = ax + b，a和b为常量

```
for i in 1..100 {
    y = 10 * i + 1;
    s[i] = y;
}
```

⇨

```
t1 = 1;
for i in 1..100 {
    t1 = t1 + 10;
    s[i] = t1;
}
```

基于IR识别归纳变量


BB0
%1 = load i32 @i;
BB1
%2 = phi(%1:%BB1, %3:%BB3);
%3 = add i32 %2, 1;
%4 = cmp gt %3, 100;
cjmp %BB2, %BB3
基本归纳变量
BB3
BB2
%5 = getptr i32* @s, %3;
%6 = mul i32 %3, 10;
%7 = add i32 %6, 1;
store i32 %7, %5;
依赖归纳变量

数组下标中的归纳变量

- IR中不一定可见

```
for i in 1..100 {
    y = 10 * i + 1;
    s[i] = y;
}
```

i*4 + s

```
%5 = getptr i32* @s, %3;
```

i的临时变量

```
%5 = getptr i32* @s, 0;
%6 = mul i32, %3, 4;
%7 = add i32, %5, %6;
```

分支预测的代价

- 减少分支跳转次数
  - Loop unswitching：外提（减少）循化内条件判断
  - Loop unroll：将循环体复制多遍

```
void testbrpred(int* a, int len,  int x){
    unsigned long long cycle = rdtsc();
    while(len>-1){
        len-=1;
        if(a[len]>x) ;
        else ;
    }
    unsigned long long cycl = rdtsc()- cycle;
    printf("x = %d, cycles = %d\n", x, cycl);
}

int main(int argc, char** argv){
    int a[1000];
    srand(time(NULL));
    for(int i = 0; i< 1000; i++) a[i] = rand()%1000;
    testbrpred(a,1000,100);
    testbrpred(a,1000,300);
    testbrpred(a,1000,500);
    testbrpred(a,1000,700);
    testbrpred(a,1000,900);
}
```

```
x = 100, cycles = 23630
x = 300, cycles = 47175
x = 500, cycles = 63744
x = 700, cycles = 49642
x = 900, cycles = 26301
```

如何测量运行开销

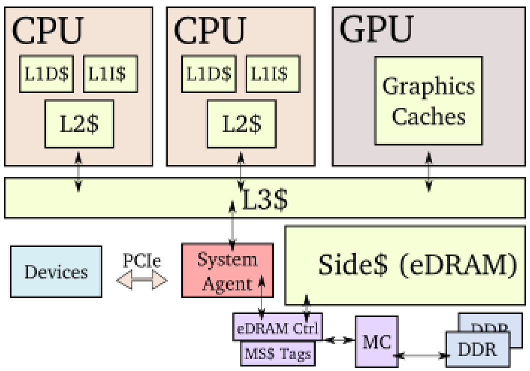
- 一般的CPU都提供Time Stamp Counter (TSC)功能
  - 记录上次reset以来的CPU cycles
  - X86-64读取TSC的指令：RDTSC/RDTSCP
    - 结果保存在EDX:EAX

```
static inline uint64_t rdtscp(void)
{
    uint64_t tsc;
    __asm__ __volatile__(
        "rdtscp;"
        "shl $32, %%rdx;"
        "or %%rdx, %%rax"
        : "=a"(tsc)
        :
        : "%rcx", "%rdx");

    return tsc;
}
```

Cache

- Cache访问速度优于内存访问速度
- 最小单位是cache line
- 通过降低cache miss提升代码性能

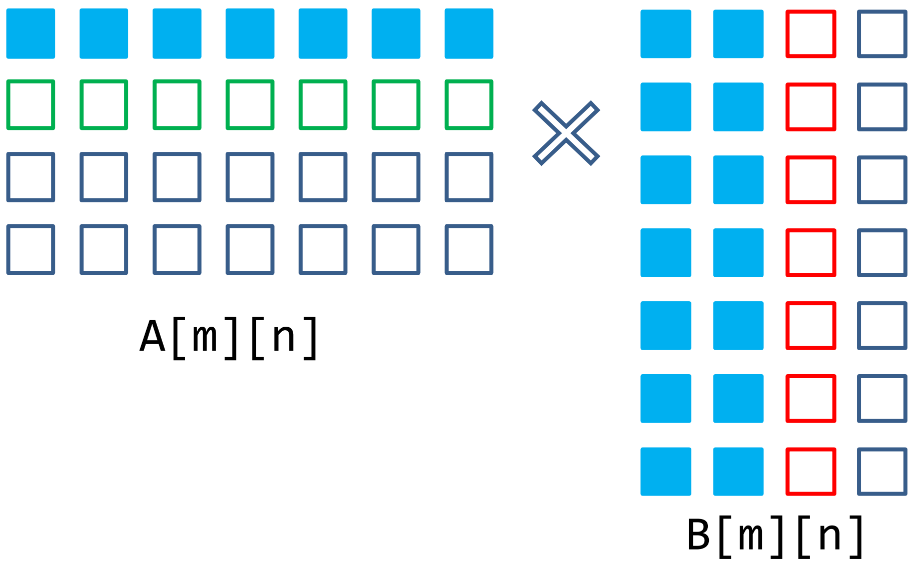


index	valid	tag	data
001	0x...		64 B
002	0x...		64 B
003	0x...		64 B
...	0x...		64 B

cache	size	line	speed
L1	32 KB + 32 KB	64 B	4-5 cycles
L2	256 KB	64 B	12 cycles
L3	up to 2 MB	64 B	30-50 cycles

矩阵乘法

```
for i in 0..m-1 {
    for j in 0..n-1 {
        for k in 0..n-1 {
            R[i][j] = R[i][j] + A[i][k]*B[k][j];
        }
    }
}
```



标量替换：Scala Replacement

```
for i in 0..m-1 {
    for j in 0..n-1 {
        for k in 0..n-1 {
            R[i][j] = R[i][j] + A[i][k]*B[k][j];
        }
    }
}
```

每次从内存或cache读写R[i][j]会影响性能

为什么不能使用R[i][j]在寄存器中值？

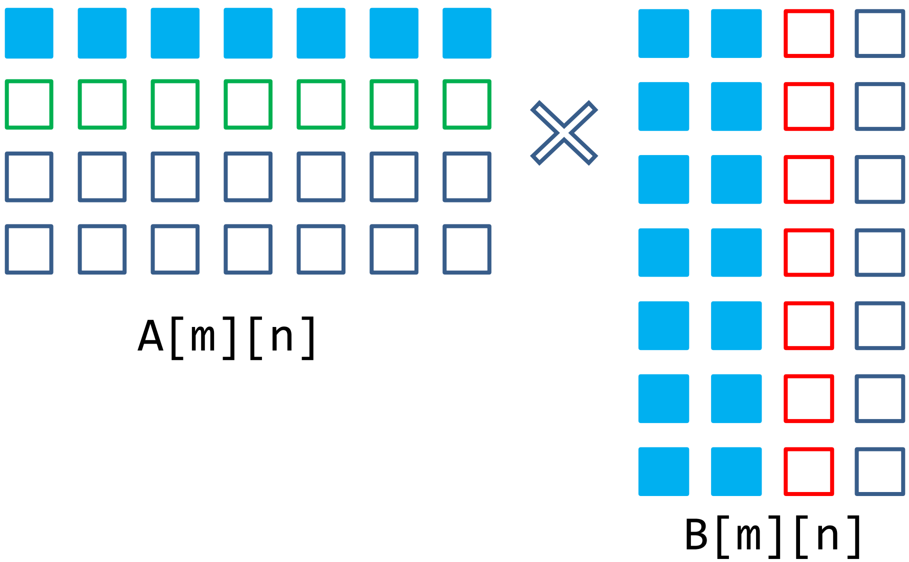
R[i][j]和i可能是alias

⇩

```
for i in 0..m-1 {
    for j in 0..n-1 {
        t = R[i][j];
        for k in 0..n-1 {
            t = t + A[i][k]*B[k][j];
        }
        R[i][j] = t;
    }
}
```

使用临时变量替换，可直接使用寄存器中的值

循环分块

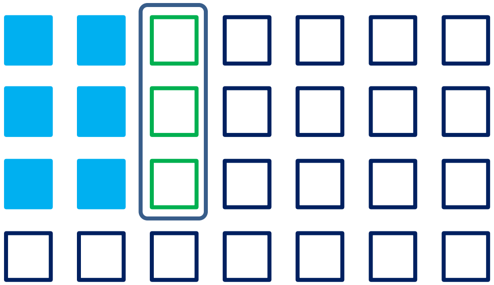


- 假设:
  - 已经算完R[0][1]和R[0][2]
  - B[][0]和B[][1]在cache中
- 先算R[0][3]还是R[1][0]?

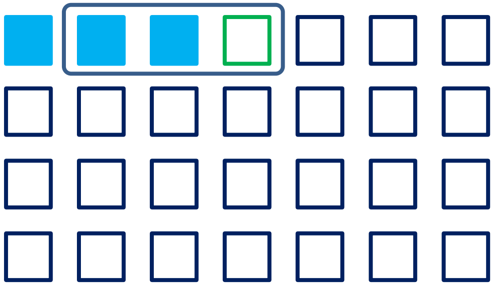
```
for t = 0..n/w {
    for i in 0..m-1 {
        for j in t*w..t*w+w-1 {
            for k in 0..n-1 {
                R[i][j] = R[i][j] + A[i][k]*B[k][j];
            }
        }
    }
}
```

循环交换

```
for i in 1..m-2 {
    for j in 0..n-1 {
        R[i][j] = A[i-1][j] + A[i][j] + A[i+1][j];
    }
}
```



```
for j in 0..n-1 {
    for i in 1..m-2 {
        R[i][j] = A[i-1][j] + A[i][j] + A[i+1][j];
    }
}
```



循环合并和拆分

```
for i in 0..n-1 {
    R1[i] = A[i] + B[i];
    R2[i] = C[i] + D[i];
}
```

拆分 ⇒

```
for i in 0..n-1 {
    R1[i] = A[i] + B[i];
}
for i in 0..n-1 {
    R2[i] = C[i] + D[i];
}
```

distribution

```
for i in 0..n-1 {
    R1[i] = A[i] + B[i];
}
for i in 0..n-1 {
    R2[i] = A[i] + B[i];
}
```

合并 ⇒

```
for i in 0..n-1 {
    R1[i] = A[i] + B[i];
    R2[i] = A[i] + B[i];
}
```

fusion

大纲

- 一、冗余代码优化
- 二、循环优化
- 三、过程间优化
- 四、指令翻译特化

函数优化策略

常用优化技术

partial evaluation
(program specialization)

compile-time
execution

参数均未知

部分参数已知

全部参数已知

```
fn factorial(n:int, r:int) -> int {
    if (n == 0)
        return r;
    else
        return factorial(n-1, n*r);
}

fn foo(x:int) -> int {
    foo(x, x+1);
    foo(x, 1);
    foo(0, x);
}
```

过程间优化

- 一般在link time进行，可以前移到中间代码环节
- 主要优化方法：
  - 函数内联
  - 尾递归优化

内联

- 在函数调用处使用函数体替换
- 提升运行效率
- Partial evaluation/Compile-time execution
  - 常量传播=>优化

```
fn factorial(n:int, r:int) -> int {
    if (n == 0)
        return r;
    else
        return r-1;
}

fn foo(x:int) -> int {
    let a = foo(x, x+1);
    let b = foo(x, 1);
    let c = foo(0, x);
}
```

```
fn foo(x:int) -> int {
    let a = {if (x == 0) 1 else x};
    let b = {if (x == 0) 1 else 0};
    let c = x;
}
```

内联问题建模

- 内联的好处：利于优化，提升代码运行效率
- 内联是有开销的，代码复制可能会增大代码体积
- 给定bugget上限，选取最优的内联函数组合
- 背包问题（Knapsack problem）

0-1背包问题

- 假设有n个选项$x_1 \dots x_n$
- 选择x_i的开销是w_i，收益是v_i
- 给定开销上限，如何选择可以获得最大收益？

$$\max \sum_{i=1}^{n} v_i x_i$$

$$s.t. \sum_{i=1}^{n} w_i x_i \leq thres \ \text{ and } x_i \in \{0,1\}$$

递归函数

- 递归函数内联问题（内联 vs 宏展开）
- 尾递归函数可以优化
  - 特点：return前的最后一条语句调用自己

```
fn factorial(n:int) -> int {
  if (n == 0)
    return 1;
  else
    return n * factorial(n-1);
}
```

```
fn factorial(n:int, r:int) -> int {
  if (n == 0)
    return r;
  else
    return factorial(n-1, n*r);
}
```

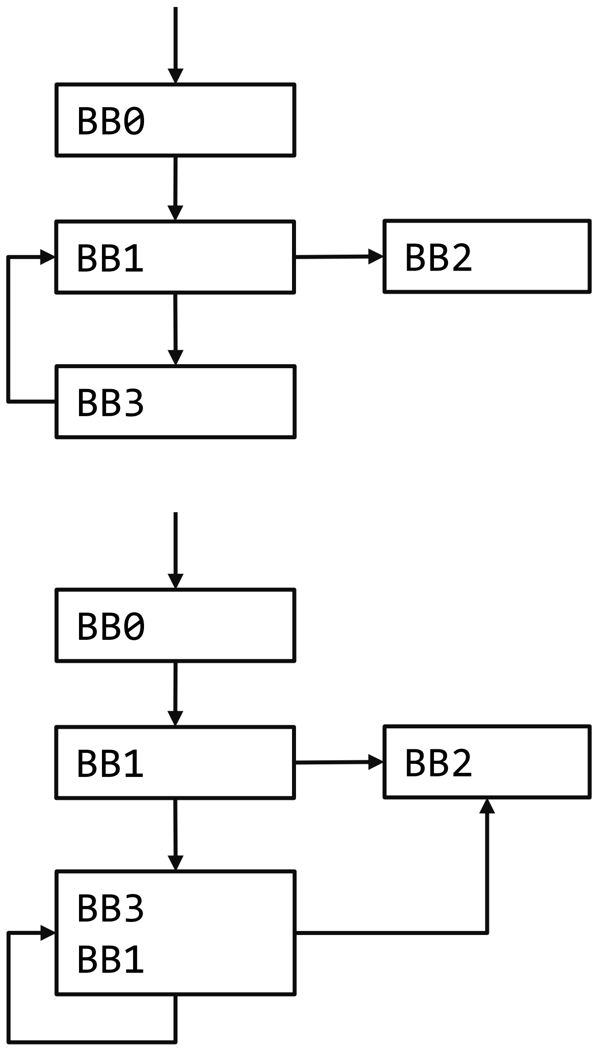
尾递归消除

```
fn factorial(n:int, r:int) {
%BB0:
  stackalloc i32, @n;
  stackalloc i32, @r;
  store %-1, @n;
  store %-2, @r;
  %1 = load i32 @n;
  %2 = load @r;
  %3 = cmp eg %1, 0;
  cjmp %3 %BB1, %BB2;
%BB1:
  ret %2;
%BB2:
  %4 = sub i32 %1, -1;
  %5 = mul i32 %1, %2;
  %6 = call factorial(%4, %5);
  ret %6;
}
```

⇨

```
fn factorial(n:int, r:int) {
%BB0:
  stackalloc i32, @n;
  stackalloc i32, @r;
  store %-1, @n;
  store %-2, @r;
  jmp %BB1;
%BB1
  %1 = load i32 @n;
  %2 = load @r;
  %3 = cmp eg %1, 0;
  cjmp %3 %BB2, %BB3;
%BB2:
  ret %2;
%BB3:
  %4 = sub i32 %1, -1;
  %5 = mul i32 %1, %2;
  store %4 @n;
  store %5 @r;
  cjmp %BB1;
}
```

尾递归优化




```
fn factorial(n:int, r:int) {
%BB0:
  stackalloc i32, @n;
  stackalloc i32, @r;
  store %-1, @n;
  store %-2, @r;
%BB1:
  %1 = load i32 @n
  %2 = load @r
  %3 = cmp eg %1, 0;
  cjmp %3 %BB2, %BB3
%BB2:
  ret %2;
%BB3:
  %4 = sub i32 %1, -1;
  %5 = mul i32 %1, %2;
  %3 = cmp eg %4, 0;
  cjmp %2 %BB2, %BB3
}
```

Sibling Call优化

- Sibling call
  - 调用函数A和被调用函数B签名相同
  - tail call

```
fn foo(a:int) -> int{
  if (a < 0) {
    return a;
  }
  int b = a - 1;
  ret bar(b);
}

fn bar(b:int) -> int{
  int c = b - 1;
  ret foo(c);
}
```

```
fn foo(a:int) -> int{
  if (a < 0) {
    return a;
  }
  int b = a - 1;
  int c = b - 1;
  ret foo(c);
}
```

大纲

- 一、冗余代码优化
- 二、循环优化
- 三、过程间优化
- 四、指令翻译特化

指令翻译特化

- CPU提供了一些扩展指令：SSE、AVX
  - 编译时通过-m声明指令集类型，如-mavx2
  - 通过lscpu查看cpu支持的flags
- 典型场景：
  - 向量运算
  - popcount
  - ...

SSE指令

- SSE扩展：Streaming SIMD (single instruction, multiple data) Extensions
  - 寄存器：XMM0-XMM15 (128bit)
- 指令：
  - 浮点数运算相关指令
    - Scalar模式：MOVSS、ADDSS、SUBSS
    - Packed模式：MOVAPS、MOVUPS、ADDPS、SUBPS...
  - 整数运算相关指令
    - PEXTRW、PINSRW、PMULHUW、PSADBW、PAVGB,
  - 其它指令：
    - popcount(SSE4)、...
- AVX扩展：Advanced Vector Extensions
  - 寄存器：ZMM0-ZMM31 (512bit)

向量运算问题

```c
struct Vec {
    float a, b, c, d;
} x,y;

struct Vec avadd() {
    struct V z;
    z.a = x.a + y.a;
    z.b = x.b + y.b;
    z.c = x.c + y.c;
    z.d = x.d + y.d;
    return z;
}
```

```
#: clang -mavx2 avx1.c -O2
```

```
vmovups xmm0,XMMWORD PTR [rip+0x2f14]
vaddps xmm0,xmm0,XMMWORD PTR [rip+0x2f1c]
vpermilpd xmm1,xmm0,0x1
ret
```

Popcount问题

- 统计一个bit vector中1的数量
- 使用AVX-512的Intrinsics(built-in)函数
  - 编译器实现的函数

```
int popcount(int x) {
    int r = 0;
    while (x != 0) {
        x >> 1
        if (x & 1) {
            r++;
        }
    }
    return r;
}
```

```
clang -mavx512vpopcntdq avx1.c -O2
```

```
//__attribute__ ((target("avx512vpopcntdq")))
__m512i popcount2(__m512i a) {
    __m512i r = _mm512_popcnt_epi32(a);
    return r;
}
```

```
vpopcntd zmm0,zmm0
```

CPU兼容性问题：函数多版本技术

- 生成多个函数副本，运行时自动适配函数版本

```
__attribute__ ((target("default")))
int foo(int a) {
    ...;
}
__attribute__ ((target("avx2")))
int foo(int a) {
    ...;
}
```

```
__attribute__ ((target_clones("default", "popcnt")))
int test(int x){
    return __builtin_popcountll(x);
}
```

总结

- 冗余代码优化
  - 无用代码、冗余代码
  - 数据流分析
- 循环优化
  - 循环不变代码
    - 循环检测
  - 归纳变量
  - 硬件相关优化：分支预测、Cache
- 过程间优化
  - 函数内联
  - 尾递归优化
- 指令翻译特化
  - SSE/AVX扩展
  - 编译器built-in函数