SSA-construction

本文中的内容基本上均来自 CMU 15-745 的课程讲义。

标准的SSA 构建算法分成两步：

1. Place all Φ()
2. Rename all variables

在讲 SSA 构建算法之前，需要一些基础知识。

Basics

Dominator

- N dominates M (N dom M) <==> 在 CFG 上，从 entry node 到 M 的所有路径都经过 N
- 真支配 (strictly dominate, sdom)，如果 N dom M 并且 N != M，则 N sdom M
- 直接支配 (immediate dominate, idom)，如果N dom M 并且不存在 N′，使 N dom N′，N′ dom M，则 N idom M

Dominator Tree

- 父节点是子节点的直接支配节点

Dominance Frontier

对于图节点 N，The Dominance Frontier of node N 是一个集合，该集合包含 W 如果 W 满足以下条件：

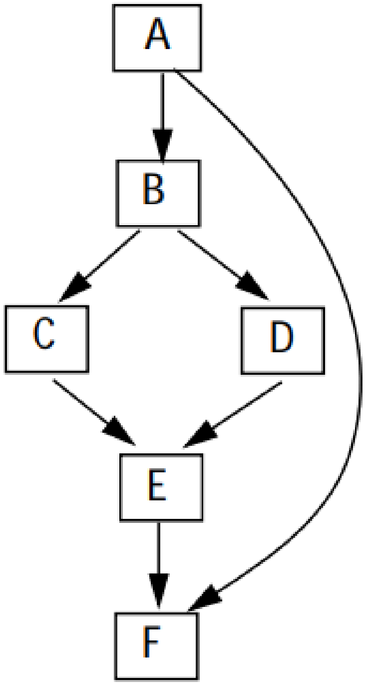
1. N 是 W 的某个前驱结点的支配节点
2. N 不是 W 的真支配节点

即 DF(N) = { W | N dom pred(W) AND !(N sdom W)}

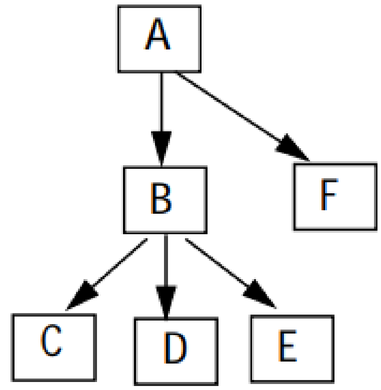
Computing the Dominance Frontier: Algorithm

```
for each node n in the post-order traversal of the D-tree
compute-DF(n)
        S = {}
        foreach node c in succ[n]
                if !(n sdom c)
                        S = S ∪ { c }
        foreach child a of n in D-tree
                compute-DF(a)
                foreach x in DF[a]
                        if !(n dom x)
                                S = S ∪ { x }
        DF[n] = S
```

下图是一个计算 Dominance Frontier 的例子：



Control Flow Graph



Dominator Tree

Block	A	B	C	D	E	F
Dominance Frontier	ϕ	{F}	{E}	{E}	{F}	ϕ

Iterated Dominance Frontier

首先定义节点集合的 Dominance Frontier：设节点集合 S = { X0, X1, X2 ... XN }，那么 DF(S) = DF(X0) U DF(X1) U DF(X2) ... U DF(XN)

节点集合的 Iterated Dominance Frontier 记作 DF+(S)，DF+(S) 就是不断地计算 S 及其 DF 集合的 DF 集合，直至不动点。

以上面计算 Dominance Frontier 的例子来计算 Iterated Dominance Frontier：

1. DF1({A, B, C}) = DF({A, B, C}) = { E, F}
2. DF2({A, B, C}) = DF({A, B, C} U DF1({A, B, C})) = DF({A, B, C, E, F}) = { E, F }
3. DF+({ A, B, C}) = { E, F }

Place all Φ()

Using Dominance Frontier to Place Φ()

- Gather all the defsites of every variable
- Then, for every variable
  - foreach defsite
    - foreach node in DominanceFrontier(defsite)
      - if we haven't put Φ() in node, then put one in
      - if this node didn't define the variable before, then add this node to the defsites (because Φ counts as def)

- This essentially computes the Iterated Dominance Frontier on the fly, inserting the minimal number of Φ() neccesary

思考一下，这里说 “This essentially computes the Iterated Dominance Frontier on the fly” 为什么？

上述算法首先计算了 DF(defsites)，对于 DF(defsites) 中的元素，如果该元素不在 defsites 中就将其加入到 defsites 中，再计算 DF(new defsites)，其实就是 DF (defsites U DF(defsites))，如此直至没有新的节点加入到 defsites 中。可见这就是在计算 Iterated Dominance Frontier。

Using Dominance Frontier to Place Φ(): Algorithm

```
foreach node n {
   foreach variable v defined in n {
     orig[n] ∪= {v}          /* variables defined in basic block n */
     defsites[v] ∪= {n}      /* basic blocks that define variable v */
   }
}
foreach variable v {
   W = defsites[v]                          /* work list of basic blocks */
   while W not empty {
     n = remove node from W
     foreach y in DF[n]
       if y ∉ PHI[v] {
         insert "v ← Φ(v,v,…)" at top of y
         PHI[v] = PHI[v] ∪ {y}          /* BBs containing a Φ for v */
         if v ∉ orig[y]: W = W ∪ {y}    /* add BB to work list */
       }
   }
}
```

Rename all variables

Rename 算法如下，参数 B 表示基本块。

rename(B):

for each assignment in B:

  replace (non-Φ) use of v with top of stack(v)

  replace def of v with v_{new}, push v_{new} onto stack(v)

for each successor S of B in CFG:

  replace k'th arg. of Φ(v,…v) with top of stack(v),

    where B is k'th predecessor of S

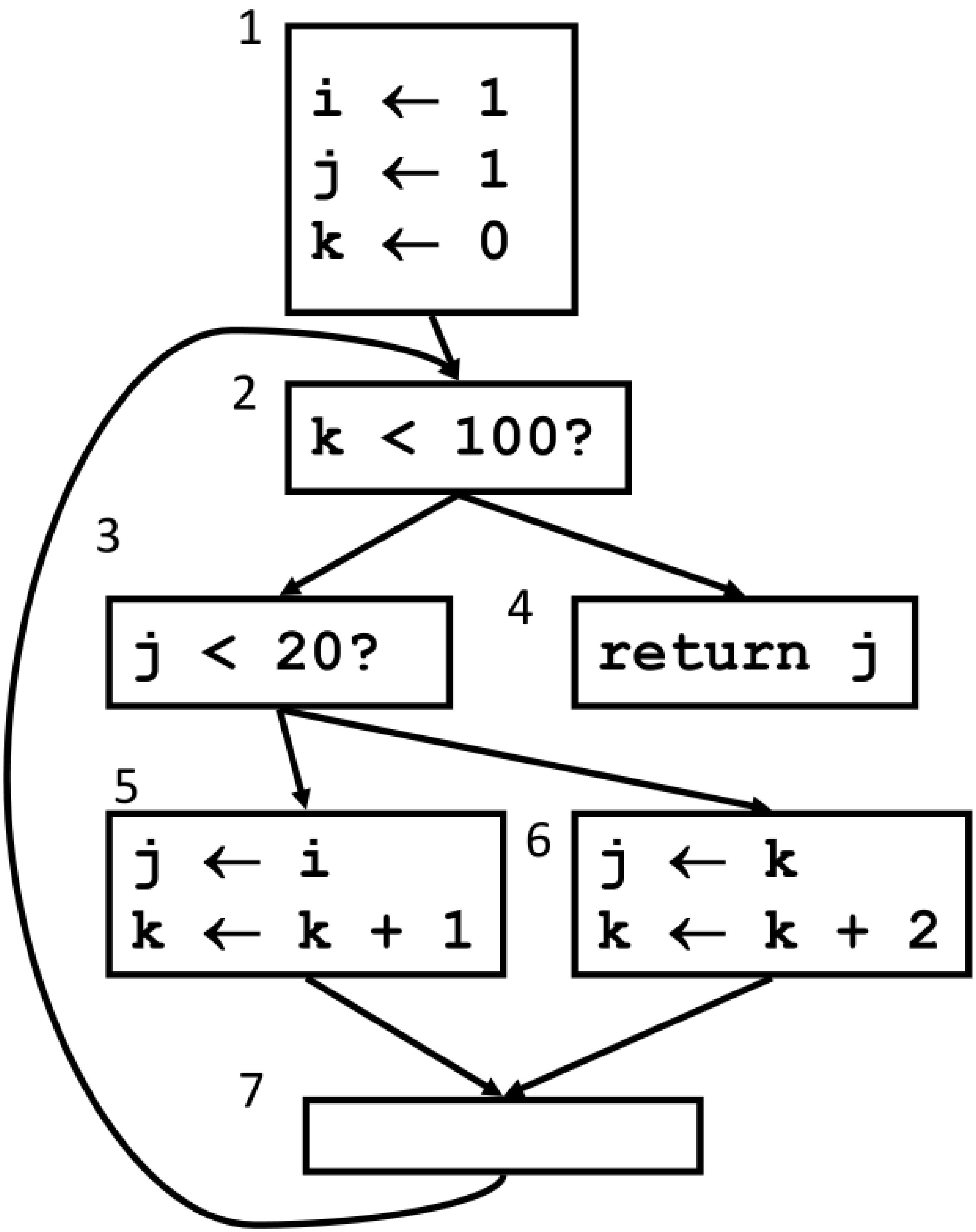
call rename(C) on all children C of B in D-tree

pop all defs in B from stacks

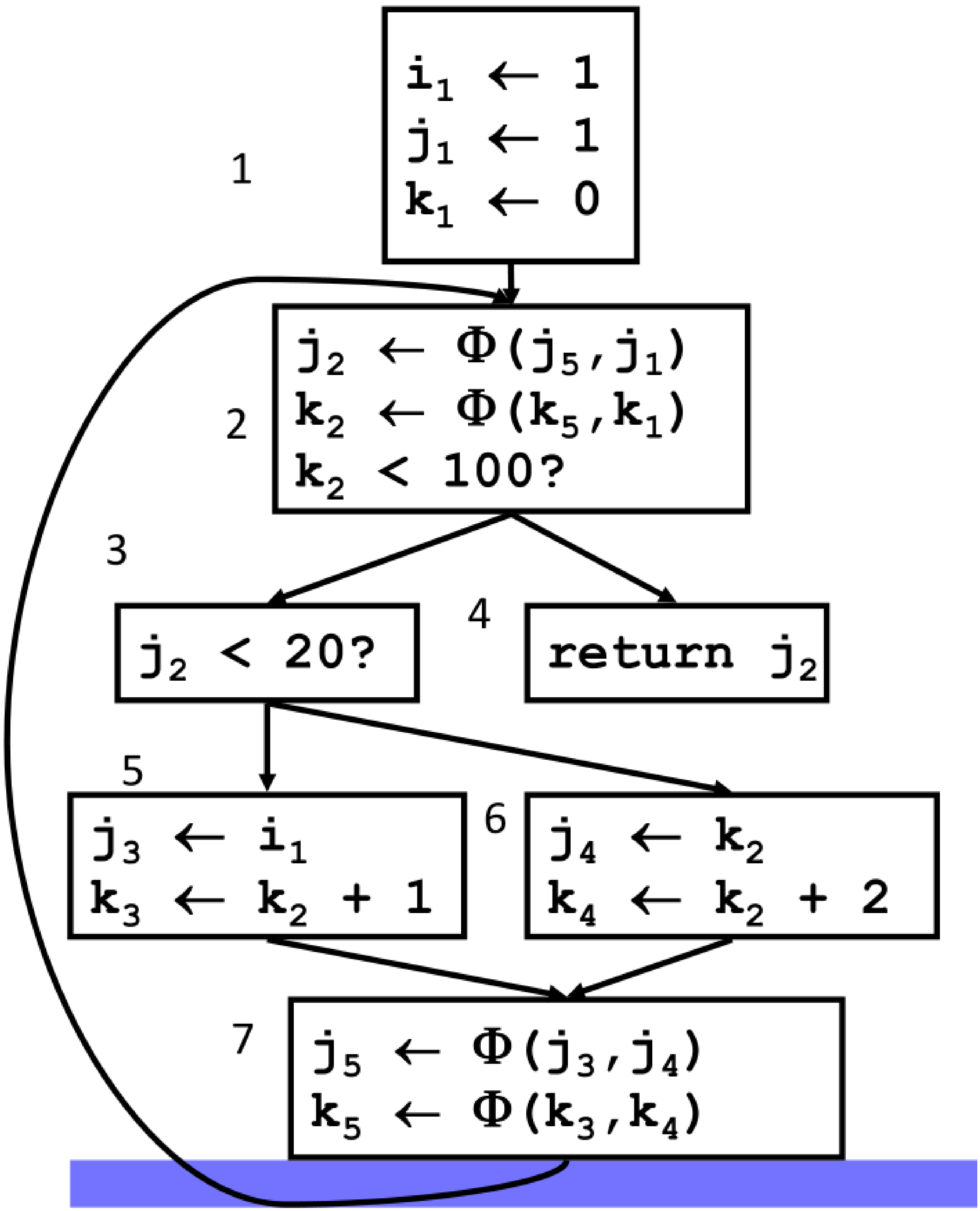
当完成 Phase1 (place all Φ()) 后，执行 phase2 (rename all variables) 就是调用 rename(entry block)，entry block 就是 CFG 的入口基本块。

Example

Normal Form IR



SSA Form IR



LLVM

Basics 部分的内容在 LLVM 中均有实现， Iterated Dominance Frontier 的实现位于 `llvm-7.0.0.src/include/llvm/Analysis/IteratedDominanceFrontier.h` 和 `llvm-7.0.0.src/lib/Analysis/IteratedDominanceFrontier.cpp` 。

```
template <class NodeTy, bool IsPostDom>
class IDFCalculator {
 public:
  IDFCalculator(DominatorTreeBase<BasicBlock, IsPostDom> &DT)
      : DT(DT), useLiveIn(false) {}

  void setDefiningBlocks(const SmallPtrSetImpl<BasicBlock *> &Blocks) {
    DefBlocks = &Blocks;
  }

  void setLiveInBlocks(const SmallPtrSetImpl<BasicBlock *> &Blocks) {
    LiveInBlocks = &Blocks;
    useLiveIn = true;
  }

  void resetLiveInBlocks() {
    LiveInBlocks = nullptr;
    useLiveIn = false;
  }

  void calculate(SmallVectorImpl<BasicBlock *> &IDFBlocks);

private:
 DominatorTreeBase<BasicBlock, IsPostDom> &DT;
 bool useLiveIn;
 const SmallPtrSetImpl<BasicBlock *> *LiveInBlocks;
 const SmallPtrSetImpl<BasicBlock *> *DefBlocks;
};
```

`IDFCalculator` 的构造函数很简单，初始化了成员变量 `DominatorTreeBase<BasicBlock, IsPostDom> &DT` 和 `bool useLiveIn` ，成员变量 `bool useLiveIn` 就是标识是否使用 `LiveInBlocks` ， `LiveInBlocks` 就是这样的基本块集合， value 在这些基本块的入口是活跃的。 `DefBlocks` 就是那些对 value 进行定值的基本块。

函数 `setDefiningBlocks()` 和函数 `setLiveInBlocks()` 就是用来设置成员变量 `DefBlocks` 和 `LiveInBlocks` 的。

`IDFCalculator` 真正来计算 Iterated Dominance Frontier 的函数就是成员函数 `calculate()` 。类 `IDFCalculator` 的使用方式就是首先定义该类的一个对象，然后调用成员函数 `setDefiningBlocks()` 和 `setLiveInBlocks()` ，其中对 `setLiveInBlocks()` 的调用是可选的。最后调用成员函数 `calculate()` 计算出 Iterated Dominance Frontier。

成员函数 `calculate()` 的定义如下：

```
template <class NodeTy, bool IsPostDom>
void IDFCalculator<NodeTy, IsPostDom>::calculate(
    SmallVectorImpl<BasicBlock *> &PHIBlocks) {
  // Use a priority queue keyed on dominator tree level so that inserted nodes
  // are handled from the bottom of the dominator tree upwards. We also augment
  // the level with a DFS number to ensure that the blocks are ordered in a
  // deterministic way.
  typedef std::pair<DomTreeNode *, std::pair<unsigned, unsigned>>
      DomTreeNodePair;
  typedef std::priority_queue<DomTreeNodePair, SmallVector<DomTreeNodePair, 32>,
                              less_second> IDFPriorityQueue;
  IDFPriorityQueue PQ;

  DT.updateDFSNumbers();

  for (BasicBlock *BB : *DefBlocks) {
    if (DomTreeNode *Node = DT.getNode(BB))
      PQ.push({Node, std::make_pair(Node->getLevel(), Node->getDFSNumIn())});
  }

  SmallVector<DomTreeNode *, 32> Worklist;
  SmallPtrSet<DomTreeNode *, 32> VisitedPQ;
  SmallPtrSet<DomTreeNode *, 32> VisitedWorklist;

  while (!PQ.empty()) {
    DomTreeNodePair RootPair = PQ.top();
    PQ.pop();
    DomTreeNode *Root = RootPair.first;
    unsigned RootLevel = RootPair.second.first;

    // Walk all dominator tree children of Root, inspecting their CFG edges
```



```
the
    // definition set.

    Worklist.clear();
    Worklist.push_back(Root);
    VisitedWorklist.insert(Root);

    while (!Worklist.empty()) {
      DomTreeNode *Node = Worklist.pop_back_val();
```

```
      BasicBlock *BB = Node->getBlock();
      // Succ is the successor in the direction we are calculating IDF, so
it is
      // successor for IDF, and predecessor for Reverse IDF.
      for (auto *Succ : children<NodeTy>(BB)) {
        DomTreeNode *SuccNode = DT.getNode(Succ);

        // Quickly skip all CFG edges that are also dominator tree edges
instead
        // of catching them below.
        if (SuccNode->getIDom() == Node)
          continue;

        const unsigned SuccLevel = SuccNode->getLevel();
        if (SuccLevel > RootLevel)
          continue;

        if (!VisitedPQ.insert(SuccNode).second)
          continue;

        BasicBlock *SuccBB = SuccNode->getBlock();
        if (useLiveIn && !LiveInBlocks->count(SuccBB))
          continue;

        PHIBlocks.emplace_back(SuccBB);
        if (!DefBlocks->count(SuccBB))
          PQ.push(std::make_pair(
              SuccNode, std::make_pair(SuccLevel, SuccNode-
>getDFSNumIn())));
      }

      for (auto DomChild : *Node) {
        if (VisitedWorklist.insert(DomChild).second)
          Worklist.push_back(DomChild);
      }
    }
  }
}
```

虽然看起来函数 `calculate()` 有很多行，但是实际上还是比较清晰的。该函数中使用优先队列来存储那些对 value 进行定值的基本块，基本块在 Dominator Tree 上的 level 越低（越靠近叶子节点），基本块在 Dominator Tree 上的 DFS 访问次序越小，就越排在优先队列的前面。优先队列的排序方式对应 Computing the Dominance Frontier: Algorithm 中以 post-order traversal of the Dominator tree 的方式来依次处理 Dominator tree 上的每个节点。后面该函数的迭代方式就是将计算 Dominance Frontier 和 Place Φ() 的算法结合在了一起。

Reference

https://www.cs.cmu.edu/~15745/lectures/L11-SSA.pdf