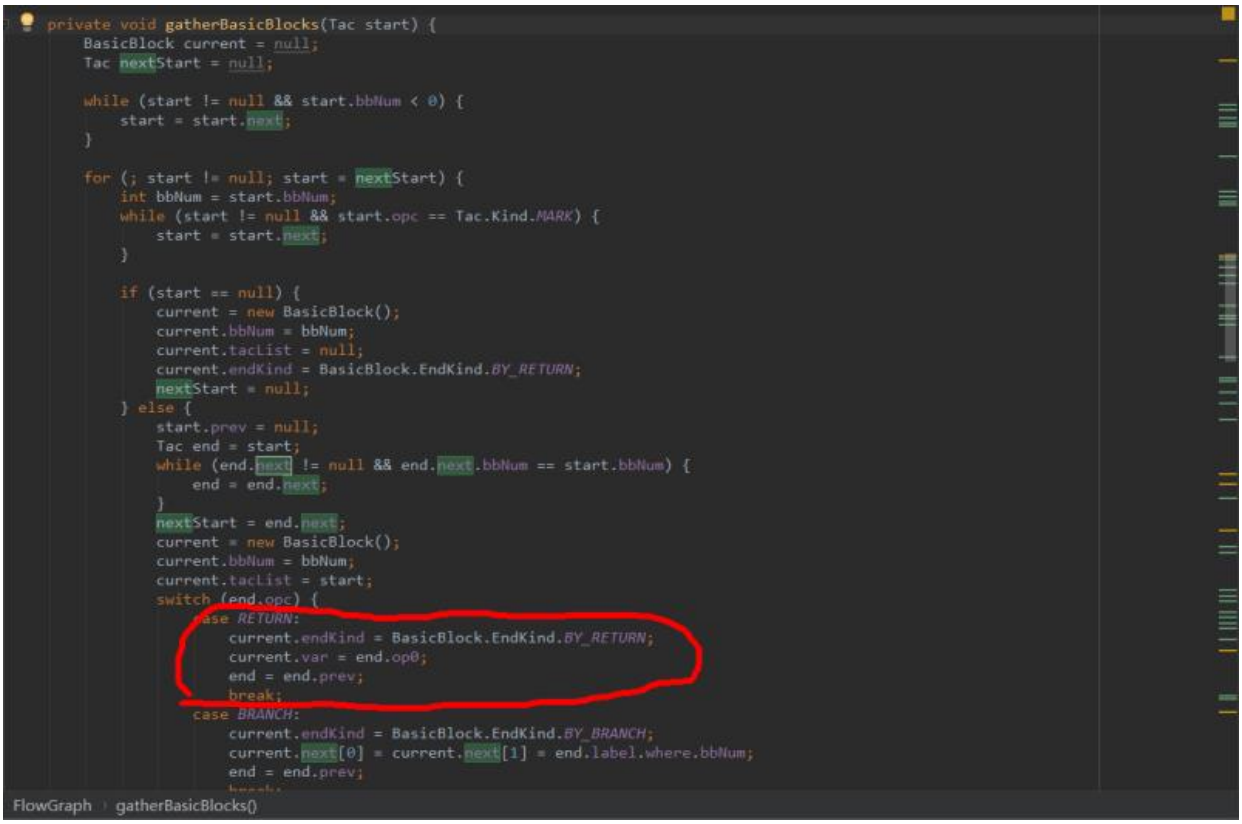
编译原理PA4实验报告

张钰晖 计55 2015011372 yuhui-zh15@mails.tsinghua.edu.cn

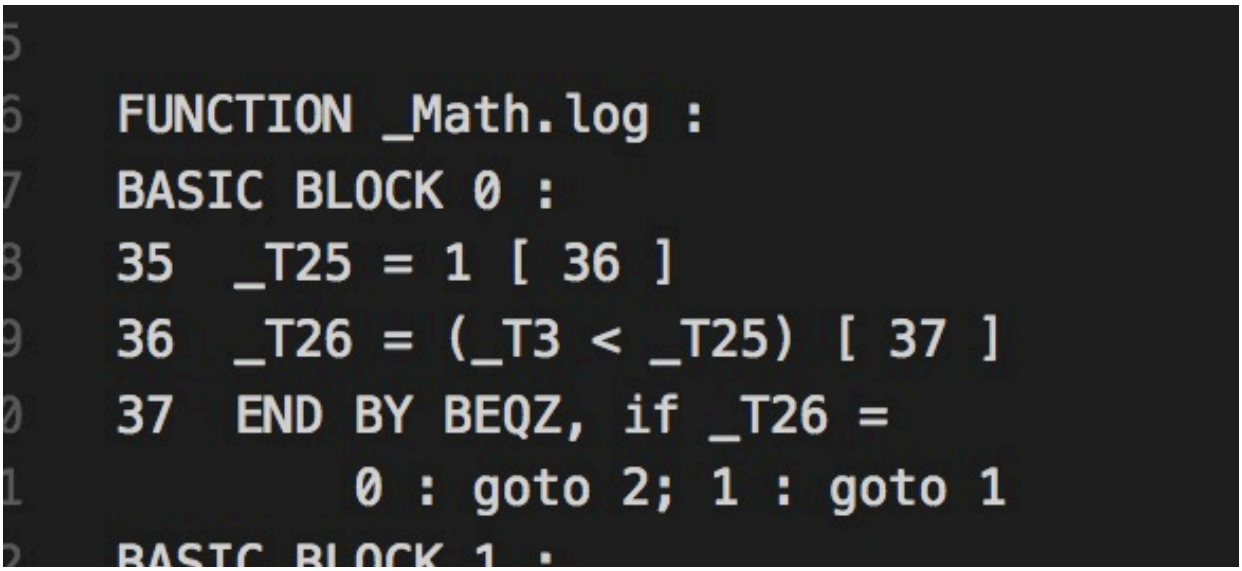
<重要说明>

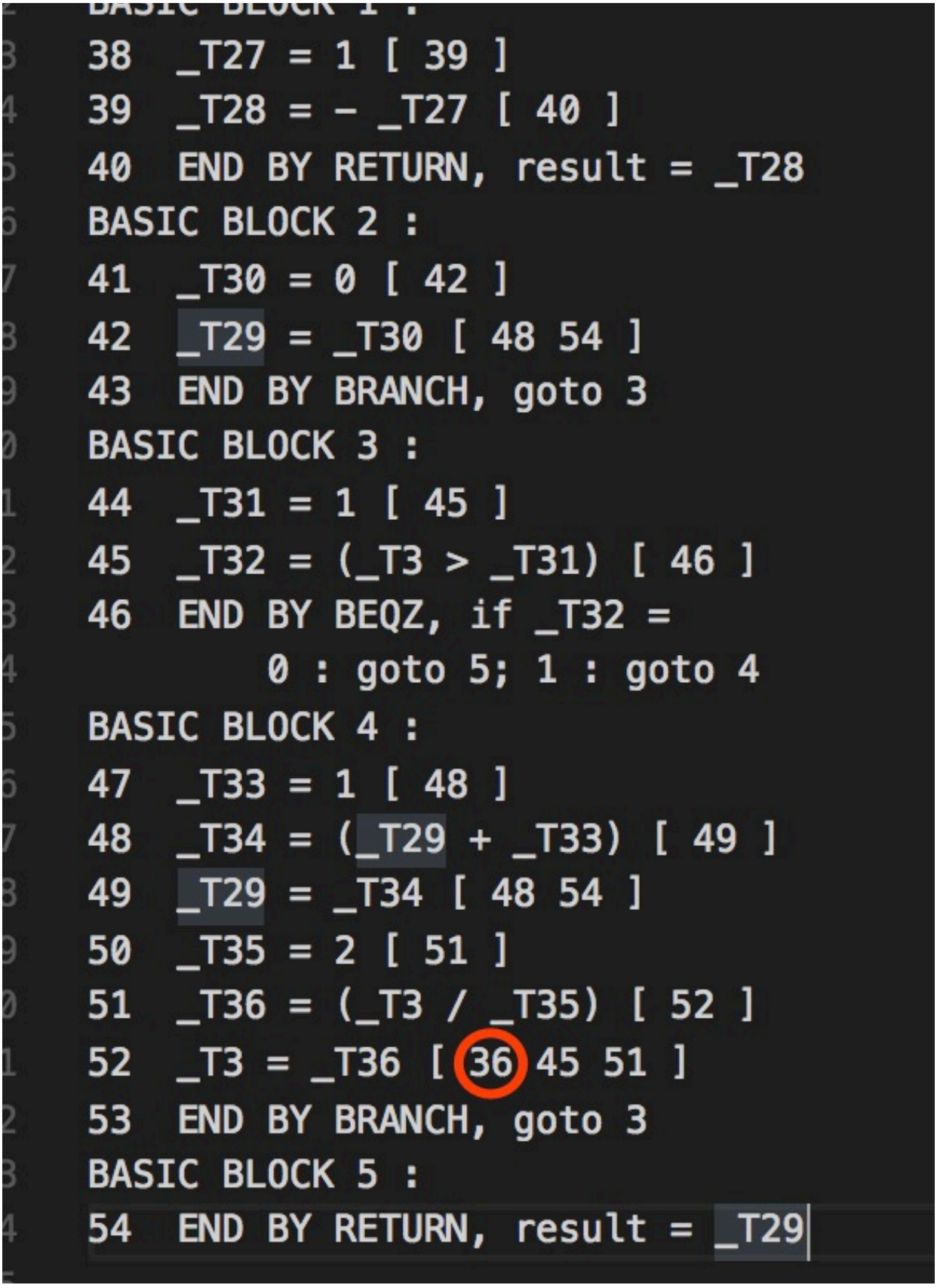
由于本次实验没有采用Lecture 12的方法进行，故math.du与标准输出不一致。

根据同学的反映，框架中遇到return语句的时候这个框架并没有给next赋值，导致next的值为0，它会错误地认为下一个block是0。



这会导致math.du的第81行错误，不应该有36。





由于笔者的算法依赖这部分框架程度较低，不需要框架此部分代码，故输出正确，没有输出36，导致和错误的答案输出不一致，特此说明，希望您理解加上此部分分数，谢谢！

任务描述

PA1阶段，我们完成了**词法分析**、**语法分析**，生成了**抽象语法树(AST)**。

PA2阶段，我们要基于PA1的抽象语法树，实现**构造符号表**、**静态语义检查**。

PA3阶段，我们在PA2的基础上，实现**语法制导的中间代码翻译**。

PA4阶段，我们在PA3的基础上，进行数据流分析，实现**DU链求解**。

文件说明

在本阶段，以下文件非常重要，主要需要修改以下文件。

文件名	含义	说明
dataflow/BasicBlock	基本块定义	实现DU链求解功能
dataflow/FlowGraph	控制流图定义	实现DU链求解功能

实验说明

DU链即定值—引用链(Definition-Use Chaining)。

假设在程序中某点 p 定义了变量 A 的值，从 p 存在一条到达 A 的某个引用点 s 的路径，且该路径上不存在 A 的其他定值点，则把所有此类引用点 s 的全体称为 A 在定值点 p 的定值-引用链，简称 DU 链。

DU链反映了定义变量被使用情况，是数据流分析环节的重要一环。

实验算法

本次实验没有采用Lecture 12的方法进行，故在此详细说明本算法。如果不能较好的理解这个算法，可以参考下面详细的Java代码。

对每个块的每个定义Tac语句，递归搜索定义变量被使用情况，直至遇到其被重复定义的Tac语句，这一段区间内使用的该变量的Tac语句即为DU链。

> 分析DU链伪代码如下

```
def 分析DU链:
    for 基本块 in 流图:
        for Tac语句 in 块Tac语句:
            if Tac语句 为定义类型:
                获得 Tac语句 定义的变量，清空搜索状态，递归跟踪该变量使用情况
```

在递归的过程中，若基本块已经被搜索或者该变量被重复定义，则递归返回。在递归的过程中，需要根据块结束类型，获得其连接的所有块，进行不同形式的递归。同时递归的过程中需要对递归深度为0进行特殊处理，因为递归深度为0时，需要对当前定义语句的下一条语句开始搜索，而其他时刻都从块第一条语句开始搜索。

> 递归搜索伪代码如下

```
def 递归搜索:
    if 基本块 已被搜索，返回
    if 递归深度 为0，起始搜索位置为定义语句下一条语句
    else 起始搜索位置为 基本块 第一条语句，标记块已搜索
    for Tac语句 in 块Tac语句:
        if Tac语句 使用了定义变量，记录该 Tac语句 位置
        if Tac语句 重新定义了之前变量，标记重定义，退出循环
    if 没有重定义:
        根据返回类型，查看 基本块 返回语句是否使用了定义变量，递归搜索 基本块 所有的连接块
    返回
```

获得Tac语句定义变量和判断Tac语句是否使用了定义变量较为简单，不再赘述，可以参考代码。

由于标记了每个块是否被搜索，每个块至多被搜索一次，故单条语句搜索算法复杂度为O(n)，不会出现指数型递归的情况。总体算法复杂度上界为O(Tac语句数量平方)，事实上，由于并非所有Tac语句都为定义语句，同时由于每个块能递归的连接块远远小于程序总块数（因为一条Tac语句的递归区间一般仅在一个函数中），故实际算法复杂度应该低得多。

实验实现

本次实验没有按照Lecture 12的方法进行，故在此列出详细的Java代码。

由于框架已经提供好了很多方便的接口，例如Tac的id，BasicBlock的id等，故本次实验修改较为简单，主要是使用接口。

- 修改类dataflow/BasicBlock.java

修改DUChain为public变量，新增searched变量用于记录基本块是否已经被搜索。

```
public Map<Pair, Set<Integer>> DUChain;
public boolean searched;
```

- 修改类dataflow/FlowGraph.java

新增DU链分析函数analyzeDuChain，新增递归搜索DU链函数dfsSearch，新增获取定义函数getDef，新增判断TAC语句是否使用定义的变量isUse。

```
public FlowGraph(Functy func) {
    ...
    analyzeDuChain();
}

public void analyzeDuChain(){
    for (BasicBlock bb : bbs) {
        Tac taclist = bb.tacList;
        for (Tac t = taclist; t != null; t = t.next){
            Temp def = getDef(t);
            if (def == null) continue;
            Pair pair = new Pair(t.id, t.op0);
```

```
            Set<Integer> locations = new TreeSet<Integer>();
            for (BasicBlock blk : bbs) blk.searched = false;
            dfsSearch(locations, t, bb, 0);
            bb.DUChain.put(pair, locations);
        }
    }
}

private void dfsSearch(Set<Integer> locations, Tac tac, BasicBlock bb,
int depth) {
    if (bb.searched) return;
    Tac taclist;
    if (depth == 0) { taclist = tac.next; }
    else { taclist = bb.tacList; bb.searched = true; }
    Temp def = getDef(tac);
    boolean isRedef = false;
    for (Tac t = taclist; t != null; t = t.next) {
        if (isUse(def, t)) {
            locations.add(t.id);
        }
        Temp redef = getDef(t);
        if (def == redef) {
            isRedef = true;
            break;
        }
    }
    if (!isRedef) {
        switch (bb.endKind) {
            case BY_BRANCH:
                dfsSearch(locations, tac, getBlock(bb.next[0]), depth +
1);
                break;
            case BY_BEQZ:
            case BY_BNEZ:
                if (bb.var == def) {
                    locations.add(bb.endId);
                }
                dfsSearch(locations, tac, getBlock(bb.next[0]), depth +
1);
                dfsSearch(locations, tac, getBlock(bb.next[1]), depth +
1);
                break;
            case BY_RETURN:
                if (bb.var == def) {
                    locations.add(bb.endId);
                }
                break;
        }
    }
```

```
}

public boolean isUse (Temp def, Tac tac) {
    switch (tac.opc) {
        case ADD:
        case SUB:
        case MUL:
        case DIV:
        case MOD:
        case LAND:
        case LOR:
        case GTR:
        case GEQ:
        case EQU:
        case NEQ:
        case LEQ:
        case LES:
        /* use op1 and op2, def op0 */
            if (tac.op1 == def || tac.op2 == def) return true;
            break;
        case NEG:
        case LNOT:
        case ASSIGN:
        case INDIRECT_CALL:
        case LOAD:
        /* use op1, def op0 */
            if (tac.op1 == def) return true;
            break;
        case LOAD_VTBL:
        case DIRECT_CALL:
        case RETURN:
        case LOAD_STR_CONST:
        case LOAD_IMM4:
        /* def op0 */
            break;
        case STORE:
        /* use op0 and op1*/
            if (tac.op0 == def || tac.op1 == def) return true;
            break;
        case BEQZ:
        case BNEZ:
        case PARM:
        /* use op0 */
            if (tac.op0 == def) return true;
            break;
        default:
        /* BRANCH MEMO MARK PARM*/
            break;
    }
```

```
    return false;
}

public Temp getDef (Tac tac) {
    Temp def = null;
    switch (tac.opc) {
        case ADD:
        case SUB:
        case MUL:
        case DIV:
        case MOD:
        case LAND:
        case LOR:
        case GTR:
        case GEQ:
        case EQU:
        case NEQ:
        case LEQ:
        case LES:
        /* use op1 and op2, def op0 */
        case NEG:
        case LNOT:
        case ASSIGN:
        case INDIRECT_CALL:
        case LOAD:
        /* use op1, def op0 */
        case LOAD_VTBL:
        case DIRECT_CALL:
        case RETURN:
        case LOAD_STR_CONST:
        case LOAD_IMM4:
        /* def op0 */
            def = tac.op0;
            break;
        case STORE:
        /* use op0 and op1*/
        case BEQZ:
        case BNEZ:
        case PARM:
        /* use op0 */
            break;
        default:
        /* BRANCH MEMO MARK PARM*/
            break;
    }
    return def;
}
```

思考题

1. 说明本阶段的工作，尤其是如何在现有框架下实现DU链的求解。

解答：前面已经充分通过了文字+伪代码+Java代码描述，如果您依旧没有理解，可以邮件或微信联系我。

2. 以 TestCases/S4/t0.decaf(对应于讲义第 12 讲 2.2 节图 4)为例，分析输出的 TAC 序列与 DU 链信息，并验证它与讲义中 2.4.2 节给出的结果是一致的。

t0.decaf：

```
class Main {
    static void main() {
        f();
    }

    static void f() {
        int i;
        int j;
        int a;
        int b;
        a = 0;
        b = 1;

        bool flag;
        flag = false;

        i = 2;
        j = i + 1;

        while (flag) {
            i = 1;
            if (flag)
                f();

            j = j + 1;
            if (flag)
                j = j - 4;
            a = i;
            b = j;
        }
    }
}
```

t0.du：

```
FUNCTION _Main_New :
BASIC BLOCK 0 :
```

```
1   _T0 = 4 [ 2 ]
2   parm _T0
3   _T1 =  call _Alloc [ 5 6 ]
4   _T2 = VTBL <_Main> [ 5 ]
5   *(_T1 + 0) = _T2
6   END BY RETURN, result = _T1

FUNCTION main :
BASIC BLOCK 0 :
7   call _Main.f
8   END BY RETURN, void result

FUNCTION _Main.f :
BASIC BLOCK 0 :
9   _T7 = 0 [ 10 ]
10  _T5 = _T7 [ ]
11  _T8 = 1 [ 12 ]
12  _T6 = _T8 [ ]
13  _T10 = 0 [ 14 ]
14  _T9 = _T10 [ 21 24 30 ]
15  _T11 = 2 [ 16 ]
16  _T3 = _T11 [ 18 ]
17  _T12 = 1 [ 18 ]
18  _T13 = (_T3 + _T12) [ 19 ]
19  _T4 = _T13 [ 28 ]
20  END BY BRANCH, goto 1
BASIC BLOCK 1 :
21  END BY BEQZ, if _T9 =
        0 : goto 7; 1 : goto 2
BASIC BLOCK 2 :
22  _T14 = 1 [ 23 ]
23  _T3 = _T14 [ 35 ]
24  END BY BEQZ, if _T9 =
        0 : goto 4; 1 : goto 3
BASIC BLOCK 3 :
25  call _Main.f
26  END BY BRANCH, goto 4
BASIC BLOCK 4 :
27  _T15 = 1 [ 28 ]
28  _T16 = (_T4 + _T15) [ 29 ]
29  _T4 = _T16 [ 28 32 36 ]
30  END BY BEQZ, if _T9 =
        0 : goto 6; 1 : goto 5
BASIC BLOCK 5 :
31  _T17 = 4 [ 32 ]
32  _T18 = (_T4 - _T17) [ 33 ]
33  _T4 = _T18 [ 28 36 ]
34  END BY BRANCH, goto 6
BASIC BLOCK 6 :
```

```
35  _T5 = _T3 [ ]
36  _T6 = _T4 [ ]
37  END BY BRANCH, goto 1
BASIC BLOCK 7 :
38  END BY RETURN, void result
```

讲义图：

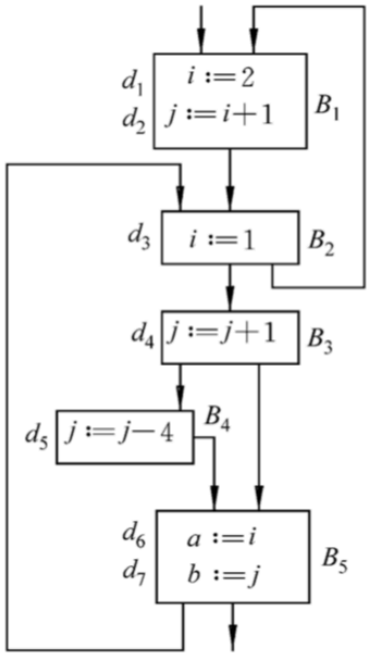


图 4 某个流图

讲义结果：

```
i 在定值点 d1 的 DU 链为 {d2},
j 在定值点 d2 的 DU 链为 {d4},
i 在定值点 d3 的 DU 链为 {d6},
j 在定值点 d4 的 DU 链为 {d4,d5,d7},
j 在定值点 d5 的 DU 链为 {d4,d7}
```

分析验证：

由输出结果可以很容易找到Main.main和Main.f，Main.f后半部分与讲义一致，可以看出Main.f被分成了8个基本块，同时可以看出T3是i，T4是j，T7是a，T8是b。

由以下验证结果可知其与讲义中 2.4.2 节给出的结果是一致的。

```
以下可验证 i 在定值点 d1 的 DU 链为 {d2}
16  _T3 = _T11 [ 18 ] **
17  _T12 = 1 [ 18 ]
18  _T13 = (_T3 + _T12) [ 19 ]
以下可验证 j 在定值点 d2 的 DU 链为 {d4}
18  _T13 = (_T3 + _T12) [ 19 ]
19  _T4 = _T13 [ 28 ] **
```

```
27  _T15 = 1 [ 28 ]
28  _T16 = (_T4 + _T15) [ 29 ]
以下可验证 i 在定值点 d3 的 DU 链为 {d6}
22  _T14 = 1 [ 23 ]
23  _T3 = _T14 [ 35 ] **
35  _T5 = _T3 [ ]
以下可验证 j 在定值点 d4 的 DU 链为 {d4,d5,d7}
27  _T15 = 1 [ 28 ]
28  _T16 = (_T4 + _T15) [ 29 ]
29  _T4 = _T16 [ 28 32 36 ] **
31  _T17 = 4 [ 32 ]
32  _T18 = (_T4 - _T17) [ 33 ]
36  _T6 = _T4 [ ]
以下可验证 j 在定值点 d5 的 DU 链为 {d4,d7}
32  _T18 = (_T4 - _T17) [ 33 ]
33  _T4 = _T18 [ 28 36 ] **
27  _T15 = 1 [ 28 ]
28  _T16 = (_T4 + _T15) [ 29 ]
36  _T6 = _T4 [ ]
```

技巧心得

本次作业难度相对PA3有所缓和，通过以下方法可以加速编程。

1. 仔细阅读代码框架

由于框架已经提供好了很多方便的接口，例如Tac的id，BasicBlock的id等，故本次实验修改较为简单，主要是使用接口。如果不理解这些接口自己实现的话，将花掉大量时间，代码量也急剧扩大。

2. 仔细阅读测试样例及正确输出

当充分理解测试样例和正确输出后，不仅能加深巩固对DU链的理解，更是加速编程，调出bug的必要保证。

总结

本次实验PA4相对实验PA3难度略有下降，主要可能是因为框架已经提供好了很多方便的接口，并且一个明显的特点就是这次实现代码量并不算很大，或许是因为笔者的算法和课件略有不同。但实现时但必须非常充分理解整个框架的结构。在实现PA4过程中，通过以上两个技巧，加速了编程，在实现的过程中，充分的锻炼了笔者的编程能力，对DU链的相关概念理解有了质的提高，笔者在实践之中真正感受到了编译的神奇之处。