

SMWaze

Межпроцедурные анализы и
оптимизации

Межпроцедурные оптимизации:

- Граф вызовов процедур (call graph)
- Подстановка процедур (inline)
- Частичная подстановка (partial inline & outlining)
- Пропагация констант, диапазонов, выравнивая, указателей и алиасов (constant, range, alignment, points-to, aliases propagation)
- Клонирование процедур (cloning)
- Замена стандартных процедур (replacing)
- Хвостовая рекурсия (tail recursion)
- Оптимизации доступа в память (memory optimizations)

Межпроцедурные анализы указателей:

- Результаты анализов: указатели и алиасы, свойства may- и must-point-to
- Неинициализированные указатели и неадресные значения
- Чувствительность к потоку управления
- Чувствительность к вызывающему контексту
- Модель обработки динамической памяти и составных объектов
- Учет языковых типов, требование компиляции всей программы
- Эффективный анализ на основе свойства транзитивности
- Точный анализ на основе ЧТФ

Граф вызовов – мультиграф, вершины – процедуры. Вершины `proc1`, `proc2` соединены ориентированным ребром (`proc1`, `proc2`), если процедура `proc1` вызывается из `proc2`.

Трудности при построении:

- Раздельная компиляция
- Различные вызовы одной и той же процедуры (пометка точки вызова)
- Вызовы по косвенности и рекурсивные вызовы
- Глобальные метки и нелокальные переходы

Свойства графов:

- Динамический и статический
- Чувствительность к контексту (fully context-sensitive \leftrightarrow context-insensitive)

Оптимизации на графе вызовов:

- Удаление невызываемых процедур («мертвый код»)
- Пропагация свойства процедур невозврата управления (`abort`, `exit`, `longjmp`) для переноса операции через операцию вызова
- Планирование на межпроцедурном уровне по «холодным» и «горячим» регионам – не просаживать буфер инструкций
- Анализ указателей – уточнение графа вызовов, превращение косвенных вызовов в прямые

Подстановка процедуры – замена вызова процедуры на копию ее кода, связывание формальных параметров с фактическими, возвращаемых значений с переменными, в который происходит запись этих значений.

Исходный Вариант

```
int f1 (int q)
{
    static int A;
    int b = q + 2;
    A++;
    return b;
}
int f2( int p)
{
    if ( p) return f1(p + 1);
    else return 0;
}
int f( int a)
{
    return f2(a);
}
```

После трансформации

```
static int A;
int f1 (int q)
{
    int b = q + 2;
    A++;
    return b;
}
int f2( int p)
{
    if ( p) return f1(p + 1);
    else return 0;
}
int f( int a)
{
    int virt2, virt1, p, q, b;
    p = a;
    if ( p) {
        q = p + 1;
        b = q + 2;
        A++;
        virt1 = b;
        virt2 = virt1;
    } else {
        virt2 = 0;
    }
    return virt2; }
```

Трудности:

- Несовпадение числа формальных и фактических параметров (функции с переменным числом параметров, нотация Керниган-Риччи)
- Нелокальные метки в вызывающем контексте – простановка глобальных меток в точках подстановки процедуры
- Коррекция профильной информации и результатов анализов
- Подстановка рекурсивной процедуры

Плюсы:

- Избавляемся от накладных расходов на вызов
- Специфицируем контекст для проведения локальных оптимизаций (оптимизация циклов)

Минусы:

- Рост кода
- Просадка кеша инструкций
- Давление на регистры
- Утяжеление процедуры – увеличение времени работы компилятора – неэффективный анализ

Поддержка в языках программирования - директива inline

Схемы подстановки – разный обход графа вызовов:

- Начиная с main берем процедуру и подставляем в нее все вызываемые процедуры, которые могут быть подставлены.
- Начиная с процедур, не содержащих вызовы (листовых) подставляем их в процедуры, откуда они вызываются и могут быть подставлены.

Оптимизация листовых процедур (Leaf-Routine Optimization)

- упрощение пролога и эпилога вызова процедуры за счет того, что внутри не содержится вызовов.

Эвристики inline:

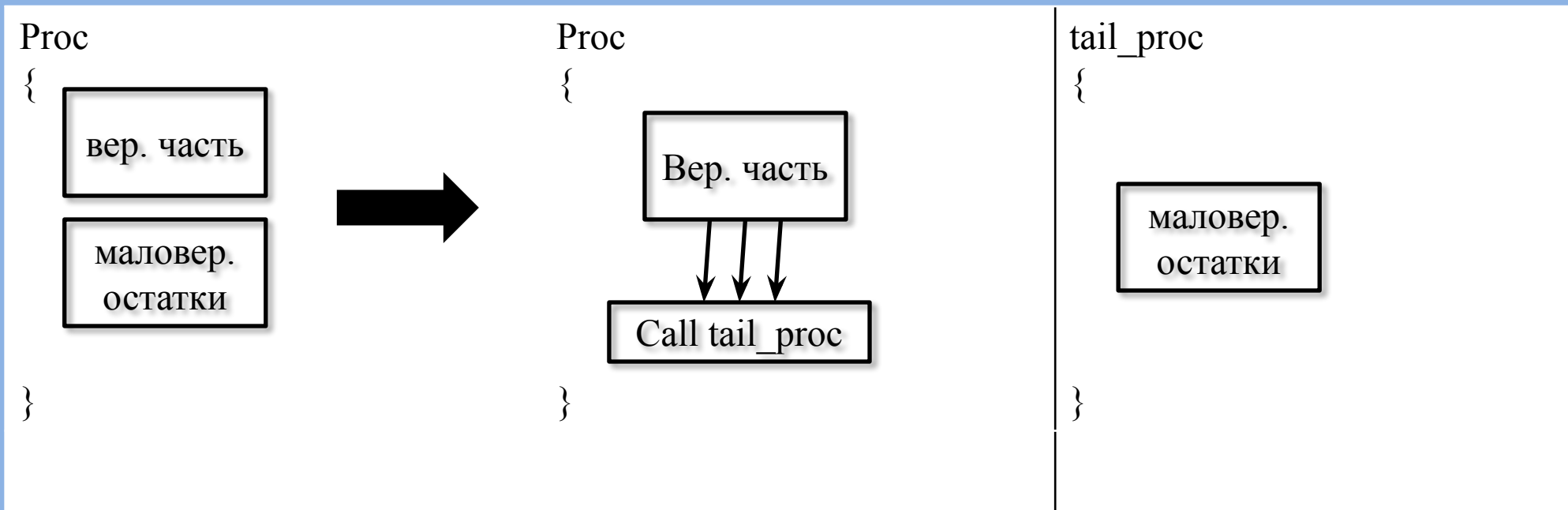
- Профильная информация (чем больше процедура вызывается, тем больше она годится для подстановки)
- Размер подставляемого кода (чем меньше процедура, тем больше она годится для подстановки)
- Процедуры внутри цикла надо подставлять для расширения возможностей оптимизации
- Если некоторые параметры процедуры константы, то надо подставлять для повышения эффективности оптимизаций благодаря пропагации констант

Частичная подстановка (partial inline) - процедуры с большим размером кода, не подходящим по эвристике для подстановки, но содержащие значительную вероятную часть.

Подготовка (outlining):

- В соответствии с профилем выделяется наиболее вероятная часть процедуры
- Выходы из вероятной части стягиваются в одну точку, в которой строится вызов новой процедуры называемой хвостовой (tail proc), содержащей маловероятные остатки

Outlining полезен для уменьшения размера процедур



Подстановка:

- Если у процедуры есть разрезанная копия, то подставляем вероятную часть и оставляем вызов хвостовой части

Процедура с большим размером кода, но при вызове она специфицируется параметрами до небольшого размера – необходим пропагатор.

```
Proc ( int args, int cond)
{
    If ( cond )
    {
        /* big code */

    } else
    {
        /* small code */

    }
}
```


- Пропагация констант (constant propagation) – пропагирует статически известные константные значения по представлению.

Исходный Вариант

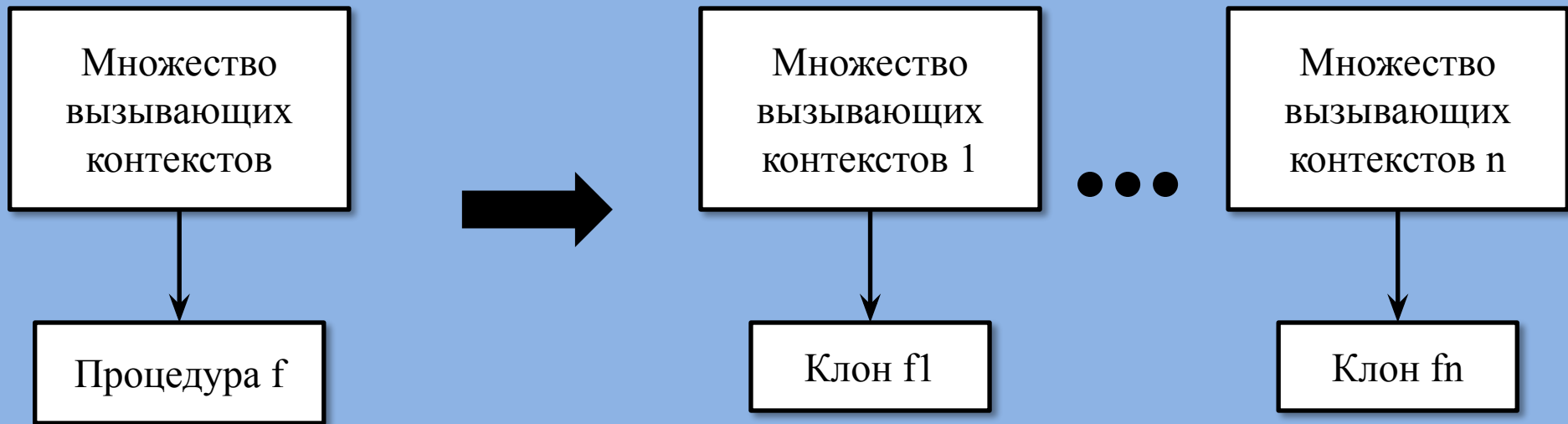
```
int b = 1;
int g( void){
    return 0;
}
void f( int p)
{   int a;
    if ( a )    {
        a = g( );
    } else    {
        a = p;
    }
    b = a;
}
int main( void)
{
    f( 0);
    f( b);
    return b;
}
```

После трансформации

```
int b = 1;
int g( void) {
    return 0;
}
void f( int p)
{   int a;
    if ( a )  {
        a = 0;
    } else   {
        a = 0;
    }
    b = 0;
}
int main( void)
{
    f( 0);
    f( 0);
    return 0;
}
```

- Пропагация выравниваний определяет для каждой операции доступа в память выровненность на определенное значение (фортран).
- Пропагация указателей определяет к каким именно объектам в памяти обращаются операции доступа в память.
- Пропагация алиасов определяет могут ли две операции доступа в память работать с одним фрагментом.
- Пропагация диапазонов определяет интервал или набор возможно принимаемых значений объектами программы

С помощью этих анализов возможно специфицировать поведение процедуры для опеределенных вызывающих контекстов – провести клонирование процедур.



Клон – спецификация процедуры для определенного вызывающего контекста
Клонирование подставляет вместо вызова процедуры вызов ее клона,
соответствующего приходящим в эту точку вызова контекстам

После клонирования становится возможно подстановка.

Исходный Вариант

```
void f( int p)
{
    if ( p )
        [часть1];
    else
        [часть2];
}

void g( )
{
    f( 1);
    f( 0);
}
```

После трансформации

```
void f( int p)
{
    if ( p )
        [часть1];
    else
        [часть2];
}

void f1( )
{
    [часть1];
}

void f2( )
{
    [часть2];
}

void g( )
{
    f1( );
    f2( );
}
```

Замена стандартных процедур

Replacing

Replacing – замена вызова стандартной функции с некоторыми параметрами на эквивалентный код

Это позволяет сделать затем подстановку или вообще избавиться от вызова.

Для замены требуется условие доверия к стандартным библиотекам, errno и т.д.

Исходный Вариант <code>printf(" ");</code>	После трансформации <code>for(i=0; i<5; i++)putch(" ");</code>
Исходный Вариант <code>Pow(2,n), pow(n, k) k=2,3,4;</code>	После трансформации <code>1 << n; n*...*n;</code>

Хвостовая рекурсия – преобразование рекурсии в цикл заменой рекурсивного вызова процедуры переходом к первой операции.

Для замены необходимо:

- После рекурсивного вызова сразу следует выход из процедуры
- При наличии профиля вызовов > 0
- Если глубина ≥ 2 , то уменьшаем ее с помощью подстановки.

Исходный Вариант

```
int
tail( int i)
{
    if ( i > 32 )
    {
        return (i / 2);
    } else
    {
        return (tail(++i));
    }
}
```

После трансформации

```
int
tail( int i)
{
start:
    if ( i > 32 )
    {
        return (i / 2);
    } else
    {
        i++;
        goto start;
    }
}
```

Оптимизация размещения данных в памяти замена выделения многомерного массива на одномерный.

- Разбор шаблона – динамическое выделение многомерного массива
- Замена его на выделение одномерного массива
- Замена работы с многомерным массивом на одномерный
- Расположение исходных данных по профильной информации

Шаблон выделения памяти:

```
a = malloc( n1*sizeof(data**));  
for ( i = 0; i < n1; i++ )  
{  
    a[i] = malloc( n2*sizeof(data*));  
    for ( j = 0; j < n2; j++ )  
        a[i][j] = malloc( n3*sizeof(data));  
}
```

Оптимизации работы с памятью

Memory optimizations

Исходный Вариант

```
static double ***a;
static int n1,n2,n3;
void ALLOC()
{
    int i,j,k;
    a = (double ***)
malloc(n1*sizeof(double**));
    if (a == NULL) {
        printf("No memory\n");
        exit(1);
    }
    for (i=0; i<n1; i++) {
        a[i] = (double
**)malloc(n2*sizeof(double*));
        if(a[i] == NULL) {
            printf("No memory\n");
            exit(1); }
        for (j=0; j<n2; j++) {
            a[i][j] = (double
*)malloc(n3*sizeof(double));
            if(a[i][j] == NULL) {
printf("No memory\n");
                exit(1);
            }}}}
```

После трансформации

```
typedef struct
{    int* ptr;    int n0;    int n1;    int n2;
int n3;
    int n4;
} my_ptr_t;

static my_ptr_t a;
static int n1,n2,n3;
void
ALLOC() {
    int i,j,k;
    a.ptr =
malloc(n1*n2*n3*sizeof(double));
    a.n0 = 1;
    a.n1 = n2;
    a.n2 = n2*n1;
    if (a.ptr == NULL) {
        printf("No memory\n");
        exit(1); }
    for (i=0; i<n1; i++) {
        if(1 == NULL) {
            printf("No memory\n");
            exit(1); }
        for (j=0; j<n2; j++) {
            if(1 == NULL) {
                printf("No memory\n");
                exit(1); }
            }}}}
```


Оптимизации работы с памятью

Memory optimizations

Исходный Вариант

```
static void ARG(double ***b){
    int i,j,k;
    for (i=0; i<n1; i++) {
        for (j=0; j<n2; j++) {
            for (k=0; k<n3; k++) {
                b[i][j][k] = 2.0;
            }
        }
    }
}

void REF()
{
    int i,j,k;

    for (i=0; i<n1; i++) {
        for (j=0; j<n2; j++){
            for (k=0; k<n3; k++) {
                a[i][j][k] = 0.0;
            }
        }
    }
    ARG(a);
}
```

После трансформации

```
static void ARG(my_ptr_t b){
    int i,j,k;
    for (i=0; i<n1; i++) {
        for (j=0; j<n2; j++) {
            for (k=0; k<n3; k++) {
                *((double*)b+i*b.n2+j*b.n1+k*b.n0) = 2.0;
            }
        }
    }
}

void REF()
{
    int i,j,k;

    for (i=0; i<n1; i++) {
        for (j=0; j<n2; j++){
            for (k=0; k<n3; k++) {
                *((double*)a+i*b.n2+j*b.n1+k*b.n0) = 0.0;
            }
        }
    }
    ARG(a);
}
```

Оптимизации работы с памятью

Memory optimizations

Исходный Вариант

```
int main( )
{
    n1 = 30;
    n2 = 30;
    n3 = 30;
    ALLOC();
    REF();
    exit(0);
}
```

После трансформации

```
int main( )
{
    n1 = 30;
    n2 = 30;
    n3 = 30;
    ALLOC();
    REF();
    exit(0);
}
```

Достаточные условия для применения:

- Выделение памяти через стандартные функции `malloc`, `calloc`, `memalign`
- Не было взятия адреса на объекты, содержащие данные (в примере `static double ***a`) или указатели на данные (исключая возможно стандартные безобидные функции `scanf("%d",&a[i][j][k])`)
- Отслежены все обращения к данным (для глобальных данных необходим анализ в режиме компиляции всей программы)

Плюсы:

- Замена нескольких операций доступа в память на одну (блочную)
- Улучшение работы индексного анализа, разрыв зависимостей
- Дополнительное переупорядочивание данных позволяет оптимизировать работу с памятью

Переупорядочивание данных (Reordering transformations)

- Транспонирование матрицы (разместить в памяти по столбцам)
- Массив структур -> структуру массивов (AoS -> SoA)
- Разрезание и переупорядочивание структур (Structure splitting and reordering)

Результаты анализов:

- анализ указателей – на какие области памяти указывает каждый указатель в программе
- анализ алиасов – для любых пар указателей ответ указывают ли они на одну область памяти

Анализ указателей => анализ алиасов

Анализ алиасов => анализ указателей ?

```
p = &x; q = &p; *q = &y;
```

```
p ->{x,y}, q->{p}
```

```
<*p,x>, <*q,p>, <**q,y>, <**q,x>
```

Свойства результатов:

- анализ may-point-to – указатель может указывать на некоторую область памяти
- анализ must-point-to – указатель обязательно указывает на некоторую область памяти

```
int *p, *q, x, y;  
p = &x;  
q = &y;  
if ( cond ) p = q;  
  
/* q->{y} - may-point-to and must-point-to  
   p->{x,y} - may-point-to */
```

Неинициализированные указатели и неадресные значения

Разыменование неинициализированного указателя

- 1) Некорректная семантика – завершение анализа
- 2) Разыменование в правой части присваивания (только чтение). Тогда считаем обращения к объекту в левой части (в который пишем) конфликтуют со всеми обращениями в память
- 3) Разыменование в левой части присваивания – некорректная семантика и завершение
- 4) Игнорируем. Считаем, что результат разыменования не будет использован как адрес для обращения в память, иначе ошибка исполнения.

```
int *p, **q, x;  
  
if ( cond )  
    p = *q; /* 1,2 - p может указывать на что угодно */  
else  
    *q = &x; /* 3 - любой указатель может указывать на x */  
  
**q; /* 4 - ошибка исполнения */
```

Неинициализированные указатели и неадресные значения

Неадресные значения (что считать инициализацией указателя)

- 1) Любое присваивание в указатель – инициализация
- 2) Присваивание только адресных значений – адреса объектов программы и возвращаемый процедурами выделения памяти

```
/* присваивание в p значения q */
```

```
void *p;
```

```
while ( p < q ) p+=1;
```

```
/* инициализация «неадресным» значением, которое может  
оказаться адресом объекта */
```

```
q = ( void *) 0x800000cef;
```

Чувствительность к потоку управления

Учитывает или нет поток управления внутри анализируемых процедур (flow-sensitive и flow-insensitive)

- Увеличивает точность анализа
- Существенно увеличивает расходы на память
- Замедляет работу анализа
- Позволяет затирать в точке постдоминирующего присваивания предыдущие значения указателя – свойство сильного обновления (strong update)

```
if(cond) { p = &x;
           foo(p); /* p->{x} во flow-sensitive версии анализа
                  p->{x,y,z} во flow-insensitive версии */
} else{    p = &y;
           foo(p); /* p->{y} flow-sensitive версия анализа
                  p->{x,y,z} flow-insensitive версия */
}
/* p->{x,y} во flow-sensitive версии анализа,
   p->{x,y,z} flow-insensitive версия */
bar(p);
p = &z; /* p->{z} во flow-sensitive версии анализа
        (это свойство сильного обновления);
        p->{x,y,z} во flow-insensitive версии */
```


Чувствительность к вызывающему контексту

Разделение информации (вызывающий контекст), приходящей в процедуру по разным путям исполнения (context-sensitive)

- Нахождение нереализуемых путей (путь, который никогда не может возникнуть в процессе исполнения программы - unrealized paths problem)

```
int* f(int *a) { return g(a); }
int* g(int *b) { return b;
    /* b->{x,y} при context-insensitive анализе */
}
main(){
    int *p, x, y;
    if(cond)
        p = f(&x);
        /* При context-insensitive анализе p->{x,y},
           а при context-sensitive p->{x} */
    else
        p = f(&y);
        /* При context-insensitive анализе p->{x,y},
           а при context-sensitive p->{y} */
```

Чувствительность к вызывающему контексту

- Вызывающий контекст однозначно определяется путем в графе вызовов
- Разные пути могут давать идентичные контексты, но в общем случае число различных контекстов – число всех путей к процедуре из main – экспонента от числа процедур программы
- Если есть рекурсивные циклы - число путей потенциально бесконечно

Необходимо объединять информацию, приходящую из разных вызывающих контекстов

- Объединять всю информацию – не чувствительный к контексту
- Различать контексты по точкам вызова процедур (на примере для g этого не достаточно)
- Клонирование процедур и граф активаций программы

Модель обработки динамической памяти

- 1) Вся динамическая память - один объект
- 2) Создавать уникальный объект динамической памяти по точке выделения
- 3) Путь в графе вызовов определяет объект – эскпонента
- 4) Некоторый начальный отрезок пути с эвристический длиной

```
char *p, *q;  
  
p = malloc(num);  
q = malloc(num);  
...  
for( i=0; i < num; i++)  
    p[i] = q[i];
```

```
main() {  
    int *p = f1();  
    int *q = f2(); ... }  
  
f1() { return my_malloc(); }  
f2() { return my_malloc(); }  
  
my_malloc() {  
    return malloc(N); }  
}
```

Модель обработки динамической памяти

- Эвристически распознавать выделение памяти (newnode – выделение памяти)

```
typedef struct node {
    char type;
    struct node *next;} NODE;
NODE *newseg;
main() {
    NODE *n1=newnode(1);
    NODE *n2=newnode(2); ...
}
void findmem() {
    newseg = calloc(1,NSIZE);
    ...
}
```

```
NODE *newnode(int type) {
    NODE *node;
    if(newseg == NIL) {
        findmem();
    }
    node = newseg;
    newseg = node->next;
    node->type = type;
    return (node);
}
```

Обработка составных объектов

Различать элементы составных объектов или рассматривать как единое целое

```
struct  
{ type * p1;  
  type * p2;  
} r;  
/* Разные адреса &r.p1; &r.p2; */
```

Множество локализаций – подмножество целочисленной прямой, задается парой

$$\langle f, s \rangle \in \mathbb{Z} \times \mathbb{N}_0, f - шаг, s - смещение, \langle f, s \rangle = \{f + i \cdot s \mid i \in \mathbb{Z}\}$$

Для однозначности $s \neq 0$ и $0 \leq f < s$.

Множество локализаций позволяют производить теоретико-множественные операции над бесконечными множествами за константное время.

Объединение, разность – наименьшее множество, содержащее результат.

Требуется нахождение НОД шагов.

Не учитывает размера области памяти.

Обработка составных объектов

Соответствие языковых типов и множества локализаций

Языковой тип	Выражение	Множество локализаций объекта
<code>type *p</code>	<code>p</code>	<code>p <0, 0></code>
<code>struct {type *F;} r</code>	<code>r.F</code>	<code>r <f, 0></code>
<code>type *a[]</code>	<code>a[i]</code>	<code>a <0, s></code>
<code>type *p;</code>	<code>*(p+X)</code>	<code>p <0, X></code>
<code>struct {type *F[];} r</code>	<code>r.F[i]</code>	<code>r <f(mod s), s></code>
<code>struct {type *F;} a[]</code>	<code>a[i].F</code>	<code>a <f, s></code>

Примечание: `f` - смещение поля `F` от начала структуры, `s` - размер элемента массива

Обработка составных объектов

Некорректное использование union

```
typedef union {
    struct { int x,y; } p;
    double z; /* Поле для быстрой инициализации
               полей x и y структуры. */
} COMPLEX;

f() {
    COMPLEX a;
    a.z = 0; /* Инициализируем union как double */
    ...
    length(a.p.x,a.p.y); /* используем как struct */
    ...
}
```

Учет языковых типов

Учет типа для операций доступа в память

- Область памяти, независимо от типа, может содержать указатель любого типа – слаботипизированные языки C/C++
- Строгое следование языковым типам – не обработать многие реальные программы
- Использовать часть ограничений из стандарта языка – например позволять обращаться к `int[]` с помощью `char *`, но запрещать доступ по указателю на процедуру или константную строку.
- Использовать информацию о типе для эвристик – например через формальные параметры типа указатель ждать передачи указателей соответствующего типа.

Требование компиляции всей программы

- Необходимо наличие для анализа всей программы, за исключением возможно стандартных библиотек (флаг доверия к библиотекам)
- Динамически линкуемые библиотеки
- Помодульная компиляция – анализу необходим предполагать, что любая глобальная переменная может быть модифицирована, любая функция может быть вызвана с неизвестными параметрами

Пример эффективного анализа

Анализ на основе свойства транзитивности

Для отношения «алиасить» добавляется свойство транзитивности: если $\langle *p, x \rangle$ и $\langle *p, y \rangle$, то $\langle x, y \rangle$.

За один проход по представлению происходит сбор информации об алиасах и объединение объектов в соответствии с введенным отношением.

Транзитивность увеличивает скорость и уменьшает точность.

- Результаты – информация об алиасах
- May-aliased анализ
- Не чувствителен к управлению
- Не чувствителен к контексту
- Динамическую память различает по точкам вызова
- Элементы составных объектов не различаются
- Языковые типы не использует
- Требуется компиляция в режиме вся программа

Пример точного анализа

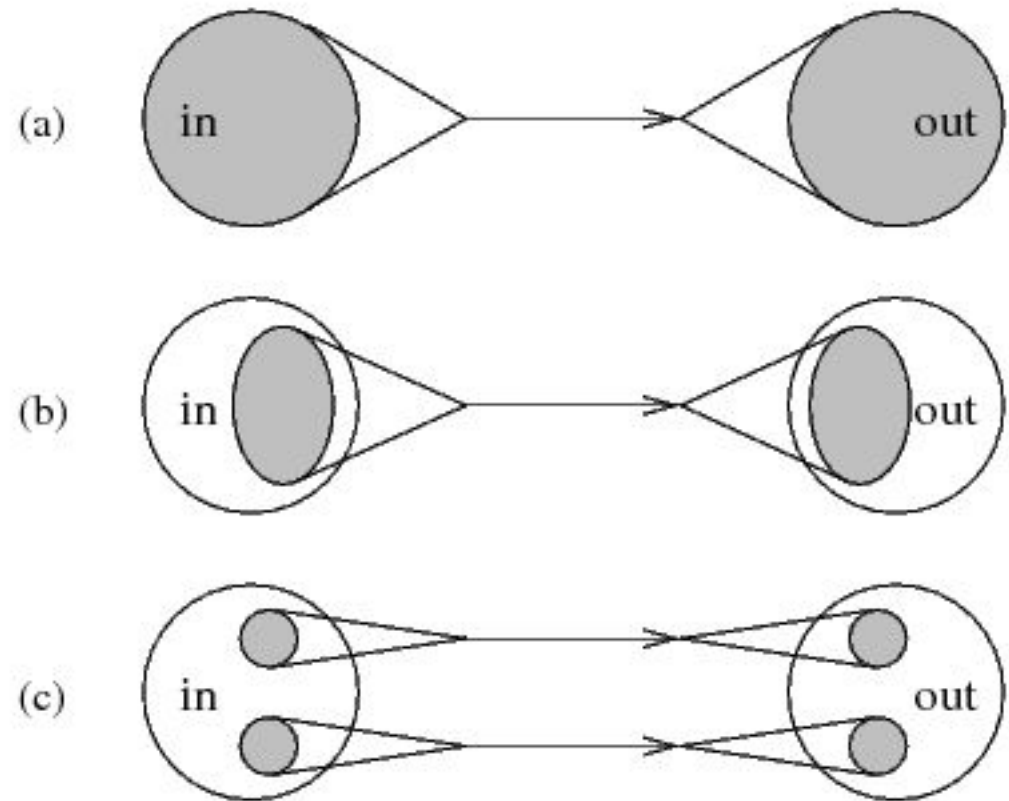
Анализ на основе ЧТФ

Трасферная функция процедуры определена для всех вызывающих контекстов, результат - измененный процедурой вызывающий контекст. (а)

Частичная трасферная функция определена не для всех возможных вызывающих контекстов.

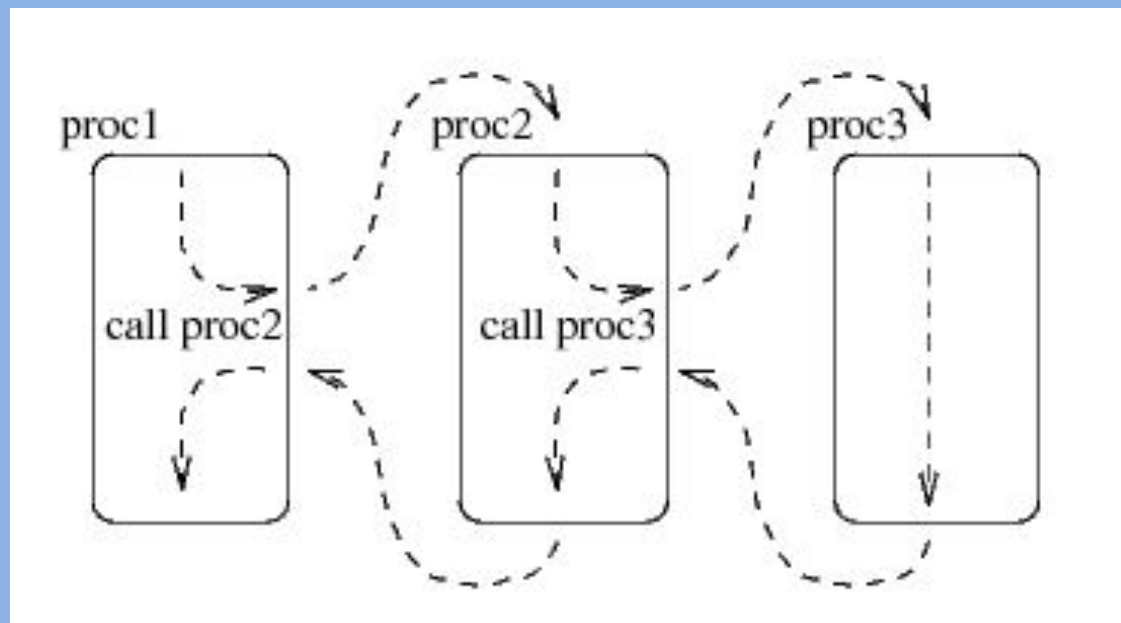
Обобщение одной ЧТФ на все вызывающие контексты и получение таким образом ТФ - моновариантный анализ (б)

Построение нескольких ЧТФ, определенных в совокупности на всех вызывающих контекстах - поливариантный анализ (с)



Анализ на основе ЧТФ

Идея абстрактной интерпритации – начиная с main итерационно собирается информация о значении указателей и завершается, когда значения указателей в main перестают меняться.



Встречаем вызов, построение ЧТФ текущей процедуры приостанавливается и переходим к анализу вызванной процедуры (построению новой или обобщению уже имеющейся ЧТФ), затем продолжается построение ЧТФ текущей процедуры.

Эвристики – число ЧТФ, алгоритм сравнения контекстов, обобщение области определения ЧТФ. Эффективность □□ точность.

Анализ на основе ЧТФ

Пример

```
f(int **p, int **q, int **r){
    *p = *q;
    *q = *r;
}

int x, y, z;
int *x0 = &x;
int *y0 = &y;
int *z0 = &z;

main( ){
    if(cond)
S1:      f(&x0, &y0, &z0); // 1-й вызывающий контекст f
    else if (cond')
S2:      f(&z0, &x0, &y0); // 2-й вызывающий контекст f
    else
S3:      f(&x0, &y0, &x0); // 3-й вызывающий контекст f
}
```

Как формализовать контекст с точки зрения интересующего нас свойства указывать?

Анализ на основе ЧТФ

Чтобы задать область определения ТФ используем points-to функции

```
p->{x, y}
p->{y}
```

```
p=&x;
q=&y;
if ( cond ) p=q;
```

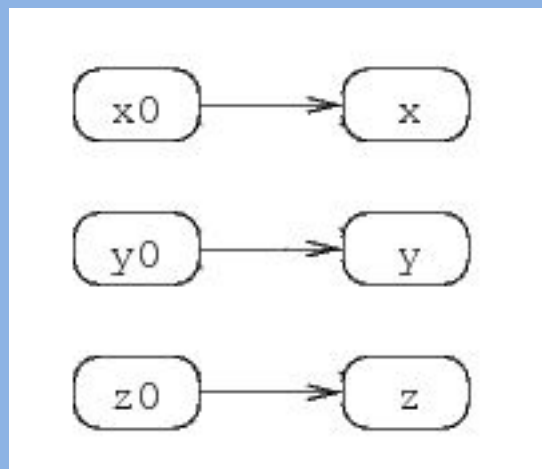
1-й и 2-й контекст одинаковые, как это отразить?

Пространство имен (name space) для каждой ЧТФ:

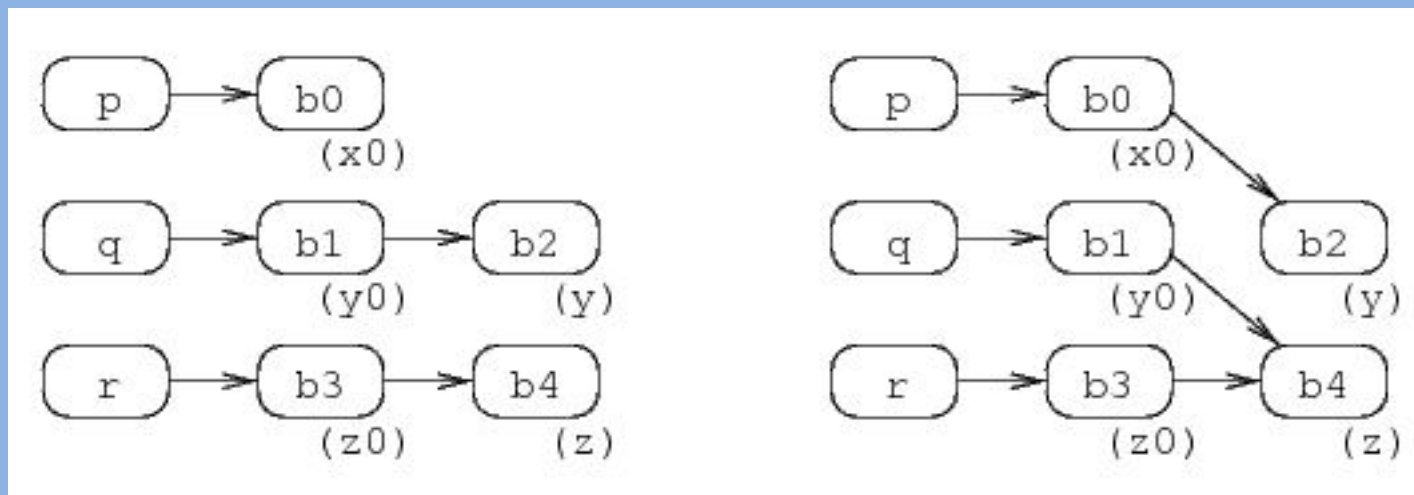
- Локальные блоки – не зависящие от вызывающего контекста (формальные параметры, локальные переменные, динамически выделяемая память)
- Нелокальные блоки – существуют в вызывающем контексте (глобальные переменные, объекты вызывающей процедуры)
- Block binding function – связывает нелокальные блоки в вызывающем и вызываемом контексте

Анализ на основе ЧТФ

Начальная points-to функция для main



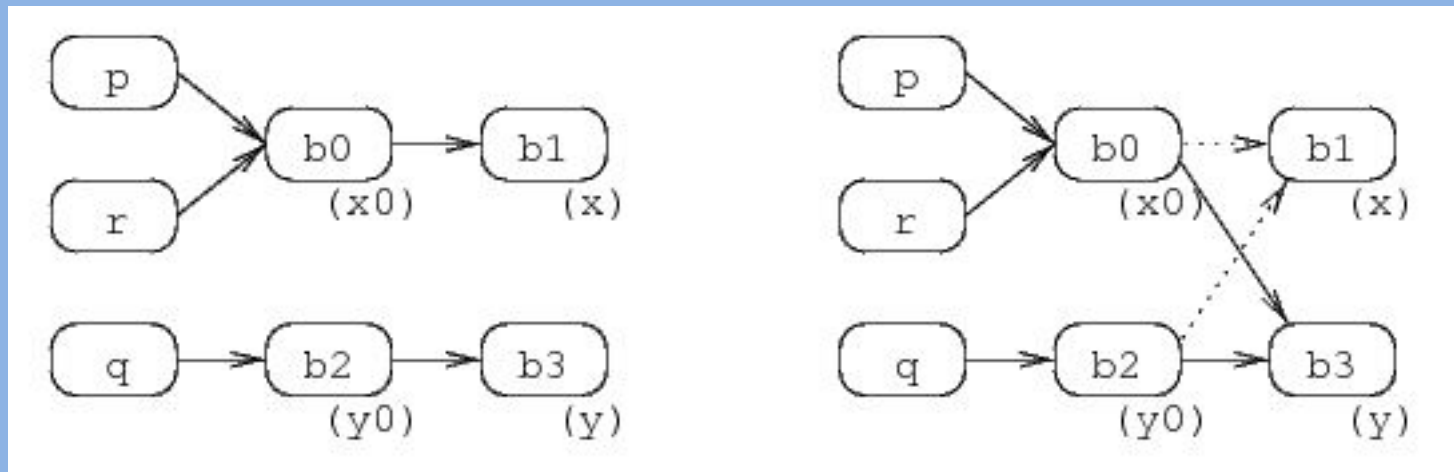
Начальная и конечная points-to функция для f в точке вызова S1



*В начале процедуры перезаписываем значение *p, потому на что указывает b0 нас не интересует*

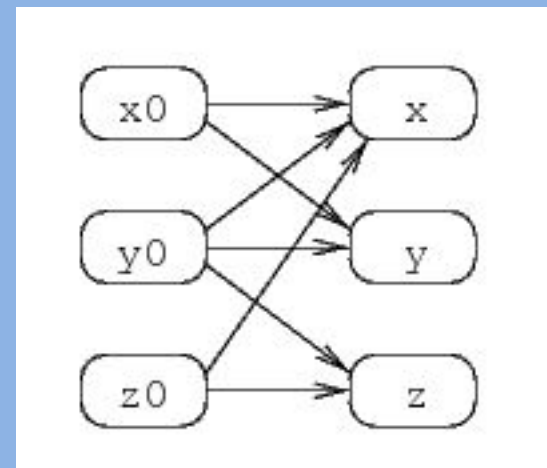
Анализ на основе ЧТФ

Начальная и конечная points-to функция для f в точка вызова $S3$



*пунктиром анализ определяет, что при записи в $*p$, записали в $*r$*

Конечная points-to функция для main



Анализ на основе ЧТФ

- Блоки создаем только когда встречаем реальное разыменованние указателя, т.е. записываем информацию не в виде “р есть указатель на b0”, а “р с начальным значением”

```
int *f ( int *p)
{
    int *q = p; /* нет
разыменования *p */
    return q;
}
```

```
void x() /* 3. обновляем РТФ */
{
    int *p1 = &q;
    y(&p1);
}
void y( int **p) /* 2. обновляем РТФ */
{
    z(p);
}
void z( int **p)
{
    r = *p; /* 1. Встретили разыменованние.
Надо найти нелок. блок для *p */
}
```

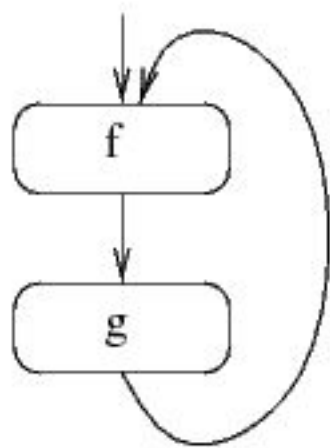
Анализ на основе ЧТФ

- Неявные вызовы – включаем в область определения ЧТФ таблицу с указателями на функции, которые потенциально могут быть вызваны. Добавляем только в случае реального вызова.

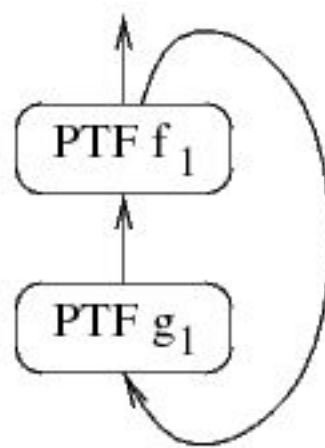
```
void x() /* 3. обновляем PTF */
{
    y(&proc1);
}
void y( funcPtr p) /* 2. обновляем PTF */
{
    z(p);
}
void z( funcPtr p)
{
    funcPtr q = &proc2;
    p(); /* 1. Встретили вызов - ищем значение p */
    q(); /* Локальное присваивание, не нужно обновлять PTF
вызывающих функций */
}
```

Анализ на основе ЧТФ

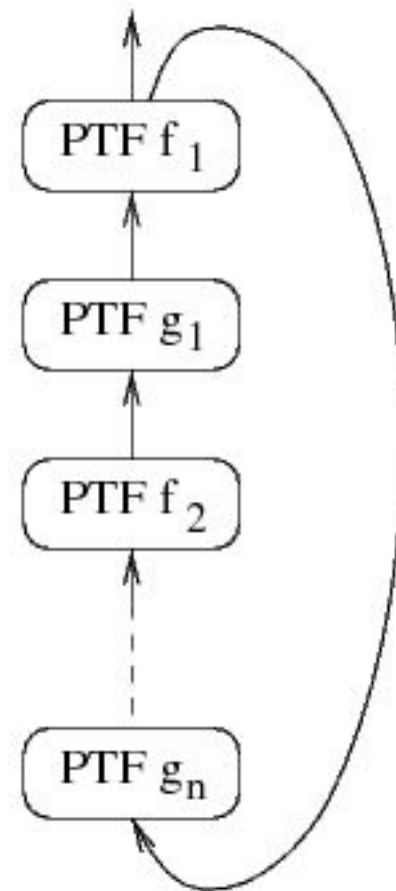
- Обработка рекурсии



(a) Call Graph



(b) Monovariant PTFs



(c) Polyvariant PTFs

Общая схема анализов

