Промежуточные представления (IR)

↓ *исходный текст*

фронтенд: **анализ** исходного текста. Если есть ошибки, то останавливаемся.

↓ *промежуточное представление*

... в сложных системах может быть несколько пром. представлений

↓ *промежуточное представление*

бэкенд: **синтез** - генерация программы, которая нам нужна вместе с какими-то оптимизациями.

↓ *целевой код*

> Разберём, какие промежуточные представления бывают, одним из них позанимаемся более плотно.

Классификация

- по степени абстракции
- по структуре:
  - графические — представимы в виде графов
  - линейные
  - гибридные

Графические IR

Синтаксическое дерево и даг

> Всё прослушала, тут что-то рассказывали

x=y*z

```
   =
 /   \
x     *
    /   \
   y     z
```

Поле дочерних узлов используем, чтобы показать...

Номер узла	Ссылка на узел	Левый операнд	Правый операнд
1	x	x.lexval	
2	y	y.lexval	
3	z	z.lexval	
4	*	2	3
5	=	1	3

Если хотим создать даг, то нужно проверять, а нет ли уже такого узла. Как проверить? По **сигнатуре** — метке и ссылке на сыновей.

Все узлы дага разбиваются на группы и используется хэш.

Граф потока управления (Control Flow Graph)

В качестве вершин этого графа используются блоки исполняемого кода или отдельные команды, рёбер — возможная передача управления между этими блоками

```
if (x==y)
    st1;
else
    st 2;
st3;



            if (x==y)
            ↙      ↘
         st1        st2
            ↘       ↙
               st3
```

Вспомогательное представление, чтобы отслеживать мёртвый код.

Граф зависимостей данных

Очень похож на граф зависимостей для атрибутных грамматик. Отражает связи и потоки данных между объявлением переменных и их использованием.

$w = w * 2 * x * y$

```
load r1, @w
mult r1, 2
load r2, @x
mult r1, r2
load r3, @y
mult r1, r3
```

```
1
↓
2   3
↓ ↙
4   5
↓ ↙
6
```

Пример гибридного, так как если в качестве узлов используем целые блоки, то внутри одного узла этот блок может быть представлен в виде линейного кода или синтаксического дерева.

Линейные IR

Типы отличаются друг от друга количеством адресов, используемых в своих командах.

Адрес — не относится к адресу в памяти. Это одно из трёх:

- имя переменной
- временное имя, сгенерированное компилятором
- константа

Одноадресный код

Команды могут использовать только один адрес. Нужен стек, так как унарных операций маловато. Есть возможность обменять вершину и элемент, лежащий под ней.

$x * y - 2$

```
push  x
push  y
mult
push  2
subtr
```

Двухадресный код

Если к операндам применяется операция, то результат должен оказаться в одной из переменных

```
mult  x, y  ;теперь результат лежит в x
subtr x, 2
```

Деструктивный характер — всё время перезатираем переменные.

Трёхадресный код

Громоздкое, но универсальное промежуточное представление. От того, как мы опишем множество команд и свяжем с целевой программой, зависит уровень абстракции. Может быть как аналогом синтаксического дерева, но может быть и приближен к математическому языку.

Набор команд, с которым будем работать:

- $x = y\ op\ z$ — бинарная операция с присваиванием
- $x = op\ y$ — унарная операция с присваиванием
- $x = y$ — присваивание
- `goto L` — безусловный переход. Переменная тоже может быть меткой
- `if x goto L` и `if False x goto L` — условный переход
- `if x relop y goto L` — условный переход с оператором сравнения
- `y = x[i]` и `x[i] = y` — присваивание с индексацией

  Чтобы вызвать функцию, нужно передать в неё параметр:

- $param\ x_1$ — передаём в функцию n аргументов
  $param\ x_n$
  $call\ f, n$
- return x
- $x = \&y$ — ссылки и указатели.
  $x = *y$
  $* x = y$

  Вообще, компилятор проверяет L и R значения. Хотя слева и справа используются переменные, но то, что слева, используется как адрес, а справа — как значение. То есть слева нельзя записать R-значение, например, константу.

В качестве линейного промежуточного представления может быть какой-то язык. Например, промежуточным представлением для C++ когда то бы обычный Си.

Связь линейного кода с графическим.

```
if (x > 0)
{
    y = z*2 - 1
    i++;
}
x = 0;
```

```
if False x > 0 goto 5
t1 = z*2
y = t1 - 1   ;t2 = t1 - 1, y = t2
i = i + 1
x = 0
```

sk

```
                  _____________________ if  _________________
                 |                        |                  |
                 >                     __ ; ____             =
                /  \                  /          \          /   \
               x    0                =            =        x     0
                                    /   \        /   \
                                   y     -      +     i
                                        /   \
                                       *     1
                                      /  \
                                     z    2
```

Представление внутри компилятора

- Четвёрки, из которых получается нумерованный список:

  1. Куда складываем результат
  2. Оператор
  3. Левый операнд
  4. Правый операнд

  Можно легко менять местами, чтобы оптимизировать.

- Тройки:

  1. Оператор
  2. Левый операнд
  3. Правый операнд

  Левый и правый операнд могут быть не только переменными и константами, но и номерами команд.

  Линейное представление синтаксического дерева.

  Перемешивать просто так — сложно, используется косвенная адресация

	Внутренние узлы	**Если не номер команды — промежуточное имя**	
L1	*	z	2
L2	-	L1	1
L3	=	y	L2

Трансляция выражений

$S \to id = E$	$S.code = E.code \vert\vert gen(\square 0 \square)$
$E \to E_1 + E_2$	$E.addr = new\ Temp,$ $E.code = E_1.code \vert\vert E_2.code \vert\vert gen(\square 0 \square)$
$E \to (E_1)$	$E.addr = E_1.addr,$ $E.code = E_1.code$
$E \to id$	$E.addr = get(id.lexval),$

$S \to id = E$	$E.code = ""$ $S.code = E.code \| \| gen(\square 0 \square)$

Атрибуты (синтезируемые):

- addr — по адресам хранятся вычисленные значения
- code —

Обозначения:

|| — конкатенация двух кодов

`{var}+{var}` — строковая интерполяция.

Инструкции изменения потока управления

Булевы выражения

> Нам их нужно либо вычислять, либо использовать. Это два разных контекста. Их можно различать с помощью, например, наследуемого атрибута. Нам интересно, как транслируются условия и циклы

$B \to B||B|B\&\&B|!B|E\ rel\ E|true|false$

$rel \in \{\leq, <, >, \geq, \neq, ==\}$

Спецификация языка обязательно упоминает о сокращённых вычислениях. Например, если первый операнд в конъюнкции ложен, то остальные вычисляться не будут. Мы ими будем пользоваться.

```
if (x>200 || x<100 && x!=y)
    x = 0;
```

```
if (x > 200) goto L1
if False x < 100 gotoL2
if False x != y goto L2
L1: x = 0;
L2: ...
```

$S \to if(B)S_1\ S \to while(B)S_1\ S \to if(B)S_1 else S_2$

Атрибуты:

- next — метка следующей команды, которая будет выполняться после S
- true/false — метка первой команды, которая выполнится если B истинно\ложно

Примеры блоков:

if:

```
                B.code
    B.true ->   S1.code
    B.false -> ..
```

while

```
    begin  ->  B.code
    B.true ->  S1.code
               goto begin
    B.false -> ... <- S.next
```

if-else

```
                   B.code
        B.true ->  S1.code
                   goto
                   S2.code
        S.next ->  ..
```

Теперь опишем семантическую грамматику:

Вспомогательные функции и процедуры:

- newlabel() — новая метка
- label(...) — пометить команду меткой

$P \to S$	$S.next = newlabel(),$ $P.code = S.code \|\| label(S.next)$
$S \to assign$	$S.code = assign.code$
$S \to if(B)S_1$	$S_1.next = S.next,$ $B.true = newlabel(),$ $B.false = S.next,$ $S.code = B.code \|\| label(B.true) \|\| S_1.code$
$S \to while(B)S_1$	$begin = newlabel(),$ $S_1.next = begin,$ $B.true = newlabel - \text{тело цикла},$ $B.false = S_1.next$ $S.code = label(begin) \|\| B.code \|\| label(B.true) \|\| S_1.code \|\| gen(\square 0 \square)$
$S \to if(B)S_1 else S_2$	$S_1.next = S.next,$ $S_2.next = S.next$ $B.true = newlabel(),$ $B.false = newlabel()$ $S.code = B.code \|\| label(B.true) \|\| S_1.code \|\| gen(\square 0 \square \|\| label(B.false) \|\| S_2.code)$
$S \to S_1; S2$	$S_1.next = newlabel(),$ $S_2.next = S.next,$ $S.code = S_1.code \|\| label(S_1.next) \|\| S_2.code$

j

$B \to B_1 \|\| B_2$	$B_1.true = B.true,$ $B_1.false = newlabel(),$ $B_2.true = B.true,$ $B_2.false = B.false$ $B.code = B_1.code$
$B \to B_1 \&\& B_2$	$B_1.true = newlabel(),$ $B_1.false = B.false,$ $B_2.true = B.true,$ $B_2.false = B.false,$

	$B.code = B_1.code \| \| label(B_1.true) \| \| B_2.code$
$B \rightarrow !B_1 \| \| B_2$	$B_1.true = B.true,$ $B_1.false = B.false,$ $B_2.true = B.true,$ $B_2.false = B.false$ $B.code = B_1.code$
$B \rightarrow E_1\ rel\ E_2$	$B.code = E_1.code \| \| E_2.code \| \| gen(\square 0 \square) \| \| gen(goto\{B.false\})$
$B \rightarrow true$	$B.code = gen(undefined)$
$B \rightarrow false$	$B.code = gen(undefined)$

```
if (x>200 || x<100 && x!=y)
    x = 0;


                                P
                                |
            ----------------------- S -----------------------
            |          |        |         |              |
            if         (        B         )              S
                                |                        |
                        ------------------------       assign
                        |          |          |
                   --- B ---      ||        - B -
                 /     |     \            /   |   \
                E      >      E          B    &&   B
                |             |        / | \     / |  \
                x            200     E   <  E   E  !=  E
                                     |      |   |      |
                                     x     100  x      y


if x > 200 goto L2
goto L3
L3: if x < 100 goto L4
    goto L1
L4: if x!=y goto L2
    goto L1
L2: x = 0
L1: ...
```

Новая команда:

- fall — провались к следующей команде??

```
test = E_1.addr rel.op E_2.addr

if B.true != fall && B.false != fall
    // обе метки реальные, нужны оба перехода
    s = gen(`if {test} goto {B.true}`)
        || gen(`if False {test} goto {B.false}`)
else if B.true != fall, B.false == fall
    s = gen(`if False {test} goto {B.true}`)
else if B.true = fall, B.false != fall
    s = gen(`if False {test} goto {B.false}`)
else s = ''

B.code = E_1.code || E_2.code || s
```

Теперь оптимизируем прошлую грамматику

$P \to S$	$S.next = newlabel(),$ $P.code = S.code \|\| label(S.next)$
$S \to assign$	$S.code = assign.code$
$S \to if(B)S_1$	$S_1.next = S.next,$ $B.true = newlabel(),$ $B.false = S.next,$ $S.code = B.code \|\| label(B.true) \|\| S_1.code$
$S \to while(B)S_1$	$begin = newlabel(),$ $S_1.next = begin,$ $B.true = newlabel - \text{тело цикла},$ $B.false = S_1.next$ $S.code = label(begin) \|\| B.code \|\| label(B.true) \|\| S_1.code \|\| gen(\square 0 \square)$
$S \to if(B)S_1 else S_2$	$S_1.next = S.next,$ $S_2.next = S.next$ $B.true = newlabel(),$ $B.false = newlabel()$ $S.code = B.code \|\| label(B.true) \|\| S_1.code \|\| gen(\square 0 \square \|\| label(B.false) \|\| S_2.code)$
$S \to S_1; S2$	$S_1.next = newlabel(),$ $S_2.next = S.next,$ $S.code = S_1.code \|\| label(S_1.next) \|\| S_2.code$

$B \to B_1 \|\| B_2$	**$B_1.true = \left\{ \begin{array}{l}B.true,\ \ &B.true \neq fall \\ newlabel(),\ &otherwise \end{array} \right. \\B_1.false = fall,\\B_2.false = B.true,\\B_2.false = B.false,\\B.code = \left\{ \begin{array}{l}B_1.code \|\|B_2.code,\ \ &B.true \neq fall \\ B_1.code\|\|B_2.code,\ &otherwise \end{array} \right.$**
$B \to B_1 \&\& B_2$	
$S \to if(B)S_1$	$B.true = fall\\B.false = S.next\\S_1.next = S.next\\S.code=B.code\|\|S_1.code$
$B \to !B_1$	
$B \to E_1\ rel\ E_2$	
$B \to true$	$B.code = gen(undefined)$

$B \to true$	$B.code = gen(unaefinea)$
$B \to false$	$B.code = gen(undefined)$
$B \to B_1 \| \| B_2$	**$B_1.true = \left\{ \begin{array}{l}B.true,\ \ &B.true \neq fall \\ newlabel(),\ &otherwise \end{array} \right. \\B_1.false = fall,\\B_2.false = B.true,\\B_2.false = B.false,\\B.code = \left\{ \begin{array}{l}B_1.code \| \|B_2.code,\ \ &B.true \neq fall \\ B_1.code\| \|B_2.code,\ &otherwise \end{array} \right.$**

Метод обратных поправок

> Два прохода, чтобы спускать наследуемые атрибуты. А хотим — за один раз с помощью восходящего анализа. Маркеры нам помогут!
>
> $S \to if(B)S_1$. Если B ложно, то мы должны выполнить код, который следует за S_1. Но, когда мы разбираем B, про S_1 мы ещё ничего не знаем! Поэтому метки в GOTO мы оставляем пустыми, и запоминаем, что эту команду мы ещё не заполнили. Когда метка станет известным, можно будет эту команду дозаполнить. Поэтому **обратные поправки**

Нужны новые синтезируемые атрибуты, наследуемые будем прятать в маркеры.

Списки команд перехода, в которые нужно вставить метки команд, которые нужно выполнить в случае истинности или ложности B

- B.truelist
- B.falselist

У S появится атрибут из списка команд, к которым нужно перейти после выполнения S

- S.nextlist

Нужны вспомогательные функции:

- $makelist(i)$ — создаёт список из единственной команды с номером i, возвращает ссылку на этот список
- $merge(p_1, p_2)$ — слияние списков

Вспомогательная процедура:

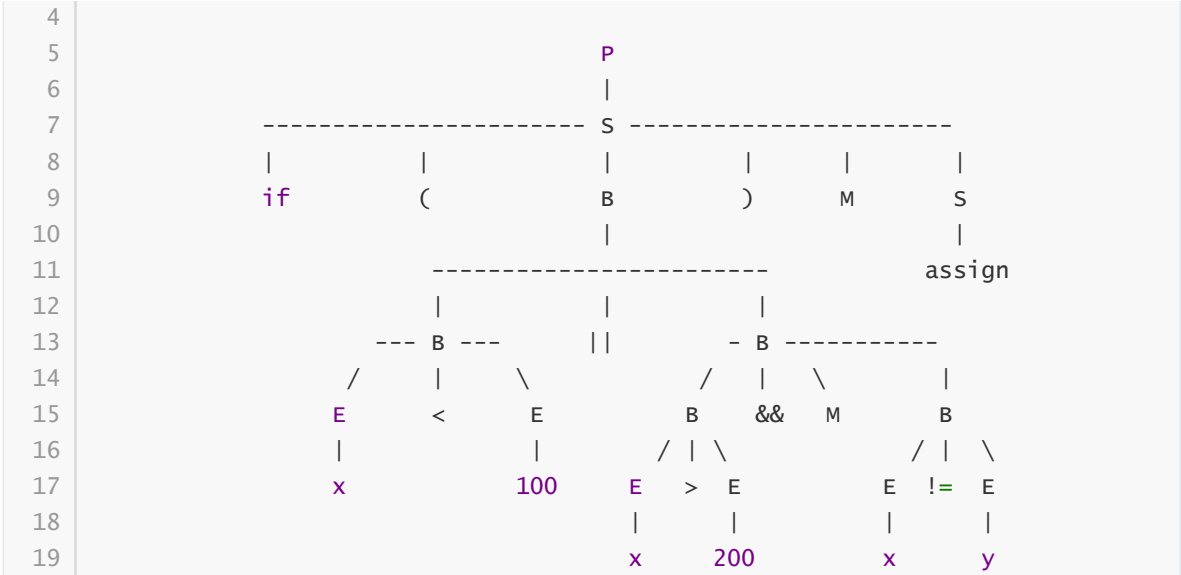
- $backpatch(p, i)$ берёт все команды, по которым не проставлен переход, и заполняет их командой перехода к

$B \rightarrow B_1\|\|MB_2$	**$B.truelist = merge(B_1.truelist, B_2.truelist)\\B.falselist = B_2.falselist\\backpatch(B_1.falselist, M.instr)\\B.code = B_1.code\|\|B_2.code$**
$M \rightarrow \lambda$	$M.instr = nextinstr$
$B \rightarrow B_1\&\&MB_2$	$B.truelist = B_2.truelist\\B.falselist = merge(B_1.falselist, B_2.falselist)\\backpatch(B_1.truelist, M.instr)\\B.code=B_1.code\|\|B_2.code$
$B \rightarrow !B_1$	$B.falselist = B_1.truelist\\B.truelist = B_1.falselist\\B.code = B_1.code$
$B \rightarrow E_1\ rel\ E_2$	$B.truelist = makelist(nextinstr)\\B.falselist = makelist(nextinstr+1)\\B.code = gen(□0□)\|\|gen(□1□)$
$S \rightarrow if(B)MS_1$	$S.nextlist = B.falselist\\backpatch(B.truelist, M.instr)$
$S \rightarrow if(B)M_1S_1NelseM_2S_2$	$S.nextlist = S_2.nextlist\\backpatch(B.truelist, M_1.instr)\\backpatch(B.falselist, M_2.instr)\\S.code = B.code\|\|S_1.code\|\|gen("goto \ \_\_\_")\|\|S_2.code$
$N \rightarrow \lambda$	$N.nextlist = makelist(nextinstr)\\gen("goto \ \_\_\_")$
$S \rightarrow while\ M_1(B)M_2S$	$backpatch(B.truelist, M_2.instr)\\backpatch(S_1.nextlist, M_1.instr)\\S.code = B.code\|\|S_1.code\|\|gen("goto \ {M_1.instr\}"))$
$S \rightarrow A$	
$S \rightarrow \{L.S\}$	
$B \rightarrow true$	$B.truelist = makelist(nextinstr)\\B.code = gen(undefined)$
$B \rightarrow false$	

Пример

```
if (x<100 || x>200 && x!=y)
    x = 0;

```



Когда сворачиваем первый куст, получаем первые списки, t и f.
В списке B.t будет лежать команда 1, в B.f - команда 2

Когда сворачиваем второй куст, B.t = {3}, B.f = {4}

Маркер получает номер команды номер 5

Последний куст: B.t = {5}, B.f = {6}

Начинаем сворачиваться. B.t ={5}, B.f={4,6}.
А ещё нужно выполнить обратную поправку. В левом ребёнке в t лежит 3, значит в третью команду нужно вставить команду из маркера.

Сворачиваем верхнее B. Берём false у B_2, обратная поправка тоже работает с f.

Из 4 и 6 незаполненные команды должны вести в 7. Но пока семёрки нет в каком-то списке, мы их заполнить не можем

S.n = {4,5}

M = 7

Код:

```
if x < 100 goto ___  (7)
goto ___  (3) line 34
if x > 200 goto ___ (5) line 32
goto ___
if x !+ y goto ___ (7)
goto ___
x = 0
```

КОНЕЦ!

Экзамен:

- задача — получить за день до экзамена
- простой вопрос
- вопрос посложнее