

Машинный уровень 2: Управление

Основы информатики

Компьютерные основы программирования

u.to/DbCmFA

На основе CMU 15-213/18-243:

Introduction to Computer Systems

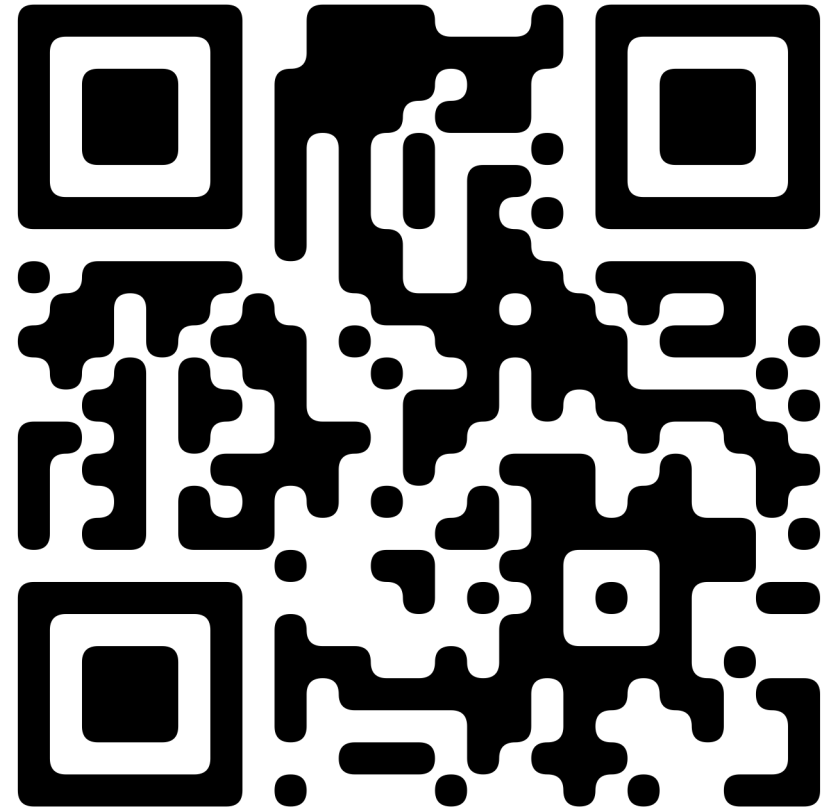
u.to/XoKmFA

Лекция 5, 04 марта, 2024

Лектор:

Дмитрий Северов, кафедра информатики 608 КПП

cs.mipt.ru/wp/?page_id=346



Машинный уровень 2: Управление

- Управление: флаги условий
- Условные переходы и пересылки
- Циклы
- Операторы переключения
- Процедуры IA 32
 - Структура стека
 - Соглашения вызова процедур
 - Рекурсия и указатели

Состояние процессора (x86-64, частично)

■ Информация о непосредственно исполняемой программе

- Промежуточные данные (`%rax`, ...)
- Адрес вершины стека (`%rsp`)
- Адрес текущей команды (`%rip`, ...)
- Результаты последних проверок (CF, ZF, SF, OF)

Регистры

<code>%rax</code>	<code>%r8</code>
<code>%rbx</code>	<code>%r9</code>
<code>%rcx</code>	<code>%r10</code>
<code>%rdx</code>	<code>%r11</code>
<code>%rsi</code>	<code>%r12</code>
<code>%rdi</code>	<code>%r13</code>
<code>%rsp</code>	<code>%r14</code>
<code>%rbp</code>	<code>%r15</code>

`%rip`

Указатель команды

Текущая вершина стека

CF	ZF	SF	OF
----	----	----	----

Флаги условий

Флаги условий (неявная установка)

■ Однобитные регистры- флаги

- CF перенос (для unsigned) SF знак (для signed)
- ZF ноль OF переполнение (для signed)

■ Устанавливаются арифметическими операциями неявно (как побочный результат)

Пример: `addq Src, Dest` \leftrightarrow `t = a+b`

CF=1, если перенос из старшего бита или заём в него (переполнение беззнакового кода)

ZF=1, если `t == 0`

SF=1, если `t < 0` (как знаковое), SF == MSB

OF=1, если переполнился дополнительный код (знаковый)
`(a>0 && b>0 && t<0) || (a<0 && b<0 && t>=0)`

■ Не устанавливаются командой `lea` !

Флаги условий

(явная установка сравнением)

■ Явная установка командами сравнения

- `cmpq Src2, Src1`
- `cmpq b, a` как вычисление `a-b` без сохранения результата
- `CF=1`, если перенос из старшего бита или заём в него
(используется при беззнаковых сравнениях)
- `ZF=1`, если `a == b`
- `SF=1`, если `(a-b) < 0` (как знаковые)
- `OF=1`, переполнение в дополнительном коде (знаковое)
`(a>0 && b<0 && (a-b)<0) || (a<0 && b>0 && (a-b)>0)`

Флаги условий

(явная установка проверкой бит)

■ Явная установка командой test

- `testq Src2, Src1`
 - `testq b, a` как вычисление `a&b` без сохранения результата
- Устанавливает флаги в зависимости от Src1 & Src2
- Удобно, если один из операндов - маска
- **ZF** = 1, если `a&b == 0`
- **SF** = 1, если `a&b < 0` (старший бит == 1)

Чтение флагов условий - 1

■ Команды set*

- Устанавливают один байт в 1 или 0 в зависимости от флагов
- Не изменяют остальные 7 байт

Команда	Условие	Описание
sete	ZF	Равно / Ноль
setne	$\sim ZF$	Неравно / Не ноль
sets	SF	Отрицательно
setns	$\sim SF$	Неотрицательно
setg	$\sim (SF \wedge OF) \ \& \ \sim ZF$	Больше (знаковое)
setge	$\sim (SF \wedge OF)$	Больше или равно (знаковое)
setl	$(SF \wedge OF)$	Меньше (знаковое)
setle	$(SF \wedge OF) \ \ ZF$	Меньше или равно (знаковое)
seta	$\sim CF \ \& \ \sim ZF$	Выше (беззнаковое)
setb	CF	Ниже (беззнаковое)

x86-64 Целочисленные регистры

%rax	%al
%rbx	%bl
%rcx	%cl
%rdx	%dl
%rsi	%sil
%rdi	%dil
%rsp	%spl
%rbp	%bpl

%r8	%r8b
%r9	%r9b
%r10	%r10b
%r11	%r11b
%r12	%r12b
%r13	%r13b
%r14	%r14b
%r15	%r15b

- Можно обращаться к младшим байтам

Чтение флагов условий - 2

■ Команды set*

- Устанавливают один байт в 1 или 0 в зависимости от флагов

■ Один из 8 байтовых регистров

- Не изменяются остальные байты регистра
- Зануление остальных байт обычно – **movzbl**
 - 32-битные команды зануляют старшие 32 бита

```
int gt (long x, long y)
{
    return x > y;
}
```

Регистр	Применение
%rdi	аргумент x
%rsi	аргумент y
%rax	результат

```
cmpq    %rsi, %rdi    # Сравнение x:y
setg     %al           # Установка младшего байта %rax в 1 если >
movzbl   %al, %eax     # Зануление остальных байт %rax
ret
```

Машинный уровень 2: Управление

- Управление: флаги условий

- **Условные переходы и пересылки**

- Циклы

- Операторы переключения

- **Процедуры IA 32**

- Структура стека
- Соглашения вызова процедур
- Рекурсия и указатели

Переходы

■ Команды j^*

- Передача управления по адресу в зависимости от флагов

j^*	Условия	Описание
$j\text{mp}$	1	Безусловный
$j\text{e}$	ZF	Равно / Ноль
$j\text{ne}$	$\sim ZF$	Неравно / Не ноль
$j\text{s}$	SF	Отрицательно
$j\text{ns}$	$\sim SF$	Неотрицательно
$j\text{g}$	$\sim (SF \wedge OF) \ \& \ \sim ZF$	Больше (знаковое)
$j\text{ge}$	$\sim (SF \wedge OF)$	Больше или равно (знаковое)
$j\text{l}$	$(SF \wedge OF)$	Меньше (знаковое)
$j\text{le}$	$(SF \wedge OF) \mid ZF$	Меньше или равно (знаковое)
$j\text{a}$	$\sim CF \ \& \ \sim ZF$	Выше (беззнаковое)
$j\text{b}$	CF	Ниже (беззнаковое)

Пример условного ветвления (по старинке)

■ Создание

```
> gcc -Og -S -fno-if-conversion control.c
```

```
long absdiff
(long x, long y)
{
    long result;
    if (x > y)
        result = x-y;
    else
        result = y-x;
    return result;
}
```

```
absdiff:
    cmpq    %rsi, %rdi    # x:y
    jle     .L4
    movq    %rdi, %rax
    subq    %rsi, %rax
    ret
.L4:       # x <= y
    movq    %rsi, %rax
    subq    %rdi, %rax
    ret
```

Регистр	Применение
%rdi	аргумент x
%rsi	аргумент y
%rax	результат

Представление «go to» кодом

- Си допускает оператор goto
- Переход в точку, обозначенную меткой

```
long absdiff
(long x, long y)
{
    long result;
    if (x > y)
        result = x-y;
    else
        result = y-x;
    return result;
}
```

```
long absdiff_j
(long x, long y)
{
    long result;
    int ntest = x <= y;
    if (ntest) goto Else;
    result = x-y;
    goto Done;
Else:
    result = y-x;
Done:
    return result;
}
```

Трансляция условного выражения в общем (используя ветвление)

Си код

```
val = Test ? Then_Expr : Else_Expr;
```

```
val = x > y ? x - y : y - x;
```

“goto” версия

```
nt = !Test;
if (nt) goto Else;
val = Then_Expr;
goto Done;
Else:
    val = Else_Expr;
Done:
    . . .
```

- Test – целочисленное выражение
 - = 0 интерпретируется как ложь
 - ≠ 0 интерпретируется как истина
- Создаёт отдельные фрагменты кода для **Then_Expr** и **Else_Expr**
- Исполняется только один из двух

Использование условной пересылки

■ Команды условной пересылки

- Команды поддерживают:
if (Test) Dest \leftarrow Src
- Есть в x86 процессорах после 1995г.
- GCC пытается использовать их
 - Но, только в безопасных случаях!

■ А зачем?

- Переходы разрушают конвейерное исполнение инструкций
- Условная пересылка не вызывает передачи управления

Си код

```
val = Test  
    ? Then_Expr  
    : Else_Expr;
```

“goto” версия

```
result = Then_Expr;  
eval = Else_Expr;  
nt = !Test;  
if (nt) result = eval;  
return result;
```

Пример условной пересылки

```
long absdiff
(long x, long y)
{
    long result;
    if (x > y)
        result = x-y;
    else
        result = y-x;
    return result;
}
```

Регистр	Применение
%rdi	аргумент x
%rsi	аргумент y
%rax	результат

absdiff:

```
movq    %rdi, %rax    # x
subq    %rsi, %rax    # result = x-y
movq    %rsi, %rdx
subq    %rdi, %rdx    # eval = y-x
cmpq    %rsi, %rdi    # x:y
cmovle  %rdx, %rax    # if <=, result = eval
ret
```


Условная пересылка исключается

Ресурсоёмкие вычисления

```
val = Test(x) ? Hard1(x) : Hard2(x);
```

- Оба значения вычисляются
- Имеет смысл только для очень простых выражений

Рискованные вычисления

```
val = p ? *p : 0;
```

- Оба значения вычисляются
- Возможен нежелательный эффект

Вычисления с побочным эффектом

```
val = x > 0 ? x*=7 : x+=3;
```

- Оба значения вычисляются
- Побочные эффекты должны исключаться

Машинный уровень 2: Управление

- Управление: флаги условий
- Условные переходы и пересылки
- Циклы
- Операторы переключения
- Процедуры IA 32
 - Структура стека
 - Соглашения вызова процедур
 - Рекурсия и указатели

Пример цикла “do-while”

Си код

```
long pcount_do
(unsigned long x) {
    long result = 0;
    do {
        result += x & 0x1;
        x >>= 1;
    } while (x);
    return result;
}
```

“goto” версия

```
long pcount_goto
(unsigned long x) {
    long result = 0;
    loop:
        result += x & 0x1;
        x >>= 1;
        if(x) goto loop;
    return result;
}
```

- Подсчитывает количество единичных бит в аргументе x (подсчёт выталкиванием)
- Использует условный переход для зацикливания или выхода из цикла

Компиляция цикла “do-while”

“goto” версия

```
long pcount_goto
(unsigned long x) {
    long result = 0;
loop:
    result += x & 0x1;
    x >>= 1;
    if(x) goto loop;
    return result;
}
```

Регистры	Применение
%rdi	аргумент x
%rax	результат

```
        movl    $0, %eax    # result = 0
.L2:                                # loop:
        movq    %rdi, %rdx
        andl    $1, %edx    # t = x & 0x1
        addq    %rdx, %rax  # result += t
        shrq    %rdi        # x >>= 1
        jne     .L2         # if (x) goto loop
        rep; ret
```

Компиляция “do-while” в общем

Си код

```
do  
    Тело  
while (Условие) ;
```

“goto” версия

```
loop:  
    Тело  
    if (Условие)  
        goto loop
```

■ **Тело:** {
 оператор₁;
 оператор₂;
 ...
 оператор_n;
}

Трансляция “while” в общем №1

- Трансляция “переход-в-середину”
- Используется при –Og

“while” версия

```
while (Условие)  
    Тело
```



“goto” версия

```
    goto test;  
loop:  
    Тело  
test:  
    if (Условие)  
        goto loop;  
done:
```

Пример цикла “while” №1

Си код

```
long pcount_while
(unsigned long x) {
    long result = 0;
    while (x) {
        result += x & 0x1;
        x >>= 1;
    }
    return result;
}
```

Переход в середину

```
long pcount_goto_jtm
(unsigned long x) {
    long result = 0;
    goto test;
loop:
    result += x & 0x1;
    x >>= 1;
test:
    if(x) goto loop;
    return result;
}
```

■ Отличие от do-while

- Начальный goto начинает цикл с проверки

Компиляция “while” в общем №2

“while” версия

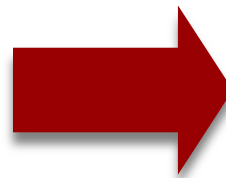
```
while (Условие)  
    Тело
```



“do-while” версия

```
if (!Условие)  
    goto done;  
do  
    Тело  
    while (Условие) ;  
done:
```

- сведение к “do-while”
- Используется при -O1



“goto” версия

```
if (!Условие)  
    goto done;  
loop:  
    Тело  
    if (Условие)  
        goto loop;  
done:
```


Пример цикла “while” №2

Си код

```
long pcount_while
(unsigned long x) {
    long result = 0;
    while (x) {
        result += x & 0x1;
        x >>= 1;
    }
    return result;
}
```

“do-while” версия

```
long pcount_goto_dw
(unsigned long x) {
    long result = 0;
    if (!x) goto done;
loop:
    result += x & 0x1;
    x >>= 1;
    if(x) goto loop;
done:
    return result;
}
```

■ Отличие от “do-while”

- Начальное условие защищает вход в цикл

Общая форма цикла “for”

Общая форма

```
for (Начало; Условие; Изменение )
```

Тело

```
#define WSIZE 8*sizeof(int)
long pcount_for
(unsigned long x)
{
    size_t i;
    long result = 0;
    for (i = 0; i < WSIZE; i++)
    {
        unsigned bit =
            (x >> i) & 0x1;
        result += bit;
    }
    return result;
}
```

Начало

```
i = 0
```

Условие

```
i < WSIZE
```

Изменение

```
i++
```

Тело

```
{
    unsigned bit =
        (x >> i) & 0x1;
    result += bit;
}
```

Цикл “for” → цикл “while”

“for” версия

```
for (Начало; Условие; Изменение )  
    Тело
```



“while” версия

```
Начало ;  
while (Условие) {  
    Тело  
    Изменение ;  
}
```

Преобразование for-while

Начало

```
i = 0
```

Условие

```
i < WSIZE
```

Изменение

```
i++
```

Тело

```
{  
    unsigned bit =  
        (x >> i) & 0x1;  
    result += bit;  
}
```

```
long pcount_for_while  
(unsigned long x)  
{  
    size_t i;  
    long result = 0;  
    i = 0;  
    while (i < WSIZE)  
    {  
        unsigned bit =  
            (x >> i) & 0x1;  
        result += bit;  
        i++;  
    }  
    return result;  
}
```

Преобразование цикла “for”-“do-while”

“goto” версия

Си код

```
long pcount_for
(unsigned long x)
{
    size_t i;
    long result = 0;
    for (i = 0; i < WSIZE; i++)
    {
        unsigned bit =
            (x >> i) & 0x1;
        result += bit;
    }
    return result;
}
```

- Начальное условие может быть оптимизировано

```
long pcount_for_goto_dw
(unsigned long x) {
    size_t i;
    long result = 0;
    i = 0;
    if (!(i < WSIZE))
        goto done;
loop:
    {
        unsigned bit =
            (x >> i) & 0x1;
        result += bit;
    }
    i++;
    if (i < WSIZE)
        goto loop;
done:
    return result;
}
```

Начало

! Условие

Тело

Изменение

Условие

Машинный уровень 2: Управление

- Управление: флаги условий
- Условные переходы и пересылки
- Циклы
- Операторы переключения
- Процедуры IA 32
 - Структура стека
 - Соглашения вызова процедур
 - Рекурсия и указатели

```

long switch_eg
(long x, long y, long z)
{
    long w = 1;
    switch(x) {
    case 1:
        w = y*z;
        break;
    case 2:
        w = y/z;
        /* Переход к другому */
    case 3:
        w += z;
        break;
    case 5:
    case 6:
        w -= z;
        break;
    default:
        w = 2;
    }
    return w;
}

```

Пример оператора switch

- Совмещённые варианты
 - case 5 и case 6
- Переход к другому варианту
 - Из case 2 в case 3
- Отсутствующие варианты
 - case 4

Структура таблицы переходов

В виде switch

```
switch(x) {  
  case val_0:  
    Блок 0  
  case val_1:  
    Блок 1  
    . . .  
  case val_n-1:  
    Блок n-1  
}
```

Таблица переходов

jtab:	Targ0
	Targ1
	Targ2
	• • •
	Targn-1

Цели переходов

Targ0:

Блок кода
0

Targ1:

Блок кода
1

Targ2:

Блок кода
2

•
•
•

Targn-1:

Блок кода
n-1

Приблизительный перевод

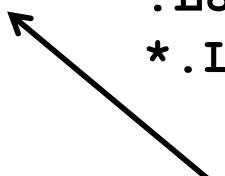
```
goto *JTab[x];
```


Пример оператора перехода

```
long switch_eg(long x, long y, long z)
{
    long w = 1;
    switch(x) {
        . . .
    }
    return w;
}
```

Пролог:

```
switch_eg:
    movq    %rdx, %rcx
    cmpq    $6, %rdi    # x:6
    ja      .L8
    jmp     *.L4(, %rdi, 8)
```



Какой диапазон значений
определён местом default?

Регистры	Использование
%rdi	аргумент x
%rsi	аргумент y
%rdx	аргумент z
%rax	результат

w инициализирован
не здесь !

Пример оператора перехода

```
long switch_eg(long x, long y, long z)
{
    long w = 1;
    switch(x) {
        . . .
    }
    return w;
}
```

Таблица переходов

```
.section      .rodata
    .align 8
.L4:
    .quad     .L8    # x = 0
    .quad     .L3    # x = 1
    .quad     .L5    # x = 2
    .quad     .L9    # x = 3
    .quad     .L8    # x = 4
    .quad     .L7    # x = 5
    .quad     .L7    # x = 6
```

Пролог:

```
switch_eg:
    movq      %rdx, %rcx
    cmpq      $6, %rdi      # x:6
    ja        .L8           # переход к default
    jmp        *.L4(,%rdi,8) # goto *JTab[x]
```

Косвенный переход



Пояснения к ассемблерному прологу

■ Структура таблицы

- Каждый переход требует 8 байт
- Базовый адрес (начало) `.L4`

■ Переход

- **Прямой:** `jmp .L8`
- Цель перехода обозначена меткой `.L8`
- **Косвенный:** `jmp *.L4(, %rdi, 8)`
- Начало таблицы переходов: `.L4`
- Масштабный множитель 8 (адреса - 8 байт)
- Адрес перехода – в ячейке по эффективному адресу `.L4 + x*8`
 - Только для $0 \leq x \leq 6$

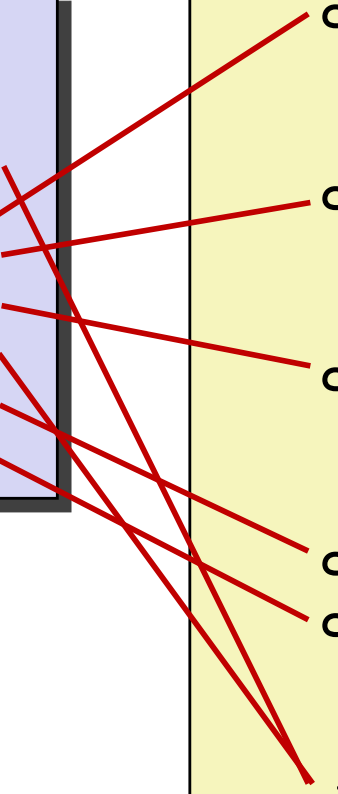
Таблица переходов

```
.section      .rodata
    .align 8
.L4:
    .quad     .L8    # x = 0
    .quad     .L3    # x = 1
    .quad     .L5    # x = 2
    .quad     .L9    # x = 3
    .quad     .L8    # x = 4
    .quad     .L7    # x = 5
    .quad     .L7    # x = 6
```

Таблица переходов

```
.section .rodata
.align 8
.L4:
.quad .L8 # x = 0
.quad .L3 # x = 1
.quad .L5 # x = 2
.quad .L9 # x = 3
.quad .L8 # x = 4
.quad .L7 # x = 5
.quad .L7 # x = 6
```

```
switch(x) {
case 1:      // .L3
    w = y*z;
    break;
case 2:      // .L4
    w = y/z;
    /* Переход к другому */
case 3:      // .L5
    w += z;
    break;
case 5:
case 6:      // .L6
    w -= z;
    break;
default:    // .L2
    w = 2;
}
```



Блоки кода (x == 1)

```
switch(x) {  
  case 1:      // .L3  
    w = y*z;  
    break;  
  . . .  
}
```

```
.L3:  
    movq    %rsi, %rax    # y  
    imulq   %rdx, %rax    # y*z  
    ret
```

Регистры	Использование
%rdi	аргумент x
%rsi	аргумент y
%rdx	аргумент z
%rax	результат

Рализация перехода к другому

```
long w = 1;  
.  
.  
.  
switch(x) {  
.  
.  
.  
case 2:   
    w = y/z;  
    /* Переход к другому */  
case 3:   
    w += z;  
    break;  
.  
.  
.  
}
```

case 2:
w = y/z;
goto merge;

case 3:
w = 1;

merge:
w += z;

Блоки кода (x == 2, x == 3)

```
long w = 1;
. . .
switch(x) {
. . .
case 2:
    w = y/z;
    /*Переход к другому*/
case 3:
    w += z;
    break;
. . .
}
```

```
.L5:                                # Case 2
    movq    %rsi, %rax
    cqto                                # расширение
    idivq    %rcx                      # y/z
    jmp     .L6                        # goto merge
.L9:                                # Case 3
    movl     $1, %eax                 # w = 1
.L6:                                # merge:
    addq     %rcx, %rax               # w += z
    ret
```

Регистры	Использование
%rdi	аргумент x
%rsi	аргумент y
%rdx	аргумент z
%rax	результат

Блоки кода (x == 5, x == 6, default)

```
switch(x) {  
    . . .  
    case 5:  // .L7  
    case 6:  // .L7  
        w -= z;  
        break;  
    default: // .L8  
        w = 2;  
}
```

```
.L7:                                # Case 5,6  
    movl    $1, %eax               # w = 1  
    subq    %rdx, %rax             # w -= z  
    ret  
.L8:                                # Default:  
    movl    $2, %eax               # 2  
    ret
```

Регистры	Использование
%rdi	аргумент x
%rsi	аргумент y
%rdx	аргумент z
%rax	результат

Промежуточный итог

■ Управление в Си

- if-then-else
- do-while
- while, for
- switch

■ Управление в ассемблере

- Условный переход
- Условная пересылка
- Косвенный переход (по таблице переходов)
- Компилятор создаёт код для более сложного управления

■ Типичные приёмы компиляторов

- Циклы преобразуются в форму do-while или переход-в-середину
- Большие switch используют таблицы переходов
- Разреженные switch могут использовать решающие деревья