程序的机器级表示：数据

施朱鸣

10 月 22 日

Outline

数组

结构体

浮点数

练习

数组

内存分配

```
char string[12];
int val[5];
T A[L];
T* p = new T[L];
```

在内存中分配 $L \times sizeof(T)$bytes 的连续空间。

数据类型是给编译器看的，分配的空间并没有记录自己的数据类型。

数组元素访问

可以用 [] 和指针运算来访问，C 语言指针计算会自动调整跨度

汇编会使用之前介绍过的寻址公式 $Imm(r_b, r_i, s)$[1]

表达式	类型	值	汇编代码
E	int*	x_E	movq %rdx,%rax
E[0]	int	M[x_E]	movl (%rdx),%rax
E[i]	int	M[x_E+4i]	movl (%rdx,%rcx,4),%eax
&E[2]	int*	x_E+8	leaq 8(%rdx),%rax
E+i-1	int*	x_E+4i-4	leaq-4(%rdx,%rcx,4),%rax
*(E+i-3)	int	M[$x_E+4i-12$]	movl-12(%rdx,%rcx,4),%eax
&E[i]-E	long	i	movq %rcx,%rax

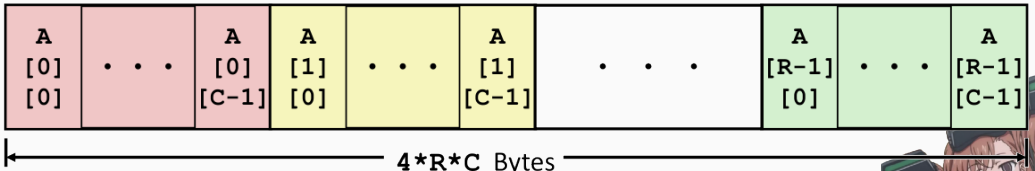
[1]可以复习书 121 页

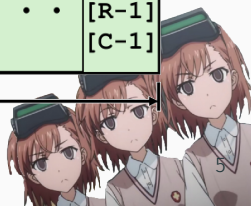
多维数组

$$\begin{pmatrix} A[0][0] & \cdots & A[0][C-1] \\ \vdots & & \vdots \\ A[R-1][0] & \cdots & A[R-1][C-1] \end{pmatrix}$$

在内存中被拉直，靠前的维度优先安排（先行后列）连续排列。

```
int A[R][C];
```





多维数组的访问

对于 $A[i][j]$，公式为

$$A + i \times (C \times K) + j \times K$$

编译器利用寻址公式计算的具体方法根据优化情况而定，下面是一个例子

多维数组的访问效率

```
// multiarray.c
int a[2][2] = {1,1,1,1};
void ij() {
   for (int i = 0; i < 2; i++)
      for (int j = 0; j < 2; j++)
         a[i][j]++;
}
void ji() {
   for (int j = 0; j < 2; j++)
      for (int i = 0; i < 2; i++)
         a[i][j]++;
}
```

多维数组的访问效率

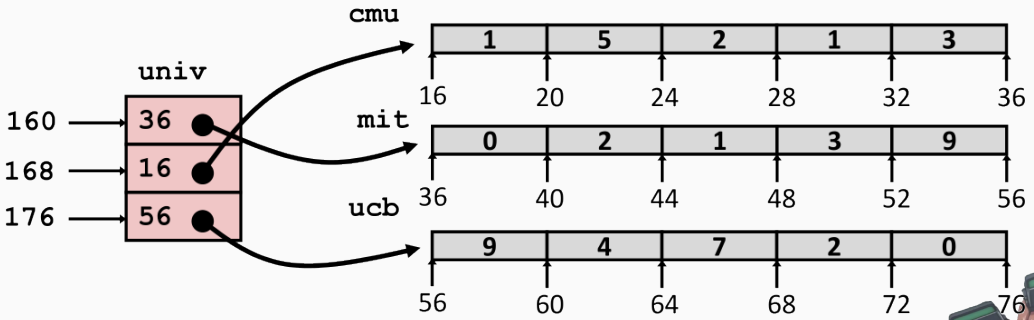
gcc -Og -S multiarray.c 发现指令相同，猜测与优化程度、内存管理相关

```
ij:
.LFB0:
    .cfi_startproc
    movl    $0, %edi
    jmp .L2
.L3:
    leaq    a(%rip), %rcx
    movslq  %eax, %rdx
    movslq  %edi, %rsi
    leaq    (%rdx,%rsi,2), %rsi
    movl    (%rcx,%rsi,4), %edx
    addl    $1, %edx
    movl    %edx, (%rcx,%rsi,4)
    addl    $1, %eax
.L4:
    cmpl    $1, %eax
    jle .L3
    addl    $1, %edi
.L2:
    cmpl    $1, %edi
    jg  .L6
    movl    $0, %eax
    jmp .L4
.L6:
    rep ret
    .cfi_endproc
```

```
ji:
.LFB0:
    .cfi_startproc
    movl    $0, %edi
    jmp .L2
.L3:
    leaq    a(%rip), %rcx
    movslq  %edi, %rdx
    movslq  %eax, %rsi
    leaq    (%rdx,%rsi,2), %rsi
    movl    (%rcx,%rsi,4), %edx
    addl    $1, %edx
    movl    %edx, (%rcx,%rsi,4)
    addl    $1, %eax
.L4:
    cmpl    $1, %eax
    jle .L3
    addl    $1, %edi
.L2:
    cmpl    $1, %edi
    jg  .L6
    movl    $0, %eax
    jmp .L4
.L6:
    rep ret
    .cfi_endproc
```

多层数组

其实就是指针数组，访问第 n 层的元素需要访问 n 次内存，时间效率低



从定长数组到变长数组

固定维度数组：编译器知道数组每个维度的大小 C

$$A + i \times (C \times K) + j \times K$$

编译的时候就把 $C \times K$ 算好了

```
/* Get element a[i][j] */
int fix_ele(fix_matrix a, size_t i, size_t j) {
  return a[i][j];
}
```

```
  # a in %rdi, i in %rsi, j in %rdx
  salq    $6, %rsi              # 64*i
  addq    %rsi, %rdi            # a + 64*i
  movl    (%rdi,%rdx,4), %eax   # M[a + 64*i + 4*j]
  ret
```

从定长数组到变长数组

固定维度数组：每个维度的大小 C 在运行时根据传入的参数确定

$$A + i \times (C \times K) + j \times K$$

$C \times K$ **只能在运行时计算**，时间开销更大。当然，数组本身的连续内存空间大小还是确定的。元素的大小 K 也是确定的。只是拓展了这个函数的适用性。

```
/* Get element a[i][j] */
int var_ele(size_t n, int a[n][n], size_t i, size_t j)
{
  return a[i][j];
}
```

```
  # n in %rdi, a in %rsi, i in %rdx, j in %rcx
  imulq    %rdx, %rdi            # n*i
  leaq     (%rsi,%rdi,4), %rax   # a + 4*n*i
  movl     (%rax,%rcx,4), %eax   # a + 4*n*i + 4*j
  ret
```

正确理解“变长”

```c
// vararray.c
# include<stdio.h>
int main(){
    int n, p[n];
    scanf("%d",&n);
    int q[n];
    printf("p:%lu and q:%lu",sizeof(p),sizeof(q));
    return 0;
}
```

> gcc vararray.c && echo 3 | ./a.out

> p:131068 and q:12

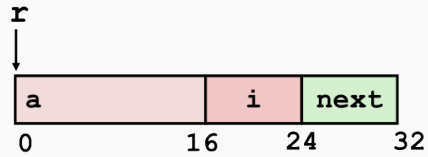
结构体

结构体的定义

按照声明的顺序，各元素顺序排列在一片连续的内存空间中

空间的大小由编译决定，机器级访问的方法类似于数组元素的访问，通过指针计算

```
struct rec {
    int a[4];
    size_t i;
    struct rec *next;
};
```

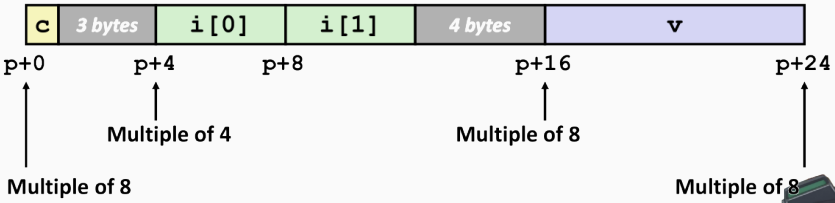


结构体的对齐

结构体对齐的规则：

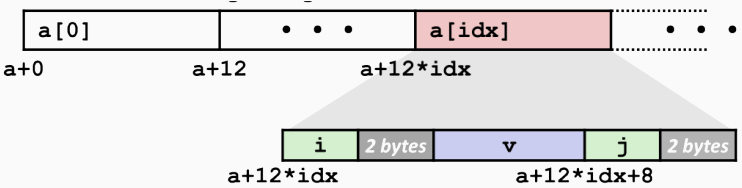
- 结构体内部对齐：每个 K 字节的基本对象的地址必须是 K 的倍数
- 结构体整体对齐：结构体整体长度是结构体中最大的基本对象长度的整数倍

编译器会用 0 补足空隙，保证对齐



结构体元素的访问

以不变应万变：指针运算，遇到对齐补的 0 记得跳过

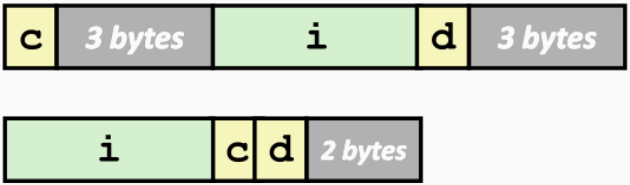



```
short get_j(int idx)
{
  return a[idx].j;
}
```

```
# %rdi = idx
leaq (%rdi,%rdi,2),%rax # 3*idx
movzwl a+8(,%rax,4),%eax
```

结构体存储的优化

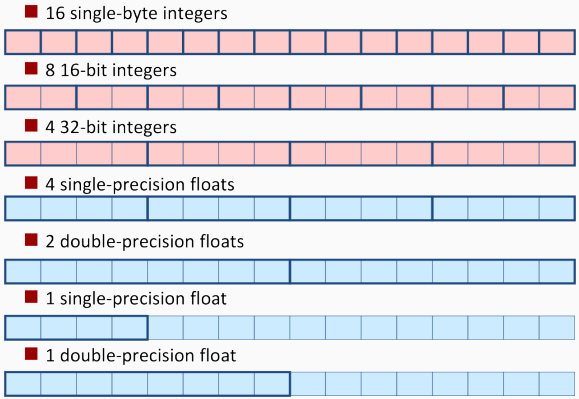
根据对其规则调整结构体元素的顺序



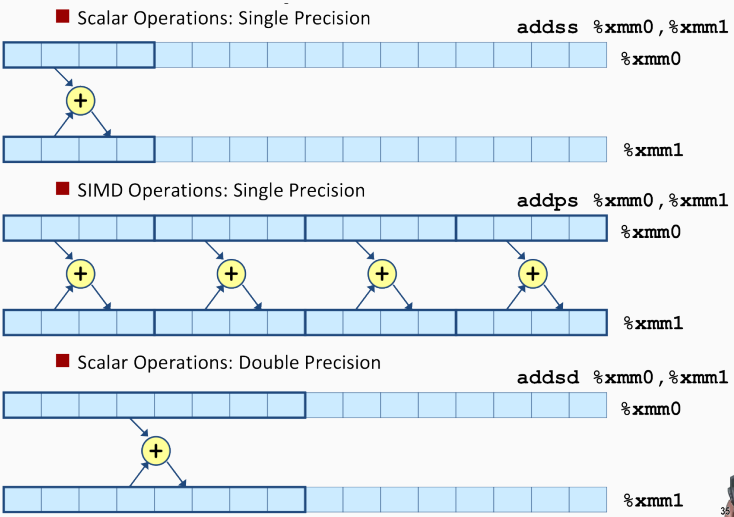
浮点数

浮点寄存器 XMM

- 一共 16 个，每个 16 bytes，命名为%xmm0 到%xmm15
- 不止可以存浮点数，也不止可以放一个数



浮点计算指令


Scalar Operations: Single Precision
addss %xmm0,%xmm1
%xmm0
%xmm1
SIMD Operations: Single Precision
addps %xmm0,%xmm1
%xmm0
%xmm1
Scalar Operations: Double Precision
addsd %xmm0,%xmm1
%xmm0
%xmm1

全部浮点数参数时的传参

规则可以类比非浮点的计算

- 参数依次放入%xmm0，%xmm1 等
- 返回值放入%xmm0 到
- **所有的 xmm 寄存器都是 caller-saved**

如果有非浮点参数和返回值呢？

全部浮点数参数时的传参

规则可以类比非浮点的计算

- 参数依次放入%xmm0，%xmm1 等
- 返回值放入%xmm0 到
- **所有的 xmm 寄存器都是 caller-saved**

如果有非浮点参数和返回值呢？

非浮点的参数用普通寄存器依次存放，浮点的参数用%xmm 依次存放。

xmm 寄存器之间的移动和内存与 xmm 的移动有浮点运算的一套指令

浮点相关的移动指令[2]

把指令前面的 v 去掉。其他浮点运算指令见书上 210 页。

指令	源	目的	描述
vmovss	M_{32}	X	传送单精度数
vmovss	X	M_{32}	传送单精度数
vmovsd	M_{64}	X	传送双精度数
vmovsd	X	M_{64}	传送双精度数
vmovaps	X	X	传送对齐的封装好的单精度数
vmovapd	X	X	传送对齐的封装好的双精度数

[2]教材 206 页

练习

练习题 3.38

练习题 3.38 考虑下面的源代码，其中 M 和 N 是用 # define 声明的常数：

```
long P[M][N];
long Q[N][M];

long sum_element(long i, long j) {
    return P[i][j] + Q[j][i];
}
```

在编译这个程序中，GCC 产生如下汇编代码：

```
    long sum_element(long i, long j)
    i in %rdi, j in %rsi
1   sum_element:
2     leaq    0(,%rdi,8), %rdx
3     subq    %rdi, %rdx
4     addq    %rsi, %rdx
5     leaq    (%rsi,%rsi,4), %rax
6     addq    %rax, %rdi
7     movq    Q(,%rdi,8), %rax
8     addq    P(,%rdx,8), %rax
9     ret
```

运用逆向工程技能，根据这段汇编代码，确定 M 和 N 的值。

练习题 3.44

练习题 3.44 对下面每个结构声明，确定每个字段的偏移量、结构总的大小，以及在 x86-64 下它的对齐要求：

A. `struct P1 { int i; char c; int j; char d; };`

B. `struct P2 { int i; char c; char d; long j; };`

C. `struct P3 { short w[3]; char c[3] };`

D. `struct P4 { short w[5]; char *c[3] };`

E. `struct P5 { struct P3 a[2]; struct P2 t };`

致谢

致谢

LaTeX 代码开源在 https://github.com/ShiZhuming/pku-ics

祝大家写 lab 顺利，谢谢聆听！