

程序的机器级表示Ⅲ：过程

教师：吴锐

计算机科学与技术学院

哈尔滨工业大学

过程的机制

■ 传递控制

- 调用：转到过程代码的起始处
- 结束：回到返回点

■ 传递数据

- 过程参数
- 返回值

■ 内存管理

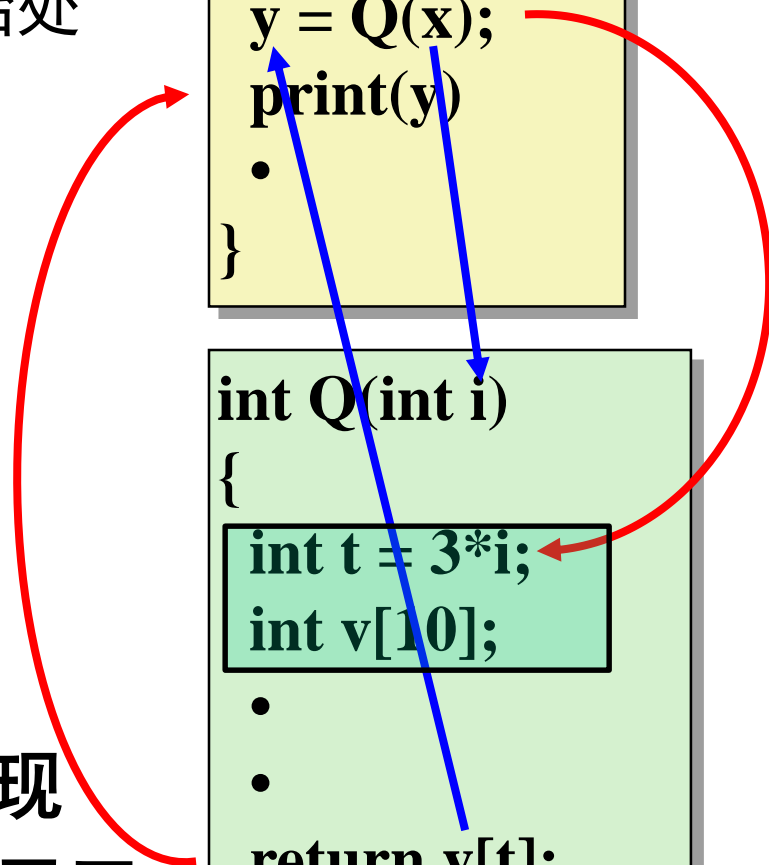
- 过程运行期间申请
- 返回时解除分配

■ 该机制全部由机器指令实现

■ x86-64 过程的实现只是使用了这些机制

```
P(...) {
    •
    •
    y = Q(x);
    print(y)
    •
}
```

```
int Q(int i)
{
    int t = 3*i;
    int v[10];
    •
    •
    return v[t];
}
```



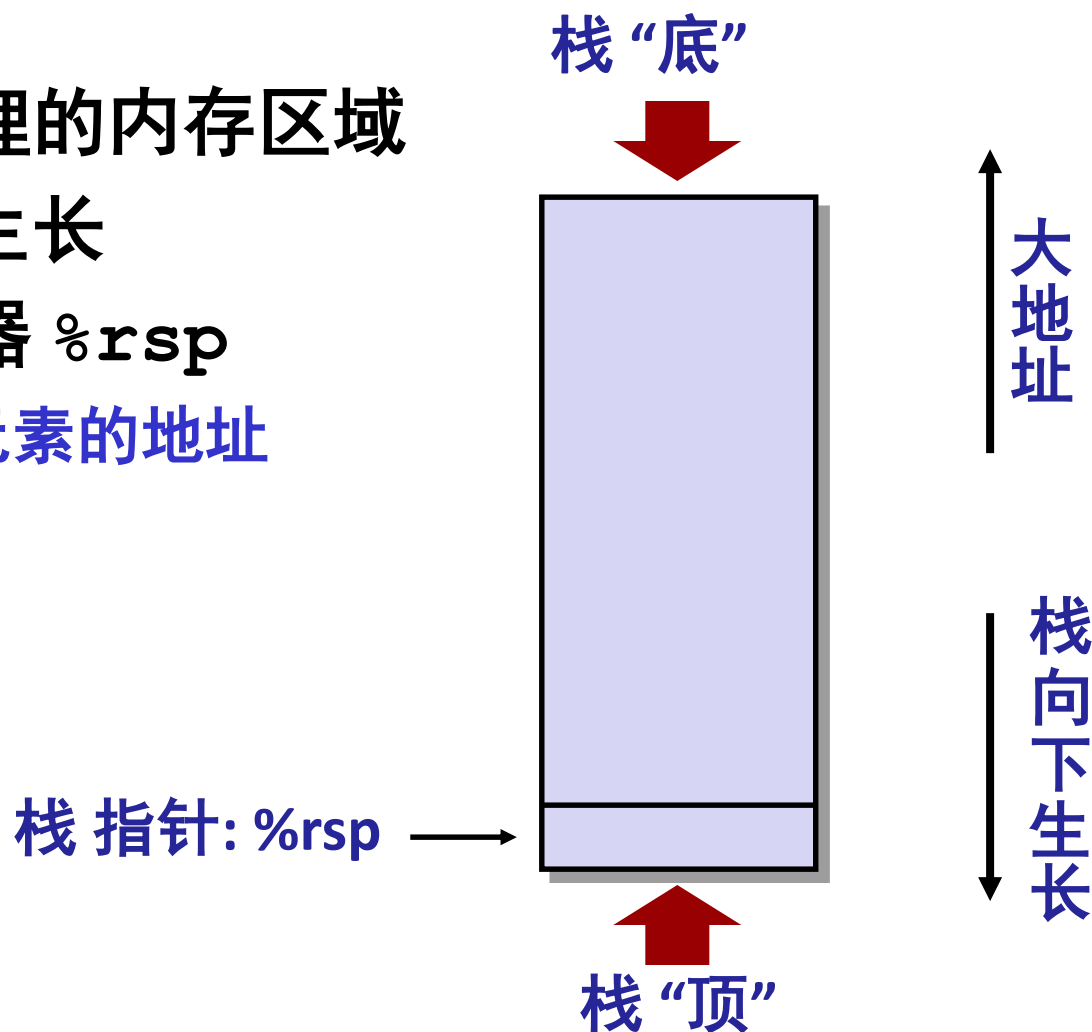
主要内容

■ 过程

- 栈结构
- 调用约定
 - 传递控制
 - 传递数据
 - 管理局部数据
- 递归

x86-64 栈

- 使用栈规则管理的内存区域
- 向低地址方向生长
- 栈指针：寄存器 `%rsp`
 - 保存栈“顶”元素的地址



x86-64 入栈指令: push

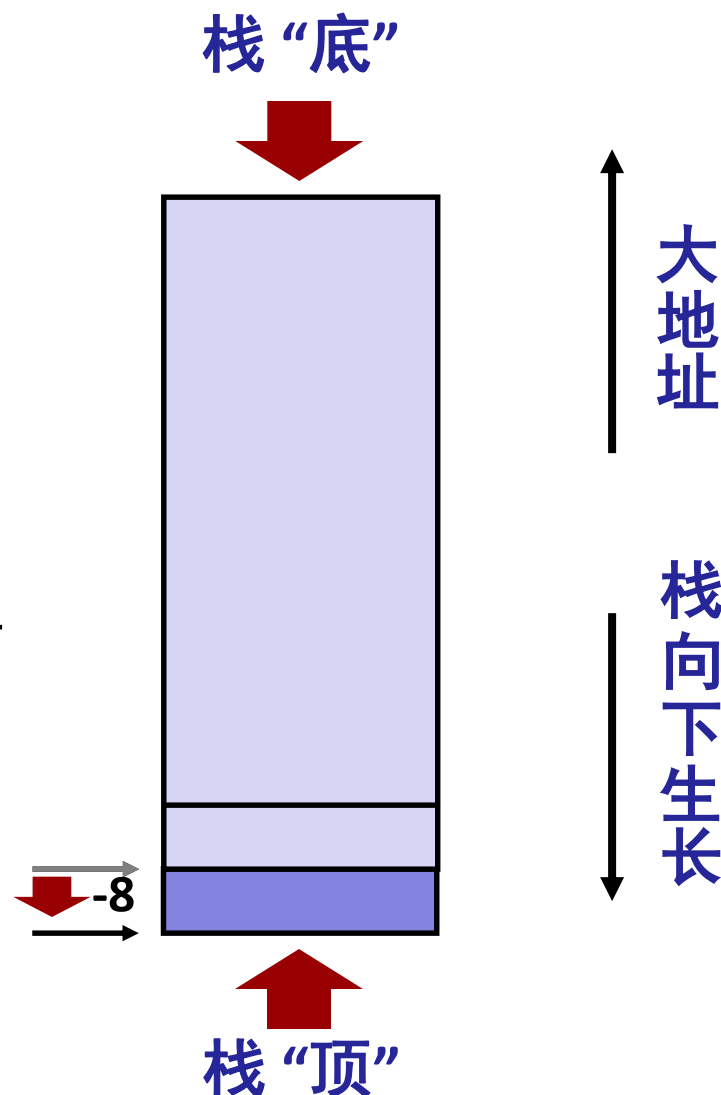
■ 入栈指令 pushq

■ 格式:

pushq Src

- 从Src取操作数
- 将%rsp减8
- 将操作数写到%rsp指向的地址

栈 指针 %rsp



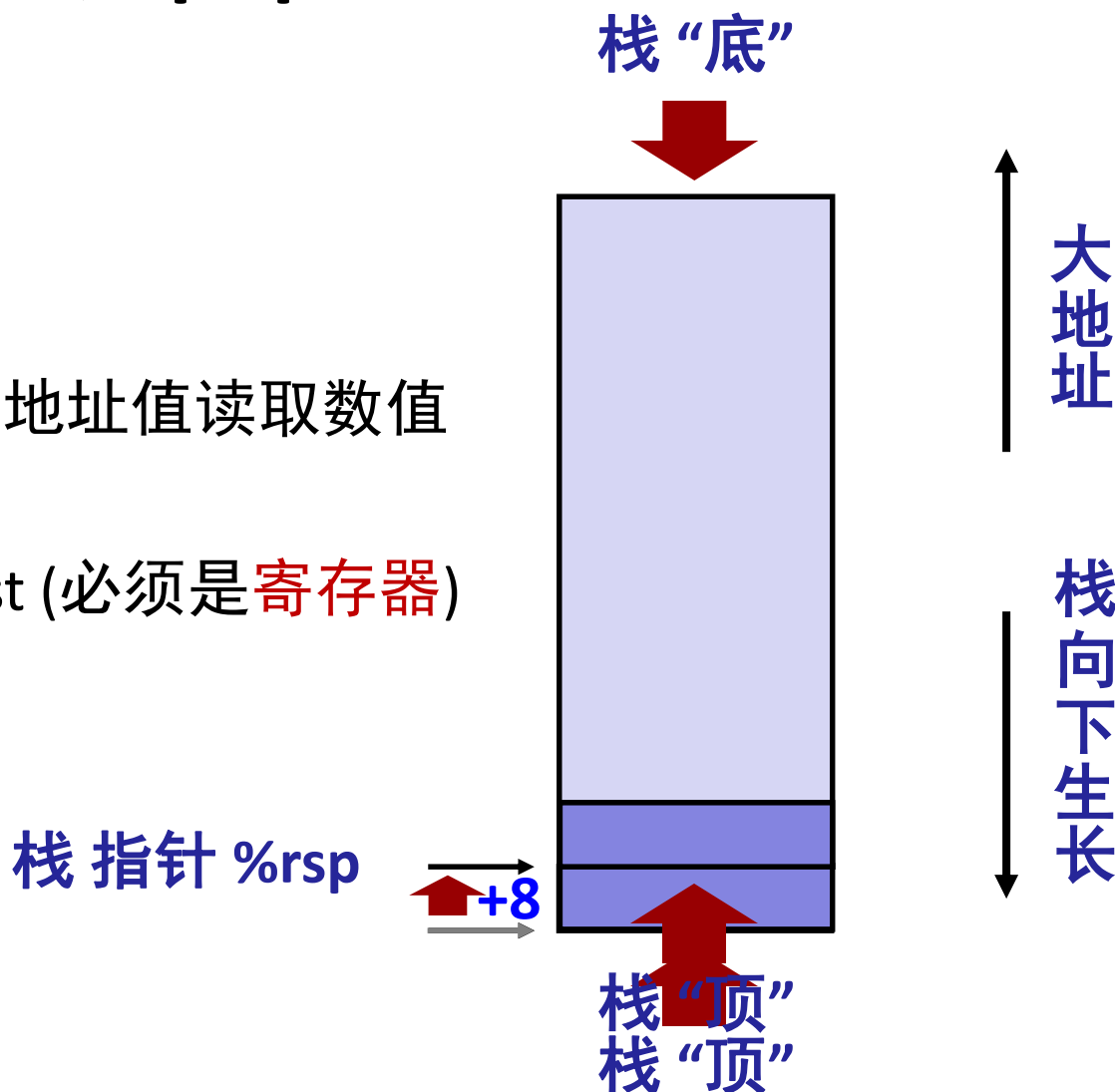
x86-64 出栈指令: pop

■ 出栈指令 pushq

■ 格式:

popq Dst

- 从%rsp中保存的地址值读取数值
- 将 %rsp加 8
- 将数值保存到Dst (必须是寄存器)



主要内容

■ 过程

- 栈结构
- 调用约定
 - 传递控制
 - 传递数据
 - 管理局部数据
- 递归与指针的解释

代码示例

```
void multstore (long x, long y, long *dest) {
    long t = mult2(x, y);
    *dest = t;
}
```

0000000000400540 <multstore>:

```
400540: push    %rbx                # Save %rbx
400541: mov     %rdx,%rbx           # Save dest
400544: callq   400550 <mult2>      # mult2(x,y)
400549: mov     %rax,(%rbx)         # Save at dest
40054c: pop     %rbx                # Restore %rbx
40054d: retq                      # return
```

```
long mult2(long a, long b)
{
    long s = a * b;
    return s;
}
```

0000000000400550 <mult2>:

```
400550: mov     %rdi,%rax # a
400553: imul    %rsi,%rax # a * b
400557: retq                      # return
```


过程控制流

- 栈：支持过程的调用、返回

- 过程调用

`call func_label`

- 返回地址入栈(Push)
- 跳转到`func_label` (函数名字就是函数代码段的起始地址)

- 返回地址：

- 紧随call指令的下一条指令的地址 (考虑PC——RIP的含义)

- 过程返回

`ret`

- 从栈中弹出返回地址(pop)
- 跳转到返回地址

控制流—1

0000000000400540 <multstore>:

•
•

400544: callq 400550 <mult2>

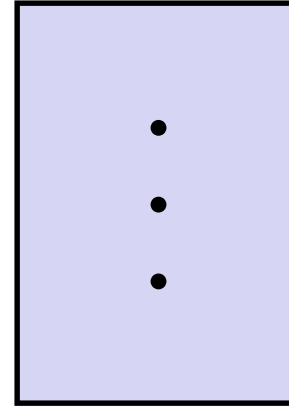
400549: mov %rax,%rbx

•
•

0x130

0x128

0x120



%rsp

0x120

%rip

0x400544

0000000000400550 <mult2>:

400550: mov %rdi,%rax

•
•

400557: retq

控制流 —2

0000000000400540 <multstore>:

•
•
•

400544: callq 400550 <mult2>

400549: mov %rax,(%rbx) ←

•
•

0000000000400550 <mult2>:

400550: mov %rdi,%rax ←

•
•

400557: retq

0x130

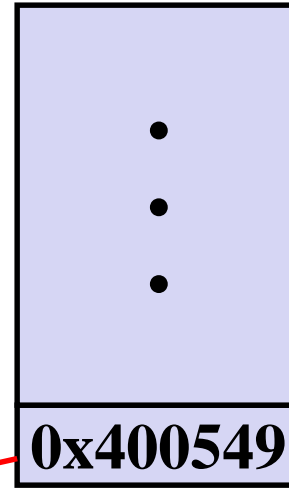
0x128

0x120

0x118

%rsp

%rip



0x118

0x400550

控制流 —3

0000000000400540 <multstore>:

•
•
•
•
•
•

400544: callq 400550 <mult2>

400549: mov %rax,%rbx

0000000000400550 <mult2>:

400550: mov %rdi,%rax

•
•

400557: retq

0x130

0x128

0x120

0x118

0x400549

%rsp

0x118

%rip

0x400557

•
•
•

控制流 —4

0000000000400540 <multstore>:

•
•
•
•
•

400544: callq 400550 <mult2>

400549: mov %rax,%rbx

0000000000400550 <mult2>:

400550: mov %rdi,%rax

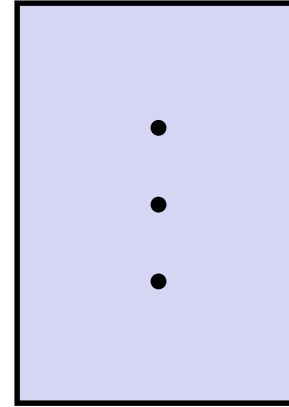
•
•

400557: retq

0x130

0x128

0x120



%rsp

0x120

%rip

0x400549

主要内容

■ 过程

- 栈结构
- 调用约定
 - 传递控制
 - 传递数据
 - 管理局部数据
- 递归与指针的解释

过程数据流

■ 参数传递

- 前6个参数用寄存器

%rdi	Arg 1
%rsi	Arg 2
%rdx	Arg 3
%rcx	Arg 4
%r8	Arg 5
%r9	Arg 6

- 其余参数用栈
(注意顺序)

...
Arg <i>n</i>
...
Arg 8
Arg 7

■ 返回值

%rax

- 局部变量：仅在需要时
申请栈空间

数据流示例

```
void multstore (long x, long y, long *dest) {  
    long t = mult2(x, y);  
    *dest = t;  
}
```

0000000000400540 <multstore>:

x in %rdi, y in %rsi, dest in %rdx

...

400541: mov %rdx,%rbx # Save dest

400544: callq 400550 <mult2> # mult2(x,y)

t in %rax

400549: mov %rax,(%rbx) # Save at dest

...

```
long mult2 (long a, long b)  
{  
    long s = a * b;  
    return s;  
}
```

0000000000400550 <mult2>:

a in %rdi, b in %rsi

400550: mov %rdi,%rax # a

400553: imul %rsi,%rax # a * b

s in %rax

400557: retq # return

主要内容

■ 过程

- 栈结构
- 调用约定
 - 传递控制
 - 传递数据
 - 管理局部数据
- 递归

基于栈的语言

■ 支持递归的语言

- C、Pascal、Java
- 代码必须可重入“*Reentrant*”
 - 单个过程有多个并发实例(simultaneous instantiations)
- 需要保存每个实例的状态
 - 参数
 - 局部变量
 - 返回地址

■ 栈的使用原则

- 有限时间内，保存给定程序的状态：从调用的发生到返回
- 被调用者先于调用者返回

■ 栈分配单位——帧，栈中单个过程实例的状态数据

调用链示例

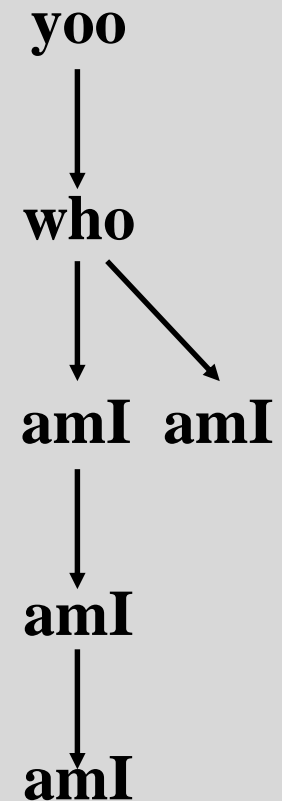
```
yoo(...)
{
  •
  •
  who();
  •
  •
}
```

```
who(...)
{
  ...
  amI();
  ...
  amI();
  ...
}
```

过程 amI() 是递归的

```
amI(...)
{
  •
  •
  amI();
  •
  •
}
```

调用链示例



栈帧

■ 内容

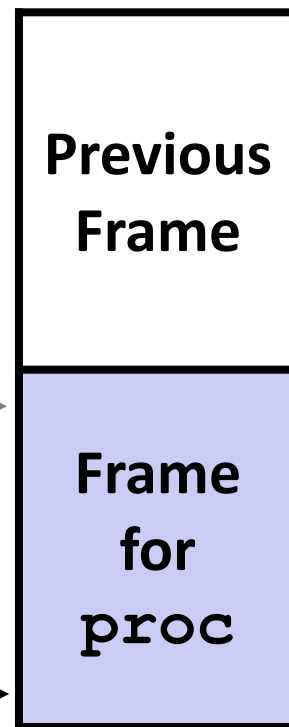
- 返回信息
- 局部存储(如需要)
- 临时空间(如需要)

■ 管理

- 进入过程时申请空间
 - 生成代码——构建栈帧
 - 包括call指令产生的push操作
- 当返回时解除申请
 - 结束代码——清理栈帧
 - 包括ret指令产生的pop操作

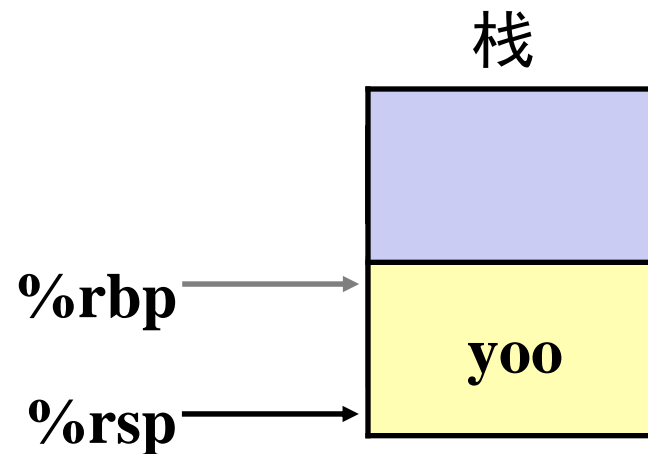
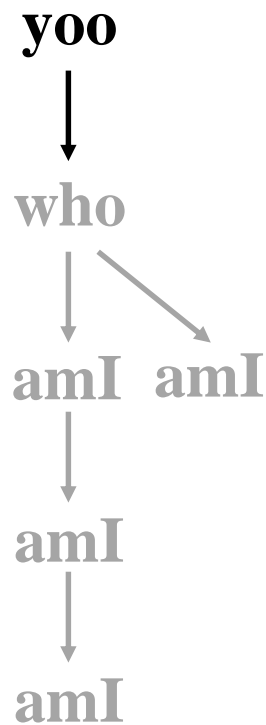
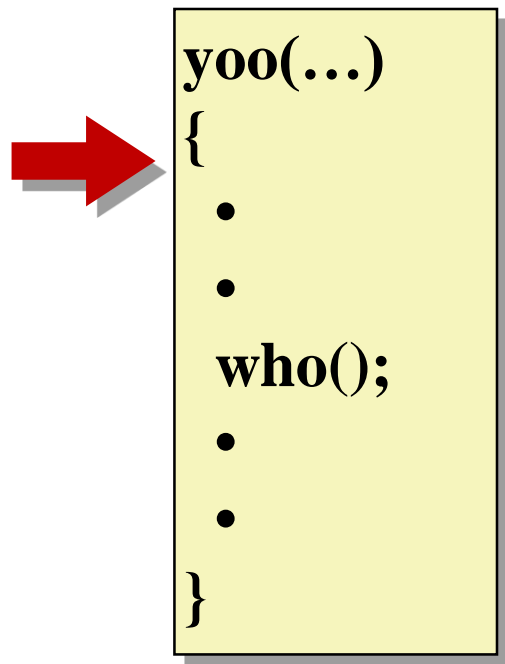
帧指针: %rbp
(可选)

栈指针: %rsp

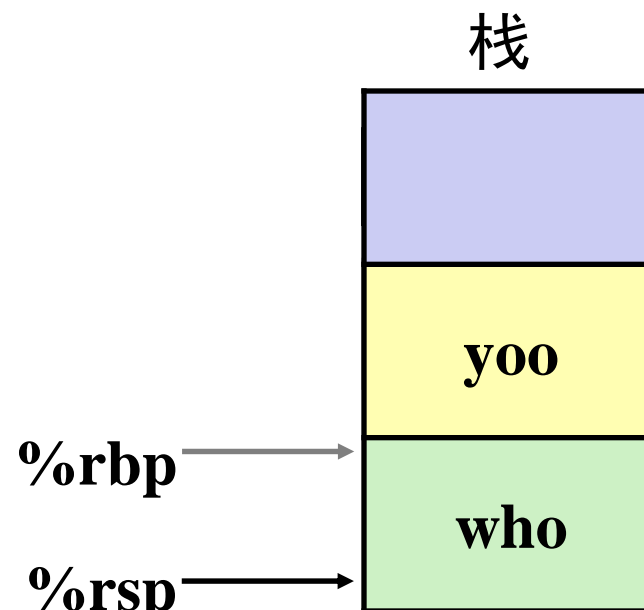
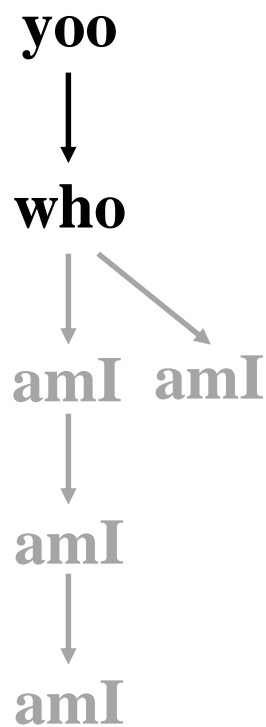
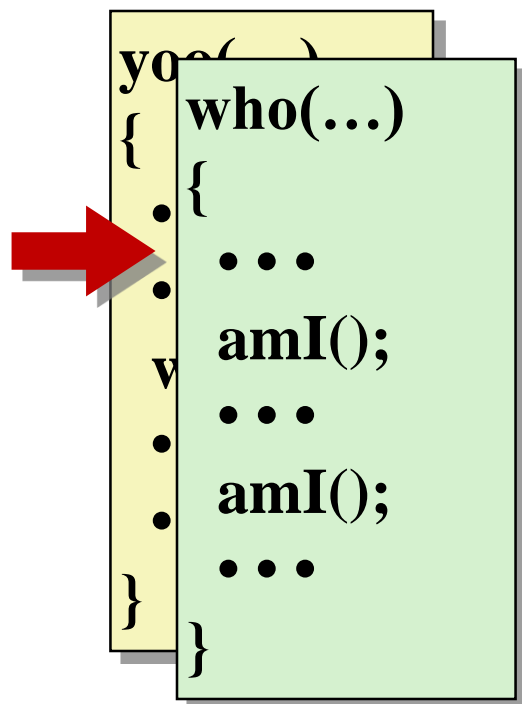


↑
栈“顶”

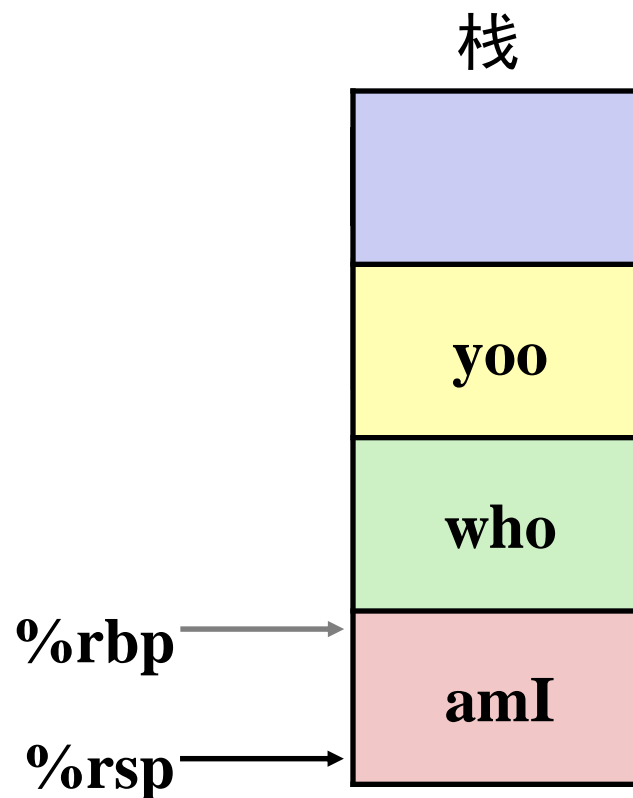
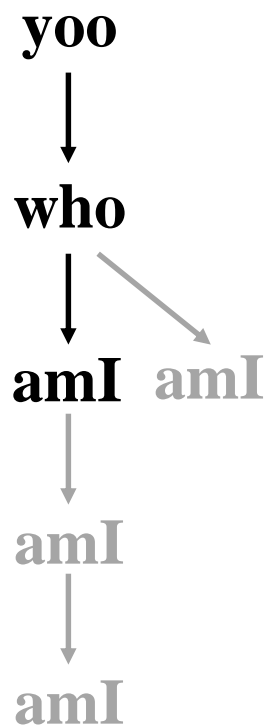
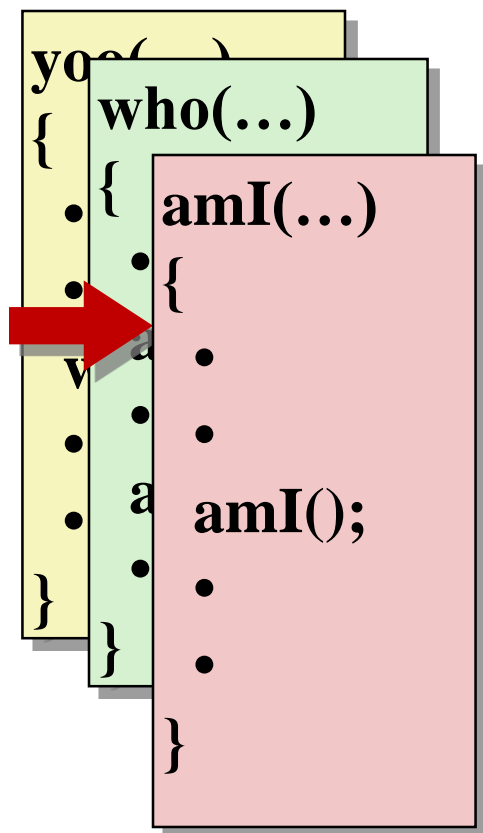
栈帧示例



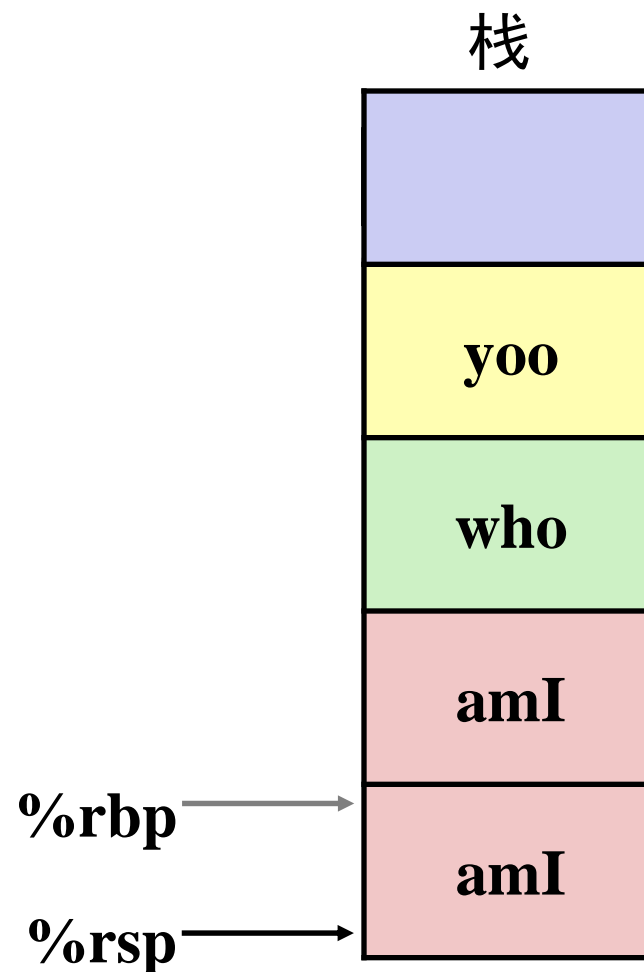
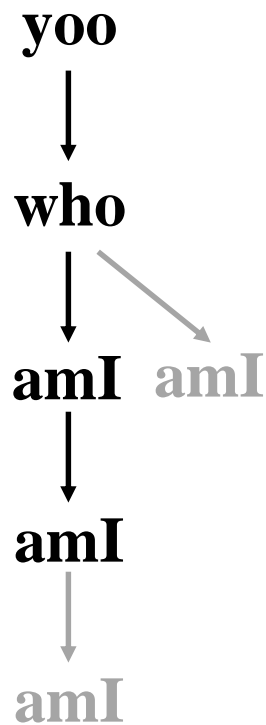
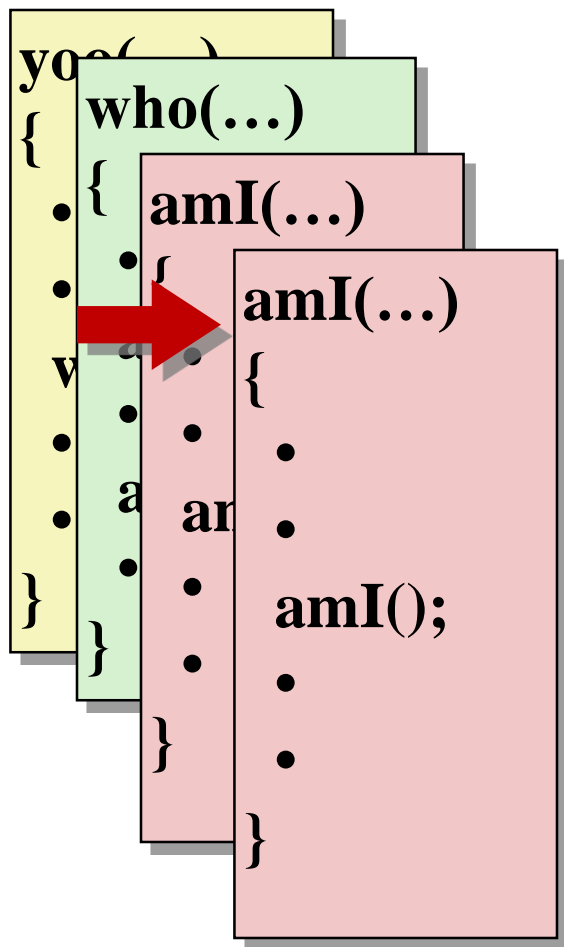
栈帧示例



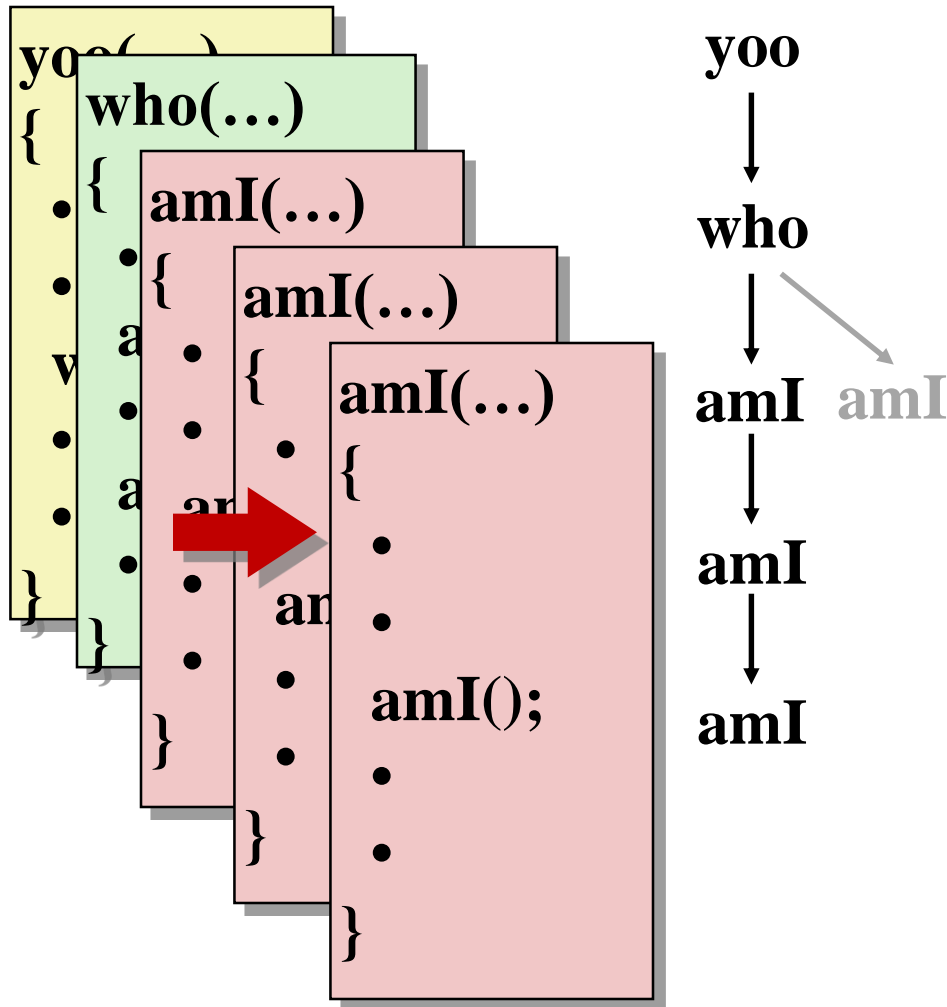
栈帧示例



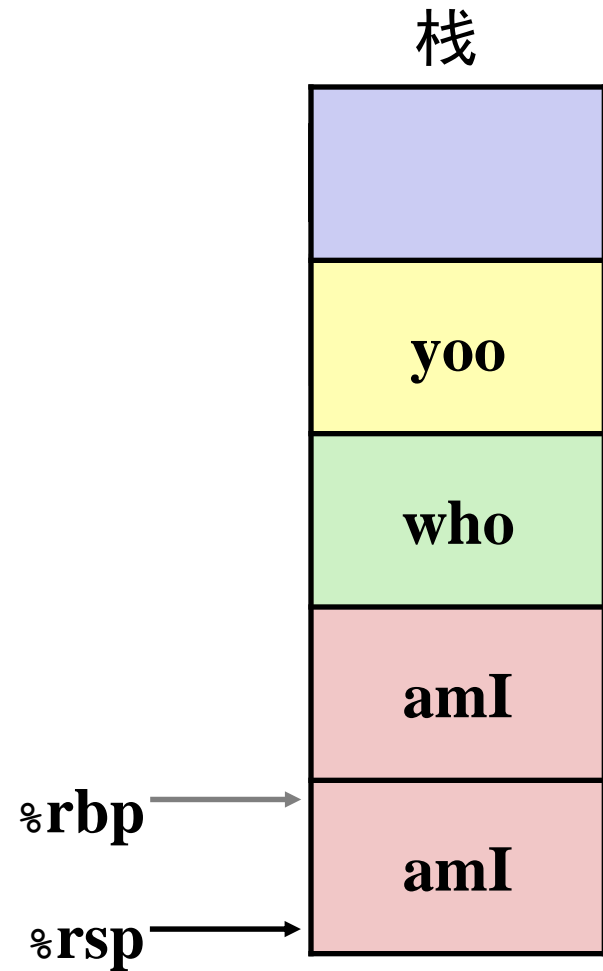
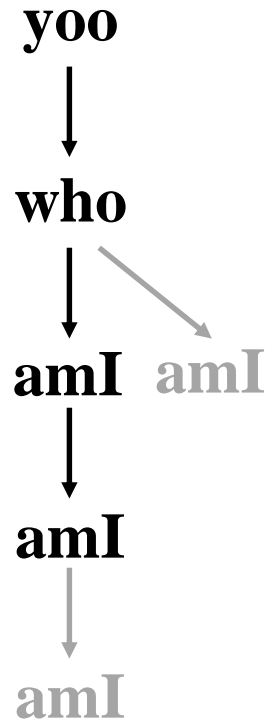
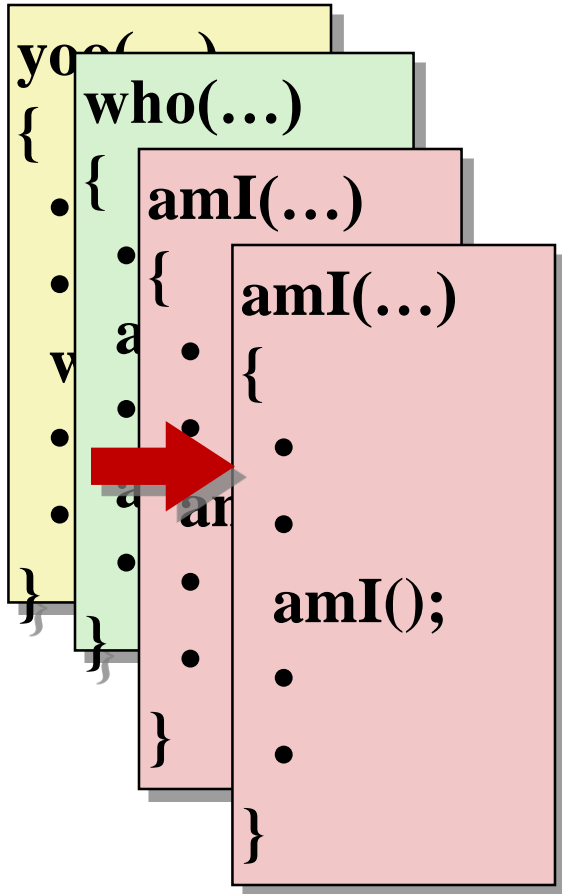
栈帧示例



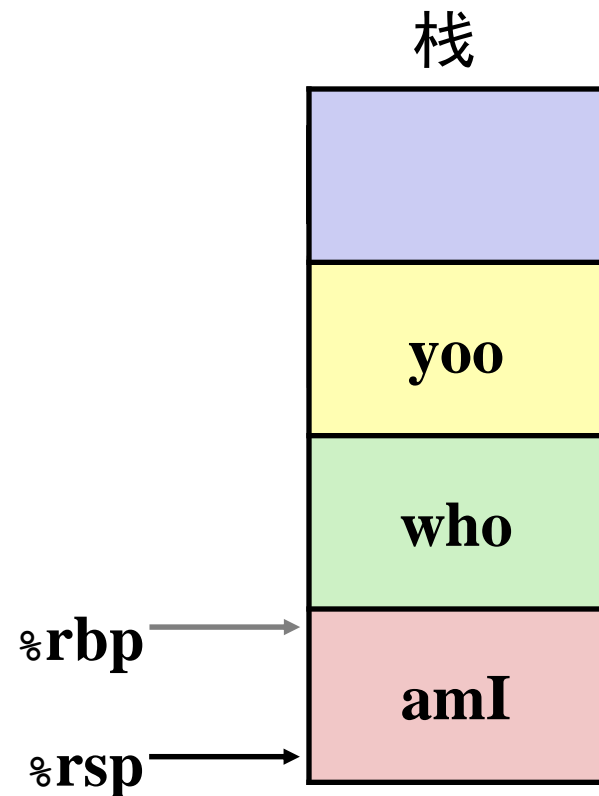
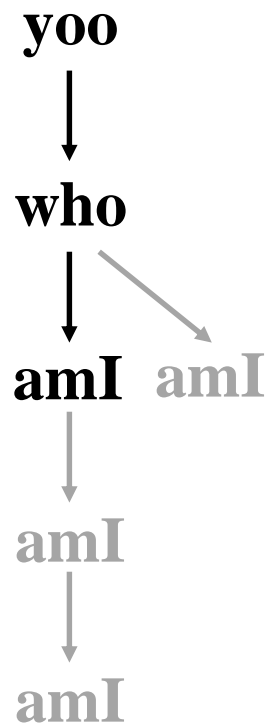
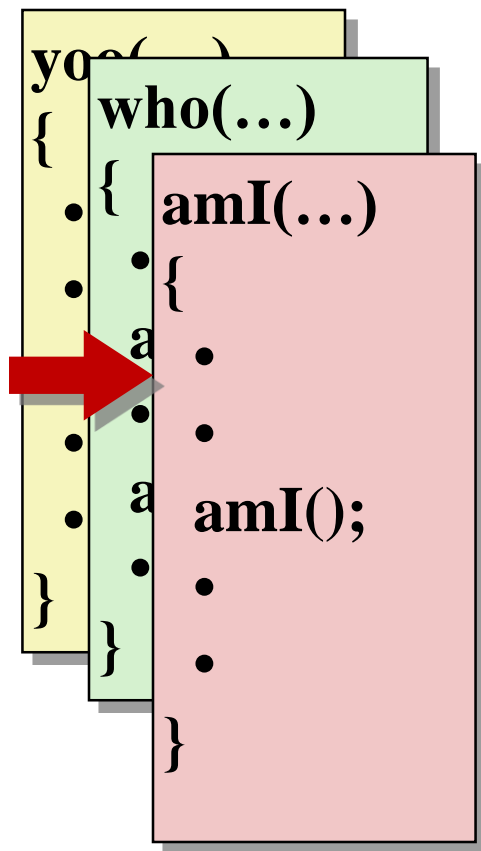
栈帧示例



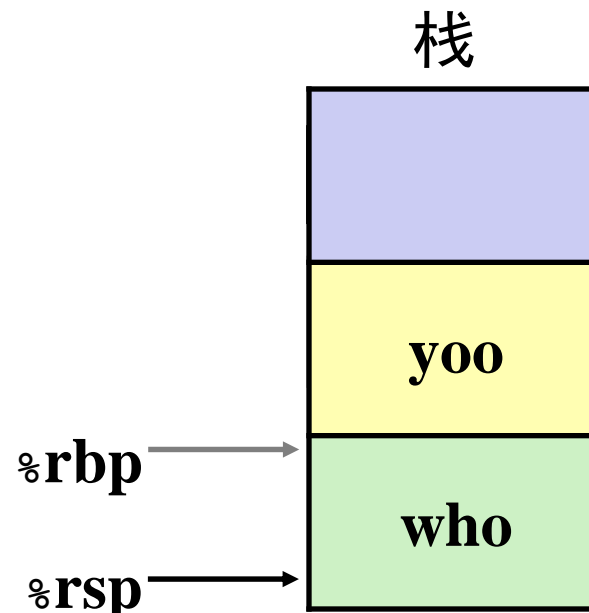
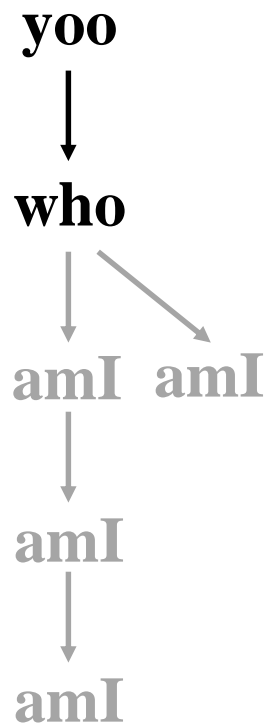
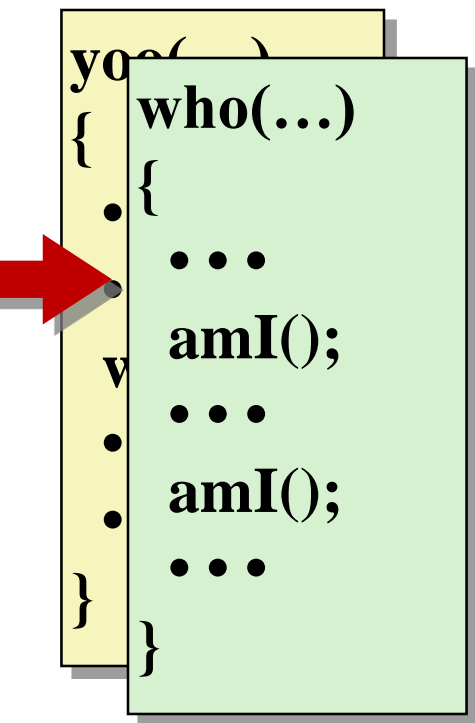
栈帧示例



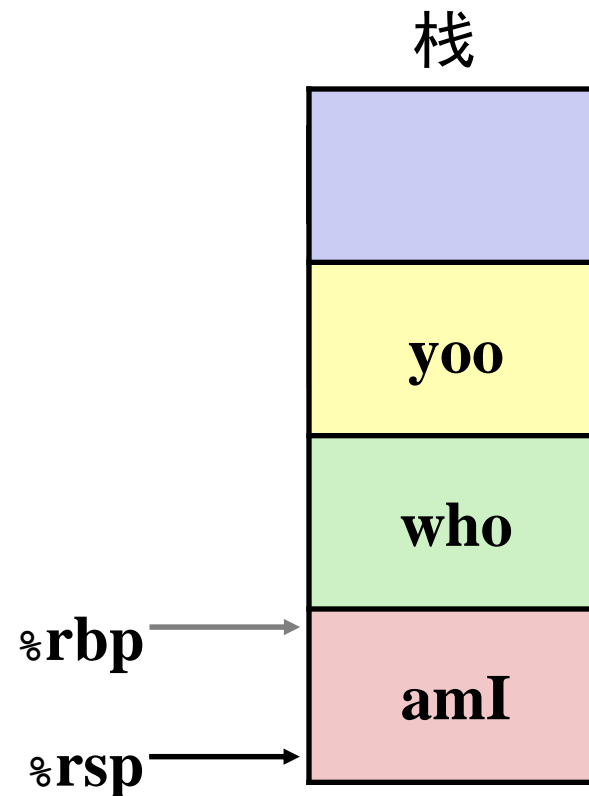
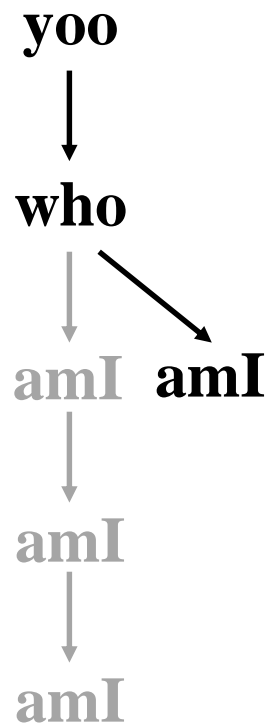
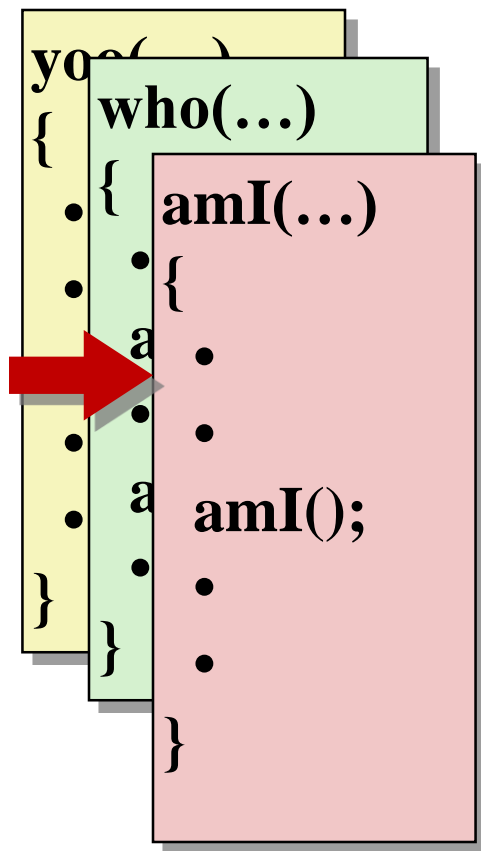
栈帧示例



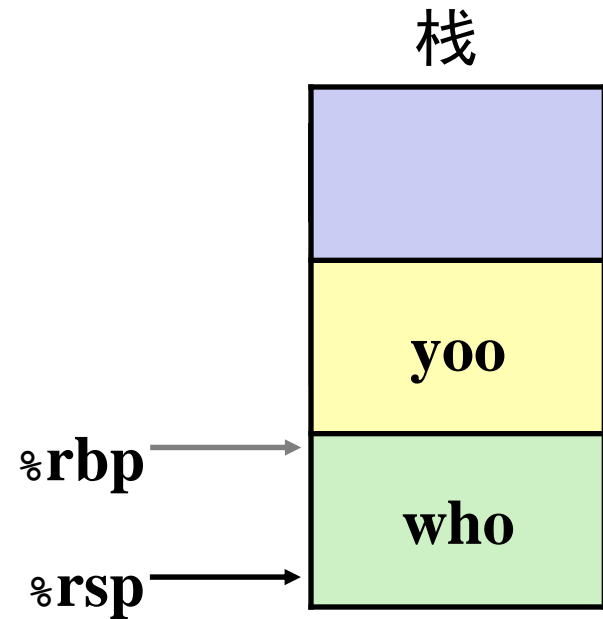
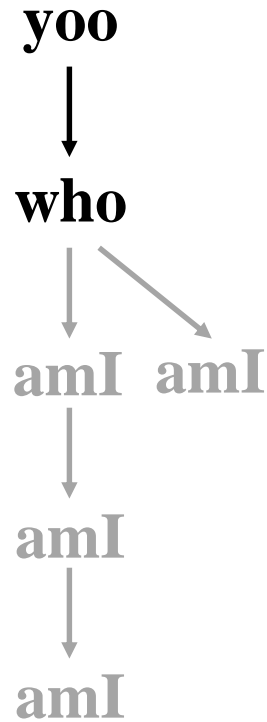
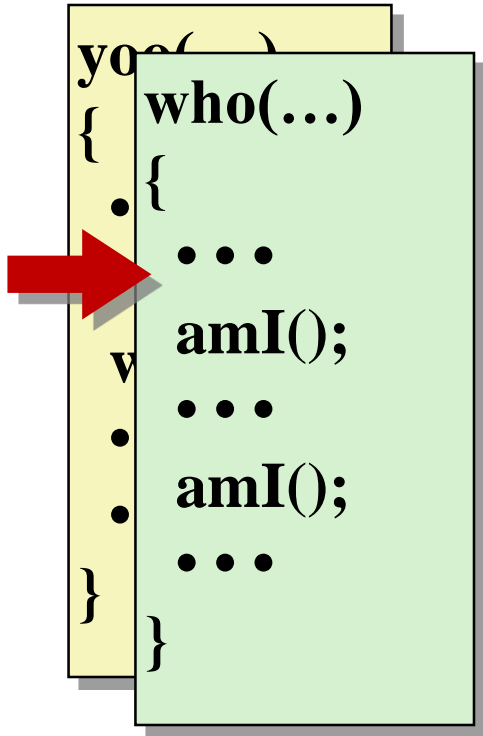
栈帧示例



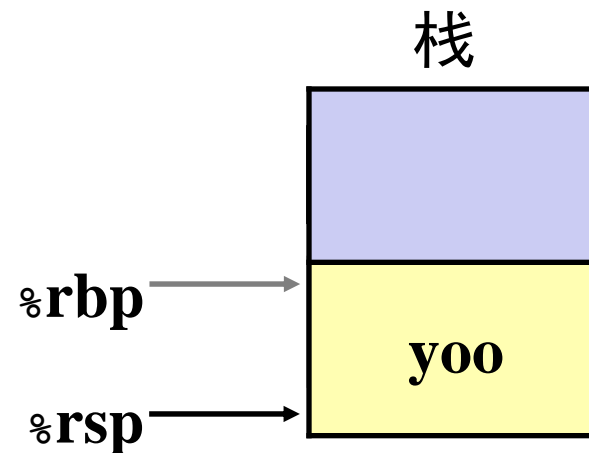
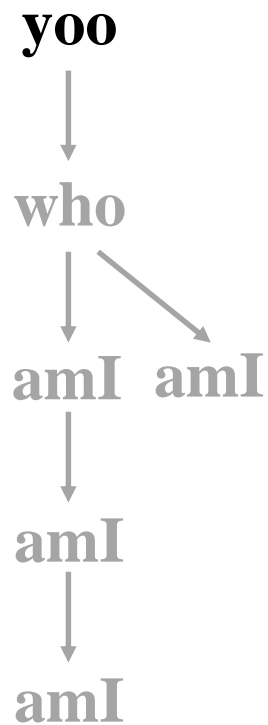
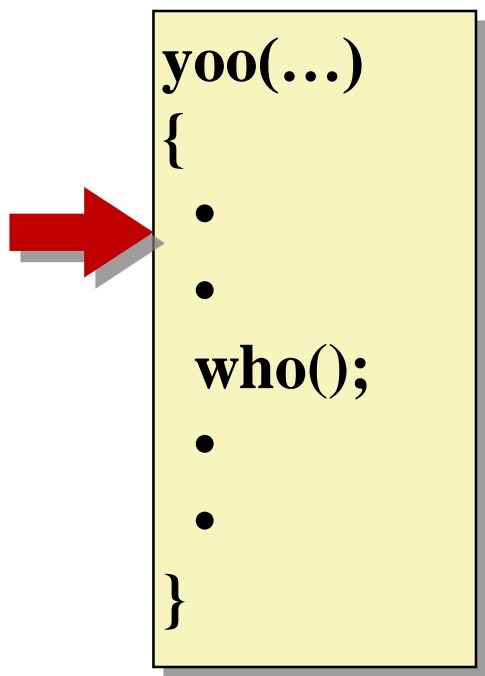
栈帧示例



栈帧示例



栈帧示例



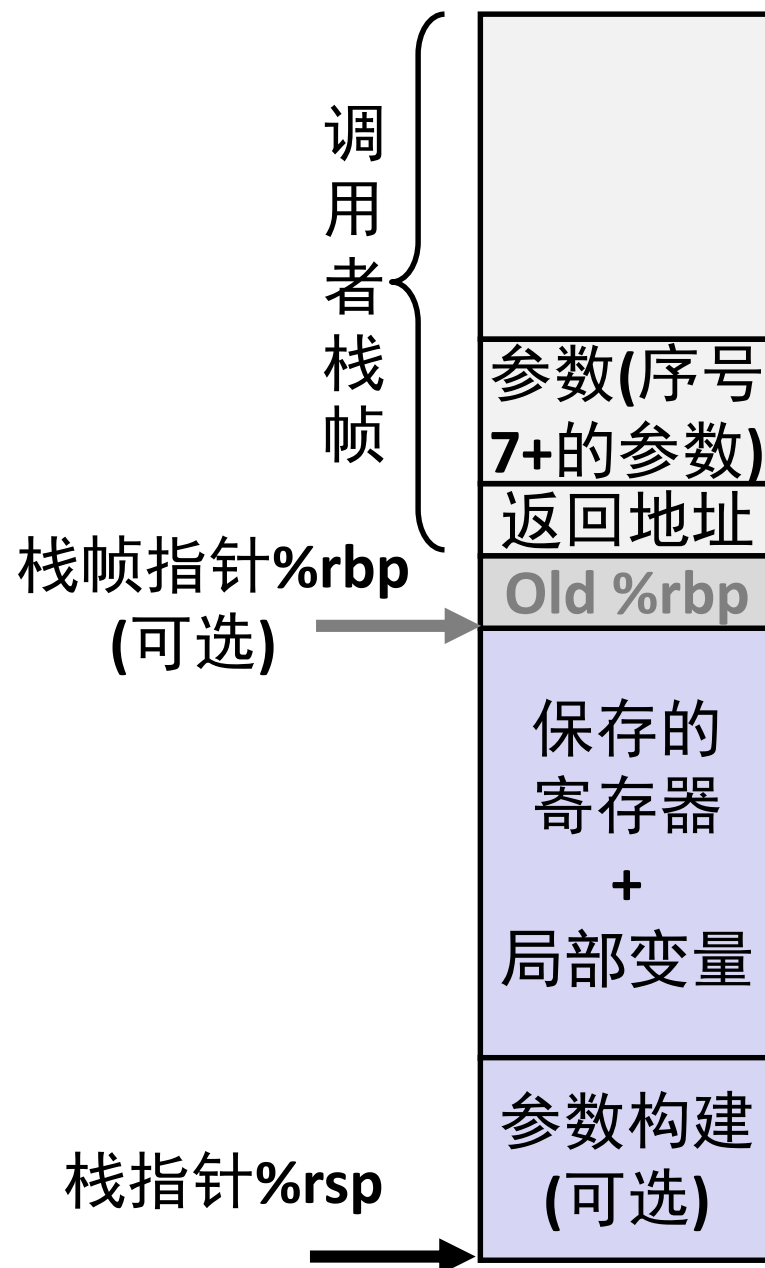
x86-64/Linux 栈帧

■ 当前栈帧(从“顶”到底)

- “参数建立”：把即将调用函数所需的参数入栈
- 局部变量
如果不能用寄存器实现，则在栈中实现
- 保存的寄存器内容
- 旧栈帧指针 (可选)

■ 调用者栈帧

- 返回地址
 - 由`call`指令压入栈
- 本次调用的参数



实例: `incr`

```
long incr(long *p, long val) {
    long x = *p;
    long y = x + val;
    *p = y;
    return x;
}
```

```
incr:
    movq    (%rdi), %rax
    addq    %rax, %rsi
    movq    %rsi, (%rdi)
    ret
```

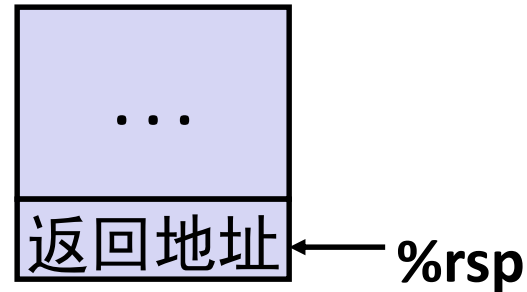
寄存器	用途
%rdi	参数 p
%rsi	参数 val, y
%rax	x, 返回值

实例: 调用incr#1

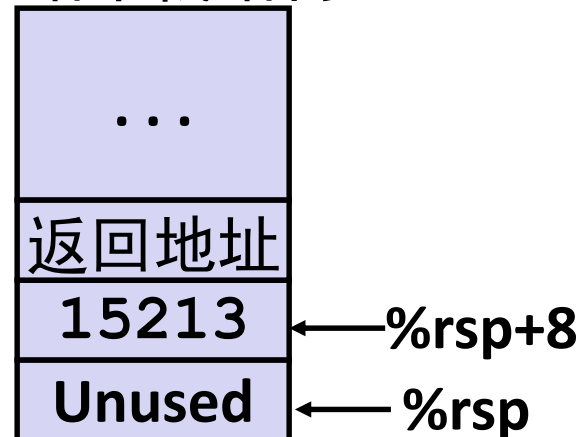
```
long call_incr() {
    long v1 = 15213;
    long v2 = incr(&v1, 3000);
    return v1+v2;
}
```

```
call_incr:
    subq    $16, %rsp
    movq    $15213, 8(%rsp)
    movl    $3000, %esi
    leaq    8(%rsp), %rdi
    call    incr
    addq    8(%rsp), %rax
    addq    $16, %rsp
    ret
```

初始栈结构



结果栈结构

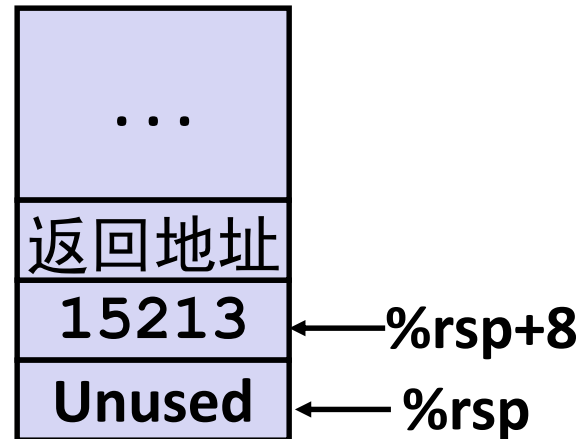


实例: 调用 `incr` #2

```
long call_incr() {
    long v1 = 15213;
    long v2 = incr(&v1, 3000);
    return v1+v2;
}
```

```
call_incr:
    subq    $16, %rsp
    movq    $15213, 8(%rsp)
    movl    $3000, %esi
    leaq    8(%rsp), %rdi
    call    incr
    addq    8(%rsp), %rax
    addq    $16, %rsp
    ret
```

栈结构



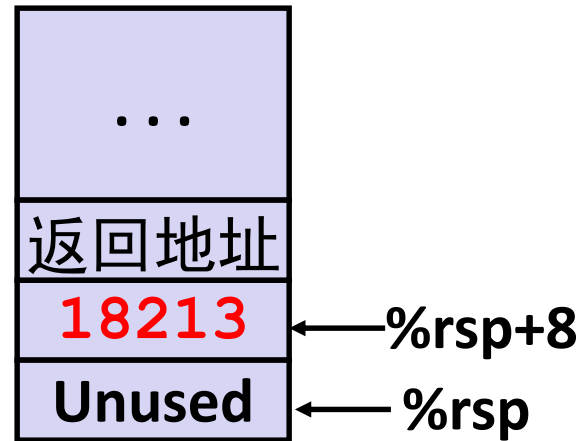
寄存器	用途
%rdi	&v1
%rsi	3000

实例: 调用 `incr` #3

```
long call_incr() {
    long v1 = 15213;
    long v2 = incr(&v1, 3000);
    return v1+v2;
}
```

```
call_incr:
    subq    $16, %rsp
    movq    $15213, 8(%rsp)
    movl    $3000, %esi
    leaq    8(%rsp), %rdi
    call    incr
    addq    8(%rsp), %rax
    addq    $16, %rsp
    ret
```

栈结构



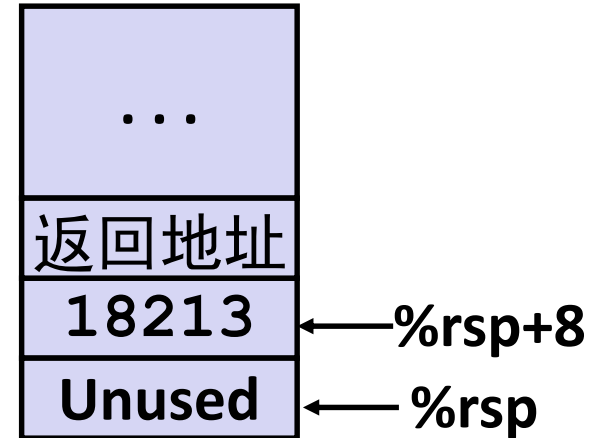
寄存器	用途
%rdi	&v1
%rsi	3000

实例: 调用 `incr` #4

```
long call_incr() {
    long v1 = 15213;
    long v2 = incr(&v1, 3000);
    return v1+v2;
}
```

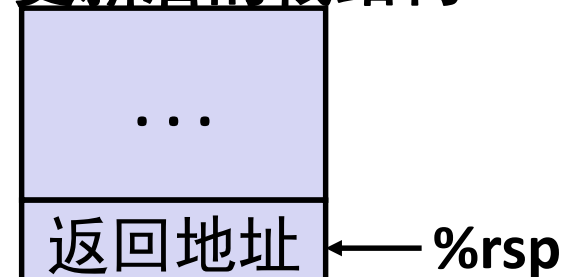
```
call_incr:
    subq    $16, %rsp
    movq    $15213, 8(%rsp)
    movl    $3000, %esi
    leaq    8(%rsp), %rdi
    call    incr
    addq    8(%rsp), %rax
    addq    $16, %rsp
    ret
```

栈结构



寄存器	用途
%rax	返回值

更新后的栈结构

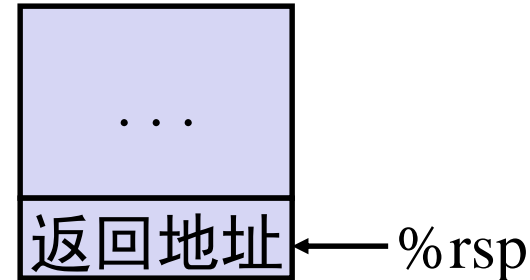


实例: 调用 `incr` #5

```
long call_incr() {
    long v1 = 15213;
    long v2 = incr(&v1, 3000);
    return v1+v2;
}
```

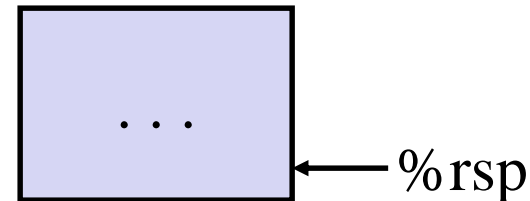
```
call_incr:
    subq    $16, %rsp
    movq    $15213, 8(%rsp)
    movl    $3000, %esi
    leaq    8(%rsp), %rdi
    call    incr
    addq    8(%rsp), %rax
    addq    $16, %rsp
    ret
```

更新后的栈结构



寄存器	用途
<code>%rax</code>	返回值

最终栈结构



寄存器保存约定

■ 当过程 yoo 调用 who 时:

- yoo 是调用者(caller)
- who 是被调用者(callee)

■ 寄存器能否用于临时存储?

```
yoo:  
...  
movq $15213, %rdx  
call who  
addq %rdx, %rax  
...  
ret
```

```
who:  
...  
subq $18213, %rdx  
...  
ret
```

- 寄存器 %rdx 的内容被 who 覆盖写了
- 这样会有问题, 如何解决?
 - 需要调用者(caller)和被调用者(callee)之间的协调

寄存器保存约定

- 当过程 `yoo` 调用 `who` 时:
 - `yoo` 是调用者 (caller)
 - `who` 是被调用者 (callee)
- 寄存器能否用于临时存储?
- 约定——谁来保存的问题
 - 调用者保存 “*Caller Saved*”
 - 调用者在调用前，在它的栈帧中保存临时值 (寄存器)
 - 被调用者保存 “*Callee Saved*”
 - 被调用者要先在自己的栈帧中保存，然后再使用 (寄存器)
 - 返回到调用者之前，恢复这些保存的值

x86-64 Linux的寄存器用法#1

■ **%rax**

- 返回值
- 调用者保存
- 被调用过程可修改

■ **%rdi, ..., %r9**

- 传递函数参数
- 调用者保存
- 被调用过程可修改

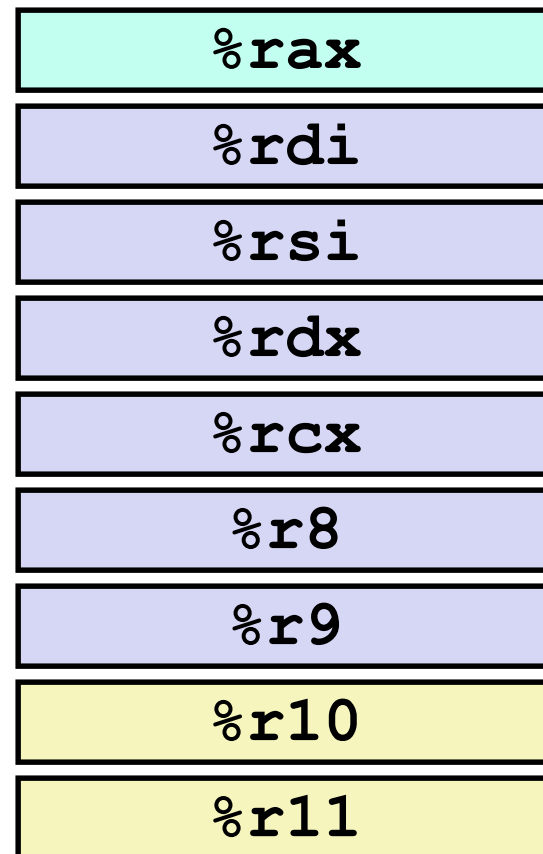
■ **%r10, %r11**

- 调用者保存
- 被调用过程可修改

返回值

参数

调用者保存
的临时值

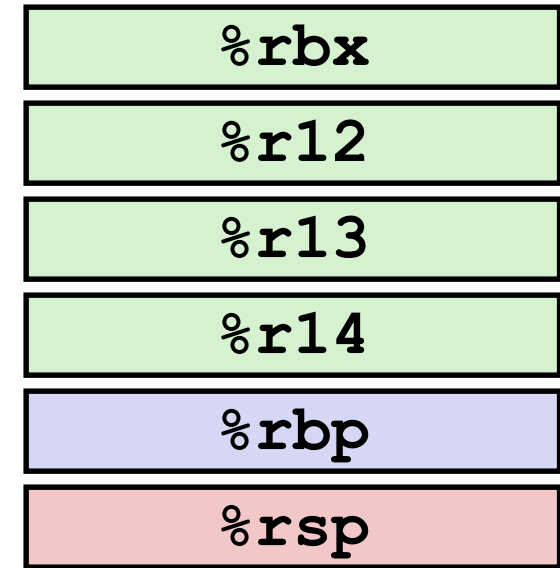


x86-64 Linux的寄存器用法#2

- **%rbx, %r12, %r13, %r14**
 - 被调用者保存并恢复
- **%rbp**
 - 被调用者保存并恢复
 - 可用作栈帧指针
- **%rsp**
 - 被调用者保存的特殊形式
 - 在离开过程时，恢复为原始值 (CALL之前的值)

被调用者保存的临时值

特殊

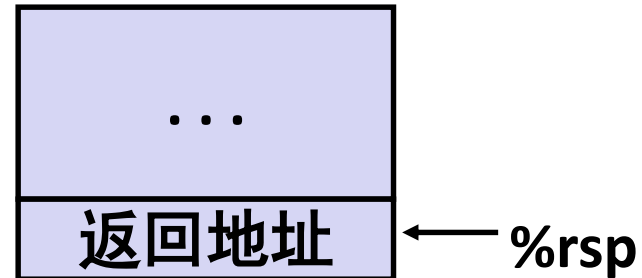


被调用者保存——实例#1

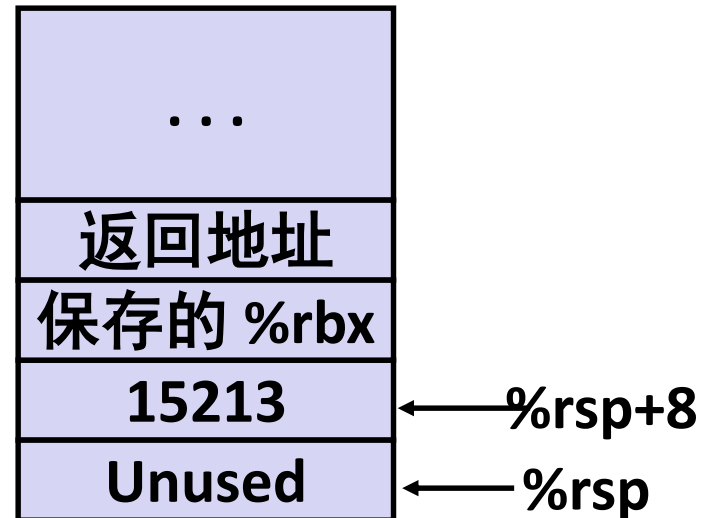
```
long call_incr2(long x) {
    long v1 = 15213;
    long v2 = incr(&v1, 3000);
    return x+v2;
}
```

```
call_incr2:
    pushq    %rbx
    subq     $16, %rsp
    movq     %rdi, %rbx
    movq     $15213, 8(%rsp)
    movl     $3000, %esi
    leaq     8(%rsp), %rdi
    call     incr
    addq     %rbx, %rax
    addq     $16, %rsp
    popq     %rbx
    ret
```

初始化栈结构



结果栈结构

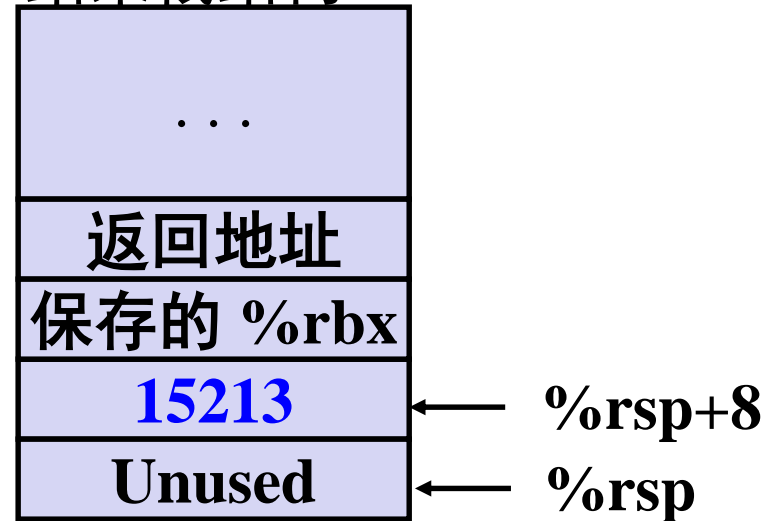


被调用者保存——实例#2

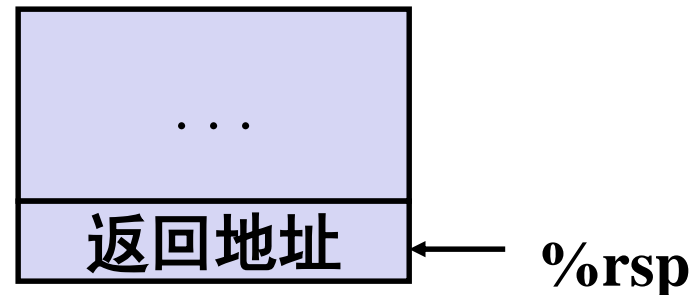
```
long call_incr2(long x) {
    long v1 = 15213;
    long v2 = incr(&v1, 3000);
    return x+v2;
}
```

```
call_incr2:
    pushq    %rbx
    subq     $16, %rsp
    movq     %rdi, %rbx
    movq     $15213, 8(%rsp)
    movl     $3000, %esi
    leaq     8(%rsp), %rdi
    call     incr
    addq     %rbx, %rax
    addq     $16, %rsp
    popq     %rbx
    ret
```

结果栈结构



返回前的栈结构



主要内容

■ 过程

- 栈结构
- 调用约定
 - 传递控制
 - 传递数据
 - 管理局部数据
- 递归

递归函数

```
/* Recursive popcount */  
long pcount_r(unsigned long x) {  
    if (x == 0)  
        return 0;  
    else  
        return (x & 1) + pcount_r(x >> 1);  
}
```

```
pcount_r:  
    movl    $0, %eax  
    testq   %rdi, %rdi  
    je      .L6  
    pushq   %rbx  
    movq    %rdi, %rbx  
    andl    $1, %ebx  
    shrq    %rdi # (by 1)  
    call    pcount_r  
    addq    %rbx, %rax  
    popq    %rbx  
.L6:  
    rep; ret
```

递归函数的终止条件

```
/* Recursive popcount */
long pcount_r(unsigned long x) {
    if (x == 0)
        return 0;
    else
        return (x & 1) + pcount_r(x >> 1);
}
```

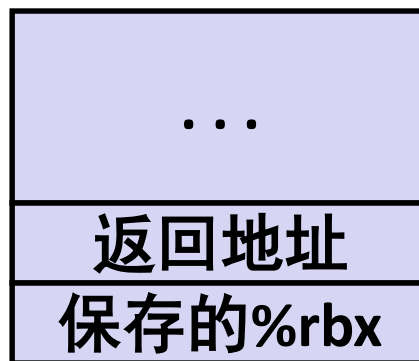
寄存器	用途	类型
%rdi	x	参数
%rax	返回值	返回值

```
pcount_r:
    movl    $0, %eax
    testq   %rdi, %rdi
    je      .L6
    pushq   %rbx
    movq    %rdi, %rbx
    andl    $1, %ebx
    shrq    %rdi # (by 1)
    call    pcount_r
    addq    %rbx, %rax
    popq    %rbx
.L6:
    rep; ret
```

递归函数的寄存器保存

```
/* Recursive popcount */
long pcount_r(unsigned long x) {
    if (x == 0)
        return 0;
    else
        return (x & 1) + pcount_r(x >> 1);
}
```

寄存器	用途	类型
%rdi	x	参数



```
pcount_r:
    movl    $0, %eax
    testq   %rdi, %rdi
    je      .L6
    pushq   %rbx
    movq    %rdi, %rbx
    andl    $1, %ebx
    shrq    %rdi # (by 1)
    call    pcount_r
    addq    %rbx, %rax
    popq    %rbx
.L6:
    rep; ret
```


递归函数的调用创建

```
/* Recursive popcount */
long pcount_r(unsigned long x) {
    if (x == 0)
        return 0;
    else
        return (x & 1) + pcount_r(x >> 1);
}
```

寄存器	用途	类型
%rdi	x >> 1	Rec. 参数
%rbx	x & 1	Callee-saved

```
pcount_r:
    movl    $0, %eax
    testq   %rdi, %rdi
    je      .L6
    pushq   %rbx
    movq    %rdi, %rbx
    andl    $1, %ebx
    shrq    %rdi # (by 1)
    call    pcount_r
    addq    %rbx, %rax
    popq    %rbx
.L6:
    rep; ret
```

递归函数调用

```
/* Recursive popcount */
long pcount_r(unsigned long x) {
    if (x == 0)
        return 0;
    else
        return (x & 1) + pcount_r(x >> 1);
}
```

寄存器	用途	类型
%rbx	x & 1	被调用者保存
%rax	递归调用的返回值	

```
pcount_r:
    movl    $0, %eax
    testq   %rdi, %rdi
    je      .L6
    pushq   %rbx
    movq    %rdi, %rbx
    andl    $1, %ebx
    shrq    %rdi # (by 1)
    call    pcount_r
    addq    %rbx, %rax
    popq    %rbx
.L6:
    rep; ret
```

递归函数的结果

```
/* Recursive popcount */
long pcount_r(unsigned long x) {
    if (x == 0)
        return 0;
    else
        return (x & 1) + pcount_r(x >> 1);
}
```

寄存器	用途	类型
%rbx	x & 1	被调用者保存
%rax	返回值	

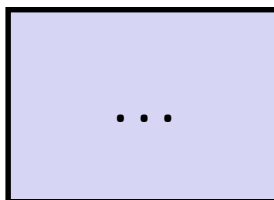
```
pcount_r:
    movl    $0, %eax
    testq   %rdi, %rdi
    je      .L6
    pushq   %rbx
    movq    %rdi, %rbx
    andl    $1, %ebx
    shrq    %rdi # (by 1)
    call    pcount_r
    addq    %rbx, %rax
    popq    %rbx
.L6:
    rep; ret
```

递归函数的完成

```
/* Recursive popcount */
long pcount_r(unsigned long x) {
    if (x == 0)
        return 0;
    else
        return (x & 1) + pcount_r(x >> 1);
}
```

寄存器	用途	类型
%rax	返回值	返回值

```
pcount_r:
    movl    $0, %eax
    testq   %rdi, %rdi
    je      .L6
    pushq   %rbx
    movq    %rdi, %rbx
    andl    $1, %ebx
    shrq    %rdi # (by 1)
    call    pcount_r
    addq    %rbx, %rax
    popq    %rbx
.L6:
    rep; ret
```



← %rsp

递归的观察

■ 递归无需特殊的处理

- 栈帧意味着每个函数调用有私有的存储
 - 保存的寄存器、局部变量
 - 保存的返回地址
- 寄存器保存约定：防止函数调用损毁其他函数(调用)的数据
 - 除非C代码明确地这样做（如第9课中的缓冲区溢出）。
- 栈的使用原则：遵循 调用/返回 模式
 - 如 P调用Q, 然后Q 在P结束之前返回
 - 后入、先出

■ 对互递归同样有效

- P调用Q; Q调用P

完整汇编函数代码

■ 函数示例

"functest3.s"

x86-64 过程总结

■ 要点

- 栈是实现过程调用/返回所依赖的数据结构
- 如P调用Q，则Q先返回P后返回

■ 用正常调用约定处理递归(互递归)

- 可安全保存数值的地方：
栈帧、被调用者保存的寄存器
- 函数调用前将参数置于栈顶
- 返回结果在 `%rax` 中

■ 指针就是数值的地址：

- 在栈中的或是全局的

