中国科学技术大学 University of Science and Technology of China

运行时存储空间的组织与管理

《编译原理和技术》

张昱

0551-63603804，yuzhang@ustc.edu.cn

中国科学技术大学

计算机科学与技术学院

本章内容

术语

- 过程的活动(activation): 过程的一次执行
- 活动记录

  过程的活动需要可执行代码和存放所需信息的存储空间，后者称为活动记录

本章内容

- 几种典型的编译运行时系统（新增）
- 一个活动记录中的数据布局
- 程序执行过程中，所有活动记录的组织方式
- 非局部名字的管理、参数传递方式、堆管理

影响存储分配策略的语言特征

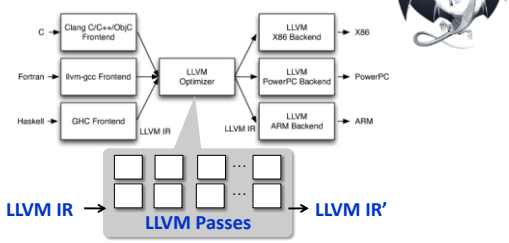
- 过程能否递归
- 当控制从过程的活动返回时，局部变量的值是否要保留
- 过程能否访问非局部变量
- 过程调用的参数传递方式
- 过程能否作为参数被传递
- 过程能否作为结果值传递
- 存储块能否在程序控制下被动态地分配
- 存储块是否必须被显式地释放

I. 几种典型的编译和运行时系统

- C/C++编译运行时环境
- 虚拟机：Java、.Net等等
- 求值的机器模型

C/C++编译系统

- Clang + LLVM

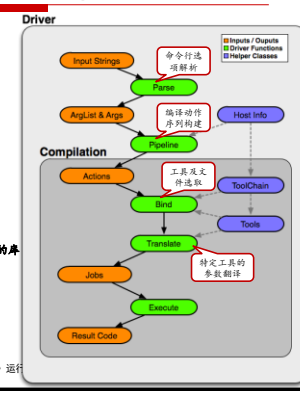


C/C++编译系统: clang

- 主要模块
  - Driver
  - Lexer and Preprocessor
  - Parser: 递归下降分析
  - AST: intro, slides
  - Sema:
  - CodeGen: AST→LLVM IR

  Clang Static Analyzer

  Tooling(doc)提供基于clang写独立工具的库
- Driver



Clang前端要点

Frontend

FrontendAction

ASTFrontendAction

ASTConsumer

- PrepareToExecuteAction()
- CreateASTConsumer()
- BeginInvocation()
- BeginSourceFileAction()
- ExecuteAction()
- EndSourceFileAction()
- shouldEraseOutputFiles()

Lexer and Parser

Parser

Preprocessor

PPCallbacks　Lexer

PPCallbacks可定制

PPCallbacks回调对象定义了预处理过程中各种可能发生的事件处理接口。继承该类型并重写相应的虚方法，即可定制对感兴趣事件的监听处理。

AST

核心表示

- ASTContext
- AST Node：Decl、Stmt、Type

遍历访问

- RecursiveASTVisitor
- ASTMatcher

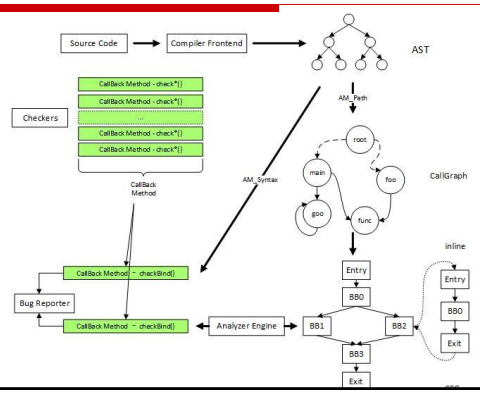
Dump工具

clang –ast-dump –ast-dump-filter –ast-list

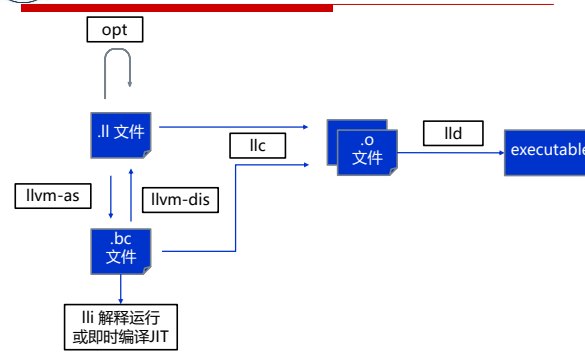
CSA：Clang Static Analyzer

- **相关资料**
  - A Memory Model for Static Analysis of C Programs, 2010
  - Clang Static Analyzer: A Checker Developer's Guide
  - Building a Checker in 24 hours, slides and video
  - Clang/lib/StaticAnalyzer/README.txt
  - Clang Static Analyzer源代码，clang\lib\StaticAnalyzer\Checkers
  - 知乎专栏Clang Static Analyzer

CSA 工作流程



LLVM 一些工具



C/C++的运行时系统

- **代码区**
- **数据区**
  - **静态数据**
  - **栈**
  - **堆**

中国科学技术大学 University of Science and Technology of China

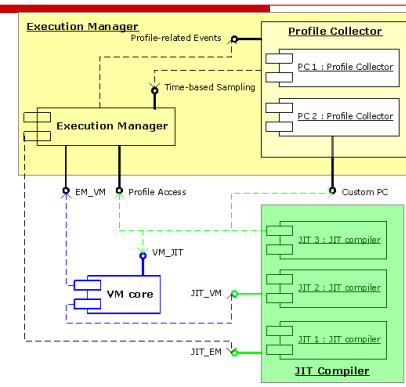
I. 几种典型的编译和运行时系统

- **C/C++编译运行时环境**
- **虚拟机：Java、.Net等等**
- **求值的机器模型**

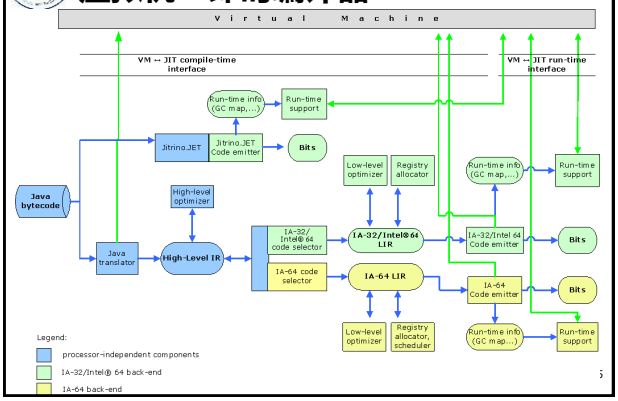
虚拟机：Apache Harmony

- 参考资料
  - Apache Harmony：DRLVM
  - Jitrino Just-in-time Compiler(Jitrino即时编译器)
  - Execution Manager (执行管理器)
  - Thread Manager(线程管理)
- 类似的架构
  - .Net虚拟机
  - JS引擎
  - ……

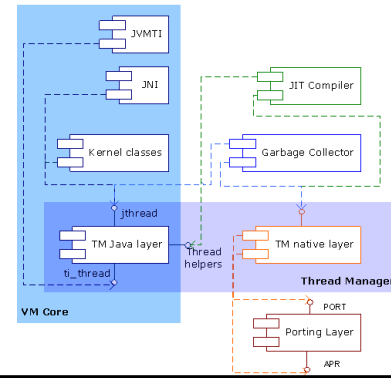
虚拟机：执行引擎



虚拟机：即时编译器



虚拟机：线程管理



虚拟机

- 本地代码管理
  - 代码、栈、堆、静态数据区
- Java字节码管理
  - VM core
  - 代码cache
  - 垃圾收集
  - 线程管理
  - ……

I. 几种典型的编译和运行时系统

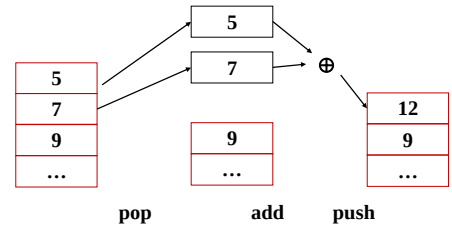
- C/C++编译运行时环境
- 虚拟机：Java、.Net等等
- 求值的机器模型

栈型机器

- 栈型机器模型
  - 是一种简单的求值模型
  - 没有变量和寄存器
  - 中间结果存放在栈中
  - 每条指令：
    1）从栈顶取操作数
    2）将这些操作数从栈中删除
    3）在这些操作数上计算所需要的操作
    4）将结果入栈

栈型机器操作示例

例 在栈型机器上执行加法操作



栈型机器操作示例

- 指令
  - push i　　将 i 置于栈顶
  - add　　从栈中弹出两个元素，将它们相加，再将结果入栈
- 计算 7+5 的程序

```
push 7
push 5          iconst 1
                iconst 2
add             iadd
```

Java字节码、.Net的 CLR、Pascal的P-code 、Perl 5属于此类

栈型机器的优点

- 统一的编译机制 => 编译器实现简单
  每个操作从同一地方取操作数，并把结果放到同一地方
- 操作数的位置是隐式的
  - 总是在栈顶
  - 无需显式指定操作数和结果的位置
- 代码量小、程序更紧凑
  - 如，用 add，而不是 add r1, r2

—— Java字节码使用栈求值模型的原因

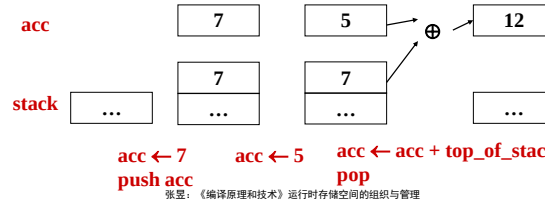
栈型机器的优化

- 存在的问题
  - add指令涉及3条访存操作：2 reads、1 write
  - 栈顶被频繁访问
- 优化思路
  - 将栈顶内容保存在寄存器中（寄存器访问速度快）
    ——累加器(accumulator)
  - add指令改为acc ← acc + top_of_stack
    这样就只有一条访存指令了

带累加器的栈型机器

- 不变式(invariants)
  - 表达式的结果总是在累加器中
  - op(e_1, …, e_n)：在计算e_1, …, e_{n-1}后，将累加器的值入栈
  - 表达式值保存在栈中

计算 7+5



寄存器型机器

- 寄存器型机器模型
  - 操作数存在在寄存器上
  - 指令中需要参数指定操作数的地址，如 add t1, t2, t3

  如，Dalvik VM、Lua VM、Parrot VM等均属于此类
- 相比栈型机器的优势和劣势
  - 劣势：编译器复杂（寄存器分配和指派等、跟踪变量存放的场所）、代码量大、单条指令的代价高
  - 优势：指令数少（执行得快）、还可以做一些栈型机器无法实现的优化（如公共表达式的结果保存到寄存器中，不必重复计算）

栈 vs. 寄存器

- 栈代码容易翻译到寄存器代码，反之则不成立
  - 局部变量直接映射
  - 栈存储单元映射到虚拟寄存器

栈代码	寄存器代码	说明
iload 4	imove r10, r4	；加载局部变量4
bipush 57	biload r11, 57	；加载立即数57
iadd	iadd r10, r10, r11	；整数加
istore 6	imove r6, r10	；存储结果到局部变量6
iload 6	imove r10, r6	；加载局部变量6
ifreq 7	ifreq r10, 7	；如果结果为0，跳到7

Virtual machine showdown: Stack versus registers

- VEE '05
- ACM Transactions on Architecture and Code Optimization (TACO)：4(4), 2008

（slides）

II. 运行时数据的组织与管理

1. 局部存储分配

- 基本概念：作用域与生存期
- 活动记录的常见布局
  - 字节寻址、类型、次序、对齐
- 程序块：同名情况的处理

基本概念

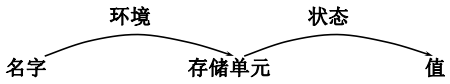
- 过程
  - 过程定义、过程调用、形式参数、实在参数
  - 活动、活动的生存期
- 名字的作用域(scope)
  - 作用域：一个声明起作用的程序部分
  - 即使一个名字在程序中只声明一次，该名字在程序运行时也可能表示不同的数据对象

  如 右边代码中的n

```
int  f(int n){
  if (n<0) error("arg<0");
  else if (n==0) return 1;
  else return n*f(n-1);
}
```

基本概念

- 环境和状态
  - 环境把名字映射到左值，而状态把左值映射到右值（即名字到值有两步映射）
  - 赋值改变状态，但不改变环境
  - 过程调用改变环境：不同的活动有不同的活动记录
  - 如果环境将名字 *x* 映射到存储单元 *s*，则说 *x* 被绑定到 *s*



基本概念

- 静态概念和动态概念的对应

静态概念	动态对应
过程的定义	过程的活动
名字的声明	名字的绑定
声明的作用域	绑定的生存期

- 活动记录（activation record）
  - 常见布局 ➡

返回值
参数
控制链
访问链
机器状态
局部数据
临时数据

局部数据的布局

- 存储布局的一些因素
  - 字节是可编址内存的最小单位
  - 变量所需的存储空间可以根据其类型而静态确定
  - 一个过程所声明的局部变量，按这些变量声明时出现的次序，在局部数据域中依次分配空间
  - 局部数据的地址可以用相对于活动记录中某个位置的地址来表示
  - 数据对象的存储布局还需考虑对齐问题

对齐对存储size的影响

例 在SPARC/Solaris工作站上下面两个结构体的size分别是24和16，为什么不一样？

```
typedef struct  _a{          typedef struct  _b{
    char    c1;                  char c1;
    long    i;                   char    c2;
    char    c2;                  long i;
    double f;                    double f;
}a;                          }b;
```

对齐：char : 1, long : 4, double : 8

对齐对存储size的影响

例 在SPARC/Solaris工作站上下面两个结构体的size分别是24和16，为什么不一样？

```
typedef struct  _a{          typedef struct  _b{
    char    c1;    0             char c1;       0
    long    i;     4             char    c2;    1
    char    c2;    8             long i;        4
    double f;      16            double f;      8
}a;                          }b;
```

对齐：char : 1, long : 4, double : 8

对齐对存储size的影响

例 在X86/Linux工作站上下面两个结构体的size分别是20和16，为什么不一样？

```
typedef struct  _a{          typedef struct  _b{
    char    c1;    0             char c1;       0
    long    i;     4             char    c2;    1
    char    c2;    8             long i;        4
    double f;      12            double f;      8
}a;                          }b;
```

对齐：char : 1, long : 4, double : 4

程序块与同名变量的处理

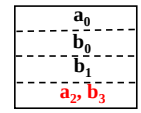
- 程序块
  - 本身含有局部变量声明的语句
  - 可以嵌套
  - 最接近的嵌套作用域规则
  - 并列程序块不会同时活跃
  - 并列程序块的变量可以重叠分配

```
main()
{
  int a = 0;
  int b = 0;
  {
    int b = 1;
    {
      int a = 2;
    }
    {
      int b = 3;
    }
  }
}
```

B_0 B_1 B_2 B_3

程序块与同名变量的处理

声　明	作 用 域
int a = 0;	$B_0 - B_2$
int b = 0;	$B_0 - B_1$
int b = 1;	$B_1 - B_3$
int a = 2;	B_2
int b = 3;	B_3



重叠分配存储单元

2. 多个活动记录的组织

- 程序运行时各个活动记录的存储分配策略
  - 静态、栈式、堆式
- 过程的目标代码如何访问名字对应的存储单元

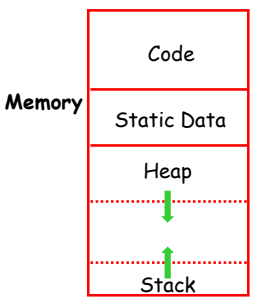
进程地址空间和静态分配

- 静态分配
  - 名字在程序被编译时绑定到存储单元，不需要运行时的任何支持
  - 绑定的生存期是程序的整个运行期间

纯静态分配给语言带来的限制：

- 不允许递归过程
- 数据对象的长度和它在内存中的位置必须是在编译时可以知道的
- 数据结构不能动态建立

Linux的地址布局



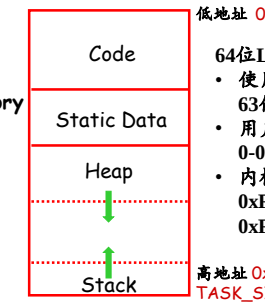
低地址 0x080480000

32位Linux系统：

- 4GB
- 用户空间：低3GB 0-0xBFFFFFFF
- 内核空间：1GB 0xc0000000-0xFFFFFFFF
- 栈的大小 RLIMIT_STACK 通常为8MB

高地址 0xC0000000 TASK_SIZE

Linux的地址布局



低地址 0x0000000000400000

64位Linux系统：

- 使用低48位虚拟地址，48位至63位必须与47位一致（256TB）
- 用户空间：低128TB 0-0x7FFFFFFFFFFF
- 内核空间：64TB 0xFFFF880000000000-0xFFFFc7FFFFFFFFFF

高地址 0x00007FFFFFFF0000 TASK_SIZE

C语言的存储分配

- 声明在函数外面
  - 外部变量 —— 静态分配
  - 静态外部变量 —— 静态分配
    （改变作用域）
- 声明在函数里面
  - 静态局部变量 —— 也是静态分配
    （改变生存期）
  - 自动变量 —— 不能静态分配，在活动记录中

C程序举例、问题与分析

1. 当执行到f1(0)时，有几个f1的活动记录？
2. f1(3)的值是多少？f2(3)呢？
3. 怎么解释在某些系统下f2(3)为0？
4. 对f3(n)编译会报错吗？为什么？
5. 如果编译不报错，执行f3(n) 运行时会产生什么现象？怎么解释这种现象？

请补齐右边的三段程序，成为三个独立的C程序，然后用gcc –m32 -S编译之，产生汇编码并理解和分析。

```
int f1(int n){
 if (n==0) return 1;
 else return n*f1(n-1);
}
… print ( f1(3) ); …
```

```
int f2(int n){
 static int m; m = n;
 if (m==0) return 1;
 else return m*f2(m-1);
}
… print ( f2(3) ); …
```

```
int n=3;
int f3(){
 if (n==0) return 1;
 else return n*f3(n-1);
}
… print ( f3(n) ); …
```


C程序举例、问题与分析

1. 当执行到f1(0)时，有几个f1的活动记录？
   f1(3), f1(2),f1(1),f1(0) -- 运行栈
2. f1(3)的值是多少？f2(3)呢？
   6；6或0
3. 怎么解释在某些系统下f2(3)为0？
   表达式的代码生成(寄存器分配策略)
4. 对f3(n)编译会报错吗？为什么？
   不会，主要做函数值的类型检查
5. f3(n) 运行时会产生什么现象？
   Segmentation fault

```
int f1(int n){
 if (n==0) return 1;
 else return n*f1(n-1);
}
… print ( f1(3) ); …
```

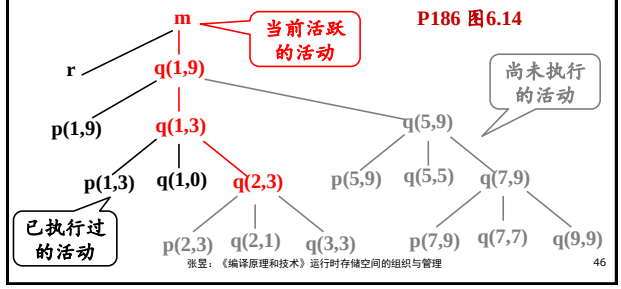
```
int f2(int n){
 static int m; m = n;
 if (m==0) return 1;
 else return m*f2(m-1);
}
… print ( f2(3) ); …
```

```
int n=3;
int f3(){
 if (n==0) return 1;
 else return n*f3(n-1);
}
… print ( f3(n) ); …
```


活动树和运行栈

- 活动树：用树来描绘控制进入和离开活动的方式
- 运行栈：当前活跃的过程活动保存在一个栈中

P186 图6.14

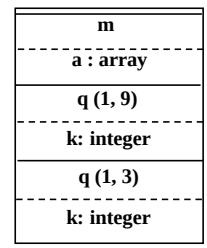


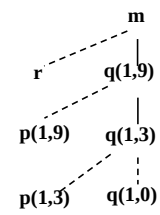
活动树和运行栈

- 活动树的特点
  - 每个结点代表某过程的一个活动
  - 根结点代表主程序的活动
  - 结点*a*是结点*b*的父结点，当且仅当控制流从*a*的活动进入*b*的活动
  - 结点*a*处于结点*b*的左边，当且仅当*a*的生存期先于*b*的生存期
- 运行栈
  - 把控制栈中的信息拓广到包括过程活动所需的所有局部信息（即活动记录）

运行栈举例

- P186 图6.14



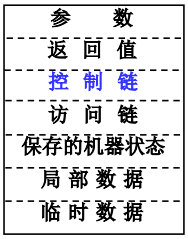


过程调用与返回和活动记录的设计

- 实现不唯一

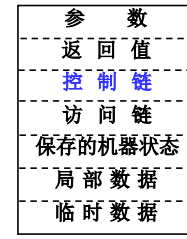
  即使是同一种语言，过程调用序列、返回序列和活动记录中各域的排放次序，也会因实现而异

- 设计的一些原则
  - 以活动记录中间的某个位置作为基地址（一般是控制链）
  - 长度能较早确定的域放在活动记录的中间
  - 一般把临时数据域放在局部数据域的后面

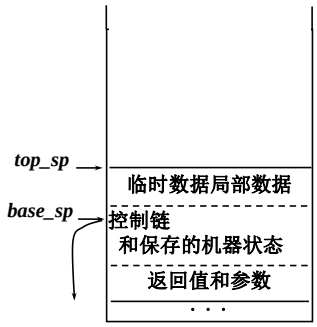


过程调用与返回和活动记录的设计

- 设计的一些原则
  - 以活动记录中间的某个位置作为基地址（一般是控制链）
  - 长度能较早确定的域放在活动记录的中间
  - 一般把临时数据域放在局部数据域的后面
  - 把参数域和可能有的返回值域放在紧靠调用者活动记录的地方
  - 用同样的代码来执行各个活动的保存和恢复

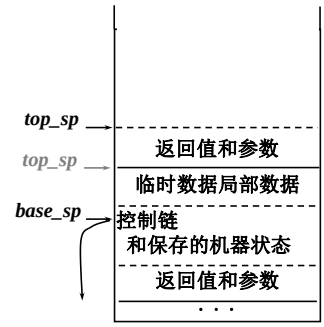


过程调用序列：p调用q



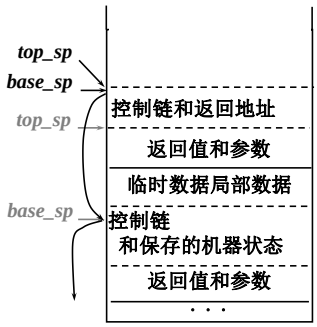
- ✓ *top_sp*: 栈顶寄存器，如esp、rsp
- ✓ *base_sp*: 基址寄存器，如ebp、rbp
- ✓ PC: 程序计数器，如eip、rip

过程调用序列：p调用q



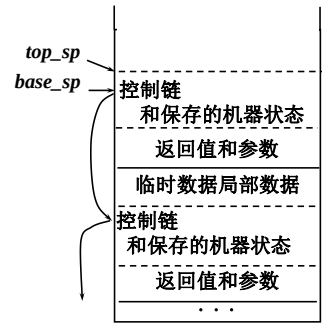
(1) p计算实参，依次放入栈顶，并在栈顶留出放返回值的空间。*top_sp*的值在此过程中被改变

过程调用序列：p调用q



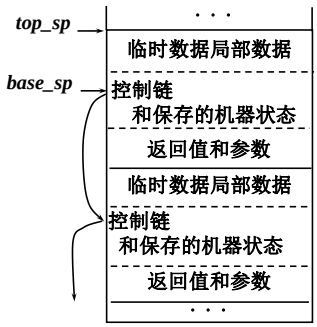
(2) p把返回地址和当前*base_sp*的值存入q的活动记录中，建立q的访问链，增加*base_sp*的值

过程调用序列：p调用q



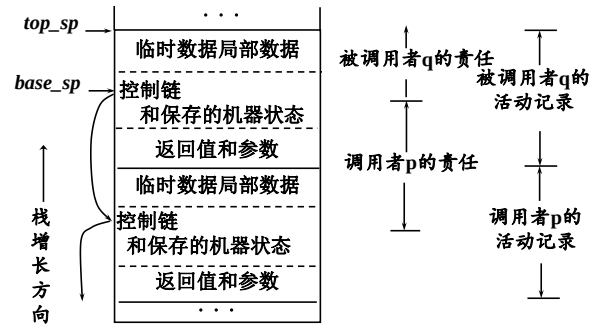
(3) q保存寄存器的值和其他机器状态信息

过程调用序列：p调用q

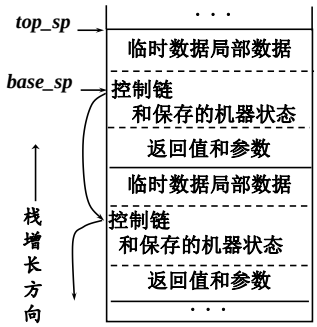


(4) q根据局部数据域和临时数据域的大小增加*top_sp*的值，初始化它的局部数据，并开始执行过程体

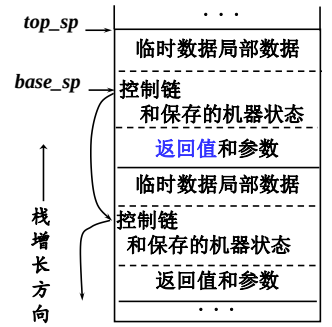
调用者p和被调用者q的任务划分



过程返回序列：p调用q



过程返回序列：p调用q



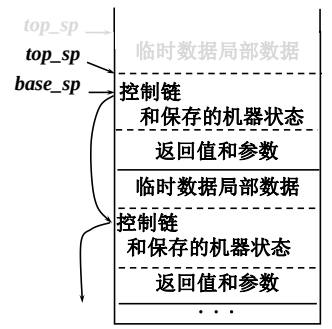
(1) q把返回值置入邻近p的活动记录的地方

参数个数可变场合难以确定存放返回值的位置，因此通常用寄存器传递返回值

通过寄存器传递返回值

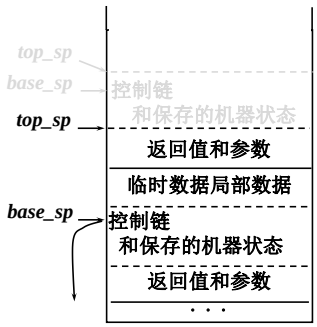
- 32位系统
  - 32位整型返回值：eax
  - 64位整型返回值：低32位 eax，高32位 edx
  - 浮点类型的返回值：浮点寄存器 st(0)
- 64位系统
  - 整型：rax
  - 浮点型：浮点寄存器 st(0)

过程返回序列：p调用q



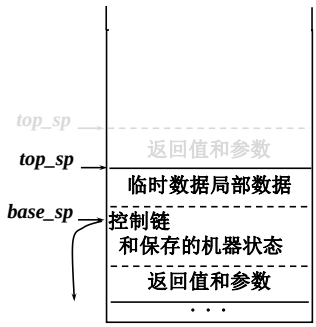
(2) q对应调用序列的步骤(4)，减小*top_sp*的值

过程返回序列：p调用q



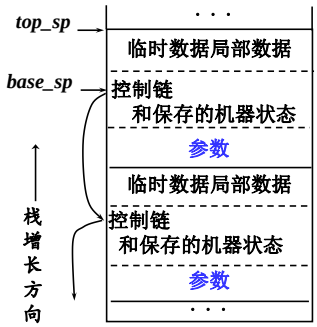
(3) q恢复寄存器(包括*base_sp*)和机器状态，返回p

过程返回序列：p调用q



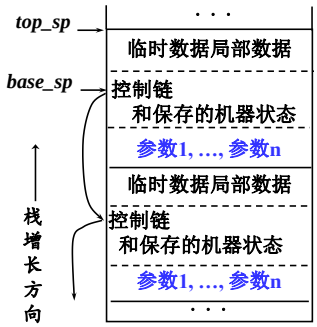
(4) p根据参数个数与类型和返回值调整 *top_sp*，然后取出返回值

过程的参数个数可变的情况



(1) 函数返回值改成用寄存器传递

过程的参数个数可变的情况



(2) 编译器产生将实参表达式逆序计算并将结果进栈的代码

自上而下依次是参数1, …, 参数n

(3)被调用者能准确地知道第一个参数的位置

(4)被调用函数根据第一个参数到栈中取第二、第三个参数等等

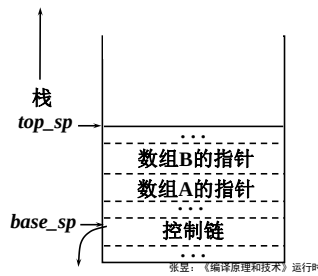
例：printf("%d, %d,\n");

栈上存储可变长的数据

- 可变长度的数组
  - C ISO/IEC9899：2011 n1570.pdf
    (http://www.open-std.org/jtc1/sc22/wg14/www/docs/n1570.pdf)
    - 6.7.6.2(P132)： int a[n][6][m];
    - 6.10.8.3(P177)： __STDC_NO_VLA__宏为1时不支持可变长数组
    - 局部数组：在栈上分配
  - Java
    - int[ ] a = new int[n];
    - 在堆上分配
- 如何在栈上布局可变长的数组？
  - 先分配存放数组指针的单元，对数组的访问通过指针间接访问
  - 运行时，这些指针指向分配在栈顶的数组存储空间

栈上可变长数据

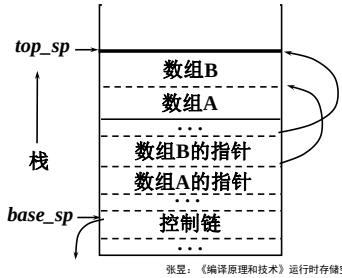
- 访问动态分配的数组



(1) 编译时，在活动记录中为这样的数组分配存放数组指针的单元

栈上可变长数据

- 访问动态分配的数组



(2) 运行时，这些指针指向分配在栈顶的数组存储空间

(3) 运行时，对数组A和B的访问都要通过相应指针来间接访问

悬空引用

- 悬空引用：程序执行中的某个时刻，处于活动状态的某个指针变量或引用变量没有引用到合法的对象

```
T *p;
...
p = (T*)malloc(sizeof(T));
...
free(p);
... *p ... // 危险!
{
  T n = ...;
  p = &n;  // p生存期比n长
}
... *p ... // 危险!
```

```
T* fun(...) {
  T n;
  ...
  return &n;
}
... { ...
  T *p = fun(...);
  .. *p .. // 危险!
}
```


3. 非局部名字的访问

- 静态数据区、堆
- 静态作用域：无过程嵌套的（C）、有过程嵌套的（Pascal）
- 动态作用域（Lisp、JavaScript）

非局部数据的存储

- 静态数据区
  - 全局变量、静态局部变量
- 堆
  - C：malloc、free
    glibc 的ptmalloc, Doug Lea's dlmalloc
    高效的并发内存分配器 jemalloc,
    TBBmalloc,TCMalloc (gperftools)
  - Java: new、Garbage Collection
    Richard Jones's the Garbage Collection Page

静态作用域

- 无过程嵌套时
  - 非静态的局部变量的访问：位于栈顶的活动记录，通过基址指针 *base_sp* 来访问
  - 过程体中的非局部引用、静态局部变量：直接用静态确定的地址（位于静态数据区中的数据）
  - 过程可以作为参数来传递，也可以作为结果来返回
  - 无须访问链
- 有过程嵌套时
  - 需要构建访问链，并通过访问链访问在外围过程中声明的非局部名字

有过程嵌套的静态作用域

- 非局部名字的访问：访问链
- 过程作为参数产生的问题和解决
- 过程作为返回值产生的问题

过程嵌套定义程序举例

图6.14， P186

sort
- readarray
- exchange
- quicksort
  - partition

过程嵌套定义程序举例

图6.14， P186

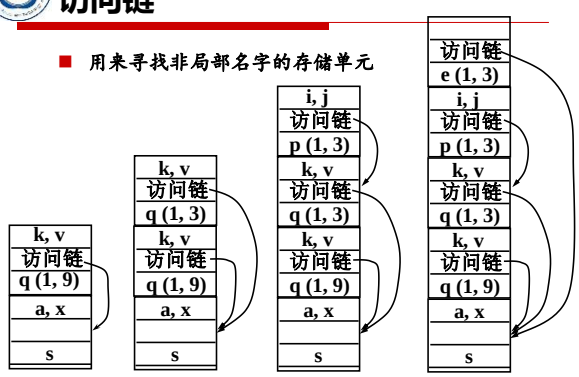
- 过程嵌套深度

sort	1
readarray	2
exchange	2
quicksort	2
partition	3

- 变量的嵌套深度：以它的声明所在的过程的嵌套深度作为该名字的嵌套深度

访问链

- 用来寻找非局部名字的存储单元



针对访问链的两个关键问题

- 通过访问链访问非局部引用

  假定过程p 的嵌套深度为n_p，它引用嵌套深度为n_a的变量a，$n_a \le n_p$，如何访问a的存储单元

- 访问链的建立

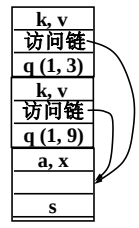
  假定嵌套深度为n_p的过程p调用嵌套深度为n_x的过程x，分别考虑 (1) $n_p < n_x$，(2) $n_p \ge n_x$ 的情况

通过访问链访问非局部引用

假定过程 p 的嵌套深度为n_p，它引用嵌套深度为n_a的变量 a，$n_a \le n_p$，如何访问 a的存储单元

- 从栈顶的活动记录开始，追踪访问链$n_p - n_a$次
- 到达 a 的声明所在过程的活动记录
- 访问链的追踪用间接操作就可完成

sort	1
readarray	2
exchange	2
quicksort	2
partition	3



非局部名字引用的表示

过程p对变量a访问时，a的地址由下面的二元组表示：

（$n_p - n_a$，a在活动记录中的偏移）

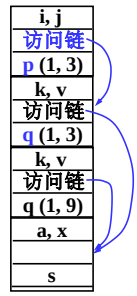
访问链的建立

假定嵌套深度为n_p的过程 p调用嵌套深度为n_x的过程 x

1. $n_p < n_x$的情况　这时 x 肯定就声明在p中

- 被调用过程的访问链须指向调用过程的活动记录的访问链
- sort调用quicksort、quicksort调用partition

```
sort          1
  readarray   2
  exchange    2
  quicksort   2
    partition 3
```

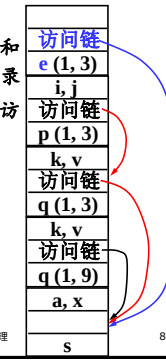


访问链的建立

2. $n_p \geq n_x$的情况　p和 x 有公共的外围过程

- 追踪访问链 $n_p - n_x + 1$次，到达静态包围x和p且离它们最近的那个过程的最新活动记录
- 所到达的活动记录就是x的活动记录中的访问链应该指向的那个活动记录
- partition调用exchange

```
sort          1
  readarray   2
  exchange    2
  quicksort   2
    partition 3
```



有过程嵌套的静态作用域

- 非局部名字的访问：访问链
- 过程作为参数产生的问题和解决
- 过程作为返回值产生的问题

过程作为参数

```
program param(input, output);（过程作为参数）
  procedure b(function h(n: integer): integer);
    begin writeln(h(2)) end {b};
  procedure c;
    var m: integer;
    function f(n: integer): integer;
      begin f := m+n end {f};
    begin m := 0; b(f) end {c};
begin
  c
end.
```

```
param   1
  b     2
  c[m]  2
    f   2
```

```
param
  |
  c
  |
b(h=f)
  |
  f
```

作为参数传递时，怎样在f被激活时建立它的访问链

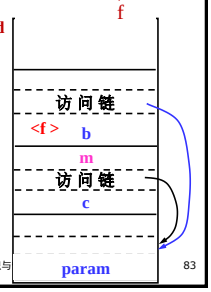
过程作为参数

```
program param(input, output);（过程作为参数）
  procedure b(function h(n: integer): integer);
    begin writeln(h(2)) end {b};
  procedure c;    b：(integer→integer)→void
    var m: integer;
    function f(n: integer): integer;
      begin f := m+n end {f};
    begin m := 0; b(f) end {c};
begin
  c
end.
```

param
  b
  c[m]
    f

param
  |
  c
  |
b(h=f)
  |
  f

从b的访问链难以建立f的访问链



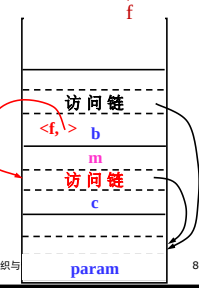
过程作为参数

```
program param(input, output);（过程作为参数）
  procedure b(function h(n: integer): integer);
    begin writeln(h(2)) end {b};
  procedure c;
    var m: integer;
    function f(n: integer): integer;
      begin f := m+n end {f};
    begin m := 0; b(f) end {c};
begin
  c
end.
```

param
  b
  c[m]
    f

param
  |
  c
  |
b(h=f)
  |
  f

f作为参数传递时，它的起始地址连同它的访问链一起传递

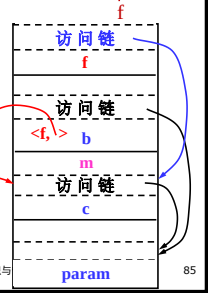


过程作为参数

```
program param(input, output);（过程作为参数）
    procedure b(function h(n: integer): integer);
      begin writeln(h(2)) end {b};
    procedure c;
      var m: integer;
      function f(n: integer): integer;
        begin f := m+n end {f};
        begin m := 0; b(f) end {c};
    begin
      c
    end.
```

param
b
c[m]
f

b调用f时，用传递过来的访问链来建立f的访问链



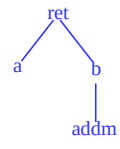
有过程嵌套的静态作用域

- 非局部名字的访问：访问链
- 过程作为参数产生的问题和解决
- 过程作为返回值产生的问题

过程作为返回值

```
program ret (input, output);（过程作为返回值）
  var f: function (integer): integer;
    function a: function (integer): integer;
      var m: integer;
      function addm (n: integer): integer;
        begin return m+n end;
      begin m:= 0; return addm end;
    procedure b (g: function (integer): integer);
      begin writeln (g(2)) end;
    begin
      f := a; b(f)
    end.
```

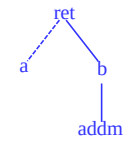
这里是对a的调用



过程作为返回值

```
program ret (input, output);（过程作为返回值）
  var f: function (integer): integer;
    function a: function (integer): integer;
      var m: integer;
      function addm (n: integer): integer;
        begin return m+n end;
      begin m:= 0; return addm end;
    procedure b (g: function (integer): integer);
      begin writeln (g(2)) end;
    begin
      f := a; b(f)
    end.
```

执行addm时，a的活动记录已不存在，取不到m的值



C语言中的函数

- 不能嵌套定义
- 当前激活的函数要访问的数据分成两种情况
  - 非静态局部变量（包括形式参数）：分配在活动记录栈顶的那个活动记录中
  - 外部变量（包括定义在其它源文件之中的外部变量）和静态的局部变量：都分配在静态数据区
  - C语言允许函数（的指针）作为返回值

其他语言

- 采用静态作用域的语言
  - 无嵌套过程：如 C++、Java、C#
  - 嵌套过程：如 Python、JavaScript、Ruby
- 闭包 （closure）
  - 解决过程作为返回值时要面对的问题

```
function add(x) {
   return function(y) {
      return x + y;
   }
}
var add3 = add(3); //add3是闭包对象，包含函数和声明函数时的环境
alert(add3(4));
```

其他语言

- 闭包 （closure）
  - 解决过程作为返回值时要面对的问题
  - 过程作为参数时也存在相似的问题

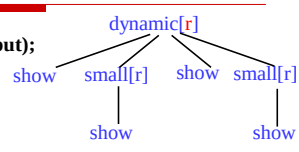
```
function do10times(fn)
  for i = 0,9 do
  fn(i)
  end
end
sum = 0
function addsum(i)
  sum = sum + i
end
do10times(addsum)
print(sum)
```


动态作用域

- 基于运行时的调用关系来确定非局部名字引用的存储单元
- 过程调用时，仅为被调用过程的局部名字建立新的绑定（在活动记录中）
- 实现动态作用域的方法
  - 深访问、浅访问

示例：基于静态作用域时

```
program dynamic(input, output);
  var r: real;
  procedure show;
    begin write(r: 5: 3) end;
  procedure small;
    var r: real;
    begin r := 0.125; show end;
  begin
    r := 0.25;
    show; small; writeln;
    show; small; writeln
  end.
```

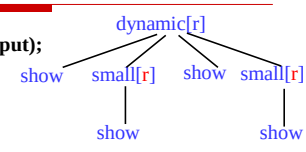


show在dynamic中定义，show中访问的r是dynamic中定义的

执行后输出：
0.250 0.250
0.250 0.250

示例：基于动态作用域时

```
program dynamic(input, output);
  var r: real;
  procedure show;
    begin write(r: 5: 3) end;
  procedure small;
    var r: real;
    begin r := 0.125; show end;
  begin
    r := 0.25;
    show; small; writeln;
    show; small; writeln
  end.
```



dynamic中调用的show所访问的r是dynamic中定义的；small中调用的show所访问的r是small中定义的

执行后输出：
0.250 0.125
0.250 0.125

动态作用域

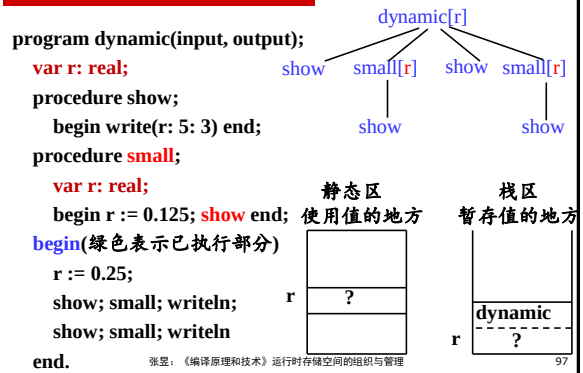
- 使用动态作用域的语言
  - Pascal、Emacs Lisp、Common Lisp（兼有静态作用域）、Perl（兼有静态作用域）、Shell语言（bash, dash, PowerShell）
- 其他
  - 宏展开

https://en.wikipedia.org/wiki/Scope_(computer_science)

实现动态作用域的方法

- 深访问
  - 用控制链搜索运行栈，寻找包含该非局部名字的第一个活动记录
- 浅访问
  - 为每个名字在静态分配的存储空间中保存它的当前值
  - 当过程p的新活动出现时，p的局部名字*n*使用在静态数据区分配给*n*的存储单元。*n*的先前值保存在p的活动记录中，当p的活动结束时再恢复

基于浅访问实现动态作用域




```
program dynamic(input, output);
  var r: real;
  procedure show;
    begin write(r: 5: 3) end;
  procedure small;
    var r: real;
    begin r := 0.125; show end;
  begin(绿色表示已执行部分)
    r := 0.25;
    show; small; writeln;
    show; small; writeln
  end.
```

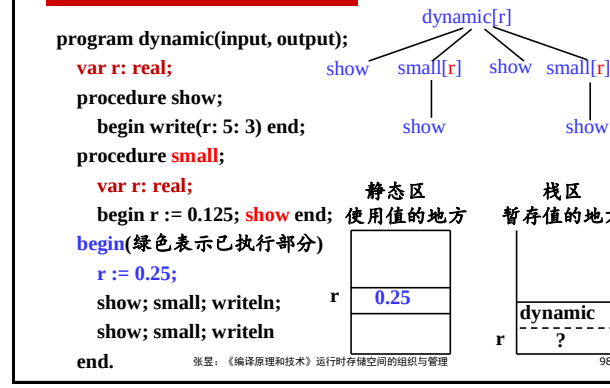
静态区 使用值的地方

r	?

栈区 暂存值的地方

	dynamic
r	?

基于浅访问实现动态作用域




```
program dynamic(input, output);
  var r: real;
  procedure show;
    begin write(r: 5: 3) end;
  procedure small;
    var r: real;
    begin r := 0.125; show end;
  begin(绿色表示已执行部分)
    r := 0.25;
    show; small; writeln;
    show; small; writeln
  end.
```

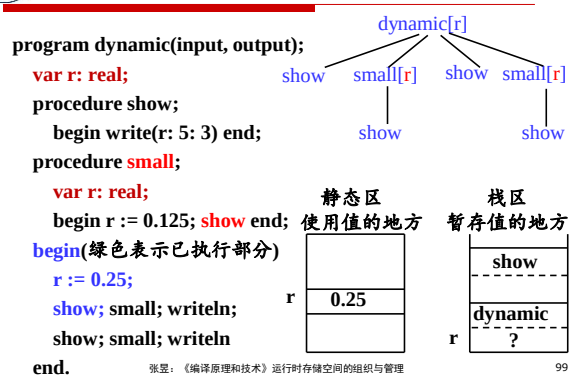
静态区 使用值的地方

r	0.25

栈区 暂存值的地方

	dynamic
r	?

基于浅访问实现动态作用域




```
program dynamic(input, output);
  var r: real;
  procedure show;
    begin write(r: 5: 3) end;
  procedure small;
    var r: real;
    begin r := 0.125; show end;
  begin(绿色表示已执行部分)
    r := 0.25;
    show; small; writeln;
    show; small; writeln
  end.
```

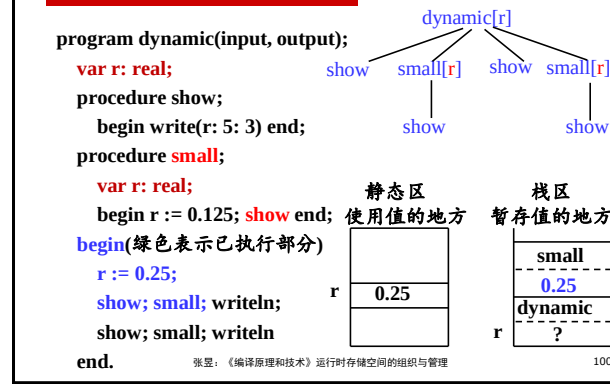
静态区 使用值的地方

r	0.25

栈区 暂存值的地方

	show
	dynamic
r	?

基于浅访问实现动态作用域




```
program dynamic(input, output);
  var r: real;
  procedure show;
    begin write(r: 5: 3) end;
  procedure small;
    var r: real;
    begin r := 0.125; show end;
  begin(绿色表示已执行部分)
    r := 0.25;
    show; small; writeln;
    show; small; writeln
  end.
```

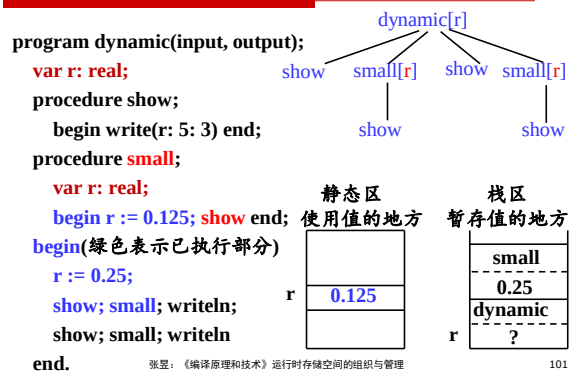
静态区 使用值的地方

r	0.25

栈区 暂存值的地方

	small
	0.25
	dynamic
r	?

基于浅访问实现动态作用域




```
program dynamic(input, output);
  var r: real;
  procedure show;
    begin write(r: 5: 3) end;
  procedure small;
    var r: real;
    begin r := 0.125; show end;
  begin(绿色表示已执行部分)
    r := 0.25;
    show; small; writeln;
    show; small; writeln
  end.
```

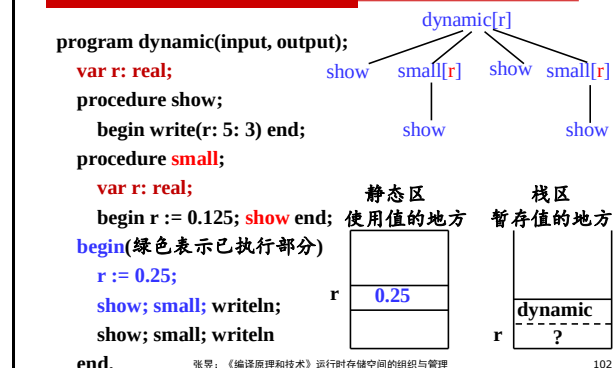
静态区 使用值的地方

r	0.125

栈区 暂存值的地方

	small
	0.25
	dynamic
r	?

基于浅访问实现动态作用域




```
program dynamic(input, output);
  var r: real;
  procedure show;
    begin write(r: 5: 3) end;
  procedure small;
    var r: real;
    begin r := 0.125; show end;
  begin(绿色表示已执行部分)
    r := 0.25;
    show; small; writeln;
    show; small; writeln
  end.
```

静态区 使用值的地方

r	0.25

栈区 暂存值的地方

	dynamic
r	?

中国科学技术大学 University of Science and Technology of China

4. 参数传递

- 值调用
- 引用调用
- 换名调用

值调用(call by value)

- 特点
  - 实参的右值传给被调用过程
- 值调用的可能实现方法
  - 把形参当作所在过程的局部名看待，形参的存储单元在该过程的活动记录中
  - 调用过程计算实参，并把其右值放入被调用过程形参的存储单元中

引用调用(call by reference)

- 特点
  - 实参的左值传给被调用过程
- 引用调用的可能实现方法
  - 把形参当作所在过程的局部名看待，形参的存储单元在该过程的活动记录中
  - 调用过程计算实参，把实参的左值放入被调用过程形参的存储单元
  - 在被调用过程的目标代码中，任何对形参的引用都是通过传给该过程的指针来间接引用实参

换名调用(call by name)

- 特点
  - 用实参表达式对形参进行正文替换，然后再执行

```
procedure swap(var x, y: integer);
  var temp: integer;
  begin
    temp := x;
    x := y;
    y := temp
  end
```

例如：调用swap(i, a[i])

替换结果：

```
temp := i;
i := a[i];
a[i] := temp
```

交换两个数据的程序并非总是正确

5. 其他

- 堆：分配与回收
- 计算机内存分层
- 局部性：时间、空间

堆管理

- 堆

  存放生存期不确定的数据
  - C：malloc、free

    glibc 的ptmalloc, Doug Lea's dlmalloc

    高效的并发内存分配器 jemalloc, TBBmalloc,TCMalloc (gperftools)
  - Java: new、Garbage Collection

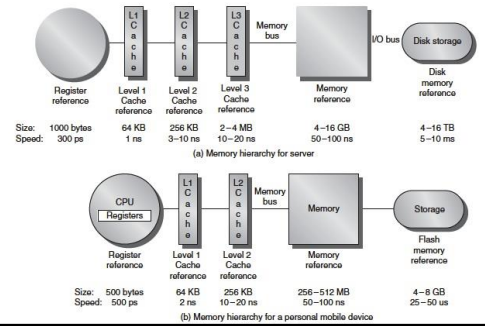
    Richard Jones's the Garbage Collection Page

内存管理器

- 内存管理器,也称内存分配器(allocator)
  - 维护的基本信息：堆中空闲空间、...
  - 重点要实现的函数：分配、回收
- 内存管理器应具有下列性质
  - 空间有效性：极小化程序需要的堆空间总量
  - 程序有效性：较好地利用内存子系统，使得程序能运行得快一些
  - 低开销：分配和回收操作所花时间在整个程序执行时间中的比例尽量小

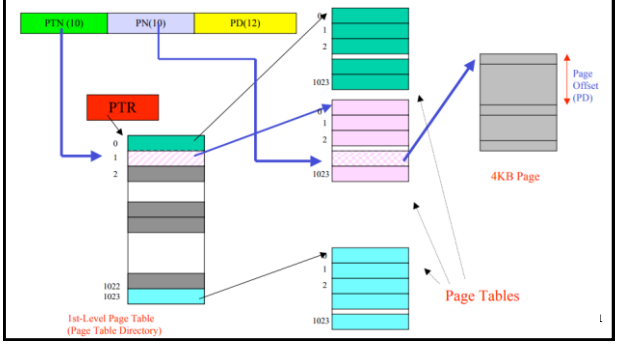
计算机内存分层

Computer Architecture, Fifth Edition: A Quantitative Approach, John Hennessy and David Patterson, **2012**



虚拟地址=>物理地址

- 两级快表（TLB, Translation lookaside buffer）



Intel Core i7

峰值内存带宽：25 GB/s；使用48位虚拟地址、36位物理地址；两级 TLB

Characteristic	Instruction TLB	Data DLB	Second-level TLB
Size	128	64	512
Associativity	4-way	4-way	4-way
Replacement	Pseudo-LRU	Pseudo-LRU	Pseudo-LRU
Access latency	1 cycle	1 cycle	6 cycles
Miss	7 cycles	7 cycles	Hundreds of cycles to access page table

TLB 结构

Characteristic	L1	L2	L3
Size	32 KB I/32 KB D	256 KB	2 MB per core
Associativity	4-way I/8-way D	8-way	16-way
Access latency	4 cycles, pipelined	10 cycles	35 cycles
Replacement scheme	Pseudo-LRU	Pseudo-LRU	Pseudo-LRU but with an ordered selection algorihtm

三级 cache 结构

程序局部性(locality)

大多数程序的大部分时间在执行一小部分代码，并且仅涉及一小部分数据

- 时间局部性(temporal locality)

  程序访问的内存单元在很短的时间内可能再次被程序访问
- 空间局部性(spatial locality)

  毗邻被访问单元的内存单元在很短的时间内可能被访问
- 有效利用缓存
  - Cache容量有限、最近使用的指令保存在cache中
  - 改变数据布局或计算次序=>改进程序局部性

举例: 改变计算次序

```
void copyij (int src[2048][2048],
             int dst[2048][2048])
{
  int i,j;
  for (i = 0; i < 2048; i++)
    for (j = 0; j < 2048; j++)
      dst[i][j] = src[i][j];
}
```

```
void copyji (int src[2048][2048],
             int dst[2048][2048])
{
  int i,j;
  for (j = 0; j < 2048; j++)
    for (i = 0; i < 2048; i++)
      dst[i][j] = src[i][j];
}
```

上述两个函数功能、算法一样，但执行时间一样吗?

```
int a[2048][2048] = {1, 1};
int b[2048][2048];
int main( )
{
  copyij(a, b);
  // copyji(a, b);
}
```

```
$ time ./copyij
real    0m0.046s
user    0m0.037s
sys     0m0.008s
```

```
$ time ./copyji
real    0m0.404s
user    0m0.384s
sys     0m0.020s
```

举例: 改变计算次序

```
int a[2048][2048] = {1, 1};
int b[2048][2048];
int main( )
{
  copyij(a, b);
  // copyji(a, b);
}
```

→

```
int a[2048][2048] = {1, 1};
int main( )
{
  int b[2048][2048];
  copyij(a, b);
  // copyji(a, b);
}
```

上述功能一样，但执行会有什么变化呢?

Segmentation fault (core dumped) ☹

Why ?

操作系统、编译器： 进程地址空间布局: 栈大小有限, 如为8MB

2048*2048*4 = 16MB

举例: 改变数据布局

例： 一个结构体大数组分拆成若干个数组

```
struct student {                int num[10000];
int num;                        char name[10000][20];
char name[20];                  …      …
…    …
}
struct  student st[10000];
```

- 若是顺序处理每个结构体的多个域，左边的数据局部性较好
- 若是先顺序处理每个结构的num域，再处理每个结构的name域，…，则右边的数据局部性较好
- 最好是按左边编程，由编译器决定是否需要将数据按右边布局