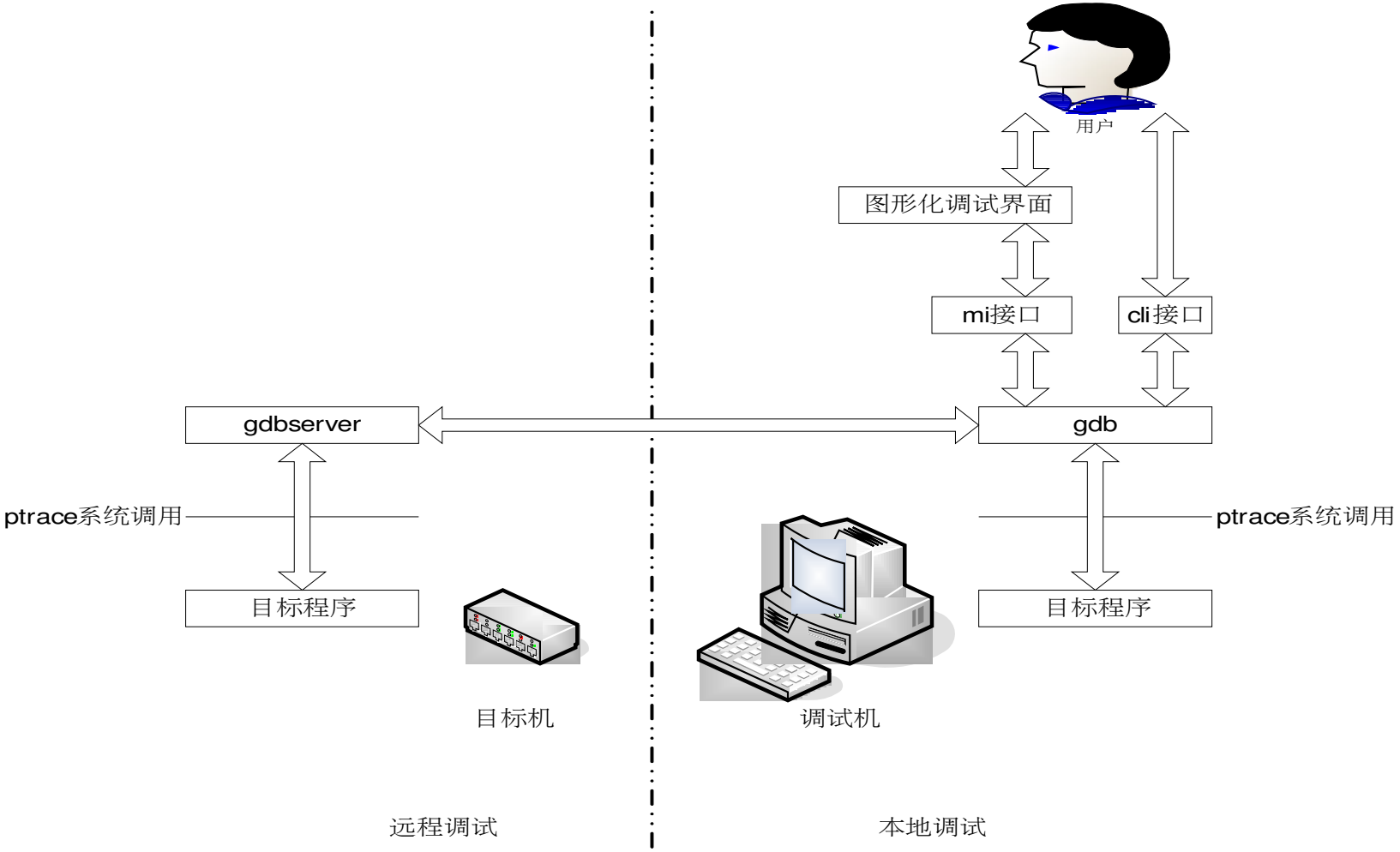
gdb 的基本工作原理

刘东
雨丝风片 @chinaunix
msn: yanbohuachuan@hotmail.com
2007.12.15

gdb 简介

- gdb - GNU debugger 。
- gdb 的主要功能 — 救死扶伤。
- gdb 的主要用途 — 修复 bug ； 分析程序结构。
- gdb 官方网址 - http://www.gnu.org/software/gdb/gdb.html
- gdb 下载地址 - http://ftp.gnu.org/gnu/gdb/

gdb 调试的组成架构


用户
图形化调试界面
mi接口
cli接口
gdbserver
gdb
ptrace系统调用
ptrace系统调用
目标程序
目标程序
目标机
调试机
远程调试
本地调试

gdb 调试的工具 — ptrace 系统调用（1）

- ptrace 系统调用的原型

  long ptrace(enum __ptrace_request request, pid_t pid, void *addr, void *data);

- ptrace 系统调用的简要说明

  ptrace 系统调用提供了一种方法来让父进程可以观察和控制其它进程的执行，检查和改变其核心映像以及寄存器。

gdb 调试的工具 — ptrace 系统调用（2）

- ptrace 系统调用的主要选项

PTRACE_TRACEME

表示本进程将被其父进程跟踪，交付给这个进程的所有信号（除 SIGKILL 之外），都将使其停止，父进程将通过 wait() 获知这一情况。

PTRACE_ATTACH

attach 到一个指定的进程，使其成为当前进程跟踪的子进程，子进程的行为等同于它进行了一次 PTRACE_TRACEME 操作。

PTRACE_CONT

继续运行之前停止的子进程。可同时向子进程交付指定的信号。

gdb 的三种调试方式 （1）

- attach 并调试一个已经运行的进程

调试关系的建立过程：

- 用户确定需要进行调试的进程 id ；
- 运行 gdb ， 输入 attach pid ， gdb 对指定进程执行下述操作：
  ptrace(PTRACE_ATTACH, pid, 0, 0);

gdb 的三种调试方式 （2）

- attach 并调试一个已经运行的进程

```
[root@localhost ~]# gdb
GNU gdb Red Hat Linux (6.5-16.el5rh)
Copyright (C) 2006 Free Software Foundation, Inc.
GDB is free software, covered by the GNU General Public License, and you are
welcome to change it and/or distribute copies of it under certain conditions.
Type "show copying" to see the conditions.
There is absolutely no warranty for GDB.  Type "show warranty" for details.
This GDB was configured as "i386-redhat-linux-gnu".
(gdb) attach 4253
Attaching to process 4253
Reading symbols from /root/test/a3...done.
Using host libthread_db library "/lib/libthread_db.so.1".
Reading symbols from /lib/libpthread.so.0...done.
[Thread debugging using libthread_db enabled]
[New Thread -1208772928 (LWP 4253)]
[New Thread -1219265648 (LWP 4255)]
[New Thread -1208775792 (LWP 4254)]
Loaded symbols for /lib/libpthread.so.0
Reading symbols from /lib/libc.so.6...done.
Loaded symbols for /lib/libc.so.6
Reading symbols from /lib/ld-linux.so.2...done.
Loaded symbols for /lib/ld-linux.so.2
0x00634402 in __kernel_vsyscall ()
(gdb)
```

gdb 的三种调试方式 （3）

- 运行并调试一个新的进程

- 调试关系的建立过程：
  - 运行 gdb，通过命令行参数或 file 命令指定目标程序。
  - 输入 run 命令， gdb 执行下述操作：
    - 通过 fork() 系统调用创建一个新进程；
    - 在新创建的子进程中执行下述操作：
      ptrace(PTRACE_TRACEME, 0, 0, 0);
    - 在子进程中通过 execv() 系统调用加载用户指定的可执行文件。

gdb 的三种调试方式 （4）

- 运行并调试一个新的进程

```
[root@localhost test]# gdb a3
GNU gdb Red Hat Linux (6.5-16.el5rh)
Copyright (C) 2006 Free Software Foundation, Inc.
GDB is free software, covered by the GNU General Public License, and you are
welcome to change it and/or distribute copies of it under certain conditions.
Type "show copying" to see the conditions.
There is absolutely no warranty for GDB.  Type "show warranty" for details.
This GDB was configured as "i386-redhat-linux-gnu"...Using host libthread_db library "/lib/libthread_db.so.1".
(gdb) run
Starting program: /root/test/a3
[Thread debugging using libthread_db enabled]
[New Thread -1208756544 (LWP 2551)]
[New Thread -1208759408 (LWP 2554)]
[New Thread -1219249264 (LWP 2555)]
```

gdb 的三种调试方式 （5）

- 远程调试目标机上新创建的进程
  - gdb 运行在调试机上， gdbserver 运行在目标机上，两者之间的通信数据格式由 gdb 远程串行协议（Remote Serial Protocol) 定义。
  - RSP 协议数据的基本格式为：“$.....#xx”。
  - gdbserver 的启动方式相当于运行并调试一个新创建的进程。

```
[root@localhost test]# gdbserver host:1100 a3
Process a3 created; pid = 2660
Listening on port 1100
```

gdb 的三种调试方式 （6）

- 远程调试目标机上新创建的进程

```
[/cygdrive/d/test]$ gdb
GNU gdb 6.6
Copyright (C) 2006 Free Software Foundation, Inc.
GDB is free software, covered by the GNU General Public License, and you are
welcome to change it and/or distribute copies of it under certain conditions.
Type "show copying" to see the conditions.
There is absolutely no warranty for GDB.  Type "show warranty" for details.
This GDB was configured as "--host=i686-pc-cygwin --target=i686-linux".
(gdb) file a3
Reading symbols from /cygdrive/d/test/a3...done.
(gdb) target remote 192.168.150.5:1100
Remote debugging using 192.168.150.5:1100
0x42e25810 in _start () from /cygdrive/d/test/lib/ld-linux.so.2
(gdb)
```

gdb 调试的基础 — 信号 （1）

- 在使用参数为 PTRACE_TRACEME 或 PTRACE_ATTACH 的 ptrace 系统调用建立调试关系之后，交付给目标程序的任何信号（除 SIGKILL 之外）都将被 gdb 先行截获，或在远程调试中被 gdbserver 截获并通知 gdb 。

- gdb 因此有机会对信号进行相应处理，并根据信号的属性决定在继续目标程序运行时是否将之前截获的信号实际交付给目标程序。

gdb 调试的基础 — 信号 （2）

- 信号是实现断点功能的基础。以 x86 为例，向某个地址打入断点，实际上就是往该地址写入断点指令 INT 3，即 0xCC 。目标程序运行到这条指令之后就会触发 SIGTRAP 信号， gdb 捕获到这个信号，根据目标程序当前停止位置查询 gdb 维护的断点链表，若发现在该地址确实存在断点，则可判定为断点命中。

- gdb 暂停目标程序运行的方法是向其发送 SIGSTOP 信号。

  kill_lwp(process->head.id, SIGSTOP);

gdb 的同步模式和异步模式

- 同步模式 — gdb 将以同步方式等待目标程序发生停止事件，可称之为“死等”。因此，在目标程序运行期间， gdb 不再扫描标准输入，用户也无法输入任何调试命令，要么等待目标程序发生调试事件而停止，要么通过“ Ctrl c” 来暂停目标程序的运行。

- 异步模式 — gdb 不会同步等待目标程序发生停止事件，此类事件将通过异步上报的方式告知 gdb 。在目标程序运行期间， gdb 仍将扫描标准输入，用户可以输入调试命令。

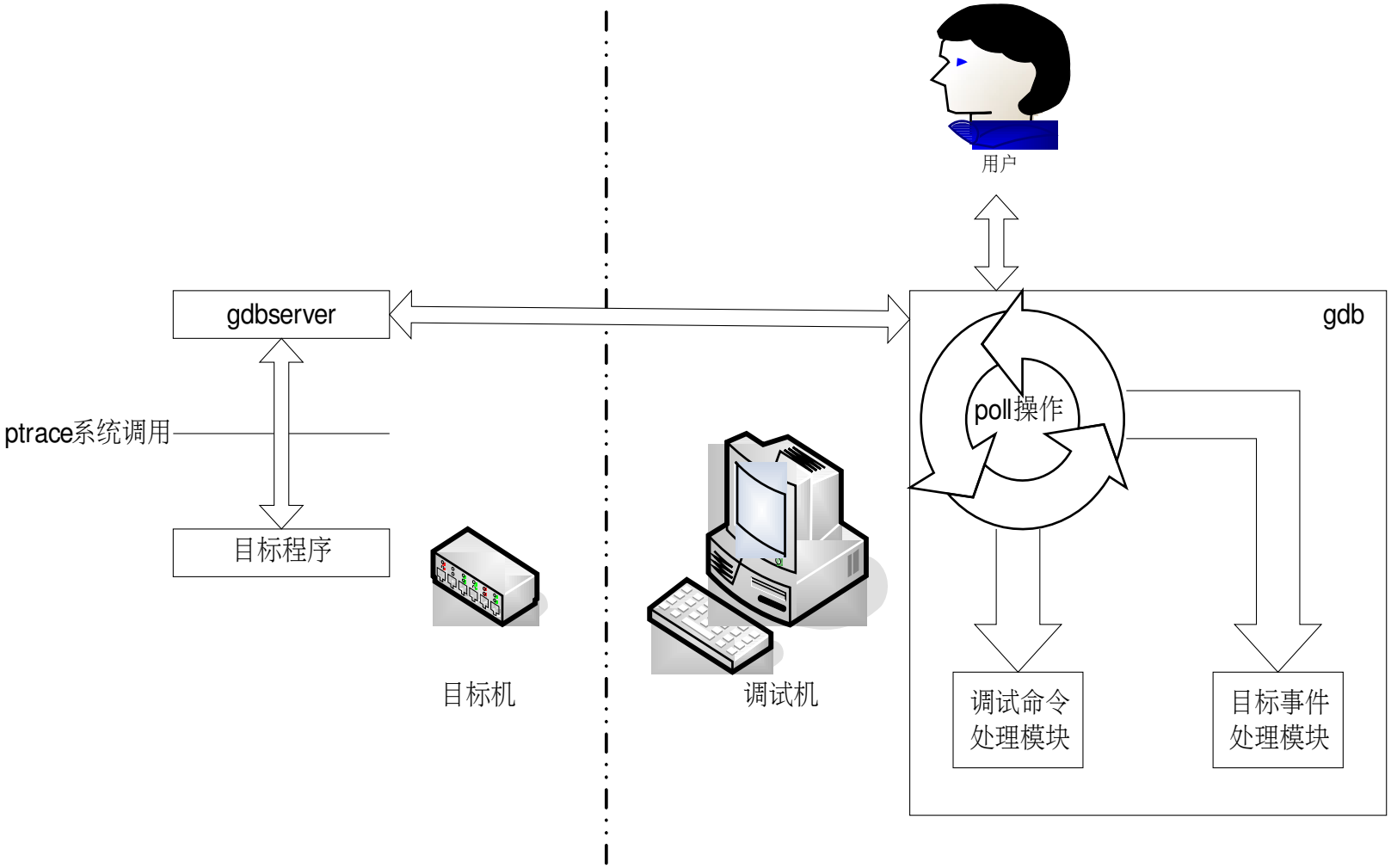
- 使用同步模式还是异步模式由调试目标决定，在启动 gdb 之后通过 target 命令的参数给出。比如远程同步目标为 target remote … ， 而远程异步目标为 target async … 。

gdb 远程异步模式中的事件循环 （1）

- gdb 远程异步模式的运转完全是由外部事件来激励的。共有两个外部事件源，一个是标准输入（用户输入的调试命令），一个是远程连接（gdbserver 上报的异步事件）。

- 负责对外部事件源进行检测和对事件进行分发处理的功能模块就是事件循环。建立调试连接之后， gdb 就会不断地对上述两个文件描述符进行 poll 操作。一旦发现某个文件描述符上有输入事件，就将该事件分发给相应的功能模块进行处理，该事件处理完毕之后将回到事件循环继续进行 poll 操作。

gdb 远程异步模式中的事件循环 （2）



gdb 远程异步模式中的事件循环 （3）

- 标准输入上会出现哪些事件?

用户输入的任何调试命令，比如 cli 的 continue 、 next 、 step 、 breakpoint 或者是 mi 的 exec-continue 、 exec-next 、 exec-step 、 break-insert 等等。

- 远程连接上会出现哪些事件?

目标程序可能遇到的任何调试事件，比如遇到断点、收到随机信号、单步结束、线程创建、线程退出、进程退出等等。

gdb 指令级单步的实现 （1）

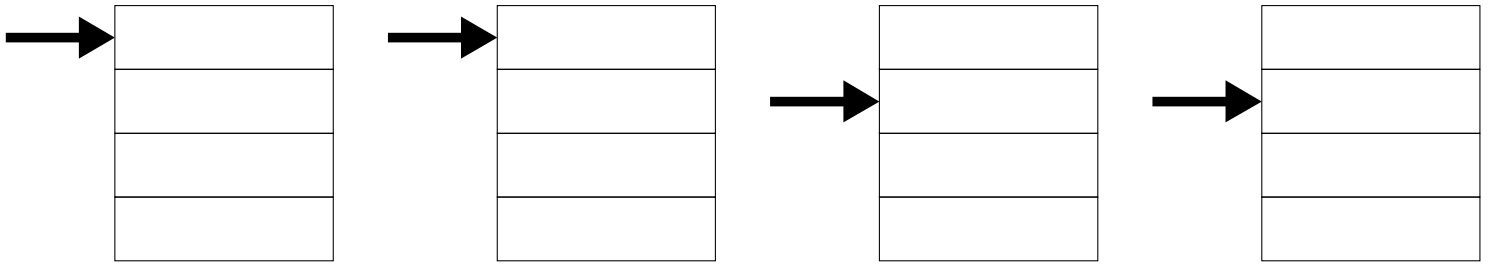
- 所谓指令级单步就是指 gdb 控制目标程序只运行一条指令之后即停止指令级单步是 next 、 step 、 nexti 、 stepi 等运行类调试命令的基础。

- 指令级单步有硬件单步和软件单步之分。所谓硬件单步是指 cpu 架构本身就支持指令级单步，目标程序可以在运行一条指令之后自动停止所谓软件单步是指 cpu 架构不支持指令级单步，需要 gdb 用软件方法来实现指令级单步。

- 支持硬件单步的架构如 x86 和 ppc 。对于 x86 ，可通过设置 EFLAGS 寄存器中的 TF 标志来将 cpu 置于单步模式。对于 ppc ，则可通过设置 MSR 寄存器中的 SE 标志来将 cpu 置于单步模式。在单步模式中， cpu 每执行一条指令，就会产生一个单步异常，通知 gdb 进行处理。

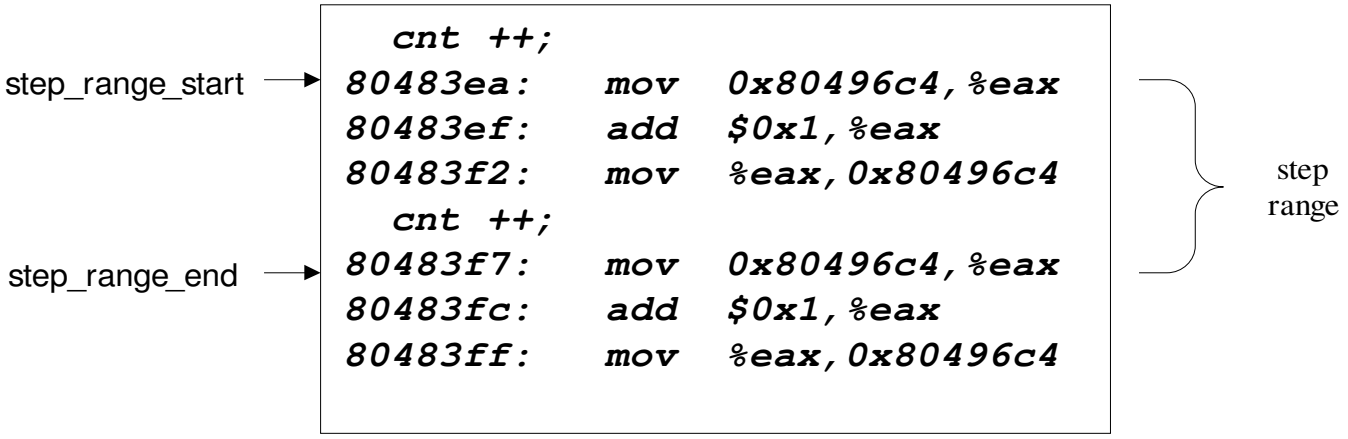
gdb 指令级单步的实现 （2）

- 不支持硬件单步的架构如 arm 和 mips 。对于此类架构， gdb 采用的是用临时的软件断点来模拟单步的方法。即在需执行指令的下一条指令处临时插入一个断点，然后让目标程序继续运行，它会在执行完当前指令之后遇到下一条指令处的临时断点，于是目标程序停止，通知 gdb 命中断点， gdb 再将此断点删除，由此来完成指令级单步的过程。（插入临时断点需要 gdb 实现代码分支预测的功能）



gdb next 命令的实现 （1）

- next 命令实现 c 代码级的单步。分析其实现机制首先需要理解 step range 以及 step_range_start 和 step_range_end 的概念。
- 执行 next 命令时， gdb 会计算出当前停止位置的 c 语句的第一条指令的地址作为 step_range_start，然后计算出当前停止位置下一行的 c 语句的第一条指令的地址作为 step_range_end，随后控制目标程序从当前停止位置开始走指令级单步，直至 pc 超出 step range 为止。



gdb next 命令的实现 （2）

- next 命令的结束条件：

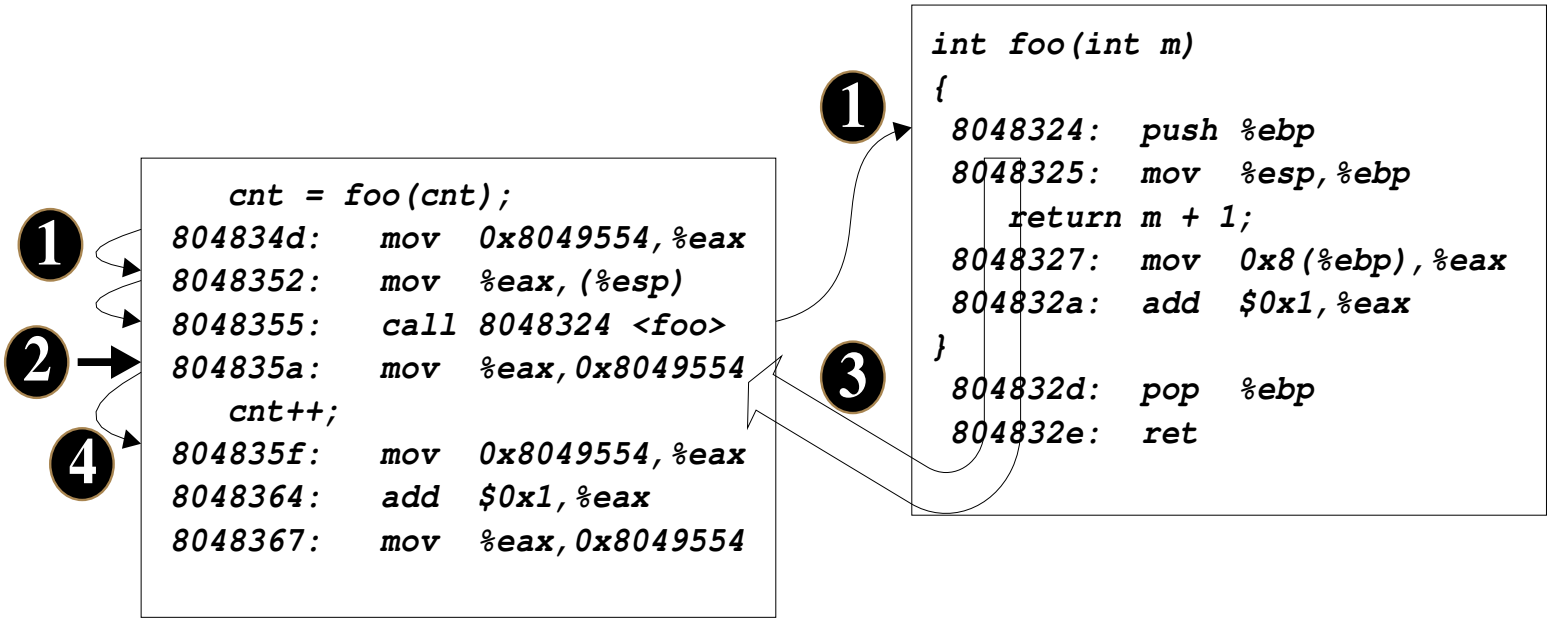
  pc < step_range_start || pc >= step_range_end 。

- 之所以不能简单地判断 pc 是否到达 step_range_end，是因为 step_range_end 仅仅是 c 源代码意义上的下一行的第一条指令的地址，目标程序实际运行时未必就会到达那里。因此， next 命令的结束条件可以理解为只要 pc 离开当前源代码行即可。

- next 过程中遇到函数调用怎么办？我们知道， next 命令是会跨过函数调用的，这个过程是如何实现的呢?

gdb next 命令的实现 （3）

- next 命令跨越函数调用的过程： 1 、从当前停止位置开始走指令级单步； 2 、走到子函数第一条指令时发现是函数调用，就在函数返回地址插入一个临时断点； 3 、让目标程序继续运行，通过子函数体，直至遇到之前插入的临时断点； 4 、继续走指令级单步，直至满足 next 命令的结束条件为止。



gdb step 、 nexti 、 stepi 命令的实现

- step 命令和 next 命令一样，也是实现 c 源代码级的单步，对于简单语句， step 完全等同于 next 。唯一不同的是，若单步过程中遇到函数调用， step 命令将停止在子函数的起始处，而不是将其跨越（无调试信息的子函数除外）。

- nexti 命令实现指令级单步，和 next 命令类似， nexti 命令单步过程中不会进入子函数调用。

- stepi 命令实现指令级单步，而且是严格的指令级单步，每次直接走一条指令后即停止，不再区分是否存在函数调用。

gdb finish 命令的实现

- finish 命令会让目标程序继续执行完当前函数的剩余语句，并停止在返回到上一级函数之后的第一条指令处（也就是调用当前函数时的返回地址）。因此，实现 finish 命令时，只需找到当前函数的返回地址，并在该处插入一个临时断点，然后让目标程序继续运行，直至遇到该断点而停止。

gdb until 命令的实现

- 不带参数的 until 命令让目标程序运行至当前函数中当前行后的任意一行。和 next 命令类似，这种 until 命令也是用指令级单步来实现的，但不同的是它的 step_range_start 设定为当前函数的起始位置，也就是说，若指令级单步过程中 pc 向函数前部移动，程序是不会停止的，仅当程序单步至当前行后的某一行时程序才会停止，这就提供了一种跳出循环体的快捷方式。
- 带参数的 until 命令让目标程序继续运行，直至达到指定位置为止。因为只要在当前函数体内， until 命令的目的地址可以任意指定，因此不能再用指令级单步来实现它，而是采用在指定地址插入临时断点，然后让目标程序继续运行直至遇到断点停止的方法。
- 关于 until 命令需要注意的是，不管带参数还是不带参数， until 都是针对当前函数内部而言的，也就是说，只要 pc 离开当前函数体程序就会停止。

gdb 对断点的处理 （1）

- 断点功能的实现就是在指定位置插入断点指令，使目标程序运行至该处时产生 SIGTRAP 信号，该信号被 gdb 捕获，通过断点地址的匹配确定是否命中断点。

- 断点的属性：
  - 是否有条件（由 condition 命令修改）；
  - 是否有忽略次数 （由 ignore 命令修改）；
  - 是否只针对某个线程有效（由 break 命令的 thread 参数指定）；
  - 是否是临时断点（由 tbreak 命令插入）。

gdb 对断点的处理 （2）

- 断点命中的判定：目标程序遇到断点，并不一定就需要停下来，该停就停，不该停的还是要继续跑。只有真正需要停止运行的情况才认为是断点命中。是否命中断点的判定因素主要有以下这些：
  - 导致目标程序本次停止运行的信号是不是 SIGTRAP ；
  - 在 gdb 维护的断点链表中是否存在一个断点的地址与目标程序本次停止位置匹配；
  - 若断点存在条件，此时条件是否满足；
  - 断点的忽略次数此时是否为 0 ；
  - 若断点只针对某个线程有效，那么遇到该断点的线程是否就是断点所设定的线程；
- 若前两个条件之一不满足，则认为目标程序本次是因随机信号而停止若后三个条件之一不满足，则认为目标程序本次没有命中断点， gdb 会让其继续运行。

gdb 对断点的处理 （3）

- 临时断点 — 断点命中之后的处理。当判定为断点命中之后，若该断点为临时断点， gdb 就会将这个断点删除。也就是说，临时断点只命中一次。可能用到临时断点的场合：
  - 用户通过 tbreak 命令显式插入；
  - next 、 nexti 、 step 命令需要跨越函数调用的时候，由 gdb 自动在函数返回地址处插入临时断点；
  - finish 命令需要在当前函数返回地址处插入临时断点；
  - 带参数的 until 命令需要在当前函数返回地址以及参数指定地址插入临时断点；
  - 在不支持硬件单步的架构上， gdb 需要逐指令插入临时断点来实现软件单步；

gdb 对断点的处理 （4）

- gdb 将断点实际插入目标程序的时机：当用户通过 break 命令设置一个断点时，这个断点并不会立即生效，因为 gdb 此时只是在内部的断点链表中为这个断点新创建了一个节点而已。 gdb 会在用户下次发出继续目标程序运行的命令时，将所有断点插入目标程序，新设置的断点到这个时候才会实际存在于目标程序中。与此相呼应，当目标程序停止时， gdb 会将所有断点暂时从目标程序中清除。
- 断点命中失败的情况下，跨越断点继续运行的过程：
  - 清除断点
  - 单步到断点的下一条指令
  - 恢复断点
  - 继续目标程序运行

gdb 对随机信号的处理

- 对于 gdb 而言，导致目标程序本次停止的信号有随机和非随机之分。非随机信号是指 gdb 已经预知其会发生或者本身就是 gdb 导致的信号，也就是说，这些信号是具有明确的调试含义的，比如遇到断点指令时的 SIGTRAP 。而随机信号则是 gdb 没有预知的、不了解其实际含义的信号，比如因程序异常而导致的 SIGSEGV ，因定时机制而产生的 SIGALRM ，或者是用户程序自己内部使用的信号。
- 对于随机信号， gdb 提供了两个属性来决定对它的处理方式。一个是当此信号发生时是否停止目标程序的运行，一个是在目标程序因此信号而停止之后，用户发出继续目标程序运行的命令时，是否将此信号交付给目标程序。
- 可通过 info signals 命令查看信号的配置属性，并通过 handle signal 命令来修改信号的属性。

谢谢！