Laborator 07 - Profiling & Debugging

Materiale ajutătoare

- lab07-slides.pdf [http://elf.cs.pub.ro/so/res/laboratoare/lab07-slides.pdf]

Nice to Watch

- Google I/O 2010 - Measure in milliseconds: Meet Speed Tracer [http://www.youtube.com/watch?v=73IyVBMf2uY]
- MIT Lecture: Performance Engineering with Profiling Tools [http://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-172-performance-engineering-of-software-systems-fall-2010/video-lectures/lecture-5-performance-engineering-with-profiling-tools/]

Latency Comparison Numbers

Operation	Time (ns)	Notes
L1 cache reference	0.5 ns	
Branch mispredict	5 ns	
L2 cache reference	7 ns	14x L1 cache
Mutex lock/unlock	25 ns	
Main memory reference	100 ns	20x L2 cache, 200x L1 cache
Compress 1K bytes with Zippy	3,000 ns	
Send 1K bytes over 1 Gbps network	10,000 ns	0.01 ms
Read 4K randomly from SSD*	150,000 ns	0.15 ms
Read 1 MB sequentially from memory	250,000 ns	0.25 ms
Round trip within same datacenter	500,000 ns	0.5 ms
Read 1 MB sequentially from SSD*	1,000,000 ns	1 ms, 4x memory
Disk seek	10,000,000 ns	10 ms, 20x datacenter roundtrip
Read 1 MB sequentially from disk	20,000,000 ns	20 ms, 80x memory, 20x SSD
Send packet Caracal - NY - Caracal	150,000,000 ns	150 ms

Credits:

- By Jeff Dean: http://research.google.com/people/jeff/ [http://research.google.com/people/jeff/]
- Originally by Peter Norvig: http://norvig.com/21-days.html#answers [http://norvig.com/21-days.html#answers]

Link-uri către secțiuni utile

Linux

- Profiler și tehnici de profiling
- Unelte de profiling
- Utilizare perf
- Unelte de debugging

Profiler și tehnici de profiling

Un **profiler** este un utilitar de analiză a **performanței** care ajută programatorul să determine punctele critice – **bottleneck** – ale unui program. Acest lucru se realizează prin investigarea comportamentului programului, evaluarea consumului de memorie și relația dintre modulele acestuia.

Suportul pentru profilere este disponibil la nivel de:

- **bibliotecă C** (GNU libc), prin informații legate de timpul de viață al alocărilor de memorie,
- **compilator**, prin modificarea codului în tehnica de **instrumentare** se poate realiza ușor în procesul de compilare, compilatorul fiind cel ce inserează secțiunile de cod necesare,
- **nucleu** al sistemului de operare, prin punerea la dispoziție de apeluri de sistem specifice,
- **hardware**, unele procesoare sunt dotate cu contoare de temporizare (Time Stamp Counter - TSC [http://en.wikipedia.org/wiki/Time_Stamp_Counter]) sau contoare de performanță care numără evenimente precum cicluri de procesor sau TLB miss-uri.

Două moduri prin care se realizează profiling-ul sunt prezentate în continuare:

Tehnica de instrumentare (instrumentation)

Profiler-ele bazate pe această tehnică necesită de obicei **modificări** în codul programului: se inserează secțiuni de cod la începutul și sfârșitul funcției ce se dorește analizată. De asemenea, se rețin și funcțiile apelate. Astfel, se poate estima timpul total al apelului în sine cât și al apelurilor de subfuncții.
Dezavantajul major al acestor profilere este legat de modificarea codului: în funcții de dimensiune scăzută și des apelate, acest overhead poate duce la o interpretare greșită a rezultatelor.

Tehnica de eșantionare (sampling)

Profiler-ele bazate pe sampling **nu fac schimbări** în codul programului, ci verifică periodic procesorul cu scopul de a determina ce funcție (instrucțiune) se execută la momentul respectiv. Apoi estimează frecvența și timpul de execuție al unei anumite funcții într-o perioadă de timp.

Unelte de profiling

În continuare sunt prezentate câteva unelte folosite în profiling.

perfcounters

Majoritatea procesoarelor moderne oferă registre speciale (`performance counters`) care contorizează diferite tipuri de evenimente hardware: instrucțiuni executate, cache-miss-uri, instrucțiuni de salt anticipate greșit, fără să afecteze performanța nucleului sau a aplicațiilor. Aceste registre pot declanșa întreruperi atunci când se acumulează un anumit număr de evenimente și astfel se pot folosi pentru analiza codului care rulează pe procesorul în cauză.

Subsistemul `perfcounters`:

- se găsește în nucleul Linux începând cu versiunea 2.6.31 [http://lwn.net/Articles/339361/] (`CONFIG_PERF_COUNTERS=y`)
- este înlocuitorul lui `oprofile`
- oferă suport pentru:
  - `evenimente hardware` (instrucțiuni, accese cache, ciclii de magistrală).
  - `evenimente software` (page fault, cpu-clock, cpu migrations).

- `tracepoints` (e.g: sys_enter_open, sys_exit_open).

perf

Utilitarul `perf` este interfața subsistemului `perfcounters` cu utilizatorul. Oferă o linie de comandă asemănătoare cu `git` și nu necesită existența unui daemon.

Un tutorial despre perf găsiți aici [https://perf.wiki.kernel.org/index.php/Tutorial].

Utilizare perf

```
$ perf [--version] [--help] COMMAND [ARGS]
```

Cele mai folosite `comenzi` sunt:

- `annotate` - Citește `perf.data` și afișează codul cu adnotări
- `list` - Listează numele simbolice ale tuturor tipurilor de evenimente ce pot fi urmărite de `perf`
- `lock` - Analizează evenimentele de tip lock
- `record` - Rulează o comandă și salvează informațiile de profiling în fișierul `perf.data`
- `report` - Citește `perf.data` (creat de `perf record`) și afișează profilul
- `sched` - Utilitar pentru măsurarea proprietăților planificatorului (latențe)
- `stat` - Rulează o comandă și afișează statisticile înregistrate de subsistemul performance counters
- `top` - Generează și afișează informații în timp real despre încărcarea unui sistem

perf list

- man perf-list [http://manpages.ubuntu.com/manpages/natty/man1/perf-list.1.html]

Afișează numele simbolice ale tuturor tipurilor de evenimente ce pot fi urmărite de `perf`.

```
$ perf list
List of pre-defined events (to be used in -e):

  cpu-cycles OR cycles                       [Hardware event]
  instructions                               [Hardware event]

  cpu-clock                                  [Software event]
  page-faults OR faults                      [Software event]

  L1-dcache-loads                            [Hardware cache event]
  L1-dcache-load-misses                      [Hardware cache event]

  rNNN                                       [Raw hardware event descriptor]

  mem:<addr>[:access]                        [Hardware breakpoint]

  syscalls:sys_enter_accept                  [Tracepoint event]
  syscalls:sys_exit_accept                   [Tracepoint event]
```

Atunci când un eveniment nu este disponibil în forma simbolică, poate fi folosit cu perf în forma procesorului din sistemul analizat.

perf stat

- perf-stat [http://manpages.ubuntu.com/manpages/lucid/man1/perf-stat.1.html]

Rulează o comandă și afișează statisticile înregistrate de subsistemul performance counters.

```
$ perf stat ls -R /usr/src/linux
 Performance counter stats for 'ls -R /usr/src/linux':

        934.512846  task-clock-msecs         #      0.114 CPUs
             1695  context-switches         #      0.002 M/sec
              163  CPU-migrations           #      0.000 M/sec
              306  page-faults              #      0.000 M/sec
        725144010  cycles                   #    775.959 M/sec
        419392509  instructions             #      0.578 IPC
         80242637  branches                 #     85.866 M/sec
          5680112  branch-misses            #      7.079 %
        174667968  cache-references         #    186.908 M/sec
          4178882  cache-misses             #      4.472 M/sec

       8.199187316  seconds time elapsed
```

`perf stat` oferă posibilitatea colectării datelor în urma rulării de mai multe ori a unui program specificând opțiunea `-r`.

```
$ perf stat -r 6 sleep 1
 Performance counter stats for 'sleep 1' (6 runs):

          1.757147  task-clock-msecs #      0.002 CPUs    ( +-   3.000% )
                 1  context-switches #      0.001 M/sec   ( +-  14.286% )
                 0  CPU-migrations   #      0.000 M/sec   ( +- 100.000% )
               144  page-faults      #      0.082 M/sec   ( +-   0.147% )
           1373254  cycles           #    781.525 M/sec   ( +-   2.856% )
            588831  instructions     #      0.429 IPC     ( +-   0.667% )
            106846  branches         #     60.806 M/sec   ( +-   0.324% )
             11312  branch-misses    #     10.587 %       ( +-   0.851% )
       1.002619407  seconds time elapsed   ( +-   0.012% )
```

Observați mai sus evenimentele cele mai importante contorizate.

perf top

- man perf-top [http://manpages.ubuntu.com/manpages/natty/man1/perf-top.1.html]

Generează și afișează informații în timp real despre încărcarea unui sistem.

```
$ ls -R /home
$ perf top -p $(pidof ls)
------------------------------------------------------------------
   PerfTop:     181 irqs/sec  kernel:72.4% (target_pid: 10421)
------------------------------------------------------------------
             samples  pcnt function             DSO
             _______ _____ _____________________ ____________________

              270.00 15.8% __d_lookup           [kernel.kallsyms]
              145.00  8.5% __GI___strcoll_l     /lib/libc-2.12.1.so
               99.00  5.8% link_path_walk       [kernel.kallsyms]
               97.00  5.7% find_inode_fast      [kernel.kallsyms]
               91.00  5.3% __GI_strncmp         /lib/libc-2.12.1.so
               55.00  3.2% move_freepages_block [kernel.kallsyms]
               44.00  2.6% ext3_dx_find_entry   [kernel.kallsyms]
               41.00  2.4% ext3_find_entry      [kernel.kallsyms]
               40.00  2.3% dput                 [kernel.kallsyms]
               39.00  2.3% ext3_check_dir_entry [kernel.kallsyms]
```

Observăm că funcțiile de lucru cu fișiere (parcurgere, căutare) sunt cele care apar cel mai des în outputul lui perf-top corespunzător rulării comenzii de listare recursivă a directorului `home`.

perf record

- man perf-record [http://manpages.ubuntu.com/manpages/natty/man1/perf-record.1.html]

Rulează o comandă și salvează informațiile de profiling în fișierul `perf.data`.

```
$ perf record wget http://elf.cs.pub.ro/so/wiki/laboratoare/laborator-07

[ perf record: Woken up 1 times to write data ]
[ perf record: Captured and wrote 0.008 MB perf.data (~334 samples) ]

$ ls
laborator-07  perf.data
```

perf report

- man perf-report [http://manpages.ubuntu.com/manpages/natty/man1/perf-report.1.html]

Interpretează datele salvate în `perf.data` în urma analizei folosind `perf record`. Astfel pentru exemplul `wget` de mai sus avem:

```
$ perf report
# Events: 13  cycles
#
# Overhead  Command      Shared Object  Symbol
# ........  .......  .................  ......
#
    86.43%     wget             e8ee21  [.] 0x00000000e8ee21
    11.03%     wget  [kernel.kallsyms]  [k] prep_new_page
     2.37%     wget  [kernel.kallsyms]  [k] sock_aio_read
     0.11%     wget  [kernel.kallsyms]  [k] perf_event_comm
     0.05%     wget  [kernel.kallsyms]  [k] native_write_msr_safe
```

Unelte de debugging

strace

`strace` interceptează şi înregistrează apelurile de sistem făcute de un proces şi semnalele pe care acesta le primeşte. În cea mai simplă formă `strace` rulează comanda specificată până când procesul asociat se încheie.

```
$strace cat /proc/cpuinfo
execve("/bin/cat", ["cat", "/proc/cpuinfo"], [/* 30 vars */]) = 0
open("/proc/cpuinfo", O_RDONLY)         = 3
read(3, "processor\t: 0\nvendor_id\t: Genuin"..., 32768) = 3652
write(1, "processor\t: 0$\nvendor_id\t: Genui"..., 7512) = 7512
```

Cele mai folosite opțiuni pentru strace sunt:

- `-f`, cu această opțiune vor fi urmărite şi procesele copil create de procesul curent
- `-o filename`, în mod implicit strace afişează informațiile la `stderr`. Cu această opțiune, output-ul va fi pus în fişierul `filename`
- `-p pid`, pid-ul procesului de urmărit.
- `-e expresie`, modifică apelurile urmărite.

```
daniel@debian$ strace -f -e connect,socket,bind -p $(pidof iceweasel)
Process 6429 attached with 30 threads - interrupt to quit
socket(PF_INET, SOCK_STREAM, IPPROTO_IP) = 50
```

```
connect(50, {sa_family=AF_INET, sin_port=htons(80), sin_addr=inet_addr("141.85.227.65")}, 16) = -1 EINPROGRESS
```

Un alt utilitar înrudit cu `strace` este ltrace [http://linux.die.net/man/1/ltrace]. Acesta urmăreşte apelurile de bibliotecă.

gdb

Scopul unui debugger (de exemplu GDB, prin comanda `gdb`) este să ne permită să inspectăm ce se întâmplă *în interiorul* unui program în timp ce acesta rulează sau la terminarea execuției acestuia, în momentul când s-a produs o eroare fatală, pe baza fișierului *coredump* creat de către acesta.

Mai multe detalii în secțiunea de resurse [http://ocw.cs.pub.ro/courses/so/laboratoare/resurse/gdb].

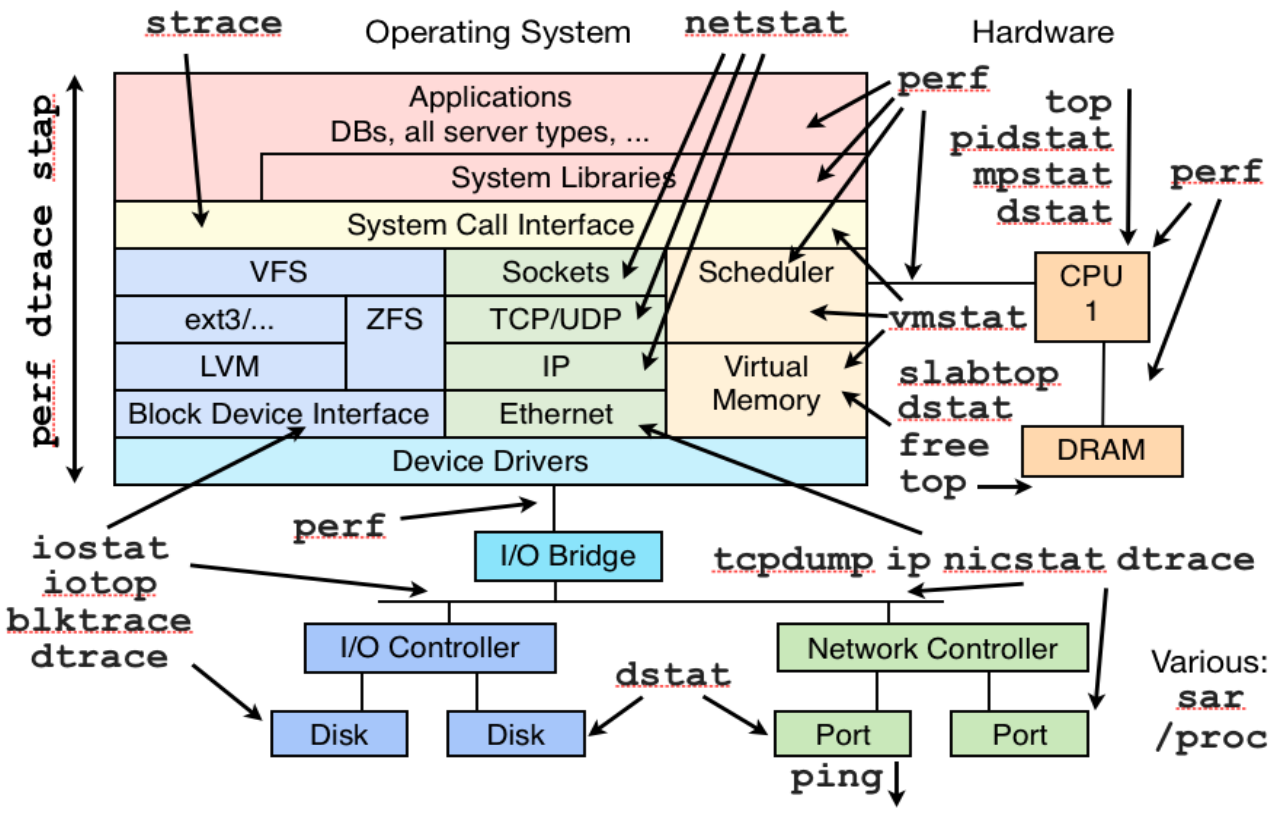
valgrind

Valgrind reprezintă o suită de utilitare folosite pentru debugging și profiling. Printre cele mai folosite tool-uri sau unelte din această suită sunt:

- `memcheck` - Realizează analiza utilizării memoriei
- `cachegrind` - Realizează analiza performanței cache-ului
- `helgrind` - Folosit pentru depanarea condițiilor de cursă în cadrul programelor cu multiple fire de execuție (multithreaded).

Mai multe detalii aici [http://ocw.cs.pub.ro/courses/so/laboratoare/laborator-05#valgrind].

Alte utilitare



- Oprofile [http://oprofile.sourceforge.net/download]
- Kernrate [http://www.microsoft.com/downloads/details.aspx?familyid=d6e95259-8d9d-4c22-89c4-fad382eddcd1&displaylang=en] este un echivalent al oprofile pentru Windows.
- KCachegrind [http://kcachegrind.sourceforge.net/html/Home.html]
- perf-tools [http://code.google.com/p/google-perftools/]
- XPerf [http://metadataconsulting.blogspot.com/2017/05/How-to-install-and-use-Windows-Performance-Toolkit.html]
- GNU gprof [http://sourceware.org/binutils/docs/gprof]

Exerciții

Folosiți arhiva lab07-tasks.zip [http://elf.cs.pub.ro/so/res/laboratoare/lab07-tasks.zip] aferentă laboratorului.

Linux

Întrucât avem nevoie de suport hardware, suport inexistent pe mașina virtuală, **lucrați pe sistemul fizic**.

Pentru a vedea ce pachet trebuie să instalați, rulați comanda `perf` fără parametri.

Pentru a putea face exercițiile e nevoie de pachetul `linux-tools`. Puteți verifica asta rulând comanda `perf --help`. Dacă utilitarul `perf` nu este găsit, trebuie să instalați pachetul folosind comenzile:

```
student@so:~$ sudo apt-get update
student@so:~$ sudo apt-get install linux-tools-4.15.0-34-generic
```

Exercițiul 1 - Custom Profiling

Scopul exercițiului este să analizăm numărul de instrucțiuni executate de către procesor pe baza unui executabil. Perf pune la dispoziție un mod de a extrage datele importante din profiling prin suportul de scripting oferit de `perf script`. Acesta funcționează împreună cu `perf record` care obține lista de sample-uri și o salvează în fișierul `perf.data`.

Intrați în directorul `1-custom`. Primul pas este să generăm fișierul `perf.data` care conține sampleurile. Pentru asta executați :

```
make
sudo perf record -e cycles:pp -c 10000 -d ./hash
```

Folosiți comanda `perf script` cu opțiunea `-F` (investigați `man perf-script`) astfel încât să gasiți numărul total de valori ale `instruction pointer-ului` și apoi pe cele aflate în funcția `hash_search_index`. Având cele două valori, calculați procentul valorilor din funcția `hash_search_index`.

Folosiți `wc -l` pentru a număra liniile outputului și `grep` pentru a filtra după simbolul `hash_search_index`. Pentru a face calcule cu numere raționale folosiți o comandă de tipul: `echo 7/2 | bc -l`.

Opțional, puteți folosi script-ul pus la dispoziție în cadrul laboratorului pentru a calcula numărul de accese în cadrul funcției `hash_search_index`. Cu ajutorul lui perf script se pot parsa eventurile înregistrate în sample-uri în metoda `process_event`. Mai multe informații despre `perf script` se pot găsi la: man perf-script-python [http://man7.org/linux/man-pages/man1/perf-script-python.1.html] și exemplu de utilizare [https://lwn.net/Articles/620900/]

Verificați rezultatul utilizând comanda `perf report`.

Exercițiul 2 - Row/Column major order

Folosind utilitarul `perf_3.2` dorim să determinăm dacă limbajul C este column-major sau row-major (row-major-order [http://en.wikipedia.org/wiki/Row-major_order]).

Intrați în directorul `2-major` și completați programul `row.c` astfel încât să incrementeze elementele unei matrice pe linii, după care completați programul `columns.c` astfel încât să incrementeze elementele unei matrice pe coloane.

Determinați numărul de cache-miss-uri comparativ cu numărul de accese la cache folosind `perf stat` pentru a urmări evenimentul `L1-dcache-load-misses`. Pentru a vedea evenimentele disponibile folosiți comanda `perf list`. Folosiți opțiunea `-e` a utilitarului `perf` pentru a specifica un anumit eveniment de urmărit (revedeți secțiunea perfcounters).

Exercițiul 3 - Busy

Intrați în directorul `3-busy` și inspectați fișierul `busy.c`. Rulați programul `busy` și analizați încărcarea sistemului folosind comanda `sudo perf top`. Ce funcție pare să încarce sistemul?

Exercițiul 4 - Căutare într-un șir de caractere

Intrați în directorul `4-find-char/` și analizați conținutul fișierului `find-char.c`. Compilați fișierul `find-char.c` și rulați executabilul obținut.

Identificați, folosind `perf record` și `perf report`, care este funcția care ocupă cel mai mult timp de procesor și încercați să îmbunătățiți performanțele programului.

Exercițiul 5 - Printing order

Intrați în directorul `5-print/` și analizați conținutul fișierului `print.c`. Folosiți comanda `make print` pentru a compila programul `print`. Există fișierul `Makefile`?

Care este ordinea în care se fac scrierile la consolă? Explicați output-ul.

Puneți o instrucțiune `sleep(5)` înainte de `return 0;` în funcția `main` și folosiți comanda `strace -e write ./print` pentru a găsi explicația.

Exercițiul 6 - Flowers reloaded

Intrați în directorul `6-flowers/` și analizați conținutul fișierului `flowers.c`. Compilați fișierul `flowers.c` şi rulați executabilul `flowers`. Ce se întâmplă? Folosiți `valgrind` cu opțiunea `--tool=memcheck`. Afișați valoarea celui de-al treilea element al array-ului `flowers`, adică `flowers[2]`.

Exercițiul 7 - Buffer overflow exploit

Rezolvați acest exercițiu pe mașina virtuală.

Intrați în directorul `7-exploit/` și analizați conținutul fișierului exploit.c. Folosiți comanda `make` pentru a compila executabilul `exploit`. Identificați o problemă în funcția `read_name`.

Folosiți `gdb` pentru a investiga stiva înaintea efectuării apelului `read`.

```
student@spook:~ gdb ./exploit
(gdb) break read_name
(gdb) run
```

Afișați adresele variabilelor `name` și `access`.

```
(gdb) print/x &access
(gdb) print/x &name
```

Observați că diferența între adresa variabilei `access` și adresa bufferului `name` este de 0x10 (16) octeți, ceea ce înseamnă că variabila `access` se află imediat la sfârșitul datelor din bufferul `name`.

Este posibil ca diferența dintre `access` și `name` să difere în funcție de arhitectura pe care lucrați. Calculați diferența dintre cele două adrese folosind valorile printate de `gdb`

Folosindu-vă de informațiile obținute, construiți un input convenabil pe care să îl oferiți executabilului `exploit`, astfel încât acesta să vă afișeze stringul "Good job, you hacked me!".

Pentru a genera caractere neprintabile, puteți folosi interpretorul Python: `python -c`.

```
student@spook:~ python -c 'print "A"*8 + "\x01\x00\x00\x00"' | ./exploit
```

Comanda de mai sus va genera 8 octeți cu valoarea 'A' (codul ASCII 0x41), un octet cu valoarea 0x01 și încă 3 octeți cu valoarea 0x00 și îi va oferi la `stdin` executabilului `exploit`. Rețineti că datele sunt

structurate în memorie în format little endian, prin urmare, dacă ultimii 4 octeți vor ajunge să suprascrie o adresă, aceasta va fi interpretată ca `0x00000001`, NU `0x01000000`.

Exercițiul 8 - Trace the mystery

Intrați în directorul `8-mystery/` unde găsiți executabilul `mystery`. Investigați și explicați ce face acesta. Revedeți secțiunea strace.

Soluții

- Soluții laborator 7 [http://elf.cs.pub.ro/so/res/laboratoare/lab07-sol.zip]

Resurse utile

- GNU grof manual [http://sourceware.org/binutils/docs/gprof/]
- linux/tools/perf [http://lxr.linux.no/linux+v2.6.38/tools/perf/]
- [Announce] Performance Counters for Linux, v8 [http://lkml.org/lkml/2009/6/6/149]
- Profiling tools and techniques [http://www.pixelbeat.org/programming/profiling/]
- Is Parallel Programming Hard, And, If So, What Can You Do About It? [http://kernel.org/pub/linux/kernel/people/paulmck/perfbook/perfbook.html]
- gprof, Valgrind and gperftools – an evaluation of some tools for application level CPU profiling on Linux [http://gernotklingler.com/blog/gprof-valgrind-gperftools-evaluation-tools-application-level-cpu-profiling-linux/]
- Linux Profiling Tools and Techniques [http://www.pixelbeat.org/programming/profiling/]

so/laboratoare/laborator-07.txt · Last modified: 2020/04/05 11:42 by dragos_florin.costea