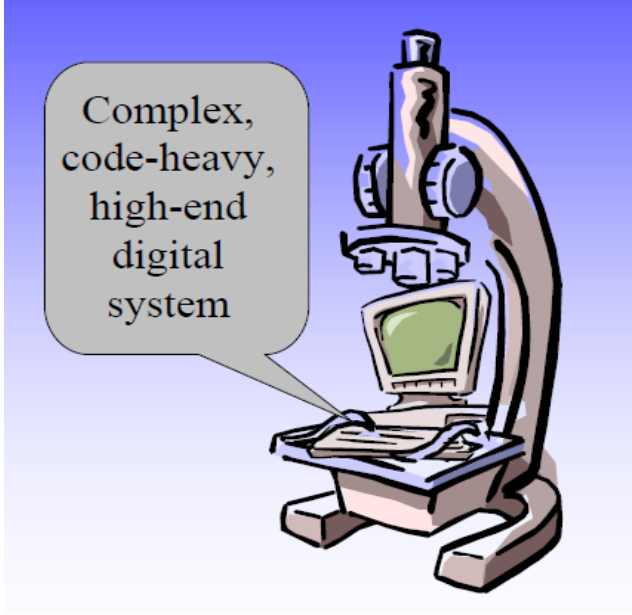
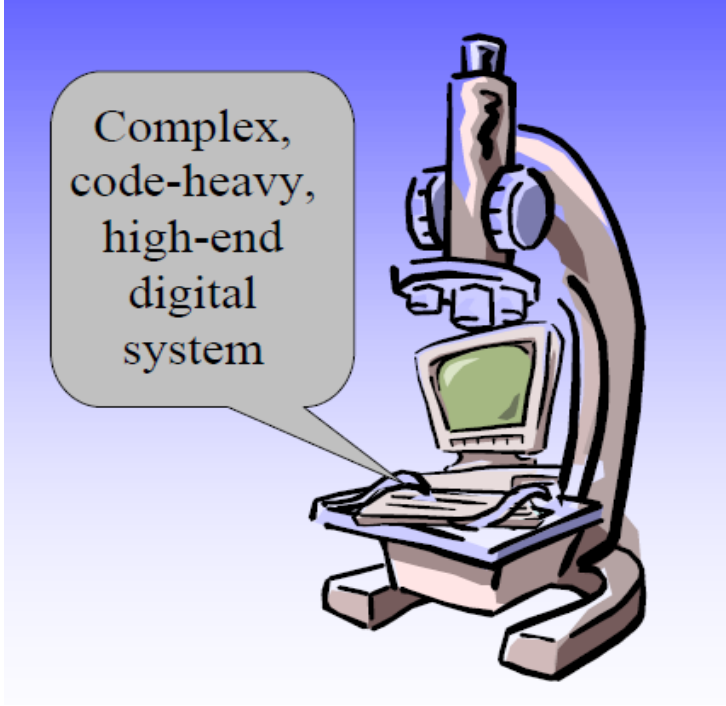
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ

Computer Architecture



- Processor Design
  - Single thread → pipeline, branch prediction
  - Multiple threads → SMT resource allocation, threads scheduling
- Ετερογενείς αρχιτεκτονικές
  - General Purpose Computing, Gaming, and Entertainment Devices
    - Cell (PS3)
    - Intel Sandy Bridge, Ivy Bridge, Haswell
    - AMD Fusion, AMD APUs (Jaguar in PS4)
  - Intel Stellarton (Atom E600C + Alter FPGA)
  - ARM (big.LITTLE)
  - HSA architectures

Computer Architecture



- Ιεραρχία μνήμης
  - Multiple levels
  - Cache sharing
  - NUMA
  - Coherence Protocols
- Παράλληλα συστήματα
  - Coherence, Δίκτυα διασύνδεσης
  - Compilers, automatic parallelization
  - Programming Models, synchronization costs, locks, computation and communication oveheads

Τρόποι Υλοποίησης

- Χρήση υπαρχόντων μηχανημάτων
  - Μεγάλο κόστος
    - » Oracle SPARC Enterprise T5120 server (2*16*8=256 threads, 512GB mem) ~ 64K $ (2014)
    - » Intel Sandy Bridge E5-4620 (4 * 8 cores, 64 threads) ~ 15K $ (2013)
  - Αδυναμία παρέμβασης στο υλικό τους
    - » pipeline, caches, interconnection network
  - Περιορισμένη δυνατότητα παρακολούθησης και μετρήσεων
    - » performance counters → λίγοι, μικρό documentation
  - Περιορισμός στο σήμερα
    - » μελλοντικές αρχιτεκτονικές (π.χ. chip με 100 ή 1000 threads) ;

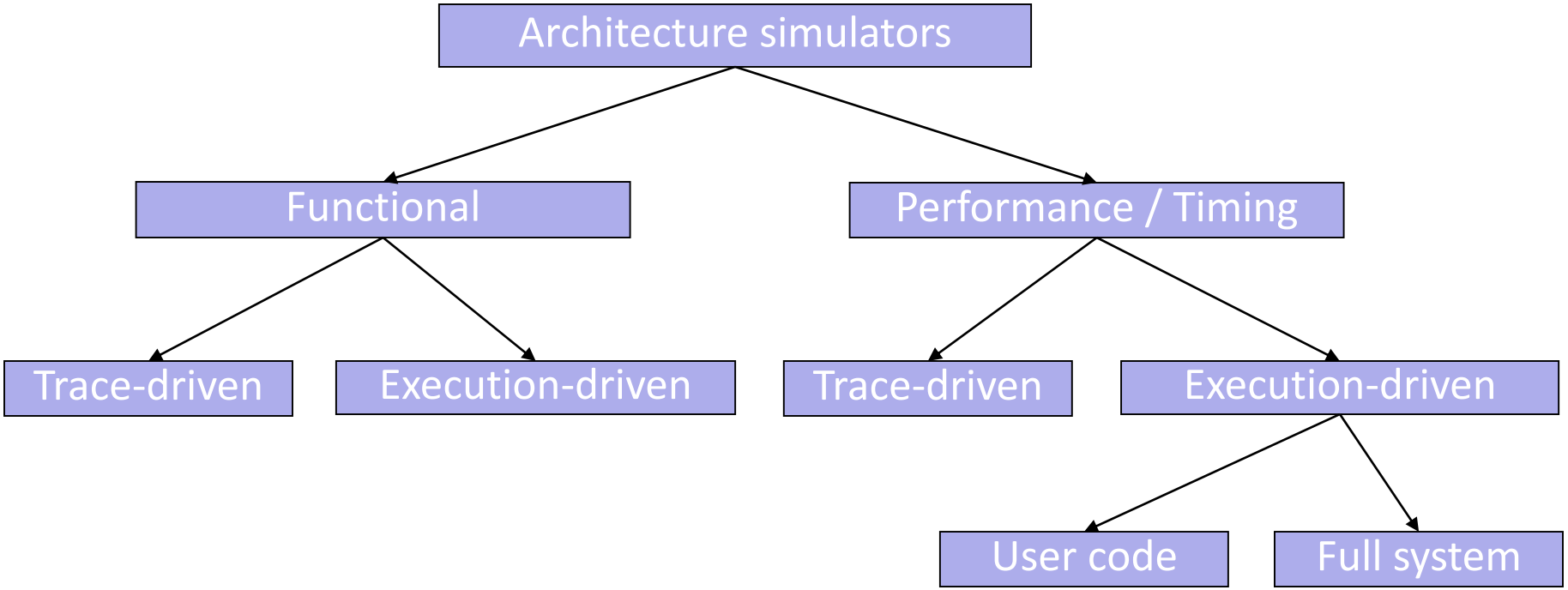
- Λύση : Simulation (προσομοίωση)

Τι είναι ο simulator;

- Ένα εργαλείο που αναπαράγει τη «συμπεριφορά» ενός υπολογιστικού συστήματος.

- Γιατί να χρησιμοποιήσουμε ένα simulator;
  - Πληροφορίες σχετικά με την εσωτερική λειτουργία
    - » Performance Analysis
  - Δυνατότητα ανάπτυξης λογισμικού για μη διαθέσιμες (ή και μη υπαρκτές) πλατφόρμες
  - Προβλέψεις απόδοσης για διαφορετικές αρχιτεκτονικές.

Simulator taxonomy



Functional vs. Timing Simulators

- Functional Simulators
  - Visible architectural state
  - Προσομοίωση της λειτουργικότητας των εντολών (instructions semantics and functionality), μεταβολή του state (registers, memory)
  - Σωστό program output
  - Κύριος σκοπός: Software development and/or emulation
- Timing Simulators
  - Microarchitecture details
  - Λεπτομερής υλοποίηση των διαφορετικών δομών (pipeline, branch predictors, interconnection networks, memory hierarchy, etc.)
  - Χρονισμός γεγονότων, προκειμένου να υπολογισθεί ο χρόνος εκτέλεσης του προγράμματος
- Functional simulation πολύ πιο γρήγορο

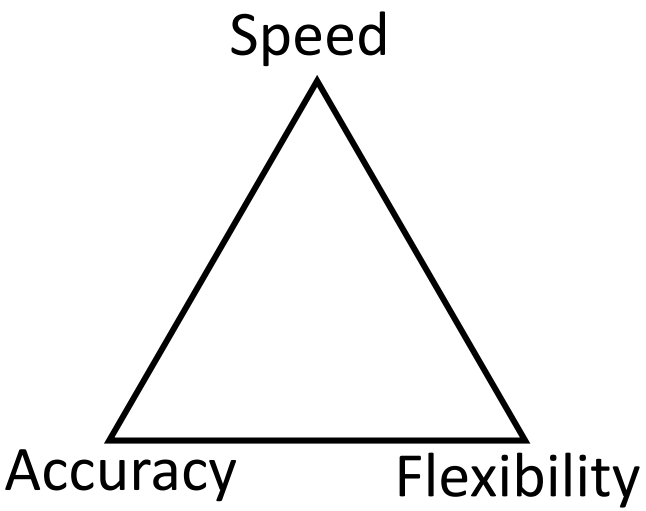
Trace vs. Execution-driven Simulators

- Trace Simulators
  - Εκτέλεση της εφαρμογής σε πραγματική πλατφόρμα → trace (instruction, address, …)
  - Τα traces χρησιμοποιούνται σαν inputs του simulator
- Execution-driven Simulators
  - Ο simulator εκτελεί την εφαρμογή
  - Διατήρηση application state και architecture state
- Trace-driven simulation συνήθως πιο γρήγορο
  - Διατήρηση μόνο του architecture state, δεν εκτελούνται όλοι οι υπολογισμοί
- Τα traces επιτρέπουν την προσομοίωση proprietary applications & input sets.
- **Πρόβλημα**: Τα traces δεν μπορούν να συλλάβουν/φανερώσουν την δυναμική συμπεριφορά της εφαρμογής

User code vs. Full system simulators

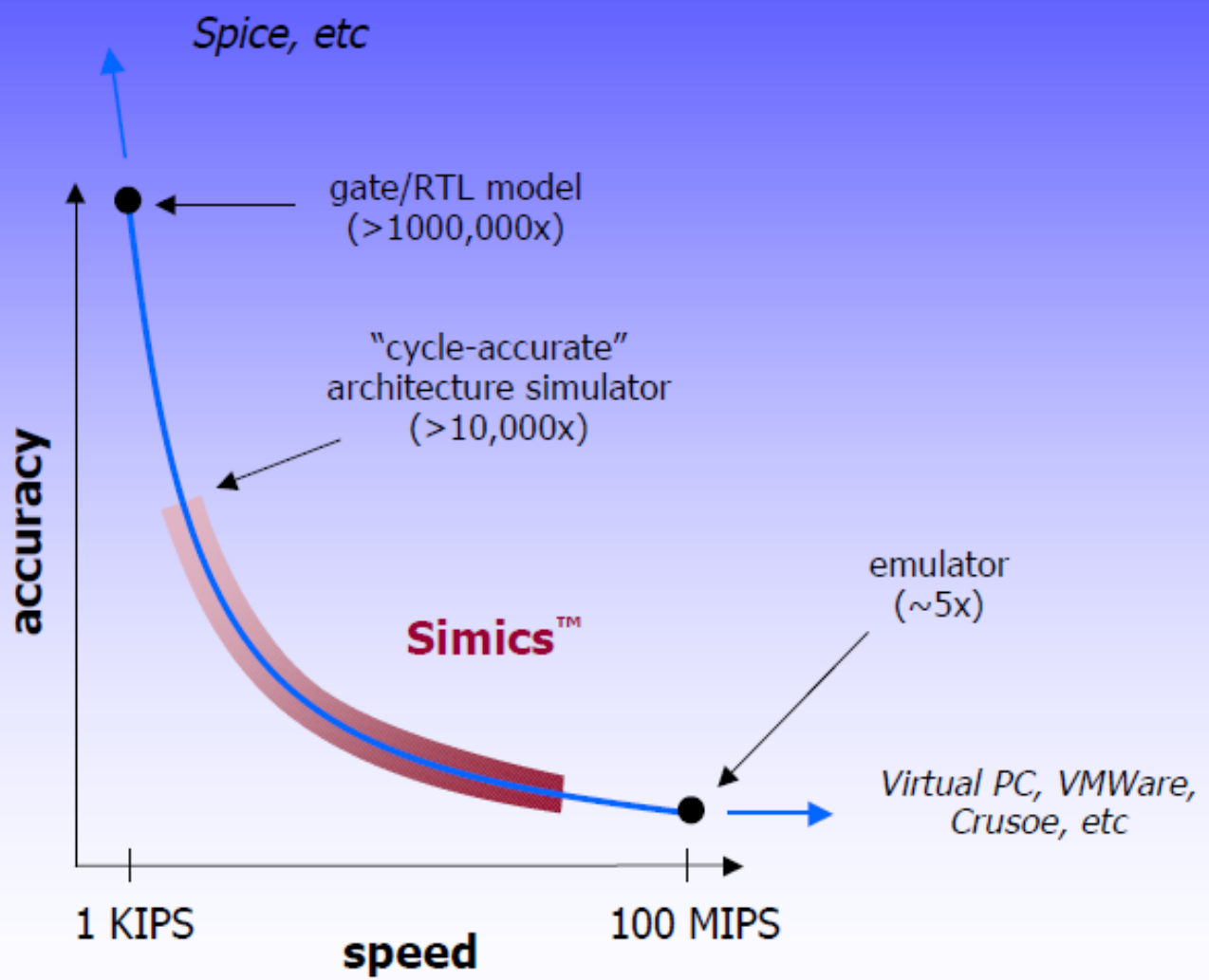
- User code Simulators
  - Προσομοίωση μόνο του κώδικα της εφαρμογής
  - System calls και I/O εκτελούνται με functional simulation
  - Συνήθως το functional emulation πραγματοποιείται από το host OS
    - » host OS = target OS
- Full system Simulators
  - Προσομοίωση της εφαρμογής
  - Προσομοίωση του OS
  - Προσομοίωση των devices (disks, network, etc.)

The Zen of architecture simulators



- Δεν υπάρχει ο τέλειος simulator
- FPGA prototypes
  - Γρήγορα, ακριβή, αλλά έλλειψη ευελιξίας
- Λεπτομερή software μοντέλα
  - Ακριβή, ευέλικτα, αλλά αργά
- Αφηρημένα software μοντέλα
  - Γρήγορα, ευέλικτα αλλά όχι ακριβή

Speed vs. Accuracy



virtutech

Παράδειγμα χρόνων προσομοίωσης (1)

- spec2k with gcc and small inputs

	Time	Ratio to Native	Ratio to Functional
Native	1,054s	--	--
sim-fast	2m 47s	158x	1
sim-outorder	1h 11m 07s	4,029x	25x
simics	7m 41s	437x	1
w/Ruby	11h 27m 25s	39,131x	89x
w/Ruby + Opal	43h 13m 41s	147,648x	338x

Παράδειγμα χρόνων προσομοίωσης (2)

- Οι πραγματικές εφαρμογές παίρνουν ώρες σε πραγματικά μηχανήματα
- Χρειαζόμαστε αρκετά μεγάλες ταχύτητες για να τρέξουμε ένα σημαντικό κομμάτι αυτών των εφαρμογών.

	Number of Ops (B)
Windows XP Boot	5
Linux RH 6.0 Boot	4
Windows XP Install	361
SPECint2000 (train)	279

virtutech

Προσομοίωση Αρχιτεκτονικής (1)

- Απαιτήσεις
  - Γενικότητα (Generality)
    - » Μπορεί το εργαλείο να αναλύσει τα workloads?
    - » Parallel Systems, Multithreading, Multiple address spaces, OS code, Network Systems, etc.
  - Πρακτικότητα (Practicality)
    - » Μπορεί το εργαλείο να χρησιμοποιηθεί αποδοτικά;
    - » Host assumptions, compiler assumptions, OS modifications, workload language assumptions
  - Εφαρμοσιμότητα (Applicability)
    - » Μπορεί το εργαλείο να απαντήσει στα ερωτήματα μας;
    - » Restricted state that can be monitored, restrictions on parameter visibility, restricted length of observations.

Προσομοίωση Αρχιτεκτονικής (2)

- Πλεονεκτήματα
  - Early availability
  - Ευκολία χρήσης
    - » Πλήρης διαφάνεια και ευκολία παρακολούθησης και μετρήσεων
    - » Διαφορετικά επίπεδα λεπτομέρειας και ακρίβειας
      - Pipelines, caches, branch predictors, …
      - Hardware devices (timer, drives, cards, …)
    - » Έλεγχος καινοτόμων προτάσεων/ιδεών
  - Κόστος
    - » Open source (Free)
    - » Academic licenses (Free ή μικρό κόστος για support)

Προσομοίωση Αρχιτεκτονικής (3)

- Προκλήσεις
  - Χρόνος ανάπτυξης των μοντέλων (modeling time)
  - Έλεγχος ορθότητας μοντέλων (validation)
  - Ταχύτητα προσομοίωσης
- Ενεργό ερευνητικό πεδίο
- Πληθώρα επιλογών
  - WindRiver Simics (x86, SPARC, MIPS, Leon, ARM…)
  - AMD SimNow (x86)
  - Simplescalar (Alpha, PISA, ARM, x86)
  - SimFlex
  - MARSSx86
  - SniperSim

Επιλογή περιβάλλοντος προσομοίωσης

- Κριτήρια Επιλογής
  - Modularity simulator
  - Extensibility simulator
  - Επίπεδο ακρίβειας simulator
  - Ταχύτητα simulator
  - Μέγεθος του design space που θέλουμε να μελετήσουμε
  - Επιλογή κατάλληλων benchmarks

Αποτελέσματα Προσομοίωσης(1)

- Ο σκοπός ενός timing simulation είναι η συγκέντρωση πληροφοριών και μέτρηση διαφόρων μεγεθών
  - IPC
  - Memory access cycles
  - On-chip network contention
- Τα προγράμματα παρουσιάζουν διαφορετικές φάσεις
  - Initialization phase
  - Main phase
  - Wrap-up phase
- Πότε παίρνουμε τα στατιστικά που μας ενδιαφέρουν;

Αποτελέσματα Προσομοίωσης(2)

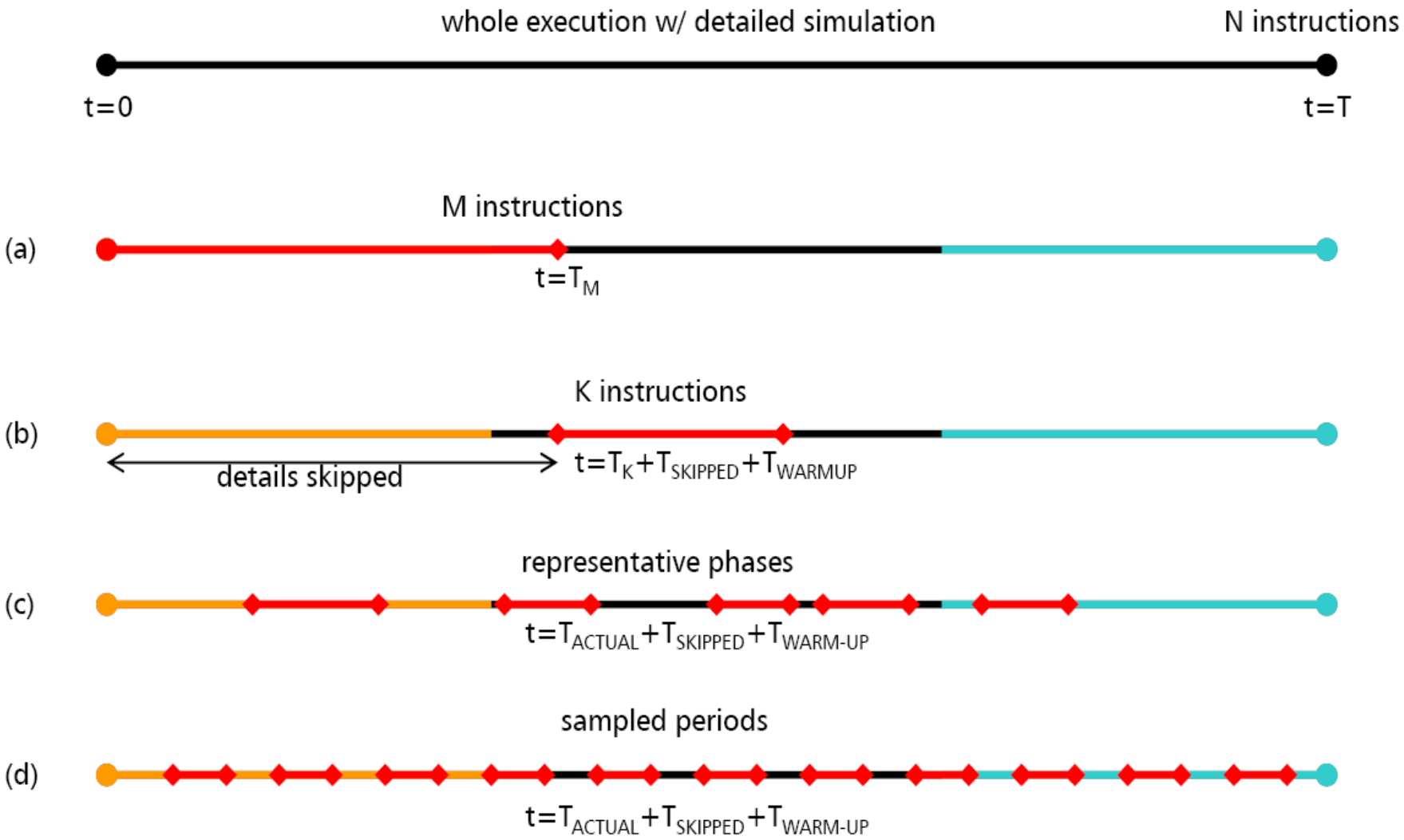
- Η προσομοίωση είναι ένα single-thread process
  - Ακόμα και αν προσομοιώνουμε ένα παράλληλο σύστημα
- Η ταχύτητα προσομοίωσης δε βελτιώνεται πια με την τεχνολογία
  - Παράλληλα συστήματα τρέχουν πολλαπλές προσομοιώσεις ταυτόχρονα.

- Δεν μπορούμε να φτιάξουμε γρήγορους simulators
  - Δεν προσομοιώνουμε ολόκληρο το σύστημα
  - Δεν προσομοιώνουμε ολόκληρη την εφαρμογή

Αποτελέσματα Προσομοίωσης(3)

- Προσομοίωση μικρότερου συστήματος
  - π.χ. 16 cores αντί για 1024
  - Δεν εκθέτει θέματα κλιμακωσιμότητας (scalability)
    - » Ανταγωνισμός για shared resources
    - » Conflicts
    - » Race conditions
- Προσομοίωση μικρότερης εφαρμογής
  - π.χ. Matrix multiply 1K x 1K αντί για 1M x 1M
  - Δεν εξετάζει τα όρια του hardware
    - » Το working set χωράει στις caches
    - » Capacity/conflict issues
    - » Λιγότερη επαναχρησιμοποίηση data/code
    - » Initialization vs. steady state

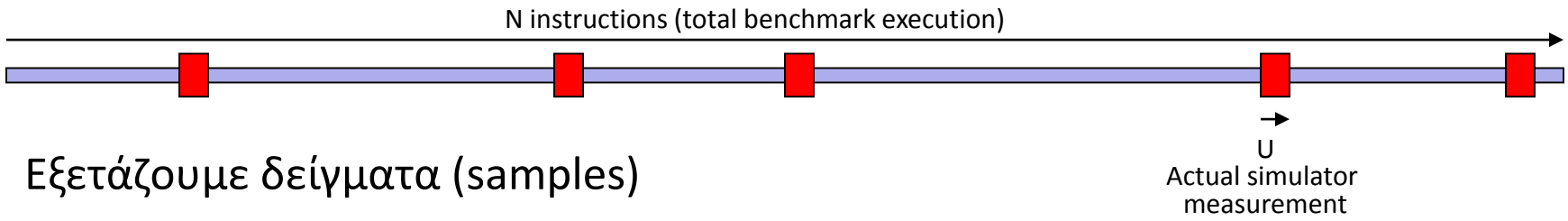
Τεχνικές Προσομοίωσης (1)



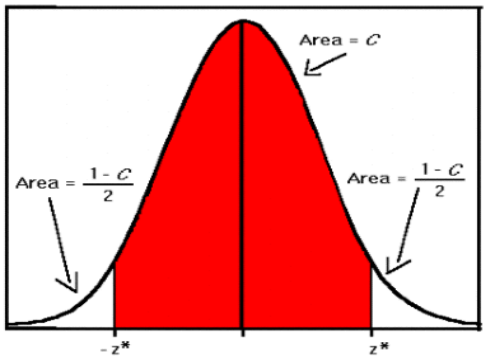
Τεχνικές Προσομοίωσης – Sampling (2)

- Sampling
  - Προσομοίωση τυχαίων σημείων της εφαρμογής
- Fast-forwarding
  - Μέχρι να φτάσουμε στο sample point
- Warm-up
  - Γρήγορη προσομοίωση πριν τη φάση των μετρήσεων
- Checkpointing
  - Αποθήκευση architectural state πριν το sample
- Phase detection
  - Επιλογή των samples μετά από ανάλυση της εφαρμογής

Τεχνικές Προσομοίωσης – Sampling (2)



- Εξετάζουμε δείγματα (samples)
- Μαθηματική προσέγγιση
  - confidence margin (eg. 95%)
  - confidence interval (eg. +/- 2.5)
- Δυο προσεγγίσεις σχετικά με την επιλογή δειγμάτων
  - Systematic sampling (π.χ. sample every N instructions)
  - Random sampling
  - Non-random sampling (phase detection, simpoints)
- Μεθοδολογία Προσομοίωσης:
  1. Fast-forwarding
  2. Warm-up (caches, branch predictors, TLBs, OS)
  3. Checkpointing
  4. Μέτρηση



Ενορχήστρωση - Instrumentation

- Εισαγωγή επιπλέον κώδικα στην εφαρμογή με στόχο την συλλογή πληροφοριών για την εκτέλεση (cache misses, total instructions executed etc.)
  - Ανάλυση προγράμματος: Performance profiling, error detection, capture & replay
  - Μελέτη Αρχιτεκτονικής: Processor & cache simulation, trace collection
  - Binary translation: Emulate unsupported instructions, modify program behavior

Τεχνικές Ενορχήστρωσης

- Source instrumentation
  - Εισαγωγή εντολών στον πηγαίο κώδικα της εφαρμογής
- Binary instrumentation
  - Εισαγωγή εντολών στο εκτελέσιμο της εφαρμογής

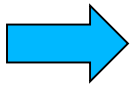
1. Static binary instrumentation
   - » Εισαγωγή των εντολών **πριν** την εκτέλεση
2. Dynamic binary instrumentation
   - » Εισαγωγή των εντολών **δυναμικά κατά την εκτέλεση**

Source Instrumentation – Παράδειγμα (1)

Αρχικό πρόγραμμα

```
void foo() {
  bool found = false;
  for (int i=0; i<100; ++i) {
    if (i==50) break;
    if (i==20) found=true;
  }

  printf("foo\n");
}
```



Instrumented

```
char inst[5];
void foo() {
  bool found = false;inst[0]=1;
  for (int i=0; i<100; ++i) {
    if (i==50) {inst[1]=1;break;}
    if (i==20) {inst[2]=1;found=true;}
    inst[3]=1;
  }

  printf("foo\n");
  inst[4]=1;
}
```

Binary Instrumentation – Παράδειγμα (2)

Total Instructions counter

```
counter++;
Sub   $0xff, %edx
counter++;
cmp   %esi,  %edx
counter++;
jle   <L1>
counter++;
mov   $0x1,  %edi
counter++;
add   $0x10, %eax
```

Binary Instrumentation – Παράδειγμα (3)

Instruction Trace

```
Print(ip);
sub   $0xff, %edx
Print(ip);
cmp   %esi,  %edx
Print(ip);
jle   <L1>
Print(ip);
mov   $0x1,  %edi
Print(ip);
add   $0x10, %eax
```

Πλεονεκτήματα Ενορχήστρωσης

- Binary Instrumentation
  - Language independent
  - Machine-level view
  - Instrument legacy/proprietary software
- Dynamic Instrumentation
  - Δεν χρειάζεται recompile/relink
  - Εντοπισμός κώδικα κατά την εκτέλεση
  - Δυνατότητα χειρισμού κώδικα που παράγεται δυναμικά
  - Δυνατότητα ενορχήστρωσης running processes

Intel's PIN

- Εργαλείο για dynamic binary instrumentation.
- Αναπτύσσεται και συντηρείται από την Intel.
- Περισσότερες πληροφορίες:

https://software.intel.com/en-us/articles/pin-a-dynamic-binary-instrumentation-tool

- Χαρακτηριστικά/Πλεονεκτήματα
  - Εύκολη ενορχήστρωση
  - Programmable (APIs)
  - Multiplatform (x86, x86-64, Windows, Linux, OSX, Android)
  - Robust
    - » Real-life apps: Database, web browseres, …
    - » Multithreaded apps
    - » Signals
  - Υψηλής Απόδοσης (compiler optimizations on instrumentation code)
  - Ευρεία αποδοχή από την ακαδημαϊκή κοινότητα και την βιομηχανία

PIN – Χρήση

Download latest version:

https://software.intel.com/en-us/articles/pintool-downloads

Unzip:

```
$ tar xvfz pin-2.14-71313-gcc.4.4.7-linux.tar.gz
$ cd pin-2.14-71313-gcc.4.4.7-linux
$ ls -aF
./ ../ doc/ extras/ ia32/ intel64/ LICENSE pin pin.sh README redist.txt
source/
```

Execute:

```
$ ./pin.sh -t pintool - application
```

ή

```
$ ./pin.sh -t pintool -pid 1243
```

PIN – Παράδειγμα

```
$ ./pin.sh -t inscount0.so -- /bin/ls
```


Total instructions count pintool

```
$ cd source/tools/ManualExamples/
$ make inscount0.so
$ ls obj-intel64/inscount0.so
```

Pintools

- Προγράμματα γραμμένα σε C++
- Χρησιμοποιούνται κατά την εκτέλεση του PIN για την ανάλυση της εφαρμογής
- Χρησιμοποιούν το PIN API:
  - INS_AddInstrumentFunction(…);
  - INS_InsertCall(…);
  - …
- PIN API reference:
  - https://software.intel.com/sites/landingpage/pintool/docs/55942/Pin/html/group__API__REF.html

Pintool code

```
#include <iostream>
#include "pin.h"

UINT64 icount = 0;

void docount() {
  icount++;
}

void Instruction(INS ins, void *v) {
  INS_InsertCall(ins,IPOINT_BEFORE,(AFUNPTR)docount,IARG_END);
}

void Fini(INT32 code, void *v){
  std::cerr << "Count " << icount << "\n";
}

int main(int argc, char *argv[]) {
  PIN_Init(argc, argv);
  INS_AddInstrumentFunction(Instruction, 0);
  PIN_AddFiniFunction(Fini, 0);
  PIN_StartProgram();
  return 0;
}
```

analysis routine

instrumentation routine

end routine

Δυνατότητες Pin & Pintools

- Αντικατάσταση των application functions.
- Εντοπισμός/καταγραφή/έλεγχος κάθε application instruction.
- Πέρασμα παραμέτρων στο instrumentation routine
  - register values, register values by reference (for modification)
  - memory addresses read/written
  - full register context
- Εντοπισμός syscalls και αλλαγή arguments
- Εντοπισμός/έλεγχος application threads
- …
- …