Szoftverellenőrzési technikák

Futásidő, memóriahasználat monitorozása (profiling)

Majzik István és Micskei Zoltán
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék
http://www.inf.mit.bme.hu/

Tartalomjegyzék

- Motiváció
  - Célkitűzés: Belső működés analízise
- A profiling általános problémái
  - Felműszerezés, triggerelés, regisztrálás
  - Szoftver és hardver monitorozás
- Futásidő profiling
  - Teljesítményproblémák felderítése
- Memóriahasználat profiling
  - Memóriaproblémák monitorozása

Célkitűzések

- Mi a profiling?
  - Dinamikus program analízis (belső működés vizsgálata),
  - a végrehajtás (tesztelés) során gyűjtött információk alapján,
  - a hibák, optimalizálási lehetőségek felderítése érdekében
- Az információgyűjtés (monitorozás) tipikus szempontjai
  - Futásidő adatok felvétele (pl. hívásidő, hívási gyakoriság)
  - Memóriafoglalás követése (pl. elmaradt felszabadítás)
- A profiling analízis része:
  A gyűjtött információ felhasználása fejlesztői szinten
  - Hibakeresés: Hol állt le a program?
  - Teljesítmény viszonyok vizsgálata: Mit érdemes gyorsítani?
  - Memóriahasználati viszonyok: Mit lehet optimalizálni?
- Amivel most nem foglalkozunk:
  - Teljesítmény modellezés, változásbecslés, optimalizálás, benchmark tervezés, felhasználói profilok felvétele, ...

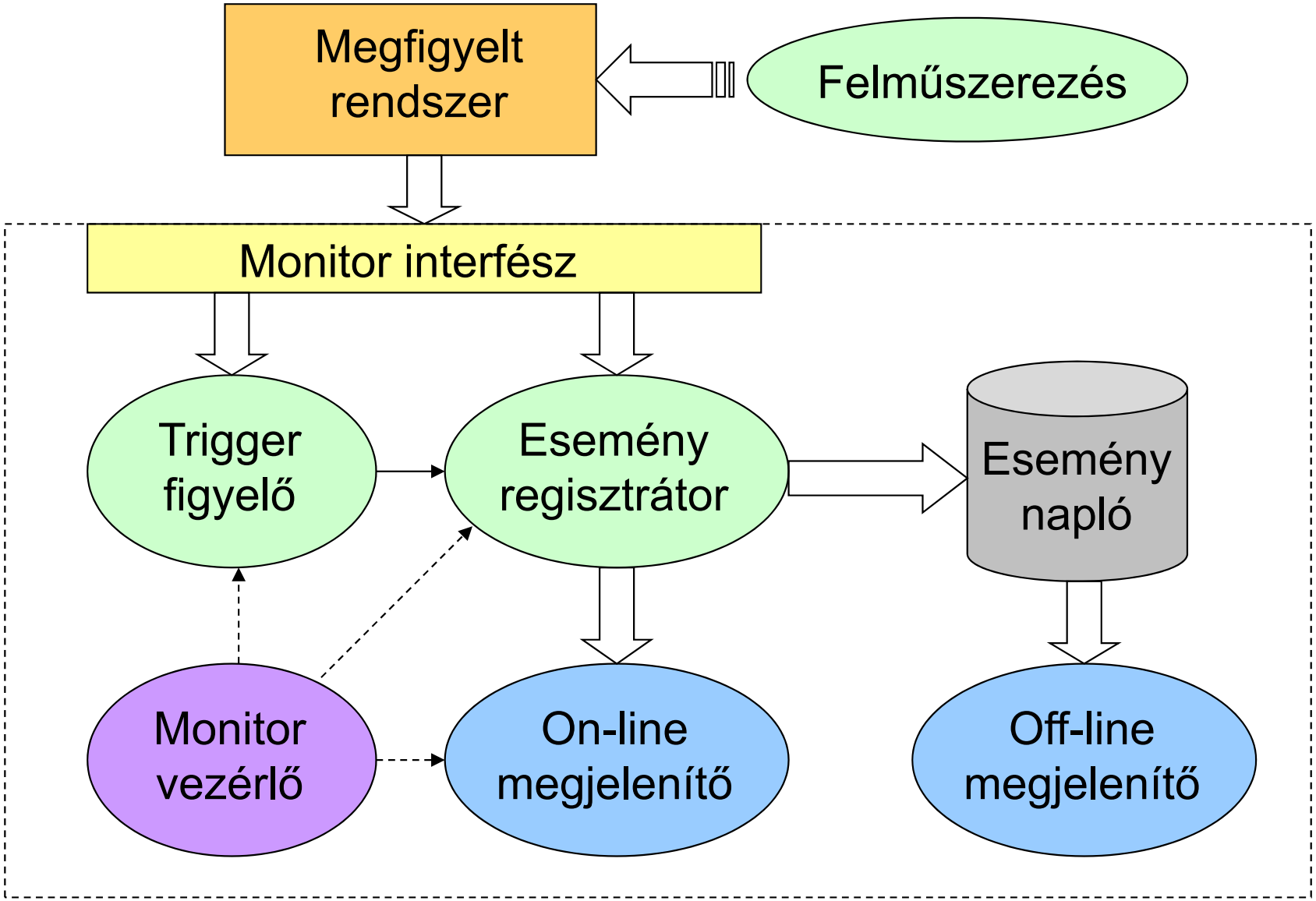
Tartalomjegyzék

- Motiváció
  - Célkitűzés: Belső működés analízise
- A profiling általános problémái
  - Felműszerezés, triggerelés, regisztrálás
  - Szoftver és hardver monitorozás
- Futásidő profiling
  - Teljesítményproblémák felderítése
- Memóriahasználat profiling
  - Memóriaproblémák monitorozása

A monitorozás alapműveletei

- Információgyűjtés:
  - Releváns információk: idők, erőforráshasználat, kommunikáció, ...
  - Periodikus információgyűjtés: mintavételezés (pillanatképek)
  - Eseményfüggő információgyűjtés: instrumentáció (eseményekre)
    - Kiterjeszthető esemény nyomkövetésre (nem csak aggregált profilok)
- Általános feladatok:
  - Információ hozzáférés: Felműszerezés
    - Szoftver úton: Extra utasítások beszúrása (ált. forráskódba)
    - Hardver úton: Illesztés a rendszerbuszra, csatornára, …
  - Információ szűrés: Triggerelés
    - Szoftver úton: Felműszerezés része (extra utasítások megoldják)
    - Hardver úton: Jelek, jelminták figyelése (pl. buszon)
  - Információ tárolás: Regisztrálás
    - Szoftver úton: Naplózás memóriába vagy fájlba szoftver modulból
    - Hardver úton: Rögzítés külső tárba (pl. körpuffer)

Általános monitorozási séma



Példa: Előfeldolgozás (felműszerezés)

```
for (i=0; i<9; i++) {
    V(sm1);
    if (i==a) {
            P(sm1);
    } else {
            P(sm2);
    }
}
```

Elő-feldolgozó

```
for (i=0; i<9; i++) {
    EV(V1); V(sm1);
    if (i==a) {
            EV(P1); P(sm1);
    } else {
            EV(P2): P(sm2);
    }
}
```

```
void switch_up() {
  if( gear == 5 ) {
    error();
    return;
  }
  set_gear( gear+1 );
}
```

```
char _TABLE[NUM_BLOCK / 8];
void switch_up() {
  if( gear == 5 ) {
    error();
    _TABLE[17/8] |= (1<<(17%8));
    return;
  }
  set_gear( gear+1 );
  _TABLE[18/8] |= (1<<(18%8));
}
```

A profiling (monitorozás) problémái

- Beavatkozás: Ha a rendszer erőforrásait használjuk, akkor megváltoztatjuk a rendszer viselkedését
  - Példa: Időzítések, eseménysorrend eltérő lesz
  - Megoldás: Hardver monitorozás, bennhagyás
- Szemantikai hézag: A megfigyelt információ különbözik a szükséges információtól
  - Példa: Processzor buszjelekből erőforráshasználatra következtetni
  - Megoldás: Rugalmas (szoftver) triggerelés vagy off-line analízis
- Globális jellemzők származtatása: Elosztott rendszerek esetén a lokális információból globális jellemzők
  - Példa: Körkörös várakozás detektálása
  - Megoldás: Központi monitor, lokális monitorok szinkronizálása

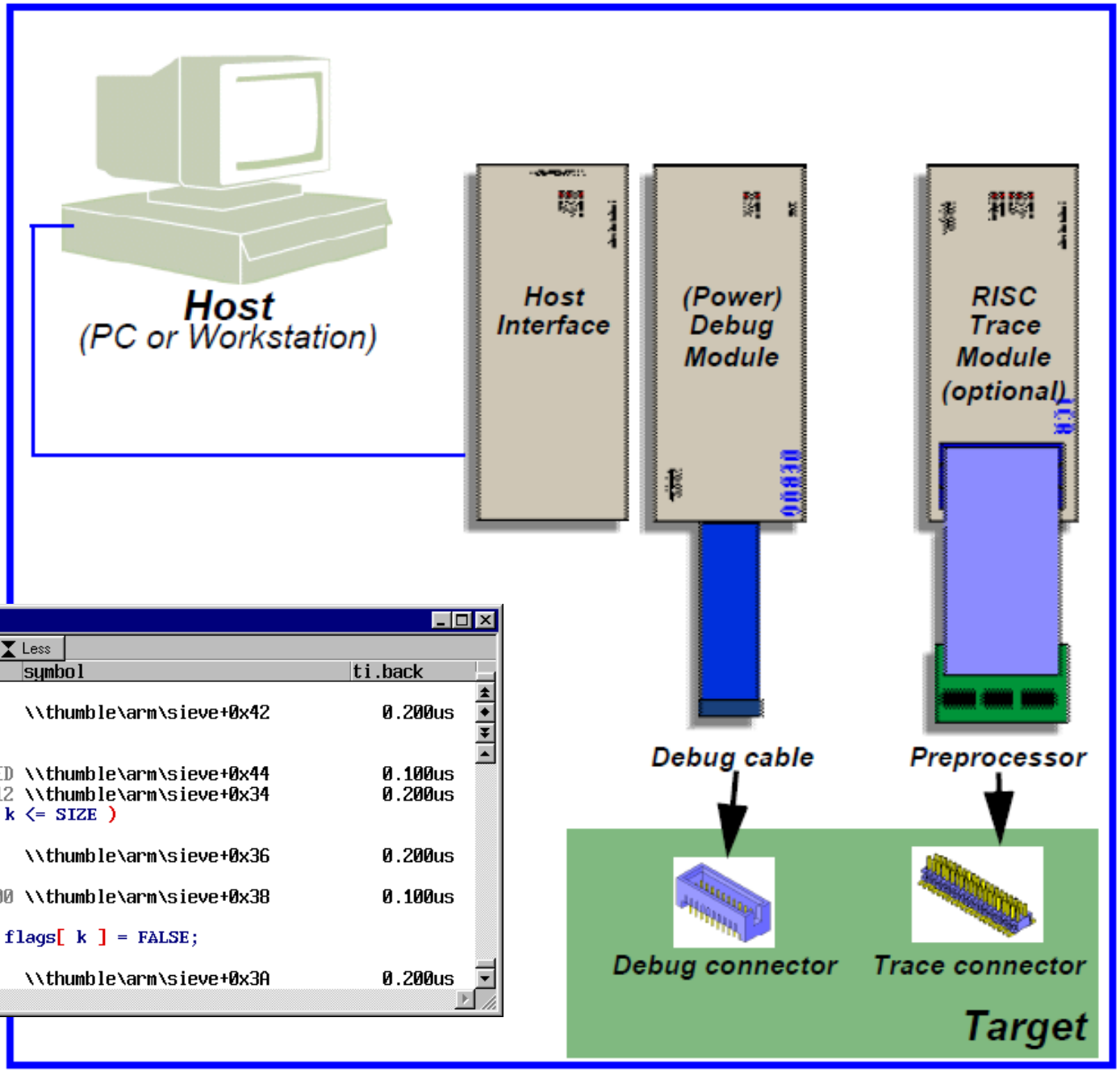
Általános megoldások áttekintése

Monitorozás típusa / feladat	Felműszerezés	Triggerelés	Regisztrálás
Szoftver (rugalmas, beavatkozó)	Trigger utasítások (aut.) beszúrása	Trigger utasítások közvetlenül	Alkalmazás, vagy monitor processz
Hardver (nem beavatkozó, de specifikus)	Közvetlen csatlakozás	Hardver komparátor	Lokális vagy távoli tároló
Hibrid (rugalmas, kevésbé beavatkozó)	Trigger utasítások (aut.) beszúrása	Trigger utasítások közvetlenül	Hardver (lokális vagy távoli tároló)

Példa: Hardver monitorozás

Lauterbach TRACE32

- Bus trace, program trace
- 512 Kframes trace memory
- 94 channels
- 36 bit time stamp 25 ns resolution



B::TRace.List

Setup... Goto... Find... Chart More Less

record	run	address	cycle	d.l	symbol	ti.back
		add r3,r3,r7				
-00000023	f	T:00001BBE fetch		3101	\\thumble\arm\sieve+0x42	0.200us
696				}		
		b 0x1BB0				
-00000022	f	T:00001BC0 fetch		E7ED	\\thumble\arm\sieve+0x44	0.100us
-00000021	f	T:00001BB0 fetch		2B12	\\thumble\arm\sieve+0x34	0.200us
692				while (k <= SIZE)		
		cmp r3,#0x12				
-00000020	f	T:00001BB2 fetch		DC04	\\thumble\arm\sieve+0x36	0.200us
		bgt 0x1BBE				
-00000019	f	T:00001BB4 fetch		2400	\\thumble\arm\sieve+0x38	0.100us
693				{		
694				flags[k] = FALSE;		
		mov r4,#0x0				
-00000018	f	T:00001BB6 fetch		4805	\\thumble\arm\sieve+0x3A	0.200us

Példa: Java Virtual Machine Tool Interface (JVMTI)

- Java Platform Debugger Architecture része
  - Korábbi Java Virtual Machine Profiler Interface (JVMPI) és a Java Virtual Machine Debug Interface (JVMDI) helyett
- Natív (C, C++) programozási interfész
  - Futtatott alkalmazások állapotának vizsgálata (profiling, debugging)
  - Alkalmazás végrehajtás vezérlése JVM-en
- Kétirányú interfész
  - Események kliens (agent) programok számára (callback fv.)
    - Pl. ThreadStart, ThreadEnd, ClassLoad, FieldAccess, MethodEntry,…
  - Függvények biztosítása vezérléshez, lekérdezéshez
    - Pl. SuspendThread, StopThread, GetThreadInfo, GetStackTrace,…
- Java bytecode felműszerezése lehetséges a kliens által (pl. metódusszintű monitorozáshoz)
  - Statikus (előzetesen)
  - Betöltési időben (load-time): ClassFileLoadHook event
  - Futási időben (run-time): RetransformClasses function

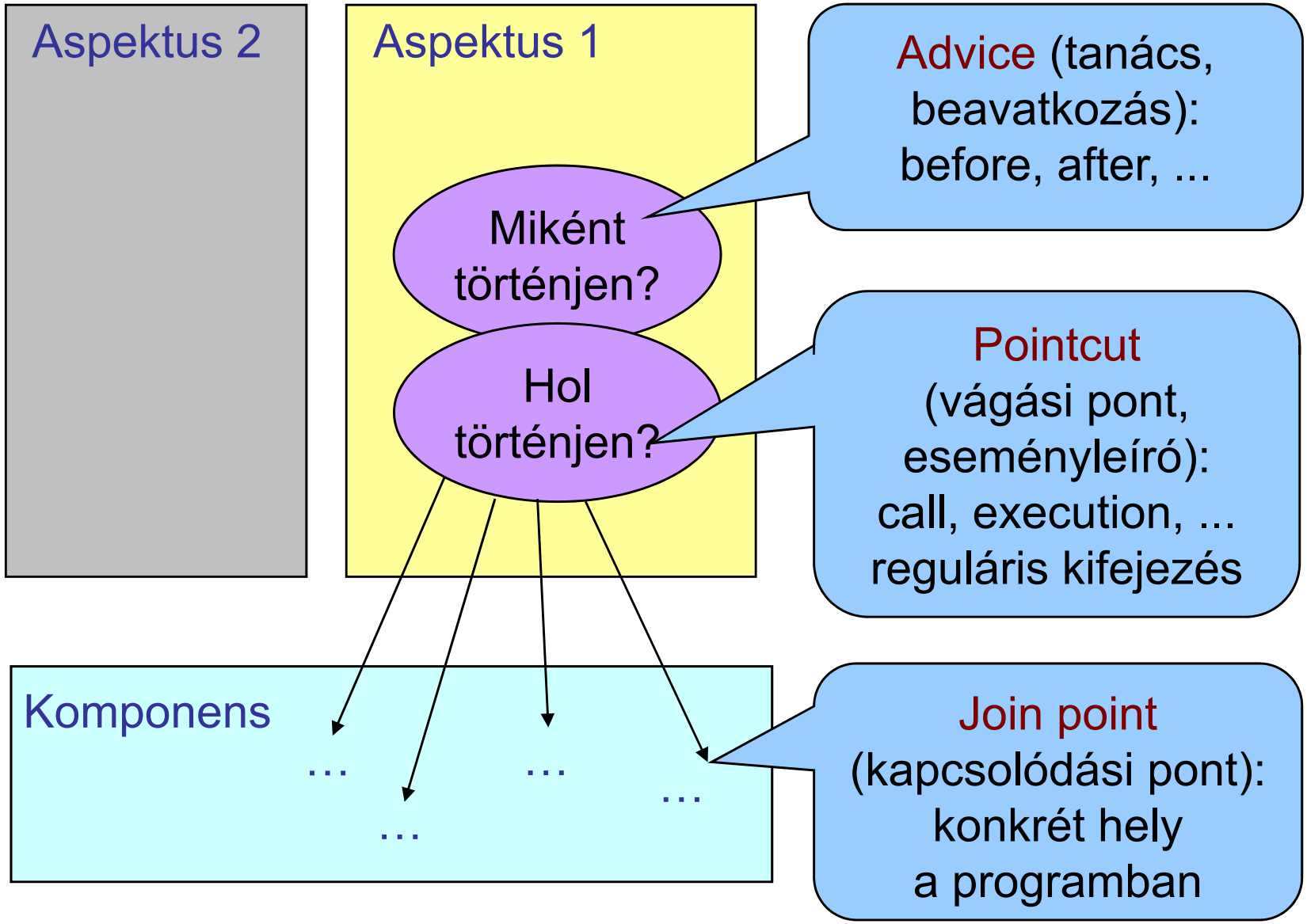
Példa: Szoftver monitorozás AOP felhasználásával

- Monitorozás: Teljes szoftvert „átszövő” beavatkozás
  - Sok helyen kell beavatkozni a regisztráláshoz
- Beavatkozások modularizálása aspektusokban
  - Megadható a beavatkozás helye (reguláris kifejezéssel)
    - Vágási pont (pointcut): hová kell kapcsolódni?
    - Kapcsolódási pont (join point): aspektus interakció helye
      - pl. `send*()` - minden send kezdetű metódus esetén
  - Újrahasználható a beavatkozás
    - Beavatkozás (advice): mit kell ott csinálni?
      - Pl. naplófájlba írás a `send*()` végrehajtásáról
- Fordítás során:
  - Felműszerezés: Aspektus és eredeti kód összefésülése

Példa: Szoftver monitorozás AOP felhasználásával

Járulékos aspektusok: különféle szempontú monitorozás

Alap komponens: monitorozott program



Példa: Aspektus-orientált minta

Eredeti forráskód:

```
class Controller {
  public int send(int msg) {
      <<sending message>>
  }
}
```

Aspektus kód:

```
public aspect SimpleLog {
  pointcut loggedCall(int msg):
      execution(public int Controller.send*(..)) && args(msg);

  before(int input): loggedCall(msg) {
      <<log request(msg)>>}
  after() throwing exception (Exception e): loggedCall() {
      <<log exception>>}
}
```

A send() hívást szeretnénk regisztrálni

Vágási pont definiálás loggedCall névvel

Vágási pont (trigger): send() végrehajtása

Vágási pont előtt avatkozunk be

Beavatkozás (regisztrálás)

Kivétel dobásának regisztrálása

Tartalomjegyzék

- Motiváció
  - Célkitűzés: Belső működés analízise
- A profiling általános problémái
  - Felműszerezés, triggerelés, regisztrálás
  - Szoftver és hardver monitorozás
- Futásidő profiling
  - Teljesítményproblémák felderítése
- Memóriahasználat profiling
  - Memóriaproblémák monitorozása

Futásidő profilerek

- Alapfeladatok:
  - Függvényhívási hierarchia felderítése, hívási gyakoriság hozzárendelése
  - Az egyes függvényekben eltöltött idő hozzárendelése
  - Annotált forrás: utasítások végrehajtási gyakorisága
  - Célkörnyezetben futtatva használhatók az eredmények
- Egyszerű példa: gprof
  - Program felműszerezése: speciális fordítással
    cc -pg prog.c -o prog (opció; gcrt0.o, libc_p.a)
  - Futás közbeni adatgyűjtés:
    gmon.out adatfájlba
  - Off-line kiértékelés:
    gprof prog gmon.out

Példa: gprof jelentés: Flat profile

% time	cumulative seconds	self seconds	calls	self us/call	total us/call	name
33.65	0.71	0.71	4	177500.00	177500.00	RELERR
28.91	1.32	0.61	4	152500.00	152500.00	RELFINE
13.27	1.60	0.28	60	4666.67	4666.67	RELCOARSE
10.90	1.83	0.23	32	7187.50	7187.50	INTERPOL
6.16	1.96	0.13	4	32500.00	32500.00	RESFINE
2.84	2.02	0.06	28	2142.86	2142.86	RESCOARSE
1.90	2.06	0.04	1	40000.00	40000.00	write_res
1.42	2.09	0.03	1	30000.00	30000.00	INIT
0.95	2.11	0.02	8	2500.00	2500.00	PUTZERO
0.00	2.11	0.00	1	0.00	0.00	OUTPUT

- Time: Percentage of the total running time of program used by this function
- Cumulative seconds: Sum of the seconds accounted for by this function and those listed above it
- Self seconds: The number of seconds accounted for by this function alone
- Self us/call: The average number of microseconds spent in this function per call
- Total us/call: The average number of microseconds spent in this function and its descendents per call

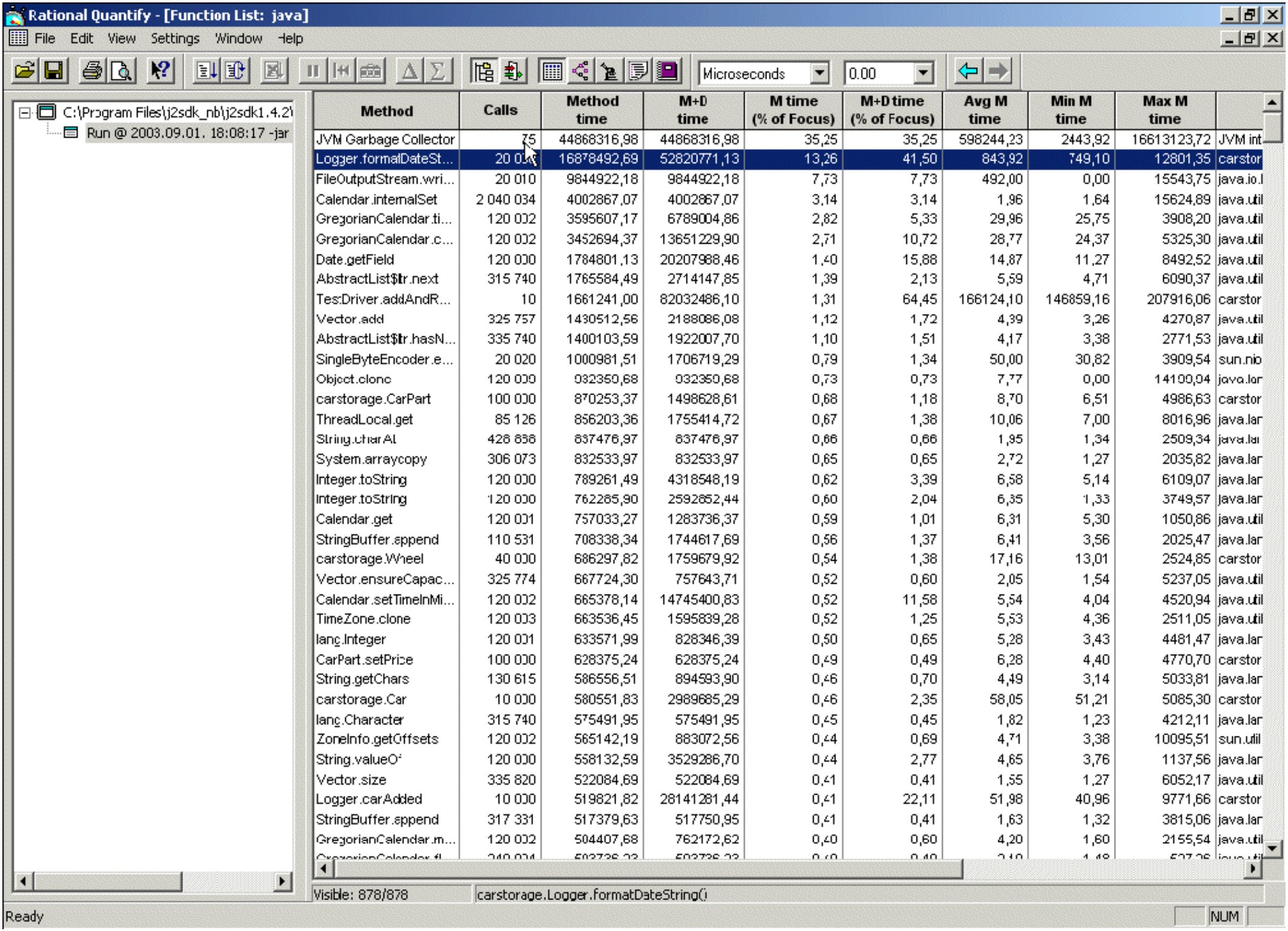
Példa: gprof jelentés: Call graph

```
index % time    self  children    called     name
[1]    100.0    0.00    2.11                 main [1]
                0.71    0.00       4/4           RELERR [2]
                0.61    0.00       4/4           RELFINE [3]
                0.28    0.00      60/60          RELCOARSE [4]
                0.23    0.00      32/32          INTERPOL [5]
                0.13    0.00       4/4           RESFINE [6]
                0.06    0.00      28/28          RESCOARSE [7]
                0.04    0.00       1/1           write_res [8]
                0.03    0.00       1/1           INIT [9]
                0.02    0.00       8/8           PUTZERO [10]
-----------------------------------------------
                0.71    0.00       4/4       main [1]
[2]     33.6    0.71    0.00       4             RELERR [2]
-----------------------------------------------
                0.61    0.00       4/4       main [1]
[3]     28.9    0.61    0.00       4             RELFINE [3]
```

- Self: Total amount of time spent in this function
- Children: Total amount of time propagated into this function by its children
- Called: Number of times the function was called

Példa: Rational Quantify

- Automatizált feladatok:
  - Futásidő adatok gyűjtése
  - Adatok analízise és bemutatása
    - Hívási hierarchia
    - Metódusok futási ideje
- Felhasználás:
  - Problémás helyek (hívások) azonosítása: Teljesítmény szempontjából szűk keresztmetszetek
    - Melyik metódust érdemes gyorsítani, átstrukturálni?
  - Javítások hatásának ellenőrzése
    - Gyorsult-e a végrehajtás a változtatás után?


Rational Quantify - [Function List: java]
File Edit View Settings Window Help
Microseconds
0.00
C:\Program Files\j2sdk_nb\j2sdk1.4.2\
Run @ 2003.09.01. 18:08:17 -jar
Method | Calls | Method time | M+D time | M time (% of Focus) | M+D time (% of Focus) | Avg M time | Min M time | Max M time
JVM Garbage Collector 75 44868316,98 44868316,98 35,25 35,25 598244,23 2443,92 16613123,72 JVM int
Logger.formalDateSt... 20 0 16878492,69 52820771,13 13,26 41,50 843,92 749,10 12801,35 carstor
FileOutputStream.wri... 20 010 9844922,18 9844922,18 7,73 7,73 492,00 0,00 15543,75 java.io.
Calendar.internalSet 2 040 034 4002867,07 4002867,07 3,14 3,14 1,96 1,64 15624,89 java.util
GregorianCalendar.ti... 120 002 3595607,17 6789004,86 2,82 5,33 29,96 25,75 3908,20 java.util
GregorianCalendar.c... 120 002 3452694,37 13651229,90 2,71 10,72 28,77 24,37 5325,30 java.util
Date.getField 120 000 1784801,13 20207988,46 1,40 15,88 14,87 11,27 8492,52 java.util
AbstractList$Itr.next 315 740 1765584,49 2714147,85 1,39 2,13 5,59 4,71 6090,37 java.util
TestDriver.addAndR... 10 1661241,00 82032486,10 1,31 64,45 166124,10 146859,16 207916,06 carstor
Vector.add 325 757 1430512,56 2188086,08 1,12 1,72 4,39 3,26 4270,87 java.util
AbstractList$Itr.hasN... 335 740 1400103,59 1922007,70 1,10 1,51 4,17 3,38 2771,53 java.util
SingleByteEncoder.e... 20 020 1000981,51 1706719,29 0,79 1,34 50,00 30,82 3909,54 sun.nio
Object.clone 120 000 932350,68 932350,68 0,73 0,73 7,77 0,00 14100,04 java.lar
carstorage.CarPart 100 000 870253,37 1498628,61 0,68 1,18 8,70 6,51 4986,63 carstor
ThreadLocal.get 85 126 856203,36 1755414,72 0,67 1,38 10,06 7,00 8016,96 java.lar
String.charAt 426 836 837476,97 837476,97 0,66 0,66 1,95 1,34 2509,34 java.la
System.arraycopy 306 073 832533,97 832533,97 0,65 0,65 2,72 1,27 2035,82 java.lar
Integer.toString 120 000 789261,49 4318548,19 0,62 3,39 6,58 5,14 6109,07 java.lar
Integer.toString 120 000 762265,90 2592652,44 0,60 2,04 6,35 1,33 3749,57 java.lar
Calendar.get 120 001 757033,27 1283736,37 0,59 1,01 6,31 5,30 1050,86 java.util
StringBuffer.append 110 531 708338,34 1744617,69 0,56 1,37 6,41 3,56 2025,47 java.lar
carstorage.Wheel 40 000 686297,82 1759679,92 0,54 1,38 17,16 13,01 2524,85 carstor
Vector.ensureCapac... 325 774 667724,30 757643,71 0,52 0,60 2,05 1,54 5237,05 java.util
Calendar.setTimeInMi... 120 002 665378,14 14745400,83 0,52 11,58 5,54 4,04 4520,94 java.util
TimeZone.clone 120 003 663536,45 1595839,28 0,52 1,25 5,53 4,36 2511,05 java.util
lang.Integer 120 001 633571,99 828346,39 0,50 0,65 5,28 3,43 4481,47 java.lar
CarPart.setPrice 100 000 628375,24 628375,24 0,49 0,49 6,28 4,40 4770,70 carstor
String.getChars 130 615 586556,51 894593,90 0,46 0,70 4,49 3,14 5033,81 java.lar
carstorage.Car 10 000 580551,83 2989685,29 0,46 2,35 58,05 51,21 5085,30 carstor
lang.Character 315 740 575491,95 575491,95 0,45 0,45 1,82 1,23 4212,11 java.lar
ZoneInfo.getOffsets 120 002 565142,19 883072,56 0,44 0,69 4,71 3,38 10095,51 sun.util
String.valueO 120 000 558132,59 3529286,70 0,44 2,77 4,65 3,76 1137,56 java.lar
Vector.size 335 820 522084,69 522084,69 0,41 0,41 1,55 1,27 6052,17 java.util
Logger.carAdded 10 000 519821,82 28141281,44 0,41 22,11 51,98 40,96 9771,66 carstor
StringBuffer.append 317 331 517379,63 517750,95 0,41 0,41 1,63 1,32 3815,06 java.lar
GregorianCalendar.m... 120 002 504407,68 762172,62 0,40 0,60 4,20 1,60 2155,54 java.util
Visible: 878/878
carstorage.Logger.formatDateString()
Ready
NUM

Példa: Visual Studio 2012 Ultimate profiler

- Profiling lehetőségek: CPU sampling, function call instrumentation, .Net memory allocation, resource contention
- Megjelenítés: Hívási fa, függvényenkénti adatok (flat profile)

Function Name	Number of Calls	Elapsed Inclusive Time %	Elapsed Exclusive Time %
ConsoleFilterDemo.exe	0	100.00	0.00
ConsoleFilterDemo.Program.Main(string[])	1	99.12	0.02
AForge.Imaging.Filters.IFilter.Apply(class Syst	1	96.94	96.94
System.Drawing.Image.FromFile(string)	1	1.54	1.54
AForge.Imaging.Filters.OilPainting..ctor()	1	0.47	0.47
ConsoleFilterDemo.Program.someFunc2()	1	0.07	0.00
System.Console.WriteLine(string)	1	0.07	0.07

Function Name	Number of Calls	Elapsed Inclusive Time %	Elapsed Exclusive Time %
AForge.Imaging.Filters.IFilter.Apply(class System.Drawing.Bitmap)	1	97.04	97.04
System.Drawing.Image.FromFile(string)	1	1.52	1.52
System.Diagnostics.Tracing.EventSource..ctor()	1	0.70	0.70
AForge.Imaging.Filters.OilPainting..ctor()	1	0.52	0.52
ConsoleFilterDemo.Program.Main(string[])	1	99.25	0.08
System.Console.WriteLine(string)	4	0.07	0.07
ConsoleFilterDemo.ConsoleFilterEventSource..cctor()	1	0.75	0.03
ConsoleFilterDemo.ConsoleFilterEventSource.ImageLoa	1	0.02	0.02

A teljesítményproblémák tipikus okai

- Haszontalan számítás
  - Nem törölt kódrészletek, amik erőforrást foglalnak
  - Igény nélküli, „alapértelmezett” szolgáltatások
- Felesleges újraszámítás
  - Részeredmények újraszámítása tárolás helyett
- Rendszerszolgáltatások mértéktelen igénybevétele
  - Lassú környezetváltás
- Foglalt erőforrásokra való várakozás
  - Szinkronizáció másik folyamattal
  - Kommunikációs csatorna foglaltsága
  - Állományok foglaltsága

A teljesítményproblémák megoldási lehetőségei

- Program átstrukturálás
  - Felesleges számítások, hívások törlése
  - Többszálú működés kialakítása (többmagos rendszerekre)
- Optimalizált számítások
  - Ismétlés elkerülése ideiglenes tárolással a programon belül
- Halasztott számítások
  - Felhasználó szempontjából nem kritikus időben végezve
- Kevesebb rendszerhívás
  - Adatok időleges tárolása (cache)
  - Foglalt erőforrások státusz figyelése
- Hatékonyabb algoritmusok
  - Rendezés, keresés, … algoritmusok: Sokféle verzió
  - Speciális utasításkészlet használata: Párhuzamosítás
  - Koprocesszor (GPU) használata egyes részfeladatokhoz

Java profiler eszközök

- Rengeteg eszköz:
  - http://java-source.net/open-source/profilers
- jvisualvm
  - JDK belépített eszközöket használ
- YourKit Java Profiler
- Quest JProbe
- JIP – Java Interactive Profiler
- Netbeans Profiler
- …
- Eclipse:
  - Test & Performance Tools Platform (TPTP)

Tartalomjegyzék

- Motiváció
  - Célkitűzés: Belső működés analízise
- A profiling általános problémái
  - Felműszerezés, triggerelés, regisztrálás
  - Szoftver és hardver monitorozás
- Futásidő profiling
  - Teljesítményproblémák felderítése
- Memóriahasználat profiling
  - Memóriaproblémák monitorozása

Jellegzetes memóriahibák

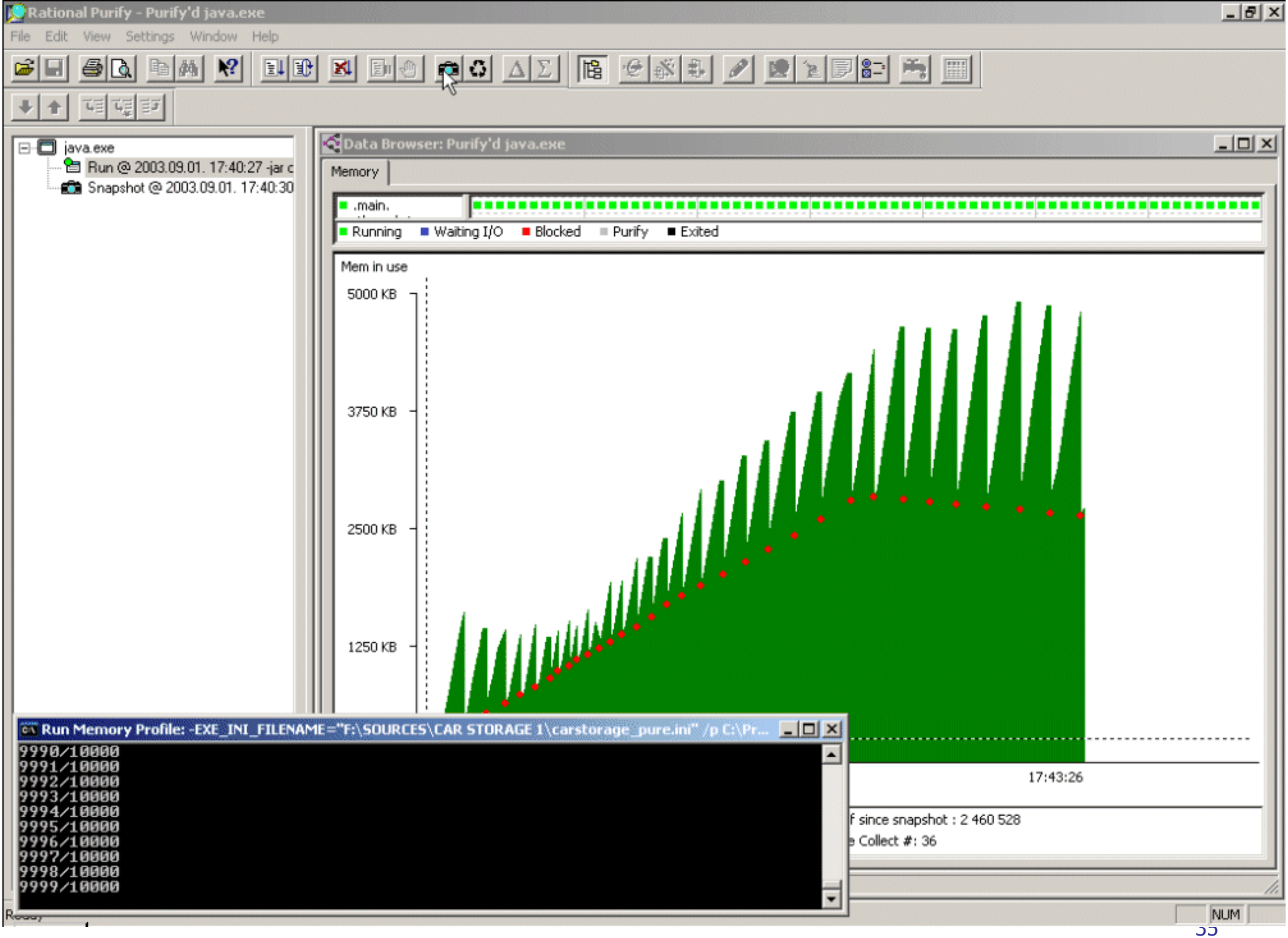
- (Statikusan detektálható hibák
  - Pl. típuskonverziós hibák)
- Memória szivárgás: hiányzó kódrészlet miatt
  - Lefoglalt, de fel nem szabadított memóriaterületek (C++) $\rightarrow$ elfogy a memória...
  - Szükségtelen hivatkozások miatt foglalt objektumok (Java) $\rightarrow$ szemétgyűjtés nem működik...
- Illegális memóriahasználat: hibás kód miatt
  - Tömbök határainak túlcímzése
  - Inicializálatlan memória olvasása
  - Írás felszabadított memóriaterületre
  - Allokálatlan memóriához való hozzáférés

Nehézségek a tesztelésben

- „Rejtélyes” hatások
  - Hatások csak későn és más formában jelentkeznek (pl. adathiba, lassulás, fagyás, ...)
  - Hatások csak nehezen reprodukálhatók
- Ötlet: Nem a késői hatás alapján detektálni
  - Tömbök határai előtt és után „tilos zóna” beillesztése
  - Memória státuszának nyilvántartása (allokált, inicializált stb.)
  - Hivatkozások nyilvántartása és ellenőrzése (C++)
  - Allokált memória kijelzése és összehasonlítása (Java); a folyamatosan foglaló metódusok azonosítása

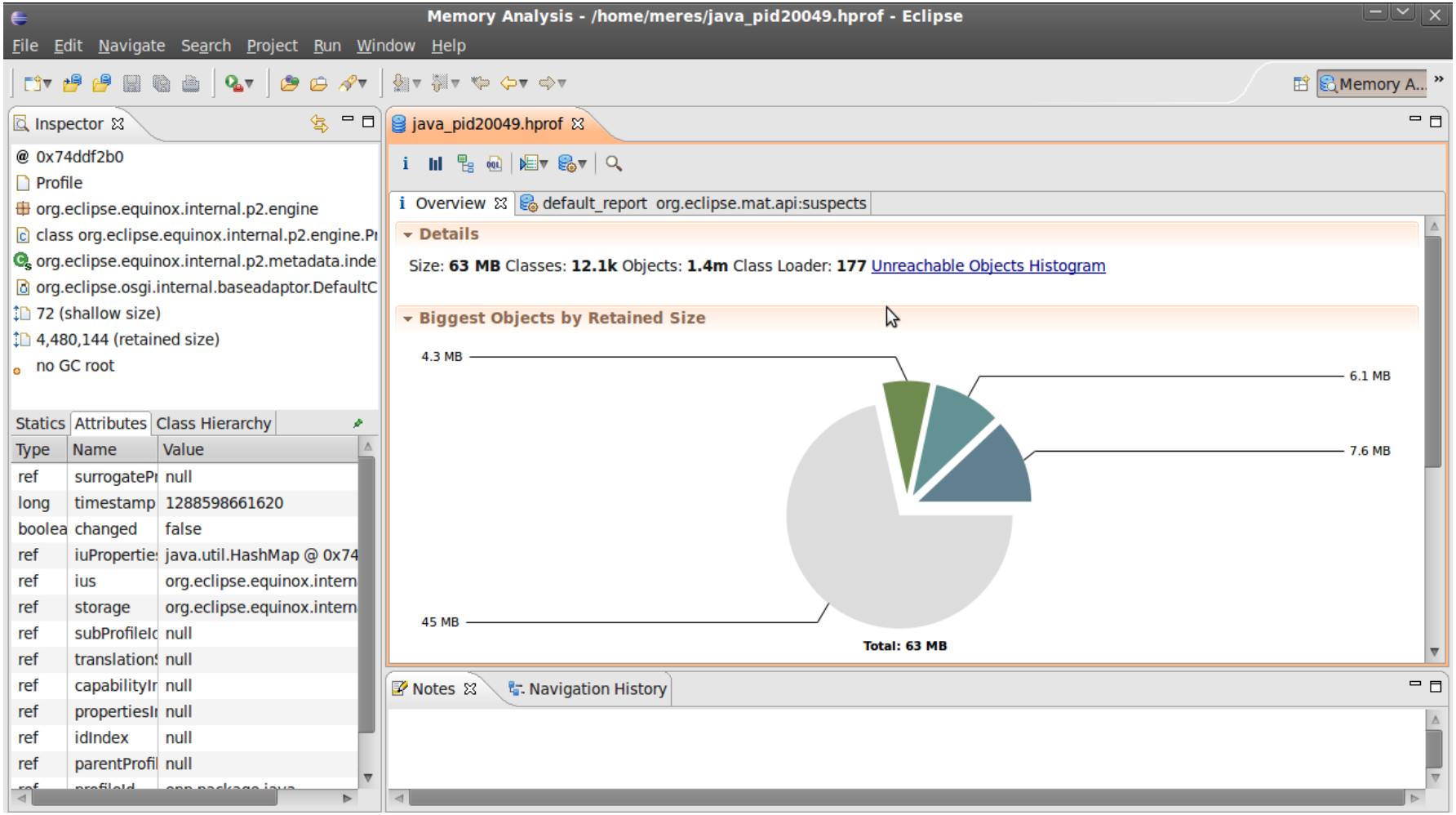
Példa eszköz: Rational Purify

- Automatizált feladatok:
  - Memóriafoglalás rögzítése
  - Memóriakezelési hibák futásidejű detektálása
- Kiindulási alap:
  - Memóriafoglalás és -felszabadítás regisztrálása
  - Automatikusan illeszt be ellenőrző kódrészleteket (akár a forráskód ismerete nélkül)
    - Solaris: object code alapján (linkelés fázisban)
    - Windows: futtatható kód alapján
    - Java: virtuális gép profiling


Rational Purify - Purify'd java.exe
File Edit View Settings Window Help
java.exe
Run @ 2003.09.01. 17:40:27 -jar c
Snapshot @ 2003.09.01. 17:40:30
Data Browser: Purify'd java.exe
Memory
.main.
Running
Waiting I/O
Blocked
Purify
Exited
Mem in use
5000 KB
3750 KB
2500 KB
1250 KB
17:43:26
f since snapshot : 2 460 528
e Collect #: 36
Run Memory Profile: -EXE_INI_FILENAME="F:\SOURCES\CAR STORAGE 1\carstorage_pure.ini" /p C:\Pr...
9990/10000
9991/10000
9992/10000
9993/10000
9994/10000
9995/10000
9996/10000
9997/10000
9998/10000
9999/10000
Ready
NUM

Példa: Memory Analyzer (Eclipse)

- Heap dump fájl vizsgálata
- Különálló RCP alkalmazás,
  vagy Eclipse Memory Analysis nézet



Összefoglalás

- Motiváció
  - Célkitűzés: Belső működés analízise
- A profiling általános problémái
  - Felműszerezés, triggerelés, regisztrálás
  - Szoftver és hardver monitorozás
- Futásidő profiling
  - Teljesítményproblémák felderítése
- Memóriahasználat profiling
  - Memóriaproblémák monitorozása