

UNIVERSITATEA BUCUREȘTI
FACULTATEA DE MATEMATICĂ ȘI INFORMATICĂ
SPECIALIZAREA INFORMATICĂ



Lucrare de licență
Analiza statică a primitivelor de sincronizare

Coordonator științific
Paul Irofti

Absolvent
Darius Marian

București, iulie 2020

Cuprins

1	Introducere	3
1.1	SyncAnalysis	4
1.2	Comparație cu ThreadSanitizer	6
1.3	Comparație cu Clang-Tidy	7
2	Tehnologii folosite	8
2.1	Limbajul C11 și biblioteca standard C	8
2.2	Limbajul C++17 și biblioteca standard C++	8
2.3	Compilerul Clang	8
2.4	Uneltele de dezvoltare CMake și CTest	9
2.5	Biblioteca pthread	9
2.6	Biblioteca DL	9
2.7	Biblioteca libunwind	9
2.8	Programele addr2line, respectiv atos	10
2.9	Biblioteca mcga-cli	10
3	Descrierea proiectului	11
3.1	Compilarea și instalarea proiectului	11
3.2	Biblioteca de înregistrare a evenimentelor	11
3.2.1	Interfață	11
3.2.2	Descrierea unui eveniment	11
3.2.3	Capturarea stivei de execuție	11
3.2.4	Serializare (fișierul DUMP)	11
3.2.5	Implementare	11
3.3	Unelte de integrare	11
3.3.1	cxxsync (C++, începând cu C++98)	11
3.3.2	pthread (C/C++)	11
3.3.3	libc++ (pentru C++, începând cu C++11)	11
3.4	Executabilul de analiză statică	11
3.4.1	Parcurgerea și parsarea fișierului DUMP	11
3.4.2	Stocarea și observarea obiectelor active	11
3.4.3	Crearea de rapoarte	11

3.4.4	Afişarea simbolurilor din stiva de execuţie	11
3.4.5	Înregistrarea analizorilor	11
3.5	Analizori pre-instalaţi	11
3.5.1	mutex-lock-order	11
3.5.2	lock-shadow	11
3.5.3	redundant-recursive-mutex	11
3.5.4	redundant-rwlock	11
3.5.5	useless-lock	11
4	Exemple de utilizare	12
4.1	Testele analizorilor (folosind cxxsync)	12
4.2	Folosind LD_PRELOAD şi <pthread.h>	12
4.3	Folosind libc++	12
5	Concluzii	13

1 Introducere

Programele cu mai multe fire de execuție au devenit mult mai comune în programarea modernă. Procesoarele noi și plăcile grafice conțin mai multe nuclee separate și capacități de virtualizare, iar pentru a folosi eficient aceste resurse, programele axate pe performanță partajează sarcinile pe care le au de îndeplinit în mai multe fire de execuție ce pot fi executate în paralel pe același hardware.

Dar prin introducerea acestui nou model de programare, s-a introdus și o nouă gamă de dificultăți și posibilități de a face greșeli programatice. Firele de execuție dintr-un proces accesează același spațiu de memorie RAM, același disc, același monitor și alte dispozitive ale calculatorului. De pildă dacă mai multe fire de execuție ce rulează *concurrent* încearcă să stocheze informații diferite la aceeași adresă de memorie RAM, rezultatul obținut nu este clar definit. Problemele de acest tip se rezolvă folosind *mecanisme de sincronizare* pentru a controla și arbitra accesul la resurse comune pe care mai multe fire de execuție le folosesc concurrent. Majoritatea acestor mecanisme sunt construite în jurul unor *primitive de sincronizare* printre care se numără *mutex*, *semaphore*, *read-write lock* și *condition variable*.

Folosirea acestor primitive este considerată dificilă. Orice resursă partajată care este accesată concurrent de mai multe fire de execuție poate duce la un *race condition* (o situație în care rezultatul este nepredictibil pentru că depinde de ordinea în care firele de execuție accesează resursa, dar de cele mai multe ori nu este cel intenționat), așa că toate situațiile de acest tip din program trebuie apărute folosind mecanisme de sincronizare. În același timp, orice exces de astfel de mecanisme poate duce la alte tipuri de erori cum ar fi *deadlock* (situație în care două sau mai multe fire de execuție se blochează reciproc, și niciuna nu mai poate progresa), *starvation* (un fir nu mai ajunge niciodată să își îndeplinească sarcina pentru că nu mai primește acces la resursa partajată) sau degradarea performanței programului (deoarece principalul motiv pentru care se folosesc mai multe fire de execuție este performanța, aceasta este de multe ori la fel de importantă ca și corectitudinea).

Dificultatea de înțelegere și utilizare a acestor concepte, împreună cu rezultatele dezastruoase care apar frecvent din cauza erorilor de programare crează o nevoie de unelte care să ajute dezvoltatorii de aplicații în a identifica și repara acest tip de greșeli. Deși există deja multe astfel de unelte în ecosistemul programării, nu toate problemele ce pot

apărea sunt rezolvate de unelte existente. De asemenea, fiecare program care folosește aceste primitive de sincronizare are alte nevoi, și o unealtă generică de multe ori nu poate rezolva problemele specifice întâmpinate de un anumit program.

Vom prezenta în continuare un proiect ce are ca scop nu doar crearea unei astfel de unelte, ci a unei platforme de dezvoltare ce facilitează conceperea și implementarea de unelte noi și specifice unei anumite nevoi printr-un efort minim.

1.1 SyncAnalysis

SyncAnalysis este un proiect ce își propune crearea unui sistem în care este ușor de dezvoltat unelte noi de diagnosticare a problemelor ce pot apărea în folosirea mecanismelor primitive de sincronizare (și nu doar).

Ideea din spatele acestui proiect vine din următoarea observație: prin capturarea unor evenimente cheie pe parcursul execuției unui program, se pot diagnostica o gamă largă de probleme pe care le întâmpină acesta. Un exemplu simplu ar fi că prin observarea tuturor cererilor de *lock* și *unlock* pe o instanță de *mutex*, se poate observa că *mutex*-ul respectiv nu este necesar dacă toate apelurile se întâmplă în contextul aceluiași fir de execuție.

Din această observație se vede că proiectul folosește strategia *post-mortem* pentru analiza programelor: de-a lungul execuției programului se înregistrează evenimentele de interes, pentru a fi procesate și analizate separat după terminarea acestuia. Această strategie a fost aleasă pentru că nu este deloc intrusivă: necesită schimbări minime sau nule în codul sursă al programului (în anumite situații nu necesită nici recompilarea codului sursă al unui program) și nu degradează prea tare performanța programului în sine pentru a face analiza. Alte strategii de analiză folosite în unelte existente includ analiză *on-the-fly*, în care analiza este făcută în paralel cu execuția programului în același proces, precum în ThreadSanitizer[1] și analiză *statică*, în care codul sursă în sine este analizat, nu programul obținut, precum în Clang Thread Safety Analysis[2].

Se distinge astfel direcția generală a acestui sistem. Prima și cea mai importantă componentă este o bibliotecă ce înregistrează evenimentele interesante în timpul execuției programului și le serializează într-un fișier, pentru a fi analizate separat de alt program. Detalii despre această bibliotecă și implementarea ei se găsesc în secțiunea **3.2**.

Biblioteca este una de uz general, neavând în mod direct o interfață specifică analizării primitivelor de sincronizare. De aceea proiectul conține și o suită de biblioteci pentru a

facilita folosirea bibliotecii de capturare a evenimentelor în scopul de analiză a primitivelor de sincronizare. Acestea oferă interfețe identice cu alte biblioteci populare cum ar fi `<pthread.h>` sau modulele `<thread>` și `<mutex>` din biblioteca standard C++, pentru a permite programelor ce folosesc aceste biblioteci să folosească *SyncAnalysis* fără schimbări în codul sursă. Detalii despre aceste biblioteci se găsesc în secțiunea **3.3**.

După execuția programului client obținem o colecție de evenimente, capturate și serializate eficient într-un fișier cu ajutorul bibliotecilor descrise mai sus. În continuare, trebuie făcută o analiză a acestor evenimente, iar proiectul oferă o soluție pentru asta în forma unui program independent. Acest program, precum biblioteca de capturare a evenimentelor, este unul de uz general, și nu este direct legat de analiza primitivelor de sincronizare. Acesta nu execută pe cont propriu nicio analiză asupra evenimentelor, ci se bazează pe o suită de module separate numite *analizori*. Acești analizori sunt distribuiți sub formă de biblioteci dinamice pe care programul le încarcă la începutul execuției. Programul se ocupă de a deserializa și indexa evenimentele din fișier în memorie, pentru ca apoi *analizorii* să diagnosticheze erori, avertismente sau alte informații utile pe baza acestor evenimente, iar programul să creeze și să afișeze apoi rapoarte pentru utilizator. Mai multe detalii despre acest program se găsesc în secțiunea **3.4**, iar despre analizorii implementați ca exemplu pentru analiza primitivelor de sincronizare în secțiunea **3.5**.

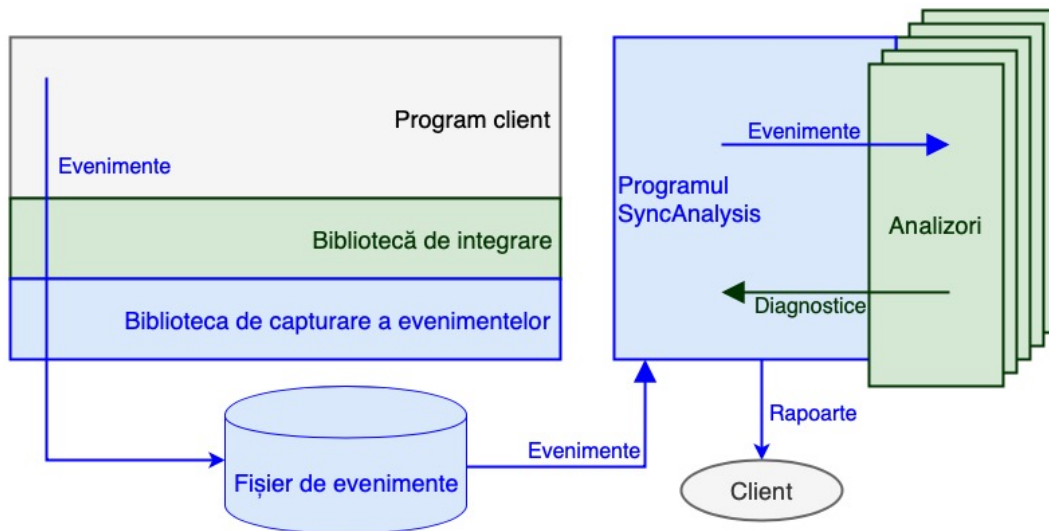


Figura 1: Arhitectura proiectului SyncAnalysis

În Figura 1 se poate vedea arhitectura software a proiectului SyncAnalysis. Cu

albastru sunt marcate elementele de uz general, adică cele independente de unealta dezvoltată (folosibile chiar pentru unelte care nu se ocupă de analiza primitivelor de sincronizare), cu verde sunt marcate elementele ce sunt specifice unei anumite unelte, iar cu gri sunt marcate elementele clientului.

1.2 Comparație cu ThreadSanitizer

O unealtă populară ce ajută la diagnosticarea folosirii insuficiente a mecanismelor de sincronizare este ThreadSanitizer[1]. Folosirea acestuia implică compilarea programului cu un compilator care implementează suport pentru ThreadSanitizer, folosind opțiunile de linie de comandă documentate de compilator (de exemplu, pentru Clang pe Linux opțiunea este `-fsanitize=thread`). Executabilul obținut prin compilare conține verificări împotriva acceselor concurente nesincronizate la memorie:

```
% clang -fsanitize=thread -g -O1 -o program tiny_race.c
% ./program
WARNING: ThreadSanitizer: data race (pid=19219)
  Write of size 4 at 0x7fcf by thread T1:
    #0 Thread1 tiny_race.c:4 (exe+0xa360)
  Previous write of size 4 at 0x7fcf by main thread:
    #0 main tiny_race.c:10 (exe+0xa3b4)
  Thread T1 (running) created at:
    #0 pthread_create tsan_interceptors.cc:705 (exe+0xc790)
    #1 main tiny_race.c:9 (exe+0xa3a4)
```

După cum se vede din exemplul de mai sus (parafrizat din site-ul oficial de documentație al proiectului [3]), ThreadSanitizer analizează programul *on-the-fly*: analiza este făcută direct în cadrul execuției programului, în același proces. Asta duce la o încetinire drastică a programului și la un consum ridicat de memorie. Măsurătorile făcute pentru articolul [1] arată o creștere a timpului de execuție între 120% și 2760%, și în consumul de memorie între 20% și 660%, în funcție de programul analizat. De asemenea, ThreadSanitizer are nevoie de ajutor din partea compilatorului, deci poate fi folosit doar cu compilatoare ce încorporează explicit suport pentru el. Deși această unealtă este folosită în companii mari din industrie [1], aceste dezavantaje îl fac inutilizabil pentru anumite proiecte obligate să folosească un anumit compilator care nu suportă ThreadSanitizer sau care sunt executate

în contexte unde reducerea drastică a performanței nu este fezabilă nici măcar pentru teste sau simulări.

Prin comparație, o unealtă construită folosind proiectul SyncAnalysis face analiza evenimentelor *post-mortem*, și prin urmare nu duce la creșteri atât de mari în consumul de timp sau memorie în timpul execuției programului. În schimb fișierele de evenimente pot deveni destul de mari dacă programul analizat este executat mult timp sau capturează multe tipuri de evenimente.

1.3 Comparație cu Clang-Tidy

Clang-Tidy[4] este o unealtă ce efectuează analiză *statică* asupra codului sursă a unui proiect. Deoarece analiza se face static, fără a necesita execuția programului în sine, considerentele de performanță a programului sunt inexistente: programul compilat nu se schimbă din cauza folosirii unelei, deci nu se aplică problema de o degradare a performanței sau o creștere a resurselor folosite din niciun punct de vedere.

Deși accentul nu este pus pe folosirea corectă sau eficientă a primitivelor de sincronizare în cel din urmă, comparația dintre proiectele *SyncAnalysis* și *Clang-Tidy* este aptă pentru că amândouă încearcă să creeze un sistem de unelte, mai degrabă decât să încerce să fie o unealtă de sine stătătoare. În timp ce proiectul *Clang-Tidy* permite scrierea cu efort mic a unor analizori statici pentru codul sursă de C/C++, *SyncAnalysis* face asta pentru analizori *post-mortem*.

2 Tehnologii folosite

2.1 Limbajul C11 și biblioteca standard C

Limbajul C[5] este folosit pentru implementarea bibliotecii de înregistrare de evenimente și a uneia din bibliotecile de integrare. Am ales limbajul pentru componenta aceasta din proiect deoarece portabilitatea bibliotecii este o prioritate: această bibliotecă trebuie să poată fi folosită în orice program scris în orice limbaj și rulând pe orice sistem de operare. De asemenea este important ca biblioteca să fie cât mai eficientă, pentru a nu interfera prea tare cu execuția programului client. Această combinație de cerințe este îndeplinită perfect de limbajul C. Am ales versiunea C11 pentru a avea acces la modulul `<stdatomic.h>` din biblioteca standard, folosit în implementarea bibliotecii de înregistrare de evenimente din motive de performanță.

2.2 Limbajul C++17 și biblioteca standard C++

Limbajul C++[6] este folosit pentru implementarea majorității proiectului. Programul SyncAnalysis, două dintre bibliotecile de integrare, toate exemplele de analizoare și toate testele automate au codul sursă scris în acest limbaj.

În afară de preferință personală, argumentul principal pentru folosirea limbajului C++ este interoperabilitatea bună cu limbajul C. Astfel, a fost ușor de refolosit cod din biblioteca de înregistrare de evenimente în programul SyncAnalysis pentru părțile de deserializare a fișierului de evenimente, în timp ce restul programului și analizorii au putut fi scriși într-un stil modern, rămânând totuși foarte eficient. Biblioteca standard C++ este folosită peste tot în implementarea programului și în implementarea analizorilor. Printre modulele folosite cel mai des se numără `<vector>`, `<map>` și `<string>`.

2.3 Compilatorul Clang

Limbafele C și C++, folosite în acest proiect, sunt limbafe a căror cod sursă se compilează în cod nativ, executabil direct pe hardware. Pentru a efectua această transformare în proiectul curent, am folosit exclusiv compilatorul Clang[7], pentru portabilitatea acestuia între Mac OS și Linux, viteza de compilare și integrarea elegantă cu alte unelte de care am avut nevoie în dezvoltare cum ar fi Clang-Tidy[4] și ThreadSanitizer[1].

2.4 Uneltele de dezvoltare CMake și CTest

Pentru proiecte mari de C++, invocarea manuală a compilatorului pentru a recompila fiecare fișier modificat devine repede impractică. CMake[8] este un *build system*: prin scrierea unui fișier concis de configurare ce descrie structura fișierelor de cod sursă din proiect, CMake automatizează recompilarea tuturor fișierelor impactate de o schimbare, ducând astfel la o experiență plăcută de dezvoltare a proiectului.

CTest este o componentă a proiectului CMake folosită pentru rularea automată a testelor. Din nou, cu creșterea numărului de teste ce trebuie efectuate după o schimbare în cod, devine impractică invocarea manuală a acestora. CTest ajută la automatizarea acestui procedeu, din nou spre a facilita o experiență plăcută de dezvoltare.

2.5 Biblioteca pthread

Biblioteca pthread[9] este interfața standard pentru crearea și manipularea mai multor fire de execuție într-un proces. Este parte din specificația standard POSIX pentru o interfață portabilă a sistemelor de operare.

Biblioteca pthread este folosită în două dintre bibliotecile de integrare, una din acestea având ca scop chiar simularea interfeței publice oferite în header-ul `<pthread.h>`.

De asemenea, pthread este folosită și în implementarea bibliotecii de capturare de evenimente pentru crearea unui fir de execuție separat care serializează evenimentele capturate în fișierul de evenimente.

2.6 Biblioteca DL

Biblioteca DL[10] este interfața descrisă în specificația standard POSIX pentru găsirea, încărcarea și utilizarea bibliotecilor dinamice. Această bibliotecă este folosită în proiect în programul independent SyncAnalysis pentru a încărca analizorii specificați de utilizator.

2.7 Biblioteca libunwind

Biblioteca libunwind[11] este o facilitate portabilă și eficientă pentru a observa stiva de apeluri de funcții în timpul execuției unui program.

Biblioteca este folosită pentru a înregistra stiva de apeluri de funcții când se capturează un eveniment. Folosirea bibliotecii acesteia este preferabilă altor variante mai convenabile

ce oferă direct simbolurile asociate funcțiilor din stivă pentru că scopul bibliotecii de capturare de evenimente este să fie cât mai eficientă, iar obținerea acestor simboluri se poate face din programul SyncAnalysis, după terminarea programului client, doar pentru stivele de execuție necesare în rapoarte.

2.8 Programele `addr2line`, respectiv `atos`

După cum s-a menționat și în secțiunea pentru `libunwind`, biblioteca de capturare a evenimentelor serializează doar lista de adrese din stiva de execuție în datele evenimentului în timpul execuției programului client. Programul SyncAnalysis trebuie apoi să transforme respectivele adrese în simboluri citibile de către client, pentru a fi atașate rapoartelor.

Pentru majoritatea sistemelor de operare ce respectă standardul POSIX, programul `addr2line` oferit de GNU ca parte din proiectul `binutils` [12] rezolvă această problemă. Programul primește o listă de adrese de memorie ce reprezintă stiva de apeluri de funcții și executabilul din care acestea au provenit și afișează exact lista de simboluri asociate, și, dacă se pot afla, numele fișierului și linia unde se află codul sursă pentru adresa respectivă din program. Pentru că proiectul a fost dezvoltat în principal pe un calculator cu sistemul de operare Mac OS (cu kernel-ul Darwin) unde programul `addr2line` nu funcționează prea bine, când se rulează programul SyncAnalysis pe Mac OS, acesta folosește `atos` [13] pentru a îndeplini aceleași sarcini.

2.9 Biblioteca `mcga-cli`

Programul SyncAnalysis acceptă multe argumente de configurare în linia de comandă (de exemplu directoarele în care să caute analizori, reguli de includere și excludere pentru ce analizori dintre cei găsiți să fie folosiți, dacă să afișeze sau nu informații auxiliare pentru găsirea de erori în interiorul executabilului în sine și altele).

Astfel, argumentele din linia de comandă sunt citite și interpretate folosind o bibliotecă externă, `mcga-cli` [14]. Această bibliotecă a fost dezvoltată de autorul proiectului SyncAnalysis, descris aici, dar este un proiect independent de articolul curent.

3 Descrierea proiectului

3.1 Compilarea și instalarea proiectului

3.2 Biblioteca de înregistrare a evenimentelor

3.2.1 Interfață

3.2.2 Descrierea unui eveniment

3.2.3 Capturarea stivei de execuție

3.2.4 Serializare (fișierul DUMP)

3.2.5 Implementare

3.3 Unelte de integrare

3.3.1 cxxsync (C++, începând cu C++98)

3.3.2 pthread (C/C++)

3.3.3 libc++ (pentru C++, începând cu C++11)

3.4 Executabilul de analiză statică

3.4.1 Parcurgerea și parsarea fișierului DUMP

3.4.2 Stocarea și observarea obiectelor active

3.4.3 Crearea de rapoarte

3.4.4 Afișarea simbolurilor din stiva de execuție

3.4.5 Înregistrarea analizorilor

3.5 Analizori pre-instalați

3.5.1 mutex-lock-order

3.5.2 lock-shadow

3.5.3 redundant-recursive-mutex

3.5.4 redundant-rwlock

3.5.5 useless-lock

4 Exemple de utilizare

4.1 Testele analizorilor (folosind `cxxsync`)

4.2 Folosind `LD_PRELOAD` și `<pthread.h>`

4.3 Folosind `libc++`

5 Concluzii

Bibliografie

- [1] Konstantin Serebryany and Timur Iskhodzhanov. Threadsanitizer: Data race detection in practice. In *Proceedings of the Workshop on Binary Instrumentation and Applications*, WBIA '09, page 62–71, New York, NY, USA, 2009. Association for Computing Machinery.
- [2] D. Hutchins, A. Ballman, and D. Sutherland. C/c++ thread safety analysis. In *2014 IEEE 14th International Working Conference on Source Code Analysis and Manipulation*, pages 41–46, 2014.
- [3] The Clang Team. Thread sanitizer - clang 11 documentation. <https://clang.llvm.org/docs/ThreadSanitizer.html>, 2009. [Online; accessed 6-June-2020].
- [4] The Clang Team. Clang-tidy - clang 11 documentation. <https://clang.llvm.org/extra/clang-tidy/index.html>, 2009. [Online; accessed 6-June-2020].
- [5] ISO. *ISO/IEC 9899:2011 Information technology — Programming languages — C*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, December 2011.
- [6] ISO. *ISO/IEC 14882:2017 Information technology — Programming languages — C++*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, fifth edition, December 2017.
- [7] Chris Lattner. Llvm and clang: Next generation compiler technology. In *The BSD conference*, volume 5, 2008.
- [8] Ken Martin and Bill Hoffman. *Mastering CMake: a cross-platform build system : version 3.1*. Kitware, New York, NY, 2015.
- [9] IEEE and The Open Group. *IEEE Std 1003.1-2017 (aka POSIX)*, volume 2, chapter 3, pages 1560–1744. IEEE, New York, NY USA, seventh edition, 2017.
- [10] IEEE and The Open Group. *IEEE Std 1003.1-2017 (aka POSIX)*, volume 2, chapter 3, pages 739–747. IEEE, New York, NY USA, seventh edition, 2017.

- [11] David Mosberger Tang. The libunwind project. <https://www.nongnu.org/libunwind/>, 2011. [Online; accessed 7-June-2020].
- [12] Roland H Pesch and Jeffrey M Osier. The gnu binary utilities. *Free Software Foundation*, 1993.
- [13] Apple Inc. atos(1) [osx man page]. <https://www.manpagez.com/man/1/atos/>, 2010. [Online; accessed 7-June-2020].
- [14] Darius Marian. The command line arguments library of the mcga project. <https://github.com/darius98/mcga-cli>, April 2019. [Online; accessed 7-June-2020].