UNIVERSITATEA ”ALEXANDRU-IOAN CUZA” DIN IAȘI

FACULTATEA DE INFORMATICĂ

LUCRARE DE LICENȚĂ

Verificarea algoritmului DPLL in F*

propusă de

Alexandru Donica

Sesiunea: iunie/iulie, 2023

Coordonator științific

Conf. Dr. Ștefan Ciobâcă

UNIVERSITATEA ”ALEXANDRU-IOAN CUZA” DIN IAȘI

FACULTATEA DE INFORMATICĂ

Verificarea algoritmului DPLL in F*

Alexandru Donica

Sesiunea: iunie/iulie, 2023

Coordonator științific

Conf. Dr. Ștefan Ciobâcă

Avizat,

Îndrumător lucrare de licență,

Conf. Dr. Ștefan Ciobâcă.

Data: ..... Semnătura: .....

Declarație privind originalitatea conținutului lucrării de licență

Subsemnatul **Donica Alexandru** domiciliat în **România, jud. Iași, mun. Iași, strada Costache Negri, nr. 35, bl. A1, ap. 42**, născut la data de **07 aprilie 2000**, identificat prin CNP **5000407226761**, absolvent al Facultății de informatică, **Facultatea de informatică** specializarea **informatică**, promoția 2022, declar pe propria răspundere cunoscând consecințele falsului în declarații în sensul art. 326 din Noul Cod Penal și dispozițiile Legii Educației Naționale nr. 1/2011 art. 143 al. 4 și 5 referitoare la plagiat, că lucrarea de licență cu titlul **Verificarea algoritmului DPLL in F*** elaborată sub îndrumarea domnului **Conf. Dr. Ștefan Ciobâcă**, pe care urmează să o susțin în fața comisiei este originală, îmi aparține și îmi asum conținutul său în întregime.

De asemenea, declar că sunt de acord ca lucrarea mea de licență să fie verificată prin orice modalitate legală pentru confirmarea originalității, consimțind inclusiv la introducerea conținutului ei într-o bază de date în acest scop.

Am luat la cunoștință despre faptul că este interzisă comercializarea de lucrări științifice în vederea facilitării falsificării de către cumpărător a calității de autor al unei lucrări de licență, de diplomă sau de disertație și în acest sens, declar pe proprie răspundere că lucrarea de față nu a fost copiată ci reprezintă rodul cercetării pe care am întreprins-o.

Data: ..... Semnătura: .....

Declarație de consimțământ

Prin prezenta declar că sunt de acord ca lucrarea de licență cu titlul **Verificarea algoritmului DPLL in F***, codul sursă al programelor și celelalte conținuturi (grafice, multimedia, date de test, etc.) care însoțesc această lucrare să fie utilizate în cadrul Facultății de informatică.

De asemenea, sunt de acord ca Facultatea de informatică de la Universitatea ”Alexandru-Ioan Cuza” din Iași, să utilizeze, modifice, reproducă și să distribuie în scopuri necomerciale programele-calculator, format executabil și sursă, realizate de mine în cadrul prezentei lucrări de licență.

Absolvent **Alexandru Donica**

Data: ..... Semnătura: .....

Cuprins

Motivație

Rolul unui 'SAT solver' este de a rezolva problema satisfiabilității booleene, făcându-se si in ziua de azi cercetări care au scopul de a îmbunătăți algoritmi existenți. Acest 'SAT solver' găsește o soluție pentru o formula data in cazul in care formula este satisfiabilă, in caz contrar formula este nesatisfiabilă.

Corectitudinea oricărui rezultat al unei formula satisfiabile poate fi verificat folosind algoritmi simpli. Însă un 'SAT solver' complex creat pentru procesa formule de dimensiuni din ce in ce mai mari sau pentru a avea o viteza de rezolvare a problemei mai rapida decât alți 'SAT solveri' folosiți pot conține erori de programare ce ar produce rezultate false, cum ar fi, in urma procesării unei formula nesatisfiabile acesta sa enunțe ca este satisfiabilă, sau invers.

De aceea este importanta crearea unor programe care verifica corectitudinea acestor 'SAT solveri' si am creat un 'SAT solver' verificat formal folosind limbajul de programare F* (FStar).

Introducere

detalii despre problema sat
conexiuni cu probleme reale
solvere create pana acum
probleme care apar la aceste solvere
importanta verificarii solverelor
acest solver implementeaza alg DPLL
descriere la alg DPLL
verificare formala
fstar - limbaj de programare si verificare foloseste z3 smt solver
ce presupune un solver verificat
de ce acest solver e verificat si in ce mod de catre fstar

Capitolul 1

Algoritmul DPLL

(Davis-Putnam-Logemann-Loveland)

Capitolul 2

Detalii de implementare

2.1 Despre FStar

Limbajul F* este un limbaj de programare orientat pe demonstratii ce poate fi folosit pentru uz general. Printre aspectele acestui limbaj se numara si faptul ca prezinta suport pentru programare functionala. De asemenea, este proiectat sa faca verificare formala a codului, astfel orice programator poate sa adauge functiilor specificatii in forma de pre-conditii, post-conditii, invarianti, pentru a putea asigura completitudinea codului.

despre asserturi, putin cod efectiv, multe lemme/asserturi

compara cate linii is in .ml fata de .fst

2.2 Structurile de date folosite

Pentru acest proiect am ales proiectarea unor structuri de date si colectii simple, pentru care au fost create functii ce implementeaza operatii generice.

Conform definitiei, o formula este o multime de clauze, astfel implementarea are forma unei liste inlantuite de clauze.

// adauga linia cu font fain formula = list clause

O clauza, conform definitiei este o multime de literali, astfel este structurata ca o lista inlantuita de literali

//adauga linia cu font fain type clause = list literal

Un literal reprezinta o variabila a carui valoare de adevar poate fi negata, motiv pentru care tipul de data 'literal' este creat astfel, folosind 2 constructori 'Var' pentru a evidentia ca nu se neaga valoarea de adevar a variabilei, si 'NotVar' pentru a arata negatia variabilei.

//type literal = — Var nat-non-zero — NotVar nat-non-zero

Doi literali, 'Var x' si 'NotVar x' sunt considerati a nu fi egali, insa au variabilele egale.

Variabilele sunt reprezentate folosind numere naturale nenule, deoarece un format des intalnit al datelor de intrare pentru aceasta problema si care s-a considerat la conceperea proiectului reprezentau literalii folosind numere intregi nenule. Am ales literalii sa fie reprezentati prin 2 constructori alaturi de numere intregi strict pozitive pentru a evita verificari repetate in cod cu privire la semnul unei variabile oarecare si pentru a se putea face usor distinctia intre tipurile de literali.

//type nat-non-zero = x : nat x ¿ 0

Pentru matricea de aparitie a clauzelor si literalilor, am folosit o structura de date intermediara care reprezinta o linie a matricei si este formata dintr-o pereche de 2 elemente, un literal si o lista inlantuita de clauze:.

//type occurence-vector = lit : literal ; clauses : list clause

Conditia acestui tip de date este ca lista 'clauses' trebuie sa contina toate clauzele in care apare literalul 'lit' din formula primita la inceperea programului, invariant care a fost scris astfel: //invariantul

Matricea in sine este o lista inlantuite de 'occurence-vector', si trebuie mereu sa respecte conditia ca nu exista 2 elemente in lista a caror membrul 'lit' sa fie egal ca si valoare.

//type occurence-matrix = list occurence-vector

Rezultatul functiei ce verifica satisfiabilitatea unei formule este in sine un o structura de date simpla creata pentru aceasta problema, reprezentata prin 2 constructori, unul pentru situatia in care formula e nesatisfiabila si unul care contine o posibila combinatie de variabile pozitive si valori booleene ce reprezinta o solutie valida pentru formula.

//type result = Sat t — Unsat

In aceasta lucrare, se va referi la o combinatie de variabile pozitive si valori booleene prin termenul 'truth-assignment' prescurtat 't' sau 'tau'.

Acest tip de data 'truth_assignment' reprezinta o lista inlantuita de elemente,

structuri formate din doi parametri, unul 'value' ce reprezinta valoarea unei variabile si 'var' ce reprezinta in sine variabila.

//type variable-info = {value : bool ; var : nat_not_zero}

//type truth_assignment = x : list variable_info {truth_assignment_condition x}

Acest 'truth_assignment' trebuie sa respecte conditia ca nu exista 2 elemente in lista care sa aibe aceeasi valoare a membrului 'var'. Invariantul a fost scris astfel simplificand conditia, si anume ca membrul 'var' al elementului din capul listei trebuie sa nu apara in oricare alt element din lista, iar daca submultimea 'tail_t' formata din toate elementele lui 't' exceptia capului listei trebuie sa respecte aceeasi proprietate.

//invariantul

Structurile de date au fost alese a fi simple in detrimentul eficientei vitezei de executie a programului, pentru a putea analiza dificultatea si complexitatea mentinerii corectitudinii in implementarrea unui algoritm complet in limbajul F*.

2.3 Modulele ce alcatuiesc programul

Separarea programului pe mai multe fisiere s-a realizat pentru a usura dezvoltarea si modificarea codului in etapa implementarii. De asemenea, orice schimbare intr-un fisier rezulta in re-verificarea acestuia la momentul compilarii, proces care devine cu atat mai indelungat cu cat fisierul prezinta mai multe functii si demonstratii complexe.

Astfel modulele acestui program sunt:

DataTypes - fisier unde s-au definit toate structurile de date explicate anterior, invariantul pentru cele ce aveau nevoie de unul, si anumite functii ajutatoare pentru a manipula tipurile de date tip colectii demonstrand in acelasi timp corectitudinea operatiilor efectuate pe colectiile respective.

Un exemplu de astfel de functie ar fi metoda 'add_var_to_truth_assignment', al carei simplu scop este de a adauga un nou element in colectia 'truth_assignment', insa care trebuie sa poata respecta urmatoarea post_conditie:

//exemplu post-conditie

Modulul 'DataTypeUtils' contine un numar considerabil de metode ajutatoare, folosite in mai multe alte module ale proiectului si care trebuie deci sa fie disponibile intr-un singur loc. Printre aceste metode apar:

- functii de procesesare a parametrilor primiti;

  ex: *get_clause_value* - returneaza valoarea de adevar a unei clauze considerand un 'truth_assignment' primit ca parametru;

- *lemme* care ajuta la asigurarea si demonstrarea corectitudinii programului;

  ex: *lemma_no_vars_in_t_outside_f_length_compare* folosita pentru a arata ca daca un 'truth_assignment' nu contine nici o variabila care nu este prezenta in formula 'f', atunci sigur lungimea variabilei 't' este mai mica sau egala cu numarul variabilelor distincte ce apar in formula 'f';

  //exemplu

- pre/post-conditii importante si relevante demonstrarii corectitudinii salvate in variabile globale, pentru a reduce cantitatea de cod repetat si pentru a putea generaliza functiile la nivel inalt, avand posibilitatea in viitor de a optimiza aspecte ale programului precum structurile de date, pentru care ar trebui modificate doar implementarea metodelor ce proceseaza aceste structuri;

  ex: *t_cant_be_solution_for_f*, folosit ca post-conditie care enunta ca orice 'truth_assignment' ce contine toate variabilele formulei 'f' si pentru care parametrul 't' este o submultime a sa, nu este o solutie valida pentru 'f';

  //exemplu

- predicate, functii care evalueaza daca anumiti parametrii respecta o anumita proprietate

  ex: *is_solution*, desi simplu, este unul din cei mai importanti predicati ai programului

  //exemplu

Modulul DpllPropagation contine putine metode insa importante pentru demonstrate si dificil la randul lor de specificat si verificat. Aceste functii se ocupa cu pasul de propagare a clauzelor 'unit' din algoritmul DPLL.

O mica parte insa cea mai importanta din specificarea metodei principale este: //aseaza mai frumos !!! t1_is_sublist_of_t2 t (fst res) / ((t_cant_be_solution_for_f f t) ¡==¿ (t_cant_be_solution_for_f f (fst res))) / length res._1 ¿= length t

Post-conditiile enunta urmatoarele:

- faptul ca tot ce e inclus in 'tau' primit ca parametru trebuie sa fie inclus si in 'tau' trimis ca rezultat;
- lungimea 'tau'-ului rezultat trebuie sa fie macar egala cu lungimea 'tau'-ului primit, lucru care ajuta la asigurarea terminarii programului;
- 'tau'-ul primit ca parametru nu poate fi solutie pentru formula 'f' daca si numai daca 'tau'-ul rezultat nu poate fi solutie

Modulul 'OccurenceMatrix' contine functii necesare crearii, procesarii si accesarii matricei de aparitie a literalilor in clauzele formulei si de asemenea implementarea optimizata pentru metoda ce verifica daca un 'tau' oarecare este solutie partiala pentru formula data.

Modulul 'Dpll' contine functia principala ce primeste o formula si ofera un rezultat, unde se specifica si verifica legatura intre valoarea rezultatului si formula.

//exemplu cu post-conditia dpll

Modulul 'InputFileParser' a fost conceput pentru a putea folosi formule diverse de diferite dimensiuni prin parsarea unor fisiere de intrare ce respecta un anumit format.

//pune link in footer la site cu input files

Modulul 'ConvertorToString' este folosit pentru a converti orice obiect creat de program intr-un sir de caractere si mai ales pentru a se afisa rezultatul pe ecran sub o forma usoara de citit si inteles.

2.4 proofness / soundness / completeness / etc..

2.5 Metrici orientative

timp sa returneze sat

timp sa dea unsat cam mult

laptop specs 500 secunde sa compileze, verifice si extraga cod pt toate fisierele

datatypes - 8 secunde

datatypeUtils - 33 sec

dpllpropagation - 285 sec

occmatrix - 91 sec

fileparser - 4 sec

dpll - 71 sec

convertorToString - 3 sec

main - 3 sec

Capitolul 3

Pasi necesari pentru a reproduce

Informatii despre replicarea conditiilor necesare executiei programelor scrise folosind F* se pot gasi pe pagina de github a limbajului F*. [1]

In sectiunea urmatoare se prezinta pasii care au fost luati pentru crearea mediului in care s-a dezvoltat 'SAT solver-ul'. Instructiunile urmatoare sunt compatibile cu sistemul de operare Windows, verificat cu versiunile 10/11.

3.1 Programe si resurse necesare

Urmatoarele aplicatii/programe/resurse trebuie descarcate de la locatia specificata fiecareia in fisierul 'INSTALL.md' gasit pe pagina de github a limbajului FStar.

- OCaml - necesar compilarii si executarii fisierelor OCaml (.ml), care rezulta in urma compilarii fisierelor FStar (.fst)
- opam - necesar pentru a instala pachetele necesare la compilarea fisierelor specifice limbajului de programare OCaml (versiune folosita - 4.14.0)

  (versiunea folosita pentru lucrare - 2.0.10)
- cygwin - ofera posibilitatea compilarii si executarii a programelor tipice sistemelor de operare Unix si Linux, ceea ce include suport pentru fisiere 'Makefile'

  (versiunea folosita pentru lucrare - 3.4.6)
- Z3 - folosit pentru a valida fisierele ce contin programe scrise folosind F*

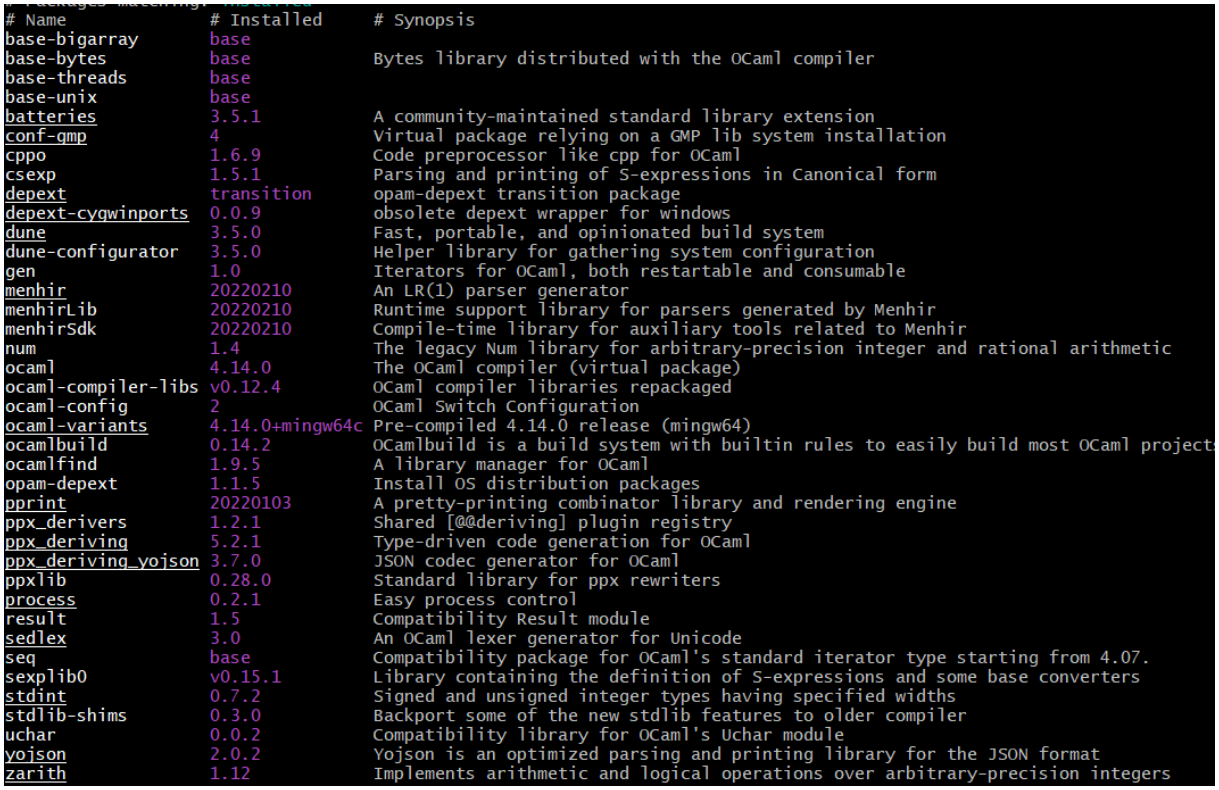
  (arhiva folosita pentru Windows - z3-4.8.5-x64-win.zip)

[1] https://github.com/FStarLang/FStar/blob/master/INSTALL.md

Dupa descarcarea/instalarea acestor resurse, trebuie clonata ramura 'master' a proiectului FStar pe dispozitivul local, denumind folder-ul "fstar". (locatia clonei pentru acest proiect: "D:/fstar", versiunea - F* 2023.04.26 dev)

Trebuie adaugate path-urile absolute catre ".../fstar/bin" si ".../z3-win/bin" in variabila 'Path' a sistemului.

Dupa instalarea programului 'opam', trebuie instalate mai anumite pachete de date. Minimul necesar de pachete se poate gasi si pe instructiunile de instalare gasite la link-ul de mai sus, insa pentru a avea la dispozitie toate resursele din proiectul FStar descarcat fara erori, sunt necesare urmatoarele pachete:



# Name	# Installed	# Synopsis
base-bigarray	base	
base-bytes	base	Bytes library distributed with the OCaml compiler
base-threads	base	
base-unix	base	
batteries	3.5.1	A community-maintained standard library extension
conf-gmp	4	Virtual package relying on a GMP lib system installation
cppo	1.6.9	Code preprocessor like cpp for OCaml
csexp	1.5.1	Parsing and printing of S-expressions in Canonical form
depext	transition	opam-depext transition package
depext-cygwinports	0.0.9	obsolete depext wrapper for windows
dune	3.5.0	Fast, portable, and opinionated build system
dune-configurator	3.5.0	Helper library for gathering system configuration
gen	1.0	Iterators for OCaml, both restartable and consumable
menhir	20220210	An LR(1) parser generator
menhirLib	20220210	Runtime support library for parsers generated by Menhir
menhirSdk	20220210	Compile-time library for auxiliary tools related to Menhir
num	1.4	The legacy Num library for arbitrary-precision integer and rational arithmetic
ocaml	4.14.0	The OCaml compiler (virtual package)
ocaml-compiler-libs	v0.12.4	OCaml compiler libraries repackaged
ocaml-config	2	OCaml Switch Configuration
ocaml-variants	4.14.0+mingw64c	Pre-compiled 4.14.0 release (mingw64)
ocamlbuild	0.14.2	OCamlbuild is a build system with builtin rules to easily build most OCaml project
ocamlfind	1.9.5	A library manager for OCaml
opam-depext	1.1.5	Install OS distribution packages
pprint	20220103	A pretty-printing combinator library and rendering engine
ppx_derivers	1.2.1	Shared [@@deriving] plugin registry
ppx_deriving	5.2.1	Type-driven code generation for OCaml
ppx_deriving_yojson	3.7.0	JSON codec generator for OCaml
ppxlib	0.28.0	Standard library for ppx rewriters
process	0.2.1	Easy process control
result	1.5	Compatibility Result module
sedlex	3.0	An OCaml lexer generator for Unicode
seq	base	Compatibility package for OCaml's standard iterator type starting from 4.07.
sexplib0	v0.15.1	Library containing the definition of S-expressions and some base converters
stdint	0.7.2	Signed and unsigned integer types having specified widths
stdlib-shims	0.3.0	Backport some of the new stdlib features to older compiler
uchar	0.0.2	Compatibility library for OCaml's Uchar module
yojson	2.0.2	Yojson is an optimized parsing and printing library for the JSON format
zarith	1.12	Implements arithmetic and logical operations over arbitrary-precision integers

La finalul acestor pasi, folosind terminalul Cygwin si instructiunile de tipul 'make' in folder-ul 'fstar', ar trebui sa functioneze verificarea si executarea oricaror fisiere surse scrise in F*, fisiere proprii sau exemple ce faceau deja parte din proiect.

3.2 Executarea solver-ului SAT

Sursele corespunzatoare proiectului prezentat se gasesc la: FStar-DPLL github.

Aceste surse trebuie descarcate, salvate intr-un folder in proiectul 'fstar'. Fisierul 'Makefile' trebuie modificat, astfel incat variabila 'FSTAR-HOME' trebuie sa faca referire folder-ul 'fstar'. Aceiasi pasi trebuie facuti pentru fisieru 'Makefile' din folder-ul 'output'.

Apoi, in terminalul cygwin deschis in folder-ul proiectului DPLL-FStar, trebuie executata comanda 'make', la finalul careia in folder-ul 'output' vor aparea pentru fiecare fisier sursa '.fst' cate un fisier '.ml' care contin codul Ocaml extras din sursele FStar. De asemenea in folder-ul 'output' se va afla executabilul "Main.exe".

Pentru a recompila si regenera fisierul "Main.exe", trebuie sters cel anterior creat, daca a fost creat.

Imediat dupa pornirea programului "Main.exe", trebuie introdus de la tastatura calea relativa catre un fisier de input. Cateva fisiere de input exista in folder-ul "input-files" si orice alt fisier de intrare trebuie sa respecte acel pentru ca parsarea implementata a datelor sa functioneze.

La finalul unei astfel de executii, va aparea mesaj la consola cygwin cu rezultatul obtinut, fie ca formula data este nesatisfiabila, fie ca e satisfiabila si alaturi o varianta de raspuns ce contine variabilele formulei si valorile lor astfel incat fiecare clauza a formulei sa aibe valoarea de adevar true.

—INTRODU EXEMPLU POZA INPUT / OUTPUT DUPA EXECUTIE

Concluzii

acest solver nu prezinte cele mai eficiente structuri de date si euristici

insa prezinta cum arata specificatii functionale pt algoritmului dpll si implicit reprezinta o baza pt specificatiile oricarei extensii ale sale

solverul este sound, complet, garantat ca se termina? ,verificat formal

schimbarea structurilor de date spre o forma mai eficienta nu ar fi una dificila

Bibliografie

- fstar tutorial,
- fstar github,
- toate linkurile referentiate mai sus?