UNIVERZITET U BEOGRADU
MATEMATIČKI FAKULTET

Ana Đorđević

AUTOMATSKO GENERISANJE TEST PRIMERA UZ POMOĆ STATIČKE ANALIZE I REŠAVAČA Z3

master rad

Beograd, 2017.

Mentor:

dr Milena Vujošević Janičić, docent
Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet

Članovi komisije:

dr Filip Marić, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet

dr Milan Banković, docent
Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet

Datum odbrane: _____

Mami i tati

Sadržaj

Glava 1

Uvod

Značajan razvoj računarstva i informatike poslednjih decenija uveo je softver u sve segmente života. Razvijeni su brojni softverski sistemi raznovrsnih namena koji se koriste kako za neobavezne tako i za poslovne aktivnosti. Softver je postao neophodan u svim oblastima društva uključujući, između ostalog, privredu, obrazovanje, zdravstvo i medije.

Složenost softverskih sistema neizbežno stvara veći prostor za pravljenje grešaka. U zavisnosti od namene sistema, greške mogu izazvati neprijatnosti ali i katastrofalne posledice po živote ljudi. Kako bismo izbegli ovakve situacije, neophodno je precizno utvrditi ispravnost razvijenog softvera.

Ispravnost softvera najčešće se utvrđuje njegovim izvršavanjem, tj. testiranjem. Prostor mogućih ulaza programa obično je prevelik pa nije moguće pokretanje i provera programa svim mogućim ulazima. Poželjno je sprovesti testiranje sistema koristeći samo reprezentativni skup ulaznih podataka. Automatizacija procesa generisanja test primera i provera rezultata testiranja posebno je važna jer olakšava i ubrzava proces testiranja.

Ispravnost softvera je moguće proveravati i bez njegovog izvršavanja, samo na osnovu analize izvornog koda, korišćenjem tehnika statičke analize. Statička analiza koda može biti manuelna, i podrazumeva ručne provere i preglede koda, ili može biti automatizovana.

U okviru statičke automatizovane provere ispravnosti softvera formiraju se uslovi ispravnosti iskazani formulama u terminima matematičkih teorija [21]. Formirani uslovi ispravnosti definišu model kojim se opisuje ponašanje programa [7]. Proveravanjem modela, primenom različitih tehnika testiranja pronalaze se greške u sistemu. Sistemi za statičku analizu koda mogu se koristiti i za automatsko generisanje test

primera.

Doprinos rada

U okviru ovog rada nadograđen je sistem za statičku proveru ispravnosti softvera LAV modulom za automatsko generisanje test primera [23]. U okviru sistema LAV, ponašanje programa modeluje se formulama izabrane teorije. Nadogradnja obuhvata prepoznavanje ulaznih vrednosti programa, a zatim izdvajanje odgovarajućih vrednosti iz modela generisanih od strane alata LAV i rešavača Z3. Na osnovu vrednosti izdvojenih iz modela, formira se test primer za koji je potrebno pokrenuti izvršavanje programa i proveriti da li generisani test primer zaista dovodi do greške u softveru.

Pregled rada

Nastavak rada organizovan je na sledeći način. U glavi 2 opisan je proces testiranja kao važan deo životnog ciklusa razvoja softvera. Navedene su vrste i strategije testiranja uključujući strategiju crne, bele i sive kutije. Opisani su načini izvršavanja i generisanja test primera. Navedeni su neki od alata za automatsko generisanje test primera. Glava 3 daje motivaciju za korišćenje rešavača tokom statičke provere ispravnosti softvera. Opisuju se osnove rešavača Z3 navođenjem podržanih teorija. Dat je pregled najvažnijih tipova i struktura podataka. Opisana su dva formata za komunikaciju sa Z3 rešavačem korišćenjem SMT-LIB standarda i C++ interfejsa i njihova upotreba kroz primere. Implementacija će biti naknadno dodata. U glavi 5 izneti su osnovni zaključci ovog rada.

Glava 2

Testiranje

Testiranje predstavlja važan deo životnog ciklusa razvoja softvera. Softver se implementira prema zahtevima korisnika sa ciljem rešavanja realnog problema ili kreiranja potrebne funkcionalnosti. Nakon implementacije, softver može u manjoj ili većoj meri odgovarati zahtevima. Svako ponašanje softvera koje se ne slaže sa zahtevima predstavlja grešku koju je potrebno detektovati i eliminisati.

Testiranje predstavlja proveru da li je softver implementiran u skladu sa korisničkim zahtevima. Pored proveravanja samog softvera, testiranje uključuje proveravanje svih pratećih komponenti i karakteristika.

Sa porastom složenosti projekta, raste i značaj testiranja i provera celokupnog softverskog sistema kako bi se izbegli ishodi koji mogu da unište ceo projekat. S obzirom da se greške ne mogu izbeći, potrebno ih je što je moguće ranije otkriti kako bi njihovo otklanjanje bilo brže i jeftinije. Zbog prednosti koje se ostvaruju, najzastupljenije i trenutno najpopularnije metodologije razvoja softvera promovišu paralelnu implementaciju i pisanje testova za svaku od celina koja se razvija u okviru softverskog sistema [25]. Pre isporučivanja softvera, neophodno je da uspešno prođu testovi za svaku od celina sistema.

U delu 2.1 opisane su faze i aktivnosti koje se primenjuju tokom procesa testiranja. U delu 2.2 opisane su vrste testiranja softverskog sistema. U delu 2.3 opisane su strategije testiranja uključujući strategiju crne, bele i sive kutije. Načini izvršavanja testova opisani su u delu 2.4. Načini generisanja testova opisani su u delu 2.5. U delu 2.5 opisane su i neke od tehnika i alata za automatsko generisanje test primera korišćenjem strategija crne, bele i sive kutije.

2.1 Testiranje u procesu razvoja softvera

Testiranje softvera se u opštem slučaju sastoji od četiri faze pri čemu svaka faza obuhvata veliki broj aktivnosti. Proces testiranja sastoji se od faza planiranja, dizajniranja, izvršavanja i evaluacije testova [13].

Planiranje (eng. *Test planning*) predstavlja pripremu za ceo proces testiranja i uključuje definisanje zadataka koje je potrebno sprovesti kao i način njihovog izvršavanja. Tokom ove faze, definišu se vrste testova koje će biti sprovedene, metode testiranja, strategije kao i kriterijum završetka. Rezultat planiranja predstavlja skup dokumenata koji sadrže opštiji pogled na sistem koji će se testirati, aktivnosti koje će biti izvršene kao i alate koji će biti korišćeni.

Tokom faze dizajniranja testova (eng. *Test design*), vrši se detaljna specifikacija načina na koje će se aktivnosti predviđene planom izvršiti. Pored toga, kreiraju se i precizna uputstva kako će se vršiti testiranje sistema. Tokom ove faze, analizira se sistem koji će biti testiran. Rezultat faze dizajniranja je skup test slučajeva i test procedura koja će biti korišćene u fazi izvršavanja testova.

Izvršavanje testova (eng. *Test execution*) se vrši radi provere funkcionalnosti sistema. To je proces konkretne primene test slučajeva i test procedura formiranih na osnovu plana i dizajna. Izvršavanje testova obuhvata i dodatnu aktivnost praćenja statusa problema. Ova aktivnost podrazumeva eliminaciju prijavljenih problema kao i potvrđivanje da je problem rešen.

Evaluacija testova (eng. *Test evaluation*) predstavlja kreiranje izveštaja kojim se opisuje šta je testirano i potvrđivanje da je implementirani sistem spreman za korišćenje u skladu sa korisničkim zahtevima. Proces evaluacija uključuje i pregled rezultata dobijenih analizom izlaza test slučajeva.

2.2 Vrste testiranja

U literaturi se sreću različite podele testiranja softvera. Svaka je nastala kao posledica posmatranja različitih aspekata i pristupa provere softverskog sistema. Jedan od pristupa odnosi se na testiranje različitih nivoa sistema. Nivoi testiranja mogu biti pojedinačni moduli, grupe modula (vezanih namenom, upotrebom, ponašanjem ili strukturom) ili ceo sistem. U skladu sa pomenutom podelom, prema nivou testiranja, razlikujemo testove jedinice koda, komponentne, integracione i sistemske testove.

U kasnijim fazama razvoja softvera, kada je testiranje sistema po svim nivoima uspešno završeno, pristupa se izvršavanju istraživačkih testova i testova prihvatljivosti.

Testiranjem jedinice koda (eng. *Unit testing*) proverava se funkcionisanje delova sistema koji se nezavisno mogu testirati [35]. U zavisnosti od konteksta i programske paradigme, to mogu biti podprogrami ili veće komponente formirane od tesno povezanih jedinica. Ovom vrstom testiranja prolazi se svaki i najmanji deo sistema, pa upravo iz tog razloga ima važnu ulogu prilikom osiguravanja kvaliteta razvijenog softvera. Jedinični testovi definisani su standardom *IEEE Standard for Software Unit Testing* [19]. Cilj jediničnih testova je dokazivanje da komponenta ima predviđenu funkcionalnost. Ukoliko postoje greške u komponenti, one bi trebalo da budu otkrivene u fazi testiranja te komponente. Treba koristiti specijalne slučajeve ulaza, probati granice domena kao i nekorektan ulaz kako bi obezbedili da ne dolazi do pada softverskog sistema pri ovakvim situacijama.

Komponentnim testiranjem (eng. *Component testing*) proveravaju se moduli sastavljeni od više komponenti [17]. Neformalno, komponenta je skup povezanih jedinica koda koje imaju zajednički interfejs prema ostalim komponentama. Moduli se proveravaju odmah po njihovom kreiranju pri čemu se testiranje može vršiti izolovano od ostatka sistema, u zavisnosti od izabranog modela razvoja. Važno je napomenuti da testiranje jedinica koda obavlja razvojni tim, a testiranje komponenti tim testera. Pored toga, preporuka je da se komponentno testiranje izvrši pre testova integracije koji će biti opisani u nastavku.

Pošto su pojedinačni moduli u sistemu ispravno implementirani, integracionim testiranjem (eng. *Integration testing*) proverava se saradnja između modula koji predstavljaju jednu celinu sistema [33]. Ispituje se da li su veze između ovih modula dobro definisane i realizovane, tj. da li moduli komuniciraju na način opisan u specifikaciji projekta. Integracionim testovima pokazuje se da različiti moduli sistema rade ispravno zajedno. Za izvršavanje integracionih testova, obično se zahteva pristup bazi i hardverskim delovima sistema. Ukoliko je testiranje komponenti uspešno završeno, tokom integracionog testiranja mogu se naći manji propusti u komunikaciji između modula, pri čemu možemo biti sigurni da su funkcionalnosti samih modula ispravno implementirane.

Sistemsko testiranje (eng. *System testing*) obuhvata proveravanje sistema kao celine [30]. Ispituje se da li je ponašanje sistema u skladu sa specifikacijom zadatom od strane klijenta. Ova vrsta testiranja stavlja naglasak na nefunkcionalne zahteve

sistema kao što su brzina, efikasnost, otpornost na otkaze, uklapanje u okruženje u kojem će se sistem koristiti. Testiranje sistema obavlja se u drugačijim uslovima u odnosu na testiranje jedinica koda i testiranje prihvatljivosti. U proces testiranja sistema uključuje se ceo razvojni tim pod nadzorom rukovodioca projekta. Testiranje sistema obuhvata nekoliko koraka pri čemu će u nastavku biti opisano testiranje performansi i instalaciono testiranje.

Tokom testiranja performansi, izvršavaju se testovi konfiguracije, kapaciteta, kompatibilnosti i bezbednosti kao i regresioni testovi. Testovima konfiguracije ispituje se ponašanje sistema u različitim hardverskim i softverskim okruženjima. Različite konfiguracije namenjene su različitim korisnicima sistema. Ovim testovima proveravaju se sve konfiguracije sistema. Testovima kapaciteta proverava se ponašanje sistema pri obradama velikih količina podataka. Proverava se i ponašanje sistema u slučaju kada skupovi podataka postignu svoje maksimalne kapacitete. Testovima kompatibilnosti proverava se način ostvarivanja komunikacije sistema sa drugim spoljnim sistemima. Ovim testovima se proverava i da li je korisnički interfejs implementiran u skladu sa zahtevima klijenta. Svakako, pri testiranju važna karakteristika je bezbednost sistema. Testovima bezbednosti proverava se da li su određene funkcionalnosti dostupne isključivo onim korisnicima kojima su namenjene. Proveravaju se i dostupnost, integritet i poverljivost svih skupova podataka. Regresiono testiranje podrazumeva primenu jednom napisanog test primera nekoliko puta za testiranje istog softvera. To se obično radi posle izmena u razvoju sistema, da bi se utvrdilo da nije došlo do lošeg rada nekih funkcija koje nisu bile obuhvaćene izmenama. Regresioni testovi garantuju da su performanse novog sistema barem jednake performansama starog.

Poslednja faza sistemskog testiranja je instalaciono testiranje. Ova vrsta testiranja izvodi se instaliranjem softvera na klijentskoj mašini. Prilikom instaliranja, sistem se konfiguriše u skladu sa okruženjem. Ukoliko je potrebno, sistem se povezuje sa spoljnim uređajima i sa njima uspostavlja komunikaciju. Instalacioni testovi se izvršavaju u saradnji sa korisnicima. Ispituje se da li uslovi na klijentskoj mašini i okruženju negativno utiču na neke funkcionalne ili nefunkcionalne osobine sistema. Kada rezultati testiranja zadovoljavaju potrebe klijenta, testiranje se prekida i sistem se formalno isporučuje.

Tokom istraživačkog testiranja (eng. *Exploratory testing*) testeri pronalaze i proveravaju druge eventualne pravce korišćenja softverskog sistema [4]. Na taj način podstiče se povećanje kreativnosti testera. Ova vrsta testiranja obuhvata aktivnosti

prepoznavanja, kreiranja i izvršavanja novih test slučajeva. Istraživačko testiranje uglavnom ima smisla kada je aplikacija u svom finalnom obliku, kada tester može videti i druge alternativne pravce korišćenja sistema koji ranije nisu mogli biti predmet testiranja. Ukoliko se ova faza testiranja preskoči, postoji opasnost da neke funkcionalnosti sistema ne budu pokrivene testovima.

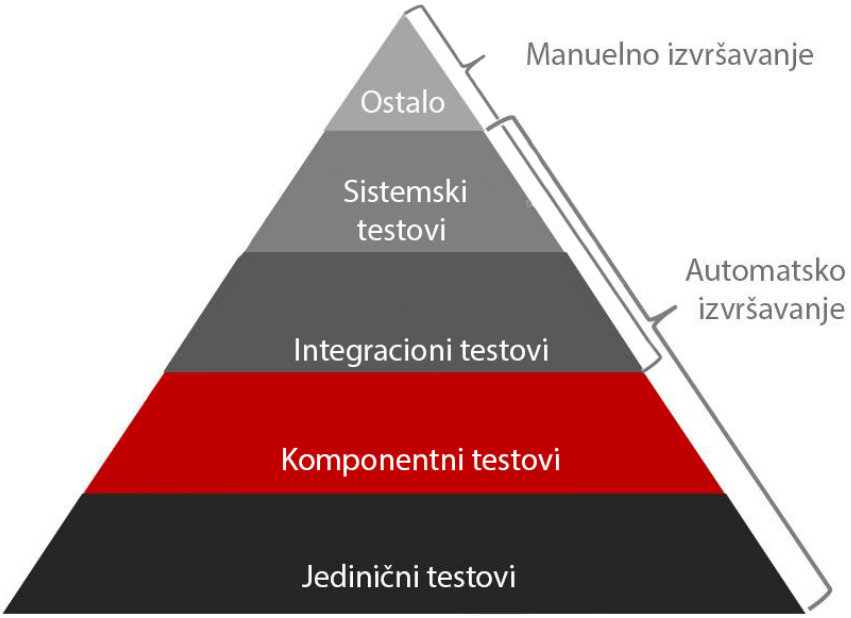
Testovi prihvatljivosti (eng. *Acceptance testing*) treba da omoguće klijentima i korisnicima da se sami uvere da je napravljeni softver u skladu sa njihovim potrebama i očekivanjima [39]. Ovu vrstu testiranja izvode i procenjuju korisnici, a razvojni tim im pruža pomoć oko tehničkih pitanja, ukoliko za tim ima potrebe. Klijent može da proceni sistem na tri načina: referentnim testiranjem, pilot testiranjem i paralelnim testiranjem. Kod referentnog testiranja, klijent generiše test slučajeve koji predstavljaju uobičajne uslove u kojima sistem treba da radi. Ove testove izvode korisnici kako bi procenili da li je softver implementiran u skladu sa očekivanjima. Pilot testiranje podrazumeva instalaciju sistema na privremenoj lokaciji i njegovu upotrebu. U ovom slučaju, testiranje se vrši simulacijom svakodnevnog rada na sistemu. Paralelno testiranje se koristi tokom razvoja, kada jedna verzija softvera zamenjuje drugu ili kada novi sistem treba da zameni stari. Ideja je paralelno funkcionisanje oba sistema (starog i novog) čime se korisnici postepeno privikavaju i prelaze na korišćenje novog sistema.

Opisani načini testiranja ilustrovani su piramidom testiranja na slici 2.1. Piramidom testiranja ilustruje se redosled izvršavanja testova. Testiranje softvera počinje izvršavanjem testova jedinica koda, zatim slede komponentni, integracioni, sistemski, istraživački i testovi prihvatljivosti. Najveći broj testova piše se za testiranje jedinica koda pri čemu svaki deo koda softverskog sistema mora biti pokriven bar jednim testom. Broj testova na svim nivoima zavisi od konkretnog projekta i prilagođava se potrebama klijenata.

Pored opisane podele i vrsta testova koji se izvršavaju, postoje i druge podele prema različitim kriterijumima testiranja. Više o podelama i podržanim načinima testiranja može se naći u literaturi [24].

2.3 Strategije testiranja

Testiranjem se obezbeđuje bolje razumevanje specifikacije problema, dizajna i implementacije rešenja. Pored otkrivanja grešaka, glavni ciljevi su obezbeđivanje traženog kvaliteta rešenja sistematskim testiranjem u kontrolisanim uslovima i iden-



Slika 2.1: Piramida testiranja softvera

tifikovanje potpunosti i korektnosti softvera. Tri najvažnije strategije za postizanje kvaliteta i detekciju grešaka su strategija crne kutije, strategija bele kutije i strategija sive kutije [15].

Strategija crne kutije

Testiranje crnom kutijom (eng. *Black Box Testing*) je strategija koja posmatra program kao zatvoreni sistem kako bi se uvrdilo ponašanje programa na osnovu odgovarajućih ulaznih podataka [1]. Ova strategija ne zahteva poznavanje strukture i analizu izvornog koda, već samo osobine definisane specifikacijom softverskog sistema. Sprovodi se tako što se sistemu prosleđuju odgovarajući ulazni podaci a zatim se proverava da li je izlaz u skladu sa očekivanim. Ova strategija se između ostalog primenjuje prilikom testiranja veb aplikacija ili servisa, gde se razmatra strana koju je generisao server na osnovu unetih podataka. Strategija testiranja crne kutije obično nije najbolji pristup, ali je uvek opcija. Prednost primene ove strategije je jednostavnost, pošto testiranje može biti vođeno bez poznavanja unutrašnje strukture softverskog sistema. Ulazni podaci za testiranje sistema definišu se

tako da povećaju verovatnoću nalaženja greške i da smanje veličinu skupa testova. Ova strategija je potpuno fokusirana na funkcionalnosti rada aplikacije.

U nastavku će biti opisane dve metode koje primenjuju strategiju crne kutije. To su metoda klasa ekvivalencije i metoda graničnih vrednosti.

Metoda klasa ekvivalencije

Ideja metode deljenja na klase ekvivalencije (eng. *Equivalence Partitioning*) je formiranje podskupova (klasa) podataka na osnovu ulaznih podataka [8]. Jedna klasa sadrži ulazne podatke koji proizvode slične rezultate (izlazne vrednosti) pri testiranju. Na primer, jednu klasu podataka mogu činiti ulazni podaci koji otkrivaju istu grešku. U idealnom slučaju, podskupovi su međusobno disjunktni i ceo ulazni skup je pokriven.

Da bismo identifikovali klase, posmatramo specifikaciju klijentskih uslova. Za svaki uslov kreiramo po dve klase u zavisnosti da li je uslov ispunjen ili nije. Formiramo legalne klase koje obuhvataju ispravne i očekivane ulazne podatke kao i nelegalne klase koje obuhvataja sve ostale slučajeve ulaznih podataka.

Prednost metode deljenja na klase ekvivalencije je manji utrošak vremena pri testiranju softvera usled manjeg broja proverenih test slučajeva. Ulazne vrednosti u okviru jedne klase se smatraju ekvivalentnim, pa je za svaku klasu dovoljno pokretanje samo jednog test slučaja. Proveravanjem većeg broja test slučajeva u istoj klasi, ne identifikuju se nove greške u programu.

Metoda graničnih vrednosti

Kod metode graničnih vrednosti (eng. *Boundary Value Analysis*) test slučajevi su napravljeni tako da reprezentuju granice odgovarajućih klasa (ulaznih podataka) . Osnovu čini princip prethodno objašnjene metode klasa ekvivalencija [8]. Za svaki skup ulaznih podataka formiraju se tri klase, jedna validna i dve nevalidne. Validna klasa ima ispravne ulazne vrednosti, a nevalidne klase sadrže ulazne vrednosti koje ne pripadaju ispravnim opsezima. Vrednosti na granicama između validne i nevalidnih klasa nazivaju se test vektorima klasa. Razlog za korišćenje upravo ovih vrednosti za test vektore jesu česte softverske greške baš na granicama opsega važenja.

Za primenu ove metode, potrebno je više vremena za određivanje test slučajeva u poređenju sa drugim metodama strategije crne kutije zbog određivanja granica između validne i nevalidnih klasa.

Strategija bele kutije

Testiranje strategijom bele kutije (eng. *White Box Testing*) zahteva pristup izvornom kodu, dobro poznavanje programskog jezika u kojem je sistem implementiran kao i dizajn konkrentog softverskog proizvoda [42]. Plan testiranja izvodi se proučavanjem celokupnog programskog koda. Za svaku liniju koda može se proveriti da li se ona izvršava u zavisnosti od podataka na ulazu. Takođe, može se vršiti provera izvršavanja pojedinačnih funkcija. Specifičnim testovima proverava se postojanje beskonačnih petlji ili detektovanje delova koda koji se nikad ne izvrši.

Da bi se obezbedila primena strategije bele kutije, neophodno je i poznavanje interne logike i strukture koda kako bi se dizajnirali test slučajevi koji proveravaju kontrolne strukture programskog jezika. Kontrolne strukture obuhvataju naredbe grananja, uslovne naredbe, način menjanja tokova podataka i petlje.

Metode testiranja belom kutijom su testiranje grananja, testiranje osnovnih putanja, testiranje toka podataka i testiranje petlji. Kod testiranja grananja testira se svaka moguća odluka u kontroli toka izvršavanja. Ova metoda uključuje i testiranje u slučaju spajanje odluka. Testiranje osnovnih putanja prati izvršavanje blokova naredbi i u zavisnosti od izvršenih blokova formira test slučajeve za koje je potrebno pokrenuti softver. Kod testiranja toka podataka, formira se graf kontrole podataka koji sadrži informacije o pojavljivanju promenljivih u kodu i načinu njihovog menjanja. Kod testiranja petlji, proverava se ispravnost konstrukcija samih petlji.

Testiranje belom kutijom se primenjuje kod testova jedinica koda i sistemskih testova kako bi se eventualno pronašli delovi sistema koji proizvode neodgovarajuće ponašanje. Nedostatak strategije bele kutije je visoka cena testiranja kao i zahtev za kvalifikovanim testerom. Pored toga, mnoge putanje u sistemu mogu ostati netestirane pa se na taj način mogu sakriti potencijalne greške.

Strategija sive kutije

Strategija testiranja sivom kutijom (eng. *Gray Box Testing*) predstavlja kombinaciju prethodne dve strategije. Kod ove strategije postoji pristup nekom segmentu softvera, ali ne i kompletnom softverskom sistemu [16]. Na osnovu analize poznatih delova koda koja odgovara testiranju bele kutije, formiraju se test slučajevi koji se zatim primenjuju na delove sistema o čijoj internoj strukturi nemamo informacija (odgovara testiranju crne kutije). Tehnika sive kutije koristi se u slučajevima testi-

ranja integracije različitih delova koda. Ova strategija povećava pokrivenost koda test primerima kombinovanjem dve strategije.

Kada se primenjuje testiranje sivom kutijom, razlikujemo dve vrste testera. Prvu grupu čine kvalifikovani testeri koji na osnovu delimičnog pristupa izvornom kodu formiraju test slučajeve. Drugu grupu čine testeri čiji je zadatak samo izvršavanje dobijenih test slučajeva bez poznavanja interne strukture sistema. U zavisnosti od procenta celokupnog izvornog koda kome se može pristupiti, pokrivenost koda testovima može biti ograničena.

Metode testiranja sive kutije su ortogonalno testiranje, regresiono testiranje i testiranje obrazaca. Ortogonalno testiranje koristi podskup svih kombinacija test slučajeva dobijenih analizom dostupnih delova izvornog koda. Regresioni testovi opisani su u delu 2.2. Testiranje obrazaca podrazumeva primenu testova obrazaca pri dizajnu softverskih sistema. Ukoliko se sistem implementira prema nekom obrazcu projektovanja, testovima obrazaca proverava se da li je arhitektura sistema u skladu arhitekturom izabranog obrasca.

2.4 Načini izvršavanja testova

U opštem slučaju, test se smatra uspešnim ukoliko je ponašanje sistema pri njegovom izvršavanju u skladu sa korisničkim zahtevima. Međutim, kod sve popularnije metodologije destruktivnog testiranja, test se smatra uspešnim ako se njegovim izvršavanjem otkriva postojanje greške u softveru.

Izvršavanje testova sprovodi se na dva načina, automatizovano i manuelno [20]. Manuelno testiranje predstavlja ručno izvršavanje test slučajeva izabranim alatima. U većini slučajeva, tester prati niz koraka da bi verifikao neki segment softverskog sistema. Nakon toga, formira se izveštaj dobijenih rezultata.

Automatizovano testiranje podrazumeva postojanje određenog koda napisanog kako bi se automatizovali koraci pri izvršavanju test slučaja. Datoteke koje sadrže logiku za testiranje nazivaju se test skripte i mogu biti pisane u svim programskim jezicima.

Tokom manuelnog i automatizovanog izvršavanja testova prate se iste faze procesa testiranja koje se mogu primeniti na različite nivoe i tipove testiranja. Manuelno i automatsko izvršavanje testova ima svoje prednosti i mane. U nastavku će biti navedene neke od njih.

Prilikom testiranja, obično su na raspolaganju ograničeni resursi, čime se onemogućuje efikasno izvršavanje manuelnih testova. Automatizovano testiranje je brže i pouzdanije jer su kod manuelnog testiranja mogući propusti usled prekomernog rada ili umora testera. Kako automatizovano izvršavanje ne zahteva prisustvo testera, oni se mogu neprekidno izvršavati. Sa druge strane, automatizovano testiranje je skuplje i zahteva posebno kvalifikovane testere. Ušteda vremena je jako važna za velike sisteme nad kojima se između ostalog izvršavaju i regresioni testovi. Kada se sistem proširuje novom komponentom, pored već izvršenih testova, dodaju se testovi koji proveravaju funkcionalnost nove komponente. Odavde zaključujemo da je automatizacija regresionih testova neophodna zbog uštede vremena.

Izvršavanje jediničnih testova i testova komponenti je uvek automatizovano. Integracioni i sistemski testovi se mogu izvršavati i automatizovano i manuelno. Istraživački i testovi prihvatljivosti se uvek izvršavaju manuelno. Načini izvršavanja testova u okviru piramide testiranja ilustrovani su slikom 2.1.

2.5 Načini generisanja testova

Izvršavanje testova u modernim razvojnim okruženjima je uglavnom automatizovano, ali je generisanje test slučajeva i dalje većinom manuelno. Pod manuelnim generisanjem testova podrazumevamo da tester ručno piše testove za koje će softver biti pokrenut. Ovakav način generisanja test primera može zahtevati veliki napor s obzirom da postoji veliki broj slučajeva koje je potrebno pokriti. Iz tog razloga teži se automatizaciji procesa generisanja test primera. Kod automatskog generisanja testova se korišćenjem drugih alata dobijaju test primeri za koje se pokreće softver i proverava njegovo ponašanje [40].

Jedna od tehnika automatskog generisanja test primera svodi se na formiranje testova koji pronalaze potencijalne slabosti jezika u kojem je sistem implementiran. Na primer, za programske jezike C i C++ slabosti su prekoračenje bafera, neispravno oslobađanje memorije, dvostruko oslobađanje memorije, deljenje nulom kao i prekoračenje i potkoračenje u aritmetičkim izrazima.

Primeri automatskog generisanja testova

Automatizacija procesa generisanja test primera posebno je važna jer ubrzava proces testiranja. U nastavku će biti navedene neke od tehnika i alata koje imaju

za cilj automatsko generisanje test primera.

Rasplinuto testiranje (eng. *Fuzz testing*) je primer tehnike koju je moguće potpuno automatizovati i zasniva se na primeni strategije crne kutije [2]. Ovom tehnikom se generišu neispravni i neočekivani ulazi za koje se prati tok izvršavanja programa sa ciljem detektovanja nebezbednog ponašanja. Test primer sa kojim se započinje testiranje može biti slučajno generisan ili ulaz definisan od strane programera. Svaki naredni test primer generiše se na osnovu prethodno generisanih test primera, praćenja toka izvršavanja programa i promena vrednosti promenljivih. Rasplinuto testiranje može se fokusirati na granične vrednosti ulaza ali i na bilo koje ulazne vrednosti koje mogu izazvati nedefinisano ili nebezbedno ponašanje. Može se definisati i kao metod otkrivanja grešaka softvera kreiranjem neočekivanih ulaza i upravljanjem izuzecima. Danas se rasplinuto testiranje najviše koristi u velikim sistemima jer se pokazalo da ova metoda daje jako dobar odnos cene i vremena naspram kvaliteta testiranja.

Uopšteno, postoje dve vrste alata za generisanje testova primenom tehnike rasplinutog testiranja. Jedna grupa alata zahteva posebno kvalifikovane testera koji unose detalje o implementaciji sistema. Druga grupa alata omogućava generisanje testova samo konfigurisanjem parametara o očekivanom ulazu i definisanjem programskog jezika. Prednost ovog pristupa je jednostavnost, dok je mana niži kvalitet testiranja u odnosu na testove koji se formiraju za specifični sistem.

Pored navedenih osobina, postoji veliki broj metoda rasplinutog testiranja. Jedna od njih je random metoda koja je najmanje efikasna i podrazumeva generisanje slučajnog test slučaja. Zanimljiva činjenica je da su slabosti kritičnih delova softvera identifikovane upravo ovo metodom. Pored ove metode, koristi se i metoda izučavanja ulaznih vrednosti koja analizira sve podržane strukture podataka i opsege ulaznih vrednosti. Takođe, primenjuje se i rasplinuto testiranje grubom silom u kojem testiranje počinje ispravnim ulazom, a zatim se u svakom sledećem koraku menja svaki bajt ili karakter niske u zavisnosti od tipa ulazne vrednosti. Složeniji ulazi zahtevaju ogroman broj varijacija pa u tom slučaju ne postoji dobra pokrivenost testovima.

Jedan od alata koji primenjuje strategiju sive kutije za automatsko generisanje test primera je SAGE [36]. Namena alata SAGE (eng. *Scalable, Automated, Guided Execution*) je proveravanje stabilnosti rada programa koji se izvršavaju na Windows operativnom sistemu čiji su procesori kompatibilni sa x86 skupom instrukcija. Odlikuje se specifičnom arhitekturom i algoritmom koji ga izdvaja od programa slične

namene. Za generisanje test primera, alat SAGE koristi program koji se testira i skupove ulaznih podataka koji se jedan za drugim učitavaju u sam program. Cilj je naći skupove ulaznih podataka koji dovode do nedefinisanog i nebezbednog ponašanja tokom izvršavanja programa. Ukoliko SAGE uspe da generiše takav skup ulaznih podataka, smatra se da je on uspešno ispunio svoj zadatak. Nađeni skup podataka se zapisuje u internu bazu alata i nastavlja se potraga za drugim skupovima ulaznih podataka koji izazivaju nebezbedno ponašanje programa, ukoliko takvi postoje. Ulazni podaci se inicijalno biraju praćenjem izvršavanja programa na nivou x86 mašinskog koda. Glavni cilj alata je pokrivenost svih delova programa prolaskom kroz sve grane programa. Važno je napomenuti da se primenom ovog alata ne generišu svi mogući ulazi, s obzirom da njihovo generisanje nije moguće u razumnom roku.

Program SAGE sastoji se od četiri faze koje se izvršavaju jedna za drugom. Te faze su testiranje, praćenje mašinskih instrukcija, generisanje ograničenja i generisanje narednog skupa ulaznih podataka. Izvršavanje četiri faze predstavlja jedan ciklus. Broj ciklusa je jako veliki a ukupno izvršavanje SAGE programa meri se satima ili čak danima. U prvoj fazi program se izvršava koristeći početni skup ulaznih podataka. Ukoliko se tokom ove faze detektuje skup ulaznih podataka koji dovodi do nedefinisanog ponašanja programa, pronađeni skup podataka se dokumentuje u internu bazu alata. Ukoliko ovakav skup ulaznih podataka ne postoji, prelazi se na drugu fazu tokom koje formira se zapis mašinskih instrukcija na osnovu izvornog koda. Za generisanje ograničenja, koriste se blokovi mašinskih instrukcija iz prethodne faze. U poslednjoj fazi se za generisanje novih skupova ulaznih podataka koriste dobijena ograničenja a zatim sledi ponavljanje ciklusa.

KLEE [27] je alat za simboličko izvršavanje [41] koji primenjuje strategiju bele kutije za automatsko generisanje test primera. Nastao je na univerzitetu Ilinois i javno je dostupan. Alat proverava greške u radu sa pokazivačima, greške prekoračenja bafera i greške deljenja nulom za programe napisane u programskom jeziku C. Ovim alatom postiže se velika pokrivenost kompleksnih programa testovima. KLEE koristi razne optimizacije i heuristike za poboljšanje pokrivenosti koda prilikom simboličkog izvršavanja. Alat ima dva cilja, pokrivanje svake linije izvršnog koda u programu i detektovanje svake nebezbedne operacije ukoliko takva postoji.

Kod normalnog izvršavanja programa, operacije nad operandima proizvode konkretne vrednosti. Problem složenih programa je eksplozija stanja sistema koju je potrebno proveriti kako bi se generisali test primeri. Iz tog razloga, koristi se pristup

simboličkog izvršavanja programa koji opisuje skup vrednosti koji je moguć na datoj putanji u programu. Kada KLEE detektuje grešku, vrši se rešavanje ograničenja trenutne putanje kako bi se proizveo test primer za koji je potrebno izvršiti program upotrebom kompajlera.

KLEE koristi jednostavan pristup za sinhronizaciju sa okruženjem. Naime, veliki deo koda je kontrolisan vrednostima koje se dobijaju iz okruženja kao što su argumenti komandne linije i fajl sistem.

Glava 3

Rešavač Z3

Sistemi za analizu i proveru ispravnosti softvera su veoma kompleksni. Njihovu osnovu predstavlja komponenta koja koristi logičke formule za opisivanja stanja i transformacija između stanja sistema. Opisivanje stanja sistema često se svodi na proveravanje zadovoljivosti formula logike prvog reda. Proveravanje zadovoljivosti formula vrši se procedurama odlučivanja u odnosu na definisanu teoriju. Formalno, zadovoljivost u odnosu na teoriju (eng. *Satisfiability Modulo Theory*, skraćeno SMT) problem je odlučivanja zadovoljivosti u odnosu na osnovnu teoriju T opisanu u klasičnoj logici prvog reda sa jednakošću [5]. Alati koji se koriste za rešavanje ovog problema nazivaju se SMT rešavači.

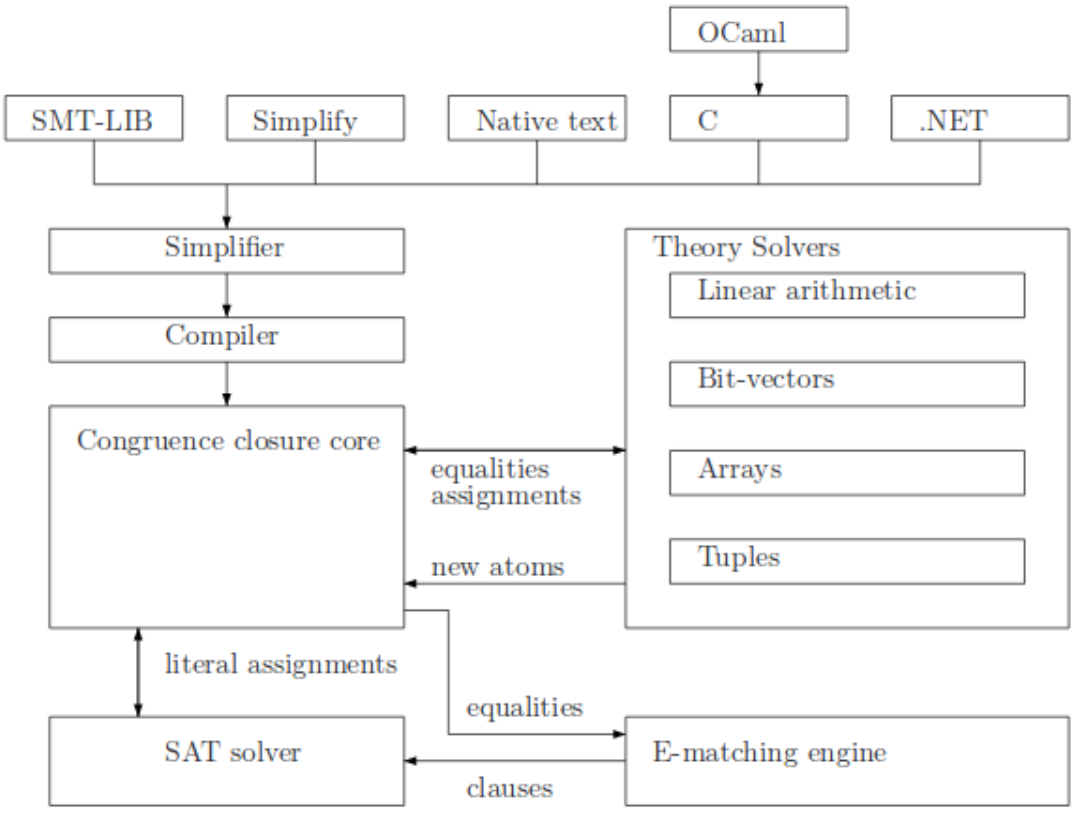
Jedan od najpoznatijih SMT rešavača je rešavač Z3 kompanije Microsoft koji se koristi za proveru zadovoljivosti logičkih formula u velikom broju teorija [32]. Z3 se najčešče koristi kao podrška drugim alatima, pre svega alatima za analizu i verifikaciju softvera. Pripada grupi SMT rešavača sa integrisanim procedurama odlučivanja.

U ovoj glavi opisane su osnove rešavača Z3 u delu 3.1. U delu 3.2 opisane su najvažnije teorije uključujući teoriju neinterpretiranih funkcija, teoriju linearne aritmetike, teoriju nelinearne aritmetike, teoriju bitvektora i teoriju nizova. U delu 3.3 opisani su podržani tipovi podataka. U delu 3.4 opisan je format za komunikaciju sa Z3 rešavačem korišćenjem SMT-LIB standarda. Pored toga, rešavač Z3 nudi interfejse za direktnu komunikaciju sa programskim jezicima C, C++, Java i Python. U delu 3.5 opisan je interfejs rešavača Z3 za komunikaciju sa programskim jezikom C++. Oba formata komunikacije imaju istu moć izražajnosti. Šta više, sintaksno se jako slično zapisuju. U delu sa implementacijom biće korišćen C++ interfejs za komunikaciju sa Z3 rešavačem. Važno zapažanje je da su interfejsi za programske je-

zike C i C++ veoma slični. Više materijala o podržanim interfejsima za programske jezike C, C++, Java i Python može se pronaći u literaturi [37].

3.1 Osnove rešavača

Problem zadovoljivosti (eng. *Satisfiability problem*, skraćeno SAT) problem je odlučivanja da li za iskaznu formulu u konjunktivnoj normalnoj formi postoji valuacija u kojoj su sve njene klauze tačne [6]. Rešavači koji se koriste za rešavanje ovog problema nazivaju se SAT rešavači. Rešavač Z3 integriše SAT rešavač zasnovan na savremenoj DPLL proceduri i veliki broj teorija. Implementiran je u programskom jeziku C++. Šematski prikaz arhitekture rešavača [32] prikazan je na slici 3.1.



Slika 3.1: Arhitektura rešavača Z3

Formule prosleđene rešavaču se najpre procesiraju upotrebom simplifikacije. Simplifikacija primenjuje algebarska pravila redukcije kao što je `p` $\wedge$ `true` $\vdash$ `p`. Ovim procesom vrše se i odgovarajuće zamene kao što je `x=4` $\wedge$ `q(x)` $\vdash$ `x=4` $\wedge$ `q(4)`.

Nakon simplifikacije, kompajler formira apstraktno sintaksno stablo formula čiji su čvorovi simplifikovane formule (klauze). Zatim se jezgru kongruentnog zatvorenja (eng. *Congruence closure core*) prosleđuje apstraktno sintaksno stablo. Jezgro kongruentnog zatvorenja komunicira sa SAT rešavačem koji određuje istinitosnu vrednost klauza.

Glavni gradivni blokovi formula su konstante, funkcije i relacije. Konstante su specijalan slučaj funkcija bez parametara. Svaka konstanta je određene sorte. Sorta odgovara tipu u programskim jezicima. Relacije su funkcije koje vraćaju povratnu vrednost tipa Boolean. Funkcije mogu uzimati argumente tipa Boolean pa se na taj način relacije mogu koristiti kao argumenti funkcija.

Formula F je validna ako je vrednost valuacije *true* za bilo koje interpretacije funkcija i konstantnih simbola. Formula F je zadovoljiva ukoliko postoji bar jedna valuacija u kojoj je formula tačna. Da bismo odredili da li je formula F validna, rešavač Z3 proverava da li je formula $\neg F$ zadovoljiva. Ukoliko je negacija formule nezadovoljiva, onda je polazna formula validna.

3.2 Teorije

Teorije rešavača Z3 su opisane u okviru višesortne logike prvog reda sa jednakošću. Definisanjem specifične teorije, uvode se restrikcije pri definisanju formula kao i podržanih relacija i operatora koje se nad njima primenjuju. Na taj način, specijalizovane metode u odgovarajućoj teoriji mogu biti efikasnije implementirane u poređenju sa opštim slučajem. U nastavku će biti opisane teorija neinterpretiranih funkcija, teorija linearne aritmetike, teorija nelinearne aritmetike, teorija bitvektora i teorija nizova.

Teorija neinterpretiranih funkcija

Teorije obično određuju interpretaciju funkcijskih simbola. Teorija koja ne zadaje nikakva ograničenja za funkcijske simbole naziva se teorija neinterpretiranih funkcija (eng. *Theory of Equality with Uninterpreted Functions*, skraćeno EUF).

Kod rešavača Z3, funkcije i konstantni simboli su neinterpretirani. Ovo je kontrast u odnosu na funkcije odgovarajućih teorija. Funkcija + ima standardnu interpretaciju u teoriji aritmetike. Neinterpretirane funkcije i konstante su maksimalno fleksibilne i dozvoljavaju bilo koju interpretaciju koja je u skladu sa ograničenjima.

Za razliku od programskih jezika, funkcije logike prvog reda su totalne, tj. definisane su za sve vrednosti ulaznih parametara. Na primer, deljenje 0 je dozvoljeno, ali nije specifikovano šta ono predstavlja. Teorija neinterpretiranih funkcija je odlučiva i postoji procedura odlučivanja polinomijalne vremenske složenosti. Jedna od procedura odlučivanja za ovu teoriju zasniva se na primeni algoritma Nelson-Open (eng. *Nelson-Open algorithm*). O ovom algoritmu može se više naći u literaturi [18].

Teorija linearne aritmetike

Rešavač Z3 sadrži procedure odlučivanja za linearnu aritmetiku nad celobrojnim i realnim brojevima. Dodatni materijali o procedurama odlučivanja linearne aritmetike dostupni su u literaturi [14].

U okviru celobrojne linearne aritmetike, podržani funkcijski simboli su $+$, $-$ i $*$ pri čemu je kod množenja drugi operand konstanta. Nad funkcijskim simbolima, čiji su specijalni slučajevi konstante mogu se primenjivati relacijski operatori $<$, $\leq$, $>$ i $\geq$.

U okviru realne linearne aritmetike, podržani funkcijski simboli su $+$, $-$ i $*$ pri čemu je kod operacije množenja drugi operand konstanta. Pored ovih podržane su operacije *div* i *mod*, uz uslov da je drugi operand konstanta različita od 0. Nad funkcijskim simbolima, čiji su specijalni slučajevi konstante mogu se primenjivati relacijski operatori $<$, $\leq$, $>$ i $\geq$.

Teorija nelinearne aritmetike

Formula predstavlja formulu nelinearne aritmetike ako je oblika (* t s), pri čemu t i s nisu linearnog oblika. Nelinearna celobrojna aritmetika je neodlučiva, tj. ne postoji procedura koja za proizvoljnu formulu vraća zadovoljivost ili nezadovoljivost. U najvećem broju slučajeva, Z3 vraća nepoznat rezultat. Za nelinearne probleme, rešavač Z3 koristi posebne metode odlučivanja zasnovane na Grebnerovim bazama.

Teorija bitvektora

Rešavač Z3 podržava bitvektore proizvoljne dužine. `(_ BitVec n)` je sorta bitvektora čija je dužina `n`. Bitvektor literali se mogu definisati koristeći binarnu, decimalnu ili heksadecimalnu notaciju. U binarnom i heksadecimalnom slučaju, veličina bitvektora je određena brojem karaktera. Na primer, literal *#b010* u binarnom formatu je bitvektor dužine 3. Kako konstanta *a* u heksadecimalnom formatu

odgovara vrednosti 10, literal *#x0a* je bitvektor veličine 10. Veličina bitvektora mora biti specifikovana u decimalnom formatu. Na primer, reprezentacija *(_ bv10 32)* je bitvektor dužine 32 sa vrednošću 10. Podrazumevano, Z3 predstavlja bitvektore u heksadecimalnom formatu ukoliko je dužina bitvektora umnožak broja 4 a u suprotnom u binarnom formatu. Bitvektor literali mogu biti reprezentovani u decimalnom formatu. Više materijala o procedurama odlučivanja za teoriju bitvektora može se naći u literaturi [9].

Pri korišćenju operatora nad bitvektorima, mora se eksplicitno navesti tip operatora. Zapravo, za svaki operator podržane su dve varijante za rad sa označenenim i neoznačenim operandima. Ovo je kontrast u odnosu na programske jezike u kojima kompajler na osnovu argumenata implicitno određuje tip operacije (označena ili neoznačena varijanta).

U skladu sa prethodno navedenom činjenicom, teorija bitvektora ima na raspolaganju različite verzije aritmetičkih operacija za označene i neoznačene operande. Za rad sa bitvektorima od aritmetičkih operacija definisane su operacije sabiranja, oduzimanja, određivanje negacije (zapisivanja broja u komplementu invertovanjem svih bitova polaznog broja), množenja, izračunavanja modula pri deljenju, šiftovanje u levo kao i označeno i neoznačeno šiftovanje u desno. Podržane su sledeće logičke operacije: disjunkcija, konjunkcija, unarna negacija, negacija konjunkcije i negacija disjunkcije. Definisane su različite relacije nad bitvektorima kao što su $\leq$, $<$, $\geq$ i $>$.

Teorija nizova

Osnovnu teoriju nizova karakterišu `select` i `store` funkcije. Funkcijom `(select a i)` vraća se vrednost na poziciji i u nizu a, dok se funkcijom `(store a i v)` formira novi niz, identičan nizu a pri čemu se na poziciji i nalazi vrednost v. Z3 sadrži procedure odlučivanja za osnovnu teoriju nizova. Dva niza su jednaka ukoliko su vrednosti svih elemenata na odgovarajućim pozicijama jednake.

Konstantni nizovi

Nizovi sa konstantnim vrednostima mogu se specifikovati koristeći `const` konstrukciju. Prilikom upotrebe `const` konstrukcije rešavač Z3 ne može da odluči kog tipa su elementi niza pa se on mora eksplicitno navesti. Interpretacija nizova je slična interpretaciji funkcija. Z3 koristi konstrukciju `(_ as-array f)` za određiva-

nje interpretacije niza. Ako je niz a jednak rezultatu konstrukcije `(_ as-array f)`, tada za svaki indeks i, vrednost `(select a i)` odgovara vrednosti `(f i)`.

Primena map funkcije na nizove

Rešavač Z3 obezbeđuje primenu parametrizovane funkcije `map` na nizove. Funkcijom `map` omogućava se primena proizvoljnih funkcija na sve elemente niza.

Nad nizovima se mogu vršiti slične operacije kao i nad skupovima. Rešavač Z3 ima podršku za računanje unije, preseka i razlike dva niza. Ovi operatori se tumače na isti način kao i u teoriji skupova. Za nizove a i b, pomenuti operatori mogu se koristiti navođenjem funkcija:
`(union a b)` ; kreiranje unije dva niza kao skupa
`(intersect a b)` ; kreiranje preseka dva niza kao skupa
`(difference a b)` ; kreiranje razlike dva niza kao skupa

3.3 Tipovi podataka

U okviru rešavača Z3 dostupni su primitivni tipovi podataka, definisanjem konstanti različitih sorti. Neke od najčešće korišćenih su konstante bulovske, celobrojne i realne sorte. Pored toga, mogu se definisati algebarski tipovi podataka. Algebarski tipovi podataka omogućavaju specifikaciju uobičajnih struktura podataka. Slogovi, torke i skalari (enumeracijski tipovi) spadaju u algebarske tipove podataka. Primena algebarskih tipova podataka može se generalizovati. Mogu se koristiti za specifikovanje konačnih listi, stabala i rekurzivnih struktura.

Slogovi

Slog se specifikuje kao tip podataka sa jednim konstruktorom i proizvoljnim brojem elemenata sloga. Rešavač Z3 ne dozvoljava povećavanje broja argumenata sloga nakon njegovog definisanja. Važi svojstvo da su dva sloga jednaka samo ako su im svi argumenti jednaki.

Skalari (tipovi enumeracije)

Sorta skalara je sorta konačnog domena. Elementi konačnog domena se tretiraju kao različite konstante. Na primer, neka je S skalarni tip sa tri vrednosti A, B i C.

Moguće je da tri konstante skalarnog tipa S budu različite. Ovo svojstvo ne može važiti u slučaju četiri konstante.

Rekurzivni tipovi podataka

Deklaracija rekurzivnog tipa podataka uključuje sebe direktno kao komponentu. Standardni primer rekurzivnog tipa podataka je lista. Lista celobrojnih vrednosti sa imenom `list` može se deklarisati naredbom:

```
(declare-datatypes (list (nil) ((head Int) (tail list)))
```

Rešavaš Z3 ima ugrađenu podršku za liste korišćenjem ključne reči `List`. Prazna lista se definiše korišćenjem klučne reči `nil` a konstruktor `insert` se koristi za dodavanje elemenata u listu. Selektori `head` i `tail` se definišu na uobičajan način.

3.4 Upotreba rešavača korišćenjem SMT-LIB standarda

Ulazni format rešavača Z3 je definisan SMT-LIB 2.0 standardom [10]. Standard definiše jezik logičkih formula čija se zadovoljivost proverava u odnosu na neku teoriju. Cilj standarda je pojednostavljivanje jezika logičkih formula povećavanjem njihove izražajnosti i fleksibilnosti kao i obezbeđivanje zajedničkog jezika za sve SMT rešavače.

Interno, Z3 održava stek korisnički definisanih formula i deklaracija. Formule i deklaracije jednim imenom nazivamo tvrđenjima. Komandom `push` kreira se novi opseg i čuva se trenutna veličina steka. Komandom `pop` uklanjaju se sva tvrđenja i deklaracije zadate posle push-a sa kojim se komanda uparuje. Komandom `assert` dodaje se formula na interni stek. Skup formula na steku je zadovoljiv ako postoji interpretacija u kojoj sve formule imaju istinitosnu vrednost tačno. Ova provera se vrši komandom `check-sat`. U slučaju zadovoljivosti vraća se `sat`, u slučaju nezadovoljivosti vraća se `unsat` a kada rešavač ne može da proceni da li je formula zadovoljiva ili ne vraća se `unknown`. Komandom `get-model` vraća se interpretacija u kojoj su sve formule na steku tačne.

Komandom `declare-const` deklariše se konstanta odgovarajuće sorte. Sorta može biti parametrizovana i u tom slučaju su specifikovana imena njenih parametara. Naredbom `(define-sort [symbol] ([symbol]+)[sort])` vrši se specifikacija sorte. Komandom `declare-fun` deklariše se funkcija. U primeru 1 koristimo

činjenicu da se validnost formule pokazuje ispitivanjem zadovoljivosti negirane formule.

Primer 1 *Dokazivanje de Morganovog zakona dualnosti ispitivanjem validnosti formule:* $\neg(a \wedge b) \Leftrightarrow (\neg a \vee \neg b)$ *tako što se kao ograničenje dodaje negacija polazne formule. Z3 pronalazi da je negacija formule nezadovoljiva, pa je polazna formula tačna u svim interpretacijama.*

Formula prosleđena rešavaču:	***Izlaz:***
(declare-const a Bool)	*unsat*
(declare-const b Bool)	
(define-fun demorgan () Bool	
(= (and a b) (not (or (not a) (not b))))	
)	
(assert (not demorgan))	
(check-sat)	
(get-model)	

Rešavač Z3 ima podršku za celobrojne i realne konstante. Komandom `declare-const` deklarišu se celobrojne i realne konstante. Rešavač ne vrši automatsku konverziju između celobrojnih i realnih konstanti. Ukoliko je potrebno izvršiti ovakvu konverziju koristi se funkcija `to-real` za konvertovanje celobrojnih u realne vrednosti. Realne konstante treba da budu zapisane sa decimalnom tačkom. Primer 2 ilustruje deklarisanje konstanti i funkcija kao i primenu funkcije na konstante. Ispituje se zadovoljivost ograničenja.

Primer 2 *Rešavaču se prosleđuje ograničenja koje sadrže primenu funkcije f na celobrojnu konstantu a kao i relacijske operatore. Rešavač Z3 pronalazi da je ovo tvrđenje zadovoljivo i daje prikazani model.*

Formula prosleđena rešavaču:	***Izlaz:***
(declare-const a Int)	*sat*
(declare-fun f (Int Bool) Int)	*(model*
(assert (> a 10))	*(define-fun a () Int 11)*
(assert (< (f a true) 100))	*(define-fun f ((x!1 Int) (x!2 Bool)) Int*
(check-sat)	*(ite (and (= x!1 11) (= x!2 true)) 0 0))*
(get-model)	*)*

Primer 3 ilustruje pronalaženje interpretacija celobrojnih i realnih konstanti. Interpretacija se svodi na pridruživanje brojeva svakoj konstanti.

Primer 3 *Rešavaču se prosleđuju jednostavna ograničenja za celobrojne i realne konstante. Ograničenja sadrže aritmetičke i relacijske operatore. Rešavač vraća zadovoljivost tvrđenja i dobijeni model prikazujemo u nastavku.*

Formula prosleđena rešavaču:

```
(declare-const a Int)
(declare-const b Int)
(declare-const c Int)
(declare-const d Real)
(declare-const e Real)
(assert (> e (+ (to_real (+ a b)) 2.0)))
(assert (= d (+ (to_real c) 0.5)))
(check-sat)
(get-model)
```

Izlaz:

```
sat
(model
  (define-fun b () Int 0)
  (define-fun a () Int 1)
  (define-fun e () Real 4.0)
  (define-fun c () Int 0)
  (define-fun d () Real (/ 1.0
  2.0))
)
```

Takođe, postoji uslovni operator (if-then-else operator). Na primer, izraz (ite (and (= x!1 11) (= x!2 false)) 21 0) ima vrednost 21 kada je promenljiva x!1 jednaka 11, a promenljiva x!2 ima vrednost False. U suprotnom, vraća se 0.

U slučaju deljenja, može se koristiti `ite` (if-then-else) operator i na taj način se može dodeliti interpretacija u slučaju deljenja nulom.

Mogu se konstruisati novi operatori, korišćenjem `define-fun` konstruktora. Ovo je zapravo makro, pa će rešavač vršiti odgovarajuće zamene. U primeru 4 ilustruje se definisanje novog operatora. Zatim se novi operator primenjuje na konstante, uvode se ograničenja i ispituje njihova zadovoljivost.

Primer 4 *Definišemo operator deljenja tako da rezultat bude specifikovan i kada je delilac 0. Uvode se dve konstante realnog tipa i primenjuje se definisani operator. Z3 rešavač pronalazi nezadovoljivost tvrđenja s obzirom da operator* `mydiv` *vraća 0 pa relacija poređenja ne može biti tačna.*

Formula prosleđena rešavaču:	***Izlaz:***
(define-fun mydiv ((x Real) (y Real)) Real	*unsat*
(if (not (= y 0.0)) (/ x y) 0.0))	
(declare-const a Real)	
(declare-const b Real)	
(assert (>= (mydiv a b) 1.0))	
(assert (= b 0.0))	
(check-sat)	

Primer 5 ilustruje rešavanje nelinearnog problema uvođenjem ograničenja nad realnim konstantama. Ispituje se zadovoljivost prosleđenih ograničenja. Kada su prisutna samo nelinearna ograničenja nad realnim konstantama, Z3 koristi posebne metode odlučivanja

Primer 5 *Rešavaču se prosleđuje ograničenja* $b^3 + b * c = 3$ *nad realnim konstantama. Rešavač vraća zadovoljivost tvrđenja i dobijeni model prikazujemo u nastavku.*

Formula prosleđena rešavaču:	***Izlaz:***
(declare-const b Real)	*sat*
(declare-const c Real)	*(model*
(assert (= (+ (b b b) (* b c)) 3.0))*	*(define-fun b () Real (/ 1.0 8.0))*
(check-sat)	*(define-fun c () Real (/ 15.0 64.0))*
(get-model)	*)*

Primer 6 ilustruje različite načine predstavljanja bitvektora. Ukoliko zapis počinje sa #b, bitvektor se zapisuje u binarnom formatu. Ukoliko zapis počinje sa #x, bitvektor se zapisuje u heksadecimalnom formatu.

Primer 6 *Nakon specifikacije formata, zapisuje se dužina vektora. Drugi način zapisa počinje skraćenicom* `bv`*, navođenjem vrednosti i na kraju dužine. Komandom* `(display t)` *štampa se izraz* `t`*.*

Formula prosleđena rešavaču:	***Izlaz:***
(display #b0100)	*#x4*
(display (_ bv20 8))	*#x14*
(display (_ bv20 7))	*#b0010100*
(display #x0a)	*#x0a*
(set-option :pp.bv-literals false)	*(_ bv4 4)*
(display #b0100)	*(_ bv20 8)*
(display (_ bv20 8))	*(_ bv20 7)*
(display (_ bv20 7))	*(_ bv10 8)*
(display #x0a)	

Primer 7 ilustruje primenu aritmetičkih operacija nad bitvektorima. Podržane aritmetičke operacije su sabiranje `(bvadd)`, oduzimanje `(bvsub)`, unarna negacija `(bvneg)`, množenje `(bvmul)`, računanje modula `(bvmod)`, šiftovanje ulevo `(bvshl)`, neoznačeno (logičko) šiftovanje udesno `(bvlshr)` i označeno (aritmetičko) šiftovanje udesno `(bvashr)`. Od logičkih operacija postoji podrška za disjunkciju `(bvor)`, konjunkciju `(bvand)`, ekskluzivnu disjunkciju `(bvxor)`, negaciju disjunkcije `(bvnor)`, negaciju konjunkcije `(bvnand)` i negaciju ekskluzivne disjunkcije `(bvnxor)`.

Primer 7 *Ovaj primer ilustruje primenu nekih aritmetičkih operacija nad bitvektorima i dobijene rezultate. Komandom* `(simplify t)` *prikazuje se jednostavniji izraz ekvivalentan izrazu* `t` *ukoliko postoji.*

Formula prosleđena rešavaču:	***Izlaz:***
(simplify (bvadd #x07 #x03))	*#x0a*
(simplify (bvsub #x07 #x03))	*#x04*
(simplify (bvneg #x07))	*#xf9*
(simplify (bvmul #x07 #x03))	*#x15*
(simplify (bvsmod #x07 #x03))	*#x01*
(simplify (bvshl #x07 #x03))	*#x38*
(simplify (bvlshr #xf0 #x03))	*#x1e*
(simplify (bvashr #xf0 #x03))	*#xfe*
(simplify (bvor #x6 #x3))	*#x7*
(simplify (bvand #x6 #x3))	*#x2*

Postoji brz način da se proveri da li su brojevi fiksne dužine stepeni dvojke. U primeru 8 pokazuje se da je bitvektor x stepen dvojke ako i samo ako je vrednost izraza x $\wedge$ (x - 1) jednaka 0.

Primer 8 *Provera da li je broj stepen dvojke primenjuje se na bitvektore čije su vrednosti 0, 1, 2, 4 i 8. Rešavaču se prosleđuje negacija formule. U svim slučajevima brojevi su stepeni dvojke pa Z3 rešavač vraća nezadovoljivost.*

Formula prosleđena rešavaču:

```
(define-fun is-power-of-two
   ((x (_ BitVec 4))) Bool
   (= #x0 (bvand x (bvsub x #x1)))
)
(declare-const a (_ BitVec 4))
(assert
   (not (= (is-power-of-two a)
      (or (= a #x0)
         (= a #x1)
         (= a #x2)
         (= a #x4)
         (= a #x8)
      ))
   )
)
(check-sat)
```

Izlaz:

```
unsat
```

Primer 9 ilustruje upotrebu relacija nad bitvektorima. Podržane relacije uključuju neoznačene i označene verzije za operatore $<$, $\leq$, $>$ i $\geq$. Neoznačene varijante počinju nazivom `bvu`, a u nastavku sledi ime relacije. Označene varijante počinju nazivom `bvs`, a u nastavku ponovo sledi ime relacije.

Primer 9 *Primer ilustruje upotrebu označenih i neoznačenih verzija operatora nad bitvektorima. Na primer, relacija $\leq$ nad neoznačenim brojevima zadaje se komandom* `bvule`*, a relacija $>$ nad neoznačenim brojevima komandom* `bvugt`*. Slično, relacija $\geq$ nad neoznačenim brojevima zadaje se komandom* `bvsge`*, a relacija $<$ nad označenim brojevima komandom* `bvslt`*.*

Formula prosleđena rešavaču:	***Izlaz:***
(simplify (bvule #x0a #xf0))	*true*
(simplify (bvult #x0a #xf0))	*true*
(simplify (bvuge #x0a #xf0))	*false*
(simplify (bvugt #x0a #xf0))	*false*
(simplify (bvsle #x0a #xf0))	*false*
(simplify (bvslt #x0a #xf0))	*false*
(simplify (bvsge #x0a #xf0))	*true*
(simplify (bvsgt #x0a #xf0))	*true*

Rešavač Z3 nudi funkcije za promenu načina reprezentacije brojeva. Moguće su konverzije reprezentacije brojeva linearne aritmetike u reprezentaciju bitvektora i obrnuto. Ovaj rezultat može se postići naredbama:

```
(define b (int2bv[32] z))
(define c (bv2int[Int] x))
```

Primer 10 ilustruje poređenje bitvektora koristeći označene i neoznačene verzije operatora. Ispituje se zadovoljivost prosleđenog ograničenja.

Primer 10 *Označeno poređenje, kao što je bvsle, uzima u obzir znak bitvektora za poređenje, dok neoznačeno poređenje komandom bvule tretira bitvektor kao prirodan broj. Z3 rešavač pronalazi da je tvrđenje zadovoljivo i daje prikazani model.*

Formula prosleđena rešavaču:	***Izlaz:***
(declare-const a (_ BitVec 4))	*sat*
(declare-const b (_ BitVec 4))	*(model*
(assert (not (= (bvule a b) (bvsle a b)))	*(define-fun b () (_ BitVec 4) #xe)*
(check-sat)	*(define-fun a () (_ BitVec 4) #x0)*
(get-model)	*)*

Primer 11 ilustruje kako se definišu nizovi sa konstantnim vrednostima. Zatim se dodaju ograničenja korišćenjem funkcije `select` i ispituje se njihova zadovoljivost.

Primer 11 *Definišemo konstantni niz m celobrojnog tipa i dve celobrojne konstante a i i. Uvodimo ograničenje da niz m sadrži samo jedinice. Z3 pronalazi da je ovo tvrđenje zadovoljivo i daje prikazani model.*

Formula prosleđena rešavaču:

```
(declare-const m (Array Int Int))
(declare-const a Int)
(declare-const i Int)
(assert (= m ((as const (Array Int Int)) 1)))
(assert (= a (select m i)))
(check-sat)
(get-model)
```

Izlaz:

```
sat
(model
   (define-fun m () (Array Int Int)
      (_ as-array k!0)
   )
   (define-fun i () Int 0)
   (define-fun a () Int 1)
   (define-fun k!0 ((x!0 Int))
      Int (ite (= x!0 0) 1 1)
   )
)
```

Primer 12 ilustruje primenu funkcije `map` na sve elemente konstatnih nizova. Za svaka dva elementa koji pripadaju različitim nizovima, pokazuje se važenje De Morganovog zakona iz primera 1.

Primer 12 *Kao ograničenje dodajemo negaciju navedene formule. Rešavač Z3 vraća nezadovoljivost negirane formule, odakle zaključujemo da je polazna formula validna.*

Formula prosleđena rešavaču:

```
(define-sort Set (T) (Array T Bool))
(declare-const a (Set Int))
(declare-const b (Set Int))
(assert (not (= ((_ map and) a b) ((_ map not)
   ((_ map or) ((_ map not) b) ((_ map not) a)))))
)
(check-sat)
```

Izlaz:

```
unsat
```

U primeru 13 pokazuje se da su dva sloga jednaka ako i samo ako su im svi argumenti jednaki. Uvodi se parametarski tip `Pair` i koriste se selektorske funkcije `first` i `second`.

Primer 13 *Nakon definisanja slogova p1 i p2, dodaje se ograničenje koje se odnosi na drugi element sloga. Dodajemo i ograničenje da su slogovi p1 i p2 jednaki. Rešavač Z3 vraća zadovoljivost formule i odgovarajući model.*

Formula prosleđena rešavaču:

```
(declare-datatypes (T1 T2)
  (Pair (mk-pair (first T1) (second T2))))
(declare-const p1 (Pair Int Int))
(declare-const p2 (Pair Int Int))
(assert (= p1 p2))
(assert (> (second p1) 20))
(check-sat)
(get-model)
```

Izlaz:

```
sat
(model
   (define-fun p1 () (Pair Int Int)
      (mk-pair 0 21)
   )
   (define-fun p2 () (Pair Int Int)
      (mk-pair 0 21)
   )
```

U primeru 14 ilustruje se definisanje listi kao i dodavanje ograničenja korišćenjem selektorskih funkcija `head` i `tail`. Ispituje se zadovoljivost tvrđenja.

Primer 14 *Pored ograničenja za prve elemente listi, tražimo model takav da liste l1 i l2 nisu jednake, tj. da nisu svi elementi na odgovarajućim pozicijama u listama jednaki. Rešavač Z3 vraća zadovoljivost tvrđenja i dobijeni model prikazujemo u nastavku.*

Formula prosleđena rešavaču:

```
(declare-const l1 (List Int))
(declare-const l2 (List Int))
(declare-const l3 (List Int))
(declare-const x Int)
(assert (not (= l1 nil)))
(assert (not (= l2 nil)))
(assert (= (head l1) (tail l2)))
(assert (not (= l1 l2)))
(assert (= l3 (insert x l2)))
(assert (> x 100))
(check-sat)
(get-model)
```

Izlaz:

```
sat
(model
   (define-fun l3 () (List Int)
   (insert 101 (insert 0 (insert 1 nil)))
   (define-fun x () Int 101)
   (define-fun l1 () (List Int) (insert 0 nil))
   (define-fun l2 () (List Int) (insert 0
      (insert 1 nil))
   )
)
```

U prethodnom primeru, uvode se ograničenja da su liste l1 i l2 različite od `nil`. Ova ograničenja se uvode jer interpretacija selektora `head` i `tail` nije specifikovana u slučaju praznih lista.

3.5 Upotreba rešavača korišćenjem C++ interfejsa

C++ interfejs prema rešavaču Z3 obezbeđuje različite strukture podataka, klase i funkcije koje su potrebne za direktnu komunikaciju C++ aplikacije sa rešavačem. Neke od najbitnijih klasa biće opisane u nastavku, dok se kompletan opis interfejsa može naći na internetu [38].

Klasa `Z3_sort` koristi se za definisanje sorte izraza. Prilikom definisanja izraza navodi se sorta kako bi bio poznat skup vrednosti koje mu se mogu dodeliti kao i skup dozvoljenih metoda. Sorte izraza definisane su tipom enumeracije. Neke od najvažnijih sorti su `Z3_BOOL_SORT`, `Z3_INT_SORT`, `Z3_REAL_SORT`, `Z3_BV_SORT` i `Z3_ARRAY_SORT`. Određivanje sorte izraza vrši se funkcijom `sort_kind()` sa povratnom vrednošću tipa enumeracije. Za proveru pripadnosti izraza sorti, koriste se funkcije `is_bool()`, `is_int()`, `is_real()`, `is_array()` i `is_bv()`. Sorte različitih izraza se mogu porediti korišćenjem operatora jednakosti.

Za upravljanje objektima interfejsa kao i za globalno konfigurisanje koristi se klasa `context`. Klasa sadrži konstruktor bez argumenata. Upotrebom klase `context`, mogu se detektovati različite vrste grešaka u korišćenju C++ API-ja. Greške su definisane tipom enumeracije `Z3_ERROR_CODE`. Neke od konstanti enumeracije su `Z3_OK`, `Z3_SORT_ERROR`, `Z3_INVALID_USAGE` i `Z3_INTERNAL_FATAL`. Kontekst omogućava kreiranje konstanti metodama `bool_const()`, `int_const()`, `real_const()` i `bv_const()`. Definisanje različitih sorti omogućeno je metodama `bool_sort()`, `int_sort()`, `real_sort()`, `bv_sort()` i `array_sort()`.

Izrazi koji se formiraju pripadaju klasi `expr`. Sadrži konstruktor čiji je argument objekat klase `context`. Za dobijanje izraza na zadatoj poziciji u skupu izraza koristi se metoda `at(expr const &index)`. Provera da li podizraz predstavlja deo drugog izraza vrši se metodom `contains(expr const &s)`. Za dobijanje pojednostavljenog izraza ekvivalentnog polaznom koristi se metoda `simplify()` ukoliko takav izraz postoji. Za dobijanje pojednostavljenog izraza može se navesti i skup parametara koji se prosleđuju Z3 simplifikatoru. Zamenu vektora izraza drugim vektorom vrši se metodom `substitute(expr_vector const &source, expr_vector const &destination)`.

Postoji veliki broj metoda i operatora koji se koriste za izgradnju složenih izraza. Podržan je veliki broj aritmetičkih operatora za rad za izrazima uključujući operatore sabiranja, oduzimanja, množenja, deljenja, računanja stepena i modula. Svi aritmetički operatori kao argumente imaju izraze. Rezultat primene

operatora je novi izraz. Pored toga, mogu se koristiti i različiti logički operatori. Neke od podržanih logičkih operacija su konjunkcija, disjunkcija, implikacija, negacija konjunkcije i negacija disjunkcije. Konjunkcija vektora izraza vrši se metodom `mk_and(expr_vector const &args)`. Disjunkcija vektora izraza vrši se metodom `mk_or(expr_vector const &args)`. Implikacija dva izraza vrši se metodom `implies(expr const &a, expr const &b)`. Negacija konjunkcije dva izraza vrši se metodom `nand(expr const &a, expr const &b)`. Negacija disjunkcije dva izraza vrši se metodom `nor(expr const &a, expr const &b)`. Nad izrazima se mogu primenjivati relacijski operatori `==`, `!=`, `<`, `<=`, `>`, `>=` pri čemu izrazi moraju biti odgovarajuće sorte kako bi poređenje bilo moguće. Nadovezivanje dva izraza vrši se metodom `concat(expr const &a, expr const &b)`. Može se vršiti i nadovezivanje vektora izraza. Kombinovanjem pomenutih metoda i operatora mogu se graditi izrazi proizvoljne složenosti.

Definicija funkcije vrši se objektima klase `func_decl`. Korišćenjem ove klase definišu se interpretirane i neinterpretirane funkcije rešavača Z3. Povratne vrednosti funkcija određene su tipom enumeracije `Z3_decl_kind`. Neke od konstanti enumeracije su `Z3_OP_TRUE`, `Z3_OP_FALSE`, `Z3_OP_REAL`, `Z3_OP_INT` i `Z3_OP_ARRAY`. Dobijanje imena funkcijskog simbola vrši se metodom `name()`. Određivanje arnosti funkcijskog simbola vrši se metodom `arity()`. Određivanje sorte i-tog parametra funkcijskog simbola određuje se metodom `domain(unsigned i)`.

U okviru C++ interfejsa, teorije rešavača Z3 zadate su semantički navođenjem modela. Ova podrška implementirana je klasom `model`. Sadrži konstruktor čiji je argument objekat klase `context`. Interpretacija izraza definisanog u modelu dobija se korišćenjem metode `eval(expr const &n)`. Metodom `get_func_decl(unsigned i)` dobija se i-ti funkcijski simbol modela. Metodom `get_const_decl(unsigned i)` dobija se interpretacija i-te konstante modela. Metodom `num_consts()` dobija se broj konstanti datog modela kao funkcijskih simbola arnosti 0. Metodom `num_funcs()` dobija se broj funkcijskih simbola arnosti veće od 0. Metodom `size()` vraća se broj funkcijskih simbola modela. Poređenje modela vrši se operatorom jednakosti. Dva modela su jednaka ukoliko su im jednake interpretacije svih funkcijskih simbola. Za ispisivanje modela, koristi se funkcija `Z3_model_to_string` čiji su argumenti objekti klasa `context` i `model`.

Sa Z3 rešavačem komunicira se korišćenjem objekta klase `solver`. Objekat klase `solver` inicijalizuje se vrednostima objekta klase `context`. Osnovni metodi klase solver su `add`, `check` i `get_model`. Metodom `add(expr const &e)` dodaje se ogra-

ničenje koje se prosleđuje rešavaču. Metodom `check()` proverava se zadovoljivost ograničenja prosleđenih rešavaču. Metodom `get_model()` vraća se model definisan ograničenjima ukoliko postoji. Pre korišćenja metode `get_model()`, mora se pozvati metod `check()`. Metodom `assertions()` vraća se vektor ograničenja prosleđenih rešavaču. Ograničenja se mogu čitati iz fajla i iz stringa, korišćenjem metoda `from_file(char const *file)` i `from_string(char const *s)`. Uklanjanje svih ograničenja prosleđenih rešavaču vrši se metodom `reset()`.

Interfejs kroz primere

Naredni primeri ilustruju korišćenje najvažnijih klasa i metoda C++ interfejsa za komunikaciju sa Z3 rešavačem. Primer 15 ilustruje kreiranje bulovskih izraza i jednostavne formule i prikazuje kako se kreira i upotrebljava klasa `context` i klasa `solver`. U ovom primeru, ilustrovano je dodavanje ograničenja u solver metodom `add` i proveravanje njegove zadovoljivosti metodom `check`.

Primer 15 *Primer demonstrira važenje De Morganovog zakona dokazivanjem formule iz primera 1. Pokazuje se nezadovoljivost negirane formule. U zavisnosti od rezultata štampa se odgovarajuća poruka.*

```
void demorgan() {
    context c;
    expr x = c.bool_const("x");
    expr y = c.bool_const("y");
    expr e = (!(x && y)) == (!x || !y);

    solver s(c);
    s.add(!e);

    switch (s.check()) {
    case unsat:   std::cout << "Formula je validna"; break;
    case sat:     std::cout << "Formula nije validna"; break;
    case unknown: std::cout << "Rezultat je nepoznat"; break;
    }
}
```

Primer 16 ilustruje kreiranje celobrojnih konstanti i jednostavne neinterpretirane funkcije upotrebom klase `func_decl`. Prilikom definisanja funkcije navodi se njeno ime kao i sorte argumenta i povratne vrednosti. Ilustruje se kreiranje složenijeg

izraza upotrebom metode `implies` koji odgovara logičkom operatoru implikacije. Složeniji izraz prosleđuje se solveru i proverava se njegova zadovoljivost.

Primer 16 *Primer demonstrira upotrebu neinterpretiranih funkcija dokazivanjem formule x = y => g(x) = g(y). Dodaje se negacija prethodno navedene formule. U zavisnosti od rezultata, štampa se odgovarajuća poruka.*

```
void primer_sa_neinterpretiranim_funkcijama() {
    context c;
    expr x       = c.int_const("x");
    expr y       = c.int_const("y");
    sort I       = c.int_sort();
    func_decl g = function("g", I, I);

    solver s(c);
    expr e = implies(x == y, g(x) == g(y));
    s.add(!e);
    if (s.check() == unsat)
        std::cout << "dokazano";
    else
        std::cout << "nije dokazano";
}
```

U primeru 17 korišćenjem metode `get_model` pristupa se modelu koji je solver vratio. Vrši se evaluacija izraza dobijenih iz modela primenom metode `eval`.

Primer 17 *Rešavaču se prosleđuju jednostavna ograničenja nad konstantama. Zatim se vrši evaluacija jednostavnih izraza nad konstantama definisanih u modelu.*

```
void eval_primer() {
    context c;
    expr x = c.int_const("x");
    expr y = c.int_const("y");
    solver s(c);

    s.add(x < y);
    s.add(x > 2);
    std::cout << s.check();

    model m = s.get_model();
    std::cout << "Model:" << m;
    std::cout << "x+y = " << m.eval(x+y);
```

```
14 }
```

Primer 18 ilustruje pronalaženje interpretacija konstanti modela za problem linearne aritmetike uvođenjem ograničenja. Pokazuje se kako se korišćenjem klase `func_decl` pristupa konstantama modela kao funkcijskim simbolima arnosti 0.

Primer 18 *Rešavaču se prosleđuju jednostavna ograničenja linearne aritmetike* $x >= 1$ *i* $y < x + 3$. *Ispisuju se imena i interpretacije konstanti modela korišćenjem funkcije* `arity` *klase* `func_decl`.

```
1  void primer_linearne_aritmetike() {
2      context c;
3      expr x = c.int_const("x");
4      expr y = c.int_const("y");
5      solver s(c);
6      s.add(x >= 1);
7      s.add(y < x + 3);
8      model m = s.get_model();
9
10     for(unsigned i = 0; i < m.size(); i++) {
11         func_decl v = m[i];
12         assert(v.arity() == 0);
13         std::cout << v.name() << "=" << m.get_const_interp(v);
14     }
15 }
```

Primer 19 ilustruje pronalaženje interpretacija realnih konstanti modela za problem nelinearne aritmetike uvođenjem ograničenja. Interpretacija realnih konstanti ispisuje se u celobrojnom i realnom formatu korišćenjem opcija za konfigurisanje formata ispisa klase `context`.

Primer 19 *Rešavaču se prosleđuju jednostavna ograničenja nelinearne aritmetike* $x^2 + y^2 = 1$ *i* $x^3 + z^3 < 0.5$. *Ispisuju se imena i interpretacije konstanti modela korišćenjem funkcije* `arity` *klase* `func_decl`.

```
1  void primer_nelinearne_aritmetike() {
2      context c;
3      expr x = c.real_const("x");
4      expr y = c.real_const("y");
```

```
5       expr z = c.real_const("z");
6
7       solver s(c);
8       s.add(x*x + y*y == 1);
9       s.add(x*x*x + z*z*z < c.real_val("1/2"));
10
11      std::cout << s.check();
12      model m = s.get_model();
13      std::cout << m;
14
15      for(unsigned i = 0; i < m.size(); i++) {
16          func_decl v = m[i];
17          assert(v.arity() == 0);
18          std::cout << v.name() << "=" << m.get_const_interp(v);
19      }
20
21  }
```

Primer 20 ilustruje pronalaženje interpretacija konstanti koje imaju bitvektorsku reprezentaciju korišćenjem metode `bv_const` klase `context`. Parametri ove metode su ime i broj mesta za zapisivanje konstante.

Primer 20 *Rešavaču se prosleđuje ograničenje* $x^y - 103 = x*y$. *Ispisuju se imena i interpretacije konstantni predstavljenih bitvektorom dužine 32 korišćenjem funkcije* `arity` *klase* `func_decl`.

```
1   void primer_sa_bitvektorima() {
2       context c;
3       expr x = c.bv_const("x", 32);
4       expr y = c.bv_const("y", 32);
5
6       solver s(c);
7       s.add((x ^ y) - 103 == x * y);
8       std::cout << s.check();
9       std::cout << s.get_model();
10
11      for(unsigned i = 0; i < m.size(); i++) {
12          func_decl v = m[i];
13          assert(v.arity() == 0);
14          std::cout << v.name() << "=" << m.get_const_interp(v);
15      }
16  }
```

Glava 4

Modul za automatsko generisanje test primera

Uporedo sa nastajanjem novih tehnologija povećava se obim posla koji je potrebno obaviti pri razvoju softverskog rešenja. Pored povećanog obima, sve se više teži delimičnoj ili potpunoj automatizaciji poslova koji su se ranije morali izvršavati manuelno. Posledica ove dve činjenice je težnja za većim kvalitetom softverskog rešenja koje neminovno dovodi do porasta složenosti. Sa porastom složenosti sistema, povećava se mogućnost pojave greške u softveru. Iz tog razloga se u procesu razvoja posebna pažnja posvećuje ispitivanju ispravnosti softvera [3].

Kao što je opisano u glavi 2, postoje različite vrste testiranja. U većini slučajeva se generisanje testova vrši manuelno. Ukoliko bi se ovaj proces automatizovao, značajno bi se skratilo vreme potrebno za testiranje kao i broj testera uključenih u proces razvoja. Na osnovu navedenih činjenica, poželjno je da se ispravnost softverskog sistema ispituje automatski generisanim testovima [40].

U ovoj glavi opisana je statička analiza softvera, kao jedan od načina ispitivanja ispravnosti programa, u delu 4.1. U delu 4.2 opisan je sistem za statičko utvrđivanje ispravnosti softvera LAV. U delu 4.3 navedena je motivacija i značaj automatskog generisanja test primera. U delovima 4.4, 4.5 i 4.6 opisana je implementacija modula za automatsko generisanje test primera integrisanog u sistem LAV.

4.1 Statička provera ispravnosti softvera

Statičko ispitivanje ispravnosti programa predstavlja analizu programskog koda, bez njegovog izvršavanja [26]. Prema načinu utvrđivanja ispravnosti softvera sta-

tičkom analizom, razlikujemo manuelni pristup, koji obuhvata ručne provere koda, kao i automatizovani pristup. Kod automatizovanog pristupa, zbog neodlučnosti halting problema, ne postoji opšti algoritam kojim se utvrđuje da li je neka naredba programa ispravna, a samim tim i da li je sam program ispravan. Iz tog razloga primenjuju se različite aproksimacije u kojima se uslovi ispravnosti programa iskazuju formulama formalno definisanih matematičkih teorija . Automatizovani pristupi statičke analize programa su *proveravanje modela*, *apstraktna interpretacija* i *simboličko izvršavanje*.

Proveravanje modela je tehnika statičke analize koda u kojem se sistem, čiju je ispravnost potrebno utvrditi, opisuje konačnim automatom, a željeno ponašanje softvera se opisuje u terminima temporalne logike [11]. Dostupna stanja automata se sistematski obilaze radi provere ponašanja sistema. U slučaju neuspešne provere, generiše se kontraprimer koji narušava željeno ponašanje sistema. Proces ispitivanja ispravnosti može biti kompleksan ukoliko je broj mogućih stanja automata veliki. Potencijalni problem ovog pristupa je kombinatorna eksplozija stanja koji podrazumeva eksponencijalni porast broja stanja sa povećanjem broja promenljivih. U tom slučaju koristi se metod *proveravanja konačnih modela* u kojem se ograničava dužina putanje stanja automata [3]. Za utvrđivanje ispravnosti uslova programa, metod *proveravanja modela* obično koristi dijagrame binarnih odluka, dok metod *proveravanja ograničenih modela* najčešće koristi SAT ili SMT rešavače [7].

Apstraktna interpretacija predstavlja metodu statičke analize u kojoj se semantika programa opisuje matematičkim modelom mogućih ponašanja programa [34]. Ponašanje programa modeluje se konkretnim domenom i relacijama nad njim. Potencijalni problem ovog pristupa javlja se u slučajevima jako velikih domena i tada se vrši aproksimacija konačnog domena apstraktnim. Aproksimacijom domena mogu se izgubiti važne informacije. Iz tog razloga, posebna pažnja posvećuje se biranju adekvatne aproksimacije [12]. Sa druge strane, apstrahovanjem domena povećava se skalabilnost metode. Ova tehnika ima široku primenu, ali se najčešće koristi za analizu kompilatora sa ciljem pronalaženja klasa grešaka u programu kao što su deljenje nulom, prekoračenje bafere i dereferenciranje NULL pokazivača.

Simboličko izvršavanje je tehnika statičke analize koda u kojoj se ponašanje programa analizira praćenjem simboličkih izraza [41]. Umesto konkretnih vrednosti promenljivih upotrebljavaju se simboličke vrednosti, dok se putanje izvršavanja programa modeluju simboličkim izrazima. Ukoliko se simboličkim izvršavanjem neke putanje u programu pokaže da je ona ispravna, time se potvrđuje ispravnost svih

mogućih ulaza koji prate tu putanju. Broj putanja programa često je prevelik, čime se onemogućava sistematsko pretraživanje svih mogućih putanja. Iz tog razloga, ova metoda se obično koristi za pronalaženje grešaka umesto dokazivanja ispravnosti. U zavisnosti od redosleda kojem se putanje programa proveravaju, vreme potrebno za pronalaženje greške može značajno da varira [31]. Šta više, postoji rizik da se greška ne detektuje ukoliko istekne vreme predviđenu za analizu.

4.2 Sistem LAV

LAV (akronim ***L****LVM* ***A****utomated* ***V****erifier*) je alat otvorenog koda za statičku proveru ispravnosti softvera [23]. Implementiran je u programskom jeziku C++ [22]. Svrha sistema LAV je statička analiza, generisanje i proveravanje uslova ispravnosti imperativnih programa koristeći tehnike opisane u delu 4.1. Sistem koristi LLVM međujezik, radi transformisanja programa u oblik koji je pogodniji za analizu [29]. Osnovna namena alata je analiza programa napisanih u programskom jeziku C, ali se zbog univerzalnosti LLVM reprezentacije koda može koristiti za analizu drugih imperativnih jezika za koje postoje pristupne komponente.

Sistem modeluje ponašanje programa, konstruiše uslove ispravnosti programa, vrši transformaciju formiranih uslova u formule odgovarajućih teorija logike prvog reda. Podržane teorije su teorija neinterpretiranih funkcija, teorija linearne aritmetike, teorija bitvektora i teorija nizova [5]. Formule kojima se definišu uslovi ispravnosti programa šalju se na proveru SMT rešavaču. Sistem LAV ima podršku za rad sa nekoliko SMT rešavača (Boolector, Z3, MathSAT i Yices). Na osnovu rezultata rešavača, LAV generiše izveštaj o ispravnosti naredbi programa.

Ispitivanje ispravnosti programa se u sistemu LAV, svodi na proveravanje da li u nekoj liniji programa postoji izraz koji može da ima neku nedozvoljenu vrednost ili da adresa pokazuje na mesto u memoriji koje nije rezervisano za dati program. Ovakvim načinom ispitivanja detektuju se, između ostalog, greške deljenja nulom, prekoračenja bafera i dereferenciranja NULL pokazivača.

Izvršavanje programa se u okviru sistema LAV opisuje modelom na osnovu kojeg se generišu uslovi ispravnosti [31]. Interpretacija modela zavisi od teorije jezika višesortne logike prvog reda koja odgovara semantici programskog jezika. Teorija u koju se transformiše izgrađena formula se može odrediti na osnovu analiziranog koda ili zadavanjem kriterijuma efikasnosti i preciznosti rezultata.

Sistem LAV uvodi dve pretpostavke. Prva pretpostavka podrazumeva da se ula-

zni program sastoji od bloka instrukcija. Izvršavanje bloka može početi samo u ulaznoj tački bloka i mora se završiti nakon izvršavanja poslednje instrukcije bloka. Druga pretpostavka podrazumeva da nijedna instrukcija ne može koristiti više operatora ili poziva funkcije, izuzev operatora dodele. Takođe, poslednja instrukcija bloka definiše kojim blokovima u programu je moguće nastaviti izvršavanje.

U okviru sistema LAV, vrši se ispitivanje ispravnosti svake naredbe u programu. U tom procesu konstruišu se dve formule, jedna odgovara uslovu ispravnosti naredbe a druga odgovara uslovu neispravnosti naredbe. Na taj način se ispitivanje da li naredba dovodi do greške svodi na ispitivanje valjanosti konstruisanih formula u izabranoj teoriji upotrebom SMT rešavača. U zavisnosti od rezultata ispitivanja, naredba može biti bezbedna, neispravna, nebezbedna i nedostižna.

Naredba je bezbedna ukoliko prilikom njenog izvršavanja nikada ne dolazi do greške. Naredba se smatra neispravnom ukoliko prilikom njenog izvršavanja uvek dolazi do greške. Nebezbedna naredba je naredba čije izvršavanje može dovesti do greške ali i ne mora. Nedostižna je ona naredba koja nikada neće biti izvršena.

Primenom sistema LAV za ispitivanje ispravnosti C programa pokazano je da je korišćeni pristup uporediv sa drugim alatima slične namene. Dodatno, eksperimentalni rezultati pokazuju prednost alata LAV u odnosu na alate koji koriste tehniku simboličkog izvršavanja u programima u kojima postoji veliki broj mogućih putanja.

4.3 Opis problema

4.4 Opis arhitekture

4.5 Implementacija modula

4.6 Integracija modula u sistem LAV

Glava 5

Zaključak

U ovom radu razmatran je problem ispitivanja ispravnosti softvera korišćenjem tehnika statičke automatizovane analize. Uslovi neispravnosti programa definisani su formulama u terminima matematičkih teorija. Modeli ovih formula se mogu koristiti za automatsko generisanje test primera za koje se proverava da li zaista dovode do greške u softveru.

Alatu LAV dodata je podrška za preciznije izdvajanje modela u radu sa Z3 rešavačem koji pokriva različite kombinacije teorija. Podržane teorije, kojima je moguće modelovati uslove ispravnosti programa, su teorija neinterpretiranih funkcija, teorija linearne aritmetike, teorija bitvektora i teorija nizova.

Prilikom pravljenja modela ponašanja programa, korišćenjem izabrane teorije, primenjuju se razne aproksimacije. Ove aproksimacije mogu prijavljivati postojanje greške u programu koja zapravo ne postoji. Iz tog razloga neophodno je pokretanjem programa proveriti da li generisani test primer stvarno dovodi do nebezbednog i neočekivanog ponašanja. Alat LAV proširen je modulom za automatsko generisanje test primera na osnovu vrednosti iz modela rešavača Z3 za izabranu teoriju.

Eksperimentalni rezultati koji ukazuju na poboljšanje performansi pri korišćenju rešavača Z3 u poređenju sa drugim SMT rešavačima dostupni su u literaturi [28]. U radu je detaljno opisana upotreba rešavača korišćenjem SMT-LIB standarda i C++ interfejsa.

Buduća istraživanja na temu unapređenja rada mogla bi da obuhvate automatsko određivanje ulaznih promenljivih, čime bi se izbeglo dodatno anotiranje promenljivih u samom kodu. Drugo unapređenje moglo bi da obuhvati preciznije izdvajanje modela za druge SMT rešavače, kao što su Boolector, Yices i Mathsat pokrivanjem različitih kombinacija teorija. Pored toga, format ispisa vrednosti modela kao i

vrednosti test primera za sve rešavače mogao bi se standardizovati.

Literatura

[1] Irfan Ali. *What is Black Box Testing?* http://www.idt.mdh.se/kurser/ct3340/ht09/ADMINISTRATION/IRCSE09-submissions/ircse09_submission_29-1.pdf.

[2] Michael Orlando Art Manion. *Fuzz Testing for Dummies.* https://fuzzinginfo.files.wordpress.com/2012/05/ag_16b_icsjwg_spring_2011_conf_manion_orlando.pdf.

[3] T. Bormer B. Beckert. *In Verified Software: Theory, Tools and Experiments.* Springer-Verlag, 2007.

[4] James Bach. *Exploratory Testing.* http://www.satisfice.com/articles/et-article.pdf.

[5] C. Barrett i R. Sebastiani. *Satisfiability Modulo Theories, Frontiers in Artificial Intelligence and Applications.* 1987, str. 825–885.

[6] Armin Biere i Marijin Heule. *Handbook of Satisfiability, volume 185 of Frontiers in Artificial Intelligence and Applications.* 2009.

[7] A. Bierre i dr. *Bounded Model Checking.* 2003.

[8] *Black Box Test Data Generation Techniques.* http://staff.cs.psu.ac.th/Apirada/344-454/12_Defect_Testing_handout.pdf.

[9] J. Levitt C. Barrett D. Dill. *A decision procedure for bit-vector arithmetic.* 1998, str. 522–527.

[10] Aaron Stump Clark Barrett. *The SMT-LIB Standard - version 2.0.* 2013.

[11] E. M. Clarke. *25 Years of Model Checking - The Birth of Model Checking.* Lecture Notes in Computer Science, Springer, 2008.

[12] P. Cousot. *Abstract Interpretation Based Formal Methods and Future Challenges.* In Informatics - 10 Years Back. 10 Years Ahead, London, 2001.

[13] T. Rajanl Devl. *Importance of Testing in Software Development Life Cycle*. https://www.ijser.org/researchpaper/Importance-of-Testing-in-Software-Development-Life-Cycle.pdf. 2012.

[14] B. Dutertre i L. de Moura. *A Fast Linear-Arithmetic Solver for DPLL(T)*. 2006.

[15] Farmeena Khan Ehmer Khan. *A Comparative Study of White Box, Black Box and Grey Box Testing Techniques*. 2012.

[16] *Gray Box Testing*. http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/information_technology/Gray_Box_Testing.pdf.

[17] dr. Horst Brinkmeyer. *A New Approach to Component Testing*. https://arxiv.org/pdf/0710.4740.pdf.

[18] R. W. House i T. Rado. *A Generalization of Nelson-Open's Algorithm for Obtaining Prime Implicants*.

[19] *IEEE Standard for Software Unit Testing*. http://ieeexplore.ieee.org/document/27763/.

[20] *Investing in Software Testing: Manual or Automated?* https://www.stickyminds.com/sites/default/files/article/file/2012/XDD3583filelistfilename1_0.pdf.

[21] M. J. Frade J. B. Almeida. *Rigorous Software Development - An Introduction To Program Verification*. 2011.

[22] Milena Vujosevic Janicic. *LAV - LLVM Automated Verifier*. http://argo.matf.bg.ac.rs/?content=lav. 2013.

[23] Milena Vujošević Janičič. *Automatsko generisanje i proveravanje uslova ispravnosti programa*. PhD Thesis, Matematički fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2013.

[24] Wachovia Bank John E. Bently. *Software Testing Fundamentals - Concepts, Roles and Terminology*. http://www2.sas.com/proceedings/sugi30/141-30.pdf.

[25] Keng Siau John Erickson Kalle Lyytinen. *Agile Modeling, Agile Software Development and Extreme Programming*. https://search.proquest.com/openview//1?pq-origsite=gscholar&cbl=3752. 2005.

[26] Jose Bacelar Almeida Jorge Sousa Pinto. *Rigorous Software Development*. Undergraduate Topics in Computer Science, Springer, London, 2011.

[27] *KLEE project*. `https://klee.github.io/`.

[28] Nicolas Bjorner Leonardo De Moura. *Efficient E-matching for SMT solvers*. 2009.

[29] *LLVM - Low Level Virtual Machine*. `http://llvm.org/`.

[30] M. Pezze M. Young. *Integration and System Testing*. `http://ix.cs.uoregon.edu/~michal/Classes/W98/LecNotes/10-Testing-system.pdf`.

[31] Viktor Kuncak Milena Vujosevic Janicic. *Development and evaluation of LAV - an smt-based error finding platform system description*. 2012.

[32] Leonardo de Moura i Nikolaj Bjorner. *Z3 - An Efficient SMT Solver, Microsoft Research*. 2008, str. 337–340.

[33] Brian Nielsen. *Test Integration Strategies*. `http://people.cs.aau.dk/~bnielsen/TOV07/lektioner/strategies-07.pdf`.

[34] R. Cousot P. Cousot. *Abstract Interpretation: A Unified Lattice Model for Static Analysis of Programs*. In Symposium on Principles of Programming Languages, 1977.

[35] Rodney Parkin. *Software Unit Testing*. `http://condor.depaul.edu/sjost/hci430/documents/testing/UnitTesting.pdf`.

[36] David Molnar Patrice Godefroid Michael Y. Levin. *Automated Whitebox Fuzz Testing*.

[37] Microsoft Research. *Automatically generated documentation for the Z3 API*. `https://z3prover.github.io/api/html/`. 2016.

[38] Microsoft Research. *Automatically generated documentation for the Z3 C++ API*. `https://z3prover.github.io/api/html/group__cppapi.html`. 2016.

[39] Christopher T. Collins Roy W. Miller. *Acceptance Testing*. `http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.18.5040&rep=rep1&type=pdf`.

[40] John Rushby. *Automated Test Generation and Verified Software*.

[41] James C. King Thomas J. Watson. *Symbolic Execution and Program Testing*. `https://pdfs.semanticscholar.org/a29f/6bad.pdf/`.

[42] *WhiteBoxTesting*. `https://students.cs.byu.edu/~cs340ta/fall2017/readings/WhiteBox.pdf`.