

Programske paradigme

— Osnovna svojstva programskih jezika —

Milena Vujošević Jančić

Matematički fakultet, Univerzitet u Beogradu

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Leksika, sintaksa, semantika	2
2.1	Leksika	2
2.2	Sintaksa	3
2.3	Neformalna semantika	4
2.4	Operaciona semantika	4
2.5	Denotaciona semantika	5
2.6	Aksiomska semantika	6
3	Imena, povezanost, doseg	7
3.1	Imena	7
3.2	Promenljive	8
3.3	Povezivanje	9
3.4	Doseg	9
3.5	Životni vek	10
4	Kontrola toka i tipovi	10
4.1	Kontrola toka	10
4.2	Tipovi	11
5	Prevođenje i izvršavanje	12
5.1	Kompilacija vs Interpretiranje	12
5.2	Izvršavanje	12
6	Pitanja i literatura	13

1 Uvod

Svojstva programskih jezika

- Šta je ono što čini dva programska jezika sličnim?
- Na osnovu čega neki jezik pripada nekoj paradigmi?
- Šta je ono što čini dva programska jezika različitim?

- Na osnovu čega neki jezik ne pripada nekoj paradigmi?
- Šta je zajedničko za sve programske jezike?
- Šta je ono što je specifično za svaki programski jezik?
- Šta je ono što je specifično za neki programski jezik?

Svojstva programskih jezika

- Postoje različita svojstva programskih jezika koja ćemo izučavati:
 - Sintaksa
 - Semantika
 - Imena, doseg, povezanost
 - Kontrola toka, podrutine
 - Tipovi
 - Kompajlirani/Interpretirani jezici
 - Izvršavanje

2 Leksika, sintaksa, semantika

2.1 Leksika

Leksika

- Programski jezici moraju da budu precizni
- Leksika je podoblast sintakse koja se bavi opisivanjem osnovnih gradivnih elemenata jezika.
- U okviru leksike, definišu se reči i njihove kategorije
- U programskom jeziku, reči se nazivaju lekseme, a kategorije tokeni.
- U prirodnom jeziku, kategorije su imenice, glagoli, pridevi
- U programskom jeziku, tokeni mogu da budu identifikatori, ključne reči, operatori...

Leksika

- $a = 2 * b + 1$ — lekseme su a , $=$, 2 , $*$, $+$, 1 i b , a njima odgovarajući tokeni su identifikator (a i b), operator $=$, operator $*$, operator $+$, celobrojni literali 2 i 1 .
- Neki tokeni sadrže samo jednu reč, a neki mogu sadržati puno različitih reči
- Programski jezik C sadrži više od 100 različitih tokena: 44 različite ključne reči, identifikatore, celobrojne vrednosti, realne vrednosti, karakterske konstante, stringovske literale, dve vrste komentara, 54 operatora...
- Drugi moderni programski jezici (npr Ada, Java) imaju sličan nivo kompleksnosti tokena

Leksika

- Razlikujemo ključne reči i identifikatore: identifikator ne može biti neka od ključnih reči, npr ne možemo da napravimo promenljivu koja bi se zvala `if` ili `while`
- Postoje ključne reči koje zavise od konteksta, engl. *contextual keywords* koje su ključne reči na određenim specifičnim mestima programa, ali mogu biti identifikatori na drugim mestima.
- Na primer, u C# -u reč `yield` može da se pojavi ispred `break` ili `return`, na mestima na kojima identifikator ne može da se pojavi. Na tim mestima, ona se interpretira kao ključna reč, ali može da se koristi na drugim mestima i kao identifikator.

Leksika

- C# 4.0 ima 26 takvih kontekstno zavisnih ključnih reči, C++11 ih takođe ima dosta.
- Većina je uvedena revizijom postojećeg jezika sa ciljem da se definiše novi standard: sa velikim brojem korisnika i napisanog koda, vrlo je verovatno da se neka reč već koristi kao identifikator u nekom postojećem programu. Uvođenjem kontekstualne ključne reči, umesto obične ključne reči, smanjuje se rizik da se postojeći program neće kompilirati sa novom verzijom standarda.

Leksika

- Reči su obično definišu regularnim izrazima
- Na primer, `[a-zA-Z_][a-zA-Z_0-9]*`
- Regularnim izrazima se definišu reči, dok se konačnim automatima prepoznaju ispravne reči.
- Generisanje je bitno programerima, a prepoznavanje kompajlerima
- Leksikom programa obično se bavi deo prevodioca koji se naziva leksički analizator: on dodeljuje ulaznim rečima odgovarajuće kategorije, što je bitno za dalji proces prevođenja.

2.2 Sintaksa

Sintaksa

- Sintaksa programskog jezika definiše strukturu izraza, odnosno načine kombinovanja osnovnih elemenata jezika u ispravne jezičke konstrukcije.
- Formalno, sintakse se opisuju kontekstno slobodnim gramatikama, a prepoznaju parserima (potisni automat)

Sintaksa

- Na primer, sledeća jednostavna gramatika definiše jednostavne aritmetičke izraze

```
<exp> ::= <exp> "+" <exp>
<exp> ::= <exp> "*" <exp>
<exp> ::= "(" <exp> ")"
<exp> ::= "a"
<exp> ::= "b"
<exp> ::= "c"
```

- Program u ovom jeziku je proizvod ili suma od 'a', 'b' i 'c', na primer ispravan izraz je $a*(b+c)$

2.3 Neformalna semantika

Semantika

- Semantika pridružuje značenje ispravnim konstrukcijama na nekom programskom jeziku.
- Semantika programskog jezika određuje značenje jezika.
- Obično je značajno teže definisati nego sintaksu.

Semantika

- Uloga semantike je da programer može da razume kako se program izvršava pre njegovog pokretanja.
- Semantika može da se opiše formalno i neformalno, često se zadaje samo neformalno.
- Na primer, semantika naredbe `if (a<b) a++;` neformalno se opisuje sa „ukoliko je vrednost promenljive a manja od vrednosti promenljive b, onda uvećaj vrednost promenljive a za jedan”

Semantika

- Formalan opis značenja jezičkih konstrukcija
 - Operaciona semantika
 - Aksiomska semantika
 - Denotaciona semantika

2.4 Operaciona semantika

Operaciona semantika

- Operaciona semantika opisuje kako se izračunavanje izvršava.
- Ponašanje se formalno definiše korišćenjem apstraktnih mašina, formalnih automata, tranzicionih sistema...
- U okviru ove semantike postoje **strukturna operaciona semantika** (small-step semantics, opisuje individualne korake izračunavanja) i **prirodna operaciona semantika** (big-step semantics, opisuje ukupne rezultate izračunavanja).
- Najčešće se koristi za opis i rezonovanje o imperativnim jezicima jer individualni koraci izračunavanja opisuju na koji način se menja stanje programa.

2.5 Denotaciona semantika

Denotaciona semantika

- Denotaciona semantika definiše značenje prevođenjem u drugi jezik, za koji se pretpostavlja da je poznata semantika
- Najčešće je taj drugi jezik nekakav matematički formalizam
- Povezivanje svakog dela programskog jezika sa nekim matematičkim objektom kao što je broj ili funkcija: svaka sintaksna definicija se tretira kao objekat na koji se može primeniti funkcija koja taj objekat preslikava u matematički objekat koji definiše značenje.
- Dodeljivanjem značenja delovima programa dodeljuje se značenje celokupnom programu, tj semantika jedne programske celine definisana je preko semantike njenih poddelova. Ova osobina denotacione semantike naziva se **kompozitivnost**.

Denotaciona semantika

Sintaksni domeni i pravila:

$B : Broj$ B je nenegativan broj

$C : Cifra$ C je cifra 0,1,...,9

$I : Izraz$

$Broj ::= Cifra | Broj Cifra$

$Cifra ::= 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9$

$Izraz ::= Broj | Izraz + Izraz$

Denotaciona semantika

Sledeći korak jeste definisanje matematičkih objekata koji će predstavljati semantičke vrednosti. Ti matematički objekti nazivaju se **semantički domeni**. Njihova kompleksnost zavisi od toga koliko je kompleksan programski jezik kojem dajemo značenje, u ovom jednostavnom primeru, semantička vrednost može biti i samo prirodan broj.

Semantički domeni

$N = 0, 1, 2, 3, \dots$ skup prirodnih brojeva

Denotaciona semantika

Funkcije značenja daju značenje uvedenim sintaksnim definicijama.

Funkcije značenja

$povezibn : B \rightarrow N$ unarna funkcija - povezuje broj sa N
 $povezicn : C \rightarrow N$ unarna funkcija - povezuje cifru sa N
 $semantika : I \rightarrow N$ unarna funkcija - povezuje izraz sa N
 $plus : N \times N \rightarrow N$ binarna funkcija plus - isto što i +
 $pom : N \times N \rightarrow N$ binarna funkcija pom - isto što i *
 $povezicn[[0]] = 0, \dots, povezicn[[9]] = 9$
 $povezibn[[C]] = povezicn[[C]]$
 $povezibn[[BC]] = plus(pom(10, povezibn[[B]]), povezibn[[C]])$
 $semantika[[B]] = povezibn[[B]]$
 $semantika[[I1 + I2]] = plus(semantika[[I1]], semantika[[I2]])$

Zagrade $[[,]]$ imaju ulogu da razdvoje semantički deo od sintaksnog dela. U okviru zagrada nalazi se sintakсни deo definicija.

Denotaciona semantika

Pronađi značenje izraza $2+32+61$. $semantika[[2+32+61]] = plus(semantika[[2+32]], semantika[[61]])$
 $= plus(plus(semantika[[2]], semantika[[32]]), povezibn[[61]]) = plus(plus(2,32), 61) = plus(2+32, 61)$
 $= plus(34+61) = 34+61 = 95$

jer je:

$semantika[[2]] = povezibn[[2]] = povezicn[[2]] = 2$

$semantika[[32]] = povezibn[[32]] = plus(pom(10, povezibn[[3]]), povezibn[[2]]) = plus(pom(10, povezicn[[3]]), povezicn[[2]])$
 $= plus(pom(10, 3), 2) = plus(10*3, 2) = plus(30, 2) = 30+2 = 32$ $semantika[[61]] = povezibn[[61]] = plus(pom(10, povezibn[[6]]), povezibn[[1]]) = plus(pom(10, povezicn[[6]]), povezicn[[1]])$
 $= plus(pom(10, 6), 1) = plus(10*6, 1) = plus(6center0, 1) = 60+1 = 61$

Denotaciona semantika

- Denotaciona semantika apstrahuje izvršavanje programa.
- Koristi se za definisanje semantike funkcionalnih programskih jezika — funkcionalno programiranje zasniva se na pojmu matematičkih funkcija i izvršavanje programa svodi se na evaluaciju funkcija.
- Analiziranje programa se svodi na analiziranje matematičkih objekata, što olakšava formalno dokazivanje semantičkih svojstava programa.

2.6 Aksiomska semantika

Aksiomska semantika

- Aksiomska semantika zasniva se na matematičkoj logici, na primer na Horovoj logici
- Horova trojka $\{P\} \text{ C } \{Q\}$; opisuje kako izvršavanje dela koda menja stanje izračunavanja: ako je ispunjen preduslov $\{P\}$, izvršavanje komande C vodi do postuslova $\{Q\}$
- Horova logika obezbeđuje aksiome i pravila izvođenja za sve konstrukte jednostavnog imperativnog programskog jezika
- Na primer

$$\frac{}{\{P\}\text{skip}\{P\}} \qquad \frac{\{P\}S\{Q\}, \{Q\}T\{R\}}{\{P\}S;T\{R\}}$$

Semantika

- Kompajler prevodi kod na mašinski kod u skladu sa zadatom semantikom jezika.
- Tokom kompilacije, vrši se proveravanje da li postoji neka semantička greška, tj situacija koja je sintaksno ispravna ali za konkretne vrednosti nema pridruženo značenje zadatom semantikom.
- Neki aspekti semantičke korektnosti programa se mogu proveriti tokom prevođenja programa — na primer, da su sve promenljive koje se koriste u izrazima definisane i da su odgovarajućeg tipa),
- Neki aspekti semantičke korektnosti se mogu proveriti tek u fazi izvršavanja programa — na primer, deljenje nulom, pristup elementima niza van granica...

Semantika

- Semantičke provere se mogu podeliti na statičke (provere prilikom kompilacije) i dinamičke (provere prilikom izvršavanja programa).
- Statički se ne može pouzdano utvrditi ispunjenost semantičkih uslova, tako da je moguće da se neke greške ne utvrde, iako prisutne, kao i da se neke greške pogrešno utvrde iako nisu prisutne i da rezultiraju nepotrebnim proverama prilikom izvršavanja programa.
- Različitim programskim jezicima odgovaraju izvršni programi koji sadrže različite nivoe dinamičkih provera ispravnosti.

3 Imena, povezanost, doseg

3.1 Imena

Imena

- Ime — string koji se koristi za predstavljanje nečega (promenljive, konstante, operatora, tipova...)
- Prvi programski jezici imali su imena dužine jednog karaktera (po uzoru na matematičke promenljive). Fortran I je to promenio dozvoljavajući šest karaktera u imenu.
- Fortran 95 i kasnije verzije Fortrana dozvoljavaju 31 karakter u imenu, C99 nema ograničenja za interna imena, ali samo prvih 63 je značajno. Eksterna imena u C99 (ona koja su definisana van modula i o kojima mora da brine linker) imaju ograničenje od 31 karaktera. Imena u Javi, C# i Adi nemaju ograničenja dužine i svi karakteri su značajni. C++ ne zadaje limit dužine imena, ali implementacije obično zadaju.

Imena

- Imena u većini programskih jezika imaju istu formu - slova, cifre i podvlaka
- Podvlaka se sve češće zamenjuje kamiljom notacijom
- U nekim jezicima imena moraju da počnu specijalnim znacima (npr PHP ime mora da počne sa \$)
- Imena su najčešće case sensitive, što može da stvara probleme

Imena

- Specijalne reči se korsite da učine program čitljivijim - imenuju akcije koje treba da se sprovedu ili sintaksno odvajaju delove naredbi i programa. U većini jezika specijalne reči su rezervisane reči koje ne mogu da budu predefinisane od strane programera.
- Ključne reči su najčešće rezervisane reči, ali ne moraju to da budu, kao na primer kontestno zavisne ključne reči
- Nije dobro ako jezik ima preveliki broj rezervisanih reči
- Na primer, COBOL ima oko 300 rezervisanih reči, u koje spadaju i count, length, bottom, destination...

3.2 Promenljive

Promenljive

- Promenljiva: apstrakcija memorijskih jedinica (ćelija), ime promenljive je imenovanje memorijske lokacije
- Karakteristke promenljivih: ime, adresa, vrednost, tip, životni vek, doseg

- Imena promenljivih su najčešća imena u programu, ali nemaju sve promenljive imena (tj nemaju sve memorijske lokacije imena, na primer, memorijske lokacije eksplicitno definisane na hipu kojima se pristupa preko pokazivača)

Adresa

- Adresa promenljive: adresa fizičke memorije koja je pridružena promenljivoj za skladištenje podataka.
- Promenljiva može imati različite fizičke lokacije prilikom istog izvršavanja programa (npr različiti pozivi iste funkcije rezultuju različitim adresama na steku). Adresa se često naziva l-vrednost
- Moguće je da postoje više promenljivih koje imaju istu adresu - aliasi
- Alias pogoršavaju čitljivost programa i čine verifikaciju programa težom.
- Alias: unije u C/C++-u, dva pointera koji pokazuju na istu memorijsku lokaciju, dve reference, pointer i promenljiva...
- Alias se u mnogim jezicima akreiraju kroz parametre poziva potprograma

Tip

- Tip promenljive određuje opseg vrednosti koje promenljiva može da ima kao i operacije koje se mogu izvršiti za vrednosti tog tipa
- Osnovni tipovi, niske, korisnički definisani prebrojivi tipovi (enum, subrange), nizovi, asocijativni nizovi, strukture, torke, liste, unije, pokazivači i reference

Vrednost

- Vrednost promenljive je sadržaj odgovarajuće memorijske ćelije, često se naziva r-vrednost
- Da bi se pristupilo r-vrednosti mora najpre da se odredi l-vrednost, što ne mora da bude jednostavno, jer zavisi od pravila doseganja.

3.3 Povezivanje

Povezivanje

- Povezivanje uspostavlja odnos između imena sa onim što to ime predstavlja.
- Vreme povezivanja je vreme kada se ova veza uspostavlja
- Rano vreme povezivanja — veća efikasnost, kasno vreme povezivanja — veća fleksibilnost.

Povezivanje

- Vreme povezivanja može biti (vreme - primer)
 - vreme dizajna programskog jezika (osnovni konstrukti, primitivni tipovi podataka...)
 - vreme implementacije (veličina osnovnih tipova podataka...)
 - vreme programiranja (algoritmi, strukture, imena promenljivih)
 - vreme kompiliranja (preslikavanje konstrukata višeg nivoa u mašinski kod)
 - vreme povezivanja (kada se ime iz jednog modula odnosi na objekat definisan u drugom modulu)
 - vreme učitavanja (kod starijih operativnih sistema, povezivanje objekata sa fizičkim adresama u memoriji)
 - vreme izvršavanja (povezivanje promenljivih i njihovih vrednosti)

3.4 Doseg

Doseg

- Doseg određuje deo programa u kojem je vidljivo neko ime
- Pravila dosega mogu da budu veoma jednsotavna (kao u skript jezicima) ili veoma kompleksna
- Doseg ne određuje nužno životni vek objekta

3.5 Životni vek

Životni vek

- Životni vek obično odgovara jednom od tri osnovna mehanizma skladištenja podataka
- Statički objekti — koji imaju životni vek koji se prostire tokom celog rada programa (npr globalne promenljive)
- Objekti na steku — živoni vek koji se alocira i dealocira LIFO principom, obično zajedno sa pozivom i završetkom rada podprograma.
- Objekti na hipu — koji se aociraju i dealociraju proizvoljno od strane programera, implicitno ili eksplicitno, i koji zahtevaju opštiji i skuplji sistem za upravljanje skladištenjem (memorijom)

4 Kontrola toka i tipovi

4.1 Kontrola toka

Kontrola toka

- Kontrola toka definiše redosled izračunavanja koje računar sprovodi da bi se ostvario neki cilj.
- Postoje različiti mehanizmi određivanja kontrole toka:
 1. Sekvenca — određen redosled izvršavanja
 2. Selekcija — u zavisnosti od uslova, pravi se izbor (if, switch)
 3. Iteracija — fragment koda se izvršava više puta
 4. Podrutine su apstrakcija kontrole toka: one dozvoljavaju da programer sakrije proizvoljno komplikovan kod iza jednostavnog interfejsa (procedure, funkcije, rutine, metodi, potprogrami)

Kontrola toka

- Postoje različiti mehanizmi određivanja kontrole toka:
 5. Rekurzija — definisanje izraza u terminima samog izraza (direktno ili indirektno)
 6. Konkurentnost — dva ili više fragmenta programa mogu da se izvršavaju u istom vremenskom intervalu, bilo paralelno na različitim procesorima, bilo isprepletano na istom procesoru
 7. Podrška za rad sa izuzecima — fragment koda se izvršava očekujući da su neki uslovi ispunjeni, ukoliko se desi suprotno, izvršavanje se nastavlja u okviru drugog fragmenta za obradu izuzetka
 8. Nedeterminizam — redosled izvršavanja se namerno ostavlja nedefinisan, što povlači da izvršavanje proizvoljnim redosledom dovodi do korektnog rezultata

4.2 Tipovi

Tipovi

- Programski jezici moraju da organizuju podatke na neki način
- Tipovi pomažu u dizajniranju programa, proveru ispravnosti programa i u utvrđivanju potrebne memorije za skladištenje podataka
- Mehanizmi potrebni za upravljanjem podacima nazivaju se sistem tipova

Tipovi

- Sistem tipova obično uključuje
 - skup predefinisanih osnovnih tipova (npr int, string...)
 - mehanizam građenja novih tipova (npr struct, union)
 - mehanizam kontrolisanja tipova
 - * pravila za utvrđivanje ekvivalentnosti: kada su dva tipa ista?
 - * pravila za utvrđivanje kompatibilnosti: kada se jedan tip može zameniti drugim?
 - * pravila izvođenja: kako se dodeljuje tip kompleksnim izrazima?
 - pravila za proveru tipova (statička i dinamička provera)

Tipovi

- Jezik je tipiziran ako precizira za svaku operaciju nad kojim tipovima podataka može da se izvrši
- Jezici kao što je assembler i mašinski jezici nisu tipizirani jer se svaka operacija izvršava nad bitovima fiksne širine
- Postoji slabo i jako tipiziranje
 - Kod jako tipiziranih jezika izvođenje operacije nad podacima pogrešnog tipa će izazvati grešku
 - Slabo tipizirani jezici izvršavaju implicitne konverzije ukoliko nema poklapanja tipova
 - Neki jezici dozvoljavaju eksplicitno kastovanje tipova

Tipovi

- Važan je trenutak kada se radi provera tipova
 - Za vreme prevođenja programa — statičko tipiziranje
 - Za vreme izvršavanja programa — dinamičko tipiziranje
- Statičko tipiziranje je manje sklono greškama ali može da bude previše restriktivno, dok je dinamičko tipiziranje sklonije greškama i teško za debugovanje ali fleksibilnije.

5 Prevođenje i izvršavanje

5.1 Kompilacija vs Interpretiranje

Kompilacija vs Interpretiranje

- Kompilirani jezici se prevode u mašinski kod koji se izvršava direktno na procesoru računara - faze prevođenja i izvršavanja programa su razdvojene.
- U toku prevođenja, vrše se razne optimizacije izvršnog koda što ga čini efikasnijim.
- Jednom preveden kod se može puno puta izvršavati, ali svaka izmena izvornog koda zahteva novo prevođenje.

Kompilacija vs Interpretiranje

- Interpretirani jezici se prevode naredbu po naredbu i neposredno zatim se naredba izvršava — faze prevođenja i izvršavanja nisu razdvojene već su međusobno isprepletene.
- Rezultat prevođenja se ne smešta u izvršnu datoteku, već je za svako naredno pokretanje potrebna ponovna analiza i prevođenje.
- Sporiji, ali prilikom malih izmena koda nije potrebno vršiti analizu celokupnog koda.
- Hibridni jezici — kombinacija prethodna dva.

Kompilacija vs Interpretiranje

- Teorijski, svi programski jezici mogu da budu i kompilirani i interpretirani.
- Moderni programski jezici najčešće pružaju obe mogućnosti, ali u praksi je za neke jezike prirodnije koristiti odgovarajući pristup.
- Nekada se u fazi razvoja i testiranja koristi interpretirani pristup, a potom se generiše izvršni kod kompilacijom.
- Prema tome, razlika se zasniva pre na praktičnoj upotrebi nego na samim karakteristikama jezika.

5.2 Izvršavanje

Izvršavanje

- Svaka netrivialna implementacija jezika višeg nivoa intenzivno koristi rantajm biblioteke
- Rantajm sistem se odnosi na skup biblioteka od kojih implementacija jezika zavisi kako bi program mogao ispravno da se izvršava.
- Neke bibliotečke funkcije rade jednostavne stvari (npr podrška aritmetičkim funkcijama koje nisu implementirane u okviru hardvera, kopiranje sadržaja memorije...) dok neke rade komplikovanije stvari (npr upravljanje hipom, rad sa baferovanim I/O, rad sa grafičkim I/O...)

Izvršavanje

- Neki jezici imaju veoma male rantajm sisteme (npr C)
- Neki jezici koriste rantajm sisteme intenzivno
- Virtuelne mašine u potpunosti skrivaju hardver arhitekture nad kojom se program izvršava
- C# koristi rantajm sistem CLI, JAVA koristi JVM

6 Pitanja i literatura

Pitanja

- Koja su osnovna svojstva programskih jezika?
- Koji formalizam se koristi za opisivanje sintakse programskog jezika?
- Šta definiše semantika programskog jezika?
- Koji su formalni okviri za definisanje semantike programskih jezika?
- Šta je ime?
- Šta je povezivanje?
- Koja su moguća vremena povezivanja?

Pitanja

- Šta je doseg?
- Šta je kontrola toka?
- Koji su mehanizmi određivanja kontrole toka?
- Šta je sistem tipova i šta on uključuje?
- Šta je tipiziranje i kakvo tipiziranje postoji?
- Kada se radi provera tipova?
- Koja je razlika između kompiliranja i interpretiranja?
- Šta je ranta jm sistem?

Literatura

- Programming Language Pragmatics, Third Edition, 2009 by Michael L. Scott
- Seven Languages in Seven Weeks: A Pragmatic Guide to Learning Programming Languages (Pragmatic Programmers), 2010 by Bruce A. Tate

Literatura

- Programming Language Pragmatics, Third Edition, 2009 by Michael L. Scott
- Deo materijala je preuzet od prof Dušana Tošića, iz istoimenog kursa.