

LATVIJAS UNIVERSITĀTES  
EKSAKTO ZINĀTŅU UN TEHNOLOĢIJU FAKULTĀTES  
DATORIKAS NODAĻA

# **INTERPRETATORS PROGRAMMĒŠANAS VALODAI IMMUTANT**

KVALIFIKĀCIJAS DARBS DATORZINĀTNĒS

Autors: Rolands Frīdemanis

Studenta apliecības Nr.: rf23009

Darba vadītājs: asociētais profesors Dr. sc. comp. Aleksandrs Belovs

RĪGA, 2025

## **Anotācija**

Mūsdienās liela daļa no vispārīga pielietojuma programmēšanas valodām, satur sematiku, kas paredz, ka datu mainība ir ierasta lieta, tomēr šim pastāv būtisks trūkums, kas ir datu neparedzamība. Lai spriešanu par programmas stāvokli padarītu paredzamu, šī darba ietvaros tiek izstrādāta programmēšanas valoda, kuras gramatika un sintakse ierosina noteikta datu nemainību. Šis darbs satur valodas specifikāciju un interpretatora arhitektūras dokumentāciju lekserim, parsētājam un abstraktā sintakses koka pārstaigāšanas algoritmam. Rezultātā, izmantojot valodu C, tiek izveidota augsta līmeņa, intepretējama, dinamiski tipizēta valoda ar atomāriem datu tipiem.

**Atslēgvārdi:** interpretators, AST, funkcionālā programmēšana, C valoda, datu nemainība

## **Abstract**

Most modern general-purpose programming languages use grammar and syntax that suggests mutable data being an ordinary matter, which in reality complicates reasoning about program state. To make such reasoning predictable, this work explores the design and development of a programming language with explicit syntax and semantics of immutable data. This work contains specification for such language and documentation of the architecture for the lexer, parser and AST-walker of the underlying interpreter. As a result, a high-level, interpreted, dynamically typed programming language with only atomic data types is created. The language is implemented in C.

**Keywords:** interpreter, AST, functional programming, C language, data immutability

# SATURS

Apzīmējumu saraksts . . . . .	2
Ievads . . . . .	3
<b>1. Valodas specifikācija</b>	<b>4</b>
1.1. Datu tipi . . . . .	4
1.2. Konstrukcijas . . . . .	6
1.3. Operatori . . . . .	6
1.4. Mainīgie . . . . .	7
1.5. Funkcijas . . . . .	8
1.6. Kontroles plūsma . . . . .	10
1.7. Kļūdu veidi un apzīmējumi . . . . .	11
<b>2. Interpretatora arhitektūra</b>	<b>12</b>

## APZĪMĒJUMU SARAKSTS

<b>AST</b>	Abstraktās sintakses koks
<b>immutability</b>	Pilnīga datu nemainība (koncepts)
<b>immutable</b>	Nemainīgs (datu īpašība)
<b>read-only</b>	Tikai lasāmi (dati)

## IEVADS

Datu mainība un to nepārtraukta plūsma no viena mainīga uz otru ir neapstrīdama daļa no lielas daļas programmatūras. Droši var apgalvot, ka datorsistēmu arhitektūru atmiņas koncepcija ļauj izmantot atmiņu vairākkārtēji. Atmiņu var relocēt, izdzēst, pieprasīt lielākus atmiņas gabalus u.t.t. No šī izriet datu mainības būtība, un līdz šai dienai tā ir iekalta lielā daļā, ja ne visu, programmēšanas un skriptēšanas valodu.

No otras puses, mainīgiem datiem pastāv īpašība būt neparedzamiem. Kamēr mazas sistēmas spēj tikt galā ar nelielu daudzumu mainīgo, tad lielajās sistēmā tas var kļūt par acīmredzamu problēmu. Atmiņa datoram ir viena, tomēr atsaukties uz to var no dažādām vietām dažādos laika brīžos, kas padara spriešanu par datu stāvokli daudz sarežģītāk.

Programmētāji izmanto iespēju mainīt datus brīvā veidā, jo programmēšanas valodas un to abstrakcijas ir padarījušas to tik vienkāršu. Lai gūtu vairāk kontroles pār iepriekš minēto uzvedību, valodas no C saimes, Java, JavaScript un citas valodas satur gramatikas, kas ierobežo mainīgu datu inicializāciju un to turpmāko vērtību maiņu. Kā piemēru var minēt `const` atslēgvārdu no valodas C, kas fiksē doto mainīgo un liedz pārrakstīt tā vērtību, tomēr tas tikai daļēji attiecas uz atsauces tipa vērtībām. Kaut arī šāda tipa mainīgais vienmēr atsauksies tikai uz vienu konkrētu atmiņas apgabalu, nav noteikts, ka vērtība, kas tajā atrodas, nemainīsies. Līdz ar to, `const` atslēgvārds negarantē patiesu datu nemainību, bet tikai noslēdz to uz `readonly` pieeju. Neskatoties uz dažādiem programmēšanas valodu centieniem ierobežot datu mainību, tādas problēmas kā neparedzamas mainīgo vērtības pāveidē izpildes laikā, mainīgo aizstājējvārdu nepārdomāta ieviešana un izmantošana, mainīgo nejauša re-inicializācija u.c. joprojām sastāda lielu daļu programmu. [1]

Šis darbs izskata jaunas interpretējamas programmēšanas valodas izveidi, kurai pielietota datu nemainības semantika, cenšoties mazināt programmatūras izstrādes problēmas saistītas ar stāvokli maiņu. Tas arī nozīmē, ka galvenā ideja kalpo par faktoru valodas nosaukuma izvēlei. Savukārt interpretatora sākotnējā versijā, kas šeit ir izskatīta, ietilpst apstrādes loģika sekojošām daļām: primitīvi datu tipi un to glabāšana mainīgos, ar to saistītā datu nemainības semantika, izteiksmes, tīras un netīras funkcijas, kontroles plūsma un cikli.

Šī darba pirmajā nodaļā tiks izskatīta programmēšanas valodas specifikācija, kurai pakārtosies interpretators. Savukārt otrā nodaļa būs veltīta interpretatora arhitektūras pārskatam un tā tehniskai specifikācijai, kā arī tehnoloģijām izmantotām programmatūras izstrādei. Trešā un ceturtā nodaļa virzīs uzmanību uz leksera un parsētāja izstrādes detaļām, bet piektā nodaļa būs par rezultējošā AST apstrādi. Tālākajā sestajā nodaļā būs apkopoti rezultāti par jauniegūto valodu un tās interpretatoru, un praktiski demonstrēts valodas pielietojums. Visbeidzot, septītajā nodaļā tiek izvirzītas idejas turpmākai valodas attīstībai, un izskatīts kopsavilkums par paveikto darbu.

# 1. VALODAS SPECIFIKĀCIJA

Šīs nodaļas nolūks ir formalizēt prasības, kas noteiktas uz valodu, kas attiecīgam interpretatoram ir jāspēj īstenot. Šī nodaļa neizklāsta implementācijas detaļas, bet gan drīzāk kalpo kā lietotāja rokasgramāta valodas lietošanā. Nodaļā izklāstītā informācija netikai palīdz lasītājiem iepazīties ar tās uzbūvi valodas lietošanas un attīstītīšanas nolūkos, bet arī nosaka prasības, kas tiek attiecīgi nostādītas uz Immutant programmēšanas valodas interpretatoru. Nodaļā ir skaidroti valodā definētie datu tipi, mainīgie funkcijas, un programmas vadības mehānismi, datu nemainības semantika, kas attiecas uz noteikta veida vērtībām, kā arī tiek uzskaitīti kļūdu paziņojumi un to attiecīgie skaidrojumi. Turpretim, lai iepazītos ar tehniskām implementācijas detaļām, skatīt nākamo nodaļu 2..

## 1.1. Datu tipi

Immutant valodā tiek definēti tikai primitīvi datu tipi, kurus iedala 3 kategorijās: patiesuma, virknes tipa, un skaitļi. Par katru no šiem zemāk seko savs skaidrojums.

### 1.1.1. Virknes

#### Definīcija

Virkne ir jebkuru simbolu kopums, kas ir ietverts starp dubultpēdiņām.

Virknes var saturēt jebkādu simbolu, tostarp specsimbolus, kā @, ^, & u.c. Proti, virknēs arī nav liegts izmantot speciālos atslēgas vārdus, ko pati valoda ir definējusi, piemēram, `mutant` (vairāk par to minēts sadaļā 1.4.). Piemērs dažādām vīknēm seko zemāk. Tāpat, arī vienu rakstzīmi ir atļauts uzdot ar virknes tipu.

`"", "someString", "sentence with spaces", " ", ,"\\"`

Izņēmuma gadījums, ir dubultpēdiņu simbola izmantošana iekš virknes. Lai nezutvertu to kā virknes beigas, tas ir jāekranē ar vadošo simbolu \. Realitātē neekranizētas virknes, kas satur specsimbolus ir pamata sintakses kļūda, ko programmētāji bieži vien pieļauj neuzmanības dēļ.

Piemērs tādai virknei:

---

"They call themselves \"the wolves\""

Rezultātā atkārtots dubultpēdiņu simbols netiek uztvers kā virknes beigu indenkators, bet gan kā daļa no virknes vērtības, un tiek panākts sekojošs teksts:

They call themselves "the wolves"

Uz ekranizēšanu attiecas arī pats ekranizēšanas simbols \. Ja ir nepieciešamība to iekļaut virknē, tas arī ir jāekranizē sekojošā veidā:

"There is something mysterious about the "\\\" character."

Dotās virknes rezultējošais teksts ir:

There is something mysterious about the "\" character.

### 1.1.2. Skaitļi

#### Definīcija

Skaitlis ir jebkura vērtība no Reālo skaitļu kopas. Ir svarīgi uzsvērt, ka irracionāli skaitļi tiek implementēti pēc IEEE 754 standarta, tāpēc realitātē tie nav līdz galam irracionāli, bet gan ir to aproksimētas vērtības. Daļskaitļu decimālo daļu atdala ar punkta (.) rakstzīmi.

Piemērs skaitliskām vērtībām seko zemāk:

102, -9, -0.3, 421.5632, PI

Dotajā piemērā PI ir viena no valodā eksistējošām konstatēm, kas satur aproksimētu matemātiskās konstantes  $\pi$  vērtību ( $\sim 3.1415926535$ ).

Valodas gramatika atļauj izmantot vadošo punktu priekšā skaitlim, kas apzīmē decimāldaļu skailim nulle. Piemēram, decimālskaitlis .34 ir identisks ar 0.34.

### 1.1.3. Patiesuma vērtības

#### Definīcija

Patiesuma vērtības ir tādas vērtības, kuras ir vai nu patiesas vai nu aplamas.

No augstāk redzamās definīcijas izriet, ka valodai Immutant tiek definēta divvērtīga loģika. Tātad, patiesu vērtību apzīmē ar `true`, bet aplamu ar `false`.



---

## 1.2. Konstruktijas

### 1.2.1. Izteiksmes

Izteiksmes ir konstrukcija, kas atgriež kādu vērtību. Piemēram, funkcijas izsaukums ir izteiksme, kas rezultātā atgriež izpildītas funkcijas vērtību. Pie tam, arī aritmētiska vai loģiska operācija ir izteiksmes konstrukcijas, jo atgriež skaitlisku vai patiesuma vērtību attiecīgi.

### 1.2.2. Apgalvojumi

Apgalvojumi jeb deklarācijas ir izteiksmes, kas veic kādu darbību, bet pašas par sevi nedod nekādu vērtību. Piemēram, mainīgo inicializācija ir apgalvojums, jo tā veic darbību - piešķir vērtību mainīgajam, bet pati par sevi nedod nekādu vērtību.

Funkcijas definīcija ir apgalvojums, jo tā arī veic darbību - reģistrē funkciju atmiņā, bet pati par sevi nedod nekādu vērtību.

## 1.3. Operatori

Operatorus iedala unāros un bināros. Unārs operators tiek pielietots tikai vienam operandam, kur tai pat laikā bināri operatori ir pielietoti 2 operandiem. Piemēram, negācijas operators, kas apvērš patiesuma vērtību ir pielietots vienam operatoram, bet saskaitīšanas operators ir pielietots diviem skaitļiem, producējot to summu.

Vērts precizēt, ka gadījumā, ja operators ir binārs, tad tas tiek rakstīts abiem operandiem starpā. Turpmāk tekstā kreisās operandas tiek definēts kā šāda bināra operatora operands, kas atrodas pa kreisi no operatora, un labais kas attiecīgi ir pa labi no tā. Piemēram, izteiksmē  $23 + 45$  skaitlis 23 ir kreisās operands, 45 ir labais operands, un + ir binārais summas operators.

**Aritmētiskie operatori:** tiek pielietoti skaitļiem, un atgriež skaitlisku vērtību.

- + saskaitīšana, atgriež divu skaitļu summu
- - atņemšana, atgriež pirmā skaitļa vērtību mīnus otrā skaitļa vērtību
- \* reizināšana, atgriež divu skaitļu reizinājumu
- / dalīšana, atgriež kreisā operanda dalījumu ar labo operandu. Ja labais operands ir nulle, tad tiek izmests izņēmums `DivisionByZeroException`

- 
- % modulis, atgriež kreisā skaitļa operanda moduli ar labā operanda vērtību

**Aritmētiskās salīdzināšanas operatori:** tiek pielietoti skaitļiem, un atgriež patiesuma vērtību.

- > lielāks par, atgriež patiesu vērtību, ja kreisā operanda vērtība ir lielāka par labā operanda vērtību
- < mazāks par, atgriež patiesu vērtību, ja kreisā operanda vērtība ir mazāka par labā operanda vērtību
- >= lielāks vai vienāds ar, atgriež patiesu vērtību, ja kreisā operanda vērtība ir lielāka vai vienāda ar labā operanda vērtību
- <= mazāks vai vienāds ar, atgriež patiesu vērtību, ja kreisā operanda vērtība ir mazāka vai vienāda ar labā operanda vērtību

**Ekvivalences operatori:** tiek pielietoti jebkura datu tipa operandiem un atgriež patiesuma vērtību. Šeit ir svarīgi atzīmēt, ka valodai Immutable nav paredzēta jebkāda datu tipa konversija - tieša un netieša, ar ko tas, piemēram, atšķiras no valodas JavaScript [2].

- == ir vienāds, atgriež patiesu vērtību, ja abu operandu vērtības ir vienādas. Proti, atgriež aplamnu vērtību, ja abi operandi ir ar dažādiem datu tiem.
- != nav vienāds ar, atgriež patiesu vērtību, ja abu operandu vērtības nav vienādas, tai skaitā arī ja to datu tipi ir dažādi.

**Loģiskie operatori:** Pielietoti patiesuma vērtībām, un atgriež patiesuma vērtību.

- ! nēgācija, apvērš patiesuma vērtību. Ir unārs operators.
- && konjukcija, atgriež patiesu vērtību, ja abu operandu vērtības ir patiesas
- || disjunkcija, atgriež patiesu vērtību, ja vismaz viena no abu operandu vērtībām ir patiesa.

## 1.4. Mainīgie

Valoda nošķir 2 veidu mainīgos: tie kas nepaļaujas datu mutācijai jeb mainībai un tie, kas tai paļaujas. Mainīgos ir atļauts deklarēt, t.i. registrēt mainīgā identifikatoru atmiņā, un tā inicializāciju izpildīt atsevišķi, bet ne otrādā secībā.

Mainīgos deklarē sekojošā formā:

```
<mutability> <identifier>;
```

---

Mainīgā deklarācija sākas ar vienu no 2 atslēgvārdiem <mutability> - `mutable` un `immutable` -, kas nosaka mainīgā mutācijas īpašību. Ja mainīgais ir deklarēts ar atslēgvārdu `mutable`, tad piešķirot doto mainīgo citam, abi šie mainīgie atsaucas uz vienu un to pašu atmiņas apgabalu, un tādējādi ir savstarpēji saistīti. Tātad, mainīgā vērtības maiņa ietekmē arī otru mainīgo. Šāda veida mainīgos sauc par **mutants** (no angļu valodas tulkojot - "mutanti"). Turpretim, ja mainīgais ir deklarēts ar atslēgvārdu `immutable`, tad piešķirot doto mainīgo citam, abi šie mainīgie atsaucas uz diviem dažādiem atmiņas apgabaliem. Citādi sakot, mainīgā vērtības kopija plūst caur programmu, nevis atsauc uz to. Šāda veida mainīgos sauc par **immutants** (vārdu spēlē angļu valodā, kombinējot datu īpašību `immutability` un lietvārdu `mutants`).

Mainīgo deklarāciju nobeidz patvaļīgs identifikators <identifier> jeb mainīgā nosaukums. Identifikators var saturēt burtus, ciparus un pasvītrojuma simbolu (`_`), bet nedrīkst sākties ar ciparu. Tāpat, identifikators nedrīkst sakrist ar kādu no valodas atslēgvārdiem, piemēram, `mutable`, `immutable`, `if`, `else` u.c. (pilnu atslēgvārdu sarakstu skatīt sadaļā ??).

Mainīgā inicializācijai ir jāseko vienai no sekojošām formām:

```
<identifier> = <expression>;
```

```
<mutability> <identifier> = <expression>;
```

Pirmo gadījumu lieto, ja mainīgā deklarācija ir veikta iepriekš, bet otro, ja mainīgā deklarācija un inicializācija notiek vienlaicīgi.

Lai inicializētu mainīgo, t.i. piešķirtu tam vērtību, ir jāizmanto piešķiršanas operatora simbols (`=`), kam seko izteiksme <expression>, kas rezultātā atgriež vērtību, ko piešķir mainīgajam.

## 1.5. Funkcijas

Funkcijas ir pilnībā vai daļēji izoltēts program-kods, kas var tikt izsaukts un izmantots ar dažādiem parametriem, dažādās vietās un dažādos laika brīžos. Funkcijas pašas par sevi ir daļa no programkoda, tomēr, lai tās varētu tikt izpildītas, ir nepieciešams tās izsaukt.

Funkcijas definē sekojošā formā:

```
<purity> fn <identifier>(<parameters>) {  
    <statements>  
}
```

<purity> apzīmē funkcijas īpašību mainīt datus ārpus tās lokālā konteksta. Matemātikā `impure` jeb tiešā tulkojumā no angļu valodas `netirsāp` zīmē funkcijas, kas maina ārējos stāvokļus vai ir atkarīgas no tiem. Savukārt `pure` jeb `tīras` funkcijas ir tādas, kas neietekmē ārējos stāvokļus un ir atkarīgas tikai no to parametriem. Tīru funkciju izmantošana programkodā ir ieteicama, jo tā padara programmu prognozējamāku un vieglāk saprotamu, jo zināms ka tīras

---

funkcijas var izsaukt tikai citas tīras funkcijas vai izteiksmes, kas nozīmē, ka tās nevienā brīdī neizmaino ārējo stāvokli. Tātad, **pure** atslēgvārds tiek lietots, lai definētu tīru funkciju, bet **impure** - netīru. Ja funkcija ir definēta kā tīra, tad tās ķermenī nav atļauts izsaukt netīras funkcijas vai veikt citas darbības, kas maina ārējo stāvokli. No otras puses, šī atslēgvārda lietošana nav obligāta, jo valodā **Immutable** pēc noklusējuma visas funkcijas tiek uzskatītas par tīrām.

```
fn <identifier>(<parameters>) {  
    <statements>  
}
```

Augstāk redzamajā piemērā funkcija tiek definēta kā tīra, jo nav lietots neviens no tīrības īpašības atslēgvārdiem. Atslēgvārds **fn** apzīmē, ka pēc tā seko funkcijas definīcija. **<identifier>** satur funkcijas nosaukumu, kas ir unikāls identifikators atmiņā. Uz funkcijas nosaukumu attiecas tie paši noteikumi, kas minēti sadaļā 1.4. par mainīgo identifikatoriem.

Pēc funkcijas nosaukuma seko apaļās iekavas, kas satur parametru sarakstu **<parameters>**. Parametri ir iekšējā funkcijas konteksta mainīgie, kas tiek nodoti funkcijai tās izsaukšanas brīdī, un kuru vērtības funkcija izmanto savā darbībā. Parametru saraksts ir komatu atdalītu parametru virkne. Ja funkcijai nav parametru, tad iekavas ir tukšas.

Funkcijas ķermenis **<statements>** ir ietverts figūriekavās, un satur apgalvojumus un izteiksmes, kas tiek izpildītas, kad funkcija tiek izsaukta. Funkcijas ķermenī ir jābūt vismaz vienam apgalvojumam vai izteiksmei. Ja funkcija ir tīra, tad tās ķermenī nav atļauts izsaukt netīras funkcijas vai veikt citas darbības, kas maina ārējo stāvokli.

Piemērs tīrai funkcijai, kas aprēķina divu skaitļu summu:

```
pure fn add(a, b) {  
    return a + b;  
}
```

Piemērs netīrai funkcijai, kas pieskaita jaunu skaitli globālam mainīgajam:

```
mutant num = 4;  
impure fn addGlobal(newNum) {  
    num += newNum;  
}
```

Funkcijas izsaukums ir izteiksme, kas satur funkcijas nosaukumu, kam seko apaļās iekavas ar argumentu sarakstu. Argumenti ir vērtības, kas tiek nodotas funkcijai tās izsaukšanas brīdī, un kuru vērtības funkcija izmanto savā darbībā. Argumentu saraksts ir komatu atdalītu argumentu virkne. Ja funkcijai nav argumentu, tad iekavas ir tukšas. Argumentus padod funkcijai secīgi, tādā pašā secībā kā tie ir definēti funkcijas parametru sarakstā.

Piemērs funkcijas izsaukumiem:

```
addGlobal(5);  
immutable sum = add(3, 7);
```

---

## 1.6. Kontroles plūsma

Kontroles plūsma ir mehānisms, kas nosaka programmas izpildes secību. Valodā Immutant ir definēti sekojoši kontroles plūsmas mehānismi: `if-else` zarošanās un cikls `while`.

### 1.6.1. Apgalvojums `if-else`

Apgalvojums `if-else` ļauj izpildīt dažādas koda daļas atkarībā no nosacījuma izpildes. Sintakse ir sekojoša:

```
if (<condition>) {  
    <statements>  
} else {  
    <statements>  
}
```

<condition> ir loģiska izteiksme, kas rezultātā atgriež patiesuma vērtību. Ja izteiksmes vērtība ir patiesa, tad tiek izpildīti apgalvojumi <statements> iekš pirmās figūriekavas. Ja izteiksmes vērtība ir aplama, tad tiek izpildīti apgalvojumi <statements> iekš otrās figūriekavas pēc atslēgvārda `else`.

Ja ir nepieciešams izpildīt vairākus nosacījumus, tad var izmantot vairākas `else if` zarošanās. Sintakse ir sekojoša:

```
if (<condition1>) {  
    <statements1>  
} else if (<condition2>) {  
    <statements2>  
} else {  
    <statements3>  
}
```

Pie tam, apgalvojums `else` nav obligāts, un to var izlaist, ja nav nepieciešams izpildīt kodu gadījumā, ja neviens no nosacījumiem nav izpildīts.

### 1.6.2. Cikli

Cikls `while` ļauj izpildīt koda daļu atkārtoti, kamēr nosacījums ir izpildīts. Sintakse ir sekojoša:

---

```
while (<condition>) {  
    <statements>  
}
```

<condition> ir loģiska izteiksme, kas rezultātā atgriež patiesuma vērtību. Ja izteiksmes vērtība ir patiesa, tad tiek izpildīti apgalvojumi <statements> iekš figūriekavām. Pēc apgalvojumu izpildes, nosacījums tiek pārbaudīts vēlreiz, un ja tas joprojām ir patiess, tad apgalvojumi tiek izpildīti vēlreiz. Šis process turpinās, kamēr nosacījums kļūst aplams. Ja nosacījums sākotnēji ir aplams, tad cikla ķermenis netiek izpildīts ne reizi.

## **1.7. Kļūdu veidi un apzīmējumi**

## **2. INTERPRETATORA ARHITEKTŪRA**

Šeit būs info par lekseri, parsētāju un tree walker.

## BIBLIOGRĀFIJA

- [1] Michael Coblenz, Joshua Sunshine, Jonathan Aldrich, Brad Myers, Sam Weber, and Forrest Shull. Exploring language support for immutability. In *Proceedings of the 38th International Conference on Software Engineering (ICSE)*, pages 736–747. IEEE/ACM, 2016.
- [2] ECMA International. EcmaScript® language specification (ecma-262 15th edition), 2024.