FAKULTA
APLIKOVANÝCH VĚD
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI

KIV/FJP — Semestrální práce

Překladač Rustu pro LLVM

Datum:
8. ledna 2017

Název týmu:
Falsum ⊥

Autoři:
Jiří Láska
Václav Löffelmann
Martin Váňa

Emaily:
goheeca@students.zcu.cz
loffelmv@students.zcu.cz
vanam@students.zcu.cz

Obsah

1 Zadání

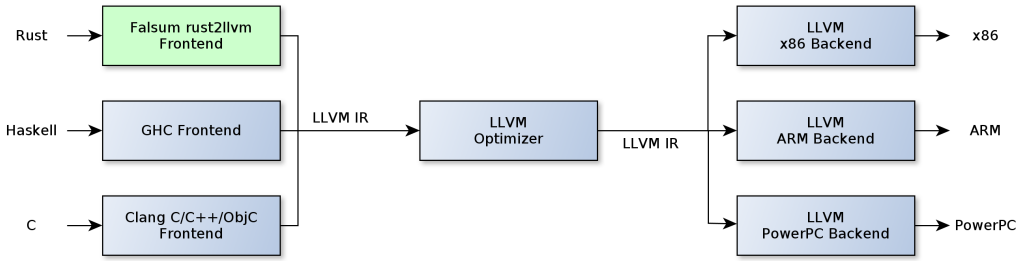
Cílem práce bude vytvoření překladače zvoleného jazyka. Je možné inspirovat se jazykem PL/0, vybrat si podmnožinu nějakého existujícího jazyka nebo si navrhnout jazyk zcela vlastní. Dále je také potřeba zvolit si pro jakou architekturu bude jazyk překládán (doporučeny jsou instrukce PL/0, ale je možné zvolit jakoukoliv instrukční sadu pro kterou budete mít interpret).

Jazyk musí mít minimálně následující konstrukce:

- definice celočíselných proměnných
- definice celočíselných konstant
- přiřazení
- základní aritmetiku a logiku (+, -, *, /, AND, OR, negace a závorky)
- cyklus (libovolný)
- jednoduchou podmínku (`if` bez `else`)
- definice podprogramu (procedura, funkce, metoda) a jeho volání

Překladač který bude umět tyto základní věci bude hodnocen deseti body. Další body je možné získat na základě rozšíření, každé je za 2 body:

- další typ cyklu (`for`, `do .. while`, `while .. do`, `repeat .. unitl`)
- `else` větev
- příkaz `goto` (pozor na vzdálené skoky)
- datový typ `boolean` a logické operace s ním
- datový typ `real` (s celočíselnými instrukcemi)
- datový typ `ratio` (s celočíselnými instrukcemi)
- složený datový typ (`Record`)
- pole
- příkazy pro vstup a výstup (`read`, `write` - potřebuje vhodné instrukce které bude možné využít)



Obrázek 1: Schéma překladače

- rozvětvená podmínka (`switch`, `case`)
- násobné přiřazení (`a = b = c = d = 3;`)
- podmíněné přiřazení / ternární operátor (`min = (a < b) ? a : b;`)
- paralelní přiřazení (`{a, b, c, d} = {1, 2, 3, 4};`)
- parametry předávané odkazem
- parametry předávané hodnotou
- návratová hodnota podprogramu
- ...

2 Analýza

Jako zadání semestrální práce jsme si zvolili implementaci překladače podmnožiny jazyka Rust[1] do mezikódu LLVM[2].

Rust je moderní programovací jazyk, jenž si bere za cíl být srovnatelně rychlý jako C či C++ a zároveň bezpečný (ve smyslu zamezení programátorovi ve vytvoření chyb typických pro C/C++, typicky při správě paměti).

LLVM je projekt, který obsahuje mnoho nástrojů usnadňující tvorbu překladačů. LLVM IR (*Intermediate Representation*) je univerzální mezijazyk, který kompilátor LLVM přeloží do spustitelné binárky pro danou platformu.

Cílem práce je tedy tvorba vlastního frontendu viz obrázek 1 pro LLVM (kaskádní překladač). Z edukativních účelů jsme programovali v jazyce Haskell.

[1] `https://www.rust-lang.org/`
[2] `http://llvm.org/`

Pozn.: Oficiální překladač Rustu je implementován přesně tímto způsobem, ale frontend je napsaný v jazyce C.

3 Gramatika jazyka

⟨*Program*⟩ ::= ⟨*TopLevel*⟩ { ⟨*TopLevel*⟩ }

⟨*TopLevel*⟩ ::= ⟨*FnLet*⟩ | ⟨*ConstLet*⟩ | ⟨*IVarLet*⟩
| ⟨*FVarLet*⟩ | ⟨*BinVarLet*⟩

⟨*FnLet*⟩ ::= '`fn`' ⟨*SymbolName*⟩ '`(`' [⟨*Arg*⟩ { '`,`' ⟨*Arg*⟩ }] '`)`'
['`->`' ⟨*Type*⟩] ⟨*Block*⟩

⟨*Arg*⟩ ::= ⟨*SymbolName*⟩ '`:`' ⟨*Type*⟩

⟨*Block*⟩ ::= '`{`' { ⟨*Stmt*⟩ } '`}`'

⟨*Stmt*⟩ ::= ⟨*ConstLet*⟩ | ⟨*IVarLet*⟩ | ⟨*FVarLet*⟩ | ⟨*BinVarLet*⟩
| ⟨*Loop*⟩ | ⟨*While*⟩ | ⟨*Return*⟩
| ⟨*IIf*⟩ | ⟨*If*⟩ | ⟨*Expr*⟩ '`;`'

⟨*IIf*⟩ ::= '`if`' ⟨*BExpr*⟩ ⟨*IIfBlock*⟩ ⟨*IElse*⟩

⟨*IIfBlock*⟩ ::= '`{`' { ⟨*Stmt*⟩ } , ⟨*IExpr*⟩ | ⟨*IIf*⟩ '`}`'

⟨*If*⟩ ::= '`if`' ⟨*BExpr*⟩ ⟨*Block*⟩ [⟨*Else*⟩]

⟨*Expr*⟩ ::= ⟨*BExpr*⟩ | ⟨*IExpr*⟩ | ⟨*FExpr*⟩

⟨*Loop*⟩ ::= '`loop`' ⟨*Block*⟩

⟨*While*⟩ ::= '`while`' ⟨*BExpr*⟩ ⟨*Block*⟩

⟨*Return*⟩ ::= ‘`return`’ , ‘`;`’ | ⟨*IExpr*⟩ ‘`;`’ | ⟨*FExpr*⟩ ‘`;`’ | ⟨*BExpr*⟩ ‘`;`’

⟨*Call*⟩ ::= ⟨*SymbolName*⟩ ‘`(`’ [⟨*Expr*⟩ { ‘`,`’ ⟨*Expr*⟩ }] ‘`)`’ ‘`;`’

⟨*Else*⟩ ::= ‘`else`’ , ⟨*If*⟩ | ⟨*Block*⟩

⟨*IElse*⟩ ::= ‘`else`’ , ⟨*IIf*⟩ | ⟨*IIfBlock*⟩

⟨*ConstLet*⟩ ::= ‘`const`’ ⟨*SymbolName*⟩ ‘`:`’ ⟨*Type*⟩ ‘`=`’ ⟨*Literal*⟩ ‘`;`’

⟨*SymbolName*⟩ ::= `isAnySymbol`

⟨*Type*⟩ ::= ‘`i32`’ | ‘`f32`’ | ‘`bool`’

⟨*Literal*⟩ ::= `intLiteral` | `floatLiteral` | ⟨*BoolLiteral*⟩

⟨*IVarLet*⟩ ::= ⟨*VarSymbolName*⟩ ‘`:`’ ‘`i32`’ ‘`=`’ , ⟨*IExpr_IIf*⟩ | ⟨*IExpr*⟩ ‘`;`’

⟨*FVarLet*⟩ ::= ⟨*VarSymbolName*⟩ ‘`:`’ ‘`f32`’ ‘`=`’ ⟨*FExpr*⟩ ‘`;`’

⟨*BinVarLet*⟩ ::= ⟨*VarSymbolName*⟩ [‘`:`’ ‘`bool`’] ‘`=`’ ⟨*BExpr*⟩ ‘`;`’

⟨*VarSymbolName*⟩ ::= ‘`let`’ | ‘`static`’ , ⟨*SymbolName*⟩ [‘`mut`’]

⟨*IExpr*⟩ ::= ⟨*ITerm*⟩
| `OPERATOR_MAGIC(<ITerm>)` `<-` ‘`-`’ `<-` ‘`*`’,‘`/`’,‘`%`’ `<-` ‘`+`’,‘`-`’ `<-` ‘`&`’ `<-` ‘`^`’ `<-` ‘`|`’

⟨*ITerm*⟩ ::= ‘`(`’ ⟨*IExpr*⟩ ‘`)`’ | ⟨*Term*⟩ | ⟨*IAssign*⟩ | ⟨*SymbolName*⟩ | ⟨*IIf*⟩ | `intLiteral`

⟨*FExpr*⟩ ::= ⟨*FTerm*⟩
| `OPERATOR_MAGIC(<FTerm>) <- ‘-’ <-‘*’,‘/’ <- ‘+’,‘-’`

⟨*FTerm*⟩ ::= ‘`(`’ ⟨*FExpr*⟩ ‘`)`’ | ⟨*Term*⟩ | ⟨*FAssign*⟩ | ⟨*SymbolName*⟩
| `floatLiteral`

⟨*BExpr*⟩ ::= ⟨*BTerm*⟩
| `OPERATOR_MAGIC(<BTerm>) <- ‘!’ <- ‘&’ <- ‘^’`
`<- ‘|’ <- ‘==’,‘/=’ <- ‘&&’ <- ‘||’`

⟨*BTerm*⟩ ::= ‘`(`’ ⟨*BExpr*⟩ ‘`)`’ | ⟨*Term*⟩ | ⟨*Relation*⟩ | ⟨*BAssign*⟩
| ⟨*SymbolName*⟩ | ⟨*BoolLiteral*⟩

⟨*Term*⟩ ::= ⟨*Call*⟩ | ⟨*SymbolName*⟩

⟨*BoolLiteral*⟩ ::= ‘`true`’ | ‘`false`’

⟨*IAssign*⟩ ::= ⟨*SymbolName*⟩ ‘`=`’ ⟨*IExpr*⟩

⟨*FAssign*⟩ ::= ⟨*SymbolName*⟩ ‘`=`’ ⟨*FExpr*⟩

⟨*BAssign*⟩ ::= ⟨*SymbolName*⟩ ‘`=`’ ⟨*BExpr*⟩

⟨*Relation*⟩ ::= ⟨*IExpr*⟩ ⟨*RelationOperator*⟩ ⟨*IExpr*⟩
| ⟨*FExpr*⟩ ⟨*RelationOperator*⟩ ⟨*FExpr*⟩

⟨*RelationOperator*⟩ ::= ‘`==`’ | ‘`!=`’ | ‘`<`’ | ‘`>`’ | ‘`<=`’ | ‘`>=`’

4 Podporované jazykové konstrukce

4.1 Základní

Lokální proměnné

Proměnné musejí mít přiřazenou hodnotu při deklaraci.

```
let a: i32 = 1;
```

Globální proměnné

```
static M: i32 = 10;
```

Globální konstanty

```
const ANSWER: i32 = 42;
```

Přiřazení

```
a = 5;
```

Základní aritmetika

```
a = b + c;
a = b - c;
a = b * c;
a = b / c;
a = b & c;
a = b | c;
a = !b;
a = (a + b) * c;
```

Nekonečný cyklus

```
loop {...}
```

Jednoduchá podmínka

```
if a == 1 {...}
```

Definice funkce

```
fn foo() {...}
```

4.2 Rozšíření

Cyklus while

```
while a > b {...}
```

else větev

```
if a == 1 {...} else {...}
```

Vícenásobná podmínka

```
if a == 1 {...} else if a == 2 {...} else {...}
```

Datový typ boolean a operace s ním

Podporujeme typovou inferenci u deklarace booleanu.

```
let x: bool = true;
let y = false;

a = b & c;
a = b | c;
a = b ^ c;
a = !b;
```

Datový typ real

```
let x: f32 = 3.2;
```

printf

Příjímá variabilní počet argumentů.

```
printf("a = %d\n", a);
printf("%d %d %d\n", a, b, c);
```

Násobné přiřazení

```
a = b = c = d = 3
```

Podmíněné přiřazení

S podmínkou umíme také pracovat jako s číselným výrazem (pokud je podmínka úplná). Může tedy sloužit například k podmíněnému přiřazení a nebo třeba jako implicitní návratová hodnota z funkce. Od obyčejného ifu se tento výraz liší tím, že poslední výraz v obou větvích musí být číselný a nekončící středníkem.

```
a = if a == 1 { b } else { c };
```

Parametry předávané hodnotou

```
fn foo(a: i32, b: bool) {...}

foo(1, true);
```

Definice funkce s návratovou hodnotou

```
fn bar() -> i32 {
    ...
    foo();
    ...
    retun 0;
}
```

Return na konci funkce je nepovinný. Pokud má funkce vracet hodnotu, může být na konci příkaz return a nebo funkce musí končit výrazem správného typu. Následující konstrukce je tedy validní.

```
fn getAnswer() -> f32 {
    42.0;
}
```

Komentáře

```
/*
 Víceřádkový komentář
*/

// jednořádkový
```

4.3 Odlišnosti od Rustu

Deklarace proměných

```
let a = 7;          // nepodporujeme
let a = 7i32;       // nepodporujeme
let a: i32 = 7;     // podporujeme
let b = true;       // podporujeme
let big = 1000_000; // podporujeme
```

Mutabilita proměných

Všechny naše proměnné jsou *mutable*.

Typové konverze

Neimplementovali jsme typové konverze.

Výpis

```
printf("a = %d\n", a);

// místo

println!("a = {}", a);
```

5 Implementace

Vlastní překlad je rozdělen do tří částí – lexeru, parseru a generátoru kódu. Vstupem je zdrojový kód v Rustu a výstupem je mezijazyk LLVM IR, který následně přeložíme pomocí Clangu do spustitelné binárky pro danou platformu.

5.1 Lexer

Úkolem lexikální analýzy je převést zdrojový kód ve formě řetězce na programové symboly. K tomu jsme použili knihovnu Parsec. Lexer je poměrně obsáhlý, protože zvládá přečíst všechny lexémy v jazyce Rust i takové, které nakonec nebyly využity. Na lexikální analýzu nestačí ani konečný automat, poněvadž Rust umožňuje zadávat řetězcové literály, které jsou uvozené speciální sekvencí libovolné délky a uvnitř pak nejsou aktivní escape sekvence.

5.2 Parser

Parser zpracovává programové symboly a sestavuje abstraktní syntaktický strom, který předá generátoru kódu. Používá také knihovnu Parsec a vnitřně používá rekurzivní sestup. Abstraktní syntaktický strom ještě projde transformací před samotným generováním kódu. Je to příprava řetězcových konstant pro formátovací řetězce při volání funkce *printf, nová funkce* main s jinou signaturou atd.

5.3 Generátor kódu

Generátor kódu vezme abstraktní syntaktický strom a vygeneruje podle něj LLVM IR pomocí knihoven `general-llvm` a `general-llvm-pure`.

6 Uživatelská příručka

6.1 Prerekvizity

Pro přeložení a použití našeho překladače je třeba mít nainstalovano:

- Haskell - `sudo apt-get install haskell-platform`
- The Haskell Tool Stack - `sudo apt-get install stack`
- Clang - `sudo apt-get install clang`
- LLVM - `sudo apt-get install llvm-3.8 libedit-dev`

Následně nástroj stack inicializujeme příkazem - `stack setup`

6.2 Překlad a použití

Aplikaci přeložíte příkazem:

```
stack build
```

Zdrojový soubor pak přeložíte pomocí přiloženého skriptu:

```
./falsum <filename>
```

7 Demonstrace překladače

V této sekci se nachází několik demonstrací našeho překladače. Vždy je uveden zdrojový text v Rustu a výsledný LLVM mezikód. Více demonstrací můžete nalézt v přiloženém adresáři `/examples/`.

7.1 Hello world

7.1.1 Zdrojový text

```
fn main() {
    printf("Hello world!\n");
}
```

7.1.2 Mezikód

```
; ModuleID = '00_hello_world.rs'

@.format.0 = private global [14 x i8] c"Hello world!\0A\00", align 1

; Function Attrs: nounwind uwtable
define void @.main() #0 {
_1:
  br label %_2

_2:                                               ; preds = %_1
  %0 = call i32 (i8*, ...) @printf(
    i8* getelementptr inbounds ([14 x i8],
    [14 x i8]* @.format.0, i32 0, i32 0))
  br label %_3

_3:                                               ; preds = %_2
  ret void
}

declare i32 @printf(i8*, ...)

; Function Attrs: nounwind uwtable
define i32 @main() #0 {
_1:
  br label %_2

_2:                                               ; preds = %_1
  call void @.main()
  br label %_3

_3:                                               ; preds = %_2
  br label %_4

_4:                                               ; preds = %_3
  ret i32 0
}

attributes #0 = { nounwind uwtable }
```

7.2 Základní jazykové konstrukce

7.2.1 Zdrojový text

```
// global variable
static START: i32 = 10;

// constant
const DECREMENT: i32 = 1;

fn main() {
    // variables are mutable, mut keyword is optional
    let mut c: i32 = START;
    let d: i32 = 2;                 // unused variable

    loop {
        printf("%d\n", c);

        c = c - DECREMENT;

        if c == 0 {
            return;
        }
    }
    // unreachable
}
```

7.2.2 Mezikód

```
; ModuleID = '{handle: 01_basic.rs}'

@START = internal global i32 10, align 4
@DECREMENT = internal global i32 1, align 4
@.format.0 = private global [4 x i8] c"%d\0A\00", align 1

; Function Attrs: nounwind uwtable
define void @.main() #0 {
_1:
  br label %_2

_2:                                               ; preds = %_1
  %c = alloca i32, align 4
```

```
  br label %_3

_3:                                               ; preds = %_2
  %0 = load i32, i32* @START, align 4
  br label %_4

_4:                                               ; preds = %_3
  store i32 %0, i32* %c, align 4
  br label %_5

_5:                                               ; preds = %_4
  %1 = load i32, i32* %c, align 4
  br label %_6

_6:                                               ; preds = %_5
  %d = alloca i32, align 4
  br label %_7

_7:                                               ; preds = %_6
  br label %_8

_8:                                               ; preds = %_7
  store i32 2, i32* %d, align 4
  br label %_9

_9:                                               ; preds = %_8
  %2 = load i32, i32* %d, align 4
  br label %_10

_10:                                              ; preds = %_9
  br label %_10_loop_1

_10_loop_1:                                       ; preds = %_10_loop_12, %_10
  %3 = load i32, i32* %c, align 4
  br label %_10_loop_2

_10_loop_2:                                       ; preds = %_10_loop_1
  %4 = call i32 (i8*, ...) @printf(
    i8* getelementptr inbounds ([4 x i8], [4 x i8]* @.format.0,
    i32 0, i32 0), i32 %3)
  br label %_10_loop_3
```

```
_10_loop_3:                                       ; preds = %_10_loop_2
  %5 = load i32, i32* %c, align 4
  br label %_10_loop_4

_10_loop_4:                                       ; preds = %_10_loop_3
  %6 = load i32, i32* @DECREMENT, align 4
  br label %_10_loop_5

_10_loop_5:                                       ; preds = %_10_loop_4
  %7 = sub i32 %5, %6
  br label %_10_loop_6

_10_loop_6:                                       ; preds = %_10_loop_5
  store i32 %7, i32* %c, align 4
  br label %_10_loop_7

_10_loop_7:                                       ; preds = %_10_loop_6
  %8 = load i32, i32* %c, align 4
  br label %_10_loop_8

_10_loop_8:                                       ; preds = %_10_loop_7
  %9 = load i32, i32* %c, align 4
  br label %_10_loop_9

_10_loop_9:                                       ; preds = %_10_loop_8
  br label %_10_loop_10

_10_loop_10:                                      ; preds = %_10_loop_9
  %10 = icmp eq i32 %9, 0
  br label %_10_loop_11

_10_loop_11:                                      ; preds = %_10_loop_10
  br i1 %10, label %_10_loop_11_then_1, label %_10_loop_12

_10_loop_11_then_1:                               ; preds = %_10_loop_11
  ret void

_10_loop_11_then_2:                               ; No predecessors!
  br label %_10_loop_12
```

```
_10_loop_12:                                      ; preds = %_10_loop_11_then_2,
  br label %_10_loop_1

_11:                                              ; No predecessors!
  ret void
}

declare i32 @printf(i8*, ...)

; Function Attrs: nounwind uwtable
define i32 @main() #0 {
_1:
  br label %_2

_2:                                               ; preds = %_1
  call void @.main()
  br label %_3

_3:                                               ; preds = %_2
  br label %_4

_4:                                               ; preds = %_3
  ret i32 0
}

attributes #0 = { nounwind uwtable }
```

7.3 Faktorizace složeného čísla

7.3.1 Zdrojový text

```
static RANDOM_SEED: i32 = 3;  // random seed = 3, other values possible

const N: i32 = 44448853;       // we assume that n is not a large prime

fn abs_val(a: i32) -> i32 {
    // if as a expression and expression as a implicit return statement
    if a > 0 {
         a
    } else {
        -a
```

```
    }
}

// returns (a * b) % c, and minimize overflow
fn mulmod(a: i32, b: i32, c: i32) -> i32 {
    let mut tmp_b: i32 = b;
    let mut x: i32 = 0;
    let mut y: i32 = a % c;

    while tmp_b > 0 {
        if tmp_b % 2 == 1 {
            x = (x + y) % c;
        }
        y = (y * 2) % c;
        tmp_b = tmp_b / 2;
    }

    return x % c;
}

fn gcd(a: i32, b: i32) -> i32 {
    // support for direct recursion
    return if b == 0 { a } else { gcd(b, a % b) };
}

fn pollard_rho(n: i32) -> i32 {
    let mut i: i32 = 0;
    let mut k: i32 = 2;

    let mut x:i32 = RANDOM_SEED;
    let mut y:i32 = RANDOM_SEED;

    let mut d: i32 = -1;

    loop {
        i = i + 1;
        x = (mulmod(x, x, n) + n - 1) % n;       // generating function

        d = gcd(abs_val(y - x), n);                  // the key insight

        // we don't support fully short-circuit operators || and &&
```

```
        // it just behave like | & respectively
        if (d != 1) & (d != n) {
            return d;
        }

        // found one non-trivial factor
        if i == k {
            y = x;
            k = k * 2;
        }
    }
    // unreachable
    return -1;                                  // set mandatory return
}

fn main() {
    // break n into two non trivial factors
    let mut ans: i32 = pollard_rho(N);
    if ans > N / ans { ans = N / ans; }  // make ans the smaller factor

    printf("%d %d\n", ans, N / ans);            // should be: 6661 6673
}
```

7.3.2 Mezikód

```
; ModuleID = '{handle: 08_complex.rs}'

@RANDOM_SEED = internal global i32 3, align 4
@N = internal global i32 44448853, align 4
@.format.0 = private global [7 x i8] c"%d %d\0A\00", align 1

; Function Attrs: nounwind uwtable
define i32 @abs_val(i32 %a) #0 {
_1:
  %0 = alloca i32, align 4
  store i32 %a, i32* %0, align 4
  br label %_2

_2:                                               ; preds = %_1
  %1 = load i32, i32* %0, align 4
  br label %_3
```

```
_3:                                               ; preds = %_2
  br label %_4

_4:                                               ; preds = %_3
  %2 = icmp sgt i32 %1, 0
  br label %_5

_5:                                               ; preds = %_4
  %.var_5 = alloca i32, align 4
  br label %_6

_6:                                               ; preds = %_5
  br i1 %2, label %_6_then_1, label %_6_else_1

_6_then_1:                                        ; preds = %_6
  %3 = load i32, i32* %0, align 4
  br label %_6_then_2

_6_then_2:                                        ; preds = %_6_then_1
  store i32 %3, i32* %.var_5, align 4
  br label %_6_then_3

_6_then_3:                                        ; preds = %_6_then_2
  br label %_7

_6_else_1:                                        ; preds = %_6
  %4 = load i32, i32* %0, align 4
  br label %_6_else_2

_6_else_2:                                        ; preds = %_6_else_1
  %5 = sub i32 0, %4
  br label %_6_else_3

_6_else_3:                                        ; preds = %_6_else_2
  store i32 %5, i32* %.var_5, align 4
  br label %_6_else_4

_6_else_4:                                        ; preds = %_6_else_3
  br label %_7
```

```
_7:                                               ; preds = %_6_else_4, %_6_then
  %6 = load i32, i32* %.var_5, align 4
  br label %_8

_8:                                               ; preds = %_7
  ret i32 %6
}

; Function Attrs: nounwind uwtable
define i32 @mulmod(i32 %a, i32 %b, i32 %c) #0 {
_1:
  %0 = alloca i32, align 4
  store i32 %a, i32* %0, align 4
  %1 = alloca i32, align 4
  store i32 %b, i32* %1, align 4
  %2 = alloca i32, align 4
  store i32 %c, i32* %2, align 4
  br label %_2

_2:                                               ; preds = %_1
  %tmp_b = alloca i32, align 4
  br label %_3

_3:                                               ; preds = %_2
  %3 = load i32, i32* %1, align 4
  br label %_4

_4:                                               ; preds = %_3
  store i32 %3, i32* %tmp_b, align 4
  br label %_5

_5:                                               ; preds = %_4
  %4 = load i32, i32* %tmp_b, align 4
  br label %_6

_6:                                               ; preds = %_5
  %x = alloca i32, align 4
  br label %_7

_7:                                               ; preds = %_6
  br label %_8
```

```
_8:                                               ; preds = %_7
  store i32 0, i32* %x, align 4
  br label %_9

_9:                                               ; preds = %_8
  %5 = load i32, i32* %x, align 4
  br label %_10

_10:                                              ; preds = %_9
  %y = alloca i32, align 4
  br label %_11

_11:                                              ; preds = %_10
  %6 = load i32, i32* %0, align 4
  br label %_12

_12:                                              ; preds = %_11
  %7 = load i32, i32* %2, align 4
  br label %_13

_13:                                              ; preds = %_12
  %8 = srem i32 %6, %7
  br label %_14

_14:                                              ; preds = %_13
  store i32 %8, i32* %y, align 4
  br label %_15

_15:                                              ; preds = %_14
  %9 = load i32, i32* %y, align 4
  br label %_16

_16:                                              ; preds = %_15
  br label %_16_while_1

_16_while_1:                                      ; preds = %_16_while_4_whileBo
  %10 = load i32, i32* %tmp_b, align 4
  br label %_16_while_2

_16_while_2:                                      ; preds = %_16_while_1
```

```
  br label %_16_while_3

_16_while_3:                                      ; preds = %_16_while_2
  %11 = icmp sgt i32 %10, 0
  br label %_16_while_4

_16_while_4:                                      ; preds = %_16_while_3
  br i1 %11, label %_16_while_4_whileBody_1, label %_17

_16_while_4_whileBody_1:                          ; preds = %_16_while_4
  %12 = load i32, i32* %tmp_b, align 4
  br label %_16_while_4_whileBody_2

_16_while_4_whileBody_2:                          ; preds = %_16_while_4_whileBo
  br label %_16_while_4_whileBody_3

_16_while_4_whileBody_3:                          ; preds = %_16_while_4_whileBo
  %13 = srem i32 %12, 2
  br label %_16_while_4_whileBody_4

_16_while_4_whileBody_4:                          ; preds = %_16_while_4_whileBo
  br label %_16_while_4_whileBody_5

_16_while_4_whileBody_5:                          ; preds = %_16_while_4_whileBo
  %14 = icmp eq i32 %13, 1
  br label %_16_while_4_whileBody_6

_16_while_4_whileBody_6:                          ; preds = %_16_while_4_whileBo
  br i1 %14, label %_16_while_4_whileBody_6_then_1, label %_16_while_4_whileBody

_16_while_4_whileBody_6_then_1:                   ; preds = %_16_while_4_whileBo
  %15 = load i32, i32* %x, align 4
  br label %_16_while_4_whileBody_6_then_2

_16_while_4_whileBody_6_then_2:                   ; preds = %_16_while_4_whileBo
  %16 = load i32, i32* %y, align 4
  br label %_16_while_4_whileBody_6_then_3

_16_while_4_whileBody_6_then_3:                   ; preds = %_16_while_4_whileBo
  %17 = add i32 %15, %16
  br label %_16_while_4_whileBody_6_then_4
```

```
_16_while_4_whileBody_6_then_4:                   ; preds = %_16_while_4_whileBo
  %18 = load i32, i32* %2, align 4
  br label %_16_while_4_whileBody_6_then_5

_16_while_4_whileBody_6_then_5:                   ; preds = %_16_while_4_whileBo
  %19 = srem i32 %17, %18
  br label %_16_while_4_whileBody_6_then_6

_16_while_4_whileBody_6_then_6:                   ; preds = %_16_while_4_whileBo
  store i32 %19, i32* %x, align 4
  br label %_16_while_4_whileBody_6_then_7

_16_while_4_whileBody_6_then_7:                   ; preds = %_16_while_4_whileBo
  %20 = load i32, i32* %x, align 4
  br label %_16_while_4_whileBody_6_then_8

_16_while_4_whileBody_6_then_8:                   ; preds = %_16_while_4_whileBo
  br label %_16_while_4_whileBody_7

_16_while_4_whileBody_7:                          ; preds = %_16_while_4_whileBo
  %21 = load i32, i32* %y, align 4
  br label %_16_while_4_whileBody_8

_16_while_4_whileBody_8:                          ; preds = %_16_while_4_whileBo
  br label %_16_while_4_whileBody_9

_16_while_4_whileBody_9:                          ; preds = %_16_while_4_whileBo
  %22 = mul i32 %21, 2
  br label %_16_while_4_whileBody_10

_16_while_4_whileBody_10:                         ; preds = %_16_while_4_whileBo
  %23 = load i32, i32* %2, align 4
  br label %_16_while_4_whileBody_11

_16_while_4_whileBody_11:                         ; preds = %_16_while_4_whileBo
  %24 = srem i32 %22, %23
  br label %_16_while_4_whileBody_12

_16_while_4_whileBody_12:                         ; preds = %_16_while_4_whileBo
  store i32 %24, i32* %y, align 4
```

```
  br label %_16_while_4_whileBody_13

_16_while_4_whileBody_13:                         ; preds = %_16_while_4_whileBo
  %25 = load i32, i32* %y, align 4
  br label %_16_while_4_whileBody_14

_16_while_4_whileBody_14:                         ; preds = %_16_while_4_whileBo
  %26 = load i32, i32* %tmp_b, align 4
  br label %_16_while_4_whileBody_15

_16_while_4_whileBody_15:                         ; preds = %_16_while_4_whileBo
  br label %_16_while_4_whileBody_16

_16_while_4_whileBody_16:                         ; preds = %_16_while_4_whileBo
  %27 = sdiv exact i32 %26, 2
  br label %_16_while_4_whileBody_17

_16_while_4_whileBody_17:                         ; preds = %_16_while_4_whileBo
  store i32 %27, i32* %tmp_b, align 4
  br label %_16_while_4_whileBody_18

_16_while_4_whileBody_18:                         ; preds = %_16_while_4_whileBo
  %28 = load i32, i32* %tmp_b, align 4
  br label %_16_while_4_whileBody_19

_16_while_4_whileBody_19:                         ; preds = %_16_while_4_whileBo
  br label %_16_while_1

_17:                                              ; preds = %_16_while_4
  %29 = load i32, i32* %x, align 4
  br label %_18

_18:                                              ; preds = %_17
  %30 = load i32, i32* %2, align 4
  br label %_19

_19:                                              ; preds = %_18
  %31 = srem i32 %29, %30
  br label %_20

_20:                                              ; preds = %_19
```

```
  ret i32 %31
}

; Function Attrs: nounwind uwtable
define i32 @gcd(i32 %a, i32 %b) #0 {
_1:
  %0 = alloca i32, align 4
  store i32 %a, i32* %0, align 4
  %1 = alloca i32, align 4
  store i32 %b, i32* %1, align 4
  br label %_2

_2:                                               ; preds = %_1
  %2 = load i32, i32* %1, align 4
  br label %_3

_3:                                               ; preds = %_2
  br label %_4

_4:                                               ; preds = %_3
  %3 = icmp eq i32 %2, 0
  br label %_5

_5:                                               ; preds = %_4
  %.var_5 = alloca i32, align 4
  br label %_6

_6:                                               ; preds = %_5
  br i1 %3, label %_6_then_1, label %_6_else_1

_6_then_1:                                        ; preds = %_6
  %4 = load i32, i32* %0, align 4
  br label %_6_then_2

_6_then_2:                                        ; preds = %_6_then_1
  store i32 %4, i32* %.var_5, align 4
  br label %_6_then_3

_6_then_3:                                        ; preds = %_6_then_2
  br label %_7
```

```
_6_else_1:                                        ; preds = %_6
  %5 = load i32, i32* %1, align 4
  br label %_6_else_2

_6_else_2:                                        ; preds = %_6_else_1
  %6 = load i32, i32* %0, align 4
  br label %_6_else_3

_6_else_3:                                        ; preds = %_6_else_2
  %7 = load i32, i32* %1, align 4
  br label %_6_else_4

_6_else_4:                                        ; preds = %_6_else_3
  %8 = srem i32 %6, %7
  br label %_6_else_5

_6_else_5:                                        ; preds = %_6_else_4
  %9 = call i32 @gcd(i32 %5, i32 %8)
  br label %_6_else_6

_6_else_6:                                        ; preds = %_6_else_5
  store i32 %9, i32* %.var_5, align 4
  br label %_6_else_7

_6_else_7:                                        ; preds = %_6_else_6
  br label %_7

_7:                                               ; preds = %_6_else_7, %_6_then
  %10 = load i32, i32* %.var_5, align 4
  br label %_8

_8:                                               ; preds = %_7
  ret i32 %10
}

; Function Attrs: nounwind uwtable
define i32 @pollard_rho(i32 %n) #0 {
_1:
  %0 = alloca i32, align 4
  store i32 %n, i32* %0, align 4
  br label %_2
```

```
_2:                                               ; preds = %_1
  %i = alloca i32, align 4
  br label %_3

_3:                                               ; preds = %_2
  br label %_4

_4:                                               ; preds = %_3
  store i32 0, i32* %i, align 4
  br label %_5

_5:                                               ; preds = %_4
  %1 = load i32, i32* %i, align 4
  br label %_6

_6:                                               ; preds = %_5
  %k = alloca i32, align 4
  br label %_7

_7:                                               ; preds = %_6
  br label %_8

_8:                                               ; preds = %_7
  store i32 2, i32* %k, align 4
  br label %_9

_9:                                               ; preds = %_8
  %2 = load i32, i32* %k, align 4
  br label %_10

_10:                                              ; preds = %_9
  %x = alloca i32, align 4
  br label %_11

_11:                                              ; preds = %_10
  %3 = load i32, i32* @RANDOM_SEED, align 4
  br label %_12

_12:                                              ; preds = %_11
  store i32 %3, i32* %x, align 4
```

```
  br label %_13

_13:                                              ; preds = %_12
  %4 = load i32, i32* %x, align 4
  br label %_14

_14:                                              ; preds = %_13
  %y = alloca i32, align 4
  br label %_15

_15:                                              ; preds = %_14
  %5 = load i32, i32* @RANDOM_SEED, align 4
  br label %_16

_16:                                              ; preds = %_15
  store i32 %5, i32* %y, align 4
  br label %_17

_17:                                              ; preds = %_16
  %6 = load i32, i32* %y, align 4
  br label %_18

_18:                                              ; preds = %_17
  %d = alloca i32, align 4
  br label %_19

_19:                                              ; preds = %_18
  br label %_20

_20:                                              ; preds = %_19
  br label %_21

_21:                                              ; preds = %_20
  store i32 -1, i32* %d, align 4
  br label %_22

_22:                                              ; preds = %_21
  %7 = load i32, i32* %d, align 4
  br label %_23

_23:                                              ; preds = %_22
```

```
  br label %_23_loop_1

_23_loop_1:                                       ; preds = %_23_loop_38, %_23
  %8 = load i32, i32* %i, align 4
  br label %_23_loop_2

_23_loop_2:                                       ; preds = %_23_loop_1
  br label %_23_loop_3

_23_loop_3:                                       ; preds = %_23_loop_2
  %9 = add i32 %8, 1
  br label %_23_loop_4

_23_loop_4:                                       ; preds = %_23_loop_3
  store i32 %9, i32* %i, align 4
  br label %_23_loop_5

_23_loop_5:                                       ; preds = %_23_loop_4
  %10 = load i32, i32* %i, align 4
  br label %_23_loop_6

_23_loop_6:                                       ; preds = %_23_loop_5
  %11 = load i32, i32* %x, align 4
  br label %_23_loop_7

_23_loop_7:                                       ; preds = %_23_loop_6
  %12 = load i32, i32* %x, align 4
  br label %_23_loop_8

_23_loop_8:                                       ; preds = %_23_loop_7
  %13 = load i32, i32* %0, align 4
  br label %_23_loop_9

_23_loop_9:                                       ; preds = %_23_loop_8
  %14 = call i32 @mulmod(i32 %11, i32 %12, i32 %13)
  br label %_23_loop_10

_23_loop_10:                                      ; preds = %_23_loop_9
  %15 = load i32, i32* %0, align 4
  br label %_23_loop_11
```

```
_23_loop_11:                                      ; preds = %_23_loop_10
  %16 = add i32 %14, %15
  br label %_23_loop_12

_23_loop_12:                                      ; preds = %_23_loop_11
  br label %_23_loop_13

_23_loop_13:                                      ; preds = %_23_loop_12
  %17 = sub i32 %16, 1
  br label %_23_loop_14

_23_loop_14:                                      ; preds = %_23_loop_13
  %18 = load i32, i32* %0, align 4
  br label %_23_loop_15

_23_loop_15:                                      ; preds = %_23_loop_14
  %19 = srem i32 %17, %18
  br label %_23_loop_16

_23_loop_16:                                      ; preds = %_23_loop_15
  store i32 %19, i32* %x, align 4
  br label %_23_loop_17

_23_loop_17:                                      ; preds = %_23_loop_16
  %20 = load i32, i32* %x, align 4
  br label %_23_loop_18

_23_loop_18:                                      ; preds = %_23_loop_17
  %21 = load i32, i32* %y, align 4
  br label %_23_loop_19

_23_loop_19:                                      ; preds = %_23_loop_18
  %22 = load i32, i32* %x, align 4
  br label %_23_loop_20

_23_loop_20:                                      ; preds = %_23_loop_19
  %23 = sub i32 %21, %22
  br label %_23_loop_21

_23_loop_21:                                      ; preds = %_23_loop_20
  %24 = call i32 @abs_val(i32 %23)
```

```
  br label %_23_loop_22

_23_loop_22:                                      ; preds = %_23_loop_21
  %25 = load i32, i32* %0, align 4
  br label %_23_loop_23

_23_loop_23:                                      ; preds = %_23_loop_22
  %26 = call i32 @gcd(i32 %24, i32 %25)
  br label %_23_loop_24

_23_loop_24:                                      ; preds = %_23_loop_23
  store i32 %26, i32* %d, align 4
  br label %_23_loop_25

_23_loop_25:                                      ; preds = %_23_loop_24
  %27 = load i32, i32* %d, align 4
  br label %_23_loop_26

_23_loop_26:                                      ; preds = %_23_loop_25
  %28 = load i32, i32* %d, align 4
  br label %_23_loop_27

_23_loop_27:                                      ; preds = %_23_loop_26
  br label %_23_loop_28

_23_loop_28:                                      ; preds = %_23_loop_27
  %29 = icmp ne i32 %28, 1
  br label %_23_loop_29

_23_loop_29:                                      ; preds = %_23_loop_28
  %30 = load i32, i32* %d, align 4
  br label %_23_loop_30

_23_loop_30:                                      ; preds = %_23_loop_29
  %31 = load i32, i32* %0, align 4
  br label %_23_loop_31

_23_loop_31:                                      ; preds = %_23_loop_30
  %32 = icmp ne i32 %30, %31
  br label %_23_loop_32
```

```
_23_loop_32:                                      ; preds = %_23_loop_31
  %33 = and i1 %29, %32
  br label %_23_loop_33

_23_loop_33:                                      ; preds = %_23_loop_32
  br i1 %33, label %_23_loop_33_then_1, label %_23_loop_34

_23_loop_33_then_1:                               ; preds = %_23_loop_33
  %34 = load i32, i32* %d, align 4
  br label %_23_loop_33_then_2

_23_loop_33_then_2:                               ; preds = %_23_loop_33_then_1
  ret i32 %34

_23_loop_33_then_3:                               ; No predecessors!
  br label %_23_loop_34

_23_loop_34:                                      ; preds = %_23_loop_33_then_3,
  %35 = load i32, i32* %i, align 4
  br label %_23_loop_35

_23_loop_35:                                      ; preds = %_23_loop_34
  %36 = load i32, i32* %k, align 4
  br label %_23_loop_36

_23_loop_36:                                      ; preds = %_23_loop_35
  %37 = icmp eq i32 %35, %36
  br label %_23_loop_37

_23_loop_37:                                      ; preds = %_23_loop_36
  br i1 %37, label %_23_loop_37_then_1, label %_23_loop_38

_23_loop_37_then_1:                               ; preds = %_23_loop_37
  %38 = load i32, i32* %x, align 4
  br label %_23_loop_37_then_2

_23_loop_37_then_2:                               ; preds = %_23_loop_37_then_1
  store i32 %38, i32* %y, align 4
  br label %_23_loop_37_then_3

_23_loop_37_then_3:                               ; preds = %_23_loop_37_then_2
```

```
  %39 = load i32, i32* %y, align 4
  br label %_23_loop_37_then_4

_23_loop_37_then_4:                               ; preds = %_23_loop_37_then_3
  %40 = load i32, i32* %k, align 4
  br label %_23_loop_37_then_5

_23_loop_37_then_5:                               ; preds = %_23_loop_37_then_4
  br label %_23_loop_37_then_6

_23_loop_37_then_6:                               ; preds = %_23_loop_37_then_5
  %41 = mul i32 %40, 2
  br label %_23_loop_37_then_7

_23_loop_37_then_7:                               ; preds = %_23_loop_37_then_6
  store i32 %41, i32* %k, align 4
  br label %_23_loop_37_then_8

_23_loop_37_then_8:                               ; preds = %_23_loop_37_then_7
  %42 = load i32, i32* %k, align 4
  br label %_23_loop_37_then_9

_23_loop_37_then_9:                               ; preds = %_23_loop_37_then_8
  br label %_23_loop_38

_23_loop_38:                                      ; preds = %_23_loop_37_then_9,
  br label %_23_loop_1

_24:                                              ; No predecessors!
  br label %_25

_25:                                              ; preds = %_24
  br label %_26

_26:                                              ; preds = %_25
  ret i32 -1
}

; Function Attrs: nounwind uwtable
define void @.main() #0 {
_1:
```

```
  br label %_2

_2:                                               ; preds = %_1
  %ans = alloca i32, align 4
  br label %_3

_3:                                               ; preds = %_2
  %0 = load i32, i32* @N, align 4
  br label %_4

_4:                                               ; preds = %_3
  %1 = call i32 @pollard_rho(i32 %0)
  br label %_5

_5:                                               ; preds = %_4
  store i32 %1, i32* %ans, align 4
  br label %_6

_6:                                               ; preds = %_5
  %2 = load i32, i32* %ans, align 4
  br label %_7

_7:                                               ; preds = %_6
  %3 = load i32, i32* %ans, align 4
  br label %_8

_8:                                               ; preds = %_7
  %4 = load i32, i32* @N, align 4
  br label %_9

_9:                                               ; preds = %_8
  %5 = load i32, i32* %ans, align 4
  br label %_10

_10:                                              ; preds = %_9
  %6 = sdiv exact i32 %4, %5
  br label %_11

_11:                                              ; preds = %_10
  %7 = icmp sgt i32 %3, %6
  br label %_12
```

```
_12:                                              ; preds = %_11
  br i1 %7, label %_12_then_1, label %_13

_12_then_1:                                       ; preds = %_12
  %8 = load i32, i32* @N, align 4
  br label %_12_then_2

_12_then_2:                                       ; preds = %_12_then_1
  %9 = load i32, i32* %ans, align 4
  br label %_12_then_3

_12_then_3:                                       ; preds = %_12_then_2
  %10 = sdiv exact i32 %8, %9
  br label %_12_then_4

_12_then_4:                                       ; preds = %_12_then_3
  store i32 %10, i32* %ans, align 4
  br label %_12_then_5

_12_then_5:                                       ; preds = %_12_then_4
  %11 = load i32, i32* %ans, align 4
  br label %_12_then_6

_12_then_6:                                       ; preds = %_12_then_5
  br label %_13

_13:                                              ; preds = %_12_then_6, %_12
  %12 = load i32, i32* %ans, align 4
  br label %_14

_14:                                              ; preds = %_13
  %13 = load i32, i32* @N, align 4
  br label %_15

_15:                                              ; preds = %_14
  %14 = load i32, i32* %ans, align 4
  br label %_16

_16:                                              ; preds = %_15
  %15 = sdiv exact i32 %13, %14
```

```
  br label %_17

_17:                                              ; preds = %_16
  %16 = call i32 (i8*, ...) @printf(
    i8* getelementptr inbounds ([7 x i8], [7 x i8]* @.format.0,
    i32 0, i32 0), i32 %12, i32 %15)
  br label %_18

_18:                                              ; preds = %_17
  ret void
}

declare i32 @printf(i8*, ...)

; Function Attrs: nounwind uwtable
define i32 @main() #0 {
_1:
  br label %_2

_2:                                               ; preds = %_1
  call void @.main()
  br label %_3

_3:                                               ; preds = %_2
  br label %_4

_4:                                               ; preds = %_3
  ret i32 0
}

attributes #0 = { nounwind uwtable }
```

8 Závěr

V rámci této semestrální práce byl implementován překladač, který překládá základní konstrukce naší gramatiky, jež vychází z jazyka Rust do IR LLVM. Tato základní škála bohužel neobsahuje pole, takže velká skupina algoritmů vůbec nelze vyjádřit, nicméně kromě polí nabízí tento jazyk konstrukce, na které jsou programátoři zvyklí a lze s nimi implementovat i netriviální algoritmy viz 7.3. Hlavní předností našeho řešení je striktní typová kontrola,

která přidává na složitosti celého řešení.

I přes absenci podpory pro pole, semestrální práce splnila povinné body zadání a přidala velkou část z volitelných konstrukcí.

V rámci implementace jsme si v praxi vyzkoušeli funkcionální programovací jazyk Haskell a seznámili se s nástrojem LLVM, který je nápomocný při vytváření nových jazyků. Pro většinu našeho týmu byl Haskell novým jazykem, ale po úvodním seznamování jsme v něm byly schopni práci dokončit.