

Monolog

Alexey Kachaev, E1

18. května 2025

Obsah

Pro učitele	4
Původní zadání	4
Změny	4
Použité knihovny třetích stran	5
Stručný popis programu	5
Sestavení	5
Předpoklady	6
Kompilátor	6
Systém sestavení (pro CMake)	6
Sestavení pomocí CMake	6
Příručka	7
Úvod	7
Výrazy a příkazy	7
Význam výrazu	7
Datové typy	8
Celá čísla	8
Řetězce	8
Prázdný typ	8
Volitelný typ	8
Seznam	8
Operátory	8
Aritmetické operátory	9
Binární	9
Unární	9
Logické a relační operátory	9
Binární	9
Unární	9
Seznamové operátory	9
Binární	9
Unární	10
Sufixové	10
Operátory pro volitelné typy	10
Unární	10
Řetězcové operátory	10
Binární	10
Operátory konverze	11
Unární	11
Operátory přiřazení	11
Priorita operátoru a asociativita	11
Řídicí příkazy	12
if, else	12
while	12
for	12
return	12
break	13
continue	13
Vazba jmen a entit	13

Proměnné	13
Seznamy: syntaktický cukr	14
Funkce	14
Rozsah platnosti	15
Rezoluce jmen	16
Blok - skupinování příkazu	16
Paměťový Model	17
Rozsah životnosti	17
Statické a dynamické hodnoty	17
Předávání argumentů u funkcí	18
Zabudované funkce	18
print	18
println	18
exit	18
input_int	18
input_string	18
random	19
random_range	19
chr	19
ord	19
Detaily implementace	20
Lexer	20
Parser	21
Parsování infixové notace	24
Prattův parser	24
Zotavení z chyby	26
Sémantická analýza	27
Interpretátor	28
Správa proměnných, funkcí a dalších informací	28
Typový systém	29
Implementace hašovací tabulky	30
Limitace a možná vylepšení	30
Appendix A	31
Gramatika	31

Pro učitelé

Projekt mám celkem dokončený, proto považoval bych to za final draft. Samozřejmě, počítám s možnými výtkami a návrhy pro vylepšení.

Kapitola **Sestavení** popisuje jak zkompileovat projekt.

Část **Detailed implementation** popisuje implementaci, a také strukturu projektu.

Dokument byl napsán v Markdownu, a převeden do PDF pomocí nástroje **Pandoc**.

V kódu můžete najít komentáře s licencí a s přezdívkou “inunix3”. Je to moje přezdívka na GitHubu, plánuju tam zveřejnit svůj projekt.

Původní zadání

- Aritmetické operátory (+, -, *, /, %)
- Inkrementace/dekrementace (++, --)
- Logické operátory (&&, ||, ==, !=, >, <, >=, <=, !)
- Spojování řetězců ("hello" + " " + "world")
- Závorky (2 * (2 + 3) / (3 - 4))
- Speciální operátor #, který vrátí počet prvku v poli nebo délku řetězce
- Speciální operátor \$, který konvertuje celé číslo v řetězec. Použití u jiného typu vyvolá chybu při parsingu.
- Speciální operátor *, který vytěží uloženou hodnotu ve volitelném typu (viz dále). Pokud tento typ neobsahuje hodnotu, program ukončí se s chybou. Použití u void vyvolá chybu při parsingu.
- Operátor [index], který se používá k indexování prvku v polích nebo znaků v řetězcích. Záporná hodnota nebo mimo hranice ukončí program s chybou.
- Datové typy: int, void, string, pole ([type, n], kde type je uchovávaný typ, n je počet prvku). Pokud typ obsahuje na konci znak?, jedná se o volitelný typ. Objekt takového typu buď obsahuje hodnotu specifikovaného typu, nebo neobsahuje (přesněji řečeno obsahuje speciální hodnotu nil').
- Cykly while a for
- Podmínky if, else if, else
- Funkce s 0 nebo více parametry a návratovou hodnotou (return_type name() nebo return_type name(param1, param2, ...);)
- Komentáře začínají //
- Zabudovaná funkce print, která přijímá řetězec a vypíše ho. (void print(string s);)
- Zabudovaná funkce println, která přijímá řetězec a vypíše ho spolu s newline znakem. (void println(string s);)
- Zabudovaná funkce input_int, která načte celé číslo a vrátí ho (int? input_int();)
- Zabudovaná funkce input_string, která načte řetězec a vrátí ho (string input_string();).

Změny

- Rozhodl jsem implementovat dynamické pole (přesněji seznamy) místo statických polí. Při deklaraci není nutno uvádět rozměr. Pokud je uveden, prvky budou vynulovány.
- Nový operátor +=: přidá prvek na konec seznamu.
- Nový operátor -=: odstraní zadaný počet prvku z konce seznamu.
- Nový operátor #=: nastaví rozměr seznamu na zadaný.

- Nová zabudovaná funkce `void exit(int code)`, která ukončí program uprostřed vykonávání.
- Nová zabudovaná funkce `int random()`, která vrátí náhodné číslo.
- Nová zabudovaná funkce `int random_range(int min, int max)`, která vrátí náhodné číslo v zadaném intervalu.
- Nová zabudovaná funkce `string chr(int ch)` pro převod číselné hodnoty do ASCII znaku.
- Nová zabudovaná funkce `int ord(string ch)` pro převod ASCII znaku do číselné hodnoty.
- Zabudovaná funkce `input_string` teď má navratový typ `string?`. Vrací `nil` v případě chyby ve čtení vstupu.
- Tyto změny vznikly spontánně.

Použité knihovny třetích stran

- **isocline** - přenosná alternativa GNU Readline, která rozšiřuje možnosti editace v příkazovém řádku. Použito pro REPL.
- **greatest** - jednoduchá knihovna pro (unit) testování. Použito pro programy ve složce `tests`.

Stručný popis programu

Běh programu probíhá následovně:

1. Načtení zdrojového kódu (ze souboru nebo klavesnice)
2. Lexikální analýza (*lexing*)
3. Syntaktická analýza a vygenerování syntaxového stromu (AST) (*parsing*)
4. Semantická analýza (*semantic analysis*)
5. Interpretace prochazením AST (*tree-walk interpretation*)

Program podporuje REPL a vykonávání ze specifikovaného souboru.

1. `monolog run FILENAME`
2. `monolog scan FILENAME`
3. `monolog parse FILENAME`
4. `monolog repl`

1. Spustí soubor s názvem `FILENAME`. V příkazovém řádku vrátí 0 v případě úspěchu, poslední hodnotu předanou zabudované funkcí `void exit(int exit_code)`, nebo -1 v případě chyby za běhu.
2. Načte soubor `FILENAME` a vypíše posloupnost tokenů.
3. Načte soubor `FILENAME` a vypíše jeho syntaktický strom.
4. Spustí v režimu REPL. V tomto režimu uživatel interaktivně zadává příkazy, program pak každý zpracovává a vykonává. Veškeré proměnné a funkce jsou pamatovány a použitelný mezi příkazy.

Také v režimu REPL interpretátor hned se neukončí v případě chyby.

Knihovna **isocline** přináší klavesové zkratky, které dovolují pohodlněji editovat text. Zkratky jsou vypsány na [stránce knihovny](#).

Sestavení

Monolog používá CMake pro kompilaci. K dispozici je na [jejích webu](#), nebo, pokud používáte Linux, v repozitáři vaší distribuce.

Pokud nebudete kompilovat pomocí CMake nebo vyskytla se chyba, v hlavní složce najdete skript `build.bat` pro Windows, a `build.sh` pro Linux, které ručně vyvolávají kompilátor.

Předpoklady

Kompilátor

K sestavení je zapotřebí kompilátor, který podporuje C11. GCC podporuje tuto normu již od 5 verze (aktuální verze je 15 nebo větší). Clang podporuje tuto normu od 3.3 verze, vydané v roce 2013.

MSVC jsem netestoval.

GCC Pro Microsoft Windows kompilátor GCC jde získat přes MinGW (implementace GCC a dalších programů GNU pro Windows), MSYS2 nebo Cygwin.

Já osobně doporučuji **w64devkit**. w64devkit je portabilní balíček, založený na MinGW-64. Zahrnuje kompilátor GCC, ladič GDB, editor Vim atd.

V případě Linuxu, kompilátor GCC by měl být již nainstalovaný, ale měl by být také v repozitáři vaší distribuce.

Clang Clang lze získat z **oficiálního webu LLVM**.

Pokud používáte Linux, měl by být v repozitáři vaší distribuce.

Systém sestavení (pro CMake)

CMake nekompile nic sám, ale generuje skript pro konkrétní systém sestavení, proto musíte mít nějaký nainstalovaný.

Pokud používáte MinGW nebo MSYS, měli by mít zahrnutou implementaci GNU Make. Jinak doporučuji **Ninja**.

DŮLEŽITÝ PRO WINDOWS: ujistěte se, že všechny tyto programy jsou dostupné přes proměnnu prostředí PATH!

Sestavení pomocí CMake

1. Otevřete terminál/konzoli ve složce Monologu, a vytvořte složku pro kompilaci:

```
mkdir build
```

2. Pak do ní přejděte:

```
cd build
```

3. Pro generaci:

```
cmake -DCMAKE_BUILD_TYPE=Release -G "VÁŠ GENERÁTOR" ..
```

- Pokud chcete použít jiný kompilátor, přidejte `-DCMAKE_C_COMPILER=cesta_k_souboru_kompilatoru`.
- Pokud chcete zkompilevat i testovací programy, přidejte `-DBUILD_TESTS=ON`.

Zvolení generátoru:

- Pro MinGW - “MinGW Makefiles”.
- Pro MSYS - “MSYS Makefiles”.
- Pro Linux - “Unix Makefiles”.
- Pokud chcete použít Ninja, napište “Ninja”.
- Jinak můžete zkusit vynechat parametr `-G`, a CMake zvolí si sám.

4. Zadejte `cmake --build .` aby zkompilevat, případně vyvolejte přímo sestavovací systém.

5. Pokud kompilace proběhla úspěšně, ve složce `src` (uvnitř složky `build`) měl by být soubor `monolog.exe` (na Linuxu bez přípony).

Příručka

Úvod

Monolog je jednoduchý, interpretovaný jazyk, podobný C svou syntaxi a konstrukcemi.

```
// Minimální hello world

println("Hello, World!");
```

Je to **statický typovaný** jazyk, což znamená, že všechny proměnné a funkce mají pevně přiřazený typ, který se specifikuje explicitně při deklaraci/definici.

Jediný podporovaný paradigma je **imperativní programování** (procedurální) - vykonávání posloupností příkazu, které mohou přímo měnit stav programu.

*Poznámka: pro popis gramatiky tento dokument používá **dialekt EBNF**, vyvinutý konsorciem W3C.*

Výrazy a příkazy

```
expression      ::= literal | identifier | nil | binary | unary |
                    suffix | subscript | grouping | function-call
literal          ::= integer-literal | string-literal
integer-literal ::= [0-9]+
string-literal  ::= "'" char "'"
char            ::= /* jakýkoliv Unicode znak */

identifier ::= ([a-zA-Z] | '_' ) ([a-zA-Z] | '_' | [0-9])*
nil         ::= 'nil'

binary      ::= expression binary-op expression
unary       ::= unary-op expression
suffix      ::= expression suffix-op
grouping    ::= '(' expression ') '

statement-separated ::= (variable-declaration | return-statement |
                        break-statement | continue-statement | expression) ';'

statement ::= if-statement | while-statement | for-statement |
            statement-separated | function-declaration | block-statement
```

Monolog je stavěn na výrazech a příkazech:

- výraz je název pro kombinaci operátoru, konstant, proměnných a funkcí, a dá se vyčíslit jeho hodnotu.
- příkaz vyjadřuje činnost, která má být provedená. Může se skládat z výrazu.

Příkazy jsou oddělovány středníkem (;).

Oboje mohou způsobit tzv. **vedlejší účinky** - jev, když výraz/příkaz ovlivňuje i jiné stav programu (např. hodnoty jiných proměnných) kromě své hodnoty.

Příkazy vykonávají se sekvenčně.

Význam výrazu

Význam výrazu také může záviset na tom, kde a jak je použit. Například,

```
int a = list[5];
```

výraz `list[5]` vrátí hodnotu prvku s indexem 5 v seznamu `list`.

Ale příkaz

```
list[5] = 115;
```

výraz `list[5]` v tomto případě nevrací hodnotu, ale je interpretován jako destinace, kam má být uloženo číslo 115.

To samé platí pro proměnné a indexování řetězce (viz dále).

Datové typy

```
type-specifier ::= int-type | string-type | void-type | option-type | list-type
int-type       ::= 'int'
string-type    ::= 'string'
void-type      ::= 'void'
option-type    ::= type-specifier '?'
list-type      ::= '[' type-specifier (',' expression)? ']'
```

Monolog nemá možnost definovat vlastní typy, ale obsahuje zabudované:

1. celé číslo `int` - 64-bitové číslo se znamínkem
2. řetězec `string` - měnitelná posloupnost znaků (bytů)
3. volitelný typ `T?`, kde `T` je libovolný typ
4. seznamy `[T]`, kde `T` je libovolný typ
5. prázdný typ `void`

Rekurzivita typu je podporovaná, takže deklarace jako `int??????`, `[[[int?]?]]?` nejsou zakázané.

Celá čísla

Primitivní typ `int` je určen pro práci s celými čísly.

V Monologu, celá čísla jsou 64-bitová a mají znamínko.

Řetězce

Složený typ `string` je posloupnost znaku (hodnoty typu `int`).

Každý řetězec má jednu vlastnost - **délka** - počet znaků v řetězci

Prázdný typ

Primitivní typ `void` je určen pro reprezentaci hodnot, které nemají hodnotu.

Volitelný typ

Volitelný typ `T?` je **složený datový typ**, který:

1. buď obsahuje hodnotu typu `T`,
2. nebo obsahuje hodnotu speciálního typu `nil` (*prázdnota*).

Seznam

Seznam `[T]` je **složený datový typ**, který obsahuje prvky typu `T`, takže je zároveň **homogenní**.

Operátory

```
binary-op ::= '+' | '-' | '*' | '/' | '%' | '<' | '>' | '+=' |
            '-=' | '#=' | '<=' | '>=' | '==' | '!=' | '&&' | '||'
unary-op  ::= '-' | '+' | '*' | '!' | '#' | '$' | '++' | '--'
```


suffix-op ::= '++' | '--'

subscript ::= expression '[' expression ']'

V Monologu jsou binární ($a + 2$), unární ($-b$) a sufixové operátory ($a++$ nebo `list[5]`). Každý typ má určitou sadu podporovaných operátorů.

Aritmetické operátory

Binární

Levá strana	Pravá strana	Operátor	Operace	Vedlejší účinky	Výsledný typ
int	int	+	provede sčítání	NE	int
int	int	-	provede odčítání	NE	int
int	int	*	provede násobení	NE	int
int	int	/	provede dělení	NE	int
int	int	%	provede dělení a vrátí zbytek	NE	int

Unární

Levá strana	Operátor	Operace	Vedlejší účinky	Výsledný typ
int	+	vrací hodnotu výrazu	NE	int
int	-	změní znamínko výrazu na opačné	NE	int

Logické a relační operátory

Tyto operace vracejí 1 pokud výraz je pravdivý, 0 pokud ne.

Binární

Levá strana	Pravá strana	Operátor	Operace	Vedlejší účinky	Výsledný typ
int	int	==	jestli hodnoty operandů jsou stejné	NE	int
int	int	!=	jestli hodnoty operandů nejsou stejné	NE	int
int	int	<	pokud první operand je menší než druhý	NE	int
int	int	>	pokud první operand je větší než druhý	NE	int
int	int	<=	pokud první operand je menší nebo rovný druhému	NE	int
int	int	>=	pokud první operand je větší nebo rovný druhému	NE	int
int	int	&&	provede logickou konjunkci	NE	int
int	int		provede logickou disjunkci	NE	int

Unární

Pravá strana	Operátor	Operace	Vedlejší účinky	Výsledný typ
int	!	provede logickou negaci	NE	int

Seznamové operátory

Binární

Levá strana	Pravá strana	Operátor	Operace	Vedlejší účinky	Výsledný typ
[T]	T	+=	vloží hodnotu pravé strany na konec seznamu	ANO	void
[T]	int	--	smaže zadaný počet prvku z konce seznamu	ANO	void
[T]	int	#=	změní rozměr seznamu na zadaný	ANO	void

- `--`: pokud zadaný počet prvek je větší nebo roven počtu prvku seznamu, smažou se všechny prvky a seznam bude prázdný.
- `*=`: pokud zadaný rozměr je větší než aktuální, nové prvky budou vynulované. Pokud je menší, nadbytek bude smazán.

Unární

Pravá strana	Operátor	Operace	Vedlejší účinky	Výsledný typ
[T]	#	vrátí počet prvků	NE	int

Sufixové

Levá strana	Operátor	Operace	Vedlejší účinky	Výsledný typ
[T]	[int]	vrátí odkaz na prvek, uložený v seznamu	NE	T

- [int]: tento operátor je **indexovací** a očekává uvnitř výraz typu `int`, který je požadovaný index. Důležitý je, že hodnota indexu musí být v rozmezí $[0, N)$, kde N je počet prvků v daném seznamu.

Operátory pro volitelné typy

Unární

Pravá strana	Operátor	Operace	Vedlejší účinky	Výsledný typ
T?	*	vytěží data z volitelného typu	NE	T

- použití tohoto operátoru umožňuje měnit vnitřní hodnotu.
- použití tohoto operátoru je zakázáno v případě, jestli objekt volitelného typu je prázdný.

Řetězcové operátory

Binární

Operace `==` a `!=` vracejí 1 pokud výraz je pravdivý, 0 pokud ne.

Levá strana	Pravá strana	Operátor	Operace	Vedlejší účinky	Výsledný typ
string	string	+	připojí pravý řetězec k levému	NE	string
string	string	==	jestli délky a obsahy řetězců jsou stejné	NE	int
string	string	!=	jestli délky a obsahy řetězců nejsou stejné	NE	int

Unární

Pravá strana	Operátor	Operace	Vedlejší účinky	Výsledný typ
string	#	vrátí délku řetězce (počet znaků)	NE	int

Suffixové

Levá strana	Operátor	Operace	Vedlejší účinky	Výsledný typ
string	[int]	vrátí odkaz na znak, uložený v seznamu	NE	int

- **[int]**: tento operátor je **indexovací** a očekává uvnitř výraz typu **int**, který je požadovaný index. Důležitý je, že hodnota indexu musí být v rozmezí $[0, N)$, kde N je délka řetězce.

Operátory konverze

Unární

Pravá strana	Operátor	Operace	Vedlejší účinky	Výsledný typ
int	\$	vytvoří nový řetězec, který obsahuje číslo	NE	string

Operátory přiřazení

Pokud výsledkem výrazu bude destinace, jako třeba proměnná nebo prvek v seznamu, a je na pravé straně, dá se změnit hodnotu, která je umístěna v destinaci.

Levá strana	Pravá strana	Operátor	Operace	Vedlejší účinky	Výsledný typ
proměnná typu T	T	=	změní hodnotu proměnné	ANO	T
prvek v poli typu T	T	=	změní hodnotu uloženou v poli	ANO	T
proměnná nebo prvek v poli typu T?	T	=	uloží hodnotu do volitelného typu	ANO	T
proměnná nebo prvek v poli typu T?	nil	==	ověří, zda levá strana je prázdná	ANO	T
znak v řetězci	int	=	změní specifikovaný znak	ANO	int

Při přiřazování hodnoty, hodnota se **kopíruje**. Takže, když například proměnné **b** přiřadíme hodnotu proměnné **a**, následně modifikace hodnoty **b** nebude ovlivňovat hodnotu **a**.

Priorita operátoru a asociativita

Monolog respektuje prioritu a asociativitu operátorů, zejména u matematických.

Následující tabulka uvádí prioritu a asociativitu všech operátorů. Operátory jsou uvedeny sestupně shora dolů, od nejvyšší priority po nejnižší.

Priorita	Operátor(y)	Popis	Asociativita
1	++ -- () []	Suffixové operátory	zleva doprava
2	+ - ! # \$ * ++ --	Prefixové operátory	zprava doleva
3	* / %	Násobení, dělení	zleva doprava
4	+ -	Sčítání, odčítání	zleva doprava
5	< <= > >=	Relační operátory	zleva doprava
6	== !=	Rovnost, nerovnost	zleva doprava
7	&&	Konjunkce	zleva doprava

Priorita	Operátor(y)	Popis	Asociativita
8		Disjunkce	zleva doprava
9	= += -= #=	Přiřazování	zprava doleva

Řídicí příkazy

Monolog obsahuje základní příkazy pro větvení a cyklování kódu:

- Větvení
 - **if** - podmíněčné vykonávání kódu.
 - **else** - alternativní cesta kódu.
- Cyklování
 - **while** - cyklování.
 - **for** - iterace/cyklování.
- Další
 - **return** - návrat z funkce.
 - **break** - ukončení cyklu.
 - **continue** - přeskočení těla cyklu.

if, else

```
if-statement ::= 'if' '(' expression ')' statement? else-statement?
else-statement ::= 'else' statement?
```

- Ověří, jestli podmínka je pravdivá. Pokud ano, vykoná se tělo.
- Pokud podmínka není pravdivá, vykoná se alternativní tělo, dané větví **else**.

while

```
while-statement ::= 'while' '(' expression ')' statement?
```

- Ověří, jestli podmínka je pravdivá.. Pokud ano, vykoná se tělo.
- Po vykonání těla, Opětovně ověří podmínku. V případě, že je stále pravdivá, tento proces se zopakuje. Pokud není, cyklus se ukončí.

for

```
for-statement ::= 'for' '(' init-clause? ';' condition? ';' iter-expr? ')' statement?
init-clause ::= expression | variable-declaration
condition ::= expression
iter-expr ::= expression
```

- Pokud **init-clause** je dán, nejdříve vykoná jeho.
- Pokud výraz **condition** je dán, ověří zda je podmínka pravdivá. Pokud **condition** není, jeho výchozí hodnotou bude číslo 1.
- Pokud podmínka je pravdivá, vykoná tělo.
- Hned po vykonávání těla, vykoná výraz **iter-expr**, pokud je dán.
- Opětovně ověří podmínku. V případě, že je stále pravdivá, tento proces se zopakuje. Pokud není, cyklus se ukončí.

return

```
return-statement ::= 'return' expression?
```

- Tento příkaz může se vyskytovat jenom ve funkcích.

- Způsobí, že vykonávání opustí aktuální funkci a bude pokračovat hned po místu v kódu, kde byla funkce vyvolaná.
- Pokud funkce má typ rozdílný od `void`, tento příkaz musí obsahovat návratový výraz, hodnota kterého bude vrácená
- Pokud funkce má typ `void`, tento příkaz musí být bez návratového výrazu.

break

`break-statement ::= 'break'`

- Tento příkaz může se vyskytovat jenom v cyklech.
- Způsobí, že vykonávání opustí aktuální cyklus a bude pokračovat hned po konci těla cyklu.

continue

`continue-statement ::= 'continue'`

- Tento příkaz může se vyskytovat jenom v cyklech.
- Způsobí, že vykonávání přeskočí zbytek těla cyklu a cyklus bude opakován.
- Po přeskočení, `while` ověří pravdivost podmínky.
- Po přeskočení, `for` nebude vykonávat iterační příkaz, ověří pravdivost podmínky.

Vazba jmen a entit

Deklarace je zavedení jednoho nebo více jmen, které má přiřazený význam a určité vlastnosti.

Monolog podporuje deklarace **proměnných** a **funkcí**

Proměnné

`variable-declaration ::= type-specifier identifier ('=' expression)? ';'`

Proměnné vytvářejí vazbu mezi jménem a určitou entitou (hodnotou). Každá proměnná má uživatelem zadaný typ `type-specifier`, a opcionalně výchozí hodnotu, danou výrazem.

Pokud proměnná je deklarovaná bez počáteční hodnoty, její výchozí hodnota je vynulovaná:

Typ	Výchozí hodnota
<code>int</code>	0
<code>string</code>	""
<code>void</code>	-
<code>[T]</code>	[]
<code>T?</code>	nil

Použití proměnné ve výrazu dosadí její hodnotu.

Proměnná nemůže být typu `void`. Je to považováno za sémantickou chybu.

// deklarace proměnné typu int s jménem "a", výchozí hodnota je 0.

`int a;`

// deklarace proměnné typu int s jménem "c", hodnotou které je součet hodnot proměnných a, b.

`int c = a + b;`

// deklarace proměnné typu string s jménem "city", hodnotou je řetězec "Prague".

```
string city = "Prague";

// volitelná proměnná, je prázdná (výchozí hodnota je `nil`).
string? jméno = nil;
jméno = "ahoj";

// deklarace proměnné typu seznamu, který obsahuje seznam prvku volitelného typu int.
[[int?]] matrix;
```

Seznamy: syntaktický cukr

Při deklaraci seznamu, je možné uvést počáteční rozměr pole:

```
[int, 5] pole; // bude mít 5 vynulovaných prvků, každý je typu int
```

Je to zkratka pro tento zápis:

```
[int] pole;
pole #= 5;
```

POZNÁMKA: aby nechat kód interpretátora jednodušší, není to možné použít u vložených seznamů:

```
// Není chyba, ale vložené pole nebude mít 3 vynulovaných prvků
[[int, 3], 5] a;
```

Aby to obejit, je potřeba použít operátor #=:

```
[[int], 5] a;

for (int i = 0; i < #a; ++i) {
    a[i] #= 3;
}
```

Funkce

```
function-declaration ::= type-specifier identifier '(' param-decl-list ')' statement
param-decl           ::= type-specifier identifier
param-decl-list      ::= param-decl ',' '?' | (param-decl ','')+ param-decl ',' '?'
```

```
function-call ::= identifier '(' arg-list ')'
arg-list      ::= expression ',' '?' | (expression ','')+ expression ',' '?'
```

Funkce váže jméno a určitý kus kódu, který může mít předem definované parametry (`param-decl-list`), které může využít.

Volání funkce znamená vykonat určitou funkci, a pokud má definované parametry, vykonat s určitými argumenty.

Když funkce má parametry a je vyvolávána syntaxí `function-call`, na místo parametru jsou předávány hodnoty argumentů, a interpretátor pak vytvoří proměnné s názvem parametru a hodnotou příslušného argumentu, a kód funkce pak bude moci využít tyto proměnné (parametry).

Při volání funkce, typ každého argumentu se musí schodovat s typem parametru, jehož pozici zaujímá.

```
// Funkce s názvem foo, bez parametrů, návratový typ je void,
// tělem je blok (viz následující sekce).
void foo() {
    println("Hello, World!");
}

// Funkce s parametry a návratovým typem int.
int max(int a, int b) {
```

```

    if (a > b) {
        return a;
    } else {
        return b;
    }
}

// Vyvolání funkce
foo();

// Vyvolání funkce s parametry
int m = max(115, 94); // argumenty jsou a = 115, b = 94.

void bar() {
    // Použití proměnné a funkce uvnitř funkce,
    // deklarované v globálním rozsahu. (viz následující sekce).
    if (max(m, 5)) {
        println("A");
    } else {
        println("B");
    }
}

```

Rozsah platnosti

Rozsah platnosti je část zdrojového kódu, ve které jsou definované proměnné (tj. uplatňuje se vazba jména s entitou).

V každém programu napsaném v Monologu existuje alespoň jeden rozsah, zvaný **globální rozsah**. Globální rozsah má stejné vlastnosti jako i rozsahy vytvořené uživatelem.

Každá funkce vytváří nový rozsah platnosti pro své parametry.

```

// Zápis:

int sum(int x, int y) {
    return x + y;
}

int z = sum(arg1, arg2);

// Význam:

int z;

{
    int x = arg1; // arg1 má být typu int
    int y = arg2; // arg2 má být typu int

    {
        z = x + y; // return x + y;
    }
}

```

Vyvolávání funkce vytváří rozsah platnosti hned po globálním rozsahu, což dovoluje vyhnout se situaci, když funkce má přístup k rozsahu volajícího a jejích rodičovským rozsahům (kromě globálního), což je kontraintuitivní a obvykle nechtěné chování.

Protože cyklus `for` dovoluje deklarovat proměnné, on také vytváří nový rozsah, ale ten je podrozsahem rozsahu, ve kterém se vyskytuje tento cyklus:

```
// Zápis:

int z;

for (int i = 0; i < 10; ++i) {
    z = z + i * i;
}

println($z);

// Význam:

int z;

{
    int i = 0;

    while (i < 10) {
        z = z + i * i;
        ++i;
    }
}

println($z);
```

Rezoluce jmen

Rezoluce jmen znamená zjištění, na jakou entitu se odkazuje jméno. Monolog rezoluci provádí tak, že nejdřív hledá jméno v současném rozsahu, pak, pokud existuje vyšší rozsah, hledá v něm a opakuje to až do globálního rozsahu, kde také provádí rezoluci. Pokud nebyla zjištěna entita, na kterou by odkazovalo dané jméno, je to považováno za sémantickou chybu a program je špatně formulován.

V případě funkcí, funkce může být deklarovaná jenom v globálním rozsahu, proto rezoluce jména funkce provádí se jenom v něm.

Nový rozsah platnosti lze definovat pomocí **bloku** - skupinování příkazu.

Blok - skupinování příkazu

```
block-statement ::= '{' statement* '}'
```

Blok vytváří nový rozsah platnosti a rozsah životnosti (viz dále) a pak sekvenčně vykonává každý příkaz nebo výraz.

```
// globální rozsah

int x;
int y;

// rozsah
{
    int z = x + y;

    // podrozsah
    {
        string w = $x + $y + $z;
```



```

    }
}

```

Paměťový Model

Paměťový model v Monologu je stavěn na základě **rozsahu životnosti**, které úzce souvisejí s rozsahy platnosti.

Rozsah životnosti

Rozsah životnosti pokrývá celý rozsah platnosti, a obsahuje všechny hodnoty a proměnné, které byly vytvořeny/deklarovány v příslušném rozsahu platnosti.

Konec životnosti znamená, že hodnota nebo proměnná se uvolní z paměti a přestanou existovat, a paměť, kterou zaujímal, interpretátor bude moci opětovně využít.

```

// globální rozsah

int x;
int y;

// rozsah 1
{
    int z = x + y;

    // rozsah 2
    {
        string w = $x + $y +:$z;

        // životnost proměnné w končí tady
    }

    // životnost proměnné z končí tady
}

// konec zdrojového kódu programu
// životnost proměnných x a y končí tady

```

Statické a dynamické hodnoty

Podle využití paměti, hodnoty se dělí na:

1. statické

- celá čísla (`int`)
- prázdný typ (`void`)
- `nil`
- prázdné volitelné typy (`T?`)

2. dynamické

- řetězce (`string`)
- seznamy (`[T]`)
- neprázdné volitelné typy (`T?`)

Dynamické hodnoty se uvolňují, když končí jejich rozsah životnosti. Pokud dynamická hodnota je hodnotou proměnné, hodnota bude uvolněná spolu s proměnnou.

Předávání argumentů u funkcí

Argumenty předávají se takovým způsobem, že buď se kopírují, nebo předávají se odkazem - změna parametru uvnitř funkce ovlivní hodnotu argumentu u volajícího.

Pokud hodnota argumentu je výsledkem nějakého výrazu a nemá vázané jméno, tento argument bude vždy zkopírován. Pokud ale argument je proměnná, v závislosti od její typu, bude předán odkazem a změna hodnoty argumentu bude ovlivňovat proměnu/prvek. Pokud argument je prvek v seznamu/řetězci, argument je vždy předáván odkazem. Také

Původ argumentu	Typ	Typ argumentu
Výsledek výrazu	T	kopie
Proměnná	T, T != int, void nebo nil	odkaz
Proměnná	T, T = int, void nebo nil	kopie
Prvek v seznamu nebo řetězci	T	odkaz

Zabudované funkce

Monolog obsahuje zabudované funkce, které jsou všude přístupné.

print

```
void print(string s);
```

Vypíše řetězec `s` do standardního výstupu.

println

```
void println(string s);
```

Vypíše řetězec `s` do standardního výstupu spolu se znakem přenosu řádku.

exit

```
void exit(int code);
```

Ukončí program s hodnotou, danou parametrem `code`.

input_int

```
int? input_int();
```

Načte celé číslo ze standardního vstupu. V případě, že celé číslo bude špatně zadáno, nebo v průběhu načítání se stane chyba vstupu/výstupu, vrátí `nil`.

Tato funkce je blokovácí.

input_string

```
string? input_string();
```

Načte řetězec ze standardního vstupu. V případě chyby vstupu/výstupu, vrátí `nil`.

Tato funkce je blokovácí.

random

```
int random();
```

Vrátí náhodné číslo v intervalu $[0, M]$, kde M je číslo, které je **alespoň** 32767 nebo větší.

random_range

```
int random_range(int min, int max);
```

Vrátí náhodné číslo v intervalu $[min, max]$.

chr

```
string chr(int ch);
```

Vrátí řetězec, obsahující znak, jehož pozice v ASCII tabulce odpovídá `ch`.

ord

```
int ord(string ch);
```

Vrátí pozici v ASCII tabulce prvního znaku v řetězci `ch`.

Prázdný řetězec vrátí 0.

Detaily implementace

Interpretátor je napsán v jazyce C, použitá norma je C11 (ISO/IEC 9899:2011).

Implementace nevyužívá rozšíření specifické pro konkrétní kompilátor, proto kód by mělo být možný zkompileovat i pomocí jiných kompilátorů jako MSVC. GCC a Clang jsou podporovány.

Struktura projektu:

docs/	dokumentace
Makefile	Makefile pro generování PDF tohoto dokumentu
prirucka.md	zdrojový kód tohoto dokumentu
examples/	ukázkové programy
...	
include/	
monolog/	.h soubory projektu
...	
src/	.c soubory projektu
...	
tests/	testovací programy
...	
third-party/	knihovny třetích stran
...	
CMakeLists.txt	hlavní kompilační soubor

Lexer

Úkolem **lexeru** je převést zdrojový kód (text, nejspíše psaný člověkem) do podoby, se kterou se dá jednoduše pracovat. Rovnou s textem není vhodný, protože to by komplikovalo kód a není to triviální.

Lexer převádí text na posloupnost tzv. **tokenů**. Laicky řečeno, token je v podstatě slovo - nejmenší jednotka v gramatice jazyku, která má smysl.

Token je struktura, která uchovává odkaz na výskyt slova, druh slova (číslo, název atd.), číslo řádku a kolonky, a případně jiné informace:

```
/* Druh tokenu */
typedef enum TokenKind {
    TOKEN_EOF,
    TOKEN_INTEGER,
    TOKEN_IDENTIFIER,
    ...
} TokenKind;

typedef struct SourceInfo {
    int line; /* řádek */
    int col; /* kolonka */
} SourceInfo;

typedef struct Token {
    /* druh */
    TokenKind kind;
    /* odkaz na výskyt ve zdrojovém kódu */
    const char *src;
    /* délka slova */
    size_t len;
    /* jestli je to validní token */
    bool valid;
```

```

    /* řádek, kolonka */
    SourceInfo src_info;
} Token;

```

Lexer funguje velice jednoduše: ověřuje současný znak, a podle něj určuje, jak to má pokračovat. Např. pokud slovo začíná na číslici, zřejmě se jedná o číslo.

```

Token next_token(Lexer *self) {
    /* přeskočit bílé znaky */
    find_begin_of_data(self);

    if (at_eof(self)) {
        return token_eof;
    } else if (is_digit(self->ch)) {
        return integer(self);
    } else if (is_identifier(self->ch)) {
        return identifier(self);
    } else if (is_operator(self->ch)) {
        return operator(self);
    } else if (self->ch == '"') {
        return string(self);
    }

    return invalid(self);
}

```

Ukázka funkce `integer()`, která lexuje číslo. Na stejným principu jsou založené ostatní.

```

Token integer(Lexer *self) {
    Token tok = new_token(TOKEN_INTEGER);

    while (!at_eof(self) && /* jestli lexer není na konci kódu */
        !is_ws(self->ch) && /* jestli aktuální znak není bílý znak */
        !is_operator(self->ch)) /* jestli aktuální znak není operátor */
    {
        /* jestli jsme našli, znak který není číslici,
        * číslo není ve validní formě
        */
        if (!is_digit(self->ch)) {
            tok.valid = false;
        }

        /* získat další znak */
        advance(self);
        ++tok.len;
    }

    return tok;
}

```

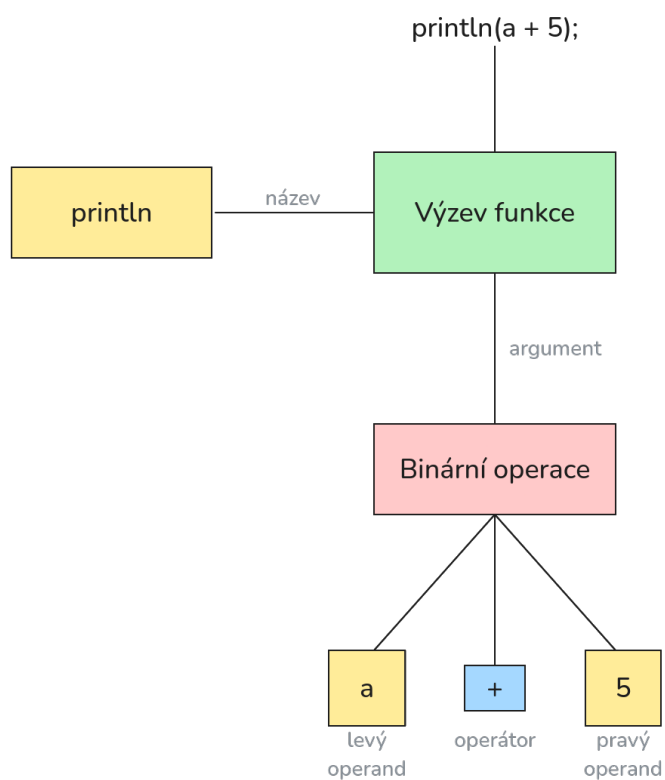
Ve výsledku, lexer vrátí pole tokenů, které pak bude potřebovat parser.

Parser

Parser vytvoří tzv. **syntaktický strom** (dále AST, z anglického *abstract syntax tree*).

AST je stromová datová struktura, kde každý uzel vysokoúrovňově reprezentuje určitou část kódu.

Například, výraz `println(a + 5)` jde reprezentovat jako uzel `BinaryOp`, který reprezentuje binární operaci. On by měl dva uzly - levý operand a pravý operand - a pak znak operátoru.



Obrázek 1: Ukázka AST

Uzel ve stromu je reprezentován strukturou `AstNode`:

```
typedef enum AstNodeKind {
    AST_NODE_INTEGER,
    AST_NODE_STRING,
    AST_NODE_BINARY,
    ...
} AstNodeKind;

typedef struct AstNode {
    AstNodeKind kind;
    Token tok;

    /* anonymní union */
    union {
        union {
            int64_t i;

            /* StrBuf je abstrakce nad char *,
             * která uchovává také jeho délku.
             */
            StrBuf str;
        } literal;

        struct {
            Token op;
            struct AstNode *left;
            struct AstNode *right;
        } binary;

        ...
    };
} AstNode;
```

Tady právě je využita jedna z výhod C11, a konkrétněji **anonymní union** - v některých případech nemá moc smysl uvádět jméno struktury ve struktuře, a tím pádem její členy jako by se vložil do rodičovské struktury, a zároveň kód pak bude čitelnější a kratší.

Parser je **rekurzivní a sestupný**. To znamená, že parsing probíhá odshora dolů, a využívá rekurzi. Každá funkce implementuje jedno z pravidel gramatiky.

Také je to *LL*(1) parser, což znamená kolik tokenů parser zpracovává aby se rozhodnout, o jaké pravidlo se jedná.

Například, tato funkce parsuje binární operace:

```
AstNode *binary(Parser *self, AstNode *left) {
    ParseRule *op_rule = &rules[self->prev->kind];

    AstNode *node = astnode_new(AST_NODE_BINARY);
    node->binary.op = self->prev;
    node->binary.left = left;
    node->binary.right = expression(self, op_rule->prec);

    return node;
}
```

Přitom samotná funkce `binary()` se vyvolává ve funkci `expression()` (která parsuje jakýkoliv výraz), takže je vidět, že se uplatňuje rekurze.

Parsování infixové notace

Monolog používá **infixovou notaci** pro zápis výrazu, kde binární operátory se zapisují mezi operandy.

Ačkoliv člověk na tuto notaci je zvyklý, zpracovávat infixové výrazy pro stroj není jednoduchý kvůli závorkám, prioritě operátoru a asociativitě.

Pro tento problem existuje spousta řešení. Jedno z populárních je převést výraz do **postfixové notace** (také známá jako *reverzní polská notace* neboli RPN), když nejdřív následují operandy, a až pak operátor.

Výhodou RPN je, že nevyžaduje závorky (priorita operátorů se vyjadřuje samotným zápisem výrazu).

Populární algoritmus pro konvertaci infixové notace do postfixové je **shunting yard algoritmus**, vyvinutý nizozemským informatikem Edsgerem Dijkstrou.

Podstatou tohoto algoritmu je, že on má výstupnou frontu, do které vkládá čísla nebo operátory, a svůj vlastní zásobník, ve kterém dočasně uchovává operátory než je vloží do výstupní fronty.

Prattův parser

Existuje ale podobný algoritmus, zvaný **prattův parser**. On je podobný shunting yard tím, že je také založený na zásobníku, ale místo vlastního používá zásobník jazyka, ve kterém je implementován, takže je rekurzivní.¹

Díky tomu, tento algoritmus je snazší implementovat.

Popis Prattův parser funguje tak, že každý token může mít přiřazené dvě funkce (parsovací pravidla):

- **prefix()** - začátek výrazu - literály, jména, unární operátory
- **infix()** - uprostřed výrazu - binární operátory, suffixové, atd.

Dále každý token má definovaný úroveň přednosti (v anglické literatuře se používá pojem **binding power** - vázací síla), a je reprezentován jako číslo. Například, literály a názvy mají přednost 0, sčítací a odčítací operátory mají 1, a operátor násobení a dělení mají 2.

Úroveň přednosti dovoluje určit, kde se parser má zastavit a vrátit řízení předchozí funkce v místě volání.

Definujeme funkci **pratt(min_precedence)**, kde **min_precedence** definuje počáteční a minimální úroveň přednosti, a obecně prattův parser lze popsat takto:

1. Když parser začíná parsovat výraz, on vyvolá tuto funkci jako **pratt(0)**;
2. Vezme první token, a vyvolá spojenou prefixovou funkci.
3. Ve smyčce:
 1. Vezme další token
 2. Pokud další token má související infixovou funkci, a má vyšší prioritu než **min_precedence**, vyvolá jeho infixovou funkci.
 3. Pokud token nemá definované infixové pravidlo nebo má nižší prioritu, vrátí výsledek (levá část výrazu).

Implementace Parsování výrazu začíná ve funkci **prefix()**:

```
AstNode *prefix(Parser *self, PrecedenceLevel min_prec) {
    ParseRule *prefix_rule = &rules[self->curr->kind];

    if (!prefix_rule->prefix) {
        /* token, který se nemůže vyskytovat ve výrazech */
    }

    AstNode *left = prefix_rule->prefix(self);
    ParseRule *suffix_rule = &rules[self->curr->kind];

    /* parsování suffixových operátorů */
    while (suffix_rule->suffix && suffix_rule->prec == PREC_SUFFIX) {
```

¹avšak ve skutečnosti toto není hlavní rozdíl, a prattův parser jde charakterizovat spíš jako LL parser, zatímco shunting yard jako LR parser. Navíc shunting yard je nejspíš parser s předností operátorů, než rekurzivní sestupný.


```

    left = suffix_rule->suffix(self, left);

    suffix_rule = &rules[self->curr->kind];
}

/* parsování infixových operátorů */
while (rules[self->curr->kind].prec > min_prec) {
    ParseRule *infix_rule = &rules[self->curr->kind];

    if (!infix_rule->infix) {
        break;
    }

    left = infix_rule->infix(self, left);
}

return left;
}

```

Protože Monolog podporuje také postfixové (sufixové) operátory, je tu také cyklus pro jejich parsování.

ParseRule je struktura, která obsahuje ukazatele na funkce, které určí jak token má být parsován:

```

/* Priority jsou uvedeny vzestupně */
typedef enum PrecedenceLevel {
    PREC_NONE,          /* příkazy, deklarace, literály */
    PREC_ASSIGN,        /* = */
    PREC_OR,            /* || */
    PREC_AND,           /* && */
    PREC_EQUALITY,      /* == != */
    PREC_INEQUALITY,    /* < <= > >= */
    PREC_ADD,           /* + - */
    PREC_MUL,           /* * / % */
    PREC_PREFIX,        /* + - ! # $ * ++ -- */
    PREC_SUFFIX         /* ++ -- ( ) [] */
} PrecedenceLevel;

typedef struct ParseRule {
    AstNode *(*prefix)(Parser *self);
    AstNode *(*infix)(Parser *self, AstNode *left);
    AstNode *(*suffix)(Parser *self, AstNode *left);

    /* priorita (vázací síla) */
    PrecedenceLevel prec;
} ParseRule;

```

Tyto funkce mohou vyvolávat funkci `prefix()`, která byla uvedena výše.

Jinak ostatní gramatické pravidla, jako třeba příkazy, parsuje bez čehokoli pozoruhodného. Pro úplnost, takto vypadá funkce pro parsování příkazu `if`:

```

AstNode *if_statement(Parser *self) {
    AstNode *stmt = astnode_new(AST_NODE_IF);

    /* wrapped_expression() parsuje výraz, uzavřený v závorkách. */
    AstNode *cond = wrapped_expression(self);

    if (cond->kind == AST_NODE_ERROR) {
        /* funkce sync() bude popsána v další sekci */
    }
}

```

```

        sync(self, SYNC_TO_SEMICOLON_KEEP | SYNC_TO_BLOCK | SYNC_TO_STATEMENT);
    }

    AstNode *body = statement(self);

    if (body->kind == AST_NODE_ERROR) {
        sync(
            self, SYNC_TO_SEMICOLON_SKIP | SYNC_TO_RBRACE_SKIP | SYNC_TO_BLOCK |
                SYNC_TO_STATEMENT
        );
    }

    stmt->kw_if.cond = cond;
    stmt->kw_if.body = body;

    /* match() ověří aktuální token */
    if (match(self, TOKEN_ELSE)) {
        advance(self);

        stmt->kw_if.else_body = statement(self);
    }

    return stmt;
}

```

Zotavení z chyby

Ne vždy vstup je syntakticky správně, proto robustní parser by měl vyjednat s možnými chybami, a přitom proparsovat co nejvíc správného kódu.

Proces, když parser se ocitl v chybovém stavu a snaží se najít bod (token), ve kterém dal může pokračovat, nazývá se **zotavení z chyby**.

Parser jsem snažil napsat tak, aby i když se vyskytla chyba, on proparsoval co nejvíc jak je to možné. Přitom chybové výrazy a tokeny jsou také částí AST (jejích konstanta druhu je `AST_NODE_ERROR`).

Jaké body se považují za “bezpečné”, závisí od kontextu (co konkrétně teď se parsuje). Ale celkem, tyto tokeny jsou považovány jako bezpečné:

- Příkazy jako `if`, `else`, `while`, `for`, `break`, `continue`, `return`.
- Blok `{`.
- Názvy typu: `int`, `void`, `string`, seznamy `([])`.
- Středník `;`.
- Konec bloku `}`.
- Konec závorky `)`.
- Čárka `,`.

Pro obnovení z chyby slouží funkce `sync()`. Tato funkce bude ignorovat další tokeny, dokud se neobjeví token, který je bezpečný:

```

static void sync(Parser *self, unsigned modes) {
    while (!match(self, TOKEN_EOF)) {
        if (modes & SYNC_TO_SEMICOLON_KEEP && match(self, TOKEN_SEMICOLON)) {
            break;
        }

        if (modes & SYNC_TO_SEMICOLON_SKIP &&
            match_prev(self, TOKEN_SEMICOLON)) {
            break;
        }
    }
}

```

```

    }

    ...

    if (modes & SYNC_TO_STATEMENT) {
        switch (self->curr->kind) {
            case TOKEN_IF:
            case TOKEN_FOR:
            case TOKEN_WHILE:
            case TOKEN_INT:
            case TOKEN_STRING:
            case TOKEN_VOID:
            case TOKEN_RETURN:
            case TOKEN_BREAK:
            case TOKEN_CONTINUE:
            case TOKEN_LBRACKET:
                return;
            default:
                break;
        }
    }

    advance(self);
}
}

```

Pro specifikaci tokenů, u kterých funkce se má zastavit, slouží enumerace `SyncMode`:

```

typedef enum SyncMode {
    SYNC_TO_SEMICOLON_KEEP = (1u << 0),
    SYNC_TO_SEMICOLON_SKIP = (1u << 1),
    SYNC_TO_RBRACE_KEEP = (1u << 2),
    SYNC_TO_RBRACE_SKIP = (1u << 3),
    SYNC_TO_LPAREN_KEEP = (1u << 4),
    SYNC_TO_LPAREN_SKIP = (1u << 5),
    SYNC_TO_RBRACKET_KEEP = (1u << 6),
    SYNC_TO_RBRACKET_SKIP = (1u << 7),
    SYNC_TO_COMMA_KEEP = (1u << 8),
    SYNC_TO_BLOCK = (1u << 9),
    SYNC_TO_STATEMENT = (1u << 10),
} SyncMode;

```

Sémantická analýza

Parser je schopen zachytit jenom syntaktické chyby. Ale sémantické těžko.

Sémantická analýza zahrnuje předcházení těmto situacím:

- Přiřazení hodnoty typu, který není shodný s typem destinace (proměnné, prvek v seznamu/řetězci).
- Při deklaraci seznamu počáteční rozměr je není kládný.
- Nesprávná kombinace typů operandů a daného operátoru.
- Opakovací parametry u konkrétní funkci.
- Výsledek podmínky u příkazu `if`, `while` a `for` není celočíselný.
- Použití `break` a `continue` mimo cyklus.
- Použití `return` mimo funkci.
- Návrátová hodnota u `return`, typ které není shodný s návratovým typem funkce.
- Použití nedeklarované proměnné nebo funkce.

- Redeklarace funkce.
- Deklarace funkce uvnitř jiné funkce.
- Neshodný počet argumentů s počtem parametrů u vyvolávané funkce.
- Špatný typ argumentů.
- Hodnota indexu není celočíselná.
- Pokus změnit hodnotu výrazu (je to možné jen u proměnných a prvku seznamu/řetězců).
- Neindexovatelný výraz.
- Deklarace proměnné jako `void`.

Sémantická analýza probíhá také rekurzivním způsobem a není celkem pozoruhodná.

Interpretátor

Pokud parsování a sémantická analýza proběhly úspěšně, je na čase konečně vykonat kód.

Interpretátor je implementován tak, že on prochází syntaktickým stromem (je to tzv. **tree-walk interpreter**), a pro každý uzel má odpovídající vykonávací funkci.

Díky předchozímu kroku, sémantické analýze, kód interpretátoru lze výrazně zjednodušit, protože je třeba brát v úvahu méně chybových a nejednoznačných situací.

Vykonávání probíhá také rekurzivně - funkce začínají na slovo `exec` a většina z nich implementuje nějaké gramatické pravidlo.

Správa proměnných, funkcí a dalších informací

Pro uchovávání proměnných a dalších věcí, sémantický analyzátor interpretátor používá strukturu `Environment`:

```
typedef struct Environment {
    /* Vector je datová struktura, která implementuje dynamické pole.
     * HashMap je datová struktura, implementující hašovací tabulku
     */

    Vector scopes; /* Vector<Scope> */
    HashMap funcs; /* HashMap<char *, Function *> */
    Scope *global_scope;
    Scope *caller_scope;
    Scope *curr_scope;
    Scope *old_scope;
    Function *curr_fn;
    Function *old_fn;
} Environment;
```

Rozsahy platnosti a životnosti jsou reprezentovány strukturou `Scope`:

```
typedef struct Scope {
    /* proměnné */
    HashMap vars; /* HashMap<char *, Variable *> */
    /* trvalé hodnoty */
    Vector values; /* Vector<Value *> */
    /* řetězce */
    Vector strings; /* Vector<StrBuf *> */
    /* seznamy */
    Vector lists; /* Vector<Vector<Value> *> */
} Scope;
```

Každý `Scope` obsahuje alokované proměnné, řetězce, seznamy a trvalé hodnoty pro volitelné typy.

Hodnoty, ať používané rovnou ve výrazech nebo uchovávané v proměnných, jsou reprezentovány strukturou `Value`:

```
typedef struct Value {
    /* Typ hodnoty */
    Type *type;

    /* Scope, kde hodnota byla vytvořena */
    Scope *scope;

    union {
        Int i;
        /* Ukazatel na řetězec, alokovaný uvnitř Scope */
        StrBuf *s;

        struct {
            /* Ukazatel na seznam, alokovaný uvnitř Scope */
            Vector *values; /* Vector<Value> */
        } list;

        struct {
            /* Ukazatel na trvalou hodnotu, alokovanou uvnitř Scope */
            struct Value *val;
        } opt;
    };
} Value;
```

Typový systém

Oba sémantický analyzátor a interpretátor potřebují mít přehled o použitých typech v programu.

Typy jsou reprezentovány strukturou Type:

```
typedef enum TypeId {
    TYPE_ERROR,
    TYPE_INT,
    TYPE_STRING,
    TYPE_VOID,
    TYPE_LIST,
    TYPE_OPTION,
    TYPE_NIL
} TypeId;

typedef struct Type {
    TypeId id;
    char *name;

    union {
        struct {
            struct Type *type;
        } opt_type;

        struct {
            struct Type *type;
        } list_type;
    };
} Type;
```

Kdyby Monolog obsahoval jenom primitivní typy, typy šlo by uchovávat staticky. Ale jelikož Monolog obsahuje i složené datové typy, je potřeba uchovávat typy dynamicky a mít způsob nacházet nutný po jménu.

Na to slouží struktura `TypeSystem`, která je zodpovědná za správu typu:

```
typedef struct TypeSystem {
    HashMap types; /* HashMap<char *, Type *> */
    Vector type_names; /* Vector<char *> */

    /* Základní typy jsou předalokovány */
    Type *builtin_int;
    Type *builtin_string;
    Type *builtin_void;
    Type *opt_type;
    Type *error_type;
    Type *nil_type;
} TypeSystem;
```

Implementace hašovací tabulky

Implementace hašovací tabulky je velice jednoduchá, ale postačující.

Hašovací tabulka neuchovává nic. Klíče jsou ukazatele na `char`, data jsou ukazatele na libovolná data (`void *`).

Jako hašovací funkci používá **FNV-1a**. Výhodou tyto funkce je, že je velice jednoduchá k implementaci, a má celkem dobré vlastnosti (kromě kryptografických, ale to je jedno pro tento projekt).

Pro řešení kolizi používá linear probing (*lineární zkoušení*), když algoritmus prochází celou tabulkou, dokud nenajde prvek/místo pro vložení.

Limitace a možná vylepšení

Monolog je hračkářský jazyk, proto ve srovnání se skutečnými jazyky, není moc užitečný.

- Zápis `[T, počáteční_rozměr]` nefunguje u vložených seznamů z důvodu zachovat kód interpretátora jednodušší.
- Garbage collection je velice primitivní a není moc efektivní. Lepší je přidat např. **reference counting**, aby data se uvolňovaly když už se nepoužívají.
- Pro zjednodušení kódu, správa pamětí není efektivní - mnoho se používá funkce `malloc()`. Většinu věcí je lepší předalokovat ve velkém poli, aby zmenšit fragmentaci pamětí a zvýšit výkon (datové struktury jako **memory pool** nebo **arena**).
- Když alokace nějaké pamětí nebude úspěšná, interpretátor hned ukončí. Velice to zjednodušuje kód a pro hračkářský jazyk je to jedno.
- Interpretátor není odolný vůči přetečení zásobníku, když třeba vykonává rekurzivní funkce.
- Escape sekvence nejsou podporovány, ale jde místo toho použít funkci `chr()`.
- Podpora jiných znaků kromě ASCII není dokonalá.

Appendix A

Gramatika

Zde je uvedený úplný popis gramatiky Monologu. Používá **dialekt EBNF**, vyvinutý konsorciem W3C.

```

expression ::= literal | identifier | nil | binary | unary |
              suffix | subscript | grouping | function-call

literal      ::= integer-literal | string-literal
integer-literal ::= [0-9]+
string-literal ::= ''' char '''
char         ::= /* jakýkoliv Unicode znak */

identifier ::= ([a-zA-Z] | '_' ) ([a-zA-Z] | '_' | [0-9]) *
nil         ::= 'nil'

binary      ::= expression binary-op expression
binary-op   ::= '+' | '-' | '*' | '/' | '%' | '<' | '>' | '=' | '+=' |
              '-=' | '#=' | '<=' | '>=' | '==' | '!=' | '&&' | '||'

unary       ::= unary-op expression
unary-op    ::= '-' | '+' | '*' | '!' | '#' | '$' | '++' | '--'

suffix      ::= expression suffix-op
suffix-op   ::= '++' | '--'

subscript   ::= '[' expression ']'
grouping    ::= '(' expression ')'

statement-separated ::= (variable-declaration | return-statement |
                        break-statement | continue-statement | expression) ';'

statement ::= if-statement | while-statement | for-statement |
            statement-separated | function-declaration | block-statement

type-specifier ::= int-type | string-type | void-type | option-type | list-type
int-type       ::= 'int'
string-type    ::= 'string'
void-type      ::= 'void'
option-type    ::= type-specifier '?'
list-type      ::= '[' type-specifier (',' , expression)? ']'

if-statement  ::= 'if' '(' expression ')' statement? else-statement?
else-statement ::= 'else' statement?

while-statement ::= 'while' '(' expression ')' statement?

for-statement ::= 'for' '(' init-clause? ';' condition? ';' iter-expr? ')' statement?
init-clause   ::= expression | variable-declaration
condition     ::= expression
iter-expr     ::= expression

return-statement ::= 'return' expression?
break-statement  ::= 'break'
continue-statement ::= 'continue'

```

```
variable-declaration ::= type-specifier identifier ('=' expression)? ';'

function-declaration ::= type-specifier identifier '(' param-decl-list ')' statement
param-decl           ::= type-specifier identifier
param-decl-list      ::= param-decl ','? | (param-decl ',')+ param-decl ','?

function-call ::= identifier '(' arg-list ')'
arg-list      ::= expression ','? | (expression ',')+ expression ','?

block-statement ::= '{' statement* '}'
```