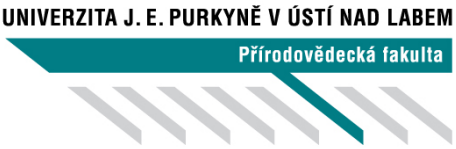
Univerzita Jana Evangelisty Purkyně
v Ústí nad Labem
Přírodovědecká fakulta



Tacit programming - návrh doménově specifického jazyka a implementace jeho interpretu

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Oleg Musijenko

Vedoucí práce: Mgr. Jiří Fišer, Ph.D.

Studijní program: Aplikovaná informatika

Studijní obor: Informační systémy

Ústí nad Labem 2023

Cíl bakalářské práce

Cílem bakalářské práce je ukázat výhody a nevýhody tacit přístupu k programování. Výstupem práce bude návrh vlastního doménově specifického jazyka (DSL), který bude využívat tacit programming, a navazující pilotní implementace jeho interpretu. Návrh jazyka by se měl soustředit na následující body:

• přehledná syntaxe,
• možnosti použití vysokoúrovňových nástrojů pro překlad a podporu běhu programu (např. LLVM v Haskellu) včetně parsování jazyka (např. Parsec v Haskellu),
• efektivita při vykonávaní,
• případná podpora paralelních výpočtů

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v přiloženém seznamu literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., ve znění zákona č. 81/2005 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona,s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

V Ústí nad Labem dne 6. srpna 2023 Podpis:

Děkuji vedoucímu práce Mgr. Jiřímu Fišerovi, Ph.D.
za neocenitelné rady a pomoc při tvorbě bakalářské práce.

Abstrakt

Tacit programming - návrh doménově specifického jazyka a implementace jeho interpretu

Klíčová slova

Abstract

Tacit programming - design of a domain specific language and implementation of it's interpreter

Translation of Czech abstract.

Key words

Translation of czech key words.

Obsah

Úvod

Programovací paradigma je způsob myšlení a přístupu k návrhu, strukturování a implementaci počítačových programů. Definuje sadu pravidel, postupů, technik a konceptů, které určují způsob, jakým se programy píší a organizují. Paradigma poskytuje rámec pro definici a řešení problémů v programování.

Některé z nejznámějších programovacích paradigmat zahrnují:

0.1 Procedurální paradigma

Zaměřuje se na sekvenci instrukcí, které jsou vykonávány postupně. Program je rozdělen na procedury a funkce, které provádějí určité operace. Příkladem takového paradigmatu je jazyk C, GOlang a Assembly. Zde se programátoři často setkávají s nutností manuální správou paměti (*malloc*, *free*).

0.2 Objektově orientované paradigma - OOP

Klade důraz na objekty a jejich interakce. Program je strukturován kolem tříd, které obsahují data (atributy) a metody (funkce), které s těmito daty pracují. Toto paradigma je obohaceno o **polymorfismus**. Vývojáři si mohou OOP představit jako nadmonžinu Procedurálního paradigmatu.

V závislosti na programovacím jazyce, vývojáři mohou vužívat automatickou správu paměti díky *garbage collectoru*, kde tuto správu paměti vužívají C# a Java. Pokud je zapotřebí manuální správa paměti, je zde C nebo Rust. Rust je zajímavý tím, že využívá *borrow checker* a má napodobit chování smart pointerů.

0.3 Funkcionální paradigma - FP

Jedná se o deklarativní způsob programování, kde funkce jsou považovány za základní stavební bloky programu. Funkcionální jazyky mají za cíl minimalizovat mutaci dat a preferovat neměnné *immutable* struktury. To přispívá ke stabilitě, zjednodušené paralelizaci a eliminaci některých typů chyb. Jazyky jako Lisp a jeho dialekty, oCaml, Closure, F# a Haskell jsou běžnými příklady funkcioního programování.

V jednotlivých funkcionálních jazycích je povolena různá míra mutace dat. Například jazyk F# umožňuje mutaci dat kdekoli v programu, což je částečně záměrem, aby oslovil uživatele jazyka C#. Na druhou stranu, v jazyce Haskell jsou mutace omezeny v IO monádě a data musí být uloženy ve specifických typech jako IORef, STRef nebo MVar. Takto Haskell pomáhá udržet jasnou separaci mezi čistým funkcionalním kódem a kódem, který se zabývá měnícím se stavem nebo interakcí s okolím.

Je důležité si uvědomit, že míra povolené mutace dat se může lišit mezi jednotlivými funkcionálními jazyky a je závislá na jejich návrhu a filozofii. Každý jazyk si volí kompromis mezi funkcionalitou a striktností v oblasti mutace, aby splňoval požadavky svých uživatelů a cílů, které si klade.

0.4 Cíl práce

Cílem práce je zaměření na *tacit* - ”beztečkové” paradigma a implementovat *Domain Specific Language* s tímto paradigmatem. V práci budou ukázky, jak tacit programming vypadá a budou vyzdvyženy argumenty proč s tacit programmingem vůbec pracovat. Do tohoto paradigmatu spadají jazyky APL rodiny. Ukázky v této práci potvrdí, že jazyky které nebyly primárně navržené jako ”beztečkové” umožňují v tomto stylu psát.

Tato bakalářská práce předpokládá, že čtenář zná základy funkcionálních jazyků a obzvlášť Haskellu, protože návrh je vytvořen v Haskellu pomocí knihoven Parsec.

1 Tacit programming

Tacit programming je programovací styl, který klade důraz na skládání a řetězení funkcí a není založen na explicitní specifikaci parametrů funkcí. Pro základní ukázky bude využit JavaScript jelikož se jedná o jeden z nejpopulárnějších jazyků. Základní principy funkcionálního a tacit programování jsou v jazyce JavaScript, jelikož se jedná o jeden z nejvíce populárních programovacích jazyků a v základu má již funkcionální možnosti. Detailnější principy jsou psány v Haskellu.

```
fetch("APIURL")
.then(x => fancyFunction(x))
.then(x => console.log(x))
.catch(e => console.error(e))
```

Zde se řetězí funkce zpětného volání (”Callbacks”).

Tento postup je běžný u JavasSript programátorů, ale bohužel má jednu malou nevýhodu. Tvoří se zde zbytečná anonymní funkce (”arrow function nebo-li šipková”) a pokud bychom prohlubovali čím dál víc zásobník volání, mohou nám tyto anonymní funkce zabírat paměť a během debuggingu nám tento styl zápisu ”znečišťuje” zásobník volání.

```
fetch("APIURL")
.then(fancyFunction)
.then(console.log)
.catch(console.error)
```

Přepsaná ukázka je logicky ekvivalentní k té předešlé. Zásadní rozdíl je ten, že se nemusí na paměťový zásobník ukládat kontext anonymní funkce a explicitně se nepředávají parametry funkce. Tudíž se jedná o *tacit* zápis.

Následující úryvek ukazuje, jak funguje **currying** a proč souvisí s tacit programováním.

```
const curry = (f) => a => b => f(a,b);
const sayHello = (a, b) = `Hello ${a} from ${b}`;
const applyToFunctionArray = (input,...args) => args.map(a => a(input))
const partiallyAppliedData = ["A", "B", "C"].map(curry(sayHello));
// [(b) => "Hello A from ${b}",
//  (b) => "Hello B from ${b}",
```

```
//  (b) => "Hello C from ${b}"]
const partiallyAppliedData2 = ["A", "B", "C"].map(curry(sayHello)(1));
// ["Hello A from 1",
//  "Hello B from 1",
//  "Hello C from 1"]
```

Curry funkce transfomuje existující funkci tak, že máme pro každý argument vlastní vracející funkci. Z funkce **f(a,b,c,d)** vzniká funkce **f(a)(b)(c)(d)** [1]. V čem je toto výhodné? Například je zde uvedené pole, které se skládá z částečně aplikovaných funkcí. Takto může programátor naiterovat odpověď ze serveru do objektu z předchozí ukázky, které je závislé na třeba na uživatelském vstupu.

Zajímavější část je u *partiallyAppliedData2*. Curryovaná funkce vrací funkci, jež očekává vstupní parametr, aby byla vyhodnocena. Tento princip je důležitý pro lenivé vyhodnocení, který využívá Haskell.

Může zde padnout argument, že v našem případě se curryování nachází pouze pro funkci, která prijímá dva argumenty. Zde je definice funkce, která převádí jakoukoliv funkci na curryovanou.

```
const curry = (f) => (..args) => args.length >= f.length ?
  f.apply(this, args) : (...args2) => curry.apply(this, args.concat(args2));
```

1.1 Principy a odlišnosti od klasického paradigmatu

Procedurální paradigma se zaměřuje na psaní procedurálních instrukcí. Typickým příkladem tohoto paradigmatu je programovací jazyk C, protože se jedná o standard, tak v následujících příkladech budu porovnávat jazyk C s jazykem Haskell. Haskell je primárně funkcionální jazyk, tento jazyk umožňuje psát funkce v ”beztečkovém” stylu.

Následující příklad sumace:

Haskell

```
sumCustom:: (Traversable t, Num a) => t a -> a
sumCustom = foldr (+) 0
```

C

```c
int sum(int* arr, size_t numOfElements)
{
    int acc = 0;

    for(int i = 0; i < numOfElements; i++)
    {
        acc += *(arr + i);
    }

    return acc;
}
```

Na příkladu jde vidět, že beztečkový styl zápisu je opravdu kompaktní. V Haskellu není třeba zasahovat do parametrů funkcí. Tento příklad je založen na podstatě tacit programmingu. Co se týče algoritmizace, tacit programming je známý pro vytváření algoritmických řešení pomocí pouze jednoho řádku kódu.

Na dalším příkladě si ukážeme fibonnacciho posloupnost. **Haskell**

```haskell
-- Haskell je lenivý jazyk a proto je možné vytvořit nekonečnou
-- fibonnacciho posloupnost a z té si vzít jen potřebný počet čísel
fibonacci:: Num a => Int -> [a]
fibonacci = (flip take) fibonacciInfinite
  where
    fibonacciInfinite:: Num a => [a]
    fibonacciInfinite = scanl (+) 0 (1:fibonacciInfinite)
```

C

```c
void fibonacci(int* arr, size_t numOfElements)
{
    if(numOfElements > 0)
    {
      arr[0] = 0;
    }
    if(numOfElements > 1)
    {
      arr[1] = 1;
    }
    for(int i = 2; i < numOfElements; i++)
    {
      arr[i] = arr[i - 1] + arr[i - 2];
    }
}
```

Z pohledu imperativního programátora implementace v C je zcela jasná. Funkce přijímá ukazatel na pole a modifikuje toto pole. Zatímco v Haskellu tato implementace může být matoucí. Funkce scanl je velice podobná funkci foldl, jen místo vracení akumulátoru, tak vrací průběžně vypočtené hodnoty.

1.2 Debugging

Debugging je zásadní činností při vývoji softwaru, která umožňuje identifikovat, analyzovat a odstraňovat chyby ve zdrojovém kódu. Proces debuggování je obzvláště důležitý v imperativních a objektově orientovaných jazycích, které často disponují vyspělými debugovacími nástroji. V těchto jazycích je očekáváno sekvenční vykonávání instrukcí, což usnadňuje postupné sledování jejich provádění. Inspekce zásobníku volání představuje další přirozenou součást debuggingu v těchto jazycích.

V případě lenivého jazyka Haskell však debugging přináší značné obtíže. Haskell využívá mechanismu lenivého vyhodnocování, což znamená, že hodnoty jsou vypočteny až ve chvíli, kdy jsou skutečně potřeba. Tato vlastnost komplikuje proces sledování výpočtu a identifikaci chyb. I přes existenci několika debuggovacích nástrojů pro Haskell může debugging pro zkušeného vývojáře představovat opravdovou výzvu. Zmatek může vznikat zejména při určování, kde a jak byla konkrétní proměnná získána, neboť její hodnota je vypočítána až v okamžiku, kdy je použita.

Naštěstí Haskell nabízí možnost využití REPL (Read - Eval - Print - Loop) prostředí, které umožňuje interaktivní evaluaci výrazů a postupné zkoumání jejich chování. REPL tak může sloužit jako užitečný nástroj pro rychlé testování a experimentování s funkcemi a výrazy. Přítomnost REPL v Haskellu zčásti kompenzuje obtíže spojené s debuggingem a poskytuje prostředí pro analýzu a ladění kódu.

1.3 Rešerše existujících implementací

2 DSL - principy a využití

DSL (Domain Specific Language) jsou jazyky, které se zaměřují na specifickou doménu problematiky. Obecně DSL jazyky jsou mnohem jednodušší než jejich plnohodnotné protějšky. Výhodou je, že náročnost učení je mnohem nižší než u GPL (General Purpose Language). Zároveň při potřebě expertů na specializovaný obor, nepotřebují znát detaily implementace algoritmů, ale místo toho pokud budou mít přístup rovnou k DSL - výpočet šikmosti stěny budovy, hodnota cukrů v krvi pacienta, tak mohou plnit svojí práci o mnohem efektivněji. [2]

2.1 Web a enterprise

Jedním z nejrozšířenejších DSL jazyků je ze světa webu a to **HTML a CSS**. HTML se zaměřuje na vytvoření rámce pro zobrazení textu, zatímco CSS se zaměřuje na stylizaci webu pomocí DOM selectorů. Pravdou je, že pro CSS se nenachází žádný protocol a proto v různých webových enginech, můžete dostat různé výsledky. Příkladem z praxe je zpracování fontů.

Též existují jazyky DSL, které jsou specifické pouze pro jednu dannou enterprise aplikaci, kde její implementace často spočívá na bázi XML nebo podobného formátu jako je např YAML. Zde DSL slouží například pro zjednodušení UI nebo business logiky. Třeba pro porovnání **XAML** pro .NET platformu zjednodušuje logiku, stylizuje UI a zároveň zbavuje potřeby tvoření ”glue” kódu, který je vygenerován automaticky.

2.2 Grafické DSL

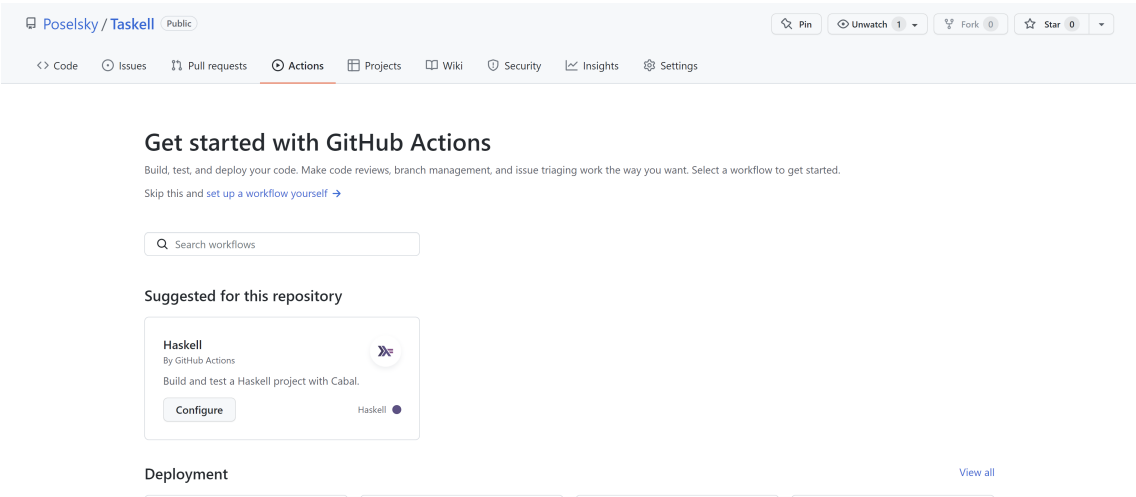
DSL se též týká programů co běží na grafických kartách. Renderovací programy jsou též známé pod pojmem *shader*. Každá grafická knihovna má vlastí DSL jazyk, který jsou velmi podobné jazyku C. Všechny renderovací jazyky prochází takzvanou *graphic pipeline*. OpenGL a Vulkan využívají pro rendering OpengGL Shading Language (GLSL). OpenGL kompiluje GLSL během runtime programu zatímco Vulkan využívá předkompilovaného GLSL bytecode nazývaný SPIRV.

Grafické karty se nevyužívají pouze pro rendering jelikož mají širokou škálu využitelnosti. Třeba *CUDA* vyvinutý firmou NVIDIA využívá dnešní architekturu grafických karet pro paralelní výpočet velkoobjemných dat, kde tuto techniku využívají dnešní algoritmy pro strojové učení.

2.3 Ostatní DSL

Další jazyk který je velice využíván v hardwarovém prostředí je **VHDL** nebo **Verilog**. Tyto DSL jsou zaměřená na simulaci obvodů pomocí FPGA (hradlových polí). Pro kompilaci projektů existuje **makefile** a je nejčastěji spárován s C/C++. Jsou zde DSL pro ”continuous integration and deployment”. Různé firmy co nabízejí online repositáře se v tomto budou trochu lišit, ale většina z nich poskytují jakousi formu automatizace vydání programu do oběhu. Toto poskytují firmy jako je GitHub, GitLab nebo Azure Dev Ops. Na GitHubu pomocí YAMLu se dají sepsat konfigurační soubory na testování a deployment.

Obrázek 2.1: Výstřižek z GitHub Actions



3 Návrh vlastního DSL

Pro návrh DSL je hlavní vědět o jakou doménu problematiky se jedná. Zatím neexistuje žádná DSL implementace pro konkurenci či paralelizaci vysokého objemu dat. Příkladem vysokého počtu dat je vzorek signálu a detailnější zpracování takového vzorku je časově velice náročné. Tato časová náročnost může být vyřešena právě zmíněnou konkurencí, či paralelizací problému. Toto DSL je pojmenované jako **Haskallyzer**. Pro řešení této problematiky byl zvolen Haskell, jelikož se zdá jako nejoptimálnější. Pro rozbor jazyka byly komunitami vytvořené knihovny (Parsec, MegaParse, AttoParsec), obsahuje mechaniky tacit programmingu, je staticky silně typovaný a díky monádám, řešení okrajových případů je snadné.

Návrh danného jazyka:

```
[CompileTime]
{
  let exampleCSV = "example.csv" :
    (a,Int)
    (b,Float)
    (c,String)
}

let exampleConcurrentProcess = exampleCSV | kalmanFilter
                                          | gaussianFilter


let exampleNestedConcurrentProcess = exampleCSV | kalmanFilter | sum
                                                               | product
                                                | gaussianFilter

let exampleGUIMainLoop = mainLoop | calculateMainState -> writeToEventQueue
                                  | gatherEventQueue -> fireEvents
```

3.1 Vysvětlení gramatiky jazyka

Celý proces je závislý na *Template Haskell* mechanismu. Díky tomuto mechanismu jsou k dispozici části kompilátoru, které umožní generovat kód dle specifikace.

Vytvoří se funkce *exampleCSV*, která vrací obsah csv souboru. Při procesu kompilace se provádí kontrola, zda v csv souboru existuje dvojice ”(a, Int)”, kde ”a” představuje název sloupce a všechny hodnoty ve sloupci ”a” jsou typu ”Int”. Díky atributu *CompileTime* je možné vytvořit funkci *exampleCSV* bez nutnosti použití IO monády. Jednou z nevýhod této metody je, že při spuštění programu se zaplní paměť, protože obsah csv souboru je součástí samotného spustitelného programu. Nicméně díky tomu není nutné používat IO monádu a obsah csv souboru je k dispozici kdekoliv v programu.

Funkce *exampleConcurrentProcess* vytvoří funkci typu `IO ([a],[b])` a předpokládá, že v programu jsou definované a implementované funkce `kalmanFilter:: CSV -> [a]` a `gaussianFilter:: CSV -> [a]`. Výsledné IO monádě se nejde vyhnout, jelikož se jedná o konkurentní proces, kde vznikají vlákna v jež jsou provedeny výpočty.

Pro vytvoření konkurentního výpočtu je zapotřebí využít *concurrent pipe compostion* `|` operátoru. Každý další *pipe operátor* vytváří další vlákno na kterém je prováděný výpočet. Celá syntaxe je závislá na odsazení, tudíž všechny *pipe operátory* musí mít stejné odsazení.

Příklad s funkcí `let exampleNestedConcurrentProcess` ukazuje, že *pipe operátory* se dají vnořovat. To znamená, že funkce sum i product musí mít typ `sum:: (Num a, Num b) => [a] -> b`. Výsledná funkce bude vygenerováná jako typ `exampleConcurrentProcess:: (Num a, Num b) => IO((a,b), [c])`.

Poslední příklad s `let exampleGUIMainLoop` poukazuje, že není potřeba využít toto DSL pouze pro analýzu dat, ale i pro definování kritických business části programu. Nedílnou součástí GUI aplikací je *EventQueue*, kde se zaznamenávají všechny interakce uživatele a program může s těmito interakcemi pracovat.

4 Implementace interpretu navrženého DSL

Návrh jakéhokoliv DSL (a nejen DSL, ale i programovacího jazyka celkově) zahrnuje **Lexer, Parser a Abstraktní syntaktický strom (AST)**.

Lexer má zaúkol přečíst soubor a najít jednotlivé tokeny v daném souboru. Tyto tokeny mohou obsahovat metadata, jako jsou řádek a sloupec, kde se token nachází, jaký token předcházel a jaký následuje atd... Tyto tokeny jsou zpracovány **parserem**, který má zaúkol přečíst tokeny a hledat mezi nimi dle předem definované gramatiky vztahy a zpracovat je do abstraktního syntaktického stromu. AST je výsledek parsování a obsahuje všechny definice jazyka.

4.1 Implementace pomocí LLVM

Prvopočáteční implementace zahrnovala využití knihovny LLVM, která má za následek převzít AST a převést tento jazyk do LLVM intermediate representation (IR). Bohužel LLVM se spíše hodí na vytvoření generického programovacího jazyka, než na vytvoření DSL. DSL se dá touto knihovnou vytvořit, ale pro každou vygenerovanou funkci se musí vytvořit binding mezi IR, jazykem C a Haskellem. Toto řešení je rozhodně možné, ale zvyšuje to komplexitu projektu a jednotlivé bindings mohou též být zdrojem nechtěných bugů. Proto se sešlo od implementace pomocí LLVM a místo toho ho nahradil mechanismus Template Haskell.

4.2 Lexer

4.3 Parser

4.4 Abstraktní sysnaktický strom - AST

4.5 Testování

4.6 Template Haskell

5 Ověření použitelnosti (testování funkčnosti, praktické příklady využití)

Abychom si ověřili využití Haskelyzeru, hodil by se nějaký praktický příklad.

5.1 Praktické využití

S rozšiřujícím se kódem a funkcionalitou projektu se zvyšuje obtížnost určení, kde se nachází problém a jak jsou data distribuována v daném systému. Jednou z nejkomplikovanějších výzev při psaní softwaru je jeho škálovatelnost. Haskallyzer má výhodu oproti tradičnímu způsobu psaní kódu v tom, že nejkritičtější části kódu jsou odděleny od business řešení a nabízejí širší pohled na tok dat. To může být z jedním hlavních argumentů, proč toto DSL využí pro větší projekty, protože usnadnuje jeho škálování. Vývojáři mají možnost určit, které části jsou nejdůležitější pro daný cíl a zapsat je do Haskallyzeru.

Konkurence má výhodu v tom, že obecně zvyšuje škálovatelnost softwaru, ale zároveň přináší složitější stav a zvyšuje riziko výskytu chyb. Haskallyzer není pouze DSL pro vnější zápis kritických částí softwaru, ale také umožňuje zápis konkurentních výpočtů v snadno čitelné formě. Tím vzniká určitá forma samo-dokumentace, kterou lze statickým jazykovým analyzátorem například převést do UML zápisu.

6 Závěr

7 Citace

[3] [4]

Bibliografie

Currying partials (2021). Unknown, Open source. URL: https://javascript.info/currying-partials.

Federico, Tomasetti (2021). *Domain Specific Languages*. Itálie, Strumenta S.R.L. URL: https://tomassetti.me/domain-specific-languages/.

Katuščák, Dušan, Barbora Drobíková a Richard Papík (2008). *Jak psát závěrečné a kvalifikační práce. jak psát bakalářské práce, diplomové práce, dizertační práce, specializační práce, habilitační práce, seminární a ročníkové práce, práce studentské vědecké a odborné činnosti, jak vytvořit bibliografické citace a odkazy a citovat tradiční a elektronické dokumenty*. Nitra: Enigma. ISBN: 978-80-89132-70-6.

Lattner, Chris (2008). *Intro to LLVM*. Erice, Sicily: Chris Lattner. URL: https://llvm.org/pubs/2008-10-04-ACAT-LLVM-Intro.pdf.