

MASARYKOVA UNIVERZITA
FAKULTA INFORMATIKY



Studie nástrojů pro trasování a testování programů v Javě

BAKALÁRSKA PRÁCA

Matej Majdiš

Brno, 2015

Prehlásenie

Prehlasujem, že táto bakalárska práca je mojím pôvodným autorským dielom, ktoré som vypracoval samostatne. Všetky zdroje, pramene a literatúru, ktoré som pri vypracovaní používal alebo z nich čerpal, v práci riadne citujem s uvedením úplného odkazu na príslušný zdroj.

Vedúci práce: RNDr. Adam Rambousek

Zhrnutie

Cieľom tejto práce je analýza vlastností, spolu s implementáciou súboru príkladov pre nástroje, *Byteman* a *Javassist*. Teoretická časť charakterizuje bajtkód, *Java Virtual Machine (JVM)*, načítavanie tried pomocou zavádzačov a dôležité vlastnosti spomínaných nástrojov. Praktická časť zahŕňa ukážky príkladov, ktoré demonštrujú funkcionality nástrojov v rôznych oblastiach vývoja a testovania softvéru.

Kľúčové slová

Byteman, Javassist, bajtkód, JVM, Java Virtual Machine, modifikácia, class-loader, zavádzač tried

Pod'akovanie

TODO...

Obsah

1	Úvod	3
2	Bajtkód	5
2.1	Štruktúra <i>class</i> súboru	5
2.1.1	Reprezentácia dátových typov	7
2.1.2	Premenné tried a inštancií	8
2.1.3	Metódy	9
2.1.4	Atribúty	10
2.2	Inštrukcie JVM	10
2.2.1	Dátové typy	11
2.2.2	Architektúra a inštrukčná sada	11
3	Zavádzače tried	14
3.0.3	Dynamické načítavanie tried	14
3.0.4	Znovunačítanie triedy	14
4	Byteman	16
4.1	Byteman Agent	16
4.2	Štruktúra jazyka pravidiel	17
4.2.1	Udalosti	17
4.2.2	Závislosti	18
4.2.3	Výrazy	19
4.2.4	Akcie	19
4.3	Použitie	19
5	Javassist	21
5.1	Modifikácie	22
5.1.1	Rozhranie pre prácu s bajtkódom	22
5.2	Zápis do <i>class</i> súboru	22
6	Porovnanie	23
6.1	Vlastnosti nástroja Byteman	23
6.2	Vlastnosti knižnice Javassist	23
6.3	Zhrnutie	24
7	Praktické ukážky	25
7.1	Detekcia volania výnimiek	25
7.2	Detekcia nesprávneho ošetrenia výnimiek	27

7.2.1	Štruktúra a funkčná logika aplikácie	28
7.2.2	Testovacie príklady	29
7.3	<i>Zlepšenie a zprehl'adnenie produkčného kódu</i>	30
7.3.1	Štruktúra a funkčná logika aplikácie	30
7.3.2	Testovací príklad	31
7.4	<i>Optimalizácia neefektívnych častí kódu</i>	32
7.4.1	Štruktúra a funkčná logika aplikácie	33
8	Záver	36
	Literatúra	37
A	Tabuľky	38
B	Obsah CD	44

Kapitola 1

Úvod

Java je v súčasnosti jedným z najpoužívanějších programovacích jazykov. Od syntakticky veľmi podobných jazykov, ako napríklad C++, alebo C# sa líši prekladom zdrojových tried do medzikódu, často označovaného ako bajtkód (*bytecode*, *p-code*, *portable code*).

Preklad a spustenie aplikácie v Jave štandardne prebieha v niekoľkých nasledujúcich fázach:

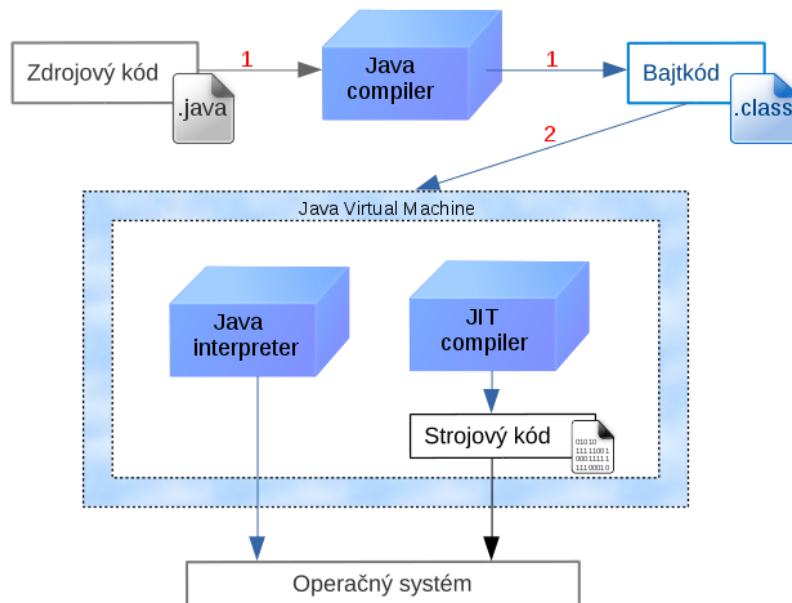
1. Preklad do medzikódu: Prekladač ¹ kompiluje zdrojový kód do bajtkódu. V praxi to znamená, že každej triede, prípadne rozhraniu, je priradený súbor *class*, ktorý obsahuje najmä inštrukcie popisujúce jej vlastnosti a funkcionality.
2. Načítanie a Interpretácia: Virtuálny stroj Javy (ďalej len JVM ²) načíta inštrukcie *class* súboru potrebnej triedy, ktoré ďalej spracúva jedným z nasledujúcich spôsobov:
 - JIT prekladač (*Just In Time compiler*): Štandardne je z bajtkódu najskôr vygenerovaný strojový kód (*machine code*) konkrétneho zariadenia (platformy), ktorý je následne interpretovaný, teda priamo vykonávaný procesorom.
 - Java interpret: Ďalším spôsobom spracovania bajtkódu je využitie interpreta jazyka Java, ktorý bajtkód ihneď spracováva a sám interpretuje.

Výhodou prekladu do bajtkódu je prenosnosť výsledných aplikácií. Samotný bajtkód je platformovo nezávislý. Program preto nie je nutné nijako prispôbovať jednotlivým operačným systémom, ktoré sa líšia výhradne v implementácii JVM.

1. Najčastejšie využívaným prekladačom je *javac*, ktorý je súčasťou JDK (Java Development Kit - súbor nástrojov určený na vývoj aplikácií pre platformu Java).

2. Java Virtual Machine, špecifikácia je dostupná na <http://docs.oracle.com/javase/specs/jvms/se7/html>

Class súbory obsahujúce bajtkód je možné modifikovať. Triedy a rozhrania danej aplikácie, uložené v týchto súboroch, podľa potreby načítava JVM. Vkladanie nových metód a tried na úrovni bajtkódu, pred načítaním *class* súboru do JVM, sa nazýva injekcia bajtkódu (*bytecode injection*, ďalej len BI). Pridávanie novej funkcionality pomocou BI, bez nutnosti zastavenia behu programu, je často využívané pri testovaní a trasovaní programov.



Obr. 1.1: Grafické znázornenie prekladu a spustenia programu, zdroj: vlastné spracovanie

Táto práca sa zaoberá popisom vlastností a implementáciou niekoľkých príkladov používajúcich nástroje na modifikáciu *class* súborov. Konkrétne nástroje spomínané a používané v tejto práci sú *Byteman* a *Javassist*.

Dokument sa skladá z dvoch logických celkov. Kapitoly dva až päť tvoria teoretickú časť, ktorá popisuje bajtkód, *Java Virtual Machine*, zavádzače tried, vlastnosti samotných nástrojov *Byteman* a *Javassist*. Šiesta kapitola spomínané nástroje porovnáva.

Kapitola sedem sa venuje praktickým ukážkam, ktoré boli vytvorené v rámci bakalárskej práce. Podkapitoly sa zaoberajú príkladmi, ktoré pokrývajú oblasti detekcie volania výnimiek, detekcie nesprávne ošetrených výnimiek, zlepšenia produkčného kódu a optimalizácie neefektívnych častí kódu. Každá z ukážok demonštruje funkcionality jedného zo spomínaných nástrojov.

Kapitola 2

Bajtkód

Po preklade zdrojových kódov prekladačom *javac* je každej triede, prípadne rozhraniu programu, priradený jeden *class* súbor, popisujúci jej vlastnosti a funkcionality.

Pri načítaní *class* súboru prijme JVM takzvaný prúd inštrukcií bajtkódu (*bytecode stream*) pre každú metódu triedy. V prípade volania konkrétnej metódy za behu programu, sú inštrukcie danej metódy vykonávané. Každá z nich je reprezentovaná číselnou hodnotou, nazývanou *opcode*. Zároveň má každá inštrukcia aj textovú podobu (*mnemonic*). V *class* súboroch sú uložené v numerickej podobe.

Táto kapitola popisuje základný formát *class* súboru a následne stručne charakterizuje inštrukčnú sadu bajtkódu.¹

2.1 Štruktúra *class* súboru

Class súbor vždy pozostáva z jedinej štruktúry *ClassFile*. Táto štruktúra jednoznačne identifikuje konkrétnu triedu, prípadne rozhranie, definuje jej premenné a metódy.

Nasledujúci popis definuje sadu dátových typov použitých v texte. Typy *u1*, *u2*, a *u4* reprezentujú neznamienkové jedno, dvoj, alebo štvor-bajtové číslo. Pre znázornenie *class* súboru je použitá pseudo-štruktúra notácie jazyka C. Obsah štruktúry je popísaný ako zoznam po sebe nasledujúcich položiek.

Formát *ClassFile* štruktúry

```
ClassFile {  
    u4 magic;  
    u2 minor_version;  
    u2 major_version;  
    u2 constant_pool_count;  
    cp_info constant_pool[constant_pool_count-1];  
}
```

1. Nasledujúci text vychádza zo 4. až 6. kapitoly špecifikácie JVM [LYBB13].

```

u2 access_flags;
u2 this_class;
u2 super_class;
u2 interfaces_count;
u2 interfaces[interfaces_count];
u2 fields_count;
field_info fields[fields_count];
u2 methods_count;
method_info methods[methods_count];
u2 attributes_count;
attribute_info attributes[attributes_count];
}

```

Konštanta *magic* identifikuje formát súboru *class*, jej hodnota je 0xCA-FEBABE.

Položky *minor_version* a *major_version* určujú verziu *class* súboru. Napríklad *minor_version* s hodnotou *m* a *major_version* s hodnotou *M* indikujú verziu s hodnotou *M.m*.

Hodnota položky *constant_pool_count* je rovná počtu záznamov v *constant_pool[]* plus jeden.

Úložisko záznamov *constant_pool[]* (v podobe poľa štruktúr) zahŕňa rôzne konštanty: mená tried, mená rozhraní, názvy premenných a iné. Každý záznam poľa sa skladá zo značky (*tag*) a indexu (*name_index*). Značka určuje typ záznamu. Tabuľka značiek je uvedená v prílohe A.1. Pomocou unikátneho indexu je možné odkazovať sa na záznamy v ďalších častiach bajtkódu. Existuje niekoľko typov štruktúr² reprezentujúcich rôzne druhy záznamov. Napríklad štruktúra *CONSTANT_String_info* reprezentuje objekty typu *String*, zatiaľ čo štruktúry *CONSTANT_Methodref_info* a *CONSTANT_InterfaceMethodref_info* reprezentujú metódy aktuálnej triedy.

Hodnota *access_flags* popisuje oprávnenia prístupu k informáciám a vlastnosti tejto triedy pomocou indikátorov. Napríklad nastavenie indikátora *ACC_INTERFACE* znamená, že *class* súbor popisuje rozhranie. Tabuľka indikátorov je uvedená v prílohe A.2.

Položka *this_class* obsahuje index položky poľa *constant_pool[]* odkazujúci na štruktúru *CONSTANT_Class_info*³. Reprezentuje triedu, respektíve rozhranie, definované týmto *class* súborom.

Hodnotou *super_class* je taktiež index *constant_pool[]* odkazujúci na štruktúru typu *CONSTANT_Class_info*. Reprezentuje priamu nadtriedu triedy definovanej aktuálnym *class* súborom. V prípade, že ide o súbor popisu-

2. Všetky štruktúry *constant_pool[]* sú popísané v špecifikácii JVM [LYBB13].

3. *CONSTANT_Class_info* je štruktúra *constant_pool*, ktorá udáva triedu, alebo rozhranie.

júci rozhranie, index odkazuje na triedu *Object*. Trieda *Object* má ako jediná hodnotu *super_class* nulovú.

Počet rozhraní, ktoré trieda implementuje, vyjadruje položka *interface_count*, v prípade rozhrania je táto položka rovná počtu jeho priamych nadrozhraní.

Pole *interfaces[]* obsahuje indexy *constant_pool[]*, odkazujúce na štruktúru typu *CONSTANT_Class_info*. Zahŕňa indexy všetkých rozhraní, ktoré sú implementované aktuálnou triedou, prípadne sú priamymi nadrozhraniami *class* súboru.

Položka *fields_count* je rovná počtu premenných triedy a premenných inštancií (*fields*) *class* súboru.

Štruktúry typu *field_info* sú združené v poli *fields[]*. Toto pole zahŕňa každú premennú triedy. Neobsahuje však zdedené atribúty. Podrobne sa štruktúrou *field_info* zaoberá kapitola 2.1.2.

Hodnota položky *methods_count* vyjadruje počet štruktúr *method_info* v poli *methods[]*.

Položka *methods[]* je poľom štruktúr typu *method_info*. Každá štruktúra *method_info* popisuje metódu aktuálnej triedy, respektíve rozhrania. Zahŕňa konštruktory, metódy triedy a metódy inštancií. Neobsahuje žiadne zdedené metódy. Štruktúru *method_info* popisuje podkapitola 2.1.3.

Hodnota *attributes_count* je rovná počtu atribútov poľa *attributes[]* *class* súboru.

Pole *attributes[]* obsahuje štruktúry typu *attribute_info*. Atribútmi štruktúry *ClassFile* sú napríklad: *SourceFile*, *Deprecated*, *InnerClasses* a iné. Atribút *SourceFile* slúži na reprezentáciu mena *class* súboru. Pole *attributes[]* *class* súboru môže obsahovať maximálne jeden takýto atribút. Atribút *Deprecated* môže byť použitý v prípade, že bola daná trieda nahradená (*deprecated*). Pri volaní takejto triedy môže prekladač upozorniť užívateľa, že sa odkazuje na nahradenú triedu ⁴. Vo všeobecnosti sa štruktúre *attribute_info* venuje podkapitola 2.1.4.

2.1.1 Reprezentácia dátových typov

Dátové typy sú v *class* súboroch reprezentované vo formáte reťazcov s kódovaním *UTF-8*. Delíme ich na:

- dátové typy premenných,
 - primitívne dátové typy

4. Rovnakým spôsobom je možné atribút *Deprecated* aplikovať aj na premenné a metódy.

- referenčné dátové typy
- polia
- dátové typy metód.

Primitívnym dátovým typom (*byte*, *integer*, ...) je priradený popis v podobe znaku (*B*, *I*, ...). Napríklad premenná typu *int* je reprezentovaná znakom: *I*.

Referenčné dátové typy reprezentuje popis v tvare: *L<classname>;*, kde *classname* je meno triedy, alebo rozhrania daného referenčného dátového typu. Premenná typu *Object* je interpretovaná ako *java/lang/Object;*.

Identifikačný reťazec jednorozmerného poľa typu *T* sa značí [*T*, pričom počet znakov [*I* je rovný dimenzii poľa. Napríklad premenná typu: *double d*[[[]]] generuje reťazec: *[[[D*.

Reťazec dátového typu metódy sa skladá z reťazcov pre dátový typ parametrov, ohraničených v zátvorkách (*P**) a reťazca pre dátový typ návratovej hodnoty *R*. Tvar reťazca dátového typu metódy je potom (*P**)*R*. V prípade návratovej hodnoty *null* je reťazcom návratovej hodnoty znak *V*. Napríklad metódu *boolean long pow(int n, int k)* reprezentuje reťazec: *(II)I*, v prípade metódy *Object method(byte b)* by šlo o reťazec: *(B)Ljava/lang/Object;*. Komplexný prehľad reprezentácie dátových typov je uvedený v prílohe A.3.

2.1.2 Premenné tried a inštancií

Premenné tried inštancií (*fields*) *class* súboru sú v poli *fields[]* reprezentované pomocou štruktúry *field_info*. Formát štruktúry *field_info* je nasledovný:

Štruktúra *field_info*

```
field_info {
    u2 access_flags;
    u2 name_index;
    u2 descriptor_index;
    u2 attributes_count;
    attribute_info attributes[attributes_count];
}
```

Položka *access_flags* je indikátorom oprávnenia prístupu k danej premennej. Mená indikátorov spolu s ich interpretáciou a hodnotou sú uvedené v prílohe A.4.

Dvoj bajtová hodnota *name_index* je index *constant_pool[]*, reprezentujúci meno premennej.

Podobne ako *name_index*, aj *descriptor_index* je dvojbytová položka odkazujúca sa na štruktúru v *constant_pool*. Na rozdiel od mena premennej však popisuje dátový typ premennej.

Položka *attributes_count* vyjadruje počet atribútov v poli *attributes[]*.

Pole *attributes[]* môže obsahovať ľubovoľné množstvo atribútov popisujúcich premennú. Štruktúra reprezentujúca atribút je daná všeobecným predpisom *attribute_info*. Atribúty premenných musia byť reprezentované jednou zo štruktúr *ConstantValue*, *Synthetic*, *Signature*, *Deprecated*, *RuntimeVisibleAnnotations*, alebo *RuntimeInvisibleAnnotations*. Atribút *ConstantValue* popisuje konštantné statické premenné. *Synthetic* je používaný u položiek, ktoré sa nevyskytujú v zdrojovom kóde. Štruktúrou *attribute_info* sa zaoberá podkapitola 2.1.4.

2.1.3 Metódy

Každá metóda triedy, prípadne rozhrania, je v poli *methods[]* uložená pomocou štruktúry *method_info*. Štruktúra *method_info* má nasledujúci formát:

Formát *method_info*

```
method_info {
    u2 access_flags;
    u2 name_index;
    u2 descriptor_index;
    u2 attributes_count;
    attribute_info attributes[attributes_count];
}
```

Indikátor *access_flags* zahŕňa nastavenia prístupových práv a vlastností metódy. Tabuľka indikátorov *access_flags* štruktúry *method_info* sa nachádza v prílohe A.5.

Položky *name_index* a *descriptor_index* sú podobne ako u *field_info* indexmi do *constant_pool*. Tieto indexy v *constant_pool* odkazujú na štruktúry popisujúce meno a dátový typ metódy. Reprezentácia dátových typov je popísaná v podkapitole 2.1.1.

Hodnotou položky *attributes_count* je počet atribútov poľa *attributes[]*.

Pole *attributes[]* zahŕňa dodatočné atribúty (položky) danej metódy. Každá položka poľa je reprezentovaná všeobecným predpisom *attributes_info*. Počet štruktúr v poli nie je obmedzený, každá položka však musí byť jednou zo štruktúr: *Code*, *Exceptions*, *Synthetic*, *Signature*, *Deprecated*, *RuntimeVisibleAnnotations*, *RuntimeInvisibleAnnotations*, *RuntimeVisibleParameterAnnotations*, *RuntimeInvisibleParameterAnnotations*, alebo *AnnotationDefault*. Atribút *Code* je jedným z najdôležitejších. Obsahuje inštrukcie bajtkódu popi-

sujúce fungovanie metódy. Okrem metód deklarovaných ako abstraktná, alebo natívna, musí každá z metód obsahovať práve jeden atribút *Code*. Atribút *Exceptions* zahŕňa indexy výnimiek, ktoré metóda volá. Popisom formátu štruktúry *attributes_info* sa zaoberá nasledujúca podkapitola.

2.1.4 Atribúty

Pojem atribút v tejto podkapitole vyjadruje atribúty používané v poli *attributes[]* štruktúr *field_info*, *method_info* a *Code_attributes*. Všeobecný predpis všetkých atribútov je vyjadrený štruktúrou *attribute_info*. Existuje niekoľko základných preddefinovaných atribútov: *SourceFile*, *ConstantValue*, *Code*, *Exceptions*, *InnerClasses*, *Synthetic*, *LineNumberTable*, *LocalVariableTable*, *Deprecated* a iné. Líšia sa funkcionalitou a využitím jednotlivými časťami *class* súboru. Všetky atribúty vychádzajú z už spomínaného všeobecného predpisu *attribute_info*, ktorý má nasledujúci formát:

Štruktúra *attribute_info*

```
attribute_info {
    u2 attribute_name_index;
    u4 attribute_length;
    u1 info[attribute_length];
}
```

Položka *attributes_name_index* je indexom do *constant_pool*, odkazujúcim na meno atribútu. Tento proces sa nazýva kontrola formátu (*format checking*). Prvé štyri bajty musia obsahovať tzv. magickú konštantu *magic*. Všetky rozoznané atribúty musia mať správnu dĺžku.

2.2 Inštrukcie JVM

Po načítaní *class* súboru sa JVM najskôr uistí, že je súbor v správnom formáte popísanom v kapitole 2.1. Štvorbajtová položka *attribute_length* je rovná hodnote vyjadrujúcej dĺžku následných informácií uložených v štruktúre *info[attribute_length]*. Informácie sa líšia na základe odlišnej funkcionality a využitia jednotlivých atribútov. *Class* súbor nesmie byť skrátený, ani obsahovať nadbytočné bajty. Takisto úložisko *constant_pool* nesmie obsahovať žiadne nerozoznatelné informácie.

Inštrukcie bajtkódu načítanej metódy sú uložené v poli *code[]* atribútu *Code*, štruktúry *method_info* daného *class* súboru. Štruktúra *Code_attribute* reprezentujúca atribút *Code* musí spĺňať obmedzenia definované JVM. Tieto obmedzenia rozdelíme na dve základné kategórie:

- Statické obmedzenia: Stanovujú rozloženie inštrukcií v poli *code* a priradenie operandov jednotlivým inštrukciám. Niektorými z nich sú napríklad:
 - prvá inštrukcia musí začínať na indexe 0,
 - pole *code* nesmie byť prázdne.
- Štrukturované obmedzenia: Špecifikujú vzťahy medzi inštrukciami JVM. Ide o podmienky, ako napríklad:
 - žiadna lokálna premenná nemôže byť volaná predtým, ako jej bola priradená hodnota,
 - pred volaním (nestickej) metódy, respektíve premennej, musí byť inicializovaná inštancia triedy, ktorá ju obsahuje.

Prekladače jazyka Java generujú *class* súbory, ktoré splňajú požiadavky popísané v predchádzajúcom odseku. JVM však nemá žiadnu záruku, že *class* súbor, ktorý požaduje, bol generovaný prekladačom. Metódou verifikácie⁵ *class* súboru môže JVM určiť, či daný súbor pochádza z dôveryhodného zdroja.

2.2.1 Dátové typy

Dátové typy JVM delíme do troch základných kategórií:

- Primitívne dátové typy: *byte*, *short*, *int*, *long*, *boolean*, *float*, *double*.
- Referenčné dátové typy: pole, inštancia triedy, rozhranie.
- Typ *returnAddress*: používaný výhradne inštrukciami *jsr*, *ret* a *jsr_w*.

Väčšina uvedených typov má veľkosť 32 bitov, typy *long* a *double* sú však 64 bitové, preto zaberajú dva sloty v zásobníku.

2.2.2 Architektúra a inštrukčná sada

Architektúra JVM je založená na dátovej štruktúre zásobník⁶, ktorej základnými operáciami sú *push* - vloženie prvku do zásobníka a *pop* - výber

5. Ďalšie príklady obmedzení a podrobný popis verifikácie *class* súborov je dostupný v špecifikácii JVM [LYBB13]

6. Dátová štruktúra zásobník (*stack*) funguje na princípe FIFO (*first in first out*), kde posledný vložený prvok je prvým vybraným.

prvku z vrcholu zásobníka. JVM nemá registre na ukladanie hodnôt, preto musia byť pred použitím všetky uložené na zásobník.

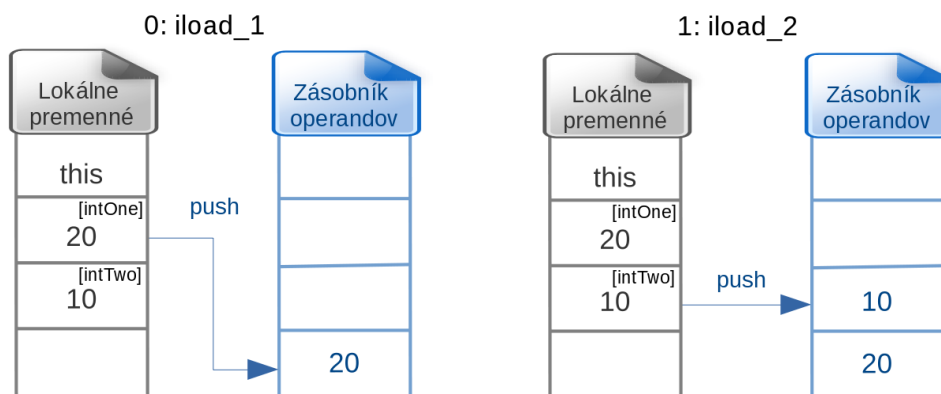
Na nasledujúcom jednoduchom príklade sú popísané základné inštrukcie bajtkódu pre prácu s premennými a konštantami.

Metóda *greaterThen* pred a po kompilácii

```
public int greaterThen(int intOne, int intTwo) {
    if (intOne > intTwo) {
        return 0;
    } else {
        return 1;
    }
}
```

```
0: iload_1
1: iload_2
2: if_icmple 7
5: iconst_0
6: ireturn
7: iconst_1
8: ireturn
```

Inštrukcie *iload_1* a *iload_2* pridajú do zásobníka operandov (ďalej len zásobník) hodnoty lokálnych premenných na indexoch 1 a 2. V tomto prípade ide o parametre *intOne* a *intTwo*.



Obr. 2.1: Znáznornenie funkcionality inštrukcií *iload_1* a *iload_2*, zdroj: vlastné spracovanie

Vo všeobecnosti môžeme túto inštrukciu chápať ako *xload* s predponou *x*, označujúcou ľubovoľný primitívny dátový typ (napríklad: *lload* pre long, *float* pre float). Existujú dva tvary, volania tejto inštrukcie:

- *load_<n>*, kde *n* označuje index (celé číslo) lokálnej premennej, zároveň musí platiť: $0 \leq n \leq 4$,
- *load vindex*, kde pozíciou lokálnej premennej je hodnota *vindex*.

Ďalšou inštrukciou je *if_icmple* s parametrom 7, ktorá porovná dva objekty na vrchole zásobníka a prejde na siedmu inštrukciu v prípade, že je hodnota položky na vrchole zásobníka väčšia ako hodnota druhej položky. V príklade sú na zásobníku len položky, vložené predchádzajúcimi inštrukciami. Podmienka teda platí v prípade, že hodnota parametra *intOne* je menšia než hodnota *intTwo*. Vo všeobecnosti je možné podmienené výrazy vyjadriť pomocou inštrukcií: *if_acmp<cond>*, *if_icmp<cond>*, *if<cond>*, *ifnonnull*, *ifnull*.

Inštrukcie *iconst_0* a *iconst_1* vložia na zásobník hodnotu 0, respektíve 1, v závislosti od vyhodnotenia podmienky *if_icmple*. Táto hodnota je následne vrátená inštrukciou *ireturn*. Inštrukcie *iconst_<n>*, a *ireturn* sú taktiež dostupné vo variantách s predponou ľubovoľného primitívneho dátového typu.

Dôkladný popis všetkých inštrukcií, vrátane ich parametrov, možno nájsť v špecifikácii JVM [LYBB13].

Kapitola 3

Zavádzače tried

Zavádzač je objekt zodpovedný za načítavanie tried. V JVM je reprezentovaný abstraktnou triedou *ClassLoader*. Pomocou mena *class* súboru by mal zavádzač nájsť a generovať obsah, definujúci danú triedu. Každá trieda obsahuje referenciu na objekt typu *ClassLoader*, ktorý ju definoval. [Ora11]

Zvyčajne je trieda do JVM načítaná len v prípade, že je potrebná. Načítané sú zároveň všetky triedy, na ktoré sa odkazuje. Pomocou zavádzačov je možné za behu programu dynamicky načítať ďalšie triedy, prípadne načítať nové inštancie pôvodných tried.

Pri štandardnom načítaní triedy niektorá z implementácií triedy *ClassLoader* vykoná nasledujúce tri kroky:

1. Skontroluje, či trieda už nebola načítaná.
2. Ak nebola, požiada nadtriedu o načítanie danej triedy.
3. V prípade, že neuspeje, pokúsi sa načítať triedu pomocou vlastného zavádzača.

3.0.3 Dynamické načítavanie tried

K načítaniu novej triedy *MyClass* do spusteného programu je potrebný zavádzač. Získať ho je možné pomocou príkazu *MyClass.class.getClassLoader()*. Novú triedu reprezentovanú súborom *class* následne vráti metóda *loadClass(class)* zavádzača.

3.0.4 Znovunačítanie triedy

Dynamické znovunačítanie triedy je komplikovanejšie. Vstavané implementácie triedy *ClassLoader* vždy kontrolujú, či trieda už nebola do JVM načítaná. Preto nie je možné žiadnu triedu načítať dvakrát pomocou vstavaných zavádzačov. Je nutné navrhnúť vlastnú implementáciu. Nasledujúci príklad znázorňuje formu implementácie vlastného zavádzača.

Príklad zavádzača tried pre načítanie *class* súborov zo serveru

```
class NetworkClassLoader extends ClassLoader {
    String host;
    int port;

    public Class findClass(String name) {
        byte[] b = loadClassData(name);
        return defineClass(name, b, 0, b.length);
    }

    private byte[] loadClassData(String name) {
        // load the class data from the connection
        ...
    }
}
```

[Ora11]

Ďalšou komplikáciou je metóda *ClassLoader.resolve()*, ktorá zabezpečuje linkovanie. Ide o metódu s atribútom *final*, z čoho vyplýva, že ju nie je možné prepísať. Nepovolí však žiadnemu zavádzaču linkovať dvakrát tú istú triedu. Preto je nutné pri každom ďalšom znovunačítaní triedy vytvoriť jeho novú inštanciu.

Kapitola 4

ByteMan

ByteMan je nástroj manipulujúci s bajtkódmi, určený na modifikáciu Java aplikácií počas načítavania JVM, alebo za behu programu. Používa sa najmä na zjednodušenie trasovania a testovania aplikácií. Umožňuje používateľovi pridávať novú funkčnosť do ktorejkoľvek časti programu. Funguje bez nutnosti prepisovania a opätovnej kompilácie pôvodnej aplikácie.

ByteMan modifikuje bajtkód aplikácie za behu programu. Preto môže zmeniť Java kód, popisujúci časť tried JVM ako napríklad *String*, *Thread* a podobne. Vďaka tejto funkčnosti je taktiež možné napríklad trasovanie správania sa JVM.

ByteMan používa jednoduchý jazyk ECA pravidiel¹ založený na Jave. Tieto ECA pravidlá používa na špecifikáciu kde, kedy a ako má byť pôvodný Java kód transformovaný, aby modifikoval operáciu [Reda].

4.1 ByteMan Agent

Aby mohol *ByteMan* manipulovať s programom, musí mať tento program aktivovaný takzvaný *ByteMan Agent*, ktorý konfiguruje JVM pre prácu s pravidlami jeho jazyka.

Pri inštalácii agenta s prekladom programu je riešením použitie argumentu nástroja *java -javaagent*, ktorý zadáva cestu k JAR súboru, popisujúcemu pravidlá jazyka. Agentovi je možné pomocou argumentov konfigurovať dve možnosti funkčnosti:

- Základnou možnosťou je použiť argument *script:[PATH]*, ktorý načíta do programu skript definovaný pravidlami v súbore s cestou *PATH*.
- V prípade potreby načítavania pravidiel do programu aj po spustení, je nutné nastaviť argument *listener* na hodnotu *true*. Do takto spuste-

1. ECA (*event-condition-action*) pravidlá pozostávajú z udalosti, podmienky a akcie. Význam pravidla znamená: Ak nastane udalosť, skontroluj podmienku a v prípade, že platí, vykonaj akciu [Sel95].

ného programu je možné následne pomocou skriptu *bmsubmit.sh* pridávať a odoberať ľubovoľné pravidlá.

Byteman je nastavený, aby neinjektoval kód tried JVM. Pri zmene tried ako *String* a *Thread* je preto nutné zmeniť túto vlastnosť nastavením *system property* *org.jboss.byteman.transform.all*. Zároveň je nutné zaistiť, aby bol *Byteman Agent* načítaný (rovnako ako tieto triedy) defaultným (*bootstrap*) zavádzačom.

Agentu je možné inštalovať taktiež do spustených aplikácií,² bez nutnosti ich opätovného spustenia. Slúži na to skript *bminstall.sh*. *Byteman* je následne možné využiť ako nástroj na kontrolu správania sa programu [Reda].

4.2 Štruktúra jazyka pravidiel

Pravidlá jazyka *Byteman* sú definované v skriptoch s príponou *btm*. Každé pravidlo pozostáva zo sekvencie definícií. Všeobecný predpis takto definovaného pravidla je nasledovný:

Kostra pravidiel

```
RULE <rule name>
CLASS <class name>
METHOD <method name>
BIND <bindings>
IF <condition>
DO <actions>
ENDRULE
```

Definície musia byť zadané v správnom poradí, pričom prvou je vždy *RULE* a poslednou *ENDRULE*. Základnými kategóriami pre rozdelenie definícií pravidiel sú: Udalosti, Závislosti, Výrazy, Podmienky, Akcie a iné. Všetky dôležité kategórie a definície sú popísané v ďalších podkapitolách.

4.2.1 Udalosti

Udalosti pravidiel (*Rule Events*) identifikujú umiestnenie pravidla v metóde, ktorá sa nachádza v cieľovej triede.

Kľúčové slovo *RULE* musí nasledovať meno pravidla, ktoré je ľubovoľným textovým reťazcom, pričom musí obsahovať medzeru. Kvôli rozlišovaniu jednotlivých pravidiel by mali byť tieto mená unikátne.

Rovnako definície *CLASS* a *METHOD* nasledujú mená triedy a metódy, do ktorej bude pravidlo načítané. Meno triedy môže byť špecifikované aj

2. Typicky ide o dlho bežiacie aplikácie ako napríklad aplikačný server JBoss

bez cesty k balíku, v ktorom sa nachádza. V takomto prípade, Byteman spracováva každú triedu s týmto menom, ktorá je do JVM načítaná. Definíciu *CLASS* je možné nahradiť kľúčovým slovom *INTERFACE*, ktoré funguje rovnakým spôsobom ako *CLASS*, no popisuje rozhranie. Doplnením znaku `^` na začiatok mena triedy, respektíve rozhrania, je možné zabezpečiť dedičnosť - prenos pravidiel na potomkov. Metódu je možné okrem samotného názvu špecifikovať aj jej návratovým typom, prípadne argumentami. Tieto bližšie špecifikácie nie sú povinné, preto je možné načítať pravidlo do viacerých preťažených metód zároveň.

Po nájdení metódy, respektíve metód, ktoré vyplývajú z definícií *CLASS*, *METHOD*, prípadne *INTERFACE*, je do každej z nich vložený takzvaný spúšťač *triggerpoint*. Tento spúšťač presne identifikuje miesto v metóde, kde bude bajtkód injektovaný. Pomocou špecifikácie je možné zvoliť rôzne umiestnenie tohto spúšťača. Defaultne je zvolené umiestnenie *AT ENTRY*, čo zaistí, vloženie spúšťača na začiatok - pred prvú inštrukciu ³ danej metódy. Ďalšími možnosťami umiestnenia spúšťača sú napríklad: *AT EXIT*, *AT LINE*, *AT READ*, *AT WRITE*. Tieto definície vkladajú spúšťač na koniec metódy, prípadne pred operáciu čítania, alebo zápisu do premennej. Tabuľka všetkých možností umiestnení sa nachádza v prílohe A.6.

4.2.2 Závislosti

Skript definujúci pravidlo jazyka *Byteman* je možné obohatiť o takzvané závislosti pravidiel (*Rule Bindings*). Tieto závislosti počítajú hodnoty premenných, ktoré môžu byť použité v ďalšom tele pravidla. Sú počítané pri každom spustení pravidla. Závislosti sú definované pomocou klauzule *BIND*, nasledovanej názvom a prípadne typom premennej. Každéj premennej je pomocou výrazu nasledujúceho za = priradená hodnota, napríklad:

Závislosť

```
RULE Bindings example
...
BIND thisClass = $0;
...
ENDRULE
```

Vytvára premennú *thisClass*, ktorej bude automaticky odvodený typ a priradí jej hodnotu reprezentujúcu metódu tohto pravidla.

3. Výnimkou sú inštrukcie volajúce konštruktor predka, prípadne alternatívny konštruktor.

4.2.3 Výrazy

Výrazy (*Rule expressions*) sa nachádzajú na pravej strane definície závislosti. Existujú dva základné typy výrazov:

- Jednoduché výrazy, ako napríklad: referencie na predošlé závislosti, referencie na lokálne premenné v okolí spúšťača, vstavané operátory ($!$, $+$, $@$, ...) a mnohé iné.
- Výrazy zložené z iných výrazov pomocou štandardných operátorov jazyka Java.

Podmienkami pravidla (Rule Conditions) sú výrazy typu boolean. Tieto pravidlá nasledujúce klauzulu *IF* sú overené po inicializácii závislostí.

4.2.4 Akcie

Jednou z najdôležitejších súčastí pravidla sú akcie pravidiel (*Rule Actions*). Sú tvorené výrazmi, návratovými klauzulami, prípadne klauzulou *throw*. Na začiatku definície je klauzula *DO*, ktorá je nasledovaná jednotlivými akciami. Každá akcia je na samostatnom riadku, oddeľuje ich bodkočiarka.

Príklad použitia akcie

```
RULE Actions example
...
DO System.out.println("This method is:" + $0);
   return;
...
ENDRULE
```

Tento príklad znázorňuje zjednodušené pravidlo, ktorého akciou je výpis názvu metódy na štandardný výstup.

4.3 Použitie

Primárne bol *Byteman* určený na podporu testovania multivláknových a multi-JVM aplikácií za použitia techniky nazývanej *Fault Injection*⁴. Zahŕňa preto funkcionality, ktorá bola navrhnutá na riešenie problémov súvisiacich s týmto typom testovania. *Byteman* poskytuje podporu pre automatizáciu v štyroch hlavných oblastiach:

4. V oblasti testovania softvéru tento pojem označuje techniku pre zlepšenie pokrytia testov vyvolaním chyby. Odstraňuje najmä chyby, ktoré by sa inak vyskytovali len zriedka. [Roe11]

- trasovanie špecifických väzieb kódu a zobrazovanie stavu aplikácie, prípadne JVM,
- narúšanie normálneho priebehu zmenou stavov, volanie nenaplánovaných metód, vynucovanie návratových volaní, prípadne vyvolávanie neočakávaných výnimiek,
- organizácia časovania aktivít vykonaných nezávislými vláknami aplikácie,
- monitorovanie a zhromažďovanie štatistík, pre sumarizáciu aplikácie a operácií JVM.

V súčasnosti je *Byteman* využívaný oveľa širšie ako nástroj na testovanie [Reda].

Najjednoduchším použitím *Bytemana* je vkladanie kódu, ktorý trasuje správanie sa aplikácie. Táto metóda môže byť využitá na monitorovanie, alebo ladenie, ako aj na úpravu kódu pri testovaní a overenie, správneho fungovania aplikácie. Pri vkladaní kódu na veľmi špecifické miesta je možné vyhnúť sa režijným nákladom, ktoré často rastú pri ladení, alebo trasovaní produktu [RH].

Kapitola 5

Javassist

Ďalším nástrojom určeným na manipuláciu s bajtkódom je *Javassist*. Tento nástroj využíva na manipuláciu s bajtkódom odlišný prístup ako *Byteman*. Narozdiel od ECA pravidiel, *Javassist* používa na reprezentáciu *class* súborov triedu *Javassist.CtClass*. *Class* súbor je možné pomocou tejto triedy modifikovať¹ a následne modifikácie zapísať.

Na modifikáciu definície triedy je nutné najskôr získať referenciu na objekt *CtClass* z objektu *ClassPool* pomocou jeho metódy *get()*.

Získanie objektu *CtClass*

```
ClassPool pool = ClassPool.getDefault();  
CtClass cc = pool.get("test.Rectangle");
```

Vo vyššie uvedenom príklade je objekt typu *CtClass*, ktorý reprezentuje triedu *test.Rectangle* vrátený objektom *ClassPool* a uložený do premennej *cc*. Samotný objekt *ClassPool* vrátila metóda *getDefault*, ktorá prehľadáva defaultnú systémovú cestu. Z implementačného pohľadu je *ClassPool* hešovacia tabuľka objektov *CtClass*, ktorá používa mená tried ako kľúče. Metóda *get()* v *ClassPool* prehľadáva túto hešovaciu tabuľku, aby našla objekty typu *CtClass*, príslušné danému kľúču [Shi].

Ďalšou možnosťou ovplyvňovania správania sa aplikácie je pridanie novo definovanej triedy. *Javassist* túto funkcionality umožňuje pomocou metódy *makeClass()*, volanej na objekte typu *ClassPool*.

Definícia novej triedy

```
ClassPool pool = ClassPool.getDefault();  
CtClass cc = pool.makeClass("Point");
```

V tomto prípade je pomocou kontajnera *pool* definovaná nová trieda *Point*.

1. Možnosti modifikácie triedy pomocou *CtClass* popisuje kapitola 5.1.

5.1 Modifikácie

Objekt *CtClass* zahŕňa množstvo metód na modifikáciu triedy, ktorú reprezentuje. Výhoda použitia tohto nástroja spočíva aj v kompatibilite s rozhraním *Java Reflection* ². *CtClass* poskytuje metódy *getName()*, *getSuperClass()*, *getMethods()* a mnohé iné. Taktiež obsahuje metódy pre úpravu definície triedy. Povoľuje prídanie nového atribútu, konštruktora a metódy, prípadne modifikáciu tela existujúcej metódy [Shi].

5.1.1 Rozhranie pre prácu s bajtkódom

Okrem štandardného rozhrania popísaného v predchádzajúcich odsekoch poskytuje *Javassist* aj rozhranie pre priamu prácu s bajtkódom požadovanej triedy, respektíve metódy.

Rozhranie priamo upravuje zadaný *class* súbor. Napríklad metóda *getClassFile()* triedy *CtClass* vracia objekt typu *ClassFile*, reprezentujúci daný súbor. Podobne metóda *getMethodInfo()* triedy *CtMethod* vytvára objekt *MethodInfo*, predstavujúci štruktúru *method_info* daného *class* súboru. Rozhranie používa notáciu JVM popísanú v kapitole 2 a špecifikácii JVM [LYBB13].

5.2 Zápis do *class* súboru

Modifikácie vykonané v bajtkóde načítaných, prípadne novo vytvorených objektov, sa prejavia ihneď po zavolaní metódy *writeFile()* triedy *CtClass*. Táto metóda preloží objekt *CtClass* do *class* súboru, ktorý zapíše na disk. *Javassist* taktiež poskytuje metódu *toBytecode()*, ktorá vráti modifikované inštrukcie bajtkódu do poľa typu *byte* [Shi].

2. *Java Reflection* je rozhranie bežne používané programami, ktoré vyžadujú schopnosť modifikácie správania sa spustenej Java aplikácie. [Ora]

Kapitola 6

Porovnanie

Každý zo spomínaných nástrojov pristupuje k manipulácii s bajtkódom odlišným spôsobom. Zatiaľ čo *Byteman* využíva jazyk ECA pravidiel, ktoré načítava pomocou takzvaného agenta, *Javassist* je knižnicou jazyka Java. Oba nástroje majú svoje výhody a nevýhody. Najjednoduchšie z nich sú popísané v nasledujúcich sekciách.

6.1 Vlastnosti nástroja *Byteman*

Výhodami použitia nástroja *Byteman* sú:

- Prehľadnosť jazyka: Jazyk ECA pravidiel použitý nástrojom *Javassist* je veľmi prehľadný a dobre zapamätateľný.
- Možnosť automatického generovania skriptov: Vďaka jednoznačnej štruktúre jazyka a jeho skriptov je možné pravidlá pomerne jednoducho generovať automaticky.

Na druhej strane má tento nástroj aj nevýhody:

- Nutnosť manipulácie s programom *java agent* v spustenej aplikácii.
- Obmedzená funkcionálnosť: Jednou z najväčších nevýhod nástroja *Byteman* je nemožnosť editovania pôvodného kódu. *Byteman* slúži ako nástroj na pridávanie novej funkcionality, nijakým spôsobom však nedokáže editovať, prípadne odstrániť funkcionality pôvodnú.

6.2 Vlastnosti knižnice *Javassist*

Manipulácia s bajtkódom pomocou knižnice *Javassist* má nasledujúce výhody:

- Jednoduchá manipulácia: Keďže je *Javassist* knižnicou jazyka Java, je manipulácia s ním pomerne nenáročná.

- Dvojité aplikačné rozhranie: *Javassist* poskytuje, na rozdiel od nástroja *Byteman*, okrem základného aj nízkoúrovňové rozhranie pre priamu manipuláciu s bajtkódom.
- Široké uplatnenie: Na rozdiel od nástroja *Byteman*, funkcionality knižnice *Javassist* poskytuje aj nástroje na úpravu existujúceho kódu.

Takisto tento nástroj má svoje slabé stránky:

- Mohutnosť aplikácie: Pri jednoduchých úlohách by mohlo mať použitie knižnice *Javassist* za následok značné časové oneskorenie.
- Nemožnosť automatizácie: Vzhľadom na povahu tejto knižnice nie je možné automatické generovanie zdrojového kódu jazyka Java pre manipuláciu s bajtkódom.

6.3 Zhrnutie

Z vyššie uvedených vlastností nástrojov *Byteman* a *Javassist* vyplývajú možnosti ich uplatnenia. Vo väčšine aplikácií pre manipuláciu s bajtkódom spôsobom, ktorý edituje pôvodnú funkcionality, je nutné použitie knižnice *Javassist*. Pre úpravy programov, napríklad v prípade trasovania správania sa aplikácií, je vhodnou alternatívou nástroj *Byteman*.

Kapitola 7

Praktické ukážky

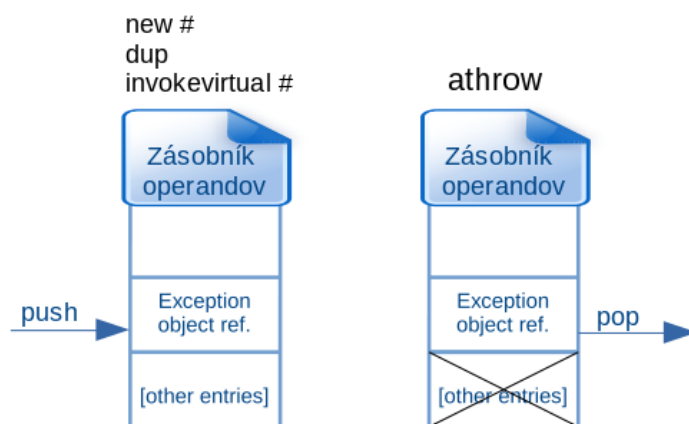
Kľúčovou súčasťou bakalárskej práce sú praktické ukážky. Každý z príkladov je navrhnutý pre jeden z nástrojov *Byteman*, respektíve *Javassist*. Konkrétne demonštrujú základné možnosti jeho využitia pre vývoj a trasovanie programov v Jave. Ukážky pokrývajú štyri oblasti:

- detekcia volania výnimiek,
- detekcia nesprávneho ošetrovania výnimiek,
- zlepšenie a sprehl'adnenie produkčného kódu,
- optimalizácia neefektívnych častí kódu.

Príklady obsahujú dve ukážky z oblasti detekcie volania a ošetrovania výnimiek a dve ukážky, zamerané na optimalizáciu a zlepšenie kódu. V praxi sa nástroje ako *Byteman* a *Javassist* využívajú najmä v aplikačných serveroch, prípadne iných projektoch, ktorých opätovná kompilácia by bola príliš časovo a technicky náročná. V ukážkach budem z praktických dôvodov využívať na testovanie ich funkcionality menšie programové celky a demonštračné programy.

7.1 Detekcia volania výnimiek

Prvou z ukážok je detekcia volania výnimiek spusteného programu. Ide o detekciu všetkých výnimiek, ktoré sú v požadovanej triede volané pomocou kľúčového slova *throw*. V bajtkóde je konštrukcia tohto kľúčového slova reprezentovaná inštrukciou *athrow*, ktorá zavolá výnimku predtým pridanú na vrchol zásobníka a zároveň zásobník vyčistí.



Obr. 7.1: Grafické znázornenie pridania objektu výnimky a jej následné vyvolanie pomocou inštrukcie `athrow`, zdroj: vlastné spracovanie

Detekcia volaných výnimiek je vhodným príkladom na ukážku využitia nástroja *Byteman*. Ako bolo uvedené v kapitole 4, *Byteman* využíva na popis modifikácie bajtkódu ECA pravidlá. Zovšeobecnené ECA pravidlá pre tento príklad sú v nasledujúcom tvare.

Všeobecný formát ECA pravidla pre detekciu výnimiek metódy `<m>` volanej z triedy `<C>`

```

RULE detect throw, method <m>, class <T>
  CLASS <T>
  METHOD <m>
  AT THROW ALL
  BIND exception:Throwable= $^
  IF true
  DO System.out.println("Detected athrow, exception: " + exception)
ENDRULE

```

Klauzula *RULE* udáva názov pravidla pre konkrétnu metódu a triedu. Nasledujú klauzuly *CLASS* a *METHOD*, ktoré špecifikujú ich názvy. V ďalšej časti pravidla sa nachádza jeho logika, ktorá popisuje zachytávanie výnimiek a reakciu na ich volanie v podobe výpisu na štandardný výstup.

Dôležitou súčasťou ukážkového programu je skript *loadScripts.sh*, ktorý tieto pravidlá generuje a načítava do už spustenej aplikácie ¹. Jediným potrebným argumentom je cesta ku *class* súboru triedy, ktorej pravidlá bude

1. Keďže skript pravidlá ihneď po vygenerovaní načítava, je nutné, aby už pred jeho spustením bežala aplikácia, ktorej výnimky bude sledovať. Táto aplikácia musí byť spustená s prepínačom *agent listener*, ktorý je možné pridať aj za behu do dlhodobo spustenej aplikácie.

skript generovať. Program následne monitoruje každú metódu zadanej triedy, vrátane konštruktora. V prípade potreby je možné generovať a načítavať pravidlá pre viacero tried zároveň. V tomto prípade je nutné zadať skriptu *loadScripts.sh* cesty k ich *class* súborom oddelené medzerou.

Po vygenerovaní a načítaní pravidiel program reaguje na každú volanú výnimku zadanej triedy, respektíve tried a pri detekcii na ňu upozorní. Pre účely tejto práce používame ako demonštračný príklad program *fileChooser*². V reálnom prostredí by bolo možné detekciu volania výnimiek využiť napríklad v aplikačných serveroch, kde nie je volanie niektorých z nich vždy viditeľné.

7.2 Detekcia nesprávneho ošetrenia výnimiek

Následujúci príklad sa zaoberá detekciou nesprávne ošetrených výnimiek. V prípade zachytenia výnimky *catch* blokom by mal program na túto situáciu vždy nejakým spôsobom reagovať (napríklad: logovaním udalosti, volaním inej výnimky, riadeným pádom programu, ...). Prázdne *catch* bloky sú preto vo väčšine prípadov nesprávnym ošetrením danej výnimky.

Detekcia nesprávneho ošetrenia výnimiek je vhodným demonštračným príkladom pre ukážku funkcionality knižnice *Javassist*. Keďže ide o ukážku nástroja *Javassist* projektom je Java aplikácia vo formáte *Maven*. Program postupne prechádza všetky metódy a konštruktory triedy, ktorú monitoruje. Pri nájdení prázdneho *catch* bloku uloží informácie o jeho polohe do logu a na záver vypíše získané údaje. Výstup môže vyzeráť napríklad nasledovne:

Výstup aplikácie po kontrole triedy *example.tables.JDBCAdapter*

```
- Class JDBCAdapter -
Apr 28, 2015 6:15:18 PM application.CatchBlockTracer trace
INFO: -> Suspicious catch block found on line: 116 in method:
        example.tables.JDBCAdapter.executeQuery(java.lang.String)
Apr 28, 2015 6:15:18 PM application.CatchBlockTracer trace
INFO: -> Suspicious catch block found on line: 266 in method:
        example.tables.JDBCAdapter.setValueAt(java.lang.Object,...)
Apr 28, 2015 6:15:18 PM application.CatchBlockTracer trace
INFO: -> Suspicious catch block found on line: 81 in method:
        example.tables.JDBCAdapter(java.lang.String,...)
Apr 28, 2015 6:15:18 PM application.CatchBlockTracer trace
```

cie. Podrobný popis spustenia aplikácie a načítania skriptov sa nachádza v *README* súbore programu.

2. Tento demonštračný príklad je súčasťou balíka *Java Development Kit Demos and Samples*.


```
INFO: -> Suspicious catch block found on line: 79 in method:
        example.tables.JDBCAdapter(java.lang.String,...)
SUMMARY: 4 suspicious catch blocks found in class JDBCAdapter
```

V tomto výstupe vidíme, že boli nájdené 4 nesprávne ošetrované výnimky na riadkoch: 79, 81, 166, 266.

7.2.1 Štruktúra a funkčná logika aplikácie

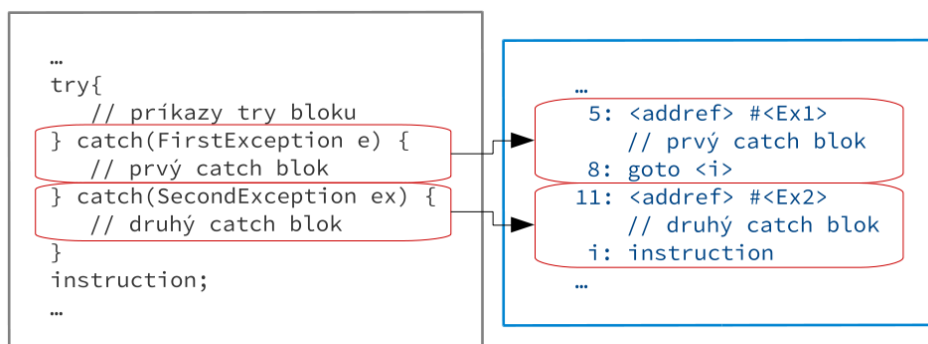
Aplikačnú logiku som rozdelil medzi štyri triedy: *Tracer*, *CatchBlockTracer*, *CBDetector* a *CBIndicesHandler*.

Trieda *Tracer* slúži na spustenie samotnej aplikácie pre ľubovoľnú triedu *<C>*. Obsahuje metódu *traceCatchBlocks(Class classToTrace)*, ktorej argumentom je objekt reprezentujúci *<C>*. Táto metóda prevedie triedu na objekt typu *CtClass* a následne z neho získa všetky metódy a konštruktory v podobe polí tried *CtMethod* a *CtConstructor*. Následne za pomoci triedy *CatchBlockTracer* získa informácie o všetkých prázdnych *catch* blokoch týchto metód a konštruktorov.

Ako bolo uvedené v predchádzajúcom odseku, trieda *CatchBlockTracer* je určená na spracovanie objektov *CtMethod* a *CtConstructor*. Hlavnou metódou triedy je *trace(final CtBehavior cm)*. Táto metóda má argument typu *CtBehavior*, ktorého potomkami sú práve triedy *CtMethod* a *CtConstructor*. Uchováva si informácie o pozícií *catch* blokov v podobe mapy, ktorej kľúčom je index prvej inštrukcie *catch* bloku v bajtkóde a hodnotou je jeho pozícia v zdrojovom súbore. Túto mapu získava za pomoci tried *CBDetector* a *CBIndicesHandler*. Po získaní údajov o polohe všetkých *catch* blokov v danej metóde je každý z nich skontrolovaný metódou *isEmpty*. V prípade preukázania nesprávne ošetrenej výnimky sú informácie *catch* bloku uložené a logované.

Mechanizmus kontroly prázdneho *catch* bloku prebieha pomocou nízkoúrovňového rozhrania knižnice *Javassist* pre prácu s bajtkódom. V bajtkóde je každý *catch* blok reprezentovaný vo forme znázornenej na obrázku 7.2.

Na začiatku je na zásobník vložená referencia na objekt výnimky. Nasleduje telo *catch* bloku. Inštrukcia po poslednom *catch* bloku má index *<i>*. V prípade, že aktuálny *catch* blok nie je posledným v rade, je za jeho telo umiestnená inštrukcia *goto*, ktorá odkazuje na index inštrukcie *<i>*. V prípade posledného bloku nasleduje index *<i>* ihneď po jeho tele. Metóda *isEmpty* preto kontroluje, či telo *catch* bloku obsahuje iba inštrukciu skoku na index *<i>*, prípadne či je telo *catch* bloku úplne prázdne.



Obr. 7.2: Grafické znázornenie reprezentácie *catch* bloku v bajtkóde, zdroj: vlastné spracovanie

Poslednými triedami na spodnej časti hierarchie v abstrakcii získavania polohy *catch* blokov sú *CBDetector* a *CBIndicesHandler*. Slúžia na získanie mapy indexov *catch* blokov pre zadanú metódu, prípadne konštruktor. Dôležitým nástrojom na samotné vyhľadávanie je metóda *CtBehavior.instrument(ExprEditor)*. Argumentom tejto metódy je práve objekt triedy *CBIndicesHandler*, keďže *CBIndicesHandler* je potomkom triedy *ExprEditor*.

7.2.2 Testovacie príklady

Okrem samotnej aplikácie sa v projekte nachádzajú aj dva balíky *example.simple* a *example.tables*, na ktorých je možné funkcionality aplikácie testovať. Každý z balíkov obsahuje vlastnú spustiteľnú triedu *Demo*, ktorá po spustení volá metódu *application.Tracer.traceCatchBlocks* hlavnej aplikácie na jednotlivých testovacích triedach balíka.

Balík *example.simple* obsahuje dve testovacie triedy, ktoré som vytvoril pre overenie funkčnosti aplikácie balíka *application*. Po spustení aplikácia upozorní na nesprávne ošetrenie *catch* blokov v triede *PersonFactory*.

Balík *example.tables* obsahuje komplexnejšie testovacie triedy, prevzaté z balíka *Java Development Kit Demos and Samples*. Výstupom spustenia triedy *Demo* je kontrola tried *JDBCAdapter*, *OldJTable* a *TableExample*. Na nesprávne ošetrené výnimky sú tentokrát upozornené metódy a konštruktor triedy *JDBCAdapter*.

Triedy v testovacích balíkoch je možné ľubovoľne modifikovať pre jednoduché testovanie funkcionality aplikácie. V prípade potreby testovania

aplikácie na novej triede je nutné volať metódu *application.Tracer.traceCatchBlocks* s argumentom špecifikujúcim danú triedu.

7.3 Zlepšenie a zprehľadnenie produkčného kódu

Program prispievajúci k zlepšeniu produkčného kódu sa špecializuje na náhradu priamych volaní atribútov generovanými *get* a *set* metódami. Vo všeobecnosti aplikácia manipuluje s bajtkódom dvoch tried. Trieda *<C1>* obsahuje atribúty, ku ktorým však neexistujú prístupové *get* a *set* metódy, atribúty sú teda používané priamo. Trieda *<C2>* zapisuje, respektíve číta obsah jednotlivých atribútov. Daná implementácia porušuje základný princíp zapuzdrenia, ktorý by mal byť dodržaný za každých okolností. Projekt pod názvom *code-improvement* preto slúži na generovanie prístupových metód k atribútom triedy *<C1>* a následnú náhradu priamych volaní týmito metódami v triede *<C2>*.

Aplikácia manipuluje s bajtkódom a *class* súbormi požadovaných tried. Zmeny sa preto neprejavajú v zdrojovom kóde. Rovnako by nemali nijako ovplyvniť vnútornú logiku modifikovaných tried. Okrem informácií zobrazených na štandardnom výstupe, je zmeny možné pozorovať aj v *class* súboroch tried³.

7.3.1 Štruktúra a funkčná logika aplikácie

Aplikácia *code-improvement* je Java projektom typu *Maven*. Demonštruje využitie nástroja *Javassist*. Projekt je tvorený dvoma balíkmi: *application* a *example*. Balík *application* obsahuje samotný program nahrádzajúci priame volania atribútov prístupovými metódami, ktorého základná funkcionálna bola načrtnutá v predchádzajúcich odsekoch. Balík *example* je jednoduchým testovacím príkladom pre kontrolu funkčnosti tried balíka *application*.

TODO DIAGRAM...

Hlavným balíkom zabezpečujúcim fungovanie programu je *application*. Funkcionalitu som tentokrát rozložil medzi 3 triedy: *FieldChecker*, *AccGenerator* a *AccCreator*.

Trieda *FieldChecker* je jedinou triedou, ktorá slúži na prístup k aplikácii. Po vytvorení objektu *FieldChecker* pre triedy *<C1>* a *<C2>* dôjde volaním metódy *FieldChecker.fixFieldsAccess()* k manipulácii s bajtkódom *<C1>* a *<C2>* spôsobom popísaním v prvom odseku tejto kapitoly. Metóda je preto

3. Class súbory je možné zobrazit' v čitateľnej podoba napríklad prostredníctvom nástroja *javap* príkazom [*javap -c <path>*].

len prístupovým bodom, ktorý využíva funkcionality ostatných metód a tried balíka *application*.

Program postupne iteruje cez všetky atribúty triedy `<C1>`. Pre každý atribút vytvorí *AccGenerator* a následne *AccCreator* prístupové *get* a *set* metódy. Akonáhle sú tieto metódy úspešne načítané do bajtkódu `<C1>`, vykoná metóda *replaceFieldAccess()* náhradu priameho volania atribútu prístupovými metódami. Využíva k tomu najmä nástroj *CodeConverter* knižnice *Javassist*.

TODO OBRAZOK...

Za generovanie a načítanie prístupových metód je zodpovedná trieda *AccGenerator* a jej pomocná trieda *AccCreator*. Táto pomocná trieda slúži na generovanie konkrétnych šablón prístupových metód pre zadaný atribút. Šablóny sa následne trieda *AccGenerator* pokúsi načítať do `<C1>`.

TODO MECHANIZMUS...

7.3.2 Testovací příklad

Balík *example* obsahuje jednoduchý príklad na otestovanie vyššie popísanej funkcionality. Spustiteľnou triedou daného príkladu je *example.Demo*. Po jej spustení sa program pokúsi:

1. Vytvoriť a inicializovať triedu *application.FieldChecker*.
2. Vykonať modifikáciu tried *example.Initializer* a *example.Triangle* (nedodržiavajú princíp zapuzdrenia) volaním metódy *fixFieldsAccess()*.
3. Skontrolovať funkčnosť modifikovaných tried ich použitím.

V prípade úspešnej modifikácie by mal výstup vyzeráť nasledovne:

Výstup testovacieho príkladu pre aplikáciu *code-improvement*

```
+ Getter for field: [a] in class [example.Triangle] was
  successfully created
+ Setter for field: [a] in class [example.Triangle] was
  successfully created
-> Read and write operations replaced for field
    [Triangle.a] in class [example.Initializer]

+ Getter for field: [b] in class [example.Triangle] was
  successfully created
+ Setter for field: [b] in class [example.Triangle] was
  successfully created
-> Read and write operations replaced for field
    [Triangle.b] in class [example.Initializer]
```

```
+ Getter for field: [c] in class [example.Triangle] was
  successfully created
+ Setter for field: [c] in class [example.Triangle] was
  successfully created
-> Read and write operations replaced for field
   [Triangle.c] in class [example.Initializer]

-----
Trying to use modified classes:

Created: Circle {radius is 5.0Vertex centre: [0.0, 0.0]}
Created: Vertices of Triangle are {Vertex A: [-1.0, -1.0],
  Vertex B: [1.0, -1.0], Vertex C: [1.0, 1.0]}

Get and set methods successfully tested.
```

Ak modifikácia neprebehla, napríklad v prípade opätovného spustenia na rovnakých triedach, vypíše program hlášku, ktorá upozorňuje užívateľa, že triedy, ktoré zadal, už boli v minulosti upravené.

Program je možné aplikovať na ľubovoľné triedy, definované v konštrukte *application.FieldChecker*⁴.

7.4 Optimalizácia neefektívnych častí kódu

Posledný z príkladov sa zaoberá optimalizáciou neefektívne generovaných častí bajtkódu. Vo všeobecnosti vykonáva na bajtkóde mnoho optimalizácií JVM. Existuje však mnoho druhov ďalších úprav, pomocou ktorých je možné bajtkód výrazne zefektívniť.

Jednými z najčastejšie sa vyskytujúcich inštrukcií sú inštrukcie typu *store* a *load*. Ich úlohou je vkladanie, respektíve výber položiek zo zásobníka. Pri opakovanej modifikácii jednej premennej teda vzniká veľké množstvo nadbytočných operácií zápisu a čítania jej hodnoty. Vhodnou optimalizáciou je preto odstránenie nadbytočných inštrukcií.

Cieľom tohto programu je identifikovať a odstrániť nadbytočné inštrukcie čítania a zápisu v prípade aritmetických operácií na premenných typu *double*.

Keďže vyžaduje priamu prácu s bajtkódom a jeho modifikáciu, je táto optimalizácia vhodným príkladom pre demonštráciu funkcionality oboch rozhraní knižnice *Javassist*.

4. V prípade, že ide o triedy mimo projektu *code-improvement* je potrebné zadať do argumentu konšuktora aj cestu k balíku obsahujúcemu *class* súbory triedy <C2>.

7.4.1 Štruktúra a funkčná logika aplikácie

Triedy popisujúce logiku aplikácie sa opäť nachádzajú v balíku *application*. Program sa skladá z troch tried: *ArithmeticOptimizer*, *MethodModifier* a *InstructionVerifier*. Triedou pre prístup k programu je *ArithmeticOptimizer*. Zvyšné triedy sú prístupné len v rámci balíka *application*, mimo neho by nemali byť nijako používané.

Kľúčovou triedou je teda *ArithmeticOptimizer* a jej metóda *optimizeClass(String classNameToOpt)*. Po inicializácii a jej volaní program iteruje cez všetky metódy triedy definovanej argumentom *classNameToOpt*. Každá metóda je následne optimalizovaná pomocou triedy *MethodModifier*. Na záver je prepísaný *class* súbor danej triedy a poskytnutá sumarizácie zmien.

Ako bolo uvedené vyššie, trieda *MethodModifier* slúži na priamu optimalizáciu zadanej metódy. Daná metóda je reprezentovaná pomocou triedy *MethodInfo*, ktorá knižnici *Javassist* slúži ako popis rovnomenného atribútu *class* súboru. Najdôležitejšou metódou triedy *MethodModifier* je *optimize()*. Táto metóda prechádza všetky inštrukcie bajtkódu a v prípade nájdeného nadbytočného páru *dstore*, *dload* tieto inštrukcie odstráni.

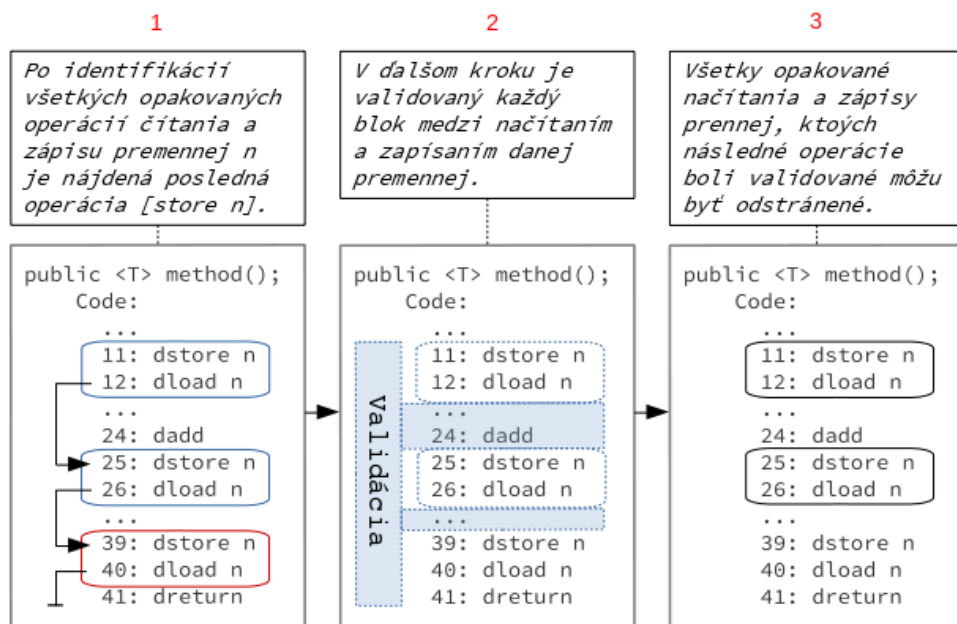
Program zvyčajne spracováva viac než jednu premennú pre danú metódu. Obrázok 7.3 popisuje kvôli prehľadnosti proces identifikácie nadbytočných inštrukcií čítania a zápisu jednej premennej *<n>*:

Ako nástroj na identifikáciu typu inštrukcie slúži programu trieda *InstructionVerifier*. Obsahuje metódy určujúce inštrukcie *dstore* a *dload*. Pomocou týchto metód je možné získať aj hodnotu argumentu spomínaných inštrukcií. Metóda *isArithmetic(int op)* rozhoduje, či inštrukcia definovaná argumentom *op* reprezentuje aritmetickú operáciu.

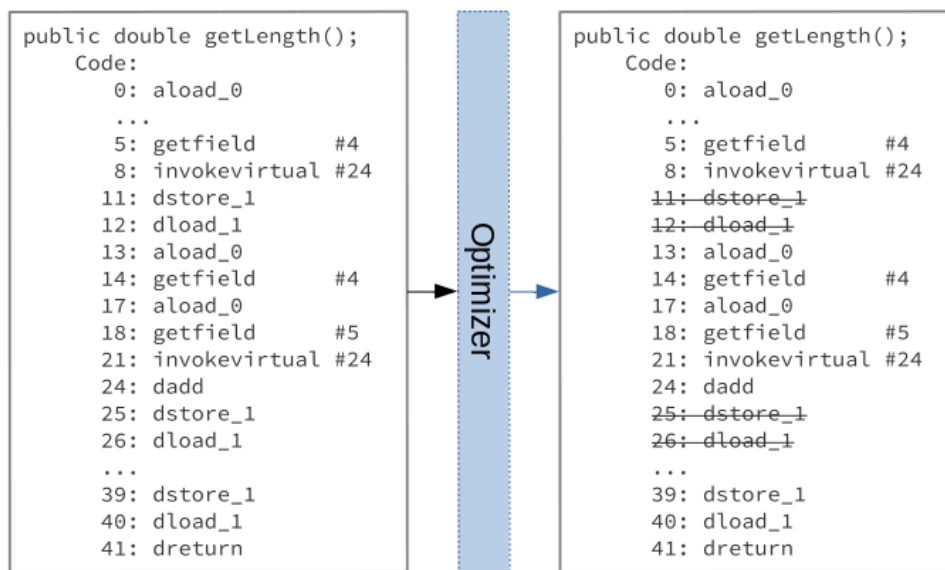
Balík *example* obsahuje dva príklady, na ktorých je možné aplikáciu testovať. Každý z príkladov má spustiteľnú triedu *Demo*, ktorá sa pokúsi optimalizovať vlastnú testovaciu triedu. Balík *example.simple* optimalizuje jednoduchú triedu *ArithmeticExample*, ktorá vykonáva aritmetické operácie. Balík *example.model* je príklad podobný demonštračnému príkladu úlohy z predchádzajúcej kapitoly. Podrobné fungovanie testovacích príkladov je uvedené v *Javadocu* a komentároch⁵.

Aplikáciu je takisto možné spustiť na ľubovoľnej triede vhodnej na optimalizáciu aritmetických operácií volaním metódy *application.ArithmeticOptimizer.optimizeClass(String classNameToOpt)*.

5. Podrobnosti o uvedených príkladoch sú uvedené aj v *README* súbore projektu.



Obr. 7.3: Znázornenie identifikácie nadbytočných inštrukcií čítania a zápisu premennej, zdroj: vlastné spracovanie



Obr. 7.4: Znázornenie optimalizácie bajtkódu jednej z metód balíka *example.model*, zdroj: vlastné spracovanie

Kapitola 8

Záver

Hlavným cieľom práce bola analýza, porovnanie a implementácia sady príkladov nástrojov určených na manipuláciu s bajtkódom jazyka Java. Nástrojmi použitými v tejto práci boli *Byteman* a *Javassist*.

Problematika manipulácie s bajtkódom má veľmi široké uplatnenie v mnohých odvetviach vývoja a testovania softvéru. Demonštračné príklady boli preto orientované na štyri vybrané oblasti:

- detekcia volania výnimiek,
- detekcia nesprávneho ošetrovania výnimiek,
- zlepšenie produkčného kódu,
- optimalizácia neefektívnych častí kódu.

Analýzou vlastností spomínaných nástrojov vyplynuli možnosti ich funkcionality a následné uplatnenie v príkladoch.

Z vlastností nástroja *Byteman* vyplýva, obmedzenie jeho použitia u obmedzenej množiny aplikácií. Tento nástroj nie je možné využiť na editovanie pôvodného bajtkódu. Jeho funkcionality je týmto obmedzená na pridávanie vlastného kódu. Uplatnenie bolo možné v prípade detekcie volania výnimiek spustenej aplikácie. Pri používaní sa nástroj javí stabilný a veľmi dobre ovládateľný.

Knižnica *Javassist* bola vďaka svojej rozsiahlej funkcionalite použitá takmer vo všetkých príkladoch. Manipulácia s týmto nástrojom bola o niečo náročnejšia. Výsledné príklady sú však badateľne využiteľnejšie. Najmä programy v oblasti zlepšenia a optimalizácie kódu by bolo po rozpracovaní možné použiť v praxi.

Vo väčšine projektov, ktoré manipulujú s bajtkódom je možné použiť knižnicu *Javassist*. Nástroj *Byteman* je však vhodnou alternatívou najmä v oblastiach trasovania a testovania programov.

Literatúra

- [LYBB13] Tim Lindholm, Frank Yellin, Gilad Bracha, and Alex Buckley. *The Java Virtual Machine Specification, Java SE 7 Edition*. Addison-Wesley Professional, 1st edition, 2013. <http://docs.oracle.com/javase/specs/jvms/se7/html/>.
- [Ora] Oracle. *Java Reflection API*. <http://docs.oracle.com/javase/tutorial/reflect/index.html>.
- [Ora11] Oracle. *Class ClassLoader documentation*, 7th edition, 2011. <http://docs.oracle.com/javase/7/docs/api/java/lang/ClassLoader.html>.
- [Reda] Red Hat and individual contributors. *Byteman Programmer's Guide*. <http://downloads.jboss.org/byteman/2.2.1/ProgrammersGuide.pdf>.
- [Redb] Red Hat and individual contributors. *Javassist Online API manual*. <http://www.csg.ci.i.u-tokyo.ac.jp/~chiba/javassist/html/index.html>.
- [RH] Inc. Red Hat. Byteman project description. <http://byteman.jboss.org>. Accessed: 2015-03-09.
- [Roe11] Kevin Roebuck. *Software Testing: High-impact Strategies - What You Need to Know Definitions, Adoptions, Impact, Benefits, Maturity, Vendors*. Tebbo, 2011.
- [Sel95] Timos Sellis. *Rules in Database Systems: Second International Workshop, RIDS '95, Glyfada, Athens, Greece, September 25 - 27, 1995. Proceedings*. Lecture Notes in Artificial Intelligence. Springer, 1995.
- [Shi] Shigeru Chiba. *Getting Started with Javassist*. <http://www.csg.ci.i.u-tokyo.ac.jp/~chiba/javassist/tutorial/tutorial.html>.

Dodatok A

Tabuľky

Zdrojom tabuliek 1 až 5 je špecifikácia JVM [LYBB13].

Constant Type	Value
CONSTANT_Class	7
CONSTANT_Fieldref	9
CONSTANT_Methodref	10
CONSTANT_InterfaceMethodref	11
CONSTANT_String	8
CONSTANT_Integer	3
CONSTANT_Float	4
CONSTANT_Long	5
CONSTANT_Double	6
CONSTANT_NameAndType	12
CONSTANT_Utf8	1
CONSTANT_MethodHandle	15
CONSTANT_MethodType	16
CONSTANT_InvokeDynamic	18

Tabuľka A.1: Tabuľka značiek určujúcich typ záznamu v *constant_pool*. Stĺpec *Constant Type* označuje názov typu, stĺpec *value* priradí uje každému typu číselnú hodnotu.

Meno Indikátora	Hodnota	Interpretácia
ACC_PUBLIC	0x0001	Deklarovaná ako verejná; prístupná aj mimo balíka.
ACC_FINAL	0x0010	Deklarovaná ako final; žiadne podtriedy po inicializácii.
ACC_SUPER	0x0020	Volá metódu nadtriedy, hlavne inštrukcia invokespecial.
ACC_INTERFACE	0x0200	Je rozhranie, nie trieda.
ACC_ABSTRACT	0x0400	Deklarovaná ako abstraktná, nemôže byť inštanciovaná.
ACC_SYNTHETIC	0x1000	Deklarovaná ako synthetic, nieje prítomná v zdrojovom kóde.
ACC_ANNOTATION	0x2000	Deklarovaná ako typ annotation.
ACC_ENUM	0x4000	Deklarovaná ako typ enum.

Tabuľka A.2: Tabuľka indikátorov prístupových práv *ClassFile* štruktúry.

Reprezentácia pomocou reťazca	Typ	Interpretácia
B	byte	znamienkové celé číslo veľkosti jedného bajtu
C	char	Znak s kódovaním UTF-16
D	double	číselná hodnota s dvojitou presnosťou a plávajúcou desatinnou čiarkou
F	float	číselná hodnota s plávajúcou desatinnou čiarkou
I	int	celé číslo
J	long	celé číslo väčšieho rozsahu
L ClassName ;	referencia	inštancia triedy ClassName
S	short	znamienkové celé číslo krátkeho rozsahu
Z	boolean	pravda alebo nepravda
[reference	jednorozmerné pole

Tabuľka A.3: Tabuľka reprezentácie dátových typov pre premenné.

Meno Indikátora	Hodnota	Interpretácia
ACC_PUBLIC	0x0001	Deklarovaná ako verejná; prístupná aj mimo balíka.
ACC_PRIVATE	0x0002	Deklarovaná ako privátna; použiteľná len v rámci triedy, v ktorej bola definovaná.
ACC_PROTECTED	0x0004	Deklarovaná ako protected; prístupná aj podtriedam.
ACC_STATIC	0x0008	Deklarovaná ako statická.
ACC_FINAL	0x0010	Deklarovaná ako final; žiadne ďalšie priradenia po inicializácii.
ACC_VOLATILE	0x0040	Deklarovaná ako volatile; nemôže byť uložená do medzipamäte.
ACC_TRANSIENT	0x0080	Deklarovaná ako transient; nieje čítaná ani modifikovaná objektovým manažérom.
ACC_SYNTHETIC	0x1000	Deklarovaná ako synthetic, nieje prítomná v zdrojovom kóde.
ACC_ENUM	0x4000	Deklarovaná ako prvok objektu enum

Tabuľka A.4: Tabuľka indikátorov prístupových práv a vlastností štruktúry *field_info*.

Meno Indikátora	Hodnota	Interpretácia
ACC_PUBLIC	0x0001	Deklarovaná ako verejná; prístupná aj mimo balíka.
ACC_PRIVATE	0x0002	Deklarovaná ako privátna; použiteľná len vrámci triedy, v ktorej bola definovaná.
ACC_PROTECTED	0x0004	Deklarovaná ako protected; prístupná aj podtriedam.
ACC_STATIC	0x0008	Deklarovaná ako statická.
ACC_FINAL	0x0010	Deklarovaná ako final; nemôže byť prepísaná.
ACC_SYNCHRONIZED	0x0020	Deklarovaná ako synchronized; pri volaní je zabalená za použitia monitora.
ACC_BRIDGE	0x0040	Bridge metóda; je generovaná prekladačom.
ACC_VARARGS	0x0080	Deklarovaná s dynamickým počtom argumentov.
ACC_NATIVE	0x0100	Deklarovaná ako natívna; implementovaná v inom jazyku ako Java.
ACC_ABSTRACT	0x0400	Deklarovaná ako abstraktná, nieje implementovaná.
ACC_STRICT	0x0800	Deklarovaná ako strictfp, výpočty s plávajúcou čiarkou sú FP - strict.
ACC_SYNTHETIC	0x1000	Deklarovaná ako synthetic, nieje prítomná v zdrojovom kóde.

Tabuľka A.5: Tabuľka indikátorov prístupových práv a vlastností štruktúry *method_info*.

Spúšťáč	Argumenty
AT ENTRY	-
AT EXIT	-
AT LINE	number
AT READ	[type .] field [count ALL]
AT READ	\$var-or-idx [count ALL]
AFTER READ	[type .] field [count ALL]
AFTER READ	\$var-or-idx [count ALL]
AT WRITE	[type .] field [count ALL]
AT WRITE	\$var-or-idx [count ALL]
AFTER WRITE	[type .] field [count ALL]
AFTER WRITE	\$var-or-idx [count ALL]
AT INVOKE	[type .] method [(argtypes)] [count ALL]
AFTER INVOKE	[type .] method [(argtypes)] [count ALL]
AT SYNCHRONIZE	[count ALL]
AFTER SYNCHRONIZE	[count ALL]
AT THROW	[count ALL]

Tabuľka A.6: Tabuľka možných umiestnení spúšťáčov jazyka ECA pravidiel pre nástroj *Byteman*. [Reda]

Dodatok B

Obsah CD

TODO - popis obsahu CD