Java Byte Code

9. prosince 2025

Naprosto zásadní částí platformy Java je její virtuální stroj, Java Virtual Machine (JVM), který provádí Java Byte Code (JBC), do nejž jsou programy v Javě a jiných programovacích jazycích překládány. Platforma Java nabízí celou řadu nástrojů, které umožňují s JBC pracovat, analyzovat jej nebo vytvářet dokonce vlastní kód, čehož se využívá i mimo vývojová prostředí.[1]

1 Analýza JBC

Exkurzi do světa JBC začneme nástrojem `javap`, který nám umožňuje zobrazit obsah jednotlivých souborů s třídami, které byly přeloženy do JBC (*class files*).

Předpokládejme, že máme jednoduchou třídu:

```
package cz.upol.pja.lecture09;

public class Point {
        private int x;
        private int y;
        public Point(int x, int y) {
                super();
                this.x = x;
                this.y = y;
        }
        public static Point create(int x, int y) {
                return new Point(x, y);
        }
        public int getX() {
                return x;
        }
        public void setX(int x) {
                this.x = x;
        }
        public int getY() {
```

[1] Oficiální rozhraní pro manipulaci s JBC je zatím pouze v preview verzi: `https://openjdk.org/jeps/457`, `https://openjdk.org/jeps/466`.

```
                return y;
        }
        public void setY(int y) {
                this.y = y;
        }
        @Override
        public String toString() {
                return "Point [x=" + x + ", y=" + y + "]";
        }
}
```

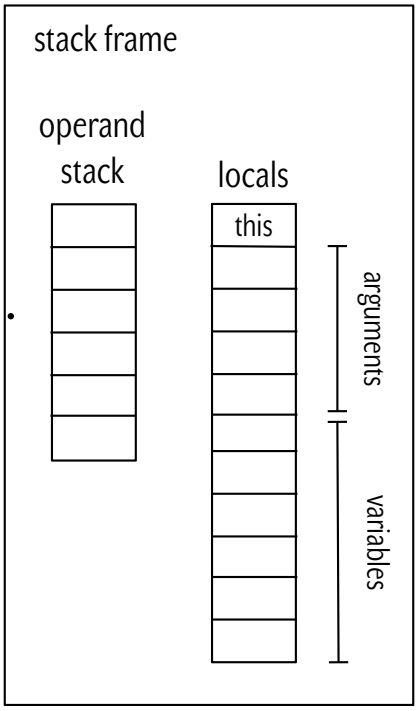
V základu nám program `javap` zobrází elementární informace o daném souboru:

```
> javap Point.class
Compiled from "Point.java"
public class cz.upol.pja.lecture09.Point {
  public cz.upol.pja.lecture09.Point(int, int);
  public static cz.upol.pja.lecture09.Point create(int, int);
  public int getX();
  public void setX(int);
  public int getY();
  public void setY(int);
  public java.lang.String toString();
}
```

S dalšími přepínači je možné získat další informace jako je například byte code jednotlivých metod. K tomu slouží přepínač `-c`.

```
> javap -c Point.class
Compiled from "Point.java"
public class cz.upol.pja.lecture09.Point {
  public cz.upol.pja.lecture09.Point(int, int);
    Code:
       0: aload_0
       1: invokespecial #11                 // Method java/lang/Object."<init>":()V
       4: aload_0
       5: iload_1
       6: putfield      #14                 // Field x:I
       9: aload_0
      10: iload_2
      11: putfield      #16                 // Field y:I
      14: return
```

Vzhledem k omezenému prostoru je zde ukázán jen byte code pro konstruktor. Vyzkoušejte si použití programu v rámci samostudia, ať vidíte úplný výpis metod.



Obrázek 1: Zásobníkový rámec vykonávané metody

Z přeloženého souboru lze získat i další informace, např. jak odpovídají jednotlivé částí JBC kódu řádkům kódu nebo jak vypadají jednotlivé zásobníkové rámce.

```
> javap -l Point.class
Compiled from "Point.java"
public class cz.upol.pja.lecture09.Point {
  public cz.upol.pja.lecture09.Point(int, int);
    LineNumberTable:
      line 18: 0
      line 19: 4
      line 20: 9
      line 21: 14
    LocalVariableTable:
      Start  Length  Slot  Name   Signature
          0      15     0  this   Lcz/upol/pja/lecture09/Point;
          0      15     1     x   I
          0      15     2     y   I
```

2 Jemný úvod do JBC

Na JVM můžeme nahlížet jako na zásobníkový procesor, kde vykonávaný kód se vztahuje vždy k nějaké metodě. Při každém vyvolání metody je alokován jeden zásobníkový rámec skládající se ze dvou částí (i) *operand stack*, kam jsou ukládány hodnoty, se kterými pracují jednotlivé instrukce JBC, a (ii) *locals*, což je oblast paměti, která má hned několik funkcí. V prvním slotu locals je uložen odkaz na aktuální objekt

(`this`),[2] další sloty obsahují argumenty, které byly předané dané metodě, a zbylé sloty obsahují lokální proměnné alokované v rámci metody. V případě operand stacku i oblasti locals, každá hodnota zabírá právě jeden slot s výjimkou hodnot typu `double` a `long`, které zabírají sloty dva. Strukturu zásobníku ilustruje Obrázek 1.

Jednotlivé instrukce JBC jsou docela jednoduché, obvykle mají žádný nebo jeden operand[3] a pracují s hodnotami uloženými na operand stacku.

Ukažme si použití na jednoduché metodě, která inkrementuje celočíselnou hodnotu o jedna.

```
public static int inc(int n) {
    return n + 1;
}
```

Tato metoda by se dala v JBC napsat jako posloupnost instrukcí.

```
iload_0    // načte na zásobník první argument
iconst_1   // načte na zásobník konstantu 1
iadd       // sečte dvě hodnoty na zásobníku
ireturn    // provede návrat z metody a vrací celočíselnou hodnotu ze zásobníku
```

U tohoto příkladu stojí za zmínku dvě věci. (i) Jednotlivé instrukce mají svůj prefix, který určuje s jakým typem pracují (např. „i" značí hodnotu typu integer, „d" double apod.) Instrukční sada obsahuje instrukce pro práci s nejběžnějšími konstantami nebo operandy.

Výčet jednotlivých instrukcí jde nad rámec tohoto textu a je přiložen k tomuto semináři.

3 Generování kódu s Class File API

Od verze Java 24[4] máme k dispozici rozhraní pro manipulaci s class-soubory, které umožnuje nejen analyzovat obsah již přiložených tříd, ale taktéž dynamicky generovat JBC JBC kód jednotlivých tříd, který je následně možné nechat vykonávat. Můžeme tak dynamicky vytvářet vlastní třídy, což se hodí, pokud chceme vytvořit něco jako vlastní překladač, potřebujeme generovat třídy, které odpovídají nějakému uživatelem zadanému vstupu, nebo chceme modifikovat chování existujících tříd.

Kód obsahuje čtyři typy příkladů zaměřené na (i) jednoduché metody, (ii) řídící struktury, (iii) volání metod a (iv) tvorbu plnohodnotných tříd.

3.1 Jednoduché metody

V příkladu `SimpleMethods.java` jsou ukázány implementace metod provádějící základní aritmetiku. Metoda z předchozího příkladu, provádějící inkrementaci, je realizována následovně.

Rozhraní Class File API silně staví na návrhnovém vzoru *Builder*. Máme proto *builder* pro sestavení třídy (`ClassBuilder`), metody (`MethodBuilder`) a samotného kódu (`CodeBuilder`).

[2] To neplatí, pokud se jedná o statickou metodu.
[3] Existují samozřejmě výjimky.
[4] Dříve se používaly extern9 knihovny jako Javassist nebo ASM.

Následující kód sestaví třídu se jménem `Foo`, mající jednu statickou metodu `int inc(int)`.

```
byte[] byteCode = ClassFile.of().build(ClassDesc.of("Foo"),
  (ClassBuilder cb) -> {
        cb.withMethod("inc", MethodTypeDesc.of(ConstantDescs.CD_int, ConstantDescs.CD_int),
           AccessFlag.PUBLIC.mask() | AccessFlag.STATIC.mask(), incMethodBuilder);
```

Builder, který se stará o sestavení souboru s třídou, nám předá `ClassBuilder cb`, který můžeme použít pro sestavení třídy. Pomocí metod `withMetod` nebo `withField` můžeme definovat jednotlivá metody a atributy třídy.

Všimněme si, že poslední argument metody je `MethodBuilder`, který nám poskytuje `CodeBuilder`, který můžeme použít pro sestavení kódu metody následovně.

```
Consumer<MethodBuilder> incMethodBuilder =
   methodBuilder -> methodBuilder.withCode(codeBuilder -> {
      codeBuilder
        .iload(0)
        .iconst_1()
        .iadd()
        .ireturn();
   });
```

3.2 Řídící struktury

Při implementaci řídících struktur (příklad `ControlStructure.java`) jako jsou podmínky či cykly narážíme na jeden problém, a to jak uvést adresu, kam bude skok proveden.

K tomu v Class File API slouží třída `Label` a metody `CodeBuilder.newLabel()` `CodeBuilder.labelBinding(Label)`. První vytvoří objekt návěští a druhá sváže tento objekt s touto adresou. Následně pak můžeme využít tento objekt v instrukcích skoku.

```
methodBuilder.withCode(codeBuilder -> {
   Label loopLabel = codeBuilder.newLabel();
   codebuilder
      .instrukce()
      // ...
      .labelBinding(loopLabel)
      .instrukce()
      //...
      .goto_(loopLabel)
      // ...
```

3.3 Volání metod

Práce s objekty včetně volání metod (viz příklad `MethodCalls.java`) vyžaduje ještě o něco víc péče, jelikož potřebujeme jednoznačně identifikovat jednotlivé metody. Musíme jednoznačně identifikovat třídu a u

každé metody musíme uvést jednoznačnou typovou signaturu. Dále je nutné volit odpovídající operaci pro volání metody, tj. rozlišovat instrukce `invokevirtual` (pro normální metody), `invokestatic` (pro statické metody) nebo `invokeinterface` (pro metody definované v rozhraní).

3.4 Tvorba plnohodnotných tříd

Poslední z příkladů (`Objects.java`) ukazuje vytvoření plnohodnotné třídy reprezentující bod v rovině. Tato třída má jak atributy, tak konstruktor, tak jednotlivé metody.

V tomto příkladu za povšimnutí stojí zejména konstruktor, kde na začátku konstruktoru musíme zavolat konstruktor předka s využitím `invokespecial`. Dále za povšimnutí stojí práce s atributy.

Nejdříve na zásobník uložíme hodnotu `this` a hodnotu, kterou chceme atributu přiřadit. A následně operací `putfield` nastavíme hodnotu. Podobně jako v případě metod je nezbytné identifikovat třídu, do které atribut patří a jeho typ, jak ukazuje následující kód.

```
codeBuilder
  .aload(0)          // `this`
  .iload(1)          // `i`
  .putfield(ClassDesc.of(CLASS_NAME), "x", ConstantDescs.CD_int)
  .return_();
```