Лабораторная работа №3	Группа 39	2022
ISA	Яковлев Илья Игоревич	

Цель работы: знакомство с архитектурой набора команд RISC-V.

Инструментарий и требования к работе: работа должна быть выполнена на C, C++, Python или Java. В отчёте указываем язык и компилятор/интерпретатор, на котором вы работали.

Описание

Необходимо написать программу-транслятор (дизассемблер), с помощью которой можно преобразовывать машинный код в текст программы на языке ассемблера.

Должен поддерживаться следующий набор команд: RISC-V RV32I, RV32M. Подробнее (volume 1): https://riscv.org/technical/specifications/

Кодирование: little endian.

Обрабатывать нужно только секции .text, .symtable.

Для каждой строки кода указывается её адрес в hex формате.

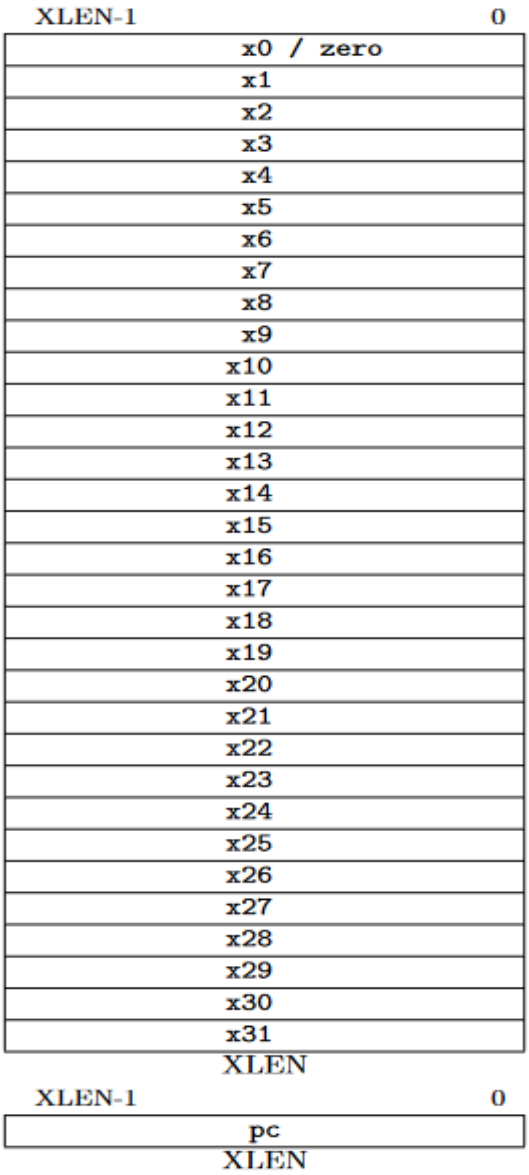
Обозначение меток нужно найти в Symbol Table (.symtab). Если же название метки там не найдено, то используется следующее обозначение: L%i, например, L2, L34. Нумерация начинается с 0. Для каждой метки перед названием указывается адрес (пример ниже).

Описание системы кодирования команд RISC-V

RISC-V – это ISA, которая была разработана для поддержки исследований и обучения компьютерной архитектуре. То есть это специальная разработанная некоммерческая архитектура набора инструкций, предназначенная для изучения архитектуры компьютера. Из-за такой цели эта ISA максимально упрощена, также разработчики стараются не вносить радикальные изменения в новые версии, чтобы поддерживать обратную совместимость.

У данной ISA есть множество наборов инструкций, однако мы будем работать только с RV32I и RV32M.

Устройство регистров:



RV32I – base integer instruction set, RV32M – расширение инструкций, включающее умножение и деление.

Всего есть 32 регистра, которые имеют размерность XLEN бит (в нашем случае XLEN = 32). x0 – особый регистр, связанный с со случаем, когда все биты 0. Регистр pc также особенный – он содержит адрес текущей инструкции. Остальные регистры x1-x31 – регистры общего назначения.

Также у регистров есть специальные названия:

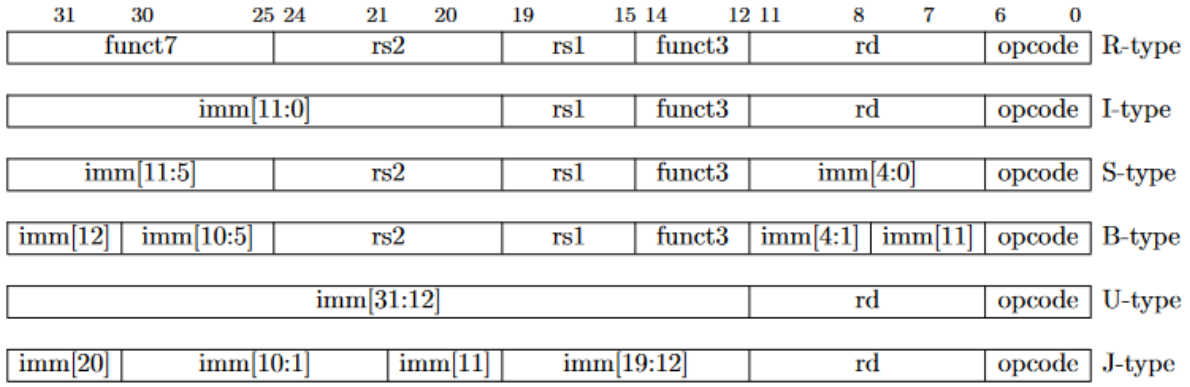
Register	ABI Name	Description	Saver
x0	zero	Hard-wired zero	—
x1	ra	Return address	Caller
x2	sp	Stack pointer	Callee
x3	gp	Global pointer	—
x4	tp	Thread pointer	—
x5	t0	Temporary/alternate link register	Caller
x6–7	t1–2	Temporaries	Caller
x8	s0/fp	Saved register/frame pointer	Callee
x9	s1	Saved register	Callee
x10–11	a0–1	Function arguments/return values	Caller
x12–17	a2–7	Function arguments	Caller
x18–27	s2–11	Saved registers	Callee
x28–31	t3–6	Temporaries	Caller
f0–7	ft0–7	FP temporaries	Caller
f8–9	fs0–1	FP saved registers	Callee
f10–11	fa0–1	FP arguments/return values	Caller
f12–17	fa2–7	FP arguments	Caller
f18–27	fs2–11	FP saved registers	Callee
f28–31	ft8–11	FP temporaries	Caller

Инструкции:

Рассматриваемые нами инструкции имеют длину 32 бита, но в общем случае это неверно. Могут быть инструкции и другой длинны, есть инструменты для увеличения длины инструкций.

В инструкциях rs1 и rs2 – регистры источника, rd – регистр назначения, funct3, funct7, opcode нужны для опознавания инструкций. Также могут встречаться константы imm. Примечание: в некоторых инструкциях биты могут быть разбросаны, как показано на схеме.

Базовые форматы инструкций с несколькими вариантами кодирования:



Сразу замечу, что S-type и B-type отличаются только в распределении битов константы, потому что в некоторых случаях удобнее пользоваться нестандартным распределением битов, в частности, при работе с адресами. Аналогично и с U-type и J-type.

R-type это инструкции, в которых происходят какие-то манипуляции с регистрами rs1 и rs2, а результат записывается в регистр rd. Например, сложение, умножение. Конкретная инструкция определяется по funct7, funct3, opcode.

I-type это инструкции, в которых происходят какие-то манипуляции с регистром rs1 и imm, а результат записывается в регистр rd. Например сложение с константой, считывание с какой-то операцией. Конкретная инструкция определяется по funct3, opcode.

S-type в данных инструкциях отсутствует регистр назначения. Обычно это инструкции для записи данных в память. Конкретная инструкция определяется по funct3, opcode.

U-type имеет большую константу и регистр назначения. Обычно это инструкции для записи константы в регистр. Конкретная инструкция определяется по opcode.

Список инструкций:

RV32M Standard Extension

0000001	rs2	rs1	000	rd	0110011	MUL
0000001	rs2	rs1	001	rd	0110011	MULH
0000001	rs2	rs1	010	rd	0110011	MULHSU
0000001	rs2	rs1	011	rd	0110011	MULHU
0000001	rs2	rs1	100	rd	0110011	DIV
0000001	rs2	rs1	101	rd	0110011	DIVU
0000001	rs2	rs1	110	rd	0110011	REM
0000001	rs2	rs1	111	rd	0110011	REMU

RV32I Base Instruction Set

imm[31:12]				rd	0110111	LUI
imm[31:12]				rd	0010111	AUIPC
imm[20|10:1|11|19:12]				rd	1101111	JAL
imm[11:0]		rs1	000	rd	1100111	JALR
imm[12|10:5]	rs2	rs1	000	imm[4:1|11]	1100011	BEQ
imm[12|10:5]	rs2	rs1	001	imm[4:1|11]	1100011	BNE
imm[12|10:5]	rs2	rs1	100	imm[4:1|11]	1100011	BLT
imm[12|10:5]	rs2	rs1	101	imm[4:1|11]	1100011	BGE
imm[12|10:5]	rs2	rs1	110	imm[4:1|11]	1100011	BLTU
imm[12|10:5]	rs2	rs1	111	imm[4:1|11]	1100011	BGEU
imm[11:0]		rs1	000	rd	0000011	LB
imm[11:0]		rs1	001	rd	0000011	LH
imm[11:0]		rs1	010	rd	0000011	LW
imm[11:0]		rs1	100	rd	0000011	LBU
imm[11:0]		rs1	101	rd	0000011	LHU
imm[11:5]	rs2	rs1	000	imm[4:0]	0100011	SB
imm[11:5]	rs2	rs1	001	imm[4:0]	0100011	SH
imm[11:5]	rs2	rs1	010	imm[4:0]	0100011	SW
imm[11:0]		rs1	000	rd	0010011	ADDI
imm[11:0]		rs1	010	rd	0010011	SLTI
imm[11:0]		rs1	011	rd	0010011	SLTIU
imm[11:0]		rs1	100	rd	0010011	XORI
imm[11:0]		rs1	110	rd	0010011	ORI
imm[11:0]		rs1	111	rd	0010011	ANDI
0000000	shamt	rs1	001	rd	0010011	SLLI
0000000	shamt	rs1	101	rd	0010011	SRLI
0100000	shamt	rs1	101	rd	0010011	SRAI
0000000	rs2	rs1	000	rd	0110011	ADD
0100000	rs2	rs1	000	rd	0110011	SUB
0000000	rs2	rs1	001	rd	0110011	SLL
0000000	rs2	rs1	010	rd	0110011	SLT
0000000	rs2	rs1	011	rd	0110011	SLTU
0000000	rs2	rs1	100	rd	0110011	XOR
0000000	rs2	rs1	101	rd	0110011	SRL
0100000	rs2	rs1	101	rd	0110011	SRA
0000000	rs2	rs1	110	rd	0110011	OR
0000000	rs2	rs1	111	rd	0110011	AND
fm | pred | succ		rs1	000	rd	0001111	FENCE
000000000000		00000	000	00000	1110011	ECALL
000000000001		00000	000	00000	1110011	EBREAK

Видно, что ECALL, EBREAK описываются полностью неизменяемым кодом. ECALL и EBREAK – специальные системные инструкции, которые могут потребовать привилегированных прав.

FENCE и вовсе вне всех типов, она используется для упорядочивания ввода и вывода.

ELF файл

В современных POSIX-системах основным форматом исполняемых файлов, объектных файлов, динамических библиотек является формат ELF. Этот формат используется и на 32-битных (Elf32), и на 64-битных (Elf64) системах и для машин с порядком байт Little-endian, и для машин с порядком байт Big-endian.

Описание структуры файла ELF

В начале файла идет заголовок ELF файла. Заголовок содержит в себе основные сведения об ELF файле. Он описывается такой структурой:

```
typedef struct
{
    unsigned char e_ident[16];
    uint16_t      e_type;
    uint16_t      e_machine;
    uint32_t      e_version;
    uint32_t      e_entry;
    uint32_t      e_phoff;
    uint32_t      e_shoff;
    uint32_t      e_flags;
    uint16_t      e_ehsize;
    uint16_t      e_phentsize;
    uint16_t      e_phnum;
    uint16_t      e_shentsize;
    uint16_t      e_shnum;
    uint16_t      e_shstrndx;
} Elf32_Ehdr;
```

Опишу наиболее важные поля:

e_ident[4] – характеризует размерность слова: 0 – неизвестно, 1- 32, 2 - 64 (в нашем случае 1)

e_ident[5] – характеризует порядок байт: 0 – неизвестно, 1- little-endian, 2 - big-endian (в нашем случае 1)

e_type – тип файла: 0 - неизвестно, 1 - объектный файл, 2 - исполняемый файл), 3 - разделяемая библиотека, 4 - core-файл (в нашем случае 2)

e_entry - определяет виртуальный адрес точки входа в программу. После загрузки программы в память управление передается на этот адрес.

e_phoff - задает смещение от начала файла до начала таблицы заголовков программы (program header table)

e_shoff - задает смещение от начала файла до начала таблицы заголовков секций (program section table)

e_phnum - хранит количество записей в таблице заголовков программы

e_shnum - хранит количество записей в таблице заголовков секций

e_shstrndx - хранит индекс заголовка секции, которая хранит имена всех секций

Информация в ELF файле организована в секции. Описывают эти секции их заголовки, которые лежат в таблице заголовков секций. Она представляет из себя массив структур (массив заголовков секций). Этот массив находится по смещению e_shoff. Элемент массива 0 зарезервирован. Таким образом, описания секций - это элементы массива с индексами от 1 до e_shnum – 1.

Структура заголовка секции:

```
typedef struct
{
    uint32_t   sh_name;
    uint32_t   sh_type;
    uint32_t   sh_flags;
    uint32_t   sh_addr;
    uint32_t   sh_offset;
    uint32_t   sh_size;
    uint32_t   sh_link;
    uint32_t   sh_info;
    uint32_t   sh_addralign;
    uint32_t   sh_entsize;
} Elf32_Shdr;
```

Опишу наиболее важные поля:

sh_name - хранит индекс имени секции, то есть хранит смещение в секции, хранящей имена (секция e_shstrndx). Имя – это последовательность символов, заканчивающаяся нулевым символом. Можно сказать, что это своеобразное расширение данных, которое специфицирует их назначение.

sh_offset - хранит смещение от начала файла, по которому размещаются данные секции

sh_size - хранит размер секции в байтах

Для написания дизассемблера нужно обработать секции .text и .symtable.

С секцией .text все просто: она содержит закодированные команды, с которыми нам нужно работать.

У секции .symtable есть своя внутренняя структура, которую необходимо описать. В данных .symtable хранятся структуры, которые содержат информацию для поиска и перемещения кода программы (в частности, метки). Вид внутреней структуры .symtable:

```
      typedef  struct  {
Elf32_Word      st_name;
Elf32_Addr     st_value;
Elf32_Word      st_size;
unsigned  char  st_info;
unsigned char st_other;
Elf32_Half     st_shndx;
} Elf32_Sym;
```

st_name - хранит индекс имени, то есть хранит смещение в специальной секции (секция .strtab)

st_value – хранит какое-то значение, причем что представляет из себя это значение контекстно зависимо

st_info – хранит некоторую информацию о данном элементе

st_shndx – хранит значение характеризующее данные элемента некоторым способом

С целью не рвать структуру описания ELF файла, опишу, что было посчитано при обработке symtable.

Обработка symtable осуществлена так, что для каждого значения секции symtable определены некоторые параметры:

Num – порядковый номер элемента

Value – его значение, равное st_value

Size – его размер, равное st_size

Type – тип элемента. Данный параметр получается из поля st_info по формуле st_info & 0xf. Таблица соответствия между полученным значением и названием типа:

Name	Value
STT_NOTYPE	0
STT_OBJECT	1
STT_FUNC	2
STT_SECTION	3
STT_FILE	4
STT_LOPROC	13
STT_HIPROC	15

Что значат типы, которые нам нужны, понятно из названия, так что подробной спецификации не будет.

Bind – доступ элемента. Данный параметр получается из поля st_info по формуле st_info >> 4. Таблица соответствия между полученным значением и названием уровня доступа:

Name	Value
STB_LOCAL	0
STB_GLOBAL	1
STB_WEAK	2
STB_LOPROC	13
STB_HIPROC	15

Что значат уровни доступа, которые нам нужны, понятно из названия, так что подробной спецификации не будет.

Vis – исключая ненужные детали, можно сказать, что в нормальной ситуации она равна default. Этот параметр зависит от st_other.

Ndx (или index) – характеристика данных элемента, равная st_shndx. Как конкретно этот параметр характеризует данные нам не важно, но важно, что

есть специальные значения, которые имеют специальные названия. Таблица специальных значений:

Name	Value
SHN_UNDEF	0
SHN_LORESERVE	0xff00
SHN_LOPROC	0xff00
SHN_HIPROC	0xff1f
SHN_ABS	0xfff1
SHN_COMMON	0xfff2
SHN_HIRESERVE	0xffff

Name – имя элемента по аналогии с st_name.

Некоторые замечания по ELF файлам:

Для загрузки программы на выполнение необходима информация, находящаяся в заголовках программы. Однако для выполнения задания анализ этих данных не нужен, из-за этого они не были описаны.

Little-endian работает в ELF файлах немного необычно. Можно разбить ELF файл на блоки размера 1 байт, 2 байта, 4 байта. Эти блоки - это стандартные типы, например, 32 битное число или 8 битный char. Так вот, в ELF файлах при порядке байт little-endian меняется порядок байтов внутри описанных выше блоков. Порядок битов и блоков относительно друг друга не меняется.

Описание работы кода

Вначале нужно вытащить из ELF файла нужные нам данные. Для этого создан класс ElfParser. Замечу, что в него встроено средство отладки, которое выводит отладочную информацию в стандартный вывод, если при инициализации ElfParser log = true. При инициализации парсера сразу инициализируются поля заголовка ELF файла и проверяются на корректность. Далее в методе parseSectionHeader мы пробегаемся по всем SectionHeader и каждый раз инициализируем секцию с помощью метода makeSectionHeader. Далее если эта секция .text, .symtab или .strtab, то мы

сохраняем необходимую информацию. В elfData – экземпляр TextSymtable - хранится нужная информация о .text и .symtab.

Также в ElfParser есть метод getSymtableString, который принимает OutputStream, куда записывает данные из .symtab в виде, который был описан выше, в описании ELF файлов. Наверное, стоит заметить, что в классе есть map’ы NDX, BIND, TYPE, которые хранят данные из соответственных табличек.

Еще в ElfParser есть метод getSymtableData, который возвращает map глобальных меток (первый аргумент – значение, второй – имя) из .symtab. Это нужно для дизассемблера. Теперь мы получили требуемые данные.

Эти данные принимает метод parseCommands (байты .text, адрес начала команд, полученную ранее map). Это метод класса DisassemblerBlock. Сразу отмечу, что из-за того, что нам нужно ставить в некоторые места метки, которые понадобятся (а значит и появятся) позже, придется дважды пробежаться по командам, но если пожертвовать наглядностью, то хватит и одного раза.

Разбор одной команды осуществляет метод parseComand. Она получает имя команды с помощью getName, которая ищет название инструкции по opcode, funct3, funct7 в заранее объявленных map’ах: OPCODE_UJ, OPCODE_ISB, OPCODE_R. Затем тип инструкции определяется по другой map - TYPE, в которой осуществлено обратное сопоставление. Затем в зависимости от типа операции вызывается парсер операций конкретного типа. Описывать работу каждого парсера излишне, но отмечу, что некоторые инструкции вызывают переходы, из-за чего ставится новая метка, если ее нет (именно для этого нам и нужна была map из .symtab).

Результат работы программы на приложенном к заданию файле

Результат работы программы находится в одном текстовом файле, но разделен согласно ТЗ. Вот его содержимое:

```
.text

00010074 <main>:

   10074:    ff010113           addi               sp,sp,-16

   10078:    00112623           sw                 ra,12(sp)
```

```
   1007c:    030000ef          jal                 ra,100ac <mmul>
   10080:    00c12083          lw                  ra,12(sp)
   10084:    00000513          addi                a0,zero,0
   10088:    01010113          addi                sp,sp,16
   1008c:    00008067          jalr                zero,0(ra)
   10090:    00000013          addi                zero,zero,0
   10094:    00100137          lui                 sp,0x100
   10098:    fddff0ef          jal                 ra,10074 <main>
   1009c:    00050593          addi                a1,a0,0
   100a0:    00a00893          addi                a7,zero,10
   100a4:    0ff0000f          unknown_instruction
   100a8:    00000073          ecall

000100ac <mmul>:
   100ac:    00011f37          lui                 t5,0x11
   100b0:    124f0513          addi                a0,t5,292
   100b4:    65450513          addi                a0,a0,1620
   100b8:    124f0f13          addi                t5,t5,292
   100bc:    e4018293          addi                t0,gp,-448
   100c0:    fd018f93          addi                t6,gp,-48
   100c4:    02800e93          addi                t4,zero,40

000100c8 <L2>:
   100c8:    fec50e13          addi                t3,a0,-20
   100cc:    000f0313          addi                t1,t5,0
   100d0:    000f8893          addi                a7,t6,0
   100d4:    00000813          addi                a6,zero,0

000100d8 <L1>:
   100d8:    00088693          addi                a3,a7,0
   100dc:    000e0793          addi                a5,t3,0
   100e0:    00000613          addi                a2,zero,0
```

```
000100e4 <L0>:
   100e4:    00078703           lb                a4,0(a5)
   100e8:    00069583           lh                a1,0(a3)
   100ec:    00178793           addi              a5,a5,1
   100f0:    02868693           addi              a3,a3,40
   100f4:    02b70733           mul               a4,a4,a1
   100f8:    00e60633           add               a2,a2,a4
   100fc:    fea794e3           bne               a5,a0,100e4 <L0>
   10100:    00c32023           sw                a2,0(t1)
   10104:    00280813           addi              a6,a6,2
   10108:    00430313           addi              t1,t1,4
   1010c:    00288893           addi              a7,a7,2
   10110:    fdd814e3           bne               a6,t4,100d8 <L1>
   10114:    050f0f13           addi              t5,t5,80
   10118:    01478513           addi              a0,a5,20
   1011c:    fa5f16e3           bne               t5,t0,100c8 <L2>
   10120:    00008067           jalr              zero,0(ra)


.symtab
Num:    Value   Size Type    Bind   Vis          Ndx Name
  0: 00000000      0 NOTYPE  LOCAL  DEFAULT      UND
  1: 00010074      0 SECTION LOCAL  DEFAULT        1
  2: 00011124      0 SECTION LOCAL  DEFAULT        2
  3: 00000000      0 SECTION LOCAL  DEFAULT        3
  4: 00000000      0 SECTION LOCAL  DEFAULT        4
  5: 00000000      0 FILE    LOCAL  DEFAULT      ABS test.c
  6: 00011924      0 NOTYPE  GLOBAL DEFAULT      ABS __global_pointer$
  7: 000118f4    800 OBJECT  GLOBAL DEFAULT        2 b
  8: 00011124      0 NOTYPE  GLOBAL DEFAULT        1 __SDATA_BEGIN__
  9: 000100ac    120 FUNC    GLOBAL DEFAULT        1 mmul
 10: 00000000      0 NOTYPE  GLOBAL DEFAULT      UND _start
```

```
 11: 00011124   1600 OBJECT  GLOBAL DEFAULT         2 c
 12: 00011c14      0 NOTYPE  GLOBAL DEFAULT         2 __BSS_END__
 13: 00011124      0 NOTYPE  GLOBAL DEFAULT         2 __bss_start
 14: 00010074     28 FUNC    GLOBAL DEFAULT         1 main
 15: 00011124      0 NOTYPE  GLOBAL DEFAULT         1 __DATA_BEGIN__
 16: 00011124      0 NOTYPE  GLOBAL DEFAULT         1 _edata
 17: 00011c14      0 NOTYPE  GLOBAL DEFAULT         2 _end
 18: 00011764    400 OBJECT  GLOBAL DEFAULT         2 a
```

Список источников:

https://refspecs.linuxfoundation.org/elf/elf.pdf

https://ejudge.ru/study/3sem/elf.html

https://riscv.org/wp-content/uploads/2017/05/riscv-spec-v2.2.pdf

https://habr.com/ru/post/480642/

https://riscv.org/technical/specifications/

Листинг кода:

```
import java.io.*;

public class Main {
    public static void main(String[] args) {
        try {
            InputStream input = new FileInputStream(args[1]);
            ElfParser parser = new ElfParser(input, false);
            DisassemblerBlock disassembler = new DisassemblerBlock();
            OutputStream output = new FileOutputStream(args[2]);
            output.write(".text".getBytes());
            output.write(disassembler.parseCommands(parser.getTextData(),
parser.getStartAddr(), parser.getSymtableData()).getBytes());
            output.write("\n.symtab\n".getBytes());
            parser.getSymtableString(output);
            output.close();
        } catch (IOException e) {
            System.out.println("Open file error " + e.getMessage());
        }
    }
}
```

```
import java.io.IOException;
import java.io.InputStream;
import java.io.OutputStream;
```

```java
import java.util.HashMap;
import java.util.Map;

public class ElfParser {
    private final Map<Integer, String> NDX = Map.of(
            0, "UND",
            65280, "LORESERVE",
            65311, "HIPROC",
            65521, "ABS",
            65522, "COMMON",
            65535, "HIRESERVE"
            );
    private final Map<Integer, String> BIND = Map.of(
            0, "LOCAL",
            1, "GLOBAL",
            2, "WEAK",
            13, "LOPROC",
            15, "HIPROC"
    );
    private final Map<Integer, String> TYPE = Map.of(
            0, "NOTYPE",
            1, "OBJECT",
            2, "FUNC",
            3, "SECTION",
            4, "FILE",
            13, "LOPROC",
            15, "HIPROC"
    );
    private TextSymtable elfData;
    private int strtabOffset;
    private int startAddr;
    private int[] elf;
    private char[] ident;
    private int type;
    private int machine;
    private int version;
    private int entry;
    private int phoff;
    private int shoff;
    private int flags;
    private int ehsize;
    private int phentsize;
    private int phnum;
    private int shentsize;
    private int shnum;
    private int shstrndx;
    private boolean log;

    ElfParser(InputStream elfFile, boolean log) {
        this.log = log;
        ident = new char[16];
        try {
            byte[] elf_byte = elfFile.readAllBytes();
            elfFile.close();
            elf = new int[elf_byte.length];
            for (int i = 0; i != elf.length; i++) {
                elf[i] = Byte.toUnsignedInt(elf_byte[i]);
            }
            for (int i = 0; i != 16; i++) {
                ident[i] = (char) elf_byte[i];
            }
```

```
            type = decodeLSB16(16);
            machine = decodeLSB16(18);
            version = decodeLSB32(20);
            entry = decodeLSB32(24);
            phoff = decodeLSB32(28);
            shoff = decodeLSB32(32);
            flags = decodeLSB32(36);
            ehsize = decodeLSB16(40);
            phentsize = decodeLSB16(42);
            phnum = decodeLSB16(44);
            shentsize = decodeLSB16(46);
            shnum = decodeLSB16(48);
            shstrndx = decodeLSB16(50);
            if (!isValidElf()) {
                throw new IllegalArgumentException("Incorrect elf file");
            }
            writeElfByteCode();
            elfData = parse();
        } catch (IOException e) {
            System.out.println("Reading error " + e.getMessage());
        }
    }

    public int[] getTextData() {
        return elfData.getText();
    }

    public int getStartAddr() {
        return startAddr;
    }

    private TextSymtable parse() {
        return parseSectionHeader();
    }

    private TextSymtable parseSectionHeader() {
        ElfSectionHeader nameSection = makeSectionHeader(shoff + shstrndx *
shentsize);
        TextSymtable data = new TextSymtable();
        for (int i = 1; i < shnum; i++) {
            ElfSectionHeader programSection = makeSectionHeader(shoff + i *
shentsize);
            write("ProgramSection " + i + "\n");
            String name = getName(nameSection.offset +
programSection.name);
            write(name + "\n");
            programSection.write();
            if (name.equals(".text")) {
                data.setText(readCode(programSection.offset,
programSection.size));
                startAddr = programSection.addr;
            } else if (name.equals(".symtab")) {
                data.setSymtable(programSection);
            } else if (name.equals(".strtab")) {
                strtabOffset = programSection.offset;
            }
            write("\n");
        }
        return data;
    }
```

```
    public void getSymtableString(OutputStream out) {
        int offset = elfData.getSymtable().offset, size =
elfData.getSymtable().size, nameOffset = strtabOffset;
        try {
            out.write(String.format("%3s:%9s%7s %-7s %-6s %-7s %9s %s\n",
"Num", "Value", "Size", "Type", "Bind", "Vis", "Ndx", "Name").getBytes());
            for (int i = 0; i + 15 < size; i += 16) {
                String name = getName(nameOffset + decodeLSB32(offset +
i));
                int value = decodeLSB32(offset + i + 4),
                        symSize = decodeLSB32(offset + i + 8),
                        shndx = decodeLSB16(offset + i + 14),
                        info = decodeLSB16(offset + i + 12) % 256;
                int bind = info >> 4, type = info & 0xf;
                out.write(String.format("%3d: %08x %6d %-7s %-6s %-7s %9s
%s\n", i / 16, value, symSize, TYPE.get(type), BIND.get(bind), "DEFAULT",
NDX.containsKey(shndx) ? NDX.get(shndx) : Integer.toString(shndx),
name).getBytes());
            }
        } catch (IOException e) {
            System.out.println("Writing error " + e.getMessage());
        }
    }

    public Map<Integer,String> getSymtableData() {
        Map<Integer,String> data = new HashMap<>();
        int offset = elfData.getSymtable().offset, size =
elfData.getSymtable().size, nameOffset = strtabOffset;
        for (int i = 0; i + 15 < size; i += 16) {
            String name = getName(nameOffset + decodeLSB32(offset + i));
            int value = decodeLSB32(offset + i + 4),
                    bind = (decodeLSB16(offset + i + 12) % 256) >> 4;
            if (bind == 1) {
                data.put(value, name);
            }
        }
        return data;
    }

    private ElfSectionHeader makeSectionHeader(int index) {
        return new ElfSectionHeader(decodeLSB32(index), decodeLSB32(index +
4),
                decodeLSB32(index + 8), decodeLSB32(index + 12),
decodeLSB32(index + 16),
                decodeLSB32(index + 20), decodeLSB32(index + 24),
decodeLSB32(index + 28),
                decodeLSB32(index + 32), decodeLSB32(index + 36), log);
    }

    private boolean isValidElf() {
        return ident[0] == 127 && ident[1] == 'E' && ident[2] == 'L' &&
ident[3] == 'F' &&
                ident[4] == 1 && ident[5] == 1 && type == 2 && flags == 0
&& ehsize == 52;
    }

    private int[] readCode(int offset, int size) {
        int[] data = new int[size];
        for (int i = offset; i + 3 < offset + size; i += 4) {
            writeBytes(data, i - offset, i, 4);
            write("\n");
```

```
        }
        return data;
    }

    private int decodeLSB16(int index) {
        int x1 = elf[index], x2 =  elf[index + 1];
        return x1 + x2 * (1 << 8);
    }

    private int decodeLSB32(int index) {
        int x1 = elf[index], x2 =  elf[index + 1], x3 = elf[index + 2], x4
=  elf[index + 3];
        return x1 + x2 * (1 << 8) + x3 * (1 << 16) + x4 * (1 << 24);
    }

    private void writeElfByteCode() {
        for (int i = 0; i != 16; i++) {
            write(+ident[i] + " ");
        }
        write("\n");
        write("type: " + type + "\nmachine: " + machine + "\nversion: " +
version +
            "\nentry: " + entry + "\nphoff: " + phoff + "\nshoff: " + shoff
+ "\nflags: " + flags +
            "\nehsize: " + ehsize + "\nphentsize: " + phentsize + "\nphnum:
" + phnum +
            "\nshentsize: " + shentsize + "\nshnum: " + shnum +
"\nshstrndx: " + shstrndx + "\n");
        for (int i = 0; i != elf.length; ++i) {
            write(Integer.toHexString(elf[i]) + " ");
        }
        write("\n");
    }

    private void writeBytes(int[] data, int offset, int index, int size) {
        for (int i = index + size - 1; i >= index; i--) {
            write(getBits(i));
            data[offset + index + size - 1 - i] = elf[i];
            if (i + 1 != index + size) {
                write("'");
            }
        }
    }

    private String getBits(int index) {
        String bits = Integer.toBinaryString(elf[index]);
        for (; bits.length() != 8; bits = "0" + bits);
        return bits;
    }

    private String getName(int index) {
        String name = "";
        for (int i = index; elf[i] != 0; i++) {
            name = name + ((char) elf[i]);
        }
        return name;
    }

    private void write(String message) {
        if (log) {
            System.out.print(message);
```

```
        }
    }
}


public class ElfSectionHeader {
    int name;
    private int type;
    private int flags;
    int addr;
    int offset;
    int size;
    private int link;
    private int info;
    private int addralign;
    private int entsize;
    private boolean log;

    public ElfSectionHeader(int name, int type, int flags, int addr, int
offset, int size, int link, int info, int addralign, int entsize, boolean
log) {
        this.name = name;
        this.type = type;
        this.flags = flags;
        this.addr = addr;
        this.offset = offset;
        this.size = size;
        this.link = link;
        this.info = info;
        this.addralign = addralign;
        this.entsize = entsize;
        this.log = log;
    }

    public void write() {
        if (log) {
            System.out.println("name: " + name + "\ntype: " + type +
"\nflags: " + flags +
                    "\naddr: " + addr + "\noffset: " + offset + "\nsize: "
+
                    size + "\nlink: " + link + "\ninfo: " + info +
                    "\naddralign: " + addralign + "\nentsize: " + entsize);
        }
    }
}


import java.util.HashMap;
import java.util.List;
import java.util.Map;
import java.util.Set;

public class DisassemblerBlock {
    private final Map<String, String> OPCODE_UJ = Map.of(
            "0110111", "LUI",
            "0010111", "AUIPC",
            "1101111", "JAL"
    );

    private final Map<String, Map <Integer, String>> OPCODE_ISB = Map.of(
```

```
            "1100111", Map.of(
                    0,"JALR"),
            "1100011", Map.of(
                    0,"BEQ",
                    1,"BNE",
                    4,"BLT",
                    5,"BGE",
                    6,"BLTU",
                    7,"BGEU"
            ),
            "0000011", Map.of(
                    0, "LB",
                    1, "LH",
                    2, "LW",
                    4, "LBU",
                    5, "LHU"
            ),
            "0100011", Map.of(
                    0, "SB",
                    1, "SH",
                    2, "SW"
            ),
            "0010011", Map.of(
                    0, "ADDI",
                    2, "SLTI",
                    3, "SLTIU",
                    4, "XORI",
                    6, "ORI",
                    7, "ANDI"
            )
    );
    private final Map<String, Map <Integer, Map <String, String>>> OPCODE_R
= Map.of(
            "0010011", Map.of(
                    1, Map.of(
                            "0000000", "SLLI"
                    ),
                    5, Map.of(
                            "0000000", "SRLI",
                            "0100000", "SRAI"
                    )
            ),
            "0110011", Map.of(
                    0, Map.of(
                            "0000000", "ADD",
                            "0100000", "SUB",
                            "0000001", "MUL"
                    ),
                    1, Map.of(
                            "0000000", "SLL",
                            "0000001", "MULH"
                    ),
                    2, Map.of(
                            "0000000", "SLT",
                            "0000001", "MULHSU"
                    ),
                    3, Map.of(
                            "0000000", "SLTU",
                            "0000001", "MULHU"
                    ),
                    4, Map.of(
```

```
                        "0000000", "XOR",
                        "0000001", "DIV"
                ),
                5, Map.of(
                        "0000000", "SRL",
                        "0100000", "SRA",
                        "0000001", "DIVU"
                ),
                6, Map.of(
                        "0000000", "OR",
                        "0000001", "REM"
                ),
                7, Map.of(
                        "0000000", "AND",
                        "0000001", "REMU"
                )
        )
);
private final List<String> regName = List.of(
        "zero",
        "ra",
        "sp",
        "gp",
        "tp",
        "t0",
        "t1",
        "t2",
        "s0",
        "s1",
        "a0",
        "a1",
        "a2",
        "a3",
        "a4",
        "a5",
        "a6",
        "a7",
        "s2",
        "s3",
        "s4",
        "s5",
        "s6",
        "s7",
        "s8",
        "s9",
        "s10",
        "s11",
        "t3",
        "t4",
        "t5",
        "t6"
        );
private final Map<String, Character> TYPE;
private int indexL;
public DisassemblerBlock() {
    TYPE = new HashMap<>();
    indexL = 0;
    TYPE.putAll(Map.of(
            "LUI", 'U',
            "AUIPC", 'U',
            "JAL", 'J',
```

```
                "JALR", 'I',
                "BEQ", 'B',
                "BNE", 'B',
                "BLT", 'B',
                "BGE", 'B',
                "BLTU", 'B',
                "BGEU", 'B'
        ));
        TYPE.putAll(Map.of(
                "LB", 'I',
                "LH", 'I',
                "LW", 'I',
                "LBU", 'I',
                "LHU", 'I',
                "SB", 'S',
                "SH", 'S',
                "SW", 'S',
                "ADDI", 'I',
                "SLTI", 'I'
        ));
        TYPE.putAll(Map.of(
                "SLTIU", 'I',
                "XORI", 'I',
                "ORI", 'I',
                "ANDI", 'I',
                "SLLI", 'R',
                "SRLI", 'R',
                "SRAI", 'R',
                "ADD", 'R',
                "SUB", 'R',
                "SLL", 'R'
        ));
        TYPE.putAll(Map.of(
                "SLTU", 'R',
                "XOR", 'R',
                "SRL", 'R',
                "SRA", 'R',
                "OR", 'R',
                "AND", 'R',
                "MUL", 'R',
                "MULH", 'R',
                "MULHSU", 'R',
                "MULHU", 'R'
        ));
        TYPE.putAll(Map.of(
                "DIV", 'R',
                "DIVU", 'R',
                "REM", 'R',
                "REMU", 'R'
        ));
    }

    public String parseCommands(final int[] commands, int addrStart, final
Map<Integer,String> symtabData) {
        int addr = addrStart;
        for (int i = 0; i + 3 < commands.length; i += 4) {
            parseCommand(get32Bits(commands[i], commands[i + 1], commands[i
+ 2], commands[i + 3]), addr, symtabData);
            addr += 4;
        }
        StringBuilder ansWithLabel = new StringBuilder();
```

```
        addr = addrStart;
        for (int i = 0; i + 3 < commands.length; i += 4) {
            if (symtabData.containsKey(addr)) {
                ansWithLabel.append(String.format( "\n%08x <%s>:\n", addr,
symtabData.get(addr)));
            }
            ansWithLabel.append(String.format("%8x:\t", addr));
            ansWithLabel.append(parseCommand(get32Bits(commands[i],
commands[i + 1], commands[i + 2], commands[i + 3]), addr, symtabData));
            ansWithLabel.append("\n");
            addr += 4;
        }
        return ansWithLabel.toString();
    }

    private String parseCommand(final String bits, int addr,
Map<Integer,String> symtabData) {
        String name = getName(bits);
        name = (name == null ? "unknown_instruction" : name.toLowerCase());
        String outString = String.format("%s\t\t%-20s", codeToHex(bits),
name);
        if (name.equals("unknown_instruction") || name.equals("ecall") ||
name.equals("ebreak")) {
            return outString;
        }
        char type = getType(name.toUpperCase());
        if (type == 'R') {
            return outString + parseTypeR(bits);
        } else if (type == 'I') {
            return outString + (Set.of("lb", "lh", "lw", "lbu", "lhu",
"jalr").contains(name) ? parseTypeI_LJ(bits) : parseTypeI_Other(bits));
        } else if (type == 'S') {
            return outString + parseTypeS(bits);
        } else if (type == 'B') {
            return outString + parseTypeB(bits, addr, symtabData);
        } else if (type == 'U') {
            return outString + parseTypeU(bits);
        } else if (type == 'J') {
            return outString + parseTypeJ(bits, addr, symtabData);
        } else {
            return codeToHex(bits) + "\tunknown_instruction";
        }
    }

    private String parseTypeR(String bits) {
        int rs2 = getRegisterNumber(bits, 7, 5), rs1 =
getRegisterNumber(bits, 12, 5), rd = getRegisterNumber(bits, 20, 5);
        return regName.get(rd) + "," + regName.get(rs1) + "," +
regName.get(rs2);
    }

    private String parseTypeI_LJ(String bits) {
        int imm = getNumber(bits, 0, 12), rs1 = getRegisterNumber(bits, 12,
5), rd = getRegisterNumber(bits, 20, 5);
        return regName.get(rd) + "," + imm + "(" + regName.get(rs1) + ")";
    }

    private String parseTypeI_Other(String bits) {
        int imm = getNumber(bits, 0, 12), rs1 = getRegisterNumber(bits, 12,
5), rd = getRegisterNumber(bits, 20, 5);
        return regName.get(rd) + "," + regName.get(rs1) + "," + imm;
```

```
    }

    private String parseTypeS(String bits) {
        int rs2 = getRegisterNumber(bits, 7, 5), rs1 =
getRegisterNumber(bits, 12, 5),
                imm = getNumber(bits.substring(0,7) +
bits.substring(20,25), 0, 12);
        return regName.get(rs2) + "," + imm + "(" + regName.get(rs1) + ")";
    }

    private String parseTypeB(String bits, int addr, Map<Integer,String>
symtabData) {
        int rs2 = getRegisterNumber(bits, 7, 5), rs1 =
getRegisterNumber(bits, 12, 5),
                imm = 2 * getNumber(bits.substring(0,1) +
bits.substring(24,25) + bits.substring(1,7) + bits.substring(20,24), 0,
12);
        return regName.get(rs1) + "," + regName.get(rs2) + "," +
Integer.toHexString(imm + addr) + " <" + getLabel(imm + addr, symtabData) +
">";
    }

    private String parseTypeU(String bits) {
        int imm = getNumber(bits, 0, 20), rd = getRegisterNumber(bits, 20,
5);
        return regName.get(rd) + ",0x" + Integer.toHexString(imm);
    }

    private String parseTypeJ(String bits, int addr, Map<Integer,String>
symtabData) {
        int rd = getRegisterNumber(bits, 20, 5),
                imm = 2 * getNumber(bits.substring(0,1) +
bits.substring(12,20) + bits.substring(11,12) + bits.substring(1,11), 0,
20);
        return regName.get(rd) + "," + Integer.toHexString(imm + addr) + "
<" + getLabel(imm + addr, symtabData) + ">";
    }

    private String getLabel(int addr, Map<Integer,String> symtabData) {
        if (!symtabData.containsKey(addr)) {
            symtabData.put(addr, "L" + indexL);
            indexL++;
        }
        return symtabData.get(addr);
    }

    private int getRegisterNumber(String bits, int first, int size) {
        int value = 0;
        for (int i = first; i != first + size; i++) {
            value = value<<1;
            if (bits.charAt(i) == '1') {
                value += 1;
            }
        }
        return value;
    }

    private int getNumber(String bits, int first, int size) {
        int value = 0;
        for (int i = first; i != first + size; i++) {
            value = value<<1;
```

```
            if (bits.charAt(i) == '1') {
                if (i == first) {
                    value -= 1;
                } else {
                    value += 1;
                }
            }
        }
        return value;
    }

    private char getType(final String name) {
        return TYPE.get(name);
    }

    private String codeToHex(String bits) {
        return Integer.toHexString(getRegisterNumber(bits, 0 , 4)) +
Integer.toHexString(getRegisterNumber(bits, 4 , 4)) +
                Integer.toHexString(getRegisterNumber(bits, 8 , 4)) +
Integer.toHexString(getRegisterNumber(bits, 12 , 4)) +
                Integer.toHexString(getRegisterNumber(bits, 16 , 4)) +
Integer.toHexString(getRegisterNumber(bits, 20 , 4)) +
                Integer.toHexString(getRegisterNumber(bits, 24 , 4)) +
Integer.toHexString(getRegisterNumber(bits, 28 , 4));
    }

    private String getName(final String bits) {
        if (bits.equals("00000000000000000000000001110011")) {
            return "ECALL";
        }
        if (bits.equals("00000000000100000000000001110011")) {
            return "EBREAK";
        }
        String opcode = bits.substring(25, 32),
                funct7 = bits.substring(0, 7);
        int funct3 = Integer.parseInt(bits.substring(17, 20), 2);
        if (OPCODE_UJ.containsKey(opcode)) {
            return OPCODE_UJ.get(opcode);
        } else if (OPCODE_ISB.containsKey(opcode) &&
OPCODE_ISB.get(opcode).containsKey(funct3)) {
            return OPCODE_ISB.get(opcode).get(funct3);
        } else if (OPCODE_R.containsKey(opcode) &&
OPCODE_R.get(opcode).containsKey(funct3) &&
OPCODE_R.get(opcode).get(funct3).containsKey(funct7)) {
            return OPCODE_R.get(opcode).get(funct3).get(funct7);
        } else {
            return null;
        }
    }

    private String get32Bits(int b1, int b2, int b3, int b4) {
        return get8Bits(b1) + get8Bits(b2) + get8Bits(b3) + get8Bits(b4);
    }

    private String get8Bits(int x) {
        String bits = Integer.toBinaryString(x);
        for (; bits.length() != 8; bits = "0" + bits);
        return bits;
    }
}
```

```java
public class TextSymtable {
    private int[] text;
    private ElfSectionHeader symtable;

    public TextSymtable() {}

    public int[] getText() {
        return text;
    }

    public ElfSectionHeader getSymtable() {
        return symtable;
    }

    public void setText(int[] text) {
        this.text = text;
    }

    public void setSymtable(ElfSectionHeader symtable) {
        this.symtable = symtable;
    }
}
```