

Laboratorio di Linguaggi Formali e Traduttori

Corso di Studi in Informatica

A.A. 2019/2020

Viviana Patti e Jeremy Sproston
Dipartimento di Informatica — Università degli Studi di Torino

Versione del 2 dicembre 2019

Sommario

Questo documento descrive le esercitazioni di laboratorio e le modalità d'esame del corso di *Linguaggi Formali e Traduttori* per l'A.A. 2019/2020.

Svolgimento e valutazione del progetto di laboratorio

È consigliato sostenere l'esame nella prima sessione d'esame dopo il corso.

Supporto on-line al corso e forum di discussione

Sulla piattaforma I-learn sono disponibili due forum: il primo è dedicato alla pubblicazione di annunci e notizie di carattere generale, mentre il secondo è un forum di discussione dedicato per gli argomenti affrontati durante il corso. L'iscrizione al forum annunci è effettuata automaticamente, è possibile disiscriversi ma è consigliabile farlo solo a seguito del superamento dell'esame per poter sempre ricevere in modo tempestivo le comunicazioni effettuate dal docente.

Progetto di laboratorio

Il progetto di laboratorio consiste in una serie di esercitazioni assistite mirate allo sviluppo di un semplice traduttore. Il corretto svolgimento di tali esercitazioni presuppone una buona conoscenza del linguaggio di programmazione Java e degli argomenti di teoria del corso Linguaggi Formali e Traduttori.

Modalità dell'esame di laboratorio

Per sostenere l'esame a un appello è necessario prenotarsi. L'esame di laboratorio è **orale e individuale**, anche se il codice è stato sviluppato in collaborazione con altri studenti. Durante l'esame vengono accertati: il corretto svolgimento della prova di laboratorio; la comprensione della sua struttura e del suo funzionamento; la comprensione delle parti di teoria correlata al laboratorio stesso.

Note importanti

- Per poter discutere il laboratorio è *necessario* aver prima superato la prova scritta relativa al modulo di teoria. L'esame di laboratorio deve essere superato nella sessione d'esame in cui viene superato lo scritto, altrimenti lo scritto deve essere sostenuto nuovamente.

- La presentazione di codice “funzionante” non è condizione sufficiente per il superamento della prova di laboratorio. In altri termini, è possibile essere respinti presentando codice funzionante (se lo studente dimostra di non avere adeguata familiarità con il codice e i concetti correlati).
- Il progetto di laboratorio può essere svolto individualmente o in gruppi formati da al massimo 3 studenti. Anche se il codice è stato sviluppato in collaborazione con altri studenti, i punteggi ottenuti dai singoli studenti sono indipendenti. Per esempio, a parità di codice presentato, è possibile che uno studente meriti 30, un altro 25 e un altro ancora sia respinto.
- Dal momento che durante la prova è possibile che venga richiesto di apportare modifiche al codice del progetto, è opportuno presentarsi all’esame con un’adeguata conoscenza del progetto e degli argomenti di teoria correlati.

Calcolo del voto finale

I voti della prova scritta e della prova di laboratorio sono espressi in trentesimi. Il voto finale è determinato calcolando la media pesata del voto della prova scritta e del laboratorio, secondo il loro contributo in CFU (con una eventuale modifica nel caso in cui lo studente ha scelto di sostenere una prova orale), e cioè

$$\text{voto finale} = \frac{\text{voto dello scritto} \times 2 + \text{voto del laboratorio}}{3} \pm \text{esito orale (facoltativo)}$$

Validità del presente testo di laboratorio

Il presente testo di laboratorio è valido sino alla sessione di febbraio 2021.

1 Implementazione di un DFA in Java

Lo scopo di questo esercizio è l’implementazione di un metodo Java che sia in grado di discriminare le stringhe del linguaggio riconosciuto da un automa a stati finiti deterministico (DFA) dato. Il primo automa che prendiamo in considerazione, mostrato in Figura 1, è definito sull’alfabeto $\{0, 1\}$ e riconosce le stringhe in cui compaiono almeno 3 zeri consecutivi.

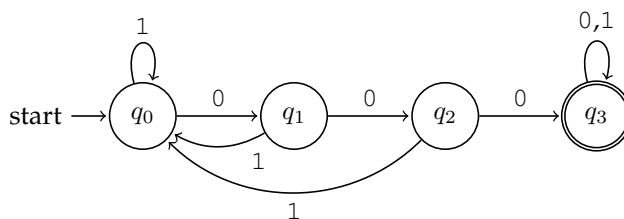


Figura 1: DFA che riconosce stringhe con 3 zeri consecutivi.

L’implementazione Java del DFA di Figura 1 è mostrata in Listing 1. L’automa è implementato nel metodo `scan` che accetta una stringa `s` e restituisce un valore booleano che indica se la stringa appartiene o meno al linguaggio riconosciuto dall’automa. Lo stato dell’automa è rappresentato per mezzo di una variabile intera `state`, mentre la variabile `i` contiene l’indice del prossimo carattere della stringa `s` da analizzare. Il corpo principale del metodo è un ciclo che, analizzando il contenuto della stringa `s` un carattere alla volta, effettua un cambiamento dello stato dell’automa secondo la sua funzione di transizione. Notare che l’implementazione assegna

il valore -1 alla variabile `state` se viene incontrato un simbolo diverso da 0 e 1. Tale valore non è uno stato valido, ma rappresenta una condizione di errore irrecuperabile.

Listing 1: Implementazione Java del DFA di Figura 1.

```
public class TreZeri
{
    public static boolean scan(String s)
    {
        int state = 0;
        int i = 0;

        while (state >= 0 && i < s.length()) {
            final char ch = s.charAt(i++);

            switch (state) {
                case 0:
                    if (ch == '0')
                        state = 1;
                    else if (ch == '1')
                        state = 0;
                    else
                        state = -1;
                    break;

                case 1:
                    if (ch == '0')
                        state = 2;
                    else if (ch == '1')
                        state = 0;
                    else
                        state = -1;
                    break;

                case 2:
                    if (ch == '0')
                        state = 3;
                    else if (ch == '1')
                        state = 0;
                    else
                        state = -1;
                    break;

                case 3:
                    if (ch == '0' || ch == '1')
                        state = 3;
                    else
                        state = -1;
                    break;
            }
        }
        return state == 3;
    }

    public static void main(String[] args)
    {
        System.out.println(scan(args[0]) ? "OK" : "NOPE");
    }
}
```

}

Esercizio 1.1. Copiare il codice in Listing 1, compilarlo e testarlo su un insieme significativo di stringhe, per es. "010101", "1100011001", "10214", ecc.

Come deve essere modificato il DFA in Figure 1 per riconoscere il linguaggio complementare, ovvero il linguaggio delle stringhe di 0 e 1 che **non** contengono 3 zeri consecutivi? Progettare e implementare il DFA modificato, e testare il suo funzionamento.

Esercizio 1.2. Progettare e implementare un DFA che riconosca il linguaggio degli identificatori in un linguaggio in stile Java: un identificatore è una sequenza non vuota di lettere, numeri, ed il simbolo di "underscore" _ che non comincia con un numero e che non può essere composto solo dal simbolo _. Compilare e testare il suo funzionamento su un insieme significativo di esempi.

Esempi di stringhe accettate: "x", "flag1", "x2y2", "x_1", "lft_lab", "_temp", "x_1_y_2", "x___", "___5"

Esempi di stringhe non accettate: "5", "221B", "123", "9_to_5", "___"

Esercizio 1.3. Progettare e implementare un DFA che riconosca il linguaggio di stringhe che contengono un numero di matricola seguito (subito) da un cognome, dove la combinazione di matricola e cognome corrisponde a studenti del turno 2 o del turno 3 del laboratorio di Linguaggi Formali e Traduttori. Si ricorda le regole per suddivisione di studenti in turni:

- Turno T1: cognomi la cui iniziale è compresa tra A e K, e il numero di matricola è dispari;
- Turno T2: cognomi la cui iniziale è compresa tra A e K, e il numero di matricola è pari;
- Turno T3: cognomi la cui iniziale è compresa tra L e Z, e il numero di matricola è dispari;
- Turno T4: cognomi la cui iniziale è compresa tra L e Z, e il numero di matricola è pari.

Per esempio, "123456Bianchi" e "654321Rossi" sono stringhe del linguaggio, mentre "654321Bianchi" e "123456Rossi" no. Nel contesto di questo esercizio, un numero di matricola non ha un numero prestabilito di cifre (ma deve essere composto di almeno una cifra). Un cognome corrisponde a una sequenza di lettere, e deve essere composto di almeno una lettera. Quindi l'automa deve accettare le stringhe "2Bianchi" e "122B" ma non "654322" e "Rossi". Assicurarsi che il DFA sia minimo.

Esercizio 1.4. Modificare l'automa dell'esercizio precedente in modo che riconosca le combinazioni di matricola e cognome di studenti del turno 2 o del turno 3 del laboratorio, dove il numero di matricola e il cognome possono essere separati da una sequenza di spazi, e possono essere precedute e/o seguite da sequenze eventualmente vuote di spazi. Per esempio, l'automa deve accettare la stringa "654321 Rossi" e " 123456 Bianchi " (dove, nel secondo esempio, ci sono spazi prima del primo carattere e dopo l'ultimo carattere), ma non "1234 56Bianchi" e "123456Bia nchi". Per questo esercizio, i cognomi composti (con un numero arbitrario di parti) possono essere accettati: per esempio, la stringa "123456De Gasperi" deve essere accettato. Modificare l'implementazione Java dell'automa di conseguenza.

Esercizio 1.5. Progettare e implementare un DFA che, come in Esercizio 1.3, riconosca il linguaggio di stringhe che contengono matricola e cognome di studenti del turno 2 o del turno 3 del laboratorio, ma in cui il cognome precede il numero di matricola (in altre parole, le posizioni del cognome e matricola sono scambiate rispetto all'Esercizio 1.3). Assicurarsi che il DFA sia minimo.

Esercizio 1.6. Progettare e implementare un DFA che riconosca il linguaggio dei numeri binari (stringhe di 0 e 1) il cui valore è multiplo di 3. Per esempio, "110", "1001" e "0" sono stringhe del linguaggio (rappresentano rispettivamente i numeri 6, 9 e 0), mentre "10" e "111" no (rappresentano rispettivamente i numeri 2 e 7). Eventuale sequenze di 0 iniziali devono essere trattate: ad esempio, il DFA deve accettare le stringhe "0110" e "0001111".

Suggerimento: usare tre stati per rappresentare il resto della divisione per 3 del numero.

Esercizio 1.7. Progettare e implementare un DFA con alfabeto $\{a, b\}$ che riconosca il linguaggio delle stringhe tali che a occorre almeno una volta in una delle *prime* tre posizioni della stringa. Il DFA deve accettare anche stringhe che contengono meno di tre simboli (ma almeno uno dei simboli deve essere a).

Esempi di stringhe accettate: "abb", "abbbbb", "bbaba", "baaaaaa", "aaaaaaa", "a", "ba", "bba", "aa", "bbabbbbbbbb"

Esempi di stringhe non accettate: "bbbababab", "b"

Esercizio 1.8. Progettare e implementare un DFA con alfabeto $\{a, b\}$ che riconosca il linguaggio delle stringhe tali che a occorre almeno una volta in una delle *ultime* tre posizioni della stringa. Come nell'esercizio 1.7, il DFA deve accettare anche stringhe che contengono meno di tre simboli (ma almeno uno dei simboli deve essere a).

Esempi di stringhe accettate: "abb", "bbaba", "baaaaaa", "aaaaaaa", "a", "ba", "bba", "aa", "bbbababab"

Esempi di stringhe non accettate: "abbbbb", "bbabbbbbbbb", "b"

Esercizio 1.9. Progettare e implementare un DFA che riconosca il linguaggio di stringhe che contengono il tuo nome e tutte le stringhe ottenute dopo la sostituzione di un carattere del nome con un altro qualsiasi. Ad esempio, nel caso di uno studente che si chiama Paolo, il DFA deve accettare la stringa "Paolo" (cioè il nome scritto correttamente), ma anche le stringhe "Pjolo", "caolo", "Pa%lo", "Paola" e "Parlo" (il nome dopo la sostituzione di un carattere), ma non "Eva", "Perro", "Pietro" oppure "P*o*o".

Esercizio 1.10. Progettare e implementare un DFA con alfabeto $\{/, *, a\}$ che riconosca il linguaggio di "commenti" delimitati da $/*$ (all'inizio) e $*/$ (alla fine): cioè l'automa deve accettare le stringhe che contengono almeno 4 caratteri che iniziano con $/*$, che finiscono con $*/$, e che contengono una sola occorrenza della sequenza $*/$, quella finale (dove l'asterisco della sequenza $*/$ non deve essere in comune con quello della sequenza $/*$ all'inizio).

Esempi di stringhe accettate: "/**/", "/*a*/", "/*a*/", "/*a//a/a*/", "/**/", "/**/"

Esempi di stringhe non accettate: "/*/", "/*/**/"

Esercizio 1.11. Modificare l'automa dell'esercizio precedente in modo che riconosca il linguaggio di stringhe (sull'alfabeto $\{/, *, a\}$) che contengono "commenti" delimitati da $/*$ e $*/$, ma con la possibilità di avere stringhe prima e dopo come specificato qui di seguito. L'idea è che sia possibile avere eventualmente commenti (anche multipli) immersi in una sequenza di simboli dell'alfabeto. Quindi l'unico vincolo è che l'automa deve accettare le stringhe in cui un'occorrenza della sequenza $/*$ deve essere seguita (anche non immediatamente) da un'occorrenza della sequenza $*/$. Le stringhe del linguaggio possono **non** avere nessuna occorrenza della sequenza $/*$ (caso della sequenza di simboli senza commenti). Implementare l'automa seguendo la costruzione vista in Listing 1.

Esempi di stringhe accettate: "aaa/**/aa", "aa/*a*/", "aaaa", "/**/", "/*a*/", "*/a", "a/*/*a", "a/*/*a", "a/*/*a/*a"

Esempi di stringhe non accettate: "aaa/*aa", "a/*/*a", "aa/*aa"

2 Analisi lessicale

Gli esercizi di questa sezione riguardano l'implementazione di un analizzatore lessicale per un semplice linguaggio di programmazione. Lo scopo di un analizzatore lessicale è di leggere un testo e di ottenere una corrispondente sequenza di token, dove un token corrisponde ad un'unità lessicale, come un numero, un identificatore, un operatore relazionale, una parola chiave, ecc. Nelle sezioni successive, l'analizzatore lessicale da implementare sarà poi utilizzato per fornire l'input a programmi di analisi sintattica e di traduzione.

I token del linguaggio sono descritti nel modo illustrato in Tabella 1. La prima colonna contiene le varie categorie di token, la seconda presenta descrizioni dei possibili lessemi dei token, mentre la terza colonna descrive i nomi dei token, espressi come costanti numeriche.

Token	Pattern	Nome
Numeri	Costante numerica	256
Identificatore	Lettera seguita da lettere e cifre	257
Relop	Operatore relazionale (<,>,<=,>=,==,<>)	258
Condizionale	cond	259
When	when	260
Then	then	261
Else	else	262
While	while	263
Do	do	264
Sequence	seq	265
Print	print	266
Read	read	267
Disgiunzione		268
Congiunzione	&&	269
Negazione	!	33
Parentesi tonda sinistra	(40
Parentesi tonda destra)	41
Parentesi graffa sinistra	{	123
Parentesi graffa destra	}	125
Somma	+	43
Sottrazione	-	45
Moltiplicazione	*	42
Divisione	/	47
Assegnamento	=	61
Punto e virgola	;	59
EOF	Fine dell'input	-1

Tabella 1: Descrizione dei token del linguaggio

Gli identificatori corrispondono all'espressione regolare $[a - zA - Z][a - zA - Z0 - 9]^*$, e i numeri corrispondono all'espressione regolare $0 | [1 - 9][0 - 9]^*$.

L'analizzatore lessicale dovrà ignorare tutti i caratteri riconosciuti come "spazi" (incluse le tabulazioni e i ritorni a capo), ma dovrà segnalare la presenza di caratteri illeciti, quali ad esempio # o @.

L'output dell'analizzatore lessicale dovrà avere la forma $\langle token_0 \rangle \langle token_1 \rangle \dots \langle token_n \rangle$. Ad esempio:

- per l'input `d=300;` l'output sarà $\langle 257, d \rangle \langle 61 \rangle \langle 256, 300 \rangle \langle 59 \rangle \langle -1 \rangle$;
- per l'input `print(* d t)` l'output sarà $\langle 266, print \rangle \langle 40 \rangle \langle 42 \rangle \langle 257, d \rangle \langle 257, t \rangle \langle 41 \rangle \langle -1 \rangle$;
- per l'input `cond when (> x y) then (= x 0) else (= y 0)` l'output sarà $\langle 259, cond \rangle \langle 260, when \rangle \langle 40 \rangle \langle 258, > \rangle \langle 257, x \rangle \langle 257, y \rangle \langle 41 \rangle \langle 261, then \rangle \langle 40 \rangle \langle 61 \rangle \langle 257, x \rangle \langle 256, 0 \rangle \langle 41 \rangle \langle 262, else \rangle \langle 40 \rangle \langle 61 \rangle \langle 257, y \rangle \langle 256, 0 \rangle \langle 41 \rangle \langle -1 \rangle$;
- per l'input `while (conds<=printread) do conds=conds+1` l'output sarà $\langle 263, while \rangle \langle 40 \rangle \langle 257, conds \rangle \langle 258, <= \rangle \langle 257, printread \rangle \langle 41 \rangle \langle 264, do \rangle \langle 257, conds \rangle \langle 61 \rangle \langle 257, conds \rangle \langle 43 \rangle \langle 256, 1 \rangle \langle -1 \rangle$.

In generale, i token della Tabella 1 hanno un attributo: ad esempio, l'attributo del token $\langle 256, 300 \rangle$ è il numero 300, mentre l'attributo del token $\langle 259, \text{cond} \rangle$ è la stringa `cond`. Si noti, però, che alcuni token della Tabella 1 sono senza attributo: ad esempio, il segno "per" (*) è rappresentato dal token $\langle 42 \rangle$, e la parentesi tonda destra () è rappresentata dal token $\langle 41 \rangle$.

Nota: l'analizzatore lessicale non è preposto al riconoscimento della *struttura* dei comandi del linguaggio. Pertanto, esso accetterà anche comandi "errati" quali ad esempio:

- `5+;`
- `(34+26(- (2+15-(27`
- `else 5 = print < cond`

Altri errori invece, come simboli non previsti o sequenze illecite (ad esempio nel caso dell'input `17&5`, oppure dell'input `|||`), devono essere rilevati.

Classi di supporto. Per realizzare l'analizzatore lessicale, si possono utilizzare le seguenti classi. Definiamo una classe `Tag` in Listing 2, utilizzando le costanti intere nella colonna Nome in Tabella 1 per rappresentare i nomi dei token. Per i token che corrispondono a un solo carattere (tranne `<` e `>`, che corrispondono a "Relop", cioè agli operatori relazionali), si può utilizzare il codice ASCII del carattere: ad esempio, il nome in Tabella 1 del segno di somma (+) è 43, il codice ASCII del +.

Listing 2: Classe Tag

```
public class Tag {
    public final static int
        EOF = -1, NUM = 256, ID = 257, RELOP = 258,
        COND = 259, WHEN = 260, THEN = 261, ELSE = 262,
        WHILE = 263, DO = 264, SEQ = 265, PRINT = 266, READ = 267,
        OR = 268, AND = 269;
}
```

Definiamo una classe `Token` per rappresentare i token (una possibile implementazione della classe `Token` è in Listing 3). Definiamo inoltre la classe `Word` derivata da `Token`, per rappresentare i token che corrispondono agli identificatori, alle parole chiave, alle operatori relazionali e agli elementi della sintassi che consistono di più caratteri (ad esempio `&&`). Una possibile implementazione della classe `Word` è in Listing 4. Ispirandosi alla classe `Word`, si può estendere Listing 5 per definire una classe `NumberTok` per rappresentare i token che corrispondono ai numeri.

Listing 3: Classe Token

```
public class Token {
    public final int tag;
    public Token(int t) { tag = t; }
    public String toString() { return "<" + tag + ">"; }
    public static final Token
        not = new Token('!'),
        lpt = new Token('('),
        rpt = new Token(')'),
        lpg = new Token('{'),
        rpg = new Token('}'),
        plus = new Token('+'),
        minus = new Token('-'),
        mult = new Token('*'),
        div = new Token('/'),
        assign = new Token('='),
        semicolon = new Token(';');
}
```

Listing 4: Classe Word

```
public class Word extends Token {
    public String lexeme = "";
    public Word(int tag, String s) { super(tag); lexeme=s; }
    public String toString() { return "<" + tag + ", " + lexeme + ">"; }
    public static final Word
        cond = new Word(Tag.COND, "cond"),
        when = new Word(Tag.WHEN, "when"),
        then = new Word(Tag.THEN, "then"),
        elsetok = new Word(Tag.ELSE, "else"),
        whiletok = new Word(Tag.WHILE, "while"),
        dotok = new Word(Tag.DO, "do"),
        seq = new Word(Tag.SEQ, "seq"),
        print = new Word(Tag.PRINT, "print"),
        read = new Word(Tag.READ, "read"),
        or = new Word(Tag.OR, "||"),
        and = new Word(Tag.AND, "&&"),
        lt = new Word(Tag.RELOP, "<"),
        gt = new Word(Tag.RELOP, ">"),
        eq = new Word(Tag.RELOP, "=="),
        le = new Word(Tag.RELOP, "<="),
        ne = new Word(Tag.RELOP, "<>"),
        ge = new Word(Tag.RELOP, ">=");
}
```

Listing 5: Classe NumberTok

```
public class NumberTok extends Token {
    // ... completare ...
}
```

Una possibile struttura dell'analizzatore lessicale (ispirata al testo [1, Appendice A.3]) è descritta nella classe Lexer in Listing 6.

Listing 6: Analizzatore lessicale di comandi semplici

```
import java.io.*;
import java.util.*;

public class Lexer {

    public static int line = 1;
    private char peek = ' ';

    private void readch(BufferedReader br) {
        try {
            peek = (char) br.read();
        } catch (IOException exc) {
            peek = (char) -1; // ERROR
        }
    }

    public Token lexical_scan(BufferedReader br) {
        while (peek == ' ' || peek == '\t' || peek == '\n' || peek == '\r') {
            if (peek == '\n') line++;
            readch(br);
        }

        switch (peek) {
```



```

        case '!':
            peek = ' ';
            return Token.not;

// ... gestire i casi di (, ), {, }, +, -, *, /, ; ... //

        case '&':
            readch(br);
            if (peek == '&') {
                peek = ' ';
                return Word.and;
            } else {
                System.err.println("Erroneous character"
                    + " after & : " + peek );
                return null;
            }

// ... gestire i casi di ||, <, >, <=, >=, ==, <>, = ... //

        case (char)-1:
            return new Token(Tag.EOF);

        default:
            if (Character.isLetter(peek)) {

// ... gestire il caso degli identificatori e delle parole chiave //

                } else if (Character.isDigit(peek)) {

// ... gestire il caso dei numeri ... //

                } else {
                    System.err.println("Erroneous character: "
                        + peek );
                    return null;
                }
            }
        }
    }

    public static void main(String[] args) {
        Lexer lex = new Lexer();
        String path = "...path..."; // il percorso del file da leggere
        try {
            BufferedReader br = new BufferedReader(new FileReader(path));
            Token tok;
            do {
                tok = lex.lexical_scan(br);
                System.out.println("Scan: " + tok);
            } while (tok.tag != Tag.EOF);
            br.close();
        } catch (IOException e) {e.printStackTrace();}
    }
}

```

Esercizio 2.1. Si scriva in Java un analizzatore lessicale che legga da file un input e stampi la sequenza di token corrispondente. Per questo esercizio, si possono utilizzare senza modifica le classi Tag, Token e Word. Invece le classi NumberTok e Lexer devono essere completate.

Esercizio 2.2. Consideriamo la seguente nuova definizione di identificatori: un identificatore è una sequenza non vuota di lettere, numeri, ed il simbolo di “underscore” `_`; la sequenza non comincia con un numero e non può essere composta solo dal simbolo `_`. Più precisamente, gli identificatori corrispondono all’espressione regolare:

$$\left([a-zA-Z] \mid (-(_)*[a-zA-Z0-9]) \right) \left([a-zA-Z0-9] \mid - \right)^* .$$

Estendere il metodo `lexical_scan` per gestire identificatori che corrispondono alla nuova definizione.

Esercizio 2.3. Estendere il metodo `lexical_scan` in modo tale che possa trattare la presenza di commenti nel file di input. I commenti possono essere scritti in due modi:

- commenti delimitati con `/*` e `*/`;
- commenti che iniziano con `//` e che terminano con un a capo oppure con EOF.

I commenti devono essere ignorati dal programma per l’analisi lessicale; in altre parole, per le parti dell’input che contengono commenti, non deve essere generato nessun token. Ad esempio, consideriamo l’input seguente.

```
/* calcolare la velocita' */
(= d 300) // distanza
(= t 10) // tempo
(print (* d t))
```

L’output del programma per l’analisi lessicale sarà `<40> <61> <257,d> <256,300> <41> <40> <61> <257,t> <256,10> <41> <40> <266,print> <40> <42> <257,d> <257,t> <41> <41> <-1>`.

Oltre alle coppie di simboli `/*`, `*/` e `//`, un commento può contenere simboli che non fanno parte del pattern di nessun token (ad esempio, `/*@#?*/` o `/*calcolare la velocita'*/`). Se un commento di forma `/* ... */` è aperto ma non chiuso prima della fine del file (si veda ad esempio il caso di input `(= d 300) /*distanza`) deve essere segnalato un errore. Si noti che ci possono essere più commenti consecutivi non separati da nessun token, ad esempio:

```
(= d 300) /*distanza*//*da Torino a Lione*/
```

Inoltre la coppia di simboli `*/`, se scritta al di fuori di un commento, deve essere trattata dal lexer come il segno di moltiplicazione seguito dal segno di divisione (ad esempio, per l’input `x*/y` l’output sarà `<257,x> <42> <47> <257,y> <-1>`). In altre parole, l’idea è che in questo caso la sequenza di simboli `*/` non verrà interpretata come la chiusura di un commento ma come una sequenza dei due token menzionati.

3 Analisi sintattica

Esercizio 3.1. Si scriva un analizzatore sintattico a discesa ricorsiva che parsifichi espressioni aritmetiche molto semplici, scritte in notazione infissa, e composte soltanto da numeri non negativi (ovvero sequenze di cifre decimali), operatori di somma e sottrazione `+` e `-`, operatori di moltiplicazione e divisione `*` e `/`, simboli di parentesi `(` e `)`. In particolare, l’analizzatore deve riconoscere le espressioni generate dalla grammatica che segue:

$$\begin{aligned}
\langle start \rangle &::= \langle expr \rangle \text{ EOF} \\
\langle expr \rangle &::= \langle term \rangle \langle exprp \rangle \\
\langle exprp \rangle &::= \begin{array}{l} + \langle term \rangle \langle exprp \rangle \\ | - \langle term \rangle \langle exprp \rangle \\ | \varepsilon \end{array} \\
\langle term \rangle &::= \langle fact \rangle \langle term p \rangle \\
\langle term p \rangle &::= \begin{array}{l} * \langle fact \rangle \langle term p \rangle \\ | / \langle fact \rangle \langle term p \rangle \\ | \varepsilon \end{array} \\
\langle fact \rangle &::= (\langle expr \rangle) \mid \text{ NUM}
\end{aligned}$$

Il programma deve fare uso dell'analizzatore lessicale sviluppato in precedenza. Si noti che l'insieme di token corrispondente alla grammatica di questa sezione è un sottoinsieme dell'insieme di token corrispondente alle regole lessicali della Sezione 2. Nei casi in cui l'input corrisponde alla grammatica, l'output deve consistere dell'elenco di token dell'input seguito da un messaggio indicando che l'input corrisponde alla grammatica. Invece nei casi in cui l'input *non* corrisponde alla grammatica, l'output del programma deve consistere di un messaggio di errore (come illustrato nelle lezioni in aula) indicando la procedura in esecuzione quando l'errore è stato individuato.

Segue una possibile struttura del programma (ispirato al testo [1, Appendice A.8]).

Listing 7: Analizzatore sintattico di espressioni semplici

```

import java.io.*;

public class Parser {

    private Lexer lex;
    private BufferedReader pbr;
    private Token look;

    public Parser(Lexer l, BufferedReader br) {
        lex = l;
        pbr = br;
        move();
    }

    void move() {
        look = lex.lexical_scan(pbr);
        System.out.println("token = " + look);
    }

    void error(String s) {
        throw new Error("near line " + lex.line + ": " + s);
    }

    void match(int t) {
        if (look.tag == t) {
            if (look.tag != Tag.EOF) move();
        } else error("syntax error");
    }
}

```

```

public void start() {
    // ... completare ...
    expr();
    match(Tag.EOF);
    // ... completare ...
}

private void expr() {
    // ... completare ...
}

private void exprp() {
    switch (look.tag) {
        case '+':
            // ... completare ...
    }
}

private void term() {
    // ... completare ...
}

private void termp() {
    // ... completare ...
}

private void fact() {
    // ... completare ...
}

public static void main(String[] args) {
    Lexer lex = new Lexer();
    String path = "...path..."; // il percorso del file da leggere
    try {
        BufferedReader br = new BufferedReader(new FileReader(path));
        Parser parser = new Parser(lex, br);
        parser.start();
        System.out.println("Input OK");
        br.close();
    } catch (IOException e) {e.printStackTrace();}
}
}

```

Esercizio 3.2. Segue una grammatica per un semplice linguaggio di programmazione, dove i terminali della grammatica corrispondono ai token descritti in Sezione 2 (in Tabella 1). Si noti che RELOP corrisponde a un elemento dell'insieme $\{==, <>, <=, >=, <, >\}$ e ID corrisponde a un identificatore. Si noti inoltre che la sintassi del linguaggio é ispirata al linguaggio di programmazione funzionale Scheme. In particolare, le espressioni aritmetiche sono scritte in *notazione prefissa* o polacca, diversamente da quanto accadeva nell'esercizio precedente dove venivano scritte secondo la notazione infissa (standard). Analogamente le espressioni booleane sono scritte in notazione prefissa, seguendo la convenzione di porre l'operatore relazionale a sinistra delle espressioni. Si noti infine che anche per lo statement di assegnamento viene proposta una sintassi prefissa. Scrivere un analizzatore sintattico a discesa ricorsiva per la grammatica.

$$\begin{aligned}
\langle prog \rangle &::= \langle stat \rangle \text{ EOF} \\
\langle statlist \rangle &::= \langle stat \rangle \langle statlistp \rangle \\
\langle statlistp \rangle &::= \langle stat \rangle \langle statlistp \rangle \mid \varepsilon \\
\langle stat \rangle &::= (\langle statp \rangle) \\
\langle statp \rangle &::= \begin{array}{l} = \text{ ID } \langle expr \rangle \\ \mid \text{ cond } \langle bexpr \rangle \langle stat \rangle \langle elseopt \rangle \\ \mid \text{ while } \langle bexpr \rangle \langle stat \rangle \\ \mid \text{ do } \langle statlist \rangle \\ \mid \text{ print } \langle exprlist \rangle \\ \mid \text{ read ID } \end{array} \\
\langle elseopt \rangle &::= (\text{ else } \langle stat \rangle) \mid \varepsilon \\
\langle bexpr \rangle &::= (\langle bexprp \rangle) \\
\langle bexprp \rangle &::= \text{ RELOP } \langle expr \rangle \langle expr \rangle \\
\langle expr \rangle &::= \text{ NUM } \mid \text{ ID } \mid (\langle exprp \rangle) \\
\langle exprp \rangle &::= + \langle exprlist \rangle \mid - \langle expr \rangle \langle expr \rangle \mid * \langle exprlist \rangle \mid / \langle expr \rangle \langle expr \rangle \\
\langle exprlist \rangle &::= \langle expr \rangle \langle exprlistp \rangle \\
\langle exprlistp \rangle &::= \langle expr \rangle \langle exprlistp \rangle \mid \varepsilon
\end{aligned}$$

4 Traduzione diretta dalla sintassi

Esercizio 4.1 (Valutatore di espressioni semplici). Modificare l'analizzatore sintattico dell'esercizio 3.1 in modo da valutare le espressioni aritmetiche semplici, facendo riferimento allo schema di traduzione diretto dalla sintassi seguente:

$$\begin{aligned}
\langle start \rangle &::= \langle expr \rangle \text{ EOF } \{ \text{print}(expr.val) \} \\
\langle expr \rangle &::= \langle term \rangle \{ exprp.i = term.val \} \langle exprp \rangle \{ expr.val = exprp.val \} \\
\langle exprp \rangle &::= \begin{array}{l} + \langle term \rangle \{ exprp_1.i = exprp.i + term.val \} \langle exprp_1 \rangle \{ exprp.val = exprp_1.val \} \\ \mid - \langle term \rangle \{ exprp_1.i = exprp.i - term.val \} \langle exprp_1 \rangle \{ exprp.val = exprp_1.val \} \\ \mid \varepsilon \{ exprp.val = exprp.i \} \end{array} \\
\langle term \rangle &::= \langle fact \rangle \{ termp.i = fact.val \} \langle termp \rangle \{ term.val = termp.val \} \\
\langle termp \rangle &::= \begin{array}{l} * \langle fact \rangle \{ termp_1.i = termp.i * fact.val \} \langle termp_1 \rangle \{ termp.val = termp_1.val \} \\ \mid / \langle fact \rangle \{ termp_1.i = termp.i / fact.val \} \langle termp_1 \rangle \{ termp.val = termp_1.val \} \\ \mid \varepsilon \{ termp.val = termp.i \} \end{array} \\
\langle fact \rangle &::= (\langle expr \rangle) \{ fact.val = expr.val \} \mid \text{ NUM } \{ fact.val = \text{NUM.value} \}
\end{aligned}$$

Si noti che il terminale NUM ha l'attributo *value*, che è il valore numerico del terminale, fornito dall'analizzatore lessicale.

Una possibile struttura del programma è la seguente.

Nota: come indicato, è fortemente consigliata la creazione di una nuova classe (chiamata Valutatore in Listing 8).

Listing 8: Valutazione di espressioni semplici

```
import java.io.*;

public class Valutatore {
    private Lexer lex;
    private BufferedReader pbr;
    private Token look;

    public Valutatore(Lexer l, BufferedReader br) {
        lex = l;
        pbr = br;
        move();
    }

    void move() {
        // come in Esercizio 3.1
    }

    void error(String s) {
        // come in Esercizio 3.1
    }

    void match(int t) {
        // come in Esercizio 3.1
    }

    public void start() {
        int expr_val;

        // ... completare ...

        expr_val = expr();
        match(Tag.EOF);

        System.out.println(expr_val);

        // ... completare ...
    }

    private int expr() {
        int term_val, expr_val;

        // ... completare ...

        term_val = term();
        expr_val = expr(term_val);

        // ... completare ...
        return expr_val;
    }
}
```

```

private int exprp(int exprp_i) {
    int term_val, exprp_val;
    switch (look.tag) {
        case '+':
            match('+');
            term_val = term();
            exprp_val = exprp(exprp_i + term_val);
            break;

        // ... completare ...
    }
}

private int term() {
    // ... completare ...
}

private int termp(int termp_i) {
    // ... completare ...
}

private int fact() {
    // ... completare ...
}

public static void main(String[] args) {
    Lexer lex = new Lexer();
    String path = "...path..."; // il percorso del file da leggere
    try {
        BufferedReader br = new BufferedReader(new FileReader(path));
        Valutatore valutatore = new Valutatore(lex, br);
        valutatore.start();
        br.close();
    } catch (IOException e) {e.printStackTrace();}
}
}

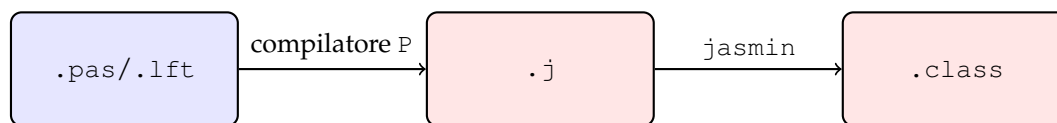
```

5 Generazione del bytecode

L'obiettivo di quest'ultima parte di laboratorio è di quello di realizzare un traduttore per i programmi scritti nel linguaggio di programmazione semplice, che chiameremo *P*, visto nell'esercizio 3.2. I file di programmi del linguaggio *P* hanno estensione *.pas*, come suggerito alle lezioni di teoria del corso A, oppure estensione *.lft*, come suggerito alle lezioni di teoria del corso B. Il traduttore deve generare bytecode [4] eseguibile dalla Java Virtual Machine (JVM).

Generare bytecode eseguibile direttamente dalla JVM non è un'operazione semplice a causa della complessità del formato dei file *.class* (che tra l'altro è un formato binario) [3]. Il bytecode verrà quindi generato avvalendoci di un linguaggio mnemonico che fa riferimento alle istruzioni della JVM (linguaggio assembler [2]) e che successivamente verrà tradotto nel formato *.class* dal programma assembler. Il linguaggio mnemonico utilizzato fa riferimento all'insieme delle istruzioni della JVM [5] e l'assembler effettua una traduzione 1-1 delle istruzioni mnemoniche nella corrispondente istruzione (*opcode*) della JVM. Il programma assembler che utilizzeremo si chiama Jasmin (distribuzione e manuale sono disponibili all'indirizzo <http://jasmin.sourceforge.net/>).

La costruzione del file `.class` a partire dal sorgente scritto nel linguaggio `P` avviene secondo lo schema seguente:



Il file sorgente viene tradotto dal compilatore (oggetto della realizzazione) nel linguaggio assembler per la JVM. Questo file (che deve avere l'estensione `.j`) è poi trasformato in un file `.class` dal programma assembler Jasmin. Nel codice presentato in questa sezione, il file generato dal compilatore si chiama `Output.j`, e il comando `java -jar jasmin.jar Output.j` è utilizzato per trasformarlo nel file `Output.class`, che può essere eseguito con il comando `java Output`.

Significato delle istruzioni del linguaggio `P`.

`= ID <expr>`

Assegna il valore dell'espressione `<expr>` all'identificatore rappresentato da `ID`. Ad esempio, `(= x 3)` corrisponde all'assegnamento del valore 3 all'identificatore `x`.

`print <exprlist>`

Stampa sul terminale il valore di tutte le espressioni incluse nella lista di espressioni `<exprlist>`. Ad esempio, `(print (+ 2 3) 4)` stampa sul terminale il valore 5 seguito dal valore 4.

`read ID`

Permette l'inserimento di un numero intero dalla tastiera e l'assegnamento del valore del numero all'identificatore scritto tra parentesi. Ad esempio, il comando `(read a)` specifica che l'utente del programma scritto in linguaggio `P` deve inserire un numero intero con la tastiera, che poi è assegnato all'identificatore `a`.

`do <statlist>`

Permette di raggruppare una sequenza di istruzioni. Ad esempio, un programma che legge in input un numero e successivamente stampa sul terminale il numero incrementato di 1 può essere scritto nella maniera seguente: `(do (read x) (print (+ x 1)))`.

`cond <beexpr> <stat1> e cond <beexpr> <stat1> (else <stat2>)`

Un comando condizionale, che assomiglia al costrutto `if/else` di Java: se l'espressione booleana `<beexpr>` risulta valutata come vera, allora `<stat1>` è eseguito, dopo di che si esce dall'istruzione `cond` e si procede a valutare l'istruzione successiva. Invece se l'espressione booleana `<beexpr>` risulta valutata come falsa, nel caso in cui la parte con `(else <stat2>)` è presente, viene eseguito lo `<stat2>` specificato dopo `else`. Se l'espressione booleana `<beexpr>` risulta valutata come falsa e la parte con `(else <stat2>)` non è presente, si esce dall'istruzione `cond` e si procede alla istruzione successiva. Ad esempio, l'istruzione

```
(cond (> x 0) (print x) (else (print y)) )
```

stampa sul terminale il valore di `x` se il valore di `x` è maggiore di 0, e il valore di `y` altrimenti.

`while <beexpr> <stat>`

Permette l'esecuzione ciclica di `<stat>`. La condizione per l'esecuzione del ciclo è `<beexpr>`. Ad esempio, l'istruzione

```
(while (> x 0) (do (= x (- x 1)) (print x) ) )
```

decrementa e stampa sul terminale il valore dell'identificatore `x`, fino a quando `x` ha il valore 0.

Classi di supporto. Per la realizzazione del compilatore utilizziamo le seguenti classi.

La classe `OpCode` è una semplice enumerazione dei nomi mnemonici (si veda [5] per un elenco dei nomi, ma utilizziamo solo quelli utili per la traduzione del linguaggio P). La classe `Instruction` verrà usata per rappresentare singole istruzioni del linguaggio mnemonico. Il metodo `toJasmin` restituisce l'istruzione nel formato adeguato per l'assembler Jasmin.

Listing 9: Una possibile implementazione della classe `OpCode`

```
public enum OpCode {
    ldc, imul, ineg, idiv, iadd,
    isub, istore, ior, iand, iload,
    if_icmpeq, if_icmple, if_icmplt, if_icmpne, if_icmpge,
    if_icmpgt, ifne, GOTO, invokestatic, label }
```

Listing 10: Una possibile implementazione della classe `Instruction`

```
public class Instruction {
    OpCode opCode;
    int operand;

    public Instruction(OpCode opCode) {
        this.opCode = opCode;
    }

    public Instruction(OpCode opCode, int operand) {
        this.opCode = opCode;
        this.operand = operand;
    }

    public String toJasmin () {
        String temp="";
        switch (opCode) {
            case ldc : temp = " ldc " + operand + "\n"; break;
            case invokestatic :
                if( operand == 1)
                    temp = " invokestatic " + "Output/print(I)V" + "\n";
                else
                    temp = " invokestatic " + "Output/read()I" + "\n"; break;
            case iadd : temp = " iadd " + "\n"; break;
            case imul : temp = " imul " + "\n"; break;
            case idiv : temp = " idiv " + "\n"; break;
            case isub : temp = " isub " + "\n"; break;
            case ineg : temp = " ineg " + "\n"; break;
            case istore : temp = " istore " + operand + "\n"; break;
            case ior : temp = " ior " + "\n"; break;
            case iand : temp = " iand " + "\n"; break;
            case iload : temp = " iload " + operand + "\n"; break;
            case if_icmpeq : temp = " if_icmpeq L" + operand + "\n"; break;
            case if_icmple : temp = " if_icmple L" + operand + "\n"; break;
            case if_icmplt : temp = " if_icmplt L" + operand + "\n"; break;
            case if_icmpne : temp = " if_icmpne L" + operand + "\n"; break;
            case if_icmpge : temp = " if_icmpge L" + operand + "\n"; break;
            case if_icmpgt : temp = " if_icmpgt L" + operand + "\n"; break;
            case ifne : temp = " ifne L" + operand + "\n"; break;
            case GOTO : temp = " goto L" + operand + "\n"; break;
            case label : temp = "L" + operand + ":\n"; break;
        }
    }
}
```

```

    return temp;
}
}

```

La classe `CodeGenerator` ha lo scopo di memorizzare in una struttura apposita la *lista delle istruzioni* (come oggetti di tipo `Instruction`) generate durante la parsificazione. I metodi `emit` sono usati per aggiungere istruzioni o etichette di salto nel codice. Le costanti `header` e `footer` definiscono il preambolo e l'epilogo del codice generato dal traduttore per restituire, mediante il metodo `toJasmin`, un file la cui struttura risponde ai requisiti dell'assembler `Jasmin`.

Listing 11: Una possibile implementazione della classe `CodeGenerator`

```

import java.util.LinkedList;
import java.io.*;

public class CodeGenerator {

    LinkedList <Instruction> instructions = new LinkedList <Instruction>();

    int label=0;

    public void emit(OpCode opCode) {
        instructions.add(new Instruction(opCode));
    }

    public void emit(OpCode opCode , int operand) {
        instructions.add(new Instruction(opCode, operand));
    }

    public void emitLabel(int operand) {
        emit(OpCode.label, operand);
    }

    public int newLabel() {
        return label++;
    }

    public void toJasmin() throws IOException{
        PrintWriter out = new PrintWriter(new FileWriter("Output.j"));
        String temp = "";
        temp = temp + header;
        while(instructions.size() > 0){
            Instruction tmp = instructions.remove();
            temp = temp + tmp.toJasmin();
        }
        temp = temp + footer;
        out.println(temp);
        out.flush();
        out.close();
    }

    private static final String header = ".class public Output \n"
        + ".super java/lang/Object\n"
        + "\n"
        + ".method public <init>()V\n"
        + "  aload_0\n"
        + "  invokevirtual java/lang/Object/<init>()V\n"
        + "  return\n"

```

```

+ ".end method\n"
+ "\n"
+ ".method public static print(I)V\n"
+ " .limit stack 2\n"
+ " getstatic java/lang/System/out Ljava/io/PrintStream;\n"
+ " iload_0 \n"
+ " invokestatic java/lang/Integer/toString(I)Ljava/lang/String;\n"
+ " invokevirtual java/io/PrintStream/println(Ljava/lang/String;)V\n"
+ " return\n"
+ ".end method\n"
+ "\n"
+ ".method public static read()I\n"
+ " .limit stack 3\n"
+ " new java/util/Scanner\n"
+ " dup\n"
+ " getstatic java/lang/System/in Ljava/io/InputStream;\n"
+ " invokespecial java/util/Scanner/<init>(Ljava/io/InputStream;)V\n"
+ " invokevirtual java/util/Scanner/next()Ljava/lang/String;\n"
+ " invokestatic java/lang/Integer.parseInt(Ljava/lang/String;)I\n"
+ " ireturn\n"
+ ".end method\n"
+ "\n"
+ ".method public static run()V\n"
+ " .limit stack 1024\n"
+ " .limit locals 256\n";

private static final String footer = " return\n"
+ ".end method\n"
+ "\n"
+ ".method public static main([Ljava/lang/String;)V\n"
+ " invokestatic Output/run()V\n"
+ " return\n"
+ ".end method\n";
}

```

Per tenere traccia degli identificatori occorre predisporre una *tabella dei simboli*. Segue una possibile implementazione della classe `SymbolTable`:

Listing 12: Una possibile implementazione della classe `SymbolTable`

```

public class SymbolTable {

    Map <String, Integer> OffsetMap = new HashMap <String,Integer>();

    public void insert( String s, int address ) {
        if( !OffsetMap.containsValue(address) )
            OffsetMap.put(s,address);
        else
            throw new IllegalArgumentException("Riferimento ad una
                locazione di memoria gia' occupata da un'altra variabile");
    }

    public int lookupAddress ( String s ) {
        if( OffsetMap.containsKey(s) )
            return OffsetMap.get(s);
        else
            return -1;
    }
}

```

Esempi di generazione di bytecode. Seguono alcuni semplici programmi P affiancati dal bytecode JVM corrispondente.

Listing 13: A.pas/A.lft

```
(do
  (read a)
  (print (+ a 1))
)
```

Listing 14: Bytecode di A.pas/A.lft

```
invokestatic Output/read()I
istore 0
L1:
  iload 0
  ldc 1
  iadd
  invokestatic Output/print(I)V
L2:
L0:
```

Listing 15: B.pas/B.lft

```
(do
  (= x 10)
  (= y 20)
  (= z 30)
  (print (+ x (* y z)))
)
```

Listing 16: Bytecode di B.pas/B.lft

```
ldc 10
istore 0
L1:
  ldc 20
  istore 1
L2:
  ldc 30
  istore 2
L3:
  iload 0
  iload 1
  iload 2
  imul
  iadd
  invokestatic Output/print(I)V
L4:
L0:
```

Esercizio 5.1. Si scriva un traduttore per programmi scritti nel linguaggio P (utilizzando uno dei lexer sviluppati per gli esercizi di Sezione 2). Si ricorda che la grammatica del linguaggio P è definita nell'esercizio 3.2.

Un frammento del codice di una possibile implementazione può essere trovato in Listing 17 (si noti che `code` è un oggetto della classe `CodeGenerator`).

Listing 17: Un frammento del codice di una possibile implementazione del programma di Esercizio 5.1

```
import java.io.*;

public class Translator {
  private Lexer lex;
  private BufferedReader pbr;
  private Token look;

  SymbolTable st = new SymbolTable();
  CodeGenerator code = new CodeGenerator();
  int count=0;
```

```

public Translator(Lexer l, BufferedReader br) {
    lex = l;
    pbr = br;
    move();
}

void move() {
    // come in Esercizio 3.1
}

void error(String s) {
    // come in Esercizio 3.1
}

void match(int t) {
    // come in Esercizio 3.1
}

public void prog() {
    // ... completare ...
    int lnext_prog = code.newLabel();
    stat(lnext_prog);
    code.emitLabel(lnext_prog);
    match(Tag.EOF);
    try {
        code.toJasmin();
    }
    catch(java.io.IOException e) {
        System.out.println("IO error\n");
    };
    // ... completare ...
}

public void statp(int lnext) {
    switch(look.tag) {
        // ... completare ...
        case Tag.READ:
            match(Tag.READ);
            if (look.tag==Tag.ID) {
                int read_id_addr = st.lookupAddress(((Word)look).lexeme);
                if (read_id_addr!=-1) {
                    read_id_addr = count;
                    st.insert(((Word)look).lexeme, count++);
                }
                match(Tag.ID);
                code.emit(OpCode.invokestatic, 0);
                code.emit(OpCode.istore, read_id_addr);
            }
            else
                error("Error in grammar (stat) after read with " + look);
            break;
        // ... completare ...
    }
}

private void exprp() {
    switch(look.tag) {
        // ... completare ...
    }
}

```

```

        case '-':
            match('-');
            expr();
            expr();
            code.emit(OpCodes.isub);
            break;
    // ... completare ...
}

// ... completare ...
}

```

Riferimenti bibliografici

- [1] Aho, Alfred V., Lam, Monica S., Sethi, Ravi, and Ullman, Jeffrey D. Compilatori: Principi, tecniche e strumenti. *Pearson Paravia Bruno Mondadori S.p.A.*, 2009.
- [2] Assembly language. http://en.wikipedia.org/wiki/Assembly_language *Wikipedia*, 2019.
- [3] Java class file. http://en.wikipedia.org/wiki/Java_class_file *Wikipedia*, 2019.
- [4] Java bytecode. http://en.wikipedia.org/wiki/Java_bytecode *Wikipedia*, 2019.
- [5] Java bytecode instruction listings. http://en.wikipedia.org/wiki/Java_bytecode_instruction_listings *Wikipedia*, 2019.