

Tema 6

Síntese

Geração de código e gestão de erros

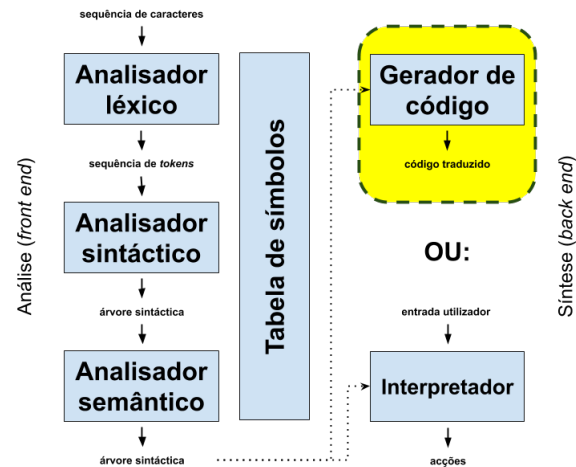
Compiladores+LFA, 2º semestre 2019-2020

Miguel Oliveira e Silva, Artur Pereira, DETI, Universidade de Aveiro

Conteúdo

1	Síntese: geração de código	2
1.1	Geração de código máquina	2
1.2	Geração de código	2
2	<i>String Template</i>	3
2.1	Geração de código: padrões comuns	5
2.2	Geração de código para expressões	6
3	Síntese: geração de código intermédio	6
3.1	Código de triplo endereço	6
3.2	TAC: Exemplo de expressões binárias	7
3.3	TAC: Endereços e instruções	7
3.4	Controlo de fluxo	7
3.5	Funções	8
4	ANTLR4: gestão de erros	8
4.1	ANTLR4: relatar erros	9
4.2	ANTLR4: recuperar de erros	10
4.3	ANTLR4: alterar estratégia de gestão de erros	10

1 Síntese: geração de código



- Podemos definir o objectivo de um compilador como sendo *traduzir* o código fonte de uma linguagem para outra linguagem.

source language → **Compiler** → target language

- A geração do código para a linguagem destino pode ser feita por diferentes fases (onde se incluem fases de optimização), mas nós iremos abordar apenas uma única fase.
- A estratégia geral consiste em identificar *padrões de geração de código*, e após a análise semântica percorrer novamente a árvore sintática (mas já com a garantia muito importante de inexistência de erros sintáticos e semânticos) gerando o código destino nos pontos apropriados.

1.1 Geração de código máquina

- Tradicionalmente, o ensino de processadores de linguagens tende a dar primazia à geração de código baixo nível (linguagem máquina, ou *assembly*).
- A larga maioria da bibliografia mantém esse enfoque.
- No entanto, do ponto de vista prático serão poucos os programadores que, fazendo uso de ferramentas para gerar processadores de linguagens, necessitam ou ambicionam este tipo de geração de código.
- Nesta disciplina vamos, alternativamente, discutir a geração de código numa perspectiva mais abrangente, incluindo a geração de código em linguagens de alto nível.
- No que diz respeito à geração de código em linguagens de baixo nível, é necessário um conhecimento robusto em arquitectura de computadores e lidar com os seguintes aspectos:
 - Representação e formato da informação (formato para números inteiros, reais, estruturas, *array*, etc.);
 - Gestão e endereçamento de memória;
 - Implementação de funções (passagem de argumentos e resultado, suporte para recursividade com pilha de chamadas e *frame pointers*);
 - Alocação de registos do processador.
- (Consultar a bibliografia recomendada para estudar este tipo de geração de código.)

1.2 Geração de código

- Seja qual for o nível da linguagem destino, uma possível estratégia para resolver este problema consiste em identificar sem ambiguidade *padrões de geração de código* associados a cada *elemento gramatical da linguagem*.

- Para esse fim, é necessário definir o contexto de geração de código para cada elemento (por exemplo, geração de instruções na linguagem destino, ou atribuir a valor a uma variável), e depois garantir que o mesmo é compatível com todas as utilizações do elemento.
- Como a larguíssima maioria das linguagens destino são textuais, esses padrões de geração de código consistem em padrões de geração de texto.
- Assim sendo, em Java, poderíamos delegar esse problema no tipo de dados `String`, `StringBuilder`, ou mesmo na escrita directa de texto em em ficheiro (ou no *standard output*).
- No entanto, também aí o ambiente ANTLR4 fornece uma ajuda mais estruturada, sistemática e modular para lidar com esse problema.

Exemplo: Calculadora

- Código fonte:

```
1+2*3:4
```

- Uma possível compilação para Java:

```
public class CodeGen {
    public static void main(String[] args) {
        int v2 = 1;
        int v5 = 2;
        int v6 = 3;
        int v4 = v5 * v6;
        int v7 = 4;
        int v3 = v4 / v7;
        int v1 = v2 + v3;
        System.out.println(v1);
    }
}
```

2 String Template

- A biblioteca *String Template* fornece uma solução estruturada para a geração de código textual.
- O software e documentação podem ser encontrados em <http://www.stringtemplate.org>
- Para ser utilizada é apenas necessário o pacote `ST-4.?.jar` (a instalação feita do antlr4 já incluiu este pacote).
- Vejamos um exemplo simples:

```
import org.stringtemplate.v4.*;
...
// code gen. pattern definition with <name> hole:
ST hello = new ST("Hello , <name>");
// hole pattern definition:
hello.add("name", "World");
// code generation (to standard output):
System.out.println(hello.render());
```

- Mesmo sendo um exemplo muito simples, podemos já verificar que a definição do padrão de texto, está separada do preenchimento dos “buracos” (atributos ou expressões) definidos, e da geração do texto final.
- Podemos assim delegar em partes diferentes do gerador de código, a definição dos padrões (que passam a pertencer ao contexto do elemento de código a gerar), o preenchimento dos “buracos” definidos, e a geração do texto final de código.
- Os padrões são blocos de texto e expressões.
- O texto corresponde a código destino literal, e as expressões são em “buracos” que podem ser preenchidos com o texto que se quiser.
- Sintaticamente, as expressões são identificadores delimitados por `<expr>` (ou por `$`).

```
import org.stringtemplate.v4.*;
...
ST assign = new ST("<var> = <expr>;\n");
assign.add("var", "i");
assign.add("expr", "10");
String output = assign.render();
System.out.println(output);
```

String Template Group

- Podemos também agrupar os padrões numa espécie de funções (módulo STGroup):

```
import org.stringtemplate.v4.*;
...
STGroup group = new STGroupString(
    "assign(var,expr) ::= \"<var> = <expr>;\n\"
);
ST assign = group.getInstanceOf("assign");
assign.add("var", "i");
assign.add("expr", "10");
String output = assign.render();
System.out.println(output);
```

- Podemos também colocar cada função num ficheiro:

```
// file assign.st
assign(var,expr) ::= "<var> = <expr>;"
```

```
import org.stringtemplate.v4.*;
...
// assuming that assign.st is in current directory:
STGroup group = new STGroupDir(".");
ST assign = group.getInstanceOf("assign");
assign.add("var", "i");
assign.add("expr", "10");
String output = assign.render();
System.out.println(output);
```

- Uma melhor opção é optar por ficheiros modulares contendo grupos de funções/padrões:

```
// file templates.stg

templateName(arg1, arg2, ..., argN) ::= "single-line template"

templateName(arg1, arg2, ..., argN) ::= <<
multi-line template preserving indentation and newlines
>>

templateName(arg1, arg2, ..., argN) ::= <%
multi-line template that ignores indentation and newlines
%>
```

```
import org.stringtemplate.v4.*;
...
// assuming that templates.stg is in current directory:
STGroup allTemplates = new STGroupFile("templates.stg");
ST st = group.getInstanceOf("templateName");
...
```

String Template: dicionários e condicionais

- Neste módulos podemos ainda definir dicionários (arrays associativos).

```
typeValue ::= [
    "integer": "int",
    "real": "double",
    "boolean": "boolean",
    default: "null"
]
```

- Na definição de padrões podemos utilizar uma instrução condicional que só aplica o padrão caso o atributo seja adicionado:

```
stats (stat) ::= <<
<if (stat)><stat; separator="\n"><endif>
>>
```

- O campo `separator` indica que em cada operação `add` em `stat`, se irá utilizar esse separador (no caso, uma mudança de linha).

String Template: Funções

- Podemos ainda definir padrões utilizando outros padrões (como se fossem funções).

```
module(name, stat) ::= <<
public class <name> {
    public static void main(String[] args) {
        <stats (stat)>
    }
}
>>

conditional(stat, var, stat_true, stat_false) ::= <<
<stats (stat)>
if (<var>) {
    <stat_true>
}<if (stat_false)>
else {
    <stat_false>
}<endif>
>>
```

String Template: listas

- Também existe a possibilidade de utilizar listas para concatenar texto e argumentos de padrões:

```
binaryExpression(type, var, e1, op, e2) ::=
"<decl (type, var, [e1, \" \", op, \" \", e2])>"
```

- Para mais informação sobre as possibilidades desta biblioteca devem consultar a documentação existente em: <http://www.stringtemplate.org>.

2.1 Geração de código: padrões comuns

- Uma geração de código modular requer um contexto uniforme que permita a inclusão de qualquer combinação de código a ser gerado.
- Na sua forma mais simples, o padrão comum pode ser simplesmente uma sequência de instruções.

```
stats (stat) ::= <<
<if (stat)><stat; separator="\n"><endif>
>>

module(name, stat) ::= <<
public class <name>
{
    public static void main(String[] args)
    {
        <stats (stat)>
    }
}
>>
```

- Com este padrão, podemos inserir no lugar do “buraco” `stat` a sequência de instruções que quisermos.
- Naturalmente, que para uma geração de código mais complexa podemos considerar a inclusão de buracos para membros de classe, múltiplas classes, ou mesmo vários ficheiros.

- Para a linguagem C, teríamos o seguinte padrão para um módulo de compilação:

```
stats ( stat ) ::= <<
< if ( stat ) > < stat ; separator = "\n" > < endif >
>>

module ( name , stat ) ::= <<
#include < stdio . h >
#include < math . h >

int main ( )
{
    < stats ( stat ) >
}
>>
```

- Se a geração de código for guiada pela árvore sintáctica (como normalmente acontece), então os padrões de código a ser gerados devem ter em conta as definições gramaticais de cada símbolo, permitindo a sua aplicação modular em cada contexto.

2.2 Geração de código para expressões

- Para ilustrar a simplicidade e poder de abstracção do *String Template* vamos estudar o problema de geração de código para expressões.
- Para resolver este problema de uma forma modular, podemos utilizar a seguinte estratégia:
 1. considerar que qualquer expressão tem a si associada uma variável (na linguagem destino) com o seu valor;
 2. para além dessa associação, podemos também associar a cada expressão um ST (stats) com as instruções que atribuem o valor adequado à variável.
- Como habitual, para fazer estas associações podemos definir atributos na gramática, fazer uso do resultados das funções de um *Visitor* ou utilizar a classe *ParseTreeProperty*
- Desta forma, podemos fácil e de uma forma modular, gerar código para qualquer tipo de expressão.
- Padrões para expressões (para Java) podem ser:

```
typeValue ::= [
    "integer": "int", "real": "double",
    "boolean": "boolean", default: "null"
]

init ( value ) ::= "< if ( value ) > = < value > < endif >"
decl ( type , var , value ) ::=
    "< typeValue . ( type ) > < var > < init ( value ) > ;"

binaryExpression ( type , var , e1 , op , e2 ) ::=
    "< decl ( type , var , [ e1 , \" \", op , \" \", e2 ] ) >"
```

- Para C apenas seria necessário mudar o padrão typeValue:

```
typeValue ::= [
    "integer": "int", "real": "double",
    "boolean": "int", default: "null"
]
```

3 Síntese: geração de código intermédio

3.1 Código de triplo endereço

- O padrão para expressões é um exemplo duma representação muito utilizada para geração de código baixo nível (em geral, intermédio, e não final), designada por *codificação de triplo endereço* (TAC).
- Esta designação tem origem nas instruções com a forma: $x = y \text{ op } z$

- No entanto, para além desta operação típica de expressões binárias, esta codificação contém outras instruções (ex: operações unárias e de controlo de fluxo).
- No máximo, cada instrução tem três operandos (i.e. três variáveis ou endereços de memória).
- Tipicamente, cada instrução TAC realiza uma operação elementar (e já com alguma proximidade com as linguagens de baixo nível dos sistemas computacionais).

3.2 TAC: Exemplo de expressões binárias

- Por exemplo a expressão $a + b * (c + d)$ pode ser transformada na sequência TAC:

```
t8 = d;
t7 = c;
t6 = t7+t8;
t5 = t6;
t4 = b;
t3 = t4*t5;
t2 = a;
t1 = t2+t3;
```

- Esta sequência – embora fazendo uso desregrado no número de registos (o que, num compilador gerador de código máquina, é resolvido numa fase posterior de optimização) – é codificável em linguagens de baixo nível.

3.3 TAC: Endereços e instruções

- Nesta codificação, um endereço pode ser:
 - Um nome do código fonte (variável, ou endereço de memória);
 - Uma constante (i.e. um valor literal);
 - Um nome temporário (variável, ou endereço de memória), criado na decomposição TAC.
- As instruções típicas do TAC são:
 1. Atribuições de valor de operação binária: $x = y \text{ op } z$
 2. Atribuições de valor de operação unária: $x = \text{op } y$
 3. Instruções de cópia: $x = y$
 4. Saltos incondicionais e etiquetas: **goto** L e **label** L :
 5. Saltos condicionais: **if** x **goto** L ou **ifFalse** x **goto** L
 6. Saltos condicionais com operador relacional: **if** x **relop** y **goto** L (o operador pode ser de igualdade ou ordem)
 7. Invocações de procedimentos (**param** $x_1 \dots \text{param } x_n$; **call** p, n ; $y = \text{call } p, n$; **return** y)
 8. Instruções com arrays (i.e. o operador é os parêntesis rectos, e um dos operandos é o índice inteiro).
 9. Instruções com ponteiros para memória (como em C)

3.4 Controlo de fluxo

- As instruções de controlo de fluxo são as instruções condicionais e os ciclos.
- Em linguagens de baixo nível muitas vezes estas instruções não existem.
- O que existe em alternativa é a possibilidade de dar “saltos” dentro do código recorrendo a endereços (*labels*) e a instruções de salto (*goto*, ...).

<pre>if (cond) { A; } else {</pre>	<pre> B; }</pre>
--------------------------------------	-------------------

```
ifFalse cond goto 11
A
goto 12
```

```
label 11:
B
label 12:
```

- De forma similar podemos gerar código para ciclos:

```
while(cond) {
  A;
}
```

```
label 11:
ifFalse cond goto 12
A
goto 11
label 12:
```

3.5 Funções

- A geração de código para funções pode ser feita recorrendo a uma estratégia tipo “macro” (i.e. na invocação da funções é colocado o código que implementa a função), ou implementando módulos algorítmicos separados.
- Neste último caso (que, entre outras coisas, permite a recursividade), é necessária a definição de um bloco algorítmico separado, assim como implementar a passagem de argumentos/resultado para/de a função.
- A passagem de argumentos pode seguir diferentes estratégias: passagem por valor, passagem por referência de variáveis, passagem por referência de objectos/registos.
- Para termos implementações recursivas é necessário que se definam novas variáveis em cada invocação da função.
- A estrutura de dados que nos permite fazer isso de uma forma muito eficiente e simples é a pilha de execução.
- Esta pilha armazena os argumentos, variáveis locais à função e o resultado da função (permitindo ao código que invoca a função não só passar os argumentos à função como ir buscar o seu resultado).
- Geralmente as arquitecturas de linguagens de baixo nível (CPU’s) têm instruções específicas para lidar com esta estrutura de dados.
- Vamos exemplificar esse procedimento: Este código apenas ilustra a ideia. Para uma análise mais detalhada devem consultar a temática de arquitectura de computadores *frame-pointer*.

```
// use:
... f(x,y);
...
// define:
int f(int a, int b) {
  A;
  return r;
}
```

```
// use:
push 0 // result
push x
push y
call f,2
pop r // result
...
// define:
label f:
pop b
pop a
pop r
store stack-position
A
// reset stack to stack-position
restore stack-position
push r
return
```

4 ANTLR4: gestão de erros

4.1 ANTLR4: relatar erros

- Por omissão o ANTLR4 faz uma gestão de erros automática, que, em geral, responde bem às necessidades.
- No entanto, por vezes é necessário ter algum controlo sobre este processo.
- No que diz respeito à apresentação de erros, por omissão o ANTLR4 formata e envia essa informação para a saída *standard* da consola.
- Esse comportamento pode ser redefinido com a interface `ANTLRErrorListener`.
- Como o nome indica, o padrão de software utilizado é o de um *listener*, e tal como nos temos habituado em ANTLR existe uma classe base (com os métodos todos implementados sem código): `BaseErrorListener`
- O método `syntaxError` é invocado pelo ANTLR na presença de erros e aplica-se ao analisador sintáctico.

Relatar erros: exemplo 1

- Como exemplo podemos definir um *listener* que escreva também a pilha de regras do parser que estão activas.

```
import org.antlr.v4.runtime.*;
import java.util.List;
import java.util.Collections;

public class VerboseErrorListener extends BaseErrorListener {
    @Override public void syntaxError(Recognizer, ? recognizer,
        Object offendingSymbol,
        int line, int charPositionInLine,
        String msg,
        RecognitionException e)
    {
        Parser p = ((Parser)recognizer);
        List<String> stack = p.getRuleInvocationStack();
        Collections.reverse(stack);
        System.err.println("rule stack: "+stack);
        System.err.println("line "+line+": "+charPositionInLine+
            " at "+offendingSymbol+": "+msg);
    }
}
```

- Podemos agora desactivar os *listeners* definidos por omissão e activar o novo *listener*:

```
...
AParser parser = new AParser(tokens);
parser.removeErrorListeners(); // remove ConsoleErrorListener
parser.addErrorListener(new VerboseErrorListener()); // add ours
parser.mainRule(); // parse as usual
...
```

- Note que podemos detectar a existência de erros após a análise sintáctica (já feito pelo `antlr4-main`):

```
...
parser.mainRule(); // parse as usual
if (parser.getNumberOfSyntaxErrors() > 0) {
    ...
}
```

- Podemos também passar todos os erros de reconhecimento de *tokens* para a análise sintáctica:

```
grammar AParser;
...
/**
Last rule in grammar to ensure all errors are passed to the parser
*/
ERROR: . ;
```

Relatar erros: exemplo 2

- Outro *listener* que escreva os erros numa janela gráfica:

```
import org.antlr.v4.runtime.*;
import java.util.*;
import java.awt.*;
import javax.swing.*;

public class DialogErrorListener extends BaseErrorListener {
    @Override public void syntaxError(Recognizer, ? recognizer,
        Object offendingSymbol, int line, int charPositionInLine,
        String msg, RecognitionException e)
    {
        Parser p = ((Parser)recognizer);
        List<String> stack = p.getRuleInvocationStack();
        Collections.reverse(stack);
        StringBuilder buf = new StringBuilder();
        buf.append("rule stack: "+stack+" ");
        buf.append("line "+line+": "+charPositionInLine+" at "+
            offendingSymbol+": "+msg);
        JDialog dialog = new JDialog();
        Container contentPane = dialog.getContentPane();
        contentPane.add(new JLabel(buf.toString()));
        contentPane.setBackground(Color.white);
        dialog.setTitle("Syntax error");
        dialog.pack();
        dialog.setLocationRelativeTo(null);
        dialog.setDefaultCloseOperation(JFrame.DISPOSE_ON_CLOSE);
        dialog.setVisible(true);
    }
}
```

4.2 ANTLR4: recuperar de erros

- A recuperação de erros é a operação que permite que o analisador sintáctico continue a processar a entrada depois de detectar um erro, por forma a se poder detectar mais do que um erro em cada compilação.
- Por omissão o ANTLR4 faz uma recuperação automática de erros que funciona razoavelmente bem.
- As estratégias seguidas pela ANTLR4 para esse fim são as seguintes:
 - inserção de *token*;
 - remoção de *token*;
 - ignorar *tokens* até sincronizar novamente a gramática com o fim da regra actual.
- (Não vamos detalhar mais este ponto.)

4.3 ANTLR4: alterar estratégia de gestão de erros

- Por omissão a estratégia de gestão de erros do ANTLR4 tenta recuperar a análise sintáctica utilizando uma combinação das estratégias atrás sumariamente apresentadas.
- A interface `ANTLRErrorStrategy` permite a definição de novas estratégias, existindo duas implementações na biblioteca de suporte: `DefaultErrorStrategy` e `BailErrorStrategy`.
- A estratégia definida em `BailErrorStrategy` assenta na terminação imediata da análise sintáctica quando surge o primeiro erro.
- A documentação sobre como lidar com este problema pode ser encontrada na classe `Parser`.
- Para definir uma nova estratégia de gestão de erros utiliza-se o seguinte código:

```
...
AParser parser = new AParser(tokens);
parser.setErrorHandler(new BailErrorStrategy());
...
```