Análise léxica

O papel do analisador léxico

Prof. Edson Alves

Faculdade UnB Gama

Sumário

Alfabetos

Definição de alfabeto

Um alfabeto, ou classe de caracteres, é um conjunto finito de símbolos.

Alfabetos

Definição de alfabeto

Um alfabeto, ou classe de caracteres, é um conjunto finito de símbolos.

Exemplos de alfabetos: ASCII, EBCDIC, a alfabeto binário $\{ 0, 1 \}$, os dígitos decimais, etc.

Cadeias

Definição de cadeia

Uma cadeia sobre um alfabeto $\mathcal{A}$ é uma sequência finita de elementos de $\mathcal{A}$. Os termos sentença, palavra e string são geralmente usados como sinônimos de cadeia.

Conceitos associados à cadeias

- O comprimento (número de caracteres) de uma cadeia s é denotado por $|s|$

Conceitos associados à cadeias

- O comprimento (número de caracteres) de uma cadeia s é denotado por $|s|$
- A cadeia vazia ϵ tem comprimento igual a zero

Conceitos associados à cadeias

- O comprimento (número de caracteres) de uma cadeia s é denotado por $|s|$
- A cadeia vazia ϵ tem comprimento igual a zero
- Um prefixo de s é uma cadeia obtida pela remoção de zero ou mais caracteres do fim de s

Conceitos associados à cadeias

- O comprimento (número de caracteres) de uma cadeia s é denotado por $|s|$
- A cadeia vazia ϵ tem comprimento igual a zero
- Um prefixo de s é uma cadeia obtida pela remoção de zero ou mais caracteres do fim de s
- Um sufixo de s é uma cadeia obtida pela remoção de zero ou mais caracteres do início de s

Conceitos associados à cadeias

- O comprimento (número de caracteres) de uma cadeia s é denotado por $|s|$
- A cadeia vazia ϵ tem comprimento igual a zero
- Um prefixo de s é uma cadeia obtida pela remoção de zero ou mais caracteres do fim de s
- Um sufixo de s é uma cadeia obtida pela remoção de zero ou mais caracteres do início de s
- Uma subcadeia de s é uma cadeia obtida pela remoção de um prefixo e de um sufixo de s

Conceitos associados à cadeias

- O comprimento (número de caracteres) de uma cadeia s é denotado por $|s|$
- A cadeia vazia ϵ tem comprimento igual a zero
- Um prefixo de s é uma cadeia obtida pela remoção de zero ou mais caracteres do fim de s
- Um sufixo de s é uma cadeia obtida pela remoção de zero ou mais caracteres do início de s
- Uma subcadeia de s é uma cadeia obtida pela remoção de um prefixo e de um sufixo de s
- Um prefixo, sufixo ou subcadeia de s são ditos próprios se diferem de ϵ e de s

Conceitos associados à cadeias

- O comprimento (número de caracteres) de uma cadeia s é denotado por $|s|$
- A cadeia vazia ϵ tem comprimento igual a zero
- Um prefixo de s é uma cadeia obtida pela remoção de zero ou mais caracteres do fim de s
- Um sufixo de s é uma cadeia obtida pela remoção de zero ou mais caracteres do início de s
- Uma subcadeia de s é uma cadeia obtida pela remoção de um prefixo e de um sufixo de s
- Um prefixo, sufixo ou subcadeia de s são ditos próprios se diferem de ϵ e de s
- Um subsequência de s é uma cadeia obtida pela remoção de zero ou mais símbolos de s, não necessariamente contíguos

Linguagens

Definição de linguagem

Uma linguagem é um conjunto de cadeias sobre algum alfabeto $\mathcal{A}$ fixo.

Linguagens

Definição de linguagem

Uma linguagem é um conjunto de cadeias sobre algum alfabeto $\mathcal{A}$ fixo.

Esta definição contempla também linguagens abstratas como $\emptyset$ (o conjunto vazio), ou $\{\ \epsilon\ \}$, o conjunto contendo apenas a cadeia vazia.

Operações em cadeias

- Se x e y são duas cadeias, então a concatenação de x e y, denotada xy, é a cadeia formada pelo acréscimo, ao final de x, de todos os caracteres de y, na mesma ordem

Operações em cadeias

- Se x e y são duas cadeias, então a concatenação de x e y, denotada xy, é a cadeia formada pelo acréscimo, ao final de x, de todos os caracteres de y, na mesma ordem
- Por exemplo, se $x =$ `"rodo"` e $y =$ `"via"`, então $xy =$ `"rodovia"`

Operações em cadeias

- Se x e y são duas cadeias, então a concatenação de x e y, denotada xy, é a cadeia formada pelo acréscimo, ao final de x, de todos os caracteres de y, na mesma ordem
- Por exemplo, se $x =$ `"rodo"` e $y =$ `"via"`, então $xy =$ `"rodovia"`
- A cadeia vazia ϵ é o elemento neutro da concatenação

Operações em cadeias

- Se x e y são duas cadeias, então a concatenação de x e y, denotada xy, é a cadeia formada pelo acréscimo, ao final de x, de todos os caracteres de y, na mesma ordem
- Por exemplo, se $x =$ `"rodo"` e $y =$ `"via"`, então $xy =$ `"rodovia"`
- A cadeia vazia ϵ é o elemento neutro da concatenação
- Se a concatenação for visualizada como um produto, é possível definir uma "exponenciação" de cadeias

Operações em cadeias

- Se x e y são duas cadeias, então a concatenação de x e y, denotada xy, é a cadeia formada pelo acréscimo, ao final de x, de todos os caracteres de y, na mesma ordem
- Por exemplo, se $x =$ `"rodo"` e $y =$ `"via"`, então $xy =$ `"rodovia"`
- A cadeia vazia ϵ é o elemento neutro da concatenação
- Se a concatenação for visualizada como um produto, é possível definir uma "exponenciação" de cadeias
- Seja s uma cadeia e n um natural. Então

Operações em cadeias

- Se x e y são duas cadeias, então a concatenação de x e y, denotada xy, é a cadeia formada pelo acréscimo, ao final de x, de todos os caracteres de y, na mesma ordem
- Por exemplo, se $x =$ `"rodo"` e $y =$ `"via"`, então $xy =$ `"rodovia"`
- A cadeia vazia ϵ é o elemento neutro da concatenação
- Se a concatenação for visualizada como um produto, é possível definir uma "exponenciação" de cadeias
- Seja s uma cadeia e n um natural. Então
  1. $s^0 = \epsilon$

Operações em cadeias

- Se x e y são duas cadeias, então a concatenação de x e y, denotada xy, é a cadeia formada pelo acréscimo, ao final de x, de todos os caracteres de y, na mesma ordem
- Por exemplo, se $x =$ `"rodo"` e $y =$ `"via"`, então $xy =$ `"rodovia"`
- A cadeia vazia ϵ é o elemento neutro da concatenação
- Se a concatenação for visualizada como um produto, é possível definir uma "exponenciação" de cadeias
- Seja s uma cadeia e n um natural. Então
  1. $s^0 = \epsilon$
  2. $s^n = ss^{n-1}$

Operações em linguagens

Sejam L e M duas linguagens. São definidas as seguintes operações sobre linguagens:

Operações em linguagens

Sejam L e M duas linguagens. São definidas as seguintes operações sobre linguagens:

Operação	**Notação**	**Definição**
união	$L \cup M$	$L \cup M = \{ \ s \mid s \in L \ \vee \ s \in M \ \}$
concatenação	LM	$LM = \{ \ st \mid s \in L \ \wedge \ t \in M \ \}$
fechamento de Kleene	L^*	$L^* = \displaystyle\bigcup_{i=0}^{\infty} L^i$
fechamento positivo	L^+	$L^+ = \displaystyle\bigcup_{i=1}^{\infty} L^i$

Exemplos de operações em linguagens

Seja $L = \{\ \texttt{A},\ \texttt{B},\ \texttt{C},\ \ldots\ \texttt{Z},\ \texttt{a},\ \texttt{b},\ \texttt{c},\ \ldots\ \texttt{z}\ \}$ e $M = \{\ \texttt{0},\ \texttt{1},\ \texttt{2},\ \ldots\ \texttt{9}\ \}$. Então:

Exemplos de operações em linguagens

Seja $L = \{\, \texttt{A},\ \texttt{B},\ \texttt{C},\ \ldots \texttt{Z},\ \texttt{a},\ \texttt{b},\ \texttt{c},\ \ldots \texttt{z} \,\}$ e $M = \{\, \texttt{0},\ \texttt{1},\ \texttt{2},\ \ldots \texttt{9} \,\}$. Então:

1. $L \cup M$ é o conjunto de letras e dígitos

Exemplos de operações em linguagens

Seja $L = \{\ \texttt{A},\ \texttt{B},\ \texttt{C},\ \ldots\ \texttt{Z},\ \texttt{a},\ \texttt{b},\ \texttt{c},\ \ldots\ \texttt{z}\ \}$ e $M = \{\ \texttt{0},\ \texttt{1},\ \texttt{2},\ \ldots\ \texttt{9}\ \}$. Então:

1. $L \cup M$ é o conjunto de letras e dígitos
2. LM é o conjunto de cadeias formadas por uma letra, seguida de um dígito

Exemplos de operações em linguagens

Seja $L = \{ \texttt{A, B, C, ... Z, a, b, c, ... z} \}$ e $M = \{ \texttt{0, 1, 2, ... 9} \}$. Então:

1. $L \cup M$ é o conjunto de letras e dígitos
2. LM é o conjunto de cadeias formadas por uma letra, seguida de um dígito
3. L^4 é o conjunto de todas as cadeias formadas por exatamente quatro letras

Exemplos de operações em linguagens

Seja $L = \{ \texttt{A}, \texttt{B}, \texttt{C}, \ldots \texttt{Z}, \texttt{a}, \texttt{b}, \texttt{c}, \ldots \texttt{z} \}$ e $M = \{ \texttt{0}, \texttt{1}, \texttt{2}, \ldots \texttt{9} \}$. Então:

1. $L \cup M$ é o conjunto de letras e dígitos
2. LM é o conjunto de cadeias formadas por uma letra, seguida de um dígito
3. L^4 é o conjunto de todas as cadeias formadas por exatamente quatro letras
4. L^* é o conjunto de todas as cadeias formadas por letras, incluíndo a cadeia ϵ

Exemplos de operações em linguagens

Seja $L = \{ \texttt{A}, \texttt{B}, \texttt{C}, \ldots \texttt{Z}, \texttt{a}, \texttt{b}, \texttt{c}, \ldots \texttt{z} \}$ e $M = \{ \texttt{0}, \texttt{1}, \texttt{2}, \ldots \texttt{9} \}$. Então:

1. $L \cup M$ é o conjunto de letras e dígitos
2. LM é o conjunto de cadeias formadas por uma letra, seguida de um dígito
3. L^4 é o conjunto de todas as cadeias formadas por exatamente quatro letras
4. L^* é o conjunto de todas as cadeias formadas por letras, incluíndo a cadeia ϵ
5. $L(L \cup D)^*$ é o conjunto de cadeias de letras e dígitos, que iniciam com uma letra

Exemplos de operações em linguagens

Seja $L = \{$ `A, B, C, ... Z, a, b, c, ... z` $\}$ e $M = \{$ `0, 1, 2, ... 9` $\}$. Então:

1. $L \cup M$ é o conjunto de letras e dígitos
2. LM é o conjunto de cadeias formadas por uma letra, seguida de um dígito
3. L^4 é o conjunto de todas as cadeias formadas por exatamente quatro letras
4. L^* é o conjunto de todas as cadeias formadas por letras, incluíndo a cadeia ϵ
5. $L(L \cup D)^*$ é o conjunto de cadeias de letras e dígitos, que iniciam com uma letra
6. D^+ é o conjunto de cadeias formadas por um ou mais dígitos

Expressões regulares

Definição de expressão regular

Sejam Σ um alfabeto. As expressões regulares sobre Σ são definidas pelas seguintes regras, onde cada expressão regular define uma linguagem:

1. ϵ é uma expressão regular que denota a linguagem $\{ \epsilon \}$
2. Se $a \in \Sigma$, então a é uma expressão regular que denota a linguagem $\{ a \}$
3. Se r e s são duas expressões regulares que denotam as linguagens $L(r)$ e $L(s)$, então
   (a) (r) é uma expressão regular que denota $L(r)$
   (b) $(r)|(s)$ é uma expressão regular que denota $L(r) \cup L(s)$
   (c) $(r)(s)$ é uma expressão regular que denota $L(r)L(s)$
   (d) $(r)^*$ é uma expressão regular que denota $(L(r))^*$

Expressões regulares e parêntesis

O uso de parêntesis em expressões regulares pode ser reduzido se forem adotadas as seguintes convenções:

Expressões regulares e parêntesis

O uso de parêntesis em expressões regulares pode ser reduzido se forem adotadas as seguintes convenções:

1. o operador unário $*$ possui a maior precedência e é associativo à esquerda

Expressões regulares e parêntesis

O uso de parêntesis em expressões regulares pode ser reduzido se forem adotadas as seguintes convenções:

1. o operador unário $*$ possui a maior precedência e é associativo à esquerda
2. a concatenação tem a segunda maior precedência e é associativa à esquerda

Expressões regulares e parêntesis

O uso de parêntesis em expressões regulares pode ser reduzido se forem adotadas as seguintes convenções:

1. o operador unário $*$ possui a maior precedência e é associativo à esquerda
2. a concatenação tem a segunda maior precedência e é associativa à esquerda
3. o operador $|$ tem a menor precedência e é associativo à esquerda

Expressões regulares e parêntesis

O uso de parêntesis em expressões regulares pode ser reduzido se forem adotadas as seguintes convenções:

1. o operador unário $*$ possui a maior precedência e é associativo à esquerda
2. a concatenação tem a segunda maior precedência e é associativa à esquerda
3. o operador $|$ tem a menor precedência e é associativo à esquerda

Neste cenário, a expressão regular $(a) \mid ((b)^* \ (c))$ equivale a $a \mid b^* \ c$.

Exemplos de expressões regulares

Seja $\Sigma = \{ a, b \}$. Então

Exemplos de expressões regulares

Seja $\Sigma = \{ a, b \}$. Então

- $a \mid b$ denota a linguagem $\{ a, b \}$

Exemplos de expressões regulares

Seja $\Sigma = \{ a, b \}$. Então

- $a \mid b$ denota a linguagem $\{ a, b \}$
- $(a \mid b)(a \mid b)$ denota $\{ aa, ab, ba, bb \}$

Exemplos de expressões regulares

Seja $\Sigma = \{\ a, b\ \}$. Então

- $a \mid b$ denota a linguagem $\{\ a, b\ \}$
- $(a \mid b)(a \mid b)$ denota $\{\ aa, ab, ba, bb\ \}$
- a^* denota $\{\ \epsilon, a, aa, aaa, \ldots\ \}$

Exemplos de expressões regulares

Seja $\Sigma = \{ \, a, b \, \}$. Então

- $a \mid b$ denota a linguagem $\{ \, a, b \, \}$
- $(a \mid b)(a \mid b)$ denota $\{ \, aa, ab, ba, bb \, \}$
- a^* denota $\{ \, \epsilon, a, aa, aaa, \ldots \, \}$
- $(a \mid b)^*$ denota todas as cadeias formas por zero ou mais instâncias de a ou de b

Exemplos de expressões regulares

Seja $\Sigma = \{\ a, b\ \}$. Então

- $a \mid b$ denota a linguagem $\{\ a, b\ \}$
- $(a \mid b)(a \mid b)$ denota $\{\ aa, ab, ba, bb\ \}$
- a^* denota $\{\ \epsilon, a, aa, aaa, \ldots\ \}$
- $(a \mid b)^*$ denota todas as cadeias formas por zero ou mais instâncias de a ou de b
- $a \mid a^*\ b$ denota a cadeia a e todas as cadeias iniciadas por zero ou mais a's, seguidos de um b

Propriedades das expressões regulares

Sejam r, s, t expressões regulares. Valem as seguintes propriedades:

Axioma	Descrição
$r \mid s = s \mid r$	$\mid$ é comutativo
$r \mid (s \mid t) = (r \mid s) \mid t$	$\mid$ é associativo
$r(st) = (rs)t$	a concatenação é associativa
$r(s \mid t) = rs \mid rt$ $(r \mid s)t = rt \mid st$	a concatenação é distributiva em relação a $\mid$
$\epsilon r = r$ $r\epsilon = r$	ϵ é o elemento neutro da concatenação
$r^* = (r \mid \epsilon)^*$	relação entre ϵ e $*$
$r^{**} = r^*$	$*$ é idempotente

Definições regulares

Definição

Seja Σ um alfabeto. Uma definição regular sobre Σ é uma sequência de definições da forma

$$
\begin{aligned}
d_1 &\to r_1 \\
d_2 &\to r_2 \\
&\ldots \\
d_n &\to r_n
\end{aligned}
$$

onde cada d_i é um nome distinto e r_i uma expressão regular sobre o alfabeto $\Sigma \cup \{\ d_1, d_2, \ldots, d_{i-1}\ \}$.

Exemplo de definição regular

Os identificadores de Pascal, e em muitas outras linguagens, são formados por cadeias de caracteres e dígitos, começando com uma letra.

Exemplo de definição regular

Os identificadores de Pascal, e em muitas outras linguagens, são formados por cadeias de caracteres e dígitos, começando com uma letra.

Abaixo segue a definição regular para o conjunto de todos os identificadores válidos em Pascal:

Exemplo de definição regular

Os identificadores de Pascal, e em muitas outras linguagens, são formados por cadeias de caracteres e dígitos, começando com uma letra.

Abaixo segue a definição regular para o conjunto de todos os identificadores válidos em Pascal:

$$\begin{aligned} \textbf{letra} &\rightarrow \texttt{A | B | ... | Z | a | b | ... | z} \\ \textbf{digito} &\rightarrow \texttt{0 | 1 | 2 | ... | 9} \\ \textbf{id} &\rightarrow \textbf{letra} \mid (\textbf{letra} \mid \textbf{digito})^* \end{aligned}$$

Simplificações notacionais

As seguintes notações podem simplificar as expressões regulares:

Simplificações notacionais

As seguintes notações podem simplificar as expressões regulares:

1. *Uma ou mais ocorrências*. Se r é uma expressão regular, então $(r)^+$ denota $(L(r))^+$. O operador $+$ tem a mesma associatividade e precedência do operator $*$. Vale que $r^* = r^+|$**e** e que r^+rr^*.

Simplificações notacionais

As seguintes notações podem simplificar as expressões regulares:

1. *Uma ou mais ocorrências*. Se r é uma expressão regular, então $(r)^+$ denota $(L(r))^+$. O operador $+$ tem a mesma associatividade e precedência do operator $*$. Vale que $r^* = r^+|$**e** e que r^+rr^*.
2. *Zero ou mais ocorrências*. Se r é uma expressão regular, então $r?$ denota $L(r) \cup \epsilon$. O operador $?$ é posfixo e unário, e $r? = r|\epsilon$.

Simplificações notacionais

As seguintes notações podem simplificar as expressões regulares:

1. *Uma ou mais ocorrências*. Se r é uma expressão regular, então $(r)^+$ denota $(L(r))^+$. O operador $+$ tem a mesma associatividade e precedência do operator $*$. Vale que $r^* = r^+|$**e** e que r^+rr^*.
2. *Zero ou mais ocorrências*. Se r é uma expressão regular, então $r?$ denota $L(r) \cup \epsilon$. O operador $?$ é posfixo e unário, e $r? = r|\epsilon$.
3. *Classes de caracteres*. A notação `[`abc`]`, onde a, b, c são símbolos do alfabeto, denota a expressão regular $a \mid b \mid c$. A notação `[`a`-`z`]` abrevia a expressão regular $a \mid b \mid \ldots \mid z$.

Limitações das expressões regulares

- Existem linguagens que não podem ser descritas por meio de expressões regulares

Limitações das expressões regulares

- Existem linguagens que não podem ser descritas por meio de expressões regulares
- Por exemplo, não é possível descrever o conjunto $\mathcal{P}$ de todas as cadeias de parêntesis balanceados por meio de expressões regulares

Limitações das expressões regulares

- Existem linguagens que não podem ser descritas por meio de expressões regulares
- Por exemplo, não é possível descrever o conjunto $\mathcal{P}$ de todas as cadeias de parêntesis balanceados por meio de expressões regulares
- Contudo, o conjunto $\mathcal{P}$ pode ser descrito por meio de uma gramática livre de contexto

Limitações das expressões regulares

- Existem linguagens que não podem ser descritas por meio de expressões regulares
- Por exemplo, não é possível descrever o conjunto $\mathcal{P}$ de todas as cadeias de parêntesis balanceados por meio de expressões regulares
- Contudo, o conjunto $\mathcal{P}$ pode ser descrito por meio de uma gramática livre de contexto
- Existem linguagens que não podem ser descritas nem mesmo por meio de uma gramática livre de contexto

Limitações das expressões regulares

- Existem linguagens que não podem ser descritas por meio de expressões regulares
- Por exemplo, não é possível descrever o conjunto $\mathcal{P}$ de todas as cadeias de parêntesis balanceados por meio de expressões regulares
- Contudo, o conjunto $\mathcal{P}$ pode ser descrito por meio de uma gramática livre de contexto
- Existem linguagens que não podem ser descritas nem mesmo por meio de uma gramática livre de contexto
- Por exemplo, o conjunto

$$\mathcal{C} = \{wcw \mid w \text{ é uma cadeia de } a\text{'s e } b\text{'s}\}$$

não pode ser descrito nem por expressões regulares e nem por meio de uma gramática livre de contexto