

Máquinas de Turing

Enumerabilidade

Prof. Edson Alves

Faculdade UnB Gama

2020

Sumário

1. Definição de enumerabilidade
2. Exemplos de conjuntos enumeráveis
3. Diagonalização

Funções parciais

Funções parciais

Sejam A e B conjuntos. A função $f : D \rightarrow B$ é uma função **parcial** de A em B se $D \subset A$ é um subconjunto próprio de A . Se $D = A$ a função f é dita uma função **total** de A em B .

Enumerabilidade

Conjuntos enumeráveis

Um conjunto A é enumerável se, e somente se, ele é imagem de ao menos uma função (total ou parcial) de \mathbb{N} em A .

Observação: informalmente, um conjunto A é enumerável se seus elementos podem ser listados em ordem, isto é, um primeiro elemento, um segundo elemento, etc,

$$a_1, a_2, a_3, \dots$$

de modo que, cedo ou tarde, todos os elementos de A sejam listados, ao menos, uma vez.

Exemplos de conjuntos enumeráveis

1. Os números naturais são enumeráveis: eles são enumerados pela função identidade $f(n) = n$
2. A união dos números naturais com o zero também é enumerável: a função $g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N} \cup \{0\}$ tal que

$$g(n) = n - 1$$

enumera esta união

3. O conjunto dos números pares pode é enumerado pela função total $h(n) = 2n$, ou pela parcial

$$p(n) = \begin{cases} n, & \text{se } n \text{ é par} \\ \text{indefinida,} & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Exemplos de conjuntos enumeráveis

4. O conjunto vazio \emptyset é enumerado pela a função $z(n) = \text{indefinida}$, $\forall n \in \mathbb{N}$
5. Qualquer conjunto finito A é enumerável
6. Os números inteiros \mathbb{Z} são enumeráveis: uma listagem possível dos seus elementos é

$$0, -1, 1, -2, 2, -3, 3, \dots$$

Uma função f que gera tal enumeração é

$$f(n) = \begin{cases} \frac{n}{2}, & \text{se } n \text{ é par} \\ -\left(\frac{n+1}{2}\right), & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Enumerabilidade dos números racionais

Teorema

O conjunto dos números racionais positivos \mathbb{Q}^+ é enumerável.

Para demonstrar este importante resultado, observe que

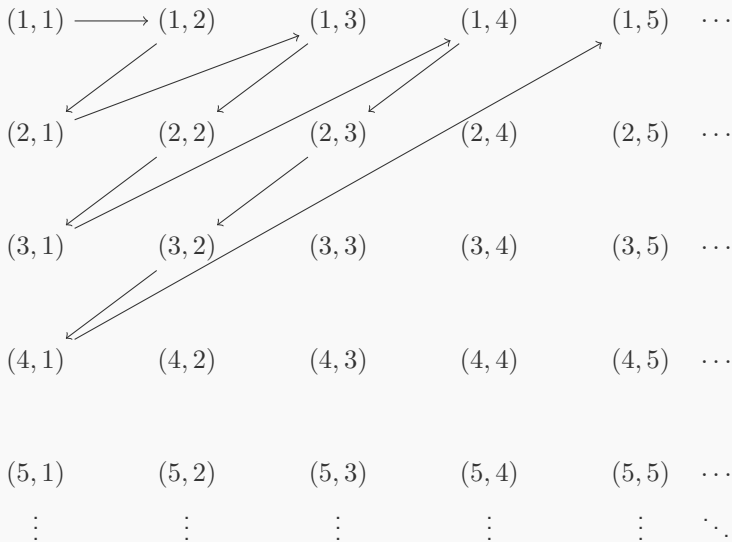
$$\mathbb{Q}^+ = \{(a, b) \mid a, b \in \mathbb{N}\}$$

Assim, basta demonstrar o seguinte lema:

Lema

O conjunto os pares ordenados de números naturais é enumerável.

Demonstração por *zigue-zague* de Cantor



Demonstração por *zigue-zague* de Cantor

- ▶ A função G que enumera os pares é tal que

$$G(1) = (1, 1), G(2) = (1, 2), G(3) = (2, 1), G(4) = (1, 3), \dots$$

conforme padrão apresentado na figura anterior

- ▶ O padrão, de fato, é o seguinte: primeiro são enumerados todos os pares cujas coordenadas somam 2 (a saber, apenas o par $(1, 1)$)
- ▶ Em seguida, são listados todos os pares cujas coordenadas somam 3, ordenados pela primeira coordenada: $(1, 2), (2, 1)$
- ▶ Após estes são enumerados os pares que somam 4, 5, \dots , e assim por diante
- ▶ É possível, mas não necessário, descrever a função G em termos de n

Enumerabilidade das sequências finitas de inteiros positivos

Proposição

O conjunto \mathcal{S} de todas as sequências finitas de inteiros positivos é enumerável.

Demonstração

O Teorema Fundamental da Aritmética nos diz que qualquer inteiro $n \geq 2$ pode ser escrito, de forma única, como

$$n = p_1^{\alpha_1} p_2^{\alpha_2} \dots p_k^{\alpha_k},$$

onde os números p_i são primos e os expoentes α_i são inteiros não-negativos. A função $f(s)$ recebe uma sequência finita de inteiros positivos $s = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ e retorna o natural

$$f(s) = 2^{s_1} 3^{s_2} 5^{s_3} \dots p_N^{s_N},$$

onde p_N é o N -ésimo número primo. Fazendo $f(e) = 1$, onde e é a sequência vazia, a inversa da função f pode ser usada para construir uma função parcial G que enumera \mathcal{S} .

Exemplos da enumeração de \mathcal{S}

1. A sequência de três termos $s = \{1, 2, 3\}$ é codificada pelo número 2250 pela função f , pois

$$f(s) = 2^1 3^2 5^3 = 2250$$

2. A sequência s tal que $f(s) = 30$ é $s = \{1, 1, 1\}$, pois

$$30 = 2^1 3^1 5^1$$

3. As cinco primeiras sequências da enumeração são

$$e, \{1\}, \{2\}, \{1, 1\}, \{3\}$$

4. Veja, na listagem acima, que a função $G(n) = f^{-1}(n)$ não está definida para n se n é um número primo ímpar

Enumerabilidade das cadeias finitas de alfabetos enumeráveis

Proposição

Seja \mathcal{A} um alfabeto enumerável. O conjunto \mathcal{C} de todas as cadeias finitas de símbolos de \mathcal{A} é enumerável.

Demonstração

Como \mathcal{A} é enumerável, seus elementos podem ser dispostos em ordem:

$$\mathcal{A} = \{a_1, a_2, a_3, \dots\}$$

Assim, qualquer cadeia finita $c = \{a_{i_1} a_{i_2} \dots a_{i_N}\} \in \mathcal{C}$ corresponde uma sequência finita de inteiros positivos

$$s = \{i_1, i_2, \dots, i_N\}$$

Como \mathcal{S} é enumerável, \mathcal{C} também é enumerável.

Exemplo de conjunto não-enumerável

Teorema de Cantor

O conjunto de todos os conjuntos de inteiros positivos não é enumerável.

Demonstração do Teorema de Cantor

- ▶ Uma forma de demonstrar o Teorema de Cantor é utilizar uma técnica chamada diagonalização
- ▶ A ideia é, a partir de uma lista L de conjuntos de inteiros positivos, construir um conjunto $\Delta(L)$ de inteiros positivos que não pertence à lista L
- ▶ Caso este conjunto seja acrescentado à lista L , é possível aplicar a mesma técnica para construir um novo conjunto $\Delta(L^*)$ que não pertence à lista $L^* = L \cup \Delta(L)$
- ▶ Assim, não existe nenhuma lista que enumera o conjunto de todos os conjuntos de inteiros positivos

Construção do conjunto $\Delta(L)$

- ▶ Seja $L = S_1, S_2, S_3, \dots$ uma lista de conjuntos de inteiros positivos $S_i, i \in \mathbb{Z}^+$
- ▶ Defina

$$\Delta(L) = \{n \in \mathbb{Z}^+ \mid n \notin S_n\}$$

- ▶ Da definição acima, $\Delta(L) \subset \mathbb{Z}^+$
- ▶ Como sugerido pela própria notação, o conjunto $\Delta(L)$ depende da lista L : cada lista L_j de conjuntos de inteiros positivos gera um conjunto $\Delta(L_j)$ em particular
- ▶ Por exemplo, se $L = S_1, S_2, S_3, \dots$ é tal que S_i é o conjunto dos i primeiros números primos, temos que

$$\Delta(L) = \{1, 4, 6, 8, 9, 10, \dots\}$$

Demonstração por contradição

- ▶ Suponha, por contradição, que $\Delta(L) \in L$, isto é, que o conjunto $\Delta(L)$ seja listado, em algum momento, por L
- ▶ Assim, existe um $k \in \mathbb{Z}^+$ tal que $\Delta(L) = S_k$
- ▶ Em relação ao inteiro positivo k há dois cenários possíveis
- ▶ Se $k \in S_k$, então $\Delta(L) \neq S_k$, pois por definição, se $k \in \Delta(L)$ então $k \notin S_k$
- ▶ Logo, deveríamos ter $k \notin S_k$ mas, neste caso, teríamos que ter $k \in \Delta(L)$, de modo que $S_k \neq \Delta(L)$
- ▶ Portanto, a hipótese de que $\Delta(L) \in L$ leva a contradição $(\Delta(L) = S_k) \wedge (\Delta(L) \neq S_k)$
- ▶ Assim, $\Delta(L) \notin L$, completando a demonstração do Teorema de Cantor

Corolário do Teorema de Cantor

Corolário

O conjunto \mathbb{R} dos números reais não é enumerável.

Demonstração

Seja $x \in \mathbb{R}$ tal que $0 < x < 1$. Então x tem uma expansão decimal da forma

$$0, x_1 x_2 x_3 \dots$$

Seja S_x o conjunto de inteiros positivos tal que $n \in S_x$ se, e somente se, $x_n = 1$. Deste modo, qualquer conjunto $S \subset \mathbb{Z}^+$ está associado a, pelo menos, um número real $y \in (0, 1)$. Assim, se os reais fossem enumeráveis, o conjunto de todos os conjuntos de inteiros positivos seria enumerável, contradizendo o Teorema de Cantor.

Referências

1. **BOOLOS**, George S.; **BURGESS**, John P.; **JEFFREY**, Richard C. *Computabilidade e Lógica*, Editora Unesp, 2012.