

Análise Combinatória

Números de Fibonacci e de Catalan

Prof. Edson Alves

Faculdade UnB Gama

Números de Fibonacci

Definição dos números de Fibonacci

O n -ésimo número de Fibonacci $F(n)$ é definido pela recorrência

$$F(0) = 0$$

$$F(1) = 1$$

$$F(n) = F(n-1) + F(n-2), \quad n \geq 2$$

Os primeiros termos da sequência de Fibonacci são:

0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 377, 610, 987, 1597, 2584, 4181, ...

Limites práticos dos números de Fibonacci

- Os números de Fibonacci crescem rapidamente, de modo que o número de termos que podem ser computados em tipos inteiros de C/C++ é bastante restrito
- Para variáveis de 32-*bits* é possível calcular o valor exato de $F(n)$ para $n \leq 46$ (a saber, $F(46) = 1836311903$)
- Para variáveis de 64-*bits*, os valores serão exatos para $n \leq 92$ (observe que $F(92) = 7540113804746346429$)
- Para valores de n superiores a 92, é necessário ou trabalhar com aritmética estendida ou com aritmética modular

Implementação recursiva dos números de Fibonacci

```
long long recursive_fibonacci(long long n)
{
    if (n == 0 or n == 1)
        return n;

    return recursive_fibonacci(n - 1) + recursive_fibonacci(n - 2);
}
```

- A implementação acima tem como vantagem a simplicidade, uma vez que corresponde a definição apresentada
- Contudo a complexidade assintótica é $O(2^n)$

Implementação iterativa em Python

```
def iterative_fibonacci(n):  
    if n < 2:  
        return n  
  
    a = 0  
    b = 1  
  
    for _ in range(n):  
        a, b = b, a + b  
  
    return a
```

- Esta versão tem complexidade $O(n)$
- A linguagem Python implementa nativamente com aritmética estendida, de modo que esta função pode computar $F(n)$ para $n > 92$

Implementação usando programação dinâmica

```
1 fib = [0, 1]
2
3 def fibonacci(n):
4     if n < len(fib) + 1:
5         return fib[n]
6
7     next = len(fib)
8
9     while next <= n:
10         fib.append(fib[next - 1] + fib[next - 2])
11         next += 1
12
13     return fib[n]
```

Equações de diferenças lineares

- Os números de Fibonacci podem ser definidos por meio de um sistema de equações de diferenças lineares
- Seja $u(n)$ um vetor cujas duas componentes são os números de Fibonacci $F(n+1)$ e $F(n)$
- Assim, vale que

$$u(n+1) = Au(n),$$

onde

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

- Observe que $u(1) = Au(0)$, $u(2) = Au(1) = A^2u(0)$, etc, e assim por diante
- De fato,

$$u(n) = A^n u(0)$$

- Usando exponenciação rápida para computar A^n , é possível determinar $F(n)$ em $O(\log n)$
- Veja que $F(n)$ ocupará as posições da diagonal secundária de A^n

Cálculo de $F(n)$ em $O(\log n)$

```
5 class Matrix {
6     long long _a, _b, _c, _d;
7
8 public:
9     Matrix(long long a = 1, long long b = 0, long long c = 0, long long d = 1)
10         : _a(a), _b(b), _c(c), _d(d) {}
11
12     Matrix operator*(const Matrix& m) const {
13         auto a = _a * m._a + _b * m._c;
14         auto b = _a * m._b + _b * m._d;
15         auto c = _c * m._a + _d * m._c;
16         auto d = _c * m._b + _d * m._d;
17         return Matrix(a, b, c, d);
18     }
19
20     long long b() const { return _b; }
21 };
```

Cálculo de $F(n)$ em $O(\log n)$

```
23 long long fast_fibonacci(long long n)
24 {
25     Matrix res, A(1, 1, 1, 0);
26
27     while (n)
28     {
29         if (n & 1)
30             res = res * A;
31
32         A = A * A;
33         n >>= 1;
34     }
35
36     return res.b();
37 }
```

Propriedades da sequência de Fibonacci

- A sequência de Fibonacci tem várias propriedades interessantes
- A razão entre dois termos consecutivos da série tende à razão áurea, isto é,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{F(n+1)}{F(n)} = \frac{1 + \sqrt{5}}{2}$$

- A soma dos n primeiros termos da sequência pode ser computada por meio de uma soma telescópica e é igual a

$$\sum_{i=1}^n F(i) = F(n+2) - 1$$

Propriedades da sequência de Fibonacci

- A soma dos quadrados dos n primeiros termos da sequência é igual a

$$\sum_{i=1}^n F(i)^2 = F(n)F(n+1)$$

- Para qualquer $m > 1$ fixo, a sequência dos restos $r(n, m)$ é cíclica, onde

$$r(n, m) = F(n) \bmod m$$

- O período de $r(n, m)$ é denominado Período de Pisano $\pi(m)$

- Alguns valores comuns:
 - $\pi(2) = 3$
 - $\pi(10) = 60$
 - $\pi(100) = 300$
 - $\pi(10^k) = 15 \times 10^{k-1}, k \geq 3$
- Exceto para o caso $m = 2$, o período de Pisano é sempre par

Números de Catalan

Definição dos números de Catalan

Os números de Catalan são definidos pela da recorrência

$$C(n+1) = \sum_{i=0}^n C(i)C(n-i), \quad n \geq 0,$$

e pelo caso base $C(0) = 1$.

Os primeiros números de Catalan são

1, 1, 2, 5, 14, 42, 132, 429, 1430, 4862, 16796, 58786, 208012, ...

- A soma que define a recorrência tem uma fórmula fechada, de modo que

$$C(n) = \frac{1}{n+1} \binom{2n}{n}$$

- Outra recorrência, com o mesmo caso base da recorrência original, decorre desta forma fechada:

$$C(n+1) = \frac{2(2n+1)}{n+2} C(n)$$

Implementação dos números de Catalan em $O(n)$

```
1 // Com variáveis do tipo `long long` é possível computar até
2 // o 33º número de Catalan sem overflow.
3 long long catalan(int n)
4 {
5     if (n == 0)
6         return 1;
7
8     if (C[n] != -1)
9         return C[n];
10
11     C[n] = (2*(2*n - 1)*catalan(n - 1))/(n + 1);
12
13     return C[n];
14 }
```

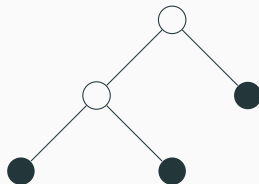
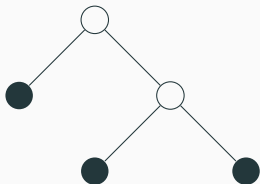
Aplicação: sequências válidas de pares de parêntesis

- A primeira aplicação notável dos números de Catalan $C(n)$ é a contagem do número de sequências corretas formadas por n pares de parêntesis, sendo um par formado pelos caracteres $()$
- Para $n = 0$ há uma única sequência: a sequência vazia
- Para $n = 1$ também existe uma única sequência: $()$
- Para $n = 2$ há duas sequências possíveis: $()()$, $((()))$
- Para $n = 3$ há $C(3) = 5$ sequências:

$()()()$, $((()))()$, $()((()))$, $((()))()$, $((()))()$

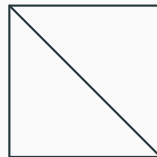
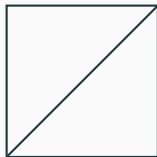
Aplicação: contagem de árvores binárias completas

- A segunda aplicação notável é a contagem de árvores binárias completas, isto é, cada nó tem ou dois filhos ou nenhum
- Há $C(n)$ árvores binárias completas com $n + 1$ folhas
- Para $n = 3$ são $C(2) = 2$ árvores:



Aplicação: triangularização de um polígono convexo

- Uma terceira aplicação seria a contagem de triangularizações de um polígono convexo de $n + 2$ lados
- Existem $C(n)$ triangularizações possíveis
- Por exemplo, para um quadrado ($n = 2$) são duas triangularizações distintas:



1. **HALIM**, Felix; **HALIM**, Steve. *Competitive Programming 3*, 2010.
2. Wolfram Math World. [Pisano Period](#). Acesso em 28/09/2017.
3. Wikipédia. [Catalan Numbers](#). Acesso em 05/10/2017.
4. Wikipédia. [Pisano Period](#). Acesso em 28/09/2017.
5. Wikipédia. [Sequência de Fibonacci](#). Acesso em 28/09/2017.