Конспект Шорохова Сергея
Если нашли опечатку/ошибку - пишите @le9endwp

§0. Методы математического доказательства

1. Индукция
   (a) База индукции
   (b) Индукционное предположение
   (c) Индукционный переход

   $P_1, P_2 \cdots P_n$

   - 1 аксиома индукции
     $\begin{cases} \text{P}_1 \text{ - истина} \\ \forall i \ P_i \to P_{i_1} \end{cases} \Rightarrow \forall i \ P_i$ - истина
   - 2 аксиома индукции
     $\begin{cases} \text{P}_1 \text{ - истина} \\ \forall i \ P_1 \cdots P_i \to P_{i+1} \end{cases} \Rightarrow \forall i \ P_i$ - истина

2. "От противного"
   $A \to B \ \overline{B} \to \overline{A}$

3. Полный перебор

4. Прямой вывод
   $A \to B \to C \to D$, от A к D

5. Контрпример

6. Комбинаторное доказательство (сведение к известной задаче)

7. Двусторонние оценки
   $\begin{cases} \text{A} \geqslant B \\ \text{B} \geqslant A \end{cases} \Rightarrow A = B$

8. Оценка + пример

9. Дедукция + рекурсия
   $A \to B \to C \to D$, от D к A

10. Принцип Дирихле
    Биективное отображение для множеств разного размера оставит "лишние"элементы в одном из них

11. Инвариант
    Ex. Доказательство баланса красно-черного дерева

12. Доказательство эквивалентных утверждений
    $A \to B \to C \to D \to A$

§1. Множества

Def. $|A|$ - мощность множества (количество элементов в множестве
$A \bigcap B = \varnothing \Rightarrow |A \bigcup B| = |A| + |B|$

- $A_1 \cdots A_n$

  $\forall i \neq j \ A_i \bigcap A_j = \emptyset$

  $|\bigcup\limits_{i=1}^{n} A_i| = \sum\limits_{i=1}^{n} |A_i|$

- $A_1 \cdots A_n$

  $|\bigtimes\limits_{i=1}^{n} A_i| = \prod\limits_{i=1}^{n} |A_i|$

Def. $|A \bigcup B| = |A| + |B| - |A \bigcap B|$ - правило включения-исплючения

Доказательство

$A = (A \backslash B) \bigcup (A \bigcap B)$
$|A| = |A \backslash B| + |A \bigcap B|$
$|B| = |B \backslash A| + |A \bigcap B|$
$|A| + |B| = |A \backslash B| + |A \bigcap B| + |B \backslash A| + |A \bigcap B| = |(A \backslash B) \bigcup (A \bigcap B) \bigcup (B \backslash A)| = |A \bigcup B| + |A \bigcap B|$

Дома обобщение для произвольного n
$|A \bigcup B \bigcup C| = |A| + |B| + |C| - |A \bigcap B| - |A \bigcap C| - |B \bigcap C| + |A \bigcap B \bigcap C|$

$L = \{A, C, G, T\}$
$|L^k| = |L|^k = 4^k$
$\begin{cases} \text{f(n)} = \text{n} \cdot f(n-1) \\ \text{f(0)} = 1 \end{cases}$ – количество перестановок
$n(n-1)\cdots(n-k+1) = A_n^k = \frac{n!}{(n-k)!} = C_n^k \cdot k!$
$C_n^k = \binom{n}{k} = \frac{A_n^k}{k!} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$
$(a+b)^n = (a+b)(a+b)\cdots(a+b) = \sum\limits_{i=0}^{n} c_i a^i b^{n-i} = \sum\limits_{i=0}^{n} C_n^i a^i b^{n-i}$

Если представить $a_1, a_2 \cdots a_n$ как двоичное число или из $(1+1)^n = \sum\limits_{i=0}^{n} C_n^i \cdot 1^i \cdot 1^{n-i} = \sum\limits_{i=0}^{n} C_n^i$

Тогда $\sum\limits_{i=0}^{n} C_n^i = 2^n$

Дома найти $\sum\limits_{k=0}^{n} (-1)^k C_n^k$
Посчитаем рекуррентно:
В $a_1 \cdots a_n$ a_1 либо берем, либо не берем

- Если берем, то C_{n-1}^{k-1}
- Если не берем, то C_{n-1}^{k}

Значит $C_n^k = C_{n-1}^{k-1} + C_{n-1}^{k}$

Другое доказательство: $C_{n-1}^k + C_{n-1}^{k-1} = \frac{(n-1)!}{k!(n-1-k)!} + \frac{(n-1)!}{(k-1)!(n-k)!} = \frac{(n-1)!}{(k-1)!(n-1-k)!}(\frac{1}{k} + \frac{1}{n-k}) = \frac{(n-1)!}{(k-1)!(n-1-k)!} \cdot \frac{n}{k(n-k)} = \frac{n!}{k!(n-k)!} = C_n^k$

Воспользоваться суммой можно из треугольника Паскаля. Его можно представить и в виде квадрата. Тогда можем посчитать C_n^i за $i(n-i+1)-(n+1)$, по формуле только $n!$ считали бы $lgn \cdot n$

Свойства:

1. $C_n^0 = C_n^n = 1$
2. $C_n^i = C_n^{n-i}$

   $\frac{n!}{k!(n-k)!} = \frac{n!}{(n-n+k)!(n-k)!}$

Задача

Пусть есть n книг и k полок. Способов разделить на полки (= поставить $k-1$ перегородок) $\frac{(n+1)(n+2)\cdots(n+k-1)}{(k-1)!} = \frac{A^{k-1}_{n+k-1}}{(k-1)!} = C^{k-1}_{n+k-1}$

Def. Отношения A, B $\rho \subset A \times B$

$a\rho b$ $\forall a \in A, b \in B$, если $(a, b) \in \rho$

Свойства:

1. $\forall a \in A$ $a\rho a$ - рефлексивность
2. $\forall a, b \in A$ $a\rho b \Rightarrow b\rho a$ - симметричность
3. $\forall a, b, c \in A$ $\begin{cases} a\rho b \\ b\rho c \end{cases} \Rightarrow a\rho c$ - транзитивность

Если выполняются все 3, то это оношение эквивалентности. Все элементы разобьются на классы эквивалентности

A, B; $f : A \to B \Leftrightarrow \forall a \in A \exists b \in B : (a, b) \in f$

Def.

Пусть A - позиции в слове, B - символы алфавита

Количество отображений - количество строк длины $|A|$

$f(a) = f(b) \Rightarrow a = b$ - инъективность

$\forall b \in B \exists a \in A : f(a) = b$ - сюрьективность

Если $f : A \to B$ - биективно, то $|A| = |B|$, при этом количество биекций - количество перестановок

Количество инъекций - A^k_n

A, B – конечные множества

Отображение – правило, сопоставляющее $a \in A$ $b \in B$, т.е.

$f : A \to B$

$\forall x \in A$ $\exists y : f(x) = y$

$\begin{matrix} (x, f(x)) \\ x \in A; y = f(x) \in B \end{matrix}$ – график отображений

$|B|^{|A|}$ – количество отображений

$Im(M) = \{f(x) | x \in M\}$ – образ M

Виды отображений:

- Инъективные

  $f(x_1) = f(x_2) \Rightarrow x_1 = x_2$

  $|Im(A)| = |A|$

  На $|B|$ позиций $|A|$ элементов

  $A^{|A|}_{|B|}$ – количество отображений

- Сюрьективные

  $\forall y \in B \exists x \in A : f(x) = y$

  $Im(A) = B$

  $\forall y \in B$; $P_y = \{x | f(x) = y\} \neq \emptyset$

  $Im(P_y) = \{y\}$

  $\hat{S}(n, k)$ – количество сюрьективных отображений $A \to B, |A| = n, |B| = k$

$k^n = \sum\limits_{i=0}^{k} (\hat{S}(n, i) \cdot C^i_k)$

$\begin{cases} f_0, f_1 \cdots ; g_0, g_1 \cdots \\ f_k = \sum\limits_i C^i_k g_i \end{cases} \Rightarrow g_i = \sum\limits_i^k (-1)^{k-i} C^i_k f_i$, если докажем, получим $\hat{S}(n, k) = \sum (-1)^{k-i} C^i_k k^i$

Доказательство

TODO, из-за отсутствия практик пока не доказываем
$\frac{\hat{S}(n,k)}{k!} = S(n,k)$ – число Стирлинга первого рода
k предметов (множество X), n ящиков (множество Y)

X	Y	Произвольно	$\leqslant 1$	$\geqslant 1$
Различимы	Различимы	k^n	A_k^n	$\hat{S}(n,k)$
Неразличимы	Различимы	C_{n+k}^k	C_k^n	C_{k-1}^{n-1}
Различимы	Неразличимы	$B(n,k)$	$0, k > n$ $1, k \leqslant n$	$S(n,k)$

$B(n,k) = \sum\limits_i^n S(i,k)$

Рекуррентные соотношения

$f_{n+m} = a_0 f_n + a_1 f_{n+1} + \cdots a_{m-1} f_{n+m-1}$
$f_0 \cdots f_{n-1}$
Прогой рекурсия удобно преображается в динамику (без проги нет)

Числа Фиббоначи: $f_{n+2} = f_{n+1} + f_n$
$f_0 = 0 \ f_1 = 1$
Явная формула (сложно): $\frac{1}{\sqrt{5}}((\frac{1+\sqrt{5}}{2})^n - (\frac{1-\sqrt{5}}{2})^n)$

Доказательство

База $n = 0, 1$ – верно
Переход $n \to n+1$
$f_{n+2} = \frac{1}{\sqrt{5}}((\frac{1+\sqrt{5}}{2})^n(\frac{1+\sqrt{5}}{2} + 1) - (\frac{1-\sqrt{5}}{2})^n(\frac{1-\sqrt{5}}{2} + 1))$
$\frac{3+\sqrt{5}}{2} = (\frac{1+\sqrt{5}}{2})^2 = \frac{1+5+2\sqrt{5}}{4}$

$f_n = \lambda^n; \ \lambda \neq 0$
$\lambda^{n+m} = a_0 \lambda^n \cdots a_{m-1} \lambda^{n+m-1}$
$\lambda^m = a_0 + \cdots + a_{m-1} \lambda^{m-1}$
$\lambda_{1 \cdots n} =$
$f_n = c_1 \lambda_1^n + c_2 \lambda_2^n \cdots c_m \lambda_m^n$ – характеристическое уравнение

На примере чисел Фиббоначи
$\lambda^2 = \lambda + 1$
$\lambda^2 - \lambda - 1 = 0$
$\lambda_{1,2} = \frac{1 \pm \sqrt{1+4}}{2}$
$f_n = c_1 \lambda_1^n + c_2 \lambda_2^n$
$\begin{cases} c_1 + c_2 = 0 \\ c_1(\frac{1+\sqrt{5}}{2}) + c_2(\frac{1-\sqrt{5}}{2}) = 1 \end{cases}$
$c_2 = -c_1$
$c_1(\frac{1+\sqrt{5}}{2} - \frac{1-\sqrt{5}}{2}) = 1$
$c_1 = \frac{1}{\sqrt{5}}; \ c_2 = -\frac{1}{\sqrt{5}}$

Корней не всегда n
Для $f_{n+2} = 4f_{n+1} - 4f_n$ неправда (корни кратные)
Что делать?
Дифференцируем!

$(n+m)\lambda^{n+m-1} = a_0 n \lambda^{n-1} \cdots a_{m-1}(n+m-1)\lambda^{n+m-2}$
$c_1 \lambda_1^n + c_2 n \lambda_2^{n-1}$ – может быть решением
$\lambda_{1,2} = 2$

$c_1 2^n + c_2 2^{n-1} n$

$\begin{cases} c_1 + 0 = 0 \\ c_1 \cdot 2 + c_2 \cdot 2^0 \cdot 1 = 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} c_1 = 0 \\ c_2 = 1 \end{cases}$

Ответ: $2^{n-1} \cdot n$

А что если корней нет вовсе?
$f_{n+2} = 4f_{n+1} - 5f_n$
$\lambda^2 - 4\lambda + 5 = 0$
$\lambda_{1,2} = 2 \pm \sqrt{2^2 - 5} = 2 \pm i$
Корни вида $c_1\lambda_1^n + c_2\lambda_2^n$ будут удовлетворять равенству, но в комплексных числах
Из $f_n = c_1\lambda_1^n + c_2\lambda_2^n$ мнимая часть будет $= 0$

$a \pm bi = 2(\cos\alpha + i\sin\alpha) = r \cdot e^{i\alpha}$
$c_1 2^n \cos\alpha^2 + c_2 2^n \sin\alpha^2$

$\frac{e^{i\alpha}+e^{-i\alpha}}{2} = \frac{\cos\alpha + i\sin\alpha}{2} + \frac{\cos\alpha - i\sin\alpha}{2} = \cos\alpha$

$(\cos\alpha + i\sin\alpha)^n = (e^{i\alpha})^n = e^{in\alpha} = \cos n\alpha + i\sin n\alpha$

$c_1 \cos n\alpha + c_2 \sin n\alpha$
$\lambda_{1,2} = 2 \pm \sqrt{2^2 - 5} = 2 \pm i = \sqrt{5}(\frac{2}{\sqrt{5}} \pm \frac{i}{\sqrt{5}})$
$\alpha = a2\cos\frac{2}{\sqrt{5}}$
$c_1 \cos n\alpha + c_2 \sin n\alpha$

$f_n = a_1 f_{n-1} + a_2 f_{n-2} + 2^n$
$\lambda_{1,2}$
$f_n = c_1\lambda_1^n + c_2\lambda_2^n + K(n)$
$K(n) - K(n-1) \cdot a_1 - K(n-2) \cdot a_2 = 2^n$
$K(n) = W \cdot 2^n$
$W \cdot 2^n - W \cdot 2^{n-1} \cdot a_1 - W \cdot 2^{n-2} \cdot a_2 = 2^n$
$4W - 2a_1W - a_2W = 4$