

# Verjetnost 1

Zapiski po predavanjih prof. dr. Romana Drnovška  
Napisal: Jon Pascal Miklavčič

2024/08/29



# Kazalo

<b>1</b>	<b>Neformalni uvod v verjetnost</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Aksiomatična definicija verjetnosti</b>	<b>5</b>
2.1	Dogodki . . . . .	5
2.2	Verjetnostna preslikava . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Pogojna verjetnost</b>	<b>11</b>
3.1	Pogojna verjetnost . . . . .	11
3.2	Formula o popolni verjetnosti . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Zaporedja neodvisnih ponovitev poskusa</b>	<b>17</b>
4.1	Bernoullijeva formula . . . . .	17
4.2	Aproksimacije Bernoullijeve formule . . . . .	18
<b>5</b>	<b>Slučajne spremenljivke</b>	<b>23</b>
5.1	Diskretne slučajne spremenljivke . . . . .	26
5.2	Zvezne slučajne spremenljivke . . . . .	29
<b>6</b>	<b>Slučajni vektorji in neodvisnost</b>	<b>37</b>
6.1	Slučajni vektorji . . . . .	37
6.2	Neodvisnost . . . . .	40
<b>7</b>	<b>Matematično upanje oz. pričakovana vrednost</b>	<b>43</b>
<b>8</b>	<b>Disperzija, kovarianca in korelacijski koeficient</b>	<b>51</b>

---

8.1	Disperzija in standardni odklon . . . . .	51
8.2	Kovarianca . . . . .	58
8.3	Korelacijski koeficient . . . . .	60
<b>9</b>	<b>Pogojna porazdelitev in pogojno matematično upanje</b>	<b>63</b>
<b>10</b>	<b>Rodovne funkcije</b>	<b>67</b>
<b>11</b>	<b>Višji momenti in vrstilne karakteristike</b>	<b>73</b>
<b>12</b>	<b>Momentno rodovna funkcija</b>	<b>79</b>

# Poglavje 1

## Neformalni uvod v verjetnost

Začetki verjetnosti so v 17. stoletju, iz iger na srečo (kartanje, kockanje, ...):

- 17. stol.: Fermant, Pascal, Bernulli;
- 18./19. stol.: Laplace, Poisson, Čebišev, Markov;
- 20. stol.: Kolmogorov.

Izvajamo poskus in opazujemo določen pojav, ki ga imenujemo *dogodek*. Ta se lahko zgodi ali ne.

**Zgled.** Poskus je met kocke. Da pade šestica, da pade sodo število pik pa sta dogodka. ◇

Poskus ponovimo  $n$ -krat. Opazujemo dogodek  $A$ . S  $k_n(A)$  označimo *frekvenco dogodka*  $A$ , t.j. število tistih ponovitev poskusa, pri katerih se je dogodek  $A$  zgodil. Naj bo  $f_n(A) = \frac{k_n(A)}{n}$  *relativna frekvenca* dogodka  $A$ . Dokazati je mogoče, da zporedje  $\{f_n(A)\}_n$  konvergira k nekemu številu  $p \in [0, 1]$ ;  $f_n(A) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} p$ . Dobimo:

**Statistično definicijo verjetnosti:**

$$P(A) := p$$

Pogosto lahko verjetnost določimo vnaprej in sicer s:

**Klasično definicijo verjetnosti:**

$$P(A) := \frac{\# \text{ ugodnih izidov za dogodek } A}{\# \text{ vseh izidov}}$$

pri pogoju, da imajo vsi izidi *enake* možnosti.

**Zgled.** Met poštene kocke:

$$P(\text{sodo število pik}) = \frac{3}{6} = \frac{1}{2}$$

◇

**Zgled.** Kolikšna je verjetnost, da pri metu dveh poštenih kock znaša vsota pik 7?

Možne vsote so: 2, 3, 4, ..., 12. Opazimo, da je vseh vsot 11 in od tega 1 ugodna. Ali to pomeni, da  $P(A) = \frac{1}{11}$ . Ne! Izidi niso enako verjetni.

Na primer 2 lahko dobimo samo kot  $2 = 1 + 1$ , 5 pa kot  $5 = 2 + 3 = 1 + 4 = 4 + 1 = 3 + 2$ . Torej vsi možni izidi, bodo urejeni pari  $(x, y)$ , kjer  $x, y \in [1, 6] \subseteq \mathbb{N}$ :

$$\begin{array}{cccc} (1, 1) & (1, 2) & \cdots & (1, 6) \\ (2, 1) & (2, 2) & \ddots & (2, 6) \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ (6, 1) & (6, 2) & \cdots & (6, 6) \end{array}$$

Vseh izidov je torej 36 in od tega je 6 ugodnih. Torej  $P(A) = \frac{6}{36} = \frac{1}{6}$ . ◇

Če je izidov neskončno, si lahko pomagamo s **Geometrijsko definicijo verjetnosti**.

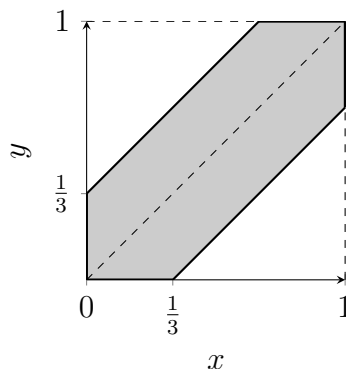
**Zgled.** Osebi se dogovorita za srečanje med 10. in 11. uro. Čas prihoda je slučajen. Vsak od njiju po prihodu čaka največ 20 minut. Če v tem času drugega ni, odide. Najdlje čaka do 11. ure. Kolišna je verjetnost srečanja?

Čas začnemo šteti ob 10. uri. Vsi izidi so urejeni pari  $(x, y) \in [0, 1] \times [0, 1]$ . Ugodni izidi so  $|x - y| \leq \frac{1}{3}$ . Torej:

$$\begin{array}{l} 1) \ x \geq y : x - \frac{1}{3} \leq y \\ 2) \ x \leq y : y - x \leq \frac{1}{3} \iff y \leq x + \frac{1}{3} \end{array}$$

Torej je

$$P(\text{srečanja}) = \frac{1 - \left(\frac{2}{3}\right)^2}{1} = \frac{5}{9}$$



Slika 1.1: Prostor vseh možnih izidov

◇

Teorija mere se ukvarja z splošnim zapisom geometrijske definicije.

**Zgled.** Vzamemo  $m, n \in \mathbb{N}$ ,  $m > n$ .  $n$  kroglic slučajno razporedimo v  $m$  posod. Kolikšna je verjetnost dogodka, da so vse kroglice v prvih  $n$  posodah, v vsaki ena?

To je pomankljivo zastavljena naloga. Ne vemo namreč, ali med seboj kroglice razlikujemo, ali ne. Za dodatno predpostavko se ponujajo 3 možnosti:

### 1. Kroglice razlikujemo:

Število vseh izidov v tem primeru je ravno število *variacij*  $m$  elementov na  $n$  mestih s *ponavljanjem*. Za vsako od  $n$ -tih kroglic imamo  $m$  možnosti, torej je vseh možnosti  $m \cdot m \cdots m = m^n$ .

Število ugodnih izidov pa je ravno število *permutacij*  $n$  kroglic v prvih  $n$  posodah. Torej je ugodnih možnosti  $n(n-1) \cdots 2 \cdot 1 = n!$ .

Torej je:

$$P(A) = \frac{n!}{m^n}$$

### 2. Kroglic ne razlikujemo:

V vsaki posodi je lahko več kroglic. Število vseh izidov je ravno število *kombinacij s ponavljanjem*. Število kombinacij  $m$  elementov s ponavljanjem na  $n$  mestih je:

$$\binom{n+m-1}{n} = \binom{n+m-1}{m-1}$$

Postavimo  $n$  kroglic in med njih razporedimo  $m - 1$  črtic, ki predstavljajo stene posod:

$$\underbrace{|\circ|\circ|\circ|\circ|\circ\cdots|\circ|}_{n \text{ kroglic, } m-1 \text{ črtic}}$$

Na  $n + m - 1$  mestih moramo določiti  $n$  kroglic. Ugoden izid je samo eden:

$$|\circ|\circ|\circ|\circ|\circ\cdots\circ|||\cdots|$$

Torej je:

$$P(A) = \frac{1}{\binom{n+m-1}{n}}$$

### 3. Kroglic ne razlikujemo, v vsaki posodi je kvečjemu ena kroglica:

Število vseh izidov je ravno število *kombinacij brez ponavljanja*  $\binom{m}{n}$ .

Ugoden izid je eden.

Torej je:

$$P(A) = \frac{1}{\binom{m}{n}}$$

◇

*Opomba.* V fiziki so kroglice delci (atomi, molekule, ...), posode pa fazna stanja, v katerih so lahko delci. Glede na zgornje primere ločimo:

1. Maxwell-Boltzmannovo statistiko, ki velja za molekule plina.
2. Bose-Einsteinovo statistiko, ki velja za delce imenovane bozoni.
3. Fermi-Diracovo statistiko, ki velja za fermione.

Diracovo izključitveno načelo.



# Poglavje 2

## Aksiomatična definicija verjetnosti

### 2.1 Dogodki

Imamo prostor vseh izidov oz. *vezorčni prostor*  $\Omega$  (možna oznaka je tudi  $\mathcal{G}$ ). Dogodki so nekatere (ne nujno vse) podmnozice  $\Omega$ .

**Zgled.** Met kocke. Vzorčni prostor je  $\Omega = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ , dogodki pa so poljubne podmnozice  $\Omega$ , to je  $\mathcal{P}(\Omega) = 2^\Omega$ . Na primer  $A = \{2, 4, 6\}$  je dogodek, da pade sodo število pik.  $\diamond$

**Računanje z dogodki:**

1. *Vsota dogodkov oz. unija dogodkov* (zgodí se vsaj enden od dogodkov):

$$A + B = A \cup B$$

2. *Produkt dogodkov oz. presek dogodkov* (zgodita se oba dogodka hkrati):

$$A \cdot B = A \cap B$$

3. *Nasprotni dogodek oz. komplement dogodka* (dogodek se ne zgodi):

$$\bar{A} = A^c$$

**Pravila za računanje z dogodki:**

1. *idempotentnost:*

$$A \cup A = A = A \cap A$$

2. *komutativnost*:

$$A \cup B = B \cup A, \quad A \cap B = B \cap A$$

3. *asociativnost*:

$$(A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C)$$

$$(A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C)$$

4. *distributivnost*:

$$(A \cup B) \cap C = (A \cap C) \cup (B \cap C)$$

$$(A \cap B) \cup C = (A \cup C) \cap (B \cup C)$$

5. *de Morganova zakona*:

$$(A \cap B)^c = A^c \cup B^c$$

$$(A \cup B)^c = A^c \cap B^c$$

Še več:

$$\left( \bigcap_i A_i \right)^c = \bigcup_i A_i^c, \quad \left( \bigcup_i A_i \right)^c = \bigcap_i A_i^c$$

V splošnem ni vsaka podnožica množice  $\Omega$  dogodek. Neprazna družina podmnožic (dogodkov)  $\mathcal{F}$  v  $\Omega$  je  $\sigma$ -algebra, če zanjo velja:

$$1. \quad \Omega \in \mathcal{F}$$

$$2. \quad A \in \mathcal{F} \implies A^c \in \mathcal{F}$$

$$3. \quad A_1, A_2, \dots \in \mathcal{F} \implies \bigcup_{i=1}^{\infty} A_i \in \mathcal{F}$$

Elementi v  $\mathcal{F}$  so dogodki. Če v točki 3. zahtevamo manj:

$$3^*. \quad A, B \in \mathcal{F} \implies A \cup B \in \mathcal{F}$$

Potem pravimo, da je  $\mathcal{F}$  algebra.

V algebri imamo potem tudi zaprtost za končne unije (dokažemo z indukcijo):

$$A_1, A_2, \dots, A_n \in \mathcal{F} \implies A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n \in \mathcal{F}$$

Ker po de-Morganu velja  $\bigcap_i A_i = (\bigcup_i A_i^c)^c$ , je algebra zaprta za končne preseke,  $\sigma$ -algebra pa celo za števne preseke. Ker velja  $A \setminus B = A \cap B^c$ , je algebra zaprta za razlike.

Vsaka algebra vsebuje  $\{\emptyset, \Omega\}$ . Ker je  $\mathcal{F}$  neprazna, obstaja  $A \in \mathcal{F}$  in je zato tudi  $\Omega = A \cup A^c \in \mathcal{F}$  in  $\emptyset = \Omega^c \in \mathcal{F}$ . Tako dobimo, da je  $\{\emptyset, \Omega\}$  najmanjša možna ( $\sigma$ -)algebra,  $\mathcal{P}(\Omega)$  pa največja možna ( $\sigma$ -)algebra.

**Zgled.** Za  $A \neq \emptyset \neq \Omega$  je najmanjša  $(\sigma)$ -algebra, ki vsebuje  $A$  enaka  $\{\emptyset, A, A^c, \Omega\}$ .  
Za  $\Omega = \{1, 2, 3\}$  in  $A = \{1, 2\}$ , je potem taka  $\sigma$ -algebra  $\{\emptyset, \{3\}, \{1, 2\}, \{1, 2, 3\}\}$ .  $\diamond$

Dogodka  $A$  in  $B$  sta *disjunkta* oz. *nezdružljiva* če je  $A \cap B = \emptyset$ .

Zaporedje  $\{A_i\}_i$  (končno ali števno mnogo) je *popoln sistem dogodkov*, če velja:

$$\bigcup_i A_i = \Omega \quad \text{in} \quad A_i \cap A_j = \emptyset \quad \text{za} \quad i \neq j.$$

## 2.2 Verjetnostna preslikava

**Definicija 1.** Naj bo  $\mathcal{F}$   $\sigma$ -algebra na  $\Omega$ . *Verjetnost* na  $(\Omega, \mathcal{F})$  je preslikava  $P : \mathcal{F} \rightarrow \mathbb{R}$  z lastnostmi:

1. Za vsak  $A \in \mathcal{F}$ :  $P(A) \geq 0$
2.  $P(\Omega) = 1$
3. Za poljubne paroma nezdružljive dogodke  $\{A_i\}_{i=1}^\infty$  velja števna aditivnost:

$$P\left(\bigcup_{i=1}^\infty A_i\right) = \sum_{i=1}^\infty P(A_i)$$

**Lastnosti verjetnosti  $P$ :**

- (a)  $P(\emptyset) = 0$ .

*Dokaz.* V lastnosti 3. vzamemo  $A_i = \emptyset$  za vsak  $i$ :

$$P\left(\bigcup_i \emptyset\right) = P(\emptyset) + P(\emptyset) + P(\emptyset) + \cdots = 0 + 0 + 0 + \cdots = 0$$

□

- (b)  $P$  je *končno aditivna*, t.j. za končno mnogo paroma nezdružljivih dogodkov  $\{A_i\}_{i=1}^n$  velja:

$$P(A_1 \cup \cdots \cup A_n) = P(A_1) + \cdots + P(A_n)$$

*Dokaz.* V lastnosti 3. vzamemo  $A_{n+1} = A_{n+2} = \cdots = \emptyset$  in upoštevamo lastnost (a). □

(c)  $P$  je *monotona*, t.j. velja:

$$A \subseteq B \implies P(A) \leq P(B)$$

Še več: iz  $A \subseteq B$  sledi  $P(B \setminus A) = P(B) - P(A)$ .

*Dokaz.* Ker je  $B = A \cup (B \setminus A)$  in  $A \cap (B \setminus A) = \emptyset$  je  $P(B) = P(A) + P(B \setminus A)$  zaradi lastnosti (b).  $\square$

(d)  $P(A^c) = 1 - P(A)$

*Dokaz.* V lastnosti (c) vzamemo  $B = \Omega$ .  $\square$

(e)  $P$  je *zvezna*, t.j.:

(i)

$$A_1 \subseteq A_2 \subseteq A_3 \subseteq \dots \implies P\left(\bigcup_{i=1}^{\infty} A_i\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} P(A_n)$$

(ii)

$$B_1 \supseteq B_2 \supseteq B_3 \supseteq \dots \implies P\left(\bigcap_{i=1}^{\infty} B_i\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} P(B_n)$$

*Dokaz.*

(i) Definiramo  $C_1 = A$  in  $C_i = A_i \setminus A_{i-1}$  za  $i = 2, 3, \dots$ . Potem je:

$$A_n = \bigcup_{i=1}^n C_i, \quad C_i \cap C_j = \emptyset \text{ za } i \neq j \quad \text{in} \quad \bigcup_{i=1}^{\infty} A_i = \bigcup_{i=1}^{\infty} C_i$$

Torej je:

$$\begin{aligned} P\left(\bigcup_{i=1}^{\infty} A_i\right) &= P\left(\bigcup_{i=1}^{\infty} C_i\right) \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} P(C_i) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n P(C_i) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\bigcup_{i=1}^n C_i\right) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} P(A_n) \end{aligned}$$

- (ii) Ker  $B_1 \supseteq B_2 \supseteq B_3 \supseteq \dots$ , je potem  $B_1^c \subseteq B_2^c \subseteq B_3^c \subseteq \dots$ . Po (i) potem velja:

$$P\left(\bigcup_{i=1}^{\infty} B_i^c\right) = \lim_{i \rightarrow \infty} P(B_i^c)$$

Potem velja:

$$\bigcup_{i=1}^{\infty} B_i^c = \left(\bigcap_{i=1}^{\infty} B_i\right)^c \implies 1 - P\left(\bigcap_{i=1}^{\infty} B_i\right) = \lim_{i \rightarrow \infty} (1 - P(B_i))$$

Od koder sledi željena enakost.

□

**Verjetnostni prostor** je trojica  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$

**Zgled** (Končni ali števeni verjetnostni prostor).  $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots\}$  končno ali števno mnogo izidov.  $\{\omega_1\}, \{\omega_2\}, \{\omega_3\}, \dots$  je popoln sistem dogodkov, neka podmnožica v  $\Omega$  je končna ali števna unija teh dogodkov. Torej  $\mathcal{F} = \mathcal{P}(\Omega)$ . Vzamemo:

$$A = \bigcup_{i: \omega_i \in A} \{\omega_i\}$$

Če označimo  $P(\{\omega_i\}) = p_i \geq 0$ , potem je:

$$\sum_i p_i = 1 \quad \text{in} \quad P(A) = \sum_{i: \omega_i \in A} p_i \quad \text{za} \quad A \subseteq \Omega$$

Če ima  $\Omega$   $n$  elementov in  $p_i = \frac{1}{n}$  za  $i = 1, 2, \dots, n$ . Potem je:

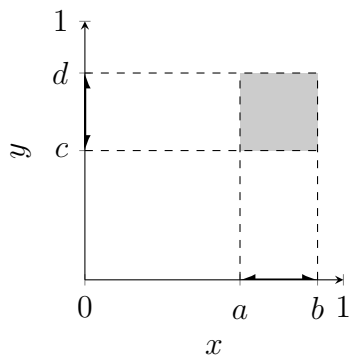
$$P(A) = \frac{|A|}{n} = \frac{\text{moč}(A)}{n}$$

To je klasična definicija verjetnosti.

◇

**Zgled** (Neskončni nešteveni verjetnostni prostor). Primer srečanja dveh oseb, kjer  $\Omega = [0, 1] \times [0, 1]$ . Za  $\sigma$ -algebro  $\mathcal{F}$  ne moremo vzeti vseh podmnožic, radi pa bi jih vzeli čim več.

$\mathcal{F}$  naj bo najmanjša  $\sigma$ -algebra, ki vsebuje vse odprte pravokotnike  $(a, b) \times (c, d)$  (izkaže se, da je isto, če vzamemo zaprte pravokotnike).  $\mathcal{F}$  imenujemo *Borelova  $\sigma$ -algebra*.

Slika 2.1: Odprt pravokotnik v  $\Omega$ 

Verjetnost definiramo na pravokotnikih kot:

$$P((a, b) \times (c, d)) = (b - a)(d - c)$$

Ni lahko videti, da lahko  $P$  razširimo do verjetnosti na  $\mathcal{F}$ .  $P$  pa ne moremo razširiti na  $\mathcal{P}(\Omega)$ . Problem je števna aditivnost. To je geometrijska definicija verjetnosti.  $\diamond$

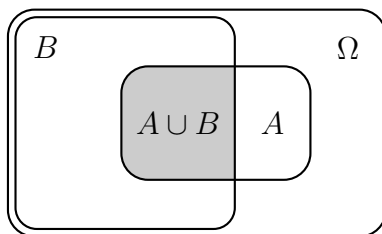
# Poglavje 3

## Pogojna verjetnost

### 3.1 Pogojna verjetnost

**Definicija 2.** Naj bo  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$  verjetnostni prostor. Fiksirajmo dogodek  $B$  s  $P(B) > 0$ . *Pogojna verjetnost* dogodka  $A$  glede na dogodek  $B$  je:

$$P(A \mid B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$$



Slika 3.1: Verjetnostni prostor  $\Omega$

**Zgled.** V posodi sta dve beli in ena črna kroglica. Dvakrat zaporedoma izvlečemo kroglico. Kolikšna je verjetnost, da smo drugič izbrali belo kroglico, če smo prvič izbrali belo?

(a) Kroglice vrečamo.

Vseh izidov je 9:

$B_1 B_1$	$B_1 B_2$	$B_1 \checkmark$
$B_2 B_1$	$B_2 B_2$	$B_2 \checkmark$
$\checkmark B_1$	$\checkmark B_2$	$\checkmark \checkmark$

$$P(\text{prvič belo}) = \frac{6}{9} = \frac{2}{3}$$

$$P(\text{prvič in drugič belo}) = \frac{4}{9}$$

$$P(\text{drugič belo} \mid \text{prvič belo}) = \frac{4/9}{6/9} = \frac{4}{6} = \frac{2}{3}$$

$$P(\text{drugič belo}) = \frac{6}{9} = \frac{2}{3}$$

(b) Kroglice ne vračamo.

Vseh izidov je 6:

$$B_1B_2 \quad B_1\check{C} \quad B_2B_1 \quad B_2\check{C} \quad \check{C}B_1 \quad \check{C}B_2$$

$$P(\text{prvič belo}) = \frac{4}{6} = \frac{2}{3}$$

$$P(\text{prvič in drugič belo}) = \frac{2}{6} = \frac{1}{3}$$

$$P(\text{drugič belo} \mid \text{prvič belo}) = \frac{2/6}{4/6} = \frac{1}{2} = \frac{2}{4}$$

$$P(\text{drugič belo}) = \frac{4}{6} = \frac{2}{3}$$

◇

Iz definicije pogojne verjetnosti dobimo:

$$P(A \cap B) = P(A \mid B) \cdot P(B)$$

Za 3 dogodke  $A, B, C$ , kjer velja  $P(B \cap C) > 0$  dobimo:

$$P(A \cap B \cap C) = P(A \mid B \cap C) \cdot P(B \cap C) = P(A \mid B \cap C) \cdot P(B \mid C) \cdot P(C)$$

Če to posplošimo na  $n$  dogodkov dobimo:

$$P(A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n) = P(A_1) \cdot P(A_2 \mid A_1) \dots P(A_n \mid A_1 \cap \dots \cap A_{n-1})$$

Če desno stran razpišemo, res dobimo:

$$\begin{aligned} P(A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n) &= P(A_1) \cdot P(A_2 \mid A_1) \dots P(A_n \mid A_1 \cap \dots \cap A_{n-1}) \\ &= P(A_1) \cdot \frac{P(A_1 \cap A_2)}{P(A_1)} \dots \frac{P(A_1 \cap \dots \cap A_n)}{P(A_1 \cap \dots \cap A_{n-1})} \\ &= P(A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n) \end{aligned}$$



**Zgled.** V posodi imamo 6 modrih, 5 rdečih in 4 zelene kroglice. Brez vračanja izberemo 3 kroglice. Kolikšna je verjetnost, da so vse rdeče?

Označimo s  $A_k$  dogodek, da je  $k$ -ta kroglica rdeče za  $k = 1, 2, 3$ . Nalogo lahko rešimo na dva načina:

1.

$$\begin{aligned} P(A_1 \cap A_2 \cap A_3) &= P(A_1) \cdot P(A_2 | A_1) \cdot P(A_3 | A_1 \cap A_2) \\ &= \frac{5}{15} \cdot \frac{4}{14} \cdot \frac{3}{13} = \frac{2}{7 \cdot 13} = \frac{2}{91} \end{aligned}$$

2.

$$P(\text{vse rdeče}) = \frac{\binom{5}{3}}{\binom{15}{3}} = \frac{\frac{5 \cdot 4 \cdot 3}{3!}}{\frac{15 \cdot 14 \cdot 13}{3!}} = \frac{2}{91}$$

◇

## 3.2 Formula o popolni verjetnosti

Imejmo poskus, ki ga opravimo v 2 korakih (fazah).

1. V prvem koraku se zgodi natanko enden izmed paroma nezdružljivih dogodkov  $H_1, H_2, H_3, \dots$  (končno ali števno mnogo).
2. V drugem koraku pa nas zanima dogodek  $A$ . Izrazimo  $P(A)$  z verjetnostmi:

$$P(H_i) \quad \text{in} \quad P(A | H_i) \quad \text{za } i = 1, 2, 3, \dots$$

Ker je  $\{H_i\}_i$  popoln sistem dogodkov, je:

$$A = A \cap \Omega = A \cap \left( \bigcup_i H_i \right) = \bigcup_i A \cap H_i$$

Zato velja:

$$P(A) = \sum_i P(A \cap H_i) = \sum_i P(H_i) \cdot P(A | H_i)$$

To je *formula za popolno verjetnost*.

**Zgled.** Pri srečolovu je  $n$  srečk, od tega je  $m$  dobitnih ( $m < n$ ). Ali imamo večje možnosti za dobiček, če izbiramo prvi ali drugi?

Če izbiramo prvi je:

$$P(\text{dobitka}) = \frac{m}{n}$$

Če izbiramo drugi je:

$$\begin{aligned} P(\text{dobitka}) &= P(\text{prvi dobi}) \cdot P(\text{dobitka} \mid \text{prvi dobi}) \\ &\quad + P(\text{prvi ne dobi}) \cdot P(\text{dobitka} \mid \text{prvi ne dobi}) \\ &= \frac{m}{n} \cdot \frac{m-1}{n-1} + \frac{n-m}{n} \cdot \frac{m}{n-1} = \frac{m}{n} \end{aligned}$$

◇

Pogosto nas v dvofaznem poskusu zanima:

$$P(H_k \mid A) = \frac{P(H_k \cap A)}{P(A)} = \frac{P(H_k) \cdot P(A \mid H_k)}{\sum_i P(H_i) \cdot P(A \mid H_i)}$$

To je *Bayesova formula*.

**Zgled.** Test s poligrafom (detektorjem laži). Resnicoljub opravi test s poligrafom z verjetnostjo 0.95. Z enako verjetnostjo poligraf prepozna lažnivca. Izmed 1000 oseb, med katerimi je natanko en lažnivec, slučajno izberemo eno osebo za katero poligraf pravi, da je lažnivec. Kolikšna je pogojna verjetnost, da je oseba zares lažnivec?

Označimo s  $L$  dogodek, da je izbrana oseba lažnivec,  $L_p$  pa dogodek, da poligraf za osebo pravi, da je lažnivec. Potem:

$$P(L_p \mid L) = 0.95, \quad P(L_p \mid L^c) = 0.05 \quad \text{in} \quad P(L) = 0.001$$

Zanima nas  $P(L \mid L_p)$ . Po Bayesovi formuli je:

$$\begin{aligned} P(L \mid L_p) &= \frac{P(L) \cdot P(L_p \mid L)}{P(L) \cdot P(L_p \mid L) + P(L^c) \cdot P(L_p \mid L^c)} \\ &= \frac{0.55 \cdot 0.001}{0.55 \cdot 0.001 + 0.05 \cdot 0.999} \\ &= \frac{95}{5090} = \frac{1}{50} = 0.02 \end{aligned}$$

◇

Dogodka  $A$  in  $B$  sta *neodvisna*, če velja:

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B)$$

Če je  $P(B) > 0$ , to enakost lahko zapišemo kot:

$$P(A) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} = P(A \mid B)$$

Če imamo več dogodkov, so dogodki  $\{A_i\}_i$  so *neodvisni*, če za poljuben končen nabor različnih dogodkov  $A_{i_1}, A_{i_2}, \dots, A_{i_k}$  velja:

$$P(A_{i_1} \cap A_{i_2} \cap \dots \cap A_{i_k}) = P(A_{i_1}) \cdot P(A_{i_2}) \cdots P(A_{i_k})$$

Če zahtevamo to le za  $k = 2$ , torej  $A_i$  in  $A_j$  sta neodvisna za vsak  $i \neq j$ , potem rečemo, da so dogodki *paroma neodvisni*. To je šibkejši pogoj kot neodvisnost.

**Zgled.** Met tetraedra.  $\Omega = \{1, 2, 3, 4\}$  in  $P(\{i\}) = \frac{1}{4}$  za  $i = 1, 2, 3, 4$ .

Če označimo  $A = \{1, 2\}$ ,  $B = \{1, 3\}$ ,  $C = \{1, 4\}$ , vidimo  $A \cap B = A \cap C = B \cap C = \{1\}$  kar implicira  $P(A \cap B) = P(A \cap C) = P(B \cap C) = \frac{1}{4} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2}$ . To implicira, da so dogodki  $\{A, B, C\}$  paroma neodvisni. Toda  $P(A \cap B \cap C) = P(\{1\}) = \frac{1}{4} \neq \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2}$ , zato dogodki niso neodvisni.  $\diamond$

**Trditev 1.** Če sta dogodka  $A$  in  $B$  neodvisna, potem sta neodvisna tudi dogodka  $A$  in  $B^c$ , dogodka  $A^c$  in  $B$ , ter dogodka  $A^c$  in  $B^c$ .

*Dokaz.*

(i) Ker je  $A \cap B^c = A \setminus A \cap B$  velja:

$$\begin{aligned} P(A \cap B^c) &= P(A) - P(A \cap B) \\ &= P(A) - P(A) \cdot P(B) \\ &= P(A)(1 - P(B)) \\ &= P(A) \cdot P(B^c) \end{aligned}$$

(ii) Za  $A^c$  in  $B$  dokažemo na podoben način.

(iii)

$$\begin{aligned} P(A^c \cap B^c) &= 1 - P(A \cup B) \\ &= 1 - P(A) - P(B) + P(A \cap B) \\ &= P(A^c) - P(B) + P(A) \cdot P(B) \\ &= P(A^c) - P(B)(1 - P(A)) \\ &= P(A^c) - P(B) \cdot P(A^c) \\ &= P(A^c) \cdot P(B^c) \end{aligned}$$

□



## Poglavje 4

# Zaporedja neodvisnih ponovitev poskusa

### 4.1 Bernoullijeva formula

Imejmo zaporedje  $n$  neodvisnih ponovitev poskusa določenega z verjetnostnim prostorom  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$  v katerem je možen dogodek  $A$  s  $P(A) = p$ . Označimo še  $q := P(A^c) = 1 - p$ .

Z  $A_n(k)$  označimo dogodek, da se v  $n$  ponovitvah poskusa, dogodek  $A$  zgodi natanko  $k$ -krat, za  $k = 0, 1, 2, \dots, n$ . Izračunajemo verjetnost:

$$P_n(k) := P(A_n(k))$$

$A_n(k)$  je dijunktna unija  $\binom{n}{k}$  dogodkov, da se  $A$  zgodi na predpisanih  $k$  mestih, na ostalih pa  $A^c$ . Verjetnost teh dogodkov je  $p^k \cdot q^{n-k}$ . Zato je:

$$P_n(k) = \binom{n}{k} \cdot p^k \cdot q^{n-k} \quad \text{za} \quad k = 0, 1, 2, \dots, n$$

To je *Bernoullijeva formula*.

**Zgled.** Kaljivost semen je 0.95. Kolikšna je verjetnost, da izmed 1000 semen v zavojčku vzkali točno 950 semen?

$A$  je dogodek, da seme vzkali. Potem je  $p = P(A) = 0,05, q = 0.95, k = 50$ . Zato:

$$P_{1000}(50) = \binom{1000}{50} \cdot 0.05^{50} \cdot 0.95^{950} = 0.05779$$

◇

To je težko izračunati, tudi če bi uporabljali Stirlingovo formulo:  $n! \sim \sqrt{2\pi n} \left(\frac{n}{e}\right)^n$ .

Kjer:

$$a_n \sim b_n \stackrel{\text{def}}{\iff} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = 1$$

Torej:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{2\pi n}}{n!} \left(\frac{n}{e}\right)^n = 1$$

## 4.2 Aproximacije Bernoullijeve formule

Aproximativne formule za  $P_n(k)$ :

(a) *Poissonova formula*:

Če je  $p$  blizu 0 in  $n$  velik, potem je:

$$P_n(k) \approx \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}, \quad \text{kjer je } \lambda = np$$

*Dokaz.*

$$\begin{aligned} P_n(k) &= \frac{n(n-1) \cdots n(n-k+1)}{k!} p^k (1-p)^{n-k} \\ &= \frac{n(n-1) \cdots (n-k+1)}{k!} \left(\frac{\lambda}{n}\right)^k \left(1 - \frac{\lambda}{n}\right)^{n-k} \\ &= \frac{\lambda^k}{k!} \frac{n(n-1) \cdots (n-k+1)}{\underbrace{n \cdot n \cdot n \cdots n}_{k \text{ krat}}} \left(1 - \frac{\lambda}{n}\right)^n \left(1 - \frac{\lambda}{n}\right)^{-k} \\ &\approx \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} \end{aligned}$$

Zadnja aproksimacija velja v limiti. □

**Zgled** (Kaljivost semen).

$$\begin{aligned} P_{1000}(50) &= \binom{1000}{50} \cdot 0.05^{50} \cdot 0.95^{950} \\ &\approx \frac{50^{50}}{50!} \cdot e^{-50} \\ &= \frac{1}{50!} \left(\frac{50}{e}\right)^{50} \\ &\approx \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot 50}} \\ &\approx 0.05642 \end{aligned}$$

◇

(b) *Laplaceova lokalna formula:*

Za velike  $n$  velja:

$$P_n(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi npq}} \cdot e^{-\frac{(k-np)^2}{2npq}}$$

Kasneje boste dokazali še splošnejši izrek (centralni limitni izrek).

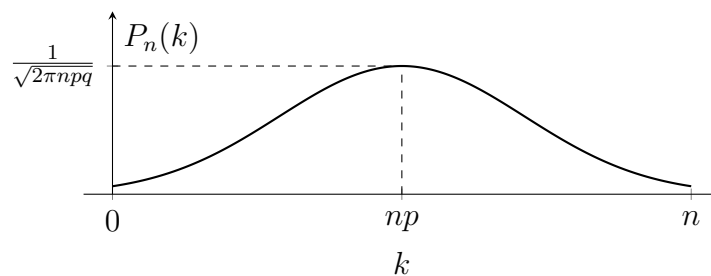
Narišimo zaporedje  $\{P_n(k)\}_{k=0}^n$ , kjer je  $n$  fiksen. Dobimo:

$$\begin{aligned} P_n(0) &= \binom{n}{0} p^0 q^n = q^n \\ P_n(1) &= \binom{n}{1} p^1 q^{n-1} \\ &\vdots \end{aligned}$$

Kdaj velja  $P_n(k) \leq P_n(k+1)$ ?

$$\begin{aligned} \frac{P_n(k+1)}{P_n(k)} &\geq 1 && \Longleftrightarrow \\ \frac{n-k}{k+1} \cdot \frac{p}{q} &\geq 1 && \Longleftrightarrow \\ np - kp &\geq (k+1)q && \Longleftrightarrow \\ np - kp &\geq kq + q && \Longleftrightarrow \\ np &\geq k + q \end{aligned}$$

Funkcija  $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2}}$  aproksimira ta graf. To je premaknjena in raztegnjena "normalna porazdelitev".



Slika 4.1: Graf  $P_n(k)$

**Zgled** (Kaljivost semen).  $p = 0.05, np = 50$ :

$$P_{1000}(50) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot 50 \cdot 0.95}} = \frac{1}{\sqrt{95 \cdot \pi}} = 0.05788$$

◇

(c) *Laplaceova integralna formula:*

Zanima nas dogodek  $B_n(k_1, k_2)$ , da se v  $n$  ponovitvah poskusa dogodek  $A$  zgodi vsaj  $k_1$ -krat in manj kot  $k_2$ -krat, za  $0 \leq k_1 < k_2 \leq n$ . Potem je:

$$B_n(k_1, k_2) = A_n(k_1) \cup A_n(k_1 + 1) \cup \dots \cup A_n(k_2 - 1)$$

Ti dogodki so med seboj nezdružljivi, torej je:

$$P_n(k_1, k_2) := P(B_n(k_1, k_2)) = \sum_{k=k_1}^{k_2-1} P(A_n(k)) = \sum_{k=k_1}^{k_2-1} P_n(k)$$

Po Laplaceovi lokalni formuli je potem:

$$P_n(k_1, k_2) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi npq}} \sum_{k=k_1}^{k_2-1} e^{-\frac{1}{2}x_k^2}, \quad \text{kjer je } x_k = \frac{k - np}{\sqrt{npq}}$$

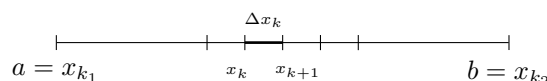
Vpeljemo:

$$\Delta x_k = x_{k-1} - x_k = \frac{k+1 - np}{\sqrt{npq}} - \frac{k - np}{\sqrt{npq}} = \frac{1}{\sqrt{npq}}$$

Potem dobimo:

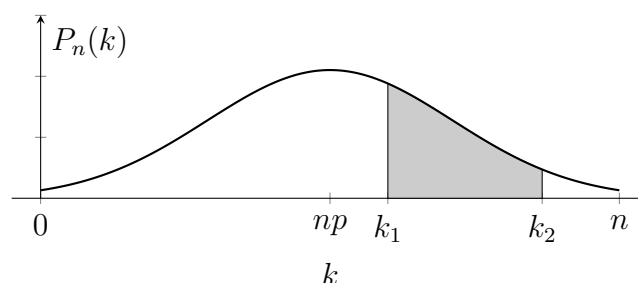
$$P_n(k_1, k_2) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{k=k_1}^{k_2-1} e^{-\frac{1}{2}x_k^2} \Delta x_k$$

To je Riemannova vsota za funkcijo  $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$  in za delitev intervala  $[a, b]$  na  $k_2 - k_1$  enakih delov, kjer je  $a = x_{k_1} = \frac{k_1 - np}{\sqrt{npq}}$ ,  $b = x_{k_2} = \frac{k_2 - np}{\sqrt{npq}}$ .



Torej za velike  $n$  imamo:

$$P_n(k_1, k_2) \approx \int_a^b f(x) dx = \int_{\frac{k_1 - np}{\sqrt{npq}}}^{\frac{k_2 - np}{\sqrt{npq}}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$



Slika 4.2:  $P_n(k_1, k_2)$



**Definicija 3.** Verjetnostni integral oziroma funkcija napake je:

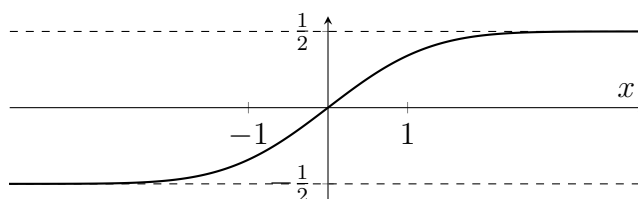
$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad \text{za } x \in \mathbb{R}$$

$\Phi$  je zvezno odvedljiva, liha in naraščujoča.  $\Phi(0) = 0$ .

Izračunajmo  $\lim_{x \rightarrow \infty} \Phi(x)$ . S pomočjo  $\Gamma$  funkcije dobimo.

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow \infty} \Phi(x) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 2} \int_0^\infty u^{-\frac{1}{2}} e^{-u} du \\ &= \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \Gamma\left(\frac{1}{2}\right) \\ &= \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (\star)$$

Kjer smo v  $(\star)$  vrstici uporabili substitucijo  $u = \frac{t^2}{2}$ ,  $du = t dt$ , oziroma  $t = \sqrt{2u}$ ,  $dt = \frac{du}{\sqrt{2u}}$ .



Slika 4.3: Graf funkcije  $\Phi$

Laplaceovo integralsko formulo sedaj razpišemo kot:

$$P_n(k_1, k_2) = \Phi(b) - \Phi(a) = \Phi\left(\frac{k_2 - np}{\sqrt{npq}}\right) - \Phi\left(\frac{k_1 - np}{\sqrt{npq}}\right)$$

**Zgled.** Kolikšna je verjetnost, da vzkali vsaj 950 semen v zavojčku s 1000 semeni?

$A$  naj bo dogodek, da seme ne vzkali. Označimo  $p = P(A) = 0.05$ ,  $q = 0.95$ ,  $n = 1000$ ,  $k_1 = 0$ ,  $k_2 = 50$  in  $np = 50$ . Dobimo:

$$P_{1000}(0, 50) = \Phi\left(\frac{50 - 50}{\sqrt{50 \cdot 0.95}}\right) - \Phi\left(\frac{0 - 50}{\sqrt{50 \cdot 0.95}}\right) \approx \Phi(7.36) \approx 0.500$$

◇



# Poglavje 5

## Slučajne spremenljivke

Danemu poskusu priredimo številsko količino, katere vrednost je odvisna od slučaja. Imenujemo jo *slučajna spremenljivka*.

**Zgled.**

1. Met kocke; število pik je slučajna spremenljivka.
2. Streljanje v tarčo; razdalja zadetka od središča tarče je slučajna spremenljivka. Na primer, verjetnost, da je razdalja  $\leq x$  je sorazmerna z  $x^2$ .

◇

**Definicija 4.** *Realna slučajna spremenljivka* na verjetnostnem prostoru  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$  je funkcija  $X : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ , z lastnostjo, da je za vsak  $x \in \mathbb{R}$  množica:

$$\{\omega \in \Omega : X(\omega) \leq x\}$$

v  $\mathcal{F}$ , se pravi dogodek.

Oznaka:

$$\{\omega \in \Omega : X(\omega) \leq x\} \equiv X^{-1}((-\infty, x]) \equiv (X \leq x)$$

**Definicija 5.** Naj bo  $X$  slučajna spremenljivka. Funkcija  $F_X : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ , definirana s predpisom:

$$F_X(x) := P(X \leq x)$$

Imenujemo jo *porazdelitvena funkcija* slučajne spremenljivke  $X$ .

Dogovor:  $P((X \leq x)) \iff P(X \leq x)$ .

Lastnosti porazdelitvene funkcije  $F \equiv F_X$ :

1.  $0 \leq F(x) \leq 1$  za vsak  $x \in \mathbb{R}$ .
2.  $F$  je naraščujoča funkcija:

$$x_1 < x_2 \implies F(x_1) \leq F(x_2)$$

*Dokaz.* Sledi iz  $(X \leq x_1) \subseteq (X \leq x_2)$  in monotonosti preslikave  $P$ .  $\square$

- 3.

$$\lim_{x \rightarrow \infty} F(x) = 1, \quad \lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0$$

*Dokaz.* Naj bo  $\{x_n\}_n \subseteq \mathbb{R}$  neomejeno strogo naraščujoče zaporedje. Potem je:

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow \infty} F(x) &= \lim_{n \rightarrow \infty} F(x_n) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} P(X \leq x_n) \\ &= P\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} (X \leq x_n)\right) \end{aligned} \tag{*}$$

$$= P(\Omega) = 1 \tag{**}$$

Kjer smo v (\*) vrstici uporabili zveznost  $P$ , v (\*\*) vrstici pa dejstvo, da  $\forall \omega \in \Omega : \exists n : X(\omega) \leq x_n$ , torej  $\omega \in (X \leq x_n)$ .

Podobno se dokaže tudi druga limita (treba je vzeti preseke).  $\square$

4.  $F$  je z desne zvezna, t.j.:

$$F(x+) = F(x), \quad \text{kjer je} \quad F(x+) = \lim_{\substack{h > 0 \\ h \rightarrow 0}} F(x+h)$$

*Dokaz.* Naj zaporedje  $\{x_n\}_n \subseteq \mathbb{R}$  strogo pada proti  $x$ . Potem je:

$$\begin{aligned} F(x+) &= \lim_{n \rightarrow \infty} F(x_n) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} P(X \leq x_n) \\ &= P\left(\bigcap_{n=1}^{\infty} (X \leq x_n)\right) \end{aligned} \tag{*}$$

$$\begin{aligned} &= P(X \leq x) \tag{**} \\ &= F(x) \end{aligned}$$

Kjer  $(\star)$  velja, zaradi zveznosti  $P$ ,  $(\star\star)$  pa velja saj je:

$$\bigcap_{n=1}^{\infty} (X \leq x_n) = (X \leq x)$$

Tukaj je:

$\supseteq$ : očitna

$\subseteq$ :

$$\begin{aligned} \exists \omega \in \bigcap_{n=1}^{\infty} (X \leq x_n) : X(\omega) \leq x_n \quad \forall n \\ \implies X(\omega) \leq x, \text{ t.j. } \omega \in (X \leq x) \end{aligned}$$

□

5. •  $P(x_1 < X \leq x_2) = P(X \in (x_1, x_2])$   
 $= P((X \leq x_2) \setminus (X \leq x_1))$   
 $= P(X \leq x_2) - P(X \leq x_1)$   
 $= F(x_2) - F(x_1)$
- $P(x_1 < X < x_2) = P(X < x_2) - P(X \leq x_1)$   
 $= F(x_2-) - F(x_1)$

Saj je:

$$\begin{aligned} P(X < x) &= P\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} \left(X \leq x - \frac{1}{n}\right)\right) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} P\left(X \leq x - \frac{1}{n}\right) \\ &= F(x-) \end{aligned}$$

- $P(x_1 \leq X \leq x_2) = P(X \leq x_2) - P(X < x_1)$   
 $= F(x_2) - F(x_1-)$
- $P(x_1 \leq X < x_2) = P(X < x_2) - P(X < x_1)$   
 $= F(x_2-) - F(x_1-)$

Oglejmo si dva najpomembnejša razreda slučajnih spremenljivk.

## 5.1 Diskretne slučajne spremenljivke

Slučajna spremenljivka  $X$  je *diskretno porazdeljena*, če je njena zaloga vrednosti končna ali števna množica števil  $\{x_1, x_2, x_3, \dots\}$ .

Tedaj vpeljemo verjetnostno funkcijo:

$$p_k = P(X = x_k) \quad \text{za} \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

in shemo:

$$X : \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \cdots \\ p_1 & p_2 & p_3 & \cdots \end{pmatrix}, \quad \sum_k p_k = 1$$

Tukaj je  $\{(X = x_k)\}_k$  popoln sistem dogodkov.

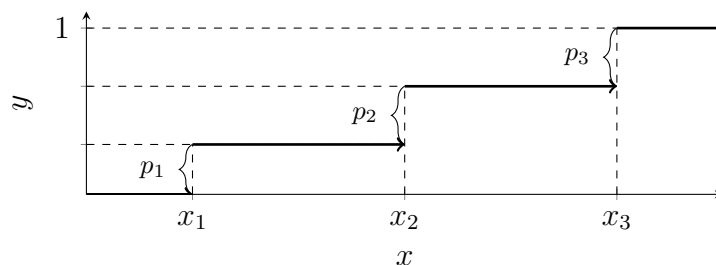
Porazdelitvena funkcija je:

$$F(x) = P(X \leq x) = P\left(\bigcup_{k: x_k \leq x} (X = x_k)\right) = \sum_{k: x_k \leq x} p_k$$

Torej je  $F$  odsekoma konstantna.

Na primer za  $x_1 < x_2 < x_3$  in  $p_1 + p_2 + p_3 = 1$ :

$$X : \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ p_1 & p_2 & p_3 \end{pmatrix}$$



Slika 5.1: Porazdelitvena funkcija  $F$

**Pomembnejše diskretne porazdelitve:**

1. *Enakomerna diskretna porazdelitev* na  $n$  točkah  $x_1, x_2, \dots, x_n$ :

$$X : \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ \frac{1}{n} & \frac{1}{n} & \cdots & \frac{1}{n} \end{pmatrix}$$

**Zgled.** Met poštene kocke,  $n = 6$ :

$$X : \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} \end{pmatrix}$$

◇

2. *Bernoullijeva porazdelitev*  $\text{Ber}(p)$ ,  $p \in (0, 1)$ ,  $q = 1 - p$ :

$$X : \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ q & p \end{pmatrix}$$

$(X = 1)$  je dogodek, da se dogodek  $A$  zgodi.

$(X = 0)$  je dogodek, da se dogodek  $A$  ne zgodi.

Indikatorska funkcija:

$$\mathbb{1}_A(\omega) = \begin{cases} 1 & ; w \in A \\ 0 & ; w \notin A \end{cases}$$

3. *Binomska porazdelitev*  $\text{Bin}(n, p)$ ,  $n \in \mathbb{N}$ ,  $p \in (0, 1)$ :

$$X : \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & \cdots & n \\ p_0 & p_1 & p_2 & p_3 & \cdots & p_n \end{pmatrix}$$

$$p_k = P(X = k) = \binom{n}{k} p^k q^{n-k}, \quad \text{kjer je } q = 1 - p$$

$(X = k)$  je dogodek, da se dogodek  $A$  zgodi natanko  $k$ -krat v  $n$  ponovitvah poskusa.

**Zgled.** Mečemo kocko.  $X$  je število šestic v  $n$  metih.  $X \sim \text{Bin}(n, \frac{1}{6})$ .

◇

4. *Poissonova porazdelitev*  $\text{Poi}(\lambda)$ ,  $\lambda > 0$ :

$$p_k = P(X = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}, \quad \text{za } k = 0, 1, 2, \dots$$

Res velja:

$$\sum_{k=0}^{\infty} p_k = e^{-\lambda} \left( \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\lambda^k}{k!} \right) = e^{-\lambda} e^{\lambda} = 1$$

**Zgled.** Število klicev v telefonskem omrežju v minuti.  $n$  je število naročnikov. Recimo, da je  $n = 10^6$  in vsak se z verjetnostjo  $p$  odloči, da bo klical. Ker je  $n$  velik in  $p$  majhen lahko aproksimiramo  $X \sim \text{Bin}(n, p) \approx \text{Poi}(np)$ . Primer je tudi število napočnih črk v časopisu.

◇

5. *Geometrijska porazdelitev*  $\text{geo}(p)$ ,  $p \in (0, 1)$ :

Ponavljamo poskus in opazujemo dogodek  $A$  s  $P(a) = p$ .  $X$  je število potrebnih ponovitev, da se zgodi dogodek  $A$  prvič.

$(X = k)$  je dogodek, da se  $A$  zgodi prvič k  $k$ -ti ponovitvi poskusa:

$$\underbrace{\bar{A}\bar{A}\bar{A}\dots\bar{A}}_{k-1}A$$

$$p_k = P(X = k) = pq^{k-1}, \quad \text{za } k = 1, 2, 3, \dots$$

Res velja:

$$\sum_{k=1}^{\infty} p_k = p \sum_{k=1}^{\infty} q^{k-1} = p \frac{1}{1-q} = 1$$

**Zgled.** Mečemo kocko.  $X$  je število potrebnih metov, da pade šestica prvič.  $X \sim \text{geo}(\frac{1}{6})$ .  $\diamond$

6. *Pascalova oz. nenegativna binomska porazdelitev*  $\text{Pas}(m, p)$ ,  $m \in \mathbb{N}$ ,  $p \in (0, 1)$ :

$X$  je število potrebnih ponovitev poskusa, da se dogodek  $A$  zgodi  $m$ -krat.

$(X = k)$  je dogodek, da se  $A$  zgodi  $m$ -tič v  $k$ -ti ponovitvi.

$$\underbrace{AA\bar{A}\bar{A}\bar{A}\dots\bar{A}A}_{\substack{m-1 \text{ } A \\ k-m \text{ } \bar{A}}}$$

$$p_k = P(X = k) = \binom{k-1}{m-1} p^m q^{k-m}, \quad \text{za } k = m, m+1, m+2, \dots$$

$\sum_{k=m}^{\infty} p_k = 1$  se dokaže računsko z  $(m-1)$ -kratnim odvajanjem vrste  $1 + q + q^2 + \dots = \frac{1}{1-q}$  ali pa direktno z uporabo vrste  $(1-q)^{-m} = \sum_{j=0}^{\infty} \binom{-m}{j} (-q)^j$ .

Geometrijska porazdelitev je poseben primer Pascalove:  $\text{Pas}(1, p) = \text{geo}(p)$

**Zgled.** Mečemo kocko.  $X$  je število potrebnih metov, da šestica pade  $m$  krat.  $X \sim \text{Pas}(m, \frac{1}{6})$ .  $\diamond$

7. *Hipergeometrijska porazdelitev*  $\text{Hip}(n; M, N)$ ,  $n \leq \min\{M, N-M\}$ :

V posodi imamo  $M$  belih in  $(N-M)$  črnih kroglic. Slučajno izvlečemo  $n$  kroglic.  $X$  naj bo število belih kroglic med izvlečenimi:

$$p_k = P(X = k) = \frac{\binom{M}{k} \binom{N-M}{n-k}}{\binom{N}{n}}$$



Ker je  $\{(X = k)\}_{k=0}^n$  popoln sistem dogodkov, je  $\sum_{k=0}^n p_k = 1$ . Torej velja:

$$\sum_{k=0}^n \binom{M}{k} \binom{N-M}{n-k} = \binom{N}{n}$$

Računsko v  $\sum_{k=0}^n p_k$  se privzame:

$$(1+x)^N = (1+x)^M (1+x)^{N-M}$$

Za vsakega od teh faktorjev se uporabi binomski obrazec in se primerja koeficiente pri  $x^n$ :

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^N \binom{N}{k} x^k &= \left( \sum_{i=0}^M \binom{M}{i} x^i \right) \cdot \left( \sum_{j=0}^{N-M} \binom{N-M}{j} x^j \right) \\ &= \sum_i \sum_j \binom{M}{i} \binom{N-M}{j} x^{i+j} \end{aligned}$$

Koeficient pri  $x^n$  na levi je  $\binom{N}{n}$ , na desni pa:

$$\sum_{i+j=n} \binom{M}{i} \binom{N-M}{j} = \sum_{k=0}^m \binom{M}{k} \binom{N-M}{n-k}$$

Tako je vsota res 1.

**Zgled.** V jezeru je  $N$  rib, od tega je  $M$  krapov. Ulovimo  $n$  rib. Naj bo  $X$  število ujetih krapov.  $X \sim \text{Hip}(n; M, N)$ .  $\diamond$

Vzemimo, da je  $n \ll \min\{M, N-M\}$ . Tedaj ne naredimo velike napake, če kroglice vrečamo. Tedaj je  $X \sim \text{Bin}(n, \frac{M}{N})$  oziroma  $p_k = \binom{n}{k} \left(\frac{M}{N}\right)^k \left(\frac{N-M}{N}\right)^{n-k}$  za  $k = 0, 1, \dots, n$ .

## 5.2 Zvezne slučajne spremenljivke

Slučajna spremenljivka  $X$  je *zvezno porazdeljena*, če obstaja nenegativna integrabilna funkcija  $p_X$ , imenovana *gostota verjetnosti*, da za vsak  $x \in \mathbb{R}$  velja:

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x p_X(t) dt$$

*Opomba.* Pogosto se gostota označuje s  $f_X$ .

Tedaj je  $F_X = F$  zvezna funkcija. Toda obstajajo tudi zvezne porazdelitvene funkcije, ki nimajo gostote.

Ker je  $\lim_{x \rightarrow \infty} F(x) = 1$ , je:

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(t) dt = 1$$

Če je  $p$  zvezna v točki  $x$ , potem je  $F$  odvedljiva v  $x$  in velja  $F'(x) = p(x)$ .

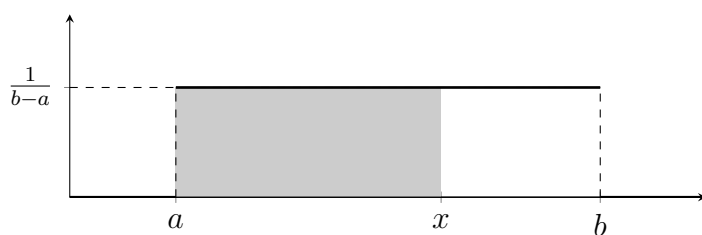
Za vsak  $x \in \mathbb{R}$  velja  $P(X = x) = F(x) - F(x-) = 0$ . Če je  $x_1 \leq x_2$ , je potem:

$$P(x_1 \leq X_1 \leq x_2) = F(x_2) - F(x_1-) = \int_{x_1}^{x_2} p(t) dt$$

**Pomembnejše zvezne porazdelitve:**

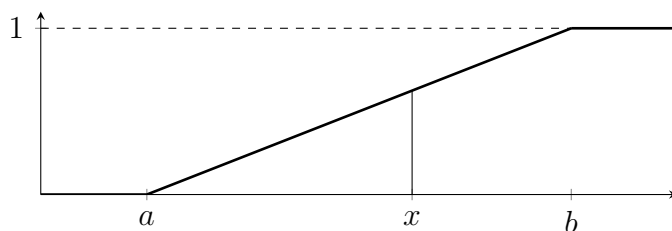
1. *Enakomerna zvezna porazdelitev* na  $[a, b]$ ,  $a < b$ :

$$p(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & ; \text{če } a \leq x \leq b \\ 0 & ; \text{sicer} \end{cases}$$



Slika 5.2:  $p_X(x)$  za enakomerno porazdelitev

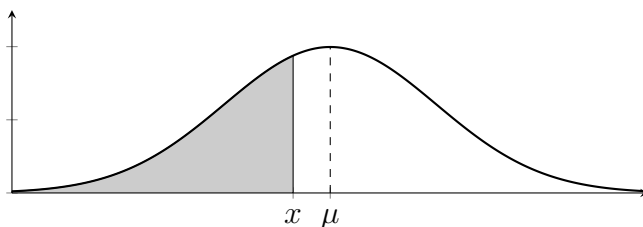
$$F(x) = \int_{-\infty}^x p(t) dt = \begin{cases} 0 & ; \text{če } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & ; \text{če } a \leq x \leq b \\ 1 & ; \text{če } x \geq b \end{cases}$$



Slika 5.3:  $p_X(x)$  za normalno porazdelitev

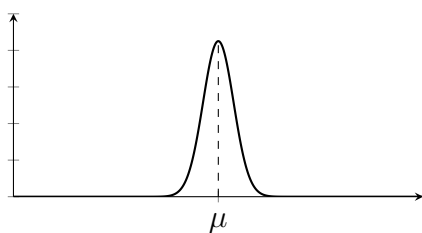
2. Normalna ali Gaussova porazdelitev  $N(\mu, \sigma)$ ,  $\mu \in \mathbb{R}, \sigma > 0$ :

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

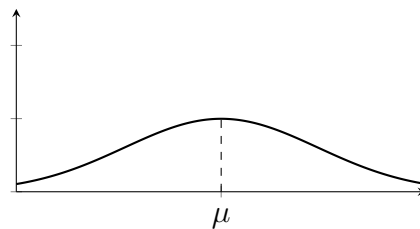


Slika 5.4: Verjetnostni prostor  $\Omega$

Če je  $\sigma$  majhen:



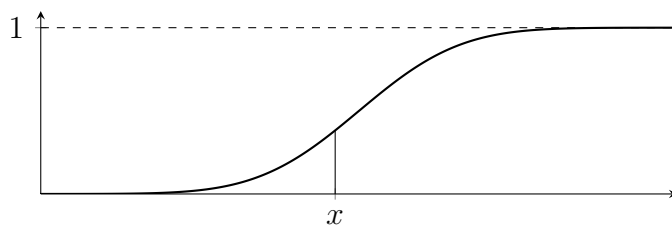
Če je  $\sigma$  velik:



$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt \stackrel{(*)}{=} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{x-\mu}{\sigma}} e^{-\frac{1}{2}s^2} ds = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)$$

Kjer smo v enakosti  $(*)$  uvedli novo spremenljivko  $s = \frac{t-\mu}{\sigma}$ . Tukaj je:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{1}{2}t^2} dt$$



Slika 5.5:  $F_X(x)$  za normalno porazdelitev

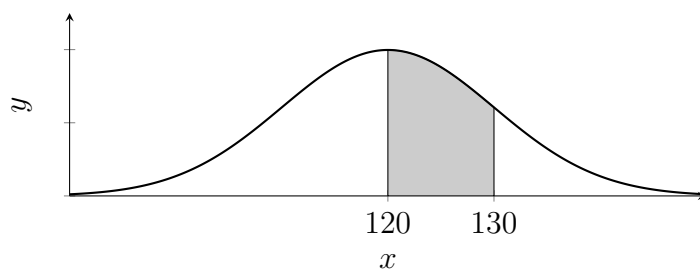
$N(0, 1)$  je *standardna normalna porazdelitev*:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$$

Laplaceova integralska formula pove, da za velike  $n$  velja:

$$\text{Bin}(n, p) \approx N(np, \sqrt{npq})$$

**Zgled.** Sistolični krvni tlak je na populaciji približno normalno porazdeljen:



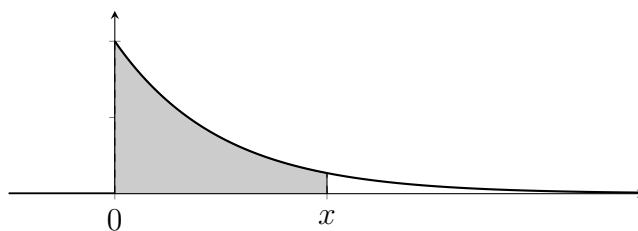
Slika 5.6: Sistolični krvni tlak

Osenčen del je delež ljudi, ki imajo tlak med 120 in 130 mm Hg.

◇

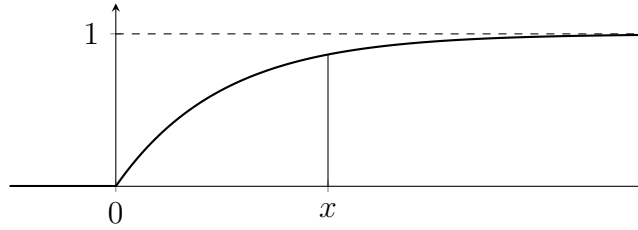
3. *Eksponentna porazdelitev*  $\text{Exp}(\lambda)$ , s parametrom  $\lambda > 0$ :

$$p(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} & ; \text{če } x \geq 0 \\ 0 & ; \text{sicer} \end{cases}$$



Slika 5.7:  $p_X(x)$  za eksponentno porazdelitev

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x} & ; \text{če } x \geq 0 \\ 0, & ; \text{sicer} \end{cases}$$

Slika 5.8:  $F_X(x)$  za eksponentno porazdelitev

**Zgled.** Radioaktivni razpad - potreben čas, da se nekaj zgodi.

◇

4. *Porazdelitev gama* (pomembna v statistiki),  $\Gamma(b, c)$ ,  $b > 0$ ,  $c > 0$ :

$$p(x) = \begin{cases} \frac{c^b}{\Gamma(b)} x^{b-1} e^{-cx} & ; \text{če } x > 0 \\ 0 & ; \text{sicer} \end{cases}$$

Velja:

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = \frac{c^b}{\Gamma(b)} \int_{-\infty}^{\infty} x^{b-1} e^{-cx} dx = \frac{1}{\Gamma(b)} \int_{-\infty}^{\infty} \underbrace{(cx)^{b-1} e^{-cx} d(cx)}_{\Gamma(b)} = 1$$

Gama porazdelitev je poseben primer eksponentne:  $\Gamma(1, \lambda) = \text{Exp}(\lambda)$ .

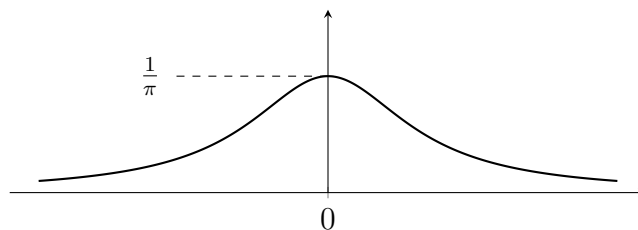
5. *Porazdelitev  $\chi^2(n)$*  (posebna porazdelitev gama),  $n \in \mathbb{N}$  prostorska stopnja:

$$p(x) = \begin{cases} \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma(\frac{n}{2})} x^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{x}{2}} & ; \text{če } x > 0 \\ 0 & ; \text{sicer} \end{cases}$$

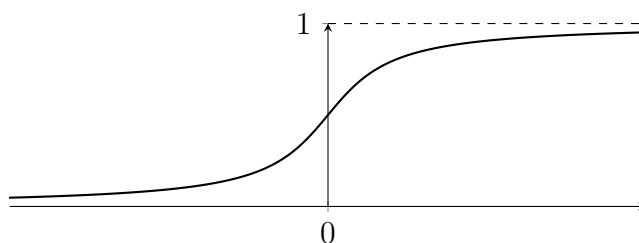
Velja:  $\chi^2(n) = \Gamma\left(\frac{n}{2}, \frac{1}{2}\right)$ .

6. *Cauchyjeva porazdelitev*:

$$p(x) = \frac{1}{\pi(1+x^2)}, \quad \text{za } x \in \mathbb{R}$$

Slika 5.9:  $p_X(x)$  za Cauchyjevo porazdelitev

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{dt}{\pi(1+t^2)} = \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} t \Big|_{-\infty}^x = \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} x + \frac{1}{2}$$



Slika 5.10:  $F_X(x)$  za Cauchyjevo porazdelitev

Imeli smo:

$$P(x_1 \leq X \leq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} p(x) dx \quad \text{oziroma}$$

$$P(X \in [x_1, x_2]) = \int_{[x_1, x_2]} p(t) dt$$

Možno je videti, da to velja za vsako Borelovo množico  $A \subseteq \mathbb{R}$ :

$$P(X \in A) = \int_A p(t) dt$$

Velja, da če je  $A$  dovolj »lepa« množica, recimo števna/končna unija intervalov, je verjetnost, da  $X$  zavzame vrednost v  $A$  ravno ploščina pod  $p(x)$  na množici  $A$ .

**Zgled.** Primer slučajne spremenljivke, ki ni niti diskretno niti zvezno porazdeljena. Vržemo pošten kovanec. Če pade grb, postavimo  $X = 1$ . Če pa pade cifra, naj bo  $X$  slučajno izbrano število na intervalu  $[0, 2]$ .

Izračunajmo  $F(x) = P(X \leq x)$ :

1. Če je  $x < 0$ , je  $F(x) = 0$ . Če je  $x > 2$ , je  $F(x) = 1$ .

2. Vzemimo, da je  $0 \leq x \leq 2$ . Potem je:

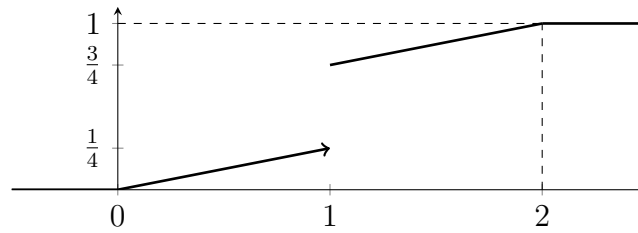
$$F(x) = P(\text{grb}) \cdot P(X \leq x \mid \text{grb}) + P(\text{cifra}) \cdot P(X \leq x \mid \text{cifra})$$

$$\text{Če je } x < 1, \text{ je } F(x) = \frac{1}{2} \cdot \frac{x}{2} = \frac{x}{4}.$$

$$\text{Če je } x \geq 1, \text{ je } F(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{x}{2} = \frac{1}{2} + \frac{x}{4}.$$

Torej je:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & ; \text{ če } x < 0 \\ \frac{x}{4} & ; \text{ če } 0 \leq x < 1 \\ \frac{1}{2} + \frac{x}{4} & ; \text{ če } 1 \leq x \leq 2 \\ 1 & ; \text{ če } x > 2 \end{cases}$$



Slika 5.11: Porazdelitvena funkcija  $F_X(x)$

Ker  $F$  ni zvezna,  $X$  ni zvezno porazdeljena. Ker  $F$  ni odsekoma konstantna,  $X$  ni diskretno porazdeljena.  $\diamond$





# Poglavje 6

## Slučajni vektorji in neodvisnost

### 6.1 Slučajni vektorji

**Definicija 6.** *Slučajni vektor* je  $n$ -terica slučajnih spremenljivk  $X = (X_1, \dots, X_n)$ , to je preslikava  $X : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$  z lastnostjo, da je množica:

$$(X_1 \leq x_1, \dots, X_n \leq x_n) := \{\omega \in \Omega : X_1(\omega) \leq x_1, \dots, X_n(\omega) \leq x_n\}$$

dogodek, za vsako  $n$ -terico  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$ .

**Definicija 7.** *Porazdelitvena funkcija*  $F_X : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  je definirana s:

$$F_X(x) \equiv F_{(X_1, \dots, X_n)}(x_1, \dots, x_n) = P(X_1 \leq x_1, \dots, X_n \leq x_n)$$

Za vsak  $x \in \mathbb{R}^n$  je  $F(x) \in [0, 1]$ .

Glede na vsako spremenljivko je  $F$  naraščujoča in z desne zvezna:

$$\begin{aligned} \lim_{x_i \rightarrow \infty \forall i} F(x_1, \dots, x_n) &= 1 \\ \lim_{x_i \rightarrow -\infty} F(x_1, \dots, x_n) &= 0 \end{aligned}$$

Če pošljemo proti  $\infty$  samo nekatere spremenljivke, dobimo porazdelitvene funkcije podvektorjev, na primer:

$$\begin{aligned} \lim_{x_n \rightarrow \infty} F_{(X_1, \dots, X_n)}(x_1, \dots, x_n) &= F_{(X_1, \dots, X_{n-1})}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}) \\ \lim_{x_2 \rightarrow \infty} F_{(X_1, \dots, X_n)}(x_1, x_2, \dots, x_n) &= F_{X_1}(x_1) \\ &\vdots \\ \lim_{x_n \rightarrow \infty} F_{(X_1, \dots, X_n)}(x_1, x_2, \dots, x_n) &= F_{X_1}(x_1) \end{aligned}$$

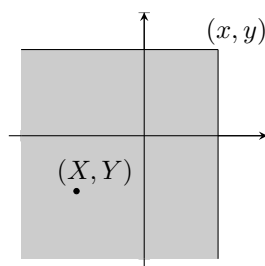
Take porazdelitvene funkcije za  $X_i$  imenujemo tudi, *robne* (marginalne) *porazdelitve*.

Oglejmo si dvorazsežen primer ( $n = 2$ ):

$$\begin{aligned}(X, Y) : \Omega &\rightarrow \mathbb{R}^2 \\ \omega &\mapsto (X(\omega), Y(\omega))\end{aligned}$$

Porazdelitvena funkcija je:

$$F_{(X,Y)}(x, y) = P(X \leq x, Y \leq y)$$



Slika 6.1: Verjetnost, da zavzamemo vrednost znotraj tega kvadrata

Robni porazdelitvi sta:

$$F_X(x) = \lim_{y \rightarrow \infty} F_{(X,Y)}(x, y)$$

$$F_Y(y) = \lim_{x \rightarrow \infty} F_{(X,Y)}(x, y)$$

Izpeljimo analog formule  $P(x_1 < X \leq x_2) = F(x_2) - F(x_1)$ , t.j. s pomočjo porazdelitvene funkcije  $F_{(X,Y)} = F$  izračunajmo verjetnost:

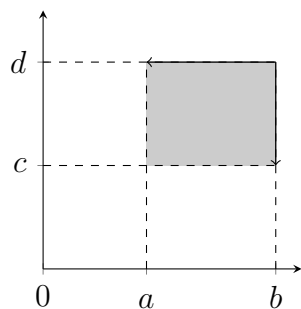
$$P(a < X \leq b, c < Y \leq d)$$

Najprej si oglejmo:

$$\begin{aligned}P(a < X \leq b, Y \leq d) &= P((X \leq b, Y \leq d) \setminus (X \leq a, Y \leq d)) \\ &= P(X \leq b, Y \leq d) - P(X \leq a, Y \leq d) \\ &= F(b, d) - F(a, d)\end{aligned}$$

V splošnem primeru:

$$\begin{aligned}P(a < X \leq b, c < Y \leq d) &= P(a < X \leq b, Y \leq d) - P(a < X \leq b, Y \leq c) \\ &= F(b, d) - F(a, d) - (F(b, c) - F(a, c)) \\ &= F(b, d) - F(a, d) - F(b, c) + F(a, c)\end{aligned}$$

Slika 6.2:  $P(a < X \leq b, c < Y \leq d)$ 

Omejimo se na diskretne porazdelitve:

Zaloga vrednosti slučajnih vektorjev  $X = (X_1, \dots, X_n)$  je največ števna množica v  $\mathbb{R}^n$ . Verjetnostno funkcijo definiramo s:

$$p_{k_1, k_2, \dots, k_n} = P(X_1 = x_{k_1}, X_2 = x_{k_2}, \dots, X_n = x_{k_n}) \geq 0 \quad \text{in} \quad \sum_{k_1, \dots, k_n} p_{k_1, \dots, k_n} = 1$$

Omejimo se na  $n = 2$ :  $(X, Y) : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^2$  z največ števno zalogo vrednosti. Naj bo  $\{x_1, x_2, \dots\}$  zaloga vrednosti za  $X$ ,  $\{y_1, y_2, \dots\}$  pa zaloga vrednosti za  $Y$ . Očitno je zaloga vrednosti  $(X, Y)$  vsbovana v množica:

$$\{(x_i, y_j) : i = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots\}$$

Verjetnostna funkcija:

$$p_{ij} := P(X = x_i, Y = y_j) \quad \text{za} \quad i = 1, 2, \dots \quad \text{in} \quad j = 1, 2, \dots$$

$X \setminus Y$	$y_1$	$y_2$	$\cdots$	$y_n$	$X$
$x_1$	$p_{11}$	$p_{12}$	$\cdots$	$p_{1n}$	$p_1$
$x_2$	$p_{21}$	$p_{22}$	$\cdots$	$p_{2n}$	$p_2$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\vdots$
$x_m$	$p_{m1}$	$p_{m2}$	$\cdots$	$p_{mn}$	$p_m$
$Y$	$q_1$	$q_2$	$\cdots$	$q_n$	1

$$p_i = P(X = x_i) = \sum_j P(X = x_i, Y = y_j) = \sum_j p_{ij}$$

$$q_j = P(Y = y_j) = \sum_i p_{ij}$$

**Zgled.** Met dveh kock:

$X \setminus Y$	1	2	...	6	$X$
1	$\frac{1}{36}$	$\frac{1}{36}$	...	$\frac{1}{36}$	$\frac{1}{6}$
2	$\frac{1}{36}$	$\frac{1}{36}$	...	$\frac{1}{36}$	$\frac{1}{6}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\vdots$
6	$\frac{1}{36}$	$\frac{1}{36}$	...	$\frac{1}{36}$	$\frac{1}{6}$
$Y$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	...	$\frac{1}{6}$	1

◇

## 6.2 Neodvisnost

Slučajne spremenljivke  $X_1, X_2, \dots, X_n$  so *neodvisne*, če velja:

$$F_{(X_1, X_2, \dots, X_n)}(x_1, x_2, \dots, x_n) = F_{X_1}(x_1) \cdot F_{X_2}(x_2) \cdots F_{X_n}(x_n)$$

za vse  $(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$ , torej dogodki  $(X_1 \leq x_1), (X_2 \leq x_2), \dots, (X_n \leq x_n)$  so neodvisni.

**Trditev 2.** Naj bo  $(X, Y)$  diskretno porazdeljen slučajni vektor. Naj bo  $p_{ij} = P(X = x_i, Y = y_j)$ ,  $p_i = P(X = x_i)$ ,  $q_j = P(Y = y_j)$  za  $i = 1, 2, \dots$ ,  $j = 1, 2, \dots$ . Potem sta  $X$  in  $Y$  neodvisni slučajni spremenljivki  $\iff p_{ij} = p_i \cdot q_j \quad \forall i, \forall j$ .

*Dokaz.*

$(\implies)$ :

$$\begin{aligned}
 p_{ij} &= \lim_{h \rightarrow 0+} P(x_i - h < X \leq x_i, y_j - h < Y \leq y_j) \\
 &= \lim_{h \rightarrow 0} (F(x_i, y_j) - F(x_i - h, y_j) - F(x_i, y_j - h) + F(x_i - h, y_j - h)) \\
 &= \lim_{h \rightarrow 0} (F_X(x_i) \cdot F_Y(y_j) - F_X(x_i - h) \cdot F_Y(y_j) - F_X(x_i) \cdot F_Y(y_j - h) + \\
 &\quad + F_X(x_i - h) \cdot F_Y(y_j - h)) \\
 &= \lim_{h \rightarrow 0} (F_X(x_i) - F_X(x_i - h)) \cdot (F_Y(y_j) - F_Y(y_j - h)) \\
 &= P(X = x_i) \cdot P(Y = y_j) \\
 &= p_i \cdot q_j
 \end{aligned}$$

Kjer smo v vrstici  $(\star)$  uporabili neodvisnost.

( $\Leftarrow$ ):

$$\begin{aligned} F_{(X,Y)}(x,y) &= \sum_{\{i,j:x_i \leq x_1, y_j \leq y\}} p_{ij} \\ &= \sum_{\{i,j:x_i \leq x, y_j \leq y\}} p_i \cdot p_j \\ &= \left( \sum_{\{i:x_i \leq x\}} p_i \right) \cdot \left( \sum_{\{j:y_j \leq y\}} q_j \right) \\ &= P(X \leq x) \cdot P(Y \leq y) \\ &= F_X(x) \cdot F_Y(y) \end{aligned}$$

□



## Poglavje 7

# Matematično upanje oz. pričakovana vrednost

**Definicija 8.** Za končno slučajno spremenljivko  $X : \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ p_1 & p_2 & \cdots & p_n \end{pmatrix}$  je *matematično upanje* definirano kot:

$$E(X) := \sum_{k=1}^n x_k p_k$$

Tako je v primeru  $p_1 = p_2 = \cdots = p_n = \frac{1}{n}$  matematično upanje enako povprečni vrednosti:  $E(X) = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n}$ .

Naj ima sedaj  $X$  neskončno zalogo vrednosti.

**Definicija 9.** Če je  $X$  diskretna slučajna spremenljivka, s  $p_k = P(X = x_k)$  za  $k \in \mathbb{N}$ , potem ima  $X$  matematično upanje, če je:<sup>1</sup>

$$\sum_{k=1}^{\infty} |x_k| p_k < \infty$$

Tedaj je *matematično upanje* definirano kot vsota vrste:

$$E(X) := \sum_{k=1}^{\infty} x_k p_k$$

---

<sup>1</sup>Absolutno konvergenco zahtevamo zato, ker če vrsta konvergira le pogojno, potem lahko zamenjamo vrstni red členov in se vsota spremeni. To pri slučajnih spremenljivkah lahko vedno počnemo, saj slučajna spremenljivka ostaja enaka. Definicija matematičnega upanja tedaj ne bi bila enolična.

**Definicija 10.** Če je  $X$  zvezna slučajna spremenljivka, z gostoto  $p(x)$ , ima  $X$  matematično upanje, če je:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x|p(x) dx < \infty$$

Tedaj je *matematično upanje* definirano kot:

$$E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x p(x) dx$$

**Zgled.**

1.  $X \sim \text{Ber}(p), p > 0, X : \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ q & p \end{pmatrix} : E(X) = 0 \cdot q + 1 \cdot p = p$
2. *Izrojena* ali *degenerirana* slučajna spremenljivka  $\exists x_0 \in \mathbb{R} : P(X = x_0) = 1$ ,  
t.j.:  $X : \begin{pmatrix} x_0 \\ 1 \end{pmatrix} : E(X) = x_0 \cdot 1 = x_0$
3.  $X \sim \text{Poi}(\lambda), \lambda > 0, p_k = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}$  in  $x_k = k$ , za  $k = 0, 1, 2, \dots$ :

$$\begin{aligned} E(X) &= \sum_{k=0}^{\infty} x_k p_k \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} k \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} \\ &= e^{-\lambda} \lambda \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\lambda^{k-1}}{(k-1)!} \\ &= e^{-\lambda} \lambda e^{\lambda} = \lambda \end{aligned}$$

4. Enakomerna zvezna porazdelitev na  $[a, b]$ :

$$\begin{aligned} E(X) &= \int_{-\infty}^{\infty} x p(x) dx \\ &= \int_a^b x \frac{1}{b-a} dx \\ &= \frac{1}{b-a} \int_a^b x dx \\ &= \frac{1}{b-a} \frac{x^2}{2} \Big|_a^b \\ &= \frac{b^2 - a^2}{(b-a) \cdot 2} \\ &= \frac{a+b}{2} \end{aligned}$$



5.  $X \sim N(0, 1)$ ,  $p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$ :

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} |x| p(x) dx &= \int_{-\infty}^{\infty} |x| e^{-\frac{x^2}{2}} dx \\ &= 2 \int_0^{\infty} x e^{-\frac{x^2}{2}} dx \\ &= 2 \int_0^{\infty} e^{-u} du \\ &= 2 \left( -e^{-u} \right) \Big|_0^{\infty} = 2 < \infty \end{aligned} \quad (\star)$$

$\Rightarrow$   $X$  ima matematično upanje. V vrstici  $(\star)$  smo vpeljali novo spremenljivko  $u = \frac{x^2}{2}$ .

$$E(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x e^{-\frac{x^2}{2}} dt \stackrel{\text{liha}}{=} 0$$

6. Cauchyjeva porazdelitev,  $p(x) = \frac{1}{\pi(1+x^2)}$ :

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x| \frac{1}{\pi(1+x^2)} dx = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{x}{1+x^2} dx = \frac{1}{\pi} \ln(1+x^2) \Big|_0^{\infty} = \infty$$

$\Rightarrow$   $X$  nima matematičnega upanja.

7.  $1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \frac{1}{5} - \dots$  je pogojno konvergentna vrsta. Če vzamemo:

$$x_k p_k = \frac{(-1)^{k+1}}{k}, \quad \text{za } k = 1, 2, \dots$$

$$p_k = 2^{-k} = \frac{1}{2^k}, \quad \sum_{k=1}^{\infty} p_k = 1, \quad x_k = \frac{(-1)^{k+1}}{k} 2^k$$

$X$  nima matematičnega upanja, ker vrsta ne konvergira absolutno.

◇

**Trditev 3.** Naj bo  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  funkcija:

(a) Če je  $X : \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \cdots \\ p_1 & p_2 & p_3 & \cdots \end{pmatrix}$ , potem je:

$$E(f \circ X) = \sum_k f(x_k) p_k$$

če matematično upanje obstaja, t.j. vrsta absolutno konvergira.

(b) Če je  $X$  zvezno porazdeljena z gostoto  $p(x)$ , potem je:

$$E(f \circ X) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) p(x) dx$$

če je integral absolutno konvergenten.

*Dokaz.* (samo (a))<sup>2</sup>

$$f \circ X \equiv f(X) : \begin{pmatrix} f(x_1) & f(x_2) & f(x_3) & \cdots \\ p_1 & p_2 & p_3 & \cdots \end{pmatrix}$$

$$E(f \circ X) = \sum_h f(x_k) p_k$$

□

**Posledica 1.** *Slučajna spremenljivka  $X$  ima matematično upanje  $\iff |X|$  ima matematično upanje. Tedaj velja:*

$$|E(X)| \leq E(|X|)$$

*Dokaz.*

$$|E(X)| = \left| \sum_k x_k p_k \right| \leq \sum_k |x_k| p_k = E(|X|)$$

□

**Posledica 2.** *Za  $a \in \mathbb{R}$  in slučajno spremenljivko  $X$  z matematičnim upanjem velja:*

$$E(a \cdot X) = a \cdot E(X)$$

*Torej je upanje homogeno.*

*Dokaz.* Vzamemo:

$$f(x) = a \cdot x$$

□

Podobno kot zadnjo trditev se dokaže:

**Trditev 4.** *Naj bo  $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$  funkcija,  $(X, Y)$  pa diskretno porazdeljen slučajni vektor:*

$$p_{ij} = P(X = x_i, Y = y_j), \quad \text{za } i, j = 1, 2, \dots$$

*Potem je  $f(X, Y) : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  slučajna spremenljivka in velja:*

$$E(f(X, Y)) = \sum_i \sum_j f(x_i, y_j) p_{ij}$$

*če vrsta absolutno konvergira.*

---

<sup>2</sup>V definiciji matematičnega upanja dopuščamo, da v  $\{f(x_k)\}_k$  niso sama različna števila.

**Trditev 5.** Če imata  $X$  in  $Y$  matematično upanje, ga ima tudi  $X + Y$  in velja:

$$E(X + Y) = E(X) + E(Y)$$

Torej je upanje aditivno.

*Dokaz.* (samo diskreten primer)

$$\begin{aligned} E(X + Y) &= \sum_i \sum_j (x_i + y_j) p_{ij} \\ &= \sum_i x_i \sum_j p_{ij} + \sum_j y_j \sum_i p_{ij} \\ &= \sum_i x_i p_i + \sum_j y_j q_j \\ &= E(X) + E(Y) \end{aligned}$$

□

**Posledica 3.** Za slučajne spremenljivke  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , ki imajo matematično upanje, velja:

$$E(a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n) = a_1 E(X_1) + a_2 E(X_2) + \dots + a_n E(X_n)$$

kjer so  $a_1, a_2, \dots, a_n \in \mathbb{R}$ .

**Zgled.**

1. Naj ima  $X$  matematično upanje. Potem je:

$$E(X - E(X)) = E(X) - \underbrace{E(E(X))}_{\text{konst.}} = E(X) - E(X) = 0$$

2.  $X_k \sim \text{Ber}(p)$ , torej  $X_k : \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1-p & p \end{pmatrix}$  za  $k = 1, 2, \dots$   $X := X_1 + \dots + X_n$ :

$$E(X) = E(X_1) + \dots + E(X_n) = np$$

Posebej: imejmo Bernoullijevo zaporedje neodvisnih ponovitev poskusa  $A$ ,  $P(A) = p$ .  $X_k : \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1-p & p \end{pmatrix}$  in  $(X_k = 1)$ , če se dogodek  $A$  zgodi v  $k$ -ti ponovitvi poskusa. Potem je  $X = X_1 + \dots + X_n$  frekvenca dogodka  $A$  v  $n$  ponovitvah. Tedaj je  $X \sim \text{Bin}(n, p)$ .

Torej je  $E(X) = np$ . To se lahko vidi tudi direktno:

$$\begin{aligned} E(X) &= \sum_{k=0}^n k \binom{n}{k} p^k q^{n-k} \\ &= \sum_{k=1}^n k \frac{n}{k} \binom{n-1}{k-1} p^k q^{n-k} \\ &= np \sum_{k=1}^n \binom{n-1}{k-1} p^{k-1} q^{n-k} \\ &= np(p+q)^{n-1} \\ &= np \end{aligned}$$

◇

**Zgled.**  $X \sim N(\mu, \sigma)$ ,  $\mu \in \mathbb{R}$ ,  $\sigma > 0$ :

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Na vajah boste pokazali:  $Y = \frac{X-\mu}{\sigma} \sim N(0, 1)$ . Ker je  $E(Y) = 0$ , je:

$$E(X) = E(\sigma Y + \mu) = \sigma E(Y) + \mu = \mu$$

◇

**Trditev 6.** Če obstajata  $E(X^2)$  in  $E(Y^2)$ , potem obstaja tudi  $E(|XY|)$  in velja:

$$E(|XY|) \leq \sqrt{E(X^2) E(Y^2)}$$

To je Cauchy-Schwarzova neenakost. Enakost velja  $\iff$

$$|Y| = \sqrt{\frac{E(Y^2)}{E(X^2)}} |X| \quad \text{z verjetnostjo 1.}$$

*Dokaz.* Za poljubni nenegativni števili  $u$  in  $v$  velja:

$$uv \leq \frac{1}{2}(u^2 + v^2) \quad \left( \iff (u-v)^2 \geq 0 \right)$$

Torej za nenegativni slučajni spremenljivki  $U$  in  $V$  velja:

$$UV \leq \frac{1}{2}(U^2 + V^2)$$

kjer velja enačaja, le za  $\omega \in \Omega$ , v katerih je  $U(\omega) = V(\omega)$ .

Če vstavimo  $U = a|X|$  in  $V = \frac{1}{a}|Y|$  za  $a > 0$ , dobimo neenakost:

$$|XY| \leq \frac{1}{2} \left( a^2 X^2 + \frac{1}{a^2} Y^2 \right)$$

in zato:

$$E(|XY|) \leq \frac{1}{2} \left( a^2 E(X^2) + \frac{1}{a^2} E(Y^2) \right)$$

Če vstavimo  $a^2 = \sqrt{\frac{E(Y^2)}{E(X^2)}}$ , je desna stran enaka:

$$\frac{1}{2} \left( \sqrt{\frac{E(Y^2)}{E(X^2)}} E(X^2) + \sqrt{\frac{E(X^2)}{E(Y^2)}} E(Y^2) \right) = \sqrt{E(X^2) E(Y^2)}$$

torej je:

$$E(|XY|) \leq \sqrt{E(X^2) E(Y^2)}$$

Enačaj velja, če je  $a|X| = \frac{1}{a}|Y|$ , torej je:

$$|Y| = a^2 |X| = \sqrt{\frac{E(Y^2)}{E(X^2)}} |X|$$

□

**Posledica 4.** Če obstaja  $E(X^2)$ , potem obstaja tudi  $E(|X|)$  in velja:

$$(E(|X|))^2 \leq E(X^2)$$

*Dokaz.* Vzamemo  $Y \equiv 1$ .

□

**Trditev 7.** Naj bosta  $X$  in  $Y$  neodvisni slučajni spremenljivki, ki imata matematično upanje. Potem obstaja tudi matematično upanje za  $XY$  in velja:

$$E(XY) = E(X)E(Y)$$

*Dokaz.* (samo diskreten primer) Po trditvi, kjer je  $p_{ij} = P(X = x_i, Y = y_j)$  dobimo:

$$E(XY) = \sum_i \sum_j x_i y_j p_{ij}$$

Zaradi neodvisnosti je  $p_{ij} = p_i q_j$ , kjer je  $p_i = P(X = x_i)$  in  $q_j = P(Y = y_j)$ . Torej je:

$$E(XY) = \sum_i \sum_j x_i y_j p_i q_j = \left( \sum_i x_i p_i \right) \left( \sum_j y_j q_j \right) = E(X)E(Y)$$

□

**Definicija 11.** Če za  $X$  in  $Y$  velja  $E(XY) = E(X)E(Y)$ , potem sta  $X$  in  $Y$  *nekorelirani* slučajni spremenljivki. Sicer sta *korelirani*.

Po trditvi iz neodvisnosti sledi nekoreliranost. Obrat ne velja.

**Zgled.**

$$U : \begin{pmatrix} 0 & \frac{\pi}{2} & \pi \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{pmatrix}$$

$$X = \sin U : \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \end{pmatrix}$$

$$Y = \cos U : \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{pmatrix}$$

Velja:

$$XY = \sin U \cdot \cos U \equiv 0 \Rightarrow E(XY) = 0$$

$$E(X) = \frac{1}{3}, \quad E(Y) = -\frac{1}{3} + 0 + \frac{1}{3} = 0$$

$\Rightarrow X, Y$  sta nekorelirani.

Poglejmo še neodvisnost:

$X \setminus Y$	-1	0	1	$Y$
0	$\frac{1}{3}$	0	$\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$
1	0	$\frac{1}{3}$	0	$\frac{1}{3}$
$X$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	1

$X, Y$  sta odvisni slučajni spremenljivki.

◇

**Domača naloga:** Za:

$$X : \begin{pmatrix} x_1 & x_2 \\ p_1 & p_2 \end{pmatrix}, \quad Y : \begin{pmatrix} y_1 & y_2 \\ q_1 & q_2 \end{pmatrix}$$

dokaži:  $X$  in  $Y$  sta nekorelirani  $\iff$  neodvisni.

## Poglavje 8

# Disperzija, kovarianca in korelacijski koeficient

### 8.1 Disperzija in standardni odklon

**Definicija 12.** Naj obstaja  $E(X^2)$ . *Disperzija* oz. *varianca* je definirana kot:

$$D(X) \equiv \text{Var}(X) := E\left((X - E(X))^2\right)$$

$D(X)$  meri razpršenost okoli  $E(X)$ . Velja tudi:

$$\begin{aligned} E\left((X - E(X))^2\right) &= E\left(X^2 - 2E(X)X + (E(X))^2\right) \\ &= E\left(X^2\right) - 2E(X)E(X) + (E(X))^2 \\ &= E\left(X^2\right) - (E(X))^2 \end{aligned}$$

Zato je:

$$D(X) = E\left(X^2\right) - (E(X))^2$$

**Lastnosti  $D(X)$ :**

1.  $D(X) \geq 0$  in  $D(X) = 0 \iff P(X = E(X)) = 1$ , t.j.:  $X : \begin{pmatrix} E(X) \\ 1 \end{pmatrix}$ .
2.  $D(aX) = a^2 D(X)$  za  $a \in \mathbb{R}$ .
3. Za vsak  $a \in \mathbb{R}$  je  $E((X - a)^2) \geq D(X)$ . Enačaj velja  $\iff a = E(X)$ .

*Dokaz.*

$$\begin{aligned}
 E((X - a)^2) &= E(X^2 - 2aX + a^2) \\
 &= E(X^2) - 2aE(X) + a^2 \\
 &= (a - E(X))^2 - (E(X))^2 + E(X^2) \\
 &= (a - E(X))^2 + D(X) \geq D(X)
 \end{aligned}$$

□

**Definicija 13.** *Standardna deviacija oz. standardni odklon* je definirana kot:

$$\sigma(X) := \sqrt{D(X)}$$

Zanjo velja  $\sigma(aX) = |a| \sigma(X)$  za  $a \in \mathbb{R}$ .

**Pregled nakaterih  $E(X)$  in  $D(X)$ :**

1. Enakomerna diskretna porazdelitev,  $X : \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ \frac{1}{n} & \frac{1}{n} & \cdots & \frac{1}{n} \end{pmatrix}$ :

$$E(X) = \frac{x_1 + \cdots + x_n}{n}, \quad D(X) = \frac{x_1^2 + \cdots + x_n^2}{n} - \left( \frac{x_1 + \cdots + x_n}{n} \right)^2$$

2. Bernoullijeva porazdelitev,  $\text{Ber}(p)$ :  $E(X) = p, \quad D(X) = pq$

*Dokaz.*

$$\begin{aligned}
 E(X) &= 0 \cdot q + 1 \cdot p = p & E(X^2) &= 0^2 \cdot q + 1^2 \cdot p = p \\
 \implies D(X) &= E(X^2) - (E(X))^2 = p - p^2 = pq
 \end{aligned}$$

□

3. Binomska porazdelitev,  $\text{Bin}(n, p)$ :  $E(X) = np, \quad D(X) = npq$

*Dokaz.*

$$\begin{aligned}
 E(X) &= \sum_{k=0}^n k \binom{n}{k} p^k q^{n-k} \\
 &= \sum_{k=1}^n k \frac{n}{k} \binom{n-1}{k-1} p^k q^{n-k} \\
 &= np \sum_{k=1}^n \binom{n-1}{k-1} p^{k-1} q^{n-k} \\
 &= np(p + q)^{n-1} \\
 &= np
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
E(X^2) &= \sum_{k=0}^n k^2 \binom{n}{k} p^k q^{n-k} \\
&= \sum_{k=0}^n kn \binom{n-1}{k-1} p^k q^{n-k} \\
&= np \sum_{k=1}^n k \binom{n-1}{k-1} p^{k-1} q^{(n-1)-(k-1)} \\
&= np \sum_{j=0}^m (j+1) \binom{m}{j} p^j q^{m-j} \\
&= np \left( \sum_{j=0}^m j \binom{m}{j} p^j q^{m-j} + \sum_{j=0}^m \binom{m}{j} p^j q^{m-j} \right) \\
&= np \left( \sum_{j=0}^m m \binom{m-1}{j-1} p^j q^{m-j} + \sum_{j=0}^m \binom{m}{j} p^j q^{m-j} \right) \\
&= np \left( (n-1)p \sum_{j=1}^m \binom{m-1}{j-1} p^{j-1} q^{(m-1)-(j-1)} + \sum_{j=0}^m \binom{m}{j} p^j q^{m-j} \right) \\
&= np \left( (n-1)p(p+q)^{m-1} + (p+q)^m \right) \\
&= np((n-1)p+1) \\
&= n^2 p^2 + np(1-p)
\end{aligned}$$

$$\implies D(X) = E(X^2) - (E(X))^2 = n^2 p^2 + np(1-p) - (np)^2 = npq \quad \square$$

4. Poissonova porazdelitev,  $\text{Poi}(\lambda)$ :  $E(X) = D(X) = \lambda$

*Dokaz.*

$$\begin{aligned}
E(X^2) &= \sum_{k=0}^{\infty} k^2 \frac{1}{k!} \lambda^k e^{-\lambda} \\
&= \lambda e^{-\lambda} \sum_{k=1}^{\infty} k \frac{1}{(k-1)!} \lambda^{k-1} \\
&= \lambda e^{-\lambda} \left( \sum_{k=1}^{\infty} (k-1) \frac{1}{(k-1)!} \lambda^{k-1} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(k-1)!} \lambda^{k-1} \right) \\
&= \lambda e^{-\lambda} \left( \lambda \sum_{k=2}^{\infty} \frac{1}{(k-2)!} \lambda^{k-2} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(k-1)!} \lambda^{k-1} \right) \\
&= \lambda e^{-\lambda} \left( \lambda \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{i!} \lambda^i + \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{j!} \lambda^j \right) \\
&= \lambda e^{-\lambda} (\lambda e^{\lambda} + e^{\lambda}) \\
&= \lambda(\lambda + 1)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E(X) &= \sum_{k=0}^{\infty} x_k p_k \\
&= \sum_{k=0}^{\infty} k \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} \\
&= e^{-\lambda} \lambda \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\lambda^{k-1}}{(k-1)!} \\
&= e^{-\lambda} \lambda e^{\lambda} = \lambda
\end{aligned}$$

$$\implies D(X) = E(X^2) - (E(X))^2 = \lambda(\lambda + 1) - (\lambda)^2 = \lambda$$

□

5. Geometrijska porazdelitev,  $\text{geo}(p)$ :  $E(X) = \frac{1}{p}$ ,  $D(x) = \frac{q}{p^2}$

*Dokaz.*

$$\begin{aligned}
E(X) &= \sum_{k=1}^{\infty} k p q^{k-1} \\
&= p \sum_{k=1}^{\infty} k q^{k-1} \\
&= p \left( \sum_{k=0}^{\infty} q^k \right)' \\
&= p \left( \frac{1}{1-q} \right)' \\
&= p \frac{1}{(1-q)^2} = \frac{1}{p}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E(X(X+1)) &= \sum_{k=1}^{\infty} k(k+1) p q^{k-1} \\
&= p \sum_{k=1}^{\infty} (k+1) k q^{k-1} \\
&= p \left( \sum_{k=-1}^{\infty} q^{k+1} \right)'' \\
&= p \left( \frac{1}{1-q} \right)'' \\
&= p \left( \frac{1}{(1-q)^2} \right)' \\
&= p \frac{2}{(1-q)^3} = \frac{2}{p^2}
\end{aligned}$$

$$\implies D(X) = E(X(X+1)) - E(X) - (E(X))^2 = \frac{2}{p^2} - \frac{1}{p} - \frac{1}{p^2} = \frac{1}{p^2} - \frac{1}{p} = \frac{q}{p^2} \quad \square$$

6. Pascalova porazdelitev,  $\text{Pas}(m, p)$ :  $E(X) = \frac{m}{p}$ ,  $D(X) = \frac{mq}{p^2}$

7. Hipergeometrijska porazdelitev,  $\text{Hip}(n; M, N)$ :

$$E(X) = n \frac{M}{N}, \quad D(X) = n \frac{M}{N} \frac{N-M}{N} \frac{N-n}{N-1}$$

8. Enakomerna zvezna porazdelitev na  $[a, b]$ :  $E(X) = \frac{a+b}{2}$ ,  $D(X) = \frac{(b-a)^2}{12}$

*Dokaz.*

$$\begin{aligned} E(X) &= \int_{-\infty}^{\infty} xp(x)dx \\ &= \int_a^b x \frac{1}{b-a} dx \\ &= \frac{1}{b-a} \int_a^b x dx \\ &= \frac{1}{b-a} \left. \frac{x^2}{2} \right|_a^b \\ &= \frac{b^2 - a^2}{(b-a) \cdot 2} \\ &= \frac{a+b}{2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E(X^2) &= \int_{-\infty}^{\infty} x^2 p(x) dx \\ &= \int_a^b x^2 \frac{1}{b-a} dx \\ &= \frac{1}{b-a} \int_a^b x^2 dx \\ &= \frac{1}{b-a} \left. \frac{x^3}{3} \right|_a^b \\ &= \frac{b^3 - a^3}{(b-a) \cdot 3} \\ &= \frac{4(b-a)(a^2 + ab + b^2)}{12(b-a)} \\ &= \frac{4a^2 + 4ab + 4b^2}{12} \end{aligned}$$

$$\implies D(X) = E(X^2) - (E(X))^2 = \frac{4a^2 + 4ab + 4b^2}{12} - \frac{(a+b)^2}{2^2} = \frac{b^2 - 2ab + a^2}{12} = \frac{(b-a)^2}{12} \quad \square$$

9. Normalna porazdelitev,  $N(\mu, \sigma)$ :  $E(X) = \mu$ ,  $D(X) = \sigma^2$ ,  $\sigma(x) = \sigma$

*Dokaz.*

$$\begin{aligned}
 E(X) &= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} (\sigma t + \mu) e^{-\frac{1}{2}t^2} dt \\
 &= \frac{\mu}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}t^2} dt + \underbrace{0}_{\text{liha fun.}} = \mu
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D(X) &= E\left((X - E(X))^2\right) \\
 &= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \sigma^2 t^2 e^{-\frac{1}{2}t^2} dt \\
 &= \frac{\sigma^2}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} t^2 e^{-\frac{t^2}{2}} dt \\
 &= \frac{\sigma^2}{\sqrt{2\pi}} \cdot 2 \int_0^{\infty} \sqrt{2u} \cdot e^{-u} du = \sigma^2
 \end{aligned} \tag{*}$$

Kjer smo v (\*) vrstici vpeljali novo spremenljivko  $x = \sigma t + \mu$ . □

10. Eksponenta porazdelitev,  $\text{Exp}(\lambda)$ :  $E(X) = \frac{1}{\lambda}$ ,  $D(x) = \frac{1}{\lambda^2}$

*Dokaz.*

$$\begin{aligned}
 E(X) &= \int_0^{\infty} x \lambda e^{-\lambda x} dx \\
 &= -x \exp(-\lambda x) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} e^{-\lambda x} dx \\
 &= (0 - 0) + -\frac{1}{\lambda} e^{-\lambda x} \Big|_0^{\infty} \\
 &= 0 + \left(0 + \frac{1}{\lambda}\right) \\
 &= \frac{1}{\lambda}
 \end{aligned} \tag{*}$$

$$\begin{aligned}
 E(X^2) &= \int_0^{\infty} x^2 \lambda e^{-\lambda x} dx \\
 &= -x^2 e^{-\lambda x} \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} 2x e^{-\lambda x} dx \\
 &= 0 + 2 \frac{1}{\lambda} \int_0^{\infty} x \lambda e^{-\lambda x} dx \\
 &= 2 \frac{1}{\lambda} E(X) \\
 &= 2 \left(\frac{1}{\lambda}\right)^2
 \end{aligned} \tag{*}$$

Kjer smo v  $(\star)$  vrsticah uporabili metodo per-partes.

$$\implies D(X) = E(X(X+1)) - E(X) - (E(X))^2 = 2\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 - \left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 = \frac{1}{\lambda^2} \quad \square$$

11. Porazdelitev gama,  $\Gamma(b, c)$ :  $E(X) = \frac{b}{c}, \quad D(X) = \frac{b}{c^2}$

*Dokaz.*

$$\begin{aligned} E(X) &= \frac{c^b}{\Gamma(b)} \int_0^\infty x^b e^{-cx} dx \\ &= \frac{c^b}{\Gamma(b)} \int_0^\infty \left(\frac{t}{c}\right)^b e^{-t} \frac{dt}{c} \\ &= \frac{c^b}{c^{b+1}\Gamma(b)} \int_0^\infty t^b e^{-t} dt \\ &= \frac{\Gamma(b+1)}{c\Gamma(b)} \\ &= \frac{b\Gamma(b)}{c\Gamma(b)} \\ &= \frac{b}{c} \end{aligned}$$

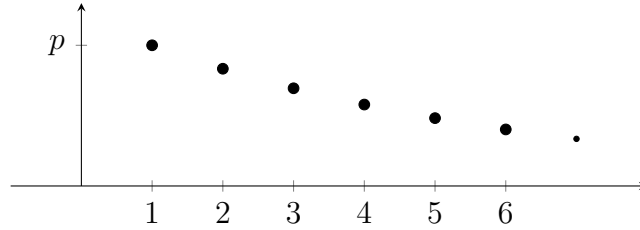
$$\begin{aligned} D(X) &= \frac{c^b}{\Gamma(b)} \int_0^\infty x^{b+1} e^{-cx} dx \\ &= \frac{c^b}{\Gamma(b)} \int_0^\infty \left(\frac{t}{c}\right)^{b+1} e^{-t} \frac{dt}{c} \\ &= \frac{c^b}{c^{b+2}\Gamma(b)} \int_0^\infty t^{b+1} e^{-t} dt \\ &= \frac{\Gamma(b+2)}{c^2\Gamma(b)} \\ &= \frac{(b+1)b}{c^2} \end{aligned}$$

$$\implies D(X) = E(X(X+1)) - E(X) - (E(X))^2 = \frac{(b+1)b}{c^2} - \left(\frac{b}{c}\right)^2 = \frac{b}{c^2} \quad \square$$

12. Porazdelitev  $\chi^2(n)$ :  $E(X) = n, \quad D(X) = 2n$

**Zgled.** Met kocke.  $X$  je število potrebnih metov, da pade prva šestica.  $X \sim \text{geo}(\frac{1}{6})$ .

$$E(X) = 6, \quad D(X) = \frac{\frac{5}{6}}{\frac{1}{36}} = 30, \quad \sigma(X) = \sqrt{30}$$



Slika 8.1: Graf  $P(X = k)$  za  $k = 1, 2, 3, \dots$

$$p_1 = p, \quad p_2 = pq, \quad p_3 = pq^2, \quad p_4 = pq^3, \quad \dots$$

◇

## 8.2 Kovarianca

**Definicija 14.** *Kovarianca* slučajne spremenljivke  $X$  in  $Y$  se definira kot:

$$\begin{aligned} K(Y, X) &\equiv \text{Cov}(X, Y) := E((X - E(X))(Y - E(Y))) \\ &= E(XY - E(X)Y - XE(Y) + E(X)E(Y)) \\ &= E(XY) - E(X)E(Y) - E(Y)E(X) + E(X)E(Y) \\ &= E(XY) - E(X)E(Y) \end{aligned}$$

**Lastnosti kovariance:**

1.  $K(X, X) = D(X)$
2.  $X$  in  $Y$  sta nekorelirani  $\iff K(X, Y) = 0$
3.  $K$  je simetrična in bilinearna funkcija:

$$K(X, Y) = K(Y, X)$$

$$K(aX + bY, Z) = aK(X, Z) + bK(Y, Z), \quad \text{za } a, b \in \mathbb{R}$$

4. Kovarianca obstaja, če obstaja  $D(X)$  in  $D(Y)$ . Tedaj velja:

$$|K(X, Y)| \leq \sqrt{D(X)D(Y)} = \sigma(X)\sigma(Y),$$

kar sledi iz Cauchy-Schwarzove neenakosti za  $X - E(X)$  in  $Y - E(Y)$ .

Enakost velja  $\iff Y - E(Y) = \pm \frac{\sigma(Y)}{\sigma(X)}(X - E(X))$  z verjetnostjo 1.

5. Če imata  $X$  in  $Y$  disperzijo, potem jo ima tudi  $X + Y$  in velja:

$$D(X + Y) = D(X) + D(Y) + 2K(X, Y)$$

Če sta  $X$  in  $Y$  nekorelirani, je potem:

$$D(X + Y) = D(X) + D(Y)$$

*Dokaz.* Sledi iz enakosti:

$$\begin{aligned} (X + Y - E(X + Y))^2 &= ((X - E(X)) + (Y - E(Y)))^2 \\ &= (X - E(X))^2 + (Y - E(Y))^2 + \\ &\quad + 2(X - E(X))(Y - E(Y)) \end{aligned}$$

□

6. Posplošitev zadnje lastnosti:

$$D(X_1 + \dots + X_n) = \sum_{k=1}^n D(X_k) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n K(X_i, X_j)$$

Posebej: če so  $X_1, \dots, X_n$  paroma nekorelirane potem je:

$$D(X_1 + \dots + X_n) = D(X_1) + \dots + D(X_n)$$

**Zgled.** Za  $X \sim \text{Bin}(n, p)$ , je  $X = X_1 + \dots + X_n$ , kjer velja:

$$X_k : \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ q & p \end{pmatrix}, \quad \text{oziroma} \quad X_k = \begin{cases} 1, & \text{zgodí se } A \text{ v } k\text{-ti ponovitvi} \\ 0, & \text{sicer} \end{cases}$$

$X_1, \dots, X_n$  so neodvisne slučajne spremenljivke, zato je:

$$D(X_k) = E(X_k^2) - (E(X_k))^2 = p - p^2 = p(1 - p) = pq$$

in potem:

$$D(X) = D(X_1 + \dots + X_n) = D(X_1) + \dots + D(X_n) = npq$$

◇

**Definicija 15.** *Standardizacija* slučajne spremenljivke  $X$  je slučajna spremenljivka:

$$X_s = \frac{X - E(X)}{\sigma(X)}$$

Tedaj je  $E(X_s) = 0$  in  $D(X_s) = 1$ , saj je:

$$D(X_s) = \frac{1}{\sigma(X)^2} \underbrace{D(X - E(X))}_{D(X)} = 1$$

**Zgled.** Na vajah boste pokazali:

$$X \sim N(\mu, \sigma) \implies X_s = \frac{X - \mu}{\sigma} \sim N(0, 1)$$

◇

## 8.3 Korelacijski koeficient

**Definicija 16.** *Korelacijski koeficient* slučajnih spremenljivk  $X$  in  $Y$  je:

$$r(X, Y) = \frac{K(X, Y)}{\sigma(X)\sigma(Y)} = \frac{E((X - E(X))(Y - E(Y)))}{\sigma(X)\sigma(Y)} = E(X_s Y_s)$$

**Lastnosti:**

1.  $r(X, Y) = 0 \iff X$  in  $Y$  sta nekorelirani.
2.  $-1 \leq r(X, Y) \leq 1$

*Dokaz.* Sledi iz lastnosti (4) za  $K$ . □

3.  $r(X, Y) = 1 \iff Y = \frac{\sigma(Y)}{\sigma(X)}(X - E(X)) + E(Y)$  z verjetnostjo 1.

$$r(X, Y) = -1 \iff Y = -\frac{\sigma(Y)}{\sigma(X)}(X - E(X)) + E(Y) \quad \text{z verjetnostjo 1.}$$

**Zgled.** Vržemo 2 kocki.  $X$  je število pik na prvi kocki in  $Y$  število pik na drugi kocki. Zaradi neodvisnosti je  $K(X, Y) = 0$ .

Definiramo  $Z = X + Y$ . Izračunajmo  $r(X, Z)$ :

$$E(X) = E(Y) = \frac{7}{2}$$

$$E(X^2) = \frac{1}{6}(1 + 4 + 9 + 16 + 25 + 36) = \frac{91}{6}$$



$$\begin{aligned}D(X) &= E(X^2) - (E(X))^2 = \frac{91}{6} - \frac{49}{4} = \frac{182 - 147}{12} = \frac{35}{12} \\K(X, Z) &= K(X, X + Y) = K(X, X) + K(X, Y) = D(X) + 0 = \frac{35}{12} \\D(Z) &= D(X) + D(Y) = 2 \cdot \frac{35}{12} = \frac{35}{6}, \quad \text{ker sta } X \text{ in } Y \text{ neodvisni.} \\r(X, Z) &= \frac{K(X, Z)}{\sqrt{D(X)D(Z)}} = \frac{\frac{35}{12}}{\sqrt{\frac{35}{12} \cdot \frac{35}{6}}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2}\end{aligned}$$

 $\diamond$



## Poglavje 9

# Pogojna porazdelitev in pogojno matematično upanje

Fiksirajmo dogodek  $B$  s  $P(B) > 0$ . *Pogojna porazdelitvena funkcija* slučajne spremenljivke  $X$  gleda na pogoj  $B$  je:

$$F_X(x | B) = P(X \leq x | B) = \frac{P((X \leq x) \cap B)}{P(B)}$$

Ima enake lastnosti kot porazdelitvena funkcija.

Naj bo  $(X, Y)$  diskreten slučajni vektor:

$$p_{ij} = P(X = x_i, Y = y_j), \quad B := (Y = y_j), \quad P(B) = P(Y = y_j) = q_j$$

Potem je pogojna porazdelitvena funkcija slučajne spremenljivke  $X$  glede na  $Y = y_j$ :

$$\begin{aligned} F_X(x | y_j) &= F_X(x | Y = y_j) \\ &= P(X \leq x | Y = y_j) \\ &= \frac{1}{q_j} P((X \leq x) \cap (Y = y_j)) \\ &= \frac{1}{q_j} \sum_{i: x_i \leq x} p_{ij} \end{aligned}$$

Vpeljemo *pogojno verjetnostno funkcijo*:

$$p_{i|j} = P(X = x_i | Y = y_j) = \frac{P(X = x_i, Y = y_j)}{P(Y = y_j)} = \frac{p_{ij}}{q_j}$$

Tedaj je:

$$F_X(x | Y = y_j) = \sum_{i: x_i \leq x} p_{i|j}$$

*Pogojno matematično upanje* slučajne spremenljivke  $X$  gleda na  $Y = y_j$  je matematično upanje te porazdelitve:

$$E(X | y_j) \equiv E(X | Y = y_j) = \sum_i x_i p_{i|j} = \frac{1}{q_j} \sum_i x_i p_{ij}$$

Tako dobimo novo slučajno spremenljivko:

$$E(X | Y) : \begin{pmatrix} E(X | y_1) & E(X | y_2) & \cdots \\ q_1 & q_2 & \cdots \end{pmatrix}$$

*Pogojno matematično upanje* slučajne spremenljivke  $X$  glede na slučajno spremenljivko  $Y$ .

Označimo  $\varphi(y_j) := E(X | y_j)$  za vse  $j$  in dobimo:

$$E(X | Y) := \varphi(Y) : \begin{pmatrix} \varphi(y_1) & \varphi(y_2) & \cdots \\ q_1 & q_2 & \cdots \end{pmatrix}$$

$\varphi$  je *regresijska funkcija*.

Za  $E(X, Y)$  velja zveza:

$$\begin{aligned} E(E(X | Y)) &= \sum_j E(X | y_j) q_j \\ &= \sum_j \sum_i x_i p_{ij} \\ &= \sum_i x_i \left( \sum_j p_{ij} \right) \\ &= \sum_i x_i p_i \\ &= E(X) \end{aligned}$$

Vzemeimo, da sta  $X$  in  $Y$  neodvisni. Tedaj:

$$p_{i|j} = \frac{p_{ij}}{q_j} = p_i \implies E(X | y_j) = \sum_i x_i p_i = E(X)$$

torej je  $E(X | Y)$  izrojena slučajna spremenljivka.

**Zgled.** Kokš znese  $N$  jajc, kjer je  $N \sim \text{Poi}(\lambda)$ . Iz vsakega jajca se zvali piščanec s verjetnostjo  $p \in (0, 1)$ , neodvisno od drugih jajc.

Naj bo  $K$  število piščancev. Določimo  $E(K | N)$ ,  $E(K)$  in  $E(N | K)$ .

$$P(N = n) = \frac{\lambda^n}{n!} e^{-\lambda}, \quad \text{za } n = 0, 1, 2, \dots$$

$$P(K = k | N = h) = \binom{n}{k} p^k q^{n-k}, \quad q = 1 - p \quad \text{in za } k = 0, 1, 2, \dots$$

$$E(K | N = n) = E(\text{Bin}(n, p)) = np =: \varphi(n)$$

$$E(K | N) = pN = \varphi(N)$$

$$E(K) = E(E(K | N)) = E(pN) = pE(N) = p\lambda$$

Dokažimo, da je  $K \sim \text{Poi}(\lambda)$ :

$$\begin{aligned} P(K = k) &= \sum_{n=k}^{\infty} P(K = k | N = n) P(N = n) \\ &= \sum_{n=k}^{\infty} \binom{n}{k} p^k q^{n-k} \frac{\lambda^n}{n!} e^{-\lambda} \\ &= e^{-\lambda} \frac{p^k}{k!} \lambda^k \sum_{n=k}^{\infty} \frac{q^{n-k} \lambda^{n-k}}{(n-k)!} \\ &= e^{-\lambda} \frac{(p\lambda)^k}{k!} e^{q\lambda} = \frac{(p\lambda)^k}{k!} e^{-p\lambda} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(N = n | K = k) &= \frac{P(N = n, K = k)}{P(K = k)} \\ &= \frac{P(K = k | N = n) P(N = n)}{P(K = k)} \\ &= \binom{n}{k} p^k q^{n-k} \frac{\lambda^n}{n!} e^{-\lambda} \frac{k!}{(p\lambda)^k} e^{p\lambda} \\ &= \frac{1}{(n-k)!} q^{n-k} \lambda^{n-k} e^{-q\lambda} \\ &= \frac{(q\lambda)^{n-k}}{(n-k)!} e^{-q\lambda} \end{aligned}$$

za  $n = k, k+1, k+2, \dots$ , kar je Poissonova porazdelitev, premaknjena za  $k$  v desno:  $k + \text{Poi}(q\lambda)$ . Zato je regresijska funkcija:

$$\varphi(k) = E(N | K = k) = E(k + \text{Poi}(q\lambda)) = k + q\lambda$$

torej je:

$$E(N | K) = \varphi(K) = K + q\lambda$$

Preizkus:

$$E(E(N \mid K)) = E(K + q\lambda) = E(K) + q\lambda = p\lambda + q\lambda = \lambda = E(N)$$

◇

# Poglavje 10

## Rodovne funkcije

Naj bo  $X$  slučajna spremenljivka z vrednostmi v  $\mathbb{N} \cup \{0\}$ :

$$p_k = P(X = k), \quad \text{za } k = 0, 1, 2, \dots, \quad p_k \geq 0, \quad \sum_{k=0}^{\infty} p_k = 1$$

*Rodovna funkcija* slučajne spremenljivke  $X$  je:

$$G_X(s) := p_0 + p_1 s + p_2 s^2 + p_3 s^3 + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} p_k s^k$$

za vse  $s \in \mathbb{R}$ , za katere vrsta absolutno konvergira.

Očitno je  $G_X(0) = p_0$ ,  $G_X(1) = \sum_{k=0}^{\infty} p_k = 1$  in  $G_X(s) = E(s^X)$ , saj je:

$$s^X : \begin{pmatrix} s^0 & s^1 & s^2 & s^3 & \dots \\ p_0 & p_1 & p_2 & p_3 & \dots \end{pmatrix}$$

Za  $s \in [-1, 1]$  velja  $|p_k s^k| \leq p_k$  in  $\sum_{k=0}^{\infty} p_k = 1$ , zato vrsta  $\sum_{k=0}^{\infty} |p_k s^k|$  konvergira. Torej je konvergenčni radij vrste vsaj 1.

**Zgled.**

1.  $X \sim \text{geo}(p)$ ,  $p_k = P(X = k) = p q^{k-1}$  za  $k = 1, 2, 3, \dots$ :

$$G_X(s) = \sum_{k=1}^{\infty} p q^{k-1} s^k = p s \sum_{k=1}^{\infty} (q s)^{k-1} = p s \frac{1}{1 - q s} = \frac{p s}{1 - q s}$$

za vse  $s \in \mathbb{R}$ , za katere je  $|q s| < 1$ , torej je konvergenčni radij  $\frac{1}{q}$ .

2.  $X \sim \text{Poi}(\lambda)$ ,  $p_k = p(X = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}$  za  $k = 0, 1, 2, \dots$ :

$$G_X(s) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} s^k = e^{-\lambda} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\lambda s)^k}{k!} = e^{-\lambda} e^{\lambda s} = e^{\lambda(s-1)}$$

za vse  $s \in \mathbb{R}$ .

◇

Iz teorije Taylorjevih vrst dobimo *izrek o enoličnosti*.

**Izrek 1.** Naj imata  $X$  in  $Y$  rodovni funkciji  $G_X$  in  $G_Y$ . Potem za  $s \in [-1, 1]$  velja:

$$G_X(s) = G_Y(s) \iff P(X = k) = P(Y = k) \quad \text{za vse } k = 0, 1, 2, \dots$$

Tedej velja:

$$P(X = k) = \frac{1}{k!} G_X^{(k)}(0)$$

Velja:

$$G_X(s) = \sum_{k=0}^{\infty} p_k s^k, \quad G'_X(s) = \sum_{k=1}^{\infty} p_k k s^{k-1}$$

za vse  $s \in (-1, 1)$ . Od koder sledi:

$$\lim_{s \uparrow 1} G'_X(s) = \sum_{k=1}^{\infty} p_k k = E(X)$$

**Izrek 2.** Naj ima  $X$  rodovno funkcijo  $G_X$  in  $n \in \mathbb{N}$ . Potem je:

$$G_X^{(n)}(1-) = E(X(X-1)(X-2) \cdots (X-n+1))$$

$$\text{kjer je: } G_X^{(n)}(1-) = \lim_{s \uparrow 1} G_X^{(n)}(s)$$

*Dokaz.* Za  $s \in [0, 1]$  je:

$$G_X^{(n)}(s) = \left( \sum_{k=0}^{\infty} p_k s^k \right)^{(n)} = \sum_{k=n}^{\infty} k(k-1) \cdots (k-n+1) s^{k-n} p_k$$

Ko gre  $s \uparrow 1$ , z uporabo Abelove leme dobimo:

$$\lim_{s \uparrow 1} G_X^{(n)}(s) = \sum_{k=n}^{\infty} k(k-1) \cdots (k-n+1) p_k = E(X(X-1)(X-2) \cdots (X-n+1))$$

□



**Posledica 5.**

$$\begin{aligned} E(X) &= G'_X(1-) \\ D(X) &= E(X(X-1)) + E(X) - (E(X))^2 \\ &= G''_X(1-) + G'_X(1-) - (G'_X(1-))^2 \end{aligned}$$

**Izrek 3.** Naj bosta  $X$  in  $Y$  neodvisni slučajni spremenljivki z rodovnima funkcijama  $G_X$  in  $G_Y$ . Potem je za  $s \in [0, 1]$ :

$$G_{X+Y}(s) = G_X(s) G_Y(s)$$

*Dokaz.*

$$\begin{aligned} G_{X+Y}(s) &= E(s^{X+Y}) \\ &= E(s^X \cdot s^Y) \\ &= E(s^X) E(s^Y) \\ &= G_X(s) G_Y(s) \end{aligned} \tag{*}$$

Enakost (\*) velja, saj sta  $s^X$  in  $s^Y$  neodvisni slučajni spremenljivki.  $\square$

**Posplošitev:** Če je  $S_n = X_1 + \dots + X_n$  vsota neodvisnih slučajnih spremenljivk z vrednostmi v  $\mathbb{N} \cup \{0\}$ , potem je za  $s \in [-1, 1]$ :

$$G_{S_n}(s) = G_{X_1}(s) G_{X_2}(s) \cdots G_{X_n}(s)$$

Posebej: če so  $X_1, \dots, X_n$  enako porazdeljene, potem je:

$$G_{S_n}(s) = (G_X(s))^n$$

Kakšne so rodovne funkcije slučajne spremenljivke  $S_N = X_1 + X_2 + \dots + X_N$ , kjer so  $X_1, X_2, \dots$  enako porazdeljene in  $N$  slučajna spremenljivka z rodovno funkcijo  $G_N$ ?

**Izrek 4.** Naj bodo za vsak  $n \in \mathbb{N}$  slučajne spremenljivke  $N, X_1, X_2, \dots, X_n$ . Naj ima  $N$  rodovno funkcijo  $G_N$ ,  $X_n$  pa rodovno funkcijo  $G_X$  za vsak  $n \in \mathbb{N}$ . Potem ima slučajna spremenljivka  $S = X_1 + X_2 + \dots + X_N$  rodovno funkcijo:

$$G_S(s) = G_N(G_X(s)) \quad \text{za} \quad s \in [-1, 1]$$

*Dokaz.* Zaradi neodvisnosti imamo:

$$\begin{aligned}
 P(S = k) &= \sum_{n=1}^{\infty} P(S = k, N = n) \\
 &= \sum_{n=1}^{\infty} P(N = n, X_1 + X_2 + \cdots + X_n = k) \\
 &= \sum_{n=1}^{\infty} P(N = n) P(X_1 + \cdots + X_n = k)
 \end{aligned} \tag{*}$$

Kjer vrstica (\*) velja zaradi neodvisnosti. Zato je:

$$\begin{aligned}
 G_S(s) &= \sum_{k=0}^{\infty} P(S = k) s^k \\
 &= \sum_{n=1}^{\infty} P(N = n) \sum_{k=0}^{\infty} P(X_1 + \cdots + X_n = k) s^k \\
 &= \sum_{n=1}^{\infty} P(N = n) G_{X_1 + \cdots + X_n}(s) \\
 &= \sum_{n=1}^{\infty} P(N = n) (G_X(s))^n \\
 &= G_N(G_X(s))
 \end{aligned}$$

□

**Posledica 6.** *Waldova enakost:*

$$E(S) = E(N) E(X)$$

*Dokaz.*

$$\begin{aligned}
 E(S) &= G'_S(1-) \\
 &= G'_N(\underbrace{G_X(1-)}_{1-}) G'_X(1-) \\
 &= E(N) E(X)
 \end{aligned}$$

□

**Zgled** (Kokoš, jajca, piščanci).  $N$  jajc,  $N \sim \text{Poi}(\lambda)$ ,  $\lambda > 0$ .  $K$  piščancev. Vpeljemo slučajne spremenljivke  $X_1, X_2, \dots$ , kjer  $(X_i = 1)$ , če se iz  $i$ -tega jajca izvali piščanec, sicer pa je  $(X_i = 0)$ . Potem je:

$$X_i : \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ q & p \end{pmatrix}, \quad K = X_1 + X_2 + \cdots + X_N$$

Ker je  $G_N(s) = e^{\lambda(s-1)}$  in  $G_X(s) = q + ps$  je:

$$G_K(s) = G_N(G_X(s)) = e^{\lambda(q+ps-1)} = e^{\lambda p(s-1)}$$

od koder sledi  $K \sim \text{Poi}(\lambda p)$ .

◇



# Poglavje 11

## Višji momenti in vrstilne karakteristike

Naj bo  $k \in \mathbb{N}$  in  $a \in \mathbb{R}$ . *Moment reda  $k$  glede na  $a$  je:*

$$m_k(a) = E\left((X - a)^k\right)$$

če obstaja.

Za  $a$  običajno vzamemo:

1.  $a = 0$ :  $z_k = m_k(0) = E\left(X^k\right)$ ; *začetni moment*.
2.  $a = E(X)$ :  $m_k = m_k(E(x)) = E\left((X - E(X))^k\right)$ ; *centralni moment reda  $k$* .

Očitno je  $z_1 = E(X)$  in  $m_2 = D(X)$ .

**Trditev 8.** Če obstaja  $m_n(a)$ , potem obstaja tudi  $m_k(a)$  za vsak  $k < n$ .

*Dokaz.*

$$\begin{aligned} E\left(|X - a|^k\right) &= \sum_i |x_i - a|^k p_i \\ &= \sum_{i: |x_i - a| \leq 1} \underbrace{|x_i - a|^k}_{\leq 1} p_i + \sum_{i: |x_i - a| > 1} |x_i - a|^k p_i \\ &\leq \sum_i p_i + \sum_i |x_i - a|^n p_i \\ &= 1 + E\left(|X - a|^n\right) < \infty \end{aligned}$$

saj  $m_n(a)$  obstaja.

□

**Trditev 9.** Če obstaja začetni moment  $z_n$ , potem obstaja tudi  $m_n(a)$  za poljuben  $a \in \mathbb{R}$ .

*Dokaz.*

$$\begin{aligned} E(|X - a|^n) &\leq E((|X| + |a|)^n) \\ &= \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} |a|^{n-k} E(|X|^k) < \infty \end{aligned}$$

po prejšnji trditvi. □

Velja:

$$m_n(a) = E((X - a)^n) = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} (-a)^{n-k} \underbrace{E(X^k)}_{z_k}$$

Tako lahko centralne momente izračunamo z začetnimi momenti:

$$m_n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} (-1)^{n-k} z_1^{n-k} z_k$$

*Asimetrija* slučajne spremenljivke  $X$  je:

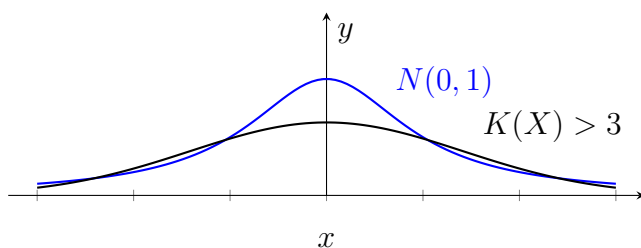
$$A(X) := E(X_s^3) = E\left(\left(\frac{X - E(X)}{\sigma(X)}\right)^3\right) = \frac{m_3}{m_2^{\frac{3}{2}}}$$

Na primer:  $A(N(\mu, \sigma)) = 0$ ,  $A(\lambda X) = A(X)$  za  $\lambda > 0$ .

*Sploščenost (kurtozis)* slučajne spremenljivke  $X$  je:

$$K(X) := E(X_s^4) = E\left(\left(\frac{X - E(X)}{\sigma(X)}\right)^4\right) = \frac{m_4}{m_2^2}$$

Na primer:  $K(N(\mu, \sigma)) = 3$ ,  $K(\lambda X) = K(X)$  za  $\lambda > 0$ .



Nekateri definirajo sploščenost kot  $K(X) - 3$ , torej je v primeru  $N(\mu, \sigma)$  enaka 0.

Za razliko od momentov vedno obstajajo *vrstilne karakteristike*.

*Mediana* slučajne spremenljivke  $X$  je vsaka vrednost  $x \in \mathbb{R}$ , za katero velja:

$$P(X \leq x) \geq \frac{1}{2} \quad \text{in} \quad P(X \geq x) \geq \frac{1}{2}$$

Ker je  $P(X \geq x) = 1 - P(X < x) = 1 - F(x-)$ , lahko pogoj za mediano zapišemo kot:

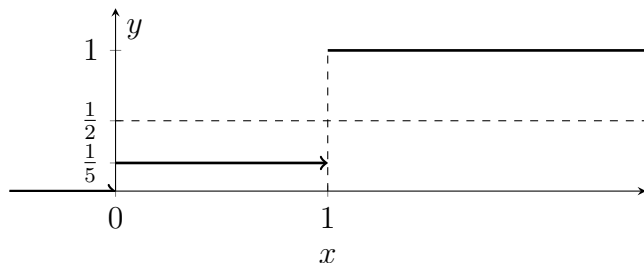
$$F(x-) \leq \frac{1}{2} \leq F(x)$$

Če je  $X$  zvezno porazdeljena, je pogoj enak  $F(x) = \frac{1}{2}$ .

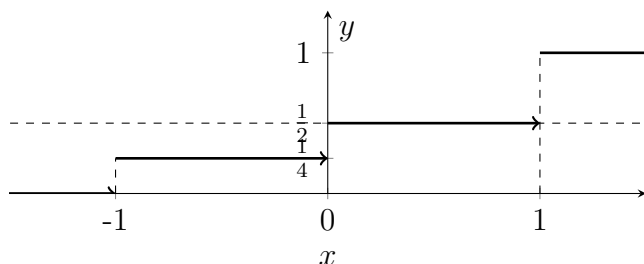
Te vrednosti (lahko jih je več) označimo z  $x_{\frac{1}{2}}$ .

**Zgled.**

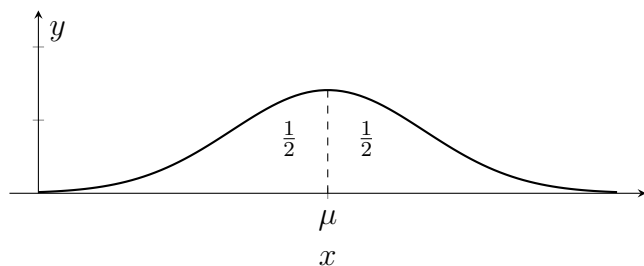
1.  $X : \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \frac{1}{5} & \frac{4}{5} \end{pmatrix}$ ,  $x_{\frac{1}{2}} = 1$ ,  $E(X) = \frac{4}{5}$ :



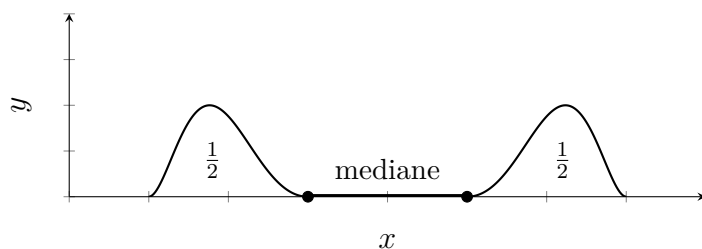
2.  $X : \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} \end{pmatrix}$ , mediane so na  $[0, 1]$ :



3.  $X \sim N(\mu, \sigma)$ ,  $x_{\frac{1}{2}} = \mu = E(X)$



4.



◇

Kvantil reda  $p$  je vsaka vrednost  $x_p$ , za katero velja:

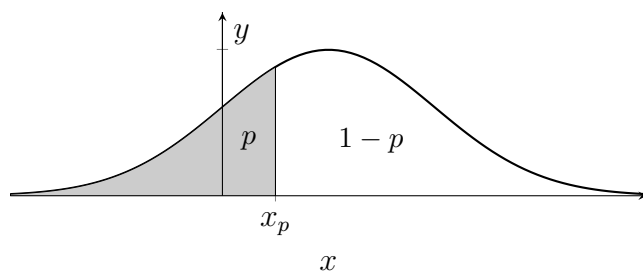
$$P(X \leq x_p) \geq p \quad \text{in} \quad P(X \geq x_p) \geq 1 - p$$

Oziroma ekvivalentno:

$$F(x_p-) \leq p \leq F(x_p), \quad 0 < p < 1$$

Če je  $X$  zvezno porazdeljena, je pogoj za kvantil:

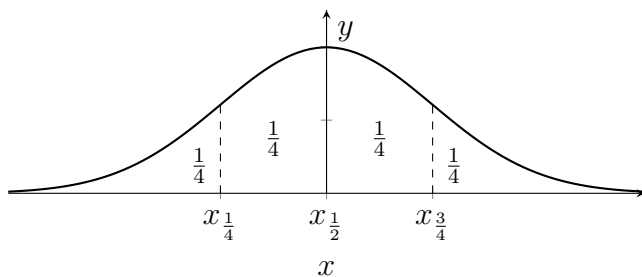
$$F(x_p) = p \iff \int_{-\infty}^{x_p} p_X(t) dt = p$$



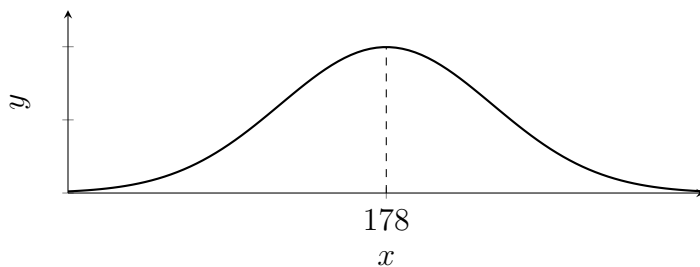
Kvartil:  $x_{\frac{1}{4}}, x_{\frac{2}{4}} = x_{\frac{1}{2}}, x_{\frac{3}{4}}$

(per)centil:  $x_{\frac{1}{100}}, x_{\frac{2}{100}}, \dots, x_{\frac{99}{100}}$





**Zgled.** Telesna višina odraslih moških:

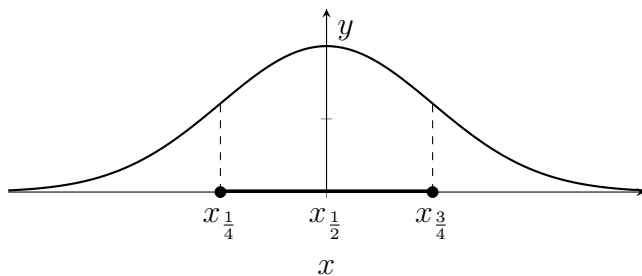


◇

(Semi)kvartilni razmik je:

$$s = \frac{1}{2} (x_{\frac{3}{4}} - x_{\frac{1}{4}})$$

ki je nadomestek za standardno deviacijo.



**Zgled.**

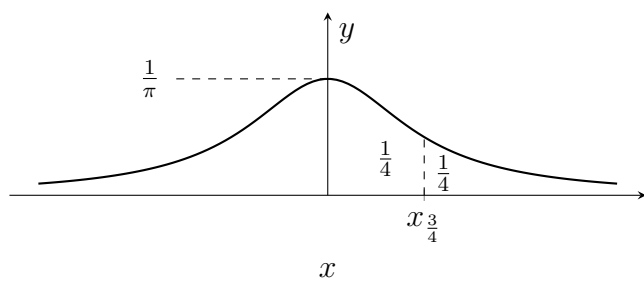
1.  $X \sim N(0, 1)$ :

$$s = \frac{1}{2} (x_{\frac{3}{4}} - x_{\frac{1}{4}}) = x_{\frac{3}{4}} \approx 0.67$$

2. Cauchyjeva porazdelitev,  $p(x) = \frac{1}{\pi(1+x^2)}$  nima momentov.

Zaradi simetrije velja  $x_{\frac{1}{2}} = 0$ .

$$\int_0^{x_{\frac{3}{4}}} \frac{1}{\pi(1+x^2)} dx = \frac{1}{4}$$



$$\frac{1}{\pi} \arctg x \Big|_0^{x_{\frac{3}{4}}} = \frac{1}{4} \implies \arctg x_{\frac{3}{4}} = \frac{\pi}{4}$$

Torej je:

$$x_{\frac{3}{4}} = 1 = s \quad \text{in} \quad x_{\frac{1}{4}} = -1$$

◇

# Poglavje 12

## Momentno rodovna funkcija

*Momentno rodovna funkcija* slučajne spremenljivke  $X$  je:

$$M_X(t) = E(e^{tX})$$

za tiste  $t \in \mathbb{R}$  za katere obstaja matematično upanje, t.j.:  $E(e^{tX}) < \infty$ .

Kadar ima  $X$  vrednosti v  $\mathbb{N} \cup \{0\}$ , je:

$$M_X(t) = E\left((e^t)^X\right) = G_X(e^t)$$

torej, gre za posplošitev rodovne funkcije.

Če je  $X$  zvezno porazdeljena z gostoto  $p(x)$ , je:

$$M_X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{tx} p(x) dx$$

kar je *Laplaceova transformacija* funkcije  $p$ .

**Zgled.**  $X \sim N(0, 1)$ :

$$\begin{aligned} M_X(t) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{tx} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \\ &= e^{\frac{t^2}{2}} \underbrace{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}(x-t)^2} dx}_{\text{gostota za } N(t,1)} \\ &= e^{\frac{t^2}{2}} \end{aligned}$$

◇

**Izrek 5.** Naj obstaja  $\delta > 0$ , da je  $M_X(t) < \infty$ , za vse  $t \in (-\delta, \delta)$ . Potem je porazdelitev  $X$  natanko določena z  $M_X$ , vsi začetni momenti obstajajo:

$$\begin{aligned} z_k &= E(X^k) = M_X^{(k)}(0) \quad \text{za vse } k \in \mathbb{N} \\ M_X(t) &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z_k}{k!} t^k \quad \text{za vse } t \in (-\delta, \delta) \end{aligned}$$

*Dokaz.* (skica)

$$\begin{aligned} M_X(t) &= E(e^{tX}) \\ &= E\left(\sum_{k=0}^{\infty} \frac{X^k}{k!} t^k\right) \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{E(X^k)}{k!} t^k \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z_k}{k!} t^k \end{aligned}$$

□

**Trditev 10.**

$$M_{aX+b}(t) = e^{bt} M_X(at) \quad \text{za } a \neq 0, b \in \mathbb{R}$$

*Dokaz.*

$$\begin{aligned} M_{aX+b}(t) &= E(e^{t(aX+b)}) \\ &= E(e^{(at)X} e^{bt}) \\ &= e^{bt} M_X(at) \end{aligned}$$

□

**Trditev 11.** Za  $X \sim N(\mu, \sigma)$  velja:

$$M_X(t) = e^{\mu t + \frac{\sigma^2 t^2}{2}}$$

*Dokaz.* Definiramo:  $U := \frac{X-\mu}{\sigma} \sim N(0, 1)$ , zato  $X = \sigma U + \mu$ :

$$\begin{aligned} M_X(t) &= M_{\sigma U + \mu}(t) \\ &= e^{\mu t} M_U(\sigma t) \\ &= e^{\mu t} e^{\frac{\sigma^2 t^2}{2}} \\ &= e^{\mu t + \frac{\sigma^2 t^2}{2}} \end{aligned}$$

□

**Izrek 6.** Če sta  $X$  in  $Y$  neodvisni slučajni spremenljivki, potem je:

$$M_{X+Y}(t) = M_X(t) M_Y(t)$$

*Dokaz.*

$$\begin{aligned} M_{X+Y}(t) &= E\left(e^{t(X+Y)}\right) \\ &= E\left(e^{tX} e^{tY}\right) \\ &= E\left(e^{tX}\right) E\left(e^{tY}\right) \\ &= M_X(t) M_Y(t) \end{aligned} \quad (\star)$$

Kjer smo v  $(\star)$  vrstici upoštevali neodvisnost. □

**Trditev 12.** Imejmo  $X \sim N(\mu_X, \sigma_X)$  in  $Y \sim N(\mu_Y, \sigma_Y)$  neodvisni slučajne spremenljivki. Potem je:

$$X + Y \sim N\left(\mu_X + \mu_Y, \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}\right)$$

*Opomba.*

$$E(X + Y) = E(X) + E(Y) = \mu_X + \mu_Y$$

$$D(X + Y) = D(X) + D(Y) = \sigma_X^2 + \sigma_Y^2$$

*Dokaz.*

$$\begin{aligned} M_{X+Y}(t) &= M_X(t) M_Y(t) \\ &= e^{\mu_X t + \frac{\sigma_X^2 t^2}{2}} e^{\mu_Y t + \frac{\sigma_Y^2 t^2}{2}} \\ &= e^{(\mu_X + \mu_Y)t + \frac{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}{2} t^2} \end{aligned}$$

od koder zaradi enoličnosti sledi:

$$X + Y \sim N\left(\mu_X + \mu_Y, \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}\right)$$

□

**Zgled.** Za  $N(0, 1)$  izračunajmo vse momente:

$$\begin{aligned} M_X(t) &= e^{\frac{t^2}{2}} \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \left(\frac{t^2}{2}\right)^k \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{t^{2k}}{2^k k!} \end{aligned}$$

$$\implies z_{2k+1} = 0 \quad \forall k$$

Po drugi strani pa je:

$$M_X(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z_k}{k!} t^k$$

Po primerjavi koeficientov dobimo:

$$\frac{z_{2k}}{(2k)!} = \frac{1}{2^k k!}$$

Od tod sledi:

$$z_{2k} = \frac{(2k)!}{2^k k!} = \frac{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdots 2k}{2 \cdot 4 \cdot 6 \cdots 2k} = 1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 \cdots (2k-1) = (2k-1)!!$$

◇