

Verjetnost in statistika

Zapiski po predavanjih izr. prof. dr. Jaka Smrekarja
Napisal: Jon Pascal Miklavčič

2024/10/03

Kazalo

I	Verjetnost	1
1	Slučajni vektorji	3
1.1	Slučajni vektorji	3
1.2	Zvezni slučajni vektorji	8
1.3	Dvofazna normalna porazdelitev	10
2	Neodvisnost	15
3	Funkcije slučajnih spremenljivk in slučajnih vektorjev	19
3.1	Slučajne spremenljivke	19
3.2	Slučajni vektorji	22
4	Matematično upanje oz. pričakovna vrednost	27

Del I

Verjetnost

Poglavje 1

Slučajni vektorji

1.1 Slučajni vektorji

Spomnimo se:

Slučajna spremenljivka na je taka funkcija $X : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$, na verjetnostnem prostoru (Ω, \mathcal{F}, P) , za katero so množice (praslike):

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

v \mathcal{F} , se pravi dogodki za vsak $x \in \mathbb{R}$

Oznaka:

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

Posledično je za slučajno spremenljivko X definirana *komulativna porazdelitvena funkcija* $F_X : \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$:

$$F_X(x) = P(X \leq x) = P\left(X^{-1}((-\infty, x])\right)$$

Definicija 1. *Slučajni vektor* je taka preslikava $X = (X_1, \dots, X_n) : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ na verjetnostnem prostoru (Ω, \mathcal{F}, P) , za katero so množice:

$$\{X_1 \leq x_1, X_2 \leq x_2, \dots, X_n \leq x_n\} := \{\omega \in \Omega : X_1(\omega) \leq x_1, \dots, X_n(\omega) \leq x_n\}$$

v \mathcal{F} , se pravi dogodki za vse n -terice $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$.

Oznaka:

$$\begin{aligned}
 \{X_1 \leq x_1, X_2 \leq x_2, \dots, X_n \leq x_n\} &\equiv \{\omega \in \Omega : X_1(\omega) \leq x_1, \dots, X_n(\omega) \leq x_n\} \\
 &\equiv \{X_1 \in (-\infty, x_1], \dots, X_n \in (-\infty, x_n]\} \\
 &\equiv \{X \in (-\infty, x_1] \times \dots \times (-\infty, x_n]\} \\
 &\equiv X^{-1}((-\infty, x_n] \times \dots \times (-\infty, x_n])
 \end{aligned}$$

Definicija 2. Komulativna porazdelitvena funkcija slučajnega vektorja je funkcija $F_X : \mathbb{R}^n \rightarrow [0, 1]$:

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

Lastnosti komulativne porazdelitvene funkcije:

$$\begin{aligned}
 1. \quad \lim_{x_1 \rightarrow -\infty} F_X(x_1, \dots, x_n) &= \lim_{x_1 \rightarrow -\infty} P\left(X \in (-\infty, x_1] \times \underbrace{\dots \times (-\infty, x_n]}_K\right) \\
 &= \lim_{n \rightarrow \infty} P(X \in (-\infty, -n] \times K) \quad (\star) \\
 &= P\left(\bigcap_{n=1}^{\infty} \{X \in (-\infty, -n] \times K\}\right) \\
 &= P\left(X \in \underbrace{\bigcap_{n=1}^{\infty} (-\infty, -n] \times K}_{=\emptyset}\right) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

Kjer smo v (\star) vrstici uporabili zveznost P oziroma:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(E_n) = P\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} E_n\right) \quad \text{za} \quad E_1 \supseteq E_2 \supseteq E_3 \supseteq \dots$$

Ta limita velja, tudi če proti ∞ pošljemo poljuben x_i . Velja še:

$$\begin{aligned}
 \lim_{(x_1, \dots, x_n) \rightarrow (\infty, \dots, \infty)} F_X(x_1, \dots, x_n) &= \lim_{n \rightarrow \infty} P(X \in (-\infty, n] \times \dots \times (-\infty, n]) \\
 &= P\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} \{X_1 \leq n, \dots, X_n \leq n\}\right) \\
 &= P(X \in \mathbb{R}^n) \\
 &= P(\Omega) \\
 &= 1
 \end{aligned}$$

2. *Monotnost*: če je $x_i \leq y_i$ za vse $i \in \{1, \dots, n\}$, potem je:

$$F_X(x) \leq F_X(y)$$

Dokaz. Sledi iz monotonosti verjetnostne preslikave. \square

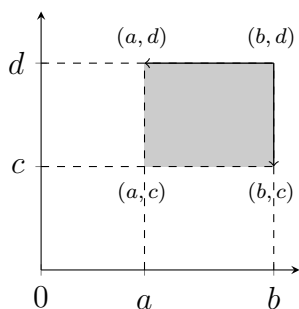
3. *Zveznost z desne*:

$$\lim_{y \downarrow x} F_X(y) = F_X(x)$$

Tukaj $y \downarrow x$ interpretiramo kot $y_i \downarrow x_i$ za vse $i \in \{1, \dots, n\}$.

Lastnosti 1., 2. in 3. karakterizirajo družino (abstraktnih) komulativnih porazdelitvenih funkcij v primeru slučajne spremenljivke t.j. $n = 1$. V večrazsežnem primeru to ne drži. Poglejmo si $n = 2$. Za $a < b$ in $c < d$ izračunajmo:

$$P((X, Y) \in (a, b] \times (c, d]) = F_{(X,Y)}(b, d) - F_{(X,Y)}(a, d) - F_{(X,Y)}(b, c) + F_{(X,Y)}(a, c)$$



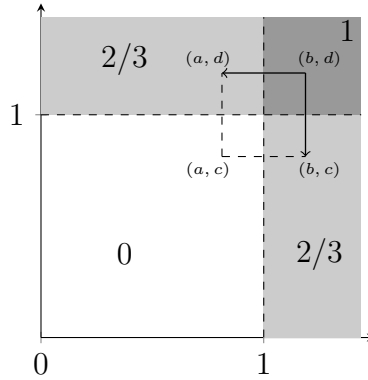
Slika 1.1: $P((X, Y) \in (a, b] \times (c, d])$

Ker je to verjetnost mora veljati:

$$F_{(X,Y)}(b, d) - F_{(X,Y)}(a, d) - F_{(X,Y)}(b, c) + F_{(X,Y)}(a, c) \geq 0 \quad (4)$$

Zgled.

$$F(x, y) = \begin{cases} 1 & ; x \geq 1, y \geq 1 \\ \frac{2}{3} & ; x \geq 1, y \in [0, 1) \\ \frac{2}{3} & ; x \in [0, 1), y \geq 1 \\ 0 & ; \text{sicer} \end{cases}$$



Slika 1.2: Verjetnost $P((X, Y) \in (a, b] \times (c, d])$ za to k.p.f.¹

Funkcija sicer zadošča lastnostim 1., 2. in 3., ampak za pravokotnik $(a, b] \times (c, d]$, kot na skici velja:

$$F(b, d) - F(a, d) - F(b, c) + F(a, c) = 1 - \frac{2}{3} - \frac{2}{3} + 0 < 0$$

Torej ne more biti komulativna porazdelitvena funkcija. \diamond

Izrek 1. Če $F : \mathbb{R}^2 \rightarrow [0, 1]$ zadošča lastnostim 1., 2., 3. in 4. (velja $F(b, d) - F(a, d) - F(b, c) + F(a, c) \geq 0$, za vse četverice $a < b$ in $c < d$), potem je F komulativna porazdelitvena funkcija nekega slučajnega vektorja $(X, Y) : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^2$.

Očitna posplošitev velja tudi za $n \geq 3$.

Trditev 1. Če je $X = (X_1, \dots, X_n)$ slučajni vektor, so vsi podvektorji tudi slučajni vektorji.

Dokaz. Na primer, za podvektor (X_1, \dots, X_{n-1}) :

$$\{X_1 \leq x_1, \dots, X_{n-1} \leq x_{n-1}\} = \bigcup_{k=1}^{\infty} \{X_1 \leq x_1, \dots, X_{n-1} \leq x_{n-1}, X_n \leq k\} \quad (\star)$$

□

Posebej sledi, da so komponente slučajnih vektorjev, funkcije X_1, X_2, \dots, X_n , slučajne spremenljivke. Iz (\star) je očitno tudi, da komulativne porazdelitvene funkcije podvektorjev dobimo tako, da ustrezne koordinate pošljemo proti ∞ :

$$F_{(X_1, \dots, X_{n-1})}(x_1, \dots, x_{n-1}) = \lim_{x_n \rightarrow \infty} F_{(X_1, \dots, X_n)}(x_1, \dots, x_n)$$

Komulativne porazdelitvene funkcije F_{X_i} imenujemo tudi *robne* ali *marginale* komulativne porazdelitvene funkcije (glede na $F_{(X_1, \dots, X_n)}$).

¹k.p.f. je okrajšava za komulativno porazdelitveno funkcijo. To se v skripti pojavi še večkrat.

Opomba. Naj bo $X : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ s.s.² Potem so naslednje množice dogodki:

- $\{X \in (a, b]\} = \{X \in (-\infty, b]\} \setminus \{X \in (-\infty, a]\}$
 $= \{X \in (-\infty, b]\} \cap \{X \in (-\infty, a]\}^c$
- $\{X \in (a, b)\}$, saj je to enako $\bigcup_{n=1}^{\infty} \{X \in (a, c_n]\}$ za $c_n \uparrow b$
- $\{X \in [a, b]\} = \bigcap_{n=1}^{\infty} \left\{X \in \left(a - \frac{1}{n}, b + \frac{1}{n}\right)\right\}$
- $\{X = x\} = \{X \in (x-1, x]\} \setminus \{X \in (x-1, x)\}$

Zgornje lahko “kombiniramo” (števne unije, komplementi, preseki). Izkaže se, da obstajajo verjetnosti $P(X \in \mathcal{B})$, kjer je $\mathcal{B} \subseteq \mathbb{R}$ poljubna Borelova množica.

Opomba. Pripomnimo, da podobno velja za slučajni vektor X . Množice:

$$\{X \in \mathcal{B}\} = X^{-1}(\mathcal{B}) \subseteq \Omega$$

so dogodki za Borelove množice $\mathcal{B} \subseteq \mathbb{R}^n$

Zgled (Borelove množice).

1. $\subseteq \mathbb{R}$

- $(a, b), (-\infty, b), \dots$ vsi intervali;
- $\{x\} = (x-1, x] \setminus (x-1, x)$ singeltoni;
- Števne unije Borelovih množic;
- Števni preseki Borelovih množic;
- Komplementi Borelovih množic.

2. $\subseteq \mathbb{R}^2$

- Krogle;
- Pravokotniki;
- Enoelementne množice;
- Unije, preseki, komplemeti kot v \mathbb{R} ;
- Če je $G : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ zvezno parcialno odvedljiva bijekcija, je $G(\mathcal{B})$ Borelova za vsako Borelovo množico \mathcal{B} .

◇

²s.s. je okrajšava za slučajno spremenljivko. To se v skripti pojavi še večkrat.

1.2 Zvezni slučajni vektorji

Definicija 3. Slučajni vektor $X : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ ima zvezno gostoto, če obstaja taka “zvezna” funkcija $f_X : \mathbb{R}^n \rightarrow [0, \infty)$, da zanjo velja:

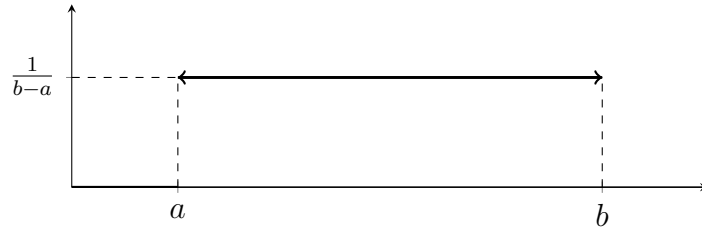
$$P(X \in \mathcal{B}) = \int_{\mathcal{B}} f_X(x_1, \dots, x_n) dx_1 \cdots dx_n = \int_{\mathcal{B}} f_X(x) dx$$

za vsako Borelovo množico $\mathcal{B} \subseteq \mathbb{R}^n$.

Mislino si, da gre za posplošeni Reimannov integral. Zvezna funkcija $f_X : \mathbb{R}^n \rightarrow [0, \infty)$ je taka, pri kateri je množica točk nezveznosti zanemarljiva za n -torni integral. Če ima slučajni vektor X “zvezno” gostoto, pravimo, da je zvezen. V tem primeru je $f_X : \mathbb{R}^n \rightarrow [0, 1]$ zvezna funkcija.

Zgled. $X \sim U(a, b)$ (enakomerna zvezna porazdelitev na (a, b)). Vse točke so “enako verjetne”. Natančneje za $a \leq c < d \leq b$:

$$P(X \in (c, d)) = \int_c^d f_{U(a,b)}(x) dx, \quad \text{kjer je} \quad f_{U(a,b)}(x) = \frac{1}{b-a} \cdot \mathbb{1}_{(a,b)}(x) \\ = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & ; x \in (a, b) \\ 0 & ; x \notin (a, b) \end{cases}$$



Slika 1.3: $f_X(x)$ za enakomerno porazdelitev

◇

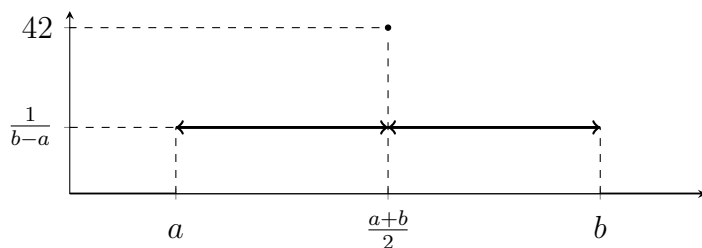
Definicija 4. Za abstraktno množico M in $A \subseteq M$ je $\mathbb{1}_A : M \rightarrow \{0, 1\}$ indikator množice A funkcija:

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

Opomba. Velja: $P(X \in A) = E(\mathbb{1}_A(X))$

Zgled. V primeru $X \sim U(a, b)$ je gostota X tudi:

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & ; x \in (a, b) \setminus \left\{ \frac{a+b}{2} \right\} \\ 42 & ; x = \frac{a+b}{2} \\ 0 & ; x \notin (a, b) \end{cases}$$



Slika 1.4: $f_X(x)$ za enakomerno porazdelitev

◇

Zgled. $D = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x^2 + y^2 < 1\}$ odprt enotski krog. Pravimo, da $(X, Y) \sim U(D)$, če ima gostoto:

$$f_{(X,Y)}(x, y) = \frac{1}{\pi} \cdot \mathbb{1}_D(x, y)$$

Množica točk nezveznosti zgornje gostote je enotska krožnica. To je zanemarljiva množica za $\int_{\mathbb{R}^2}$. ◇

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

Za $(X, Y) : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^2$ z gostoto $f_{(X,Y)} : \mathbb{R}^2 \rightarrow [0, \infty)$ velja:

$$\begin{aligned} F_{(X,Y)}(x, y) &= P((X, Y) \in (-\infty, x] \times (-\infty, y]) \\ &= \int_{(-\infty, x] \times (-\infty, y]} f_{(X,Y)}(u, v) \, du \, dv \\ &= \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y f_{(X,Y)}(u, v) \, dv \, du \\ &= \int_{-\infty}^y \int_{-\infty}^x f_{(X,Y)}(u, v) \, du \, dv \end{aligned} \tag{*}$$

Kjer smo v (*) vrstici uporabili Fubinijev izrek (integral mora biti absolutno konvergenten).

Robni komulativni porazdelitveni funkciji se glasita:

$$\begin{aligned}
 F_X(x) &= \lim_{y \rightarrow \infty} F_{(X,Y)}(x, y) \\
 &= \lim_{y \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^y \int_{-\infty}^x f_{(X,Y)}(u, v) \, dudv \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^x f_{(X,Y)}(u, v) \, dudv \\
 &= \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^{\infty} f_{(X,Y)}(u, v) \, dvdu
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_Y(y) &= \lim_{x \rightarrow \infty} F_{(X,Y)}(x, y) \\
 &= \lim_{x \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y f_{(X,Y)}(u, v) \, dudv \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^y f_{(X,Y)}(u, v) \, dudv \\
 &= \int_{-\infty}^y \int_{-\infty}^{\infty} f_{(X,Y)}(u, v) \, dvdu
 \end{aligned}$$

Od tod sledita robni gostoti:

$$f_X(x) = F'_X(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{(X,Y)}(x, v) \, dv$$

$$f_Y(y) = F'_Y(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{(X,Y)}(u, y) \, du$$

V točkah odevljivosti k.p.f. F , oz. za skoraj vse x oz. y .

1.3 Dvofazna normalna porazdelitev

Naj bo $\mu = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^2$ in naj bo $\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} \\ \sigma_{12} & \sigma_2^2 \end{bmatrix}$, kjer je $\sigma_1, \sigma_2 \in (0, \infty)$ in $\sigma_{12} \in \mathbb{R}$, simetična pozitivno definitna 2×2 matirka ($\iff \det(\Sigma) > 0$). Tedaj ima slučajni vektor (X, Y) dvorazsežno normalno porazdelitev s parametroma μ in Σ , če ima gostoto:

$$f_{(X,Y)}(x, y) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{\det \Sigma}} \cdot \exp \left(-\frac{1}{2} \left\langle \Sigma^{-1} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{pmatrix} \right\rangle \right)$$

Gostota $f_{X,Y}$ je zvezna povesod na \mathbb{R}^2 .

Opomba. Pišemo $(X, Y) \sim N(\mu, \Sigma) = N \left(\begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} \\ \sigma_{12} & \sigma_2^2 \end{bmatrix} \right)$.

Seveda je:

$$\Sigma^{-1} = \frac{1}{\sigma_1^2 \sigma_2^2 - \sigma_{12}^2} \begin{bmatrix} \sigma_2^2 & -\sigma_{12} \\ -\sigma_{12} & \sigma_1^2 \end{bmatrix}$$

Tako dobimo: $\left\langle \Sigma^{-1} \left(\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix} \right), \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix} \right\rangle = (\star)$ prepíšemo v:

$$\begin{aligned} \left\langle \Sigma^{-1} \begin{bmatrix} x - \mu_1 \\ y - \mu_2 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x - \mu_1 \\ y - \mu_2 \end{bmatrix} \right\rangle &= \frac{1}{\sigma_1^2 \sigma_2^2 - \sigma_{12}^2} \left\langle \begin{bmatrix} \sigma_2^2 & -\sigma_{12} \\ -\sigma_{12} & \sigma_1^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - \mu_1 \\ y - \mu_2 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x - \mu_1 \\ y - \mu_2 \end{bmatrix} \right\rangle \\ &= \frac{1}{\sigma_1^2 \sigma_2^2 - \sigma_{12}^2} \left\langle \begin{bmatrix} \sigma_2^2 (x - \mu_1) - \sigma_{12} (y - \mu_2) \\ \sigma_1^2 (y - \mu_2) - \sigma_{12} (x - \mu_1) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x - \mu_1 \\ y - \mu_2 \end{bmatrix} \right\rangle \\ &= \frac{\sigma_2^2 (x - \mu_1)^2 - 2\sigma_{12} (x - \mu_1) (y - \mu_2) + \sigma_1^2 (y - \mu_2)^2}{\sigma_1^2 \sigma_2^2 - \sigma_{12}^2} \end{aligned}$$

Vpeljemo $\rho = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_1 \sigma_2}$. Ker je $\det \Sigma = \sigma_1^2 \sigma_2^2 (1 - \rho^2)$ je $\det \Sigma > 0 \iff \rho^2 < 1$, oz. $\rho \in (-1, 1)$. S parametrom ρ lahko nadomestimo σ_{12} . Dobimo:

$$\left\langle \Sigma^{-1} \begin{bmatrix} x - \mu_1 \\ y - \mu_2 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x - \mu_1 \\ y - \mu_2 \end{bmatrix} \right\rangle = \frac{1}{1 - \rho^2} \left(\left(\frac{x - \mu_1}{\sigma_1} \right)^2 - 2\rho \left(\frac{x - \mu_1}{\sigma_1} \right) \left(\frac{y - \mu_2}{\sigma_2} \right) + \left(\frac{y - \mu_2}{\sigma_2} \right)^2 \right)$$

Ekvivalentno lahko torej normalno porazdelitev parametriziramo s parametri:

$$\mu_1 \in \mathbb{R}, \mu_2 \in \mathbb{R}, \sigma_1 \in (0, \infty), \sigma_2 \in (0, \infty), \rho \in (-1, 1)$$

Dobimo:

$$f_{(X,Y)}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} \exp \left(-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left(\left(\frac{x-\mu_1}{\sigma_1} \right)^2 - 2\rho \left(\frac{x-\mu_1}{\sigma_1} \right) \left(\frac{y-\mu_2}{\sigma_2} \right) + \left(\frac{y-\mu_2}{\sigma_2} \right)^2 \right) \right)$$

Vidimo, da so nivojnice funkcije $f_{(X,Y)}$ krivulje, ki so elipse s središčem v (μ_1, μ_2) .

Oglejmo si poseben primer $\mu_1 = \mu_2 = 0, \sigma_1 = \sigma_2 = 1$ (ekvivalentno, obravnavamo gostoto transformacije $U = \frac{X-\mu_1}{\sigma_1}, V = \frac{Y-\mu_2}{\sigma_2}$). Nivojnice se krivulje:

$$\begin{aligned} u^2 - 2\rho uv + v^2 &= C(1 - \rho^2) \\ \left\langle \begin{bmatrix} 1 & -\rho \\ -\rho & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \right\rangle &= C(1 - \rho^2) \end{aligned}$$

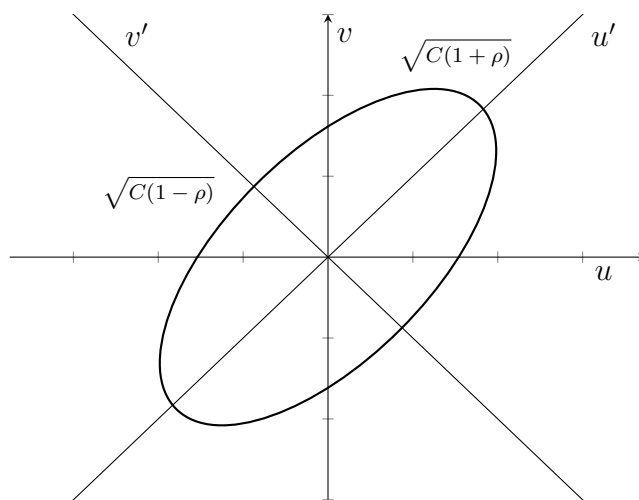
To je kvadratna forma oblike $q_A(x) = \langle Ax, x \rangle$. Izračunajmo lastni vrednosti matrike

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -\rho \\ -\rho & 1 \end{bmatrix}:$$

$$\begin{aligned} \det(A - \lambda I) &= \begin{vmatrix} 1 - \lambda & -\rho \\ -\rho & 1 - \lambda \end{vmatrix} \\ &= (1 - \lambda)^2 - \rho^2 \\ &= (1 - \lambda - \rho)(1 - \lambda + \rho) \end{aligned}$$

Lastni vrednosti sta $1 \pm \rho$.

$$\begin{aligned} \lambda_1 = 1 - \rho : \begin{bmatrix} \rho & -\rho \\ -\rho & \rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \implies \text{lastni vektor je } \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \\ \lambda_1 = 1 + \rho : \begin{bmatrix} -\rho & -\rho \\ -\rho & -\rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \implies \text{lastni vektor je } \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$



Slika 1.5: Nivojnica $N \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & \rho \\ \rho & 1 \end{bmatrix} \right)$

V koordinatah $\begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$ dobimo enačbo:

$$(1 - \rho)u'^2 + (1 + \rho)v'^2 = C(1 - \rho^2) \iff \frac{u'^2}{C(1 + \rho)} + \frac{v'^2}{C(1 - \rho)} = 1$$

Naj bo $(X, Y) \sim N\left(\begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} \\ \sigma_{12} & \sigma_2^2 \end{bmatrix}\right)$. Izkaže se, da za robni porazdelitvi velja:

$$X \sim N(\mu_1, \sigma_1^2) \quad \text{in} \quad Y \sim N(\mu_2, \sigma_2^2)$$

Nadalje se izkaže, da je $\sigma_{12} = K(X, Y)$. Posledično je ρ t.i. Pearsonov korelacijski koeficient.

Opomba. Pripomnimo, da sledi, da porazdelitev vektorja (X, Y) ni določena z robnimi porazdelitvama.

Zgled. Oglejmo si primer $(X, Y) \sim N\left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & \rho \\ \rho & 1 \end{bmatrix}\right)$. Tedaj se gostota (X, Y) glasi:

$$f_{(X,Y)}(x, y) = \frac{1}{2\pi} \cdot e^{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}(x^2 - 2\rho xy + y^2)}$$

$\rho = 0 \implies$ standardna dvorazsežna normalna porazdelitev.

◇

Posplošitev:

Pravimo, da ima vektor $X = (X_1, \dots, X_n)$ n -razsežno normalno porazdelitev s parametroma $\mu \in \mathbb{R}^n$ in $\Sigma \in \mathbb{R}^{n \times n}$ (simetrična in poz. definitna), če ima gostoto:

$$f_X(x) = (2\pi)^{-\frac{n}{2}} (\det \Sigma)^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{1}{2} \langle \Sigma^{-1}(x - \mu), x - \mu \rangle\right)$$

Poglavje 2

Neodvisnost

Definicija 5. Slučajne spremenljivke X_1, \dots, X_n , so neodvisne, če velja:

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

za vse realne n -terice $(x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$.

Enakost (\star) lahko prepišemo v:

$$P(X \in (-\infty, x_1] \times \dots \times (-\infty, x_n]) = P(X_1 \in (-\infty, x_1]) \cdots P(X_n \in (-\infty, x_n])$$

Izkaže se, da so komponente vektorja X neodvisne natanko tedaj, ko velja:

$$P(X_1 \in B_1, X_2 \in B_2, \dots, X_n \in B_n) = P(X_1 \in B_1) \cdot P(X_2 \in B_2) \cdots P(X_n \in B_n)$$

za vse n -terice Borelovih množic $B_i \subseteq \mathbb{R}$.

Torej za slučajni spremenljivki X, Y velja, da sta neodvisni natanko tedaj, ko:

$$P(X \in A, Y \in B) = P(X \in A) \cdot P(Y \in B)$$

za vse intervale $A, B \subseteq \mathbb{R}$

Spomnimo se, da so dogodki E_1, E_2, \dots, E_n neodvisni:

$$P(E_{i_1} \cap \dots \cap E_{i_k}) = P(E_{i_1}) \cdots P(E_{i_k})$$

za $\forall k \in \{2, 3, \dots, n\}$ in vsako k -terico $i_1 < i_2 < \dots < i_k$.

Opomba. Če so X_1, \dots, X_n neodvisne, so tudi paroma neodvisne, t.j. neodvisni sta X_i in X_j za vsak par $i \neq j$. Obratno ne velja v splošnem.

Trditev 2. Naj ima slučajni vektor (X, Y) "zvezno" gostoto $f_{(X,Y)} : \mathbb{R}^2 \rightarrow [0, \infty)$. X in Y sta neodvisni \iff

$$f_{(X,Y)}(x, y) = f_X(x) \cdot f_Y(y)$$

za skoraj vse realne pare $(x, y) \in \mathbb{R}^2$.

Dokaz. Definicija neodvisnosti pravi:

$$P((X, Y) \in (-\infty, x] \times (-\infty, y]) = P(X \in (-\infty, x])P(Y \in (-\infty, y])$$

Oziroma:

$$\begin{aligned} \int_{(-\infty, x] \times (-\infty, y]} f_{(X,Y)}(u, v) dudv &= \int_{(-\infty, x]} f_X(u) du \int_{(-\infty, y]} f_Y(v) dv \\ \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y f_{(X,Y)}(u, v) dvdu &= \int_{-\infty}^x f_X(u) du \int_{-\infty}^y f_Y(v) dv \end{aligned}$$

(\implies) Uporabimo osnovni izrek analize in odvajamo najprej po x :

$$\int_{-\infty}^y f_{(X,Y)}(x, y) dv = f_X(x) \int_{-\infty}^y f_Y(v) dv$$

Odvajati smemo skoraj v vseh točka $x \in \mathbb{R}$, saj gostote niso vedno povsod zvezne.

Odvajamo še po y :

$$f_{(X,Y)}(x, y) = f_X(x)f_Y(y)$$

Velja za skoraj vse x in y .³

(\impliedby) Če veja $f_{(X,Y)}(u, v) = f_X(u)f_Y(v)$ za skoraj vse u, v veja tudi:

$$\int_{(-\infty, x] \times (-\infty, y]} f_{(X,Y)}(u, v) dudv = \int_{(-\infty, x] \times (-\infty, y]} f_X(u) \cdot f_Y(v) dudv$$

za vse⁴ x in y . Leva stran je $F_{(X,Y)}(x, y)$, na desni strani pa dvojni integral spremenimo v dvakratnega:

$$\begin{aligned} \int_{(-\infty, x] \times (-\infty, y]} f_X(u) \cdot f_Y(v) dudv &= \int_{(-\infty, x]} f_X(u) \int_{(-\infty, y]} f_Y(v) dvdu \\ &= \int_{(-\infty, x]} f_X(u) du \int_{(-\infty, y]} f_Y(v) dv \\ &= F_X(x) \cdot F_Y(y) \end{aligned}$$

□

³Enakost za skoraj vse x in y pomeni enakost za vse integrale po Borelovih množicah.

⁴Če sta funkciji skoraj povsod enaki je integral funkcij enak povsod.

Posledica 1. Če je $(X, Y) \sim N\left(\begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} \\ \sigma_{12} & \sigma_2^2 \end{bmatrix}\right)$ potem sta X in Y neodvisni $\iff \sigma_{12} \iff \rho = 0$.

Dokaz. (\implies) Spomnimo se, da ima (X, Y) gostoto:

$$f_{(X,Y)}(x, y) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{\det \Sigma}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\langle \Sigma^{-1}(\vec{x}-\vec{\mu}), \vec{x}-\vec{\mu} \rangle}$$

Če za f_X f_Y izberemo "standardne" funkcije zaradi njihove zveznosti, dobimo neodvisnost natanko tedaj, ko velja:

$$f_{(X,Y)}(x, y) = f_X(x) \cdot f_Y(y)$$

za vse pare x, y , kjer sta:

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu_1}{\sigma_1}\right)^2} \quad \text{in} \quad f_Y(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y-\mu_2}{\sigma_2}\right)^2}$$

To pomeni:

$$\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{\det \Sigma}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\langle \Sigma^{-1}(\vec{x}-\vec{\mu}), \vec{x}-\vec{\mu} \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu_1}{\sigma_1}\right)^2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y-\mu_2}{\sigma_2}\right)^2}$$

Če privzamemo veljavnost zgornjega razcepa in vstavimo $(x, y) = (\mu_1, \mu_2)$ dobimo:

$$\frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sigma_1 \sigma_2 \sqrt{1-\rho^2}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \implies 1 - \rho^2 = 1 \implies \rho = 0$$

(\Leftarrow) Očitno. Vstavimo $\rho = 0$. □

Opomba. Za $\mu \in \mathbb{R}^n$ in simetrično pozitivno definitno matriko $\Sigma \in \mathbb{R}^{n \times n}$ je slučajni vektor $X : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ porazdeljen normalno s parametroma μ in Σ ($X \sim N(\mu, \Sigma)$), če ima gostoto:

$$f_X(x) = (2\pi)^{-\frac{n}{2}} (\det \Sigma)^{-\frac{1}{2}} e^{-\frac{1}{2}\langle \Sigma^{-1}(x-\mu), x-\mu \rangle}$$

Izkaže se, da sledi:

$$X_i \sim N(\mu_i, \Sigma_{ii}) \quad \text{in da je} \quad \Sigma_{ij} = K(X_i, X_j) \quad \text{za} \quad i \neq j.$$

Dalje sledi, da so X_1, \dots, X_n neodvisne $\iff \Sigma$ diagonalna. Posledično so komponente večrazsežno normalno porazdeljenega slučajnega vektorja neodvisne natanko tedaj, ko so paroma neodvisne.

Posledica 2. Naj ima slučajni vektor (X, Y) “zvezno” gostoto $f_{X,Y} : \mathbb{R}^2 \rightarrow [0, \infty)$.
 X in Y neodvisni \iff

$$f_{(X,Y)}(x, y) = \phi(x) \cdot \psi(y)$$

za skoraj vse pare x in y in neki nenegativni integrabilni funkciji ϕ in ψ .

Dokaz. (\implies) Že vemo.

(\impliedby) Iz razcepa $f_{(X,Y)}(x, y) = \phi(x) \cdot \psi(y)$ sledi:

$$F_{(X,Y)}(x, y) = \int_{-\infty}^x \phi(u) du \int_{-\infty}^y \psi(v) dv$$

Zato:

$$\begin{aligned} \lim_{y \rightarrow \infty} F_{(X,Y)}(x, y) &= \lim_{y \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^x \phi(u) du \int_{-\infty}^y \psi(v) dv \\ F_X(x) &= \int_{-\infty}^x \phi(u) du \int_{-\infty}^{\infty} \psi(v) dv \end{aligned}$$

Posledično je po osnovnem izreku analize:

$$f_X(x) = \phi(x) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \psi(v) dv$$

Simetrično je:

$$f_Y(y) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi(v) dv \cdot \psi(y)$$

Ker je $\int_{\mathbb{R}^2} f_{(X,Y)}(u, v) dudv = 1$ sledi:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi(u) du \int_{-\infty}^{\infty} \psi(v) dv = 1$$

Sledi:

$$\phi(x) \cdot \psi(y) = \phi(x) \int_{-\infty}^{\infty} \psi(v) dv \int_{-\infty}^{\infty} \phi(u) du \psi(y) = f_X(x) \cdot f_Y(y)$$

□

Poglavje 3

Funkcije slučajnih spremenljivk in slučajnih vektorjev

3.1 Slučajne spremenljivke

Naj bo X slučajna spremenljivka in $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ zvezna bijekcija. Potem je $Y = g \circ X : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ tudi slučajna spremenljivka, saj je:

$$\begin{aligned}\{Y \leq y\} &\equiv \{\omega \in \Omega : g(X(\omega)) \leq y\} \\ &= \{\omega \in \Omega : g(X(\omega)) \in (-\infty, y]\} \\ &= \{\omega \in \Omega : X(\omega) \in g^{-1}((-\infty, y])\} \\ &= \{X \in \underbrace{g^{-1}((-\infty, y])}_{\text{Borelova množica}}\} \in \mathcal{F}\end{aligned}$$

Torej je $\{Y \leq y\}$ dogodek. Pravimo, da je Y *funkcija slučajne spremenljivke* X . Vprašanje: kako je porazdelitveno funkcijo za Y ponazoriti s pomočjo g in porazdelitvene funkcije za X ?

Vzemimo, da je $g : (a, b) \rightarrow (c, d)$ strogo naraščujoča zvezna bijekcija, z zalogo vrednosti (a, b) za $-\infty \leq a < b \leq \infty$, torej $P(X \in (a, b)) = 1$. Vzemimo, da je f strogo naraščujoča, zvezna funkcija, z zalogo vrednosti (a, b) . Za $y \in (a, b)$ je:

$$\begin{aligned}F_Y(y) &= P(g \circ X \leq y) = P(X \leq g^{-1}(y)) \\ &= F_X(g^{-1}(y))\end{aligned}$$

Za $y \leq a$ je $F_Y(y) = 0 = P(Y \leq y)$ (nemogoč dogodek), za $y \geq b$ pa $F_Y(y) = 1$.

Poglejmo si najprej diskreten primer. Če je X diskretna slučajna spremenljivka z vrednostmi $\{x_i\}_{i \in I}$ in je g funkcija, ki preslika množico $\{x_i\}_{i \in I}$ na množico $\{y_i\}_{i \in J}$,

je $f \circ X$ diskretna slučajna spremenljivka z verjetnostno funkcijo:

$$P(g(X) = y_j) = \sum_{i: g(x_i) = y_j} P(X = x_i)$$

Zgled.

$$X \sim \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \end{pmatrix}, \quad g(x) = x^2$$

Potem:

$$X^2 \sim \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix}$$

◇

Poglejmo si zdaj še zvezen primer. Če je X slučajna spremenljivka z zvezno gostoto f_X , ki je od 0 različna na intervalu (a, b) in $g : (a, b) \rightarrow (c, d)$ zvezna bijekcija, potem je tudi Y zvezno porazdeljena slučajna spremenljivka in velja:

$$F_{g(X)}(y) = P(g(X) \leq y) = \begin{cases} 1 & ; y \geq d \\ F_X(g^{-1}(y)) & ; y \in (c, d) \\ 0 & ; y \leq c \end{cases}$$

Če je f odvedljiva, sledi:

$$f_{g(X)}(y) = \frac{d}{dz} F_{g(X)}(y) = \begin{cases} \frac{f_X(g^{-1}(y))}{g'(g^{-1}(y))} & ; y \in (c, d) \\ 0 & ; \text{sicer} \end{cases}$$

Podobno ravnamo v primeru, ko je f strogo padajoča funkcija:

$$\begin{aligned} F_{g(X)}(y) &= P(g(X) \leq y) \\ &= P(X \geq g^{-1}(y)) \\ &= 1 - P(X < g^{-1}(y)) \\ &= 1 - F_X(g^{-1}(y)) \end{aligned}$$

Nadaljujemo podobno kot prej. Za splošno odvedljivo bijekcijo $f : (a, b) \rightarrow (c, d)$ potem velja transformacijska formula:

$$f_{g(X)}(y) = \frac{f_X(g^{-1}(y))}{|g'(g^{-1}(y))|} = p_X(g^{-1}(y)) \cdot (g^{-1}(y))', \quad y \in (c, d)$$

Če pa funkcija ni povsod naraščujoča oz. padajoča, potem njeno definicijsko območje razdelimo na intervale monotnosti in obravnavamo vsakega posebj.

Zgled. Naj bo $X \sim N(0, 1)$, $f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$ in $\alpha, \beta \in \mathbb{R}, \alpha \neq 0$. Kakšna je porazdelitev $\alpha X + \beta$?

Gre za $g(X)$, kjer je $g(x) = \alpha x + \beta$. To je zvezno odvedljiva bijekcija $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, za katero $g^{-1}(z) = \frac{z-\beta}{\alpha}$ in $g'(x) = \alpha$. Transformacijska formula nam da:

$$f_{\alpha X + \beta}(z) = \frac{1}{|\alpha|} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z-\beta}{\alpha} \right)^2}$$

Torej $\alpha X + \beta \sim N(\beta, \alpha^2)$

◇

Zgled. Oglejmo si primer nemonotone funkcije g . Naj bo $g : \mathbb{R} \rightarrow [0, \infty), g(x) = x^2$.

Ideja: $P(X^2 \in (c, d))$ bomo izpeljali, kot $\int_c^d \dots$ in s tem prepoznavali gostoto slučajne spremenljivke X^2 .

Dovolj je obravnavati primer $0 < c < d < \infty$:

$$\begin{aligned} P(X^2 \in (c, d)) &= P(c < X^2 < d) \\ &= P(\sqrt{c} < |X| < \sqrt{d}) \\ &= P(\sqrt{c} < X < \sqrt{d}) + P(-\sqrt{d} < X < -\sqrt{c}) \\ &= \underbrace{\int_{\sqrt{c}}^{\sqrt{d}} f_X(x) dx}_{z=x^2, x=\sqrt{z}} + \underbrace{\int_{-\sqrt{d}}^{-\sqrt{c}} f_X(x) dx}_{z=x^2, x=-\sqrt{z}} \\ &= \int_c^d f_X(\sqrt{z}) \frac{1}{2\sqrt{z}} dz + \int_d^c f_X(-\sqrt{z}) \frac{-1}{2\sqrt{z}} dz \\ &= \int_c^d \frac{f_X(\sqrt{z}) + f_X(-\sqrt{z})}{2\sqrt{z}} dz \end{aligned}$$

Torej:

$$f_{X^2}(z) = \frac{f_X(\sqrt{z}) + f_X(-\sqrt{z})}{2\sqrt{z}}$$

◇

Zgled. Naj bo $X \sim N(0, 1)$ in $Y = X^2$ (mali g je torej kvadriranje). Za $y < 0$ je $F_Y(y) = 0 = P(Y \leq y)$ nemogoč dogodek, saj $Y \geq 0$. Za $y \geq 0$ uporabimo zgornjo formulo in dobimo:

$$f_{X^2}(y) = f_Y(y) = \frac{f_X(\sqrt{y}) + f_X(-\sqrt{y})}{2\sqrt{y}} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y}{2}} + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y}{2}}}{2\sqrt{y}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} y^{-\frac{1}{2}} \cdot e^{-\frac{y}{2}}$$

Torej je:

$$X^2 \sim \text{Gama}\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) = \chi_1^2$$

◇

3.2 Slučajni vektorji

Trditev 3. Naj bo $X : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ slučajni vektor in $h : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ zvezna funkcija. Tedaj je $h(X) = h(X_1, X_2, \dots, X_n)$ slučajna spremenljivka.

Dokaz.

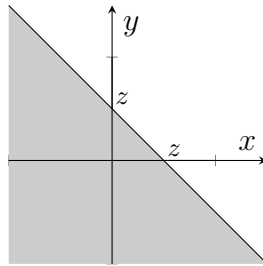
$$\begin{aligned} \{h(X_1, \dots, X_n) \leq z\} &= \{h(X) \in (-\infty, z]\} \\ &= \{X \in h^{-1}((-\infty, z])\} \\ &= \{\omega \in \Omega \mid X(\omega) \in h^{-1}((-\infty, z])\} \end{aligned}$$

Tu je $h^{-1}((-\infty, z]) = \{x \in \mathbb{R}^n \mid h(x) \in (-\infty, z]\}$ prasluka. Ker je h zvezna in je $(-\infty, z]$ zaprta v \mathbb{R} je $h^{-1}((-\infty, z])$ zaprta in zato Borelova. \square

Zgled. Naj ima (X, Y) "zvezno" gostoto $f_{(X,Y)}$. Zanima nas porazdelitev $X + Y$ (tu interpretiramo $X + Y = h(X, Y)$ za $h : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$, $h(x, y) = x + y$)⁵. Izračunajmo k.p.f. slučajne spremenljivke $X + Y$:

$$\begin{aligned} P(X + Y \leq z) &= P((X, Y) \in h^{-1}((-\infty, z])) \\ &= P((X, Y) \in \{(x, y) \mid x + y \leq z\}) \\ &= \int_{x+y \leq z} f_{(X,Y)}(x, y) \, dx dy \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{z-y} f_{(X,Y)}(x, y) \, dx dy \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^z f_{(X,Y)}(u - y, y) \, du dy \\ &= \int_{-\infty}^z \int_{-\infty}^{\infty} f_{(X,Y)}(u - y, y) \, dy du \end{aligned} \tag{*}$$

Kjer smo v (*) vrstici vpeljali novo spremenljivko $u = x + y$.



Slika 3.1: $\{(x, y) \mid x + y \leq z\}$

⁵To ni bijekcija; preslikava ni injektivna, saj za $(2, 1)$ in $(1, 2)$ dobimo isti rezultat, je pa surjektivna. Zato prasluka vrne vse pare (x, y) , za katere velja, da so enaki neki vrednosti $h(x, y)$. Recimo $h(x, y) = z$ in $z = 3$. Prasluka potem vrne vse pare (x, y) , da je $x + y = 3$. V našem primeru vrne vse pare (x, y) , ki so $\leq z$

Sledi:

$$f_{X+Y}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{(X,Y)}(z-y, y) dy$$

Če sta X in Y neodvisni dobimo:

$$f_{X+Y}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_X(z-y) \cdot f_Y(y) dy$$

Slednji pravimo *konvolucija* funkcij f_X in f_Y . ◇

Trditev 4. Naj bosta X in Y neodvisni slučajni spremenljivki. $X \sim \chi^2(m)$ in $Y \sim \chi^2(n)$. Potem je:

$$X + Y \sim \chi^2(m+n)$$

Dokaz. Vzemimo $X \sim \chi^2(m)$ in $Y \sim \chi^2(n)$. Izračunajmo $X + Y$. Ta je nenegativna (saj je χ^2 negativna) in zato $f_{X+Y}(z) = 0$ za $z \leq 0$. Za $z > 0$ pa je:

$$\begin{aligned} f_{X+Y}(z) &= \frac{1}{2^{\frac{m}{2}} \Gamma\left(\frac{m}{2}\right) \cdot 2^{\frac{n}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \int_0^z x^{\frac{m}{2}-1} e^{-\frac{x}{2}} (z-x)^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{z-x}{2}} dx \\ &= \frac{1}{2^{\frac{m+n}{2}} \cdot \Gamma\left(\frac{m}{2}\right) \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} e^{-\frac{z}{2}} \int_0^z x^{\frac{m}{2}-1} (z-x)^{\frac{n}{2}-1} dx \quad (\star) \\ &= \frac{1}{2^{\frac{m+n}{2}} \cdot \Gamma\left(\frac{m}{2}\right) \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} e^{-\frac{z}{2}} z^{\frac{m+n}{2}-1} \underbrace{\int_0^1 t^{\frac{m}{2}-1} \cdot (1-t)^{\frac{n}{2}-1} dt}_{\beta\left(\frac{m}{2}, \frac{n}{2}\right) = \frac{\Gamma\left(\frac{m}{2}\right) \cdot \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{m}{2} + \frac{n}{2}\right)}} \\ &= \frac{1}{2^{\frac{m+n}{2}} \Gamma\left(\frac{m+n}{2}\right)} z^{\frac{m+n}{2}-1} e^{-\frac{z}{2}} \end{aligned}$$

Kjer smo v (\star) vrstici vpeljali novo spremenljivko $tz = x$. Torej je:

$$X + Y \sim \chi^2(m+n)$$

□

Posledica 3. Naj bodo neodvisne slučajne spremenljivke $X_1, X_2, \dots, X_m \sim N(0, 1)$ porazdeljene standardno normalno. Potem je $Y = X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_n^2 \sim \chi^2(n)$.

Dokaz. Vemo že, da je $X_i^2 \sim \chi^2(1)$. Posledica sledi takoj iz trdive, ter trditve da so kvadrati neodvisnih slučajnih spremenljivk med seboj neodvisni. □

V splošnem porazdelitev slučajne spremenljivke $h(X_1, \dots, X_n)$ najpreprosteje dobimo z dopolnitvijo funkcije $h : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ do zvezno diferenciable preslikave $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ (na primer $h(x, y) = x + y$ lahko dopolnimo do $g(x, y) = (x + y, y)$) in izračunamo porazdelitev transformacije $g(X)$.

Trditev 5. Naj bo $X : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ slučajni vektor z “zvezno” gostoto $f_X : \mathbb{R}^n \rightarrow [0, \infty)$. Dalje naj bo $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ (ali $g : D \rightarrow E$ za primerni množici $D, E \subseteq \mathbb{R}^n$, kjer $P(X \in D) = 1$) zvezno diferenciablena bijekcija. Tedaj ima slučajni vektor $g(X) : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ gostoto:

$$f_{g(X)}(z) = f(g^{-1}(z)) |\det J_{g^{-1}}(z)| = \frac{f(g^{-1}(z))}{|\det J_g(g^{-1}(z))|}$$

za vse $z \in \mathbb{R}^n$ (oziroma $z \in E$).

Dokaz. Rdeča nit: $P(g(X) \in C)$ želimo izraziti kot $\int_C \dots$, kjer bo \dots gostota:

$$\begin{aligned} P(g(X) \in C) &= P(X \in g^{-1}(C)) \\ &= \int_{g^{-1}(C)} f_X(x) dx \\ &= \int_C f_X(g^{-1}(z)) |\det J_{g^{-1}}(z)| dz \end{aligned} \quad (\star)$$

Kjer smo v (\star) vrstici vpeljali novo spremenljivko $x = g^{-1}(z)$, $dx = |\det J_{g^{-1}}(z)| dz$. □

Zapišimo dvorazsežen primer v “tradicionalnih” oznakah:

Transformacijo $g(X, Y)$ zapišemo kot:

$$(U, V) = (U(X, Y), V(X, Y))$$

Njen inverz $g^{-1}(U, V)$ pa kot:

$$(X, Y) = (X(U, V), Y(U, V))$$

Tedaj:

$$|\det J_{g^{-1}}(u, v)| = \left| \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} \end{vmatrix} \right|_{(u,v)}$$

in

$$|\det J_g(g^{-1}(u, v))| = \left| \begin{vmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{vmatrix} \right|_{(x(u,v), y(u,v))}$$

Transformacijska formula se tedaj glasi:

$$f_{U,V}(u, v) = f_{(X,Y)}(x(u, v), y(u, v)) \cdot \left| \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} \end{vmatrix} \right|_{(u,v)}$$

Upošteva je $g \circ g^{-1} = \text{id}$ je posledično $J_g(g^{-1}(u, v)) \cdot J_{g^{-1}}(u, v) = I$. Zgornje lahko prepišemo v:

$$f_{U,V}(u, v) = \frac{f_{(X,Y)}(x(u, v), y(u, v))}{\left| \begin{vmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{vmatrix} \right|_{(x(u,v), y(u,v))}}$$

Zgled.

1. Oglejmo si transformacijo:

$$U = X + Y, V = Y \implies Y = V, X = U - V$$

To pomeni $g(x, y) = (x + y, y)$ in $g^{-1}(u, v) = (u - v, v)$.

$$\det J_g(x, y) = \begin{vmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = 1$$

Torej:

$$f_{(X+Y,Y)}(u, v) = \frac{f_{(X,Y)}(u - v, v)}{1}$$

Gostota slučajne spremenljivke $X + Y$ je robna gostota oziroma:

$$f_{X+Y}(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{(X,Y)}(u - v, v) dv$$

2. Oglejmo si še transformacijo:

$$U = \frac{X}{Y}, V = Y \implies X = UV, Y = V$$

Pripomnimo, da je transformacija $g(x, y) = \left(\frac{x}{y}, y\right)$ definirana le na $\{Y \neq 0\} = \mathbb{R} \times \mathbb{R} \setminus \{0\}$. Razumemo lahko $g : \mathbb{R} \times \mathbb{R} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{R} \times \mathbb{R} \setminus \{0\}$. Za “zvezen” slučajni vektor (X, Y) seveda velja $P(Y = 0) = 0$ oziroma $P((X, Y) \in \mathbb{R} \times \mathbb{R} \setminus \{0\}) = 1$. Po transformacijski formuli velja:

$$f_{\left(\frac{X}{Y}, Y\right)}(u, v) = \frac{f_{(X,Y)}(uv, v)}{\left| \begin{vmatrix} \frac{1}{y} & * \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \right|_{y=y(u,v)}} = |v| f_{(X,Y)}(uv, v)$$

in:

$$f_{\frac{X}{Y}}(u) = \int_{-\infty}^{\infty} |v| f_{(X,Y)}(uv, v) dv$$

◇

Trditev 6. Naj za $X : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ velja $X \sim N(\mu, \Sigma)$ ($\mu \in \mathbb{R}^n, \Sigma \in \mathbb{R}^{n \times n}$ s.p.d.) in naj bo $A : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ obrljiva matrika. Dalje naj bo $\nu \in \mathbb{R}^n$. Tedaj:

$$AX + \nu \sim N(A\mu + \nu, A\Sigma A^\top)$$

Dokaz. Imamo $g(x) = Ax + \nu$ in $g^{-1}(z) = A^{-1}(z - \nu)$. g je "linearna" (afina) preslikava $\implies J_g(x) \equiv A$. Transformacijska formula pove:

$$\begin{aligned} f_{AX+\nu}(z) &= \frac{1}{|\det A|} f_X(A^{-1}(z - \nu)) \\ &= \frac{1}{\sqrt{|\det A|^2}} (2\pi)^{-\frac{n}{2}} (\det \Sigma)^{-\frac{1}{2}} e^{-\frac{1}{2} \langle \Sigma^{-1}(A^{-1}(z-\nu)-\mu), A^{-1}(z-\nu)-\mu \rangle} \quad (\star) \\ &= (2\pi)^{-\frac{n}{2}} \left(\det(A\Sigma A^\top) \right)^{-\frac{1}{2}} e^{-\frac{1}{2} \langle (A^\top)^{-1} \Sigma^{-1} A^{-1}(z-\nu-A\mu), z-\nu-A\mu \rangle} \end{aligned}$$

V vrstici (\star) velja:

$$\begin{aligned} |\det A| &= \sqrt{|\det A|^2} = \sqrt{\det A \cdot \det A^\top} = \sqrt{\det(AA^\top)} \\ A^{-1}(z - \nu) - \mu &= A^{-1}((z - \nu) - A\mu) \end{aligned}$$

□

Posledica 4. Naj bo $X \sim N(\mu, \Sigma)$. Razcepimo $\Sigma = LL^\top$ (npr. Cholesky). Sledi, da je $X \sim LZ + \mu$, kjer je $Z \sim N(0, I_{n \times n})$ n -razsežna standardna normalna porazdelitev. To je ključnega pomena za simulacijo vzorčenja.⁶

⁶To pomeni, da lahko do katere koli normalne porazdelitve pridemo tako, da naredimo afino preslikavo s spodnje trikotno matriko in nekim vektorjem na standarni normalni porazdelitvi.

Poglavje 4

Matematično upanje oz. pričakovna vrednost

Definicija 6. Naj bo $X : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ slučajna spremenljivka z “zvezno” gostoto f_X . Teda je *pričakovana vrednost* slučajne spremenljivke X definirana kot:

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

za zvezne porazdelitve, če integral absolutno konvergira, t.j. $\int_{-\infty}^{\infty} |x| f_X(x) dx < \infty$ in:

$$E(X) = \sum_i x_i P(X = x_i)$$

za diskretne porazdelitve, če vrsta absolutno konvergira, t.j. $\sum_i |x_i| P(X = x_i) < \infty$.

Če je $X : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ slučajni vektor, definiramo pričakovano vrednost “po komponentah”:

$$E \left(\begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} E(X_1) \\ \vdots \\ E(X_n) \end{bmatrix}$$

Podobno velja za slučajno matriko.

Zgled.

- Če je X porazdeljena Cauchyjevo $E(X)$ ne obstaja. Če sta X in Y neodvisni in porazdeljeni standardno normalno, t.j. $X, Y \sim N(0, 1)$ je $\frac{X}{Y}$ porazdeljena Cauchyjevo.
- $X \sim N(\mu, \sigma^2) \implies E(X) = \mu$

$$\bullet \quad X \sim U(a, b) \implies E(X) = \frac{a+b}{2}$$

◇

Trditev 7. Naj bo X slučajna spremenljivka z “zvezno” gostoto f_X in naj bo $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ (ali $g : (a, b) \rightarrow (c, d)$) zvezna funkcija. Tedaj je:

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

če obstaja.

Dokaz. Za primer, ko je $X : \Omega \rightarrow (a, b)$ (t.j. $P(X \in (a, b)) = 1$) in je $g : (a, b) \rightarrow (c, d)$ zvezno diferenciablena bijekcija. Vemo, da v tem primeru velja:

$$f_{g(X)}(z) = f_X(g^{-1}(z)) \left| (g^{-1})'(z) \right| \quad \text{za } z \in (c, d)$$

Po definiciji je tedaj:

$$\begin{aligned} E(g(X)) &= \int_{(c,d)} f_X(g^{-1}(z)) \left| (g^{-1})'(z) \right| dz & (\star) \\ &= \int_{(a,b)} g(x) f_X(x) dx \\ &= \int_a^b g(x) f_X(x) dx \quad \text{za } a < b \end{aligned}$$

Kjer smo v (\star) vrstici vpeljali novo spremenljivko $x = g^{-1}(z)$. □

Zgled. Posebej izračunajmo $E(|X|)$ za “zvezno” slučajno spremenljivko X . Najprej izračunajmo njeno komulativno porazdelitveno funkcijo:

$$\begin{aligned} F_{|X|}(z) &= P(|X| \leq z) = P(-z \leq X \leq z) = F_X(z) - F_X(-z) \\ \implies f_{|X|}(z) &= f_X(z) + f_X(-z) \quad \text{za } z > 0 \end{aligned}$$

Sledi:

$$\begin{aligned} E(|X|) &= \int_0^{\infty} z (f_X(z) + f_X(-z)) dz \\ &= \int_0^{\infty} x f_X(x) dx + \int_0^{-\infty} (-x) f_X(x) (-dx) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} |x| f_X(x) dx \end{aligned}$$

◇

Posledica 5. Za $p \neq 0$ velja:

$$E(|X|^p) = \int_0^{\infty} z^p (f_X(z) + f_X(-z)) dz = \int_{-\infty}^{\infty} |x|^p f_X(x) dx$$

Dokaz. V prvi enakosti smo uporabili trditev in $F_{|X|}(z^p) = P(|X|^p \leq z^p)$ v drugi enakosti pa račun zgoraj. \square

Trditev 8. Naj ima slučajni vektor (X, Y) "zvezno" gostoto $f_{(X,Y)}$ in naj bo $h : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ (ali $D \rightarrow \mathbb{R}$ za $P((X, Y) \in D) = 1$) zvezna funkcija. Tedaj je:

$$E(h(X, Y)) = \int_{\mathbb{R}^2} h(x, y) f_{(X,Y)}(x, y) dx dy$$

Dokaz. Za primer, ko je h mogoče dopolniti do zveno diferenciable bijekcije $g : D \rightarrow E$ kot $g(x, y) = (h(x, y), k(x, y))$, kjer sta D in E odprti množici v \mathbb{R}^2 . Tedaj je:

$$f_{h(X,Y)}(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{g(X,Y)}(u, v) dv = \int_{-\infty}^{\infty} f_{(X,Y)}(g^{-1}(u, v)) |\det J_{g^{-1}}(u, v)| dv$$

in

$$\begin{aligned} E(h(X, Y)) &= \int_{-\infty}^{\infty} u f_{h(X,Y)}(u) du \\ &= \int_{\mathbb{R}^2} u f_{(X,Y)}(g^{-1}(u, v)) |\det J_{g^{-1}}(u, v)| dudv \quad (\star) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) f_{(X,Y)}(x, y) dx dy \end{aligned}$$

Kjer smo v (\star) vrstici naredili substitucijo $(x, y) = g^{-1}(u, v)$, $(u, v) = g(x, y)$ in $dx dy = |\det J_{g^{-1}}(u, v)| dudv$. \square

Zgled.

- Poglejmo si $h(x, y) = x + y$:

$$\begin{aligned} E(X + Y) &= \int_{\mathbb{R}^2} (x + y) f_{(X,Y)}(x, y) dx dy \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x \int_{-\infty}^{\infty} f_{(X,Y)}(x, y) dy dx + \int_{-\infty}^{\infty} y \int_{-\infty}^{\infty} f_{(X,Y)}(x, y) dx dy \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x f_X(x) dx + \int_{-\infty}^{\infty} y f_Y(y) dy \\ &= E(X) + E(Y) \end{aligned}$$

Dokazali smo *aditivnost* pričakovane vrednosti.

- Poglejmo si še $h(x, y) = xy$:

$$E(XY) = \int_{\mathbb{R}^2} xy f_{(X,Y)}(x, y) dx dy$$

Če integral absolutno konvergira.

◇

Posledica 6. Če sta X in Y neodvisni slučajni spremenljivki, za kateri obstajata $E(X)$ in $E(Y)$, obstaja tudi $E(XY)$ in velja:

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

Dokaz.

$$\begin{aligned} E(|XY|) &= \iint_{\mathbb{R}^2} |xy| f_{(X,Y)}(x, y) \, dx dy \\ &= \iint_{\mathbb{R}^2} |x| |y| f_X(x) f_Y(y) \, dx dy \\ &= \int_{\mathbb{R}} |x| f_X(x) \, dx \int_{\mathbb{R}} |y| \cdot f_Y(y) \, dy < \infty \end{aligned}$$

Pokazali smo obstoj. Enak račun pokaže $E(XY) = E(X) \cdot E(Y)$. □

Posledica 7. Če je $X \leq Y$ (z verjetnostjo 1) velja $E(X) \leq E(Y)$, če obstaja $E(Y)$.

Dokaz. Iz aditivnosti sledi:

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

Ker je $Y - X \geq 0$ z verjetnostjo 1, je $E(Y - X) \geq 0$. □

Izrek 2. 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

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

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 nanegativni slučajni spremenljivki U in V velja:

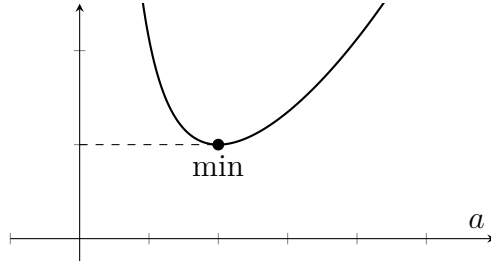
$$UV \leq \frac{1}{2} (U^2 + V^2)$$

kjer velja enačaj, 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:

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

Iz $E(X^2) < \infty$ in $E(Y^2) < \infty$ ter monotnosti sledi $E(|XY|) < \infty$, torej smo dokazali obstoj in:

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



Slika 4.1: Graf $a^2 + \frac{1}{a^2}$

Minimum desne strani (po $a \in (0, \infty)$) je dosežen pri $a^2 = \sqrt{\frac{E(Y^2)}{E(X^2)}}$ in znaša:

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

torej je:

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

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

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

□

Posledica 8. Če je $E(X^2) < \infty$, je $E(|X|) < \infty$ (vzamemo $Y \equiv 1$) in $E(|X|) \leq \sqrt{E(X^2)}$.