

# Vettori aleatori

## Variabili aleatorie congiunte

$(S, \mathcal{A}, \mathbb{P})$  spazio di probabilità,  $X, Y$  variabili aleatorie

La coppia  $(X, Y)$  è detta vettore aleatorio

## Funzione di ripartizione congiunta

$$F(x, y) = \mathbb{P}((X \leq x) \cap (Y \leq y))$$

Proprietà:

- è continua da destra:  $F(x, y) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} F(x + \epsilon, y) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} F(x, y + \epsilon)$

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

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

$$\lim_{(x, y) \rightarrow (+\infty, +\infty)} F(x, y) = 1$$

Inoltre:

$$\mathbb{P}((x_1 < X \leq x_2) \cap (y_1 < Y \leq y_2)) = F(x_2, y_2) - F(x_1, y_2) - F(x_2, y_1) + F(x_1, y_1)$$

## Funzioni marginali

### Funzioni di ripartizione marginali

$$F_X(x) = F(x, +\infty)$$

$$F_Y(y) = F(+\infty, y)$$

### Funzioni di densità marginali

$$f_X(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) dy$$

$$f_Y(y) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) dx$$

### Funzioni di massa marginali

$$P_X(x) = \sum_i P(x, y_i)$$

$$P_Y(y) = \sum_i P(x_i, y)$$

# Indipendenza

$X, Y$  variabili aleatorie,  $D_X, D_Y$  sottoinsiemi degli insiemi di definizione di  $X, Y \implies X \perp\!\!\!\perp Y$  se

$$\mathbb{P}((X \in D_X) \cap (Y \in D_Y)) = \mathbb{P}(X \in D_X) \cdot \mathbb{P}(Y \in D_Y) \quad \forall D_X, D_Y$$

In particolare se  $D_X = (X \leq x), D_Y = (Y \leq y)$  e  $F$  è funzione di ripartizione congiunta  $\implies X \perp\!\!\!\perp Y$  se

$$F(x, y) = F_X(x) \cdot F_Y(y)$$

Analogamente  $f(x, y) = f_X(x) \cdot f_Y(y)$  e  $P(x, y) = P_X(x) \cdot P_Y(y)$

## Media

$$\mathbb{E}[X] := \begin{cases} \sum_i x_i P(x_i) \\ \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx \end{cases}$$

se esiste finita è detta speranza matematica di  $X$

$$\varphi: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \implies$$

$$\mathbb{E}[\varphi(X)] := \begin{cases} \sum_i \varphi(x_i) P(x_i) \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x) f(x) dx \end{cases}$$

Si può anche applicare alla potenza di una variabile aleatoria  $X^n$  e  $\mathbb{E}[X^n]$  è detto momento  $n$ -esimo centrato di  $X$

$$\text{E' lineare: } \mathbb{E}[a + bX] = a + b\mathbb{E}[X] \quad \forall a, b \in \mathbb{R}$$

$(X, Y)$  vettore aleatorio

$$\mathbb{E}[(X, Y)] = \begin{cases} \sum_i \sum_j x_i y_j P(x_i, y_j) \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} xy f(x, y) dx dy \end{cases}$$

se esistono finiti

## Casi notevoli

$X, Y$  variabili aleatorie,  $Z = X + Y \implies \mathbb{E}[Z] = \mathbb{E}[X] + \mathbb{E}[Y]$

Se  $X \perp\!\!\!\perp Y$  continue  $f(x, y) = f_X(x) \cdot f_Y(y) \implies$

$$\mathbb{E}[(X, Y)] = \left( \int_{-\infty}^{+\infty} x f_X(x) dx \right) \left( \int_{-\infty}^{+\infty} y f_Y(y) dy \right)$$

## Varianza

$$\text{Var}(X) = \mathbb{E}[(X - \mathbb{E}[X])^2] = \begin{cases} \sum_i (x_i - \mathbb{E}[X])^2 P(x_i) \\ \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mathbb{E}[X])^2 f(x) dx \end{cases}$$

Non è lineare e  $\text{Var}(a + bX) = b^2 \text{Var}(X)$

$\text{Var}(X + Y) = \text{Var}(X) + \text{Var}(Y) - 2\mathbb{E}[(X - \mathbb{E}[X])(Y - \mathbb{E}[Y])]$  misura la tendenza delle due variabili ad assumere valori maggiori o minori della media "insieme"

# Covarianza

$$\text{Cov}(X, Y) = \mathbb{E}[(X - \mathbb{E}[X])(Y - \mathbb{E}[Y])] = \left\{ \sum_i \sum_j (x_i - \mathbb{E}[X])(y_j - \mathbb{E}[Y]) P(x_i, y_j) \right. \\ \left. \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mathbb{E}[X])(y - \mathbb{E}[Y]) dx dy \right\}$$

Se  $X \perp\!\!\!\perp Y \implies \text{Cov}(X, Y) = 0 \implies \text{Var}[X + Y] = \text{Var}[X] + \text{Var}[Y]$

Dimostrazione (nel caso continuo):

$$\text{Cov}(X, Y) = \left( \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mathbb{E}[X]) f_X(x) dx \right) \left( \int_{-\infty}^{+\infty} (y - \mathbb{E}[Y]) f_Y(y) dy \right)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x f_X(x) dx - \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbb{E}[X] f_X(x) dx = \mathbb{E}[X] - 1\mathbb{E}[X] \cdot 1 = 0$$

Analogamente per  $y$

$$\text{Var}(aX + bY) = a^2 \text{Var}(X) + b^2 \text{Var}(Y) + 2ab \text{Cov}(X, Y)$$

# Correlazione

$X, Y$  variabili aleatorie legate da una relazione lineare  $Y = aX + b$   $a, b \in \mathbb{R}$

$$\mathbb{E}[Y] = a\mathbb{E}[X] + b \implies Y - \mathbb{E}[Y] = a(X - \mathbb{E}[X])$$

$$\text{Cov}(X, Y) = \mathbb{E}[(X - \mathbb{E}[X])(Y - \mathbb{E}[Y])] = \mathbb{E}[(X - \mathbb{E}[X])a(X - \mathbb{E}[X])] = \mathbb{E}[a(X - \mathbb{E}[X])^2] = a\text{Var}(X) = \frac{1}{a}\text{Var}(Y)$$

$$[\text{Cov}(X, Y)]^2 = a\text{Var}(X) \frac{1}{a}\text{Var}(Y) = \text{Var}(X)\text{Var}(Y)$$

# Coefficiente di correlazione

E' un indice adimensionale che misura la dipendenza lineare tra  $X$  e  $Y$

$$\rho = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{Var}(X)\text{Var}(Y)}}$$

$\implies \rho = \pm 1$  se  $X$  e  $Y$  sono perfettamente correlate tra di loro

$\rho = 0$  se  $X \perp\!\!\!\perp Y$

Vale  $-1 \leq \rho \leq 1$ :

- $|\rho|$  vicino a 1 indica una buona correlazione
- $|\rho|$  vicino a 0 indica poca correlazione

Normalmente  $Y = aX + b + Z$  dove  $Z$  rende incerta la relazione tra  $X$  e  $Y$

$Z : \mathbb{E}[Z] = 0$  e  $\text{Var}(Z)$  è minima

$$\mathbb{E}[Y] = a\mathbb{E}[X] + b + \mathbb{E}[Z] \implies b = \mathbb{E}[Y] - a\mathbb{E}[X]$$

$$Z = Y - aX + b \implies \text{Var}(Z) = \text{Var}(Y) + a^2 \text{Var}(X) - 2a \text{Cov}(X, Y)$$

$$\frac{d\text{Var}(Z)}{da} = 2a\text{Var}(X) - 2\text{Cov}(X, Y)$$

Il minimo corrisponde a  $2a\text{Var}(X) - 2a\text{Cov}(X, Y) = 0 \implies$

$$a = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\text{Var}(X)}$$

$$\text{Var}(Z) = \text{Var}(Y) + \frac{[\text{Cov}(X, Y)]^2}{[\text{Var}(X)]^2} \text{Var}(X) - 2 \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\text{Var}(X)} \text{Cov}(X, Y) =$$

$$= \text{Var}(Y) + \frac{[\text{Cov}(X, Y)]^2}{\text{Var}(X)\text{Var}(Y)} \text{Var}(Y) - 2 \frac{[\text{Cov}(X, Y)]^2}{\text{Var}(X)\text{Var}(Y)} \text{Var}(Y)$$

$$= \text{Var}(Y)(1 - \rho^2 - 2\rho^2) = \text{Var}(Y)(1 - \rho^2)$$

Se  $\rho^2 = 1$  la dipendenza lineare è perfetta

## Funzione generatrice di momenti

$X$  variabile aleatoria,  $t \in \mathbb{R}$

La speranza matematica  $\Phi_X(t) := \mathbb{E}[e^{tX}]$  è una formula analitica per calcolare i momenti di una variabile aleatoria

Utilizzando lo sviluppo di Taylor

$$\Phi_X(t) = \mathbb{E}\left[1 + tX + \frac{t^2 X^2}{2!} + \dots\right] = 1 + t\mathbb{E}[X] + \frac{t^2}{2!}\mathbb{E}[X^2] + \dots$$

Quindi

$$\mathbb{E}[X^n] = \left. \frac{d^n \Phi_X(t)}{dt^n} \right|_{t=0} = \Phi_X^{(n)}(0)$$

$$\mathbb{E}[e^{tX}] = \begin{cases} \sum_i e^{tx_i} P(x_i) \\ \int_{-\infty}^{+\infty} e^{tx} f(x) dx \end{cases}$$

Se converge esiste la funzione generatrice dei momenti, questa fissa tutti i momenti di  $X$  e la determina univocamente

$X_1, X_2$  variabili aleatorie,  $Y = X_1 + X_2$

$$\Phi_Y(t) = \mathbb{E}[e^{tY}] = \mathbb{E}[e^{tX_1+tX_2}] = \mathbb{E}[e^{tX_1} \cdot e^{tX_2}]$$

Se  $X_1 \perp\!\!\!\perp X_2$

$$\Phi_Y(t) = \mathbb{E}[e^{tX_1}] \cdot \mathbb{E}[e^{tX_2}] = \Phi_{X_1}(t) \cdot \Phi_{X_2}(t)$$