

Appunti di Calcolo delle probabilità

Riccardo Lo Iacono

Dipartimento di Matematica & Informatica
Università degli studi di Palermo
Sicilia
a.a. 2023-2024

Indice.

1	Introduzione alla probabilità: storia e concetti base	2
1.1	Partizione dell'evento certo	2
2	Impostazioni della probabilità	3
2.1	Impostazione assiomatica	3
2.2	Impostazione frequentista	3
2.3	Impostazione soggettiva	3
3	Eventi e probabilità condizionate	5
3.1	Teorema delle probabilità composte	5
3.2	Formula di disintegrazione	5
3.3	Teorema di Bayes	6

– 1 – Introduzione alla probabilità: storia e concetti base.

Storicamente il primo ad interessarsi a quella che sarebbe poi divenuto lo studio della probabilità fu il cavaliere *De Mere*. Questi accanito scommettitore, suppose che vi fosse un legame tra la frequenza con cui uscisse un certo risultato e la sua probabilità.

Esempio: Come esempio della logica di De Mere si consideri quanto segue: siano

$A =$ “Lanciando un dado a sei facce 4 volte, esce almeno un 6”

$B =$ “Lanciando due dadi a sei facce 24 volte, esce almeno una coppia (6,6)”

ci si chiede: $\Pr(A) = \Pr(B)$?

Secondo De Mere si avrebbe

$$\begin{aligned}\Pr(A) &= \frac{1}{6} + \frac{1}{6} + \frac{1}{6} + \frac{1}{6} = \frac{2}{3} \\ \Pr(B) &= \underbrace{\frac{1}{36} + \frac{1}{36} + \cdots + \frac{1}{36}}_{\times 36} = \frac{2}{3} \implies \Pr(A) = \Pr(B)\end{aligned}$$

Si osserva però che una valutazione più “corretta” è ottenuta sottraendo a tutti casi possibili, quelli a sfavore di A e B rispettivamente, da cui

$$\begin{aligned}\Pr(A) &= \frac{6^4 - 5^4}{6^4} \approx 0.518 \\ \Pr(B) &= \frac{36^{24} - 35^{24}}{36^{24}} \approx 0.491\end{aligned}$$

Concludendo dunque che $\Pr(A) > \Pr(B)$.

Introducendo un po di formalismo, quelli che nell’esempio di sopra sono stati indicati con A e B prendono il nome di eventi. Più in generale, fissato un certo spazio campionario Ω , dicasi ogni suo sottoinsieme E evento. Cioè un evento descrive uno dei possibili esiti di un esperimento. Casi particolari di evento sono l’evento certo Ω e quello impossibile \emptyset . In fine dato E un evento, si definisce $|E|$ il suo indicatore e si ha

$$|E| = \begin{cases} 1, & \text{se } E \text{ è vero;} \\ 0, & \text{se } E \text{ è falso.} \end{cases}$$

Dove con “vero” e “falso” ci si riferisce al verificarsi o meno di E .

Nota: la definizione di probabilità data da De Mere prende il nome di *criterio classico*.

– 1.1 – Partizione dell’evento certo.

Siano E_1, \dots, E_n una famiglia di eventi. Allora se

1. $\forall i, j, i \neq j \quad E_i \wedge E_j = \emptyset$
2. $\bigcup_{i=1}^n (E_i) = \Omega$

si dirà che E_1, \dots, E_n formano una partizione di Ω .

– 2 – Impostazioni della probabilità.

Quella dell'impostazione classica, non è l'unica impostazione della probabilità esistente. Di fatti in aggiunta a quella sinora vista, si hanno le impostazioni *assiomatica*, *frequentista* e *soggettiva*, analizzate in maggior dettaglio nelle sezioni a seguire.

– 2.1 – Impostazione assiomatica.

L'impostazione assiomatica da una definizione rigorosamente matematica di probabilità, a seguito riportata.

Definizione: dato (Ω, A) uno spazio di misura: ossia Ω è uno spazio con un'algebra (o una σ -algebra e A) una sua sottofamiglia di eventi; dicasi che una funzione $\Pr : A \rightarrow [0, 1]$, dicasi probabilità se:

1. $\forall E \in A, \Pr(E) \geq 0$;
2. $\Pr(\Omega) = 1$;
3. $\Pr(E_1 \vee E_2) = \Pr(E_1) + \Pr(E_2), \forall E_1, E_2 \in A : E_1 E_2 = \emptyset$

Nel caso in cui A sia infinito, il punto 3 diventa

$$\Pr\left(\bigvee_{i=1}^{\infty} E_i\right) = \sum_{i=1}^{\infty} \Pr(E_i)$$

– 2.2 – Impostazione frequentista.

Come evidente dall'esempio di De Mere, vi è una naturale tendenza ad associare la probabilità di un evento alla frequenza con cui lo stesso avviene. Tale concezione di probabilità è detta *impostazione frequentista*.

Definizione: considerata una successione di prove indipendenti, ripetute sotto le stesse condizioni, posto E un evento e f_N la frequenza di successo entro relativamente le prime N prove, si pone

$$\Pr(E) = \lim_{N \rightarrow \infty} f_N$$

– 2.3 – Impostazione soggettiva.

Le impostazioni sinora viste, sono generalizzabili nella *teoria soggettiva*. Con tale impostazione si ha una divisione rigorosa tra gli aspetti del certo e del probabile. Più in generale si ha quanto segue.

Definizione: sia E un evento, la probabilità $\Pr(E) = p$ rappresenta il grado di fiducia che un individuo ha del verificarsi di E .

– 2.3.1 – Criterio della scommessa.

Da quanto detto precedentemente, sia supposto $\Pr(E) = p$ per un qualche evento E , si può intendere p come la quota che, in un ipotetica scommessa, un individuo è disposto a scommettere. Cioè

$$\text{si paga } p \text{ e si riceve } \begin{cases} 1, & \text{se } E \text{ vero,} \\ 0, & \text{altrimenti} \end{cases}$$

più in generale, $\forall S \in \mathbb{R}, S \neq 0$

$$\text{si paga } pS \text{ e si riceve } \begin{cases} S, & \text{se si verifica } S, \\ 0, & \text{altrimenti.} \end{cases}$$

– 2.3.2 – Guadagno e criterio di coerenza.

Definizione: Sia $\Pr(E) = p$ la probabilità che un individuo attribuisce al verificarsi di E . Dicasi la seguente quantità

$$\mathcal{G} = S|E| - pS = S(|E| - p)$$

guadagno.

In generale, affinché una scommessa sia sensata, questa deve essere coerente, cioè: l'assegnazione di p non deve portare ad una perdita certa, e ciò si verifica se e solo se

$$\min \{\mathcal{G}\} \max \{\mathcal{G}\} \leq 0, \forall S \in \mathbb{R}$$

– 3 – Eventi e probabilit  condizionate.

Definizione: Siano E e $H, H \neq \emptyset$ eventi. Dica si evento condizionato il seguente ente logico.

$$E \mid H = \begin{cases} \text{vero, se } E \text{ e } H \text{ veri ,} \\ \text{falso, se } E^C \text{ e } H \text{ veri ,} \\ \text{indeterminato, se } H^C \text{ vero.} \end{cases}$$

Banalmente se $H = \Omega$, si ha $E \mid H = E \mid \Omega = E$. Vale inoltre

$$E \mid H = (E \wedge \Omega) \mid H = [(E \wedge H) \vee (E \wedge H^C)] \mid H = (E \wedge H) \mid H$$

Applicando dunque il criterio di scommessa si ha che

$$\Pr(E \mid H) = \begin{cases} S, & \text{se } EH \text{ vero ,} \\ 0, & \text{se } E^C H \text{ vero} \\ pS, & \text{se } H \text{ falso.} \end{cases}$$

da cui, considerando il guadagno si ha

$$\mathcal{G} = S|EH| - pS|H| = S|H|(|E| - p)$$

posto dunque $G = \{S(1 - p), -pS\}$, la condizione di coerenza diventa

$$\begin{aligned} \min\{G\} \max\{G\} &\leq 0, \forall S \neq 0 \\ \implies S^2(1 - p)(-p) &\leq 0 \iff p \in [0, 1] \end{aligned}$$

– 3.1 – Teorema delle probabilit  composte.

Teorema 3.1: *Dati due eventi E e $H, H \neq \emptyset$, se la valutazione di probabilit  ($\Pr(H), \Pr(E \mid H), \Pr(EH)$) su $\{H, E \wedge H, E \mid H\}$   coerente, si ha*

$$\Pr(EH) = \frac{\Pr(E \mid H)}{\Pr(H)}$$

Corollario 3.1.1: *Se $\Pr(H) \neq 0$ si ha*

$$\Pr(E \mid H) = \frac{\Pr(EH)}{\Pr(H)}$$

– 3.2 – Formula di disintegrazione.

Il *Teorema 3.1* pu  essere generalizzato a n eventi, come segue. Siano $\{H_1, \dots, H_n\}$ una partizione di Ω e sia E un evento. Allora

$$\Pr(E) = \sum_i \Pr(E \mid H_i) \Pr(H_i)$$

– 3.3 – Teorema di Bayes.

Dalla formula di disintegrazione segue il seguente risultato, noto come *Teorema di Bayes*.

Teorema di Bayes: Siano E, H due eventi. Allora

$$\Pr(H | E) = \frac{\Pr(H) \Pr(E | H)}{\Pr(E)}$$

Questi, nella sua versione pi  generale stabilisce quanto segue.

Teorema di Bayes (generalizzato): Siano $\{H_1, \dots, H_n\}$ una partizione di Ω , sia E un evento. Si ha allora

$$\Pr(H_i | E) = \frac{\Pr(H_i) \Pr(E | H_i)}{\Pr(E | H_1) \Pr(H_1) + \dots + \Pr(E | H_n) \Pr(H_n)}$$

– 3.3.1 – Indipendenza stocastica.

Definizione: dati due eventi E e $H, H \neq \emptyset$, si dir  che questi sono stocasticamente indipendenti se

$$\Pr(E | H) = \Pr(E)$$

da cui

$$\Pr(EH) = \Pr(E) \Pr(H)$$