

Reti Bayesiane: Richiamo

Perchè sono interessanti:

- Naive Bayes usa una assunzione di indipendenza condizionale troppo restrittiva
 - ...ma se non si usa una assunzione di tale tipo il problema è intrattabile...
 - le Reti Bayesiane descrivono l'indipendenza condizionale tra *sottoinsiemi* di variabili
- permettono di combinare conoscenza a priori sulla (in) dipendenza fra variabili con dati osservati (esempi di apprendimento)

Indipendenza Condizionale: Richiamo

Definizione: X è *condizionalmente indipendente* da Y dato Z se la distribuzione di probabilità che governa X è indipendente dal valore di Y dato il valore di Z ; cioè, se

$$(\forall x_i, y_j, z_k) P(X = x_i, Y = y_j, Z = z_k) = P(X = x_i | Z = z_k)$$

in modo compatto, scriveremo $P(X, Y, Z) = P(X | Z)$

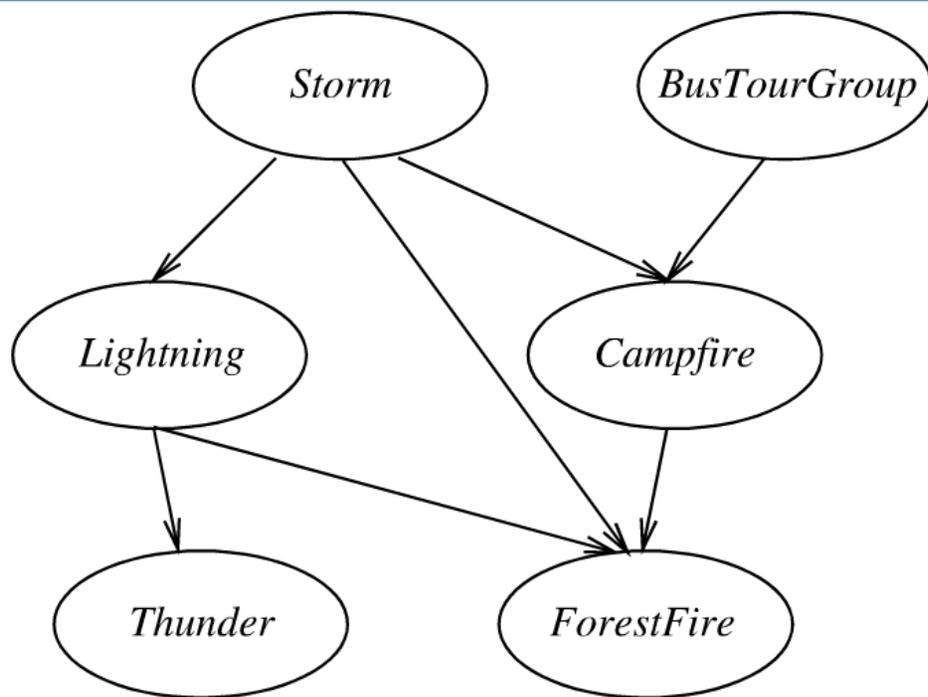
Esempio: *Fulmine* è condizionalmente indipendente da *Pioggia*, dato *Lampo*

$$P(\text{Fulmine} | \text{Pioggia}, \text{Lampo}) = P(\text{Fulmine} | \text{Lampo})$$

Naive Bayes usa l'indipendenza condizionale per giustificare

$$\begin{aligned} P(X, Y | Z) &= P(X | Y, Z) P(Y | Z) \\ &= P(X | Z) P(Y | Z) \end{aligned}$$

Esempio di Rete Bayesiana

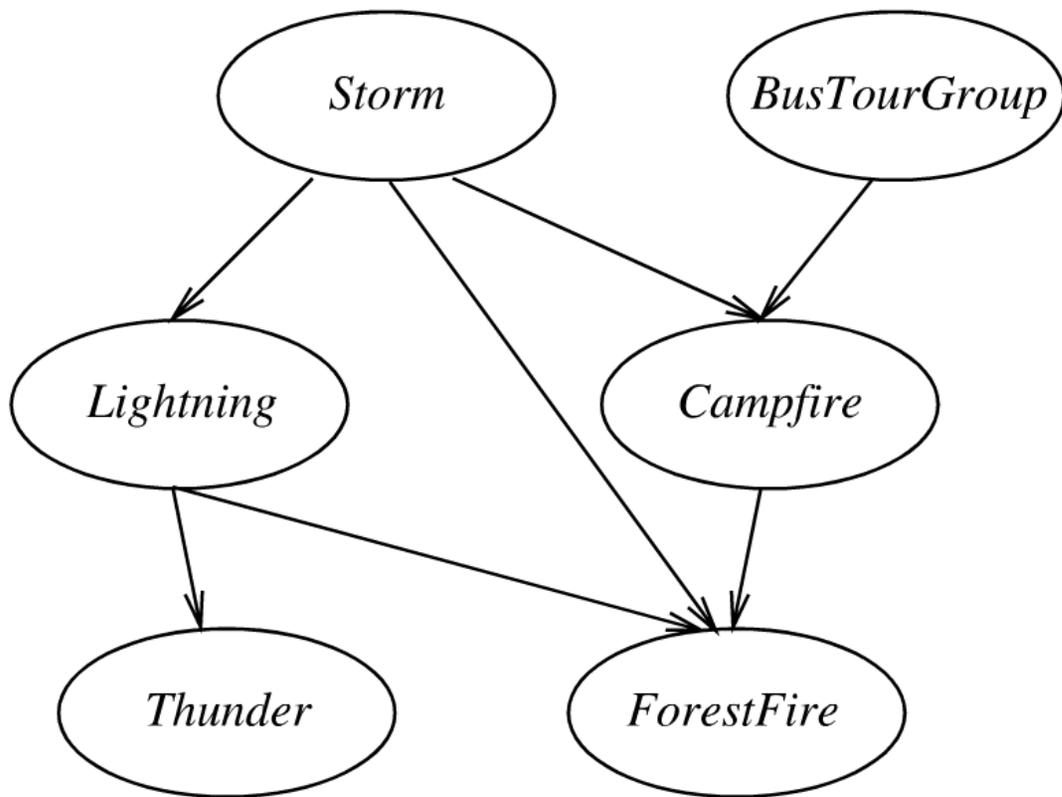


	S, B	$S, \neg B$	$\neg S, B$	$\neg S, \neg B$
C	0.4	0.1	0.8	0.2
$\neg C$	0.6	0.9	0.2	0.8



la rete rappresenta un insieme di asserzioni di indipendenza condizionale:

- ogni nodo è asserito essere condizionalmente indipendente dai suoi non-discendenti, dati i suoi genitori
- grafo diretto aciclico



	S, B	$S, \neg B$	$\neg S, B$	$\neg S, \neg B$
C	0.4	0.1	0.8	0.2
$\neg C$	0.6	0.9	0.2	0.8



rappresenta $P(\text{Storm}, \text{BusTourGroup}, \dots, \text{ForestFire})$

- in generale, $P(y_1, \dots, y_n) = \prod_{i=1}^n P(y_i | \text{Genitori}(Y_i))$
- quindi, la distribuzione congiunta è totalmente specificata dal grafo e dalle $P(y_i | \text{Genitori}(Y_i))$

Inferenza nelle Reti Bayesiane

Come inferire la distribuzione di probabilità sui valori che una o più variabili possono assumere, dati alcuni valori osservati per altre variabili ?

- Reti Bayesiane contengono tutta l'informazione per esguire tale inferenza (rappresentano la probabilità congiunta)
- Se si ha una sola variabile con valore sconosciuto, è facile rispondere
- Nel caso più generale, l'inferenza è un problema NP arduo

In pratica

- metodi esatti di inferenza polinomiali se la rete è un poli-albero
- metodi Monte Carlo “simulano” stocasticamente la rete per calcolare soluzioni approssimate

Cenni di Apprendimento in Reti Bayesiane

Esistono diverse varianti di compiti di apprendimento

- La struttura della rete può essere *nota* o *sconosciuta*
- Esempi di apprendimento possono fornire dati per *tutte* le variabili della rete, o solo per *alcune*

Se si conosce la struttura e tutte le variabili sono “osservabili”

- allora l’allenamento è in sostanza equivalente a quello del classificatore Naive di Bayes

This block contains a series of small thumbnail images, likely from a presentation or lecture notes, illustrating various concepts in Bayesian networks. The thumbnails include:

- A slide titled "Ascesa di Gradiente ML" (Gradient Ascent ML) showing mathematical derivations for maximizing the log-likelihood function.
- A slide titled "Ascesa di Gradiente EM" (Gradient Ascent EM) showing the EM algorithm's steps for parameter estimation.
- A slide titled "Algoritmo EM" (EM Algorithm) showing the iterative process of maximizing the expected complete log-likelihood.
- Other slides showing network diagrams, probability distributions, and mathematical formulas related to Bayesian inference and learning.

Supponiamo che la struttura sia nota e le variabili parzialmente osservabili per esempio, si hanno dati per *ForestFire*, *Storm*, *BusTourGroup*, *Thunder*, ma non per *Lightning*, *Campfire*...

- situazione simile al caso di reti neurali con unità nascoste: unità di output osservabili, unità nascoste non osservabili
- in effetti si possono apprendere le tabelle di probabilità condizionale per le variabili non osservabili tramite **ascesa di gradiente**
- approccio Maximum Likelihood (ML): massimizzare $P(D|h)$

Ascesa di Gradiente ML

Come al solito è più semplice massimizzare $\ln P(D|h)$

Denotiamo con w_{ijk} una generica entry della tabella di probabilità condizionale per la variabile Y_i nella rete

$$w_{ijk} = P(Y_i = y_{ij} | \text{Genitori}(Y_i) = \text{la lista } u_{ik} \text{ di valori})$$

ad esempio, se $Y_i = \text{Campfire}$, allora u_{ik} potrebbe essere $\langle \text{Storm} = T, \text{BusTourGroup} = F \rangle$

Calcolo del gradiente:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \ln P(D|h)}{\partial w_{ijk}} &= \frac{\partial}{\partial w_{ijk}} \ln \prod_{d \in D} P(d|h) \quad (\text{esempi estratti indipendentemente}) \\ &= \sum_{d \in D} \frac{\partial \ln P(d|h)}{\partial w_{ijk}} \\ &= \sum_{d \in D} \frac{1}{P(d|h)} \frac{\partial P(d|h)}{\partial w_{ijk}} \\ &= \sum_{d \in D} \frac{1}{P(d|h)} \frac{\partial}{\partial w_{ijk}} \sum_{q,t} P(d|y_{iq}, u_{it}, h) P(y_{iq}, u_{it}, h) \\ &= \sum_{d \in D} \frac{1}{P(d|h)} \frac{\partial}{\partial w_{ijk}} \sum_{q,t} P(d|y_{iq}, u_{it}, h) \underbrace{P(y_{iq}|u_{it}, h) P(u_{it}|h)}_{\text{regola del prodotto}}\end{aligned}$$

Poiché $w_{ijk} = P(y_{iq}|u_{it})$, solo il termine della sommatoria per cui $q = j$ e $t = k$ il gradiente è non nullo

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \ln P(D|h)}{\partial w_{ijk}} &= \sum_{d \in D} \frac{1}{P(d|h)} \frac{\partial}{\partial w_{ijk}} P(d|y_{ij}, u_{ik}, h) P(y_{ij}|u_{ik}, h) P(u_{ik}|h) \\
&= \sum_{d \in D} \frac{1}{P(d|h)} \frac{\partial}{\partial w_{ijk}} P(d|y_{ij}, u_{ik}, h) w_{ijk} P(u_{ik}|h) \\
&= \sum_{d \in D} \frac{1}{P(d|h)} P(d|y_{ij}, u_{ik}, h) P(u_{ik}|h)
\end{aligned}$$

Per il teorema di Bayes abbiamo $P(d|y_{ij}, u_{ik}, h) = \frac{P(y_{ij}, u_{ik}|d, h)P(d|h)}{P(y_{ij}, u_{ik}|h)}$ e quindi

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \ln P(D|h)}{\partial w_{ijk}} &= \sum_{d \in D} \frac{1}{P(d|h)} \frac{P(y_{ij}, u_{ik}|d, h)P(d|h)P(u_{ik}|h)}{P(y_{ij}, u_{ik}|h)} \\
&= \sum_{d \in D} \frac{P(y_{ij}, u_{ik}|d, h)P(u_{ik}|h)}{P(y_{ij}, u_{ik}|h)} \\
&= \sum_{d \in D} \frac{P(y_{ij}, u_{ik}|d, h)}{P(y_{ij}|u_{ik}, h)} = \sum_{d \in D} \frac{P(y_{ij}, u_{ik}|d, h)}{w_{ijk}}
\end{aligned}$$

Ascesa di Gradiente ML

Eseguire ascesa di gradiente ripetendo le seguenti operazioni

1. aggiornare tutti i w_{ijk} usando i dati di apprendimento D :

$$w_{ijk} \leftarrow w_{ijk} + \eta \sum_{d \in D} \frac{P(y_{ij}, u_{ik} | d, h)}{w_{ijk}}$$

2. poi, normalizzare i w_{ijk} in modo da assicurare

- $\sum_j w_{ijk} = 1$
- $0 \leq w_{ijk} \leq 1$

Ancora sull'Apprendimento di Reti Bayesiane

Si può usare anche l'algoritmo **E**xpectation **M**aximization (EM)

Ripetere:

1. Calcolare le probabilità di variabili non osservabili, assumendo h corrente
2. Calcolare nuovi w_{ijk} (cioè una nuova ipotesi h') che massimizzano $E[\ln P(D|h)]$, dove D include ora sia i dati osservati che (le probabilità calcolate) di variabili non osservabili

Se la struttura non è conosciuta...

- algoritmi basati su ricerca greedy per aggiungere/togliere archi e nodi

Algoritmo Expectation Maximization (EM)

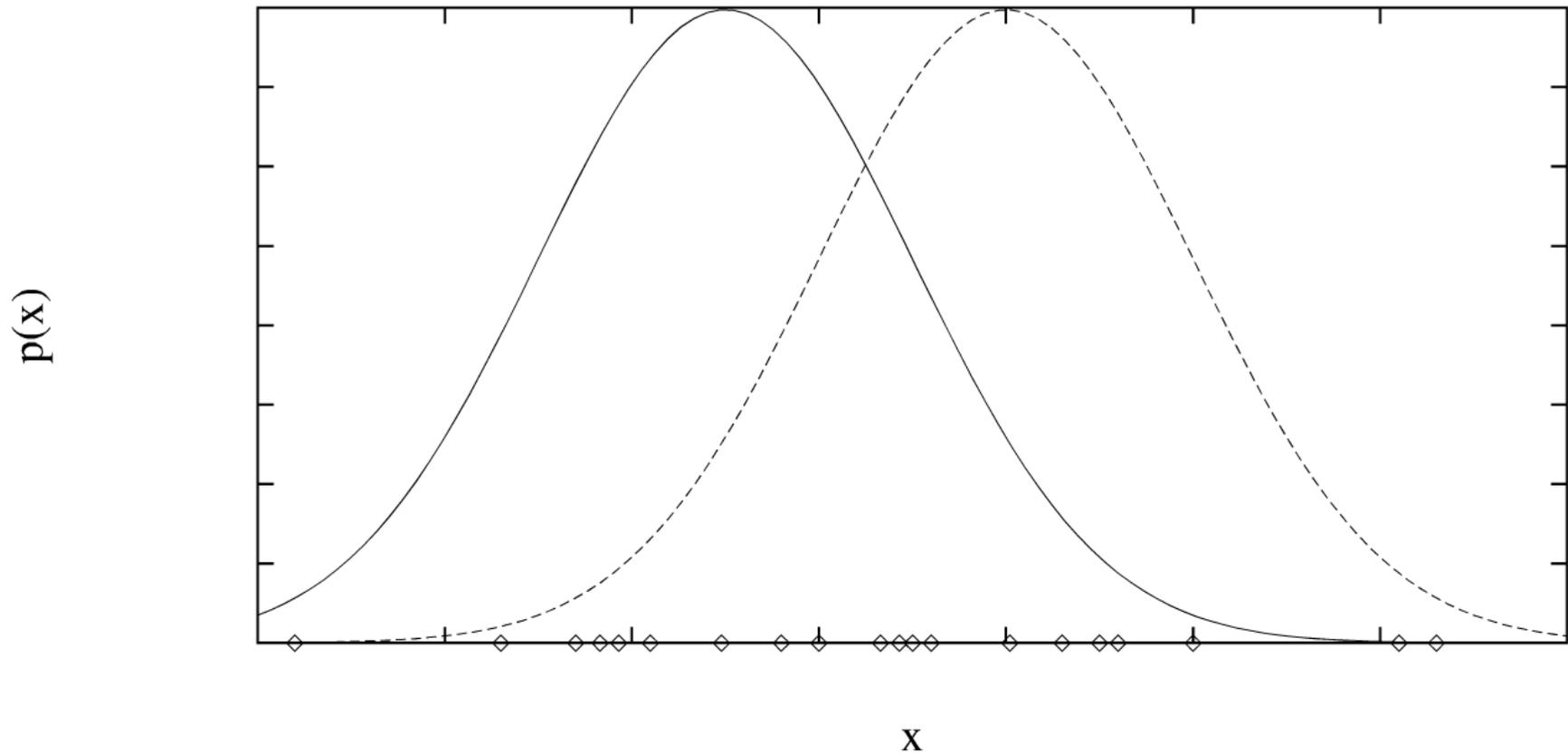
Quando usarlo:

- dati solo parzialmente osservabili
- clustering non supervisionato (valore target non osservabile)
- apprendimento supervisionato (alcuni attributi con valori mancanti)

Alcuni esempi:

- apprendimento Reti Bayesiane
- AUTOCLASS: clustering non supervisionato
- apprendimento di Modelli Markoviani Nascosti (Hidden Markov Models)

Cerchiamo di capire EM con un esempio...



Ogni istanza x generata

1. scegliendo una delle Gaussiane con probabilità uniforme
2. generando una istanza a caso secondo la Gaussiana scelta

EM per stimare k medie

Date:

- istanze da X generate da una mistura di k distribuzioni Gaussiane
- medie $\langle \mu_1, \dots, \mu_k \rangle$ sconosciute delle k Gaussiane (σ^2 conosciuto ed uguale per tutte le Gaussiane)
- non si sa quale istanza x_i è stata generata da quale Gaussianiana

Determinare:

- stime maximum likelihood di $\langle \mu_1, \dots, \mu_k \rangle$

ogni istanza può essere pensata nella forma $y_i = \langle x_i, z_{i1}, z_{i2} \rangle$ (caso $k = 2$), dove

- z_{ij} è 1 se x_i è generata dalla j -esima Gaussianiana
- x_i osservabile
- z_{ij} non osservabile

EM per stimare k medie

Algoritmo EM: scegliere a caso l'ipotesi iniziale $h = \langle \mu_1, \mu_2 \rangle$, poi ripetere

passo E: calcola il valore atteso $E[z_{ij}]$ di ogni variabile non osservabile z_{ij} , assumendo che valga l'ipotesi corrente $h = \langle \mu_1, \mu_2 \rangle$

$$\begin{aligned} E[z_{ij}] &= \frac{p(x = x_i | \mu = \mu_j)}{\sum_{n=1}^2 p(x = x_i | \mu = \mu_n)} \\ &= \frac{e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(x_i - \mu_j)^2}}{\sum_{n=1}^2 e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(x_i - \mu_n)^2}} \end{aligned}$$

passo M: calcola la nuova ipotesi maximum likelihood $h' = \langle \mu'_1, \mu'_2 \rangle$, assumendo che il valore preso da ogni variabile non osservabile z_{ij} sia il suo valore atteso $E[z_{ij}]$ (calcolato sopra). Rimpiazza $h = \langle \mu_1, \mu_2 \rangle$ con $h' = \langle \mu'_1, \mu'_2 \rangle$.

$$\mu_j \leftarrow \frac{\sum_{i=1}^m E[z_{ij}] x_i}{\sum_{i=1}^m E[z_{ij}]}$$

Algoritmo EM

Converge alla ipotesi h_{ML} locale (massimo locale) fornendo stime per le variabili non osservabili z_{ij}

Di fatto, trova un massimo locale di $E[\ln P(Y|h)]$, dove

- Y rappresenta tutti i dati (variabili osservabili e non)
- il valore atteso è preso sui possibili valori di variabili non osservabili in Y

EM in Generale

Dati:

- dati osservati $X = \{x_1, \dots, x_m\}$
- dati non osservabili $Z = \{z_1, \dots, z_m\}$
- distribuzione di probabilità parametrizzata $P(Y|h)$, dove
 - $Y = \{y_1, \dots, y_m\}$ è tutto l'insieme dei dati $y_i = x_i \cup z_i$
 - h sono i parametri

Determinare:

- h che massimizza (localmente) $E[\ln P(Y|h)]$

Metodo EM Generale

Definire la funzione di verosimiglianza (likelihood) $Q(h'|h)$ che calcola $Y = X \cup Z$ usando i dati osservati X ed i parametri correnti h per stimare Z

$$Q(h'|h) \leftarrow E[\ln P(Y|h')|h, X]$$

Algoritmo EM:

passo di stima (E): calcolare $Q(h'|h)$ usando l'ipotesi corrente h ed i dati osservati X per stimare la distribuzione di probabilità su Y

$$Q(h'|h) \leftarrow E[\ln P(Y|h')|h, X]$$

passo di massimizzazione (M): rimpiazza l'ipotesi h tramite l'ipotesi h' che massimizza la funzione Q

$$h \leftarrow \arg \max_{h'} Q(h'|h)$$