

Intelligenza Artificiale II

Ragionamento probabilistico: apprendimento

Marco Piastra

Ragionamento probabilistico: apprendimento

Problemi di inferenza probabilistica

Inferenza nei modelli grafici

Eliminazione delle variabili

Factor graphs e belief propagation

Tipi di apprendimento

Si consideri un agente che riceve una serie di impulsi sensoriali (input)

$$\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$$

■ ***Supervised learning***

L'agente conosce anche l'insieme di valori $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$ che dovrebbero essere prodotti da una funzione $Y_i = f(X_i)$

In altri termini, l'obiettivo è apprendere una *funzione* $f(X_i)$

■ ***Unsupervised learning***

L'agente ha come obiettivo la costruzione di un **modello** di $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ che possa servire come *descrizione* dell'insieme degli input

In campo probabilistico, l'obiettivo è apprendere una *distribuzione congiunta* P

■ ***Reinforcement learning***

Ad ogni input l'agente effettua anche **azioni** $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ e osserva i **risultati** $\{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ di tali azioni.

L'obiettivo è definire una funzione $a(X_i)$ che determina l'azione da effettuare,

in modo da massimizzare una funzione obiettivo complessiva $\sum_i r_i$

In altri termini, l'obiettivo è apprendere una *strategia* $a(X_i)$

Eventi ed osservazioni

■ Eventi

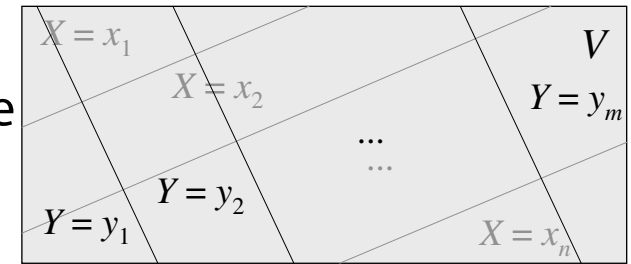
Un **evento** è un sottoinsieme di *mondi possibili*

Un evento si **verifica** quando il *mondo attuale* appartiene al corrispondente sottoinsieme

■ Variabili aleatorie multiple

In generale, in una rappresentazione probabilistica si hanno più variabili aleatorie

Ciascuna combinazione di valori delle variabili aleatorie descrive un *evento*



■ Osservazioni (dati)

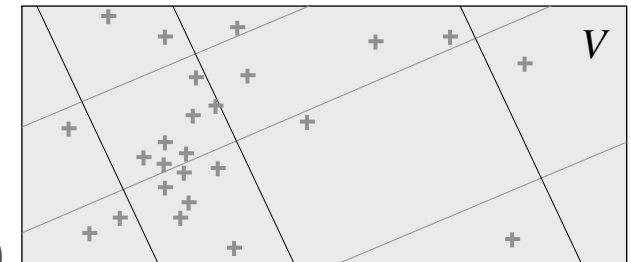
Un'osservazione completa è un mondo possibile completamente osservato

In ciascun mondo, la combinazione dei valori di tutte le variabili aleatorie è completamente determinata

Le osservazioni potrebbero essere solo parziali

Potrebbero essere noto solamente il valore di alcune variabili aleatorie

In che modo un'insieme di osservazioni (complete o meno) influenza la *misura di probabilità*?



Indipendenza ed osservazioni

Preludio: notazione

Un'osservazione può essere l'esito di un esperimento o un test

Per convenzione, si preferisce definire un set di variabili aleatorie separato per ciascun esperimento o test

Ad esempio, se il modello probabilistico utilizza le variabili aleatorie $\{X, Y\}$, si indicano con $\{X_1, Y_1\}, \{X_2, Y_2\}, \dots, \{X_n, Y_n\}$ i possibili esiti di n esperimenti o test distinti

■ *Osservazioni indipendenti, stessa distribuzione di probabilità*

Independent, Identically Distributed (IID) random variables

Definizione

Una sequenza o insieme di variabili aleatorie $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ è IID se:

- 1) $\langle X_i \perp X_j \rangle, i \neq j$ (indipendenza)
- 2) $P(X_i) = P(X_j), i \neq j$ (identica distribuzione)

La definizione si estende facilmente a sequenze formate da v.a. multiple

Cautela

Spesso le v. a. che descrivono risultati di esperimenti non sono IID

Esempio: misurazioni diverse su pazienti diversi possono essere viste come IID, ma le misurazioni sullo stesso paziente in tempi diversi non sono IID

Maximum Likelihood Estimation (MLE)

Elementi di base

Un modello probabilistico parametrico $P(X)$, con parametri θ

θ sono i parametri caratterizzanti del modello: p.es. la probabilità di avere testa o croce

Un insieme di osservazioni $D = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ che si assumono essere IID

■ *Likelihood function* (funzione di verosimiglianza)

Una funzione della probabilità condizionale $P(D | \theta)$ derivata dal modello $P(X)$

$$L(\theta | D) = P(D | \theta) = P(X_1, X_2, \dots, X_n | \theta)$$

dove $P(D | \theta)$ è la probabilità che i parametri θ , visti come v.a., generino le osservazioni D

Nel caso di osservazioni $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ che possono essere considerate IID, si ha:

$$L(\theta | D) = P(X_1 | \theta)P(X_2 | \theta) \dots P(X_n | \theta) = \prod_i P(X_i | \theta)$$

■ *Maximum Likelihood Estimation*

$$\theta_{ML}^* = \arg \max_{\theta} L(\theta | D)$$

Più comoda per i calcoli la forma logaritmica (*Log-Likelihood*)

$$\ell(\theta | D) = \log L(\theta | D) = \log \prod_i P(X_i | \theta) = \sum_i \log P(X_i | \theta)$$

$$\theta_{ML}^* = \arg \max_{\theta} \ell(\theta | D)$$

Esempio: lanci di una moneta (*Bernoulli Trials*)

■ Descrizione

Test: lancio di una moneta X , di caratteristiche non note. ($X = 1$ testa, $X = 0$ croce)

Modello: $P(X = 1) = \theta$, $P(X = 0) = 1 - \theta$

Osservazioni: una sequenza $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ (p.es. $D = \{X_1 = 1, X_2 = 1, X_3 = 0 \dots\}$)

■ (*Log-*)Likelihood Function

$$\ell(\theta | D) = \log P(D | \theta) = \log P(\{X_i\} | \theta) = \log \prod_i P(X_i | \theta) = \sum_i \log P(X_i | \theta)$$

Likelihood per P : *(Algebraic Follies!)*

$$P(X | \theta) = \theta^{[X=1]} (1 - \theta)^{[X=0]} \quad \text{dove:} \quad [X_i = v] = \begin{cases} 1 & \text{se } X_i = v \\ 0 & \text{se } X_i \neq v \end{cases}$$

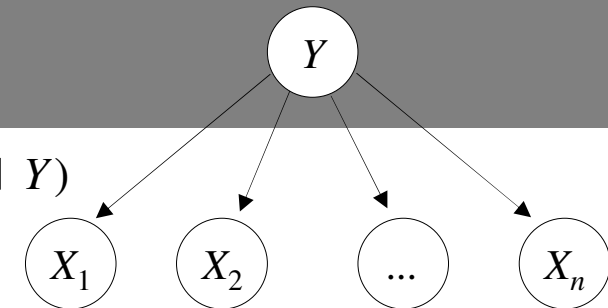
$$\begin{aligned} \ell(\theta | D) &= \sum_i \log(\theta^{[X_i=1]} (1 - \theta)^{[X_i=0]}) = \log \theta \sum_i [X_i = 1] + \log(1 - \theta) \sum_i [X_i = 0] \\ &= N_{X=1} \log \theta + N_{X=0} \log(1 - \theta) \quad (\text{dove p.es. } N_{X=1} \text{ è il numero di } X_i = 1 \text{ nella sequenza } D) \end{aligned}$$

■ Maximum Likelihood Estimation

$$\frac{\partial \ell}{\partial \theta} = \frac{N_{X=1}}{\theta} - \frac{N_{X=0}}{(1 - \theta)} \quad \frac{\partial \ell}{\partial \theta} = 0 \quad \Rightarrow \quad \theta_{ML}^* = \frac{N_{X=1}}{N_{X=1} + N_{X=0}}$$

Apprendimento del filtro *anti-spam*

$$P(Y, \{X_i\}) = P(Y) \prod_{i=1}^n P(X_i | Y)$$



■ Descrizione

Modello parametrico: $P(Y = k) = \pi_k$, $P(X_i = j | Y = k) = \eta_{ijk}$
 (i valori delle probabilità condizionali nel modello grafico)

Osservazioni: sequenza di set di valori, ottenuti da messaggi ricevuti e classificati

p.es. $D = \{\{Y_1 = 1, X_{11} = 1, X_{12} = 1, \dots, X_{1n} = 0\}, \{Y_2 = 0, X_{21} = 0, X_{22} = 1, \dots, X_{2n} = 1\}, \dots\}$

■ Likelihood Function

$$L(\{\pi_k, \eta_{ijk}\} | D) = P(D | \theta) = P(\{\{Y_m = y_m, X_{mi} = x_{mi}\}\} | \{\pi_k, \eta_{ijk}\})$$

Sequenza di messaggi

$$= \prod_m P(\{Y_m = y_m, X_{mi} = x_{mi}\} | \{\pi_k, \eta_{ijk}\}) \quad (\text{i messaggi sono IID})$$

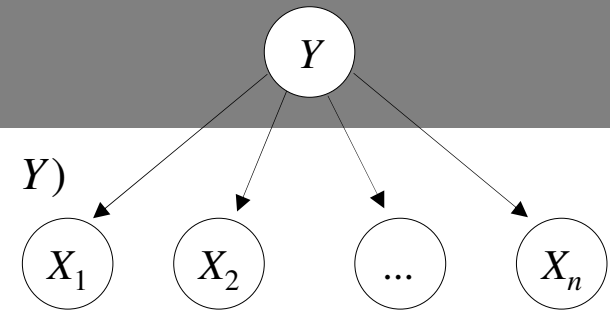
$$= \prod_m P(Y_m = y_m | \{\pi_k, \eta_{ijk}\}) P(\{X_{mi} = x_{mi}\} | Y_m = y_m, \{\pi_k, \eta_{ijk}\}) \quad (\text{fattorizzazione})$$

$$= \prod_m P(Y_m = y_m | \{\pi_k\}) P(\{X_{mi} = x_{mi}\} | Y_m = y_m, \{\eta_{ijk}\}) \quad (\text{indipendenza cond.})$$

$$= \prod_m P(Y_m = y_m | \{\pi_k\}) \prod_i P(X_{mi} = x_{mi} | Y_m = y_m, \{\eta_{ijk}\}) \quad (\langle X_i \perp X_j, Y \rangle)$$

Apprendimento del filtro *anti-spam*

$$P(Y, \{X_i\}) = P(Y) \prod_{i=1}^n P(X_i | Y)$$



■ *Log-Likelihood Function*

$$\ell(\{\pi_k, \eta_{ijk}\} | D) = \sum_m \log P(Y_m = y_m | \{\pi_k\}) + \sum_m \sum_i \log P(X_{mi} = x_{mi} | Y_m = y_m, \{\eta_{ijk}\})$$

Forma alternativa per P:

$$P(Y = k | \{\pi_k\}) = \pi_k = \prod_k \pi_k^{[Y=k]} \quad (\text{Algebraic Follies!})$$

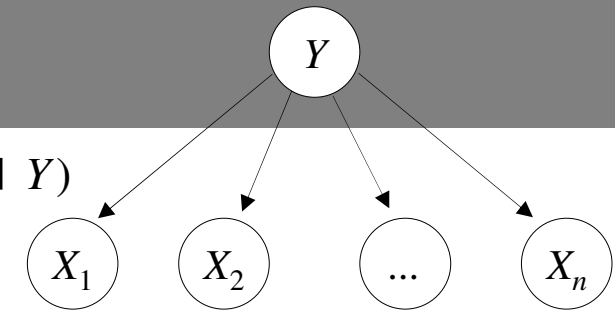
$$P(X_i = j | Y_m = k, \{\eta_{ijk}\}) = \eta_{ijk} = \prod_j \prod_k \eta_{ijk}^{[X_i=j][Y=k]}$$

$$\ell(\{\pi_k, \eta_{ijk}\} | D) = \sum_m \sum_k [Y_m = k] \log \pi_k + \sum_m \sum_i \sum_j \sum_k [X_{mi} = j][Y_m = k] \log \eta_{ijk}$$

■ *Maximum Likelihood Estimation*

I due termini principali della funzione possono essere massimizzati separatamente

Apprendimento del filtro *anti-spam*



$$P(Y, \{X_i\}) = P(Y) \prod_{i=1}^n P(X_i | Y)$$

■ Maximum Likelihood Estimation

$$\ell(\{\pi_k, \eta_{ijk}\} | D) = \sum_m \sum_k [Y_m = k] \log \pi_k + \sum_m \sum_i \sum_j \sum_k [X_{mi} = j][Y_m = k] \log \eta_{ijk}$$

Ottimizzazione del primo termine:

moltiplicatore di Lagrange

$$\ell^*(\{\pi_k\} | D) = \sum_m \sum_k [Y_m = k] \log \pi_k + \lambda(1 - \sum_k \pi_k)$$

$$\frac{\partial \ell^*}{\partial \pi_k} = \frac{\sum_m [Y_m = k]}{\pi_k} - \lambda$$

numero di messaggi in D classificati come k

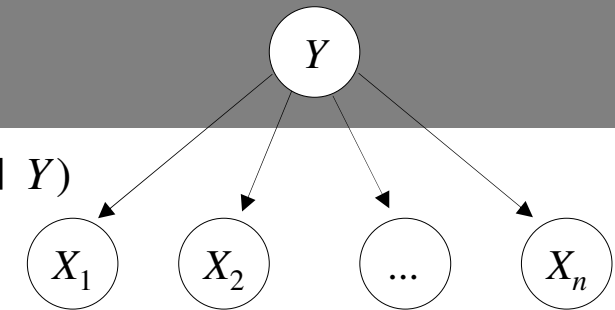
$$\frac{\partial \ell^*}{\partial \pi_k} = 0 \Rightarrow \pi_k = \frac{N_{Y=k}}{\lambda}$$

numero complessivo di messaggi in D

$$\sum_k \pi_k = 1 \Rightarrow \sum_k \frac{N_{Y=k}}{\lambda} = 1 \Rightarrow \lambda = \sum_k N_{Y=k} = N_D$$

$$\pi_k^* = \frac{N_{Y=k}}{N_D} \quad (\text{Maximum Likelihood Estimator di } \pi_k)$$

Apprendimento del filtro *anti-spam*



$$P(Y, \{X_i\}) = P(Y) \prod_{i=1}^n P(X_i | Y)$$

■ *Maximum Likelihood Estimation*

$$\ell(\{\pi_k, \eta_{ijk}\} | D) = \sum_m \sum_k [Y_m = k] \log \pi_k + \sum_m \sum_i \sum_j \sum_k [X_{mi} = j][Y_m = k] \log \eta_{ijk}$$

Ottimizzazione del secondo termine:

$$\ell^*(\{\eta_{ijk}\} | D) = \sum_m \sum_i \sum_j \sum_k [X_{mi} = j][Y_m = k] \log \eta_{ijk} + \sum_i \sum_k \lambda_{ik} (1 - \sum_j \eta_{ijk})$$

$$\frac{\partial \ell^*}{\partial \eta_{ijk}} = \frac{\sum_m [X_{mi} = j][Y_m = k]}{\eta_{ijk}} - \lambda_{ik}$$

$$\frac{\partial \ell^*}{\partial \eta_{ijk}} = 0 \Rightarrow \eta_{ijk} = \frac{N_{X_i=j, Y=k}}{\lambda_{ik}}$$

$$\sum_j \eta_{ijk} = 1 \Rightarrow \sum_j \frac{N_{X_i=j, Y=k}}{\lambda_{ik}} = 1 \Rightarrow \lambda_{ik} = \sum_j N_{X_i=j, Y=k} = N_{Y=k}$$

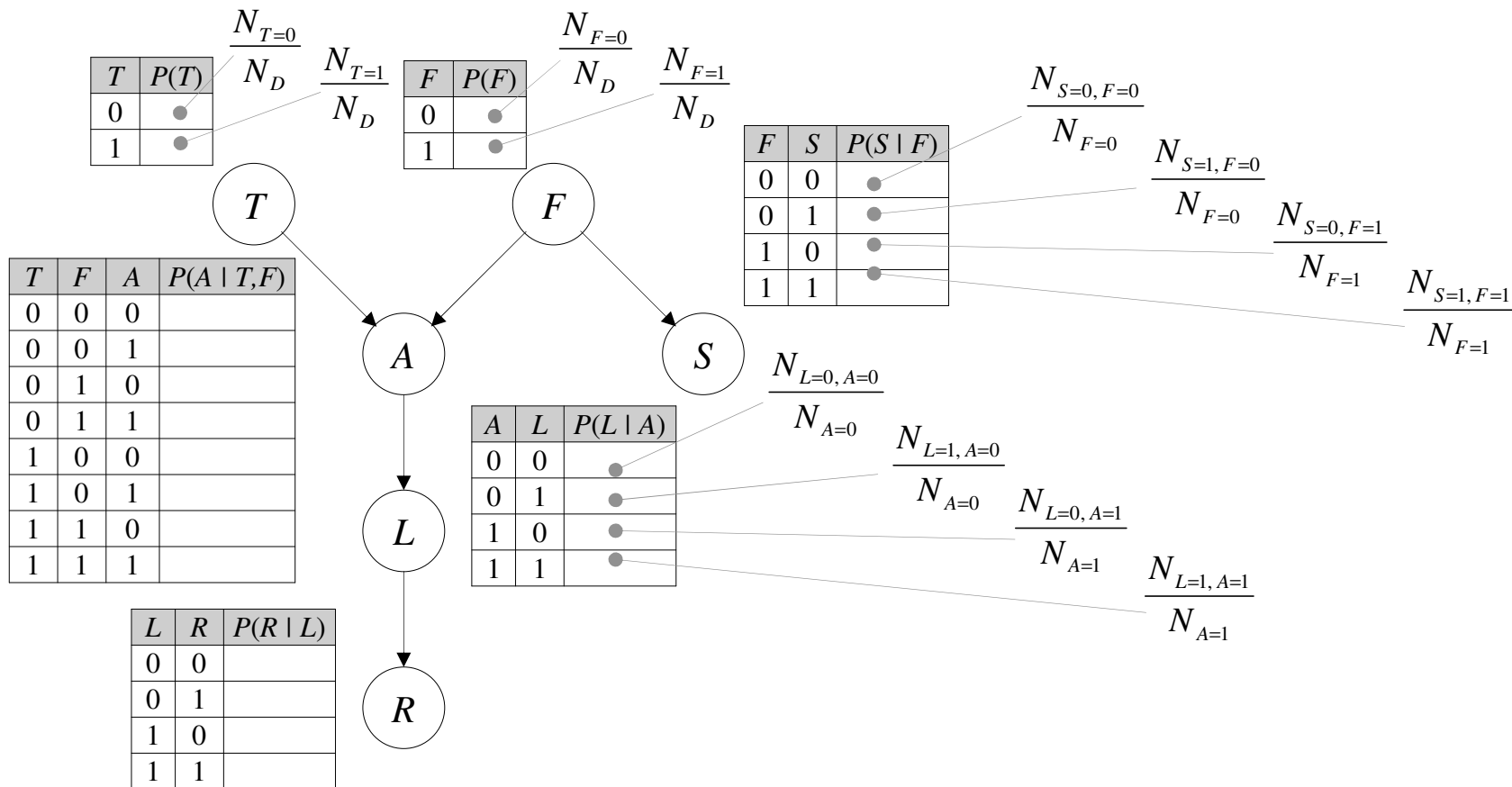
$$\eta_{ijk}^* = \frac{N_{X_i=j, Y=k}}{N_{Y=k}} \quad (\text{Maximum Likelihood Estimator di } \eta_{ijk})$$

Apprendimento per un modello grafico

La *Maximum Likelihood Estimation* del filtro anti-spam si estende al caso più generale

Modello parametrico: il modello grafico del *fire alarm*, con le probabilità come parametri

Osservazioni: sequenza di set di valori, ottenuta da eventi completamente osservati



Apprendimento bayesiano

■ *Maximum a Posteriori Estimation (MAP)*

Invece di massimizzare la sola *likelihood function*, si massimizza la probabilità a posteriori

$$P(\theta|D) = \frac{P(D|\theta)P(\theta)}{P(D)} = \frac{P(D|\theta)P(\theta)}{\sum_{\theta} P(D|\theta)P(\theta)}$$

Il che equivale a massimizzare il termine:

$$P(D|\theta)P(\theta)$$

Passando al logaritmo:

$$\log P(D|\theta) + \log P(\theta)$$

termine 'a priori'

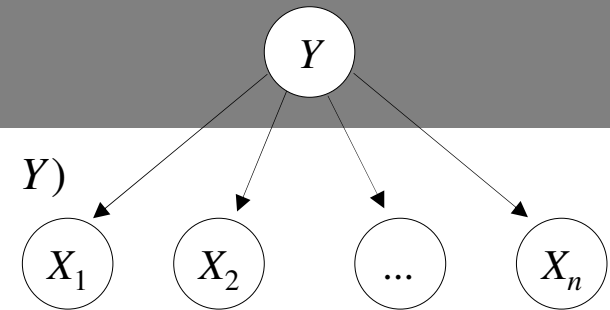
Log-Likelihood Function

Vantaggi:

- Maggiore regolarità: alcune combinazioni potrebbero essere mancanti in D
- Una formula per l'apprendimento incrementale:
i termini a priori possono rappresentare la conoscenza *prima* delle osservazioni D

Apprendimento del filtro *anti-spam*

$$P(Y, \{X_i\}) = P(Y) \prod_{i=1}^n P(X_i | Y)$$



■ *Maximum a Posteriori Estimation*

Ripetendo il procedimento di ottimizzazione per:

$$\log P(D|\theta) + \log P(\theta)$$

Si ottiene:

$$\pi_k^* = \frac{\alpha_k + N_{Y=k}}{\sum_k \alpha_k + N_D} \quad (\text{MAP Estimator di } \pi_k)$$

$$\eta_{ijk}^* = \frac{\alpha_{ijk} + N_{X_i=j, Y=k}}{\sum_j \alpha_{ijk} + N_{Y=k}} \quad (\text{MAP Estimator di } \eta_{ijk})$$

Dove

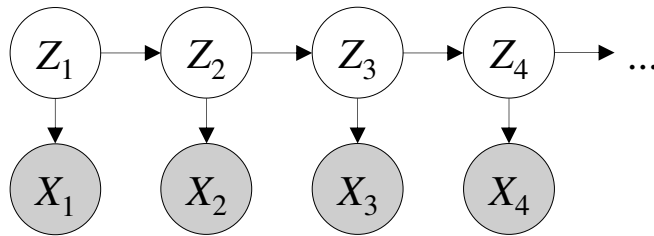
$$\frac{\alpha_k}{\sum_k \alpha_k} \quad \frac{\alpha_{ijk}}{\sum_j \alpha_{ijk}}$$

sono le probabilità a priori, sotto forma di frequenze relative

(o i parametri del modello grafico *prima* dell'arrivo di un nuovo lotto di messaggi D)

Osservazioni incomplete

Esempio: modello 'Hidden Markov'



Nota lessicale:

hidden = latent = always unobserved
missing = unobserved (in a data set)

In genere, i nodi Z_i sono *hidden*,
nel senso di *non-osservabili*

$$P(Z_1, \dots, Z_n, X_1, \dots, X_n) = P(Z_1) P(X_1 | Z_1) \prod_{i=2}^n P(Z_i | Z_{i-1}) P(X_i | Z_i)$$

■ Problema

Trovare la *MLE* dei parametri $\{\theta_k\}$ del modello partendo da osservazioni parziali $\{X_j\}$

In altri termini, si tratta di trovare il *MLE* della *likelihood function*

$$L(\{\theta_k\} | D) = \sum_{\{Z_i\}} P(\{Z_i\}, \{X_j\} | \{\theta_k\})$$

Notare che il modello (= la distribuzione congiunta) e le osservazioni sono noti,
non sono noti i parametri e i valori delle variabili hidden

Algoritmo *Expectation-Maximization* (EM)

Problema: trovare la *MLE* dei parametri $\{\theta_k\}$ del modello partendo da osservazioni parziali $\{X_j\}$

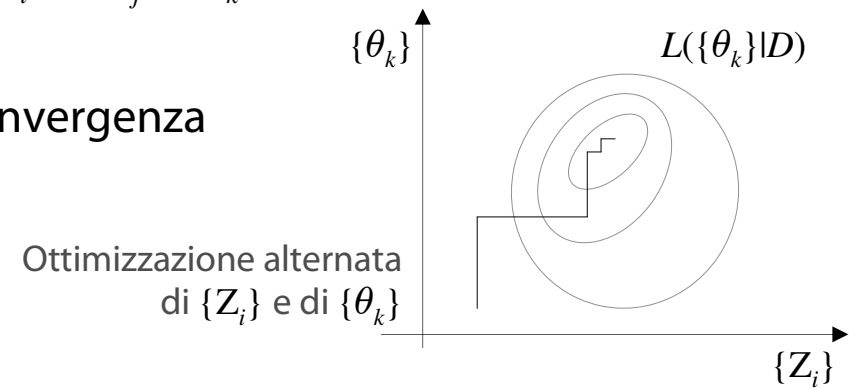
- 1) Assegnazione di un valore iniziale (p.es. *casuale*) ai parametri $\{\theta_k\}$
- 2) Calcolo della distribuzione $P(\{Z_i\} | \{X_j\}, \{\theta_k\})$
(*E-step*)

$$P(\{Z_i\} | \{X_j\}, \{\theta_k\}) = \frac{P(\{X_j\} | \{Z_i\}, \{\theta_k\}) P(\{Z_i\} | \{\theta_k\})}{\sum_{\{Z_i\}} P(\{X_j\} | \{Z_i\}, \{\theta_k\}) P(\{Z_i\} | \{\theta_k\})}$$

- 3) *MLE* del valor medio di $L(\{\theta_k\} | \{Z_i\}, \{X_j\})$, data la distribuzione $P(\{Z_i\} | \{X_j\}, \{\theta_k\})$
(*M-step*)

$$\{\theta_k^*\} = \arg \max_{\{\theta_k\}} \sum_{\{Z_i\}} P(\{Z_i\} | \{X_j\}, \{\theta_k\}) P(\{Z_i\}, \{X_j\} | \{\theta_k\})$$

- 4) Ritorno al passo 2), usando $\{\theta_k^*\}$, fino a alla convergenza



Apprendimento delle strutture

L'apprendimento della struttura di un modello grafico dai dati

■ Problema:

come si misura l'adeguatezza di un modello grafico alle osservazioni

Si può vedere come l'ottimizzazione di

$$L(Model, \theta_{Model} | D) = P(D | Model, \theta_{Model})$$

Ovviamente non è un problema facile

Si può affrontare come un problema di ricerca in uno spazio,
usando la metrica come *euristica*

Si possono usare metodi di calcolo evolutivo

Caveat:

Occorre considerare anche la semplicità del modello

Ad esempio $L(Model, \theta_{Model} | D)$ sarà massima per

$$P(X_1, X_2, X_3, X_4) = P(X_1)P(X_2 | X_1)P(X_3 | X_1, X_2)P(X_4 | X_1, X_2, X_3) \quad (\text{Dipendenza completa})$$

Minimum Description Length (MDL) (Lam e Bacchus, 1993)

Lunghezza della descrizione del modello + lunghezza descrizione dei dati, dato il modello

$$DL = DL_{Model} + DL_{Data \setminus Model}$$

■ Lunghezza della descrizione del modello

Bit usati per un val. di probabilità

Valori assunti da X_i

$$DL_{Model} = \sum_{i=1}^n \left[|\Pi_{X_i}| \log_2 n + d(v_i - 1) \prod_{X_j \in \Pi_{X_i}} v_j \right]$$

Insieme dei $parents(X_i)$

Valori assunti dai $parents(X_j)$

■ Lunghezza della descrizione dei dati, dato il modello

Frequenza relativa dei valori effettivi nei dati D

$$DL_{Data \setminus Model} = - \sum_{i=1}^n \sum_{X_i, \Pi_{X_i}} F_D(X_i, \Pi_{X_i}) \log_2 \frac{F_D(X_i, \Pi_{X_i})}{F_D(X_i) F_D(\Pi_{X_i})}$$

Insieme dei $parents(X_i)$

Tutte le sommatorie riguardano valori locali calcolati per ciascun nodo

Evolutionary Programming per i modelli (Wong e Leung, 1999)

- Individui della popolazione
 - Modelli grafici
- Funzione di fitness
 - Minimum Description Length*
- Operatori genetici
 - Solo mutazioni

