

Statistical methods for machine learning

Mauro Tellaroli

Indice

1	Introduzione	2
1.1	Definizioni fondamentali	2
1.1.1	<i>Label set</i> \mathcal{Y}	2
1.1.2	<i>Loss function</i> ℓ	2
1.1.3	<i>Data domain</i> \mathcal{X}	3
1.1.4	Predittori f	4
1.1.5	Esempi	4
1.1.6	<i>Test set</i> e <i>test error</i>	4
1.1.7	<i>Learning algorithm</i> A	4
1.1.8	<i>Training error</i> ℓ_S	4
1.2	Empirical Risk Minimization (ERM)	5
1.2.1	Definizione	5
1.2.2	Predittori con <i>test error</i> elevato	5
1.2.3	<i>Overfitting</i> e <i>underfitting</i>	6
1.2.4	Etichette rumorose	6
2	Gli algoritmi <i>Nearest Neighbor</i>	7
2.1	<i>Nearest Neighbor</i> (NN)	7
2.1.1	Definizione	7
2.1.2	Efficienza ed efficacia	8
2.2	k - <i>Nearest Neighbor</i> (k -NN)	8
2.2.1	Definizione	8
2.2.2	Efficienza ed efficacia	8
3	<i>Tree Predictors</i>	10
3.1	Definizione	10
3.2	Costruzione di un <i>tree predictor</i>	11
3.2.1	Idea generale	11
3.2.2	<i>Training error</i>	11
3.2.3	Crescita dell'albero e <i>training error</i>	13
3.2.4	Algoritmo generale	14
3.3	<i>Overfitting</i>	14
3.4	Interpretabilità	15
4	<i>Statistical Learning</i>	16
4.1	Definizioni	16
4.1.1	Rischio statistico $\ell_{\mathcal{D}}$	16
4.1.2	Predittore ottimo di Bayes f^*	16
4.1.3	Rischio condizionato	16
4.1.4	Rischio di Bayes $\ell_{\mathcal{D}}(f^*)$	16
4.2	f^* e $\ell_{\mathcal{D}}$ nelle varie <i>loss function</i>	16
4.2.1	<i>Quadratic loss</i>	17
4.2.2	<i>Zero-one loss</i>	18

1 Introduzione

1.1 Definizioni fondamentali

La *data inference* è lo studio dei metodi che utilizzano i dati per predire il futuro. Il *Machine Learning* è uno strumento potente che può essere usato per risolvere una grossa parte dei problemi di *data inference*, inclusi i seguenti:

- **Clustering**: raggruppare i *data points* in base alle loro similarità;
- **Prediction**: assegnare delle etichette (*label*) ai *data points*;
- **Generation**: generare nuovi *data points*;
- **Control**: eseguire una sequenza di azioni in un ambiente con l'obiettivo di massimizzare una nozione di utilità.

Con *data point* si intende una serie di informazioni legate ad un unico elemento; un'analogia può essere un *record* in un database.

Gli algoritmi che risolvono una *learning task* in base a dei dati già semanticamente etichettati lavorano in modalità ***supervised learning***. A etichettare i dati saranno delle persone o la natura. Un esempio dell'ultimo caso sono le previsioni del meteo. D'altra parte, gli algoritmi che utilizzano i dati senza la presenza di etichette lavorano in modalità ***unsupervised learning***.

In questo corso ci si focalizzerà sul *supervised learning* e la progettazione di sistemi di *machine learning* il cui obiettivo è apprendere dei **predittori**, ovvero funzioni che mappano i *data points* alla loro etichetta.

1.1.1 Label set \mathcal{Y}

Verrà usata \mathcal{Y} per indicare il *label set*, ovvero l'insieme di tutte le possibili etichette di un *data point*. Le etichette potranno essere di due tipi differenti:

1. **Categoriche** ($\mathcal{Y} = \{\text{sport, politica, economia}\}$): si parlerà di problemi di **classificazione**;
2. **Numeriche** ($\mathcal{Y} \subseteq \mathbb{R}$): si parlerà di problemi di **regressione**.

È importante sottolineare come la reale differenza tra le due tipologie di etichetta sia il significato e non la sua rappresentazione in quanto, si potrà sempre codificare un'etichetta categorica in un numero.

A sottolineare ciò è il fatto che nella regressione l'errore è tipicamente una funzione della differenza $|y - \hat{y}|$, dove \hat{y} è la predizione di y . Nella classificazione, invece, l'errore è tipicamente binario: predizione corretta ($\hat{y} = y$) o errata ($\hat{y} \neq y$).

Quando ci sono solo due possibili etichette ($|\mathcal{Y}| = 2$), si ha un **problema di classificazione binario** e, convenzionalmente, verrà usata una codifica numerica $\mathcal{Y} = \{-1, 1\}$.

1.1.2 Loss function ℓ

Come già visto precedentemente, si vuole misurare l'errore che un predittore commette su una determinata predizione. Per farlo si userà una **funzione di loss** ℓ non negativa che misurerà la discrepanza $\ell(y, \hat{y})$ tra l'etichetta predetta \hat{y} e quella corretta y . Si assumerà sempre $\ell(y, \hat{y}) = 0$ quando $\hat{y} = y$.

La funzione di loss più semplice per la classificazione è la **zero-one loss**:

$$\ell(y, \hat{y}) = \begin{cases} 0 & y = \hat{y} \\ 1 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Nella regressione, le tipiche funzioni di loss sono:

- la **absolute loss**: $\ell(y, \hat{y}) = |y - \hat{y}|$

- la **quadratic loss**: $\ell(y, \hat{y}) = (y - \hat{y})^2$

In alcuni casi può essere conveniente scegliere l'etichetta predetta da un insieme \mathcal{Z} diverso da \mathcal{Y} . Per esempio, si consideri il problema di assegnare una probabilità $\hat{y} \in (0, 1)$ all'evento $y = \text{"pioverà domani"}$. In questo caso, $\mathcal{Y} = \{\text{"piove", "non piove"}\}$ e $\mathcal{Z} = (0, 1)$. Indicando questi due eventi con 1 (piove) e 0 (non piove), si può usare una funzione di loss per la regressione, come la *absolute loss*:

$$\ell(y, \hat{y}) = |y - \hat{y}| = \begin{cases} 1 - \hat{y} & y = 1 \quad (\text{piove}) \\ \hat{y} & y = 0 \quad (\text{non piove}) \end{cases}$$

Per penalizzare maggiormente le predizioni che distano troppo dalla realtà, si può usare una **logarithmic loss**:

$$\ell(y, \hat{y}) = \begin{cases} \ln \frac{1}{\hat{y}} & y = 1 \quad (\text{piove}) \\ \ln \frac{1}{1-\hat{y}} & y = 0 \quad (\text{non piove}) \end{cases}$$

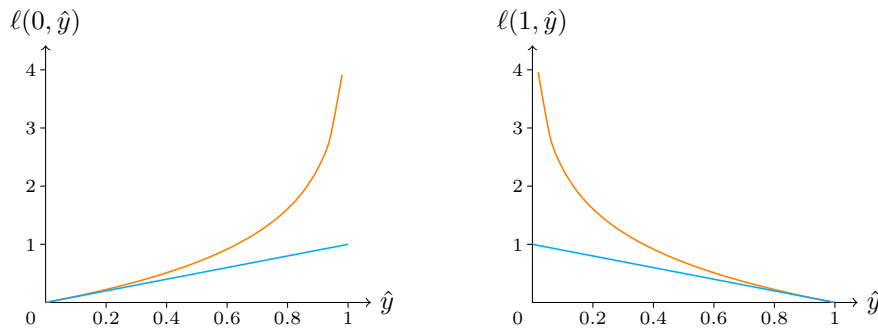


Figura 1: Confronto tra *absolute loss* e *logarithmic loss*; a sinistra il caso $y = 0$, a destra $y = 1$.

Si noti in figura 1 come la *logarithmic loss* tenda ad infinito quando la predizione è opposta all'etichetta reale:

$$\lim_{\hat{y} \rightarrow 1^-} \ell(0, \hat{y}) = \lim_{\hat{y} \rightarrow 0^+} \ell(1, \hat{y}) = +\infty$$

In pratica questo previene l'utilizzo di predizioni \hat{y} troppo sicure, quindi troppo vicine a zero o uno.

1.1.3 Data domain \mathcal{X}

Verrà usata \mathcal{X} per indicare l'insieme dei *data points*; ogni suo punto $x \in \mathcal{X}$ è tipicamente un record di un database formato da *feature*:

$$x = (x_1, \dots, x_d)$$

Spesso un *data point* può essere codificato come un vettore i cui elementi sono le sue *feature*. Questa codifica risulta naturale in presenza di quantità omogenee, come i pixel di un'immagine o una lista di occorrenze di parole in un testo. Quando invece i dati presenti utilizzano unità di misura differenti, come "età" e "altezza", la codifica non risulta più immediata. Ci sarà bisogno di una procedura che codifichi i dati in modo da ottenere uno spazio vettoriale omogeneo e coerente con i dati iniziali.

In questo corso si assumerà che i dati possano essere rappresentati da vettori di numeri:

$$\mathcal{X} \equiv \mathbb{R}^d$$

1.1.4 Predittori f

Un **predittore** è una funzione $f : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$ che mappa i *data points* alle etichette (o $f : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Z}$). Si può quindi dire che in un problema di predizione l'obiettivo è ottenere una funzione f che genera delle predizioni $\hat{y} = f(x)$ tali che $\ell(y, \hat{y})$ sia basso per il maggior numero di punti $x \in \mathcal{X}$ osservati. In pratica, **la funzione f è definita da un certo numero di parametri in un dato modello**. Un esempio sono i parametri di una rete neurale.

1.1.5 Esempi

Nel *supervised learning* un **esempio** è una coppia (x, y) dove x è un *data point* e y la sua reale etichetta.

In alcuni casi x ha un'unica y , come nel caso in cui y rappresenta una proprietà oggettiva di x ; in altri casi, invece, x può avere diverse y associate, come quando le y sono soggettivamente assegnate da persone.

1.1.6 Test set e test error

Per poter stimare la qualità di un predittore si usa un insieme di esempi detto **test set**:

$$\{(x'_1, y'_1), \dots, (x'_n, y'_n)\}$$

Data una *loss function* ℓ , il *test set* viene usato per calcolare il **test error** di un predittore f :

$$\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \ell(\underbrace{y'_t}_{\text{reale}}, \underbrace{f(x'_t)}_{\text{predetta}})$$

Il *test error* ha quindi lo scopo di calcolare la prestazione media del predittore su dei dati reali.

1.1.7 Learning algorithm A

Si definisce *training set* S un insieme di esempi:

$$S = \{(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)\}$$

che viene usato dal **learning algorithm** A per produrre un predittore $A(S)$. Informalmente, il *learning algorithm* “impara” dal *training set*.

$$\underbrace{\{(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)\}}_S \longrightarrow \boxed{\begin{matrix} A \\ \ell \end{matrix}} \longrightarrow A(S) = f : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$$

Il *test set* e il *training set* vengono solitamente prodotti assieme attraverso un processo di collezione dati e etichettamento. Dato l'insieme di esempi preparati, questo verrà partizionato in *test set* e *training set*, tipicamente tramite una divisione casuale. **Obiettivo del corso è lo sviluppo di una teoria che ci guidi nella progettazione di learning algorithm che generano predittori con un basso test error.**

1.1.8 Training error ℓ_S

Sia $S = \{(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)\}$ il *training set*; viene definito, equivalentemente al *test error*, il **training error**:

$$\ell_S(f) = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m \ell(y_t, f(x_t))$$

Un approccio intuitivo alla progettazione di *learning algorithm* è quello di assumere che il *training error* $\ell_S(f)$ del predittore f sia correlato con il suo *test error*.

1.2 Empirical Risk Minimization (ERM)

1.2.1 Definizione

Sia \mathcal{F} un insieme di predittori e ℓ una *loss function*. L'*empirical risk minimizer* (ERM) è il *learning algorithm* A che restituisce un predittore in \mathcal{F} che **minimizza il *training error***:

$$A(S) \in \operatorname{argmin}_{f \in \mathcal{F}} \ell_S(f)$$

Si noti come $A(S)$ appartenga e non uguagli il minimo; questo perchè ci potrebbero essere più $f \in \mathcal{F}$ che minimizzano $\ell_S(f)$.

1.2.2 Predittori con *test error* elevato

Quando in \mathcal{F} tutti i predittori hanno un *test error* alto, ERM produrrà un pessimo predittore. **Per trovare un buon predittore, ovvero un predittore con un *test error* basso, ci sarà quindi bisogno che \mathcal{F} sia sufficientemente grande.**

Tuttavia, se \mathcal{F} è troppo grande, anche in questo caso verrà prodotto un pessimo predittore. Un esempio è il seguente.

Si consideri il seguente problema “giocattolo”:

$$\mathcal{Y} = \{-1, 1\} \quad \mathcal{X} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$$

Si prenda l'insieme \mathcal{F} contenente un classificatore $f : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$ per ognuna delle possibili combinazioni di etichettamento dei cinque *data points*. \mathcal{F} sarà quindi formata da $2^5 = 32$ classificatori:

$$\mathcal{F} = \{f_1, \dots, f_{32}\}$$

\mathcal{F}	$f(x_1)$	$f(x_2)$	$f(x_3)$	$f(x_4)$	$f(x_5)$
f_1	1	1	1	1	1
f_2	1	1	1	1	-1
f_3	1	1	1	-1	1
f_4	1	1	1	-1	-1
f_5	1	1	-1	1	1
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
f_{31}	-1	-1	-1	-1	1
f_{32}	-1	-1	-1	-1	-1

Si supponga che il *training set* S contenga solo tre *data points* qualsiasi e il *test set* contenga gli altri due. Sia f^* il predittore usato per etichettare i dati che quindi avrà zero *test e training error*; ogni etichetta y_t sarà quindi ottenuta da f^* :

$$y_t = f^*(x_t) \quad \forall t = 1, \dots, 5$$

Per rendere l'idea, si prenda come esempio:

$$f^* = f_3$$

$$\begin{aligned} S &= \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)\} \\ &= \{(x_1, 1), (x_2, 1), (x_3, 1)\} \end{aligned}$$

Nonostante ad avere *test error* nullo sia solo f_3 , ad avere il *training error* nullo sono i quattro classificatori che hanno $y_1, y_2, y_3 = 1$ ovvero f_1, f_2, f_3, f_4 . Questo perchè il *training set* S contiene solo i primi 3 *data points*.

Siamo quindi nella situazione in cui ERM trova più predittori con ℓ_S minimo e non ha abbastanza informazioni per capire quale di questi sia migliore a livello di *test error*.

Il problema dell'esempio appena visto è che \mathcal{F} è troppo grande rispetto al *training set*. La domanda che sorge spontanea è quindi: Quanto deve essere grande \mathcal{F} per poter ottenere un buon predittore tramite ERM?

La teoria dell'informazione ci suggerisce che S debba avere cardinalità $\log_2 |\mathcal{F}|$ o, viceversa, \mathcal{F} debba avere cardinalità 2^m . Quindi, nell'esempio di prima, il *training set* avrebbe dovuto contenere almeno $\log_2 |\mathcal{F}| = 5$ *data points*.

1.2.3 Overfitting e underfitting

I due eventi visti nella sezione precedente, che portano alla generazione di un predittore con *test set* elevato, vengono chiamati:

- **Underfitting:** si verifica quando il *training error* è elevato;
- **Overfitting:** si verifica quando il *training error* è basso ma il *test error* è alto.

Quando A è ERM e S ha dimensione fissata $|S| = m$:

- Ci si aspetta *overfitting* quando $\log_2 |\mathcal{F}| \gg m$;
- Ci si aspetta *underfitting* quando $\log_2 |\mathcal{F}| \ll m$.

1.2.4 Etichette rumorose

Il fenomeno dell'*overfitting* spesso accade quando le etichette sono rumorose, ovvero quando le etichette y non sono deterministicamente associate con i *data points* x . Questo può accadere per i seguenti motivi (non mutuamente esclusivi tra loro):

1. **Incertezza umana:** se ad etichettare S sono delle persone, ci sarà dell'incertezza in quanto persone diverse potrebbero avere opinioni diverse;
2. **Incertezza epistemica:** ogni *data point* è rappresentato da un vettore delle *feature* che non contiene abbastanza informazioni per determinare univocamente l'etichetta;
3. **Incertezza aleatoria:** il vettore delle *feature* che rappresenta il *data point* è ottenuto attraverso delle misurazioni rumorose.

Le etichette rumorose portano all'*overfitting* perchè possono ingannare l'algoritmo su quale sia la "vera" etichetta di una certo *data point*.

2 Gli algoritmi *Nearest Neighbor*

2.1 *Nearest Neighbor* (NN)

2.1.1 Definizione

Verrà introdotto ora l'algoritmo di *Nearest Neighbor* (NN) per la classificazione binaria con *feature* numeriche:

$$\mathcal{X} = \mathbb{R}^d \quad \mathcal{Y} = \{-1, 1\}$$

NN non è un'istanza di ERM in quanto non punta a minimizzare ℓ_S .

L'idea di NN è la seguente:

- Predici ogni punto del *training set* con la propria etichetta;
- Predici gli altri punti con l'etichetta del punto del *training set* che è più vicino al punto interessato.

Più formalmente, dato un *training set*:

$$S = \{(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)\}$$

l'algoritmo A_{NN} genera un classificatore $h_{NN} : \mathbb{R} \rightarrow \{-1, 1\}$ definito come segue:

$$h_{NN}(x) = \text{etichetta } y_t \text{ del punto } x_t \in S \text{ più vicino a } x$$

Se a minimizzare la distanza con x sono più punti, si predirà l'etichetta più presente tra i punti vicini. Se non c'è una maggioranza di etichette tra i punti più vicini si predirà un valore di default $\in \{-1, 1\}$.

Presi due punti $x = (x_1, \dots, x_d)$ e $x_t = (x_{t,1}, \dots, x_{t,d})$, la distanza $\|x - x_t\|$ verrà calcolata tramite la distanza euclidea:

$$\|x - x_t\| = \sqrt{\sum_{i=1}^d (x_i - x_{t,i})^2}$$

Ogni classificatore binario $f : \mathbb{R}^d \rightarrow \{-1, 1\}$ partiziona \mathbb{R}^d in due regioni (come mostrato in figura 2):

$$\{x \in \mathbb{R}^d : f(x) = 1\} \quad , \quad \{x \in \mathbb{R}^d : f(x) = -1\}$$

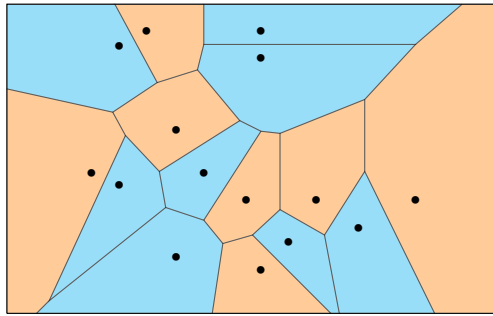


Figura 2: Diagramma di Voronoi in \mathbb{R}^2 ; tutti i punti x interni a una cella con centro $\bullet x_t$ sono tali che $h_{NN}(x) = y_t$

2.1.2 Efficienza ed efficacia

Siccome il funzionamento di NN implica la memorizzazione di tutto il *training set*, **l'algoritmo non scala bene con il numero di $|S| = m$ di *training point***. Inoltre, calcolare un qualsiasi $h_{\text{NN}}(x)$ è costoso, in quanto richiede di calcolare la distanza tra x e tutti gli altri punti di S ; questo in \mathbb{R}^d comporta un costo di $\Theta(dm)$.

Infine, si noti come, vista la completa memorizzazione di S , **NN generi sempre un classificatore h_{NN} con *training error* nullo:**

$$\ell_S(h_{\text{NN}}) = 0$$

2.2 k -Nearest Neighbor (k -NN)

2.2.1 Definizione

Partendo dagli algoritmi NN, si può ottenere una famiglia di algoritmi detta k -NN; il parametro k assume tipicamente i valori $k = 1, 3, 5, \dots$ con $k < |S|$.

Questi algoritmi sono definiti come segue: dato un *training set* S e un punto $x \in \mathcal{X}$, k -NN genererà un predittore $h_{k\text{-NN}}$ tale che:

$$h_{k\text{-NN}}(x) = \text{etichetta } y_t \text{ appartenente alla maggioranza dei } k \text{ punti più vicini a } x$$

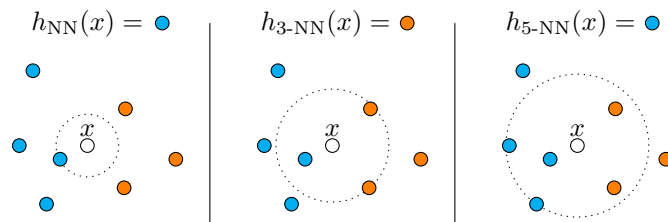


Figura 3: Esempi di $h_{k\text{-NN}}$ con $\mathcal{X} = \mathbb{R}^2$; si noti come, con lo stesso *training set*, la predizione cambia al variare di k .

2.2.2 Efficienza ed efficacia

A livello di efficienza k -NN soffre degli stessi problemi di NN vista la memorizzazione dell'intero *training set*.

Per quanto riguarda la sua efficacia invece, k -NN non ha sempre un *training error* nullo:

$$\ell_S(h_{k\text{-NN}}) \geq 0$$

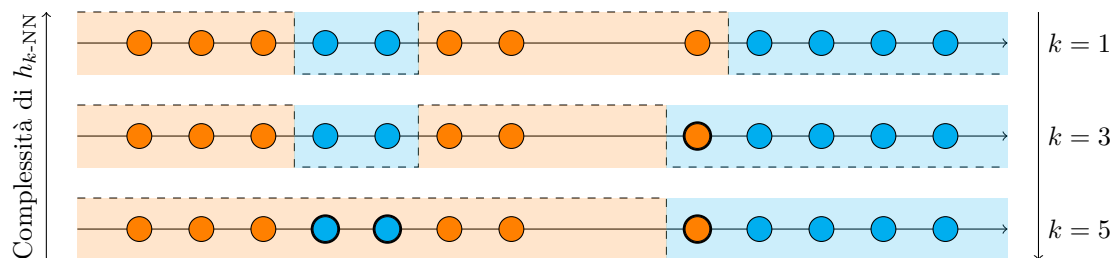


Figura 4: Esempi di $h_{k\text{-NN}}$ con $\mathcal{X} = \mathbb{R}$.

Come si può infatti notare dalla figura 4, nei casi con $k = 3$ e $k = 5$ sono presenti punti errati (evidenziati in grassetto) considerati dal classificatore come *outlier*. Inoltre **al crescere di k**

cresce anche la “semplicità” del classificatore così come il numero di punti errati. L'estremo di ciò è quando $k = |S|$; in questo caso infatti $h_{k\text{-NN}}$ diventa un classificatore costante che predice sempre l'etichetta più presente in tutto S .

In un generico classificatore $h_{k\text{-NN}}$ tipicamente succede che:

- Se k è troppo basso si ottiene un classificatore che si “fida” troppo del *training set*, ottenendo quindi *overfitting*;
- Se k è troppo alto, si ottiene un classificatore troppo semplice, ottenendo *underfitting*.

Tutti i classificatori introdotti fino ad'ora sono classificatori binari ($|\mathcal{Y}| = 2$). Tuttavia $k\text{-NN}$ può essere usato anche per:

- problemi di classificazione multiclasse ($|\mathcal{Y}| > 2$): si opera come nel caso binario, predicendo quindi l'etichetta più presente nei k punti più vicini;
- problemi di regressione ($\mathcal{Y} = \mathbb{R}$): si predice la media aritmetica delle etichette dei k punti più vicini.

3 Tree Predictors

3.1 Definizione

Come già visto, mentre alcuni tipi di dato hanno una naturale rappresentazione vettoriale $x \in \mathbb{R}^d$, altri non ce l'hanno. Un esempio possono essere dei *record* medici, dove i dati contengono i seguenti campi:

età $\in \{12, \dots, 90\}$
 fumatore $\in \{\text{sì}, \text{no}, \text{ex}\}$
 peso $\in [10, 200]$
 sesso $\in \{\text{M}, \text{F}\}$
 terapia $\in \{\text{antibiotici}, \text{cortisone}, \text{nessuna}\}$

Anche convertendo questi tipi di dato in dati numerici, gli algoritmi basati sulla distanza euclidea, come il k -NN, potrebbero non andare molto bene.

Per poter applicare la *data inference* su dati le cui *feature* variano in insiemi eterogenei $\mathcal{X}_1, \dots, \mathcal{X}_d$, verrà introdotta una nuova famiglia di predittori: i *tree predictors*.

Un *tree predictor* è un albero ordinato e radicato dove ogni nodo può essere una **foglia** o un **nodo interno**. È importante sottolineare che in un albero ordinato i figli di ogni nodo sono anch'essi ordinati e quindi numerabili consecutivamente. In figura 5 viene mostrato un esempio di *tree predictor* binario le cui *feature* sono:

previsione $\in \{\text{sole}, \text{nuvole}, \text{pioggia}\}$
 umidità $\in [0, 100]$
 vento $\in \{\text{sì}, \text{no}\}$

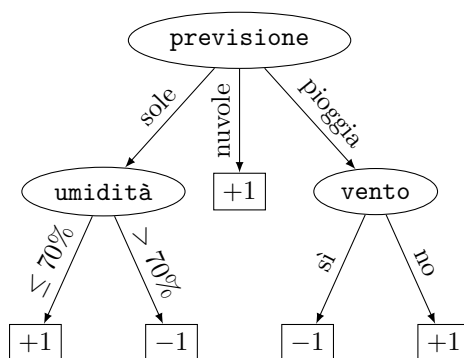


Figura 5: Esempio classico di *tree classifier* per una classificazione binaria.

Sia $\mathcal{X} = \mathcal{X}_1, \dots, \mathcal{X}_d$, dove ogni \mathcal{X}_i rappresenta il dominio dell' i -esimo attributo (o *feature*) x_i . Il *tree predictor* $h_T : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$ è un predittore definito da un albero T i cui nodi interni corrispondono a dei test e le cui foglie corrispondono a delle etichette $y \in \mathcal{Y}$.

Un test su un attributo i su un nodo interno con k figli è una funzione $f : \mathcal{X} \rightarrow \{1, \dots, k\}$. f mappa ogni elemento di \mathcal{X}_i a un nodo figlio. Due esempi possono essere i seguenti:

$$\begin{array}{ll} \mathcal{X}_i = \{a, b, c, d\} & k = 3 \\ f(x_i) = \begin{cases} 1 & x_i = c \\ 2 & x_i = d \\ 3 & x_i \in \{a, b\} \end{cases} & \end{array} \quad \begin{array}{ll} \mathcal{X}_i = [0, 100] & k = 2 \\ f(x_i) = \begin{cases} 1 & x_i \in [0, 70] \\ 2 & x_i \in (70, 100] \end{cases} & \end{array}$$

L'esempio di destra è riferito all'attributo *umidità* di figura 5.

La predizione $h_T(x)$ è calcolata come segue:

1. $v \leftarrow r$ (r è la radice di T)
2. se v è una foglia ℓ , si restituisce l'etichetta $y \in \mathcal{Y}$ associata a ℓ ;
3. altrimenti, sia $f : \mathcal{X}_i \rightarrow \{1, \dots, k\}$ il test associato a v , **assegna** $v \leftarrow v_j$ dove $j = f(x_i)$ e v_j indica il j -esimo figlio di v ;
4. vai al punto 2.

Se $h_T(x)$ restituisce la foglia ℓ , si dirà che l'esempio x è indirizzato a ℓ .

3.2 Costruzione di un *tree predictor*

3.2.1 Idea generale

Dato un *training set* S , si vedrà ora come costruire un *tree predictor*. Per semplicità, si guarderà solo ad una classificazione binaria $\mathcal{Y} = \{-1, 1\}$ e verranno usati solo alberi binari completi, cioè alberi dove ogni nodo interno ha due figli.

L'idea è quella di far crescere l'albero partendo da un singolo nodo (che dovrà essere una foglia). L'etichetta di quest'unica foglia sarà l'etichetta $\hat{y} \in \mathcal{Y}$, ovvero l'etichetta più presente nel *training set*. Si avrà quindi inizialmente, un classificatore che assegna a tutti i *data point* l'etichetta \hat{y} . **L'albero sarà fatto crescere scegliendo una foglia e rimpiazzandola con un nodo interno e due nuove foglie.**

3.2.2 Training error

Si chiami T l'albero cresciuto fino a un certo punto e h_T il classificatore corrispondente. **Obiettivo è calcolare il contributo che ogni foglia dà al *training error* $\ell_S(h_T)$.**

Presa una foglia ℓ , si vuole capire che etichetta assegnarle per minimizzare ℓ_S .

Si definisca:

$$S_\ell = \{(x_t, y_t) \in S : x_t \text{ è indirizzato a } \ell\}$$

S_ℓ è quindi l'insieme degli esempi di *training* che sono indirizzati alla foglia ℓ . Si divida ora S_ℓ in due sottoinsiemi:

$$S_\ell^+ = \{(x_t, y_t) \in S_\ell : y_t = +1\}$$

$$S_\ell^- = \{(x_t, y_t) \in S_\ell : y_t = -1\}$$

Il primo conterrà tutti gli esempi di *training* che vengono indirizzati a ℓ con etichetta positiva mentre il secondo con etichetta negativa. Di questi insiemi si prenda il loro numero di elementi:

$$N_\ell^+ = |S_\ell^+| \quad N_\ell^- = |S_\ell^-| \quad N_\ell = |S_\ell|$$

È facile capire che se la maggior parte degli esempi di *training* che vengono indirizzati alla foglia ℓ hanno etichetta positiva, allora l'etichetta che bisognerà dare a ℓ , per minimizzare il suo errore ℓ_S , sarà l'etichetta positiva (chiaramente lo stesso discorso vale per l'etichetta negativa); questa intuizione può essere quindi usata per assegnare l'etichetta y_ℓ alla foglia ℓ nel seguente modo:

$$y_\ell = \begin{cases} +1 & N_\ell^+ \geq N_\ell^- \\ -1 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Di conseguenza la foglia ℓ sbaglierà la sua previsione su $\min\{N_\ell^+, N_\ell^-\}$ esempi di *training*. Per facilitare delle successive osservazioni moltiplichiamo e dividiamo per N_ℓ :

$$\min\{N_\ell^+, N_\ell^-\} = \min\left\{\frac{N_\ell^+}{N_\ell}, \frac{N_\ell^-}{N_\ell}\right\} N_\ell$$

Quindi se il valore appena scritto è l'errore che una singola foglia ℓ fa, il *training error* sarà:

$$\begin{aligned}\ell_S(h_T) &= \frac{1}{m} \sum_{\ell} \min \left\{ \frac{N_{\ell}^+}{N_{\ell}}, \frac{N_{\ell}^-}{N_{\ell}} \right\} N_{\ell} \\ &= \frac{1}{m} \sum_{\ell} \psi \left(\frac{N_{\ell}^+}{N_{\ell}} \right) N_{\ell}\end{aligned}$$

Dove viene introdotta la funzione ψ , definita in $[0, 1]$:

$$\psi(a) = \min \{a, 1 - a\}$$

Si può facilmente intuire come N_{ℓ}^+/N_{ℓ} e N_{ℓ}^-/N_{ℓ} siano sempre compresi tra 0 e 1 in quanto rappresentano la percentuale di esempi positivi/negativi che raggiungono ℓ rispetto al totale degli esempi (sempre che raggiungono ℓ).

Esempio

Sia T l'albero di figura 6 e S il *training set* mostrato in tabella 1 (vengono mostrati solo gli esempi di S che sono indirizzati a ℓ' e ℓ''). Si deve decidere che etichette assegnare alle foglie ℓ' e ℓ'' ;

x_t	previsione	umidità	vento	y_t
x_1	sole	85	no	+1
x_2	sole	76	sì	-1
x_3	sole	55	sì	+1
x_4	sole	65	sì	-1
x_5	sole	82	sì	-1
x_6	sole	35	no	+1
x_7	sole	94	no	-1
x_8	sole	66	no	+1
x_9	sole	48	sì	+1

Tabella 1: Esempio di *training set*

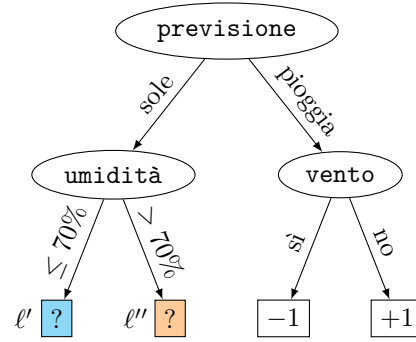


Figura 6: Esempio di *tree classifier* “in costruzione”.

Si prenda ℓ' :

$$S_{\ell'} = \{(x_3, +1), (x_4, -1), (x_6, +1), (x_8, +1), (x_9, +1)\} \quad N_{\ell'} = 5$$

$$S_{\ell'}^+ = \{(x_3, +1), (x_6, +1), (x_8, +1), (x_9, +1)\} \quad N_{\ell'}^+ = 4 \quad \frac{N_{\ell'}^+}{N_{\ell'}} = 0.8$$

$$S_{\ell'}^- = \{(x_4, -1)\} \quad N_{\ell'}^- = 1 \quad \frac{N_{\ell'}^-}{N_{\ell'}} = 0.2$$

L'**ottanta per cento** degli esempi che raggiungono ℓ' ha etichetta positiva, si può quindi affermare che l'etichetta $y_{\ell'} = +1$.

Si prenda infine ℓ'' :

$$S_{\ell''} = \{(x_1, +1), (x_2, -1), (x_5, -1), (x_7, -1)\} \quad N_{\ell''} = 4$$

$$S_{\ell''}^+ = \{(x_1, +1)\} \quad N_{\ell''}^+ = 1 \quad \frac{N_{\ell''}^+}{N_{\ell''}} = 0.25$$

$$S_{\ell''}^- = \{(x_2, -1), (x_5, -1), (x_7, -1)\} \quad N_{\ell''}^- = 3 \quad \frac{N_{\ell''}^-}{N_{\ell''}} = 0.75$$

Il **settantacinque per cento** degli esempi che raggiungono ℓ'' ha etichetta negativa, si può quindi affermare che l'etichetta $y_{\ell''} = -1$.

3.2.3 Crescita dell'albero e *training error*

Si supponga di sostituire una foglia ℓ con un nodo interno e due nuove foglie ℓ' e ℓ'' , come mostrato in figura 7. **Può il *training error* del nuovo albero espanso crescere rispetto a quello originale?**

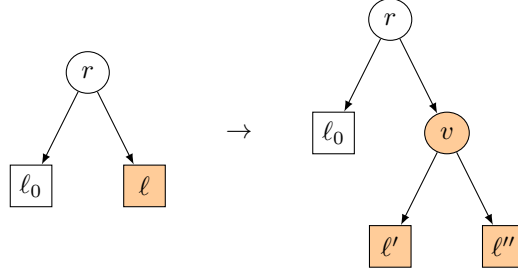


Figura 7: Un passaggio della crescita dell'albero: la foglia ℓ viene rimpiazzata da un nodo interno v con due nuove foglie ℓ' e ℓ'' .

L'apporto che la foglia ℓ dà al *training error* è:

$$\psi\left(\frac{N_{\ell}^{+}}{N_{\ell}}\right) N_{\ell} \quad (1)$$

Gli esempi con etichetta positiva che vengono indirizzati a ℓ saranno ora divisi tra ℓ' e ℓ'' :

$$N_{\ell}^{+} = N_{\ell'}^{+} + N_{\ell''}^{+} \quad (2)$$

Si può quindi ottenere che:

$$\begin{aligned} \frac{N_{\ell}^{+}}{N_{\ell}} &= \frac{N_{\ell'}^{+} + N_{\ell''}^{+}}{N_{\ell}} \\ &= \frac{N_{\ell'}^{+}}{N_{\ell}} + \frac{N_{\ell''}^{+}}{N_{\ell}} \\ &= \frac{N_{\ell'}^{+}}{N_{\ell}} \cdot \frac{N_{\ell'}}{N_{\ell'}} + \frac{N_{\ell''}^{+}}{N_{\ell}} \cdot \frac{N_{\ell''}}{N_{\ell''}} \\ &= \frac{N_{\ell'}^{+}}{N_{\ell'}} \cdot \frac{N_{\ell'}}{N_{\ell}} + \frac{N_{\ell''}^{+}}{N_{\ell''}} \cdot \frac{N_{\ell''}}{N_{\ell}} \end{aligned} \quad (3)$$

Dati (1) e (3) si può dire che l'apporto di ℓ è:

$$\psi\left(\frac{N_{\ell}^{+}}{N_{\ell}}\right) N_{\ell} = \psi\left(\frac{N_{\ell'}^{+}}{N_{\ell'}} \cdot \frac{N_{\ell'}}{N_{\ell}} + \frac{N_{\ell''}^{+}}{N_{\ell''}} \cdot \frac{N_{\ell''}}{N_{\ell}}\right) N_{\ell} \quad (4)$$

Si noti che ψ è una funzione concava. Questo permette di poter applicare la disuguaglianza di Jensen (valida con $a, b \in \mathbb{R} \wedge \mu \in [0, 1]$):

$$\psi(a\mu + b(1-\mu)) \geq \mu\psi(a) + (1-\mu)\psi(b) \quad (\text{Jensen})$$

$$\begin{aligned} \psi\left(\frac{N_{\ell'}^{+}}{N_{\ell'}} \cdot \frac{N_{\ell'}}{N_{\ell}} + \frac{N_{\ell''}^{+}}{N_{\ell''}} \cdot \frac{N_{\ell''}}{N_{\ell}}\right) N_{\ell} &\geq \cancel{N_{\ell}} \frac{N_{\ell'}}{\cancel{N_{\ell}}} \psi\left(\frac{N_{\ell'}^{+}}{N_{\ell'}}\right) + \cancel{N_{\ell}} \frac{N_{\ell''}}{\cancel{N_{\ell}}} \psi\left(\frac{N_{\ell''}^{+}}{N_{\ell''}}\right) \\ &\geq \psi\left(\frac{N_{\ell'}^{+}}{N_{\ell'}}\right) N_{\ell'} + \psi\left(\frac{N_{\ell''}^{+}}{N_{\ell''}}\right) N_{\ell''} \end{aligned} \quad (5)$$

Chiaramente si dovrà avere che:

$$\frac{N_{\ell''}}{N_{\ell}} = 1 - \frac{N_{\ell'}}{N_{\ell}}$$

Questo è facilmente verificabile a partire da (2). Infine, dati (4) e (5) si ha:

$$\underbrace{\psi\left(\frac{N_\ell^+}{N_\ell}\right) N_\ell}_{\text{apporto di } \ell} \geq \underbrace{\psi\left(\frac{N_{\ell'}^+}{N_{\ell'}}\right) N_{\ell'}}_{\text{apporto di } \ell'} + \underbrace{\psi\left(\frac{N_{\ell''}^+}{N_{\ell''}}\right) N_{\ell''}}_{\text{apporto di } \ell''}$$

Questo dimostra che, **facendo crescere l'albero, il *training error* non aumenta.**

Una foglia ℓ viene detta pura se non contribuisce ad aumentare il *training error*, ovvero:

$$N_\ell^+ \in \{0, N_\ell\}$$

In qualsiasi albero il *training error* è maggiore di zero ($\ell_S(h_T) > 0$) almeno che non abbia solo foglie pure.

3.2.4 Algoritmo generale

Verrà ora mostrato un algoritmo generale per la costruzione di un albero binario a partire da un *training set* S :

1. Inizializzazione:

- (a) Crea un albero T con solo la radice ℓ
- (b) $S_\ell = S$
- (c) y_ℓ = etichetta più frequente in S_ℓ

2. Main loop:

- (a) Scegli una foglia ℓ e sostituiscila con un nodo interno v e due nuove foglie ℓ' e ℓ''
- (b) Scegli un attributo i e un test $f : \mathcal{X}_i \rightarrow \{1, 2\}$
- (c) Associa il test f a v e partiziona S_ℓ in due sottoinsiemi:

$$S_{\ell'} = \{(x_t, y_t) \in S_\ell : f(x_{t,i}) = 1\} \quad \text{e} \quad S_{\ell''} = \{(x_t, y_t) \in S_\ell : f(x_{t,i}) = 2\}$$

- (d) Associa a ℓ' l'etichetta più frequente in $S_{\ell'}$
- (e) Associa a ℓ'' l'etichetta più frequente in $S_{\ell''}$

3.3 Overfitting

Se il numero di nodi dell'albero è troppo alto rispetto alla cardinalità di S si potrà avere dell'*overfitting*. Per questo motivo, la scelta della foglia da espandere dovrebbe garantire approssimativamente la riduzione massima del *training error*.

Nella pratica, per calcolare il *training error* si usano funzioni diverse da $\psi(p) = \min\{p, 1-p\}$. Questo perchè ψ può essere problematica in alcuni casi. Un esempio è il seguente:

$$p = \frac{N_\ell^+}{N_\ell} = 0.8 \quad q = \frac{N_{\ell'}^+}{N_{\ell'}} = 0.6 \quad r = \frac{N_{\ell''}^+}{N_{\ell''}} = 1 \quad \alpha = \frac{N_{\ell'}^+}{N_\ell} = 0.5$$

$$\underbrace{\psi(p)}_{\text{apporto di } \ell} - \underbrace{(\alpha\psi(q))}_{\text{apporto di } \ell'} + \underbrace{(1-\alpha)\psi(r)}_{\text{apporto di } \ell''} = 0.2 - (0.5 \cdot 0.4 + 0.5 \cdot 0) = 0$$

In questo passaggio il cambiamento che si avrebbe rimpiazzando la foglia ℓ sarebbe nullo e quindi non verrebbe scelto dall'algoritmo. Potrebbe inoltre succedere che tutte le foglie diano questo risultato facendo quindi bloccare l'algoritmo.

Per correggere questo problema vengono usate altre funzioni ψ . Queste funzioni sono simili a quella già vista in quanto simmetriche attorno a $1/2$ e nulle agli estremi ($\psi(0) = \psi(1) = 0$). Alcune funzioni usate sono:

- **Funzione di Gini:** $\psi_2(p) = 2p(1 - p)$
- **Entropia scalata:** $\psi_3(p) = -\frac{p}{2} \log_2(p) - \frac{1-p}{2} \log_2(1 - p)$
- $\psi_4(p) = \sqrt{p(1 - p)}$

Come si può vedere in figura 8, valgono le seguenti disuguaglianze ($\psi_1(p) = \min\{p, 1 - p\}$):

$$\psi_1(p) \leq \psi_2(p) \leq \psi_3(p) \leq \psi_4(p)$$

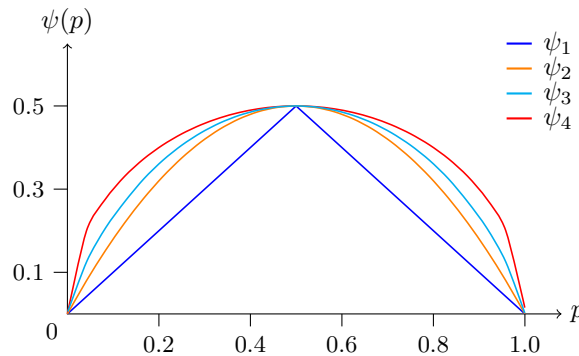


Figura 8: Grafici delle funzioni ψ

3.4 Interpretabilità

Una proprietà interessante dei *tree predictors* per la classificazione binaria è che possono essere rappresentati con una proposizione logica in forma normale disgiuntiva (DNF). Questa rappresentazione è ottenuta considerando le clausole (congiunzione di predicati) che risultano dai test che si trovano sui percorsi che portano ad un etichetta $+1$.

Un esempio è la seguente DNF ricavata dall'albero in figura 9:

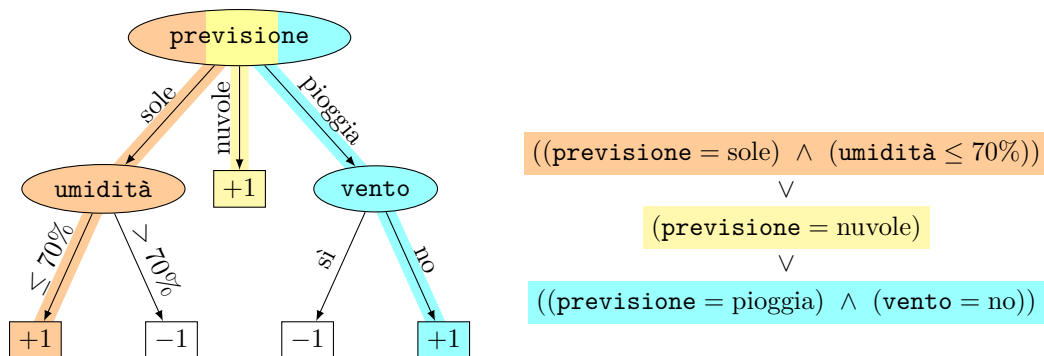


Figura 9: *Tree predictor*

Questa rappresentazione “logica” dell'albero è molto intuitiva e permette di essere manipolata attraverso le regole della logica proposizionale, permettendo quindi una possibile semplificazione del classificatore. Soprattutto, questa rappresentazione fornisce una descrizione interpretabile della conoscenza del *learning algorithm* estratta dal *training set*.

4 Statistical Learning

Per poter analizzare un *learning algorithm* c'è bisogno di definire un modello matematico di come gli esempi (x, y) siano generati. Nel contesto della *statistical learning* si assumerà che ogni esempio sia ottenuto attraverso un'estrazione indipendente da una distribuzione di probabilità fissata su $\mathcal{X} \times \mathcal{Y}$. Si scriverà (X, Y) per sottolineare come **le due componenti di un esempio siano due variabili aleatorie**.

Assumere che ogni esempio (x, y) sia la realizzazione di un'estrazione casuale **indipendente** da un'unica distribuzione \mathcal{D} , implica che ogni *dataset* (come *test* e *training set*) sia un campione statistico. L'indipendenza dei dati è in realtà violata in alcuni domini pratici. Nonostante ciò, l'assunzione di indipendenza nei dati è estremamente utile dal punto di vista della tracciabilità analitica del problema e funziona sorprendentemente bene nella pratica.

4.1 Definizioni

Nel contesto della *statistical learning* un problema è specificato da una coppia (\mathcal{D}, ℓ) , dove \mathcal{D} è la distribuzione e ℓ la *loss function*.

4.1.1 Rischio statistico $\ell_{\mathcal{D}}$

Le prestazioni di un predittore $h : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$ rispetto a (\mathcal{D}, ℓ) è valutata dal **rischio statistico**:

$$\ell_{\mathcal{D}}(h) = \mathbb{E}[\ell(Y, h(X))]$$

che indica il valore atteso della *loss function* su un esempio casuale (X, Y) estratto da \mathcal{D} .

4.1.2 Predittore ottimo di Bayes f^*

Data \mathcal{D} , il miglior predittore possibile $f^* : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$ è detto **predittore ottimo di Bayes**:

$$f^*(x) = \operatorname{argmin}_{\hat{y} \in \mathcal{Y}} \mathbb{E}[\ell(Y, \hat{y}) \mid X = x]$$

4.1.3 Rischio condizionato

L'argomento di argmin di f^* , ovvero $\mathbb{E}[\ell(Y, \hat{y}) \mid X = x]$, è detto **rischio condizionato**. Il *Bayes optimal predictor* quindi, è la predizione che minimizza il rischio condizionato. Un altro modo per scrivere il rischio condizionato di un predittore f è:

$$\mathbb{E}[\ell(Y, \hat{y}) \mid X = x] = \mathbb{E}[\ell(Y, f(X)) \mid X = x]$$

4.1.4 Rischio di Bayes $\ell_{\mathcal{D}}(f^*)$

Essendo f^* il miglior predittore possibile per \mathcal{D} è ragionevole pensare che esso abbia il rischio statistico migliore, ed è così; si ha infatti che il rischio $\ell_{\mathcal{D}}(f^*)$, detto **rischio di Bayes**, è il minore tra tutti i predittori:

$$\forall h \in \mathcal{F} \quad \ell_{\mathcal{D}}(f^*) \leq \ell_{\mathcal{D}}(h)$$

Tipicamente il rischio di Bayes è maggiore di zero vista la casualità delle etichette.

4.2 f^* e $\ell_{\mathcal{D}}$ nelle varie *loss function*

Si valuteranno ora i predittori ottimi di Bayes per le varie *loss function*.

4.2.1 Quadratic loss

Sia $\ell(y, \hat{y}) = (y - \hat{y})^2$ con $\mathcal{Y} = \mathbb{R}$.

Si analizzi il predittore ottimo di Bayes:

$$\begin{aligned} f^*(x) &= \operatorname{argmin}_{\hat{y} \in \mathbb{R}} \mathbb{E}[(Y - \hat{y})^2 \mid X = x] \\ &= \operatorname{argmin}_{\hat{y} \in \mathbb{R}} \mathbb{E}[Y^2 + \hat{y}^2 - 2\hat{y}Y \mid X = x] \end{aligned}$$

Per le varie proprietà del valore atteso si ha:

$$\begin{aligned} &= \operatorname{argmin}_{\hat{y} \in \mathbb{R}} (\mathbb{E}[Y^2 \mid X = x] + \mathbb{E}[\hat{y}^2 \mid X = x] - \mathbb{E}[2\hat{y}Y \mid X = x]) \\ &= \operatorname{argmin}_{\hat{y} \in \mathbb{R}} (\mathbb{E}[Y^2 \mid X = x] + \mathbb{E}[\hat{y}^2 \mid X = x] - 2\hat{y}\mathbb{E}[Y \mid X = x]) \end{aligned}$$

Siccome argmin varia su \hat{y} , tutti i fattori che non ne dipendono non incidono sul risultato; possono quindi essere tolti:

$$= \operatorname{argmin}_{\hat{y} \in \mathbb{R}} (\mathbb{E}[\hat{y}^2 \mid X = x] - 2\hat{y}\mathbb{E}[Y \mid X = x])$$

Non essendo \hat{y} una variabile aleatoria:

$$= \operatorname{argmin}_{\hat{y} \in \mathbb{R}} (\hat{y}^2 - 2\hat{y}\mathbb{E}[Y \mid X = x])$$

L'argomento di argmin è una funzione del tipo:

$$F(\hat{y}) = \hat{y}^2 - 2\hat{y}q \quad q = \mathbb{E}[Y \mid X = x]$$

Obiettivo di argmin è trovare il valore di \hat{y} che minimizza F . Facendo un semplice studio di funzione si può trovare che F è minimizzata quando:

$$F'(\hat{y}) = 2\hat{y} - 2q$$

Cerco il minimo:

$$\begin{aligned} F'(\hat{y}) &= 0 & \Rightarrow & \hat{y} = \mathbb{E}[Y \mid X = x] \\ 2\hat{y} - 2q &= 0 \\ \hat{y} &= q \end{aligned}$$

Si può quindi dire che:

$$f^*(x) = \mathbb{E}[Y \mid X = x] = \mathbb{E}[Y \mid X]$$

Sostituendo il risultato appena mostrato nella formula del rischio condizionato si ha:

$$\begin{aligned} &\mathbb{E}[\ell(Y, \hat{y}) \mid X = x] \\ &= \mathbb{E}[(Y - f^*(X))^2 \mid X = x] \\ &= \mathbb{E}[(Y - \mathbb{E}[Y \mid X])^2 \mid X = x] \\ &= \operatorname{Var}[Y \mid X] \end{aligned}$$

Il rischio di Bayes sarà quindi:

$$\ell_{\mathcal{D}}(f^*) = \mathbb{E}[\operatorname{Var}[Y \mid X]] \neq \operatorname{Var}[Y]$$

Da notare che il valore atteso della varianza dato X sia diverso dalla varianza; per la legge della varianza totale si ha infatti che:

$$\operatorname{Var}[Y] - \mathbb{E}[\operatorname{Var}[Y \mid X]] = \operatorname{Var}[\mathbb{E}[Y \mid X]]$$

4.2.2 Zero-one loss

Si guarderà ora la classificazione binaria dove $\mathcal{Y} = \{-1, 1\}$.

Si definiscano due funzioni:

$$\begin{aligned}\eta(x) &= \mathbb{P}(Y = 1 \mid X = x) & (\mathbb{P} \text{ è la funzione di probabilità}) \\ \mathbb{I}\{A\} &= \begin{cases} 1 & \text{si verifica } A \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} & (A \text{ è un evento})\end{aligned}$$

La funzione *zero-one loss* si potrà ora definire:

$$\ell(y, \hat{y}) = \mathbb{I}\{\hat{y} \neq y\}$$

Si analizzi il rischio statistico:

$$\begin{aligned}\ell_{\mathcal{D}}(h) &= \mathbb{E}[\ell(Y, h(X))] \\ &= \mathbb{E}[\mathbb{I}\{h(X) \neq Y\}] \\ &= \mathbb{P}(h(X) \neq Y)\end{aligned}$$

Di conseguenza **il predittore ottimo di Bayes è:**

$$\begin{aligned}f^*(x) &= \operatorname{argmin}_{\hat{y} \in \{-1, 1\}} \mathbb{E}[(Y - \hat{y})^2 \mid X = x] \\ &= \operatorname{argmin}_{\hat{y} \in \{-1, 1\}} \mathbb{E}[\mathbb{I}\{Y = 1\}\mathbb{I}\{\hat{y} = -1\} + \mathbb{I}\{Y = -1\}\mathbb{I}\{\hat{y} = 1\} \mid X = x]\end{aligned}$$

Si applichi la definizione di valore atteso:

$$\begin{aligned}&= \operatorname{argmin}_{\hat{y} \in \{-1, 1\}} \left(\mathbb{P}(Y = 1 \mid X = x)\mathbb{I}\{\hat{y} = -1\} + \mathbb{P}(Y = -1 \mid X = x)\mathbb{I}\{\hat{y} = 1\} \right) \\ &= \operatorname{argmin}_{\hat{y} \in \{-1, 1\}} \left(\eta(x)\mathbb{I}\{\hat{y} = -1\} + (1 - \eta(x))\mathbb{I}\{\hat{y} = 1\} \right) \\ &= \begin{cases} -1 & \eta(x) < 1/2 \\ +1 & \eta(x) \geq 1/2 \end{cases}\end{aligned}$$

$f^*(x)$ predurrà quindi l'etichetta con la maggior probabilità quando condizionata dall'istanza.

Infine è facile verificare che **il rischio di Bayes è:**

$$\ell_{\mathcal{D}}(f^*) = \mathbb{E}[\min\{\eta(X), 1 - \eta(X)\}]$$