

**METODI MATEMATICI PER
L'INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE:
APPUNTI 2016-2017
PAOLA LORETI**

1. ELEMENTI DI TOPOLOGIA DI \mathbb{R}^m

Ricordiamo che per $x, y \in \mathbb{R}$ valgono le seguenti proprietà

- $|x| \geq 0$
- $x \neq 0$ se e solo se $|x| > 0$
- $|x| = |-x|$
- $|xy| = |x||y|$
- $|x + y| \leq |x| + |y|$
- $||x| - |y|| \leq |x - y|$

1.1. **Norma.** \mathbb{R}^m con $p > 1$. La formula

$$\|x\|_p = (|x_1|^p + \dots + |x_m|^p)^{1/p}.$$

definisce una norma in \mathbb{R}^m . (da dimostrare più tardi tramite la disuguaglianza di Young, Holder, Minkowski).

Occorre verificare che valgono le seguenti proprietà $\forall x, y, z \in \mathbb{R}^m$ e $\lambda \in \mathbb{R}$:

- $\|x\| \geq 0$,
- $\|x\| = 0 \iff x = 0$,
- $\|\lambda x\| = |\lambda| \cdot \|x\|$,
- $\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$.

1.2. **Il prodotto scalare.** Il prodotto scalare in \mathbb{R}^m è un numero reale dato da

$$x \cdot y = x_1 y_1 + \dots + x_m y_m \quad \text{per ogni } x, y, z \in \mathbb{R}^m \quad \lambda \in \mathbb{R}$$

Occorre verificare che valgono le seguenti proprietà

$$x \cdot y = y \cdot x, \quad (x + y) \cdot z = x \cdot z + y \cdot z, \quad \lambda(x \cdot y) = \lambda x \cdot y.$$

$$(x, x) = \|x\|^2$$

Esempio 1.1.

- *La formula*

$$\|x\|_1 = |x_1| + \dots + |x_m|, \quad x = (x_1, \dots, x_m) \in \mathbb{R}^m$$

definisce una norma su \mathbb{R}^m . Infatti dimostriamo la disuguaglianza triangolare

$$\|x + y\|_1 = |x_1 + y_1| + \dots + |x_m + y_m| \leq |x_1| + |y_1| + \dots + |x_m| + |y_m|$$

$$= \|x\|_1 + \|y\|_1$$

- *La formula*

$$\|x\|_\infty = \max \{|x_1|, \dots, |x_m|\}$$

definisce una norma su \mathbb{R}^m .

$$\|x + y\|_\infty = \max \{|x_1 + y_1|, \dots, |x_m + y_m|\} \leq \max \{|x_i|\} + \max \{|y_i|\} = \|x\|_\infty + \|y\|_\infty$$

Vale la relazione

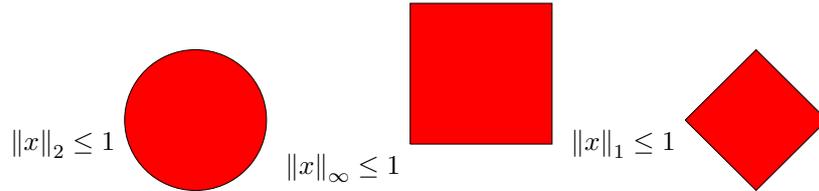
$$\lim_{p \rightarrow +\infty} \|x\|_p = \|x\|_\infty$$

Sfruttando la relazione tra le norme, valida per ogni $p \geq 1$

$$\|x\|_\infty \leq \|x\|_p \leq m^{\frac{1}{p}} \|x\|_\infty$$

1.3. **Intorni.** Disegnare gli intorni

$$\|x\|_2 \leq 1 \quad \|x\|_\infty \leq 1 \quad \|x\|_1 \leq 1$$



Gli esempi appena visti sono casi particolari di una teoria molto importante. Ricordiamo alcune nozioni fondamentali

1.4. **Spazi vettoriali.** Uno spazio vettoriale su un campo K è un insieme V dotato di due operazioni binarie, dette somma e moltiplicazione per scalare, caratterizzate da determinate proprietà

Gli elementi di V sono detti vettori e quelli di K scalari. Le operazioni sono:

-una somma dati due vettori u, v la somma fornisce un altro vettore indicato con $u + v$,

$$(u, v) \rightarrow u + v$$

-un prodotto per scalare che dato un vettore v e uno scalare λ fornisce un altro vettore indicato con λv .

$$(\lambda, v) \rightarrow \lambda v$$

Gli assiomi che queste due operazioni devono soddisfare sono i seguenti[

L'insieme V con la somma è un gruppo abeliano:

la somma è commutativa e associativa,

esiste quindi un elemento neutro 0 ,

ogni vettore v ha un opposto che è normalmente indicato con $-v$;

$$\lambda(u + v) = \lambda u + \lambda v \quad \forall \lambda \in K \quad \forall u, v \in V$$

$$(\lambda + \lambda_1)v = \lambda v + \lambda_1 v \quad \forall \lambda, \lambda_1 \in K \quad \forall v \in V$$

$$(\lambda \lambda_1)v = \lambda(\lambda_1 v) \quad \forall \lambda, \lambda_1 \in K \quad \forall v \in V$$

$$1v = v \quad \forall v \in V$$

Esempio \mathbb{R}^m su \mathbb{R} .

$$x + y = (x_1 + y_1, x_2 + y_2, \dots, x_m + y_m)$$

$\lambda \in \mathbb{R}$

$$\lambda x = (\lambda x_1, \lambda x_2, \dots, \lambda x_m)$$

Sia V uno spazio vettoriale, un sottoinsieme W di V è un sottospazio vettoriale se è uno spazio vettoriale rispetto alle stesse operazioni di V .

$$\forall \lambda, \lambda_1 \in K, \forall u, v \in V \implies \lambda u + \lambda_1 v \in W$$

Notazione $V(K)$, V su K

1.5. Spazi normati. Uno spazio vettoriale $X(\mathbb{R})$ munito di norma si chiama spazio vettoriale normato o semplicemente spazio normato. $\forall x, y, z \in X$ e $\lambda \in \mathbb{R}$, valgono le proprietà:

- $\|x\| \geq 0$,
- $\|x\| = 0 \iff x = 0$,
- $\|\lambda x\| = |\lambda| \cdot \|x\|$,
- $\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$.

1.6. Disuguaglianza di Young. Dato $p > 1$, $p \in \mathbb{R}$ diciamo coniugato di p il numero reale q tale che

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1.$$

Teorema 1.2. *Disuguaglianza di Young (esponenti reali): dati due numeri reali positivi a e b , e dati p, q numeri reali coniugati, si ha*

$$ab \leq \frac{a^p}{p} + \frac{b^q}{q}$$

Dimostrazione 1.1. *Fissiamo $b > 0$*

$$f : [0, +\infty) \rightarrow \mathbb{R}$$

$$f(t) = \frac{t^p}{p} + \frac{b^q}{q} - tb$$

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{t^p}{p} + \frac{b^q}{q} - tb = +\infty$$

$$f(0) = \frac{b^q}{q} > 0$$

$$f'(t) = t^{p-1} - b$$

$$t^{p-1} = b \iff t = b^{\frac{1}{p-1}}$$

$$f''(b^{\frac{1}{p-1}}) > 0$$

Punto di minimo relativo che è anche punto di minimo assoluto

$$f(b^{\frac{1}{p-1}}) = \frac{b^{\frac{p}{p-1}}}{p} + \frac{b^q}{q} - b^{\frac{1}{p-1}}b = \left(\frac{1}{p} + \frac{1}{q} - 1\right)b^q = 0$$

Allora risulta per ogni numero reale $a \geq 0$

$$f(a) \geq 0,$$

ossia

$$ab \leq \frac{1}{p}a^p + \frac{1}{q}b^q$$

Teorema 1.3 (disuguaglianza di Hölder). *Per p, q esponenti coniugati e $p, q \in [1, +\infty)$ e $\forall x, y \in \mathbb{R}^m$ abbiamo*

$$(1.1) \quad |x \cdot y| \leq \|x\|_p \|y\|_q.$$

Si fissi

$$a_i = \frac{|x_i|}{\|x\|_p}, \quad b_i = \frac{|y_i|}{\|y\|_q}$$

Dalla disuguaglianza di Young

$$a_i b_i \leq \frac{1}{p} \frac{|x_i|^p}{\|x\|_p^p} + \frac{1}{q} \frac{|y_i|^q}{\|y\|_q^q}$$

Sommando

$$\sum_{i=1}^m a_i b_i \leq \frac{1}{p} \frac{\sum_{i=1}^m |x_i|^p}{\|x\|_p^p} + \frac{1}{q} \frac{\sum_{i=1}^m |y_i|^q}{\|y\|_q^q} = 1$$

Da cui si evince

$$\sum_{i=1}^m a_i b_i = \sum_{i=1}^m \frac{|x_i|}{\|x\|_p} \frac{|y_i|}{\|y\|_q} \leq 1$$

e la disuguaglianza di Hölder segue

$$(1.2) \quad |x \cdot y| \leq \|x\|_p \|y\|_q.$$

Teorema 1.4 (Disuguaglianza Minkowski). Per $p \in [1, +\infty)$ e $\forall x, y \in \mathbb{R}^m$ abbiamo

$$(1.3) \quad \|x + y\|_p \leq \|x\|_p + \|y\|_p.$$

$$\begin{aligned} |x_i + y_i|^p &= |x_i + y_i|^{p-1} |x_i + y_i| \leq \\ &|x_i + y_i|^{p-1} (|x_i| + |y_i|) \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^m |x_i + y_i|^p \leq \sum_{i=1}^m |x_i + y_i|^{p-1} |x_i| + \sum_{i=1}^m |x_i + y_i|^{p-1} |y_i|$$

Si ha

$$\sum_{i=1}^m |x_i + y_i|^{p-1} |x_i| \leq \|x\|_p \|(x + y)^{(p-1)}\|_q = \|x\|_p \left(\sum_{i=1}^m |x_i + y_i|^{(p-1)q} \right)^{\frac{1}{q}}$$

$$\sum_{i=1}^m |x_i + y_i|^{p-1} |y_i| \leq \|y\|_p \|(x + y)^{(p-1)}\|_q = \|y\|_p \left(\sum_{i=1}^m |x_i + y_i|^{(p-1)q} \right)^{\frac{1}{q}}$$

Quindi da $(p-1)q = p$

$$\|x + y\|_p^p \leq \|x + y\|_p^{p-1} (\|x\|_p + \|y\|_p)$$

e dividendo per $\|x + y\|_p^{p-1}$ (assumendo non nullo) si ottiene la Disuguaglianza di Minkowski

$$\|x + y\|_p \leq \|x\|_p + \|y\|_p.$$

Esempio. $\mathbb{R}^m(\mathbb{R})$ dotato della norma euclidea di x . Dato un punto $x = (x_1, \dots, x_m) \in \mathbb{R}^m$

$$\|x\|_2 = (x_1^2 + \dots + x_m^2)^{1/2}.$$

Due norme $\|x\|_a$ $\|x\|_b$ si dicono equivalenti se esistono due costanti m e M tali che

$$m \|x\|_b \leq \|x\|_a \leq M \|x\|_b.$$

Si ha che le norme p per $p \geq 1$ sono tra loro equivalenti.

Esercizio 1. Data la funzione

$$f(x, y) = x^2 - y^2$$

calcolare la derivata direzionale di f nel punto $(1, 2)$ lungo la direzione del vettore $v = (1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{2})$.

Calcolare il minimo e il massimo assoluti di f nella regione D delimitata dal trapezio di vertici

$$(1, 2), (-1, 2), (1/4, 1/2), (-1/4, 1/2),$$

compresi i lati

$$\text{Risposta } f_v = -\sqrt{2} \quad m = -4, \quad M = -3/16.$$

Esercizio 2. Data la funzione $f(x, y) = x - y$ determinare minimi e massimi assoluti nell'insieme

$$\{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : -1 \leq x \leq 1, -2 \leq y \leq 2\}$$

$$\text{Risposta } m = -3, \quad M = 3.$$

Esercizio 3. Data la funzione $f(x, y) = x^2 - y^2 + 2xy$ determinare minimi e massimi assoluti nel cerchio unitario

$$\{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x^2 + y^2 \leq 1\}$$

$$\text{Risposta } m = -\sqrt{2}, \quad M = \sqrt{2}.$$

Sia V uno spazio vettoriale. Una norma su V è una funzione che a ogni vettore x di V associa un numero reale $\|x\| \forall x, y, z \in V$ e $\lambda \in \mathbb{R}$:

- $\|x\| \geq 0$,
- $\|x\| = 0 \iff x = 0$,
- $\|\lambda x\| = |\lambda| \cdot \|x\|$,
- $\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$.

Esempio \mathbb{R}^m

Definizione 1.5. Definiamo la distanza tra due punti di \mathbb{R}^m tramite la formula

$$d(x, y) := \|x - y\|$$

$$d(x, y) := \|x - y\| = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - y_i)^2}$$

- $d(x, y) \geq 0$
- $d(x, y) = 0 \iff x = y$
- $d(x, y) = d(y, x)$
- $d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y)$

La base canonica in \mathbb{R}^N è data da $e^1 = (1, 0, \dots, 0)$, $e_2 = (0, 1, \dots, 0)$, $e^m = (0, 0, \dots, 1)$.

$$e^j = (0, \dots, 1, 0 \dots 0)$$

$$e^k = (0, \dots, 0, 1 \dots 0).$$

$$d(e^j, e^k) = \sqrt{2} \quad j \neq k$$

\mathbb{R}^m con la norma euclidea è un esempio di uno spazio metrico

$$(X, d)$$

X insieme e d la metrica

- $d(x, y) \geq 0$
- $d(x, y) = 0 \iff x = y$
- $d(x, y) = d(y, x)$
- $d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y)$

Ogni spazio normato è uno spazio metrico, dove la distanza tra due punti x, y è data dalla norma del vettore $x - y$. In questi casi si dice che la metrica d è indotta dalla norma. Osserviamo che la metrica indotta da una norma ha in più le proprietà che non sono necessariamente vere in uno spazio metrico:

Invarianza per traslazioni

$$d(x + w, y + w) = d(x, y)$$

Riscalamento :

$$d(\lambda x, \lambda y) = |\lambda| d(x, y)$$

Non vale però il viceversa, esistono cioè spazi metrici la cui metrica d non può derivare da una norma, come mostra l'esempio: L'insieme \mathbb{R} dei numeri reali, con la distanza data da

$$d(x, y) = \frac{1}{\pi} |\arctan x - \arctan y|$$

La funzione è ben definita e positiva a valori in $[0, 1)$

$$0 \leq \frac{1}{\pi} |\arctan x - \arctan y| \leq \frac{1}{\pi} (|\arctan x| + |\arctan y|) < \frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \right) = 1.$$

La proprietà

$$\arctan x = \arctan y \iff x = y$$

segue dall'iniettività della funzione \arctan .

La simmetria

$$d(x, y) = \frac{1}{\pi} |\arctan x - \arctan y| = \frac{1}{\pi} |\arctan y - \arctan x| = d(y, x)$$

è verificata.

Vale la disuguaglianza triangolare

$$\begin{aligned} d(x, y) &= \frac{1}{\pi} |\arctan x - \arctan y| = \frac{1}{\pi} |\arctan x - \arctan z + \arctan z - \arctan y| \leq \\ &\frac{1}{\pi} |\arctan x - \arctan z| + \frac{1}{\pi} |\arctan z - \arctan y| = d(x, z) + d(z, y) \end{aligned}$$

La palla aperta unitaria in (\mathbb{R}, d) con $d(x, y) = \frac{1}{\pi} |\arctan x - \frac{1}{\pi} \arctan y|$

$$B_1(x, 0) = \left\{ x : \frac{1}{\pi} |\arctan x - \arctan 0| < 1 \iff |\arctan x| < \pi \quad \forall x \in \mathbb{R} \right.$$

dunque coincide con \mathbb{R} .

Vale

$$|d(x, z) - d(y, z)| \leq d(x, y) \quad \forall x, y, z \in X$$

Dimostrazione. La dimostrazione si basa sulle due disuguaglianze

$$d(x, z) - d(y, z) \leq d(x, y) \quad d(x, y) \geq -(d(x, z) - d(y, z))$$

Segue dalla disuguaglianza triangolare

$$d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$$

$$d(x, z) - d(y, z) \leq d(x, y)$$

$$d(y, z) \leq d(y, x) + d(x, z)$$

$$-d(y, x) \leq d(x, z) - d(y, z)$$

$$-d(x, y) \leq d(x, z) - d(y, z) \leq d(x, y),$$

e dunque il risultato.

Definiamo l'intorno sferico (circolare) di centro x_0 e raggio r

$$B_r(x_0) := \{x \in \mathbb{R}^m : d(x, x_0) < r\}.$$

Un insieme $A \subset \mathbb{R}^N$ si dice aperto se ogni suo punto è centro di un intorno circolare interamente contenuto in A . In simboli

$$\forall x_0 \in A \exists r > 0 : B_r(x_0) \subset A$$

L'insieme di tutti gli aperti si chiama topologia generata dalla metrica.

Proposizione 1. *In uno spazio metrico ogni intorno circolare è un insieme aperto, ogni unione di aperti è un aperto, l'intersezione di due aperti è un aperto.*

Infatti $\forall x_0 \in B_r(x_0) \exists r_1 : B_{r_1} \subset B_r(x_0)$. Fissiamo

$$r_1 = r - d(x, x_0)$$

allora da

$$d(y, x) < r_1 \implies d(y, x_0) \leq d(y, x) + d(x, x_0) < r - d(x, x_0) + d(x, x_0) = r$$

ovvero $y \in B_r(x_0)$. Dimostriamo ora che ogni unione di aperti è un aperto, Consideriamo una famiglia A_i di aperti. Sia $x \in \cup A_i$.

$x \in \cup A_i$ se $\exists i$ tale che $x \in A_i$. Essendo A_i un aperto $\exists r > 0$ tale che

$$B_r(x) \subset A_i \subseteq \cup A_i$$

2. CONVERGENZA

2.1. Successioni.

Definizione 2.1. Una successione (x_n) $x_n \in \mathbb{R}^m$ è convergente, se esiste un punto $a \in \mathbb{R}^m$, detto limite della successione tale che $\|x_n - a\| \rightarrow 0$ per $n \rightarrow \infty$.

Diremo anche che (x_n) converge ad a , e scriviamo

$$x_n \rightarrow a \quad \text{anche} \quad \lim x_n = a$$

Esempio 2.2.

- Per $m = 1$ si ha la nozione di convergenza per successioni reali

Definizione 2.3. Una successione (x_n) $x_n \in \mathbb{R}^m$ è una successione di Cauchy se $\forall \varepsilon > 0 \exists \nu > 0$ tale che $\|x_n - x_m\| < \varepsilon, \forall n, m > \nu$

Equivalentemente

Definizione 2.4. Una successione (x_n) $x_n \in \mathbb{R}^m$ è una successione di Cauchy se $\forall \varepsilon > 0 \exists \nu > 0$ tale $\|x_{n+p} - x_n\| < \varepsilon, \forall n > \nu, \forall p \in \mathbb{N}$

(Caratterizzazione della convergenza). Sia (x_n) $x_n \in \mathbb{R}^m, a \in \mathbb{R}^m$ scriviamo

$$x_n = (x_{n1}, \dots, x_{nm}) \quad \text{e} \quad a = (a_1, \dots, a_m).$$

Allora $x_n \rightarrow a$ in $\mathbb{R}^m \iff x_{nk} \rightarrow a_k$ in \mathbb{R} , per ciascuna componente $k, k = 1, \dots, m$.

In \mathbb{R}^m non valgono più i risultati che fanno uso della monotonia.

Proposizione 2. Siano $(x_n), (y_n)$ due successioni con $x_n, y_n \in \mathbb{R}^m$ e $(\lambda_n) \subset \mathbb{R}$.

- Il limite di una successione convergente è unico : se $x_n \rightarrow a$ e $x_n \rightarrow b$, allora $a = b$.
- Se $x_n \rightarrow a$, allora $x_{n_k} \rightarrow a$ per ogni sottosuccessione (x_{n_k}) della successione (x_n) .
- Se $x_n \rightarrow a$ e $y_n \rightarrow b$, allora $x_n + y_n \rightarrow a + b$.
- Se $\lambda_n \rightarrow \lambda$ (in \mathbb{R}) e $x_n \rightarrow a$ (in \mathbb{R}^m), allora $\lambda_n x_n \rightarrow \lambda a$ (in \mathbb{R}^m).
- Se $x_n \rightarrow a$ (in \mathbb{R}^m), allora $\|x_n\| \rightarrow \|a\|$ (in \mathbb{R}).

Definizione 2.5. Una successione (x_n) $x_n \in \mathbb{R}^m$ è limitata, se esiste $L \in \mathbb{R}$ tale che $\|x_n\| < L$ per ogni n .

Tutte le successioni convergenti sono limitate e vale

Teorema 2.6. (Bolzano–Weierstrass) Tutte le successioni limitate di \mathbb{R}^m ammettono una sottosuccessione convergente

2.2. Spazi di Banach. Lo spazio di Banach è uno spazio normato completo (ogni successione di Cauchy è convergente a un elemento dello spazio) rispetto alla metrica indotta dalla norma.

ESERCIZIO 1

Dimostrare

$$|xy| \leq \frac{\epsilon}{2}x^2 + \frac{y^2}{2\epsilon}, \quad \forall x, y \in \mathbb{R}, \epsilon > 0$$

Si ha

$$0 \leq (\epsilon x \pm y)^2 = \epsilon^2 x^2 + y^2 \pm 2\epsilon xy,$$

si divide poi per 2ϵ .

ESERCIZIO 2

Dimostrare

$$\begin{aligned} \|x + y\|^2 &= \|x\|^2 + 2x \cdot y + \|y\|^2 \quad \forall x, y \in \mathbb{R}^N \\ \|x + y\|^2 &= \sum_{k=1}^N (x_k + y_k)^2 = \sum_{k=1}^N x_k^2 + \sum_{k=1}^N y_k^2 + 2 \sum_{k=1}^N x_k y_k = \\ &= \|x\|^2 + 2x \cdot y + \|y\|^2 \end{aligned}$$

ESERCIZIO 3

Dimostrare

$$|x \cdot y| \leq \frac{\epsilon}{2} \|x\|^2 + \frac{\|y\|^2}{2\epsilon} \quad \forall x, y \in \mathbb{R}^N, \epsilon > 0$$

Si ha

$$0 \leq \|\epsilon x \pm y\|^2 = \epsilon^2 \|x\|^2 + \|y\|^2 \pm 2\epsilon x \cdot y,$$

si divide poi per 2ϵ .

ESERCIZIO 4

Nel caso $N = 2$, dimostrare che la posizione seguente

$$\|x\|_{1/2} = (\sqrt{|x_1|} + \sqrt{|x_2|})^2$$

non definisce una norma. (prendere i punti $(0, 1/4)$ e $(1/4, 0)$, si trova che non è verificata la disuguaglianza triangolare.

2.3. Interno, Esterno, Frontiera di un insieme.

Definizione 2.7. Sia $a \in \mathbb{R}^m$ e $r > 0$ un numero reale. $B_r(a)$ di centro a e raggio r per

$$B_r(a) := \{x \in \mathbb{R}^m : \|x - a\| < r\}.$$

- Per $m = 1$ troviamo gli intervalli $]a - r, a + r[$.
- Per $m = 2$ troviamo il cerchio privato dei suoi punti frontiera
- Per $m = 3$ troviamo la palla privata dei suoi punti frontiera

Sia $A \subset \mathbb{R}^m$ e $x \in \mathbb{R}^m$.

- x è un *punto interno* di A se esiste $r > 0$ tale $B_r(x) \subset A$.
- x è un *punto esterno* di A se esiste $r > 0$ tale che $B_r(x) \subset \mathbb{R}^m \setminus A$.
- x è un *punto frontiera* di A se $B_r(x)$ incontra A e $\mathbb{R}^m \setminus A$ per ogni $r > 0$.

L'insieme dei punti interni esterni e di frontiera si chiama *interno*, *esterno* e la *frontiera* di A , e si denota con $\text{int}(A)$, $\text{ext}(A)$ e ∂A . Si utilizza anche la notazione A° invece di $\text{int}(A)$.

Sia $A \subset \mathbb{R}^m$.

- Gli insiemi $\text{int}(A)$, $\text{ext}(A)$, ∂A formano una *partizione* di \mathbb{R}^m : sono disgiunti e la loro riunione fornisce \mathbb{R}^m .

2.4. Insiemi aperti, chiusi, compatti.

Definizione 2.8. Sia $X \subset \mathbb{R}^m$ e $x \in \mathbb{R}^m$. Si dice che il punto x è di *aderenza* per X se la palla $B_r(x)$ incontra X per ogni $r > 0$. L'insieme dei punti x con questa proprietà si chiama *aderenza* di X e si denota con \overline{X} .

Proposizione 3. Sia $X \subset \mathbb{R}^m$ e $x \in \mathbb{R}^m$, allora

$$x \in \overline{X} \iff \exists (x_n) \subset X \text{ e } x_n \rightarrow x$$

Definizione 2.9. Sia $X \subset \mathbb{R}^m$. Si dice che X è un *insieme aperto* se per ogni $x \in X$ se esiste $r > 0$ tale che la palla $B_r(x)$ è interamente contenuta in X .

Dati due punti distinti di \mathbb{R}^m x e y esistono due aperti X e Y tali che $x \in X$ $y \in Y$ e $X \cap Y = \emptyset$.

Proposizione 4. \emptyset e \mathbb{R}^m sono aperti. L'unione qualsiasi di insiemi aperti è un insieme aperto. L'intersezione di un numero finito di insiemi aperti è un insieme aperto.

Definizione 2.10. Un insieme X è *chiuso* se l'insieme complementare in \mathbb{R}^m è aperto

\overline{X} è il più piccolo insieme chiuso che contiene X .

Proposizione 5. \emptyset e \mathbb{R}^m sono chiusi. L'unione di un numero finito di insiemi chiusi è un insieme chiuso. L'intersezione qualunque di insiemi chiusi è un insieme chiuso.

Definizione 2.11. K è limitato \iff esiste una costante L tale che $\|x\| < L$ per ogni $x \in K$

Il diametro di K è definito come

$$\text{diam}(K) = \sup\{d(x, y), x, y \in K\}.$$

Se $\text{diam}(K) = +\infty$ diremo che K è illimitato.

Definizione 2.12. K è compatto se $\forall (x_n) \subset X$ esiste una sottosuccessione (x_{n_k}) con $\lim x_{n_k} \in X$

Teorema 2.13. (Teorema di Heine-Borel) K compatto di $\mathbb{R}^m \iff K$ è chiuso e limitato

L'intersezione infinita di una famiglia infinita di aperti può non essere aperta. Esempio $(-\frac{1}{n}, \frac{1}{n})$. L'intersezione $\{0\}$: un insieme chiuso.

\emptyset e \mathbb{R}^m sono gli unici insiemi che sono sia aperti che chiusi.

Ci sono insiemi che non sono né aperti né chiusi, ad esempio gli intervalli di \mathbb{R} a cui appartiene un solo estremo.

2.5. Funzioni. A un sottoinsieme aperto di \mathbb{R}^m .

Lemma 2.14. Sia $f : A \rightarrow \mathbb{R}^n$ e $a \in A$

Le due proprietà seguenti sono equivalenti

(a) $\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0$ tale che se $x \in A$ e $\|x - a\| < \delta$, allora

$$\|f(x) - f(a)\| < \varepsilon$$

(b) $(x_n) x_n \in A$ e $x_n \rightarrow a$, allora $f(x_n) \rightarrow f(a)$.

f è continua in A se è continua in ogni punto $a \in A$, ossia

$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0$ tale che se $x \in A$ e $\|x - a\| < \delta$, allora $\|f(x) - f(a)\| < \varepsilon$

2.6. Teorema di Weierstrass. Una funzione continua in un compatto ammette minimo e massimo assoluto.

Definizione della derivata di f in \bar{x}

Definizione 2.15.

$$f_{x_i}(\bar{x}) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_i + h, \dots, \bar{x}_m) - f(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_i, \dots, \bar{x}_m)}{h},$$

se tale limite esiste finito.

Definizione 2.16. Definizione del gradiente di f .

$$Df(x) = (f_{x_1}(x), f_{x_2}(x), \dots, f_{x_n}(x))$$

Definizione del Laplaciano di f .

Definizione 2.17. Sia Ω un aperto di \mathbb{R}^n

$$f \in C^2(\Omega) \cap C(\bar{\Omega})$$

$$\Delta f = \sum_{i=1}^n f_{x_i x_i}$$

Δ è l'operatore di Laplace o Laplaciano.

Esempio 2.18. Calcolare il gradiente di f per

- i) $f(x) = \|x\|^2$
- ii) $x \neq 0 \quad f(x) = \|x\|$
- iii) per $n \geq 3 \quad x \neq 0 \quad f(x) = \|x\|^{2-n}$
 - i) r1 $f(x) = \|x\|^2 \quad f_{x_i} = 2x_i$
 - ii) r2 $x \neq 0 \quad f(x) = \|x\| \quad f_{x_i} = \frac{1}{2} \frac{2x_i}{\|x\|} = \frac{x_i}{\|x\|}$
 - iii) r3 per $n \geq 3 \quad x \neq 0 \quad f(x) = \|x\|^{2-n}$
 $f_{x_i} = (2-n) \|x\|^{1-n} \frac{x_i}{\|x\|} = (2-n) \frac{x_i}{\|x\|^n}$

Esempio 2.19. Calcolare il Laplaciano di f per

- i) $f(x) = \|x\|^2$
- ii) $f(x) = \|x\|$
- iii) per $n \geq 3 \quad x \neq 0 \quad f(x) = \|x\|^{2-n}$
 - i) r1 $f(x) = \|x\|^2 \quad f_{x_i} = 2x_i \quad f_{x_i x_i} = 2 \quad \Delta \|x\|^2 = 2n$
 - ii) r2 $x \neq 0 \quad f(x) = \|x\| \quad f_{x_i} = \frac{1}{2} \frac{2x_i}{\|x\|} = \frac{x_i}{\|x\|}$

$$f_{x_i x_i} = \frac{1}{\|x\|} + \frac{x_i^2}{\|x\|^2}$$

$$\Delta \|x\| = n \frac{1}{\|x\|} + 1$$

- iii) r3 per $n \geq 3 \quad x \neq 0 \quad f(x) = \|x\|^{2-n}$
 $f_{x_i} = (2-n) \|x\|^{1-n} \frac{x_i}{\|x\|} = (2-n) \frac{x_i}{\|x\|^n}$
 $f_{x_i x_i} = (2-n) \frac{1}{\|x\|^n} - n(2-n) x_i^2 \|x\|^{-n-2}$

$$\Delta \|x\|^{2-n} = (2-n)n \frac{1}{\|x\|^n} - (2-n)n \frac{1}{\|x\|^n} = 0$$

2.7. Principio del massimo per le funzioni armoniche. Sia Ω un insieme aperto e limitato. Sia $f \in C^2(\Omega) \cap C(\bar{\Omega})$. Una funzione armonica soddisfa l'equazione di Laplace

$$\Delta f = 0$$

Osserviamo che somma e differenza di funzioni armoniche sono funzioni armoniche. Sia

$$M = \max\{f(x), x \in \partial\Omega\}$$

$$m = \min\{f(x), x \in \partial\Omega\},$$

e f una funzione armonica.

Si ha

Principio del massimo per le funzioni armoniche

$$m \leq f(x) \leq M \quad x \in \bar{\Omega}.$$

Dimostremo

$$f(x) \leq M \quad x \in \bar{\Omega}.$$

La dimostrazione è basata sullo studio della funzione

$$g_\epsilon(x) = f(x) + \epsilon \|x\|^2 \quad x \in \bar{\Omega}.$$

$$g_\epsilon(x) \in C^2(\Omega) \cap C(\bar{\Omega}),$$

$$\Delta g_\epsilon(x) = \Delta f(x) + 2\epsilon n > 0$$

Allora non ci sono punti di massimo relativi interni per g_ϵ , perché in tali punti x_ϵ il Laplaciano $\Delta g_\epsilon(x_\epsilon) \leq 0$ (in dettaglio il caso $n = 2$). Allora se $x \in \bar{\Omega}$ si ha

$$g_\epsilon(x) \leq \max\{f(x) + \epsilon \|x\|^2, x \in \partial\Omega\}.$$

Ricordando che $\bar{\Omega}$ è limitato per ipotesi, si ha che esiste un numero reale L tale che

$$\|x\| \leq L \quad x \in \bar{\Omega}.$$

Se $x \in \bar{\Omega}$

$$g_\epsilon(x) \leq \max\{f(x) + \epsilon L^2, x \in \partial\Omega\} = M + \epsilon L^2,$$

ossia

$$f(x) + \epsilon \|x\|^2 \leq M + \epsilon L^2.$$

Il risultato segue per $\epsilon \rightarrow 0$.

Svolgere

$$m \leq f(x) \quad x \in \bar{\Omega},$$

considerando la funzione

$$g_\epsilon(x) = f(x) - \epsilon \|x\|^2 \quad x \in \bar{\Omega}.$$

3. IL TEOREMA DI WEIERSTRASS IN SPAZI METRICI

Definizione 3.1. *Un sottoinsieme K dello spazio metrico X, d si dice compatto se da ogni successione x_k di punti di K si può estrarre una sottosuccessione convergente verso un punto $x \in K$*

Definizione 3.2. *Sia (X, d_X) e (Y, d_Y) due spazi metrici. $f : X \rightarrow Y$ è continua in $x_0 \in X$ se $\forall x_k \subset X \rightarrow x_0$ (ossia $d_X(x_k, x_0) \rightarrow 0$), risulta $f(x_k) \rightarrow f(x_0)$ (ossia $d_Y(f(x_k), f(x_0)) \rightarrow 0$).
 f è continua in X se è continua in ogni punto di X .*

Sia K un sottoinsieme compatto dello spazio metrico X, d e sia $f : K \rightarrow \mathbb{R}$. Allora

Definizione 3.3. *Un punto x_0 del sottoinsieme K dello spazio metrico (X, d) è di massimo assoluto per la funzione f se*

$$\forall x \in K \quad f(x) \leq f(x_0)$$

Un punto x_0 del sottoinsieme K dello spazio metrico (X, d) è di minimo assoluto per la funzione f se

$$\forall x \in K \quad f(x) \geq f(x_0)$$

Teorema 3.4. *Sia K un sottoinsieme compatto dello spazio metrico (X, d) e sia $f : K \rightarrow \mathbb{R}$ una funzione continua. Allora f è dotata di minimo e massimo assoluti su K .*

Dimostrazione 3.1. *Consideriamo dapprima la dimostrazione che f è dotata di massimo assoluto su K . Occorre dimostrare che detto*

$$M = \sup\{f(x) : x \in K\},$$

allora

$$M \neq +\infty$$

e

$$\exists x_0 \in K : f(x_0) = M$$

Come primo punto verificiamo che esiste una successione x_k in K tale che

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} f(x_k) = M$$

Se $M \neq +\infty$ segue dalla proprietà del sup

$$\forall k \exists x_k \in K : M - \frac{1}{k} < f(x_k) \leq M$$

Se $M = +\infty$

$$\forall k \exists x_k \in K : f(x_k) > k$$

In ogni caso $f(x_k) \rightarrow M$.

K è un insieme compatto quindi possiamo estrarre una sottosuccessione convergente a un elemento $x_0 \in K$: $f(x_{k_h}) \rightarrow f(x_0)$ per la continuità di f .

$$M = \lim_{k \rightarrow +\infty} f(x_k) = \lim_{h \rightarrow +\infty} f(x_{k_h}) = f(x_0)$$

$M \neq +\infty$ e

$$\exists x_0 \in K : f(x_0) = M.$$

Analogamente per stabilire l'esistenza del punto di minimo.

3.1. Funzione Distanza. Consideriamo la funzione distanza di $x \in \mathbb{R}^N$

$$(3.1) \quad dist_K(x) = \inf_{y \in K} \|x - y\|.$$

$\|x - y\|$: si tratta di una funzione continua, K è un insieme compatto, come applicazione del teorema di Weierstrass, abbiamo che il minimo è assunto. Allora per qualche $y^* \in K$.

$$dist_K(x) = \|x - y^*\|$$

$dist_K : \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}$ la funzione distanza di $x \in \mathbb{R}^N$ dall'insieme compatto K è allora definita

$$dist_K(x) = \min_{y \in K} \|x - y\|.$$

Vale 0 in K .

Proposizione 6. *Sia K un insieme compatto. Allora $dist_K$ è Lipschitz continua*

$$|dist_K(x) - dist_K(x')| \leq \|x - x'\| \quad \forall x, x' \in \mathbb{R}^N.$$

Dimostrazione 3.2. *$dist_K(x') = x' - \hat{y}$ per qualche $\hat{y} \in K$ allora*

$$dist_K(x) - dist_K(x') \leq \|x - \hat{y}\| - \|x' - \hat{y}\| \leq \|x - x'\|.$$

La dimostrazione segue scambiando il ruolo di x and x' .

Vale il seguente risultato di separazione. Siano X e Y sono due insiemi compatti non vuoti e disgiunti di \mathbb{R}^m . Allora

$$f(x) = \frac{dist(x, X)}{dist(x, X) + dist(x, Y)}$$

verifica

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x \in X \\ 1 & x \in Y \end{cases},$$

ossia f separa X e Y

3.2. Esempio con uso del moltiplicatore di Lagrange. Ricordiamo che

- La condizione al primo ordine non distingue massimi, minimi o punti di sella
- Nel caso di funzioni $C^1(\Omega) \cap C(\bar{\Omega})$ possiamo calcolare i massimi e minimi assoluti della funzione f confrontando i valori della funzione tra punti interni in cui si annulla il gradiente e il massimo e il minimo valore della funzione sulla frontiera.

Breve introduzione nel caso $N = 2$.

Equazione del vincolo. Sia g una funzione regolare.

$$V = \{(x, y) : g(x, y) = 0\}$$

Assumiamo che V sia il sostegno di una curva regolare semplice γ di equazioni parametriche

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad t \in I$$

Supponiamo che $t_0 = (x_0, y_0)$ sia un punto di massimo o minimo relativo per la funzione ϕ

$$\phi(t_0) = f(x_1(t_0), x_2(t_0))$$

$$\phi'(t_0) = f_x(x(t_0), y(t_0))x'(t_0) + f_y(x(t_0), y(t_0))y'(t_0) = 0$$

In corrispondenza di un massimo o di un minimo relativo per f il gradiente di f deve essere ortogonale alla curva $\gamma = (x(t), y(t))$ (ricordiamo $V = \{(x, y) : g(x, y) = 0\}$ e V sostegno di una curva regolare semplice γ)

Si può dimostrare il seguente

Teorema 3.5. *Siano f e g funzioni $C^1(A)$ con A aperto di \mathbb{R}^2 e sia (x_0, y_0) un punto regolare per V . Allora (x_0, y_0) è un punto stazionario vincolato a V se e sole se \exists un numero reale λ_0 tale che*

$$Df(x_0, y_0) + \lambda_0 Dg(x_0, y_0)$$

Definiamo

$$L(x, y, \lambda) = f(x, y) + \lambda g(x, y).$$

La funzione L si chiama funzione Lagrangiana. Dipende anche dalla variabile λ , che prende il nome di moltiplicatore di Lagrange. Risolveremo il sistema

$$\begin{cases} L_x(x, y, \lambda) = 0 \\ L_y(x, y, \lambda) = 0 \\ L_\lambda(x, y, \lambda) = 0 \end{cases}$$

L'ultima equazione è l'equazione del vincolo e il sistema diventa

$$\begin{cases} L_x(x, y, \lambda) = f_x(x, y) + \lambda g_x(x, y) = 0 \\ L_y(x, y, \lambda) = f_y(x, y) + \lambda g_y(x, y) = 0 \\ g(x, y) = 0 \end{cases}$$

Esercizio 3.6. *Tra tutti i rettangoli inscritti nell'ellisse di equazione $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ trovare quello di area massima.*

Possiamo calcolare con un metodo di sostituzione ($2x$, $2y$ semi-lato)

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \iff y = b\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \iff y = \frac{b}{a}\sqrt{a^2 - x^2}$$

Segue

$$f(x) = 4xy = \frac{4b}{a}x\sqrt{a^2 - x^2}.$$

$$f'(x) = \frac{4b}{a} \left(\sqrt{a^2 - x^2} - \frac{x^2}{\sqrt{a^2 - x^2}} \right) = 0$$

Si ricava $x = a/\sqrt{2}$, $y = b/\sqrt{2}$ $f(a/\sqrt{2}, b/\sqrt{2}) = 2ab$

Esercizio 3.7. *Tra tutti i rettangoli inscritti nell'ellisse di equazione $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ trovare quello di area massima.*

($2x$, $2y$ semi-lato)

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

In forma parametrica

$$\begin{cases} x(t) = a \cos(t) & t \in [0, \pi/2] \\ y(t) = b \sin(t) \end{cases}$$

$$\phi(t) = 4ab \cos(t) \sin(t) = 2ab \sin(2t) \quad t \in [0, \pi/2]$$

$$\phi'(t) = 0 \iff \sin(2t) = 0 \quad t \in [0, \pi/2]$$

$$\phi(\pi/4) = 2ab \quad \phi(0) = \phi(\pi/2) = 0$$

3.2.1. *Metodo dei moltiplicatori di Lagrange.*

$$\begin{cases} \max_{x,y} 4xy \\ \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \\ x > 0, y > 0 \end{cases}$$

$$L(x, y, \lambda) = \max_{x,y} 4xy + \lambda \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - 1 \right)$$

Si calcolano i punti stazionari della funzione L

$$\begin{cases} 4y + \frac{2\lambda x}{a^2} = 0 \\ 4x + \frac{2\lambda y}{b^2} = 0 \\ \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \end{cases}$$

Si ricava dalla prima equazione

$$\lambda = -\frac{2a^2 y}{x}$$

Sostituendo e semplificando

$$\begin{cases} \frac{x^2}{a^2} = \frac{y^2}{b^2} \\ \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \\ x^2 = \frac{a^2}{2}, \end{cases}$$

la cui soluzione positiva è

$$x = \frac{a}{\sqrt{2}}.$$

Dunque

$$x = \frac{a}{\sqrt{2}} \quad y = \frac{b}{\sqrt{2}}$$

Esercizio 3.8. *Tra tutti i parallelepipedi retti a base rettangolare inscritti in un ellissoide di equazione*

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$$

determinare quello di volume massimo.

Se x, y, z indicano i semispigoli si tratta di massimizzare la funzione

$$f(x, y, z) = 8xyz,$$

soggetta al vincolo $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$, con $x > 0, y > 0, z > 0$.

Il problema può essere scritto nella forma

$$\begin{cases} \max_{x,y,z} 8xyz \\ \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \\ x > 0, y > 0, z > 0 \end{cases}$$

3.3. Metodo dei moltiplicatori di Lagrange.

$$\begin{cases} \max_{x,y,z} 8xyz \\ \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \end{cases}$$

$$L(x, y, z, \lambda) = \max_{x,y,z} 8xyz + \lambda \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} - 1 \right)$$

Si calcolano i punti stazionari della funzione L

$$\begin{cases} 8yz + \frac{2\lambda x}{a^2} = 0 \\ 8xz + \frac{2\lambda y}{b^2} = 0 \\ 8xy + \frac{2\lambda z}{c^2} = 0 \\ \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \end{cases}$$

Si ricava dalla prima equazione

$$\lambda = -\frac{4a^2yz}{x}$$

$$\begin{cases} 8x^2zb^2 - 8a^2y^2z = 0 \\ 8x^2yc^2 + 8yz^2a^2 = 0 \\ \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \end{cases}$$

Semplificando

$$\begin{cases} \frac{x^2}{a^2} = \frac{y^2}{b^2} \\ \frac{x^2}{a^2} = \frac{z^2}{c^2} \\ \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \end{cases}$$

$$x^2 = \frac{a^2}{3},$$

la cui soluzione positiva è

$$x = \frac{a}{\sqrt{3}}.$$

Dunque

$$x = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad y = \frac{b}{\sqrt{3}} \quad z = \frac{c}{\sqrt{3}}.$$

Esercizio 3.9. Siano $a_i > 0 \forall i = 1, \dots, N$. Massimizzare la funzione

$$f(x_1, x_2, \dots, x_N) = 2^N \prod_{i=1}^N x_i,$$

sotto la condizione

$$\sum_{i=1}^N \frac{x_i^2}{a_i^2} = 1, \quad x_i > 0 \forall i = 1, \dots, N$$

$$L(x_1, x_2, \dots, x_N, \lambda) = \max_{x_i} 2^N \prod_{i=1}^N x_i + \lambda \left(\sum_{i=1}^N \frac{x_i^2}{a_i^2} - 1 \right)$$

Si calcolano i punti stazionari della funzione L

$$\frac{\partial L(x_1, x_2, \dots, x_N, \lambda)}{\partial x_k} = 2^N \prod_{i=1, i \neq k}^N x_i + \frac{2\lambda x_k}{a_k^2} = 0 \quad k = 1, \dots, N$$

Si ricava dalla prima equazione ($k = 1$)

$$\lambda = - \frac{2^{N-1} a_1^2 \prod_{i=2}^N x_i}{x_1}$$

Sostituendo in tutte le altre

$$2^N a_k^2 x_1^2 \prod_{i=2, i \neq k}^N x_i - 2^N x_k a_1^2 \prod_{i=2}^N x_i = 0 \quad k = 2, \dots, N$$

Semplificando

$$a_k^2 x_1^2 - x_k^2 a_1^2 = 0 \quad k = 2, \dots, N$$

Semplificando

$$\begin{cases} \frac{x_1^2}{a_1^2} = \frac{x_2^2}{a_2^2} \\ \frac{x_1^2}{a_1^2} = \frac{x_3^2}{a_3^2} \\ \dots \\ \frac{x_1^2}{a_1^2} = \frac{x_N^2}{a_N^2} \\ \sum_{i=1}^N \frac{x_i^2}{a_i^2} = 1, \\ x_i > 0 \forall i = 1, \dots, N \end{cases}$$

$$x_1^2 = \frac{a_1^2}{N},$$

la cui soluzione positiva è

$$x_i = \frac{a_i}{\sqrt{N}}.$$

Dunque

$$x_i = \frac{a_i}{\sqrt{N}} \quad i = 1, \dots, N$$

Esercizio 3.10. Calcolare per a e b non entrambi nulli il minimo e il massimo assoluti della funzione $ax + by$ nell'insieme $x^2 + y^2 = 1$.

Si definisce la funzione Lagrangiana

$$f(x, y, \lambda) = ax + by + \lambda(x^2 + y^2 - 1).$$

Applicando il metodo dei moltiplicatori si ricava

$$m = -\sqrt{a^2 + b^2}, \quad M = \sqrt{a^2 + b^2}$$

4. CALCOLO DIFFERENZIALE IN \mathbb{R}^N

Definizione della derivata parziale prima di f in $\bar{x} \in A$, A aperto di \mathbb{R}^n

Definizione 4.1.

$$f_{x_i}(\bar{x}) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_i + h, \dots, \bar{x}_n) - f(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_i, \dots, \bar{x}_n)}{h},$$

se tale limite esiste finito.

Definizione 4.2. Definizione del gradiente di f .

$$Df(x) = (f_{x_1}(x), f_{x_2}(x), \dots, f_{x_n}(x))$$

Definizione 4.3. $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ si dice differenziabile in $x \in A$ se esiste il gradiente di f e se vale la relazione di limite

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x) - Df(x) \cdot h}{\|h\|} = 0$$

$$Df(x) = (f_{x_1}(x), f_{x_2}(x), \dots, f_{x_n}(x))$$

Si può anche scrivere

$$f(x+h) = f(x) + Df(x) \cdot h + o(\|h\|) \quad h \rightarrow 0$$

f è differenziabile in A se è differenziabile in ogni punto appartenente all'insieme aperto A .

Se f è differenziabile in $x \in A$ allora f è continua in x Infatti

$$\lim_{h \rightarrow 0} f(x+h) = f(x) + \lim_{h \rightarrow 0} Df(x) \cdot h + o(\|h\|) = f(x)$$

Teorema 4.4. Teorema del differenziale Sia $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ una funzione derivabile in A aperto di \mathbb{R}^n . Se $f_{x_1}, f_{x_2}, \dots, f_{x_n}$ sono continue in $x \in A$ allora f è differenziabile in $x \in A$

Teorema 4.5. Teorema di derivazione delle funzioni composte Sia $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ una funzione derivabile in A aperto di \mathbb{R}^n . Se $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$ sono derivabili in $t \in I$ e se f è differenziabile in $x(t) \in A$ allora

$$F(t) = f(x(t))$$

è derivabile in t e la sua derivata vale

$$F'(t) = Df(x(t)) \cdot x'(t)$$

Teorema 4.6. Derivata direzionale di funzioni differenziabili Sia $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ una funzione derivabile in A aperto di \mathbb{R}^n . Se f è differenziabile in $x \in A$ allora f ammette derivata direzionale in ogni direzione λ e vale la relazione

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} f(x) = Df(x) \cdot \lambda$$

Esercizio 4.7. Sia $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Per $x \neq 0$

$$f(x) = \ln \|x\|$$

$$f_{x_i} = \frac{x_i}{\|x\|^2}$$

$$f_{x_i x_i} = \frac{1}{\|x\|^2} - 2 \frac{x_i}{\|x\|^3} \frac{x_i}{\|x\|} = \frac{1}{\|x\|^2} - 2 \frac{x_i^2}{\|x\|^4}$$

$$\Delta \ln \|x\| = (n-2) \frac{1}{\|x\|^2}$$

Se $n = 2$ allora $\Delta \ln \|x\| = 0$.

5. ESERCIZI SU MINIMI E MASSIMI RELATIVI IN \mathbb{R}^2

Esercizio 5.1. Data $f(x, y) = x^3 + y^3 - (1 + x + y)^3$ in \mathbb{R}^2 , calcolarne eventuali massimi e minimi relativi.

Cerchiamo i punti stazionari

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial x} = 3x^2 - 3(1+x+y)^2 = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial y} = 3y^2 - 3(1+x+y)^2 = 0 \end{cases}$$

Riscriviamo il sistema sostituendo alla prima equazione la differenza tra la prima e la seconda:

$$\begin{cases} x^2 - y^2 = 0 \\ y^2 - (1+x+y)^2 \end{cases} \quad \begin{cases} (x-y)(x+y) = 0 \\ y^2 - (1+x+y)^2 \end{cases}$$

da cui otteniamo due sottosistemi

$$\begin{cases} x = -y \\ y^2 - (1+x+y)^2 = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} x = y \\ y^2 - (1+x+y)^2 = 0 \end{cases}$$

Per il primo possiamo scrivere:

$$\begin{cases} x = -y \\ y^2 - (1-y+y)^2 = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} x = -y \\ y = \pm 1 \end{cases}$$

ottenendo i punti $A(1, -1)$ e $B(-1, 1)$.

Passando al secondo sistema

$$\begin{cases} x = y \\ y^2 - (1 + 2y)^2 = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} x = y \\ 3y^2 + 4y + 1 = 0 \end{cases}$$

ottenendo i punti $C(-1, -1)$ e $D(-\frac{1}{3}, -\frac{1}{3})$.

Calcoliamo ora la matrice Hessiana:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = 6x - 6(1 + x + y) \quad \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = 6y - 6(1 + x + y) \quad \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = -6(1 + x + y)$$

$$H = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \end{pmatrix}$$

Per $A(1, -1)$

$$\begin{vmatrix} 6 - 6(1 + 1 - 1) & -6(1 + 1 - 1) \\ -6 & 6 - 6(1 + 1 - 1) \end{vmatrix} = -36 < 0$$

il determinante della matrice è negativo, il punto è di sella.

Per $B(-1, 1)$

$$\begin{vmatrix} -12 & -6 \\ -6 & 0 \end{vmatrix} = -36 < 0$$

il determinante della matrice risulta negativo, il punto è di sella.

Per $C(-1, -1)$

$$\begin{vmatrix} 0 & 6 \\ 6 & 0 \end{vmatrix} = -36 < 0$$

il determinante della matrice è negativo, il punto è di sella.

Per $D(-\frac{1}{3}, -\frac{1}{3})$

$$\begin{vmatrix} -4 & 2 \\ 2 & -4 \end{vmatrix} = 12 > 0$$

Poichè il determinante della matrice è positivo e $\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(D) = -4 < 0$, D è un punto di massimo relativo.

Esercizio. Classificare gli eventuali punti stazionari della funzione definita in \mathbb{R}^2 da

$$f(x, y) = \cos x + \sin y$$

Soluzione:

I punti stazionari della funzione sono dati dal sistema

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} f(x, y) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial y} f(x, y) = 0 \end{cases} \iff \begin{cases} -\sin x = 0 \\ \cos y = 0 \end{cases} \iff \begin{cases} x = k\pi & k \in \mathbb{Z} \\ y = \frac{\pi}{2} + j\pi & j \in \mathbb{Z} \end{cases}$$

Si hanno dunque infiniti punti stazionari, ciascuno di coordinate $(k\pi, \frac{\pi}{2} + j\pi)$, al variare di $k \in \mathbb{Z}, j \in \mathbb{Z}$. La matrice hessiana in un generico punto (x, y) è

$$H(x, y) = \begin{pmatrix} -\cos x & 0 \\ 0 & -\sin y \end{pmatrix}.$$

Calcolandola in un generico punto stazionario diventa

$$H(k\pi, \frac{\pi}{2} + j\pi) = \begin{pmatrix} (-1)^{k+1} & 0 \\ 0 & (-1)^{j+1} \end{pmatrix}$$

Il determinante della matrice Hessiana in un generico punto stazionario risulta $(-1)^{j+k}$. Dunque, se k e j sono entrambi pari o entrambi dispari, il determinante risulta pari a 1 e dunque positivo; si tratterà di punti di max o min relativo a seconda del segni di $(-1)^{k+1}$: se k è pari si tratta di un punto di max relativo, se k è dispari si tratta di un minimo relativo. Ripetendo se k e j sono entrambi pari si tratta di un massimo relativo. Se invece k e j sono entrambi dispari si tratta di un minimo relativo. Infine se k è pari e j è dispari (o viceversa), abbiamo un punto di sella poiché il valore del determinante è -1 .

6. LA FORMULA DI TAYLOR IN \mathbb{R}^n

Assumeremo ipotesi di regolarità. Sia A un aperto di \mathbb{R}^n , $h = (h_1, h_2), \dots, h_n$, i punti $x_0, x_0 + h$ siano appartenenti all'insieme A . Sia $f \in C^2(A)$.

6.1. La formula di Taylor in \mathbb{R}^N con il resto di Lagrange. Dimostreremo la seguente formula

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + \sum_{i=1}^n f_{x_i}(x)h_i + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n f_{x_i x_j}(x_0 + \theta h)h_i h_j$$

Dalla $x(t) = x + th$ con h piccolo e $h \in \mathbb{R}^n$. Poniamo

$$F(t) = f(x + th).$$

Applicando la regola di derivazione delle funzioni composte ove $x(t) = x + th$, si ottiene

$$F'(t) = \sum_{i=1}^n f_{x_i}(x + th)h_i,$$

applicandola di nuovo

$$F''(t) = \sum_{i,j=1}^n f_{x_i x_j}(x + th)h_i h_j,$$

dalla formula di Taylor per funzioni di una variabile reale si ottiene

$$F(1) = F(0) + F'(0) + \frac{1}{2}F''(\theta)$$

con $\theta \in (0, 1)$.

Sostituendo in $F(t) = f(x + th)$ si ottiene

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + \sum_{i=1}^n f_{x_i}(x)h_i + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n f_{x_i x_j}(x_0 + \theta h)h_i h_j$$

Teorema 6.1. *Sia $f \in C^2(A)$. Sianno $x, x + h$ punti di A : il segmento di estremi $x, x + h$ sia contenuto in A . Esiste $\theta \in (0, 1)$ tale che*

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + \sum_{i=1}^n f_{x_i}(x)h_i + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n f_{x_i x_j}(x_0 + \theta h)h_i h_j$$

6.2. La formula di Taylor in \mathbb{R}^n con il resto di Peano. Dimostreremo la seguente formula

$$f(x + h) = f(x) + \sum_{i=1}^n f_{x_i}(x)h_i + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n f_{x_i x_j}(x + \theta h)h_i h_j + o(\|h\|^2) \quad h \rightarrow 0$$

Occorre dimostrare che

$$\begin{aligned} \sum_{i,j=1}^n f_{x_i x_j}(x_0 + \theta h)h_i h_j &= \sum_{i,j=1}^n f_{x_i x_j}(x_0)h_i h_j + o(\|h\|^2) \quad h \rightarrow 0 \\ \sum_{i,j=1}^n (f_{x_i x_j}(x_0 + \theta h) - f_{x_i x_j}(x_0))h_i h_j &= o(\|h\|^2) \end{aligned}$$

Occorre tener presente la disuguaglianza

Proposizione 7. *Sia A una matrice $n \times n$. Sia h in \mathbb{R}^n . Allora*

$$\|Ah\| \leq \|A\| \|h\|$$

ove $\|A\|$ è la norma di Frobenius della matrice A definita come

$$\|A\| = \sqrt{\sum_{i,j=1}^n |a_{i,j}|^2}$$

Proof.

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

$$Ah = \begin{pmatrix} a_{11}h_1 + a_{12}h_2 + a_{13}h_3 + \dots + a_{1n}h_n \\ \dots \\ a_{n1}h_1 + a_{n2}h_2 + a_{n3}h_3 + \dots + a_{nn}h_n \end{pmatrix}$$

$$\|Ah\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_{i1}h_1 + a_{i2}h_2 + a_{i3}h_3 + \dots + a_{in}h_n)^2}$$

$$\|Ah\| \leq \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}^2} \|h\| = \|A\| \|h\|$$

□

Segue

$$|Ah \cdot h| \leq \|Ah\| \|h\| \leq \|A\| \|h\|^2$$

Teorema 6.2. *Sia $f \in C^2(A)$. Siano $x, x+h$ punti di A : il segmento di estremi $x, x+h$ sia contenuto in A . Allora*

$$f(x+h) = f(x) + \sum_{i=1}^n f_{x_i}(x)h_i + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n f_{x_i x_j}(x+\theta h)h_i h_j + o(\|h\|^2) \quad h \rightarrow 0$$

Infatti

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{\left| \sum_{i,j=1}^n (f_{x_i x_j}(x_0 + \theta h) - f_{x_i x_j}(x_0))h_i h_j \right|}{\|h\|^2} \leq$$

$$\lim_{h \rightarrow 0} \|D^2 f(x_0 + \theta h) - D^2 f(x_0)\| = 0$$

6.3. Minimi e Massimi Locali.

Definizione 6.3. *Sia A un aperto e $f : A \rightarrow \mathbb{R}$, sia $x_0 \in A$. Se esiste $r > 0$ tale che comunque preso $x \in A \cap B_r(x_0)$ risulta $f(x) \geq f(x_0)$ allora x_0 è un punto di minimo locale e $f(x_0)$ è minimo locale*

Definizione 6.4. *Sia A un aperto e $f : A \rightarrow \mathbb{R}$, sia $x_0 \in A$. Se esiste $r > 0$ tale che comunque preso $x \in A \cap B_r(x_0)$ risulta $f(x) \leq f(x_0)$ allora x_0 è un punto di massimo locale e $f(x_0)$ è massimo locale*

6.4. Matrice Hessiana.

Definizione 6.5. *Sia $f \in C^2(A)$. La Matrice Hessiana è allora una matrice simmetrica data da*

$$Hf(x_0) = (f_{x_i x_j}(x_0))_{i,j=1,n}$$

6.4.1. *Minimi e Massimi Locali, $n=2$.* Consideriamo le forme quadratiche nel caso di dimensione due associate alla matrice hessiana. Ricordiamo che la matrice hessiana, o matrice di Hesse, nel caso $n = 2$ è la matrice quadrata 2×2 delle derivate parziali seconde della funzione.

$$(Hf)_{i,j} = \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \quad i, j = 1, 2$$

ove il simbolo $\partial x_i \partial x_j$ indica che prima deriviamo rispetto a x_i e poi rispetto a x_j .

Definizione 6.6. Una matrice Q si dice non negativa (rispettivamente, non positiva) se la forma $z^T Q z$ è semidefinita positiva (rispettivamente negativa) cioè se

$$z^T Q z = \sum_{i,j=1}^2 q_{i,j} z_i z_j \geq 0$$

(rispettivamente, $z^T Q z \leq 0$), $\forall z \in \mathbb{R}^2$,

e se esiste $z \in \mathbb{R}^2$ non nullo tale la forma quadratica è nulla.

Definizione 6.7. Una matrice Q si dice positiva (rispettivamente, negativa) se la forma $z^T Q z$ è positiva (rispettivamente, negativa)

$$z^T Q z = \sum_{i,j=1}^2 q_{i,j} z_i z_j > 0 \quad (z^T Q z < 0) \quad \forall z \in \mathbb{R}^2, z \neq 0.$$

Se restringiamo l'analisi alle matrici 2×2 allora abbiamo il seguente

Teorema 6.8. Sia

$$(6.1) \quad Q = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{pmatrix}$$

una matrice simmetrica.

$$|Q| = \det Q = q_{11}q_{22} - (q_{12})^2.$$

Allora

$$|Q| > 0 \quad \text{e} \quad q_{11} > 0, \implies Q > 0$$

$$|Q| > 0 \quad \text{e} \quad q_{11} < 0, \implies Q < 0$$

Se $\det Q < 0$, allora Q è indefinita.

Dimostrazione 6.1. Data la forma quadratica

$$ah_1^2 + 2bh_1h_2 + ch_2^2,$$

essa può essere equivalentemente scritta

$$a \left(h_1 + \frac{b}{a} h_2 \right)^2 + \frac{ac - b^2}{a} h_2^2,$$

da questa formula si evince chiaramente il risultato.

Se la matrice Q è la matrice Hessiana ritroviamo un caso già studiato

$$(6.2) \quad Hf = \begin{pmatrix} f_{xx}(x_0, y_0) & f_{xy}(x_0, y_0) \\ f_{xy}(x_0, y_0) & f_{yy}(x_0, y_0) \end{pmatrix}$$

$$f_{xx}(x_0, y_0) \left(h_1 + \frac{f_{xy}(x_0, y_0)}{f_{xx}(x_0, y_0)} h_2 \right)^2 + \frac{f_{xx}(x_0, y_0)f_{yy}(x_0, y_0) - f_{xy}(x_0, y_0)^2}{f_{xx}(x_0, y_0)} h_2^2,$$

Torniamo al caso n dimensionale. Se x_0 è un punto stazionario ossia $Df(x_0) = 0$, la formula diventa

$$f(x+h) = f(x_0) + \frac{1}{2}D^2f(x_0)h \cdot h + o(\|h\|^2), \quad h \rightarrow 0$$

$$\frac{1}{2}D^2f(x_0)h \cdot h \cdot (x - x_0) + o(\|h\|^2) \geq 0$$

allora localmente

$$f(x) \geq f(x_0),$$

vicino a x_0 cosicché il punto x_0 è un punto di minimo locale.

Per studiare minimi e massimi locali in \mathbb{R}^n dobbiamo ora studiare la positività delle forme quadratiche o equivalentemente la positività della matrice $D^2f(x_0)$:

$$D^2f(x_0) > 0$$

Valgono

Teorema 6.9. *Condizione necessaria del secondo ordine. Sia A un aperto. Sia $f \in C^2(A)$, x_0 punto di minimo (massimo) relativo allora la matrice Hessiana nel punto x_0 è semidefinita positiva.*

Teorema 6.10. *Condizione sufficiente del secondo ordine. Sia A un aperto. Sia $f \in C^2(A)$, x_0 un punto stazionario in cui la matrice Hessiana è definita positiva (negativa) allora x_0 è un punto di minimo (massimo) relativo.*

7. FORME QUADRATICHE

Forme Quadratiche Una forma quadratica é un polinomio omogeneo di grado 2 in n variabili.

In generale $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$

$$q(x) = \sum_{i,j=1}^n a_{i,j} x_i x_j = \sum_{i=1}^n a_{i,i} x_i^2 + \sum_{i \neq j}^n a_{i,j} x_i x_j$$

$$A = (a_{i,j})$$

In forma di prodotto scalare

$$q(x) = Ax \cdot x$$

In forma matriciale

$$q(x) = x^T Ax$$

A una forma quadratica resta associata una matrice simmetrica.

Una matrice Q si dice *positiva* (rispettivamente, *negativa*) se la forma $z^T Q z$ è *positiva* (rispettivamente, *negativa*)

$$z^T Q z = \sum_{i,j=1}^n q_{i,j} z_i z_j \quad 0 \quad (z^T Q z < 0) \quad \forall z \in \mathbb{R}^n, x, y \neq 0.$$

Un esempio di matrice positiva è data da

$$(7.1) \quad I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

poichè $x^2 + y^2 > 0$.

Una matrice Q si dice *non negativa* (rispettivamente, *non positiva*) \iff la forma $z^T Q z$ ($z = (x, y)$) is semidefinita positiva (rispettivamente negativa) cioè se

$$z^T Q z = \sum_{i,j=1}^n q_{i,j} z_i z_j \geq 0$$

(rispettivamente, $z^T Q z \leq 0$), $\forall z \in \mathbb{R}^n$

e se esiste $z \in \mathbb{R}^n$ non nullo tale la forma quadratica è nulla.

Un esempio di matrice non negativa è data da

$$(7.2) \quad Q = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Una matrice Q si dice indefinita se esistono \bar{z} e \hat{z} tali che

$$\sum_{i,j=1}^n q_{i,j} \bar{z}_i \bar{z}_j > 0 \quad \sum_{i,j=1}^n q_{i,j} \hat{z}_i \hat{z}_j < 0$$

$$(7.3) \quad Q = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -2 \end{pmatrix}$$

7.1. $N = 3$. Come riconoscere se la forma quadratica (o la matrice associata) è definita positiva ossia

$$q(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = \sum_{i,j=1}^n a_{i,j} x_i x_j \geq 0, \quad \forall x \neq 0$$

Esercizi di riscrittura dalla forma alla matrice associata e viceversa.

$$q(x_1, x_2, x_3) = x_1^2 + 3x_2^2 + x_3^2 - 24x_1x_2 - 6x_1x_3 + 2x_2x_3$$

La matrice associata è

$$\begin{pmatrix} 1 & -12 & -3 \\ -12 & 3 & 1 \\ -3 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Calcolo degli autovalori.

Ricordiamo che se A è una matrice simmetrica allora tutti gli autovalori sono reali. Vale

Teorema 7.1. *A è una matrice definita positiva se e solo se gli autovalori sono positivi*

Infatti

Teorema 7.2. *Indichiamo con m e M il più piccolo e il più grande autovalore della matrice simmetrica A . Allora*

$$m \|h\|^2 \leq Ah \cdot h \leq M \|h\|^2 \quad \forall h \in \mathbb{R}^n$$

Proof. Consideriamo la funzione

$$F(h) = Ah \cdot h = \sum_{i,j=1}^n a_{ij} h_i h_j,$$

nell'insieme

$$K = \{h \in \mathbb{R}^n : \|h\| = 1\}$$

Per il teorema di Weierstrass F assume minimo e massimo assoluti in K . Siano h_{m1}, h_{M1}

$$F(h_{m1}) = m_1 \quad F(h_{M1}) = M_1$$

$$F(h_{m1}) \leq \sum_{i,j=1}^n a_{ij} h_i h_j \leq F(h_{M1}) \quad \forall h \in \mathbb{R}^n : \|h\| = 1$$

Sia

$$\mu = \frac{h}{\|h\|}, \quad h \neq 0$$

$\|\mu\| = 1$,

$$m_1 \leq \sum_{i,j=1}^n a_{ij} \mu_i \mu_j = \sum_{i,j=1}^n a_{ij} \frac{h_i h_j}{\|h\|^2} = \frac{1}{\|h\|^2} \sum_{i,j=1}^n a_{ij} h_i h_j \leq M_1$$

Posto

$$G(h) = \frac{1}{\|h\|^2} \sum_{i,j=1}^n a_{ij} h_i h_j, \quad h \neq 0,$$

h_{m1} punto di minimo, h_{M1} punto di massimo.

$$G_{h_i} = \frac{1}{\|h\|^4} \left(\|h\|^2 \frac{\partial}{\partial h_i} Ah \cdot h - Ah \cdot h \frac{\partial}{\partial h_i} \|h\|^2 \right) =$$

Calcoliamo

$$\frac{\partial}{\partial h_i} \left(\frac{1}{\|h\|^2} \right) = \frac{\partial}{\partial h_i} \left(\frac{1}{h_1^2 + h_2^2 + \dots + h_n^2} \right) = -\frac{2h_i}{(h_1^2 + h_2^2 + \dots + h_n^2)^2} = -\frac{2h_i}{\|h\|^4}$$

Ricordiamo

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1i} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2i} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} & a_{i2} & a_{i3} & \dots & a_{ii} & \dots & a_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{ni} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

$$Ah = \begin{pmatrix} a_{11}h_1 + a_{12}h_2 + a_{13}h_3 + \dots + a_{1i}h_i + \dots + a_{1n}h_n \\ a_{21}h_1 + a_{22}h_2 + a_{23}h_3 + \dots + a_{2i}h_i + \dots + a_{2n}h_n \\ \dots \\ a_{i1}h_1 + a_{i2}h_2 + a_{i3}h_3 + \dots + a_{ii}h_i + \dots + a_{in}h_n \\ \dots \\ a_{n1}h_1 + a_{n2}h_2 + a_{n3}h_3 + \dots + a_{ni}h_i + \dots + a_{nn}h_n \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} Ah \cdot h &= (a_{11}h_1^2 + a_{12}h_1h_2 + a_{13}h_1h_3 + \dots + a_{1i}h_1h_i + \dots + a_{1n}h_1h_n) + \\ &\quad (a_{21}h_1h_2 + a_{22}h_2^2 + a_{23}h_2h_3 + \dots + a_{2i}h_2h_i + \dots + a_{2n}h_2h_n) \\ &\quad \dots \\ &\quad (a_{i1}h_1h_i + a_{i2}h_2h_i + a_{i3}h_3h_i + \dots + a_{ii}h_i^2 + \dots + a_{in}h_nh_i) + \\ &\quad \dots \\ &\quad (a_{n1}h_1h_n + a_{n2}h_2h_n + a_{n3}h_3h_n + \dots + a_{ni}h_ih_n + \dots + a_{nn}h_n^2) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial}{\partial h_i} \left(\sum_{i,j=1}^n a_{i,j} h_i h_j \right) = 2a_{1i}h_1 + 2a_{2i}h_2 + \dots + 2a_{ii}h_i + \dots + 2a_{ni}h_n$$

$$\frac{\partial}{\partial h_i} \left(\sum_{i,j=1}^n a_{i,j} h_i h_j \right) = 2 \sum_{j=1}^n a_{j,i} h_j.$$

Da cui si deduce

$$\frac{\partial G}{\partial h_i} = \frac{2}{\|h\|^2} \left(\sum_{j=1}^n a_{j,i} h_j - \frac{Ah \cdot h}{\|h\|^2} h_i \right)$$

$$DG(h_{m1}) = 0 \iff Ah_{m1} - G(h_{m1})h_{m1} = 0$$

$$Dg(h_{M1}) = 0 \iff Ah_{M1} - G(h_{M1})h_{M1} = 0$$

ossia $m_1 = G(h_{m1})$ e $M_1 = G(h_{M1})$ autovalori per A . Inoltre sono il più piccolo e il più grande autovalore come segue facilmente. \square

Teorema 7.3. *Una matrice simmetrica è definita positiva (negativa) \iff tutti gli autovalori della matrice sono positivi (negativi). Una matrice simmetrica è definita positiva (negativa) \iff tutti gli autovalori della matrice sono positivi (negativi). È semi definita positiva (negativa) \iff tutti gli autovalori sono positivi (negativi o nulli). Una matrice simmetrica è indefinita \iff esistono autovalori della matrice positivi e autovalori negativi.*

7.2. Condizioni sufficienti del secondo ordine per estremi liberi.

Teorema 7.4. *Condizione sufficiente del secondo ordine. Sia A un aperto. Sia $f \in C^2(A)$, x_0 un punto stazionario in cui la matrice Hessiana è definita positiva (negativa) allora x_0 è un punto di minimo (massimo) relativo stretto.*

Proof. Dallo sviluppo di Lagrange al secondo ordine con il resto di Peano per punti stazionari

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + \frac{1}{2} D^2 f(x_0) h \cdot h + o(\|h\|^2)$$

Dal teorema 7.2 Indichiamo con λ_m e λ_M il più piccolo e il più grande autovalore della matrice simmetrica A . Allora

$$\lambda_m \|h\|^2 \leq Ah \cdot h \leq \lambda_M \|h\|^2 \quad \forall h \in \mathbb{R}^n$$

Nel caso in cui la matrice Hessiana è definita positiva dalla

$$\lambda_m \|h\|^2 \leq Ah \cdot h,$$

deduciamo

$$f(x_0 + h) \geq f(x_0) + \frac{1}{2} \lambda_m \|h\|^2 (1 + o(1)),$$

Per h piccolo deduciamo che x_0 è un punto di minimo stretto (λ_m positivo)

$$f(x_0 + h) > f(x_0)$$

Nel caso in cui la matrice Hessiana è definita negativa dalla

$$\lambda_M \|h\|^2 \geq Ah \cdot h,$$

deduciamo

$$f(x_0 + h) \leq f(x_0) + \frac{1}{2} \lambda_M \|h\|^2 (1 + o(1)),$$

Per h piccolo deduciamo che x_0 è un punto di massimo stretto, (λ_M negativo)

$$f(x_0 + h) < f(x_0)$$

\square

7.3. Calcolo di autovalori.

$$D(\lambda) = \begin{vmatrix} \lambda - 1 & -12 & -3 \\ -12 & \lambda - 3 & 1 \\ -3 & 1 & \lambda - 1 \end{vmatrix}$$

$$D(\lambda) = 0,$$

$$(\lambda - 1) \begin{vmatrix} \lambda - 3 & 1 \\ 1 & \lambda - 1 \end{vmatrix} + 12 \begin{vmatrix} -12 & 1 \\ -3 & \lambda - 1 \end{vmatrix} - 3 \begin{vmatrix} -12 & \lambda - 3 \\ -3 & 1 \end{vmatrix} = 0$$

$$\begin{aligned} & (\lambda - 1)((\lambda - 3)(\lambda - 1) - 1) - 144(\lambda - 1) + 36 + 36 - 9(\lambda - 3) = \\ & (\lambda - 1)(\lambda^2 - 4\lambda + 3) - \lambda + 1 - 144\lambda + 144 + 72 - 9\lambda + 27 = \\ & \lambda^3 - 4\lambda^2 + 3\lambda - \lambda^2 + 4\lambda - 3 - \lambda + 1 - 144\lambda + 144 + 72 - 9\lambda + 27 \\ & \lambda^3 - 5\lambda^2 - 147\lambda + 241 = 0 \end{aligned}$$

Per il Teorema Fondamentale dell'Algebra un'equazione di terzo grado ha tre soluzioni in \mathbb{C} , in questo caso sappiamo che le radici sono reali. L'equazione di terzo grado ha sempre almeno una radice reale, come già detto nel caso in esame sappiamo che tutte le soluzioni sono reali per la simmetria della matrice A .

Possiamo avere informazioni sul segno senza calcolarle?

Se r , s e t sono le sue tre radici, l'equazione si annulla se $x = r$ o se $x = s$ o se $x = t$, cioè dovrà essere:

$$(x-r)(x-s)(x-t) = 0$$

Si ottiene:

$$x^3 - (r + s + t)x^2 + (rs + rt + st)x - rst = 0$$

Da cui si trova

$$r + s + t = 5$$

e

$$rst = -241.$$

Almeno una dovrà essere negativa, non tutte e tre perché la somma è positiva.

Il problema di determinare formule esatte per le soluzioni di equazioni di grado > 2 con un numero finito di operazioni di somme e prodotti moltiplicazioni, divisioni e radici n -esime rimane aperto per lungo tempo.

Gerolamo Cardano (1501-1576), Tartaglia (1500-1557) : equazioni di terzo grado.

Ludovico Ferrari (1522-1565): equazioni di quarto grado.

La ricerca di formule risolutive si è in seguito spostata verso le equazioni di quinto grado. Il problema è rimasto insoluto sino a quando, nel 1824, Abel completò una dimostrazione parziale di Ruffini, provando che una tale formula risolutiva non può esistere (Teorema di Abel-Ruffini).

7.4. Equazioni di terzo grado. Assumeremo che le radici siano reali. Data l'equazione di terzo grado.

$$x^3 + bx^2 + cx + d = 0$$

la trasformiamo in un'equazione priva del termine di secondo grado

$$x = y - b/3$$

$$(y - b/3)^3 + b(y - b/3)^2 + c(y - b/3) + d = 0$$

$$(y^3 - 3(b/3)y^2 + 3(b^2/9)y - b^3/27) + b(y^2 - 2(b/3)y + b^2/9) + cy - bc/3 + d = 0$$

$$y^3 - by^2 + (b^2/3)y - b^3/27 + by^2 - (2b^2/3)y + b^3/9 + cy - bc/3 + d = 0$$

$$y^3 + (-b^2/3 + c)y + 2b^3/27 - bc/3 + d = 0$$

$$p = -b^2/3 + c \quad q = 2b^3/27 - bc/3 + d$$

$$y^3 + py + q = 0$$

Introduciamo u e v

$$y = u + v$$

$$p = -3uv$$

$$(u + v)^3 - 3uv(u + v) + q = 0$$

Da cui

$$u^3 + v^3 = -q \quad u^3v^3 = -p^3/27$$

Risolviamo

$$z^2 + qz - p^3/27 = 0$$

$$z_{1,2} = \frac{-q \pm \sqrt{q^2 + 4p^3/27}}{2}$$

Consideriamo un caso particolare : assumiamo

$$p^2 + 4p^3/27 \geq 0$$

Si ottiene una radice reale

$$y = \sqrt[3]{z_1} + \sqrt[3]{z_2}.$$

Se

$$p^2 + 4p^3/27 < 0,$$

allora vogliamo determinare anche in questo caso una radice reale y . Divideremo poi il polinomio per $x - y$. Consideriamo

$$z^2 + qz - p^3/27 = 0$$

z_1 e z_2 complesse coniugate. Risolviamo il problema ($z_1 = |z_1|e^{i\theta}$, $z_2 = |z_1|e^{-i\theta}$)

$$\sqrt[3]{z_1} \quad \sqrt[3]{\bar{z}_1},$$

ottenendo

$$u_k = \sqrt[3]{|z_1|} e^{i\frac{\theta+2k\pi}{3}} |z_1| \quad v_j = \sqrt[3]{|z_1|} e^{i\frac{-\theta+2j\pi}{3}}$$

$k = 0, 1, 2$ $j = 0, 1, 2$ si ha tramite la formula di Eulero che $u_0 + v_0 \in \mathbb{R}$

7.4.1. *Esercizi.* Calcolare gli autovalori di una matrice simmetrica A , per $n = 2$, per $n = 3$

$$a_{11} = 1, a_{22} = 2, a_{33} = 2$$

$$a_{12} = -2, a_{13} = 0$$

$$a_{23} = 0$$

Calcolare gli autovalori di una matrice A , per $n = 3$

$$a_{11} = 1, a_{22} = 2, a_{33} = 2$$

$$a_{12} = -2, a_{13} = a_{31} = a_{21} = 0$$

$$a_{23} = a_{32} = 0$$

8. E2: REGRESSIONE LINEARE MINIMI QUADRATI

Dati $n > 2$ di \mathbb{R}^2 con ascisse distinte tra loro si vuole determinare la retta che minimizza l'errore quadratico totale

$$F(a_0, a_1) = \sum_{j=1}^n (a_1 x_j + a_0 - y_j)^2 =$$

$$a_1^2 \sum_{j=1}^n x_j^2 + n a_0^2 + \sum_{j=1}^n y_j^2 + 2a_0 a_1 \sum_{j=1}^n x_j - 2a_0 \sum_{j=1}^n y_j - 2a_1 \sum_{j=1}^n x_j y_j$$

Funzione di due variabili di cui possiamo calcolare i punti critici

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial a_0} = 2 \sum_{j=1}^n (a_1 x_j + a_0 - y_j) = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial a_1} = 2 \sum_{j=1}^n x_j (a_1 x_j + a_0 - y_j) = 0 \end{cases}$$

Scritto sotto forma di sistema

$$\begin{cases} a_0 n + a_1 \left(\sum_{j=1}^n x_j \right) = \sum_{j=1}^n y_j \\ a_0 \left(\sum_{j=1}^n x_j \right) + a_1 \left(\sum_{j=1}^n x_j^2 \right) = \sum_{j=1}^n x_j y_j \end{cases}$$

$$D = \begin{vmatrix} n & \sum_{j=1}^n x_j \\ \sum_{j=1}^n x_j & \sum_{j=1}^n x_j^2 \end{vmatrix} = n \left(\sum_{j=1}^n x_j^2 \right) - \left(\sum_{j=1}^n x_j \right)^2$$

Esercizio 8.1. Dimostrare, assumendo x_j distinti tra loro al variare di $j = 1, \dots,$

$$\left(\sum_{j=1}^n x_j \right)^2 < n \sum_{j=1}^n x_j^2, \quad n \in \mathbb{N}, n \geq 2$$

Dimostrazione 8.1. *La disuguaglianza è verificata per $n = 2$. Assumendo vera la disuguaglianza al passo n dobbiamo dimostrare*

$$\begin{aligned} & \left(\sum_{j=1}^{n+1} x_j \right)^2 < (n+1) \sum_{j=1}^{n+1} x_j^2. \\ & \left(\sum_{j=1}^{n+1} x_j \right)^2 = \left(\sum_{j=1}^n x_j + x_{n+1} \right)^2 \\ & \left(\sum_{j=1}^n x_j \right)^2 + x_{n+1}^2 + 2x_{n+1} \sum_{j=1}^n x_j < \\ & n \sum_{j=1}^n x_j^2 + x_{n+1}^2 + 2x_{n+1} \sum_{j=1}^n x_j = \\ & (n+1) \sum_{j=1}^n x_j^2 + nx_{n+1}^2 + x_{n+1}^2 - \underbrace{x_{n+1}^2 + \dots + x_{n+1}^2}_{n \text{ volte}} - \sum_{j=1}^n x_j^2 + 2x_{n+1} \sum_{j=1}^n x_j = \\ & (n+1) \sum_{j=1}^{n+1} x_j^2 - \sum_{j=1}^n (x_j - x_{n+1})^2 < (n+1) \sum_{j=1}^{n+1} x_j^2. \end{aligned}$$

Calcolo delle soluzioni

Un sistema con 2 equazioni e 2 incognite ha un'unica soluzione se e solo se il determinante D è diverso da zero. In questo caso, la soluzione è data da:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{\begin{vmatrix} \sum_{j=1}^n y_j & \sum_{j=1}^n x_j \\ \sum_{j=1}^n x_j y_j & \sum_{j=1}^n x_j^2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} n & \sum_{j=1}^n x_j \\ \sum_{j=1}^n x_j & \sum_{j=1}^n x_j^2 \end{vmatrix}} \\ a_1 &= \frac{\begin{vmatrix} n & \sum_{j=1}^n y_j \\ \sum_{j=1}^n x_j & \sum_{j=1}^n x_j y_j \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} n & \sum_{j=1}^n x_j \\ \sum_{j=1}^n x_j & \sum_{j=1}^n x_j^2 \end{vmatrix}} \end{aligned}$$

Calcoliamo la matriche Hessiana

$$H(a_0, a_1) = \begin{pmatrix} 2n & 2 \sum_{j=1}^n x_j \\ 2 \sum_{j=1}^n x_j & 2 \sum_{j=1}^n x_j^2 \end{pmatrix}.$$

il cui determinante risulta positivo. La matrice Hessiana risulta positiva (il primo elemento è positivo), il punto in cui si annulla il gradiente è un punto di minimo relativo. Si tratta infatti di un punto di minimo assoluto.

Riflessioni sulla validità del metodo. Regressione polinomiale.

9. MATRICI DEFINITE POSITIVE/NEGATIVE

Ricordiamo la regola dei determinanti di nord-ovest.

Definizione 9.1. Sia A una matrice $n \times n$ le sottomatrici di nord-ovest si ottengono da A

$$A_1 = (a_{11}), \dots, A_2 = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \dots \dots \dots$$

$$A_3 = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \dots \dots \dots A_n = A$$

Vale il seguente

Teorema 9.2. La matrice simmetrica A è definita positiva \iff

$$\det A_k > 0, \forall k = 1, \dots, n.$$

La matrice simmetrica A è definita negativa \iff

$$(-1)^k \det A_k > 0, \forall k = 1, \dots, n$$

($A_1 < 0, A_2 > 0, A_3 < 0 \dots$)

10. DETERMINANTE DI MATRICI HESSIANE: ESEMPIO

Ricordiamo lo studio della funzione gaussiana nel caso unidimensionale
La funzione gaussiana ha la forma generale seguente

$$f(x) = Ae^{-B(x-x_0)^2},$$

$x_0 \in \mathbb{R}$, A e B positivi. Studiamo il caso $A = 1, B = 1, x_0 = 0$.

11. 1-D E 2-D

La funzione $f(x) = e^{-x^2}$ La funzione è definita in \mathbb{R} ed è pari, dunque simmetrica rispetto all'asse y , pertanto è possibile studiarla solo per $x > 0$. Risulta

$$e^{-x^2} > 0 \quad \forall x \in \mathbb{R},$$

quindi non ci sono intersezioni con l'asse x . Inoltre

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} e^{-x^2} = 0,$$

pertanto la retta $y = 0$ (asse x) è un asintoto orizzontale per la funzione. Si ha

$$f'(x) = (e^{-x^2})' = -2xe^{-x^2},$$

da cui

$$f'(x) > 0 \text{ per } x < 0, \quad f'(x) < 0 \text{ per } x > 0.$$

Dunque la funzione è crescente per $x < 0$ e decrescente per $x > 0$ ed il punto $(0, 1)$ è il punto di massimo assoluto. Inoltre

$$f''(x) = (-2xe^{-x^2})' = e^{-x^2}(4x^2 - 2).$$

Ponendo

$$e^{-x^2}(4x^2 - 2) = 0,$$

ricaviamo $x = \pm \frac{\sqrt{2}}{2}$, da cui otteniamo i punti di flesso

$$\left(-\frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{1}{\sqrt{e}}\right), \left(\frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{1}{\sqrt{e}}\right).$$

La funzione è concava in $(-\frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2})$

11.1. **2-d: La funzione** $f(x_1, x_2) = e^{-(x_1^2+x_2^2)}$. Si ha

$$f_{x_1}(x) = -2x_1 e^{-(x_1^2+x_2^2)} = 0$$

$$f_{x_2}(x) = -2x_2 e^{-(x_1^2+x_2^2)} = 0$$

$$\iff (x_1, x_2) = (0, 0)$$

$$f_{x_1, x_1} = -2e^{-(x_1^2+x_2^2)} + 4x_1^2 e^{-(x_1^2+x_2^2)}$$

$$f_{x_2, x_2} = -2e^{-(x_1^2+x_2^2)} + 4x_2^2 e^{-(x_1^2+x_2^2)}$$

$$f_{x_1, x_2} = f_{x_2, x_1} = 4x_1 x_2 e^{-(x_1^2+x_2^2)}$$

Calcoliamo la matrice hessiana

$$\begin{pmatrix} -2e^{-(x_1^2+x_2^2)} + 4x_1^2 e^{-(x_1^2+x_2^2)} & 4x_1 x_2 e^{-(x_1^2+x_2^2)} \\ 4x_1 x_2 e^{-(x_1^2+x_2^2)} & -2e^{-(x_1^2+x_2^2)} + 4x_2^2 e^{-(x_1^2+x_2^2)} \end{pmatrix}$$

Il punto $(0, 0)$ è di massimo relativo (e assoluto). Infatti

$$\begin{pmatrix} -2 & 0 \\ 0 & -2 \end{pmatrix}$$

la matrice hessiana calcolata nel punto è definita negativa e la funzione è sempre minore o uguale di uno.

$$e^{-2(x_1^2+x_2^2)} \begin{pmatrix} -2 + 4x_1^2 & 4x_1x_2 \\ 4x_1x_2 & -2 + 4x_2^2 \end{pmatrix}$$

Inoltre il determinante della matrice

$$e^{-2(x_1^2+x_2^2)} [(-2 + 4x_1^2)(-2 + 4x_2^2) - 16x_1^2x_2] = \\ e^{-2(x_1^2+x_2^2)} (4 - 8(x_1^2 + x_2^2))$$

La matrice è definita negativa se $1 - 2(x_1^2 + x_2^2) > 0$ e $-1 + 2x_1^2 < 0$. Nel caso $n = 2$ si è ancora potuto fare il calcolo esplicitamente tuttavia aumentando la dimensione il calcolo diviene via via più complicato.

Indicando con H_n il determinante della matrice hessiana diviso per $e^{n(x_1^2+x_2^2+\dots+x_n^2)}$ nel caso n variabili, nel caso in esame notiamo

$$H_2 = [(-2)^3 x_2^2 - 2H_1]$$

Infatti

$$[(-2)^3 x_2^2 - 2(4x_1^2 - 2)]$$

11.2. **n-d: La funzione** $f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = e^{-(x_1^2+x_2^2+x_3^2+\dots+x_n^2)}$. La formula che vogliamo dimostrare è la seguente

$$H_n = [(-2)^{n+1} x_n^2 - 2H_{n-1}]$$

(Iterare la formula sostituendo H_{n-1} e così via)

$$H_n = [(-2)^{n+1} x_n^2 - 2H_{n-1}] = (-2)^n (1 - 2(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2))$$

Ricordiamo che

- 1. Se si scambiano due righe il determinante cambia di segno.
- 2. Se ad una riga sommo un'altra riga moltiplicata per uno scalare non nullo il determinante non cambia.
- 3. Se ad una colonna sommo un'altra colonna moltiplicata per uno scalare non nullo il determinante non cambia.
- 4. Se si moltiplicano gli elementi di una riga (o colonna) per uno scalare anche il determinante risulta moltiplicato per lo scalare.
- 5. Se in A la riga a_i è somma di due vettori numerici: $a_i = a'_i + a''_i$, allora $\det A$ si può ottenere come somma dei determinanti delle due matrici A' ed A'' aventi come riga di posto i rispettivamente i vettori a'_i e a''_i .

$$\text{Det} \begin{pmatrix} 4x_1^2 - 2 & 4x_1x_2 & \dots & \dots & 4x_1x_n \\ 4x_2x_1 & 4x_2^2 - 2 & \dots & \dots & 4x_2x_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 4x_nx_1 & 4x_nx_2 & \dots & \dots & 4x_n^2 - 2 \end{pmatrix} =$$

Prendere l'ultima riga e applicare la 5, con $a_i'' = (0, 0, 0, \dots, -2)$ Si ottiene

$$\begin{aligned}
 & \text{Det} \begin{pmatrix} 4x_1^2 - 2 & 4x_1x_2 & \dots & \dots & 4x_1x_n \\ 4x_2x_1 & 4x_2^2 - 2 & \dots & \dots & 4x_2x_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 4x_nx_1 & 4x_nx_2 & \dots & \dots & 4x_n^2 \end{pmatrix} + \\
 & \text{Det} \begin{pmatrix} 4x_1^2 - 2 & 4x_1x_2 & \dots & \dots & 4x_1x_{n-1} & 0 \\ 4x_2x_1 & 4x_2^2 - 2 & \dots & \dots & 4x_2x_{n-1} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 4x_{n-1}x_1 & 4x_{n-1}x_2 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & -2 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Calcolare il primo determinante

$$\text{Det} \begin{pmatrix} 4x_1^2 - 2 & 4x_1x_2 & \dots & \dots & 4x_1x_n \\ 4x_2x_1 & 4x_2^2 - 2 & \dots & \dots & 4x_2x_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 4x_nx_1 & 4x_nx_2 & \dots & \dots & 4x_n^2 \end{pmatrix} =$$

Mettiamo in evidenza $2x_n$ sia dall'ultima riga che dall'ultima colonna e applichiamo la 4. Allora

$$4x_n^2 \text{Det} \begin{pmatrix} 4x_1^2 - 2 & 4x_1x_2 & \dots & \dots & 2x_1 \\ 4x_2x_1 & 4x_2^2 - 2 & \dots & \dots & 2x_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 2x_1 & 2x_2 & \dots & \dots & 1 \end{pmatrix} =$$

Moltiplichiamo per $2x_1$ l'ultima colonna e la sottraiamo alla prima e poi per $2x_2$ e lo sottraiamo alla seconda e così via, applicando la 3.

$$4x_n^2 \text{Det} \begin{pmatrix} -2 & 0 & \dots & \dots & 2x_1 \\ 0 & -2 & \dots & \dots & 2x_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 1 \end{pmatrix} = (-2)^{n+1} x_n^2$$

Da cui otteniamo la formula

$$\text{Det}H_n = (-2)^{n+1} x_n^2 - 2\text{Det}H_{n-1}$$

Sostituendo a $\text{det}H_{n-1}$ il valore dato dalla precedente formula e così via

$$\text{Det}H_n = (-2)^n (1 - 2(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)).$$

$$\text{Det}H_1 = (-2)(1 - 2x_1^2)$$

$$\text{Det}H_2 = (-2)^2 (1 - 2(x_1^2 + x_2^2))$$

$$\text{Det}H_3 = (-2)^3 (1 - 2(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2))$$

Ricordando la definizione di HE_n abbiamo la formula generale

$$\text{Det}HE_n = (-2)^n e^{-n(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)} (1 - 2(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)).$$

In $(0, 0, \dots, 0)$ la matrice è definita negativa come si può evincere da $\text{Det}HE_n = (-2)^n$, e dal teorema 7.2.