

Intorno in n dimensioni

Come visto in algebra, \mathbb{R}^n è uno spazio vettoriale con prodotto scalare e quindi norma (distanza). La norma euclidea si definisce:

$$\|\bar{x} - \bar{x}_0\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0^i)^2}$$

Possiamo, quindi, definire l'intorno sferico di raggio ϵ come:

$$B(x_0, \epsilon) = \left\{ \bar{x} \in \mathbb{R}^n : \|\bar{x} - \bar{x}_0\| < \epsilon \right\} \quad (\text{Bolla})$$

Quindi gli intorni sferici sono una generalizzazione in n dimensioni dell'intorno simmetrico.

Il raggiungimento dei bordi di un intervallo sono spiccioli: non sono raggiungibili con percorsi qualunque. Consideriamo quindi i tipi di punti dello spazio in più tipi:

Presto un insieme $A \subseteq \mathbb{R}^2$:

- x si dice **INTERNO** ad A se $\exists \epsilon > 0 : B(x, \epsilon) \subset A$
- x si dice **DI FRONTIERA** per A se $\forall \epsilon > 0 : B(x, \epsilon) \cap A \neq \emptyset \wedge B(x, \epsilon) \cap \bar{A} \neq \emptyset$
- x si dice **ESTERNO** ad A se $\exists \epsilon > 0 : B(x, \epsilon) \subset \bar{A}$

L'insieme dei punti interni ad A viene indicato con A° . L'insieme dei punti di frontiera di A è indicato con ∂A . Le frontiere di A e \bar{A} coincidono.

L'insieme A si dice **aperto** se ogni punto è interno. Se \bar{A} è aperto, allora A è chiuso e viceversa. A si dice **chiuso** se $\partial A \subseteq A$. Considerando \mathbb{R}^2 , la sua frontiera è \emptyset , quindi è sia aperto che chiuso. Questa cosa vale per \emptyset . L'insieme totale e quello nullo sono gli unici insiemni che sono contemporaneamente chiusi e aperti.

Intervalli limitati

In \mathbb{R}^2 bisogna ridefinire il concetto di limitatezza:

$$A \subseteq \mathbb{R}^2 (\mathbb{R}^n) \text{ è limitato se } \exists x_0 \in \mathbb{R}^2, p > 0 : A \subset B(x_0, p)$$

Si può notare che la definizione sopra non è altro che una generalizzazione del concetto di limitatezza in \mathbb{R} . Bisogna ora definire quando un insieme è **connesso**, ovvero fatto "da un solo pezzo".

Curva

Si definisce una curva (o arco di curva) in \mathbb{R}^n una funzione

$$\begin{aligned} \bar{r} : I \subseteq \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{R}^n \\ t \in I &\mapsto \begin{bmatrix} r_1(t) \\ \vdots \\ r_n(t) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Possiamo ora dire un insieme connesso come:

Presto $A \subseteq \mathbb{R}^n$, A è connesso per archi se, per ogni coppia di punti \bar{x} e \bar{y} esiste una curva $\bar{r} : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ con $\bar{r}(a) = \bar{x}$ e $\bar{r}(b) = \bar{y}$, $r(t) \in A$

Un insieme connesso è connesso per archi, ma non vale il viceversa.

Funzioni in più variabili

Definiamo funzione in più variabili:

$$f: A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$$

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \mapsto \begin{bmatrix} f_1(\underline{x}) \\ \vdots \\ f_m(\underline{x}) \end{bmatrix} \quad \text{con } f_i: A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \Rightarrow f(\underline{x}) = \begin{cases} f_1(\underline{x}) \\ \vdots \\ f_m(\underline{x}) \end{cases}$$

Obliamo già varie delle funzioni di questo tipo: le funzioni lineari

La norma è già stata definita sopra. Una proprietà dice che:

LIMITE DI FUNZIONI IN PIÙ VARIABILI

$$\|\underline{x} - \underline{x}_0\| \rightarrow 0 \iff |x_i - x_{0i}| \rightarrow 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n$$

Si può anche dimostrare la stessa cosa in termini di ϵ/δ . Ciò ci permetterà di definire il limite di funzioni in più variabili:

$$\lim_{\underline{x} \rightarrow \underline{x}_0} f(\underline{x}) = \underline{l} \iff \lim_{\underline{x} \rightarrow \underline{x}_0} f_j(\underline{x}) = l_j \quad \forall j = 1, 2, \dots, m \quad \text{con } f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m \quad \underline{l} \in \mathbb{R}^m$$

La convergenza in \mathbb{R}^n avviene, quindi, per coordinate. Se si studiano $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ posso studiare anche $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$.

Continuità e derivabilità di funzioni $f: I \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^m$

Consideriamo $f: I \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$, allora $f_j: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ che non altro che una solita funzione vista fino ad ora. Possiamo allora estendere i concetti visti in analisi 1:

- $f \in C(I) \iff f_j \in C(\mathbb{R}) \quad \forall j = 1, \dots, n$
- f è derivabile su I se e solo se sono derivabili tutte le f_j su I

LIMITI DI FUNZIONI REALI IN PIÙ VARIABILI REALI

Consideriamo una funzione $f: A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$. Poiché \mathbb{R}^n non è ordinato, non possiamo più parlare di funzioni crescenti o decrescenti. Possiamo, però, ancora parlare di massimi e di minimi.

Potrebbe distinguere il grafico di queste funzioni è difficile, definiamo gli insiemi di livello K di f come

$$I = \{\underline{x} \in A : f(\underline{x}) = K\}.$$

Per distinguere il grafico di una funzione di questo tipo bisogna usare sia gli insiemi di livello che le restrizioni a retta (escludere le singole coordinate ponendo le altre pari a zero / costante).

Notiamo che le funzioni che dipendono dalla distanza dall'origine sono grafici di rotazioni. Basta quindi trovare il grafico in 1 variabile e farlo rendere. Funzioni di questo tipo sono delle funzioni radiali.

Limite (in) finito per $\underline{x} \rightarrow \underline{x}_0$ di funzioni reali in più variabili reali

Dato $f: A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ con A insieme aperto, definiamo $\underline{l} \in \mathbb{R}^*$ limite di f per $\underline{x} \rightarrow \underline{x}_0 \in A$ se

$$\forall \mathcal{V}(\underline{l}) \exists \mathcal{U}(\underline{x}_0) : \forall \underline{x} \in \mathcal{U} \setminus \{\underline{x}_0\} \quad f(\underline{x}) \in \mathcal{V}$$

In particolare abbiamo:

- $\lim_{\underline{x} \rightarrow \underline{x}_0} f(\underline{x}) = \underline{l} \rightarrow \forall \varepsilon > 0 \ \exists \delta = \delta(\varepsilon) > 0 : \forall \underline{x} \in B(\underline{x}_0, \delta) \setminus \{\underline{x}_0\} \quad |f(\underline{x}) - \underline{l}| < \varepsilon$
- $\lim_{\underline{x} \rightarrow \underline{x}_0} f(\underline{x}) = +\infty \rightarrow \forall K > 0 \ \exists \delta = \delta(K) > 0 : \forall \underline{x} \in B(\underline{x}_0, \delta) \setminus \{\underline{x}_0\} \quad f(\underline{x}) > K$

Limiti per $(x, y) \rightarrow \infty$

Poiché per dire che il limite esiste la funzione deve avere lo stesso limite su tutte le rette radiali (vedi definizione successionale di limite), parlare di $(x, y) \rightarrow \infty$ si complica la vita. Quando si affrontano i limiti di funzioni all'infinito, si farà riferimento alla norma del vettore (x, y) . Possiamo, allora, dire che:

$$\lim_{\|x\| \rightarrow +\infty} f(x) = l \in \mathbb{R} \quad \text{se} \quad \forall \epsilon > 0 \quad \exists R > 0 : \forall x \in \mathbb{R}^n \quad \|x\| > R \Rightarrow |f(x) - l| < \epsilon$$

$$\lim_{\|x\| \rightarrow +\infty} f(x) = +\infty \quad \text{se} \quad \forall K > 0 \quad \exists R > 0 : \forall x \in \mathbb{R}^n \quad \|x\| > R \Rightarrow |f(x)| > K$$

Definizione successionale di limite

La definizione successionale di limite afferma che:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l \in \mathbb{R}^* \iff \forall \{x_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subset A \subset \mathbb{R}^n, x_n \neq x_0 : \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0 \quad \text{in} \quad \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = l$$

Continuità di funzione reale a più variabili reali

Dato $f: A \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ con A aperto. Chiamiamo f continua in $x_0 \in A$ se $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$.

In seguito ai teoremi dell'algebra dei limiti possiamo affermare che somma/prodotto/quoziente/composizione di funzioni continue dà una funzione continua.

Proprietà delle funzioni a più variabili continue

- Se $f: D \subset \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$ e $x \in C$ è un chiuso di \mathbb{R}^m e A è un aperto di \mathbb{R}^n allora $f^{-1}(C)$ è un chiuso in \mathbb{R}^m e $f^{-1}(A)$ è aperto in \mathbb{R}^m !! f^{-1} è la controimmagine, non la funzione inversa !!
- Di conseguenza sia $f: D \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ e sia $c \in \mathbb{R}$ (c è un insieme chiuso), allora $f^{-1}(c)$ è anch'esso chiuso. Poiché $f(x, y) = c$ è la definizione di un insieme di livello, per il teorema sopra essi sono chiusi
- Di conseguenza sia $f: D \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$, considera $f((0, +\infty))^+$ aperto; per il teorema sopra avremo che la funzione sarà positiva (e con un procedimento analogo negativa) solo su insiemini aperti mentre sarà nulla su insiemini chiusi (vedi considerazione precedente)

Teoremi sulle funzioni continue

- Teorema di Weierstrass: sia $f: D \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, f continua e D un insieme chiuso e limitato, f avrà un massimo ed un minimo assoluto in D .
- Teorema degli zeri: sia $f: A \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, f continua, A connesso per archi; se esiste $x_1 \in A : f(x_1) > 0$ e $x_2 \in A : f(x_2) < 0$ allora esiste $x_0 \in A : f(x_0) = 0$

DIMOSTRAZIONE: Considero una curva $\pi(t) : [a, b] \rightarrow A : \pi(a) = x_1 \quad \pi(b) = x_2$ (per definizione di curva π è continua).

Considero $g = f \circ \pi : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$, g è continua in quanto composizione di funzioni continue. Abbiamo che $g(a) = f(\pi(a)) = f(x_1) > 0$ e $g(b) = f(\pi(b)) = f(x_2) < 0$. Per il Teorema degli zeri in 1 variabile, esiste $t_0 \in [a, b] : g(t_0) = 0$. Quindi $\pi(t_0) = x_0$

- Conseguenza: se $f(x, y)$ è continua, ogni regione connessa per archi individuata dagli zeri è di segno costante. ■

Teoremi sui limiti

1. Unicità del limite: se il limite per $x \rightarrow x_0$ di f esiste, esso è unico

2. Algebra dei limiti:

- $\lim_{x \rightarrow x_0} f + g = \lim_{x \rightarrow x_0} f + \lim_{x \rightarrow x_0} g \quad [+ \infty - \infty]$
- $\lim_{x \rightarrow x_0} f \cdot g = \lim_{x \rightarrow x_0} f \cdot \lim_{x \rightarrow x_0} g \quad [0 \cdot \infty]$
- $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f}{g} = \frac{\lim f}{\lim g} \quad [\frac{0}{0}; \frac{\infty}{\infty}]$
- data $f: A \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ e $g: A \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ abbiamo $\lim_{x \rightarrow x_0} g(f(x)) = \lim_{t \rightarrow t_0} g(t)$
- ' $g: A \subset \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}^n$ e $f: A \subset \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}$ abbiamo $\lim_{w \rightarrow w_0} f(g(w)) = \lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$

3. Teorema del confronto: Siano f, g, h definite da $A \subset \mathbb{R}^n$ a \mathbb{R} tali che esistono definitivamente per $x \rightarrow x_0$ $f(x) \leq g(x) \leq h(x)$. Allora se $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l$ e $\lim_{x \rightarrow x_0} h(x) = l$ con $l \in \mathbb{R}^*$, allora $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = l$

4. Teorema della permanenza del segno: Sia f continua e sia $x_0 \in A \subset \mathbb{R}^n : f(x_0) > 0$. Allora $\exists \delta > 0 : f(x) > 0 \quad \forall x \in B(x_0, \delta)$.

ESEMPIO: Date $f_1(x, y) = \frac{x^2y}{x^2+y^2}$, $f_2(x, y) = \frac{xy}{\sqrt{x^2+y^2}}$, $f_3(x, y) = \frac{xy}{x^2+y^2}$, $f_4 = \frac{x+y}{x^2+y^2}$. Calcola $\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} f_i(x, y)$.

$$|f_1(x, y)| = \frac{|x^2y|}{x^2+y^2} \leq 1, |y| \rightarrow 0 \stackrel{\text{C.F.R.}}{\Rightarrow} \lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} f_1(x, y) = 0$$

$$|f_2(x, y)| = \frac{|xy|}{\sqrt{x^2+y^2}} \leq 1, |x| \rightarrow 0 \stackrel{\text{C.F.R.}}{\Rightarrow} \lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} f_2(x, y) = 0$$

$$|f_3(x, y)| = \frac{|xy|}{(x^2+y^2)^2} \leq 1 \quad \text{Studiando } f_3(x, x) = \frac{x^2}{2x^2} = \frac{1}{2}, \text{ mentre } f_3(x, 0) = 0. \quad \text{Il limite, quindi, non esiste.}$$

Al punto $(0,0)$ ci si può avvicinare in infiniti modi. Affinché il limite esista, tutte le restrizioni devono convergere allo stesso valore (cfr: definizione successionale di limite)

$$|f_4(x, y)| = \dots \leq 2 \quad \text{Studiando } f_4(x, -x) = 0, \text{ mentre } f_4(x, x) = \frac{2}{x} \rightarrow \infty. \quad \text{Il limite, quindi, non esiste.}$$

Passaggio a coordinate reali in \mathbb{R}^2

Per coordinate polari si intendono:

$$\rho \in (0, +\infty), \theta \in (-\pi; \pi] : \begin{cases} x = \rho \cos \theta \\ y = \rho \sin \theta \end{cases}$$

Per passare alle coordinate polari basta sostituire a x e y i corrispondenti. Nota bene: $\rho = \sqrt{x^2+y^2}$ e $\theta = \arctan(\frac{y}{x})$.

Il passaggio a coordinate polari può aiutare nel calcolo dei limiti:

$$\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} f(x, y) = l \iff \lim_{\rho \rightarrow 0} \tilde{f}(\rho, \theta) = l \quad \text{uniformemente rispetto a } \theta$$

ESEMPIO: Consideriamo $f_1(x, y) = \frac{xy}{\sqrt{x^2+y^2}}$, $f_2(x, y) = \frac{x+y}{\sqrt{x^2+y^2}}$, $f_3(x, y) = \frac{xy^2}{x^2+y^2}$. Calcolare il limite per $x \rightarrow (0,0)$.

$$\tilde{f}_1(\rho, \theta) = \frac{\rho^2 \cos \theta \sin \theta}{\rho} = \rho \cos \theta \sin \theta \quad ; \quad \tilde{f}_2(\rho, \theta) = \frac{\rho(\cos \theta + \sin \theta)}{\rho} \rightarrow \text{Il limite poiché dipende da } \theta$$

$$|\tilde{f}_1(\rho, \theta)| \leq \rho \rightarrow 0 \stackrel{\text{C.F.R.}}{\Rightarrow} \lim_{\rho \rightarrow 0} \tilde{f}_1(\rho, \theta) = 0$$

$$\tilde{f}_3(\rho, \theta) = \frac{\rho^3 \cos \theta \sin^2 \theta}{\rho^2 \cos^2 \theta + \rho^2 \sin^2 \theta} = \rho \frac{\cos \theta \sin^2 \theta}{\cos^2 \theta + \sin^2 \theta}$$

Per $\rho \rightarrow 0$, abbiamo $\tilde{f}_3(\rho, \theta) \sim \rho \frac{\sin^2 \theta}{\cos^2 \theta}$, quindi avremo un problema per $\cos \theta \rightarrow 0$. Quindi il limite non esiste.

DERIVABILITÀ E DIFFERENZIABILITÀ

In \mathbb{R} i due concetti erano pressoché equivalenti. Ora non più.

Derivate parziali

Consideriamo $f: A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$. Considerando la definizione di derivabilità otteniamo $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0+h) - f(x_0)}{h}$ che non ha senso poiché $\frac{h}{t}$ è un vettore. Fixiamo una direzione v , poniamo scrivere $f(x_0 + tv) - f(x_0)$ e calcolare $\lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + tv) - f(x_0)}{t}$. Ciò ci dà informazioni parziali valide solo per una direzione. Le direzioni usuali saranno i versori canonici di \mathbb{R}^n .

Se esiste finito $\lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + t, y_0) - f(x_0, y_0)}{t} = l$, dire che esiste la derivata parziale $\frac{\partial f}{\partial x}(x_0, y_0) = l$. Analogamente per $\frac{\partial f}{\partial y}(x_0, y_0) = l$.

Le derivate parziali possono esistere anche se la funzione non è continua.

Derivabilità e gradiente

Se esistono $\frac{\partial f}{\partial x}(x_0, y_0)$ e $\frac{\partial f}{\partial y}(x_0, y_0)$ diciamo che f è derivabile in (x_0, y_0) . Definiamo il vettore $(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}) = \nabla f$ il gradiente di f in (x_0, y_0) .

Derivate direzionali

Consideriamo il limite $\lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + tv, y_0 + tw) - f(x_0, y_0)}{t}$. Se il precedente limite esiste finito lo chiamiamo $D_v f(x_0, y_0)$ derivata direzionale.

La derivata direzionale può esistere anche se la funzione non è continua.

Funzione differenziabile

In analogia al calcolo unidimensionale, se $f'(x_0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0+h) - f(x_0)}{h} = \lambda$, possiamo scrivere che $f(x_0+h) - f(x_0) = f'(x_0) \cdot h + o(h)$ per $h \rightarrow 0$. Analogamente in \mathbb{R}^n , possiamo dire che $f: A \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ è differenziabile nel punto $x_0 \in A$ se $\exists \in \mathbb{R}^n: f(x_0+h) - f(x_0) = \alpha \cdot h + o(\|h\|)$ per $h \rightarrow 0$.

In \mathbb{R} , la definizione di derivabilità e differenziabilità coincidono. In \mathbb{R}^n , però, questo non accade più.

Applicando la definizione di differenziabilità, otteniamo che

$$f(x_0+h, y_0+k) - f(x_0, y_0) - \nabla f(x_0, y_0)(h, k) = o(\sqrt{h^2+k^2}) \Rightarrow \lim_{h, k \rightarrow 0, 0} \frac{f(x_0+h, y_0+k) - f(x_0, y_0) - \nabla f(x_0, y_0)(h, k)}{\sqrt{h^2+k^2}} = 0$$

Quello che stiamo facendo è associare una funzione differenziale definita così:

$$\begin{aligned} \text{d} f_{x_0}: \quad & \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \\ & x_0 \mapsto \text{d} f_{x_0}(x_0) = \nabla f(x_0) \cdot h \end{aligned} \quad \left. \right\} \text{differenziale primo}$$

Condizione necessaria di differenziabilità

Sia f differenziabile in $x_0 \in A$. Allora:

- f è continua in $x_0 \in A$
- f è derivabile in $x_0 \in A$ e $\alpha = \nabla f(x_0)$
- $\forall v \in \mathbb{R}^n, \|v\|=1 \exists D_v f(x_0) \wedge D_v f(x_0) = \nabla f(x_0) \cdot v$ (formula del gradiente)

Significato della formula del gradiente

Espandendo l'espressione otteniamo che $D_v f(x_0, y_0) = \frac{\partial}{\partial x} f(x_0, y_0) v_1 + \frac{\partial}{\partial y} f(x_0, y_0) v_2$. Questo significa che tutte le rette tangenti ai grafici delle restrizioni di f a tutte le parallele per. (x_0, y_0) sono tutte congruenti.

Chiamiamo (x, y) il vettore incrementale e $h = x - x_0$ e $k = y - y_0$, possiamo scrivere che

$$f(x, y) = f(x_0, y_0) + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} f(x_0, y_0)(x-x_0) + \frac{\partial}{\partial y} f(x_0, y_0)(y-y_0)}_{\text{Piano tangente al grafico di } f \text{ in } (x_0, y_0, f(x_0, y_0))} + o(\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2})$$

Riprendendo la definizione, abbiamo che:

$$g(x) = \underbrace{f(x_0) + \nabla f(x_0)(x-x_0)}_{\text{con } g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \text{ e } g \text{ affine}}$$

Tangente a $f(x_0)$

Conseguenze della differenziabilità

- Significato geometrico del gradiente: $D_v f(x_0, y_0) = \nabla f(x_0, y_0) \cdot (v_1, v_2) = \|\nabla f(x_0, y_0)\| \cos \theta$ con θ l'angolo formato tra i due vettori. Il gradiente sarà, quindi, la direzione di massima crescita (discesa).

Condizione sufficiente per la differenziabilità

Sia $f: A \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$. Se f è derivabile in intorno a x_0 e tutte le derivate parziali sono continue in x_0 , allora f è differenziabile in x_0 .

Se f ha derivate parziali continue su tutto A , allora f è differenziabile su A . Possiamo dire che $f \in C^1(A)$.

DIMOSTRAZIONE:

$$\begin{aligned}
 f(x_0+h, y_0+k) - f(x_0, y_0) &= f(x_0+h, y_0+k) - f(x_0, y_0+k) + f(x_0, y_0+k) - f(x_0, y_0) = g(h) - g(0) + g(0) - f(x_0, y_0) = \\
 &\quad \hookrightarrow g(t) : [0, h] \rightarrow \mathbb{R} \\
 &= \frac{\partial}{\partial x} f(x_0+\theta h, y_0+k) h + \frac{\partial}{\partial y} f(x_0, y_0+\eta k) k = \left(\frac{\partial}{\partial x} (x_0, y_0) + E_1(h, k) \right) h + \left(\frac{\partial}{\partial y} (x_0, y_0) + E_2(k, h) \right) k = \\
 \hookrightarrow \text{Lagrange: } g(h) - g(0) &= g'(0)h \quad \hookrightarrow E_{1,2} \rightarrow 0 \text{ per } (h, k) \rightarrow (0, 0) \\
 \frac{\partial}{\partial x} f(x_0, y_0) h + \frac{\partial}{\partial y} (x_0, y_0) k + E_1 h + E_2 k &= \nabla f(x_0, y_0) (h, k) + E(h, k) = \nabla f(x_0, y_0) + \Theta(\sqrt{h^2+k^2}) \\
 \frac{|E(h, k)|}{\sqrt{h^2+k^2}} &\leq \frac{|E(h, k)|}{\sqrt{h^2+k^2}} \leq E_1(h, k) + E_2(k, h) \rightarrow 0 \Rightarrow E(h, k) = \Theta(\sqrt{h^2+k^2}) \\
 (\text{affinché } E(h, k) &= \Theta(\sqrt{h^2+k^2})) \quad \nearrow
 \end{aligned}$$

Differenziabilità di funzioni composite

($g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$)

Sia $f: A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ differenziabile in x_0 e g derivabile (o differenziabile) in $y_0 = f(x_0)$, allora $h: g \circ f$ è differenziabile in x_0 e $\nabla h(x_0) = g'(f(x_0)) \cdot \nabla f(x_0)$

Sia $f: A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ differenziabile in $x_0 = g(t_0)$ e $g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ derivabile (o differenziabile) in t_0 , allora $h: f \circ g$ è derivabile (o differenziabile) in t_0 e $h'(t_0) = \nabla f(g(t_0)) \cdot g'(t_0)$

Gradiente e vettore tangente

La seconda ha un significato intuizionale se prengiamo $g = \pi$ con π un arco di curva continuo e differenziabile. Il vettore $\mathbf{T} = \frac{\pi'(t)}{\|\pi'(t)\|}$ è il vettore tangente alla curva in t .

Sia $f: A \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ e sia π una sua curva di livello con π' derivabile, $\pi'(t) = 0$. Se f è differenziabile in $x_0 \in \pi(I)$, allora $\nabla f(x_0)$ è ortogonale alla curva in $x_0 = \pi(t_0)$.

DIMOSTRAZIONE: $h(t) = f(\pi(t))$ su $\pi(I)$ è costante, quindi h è costante $\forall t \in I$. Segue che $h'(t_0) = 0 = \nabla f(\pi(t_0)) \cdot \pi'(t_0) \Rightarrow \nabla f(\pi(t_0)) \perp \pi'(t_0) \quad (\parallel \mathbf{T}(t_0))$

Teorema della media

Sia f differenziabile su A , Allora $\forall x_1, x_2 \in A \quad \exists \tilde{x} \in [x_1, x_2]$ tale che $f(x_1) - f(x_2) = \nabla f(\tilde{x})(x_2 - x_1)$

PRELIMINARE: l'espressione di una retta passante per due punti è $\pi(\lambda) = x_1 + \lambda(x_2 - x_1)$ con $\lambda \in \mathbb{R}$. Per ottenere un seguendo, scriviamo $\pi(\lambda) = x_1 + \lambda(x_2 - x_1)$ con $\lambda \in [0, 1]$

DIMOSTRAZIONE: Ricordiamo $f(x_2) - f(x_1)$: scriviamo $\pi(t) = x = x_1 + t(x_2 - x_1)$ e consideriamo $h(t) = f(\pi(t))$. Scriviamo che $h(0) = f(x_1)$ e $h(1) = f(x_2)$. Notiamo che h risulta le ipotesi del Teorema di Lagrange. Allorciamo così che $h(1) - h(0) = h'(0) = f(x_2) - f(x_1)$. Come visto prima, abbiamo $h'(0) = \nabla f(x_1 + \Theta(x_2 - x_1)) \pi'(0)$. Siccome $\pi' = x_2 - x_1$, ottieniamo che $f(x_2) - f(x_1) = \nabla f(\tilde{x})(x_2 - x_1)$.

Differenziazione di funzione $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$

Diciamo che $f: A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ è differenziabile in $x_0 \in A$ se f_3 è differenziabile.

Sezione ogni f_3 avrà un $\nabla f_3(x_0)$, definiamo:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} f_1(x_0) & \dots & \frac{\partial}{\partial x_n} f_1(x_0) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial}{\partial x_1} f_m(x_0) & \dots & \frac{\partial}{\partial x_n} f_m(x_0) \end{bmatrix} = J_f(x_0) \rightarrow \text{Matrice Jacobiana di } f \text{ valutata in } x_0$$

Il determinante $|J_{f(x_0)}|$ viene chiamato Jacobiano di f in x_0 .

Se f è differenziabile su A , è possibile definire

$$\begin{aligned} J_f(x) &: A \rightarrow \text{Mat}(\mathbb{R}, n, m) \\ x_0 &\mapsto J_{f(x_0)} \end{aligned}$$

Come sarà fatto $f(x_0+h) - f(x_0)$? Sappiamo che $f(x_0+h) - f(x_0) = \nabla f(x_0) \cdot h$, quindi l'incremento di f lo poniamo scrivere riga per riga:

$$\begin{bmatrix} \nabla f_1(x_0) \cdot h \\ \vdots \\ \nabla f_m(x_0) \cdot h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nabla f_1(x_0) \\ \vdots \\ \nabla f_m(x_0) \end{bmatrix} \cdot h = J_{f(x_0)} \cdot h$$

Differenziabilità di funzioni composte per $f: A \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$

Siamo $f: A \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ e $g: f(A) \subset \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^p$, f differenziabile in $x_0 \in A$, g differenziabile in $y_0 = f(x_0)$. Della $h = g \circ f$ $h: A \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p$, h è differenziabile in x_0 e $J_h(x_0) = J_g(y_0) \cdot J_f(x_0)$

Teorema di Fermat

Diciamo che $x_0 \in A$ è un punto di massimo (minimo) locale per f se $\exists r > 0 : \forall x \in B(x_0, r) \cap A \quad f(x) \leq f(x_0)$ ($f(x) \geq f(x_0)$).
Se al posto di $\leq (>)$ consideriamo $< (>)$ avremo un punto di massimo locale forte.

Possiamo adesso estendere il Teorema di Fermat: sia $f: A \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ differenziabile (derivabile) in $x_0 \in A$; se x_0 è un punto di massimo (minimo) locale, si ha $\nabla f(x_0) = 0$

Chiamiamo un punto $x_0 \in A$: $\nabla f(x_0) = 0$ punto stazionario. Nota bene: un punto può essere di massimo (minimo) locale anche senza essere punto stazionario.

Poiché in \mathbb{R}^n perdiamo il concetto di crescente/decrecente, ci serve un altro modo per trovare i punti di max/min locale. Dal polinomio di Taylor possiamo dire che: data $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ derivabile n volte in x_0 ; se f'' è la prima derivata non nulla in x_0 allora: se n è dispari x_0 non è stazionario; se n è pari e $f''(x_0) > 0$ è minimo, se $f''(x_0) < 0$ è massimo.
Possiamo quindi usare le derivate di ordine superiore per studiare massimi e minimi locali.

Derivata di ordine superiore

Sia $f: A \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ differenziabile su A . Chiamiamo derivata seconda di f :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial}{\partial x} f \right) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} f \quad ; \quad \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial}{\partial y} f \right) = \frac{\partial^2}{\partial y^2} f \quad ; \quad \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial}{\partial y} f \right) = \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} f \quad ; \quad \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial}{\partial x} f \right) = \frac{\partial^2}{\partial y \partial x} f$$

Se $f: A \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ avremo n^2 derivate seconde.

Teorema di Schwarz

Sia $f: A \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ derivabile 2 volte in A ; se $\frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} f$ e la $\frac{\partial^2}{\partial x_j \partial x_i} f$ sono funzioni continue in $x_0 \in A$ allora $\frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} f(x_0) = \frac{\partial^2}{\partial x_j \partial x_i} f(x_0)$

Differenziabilità di ordine superiore

Sia $f: A \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ differenziabile su A . Dico che f è differenziabile 2 volte in $x_0 \in A$ se la funzione $\nabla f: A \rightarrow \mathbb{R}^n$ è differenziabile in $x_0 \Rightarrow \forall i=1, \dots, n \quad \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} f$ è differenziabile

Applicando la condizione sufficiente di differenziabilità, possiamo dire che se $\frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} f$ sono continue, allora $\frac{\partial^2}{\partial x_i^2} f$ è differenziabile. In questo caso diciamo che $f \in C^2(\mathbb{R})$. Per il teorema di Schwarz, le derivate sono anche simmetriche.

Matrice Hermitiana

In \mathbb{R}^2 , definiamo matrice Hermitiana di f in x_0, y_0 la seguente matrice:

$$H_f(x_0, y_0) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2}{\partial x^2} f & \frac{\partial^2}{\partial y \partial x} f \\ \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} f & \frac{\partial^2}{\partial y^2} f \end{bmatrix}$$

Se $f \in C^2$, allora $H_f(x_0, y_0) \in \mathcal{S}(2; \mathbb{R})$

Differenziale secondo

Sia $f \in C^2(A)$, chiamiamo differenziale secondo di f in $x_0 \in A$ la funzione:

$$d^2 f(x_0) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \quad \text{tale che } d^2 f(x_0)(h) = \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} f(x_0) h_i h_j$$

Studiando il caso per $n=2$ otteniamo:

$$\begin{aligned} d^2 f(x_0, y_0)(h, K) &= \dots = \underbrace{\frac{\partial^2}{\partial x^2} f(x_0, y_0) h^2 + 2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} f(x_0, y_0) h K + \frac{\partial^2}{\partial y^2} f(x_0, y_0) K^2}_{P_h(h, K)} \\ P_h(h, K) &= ah^2 + 2bhK + cK^2 \\ &= [h \ K] \begin{bmatrix} a & b \\ b & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ K \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Epondendoci su \mathbb{R}^n otteniamo

$$d^2 f(x_0)(h) = \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} f(x_0) h_i h_j = [h_1 \ h_2 \ \dots \ h_n] \begin{bmatrix} \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} f & \dots & \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_n} f \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2}{\partial x_n^2} f & \dots & \frac{\partial^2}{\partial x_n \partial x_1} f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_n \end{bmatrix} = h^T H_f(x_0) h \Rightarrow \text{polinomio di secondo grado omogeneo}$$

Possiamo, quindi, dire che $d^2 f(x_0)$ è una forma quadratica su \mathbb{R}^n .

Formula di Taylor del 2° ordine per $f: A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$

Sia $f \in C^2(A)$, A aperto, e sia $x_0 \in A$, allora

$$f(x_0 + h) - f(x_0) = df(x_0)(h) + \frac{1}{2} d^2 f(x_0)(h) + o(\|h\|^2)$$

avrà la formula di Taylor del 2° ordine con resto di Peano. Invece:

$$f(x_0 + h) - f(x_0) = df(x_0)(h) + \frac{1}{2} d^2 f(x_0 + \theta h)(h)$$

avrà la formula di Taylor del secondo ordine con resto di Lagrange.

Forme quadratiche

Definiamo forma quadraticha il polinomio ottenuto da: $q(h) = h^T M h$. ($M \in \mathcal{S}(n; \mathbb{R})$)

Dada $q: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ forma quadraticha, dico che q è definita:

- **positiva (negativa)** se $q(h) > 0$ (< 0) $\forall h \neq 0$;
- **semipositiva (seminegativa)** se $q(h) \geq 0$ (≤ 0) $\forall h \neq 0 \wedge \exists h \neq 0 : q(h) = 0$
- **indefinita** se $\exists h, K : q(h) > 0 \wedge q(K) < 0$

In \mathbb{R}^2 , per studiare il segno di una forma quadraticha studiamo il determinante di M

- se $|M| > 0$ q è definita positiva se $a > 0$, negativa se $a < 0$
- se $|M| = 0$ q è semidefinita
- se $|M| < 0$ q è indefinita

In \mathbb{R}^n , invece, data M_K la sottomatrice quadrata di nord-ovest, diciamo che:

- se $|M_{kk}| > 0 \quad \forall k = 1, 2, \dots, n$ è definita positiva
- se $(-1)^k |M_{kk}| > 0 \quad \forall k = 1, 2, \dots, n$ è definita negativa

Esiste un metodo più veloce usando gli autovetori/autovettori

$$q(b) = b^T M_K b = b^T S \Lambda S^T b = \tilde{b}^T \Lambda K = \tilde{q}(K)$$

\hookrightarrow diagonalizzabile poiché simmetrica

$$\tilde{q}(K) = \sum_{i=1}^n \lambda_i k_i^2 \Rightarrow \tilde{q}(K) > 0 \quad \forall K \Leftrightarrow \lambda_i > 0 \quad \forall i$$

$$\tilde{q}(K) < 0 \quad \forall K \Leftrightarrow \lambda_i < 0 \quad \forall i$$

$$\exists \lambda_i = 0 \Rightarrow q(K) = 0 \text{ anche per } K \neq 0$$

Possiamo quindi dire che:

- se gli autovetori di M sono tutti positivi la forma è definita positiva
- se gli autovetori di M sono tutti negativi la forma è definita negativa
- se un autovettore è nullo e gli altri sono positivi allora la forma è semidefinita positiva
- se un autovettore è nullo e gli altri sono negativi allora la forma è semidefinita negativa
- se gli autovetori di M hanno segno misto allora la forma è indefinita.

Enunciato il seguente teorema: sia q definita positiva, allora $q(b) \geq \lambda_{\min} \|b\|^2$; sia q definita negativa, allora $q(b) \leq \lambda_{\max} \|b\|^2$.

DIMOSTRAZIONE: $q(b) = \tilde{q}(K) \geq \lambda_{\min} \|K\|^2 = \lambda_{\min} \|b\|^2$ poiché il cambio di base è un'isometria ■

Massimi e minimi locali per $f: A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$

Sia A aperto, $f \in C^2(A)$ e $x_0 \in A$ punto stazionario. Allora se $d^2 f(x_0)$ è una forma quadratica

- definita positiva (negativa) allora x_0 è un punto di minimo (massimo) locale;
- indefinita x_0 non è né max né min locale
- semidefinita non posso trovare conclusioni finché per il fatto che se c'è un estremante deve essere minimo se è semidefinita positiva e massimo se è semidefinita negativa.

DIMOSTRAZIONE Scriviamo il polinomio di Taylor: $f(x_0 + h) - f(x_0) = d^2 f(x_0)(h) + \frac{1}{2} d^3 f(x_0)(h) + o(\|h\|^3) = \frac{1}{2} d^2 f(x_0)(h) + o(\|h\|^2)$

Supponiamo $d^2 f(x_0)(h)$:

- definita positiva: $\frac{1}{2} d^2 f(x_0)(h) \geq \frac{1}{2} \lambda_m \|h\|^2 + o(\|h\|^2) = \|h\|^2 \left(\frac{1}{2} \lambda_m + o(1) \right)$ quindi $\exists \delta > 0: \|h\| < \delta \Rightarrow \frac{1}{2} \lambda_m + o(1) > 0$. Quindi per $h \in B(0, \delta)$ $f(x_0 + h) - f(x_0) \geq 0$ ($= 0$ solo se $h = 0$)
- definita negativa: $\frac{1}{2} d^2 f(x_0)(h) \leq \frac{1}{2} \lambda_M \|h\|^2 + o(\|h\|^2) < 0$ definitivamente per $h \neq 0$

Se $d^2 f(x_0)(h)$ è indefinito, allora $\exists v, w, \|v\| = \|w\| = 1: d^2 f(x_0)(v) > 0 \neq d^2 f(x_0)(w) < 0$. Allora $f(x_0 + tv) - f(x_0) - \frac{1}{2} d^2 f(x_0)(tv) + o(\|tv\|^2) = \frac{1}{2} t^2 d^2 f(x_0)(v) + o(t^2) = t^2 \left(\frac{1}{2} d^2 f(x_0)(v) + o(1) \right)$ per $t \rightarrow 0$, quindi $\exists \delta > 0: 0 < |t| < \delta \Rightarrow f(x_0 + tv) > f(x_0)$. Possiamo scrivere la stessa cosa per w : $f(x_0 + tw) - f(x_0) - \frac{1}{2} d^2 f(x_0)(tw) + o(t^2) = t^2 \left(\frac{1}{2} d^2 f(x_0)(w) + o(1) \right)$ per $t \rightarrow 0$, quindi $\exists \eta > 0: 0 < |t| < \eta \Rightarrow f(x_0 + tw) < f(x_0)$. Quindi per $|t| < \min\{\delta, \eta\} = r$ in $B(x_0, r)$ $f(x_0 + tv) > f(x_0)$ e $f(x_0 + tw) < f(x_0)$. ■

Studio di massimi e minimi vincolati

Il vincolo Ω sarà l'insieme di punti $\{(x, y): g(x, y) = 0\}$. $g(x, y) = 0$ è la curva di livello o della funzione g . Il vincolo potrà anche essere una regione di spazio $\Omega = \{(x, y): g(x, y) \leq 0\}$

Espresso un vincolo (una curva o una regione), dico che x_0 è massimo vincolato per f rispetto al vincolo Ω se è punto di massimo locale o globale e massimo per la funzione restituita a quel vincolo. Analogamente per i minimi.

ESEMPIO $f(x,y) = x+y$ su $C = \{x^2 + y^2 \leq 1\}$

Guardo in C ∇f : $\nabla f(x_0, y_0) = 0 \Rightarrow$ \exists max/min per $x^2 + y^2 < 1$. Per $\nabla f = 0$ consideriamo, però, due max/min assoluti per f/c . Poiché sulla regione non abbiamo candidati, saremo per forza sulla frontiera $\partial C = \{x^2 + y^2 = 1\}$. Parametrizziamo ∂C : $\{x = \cos t, y = \sin t\}$ e sostituiamo la parametrizzazione: $f(t) = f(x(t), y(t)) = \cos t + \sin t$. Studiamo i punti stazionari di f : $f'(t) = -\sin t + \cos t = 0 \Leftrightarrow \sin t = \cos t \Leftrightarrow t = \frac{\pi}{4} \vee t = \frac{5\pi}{4}$. Abbiamo, quindi, due candidati: $f(\frac{\pi}{4}) = f(\frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2}) = \sqrt{2}$; $f(\frac{5\pi}{4}) = f(-\frac{\sqrt{2}}{2}, -\frac{\sqrt{2}}{2}) = -\sqrt{2}$ e avremo che $M = (\frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2})$ è massimo assoluto su C e $m = (-\frac{\sqrt{2}}{2}, -\frac{\sqrt{2}}{2})$ è minimo assoluto su C .

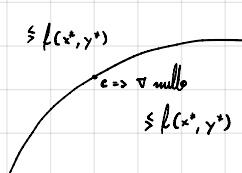
Parametrizzare il vincolo come nell'esempio non sempre è facile anche se era una bella curva. Servono, allora, strumenti un po' più raffinati.

Metodo moltiplicativo di Lagrange (Condizione necessaria per punti estremanti su un vincolo)

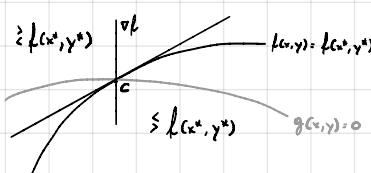
Sia $f \in C^2(A)$ $A \subset \mathbb{R}^2$, sia $g \in C^2(A)$ la funzione che definisce il vincolo tramite $g(x, y) = 0$. Se (x^*, y^*) è un punto di massimo o di minimo locale per f rispetto al vincolo $\nabla g(x^*, y^*) \neq 0$, allora $\exists \lambda: \nabla f(x^*, y^*) = \lambda \nabla g(x^*, y^*)$. λ è chiamato moltiplicatore di Lagrange.

Studiamo il significato del teorema. Consideriamo la curva di livello $f(x, y) = f(x^*, y^*)$ e c un punto di max/min locale.

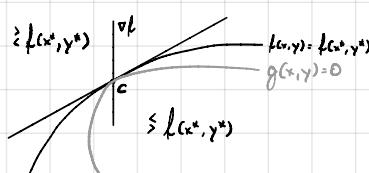
Avremo le seguenti situazioni:



caso ipotesi!

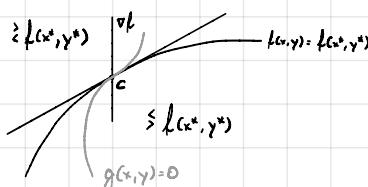


impossibile se c è max/min locale.



Le due curve, quindi, hanno la stessa tangente in c

Se le due curve condividono la tangente, allora il loro gradiente sarà parallelo. La condizione, però, non è sufficiente poiché la seguente situazione:



è possibile in quanto non è detto che se curva di livello e vincolo hanno la stessa tangente la prima non attraversi la seconda.

Definiamo $L(x, y, \lambda) = f(x, y) - \lambda g(x, y)$ chiamata lagrangiana. Notiamo che (x^*, y^*) è punto critico se e solo se $\exists \lambda^*: \nabla L(x^*, y^*, \lambda^*) = 0$. Questo significa che:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial x}(x, y, \lambda) = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial y}(x, y, \lambda) = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda}(x, y, \lambda) = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \frac{\partial f}{\partial x}(x, y) - \lambda \frac{\partial g}{\partial x}(x, y) = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial y}(x, y) - \lambda \frac{\partial g}{\partial y}(x, y) = 0 \\ g(x, y) = 0 \end{cases}$$

Il gradiente della lagrangiana ci permette, quindi, di riscrivere il teorema sopra in modo compatto.

Funzione convexa

Sia $f: A \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, definiamo l'epigrafico di f : $Epi f = \{(x, y) \mid x \in A, y \in \mathbb{R}: y \geq f(x)\}$. Sarà, quindi, l'insieme di punti che sta sopra al grafico della funzione.

Definiamo, allora, la funzione convessa: sia $f: A \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$, A convesso; dire che f è convessa se il suo epigrafico è un insieme convesso.

Eseguendo dei calcoli, otteniamo che una funzione è convessa se: $f((1-\lambda)x_1 + \lambda x_2) \leq f(x_1) + \lambda f(x_2) \quad \forall \lambda \in [0,1]$. Se consideriamo la disegualanza strita possiamo dire che f è strettamente convessa.

Diciamo che f è concava se $-f$ è convessa.

Proprietà delle funzioni convesse

- Se A è aperto, allora $\forall i \exists \frac{\partial f^+}{\partial x_i}, \frac{\partial f^-}{\partial x_i}$
- Se A è aperto e \mathbb{F}^f , allora f è differenziabile

Convessità relativa al piano tangente

Lia f differenziabile su A aperto convesso, allora f è convessa su A se e solo se $\forall x_0 \in A, \forall x \in A$ corrisponde al piano tangente $f(x_0) + \nabla f(x_0)(x-x_0)$ il grafico di f sta al di sopra, ossia $f(x) \geq f(x_0) + \nabla f(x)(x-x_0)$.

Convessità/concavità relativa al differenziale secondo

Lia $f \in C^2(A)$, A aperto convesso. Se d^2f è $\forall x_0 \in A$ una forma quadratica semidefinita positiva (negativa) allora f sarà convessa (concava).

DIMOSTRAZIONE Considero per f la formula di Taylor di secondo ordine con resto di Lagrange:

$$f(x) = f(x_0) + d f(x_0)(x-x_0) + \frac{1}{2} d^2 f(x_0 + \theta(x-x_0))(x-x_0) \quad \theta \in (0,1)$$

$d^2 f(x_0 + \theta(x-x_0))(x-x_0)$ è una forma quadratica semidefinita positiva, ossia $q(x-x_0) \geq 0 \quad \forall (x-x_0)$, per ipotesi. Chiedi $f(x) \geq f(x_0) + d f(x_0)(x-x_0)$ e per il teorema della convessità per la retta tangente, f è convessa. ■

Se d^2f è definito positivo (negativo) la funzione sarà strettamente convessa (concava). La dimostrazione è identica.

Conseguenza di questo teorema è che una funzione convessa (concava) avrà in A aperto solo minimi (massimi) relativi o assoluti.

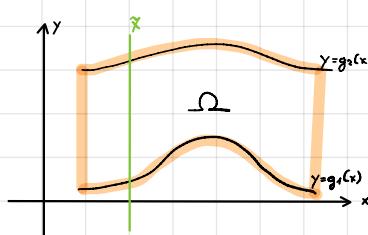
CALCOLO INTEGRALE PER FUNZIONI DI PIÙ VARIABILI

La definizione di intervallo non è immediata: $I = [a;b] \times [c;d]$. Ottieniamo così un rettangolo. Individuiamo il nostro rettangolo in molti sottoretangoli, analogamente a come facevamo in Analisi 1. Una funzione definita sul nostro rettangolo può essere, quindi, approssimata da vari gradini costanti. Poi poniamo il limite e ottenere ciò che vogliamo. L'insieme su cui integriamo, però, dovrà essere rettangolare. Si può passare da un'insieme rettangolare a uno qualsiasi con passaggi che non forse.

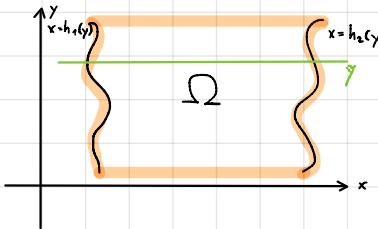
Funzione integrabile

Consideriamo $f: \Omega \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ con f limitata e Ω limitato.

Definiamo $\Omega = \{(x,y) \in \mathbb{R}^2 : x \in [a,b] \wedge g_1(x) \leq y \leq g_2(x)\}$ con $g_1, g_2 \in C([a,b])$ y -semplice. La forma di un insieme y -semplice sarà:



Chiamiamo $\Omega = \{(x,y) \in \mathbb{R}^2 : y \in [c,d] \wedge h_1(y) \leq x \leq h_2(y)\}$ con $h_1, h_2 \in C([c,d])$ viene detto x -simplice.



Chiamiamo $\Omega = \bigcup_{k=1}^n \Omega_k$, Ω_k y -simplice o x -simplice, dominio regolare.

Qui domini regolari vale il seguente teorema: sia $f \in C(\Omega)$, allora f è integrabile su Ω . Se f è integrabile su Ω con integrale pari a 0 scriviamo:

$$\lambda = \int_{\Omega} f(x) dx dy$$

Se $\Omega \subseteq \mathbb{R}^3$ avremo invece $\lambda = \int_{\Omega} f(x,y,z) dx dy dz$

Insiemi misurabili

Lia $\Omega \subseteq \mathbb{R}^2$ (\mathbb{R}^3), esso è misurabile se $\int_{\Omega} 1 dx dy$ ($\int_{\Omega} 1 dx dy dz$) è un numero reale.

Di conseguenza possiamo dire che ogni dominio regolare è integrabile. Se $\Omega = [a,b] \times [c,d]$, allora $\int_{\Omega} 1 dx dy = (b-a)(c-d)$.

Se Ω è misurabile definiamo $|\Omega| = \int_{\Omega} 1 dx dy = |\Omega|$ misura di Ω .

Insiemi di misura nulla

Per definizione Ω è un insieme di misura nulla se $\int_{\Omega} 1 dx dy = 0$. È caratterizzato dalle seguenti proprietà:

- $|\Omega| = 0 \Leftrightarrow \forall \epsilon > 0 \exists R_1, R_2, \dots, R_n$ rettangoli di \mathbb{R}^2 : $\Omega \subseteq \bigcup_{i=1}^n R_i \wedge \sum_i |R_i| < \epsilon$

Ogni unione finita di insiemi di misura nulla ha misura nulla.

Lia $f: [a,b] \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, $f \in C([a,b])$, allora $|Graf f| = 0$. Chiamiamolo vale per \mathbb{R}^2 .

Come corollario possiamo dire che se $\Omega \subseteq \mathbb{R}^2$ dominio regolare, allora $|\Omega| = 0$.

Enuniamo il seguente teorema: sia $f \in C(\Omega \setminus A)$, f limitata su $\Omega \setminus A$ con Ω regolare e $|A|=0$, allora f è integrabile su $\Omega \setminus A$.

Proprietà dell'integrale

$f \in R(\Omega)$

d'integrale è una funzione definita così: $I: \{f: f \text{ integrabile su } \Omega\} \rightarrow \mathbb{R}$. Essa gode delle seguenti proprietà:

- I è lineare: $\int_{\Omega} (\alpha f + \beta g) = \alpha \int_{\Omega} f + \beta \int_{\Omega} g$
- I è monotona rispetto all'integrandi: $f \geq g \Rightarrow \int_{\Omega} f \geq \int_{\Omega} g$
- I è additiva rispetto all'insieme d'integrazione: $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2 \wedge |\Omega_1 \cap \Omega_2| = 0 \Rightarrow \int_{\Omega} f = \int_{\Omega_1} f + \int_{\Omega_2} f$
- I è monotona rispetto all'insieme d'integrazione: $f \geq 0$, $\Omega_1 \subseteq \Omega_2$ allora $\int_{\Omega_1} f \leq \int_{\Omega_2} f$

Le rimanenti proprietà ci permette di enunciare:

- $f \geq 0 \Rightarrow \int_{\Omega} f \geq 0$
- $|\int_{\Omega} f| \leq \int_{\Omega} |f|$

Teorema della media integrale

Lia f integrabile su Ω e continua, allora $\exists w \in \Omega : \int_{\Omega} f = f(w) |\Omega|$. È ovvio che se $|\Omega|=0$, allora $\int_{\Omega} f = 0$. Se invece $f > 0$ e $|\Omega| > 0$ allora se $f \in C(\Omega)$ e $\int_{\Omega} f = 0$ allora $f = 0$ su Ω . Questa cosa vale per $f \in C(\bar{\Omega})$, basta rimuovere A con $|A|=0$ da causa la discontinuità.

Calcolo degli integrali multipli

Vale il seguente teorema di riduzione per domini semplici: sia $f \in C(\bar{\Omega})$, Ω y -semplice, allora

$$\int_{\Omega} f(x, y) dx dy = \int_a^b \left[\int_{g(x)}^{g_2(x)} f(x, y) dy \right] dx$$

ESEMPIO sia $f(x, y) = x^2 + y$ e Ω il triangolo con vertici $(0,0), (0,1), (1,0)$, ossia $\Omega = \{(x, y) : 0 \leq x \leq 1 \wedge 0 \leq y \leq 1-x\}$. Dunoviamo quindi che: $\int_{\Omega} f = \int_0^1 \left[\int_0^{1-x} (x^2 + y) dy \right] dx = \int_0^1 (x^2 y + \frac{y^2}{2} \Big|_0^{1-x}) dx = \int_0^1 (x^2 - x^3 - \frac{(1-x)^2}{2}) dx = \left[\frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} - \frac{(1-x)^3}{6} \right]_0^1 = \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \frac{1}{6} = \frac{1}{4}$

Cambio di coordinate negli integrali multipli

Lia f integrabile su Ω e sia $T: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ un cambio di coordinate, allora posto $\tilde{\Omega} = \{(u, v) \in I \times J : T(u, v) \in \Omega\}$ vale

$$\int_{\Omega} f(x, y) dx dy = \int_{\tilde{\Omega}} \tilde{f}(u, v) |\det J_T(u, v)| du dv$$

dove $\tilde{f}(u, v) = f(x(u, v), y(u, v))$

Integrali doppi generalizzati

Lia Ω illimitato, consideriamo Ω_K limitato da un valore K e $f(x, y) \geq 0$. L'insieme Ω_K varia $y(x)$ semplice e quindi possiamo scrivere:

$$\lim_{K \rightarrow \infty} \int_{\Omega_K} f(x, y) dx dy = \int_{\Omega} f(x, y) dx dy$$

Se esistono gli integrali generalizzati iterati finiti, allora f è integrabile in senso generalizzato su Ω illimitato

Integrali in \mathbb{R}^3

In \mathbb{R}^3 un insieme può essere, oltre che x o y semplice, anche z semplice. La definizione è analoga:

$\Omega = \{(x, y, z) : (x, y) \in \Omega_1, g_1(x, y) \leq z \leq g_2(x, y)\}$ dove $g_1, g_2 \in C(\Omega_1)$. Se il dominio è z semplice, allora

$$\int_{\Omega} f(x, y, z) dx dy dz = \int_{\Omega_1} \underbrace{\left[\int_{g_1(x, y)}^{g_2(x, y)} f(x, y, z) dz \right]}_{\text{Integrazione in } dz} dx dy \rightarrow \text{Integrazione per "fissi"}$$

Possiamo anche esprimere $\Omega = \{(x, y, z) : a \leq z \leq b \wedge (x, y) \in \Omega_2\}$ e calcolare l'integrale come:

$$\int_{\Omega} f(x, y, z) dx dy dz = \int_a^b \left[\int_{\Omega_2} f(x, y) dx dy \right] dz \rightarrow \text{Integrazione per "strati"}$$

Integrazione in dz

Se esiste $\int_{\Omega} 1 dx dy dz$ finito, allora Ω è misurabile in \mathbb{R}^3 e diciamo $\int_{\Omega} 1 = |\Omega|$ misura o volume di Ω . Le considerazioni sugli insiemi a misura nulla e su altre proprietà rimangono invariate.

Cambio di coordinate in \mathbb{R}^3

Supponiamo di avere $T: A \subseteq \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ con $(x, y, z) = T(u, v, w)$, T invertibile, $T \in C(A)$, $T^{-1} \in C(\bar{A})$ e $|J_T| \neq 0$, allora f è integrabile su Ω se e solo se $\tilde{f} = f \circ T^{-1}$ è integrabile su $\tilde{\Omega}$ dove $\tilde{f}(u, v, w) = f(x(u, v, w), y(u, v, w), z(u, v, w)) = (f \circ T)(u, v, w)$ e $\tilde{\Omega} = \{(u, v, w) \in A : T(u, v, w) \in \Omega\}$ e vale $\int_{\Omega} f = \int_{\tilde{\Omega}} \tilde{f} |\det J_T|$.

Massa baricentro e momento d'inerzia

Consideriamo una lamina piana. Definiamo $\rho(x,y)$ la densità di massa e γ la superficie della lamina. Avremo che la massa e il barioentre saranno:

$$M = \int_{\Omega} \rho(x,y) dx dy \rightarrow M = K \cdot S$$

$$\bar{x} = \frac{1}{M} \int_{\Omega} x \rho(x,y) dx dy$$

$$\bar{y} = \frac{1}{M} \int_{\Omega} y \rho(x,y) dx dy$$

[MEDIA PESATA]

Il momento d'inerzia rispetto ad un asse sarà:

$$I = \int_{\Omega} \delta^2(x,y) \rho(x,y) dx dy \quad \text{con } \delta(x,y) \text{ la distanza di } (x,y) \text{ dall'asse.}$$

\hookrightarrow se $\rho(x,y) = K$ $I = \frac{M}{2} \int_{\Omega} \delta^2(x,y) dx dy$

Consideriamo ora un generico solido da massa e il barioentre sono date da formule analoghe ma adattate a 3 dimensioni. Il momento d'inerzia, invece, se non viene specificato l'asse, si considera calcolato rispetto all'asse z dividendo:

$$I = \int_{\Omega} \delta^2(x,y,z) \rho(x,y,z) dx dy dz$$

CURVE

Definiamo il concetto di curva: diamiamo curva in $\mathbb{R}^2(\mathbb{R}^3)$ la coppia (α, π) dove α è una funzione continua definita su $I \subseteq \mathbb{R}$ a valori in $\mathbb{R}^2(\mathbb{R}^3)$ e π il suo insieme di punti. π viene chiamato sostegno della curva.

Una curva π definita su $[a,b]$ a valori in $\mathbb{R}^2(\mathbb{R}^3)$ si dice chiusa se $\pi(a) = \pi(b)$. Una curva $\pi: I \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^2(\mathbb{R}^3)$ è semplice se $t_1 \neq t_2 \Rightarrow \pi(t_1) \neq \pi(t_2)$ tranne per $\pi(a) = \pi(b)$ nel caso $I = [a,b]$. Una curva in \mathbb{R}^3 è piana se π è contenuta in un piano di \mathbb{R}^3 . Una curva piana, chiusa e semplice è detta curva di Jordan; π divide il piano in cui è contenuta in due regioni connesse, una limitata e una illimitata.

Dia $f: I \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, $f \in C^1(I)$ e $\pi(t) = (t, f(t))$ con $\pi: I \rightarrow \mathbb{R}^2$ e $\pi \in \mathcal{C}(I)$. Chiamiamo (f, π) curva cartesiana.

Definiamo che due curve $\pi_1: [a,b] \rightarrow \mathbb{R}^2$, $\pi: [\alpha, \beta] \rightarrow \mathbb{R}^2$ sono equivalenti se esiste $\varphi: [\alpha, \beta] \rightarrow [a,b]$, $\varphi \in C^1([\alpha, \beta])$, $\varphi'(t) > 0$ $\forall t$ tale che $\pi_1 = \pi_2 \circ \varphi$ cioè $\pi_2(\tau) = \pi_1(\varphi(\tau))$ con $\tau \in [\alpha, \beta]$. Definiamo due curve π_1, π_2 opposte se esiste $\varphi \in C^1([a, b])$, $\varphi'(t) < 0$ tale che $\pi_2 = \pi_1 \circ \varphi$. Esiste un metodo per scrivere curve opposte di qualsiasi curva: $\pi(t) = \begin{cases} x(b-a-t) \\ y(b-a-t) \end{cases}$

Dato (f, π) , $\pi: I \rightarrow \mathbb{R}^2(\mathbb{R}^3)$ diammo che la curva è regolare se $\pi \in C^1(I)$ e $\pi'(t) \neq 0 \quad \forall t \in I$. Se (f, π) è regolare, il vettore $\pi'(t)$ viene chiamato vettore tangente in t ; analogamente $T(t) = \frac{\pi'(t)}{\|\pi'(t)\|}$ viene chiamato vettore tangente. La retta $\ell(t) = \pi(t_0) + t T(t_0)$ è la retta tangente alla curva in t_0 . Una curva regolare (o opposta) a una curva regolare è anch'essa regolare.

Le curve possono essere composte da più tratti indipendentemente: sia $\pi \in C(I)$ non regolare, se $\exists t_0 = a < t_1 < t_2 < \dots < t_n = b$ tali che $\pi_j(t) = \pi_{j-1}[t_{j-1}, t_j](t)$, $j = 1, \dots, n$ π_j è regolare su $I_j = [t_{j-1}, t_j]$ allora possiamo dire che π è regolare a tratti.

Curva raffigurabile

Consideriamo (f, π) con $\pi: [a,b] \rightarrow \mathbb{R}^2$. Suddividiola in $a = t_0 < \dots < t_n = b$: $t_3 - t_2 = \frac{b-a}{n}$. Questa è chiamata poligonale di una curva. Più filtri è la partizione, meglio la poligonale approssima la curva.

Se esiste finito $\limsup l(P_n)$ dove $l(P_n)$ è la lunghezza di una poligonale con i vertici su π sostegno della curva, P_n congiungente $\pi(a)$ con $\pi(b)$, dico che π è raffigurabile col la lunghezza Δ .

Dia (f, π) , $\pi: [a,b] \rightarrow \mathbb{R}^2$ una curva regolare, allora (f, π) è raffigurabile e la sua lunghezza è data da:

$$l = \int_a^b \| \underline{x}'(t) \| dt$$

Ogni punto t è caratterizzato dalla lunghezza dell'arco $[a, t]$. Possiamo definire la funzione:

$$s(t) = \int_a^t \| \underline{x}'(\tau) \| d\tau, \quad s: [a, b] \rightarrow [0, l]$$

chiamata curva curvilinea. La funzione $s(t)$ è una funzione integrale e quindi si ha $s'(t) = \| \underline{x}'(t) \| > 0$. Essa è anche invertibile:

$$t = \Psi(s), \quad \Psi: [0, l] \rightarrow [a, b], \quad \Psi'(s) > 0$$

$$\hookrightarrow \underline{x}(s) = \underline{x}(\Psi(s)) = \underline{x}(t(s))$$

Questa è una parametrizzazione equivalente. Se la dividiamo ottieniamo:

$$\underline{x}'(s) = (\underline{x}(t(s)))' = \frac{d \underline{x}}{dt} \cdot \frac{dt}{ds} = \| \underline{x}'(t(s)) \| \cdot T(t(s)) \cdot \frac{1}{\| \underline{x}'(t(s)) \|} = T(t(s))$$

Curve in forma polare

Le curve date, data $\rho = f(\theta)$, ne ha $\underline{x}(\theta) = \begin{pmatrix} f(\theta) \cos \theta \\ f(\theta) \sin \theta \end{pmatrix}$.

La curva è chiusa se $f(\theta_1) = f(\theta_2)$ ($\theta: [\theta_1, \theta_2] \rightarrow \mathbb{R}^2$) e quindi $\theta_2 = \theta_1 + 2k\pi$. Studiamo la derivata di una curva polare:

$$\underline{x}'(\theta) = \begin{cases} \rho'(\theta) \cos \theta - \rho(\theta) \sin \theta \\ \rho'(\theta) \sin \theta + \rho(\theta) \cos \theta \end{cases}, \quad \| \underline{x}'(\theta) \| = \sqrt{\rho'^2(\theta) + \rho^2(\theta)}$$

Possiamo dire che essa è regolare se $f(\theta) \in C^1(I)$ e $\rho(\theta) \neq 0 \wedge \rho'(\theta) \neq 0$

Integrale di f rispetto all'ascissa curvilinea

Supponiamo di avere (γ, s) regolare a tratti e $f: A \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ con $\gamma \in A$ e $f \in C(A)$. L'integrale

$$\int_a^b f(\underline{x}(s)) \| \underline{x}'(s) \| ds$$

è l'integrale di f su γ rispetto all'ascissa curvilinea soli indicato con $\int_s f ds$

TEOREMA L'integrale $\int_s f ds$ è invariante al passaggio a curve equivalenti e opposte

DIMOSTRAZIONE Sia $\gamma_2 = \gamma_1 \circ \Psi$ con $\Psi: [a, b] \rightarrow [a, b]$ e $\Psi \in C^1([a, b])$ e $\Psi'(t) \neq 0$. Consideriamo $(\gamma_2, s_2): \int_{(\gamma_2, s_2)} f ds = \int_a^b f(\underline{x}_2(s)) \| \underline{x}'_2(s) \| ds$

da $\Psi' \circ 0: \int_{(\gamma_2, s_2)} f ds = \int_a^b f(\underline{x}_1(\Psi(\tau))) \| \underline{x}'_1(\Psi(\tau)) \| \Psi'(\tau) d\tau = \int_a^b f(\underline{x}_1(\tau)) \| \underline{x}'_1(\tau) \| d\tau = \int_{(\gamma_1, s_1)} f ds$ → Caso curva equivalente

da $\Psi' \circ 0: \int_{(\gamma_2, s_2)} f ds = \int_b^a f(\underline{x}_1(\Psi(\tau))) \| \underline{x}'_1(\Psi(\tau)) \| \Psi'(\tau) d\tau = \int_b^a f(\underline{x}_1(\tau)) \| \underline{x}'_1(\tau) \| (-\Psi'(\tau)) d\tau = \int_a^b f(\underline{x}_1(\tau)) \| \underline{x}'_1(\tau) \| d\tau = \int_{(\gamma_1, s_1)} f ds$ → Caso curva opposta

SERIE

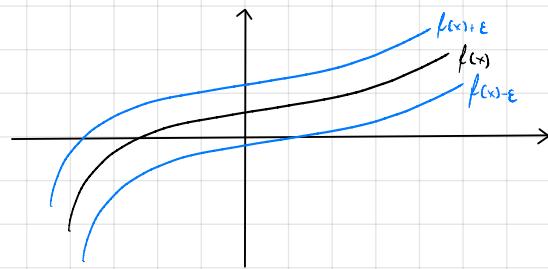
Successioni e serie di funzioni

data una funzione $f_n: I \rightarrow \mathbb{R}$. Consideriamo la successione $\{f_n\}$ $\forall x \in I$, $\{f_n(x)\}$ è una successione numerica. Analogamente $\sum_{n=0}^{\infty} f_n(x)$ è una serie numerica. Possiamo esprimere il concetto di limite: la successione $\{f_n\}$ converge puntualmente su I se $\{f_n(x)\}$ converge $\forall x \in I$. Analogamente per le serie: la serie $\sum_{n=0}^{\infty} f_n$ converge puntualmente se $\sum_{n=0}^{\infty} f_n(x)$ converge $\forall x \in I$

Se $\{f_n\}$ converge puntualmente, la funzione $f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$ viene detta funzione limite di $\{f_n\}$, analogamente $f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} f_n(x)$ è detta funzione somma.

Il limite puntuale di una successione di funzioni non mantiene le proprietà né di continuità, né di differenziabilità né di integrabilità delle singole funzioni della successione.

Diciamo che $\{f_n\}$ converge uniformemente ad f su I se $\forall \varepsilon > 0 \exists n_0 = n_0(\varepsilon)$: $\forall n > n_0 \sup_{x \in I} |f_n(x) - f(x)| < \varepsilon$. La convergenza uniforme implica quella puntuale.



Dato $\{f_n\}$ con $f_n: A \rightarrow \mathbb{R}$, dici che la serie $\sum_{n=0}^{\infty} f_n$ converge totalmente su A se esiste $\{a_n\}, a_n \in \mathbb{R}$ tali che $\sup_{x \in A} |f_n(x)| \leq a_n \wedge \sum_{n=0}^{\infty} a_n$ convergono. La convergenza totale implica la convergenza assoluta e la convergenza uniforme delle somme parziali.

Continuità della funzione somma di una serie

TEOREMA Sia $\{f_n\}$ una successione di funzioni, $f_n \in C(I)$. Se la $\sum f_n$ converge totalmente allora la funzione f somma della serie è continua su I .

Esiste l'analogo che afferma $f_n \in C(I) \Rightarrow f = \lim f_n$, $f \in C(I)$ se $\{f_n\}$ converge uniformemente.

Derivabilità termine a termine

TEOREMA Dato $\{f_n\}$, f_n derivabili su I . Se $\sum f_n$ converge almeno in un punto $x_0 \in I$ (\circ converge su I) e $\sum f'_n$ converge totalmente su I , allora $\sum f_n$ converge su I e della $f = \sum f_n$, f è derivabile su I e $f' = \sum f'_n$.

Integrabilità termine a termine

TEOREMA Dato $\{f_n\}$, $f_n: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$, $f_n \in R([a, b])$, se $\sum f_n$ converge totalmente su $[a, b]$, allora $f = \sum f_n$, $f \in R([a, b])$ e $\int_a^b f(x) dx = \sum \int_a^b f_n(x) dx$.

DI MOSTRAZIONE Dobbiamo dimostrare che $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n \int_a^b f_k(x) dx = \int_a^b \sum_{k=0}^{\infty} f_k(x) dx$ cioè che $\forall \varepsilon > 0 \exists n_0 = n_0(\varepsilon)$: $\forall n > n_0 \left| \sum_{k=0}^n \int_a^b f_k(x) dx - \int_a^b \sum_{k=0}^{\infty} f_k(x) dx \right| < \varepsilon$. Supponiamo che $\exists \{c_n\}$: $\forall x \in [a, b] |f_n(x)| \leq c_n$ e $\sum c_n$ converge. Poiché $\sum c_n$ converge, allora $\forall \varepsilon > 0 \exists n_0 = n_0(\varepsilon)$: $\sum_{n=n_0+1}^{\infty} c_n < \frac{\varepsilon}{b-a}$.

Poniamo, allora, scrivere:

$$\begin{aligned} \left| \sum_{k=0}^n \int_a^b f_k(x) dx - \int_a^b \sum_{k=0}^{\infty} f_k(x) dx \right| &= \left| \sum_{k=0}^n \int_a^b f_k(x) dx - \int_a^b \left(\sum_{k=0}^n f_k(x) + \sum_{k=n+1}^{\infty} f_k(x) \right) dx \right| = \left| \sum_{k=0}^n \int_a^b f_k(x) dx - \int_a^b \sum_{k=n+1}^{\infty} f_k(x) dx - \int_a^b \sum_{k=0}^n f_k(x) dx \right| = \\ &= \left| \int_a^b \sum_{k=0}^n f_k(x) dx \right| \leq \int_a^b \left| \sum_{k=0}^n f_k(x) \right| dx \leq \int_a^b \sum_{k=0}^n |f_k(x)| dx \leq \int_a^b \sum_{k=0}^n c_n dx \leq \int_a^b c_n dx = \int_a^b \frac{\varepsilon}{b-a} = \varepsilon \end{aligned}$$

Nota bene: come si vede dalla dimostrazione, il teorema non vale per intervalli illimitati.

Serie di potenze

Si definisce serie di potenze $\sum a_n(x-x_0)^n$ con x_0 il centro della serie e a_n i coefficienti della serie. Se singole funzioni f_n sono continue, derivabili e integrabili. Nel campo complesso la serie sarà $\sum a_n(z-z_0)^n$ con $a_n \in \mathbb{C}$.

TEOREMA Dato in \mathbb{C} una serie di potenze, se $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = l$ ($\exists \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{|a_{n+1}|}{|a_n|} = l$) allora la serie converge assolutamente $\forall z: |z-z_0| < R = \frac{1}{l}$ e non converge $\forall z: |z-z_0| > R = \frac{1}{l}$. Nella si può dire per $z: |z-z_0| = R$.

DI MOSTRAZIONE Sia $z: |z-z_0| < R$, allora $\sqrt[n]{|a_n(z-z_0)|} = \sqrt[n]{|a_n|} |z-z_0| \rightarrow \frac{1}{l} |z-z_0| < 1$ quindi la serie converge assolutamente per il criterio della radice.

Se $|z-z_0| > R$ allora il limite $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n(z-z_0)|} = |z-z_0| \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} > 1$ quindi $\lim_{n \rightarrow \infty} |a_n| |z-z_0| > 1$, quindi la serie non può convergere perché il teorema generale non dà di 0.

In realtà, anche se $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|}$ si può trovare $R: \sum a_n(z-z_0)^n$ converge assolutamente $\forall z: |z-z_0| < R$ e non converge per alcune $z: |z-z_0| < R$. Il numero R viene chiamato raggio di convergenza. Il teorema prima enunciato continua a valere in \mathbb{R} .

TEOREMA Una serie di potenze $\sum_{n=0}^{\infty} a_n(x-x_0)^n$ converge totalmente su $(x_0-r, x_0+r) \forall r < R$

DIMOSTRAZIONE Sia $x: |x-x_0| < r$, allora $|a_n(x-x_0)^n| \leq |a_n r^n|$, ma $\sum_{n=0}^{\infty} |a_n r^n|$ converge perche $r < R$.

Conseguenza di questo sono che $\forall x \in I(x_0, R) f \in C((x_0-R, x_0+R))$. Analogamente $f_n = a_n(x-x_0)^n \Rightarrow f_n = n a_n(x-x_0)^{n-1}$; $\sum_{n=0}^{\infty} f_n$ è una serie di potenze con lo stesso raggio di convergenza, quindi converge totalmente in $(x_0-r, x_0+r) \forall r < R$. Di conseguenza, per il teorema di derivabilità termine a termine $f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n(x-x_0)^n$ e $f'(x) = \sum_{n=0}^{\infty} n a_n(x-x_0)^{n-1}$. Possiamo ripetere il procedimento su f' , quindi possiamo dire che $f = \sum_{n=0}^{\infty} a_n(x-x_0)^n$, $f \in C^\infty((x_0-r, x_0+r)) \forall r < R$ con diverse calcolabilità termine a termine.

Dall'analisi 1 rimane il problema del calcolo di integrali come $\int_0^1 e^{x^2} dx$ o $\int_0^1 \frac{\sin x}{x} dx$

Serie di Taylor

DATE una funzione infinitamente differenziabile, possiamo scrivere la serie di Taylor $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}(x-x_0)^n$. Abbiamo due domande.

- 1) Questa serie deve convergere?
- 2) Se converge, converge ad f ?

Discussione del primo. Sappiamo che $f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}(x-x_0)^n + \frac{f^{(n+1)}(c)}{(n+1)!}(x-x_0)^{n+1}$ e che $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}(x-x_0)^n$ converge in x se e solo se $\frac{f^{(n+1)}(c)}{(n+1)!}(x-x_0)^{n+1} \rightarrow 0$.

ESEMPIO Consideriamo $f(x) = e^x$ con serie $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} + e^{\frac{x^{n+1}}{(n+1)!}}$. Il resto $R_n = e^{\frac{x^{n+1}}{(n+1)!}}$ sarà minore di $e^{\frac{x^{n+1}}{(n+1)!}}$ che tende a 0. La serie di Taylor $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$ converge a $e^x \forall x \in \mathbb{R}$. Chiamiamo $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$ sviluppo in serie di Taylor di e^x .

Possiamo ora alla seconda domanda. In generale non si può dire che se è possibile scrivere la serie di Taylor di una funzione la somma converga sempre alla funzione. Ciò si può notare nel prossimo esempio.

ESEMPIO Consideriamo $f(x) = \begin{cases} e^{-\frac{1}{x^2}} & x \neq 0 \\ 0 & x=0 \end{cases}$. Si può dimostrare che $f \in C^\infty(\mathbb{R})$ con $f^{(n)}(0)=0$. Di conseguenza la serie di Taylor di f è $\sum_{n=0}^{\infty} 0 = 0$ che è diverso da f .

Consideriamo i due integrali $\int_0^1 e^{x^2} dx$ e $\int_0^1 \frac{\sin x}{x} dx$. Dall'analisi 1 si vede visto che non è possibile scrivere una primitiva per risolvere questi integrali. Usiamo ora la serie di Taylor:

$$\int_0^1 e^{x^2} dx \rightarrow \text{Serie di Taylor di } e^{x^2} \text{ è } \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n}}{n!}, \text{ siccome è una serie di potenze posso usare il teorema di integrazione termine a termine: } \int_0^1 e^{x^2} dx = \int_0^1 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n}}{n!} dx = \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^1 \frac{x^{2n}}{n!} dx = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!(2n+1)}$$

$$\int_0^1 \frac{\sin x}{x} dx \rightarrow \text{Il procedimento è lo stesso: } \int_0^1 \frac{\sin x}{x} dx = \int_0^1 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \frac{x^n}{n!}}{x} dx = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!(2n+1)(2n+1)}$$

Definizione di e^z , $\sin z$ e $\cos z$ in \mathbb{C}

Consideriamo la serie $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!}$, essa ha raggio di convergenza infinito. La stessa serie, in \mathbb{R} , equivale all'esponenziale. Estendiamo l'esponenziale definendo l'esponenziale complesso come $e^z = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!}$. Questa cosa vale per le altre due:

$$\begin{aligned} - \sin z &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \frac{z^{2n+1}}{(2n+1)!}}{} \\ - \cos z &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \frac{z^{2n}}{2n!}}{} \end{aligned}$$

Oltre le peculiarità delle funzioni sono che in \mathbb{C} e^z è periodica mentre $\sin z$ e $\cos z$ sono illimitate.

Serie di Fourier

Chiamiamo polinomio trigonometrico $P_n(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n (a_k \cos(kx) + b_k \sin(kx))$. Esso sarà 2π -periodico. Ogni elemento $a_k \cos(kx) + b_k \sin(kx)$ è dilla armonica. L'armonica con $k=1$ è detta armonica fondamentale. Ogni armonica può essere riscritta sotto forma di:

$$a_k \cos(kx) + b_k \sin(kx) = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \left(\frac{a_k}{\sqrt{a_k^2 + b_k^2}} \cos(kx) + \frac{b_k}{\sqrt{a_k^2 + b_k^2}} \sin(kx) \right) = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \left(\sin \theta_k \cos(kx) + \cos \theta_k \sin(kx) \right) =$$

\downarrow ampiezza \downarrow fase

Chiamiamo serie trigonometrica $\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)]$. Dove converge questa serie? Possiamo dire che che se $\sum_{n=1}^{\infty} |a_n|$ e $\sum_{n=1}^{\infty} |b_n|$ convergono allora la serie trigonometrica converge totalmente. Come condizione necessaria di convergenza abbiamo $a_n, b_n \rightarrow 0$. Di condizioni sufficienti, invece, abbiamo: se $\{a_n\} \downarrow 0$ allora $\sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nx)$ ($\sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(nx)$) converge su $(0, 2\pi)$ mentre $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n a_n \cos(nx)$ ($\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n a_n \sin(nx)$) converge su $(0, \pi) \cup (\pi, 2\pi)$.

Consideriamo lo spazio vettoriale $V = \{f: 2\pi\text{-periodica, integrabile su } (-\pi, \pi)\}$; date $f, g \in V$ definiamo il prodotto interno come $\langle f, g \rangle = \int_{-\pi}^{\pi} f(x)g(x)dx$. Consideriamo $V_n = \text{span}\{1, \sin x, \cos x, \dots, \sin nx, \cos nx\}$, esso è uno spazio di dimensione finita $2n+1$ e non è altro se non lo spazio dei polinomi trigonometrici. Possiamo dimostrare che $\int_{-\pi}^{\pi} \sin mx \cos nx dx = 0$ ($m \neq n$), $\int_{-\pi}^{\pi} \sin^2 nx dx = \int_{-\pi}^{\pi} \cos^2 nx dx = \pi$ e $\int_{-\pi}^{\pi} 1 dx = 2\pi$, quindi $\left\{\frac{1}{\sqrt{2\pi}}, \frac{\sin x}{\sqrt{\pi}}, \frac{\cos x}{\sqrt{\pi}}, \dots, \frac{\sin nx}{\sqrt{\pi}}, \frac{\cos nx}{\sqrt{\pi}}\right\}$ è una base ortonormale. Di conseguenza $\left\{\frac{1}{\sqrt{2\pi}}, \frac{\cos x}{\sqrt{\pi}}, \frac{\sin x}{\sqrt{\pi}}, \dots, \frac{\sin nx}{\sqrt{\pi}}, \frac{\cos nx}{\sqrt{\pi}}\right\}$ è una base ortonormale. Allora per $f \in V$, la sua proiezione su V_n sarà $\frac{a_0}{2} + \sum_{k=0}^n [a_k \cos kx + b_k \sin kx]$ così definito:

$$\begin{aligned} z_K &= \langle f, \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \rangle \frac{1}{\sqrt{2\pi}} + \langle f, \frac{\cos x}{\sqrt{\pi}} \rangle \frac{\cos x}{\sqrt{\pi}} + \langle f, \frac{\sin x}{\sqrt{\pi}} \rangle \frac{\sin x}{\sqrt{\pi}} + \dots + \langle f, \frac{\cos Kx}{\sqrt{\pi}} \rangle \frac{\cos Kx}{\sqrt{\pi}} + \langle f, \frac{\sin Kx}{\sqrt{\pi}} \rangle \frac{\sin Kx}{\sqrt{\pi}} + \dots + \\ &\quad + \langle f, \frac{\cos nx}{\sqrt{\pi}} \rangle \frac{\cos nx}{\sqrt{\pi}} + \langle f, \frac{\sin nx}{\sqrt{\pi}} \rangle \frac{\sin nx}{\sqrt{\pi}} \end{aligned}$$

↳ dunque $K\text{-esimo: } a_K \cos Kx + b_K \sin Kx \text{ con } \begin{cases} a_K = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos Kx dx \\ b_K = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin Kx dx \end{cases}$ coefficienti di Fourier

$$\text{poiché } a_0 \text{ sarebbe diverso dagli altri chiamiamo } \frac{a_0}{2} = a_0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} = \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} dx \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx$$

Il polinomio $P_n(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n [a_k \cos kx + b_k \sin kx]$ con $a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos kx dx$, $b_k = \int_{-\pi}^{\pi} b_k \sin kx dx$ è detto polinomio di Fourier.

Dato $f \in V$, $\forall y \in V_n = \left\{ \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n [a_k \cos kx + b_k \sin kx] \right\}$, allora si ha che $\|f - S_n(f)\| \leq \|f - y\|$ dove $S_n(f)$ è il polinomio di Fourier corrispondente a f .

Per ogni $f \in V$, presi a_k, b_k coefficienti di Fourier definiamo $\frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos kx + b_k \sin kx]$ serie di Fourier di f .

TEOREMA Dato $f \in V$ e dati a_k, b_k i suoi coefficienti di Fourier, valgono le seguenti proprietà:

- 1) $\|S_n(f)\|^2 = \pi \left(\frac{a_0^2}{2} + \sum_{k=1}^n a_k^2 + b_k^2 \right)$
- 2) $\|S_n(f)\| \leq \|f(y)\|$ disegualanza di Bessel
- 3) $\sum_{k=0}^{\infty} (a_k^2 + b_k^2)$ converge
- 4) $a_k, b_k \rightarrow 0$ sempre quadratico modo
- 5) $\|f - S_n(f)\| \leq \|f - y\| \quad \forall y \in V_n$
- 6) $\|f - S_n(f)\|^2 = \|f\|^2 - \|S_n(f)\|^2 = \|f\|^2 - \pi \left(\frac{a_0^2}{2} + \sum_{k=1}^n a_k^2 + b_k^2 \right)$

DIMOSTRAZIONE

- 1) $\|S_n(f)\|^2 = \left\langle \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n [a_k \cos kx + b_k \sin kx], \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n [a_k \cos kx + b_k \sin kx] \right\rangle = \int_{-\pi}^{\pi} \left\{ \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n [a_k \cos kx + b_k \sin kx] \right\} \left\{ \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n [a_k \cos kx + b_k \sin kx] \right\} dx =$

per l'ortogonalità abbiamo che il prodotto è non nullo solo per $n=m$ e quindi:

$$\int_{-\pi}^{\pi} \left\{ \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n [a_k \cos kx + b_k \sin kx] \right\} \left\{ \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^m [a_k \cos kx + b_k \sin kx] \right\} dx = \frac{a_0^2}{4} 2\pi + \pi \sum_{k=1}^n a_k^2 + b_k^2$$

2) Deriva dal fatto che la norma della proiezione di un vettore è sempre minore della norma dello stesso vettore.

- 3) $\sum_{k=1}^{\infty} (a_k^2 + b_k^2) \leq \frac{\|f\|^2}{\pi} \cdot \frac{a_0^2}{2} \quad \forall n \Rightarrow$ la serie converge

4) deriva da 3: termine generale di una serie convergente tende a 0

5) analogo al precedente a dimensione finita

6) È sostanzialmente il teorema di Pitagora generalizzato a dimensione infinita. Abbiamo che

$$\|f - S_n(f)\|^2 = \int_{-\pi}^{\pi} (f - S_n(f))^2 dx = \int_{-\pi}^{\pi} f^2 dx - 2 \int_{-\pi}^{\pi} f(x) S_n(f)(x) dx + \int_{-\pi}^{\pi} S_n(f)^2 dx = \|f(x)\|^2 - \dots + \|S_n(f)\|^2$$

Concentriamoci sull'integrale cubico:

$$\int_{-\pi}^{\pi} f(x) \left(\frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n [a_k \cos kx + b_k \sin kx] \right) dx = \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \frac{a_0}{2} dx + \sum_{k=1}^n \left(a_k \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos kx dx + b_k \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin kx dx \right) = \pi \left(\frac{a_0^2}{2} + \sum_{k=1}^n a_k^2 + b_k^2 \right) = \|S_n(f)\|^2$$

Quindi assorbendo tutto: $\|f(x)\|^2 - 2\|S_n(f)\|^2 + \|S_n(f)\|^2 = \|f(x)\|^2 - \|S_n(f)\|^2$

Come converge la serie di Fourier? Visto che abbiamo accennato la media quadratica vediamo la convergenza in media quadratica.

TEOREMA Lia $f \in V$ (f 2π -periodica), integrabile su $[-\pi, \pi]$ allora $\lim_{n \rightarrow \infty} \|f - s_n(f)\| = 0$, cioè la successione $\{s_n(f)\}$ dei polinomi di Fourier di f converge ad f in media quadratica. Inoltre, facendo tendere a $n \rightarrow \infty$ si ha $\|f\|^2 = \pi \left(\frac{a_0^2}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k^2 + b_k^2 \right)$ (uguaglianza di Parseval). Dovremo $f(x) \sim \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos kx + b_k \sin kx$.

Grazie all'equazione di Parseval possiamo dire che:

$$a_k, b_k = 0 \quad \forall k \Rightarrow \int_{-\pi}^{\pi} f(x)^2 dx = 0 \rightarrow f = 0 \\ \rightarrow f = 0 \text{ se non per un insieme di misura nulla}$$

Quindi se f, g se le due funzioni hanno coefficienti coincidenti allora $f = g$ tranne per $x \in A$, $|A|=0$. Nota che la convergenza in media quadratica non implica la convergenza puntuale ad f .

Vediamo ora la convergenza puntuale. Diciamo che f è regolare a tratti su $[-\pi, \pi]$ se f è continua a tratti se valgono:

- esiste un numero finito di punti x_1, \dots, x_n con $-\pi < x_1 < \dots < x_n < \pi$ tale che $f \in C^1([x_i, x_{i+1}])$, $i=1, \dots, n$
- nei punti x_1, \dots, x_n esistono finiti i limiti destro e sinistro
- nei punti x_1, \dots, x_n esistono finite le derivate destre e sinistre

TEOREMA Lia $f \in V$, f regolare a tratti su $[-\pi, \pi]$, allora $\frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos kx + b_k \sin kx$, serie di Fourier di f , converge in ogni punto x_0 di $(-\pi, \pi)$ a:

$$\frac{\lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) + \lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x)}{2}$$

In particolare converge a $f(x_0)$ se f è continua in x_0 , converge a $f(-\pi)$ e a $f(\pi)$ se $f(-\pi) = f(\pi)$.

Se f è continua a tratti, chiamiamo funzione regolarizzata di f la funzione definita da

$$\hat{f}(x) = \frac{f(x^-) + f(x^+)}{2} \quad \text{con } f(x^\pm) = \lim_{h \rightarrow 0} f(x \pm h)$$

Vale anche il seguente teorema:

TEOREMA Lia $f \in V$, monotonica a tratti e soddisfi le ipotesi sulle derivate di una funzione regolare a tratti. Allora la serie di Fourier di f converge a f regolarizzata.

La convergenza della serie delle derivate è "più difficile" di quella della funzione.

TEOREMA Lia $f: [-\pi, \pi] \rightarrow \mathbb{R}$, $f \in C^1([- \pi, \pi])$, f regolare a tratti e $f(-\pi) = f(\pi)$ allora f è derivabile termine a termine su $(-\pi, \pi)$. Se $f'_+(-\pi) = f'_-(\pi)$ allora la funzione è derivabile termine a termine su \mathbb{R} .

TEOREMA Lia f 2π -periodica, continua a tratti su $[-\pi, \pi]$, allora $\forall [a, b] \subseteq (-\pi, \pi)$ f è integrabile termine a termine su (a, b) .