

# Appunti di Analisi Matematica 2

**Federico Cerutti**  
**Mauro Conte**

Dal corso del professor  
*Rinaldo M. Colombo*



Università degli Studi di Brescia

Ultimo aggiornamento: 30 marzo 2020

*Le sezioni di questo documento scritte in testo verde non son state trattate a lezione e son state riportate dal libro per completezza.*

Quest'opera è distribuita con licenza [Creative Commons](#) “Attribuzione – Non commerciale – Condividi allo stesso modo 4.0 Internazionale”.



# Indice

<b>1</b>	<b>Spazi Metrici</b>	<b>1</b>
1	Preliminari . . . . .	1
2	Successioni e Completezza . . . . .	6
2.1	Insiemi Compatti . . . . .	7
3	Limiti e Continuità . . . . .	7
3.1	Uniforme Continuità . . . . .	8
3.2	Lipschitzianità . . . . .	8
4	Il Teorema delle Contrazioni . . . . .	9
5	Funzioni a Valori in $\mathbb{R}$ . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Calcolo Differenziale</b>	<b>11</b>
6	Preliminari . . . . .	11
7	Derivate Parziali e Direzionali . . . . .	11
8	Derivata Totale . . . . .	12
8.1	Regole di Derivazione . . . . .	14
8.2	La Formula degli Accrescimenti Finiti . . . . .	15
9	Derivate Seconde . . . . .	16
9.1	Il Lemma di Schwarz . . . . .	17
9.2	Sviluppo in Serie di Taylor al II Ordine . . . . .	18
9.3	Derivate di Ordine Superiore . . . . .	18
10	Il Teorema della funzione Implicita . . . . .	18
10.1	Il Teorema della funzione Inversa . . . . .	23
11	Massimi e Minimi Liberi . . . . .	23
11.1	Condizioni Necessarie . . . . .	24
11.2	Condizioni Sufficienti . . . . .	26
11.3	Il Significato Geometrico del Gradiente $n=2$ $m=1$ . . . . .	26
12	Massimi e Minimi Vincolati . . . . .	27
13	Il caso $n = 2, m = 1$ . . . . .	29
14	Derivate e Integrali . . . . .	29
15	Funzioni a Valori in $\mathbb{C}$ . . . . .	29
<b>3</b>	<b>Integrali Doppi</b>	<b>31</b>
16	Regole di Calcolo . . . . .	31
17	Cambiamento di Variabili . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Successioni e Serie di Funzioni</b>	<b>33</b>
18	Preliminari . . . . .	33
19	Tipi Di Convergenza . . . . .	33
19.1	Convergenza Puntuale . . . . .	33
19.2	Convergenza Uniforme . . . . .	36
20	Serie di Funzioni Particolari . . . . .	41
20.1	Serie di Potenze . . . . .	41
20.2	Serie di Taylor . . . . .	44

20.3	Serie di Fourier . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Equazioni Differenziali</b>	<b>59</b>
21	Preliminari . . . . .	59
22	Teoria Locale . . . . .	63
22.1	Esistenza e Unicit� . . . . .	64
22.2	Dipendenza Continua . . . . .	71
23	Teoria Globale . . . . .	76
23.1	Il Caso Lipschitziano . . . . .	77
23.2	Il Caso Sublineare . . . . .	79
24	Equazioni Autonome . . . . .	82
25	Equazioni Differenziali Lineari . . . . .	84
26	Equazioni Lineari a Coefficienti Costanti . . . . .	87
27	Esempi . . . . .	89
27.1	La Legge di Malthus . . . . .	89
<b>6</b>	<b>Calcolo delle Variazioni</b>	<b>91</b>
28	Preliminari . . . . .	91
29	L'Equazione di Eulero . . . . .	92
<b>I</b>	<b>Temi Esame</b>	<b>95</b>
<b>7</b>	<b>T.E. 2012/2013 scritto n.1</b>	<b>97</b>
30	Esercizio . . . . .	97
31	Esercizio . . . . .	97

# Capitolo 1

## Spazi Metrici

### 1 Preliminari

**Definizione 1.1** (Spazio Vettoriale)

Siano  $K$  un **campo** e  $V$  un **insieme**. Si dice che **Spazio Vettoriale** sul campo  $K$  se sono definite due operazioni:

1. **Somma**, operazione interna binaria
2. **Prodotto per scalari** operazione esterna

*Nota.* Questa definizione è stata riportata per ricordare il concetto, si consiglia la consultazione di un libro di Algebra Lineare per una definizione più precisa.

**Definizione 1.2** (Spazio Metrico)

Si dice Spazio Metrico  $(X, d)$  un insieme  $X$  non vuoto in cui sia definita una **distanza** (o **metrica**), vale a dire una funzione  $d : X \times X \mapsto \mathbb{R}$  con le seguenti proprietà:

1.  $d(x, y) \geq 0 \quad \forall x, y \in X$
2.  $d(x, y) = 0 \quad \forall x, y \in X \iff x = y$
3.  $d(x, y) = d(y, x) \quad \forall x, y \in X \quad (\text{simmetria})$
4.  $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z) \quad \forall x, y, z \in X \quad (\text{disuguaglianza triangolare})$

**Definizione 1.3** (Sottospazio Metrico)

Siano  $S \subseteq X$  e  $d$  metrica su  $X$ . Allora  $d_S = d|_{S \times S}$  è una metrica su  $S$ , cioè la metrica  $d_S$  è la **metrica indotta**, definita come la **restrizione** della metrica  $d$  ai soli elementi di  $S$ .

$(S, d_S)$  è Sottospazio Metrico di  $(X, d)$

Unendo le due definizioni si giunge naturalmente a

**Definizione 1.4** (Spazio Vettoriale Metrico)

Uno Spazio Vettoriale Metrico è uno spazio vettoriale  $V$  su cui è definito un prodotto scalare  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  definito positivo, una **metrica**.

*Nota.* Analogamente si definisce il Sottospazio Vettoriale Metrico

**Proposizione 1.5**

Sia  $(V)$  uno spazio vettoriale metrico sul campo  $K$  e sia  $\emptyset \neq U \subseteq V$ . Il sottoinsieme  $U$  è un sottospazio vettoriale metrico se, e soltanto se, sono verificate le seguenti condizioni:

1.  $\forall \mathbf{u}, \mathbf{u}' \in U \quad \mathbf{u} + \mathbf{u}' \in U$
2.  $\forall \lambda \in K, \forall \mathbf{u} \in U \quad \lambda \cdot \mathbf{u} \in U$

*Dimostrazione.* Non richiesta, analoga a quella per Spazi Vettoriali reperibile in un libro di Algebra Lineare  $\square$

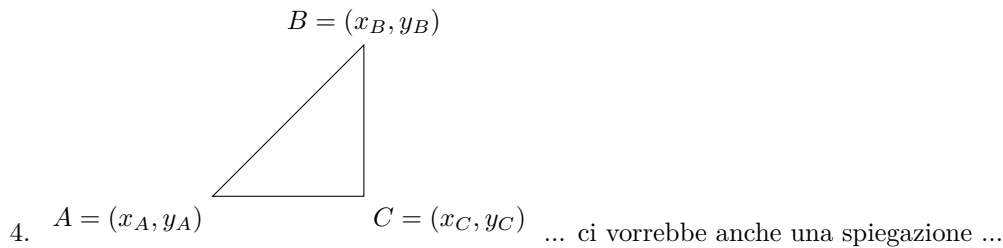
**Esempio 1.6**

$$X = \mathbb{R}^2, \quad d((x_1, y_1), (x_2, y_2)) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

si dimostra che la funzione così definita è una distanza:

1.  $d(x_1, x_2) \geq 0$ , è verificata poiché l'argomento della radice è sempre positivo o al più nullo essendo una somma di quadrati, e la radice mantiene le quantità positive.
2.  $d((x_1, y_1), (x_2, y_2)) = 0 \iff \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} = 0$   
 $\iff (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 = 0 \iff \begin{cases} (x_2 - x_1)^2 = 0 \\ (y_2 - y_1)^2 = 0 \end{cases} \iff \begin{cases} x_2 = x_1 \\ y_2 = y_1 \end{cases} \iff (x_1, y_1) = (x_2, y_2)$
3. invertendo le prime componenti con le seconde, il quadrato non cambia quindi la simmetria è rispettata

$$d((x_1, y_1), (x_2, y_2)) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} = d((x_2, y_2), (x_1, y_1))$$

**Esempio 1.7**

$$X = \mathbb{R}, \quad d(x_1, x_2) = |x_2 - x_1|$$

Le proprietà 1,2,3 sono soddisfatte per le proprietà del modulo.

La proprietà 4 si può dimostrare:

$$d(x_1, x_3) = |x_3 - x_1| \leq |x_3 - x_2| + |x_2 - x_1| = d(x_3, x_2) + d(x_2, x_1)$$

**Esempio 1.8**

$$X = \mathbb{R}^3 \quad d((x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2))$$

Analogo al primo esempio

**Esempio 1.9**

$$X = \mathbb{R}^n$$

$$x = (x_1, \dots, x_n) \quad y = (y_1, \dots, y_n)$$

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

Analogo al primo esempio

**Esempio 1.10**

$$X = \mathbf{C}^0([a, b], \mathbb{R}), a, b \in \mathbb{R}, a < b$$

$$d_\infty = \sup_{x \in [a, b]} |g(x) - f(x)|$$

1.  $X$  contiene infiniti elementi(funzioni)

2.  $d_\infty$  è detta distanza uniforme o distanza della convergenza infinita o distanza della convergenza uniforme



3.

Si verificano le 4 proprietà di distanza:

1. Se  $\sup = \infty$  non va bene poiché l'insieme di arrivo è  $\mathbb{R}$ , applicando il Thm. di Weierstrass, una funzione continua definita su un intervallo  $[a, b]$  ammette massimo e minimo e quindi anche il  $\sup$  ... (le funzioni sono definite su un intervallo chiuso e limitato e sono continue)
2. se e solo se hanno lo stesso dominio e per ogni punto di esso entrambe le funzioni hanno la stessa immagine
3.  $d_\infty(f, g) = \sup_{x \in [a, b]} |f - g| = \sup_{x \in [a, b]} |g - f| = d_\infty(g, f)$
4.  $|h(x) - f(x)| \leq |h(x) - g(x)| + |g(x) - f(x)|$ , applicando il  $\sup$  la disuguaglianza resta vera

#### Osservazione 1.11

Tutto questo è valido finché  $[a, b]$  chiuso e limitato altrimenti non vale più Weierstrass

#### UN CONTROESEMPIO

#### Esempio 1.12

ferrovia

#### Esempio 1.13

Metrica Discreta  $X \neq \emptyset$ ,  $d(x, y) = \begin{cases} 0 & x = y \\ 1 & x \neq y \end{cases}$

1.  $d(x, y) \geq 0$  per definizione
2.  $d(x, y) = 0 \iff x = y$ , per definizione (ragiona sul sse)
3.  $d(x, y) = d(y, x)$  ...per definizione (fai due casi  $x=y$  e l'altro)
4.  $d(x, y) \leq d(y - z) + d(z - x)$

#### Esempio 1.14

$$X = \mathbb{R}^2$$

$$x = (x_1, x_2), y = (y_1, y_2)$$

$$d'(x, y) = |x_1 - y_1 - 1| + |x_2 - y_2 - 2|$$

...

**Esempio 1.15****Esempio 1.16**

$$X = \mathbf{C}^0([0, 1], \mathbb{R})$$

$$d_2 = \int_0^1 |g(x) - f(x)| d(x)$$

**Esempio 1.17**

$$X = \mathbf{C}^0([a, b], \mathbb{R}), a, b \in \mathbb{R}, a < b$$

$$d_2 = \sqrt{\int_a^b [g(x) - f(x)]^2 d(x)}$$

**Proposizione 1.18**

Sia  $(X, d)$  s.m. e  $A \subseteq X$  e  $A \neq \emptyset$ , sia  $d|_A : A \times A \rightarrow \mathbb{R}$   
 $(x, y) \rightarrow d(x, y) \Rightarrow (A, d|_A)$  è uno spazio metrico

*Dimostrazione.* ....

□

**Definizione 1.19**

Un insieme è finito se il numero dei suoi elementi è finito

**Definizione 1.20**

Un insieme è infinito se non è finito

**Definizione 1.21**

Sia  $(X, d)$  s.m.,  $A \subseteq X$ ,  $A \neq \emptyset$  si definisce diametro di  $A$ :

$$diam(A) = \sup_{x, y \in A} d(x, y)$$

**Definizione 1.22**

$A$  è limitato  $\Leftrightarrow diam(A)$  è finito ( $\in \mathbb{R}$ )

**Definizione 1.23**

$A$  è illimitato  $\Leftrightarrow diam(A)$  è infinito ( $= \infty$ )

**Esempio 1.24**

...  
 ...  
 ...  
 ..  
 ....

**Osservazione 1.25**

Ogni insieme finito è limitato e ogni insieme illimitato è infinito. Non valgono i viceversa.

**Esempio 1.26**

....  
 ....  
 ....  
 .....  
 .....  
 ....



**Definizione 1.27** (Norma)

Dato uno spazio vettoriale  $V$  sul campo  $\mathbb{K}$ , si definisce **norma** una funzione  $\|\cdot\| : V \mapsto \mathbb{R}$  con le proprietà:

1.  $\forall x \in V, \quad \|x\| \geq 0$
2.  $\forall x \in V, \quad \|x\| = 0 \iff x = 0$
3.  $\forall x, y \in V, \quad \|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$
4.  $\forall x \in V, \lambda \in \mathbb{K}, \quad \|\lambda x\| = |\lambda| \cdot \|x\|$

**Nota.** La funzione Norma associa dunque ad un vettore di qualsiasi dimensione uno scalare, fornendo (anche) una metrica per ordinare vettori tra loro.

**Definizione 1.28** (Spazio Normato)

Uno spazio normato è uno spazio vettoriale  $V$  sul campo  $\mathbb{K}$  **in cui è definita una norma**.

**Nota.** Nel seguito verranno considerati esclusivamente spazi vettoriali su  $\mathbb{R}$  o su  $\mathbb{C}$ , cioè  $\mathbb{K} = \mathbb{R}$  o  $\mathbb{K} = \mathbb{C}$

$X$  è uno spazio (vettoriale) normato sul campo  $\mathbb{K}$  se:

**Esempio 1.29**

$$X = \mathbb{R} \quad \|x\| = |x|$$

**Esempio 1.30**

$$X = \mathbb{R}^2 \quad \left\| \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \right\| = \sqrt{x^2 + y^2}$$

**Esempio 1.31**

$$X = \mathbb{R}^n \quad x \equiv (x_1, \dots, x_n) \quad \|x\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}$$

**Esempio 1.32**

$$X = \mathbb{C} \quad \|x\| = |x|$$

**Esempio 1.33**

$$X = \mathbf{C}^0([a, b], \mathbb{R}) \quad \|f\| = \sup_{x \in [a, b]} |f|$$

**Proposizione 1.34**

Sia  $X$  uno spazio normato allora  $(X, d)$  è uno spazio metrico con

$$\begin{aligned} d : X \times X &\rightarrow \mathbb{R} \\ (x_1, x_2) &\rightarrow \|x_1 - x_2\| \end{aligned}$$

Inoltre per la distanza così definita valgono le seguenti proprietà:

## 1. INVARIANZA PER TRASLAZIONI

$$\forall x_1, x_2, x_3 \in X \quad d(x_1, x_2) = d(x_1 + x_3, x_2 + x_3)$$

## 2. POSITIVAMENTE OMOGENEA

$$\forall x_1, x_2 \in X, \lambda \in \mathbb{R} \quad d(\lambda x_1, \lambda x_2) = |\lambda| d(x_1, x_2)$$

*Dimostrazione.* Per dimostrare che è uno spazio metrico si dimostra che valgono le proprietà di distanza

1.

2.

3.

4.

□

**Definizione 1.35**

Sia  $(X, d)$  spazio metrico e siano  $x_0 \in X$  e  $r \in \mathbb{R}$ . Si dice sfera aperta di centro  $x_0$  e raggio  $r$  l'insieme:

$$B(x_0, r) = \{x \in X : d(x, x_0) < r\}$$

**Osservazione 1.36**

se  $r = 0 \Rightarrow B(x_0, r) = \emptyset$

se  $r > 0 \Rightarrow x_0 \in B(x_0, r)$

**Esempio 1.37**

In  $\mathbb{R}$  con  $d_E$ ,  $B(x_0, r)$  è un intervallo simmetrico centrato in  $x_0$

**Esempio 1.38**

In  $\mathbb{R}^2$  con  $d_E$ ,  $B(x_0, r)$  è una un cerchio con centro in  $x_0$

**Esempio 1.39**

In  $\mathbb{R}^3$  con  $d_E$ ,  $B(x_0, r)$  è una sfera con centro in  $x_0$

**Esempio 1.40****Definizione 1.41**

Sia  $(X, d)$  spazio metrico, sia  $A \subseteq X$ . Si definisce

$$A \text{ è aperto} \Rightarrow A = \emptyset \quad \text{oppure} \quad A = \overset{\circ}{A}$$

**Definizione 1.42**

Sia  $(X, d)$  spazio metrico, sia  $A \subseteq X$ . Si definisce

$$A \text{ è chiuso} \Rightarrow A = \emptyset \quad \text{oppure} \quad A = \bar{A}$$

**Definizione 1.43**

Siano  $(X, d_1)$  e  $(X, d_2)$  spazi metrici.  $d_1$  e  $d_2$  sono equivalenti  $\Leftrightarrow \exists c, C \in \mathbb{R}, c_1 > 0, c_2 > 0$  t.c:

$$\forall x, y \in X \quad cd_1(x, y) \leq d_2(x, y) \leq Cd_1(x, y)$$

## 2 Successioni e Completezza

**Definizione 2.1****Definizione 2.2****Definizione 2.3****Proposizione 2.4**

Data la successione  $x : \mathbb{N} \mapsto X$  di elementi dello spazio metrico  $(X, d)$  e dato  $x_\infty \in X$ :

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = x_\infty \iff \forall \varepsilon > 0 \quad \exists \nu \in \mathbb{N} : \quad \forall n > \nu \quad d(x_n, x_\infty) < \varepsilon$$

*Dimostrazione.*

□

## 2.1 Insiemi Compatti

### Definizione 2.5 (Insieme Compatto)

Sia  $(X, d)$  uno spazio metrico e sia  $A \subseteq X$ .  $A$  è compatto se e solo se ogni successione di elementi di  $A$  ammette una sottosuccessione avente limite in  $A$ .

**Nota.** Questa è la definizione di **Compattezza per Successioni**, in spazi più generali può essere necessario utilizzare una definizione più debole che, nel caso degli spazi metrici, coincide con la precedente.

### Esercizio 2.6

Sia  $(X, d)$  uno spazio metrico. Siano  $K_1$  e  $K_2$  due sottoinsiemi compatti di  $X$ . Allora  $K_1 \cup K_2$  è compatto

*Soluzione.* Posto  $K = K_1 \cup K_2$ , per definizione di **unione**, ogni elemento di  $K$  è in  $K_1$  o  $K_2$ . Visto che, per ipotesi,  $K_1$  e  $K_2$  sono compatti, sappiamo che ogni successione in uno dei due avrà una sottosuccessione convergente nello stesso insieme. A questo punto possiamo concludere che ogni successione in  $K$  ammetterà una sottosuccessione convergente ad un elemento  $x_\infty \in K_1$  oppure  $x_\infty \in K_2 \implies x_\infty \in K$  ■

## 3 Limiti e Continuità

### Definizione 3.1

Siano  $(X, d_x)$  e  $(Y, d_y)$  spazi metrici,  $A \subseteq X, x_0$  di accumulazione per  $A$ ,  $f : A \rightarrow Y$  una funzione e  $l \in Y$   
 $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l \iff \forall \varepsilon, \exists \delta : \forall x \in A : d_x(x, x_0) < \delta \implies d_y(f(x), l) < \varepsilon$

### Proposizione 3.2

Siano  $(X, d_x)$  e  $(Y, d_y)$  spazi metrici,  $A \subseteq X, x_0$  di accumulazione per  $A$ ,  $f : A \rightarrow Y$  una funzione e  $l' \in Y, l'' \in Y$

### Definizione 3.3 (Funzione Continua)

Siano  $(X, d_X)$  e  $(Y, d_Y)$  spazi metrici e sia  $f : A \rightarrow Y$  con  $A \subseteq X$  e sia  $x_0 \in A$

$$\begin{aligned} f \text{ è continua in } x_0 &\iff \\ \forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta > 0 : \quad \forall x \in A \text{ con } d_X(x, x_0) < \delta &\text{ vale } d_Y(f(x), f(x_0)) < \varepsilon \\ f \text{ è continua in } A &\iff \\ f \text{ è continua in ogni punto di } A \end{aligned}$$

**Nota.** Non andrebbe detto semplicemente  $f$  è continua perché la continuità dipende in modo essenziale dall'insieme di punti su cui la funzione viene considerata. In assenza di ulteriori specificazioni, spesso si sottintende che l'insieme in esame è l'intero dominio della funzione.

**Nota.** Ha senso valutare la continuità di una funzione esclusivamente nell'insieme in cui è definita. Quindi una frase come:

la funzione  $x \mapsto \frac{1}{x}$  è discontinua in 0,

non è (a rigore) sensata. Andrebbe riformulata come:

la funzione  $x \mapsto \frac{1}{x}$  non può essere estesa ad una funzione definita e continua anche in 0.

**Nota.** La continuità di una funzione dipende in modo essenziale anche dalla distanza adottata, tuttavia è prassi sottintendere questa precisazione, soprattutto per funzioni  $\mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}^n$ , se la distanza adottata è quella Euclidea.

### Teorema 3.4 (Teorema generale di Weierstrass)

Siano  $(X, d_X)$  e  $(Y, d_Y)$  spazi metrici e sia  $f : K \rightarrow Y$  con  $K \subseteq X$ .

$$\left. \begin{array}{l} K \text{ compatto} \\ f \text{ continua su } K \end{array} \right\} \implies f(K) \text{ compatto}$$

*Dimostrazione.* Siano le successioni

- $y : \mathbb{N} \rightarrow Y$  tale che  $y_n \in f(K) \forall n \in \mathbb{N}$ , cioè  $\forall n \in \mathbb{N} \exists x_n \in K : f(x_n) = y_n$
- $x : \mathbb{N} \rightarrow X$  tale che  $x_n \in K \forall n \in \mathbb{N}$

**Nota.** Abbiamo una successione che, attraverso la  $f$  (non direttamente: le successioni non sono  $X \mapsto Y$ !), associa indirettamente valori in  $K \subseteq X$  a valori in  $f(K) \subseteq Y$

La successione  $x$  ammette una sottosuccessione  $x_{n_k}$  convergente ad un elemento  $\bar{x} \in K$  dalla [Definizione 2.5 \(Insieme Compatto\)](#), avendo  $K$  compatto per ipotesi, ed essendo  $x$  a valori in  $K$ .

Data la continuità di  $f$  in  $K$ , abbiamo  $y_{n_k} = f(x_{n_k}) \in f(K)$ , ma essendo  $x_{n_k}$  convergente ad  $\bar{x}$ , anche  $y_{n_k}$  converge, verificando così la definizione di spazio Compatto.  $\square$

*Dimostrazione.* (Alternativa)

La successione  $x$  ammette una sottosuccessione  $x_{n_k}$  convergente ad un elemento  $\bar{x} \in K$ , dunque da [Proposizione 2.4](#):

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = x_* \iff \forall \eta > 0 \exists \nu \in \mathbb{N} : \forall n > \nu \quad d(x_n, x_*) < \eta$$

Dalla [Definizione 3.3 \(Funzione Continua\)](#) e sapendo che  $f(x)$  è continua, sappiamo che:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 : \forall x \in K \quad d_X(x, x_*) < \delta \implies d_Y(f(x_n), f(x_*)) < \varepsilon$$

Unisco ora le due definizioni:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \nu \in \mathbb{N} : \forall n > \nu \quad d_Y(f(x_n), f(x_*)) < \varepsilon$$

Che equivale, per come è definita  $y_n$ , a

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} y_n = y_*$$

Cioè la definizione di successione convergente. Ho dunque individuato una sottosuccessione convergente per ogni successione in  $f(K)$ , verificando così la definizione di spazio Compatto.  $\square$

### 3.1 Uniforme Continuità

**Definizione 3.5** (Funzione Uniformemente Continua)

Siano  $(X, d_X)$  e  $(Y, d_Y)$  spazi metrici. Sia  $f : A \mapsto Y$  con  $A \subseteq X$ .

$f$  è **uniformemente continua** in  $A$

$\iff$

$$\forall \epsilon > 0 \exists \delta > 0 \text{ tale che } \forall x, x_0 \in A \text{ con } d_X(x, x_0) < \delta \implies d_Y(f(x), f(x_0)) < \epsilon$$

#### Esercizio 3.6

Confrontare la ?? con la [Definizione 3.5 \(Funzione Uniformemente Continua\)](#)

#### Proposizione 3.7

Siano  $(X, d_X)$  e  $(Y, d_Y)$  spazi metrici. Sia  $f : A \mapsto Y$  con  $A \subseteq X$ . Se  $f$  è **uniformemente continua** in  $A$ , allora  $f$  è **continua** in  $A$ .

*Dimostrazione.* Deriva da [Esercizio 3.6](#)  $\square$

### 3.2 Lipschitzianità

**Definizione 3.8** (Funzione Lipschitziana)

Siano:

- $(X, d_X), (Y, d_Y)$  spazi metrici
- $A \subseteq X$
- $f : A \mapsto Y$

Allora

$f$  è **Lipschitziana**

$\iff$

$$\exists L > 0 : \forall x_1, x_2 \in X, \quad d_Y(f(x_1), f(x_2)) \leq L \cdot d_X(x_1, x_2)$$

## 4 Il Teorema delle Contrazioni

### Definizione 4.1 (Contrazione)

Sia  $(X, d)$  uno spazio metrico. Si dice contrazione una funzione  $T: X \rightarrow X$  soddisfacente a:

$$\exists K \in [0, 1[ \text{ tale che } \forall x', x'' \in X \text{ vale} \quad (4.1)$$

$$d_X(T(x''), T(x')) \leq K \cdot d_X(x'', x'). \quad (4.2)$$

Una contrazione è quindi una funzione con insieme di partenza e di arrivo coincidenti e Lipschitziana con costante di Lipschitz strettamente minore di 1. E generalmente inutile considerare contrazioni definite tra spazi diversi. Data una funzione  $T: X \rightarrow Y$  Lipschitziana, è sempre possibile riscalarla la distanza in uno dei due spazi  $X$  o  $Y$  per ottenere una costante di Lipschitz minore di 1.

**Nota.** D'ora in poi si utilizzerà spesso la notazione  $Tx$  per intendere  $T(x)$

ESEMPI:

1.  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  data da  $f(x) = \frac{x}{2}$ .  $f$  è una contrazione.
2.  $f: [0, 2] \rightarrow [0, 2]$  data da  $f(x) = 1 + \frac{x}{2}$ .  $f$  è una contrazione
3.  $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$  data da  $f(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 \\ 0 & \frac{1}{5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$  è una contrazione

### Proposizione 4.2

Sia  $(X, d)$  uno spazio metrico, siano  $f, g: X \rightarrow X$  due contrazioni in  $X \Rightarrow f \circ g$  è una contrazione

*Dimostrazione.* Sappiamo che

$$\forall x', x'' \in X, d(fx'', fx') \leq K_f d(x'', x').$$

$$\forall x', x'' \in X, d(gx'', gx') \leq K_g d(x'', x').$$

$f \circ g = f(g(x))$ , quindi presi  $x', x'' \in X$  si ha che:

$$d(fg(x''), fg(x')) \leq K_f d(g(x''), g(x')) \leq K_f K_g d(x'', x').$$

□

### Proposizione 4.3

Sia  $f \in C^1(\mathbb{R}^n; \mathbb{R}^n)$ . Se  $\exists k \in [0, 1[$  tale che  $\forall x \in \mathbb{R}^n$  vale  $\|Df(x)\| < k$ , allora  $f$  è una contrazione.

### Teorema 4.4 (Teorema delle Contrazioni)

Sia  $(X, d)$  uno spazio metrico completo in cui è definita una contrazione  $T: X \rightarrow X$ . Allora esiste un unico punto fisso di  $T$  in  $X$ .

*Dimostrazione.* Costruisco una successione di elementi di  $X$  nel seguente modo:

scelgo  $x_0 \in X$ ,

$$x_1 = Tx_0$$

$$x_2 = Tx_1$$

...

$$x_n = Tx_{n-1}$$

La successione  $x_n: n \in \mathbb{N}$  così costruita è una successione di Cauchy. Infatti, presi  $n, m \in \mathbb{N}$  con  $m > n$  si ha:

$$\begin{aligned} d(x_m, x_n) &= d(Tx_{m-1}, Tx_{n-1}) \leq K d(x_{m-1}, x_{n-1}) = \\ &= K d(x_{m-1}, x_{n-1}) = K d(Tx_{m-2}, Tx_{n-2}) \leq K^2 d(x_{m-2}, x_{n-2}) = \\ &= \dots = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \dots = K^n d(x_{m-n}, x_0) \leq \\
&\leq K^n \sum_0^{m-n+1} (d(x_{m-n-i}, x_{m-n-i-1})) = \\
&\leq \sum_0^{m-n+1} (d(Tx_{m-n-i-1}, Tx_{m-n-i-2}))
\end{aligned}$$

per ogni termine di questa sommatoria si può applicare lo stesso ragionamento

$$\begin{aligned}
&\leq K^n \sum_0^{m-n+1} (K^{m-n-2} d(Tx_0, x_0)) = \\
&\leq K^n d(Tx_0, x_0) \sum_0^{m-n+1} K^{m-n-2} = K^n \frac{1 - K^{m-n-1}}{1 - K} d(Tx_0, x_0) \leq \frac{K^n}{1 - K} d(Tx_0, x_0)
\end{aligned}$$

Ho quindi trovato che  $d(x_m, x_n) \leq \frac{K^n}{1-K} d(Tx_0, x_0)$

L'ultima espressione ottenuta può essere resa arbitrariamente piccola (in modulo) pur di prendere  $n$ , e quindi anche  $m$ , sufficientemente elevato. La completezza di  $X$  implica quindi che esiste il limite  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n$ . Sia  $x^*$  questo limite.  $x^*$  è un punto fisso per  $T$ . Infatti, grazie alla continuità di  $T$ :

$$T(x^*) = T \lim_{n \rightarrow +\infty} x_n$$

□

#### Definizione 4.5 (Funzione Iterata)

Data  $F : X \mapsto X$ , si dice funzione iterata  $n$  volte di  $F$  la  $F^n$  che corrisponde all'applicazione  $n$  volte di  $F$  su sè stessa. Formalmente:

$$f^{n+1} = f \circ f^n \quad \forall n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$$

Se  $n = 0$ , per definizione,  $f^0 = \text{Id}_X$  con  $\text{Id}_X$  funzione identità su  $X$

#### Teorema 4.6 (Teorema dell'Iterata Contrazione)

Sia  $(X, d_X)$  uno spazio metrico completo e sia  $T : X \mapsto X : \exists n \in \mathbb{N}, T^n$  **iterata** è contrazione.

Allora  $T$  ammette un unico punto fisso in  $X$

**Nota.** La  $n$  non è univocamente definita e non potrebbe esserlo. Se infatti  $T^n$  è contrazione, allora anche  $T^{2n}, T^{3n}, \dots, T^{\alpha n}$  lo sono.

*Dimostrazione.* Per il [Teorema 4.4 \(Teorema delle Contrazioni\)](#) esiste un unico punto fisso  $x_* \in X$  per  $T^n$ , quindi

$$T^n x_* = x_*$$

applicando  $T$  ad entrambi i membri

$$T(T^n x_*) = T x_*$$

e per la [Definizione 4.5 \(Funzione Iterata\)](#)

$$T(T^n x_*) = T^n(T x_*) = T x_*$$

Dunque  $T x_*$  è punto fisso della  $T^n$ . Avevamo però già trovato che  $x_*$  era punto fisso della  $T^n$  e, per il [Teorema 4.4 \(Teorema delle Contrazioni\)](#), può esistere un unico punto fisso. Ciò permette di concludere che  $T x_* = x_*$  □

## 5 Funzioni a Valori in $\mathbb{R}$

## Capitolo 2

# Calcolo Differenziale

### 6 Preliminari

La base canonica di  $R^n$  è indicata con  $(e_1, \dots, e_i)$ ,  $e_i$  è il vettore di  $R^n$  con tutte le componenti nulle tranne la  $i$ -esima che vale 1.

Un generico vettore  $x$  si può quindi scrivere come combinazione lineare dei vettori di base  $x = \sum_{j=1}^i \alpha_j e_j$ .

Nel caso  $n=2$  è usata la notazione  $(x, y) = xi + yj$

Nel caso  $n=3$  è usata la notazione  $(x, y, z) = xi + yj + zk$

Alcune classi di funzioni  $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  hanno nomi particolari:

- $n = 1, m = 1$ :  $f$  è una funzione reale di una variabile reale;
- $n = 1, m > 1$ :  $f$  è una curva in  $R^m$  (purché sia almeno continua e definita su un intervallo)
- $n > 1, m = 1$ :  $f$  è un campo scalare
- $n > 1, m > 1$ :  $f$  è un campo vettoriale

### 7 Derivate Parziali e Direzionali

#### Definizione 7.1

sia  $f : A \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$  e  $(x_0, y_0) \in \overset{\circ}{A}$ ,  $h, k \in \mathbb{R}$  chiamo derivata parziale rispetto a  $x$  di  $f$  in  $(x_0, y_0)$  la quantità (se esiste finita)

$$\partial_x f(x_0, y_0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + h, y_0) - f(x_0, y_0)}{h}$$

chiamo derivata parziale rispetto a  $y$  di  $f$  in  $(x_0, y_0)$  la quantità (se esiste finita)

$$\partial_y f(x_0, y_0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0, y_0 + k) - f(x_0, y_0)}{h}$$

#### Definizione 7.2

sia  $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  e  $x_0 \in \overset{\circ}{A}$ ,  $i = 1, \dots, n$

$$\partial_i f(x_0) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + te_i) - f(x_0)}{t}$$

dove  $(e_1, \dots, e_n)$  rappresentano la base canonica di  $R^n$

#### Osservazione 7.3

nella prima definizione la derivata è un valore reale mentre nella seconda è un vettore di  $R^m$

**Osservazione 7.4**

le proprietà e le regole di derivazione sono le stesse di Analisi 1

**Definizione 7.5**

sia  $f : A \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$  e  $(x_0, y_0) \in \overset{\circ}{A}$ , sia  $v \in \mathbb{R}^2$  con  $\|v\| = 1$  diciamo derivata nella direzione  $v$  della funzione  $f$  nel punto  $(x_0, y_0)$  il limite (se esiste finito)

$$D_v f(x_0, y_0) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + tv_1, y_0 + tv_2) - f(x_0, y_0)}{t}$$

dove  $v_1, v_2$  sono le componenti di  $v$  ( $v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$ )

**Definizione 7.6**

sia  $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  e  $x_0 \in \overset{\circ}{A}$ , sia  $v \in \mathbb{R}^n$  con  $\|v\| = 1$  diciamo derivata nella direzione  $v$  della funzione  $f$  nel punto  $x_0$  il limite (se esiste finito)

$$D_v f(x_0) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + tv) - f(x_0)}{t}$$

**Proposizione 7.7**

(ANALISI 1): sia  $f : A \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  e  $x_0 \in \overset{\circ}{A}$

$f$  è differenziabile  $\iff \exists m \in \mathbb{R}$  t.c.  $f(x_0 + h) = f(x_0) + mh + o(h)$  per  $h \rightarrow 0 \dots$

...

...

**Esercizio 7.8**

Formulare in modo rigoroso e dimostrare:

1. La somma di funzioni parzialmente derivabili è parzialmente derivabile.
2. La composizione di funzioni parzialmente derivabili è parzialmente derivabile.
3. Prodotto e rapporto, quando definiti, di funzioni parzialmente derivabili sono funzioni parzialmente derivabili.

## 8 Derivata Totale

**Proposizione 8.1**

Siano  $I \in \mathbb{R}$  un intervallo reale e  $f(x)$  una funzione derivabile in  $I$ . Se la  $f'(x)$  è una **funzione limitata** in  $I$ , allora  $f$  è uniformemente continua in  $I$

**Definizione 8.2**

sia  $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  e  $x_0 \in \overset{\circ}{A}$

$f$  è differenziabile in  $x_0 \iff \exists M \in \text{Mat}(m \times n) : f(x_0 + h) = f(x_0) + Mh + o(h)$  per  $h \rightarrow 0$

**Definizione 8.3**

siano  $f, g : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  e  $x_0$  di accumulazione per  $A$

$f = o(g)$  per  $x \rightarrow x_0 \iff \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\|f(x)\|}{\|g(x)\|} = 0$

**Definizione 8.4**

sia  $f : A \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$  e  $(x_0, y_0) \in \overset{\circ}{A}$

$f$  è differenziabile in  $(x_0, y_0) \iff f(x_0 + h, y_0 + k) = f(x_0) + m_1 h + m_2 k + o(\sqrt{h^2 + k^2})$  per  $(h, k) \rightarrow (0, 0)$

**Definizione 8.5**

siano  $f, g : A \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$  e  $(x_0, y_0)$  di accumulazione per  $A$

$f = o(g)$  per  $(x, y) \rightarrow (x_0, y_0) \iff \lim_{(x,y) \rightarrow (x_0,y_0)} \frac{\|f(x,y)\|}{\|g(x,y)\|} = 0$



**Proposizione 8.6**

(Unicità della derivata totale) sia  $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ ,  $x_0 \in \overset{\circ}{A}$ ,  $M_1, M_2 \in \text{Mat}(m \times n)$   
 $M_1$  derivata totale di  $f$  in  $x_0$ ,  
 $M_2$  derivata totale di  $f$  in  $x_0$ ,  
allora  $M_1 = M_2$

*Dimostrazione.* poiché  $M_1$  e  $M_2$  sono derivate totali di  $f$  nel punto  $x_0$ ,

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + M_1 h + o(h) \text{ per } h \rightarrow 0$$

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + M_2 h + o(h) \text{ per } h \rightarrow 0$$

facendo la differenza membro a membro delle precedenti ottengo che  $(M_1 - M_2)h = o(h)$  per  $h \rightarrow 0$

Scelto  $h = te_i$ , dove  $e_i$  è un vettore della base canonica, si ottiene  $(M_1 - M_2)te_i = o(h)$  quindi

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{(M_1 - M_2)te_i}{t\|e_i\|} = \lim_{t \rightarrow 0} (M_1 - M_2)e_i = 0, \text{ poiché } e_i \text{ è un vettore non nullo deve essere } (M_1 - M_2) = 0 \text{ quindi } M_1 = M_2$$

□

**Osservazione 8.7**

L'ultima riga della dimostrazione dice che le applicazioni lineari  $M_1$  e  $M_2$  hanno le stesse immagini sui vettori della base canonica, quindi coincidono.

**Proposizione 8.8**

sia  $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ ,  $x_0 \in \overset{\circ}{A}$   
 $f$  è differenziabile in  $x_0 \Rightarrow f$  è continua in  $x_0$   
**DIMOSTRAZIONE**

..  
..  
..  
..  
..  
..

**Teorema 8.9**

Differenziale Totale sia  $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  e  $x_0 \in \overset{\circ}{A}$ .  
 $\exists \partial_i f(x) \forall i = 1, \dots, n \text{ definite } \forall x$  in un intorno di  $x_0$   
 $\partial_i f$  è continua in  $x_0$   
 $\Rightarrow f$  è differenziabile in  $x_0$

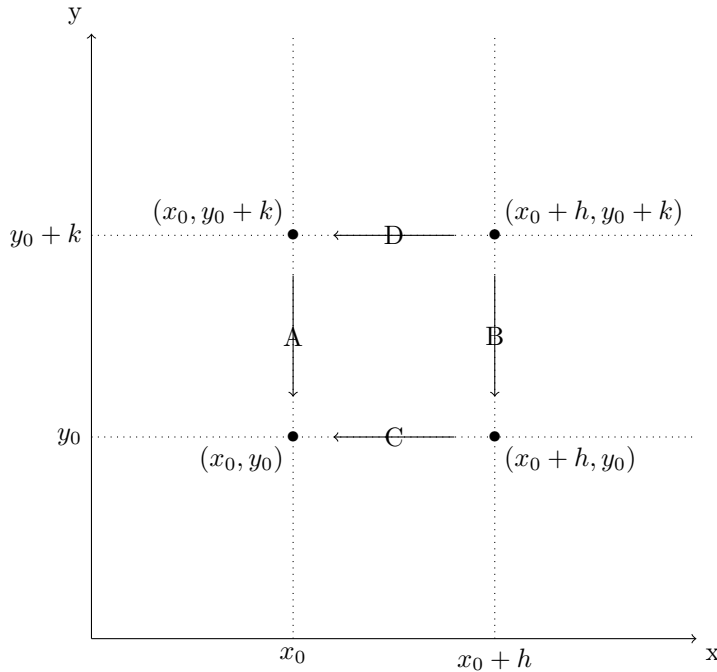
**Teorema 8.10**

Differenziale Totale sia  $f : A \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$  e  $(x_0, y_0) \in \overset{\circ}{A}$ .  
 $\exists \partial_x f(x, y)$  e  $\exists \partial_y f(x, y)$  definite  $\forall x$  in un intorno di  $(x_0, y_0)$   
 $\partial_x f(x, y)$  e  $\partial_y f(x, y)$  continue in  $x_0$   
 $\Rightarrow f$  è differenziabile in  $(x_0, y_0)$

*Dimostrazione.* devo dimostrare che

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

dove  $\nabla f(x_0, y_0) = [\partial_x f(x_0, y_0) \quad \partial_y f(x_0, y_0)]$



devo calcolare lo scarto della funzione tra i punti  $(x_0 + h, y_0 + k)$  e  $(x_0, y_0)$ . Ho a disposizione le derivate parziali che mi danno informazioni lungo le parallele agli assi quindi non muovo lungo la diagonale ma lungo i percorsi D, A e B, C. Il limite ( $\rightarrow$ ) fa zero se il denominatore è zero, allora guardo solo quello.

$$f(x_0 + h, y_0 + k) - f(x_0, y_0) - \partial_x f(x_0, y_0)h - \partial_y f(x_0, y_0)k$$

riscrivo tale quantità seguendo il percorso D, A

$$[f(x_0 + h, y_0 + k) - f(x_0 + h, y_0)] + [f(x_0 + h, y_0) - f(x_0, y_0)] - \partial_x f(x_0, y_0)h - \partial_y f(x_0, y_0)k$$

chiamo  $\varphi(x) = f(x, y_0)$  quindi  $f(x_0 + h, y_0) - f(x_0, y_0) = \varphi(x_0 + h) - \varphi(x_0)$

la funzione  $\varphi$  è una funzione reale di una variabile reale ed in virtù del teorema di Lagrange  $\varphi(x_0 + h) - \varphi(x_0) = \varphi'(x_0 + \beta h)h$  per  $\beta \in ]0, 1[$ , per come definita  $\varphi$  si ha che  $\varphi'(x_0 + \beta h)h = \partial_x f(x_0 + \beta h, y_0)h$

con un ragionamento del tutto analogo si può definire  $\Psi(y) = f(x_0 + h, y)$  e si ha che  $\Psi(y_0 + k) - \Psi(y_0) = \Psi'(y_0 + \alpha k)k = \partial_y f(x_0 + h, y_0 + \alpha k)k$  per  $\alpha \in ]0, 1[$

Quindi

$$\begin{aligned} & [f(x_0 + h, y_0 + k) - f(x_0 + h, y_0)] + [f(x_0 + h, y_0) - f(x_0, y_0)] - \partial_x f(x_0, y_0)h - \partial_y f(x_0, y_0)k = \\ & = [\partial_x f(x_0 + \beta h, y_0)h] + [\partial_y f(x_0 + h, y_0 + \alpha k)k] - \partial_x f(x_0, y_0)h - \partial_y f(x_0, y_0)k = \\ & = [\partial_x f(x_0 + \beta h, y_0)h - \partial_x f(x_0, y_0)h] + [\partial_y f(x_0 + h, y_0 + \alpha k)k - \partial_y f(x_0, y_0)k] \end{aligned}$$

Adesso la riscrivo recuperando il denominatore 'e devo verificare che il limite per  $(h, k) \rightarrow (0, 0)$  tenda a zero.

$$[\partial_x f(x_0 + \beta h, y_0) - \partial_x f(x_0, y_0)] \frac{h}{\sqrt{h^2 + k^2}} + [\partial_y f(x_0 + h, y_0 + \alpha k) - \partial_y f(x_0, y_0)] \frac{k}{\sqrt{h^2 + k^2}}$$

Le derivate parziali sono continue quindi per  $(h, k) \rightarrow (0, 0)$  i numeratori tendono a zero

Inoltre le due frazioni per  $(h, k) \rightarrow (0, 0)$  sono quantità limitate tra  $-1$  e  $1$  quindi si può dire che il limite cercato fa  $0$ .  $\square$

## 8.1 Regole di Derivazione

### Proposizione 8.11

Siano  $f, g : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  e  $x_0 \in \overset{\circ}{A}$

$f$  differenziabile in  $x_0$ ,  $g$  differenziabile in  $x_0$  allora  $f + g$  differenziabile in  $x_0$  e  $D(f + g)(x_0) = Df(x_0) + Dg(x_0)$

*Dimostrazione.*  $f$  è differenziabile, allora  $f(x_0 + h) = f(x_0) + Df(x_0)h + o(h)$  per  $h \rightarrow 0$   
 anche  $g$  lo è, quindi  $g(x_0 + h) = g(x_0) + Dg(x_0)h + o(h)$  per  $h \rightarrow 0$   
 sommando membro a membro si ottiene  $(f + g)(x_0 + h) = (f + g)(x_0) + [Df(x_0) + Dg(x_0)]h + o(h)$  per  $h \rightarrow 0$   
 Questa è la definizione di differenziabilità, allora  $f + g$  è differenziabile e  $D(f + g)(x_0) = Df(x_0) + Dg(x_0)$   $\square$

**Proposizione 8.12**

Sia  $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  e  $x_0 \in \overset{\circ}{A}$  e  $\lambda \in \mathbb{R}$   
 $f$  differenziabile in  $x_0$  allora  $\lambda f$  differenziabile in  $x_0$  e  $D(\lambda f)(x_0) = \lambda Df(x_0)$

*Dimostrazione.*  $f$  è differenziabile, allora  $f(x_0 + h) = f(x_0) + Df(x_0)h + o(h)$  per  $h \rightarrow 0$   
 valuto ora  $(\lambda f)(x_0 + h) = (\lambda f)(x_0) + \lambda Df(x_0)h + o(h)$  per  $h \rightarrow 0$   
 Questa è la definizione di differenziabilità, allora  $\lambda f$  è differenziabile e  $D(\lambda f)(x_0) = \lambda Df(x_0)$   $\square$

**Proposizione 8.13**

Sia  $g : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  e  $x_0 \in \overset{\circ}{A}$   
 Sia  $f : B \subseteq \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^p$  e  $g(x_0) \in \overset{\circ}{B}$   
 $f$  differenziabile in  $g(x_0)$ ,  $g$  differenziabile in  $x_0$  allora  $f \circ g$  differenziabile in  $x_0$  e  $D(f \circ g)(x_0) = Df(g(x_0)) * Dg(x_0)$

*Dimostrazione.*  $g$  è differenziabile in  $x_0$ , allora  $g(x_0 + h) = g(x_0) + Dg(x_0)h + o(h)$  per  $h \rightarrow 0$   
 $f$  è differenziabile in  $g(x_0)$  allora  $g(g(x_0) + k) = f(g(x_0)) + Df(g(x_0))k + o(k)$  per  $k \rightarrow 0$   
 valuto ora

$$\begin{aligned} (f \circ g)(x_0 + h) &= f(g(x_0 + h) + Dg(x_0)h + o(h)) = \\ &= f(g(x_0)) + Df(g(x_0))(Dg(x_0)h + o(h)) + o(Dg(x_0)h + o(h)) = \\ &= (f \circ g)(x_0) + Df(g(x_0))Dg(x_0)h + Df(g(x_0))o(h) + Dg(x_0)o(h) + o(h) \end{aligned}$$

con  $h$  un vettore  $n \times 1$   
 con  $Dg$  una matrice  $m \times n$   
 con  $Df$  una matrice  $p \times m$

da rivedere un pochino ....

Questa è la definizione di differenziabilità, allora  $f \circ g$  è differenziabile e  $D(f \circ g)(x_0) = Df(g(x_0))Dg(x_0)$   $\square$

**Proposizione 8.14**

DERIVATA DEL PRODOTTO

**8.2 La Formula degli Accrescimenti Finiti****Definizione 8.15**

Siano  $x_0, x_1 \in \mathbb{R}^n$ , si dice segmento di estremi  $x_0$  e  $x_1$  l'insieme  $S = tx_1 + (1 - t)x_0 : t \in [0, 1]$

**Teorema 8.16** (Formula degli accrescimenti finiti)

Sia  $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ ,  $x_0, x_1 \in \overset{\circ}{A}$ ,  $S$  il segmento di estremi  $x_0, x_1$ , sia  $f \in \mathbf{C}^1(A, \mathbb{R}^m)$  allora  $\|f(x_1) - f(x_0)\| \leq \sup_{x \in S} \|Df(x)\| \|x_1 - x_0\|$

**Osservazione 8.17**

$\|A\|$  con  $A \in \text{Mat}(n \times m)$ ,  $\|A\| = \sup_{\|x\|=1: x \in \mathbb{R}^n} \|Ax\| = \sup_{x \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}} \frac{\|Ax\|}{\|x\|}$  questa è chiamata norma operativa

*Nota.*

$$\|Ax\| \leq \|A\| \|x\|$$

$$\|AB\| \leq \|A\| \|B\|$$

*Dimostrazione.* sia  $F : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$  che  $t \rightarrow f(tx_1 + (1-t)x_0)$

La funzione  $F$  è una funzione reale di variabile reale, posso quindi applicare il teorema di Lagrange  $F(1) - F(0) = F'(\theta)(1-0)$  quindi  $f(x_1) - f(x_0) = Df(\theta x_1 + (1-\theta)x_0)(x_1 - x_0)$

scelto  $v \in \mathbb{R}^m$  con  $v = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{\|f(x_1) - f(x_0)\|}$  moltiplico entrambi i membri per  $v$  si ottiene  $v(f(x_1) - f(x_0)) = vDf(\theta x_1 + (1-\theta)x_0)(x_1 - x_0)$

... da finire per bene □

### Definizione 8.18

Sia  $C \subseteq \mathbb{R}^n$ ,  $C$  è convesso  $\Leftrightarrow \forall x_0, x_1 \in C$  anche  $S(x_0, x_1) = \{tx_1 + (1-t)x_0 : t \in [0, 1]\} \subseteq C$ ù

### Proposizione 8.19

sia  $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ ,  $A$  è aperto connesso e  $f \in \mathbf{C}^1(A; \mathbb{R}^m)$  e  $Df = 0$  allora  $f$  è costante su  $A$   
..... disegnano e bozza di dimostrazione

### Proposizione 8.20

sia  $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ ,  $A$  è aperto convesso e  $f \in \mathbf{C}^1(A; \mathbb{R}^m)$  e  $Df = 0$  allora  $f$  è costante su  $A$   
..... disegnano e bozza di dimostrazione

### Proposizione 8.21

sia  $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ ,  $A$  è aperto connesso e  $f \in \mathbf{C}^1(A; \mathbb{R}^m)$  e  $Df = 0$  allora  $f$  è costante su  $A$   
..... disegnano e bozza di dimostrazione

### Osservazione 8.22

vale anche sugli insiemi connessi poiché in questi posso congiungere due qualunque punti con una poligonale interamente contenuta nell'insieme e con i lati paralleli agli assi. Attraverso la formula degli accrescimenti finiti posso calcolare la  $f$  nei due estremi passando per tutti gli spigoli della poligonale. (Uno spigolo è un segmento quindi si può applicare il teorema precedente)

si può dire qualcosa sulle funzioni lineari tipo c1, lips ....

## 9 Derivate Seconde

Sia  $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  sappiamo che  $Df(x_0) \in \text{Mat}(m \times n)$ , allora  $Df : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{m \times n}$  cioè la derivata è una funzione a valori in  $\text{Mat}(m \times n)$ , ne segue che  $D(Df) : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{m \times n \times n}$

### Definizione 9.1

sia  $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  derivabile parzialmente in  $x_0$  lungo  $e_i$ . Se la funzione  $\frac{\partial f}{\partial x_i}$  è derivabile parzialmente lungo  $e_j$  in  $x_0$ , la quantità  $\frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial f}{\partial x_i}(x_0)$  è la derivata seconda di  $f$  in  $x_0$  rispetto  $x_i, x_j$  e si indica  $\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}(x_0)$

### Definizione 9.2

sia  $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  e  $x_0 \in \overset{\circ}{A}$   
 $f$  differenziabile due volte in  $x_0 \Leftrightarrow f$  è differenziabile in un intorno di  $x_0$  e  $f$  è differenziabile in  $x_0$

### Osservazione 9.3

con la notazione della definizione precedente,  $f$  è una funzione definita in un intorno di  $x_0$  con valori in  $\text{Mat}(m \times n)$ , spazio identificabile con  $\mathbb{R}^{m \times n}$

### Osservazione 9.4

per una funzione scalare  $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ , la derivata prima è un vettore (il gradiente  $\nabla$  in  $\mathbb{R}^{1 \times n}$ ), la derivata seconda è una matrice in  $\mathbb{R}^{1 \times n \times n}$ , la derivata terza è una super matrice ...

### Definizione 9.5

sia  $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  e  $x_0 \in \overset{\circ}{A}$ ,  $f$  ammette tutte le derivate parziali seconde in  $x_0$ . La matrice di queste derivate

seconde si chiama Matrice Hessiana di  $f$  in  $x_0$

$$H_f(x_0) = D^2 f(x_0) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_2} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_n} \end{bmatrix}$$

ESEMPLI:

...  
...  
...

## 9.1 Il Lemma di Schwarz

### Proposizione 9.6

sia  $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  e  $x_0 \in \overset{\circ}{A}$ . Fino ...

$\exists \partial_{ij}^2 f(x)$  e  $\exists \partial_{ji}^2 f(x)$  in un intorno di  $x_0$  e continue in  $x_0 \Rightarrow \dots$

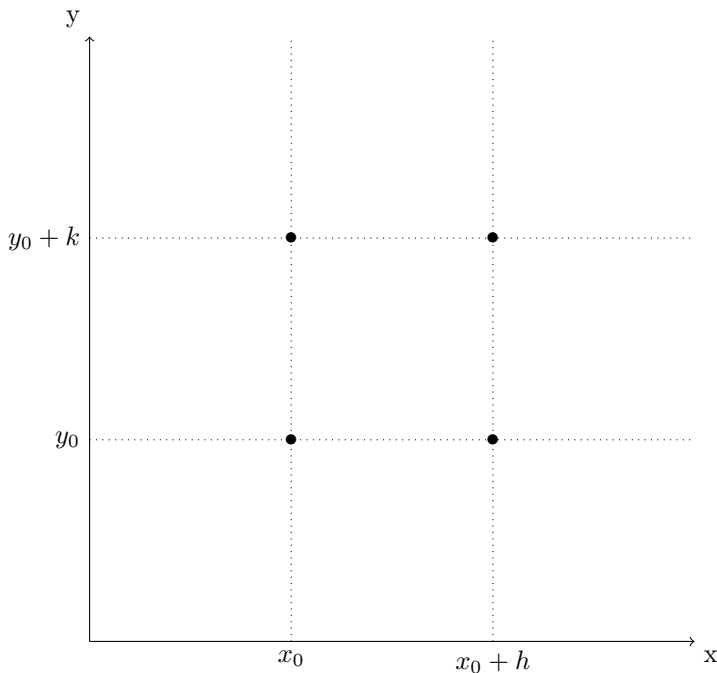
CASO  $n=2$   $m=1$

### Proposizione 9.7

sia  $f : A \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^1$  e  $(x_0, y_0) \in \overset{\circ}{A}$ . ....

$\exists \partial_{xy}^2 f(x, y)$  e  $\exists \partial_{yx}^2 f(x, y)$  in un intorno di  $(x_0, y_0)$  e continue in  $(x_0, y_0) \Rightarrow \dots$

*Dimostrazione.* prendo una quantità  $q = f(x_0 + h, y_0 + k) - f(x_0 + h, y_0) - f(x_0, y_0 + k) + f(x_0, y_0)$



L'idea è quella di calcolare  $q$  in due modi diversi e osservare che le due scritture rappresentano la stessa quantità quindi sono uguali.

$$q = [f(x_0 + h, y_0 + k) - f(x_0 + h, y_0)] - [f(x_0, y_0 + k) - f(x_0, y_0)]$$

scelgo una funzione  $\varphi(h) = f(x_0 + h, y_0 + k) - f(x_0 + h, y_0)$

$$q = \varphi(h) - \varphi(0) = \varphi'(0)h$$

valida per  $\alpha' \in ]0, 1[$  e  $\varphi'(h) = \partial_x f(x_0 + h, y_0 + k) - \partial_x f(x_0 + h, y_0)$

$$q = [\partial_x f(x_0 + \alpha' h, y_0 + k) - \partial_x f(x_0 + \alpha' h, y_0)]h$$

scelgo una funzione  $\Phi(k) = \partial_x f(x_0 + h, y_0 + k)$

$$q = [\Phi(k) - \Phi(0)]h = \Phi'(\beta' k)hk$$

valida per  $\beta' \in ]0, 1[$  e  $\Phi'(k) = \partial_y \partial_x f(x_0 + \alpha' h, y_0 + k)$

$$q = \partial_{xy}^2 f(x_0 + \alpha' h, y_0 + \beta' k)hk$$

Ma  $q$  può anche essere calcolata in un secondo modo

$$q = [f(x_0 + h, y_0 + k) - f(x_0, y_0 + k)] - [f(x_0 + h, y_0) - f(x_0, y_0)]$$

scelgo una funzione  $\psi(k) = f(x_0 + h, y_0 + k) - f(x_0, y_0 + k)$

$$q = \psi(k) - \psi(0) = \psi'(\alpha'' k)k$$

valida per  $\alpha'' \in ]0, 1[$  e  $\psi'(k) = \partial_y f(x_0 + h, y_0 + k) - \partial_y f(x_0, y_0 + k)$

$$q = [\partial_y f(x_0 + h, y_0 + \alpha'' k) - \partial_y f(x_0, y_0 + \alpha'' k)]k$$

scelgo una funzione  $\Psi(h) = \partial_y f(x_0 + h, y_0 + \alpha'' k)$

$$q = [\Psi(h) - \Psi(0)]k = \Psi'(\beta'' k)hk$$

valida per  $\beta'' \in ]0, 1[$  e  $\Psi'(h) = \partial_x \partial_y f(x_0 + h, y_0 + \beta'' k)$

$$q = \partial_{xy}^2 f(x_0 + \alpha'' h, y_0 + \beta'' k)hk$$

Abbiamo quindi trovato che

$$\partial_{xy}^2 f(x_0 + \alpha' h, y_0 + \beta' k)hk = \partial_{xy}^2 f(x_0 + \alpha'' h, y_0 + \beta'' k)hk$$

Ci sarebbe un disegno ...

...

Abbiamo trovato che le derivate parziali seconde miste coincidono in due punti ad esempio quelli segnati con il cerchio, poiché  $\alpha', \alpha'', \beta', \beta''$  li abbiamo scelti in  $]0, 1[$  poiché  $h, k$  li abbiamo scelti del tutto arbitrari allora facciamo il limite e poiché le due quantità sono uguali allora sono uguali anche i limiti.

allora per  $(h, k) \rightarrow (0, 0)$  anche  $\alpha', \alpha'', \beta', \beta''$  cambiano ma essendo limitati tra  $]0, 1[$  moltiplicandoli oer una quantità che tende a zero fa tutto zero.

Usando la continuità, per  $(h, k) \rightarrow (0, 0)$  ottengo  $\partial_{xy}^2 f(x_0, y_0) = \partial_{yx}^2 f(x_0, y_0)$  □

### Osservazione 9.8

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

$Df(x_0) = \nabla f(x_0) \in \text{Mat}(1 \times n)$

$H_f(x_0) \in \text{Mat}(n \times n)$

Il lemma di Schwarz dice che sotto opportune ipotesi la  $H_f(x_0)$  è una matrice simmetrica, in questo caso non dobbiamo calcolare  $n \times n$  termini, ma solo  $\frac{n(n+1)}{2}$

## 9.2 Sviluppo in Serie di Taylor al II Ordine

## 9.3 Derivate di Ordine Superiore

# 10 Il Teorema della funzione Implicita

### Definizione 10.1

sia  $X \in \mathbb{R}^n$  e  $Y \in \mathbb{R}^m$ ,  $f : X \times Y \rightarrow \mathbb{R}^l$ ,  $x_0 \in \overset{\circ}{X}$ ,  $y_0 \in \overset{\circ}{Y}$ .

L'equazione  $f(x, y) = 0$  definisce implicitamente una funzione  $y = \varphi(x)$  in un intorno di  $(x_0, y_0) =$

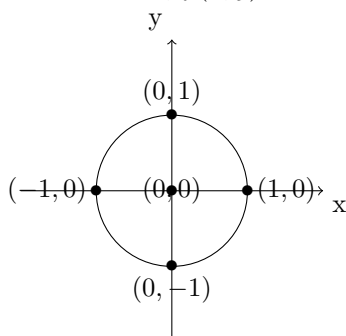
1.  $f(x_0, y_0) = 0$ , rappresenta un punto di partenza
2.  $\exists \mathcal{X}$  intorno di  $x_0$  e  $\exists \mathcal{Y}$  intorno di  $y_0$ , in questo modo due intorno uno per punto, uno è l'insieme di partenza, l'altro l'insieme di arrivo
3.  $\exists \varphi : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$  t.c.:  $f(x, y) = 0$  con  $x \in \mathcal{X}$  e  $y \in \mathcal{Y} \iff y = \varphi(x)$

ESEMPIO:

$m = n = l = 1$ ,  $f(x, y) = x^2 + y^2 + 1$ , questa equazione non definisce mai una funzione implicita poiché non è mai nulla

ESEMPIO:

$m = n = l = 1$ ,  $f(x, y) = x^2 + y^2 - 1$



Per prima cosa osservo che si possono trovare dei punti che rendono vera  $f(x, y) = x^2 + y^2 - 1 = 0$  e sono tutti i punti della circonferenza di centro l'origine degli assi e raggio unitario.

il punto  $(x_0, y_0) = (0, 1)$  definisce implicitamente una funzione  $y = \varphi(x) = \sqrt{1 - x^2}$  con  $\mathcal{X} = [-1, 1]$  e  $\mathcal{Y} = [0, 1]$  un primo problema è dovuto alla scelta degli intervalli  $\mathcal{X}, \mathcal{Y}$ , per esempio posso scegliere  $\mathcal{X} = [-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}]$  e  $\mathcal{Y} = \mathbb{R}^+$  un secondo problema è la scelta del punto  $(x_0, y_0)$ , potrei scegliere il punto  $(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}})$

### Osservazione 10.2

La stessa definizione può essere riscritta con la  $x$  funzione della  $y$  poiché a priori non c'è distinzione tra le variabili.

### Proposizione 10.3

(caso lineare)

sia  $f : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^p$  che  $(x, y) \mapsto Ax + By - C$  con  $A \in \text{Mat}(p \times n)$ ,  $B \in (p \times m)$ ,  $C \in (p \times 1)$ . Se  $p = m$  cioè  $B$  è una matrice quadrata, e  $\det(B) \neq 0$  cioè invertibile, allora

$\exists! \varphi : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  t.c.:  $f(x, y) = 0 \iff y = \varphi(x)$

*Dimostrazione.*  $f(x, y) = 0 \iff Ax + By = -C \iff By = -Ax + C \iff y = -B^{-1}Ax + B^{-1}C = \varphi(x) \quad \square$

### Teorema 10.4 (Teorema della Funzione Implicita)

Sia  $f : X \times Y \rightarrow \mathbb{R}^m$  con  $X \subseteq \mathbb{R}^n, Y \subseteq \mathring{\mathbb{R}}^m$

Preso un punto  $(x_0, y_0)$  con  $x_0 \in \mathring{X}, y_0 \in \mathring{Y}$

se:

1.  $f$  continua in  $X \times Y$
2.  $f(x_0, y_0) = 0$
3.  $f$  differenziabile rispetto a  $y \forall (x, y) \in X \times Y$  e  $D_y f(x, y)$  continua.
4.  $D_y f(x_0, y_0)$  invertibile.

$\Rightarrow$  si ha:

esistenza della funzione implicita

$\exists \mathcal{X} \subseteq X$  intorno di  $x_0$  (strano aperto)

$\exists \mathcal{Y} \subseteq Y$  intorno di  $y_0$  (strano aperto)

$\exists \varphi$  continua con  $\varphi : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$  t.c.  $[\varphi(x_0) = y_0] f(x, y) = 0, x \in \mathcal{X}, y \in \mathcal{Y} \iff y = \varphi(x)$  unicità di sostanza cioè a meno del dominio:

se  $\varphi_i : \mathcal{X}_i \rightarrow \mathcal{Y}_i$  e  $x_0 \in \mathcal{X}_i, y_0 \in \mathcal{Y}_i$

$f(x_0, y_0) = 0 \forall x \in \mathcal{X}_i, y \in \mathcal{Y} \iff y = \varphi_i(x)$  con  $i = 1, 2$

Allora  $\forall x \in \mathcal{X} \cap \mathcal{X}_1 \cap \mathcal{X}_2$  vale  $\varphi_1(x) = \varphi_2(x)$

### Osservazione 10.5

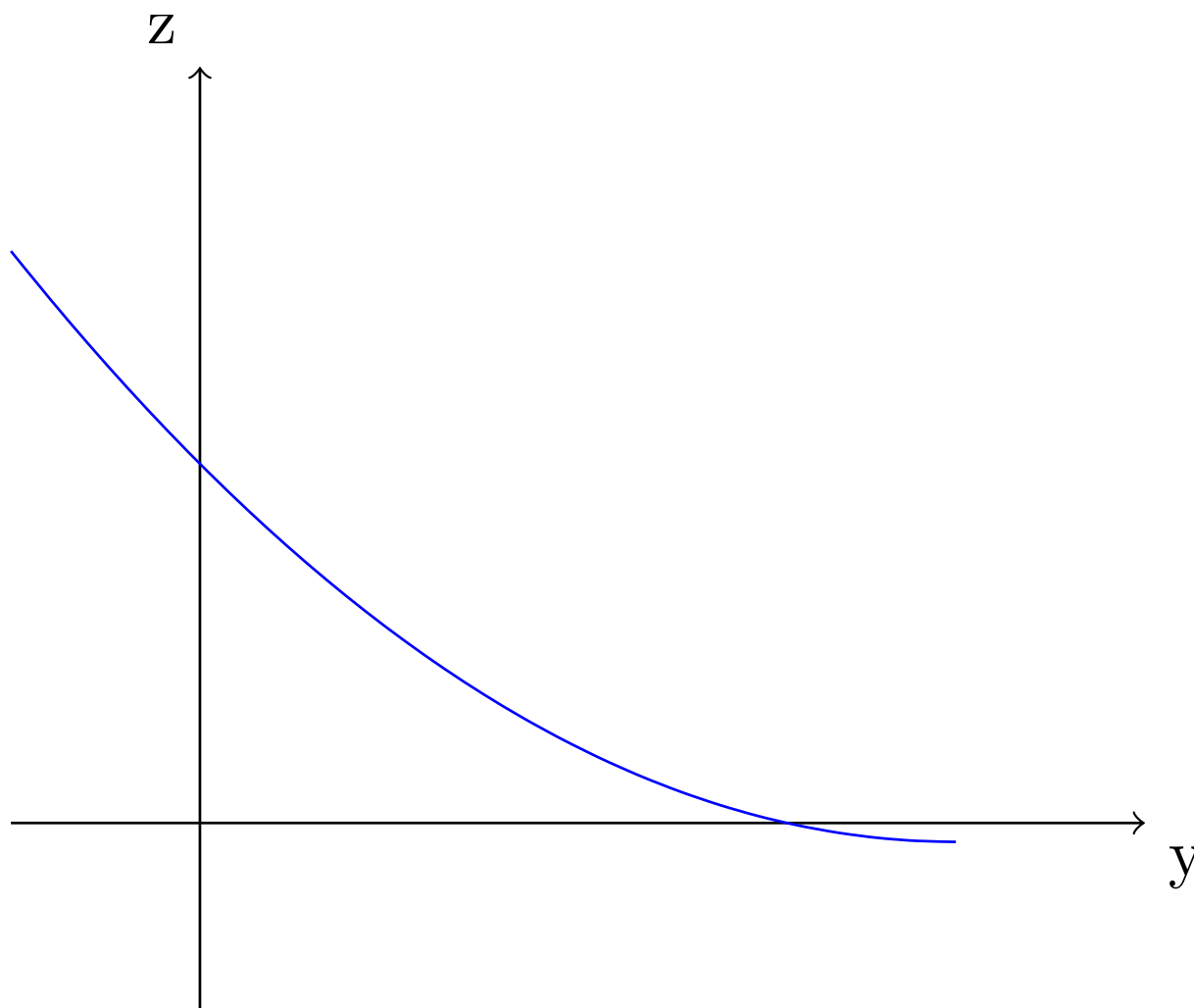
Le ipotesi 3 e 4 garantiscono che esiste una approssimazione lineare, l'ipotesi 4 è sensata poiché  $y$  e  $f$  hanno lo stesso numero di componenti quindi  $D_y f$  è una matrice quadrata.

la funzione  $f : X \times Y \rightarrow \mathbb{R}^m$  che  $(x, y) \rightarrow f(x, y)$  ??????

cioè  $\forall x \in X$  (sto fissando una  $x$ )  $f^x : Y \rightarrow \mathbb{R}^m$  che  $y \rightarrow f(x, y)$  (sto variando la  $y$ ),  $Df^x \in Mat(m \times m)$

### Osservazione 10.6

Metodo degli zeri di Newton per trovare gli zeri di una funzione o metodo delle tangenti.



Scelgo un punto  $y_0$  ne prendo il valore sulla curva, disegno la tangente e chiamo  $y_1$  l'intersezione con l'asse  $y$ .

Itero il processo  $y_{n+1} = y_n - \frac{f(y_n)}{f'(y_n)}$

discorso al momento difficile per me....

*Dimostrazione.* Dobbiamo partire da  $f(x, y) = 0$  arrivare a  $y = \varphi(x)$ , vogliamo applicare un ragionamento simile a quello del Metodo di Newton, passando però per il concetto di punto fisso, il teorema delle Contrazioni ci assicura che esiste unico.



cerchiamo quindi una contrazione  $T$  il cui punto fisso sia soluzione di  $f(x, y) = 0$ .  $T$  è del tipo:

$T : ? \times ? \rightarrow ?$

$(x, y) \rightarrow y - [D_y f(x_0, y_0)]^{-1} f(x, y)$ , nota che non avere nella derivata lo stesso punto in cui si calcola la funzione (come è nel metodo di Newton) ha effetti "tragici" sulla velocità di convergenza, ma a noi interessa l'esistenza. bisogna capire quali insiemi usare come insiemi di partenza e arrivo, devo essere scelti in modo da poter applicare il teorema delle contrazioni. Bisogna scegliere sottoinsiemi di  $R^n$  e  $R^m$ , scegliamo quindi delle sfere  $T : \overline{B}(x_0, r_x) \times \overline{B}(y_0, r_y) \rightarrow \overline{B}(y_0, r_y)$ , scegliendo la chiusura delle sfere si è sicuri di lavorare in uno spazio metrico completo, poiché in  $R^l$  completo  $\iff$  chiuso e limitato.

come vengono invece scelti i raggi? sono scelti in modo che:

1.  $T$  è ben definita
2.  $\forall x \in \overline{B}(x_0, r_x) \exists Tx : \overline{B}(x_0, r_x) \rightarrow \overline{B}(y_0, r_y)$  che  $y \rightarrow T(x, y)$ ,

cioè  $T$  è una contrazione tale che  $\forall x$  esiste un punto fisso,  $\forall x$  associo a  $y$  una  $x$ , e quindi la funzione.  $r_x, r_y$  devono essere sufficientemente piccoli per avere tali proprietà e per poter lavorare sopra.

Abbiamo che  $f(x, y) = 0 \iff T(x, y) = y$

$T(x, y) = y \iff y = y - [D_y f(x_0, y_0)]^{-1} f(x, y)$

$[D_y f(x_0, y_0)]^{-1} f(x, y) \iff f(x, y) = 0$

Per verificare che  $T$  è una contrazione ne stimo la norma

$$\|T(x, y_2) - T(x, y_1)\| \leq \sup_{\tilde{y} \in \text{segmento}} \|D_y T(x, \tilde{y})\| \|y_2 - y_1\| \text{ accrescimenti finiti.}$$

Poiché le sfere sono insiemi convessi è stato possibile applicare il Teorema degli accrescimenti finiti.

Presa  $T(x, y) = y - [D_y f(x_0, y_0)]^{-1} f(x, y)$ , la derivo rispetto a  $y$ :

$$\begin{aligned} D_y T(x, y) &= I_{\mathbb{R}^m} - [D_y f(x_0, y_0)]^{-1} D_y f(x, y) = \\ &= [D_y f(x_0, y_0)]^{-1} [D_y f(x_0, y_0) - D_y f(x, y)] \end{aligned}$$

Osserviamo che abbiamo ottenuto una matrice come costante moltiplicativa, al secondo membro abbiamo la differenza di due valori di una funzione, che per ipotesi è una funzione continua ( $D_y f(x, y)$  continua), allora per  $r_x$  e  $r_y$  sufficientemente piccoli ho che:

$\|D_y T(x, y)\| \leq \frac{1}{2}$ , è scelto questo valore poiché è comodo al fine di dimostrare la contrazione...

$$\|D_y T(x, y)\| \leq \| [D_y f(x_0, y_0)]^{-1} \| \| D_y f(x_0, y_0) - D_y f(x, y) \| \leq \frac{1}{2}$$

$$\|T(x, y_2) - T(x, y_1)\| \leq \frac{1}{2} \|y_2 - y_1\|$$

Se dimostriamo che  $T$  è ben definita abbiamo dimostrato che  $T$  è una contrazione.

Per verificare che  $T$  è ben definita bisogna mostrare che  $T(x, y) \in \overline{B}(y_0, r_y)$  quindi si mostra che la distanza tra  $T(x, y)$  e il centro è minore di  $r_y$

$$\begin{aligned} \|T(x, y) - y_0\| &\leq \|T(x, y) - T(x, y_0)\| + \|T(x, y_0) - y_0\| \leq \\ &\leq \frac{1}{2} \|y - y_0\| + \|y_0 - [D_y f(x_0, y_0)]^{-1} f(x, y_0) - y_0\| \leq \\ &\leq \frac{1}{2} \|y - y_0\| + \|[D_y f(x_0, y_0)]^{-1}\| \|f(x, y_0) - 0\| \leq \\ &\leq \frac{1}{2} \|y - y_0\| + \|[D_y f(x_0, y_0)]^{-1}\| \|f(x, y_0) - f(x_0, y_0)\| \leq \\ &\leq \frac{1}{2} r_y + \frac{1}{2} r_y \leq r_y \end{aligned}$$

Allora  $T$  è ben definita perché  $T(x, y) \in \overline{B}(y_0, r_y)$ .

In conclusione con  $\mathcal{X} = \overline{B}(x_0, r_x)$  e  $\mathcal{Y} = \overline{B}(y_0, r_y)$  ho che  $T : \mathcal{X} \times \mathcal{Y} \rightarrow \mathcal{Y}$  è tale che  $\forall x \in \mathcal{X}$  la funzione

$y \rightarrow T(x, y)$  è una contrazione e  $\overline{B(y_0, r_y)}$  è completo.  
 qualcosa sui completi.....

.....  
 .....

A questo punto può essere applicato il teorema delle contrazioni:

$\forall x \in \mathcal{X}, \exists y \in \mathcal{Y} : f(x, y) = 0$  allora chiamo  $\varphi : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$  che  $x \rightarrow y$  è unica quindi  $\varphi$  è una funzione.

Allora la funzione implicita esiste. La continuità direva direttamente dal teorema delle contrazioni: l'applicazione che al parametro associa il punto fisso è continua.

Per l'unicità si osservano le ipotesi 1 e 2, dove è scritto  $\forall x$  ovvero scelta una qualunque  $x$  la  $y$  è unica quindi  $\varphi$  è univocamente definita.

□

### Proposizione 10.7

Sia  $f : X \times Y \rightarrow \mathbb{R}^m$  con  $X \in \mathbb{R}^n, Y \in \mathbb{R}^m$

Preso un punto  $(x_0, y_0)$  con  $x_0 \in \overset{\circ}{X}, y_0 \in \overset{\circ}{Y}$   
 se:

1.  $f(x_0, y_0) = 0$
2.  $f \in \mathbf{C}^1(X \times Y, \mathbb{R}^m)$ .
3.  $D_y f(x_0, y_0)$  invertibile .

$\Rightarrow$  si ha:

1.  $\exists \varphi : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$  definita implicitamente da  $f(x_0, y_0) = 0$
2.  $\varphi$  continua su  $\mathcal{X}$
3.  $\varphi$  è differenziabile e  $D\varphi(x) = -[D_y f(x, \varphi(x))]^{-1} D_x f(x, \varphi(x))$

*Dimostrazione.* I punti 1 e 2 sono gli stessi del teorema della funzione implicita e si dimostrano allo stesso modo.

Per il punto 3 abbiamo che  $f(x, y) = 0 \iff y = \varphi(x)$  e quindi  $\forall x \in \mathcal{X} f(x, \varphi(x)) = 0$

.....  
 .....

□

### Proposizione 10.8

CASO N=1, M=1

Sia  $f : X \times Y \rightarrow \mathbb{R}$  con  $X \in \mathbb{R}, Y \in \mathbb{R}$

Preso un punto  $(x_0, y_0)$  con  $x_0 \in \overset{\circ}{X}, y_0 \in \overset{\circ}{Y}$   
 se:

1.  $f(x_0, y_0) = 0$
2.  $f \in \mathbf{C}^1(X \times Y, \mathbb{R})$ .
3.  $\partial_y f(x_0, y_0) \neq 0$ .

$\Rightarrow$  si ha:

1.  $\exists \varphi : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$  definita implicitamente da  $f(x_0, y_0) = 0$
2.  $\varphi \in \mathbf{C}^0(\mathcal{X}, \mathcal{Y})$
3.  $\varphi$  è derivabile e  $\varphi'(x) = -[\partial_y f(x, \varphi(x))]^{-1} \partial_x f(x, \varphi(x))$

*Dimostrazione.*  $f(x, y) = 0 \iff y = \varphi(x)$ , derivando  $D(f(x, \varphi(x))) = 0$   
 $\partial_x f(x, \varphi(x)) + \partial_y f(x, \varphi(x))\varphi'(x) = 0$   
 allora  $\varphi'(x) = -\frac{\partial_x f(x, \varphi(x))}{\partial_y f(x, \varphi(x))}$  □

### Osservazione 10.9

Non essendoci motivo per preferire la  $x$  alla  $y$  o viceversa, esiste anche una versione di questo teorema in cui le ipotesi sono le stesse eccetto l'ultima che diventa  $\partial_x f(x_0, y_0) \neq 0$

1.  $\exists \psi : \mathcal{Y} \rightarrow \mathcal{X}$  definita implicitamente da  $f(x, y) = 0$
2.  $\psi \in \mathbf{C}^0(\mathcal{Y}, \mathcal{X})$
3.  $\psi$  è derivabile e  $\psi'(y) = -[\partial_x f(\psi(y), y)]^{-1} \partial_y f(\psi(y), y)$

Qualche esempio qui

## 10.1 Il Teorema della funzione Inversa

Data una funzione  $f$ , poterla invertire ..... unico modo l'equazione (o sistema ....) ... l'incognita  $x$  in funzione del parametro .....

### Proposizione 10.10

(Teorema della funzione inversa caso lineare)

Sia  $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  data da  $f(x) = Mx$  e  $M \in \text{Mat}(m \times n)$ ,  $f$  è invertibile  $\iff n = m$  e  $\det M \neq 0$

### Proposizione 10.11

(caso generale)

sia  $f : A \rightarrow \mathbb{R}^n$  con  $A \subseteq \mathbb{R}^n$ ,  $f \in \mathbf{C}^1(A, \mathbb{R}^n)$ ,  $x_0 \in \overset{\circ}{A}$  e  $Df(x_0)$  invertibile.

Allora  $\exists \mathcal{X} \subseteq A$ ,  $\exists \mathcal{Y} \subseteq \mathbb{R}^n$ ,  $\exists \varphi : \mathcal{Y} \rightarrow \mathcal{X}$  con la proprietà  $f(x) = y \iff x = \varphi(y)$  con  $x \in \overset{\circ}{\mathcal{X}}$  e  $y \in \overset{\circ}{\mathcal{Y}}$  e  $\varphi \in \mathbf{C}^1(\mathcal{Y}, \mathcal{X})$  e  $D\varphi(y) = [Df(x)]^{-1}$

*Dimostrazione.*  $f(x) = y \iff f(x) - y = 0$ . Allora introduco  $F : A \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$  data da  $F(x, y) = f(x) - y$ .

Studio  $F(x, y) = 0$  per ottenere  $x = \varphi(y)$ .

Per poter applicare il teorema della funzione implicita serve  $D_x F(x_0, y_0)$  invertibile, ma  $D_x F(x_0, y_0) = Df(x_0)$  che è invertibile per ipotesi.

Applico allora il teorema della funzione implicita, quindi gli intorno esistono e  $x = \varphi(y)$ .

resta da trovare la derivata totale di  $\varphi$ . Sappiamo che  $f \in \mathbf{C}^1$  quindi  $\varphi \in \mathbf{C}^1$ .

Sappiamo che  $\varphi(f(x)) = x$ , applicando la derivata della funzione composta abbiamo che:

$$D\varphi(f(x))Df(x) = I$$

$$D\varphi = [Df(x)]^{-1} \text{ quando } \varphi(y) = x$$

si può anche scrivere come  $(Df^{-1})(f(x)) = [Df(x)]^{-1}$  □

## 11 Massimi e Minimi Liberi

### Definizione 11.1

Siano  $(X, d)$  s.m.,  $A \subseteq X$  e  $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ , siano  $x_0 \in A$ ,  $B \subseteq A$  e  $m, M \in \mathbb{R}$  (L'insieme immagini deve essere  $\mathbb{R}$  per poter parlare di massimi e minimi,  $\mathbb{R}$  è un campo ordinato a differenza di  $\mathbb{R}^n$ ).

$M$  è massimo di  $f$  su  $B \iff M = \max_{x \in B} f(x) \iff \forall x \in B f(x_0) \geq f(x)$

$m$  è minimo di  $f$  su  $B \iff m = \min_{x \in B} f(x) \iff \forall x \in B f(x_0) \leq f(x)$

$x_0$  è punto di massimo assoluto per  $f \iff f(x_0) = \max_A f(x)$

$x_0$  è punto di minimo assoluto per  $f \iff f(x_0) = \min_A f(x)$

$x_0$  è punto di massimo locale relativo per  $f \iff \exists r > 0 : f(x_0) = \max_{x \in B(x_0, r)} f(x)$  con  $B(x_0, r) \subseteq A$

$x_0$  è punto di minimo locale relativo per  $f \iff \exists r > 0 : f(x_0) = \min_{x \in B(x_0, r)} f(x)$  con  $B(x_0, r) \subseteq A$

### 11.1 Condizioni Necessarie

#### Proposizione 11.2

Teorema di Fermat

sia  $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  e  $x_0 \in \overset{\circ}{A}$ . Se  $x_0$  è punto di massimo(0 minimo) locale per  $f$  su  $A$  e  $f$  è differenziabile in  $x_0$  allora  $\nabla f(x_0) = 0$ .

*Dimostrazione.* Sia  $v \in \mathbb{R}^n$  con  $\|v\| = 1$ , la funzione  $F(t) = f(x_0 + tv)$  che a  $t \rightarrow x_0 + tv$  è il moto rettilineo uniforme che passa da  $x_0$  all'istante 0 e si muove con velocità vettore costante  $v$ . cioè per tempi negativi mi avvicino a  $x_0$  al tempo zero si è in  $x_0$  e per tempi positivi si allontana da  $x_0$ . quindi  $t = 0$  è punto di massimo per  $F$ , allora  $F'(0) = 0$  per il teorema di Fermat di A1.

Ora abbiamo che  $F'(t) = \nabla f(x_0 + tv)v$  quindi  $F'(0) = \nabla f(x_0)v$  cioè  $\nabla f(x_0)v = 0$ .

Quindi  $\forall v : \|v\| = 1$  vale  $\nabla f(x_0) = 0$

OSS:: Vale anche che  $D_v f(x_0) = 0$

□

#### Definizione 11.3

sia  $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $x_0 \in \overset{\circ}{A}$

$x_0$  è punto stazionario ....  $\Leftrightarrow f$  è differenziabile in  $x_0$  e  $\nabla f(x_0) = 0$

#### Osservazione 11.4

nel caso  $n = 2, m = 1, \nabla f(x_0, y_0) = [\partial_x f(x_0, y_0), \partial_y f(x_0, y_0)]$  .... i punti stazionari sono quelli che .....parziali.

#### Osservazione 11.5

Prima di continuare un paio di osservazioni sulle forme quadratiche.

#### Definizione 11.6

forma quadratica su  $\mathbb{R}^n \Rightarrow q : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  che  $x \rightarrow x^T Q x$  con  $Q \in \text{Mat}(n \times n)$  simmetrica

ESEMPLI:  $n=2$

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad Q = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad Q = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

SEMPRE POSITIVA SEMPRE NEGATIVA CAMBIA SEGNO

SEMPRE POSITIVA SEMPRE NEGATIVA CAMBIA SEGNO

SEMPRE POSITIVA SEMPRE NEGATIVA CAMBIA SEGNO

#### Proposizione 11.7

se  $Q$  è una forma quadratica, allora

- $\forall \lambda \in \mathbb{R}, \forall x \in \mathbb{R}^n \quad q(\lambda x) = \lambda^2 q(x)$
- $q(0) = 0$
- se  $q$  è limitata  $\Rightarrow q \equiv 0$

*Dimostrazione.* •  $q(\lambda x) = (\lambda x)^T Q (\lambda x) = \lambda^2 x^T Q x = \lambda^2 q(x)$

- $q(0) = q(0x) = 0q(x) = 0$
- (contronominale  $q \neq 0 \Rightarrow q$  non è limitata).  
se  $q$  è non nulla  $\Rightarrow \exists x \in \mathbb{R}^n \quad q(x) \neq 0$   
allora  $q(\lambda x) = \lambda^2 q(x)$  illimitata.
- ???

□

#### Proposizione 11.8

se  $q$  è una forma quadratica  $\Rightarrow \exists M \geq 0 : |q(x)| \leq M \|x\|^2 \quad \forall x \in \mathbb{R}^n$

*Dimostrazione.* per  $x \neq 0$   $|q(x)| = \left| q \left( \|x\| \frac{1}{\|x\|} x \right) \right| = \|x\|^2 \left| q \left( \frac{1}{\|x\|} x \right) \right| \leq$   
 $\leq \left( \sup_{\|x\|=1} |q(x)| \right) \|x\|^2 = \left( \max_{\|x\|=1} |q(x)| \right) \|x\|^2 = M \|x\|^2$   $\square$

**Proposizione 11.9**

Sia  $q$  una forma quadratica, se  $q(x) = o(\|x\|^2)$  per  $x \rightarrow 0 \Rightarrow q \equiv 0$

*Dimostrazione.* sia  $x \in \mathbb{R}^n$  con  $\|x\| = 1$  e  $t > 0$ .

$q(x) = \frac{1}{t^2}$ ,  $q(tx) = \frac{q(tx)}{\|tx\|^2} \rightarrow 0$  per  $t \rightarrow 0$  per ipotesi.

Allora  $\forall x$  con  $\|x\|$  vale  $q(x) = 0$  e allora  $\forall x \neq 0$ ,  $q(x) = q \left( \frac{1}{\|x\|} x \right) \|x\|^2$   $\square$

**Definizione 11.10**

Sia  $q : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  una forma quadratica

- $q$  è definita positiva  $\Leftrightarrow \forall x \in \mathbb{R}^n, x \neq 0 \quad q(x) > 0 [Q > 0]$
- $q$  è semidefinita positiva  $\Leftrightarrow \forall x \in \mathbb{R}^n \quad q(x) \geq 0 [Q \geq 0]$
- $q$  è definita negativa  $\Leftrightarrow \forall x \in \mathbb{R}^n, x \neq 0 \quad q(x) < 0 [Q < 0]$
- $q$  è semidefinita negativa  $\Leftrightarrow \forall x \in \mathbb{R}^n \quad q(x) \leq 0 [Q \leq 0]$

**Proposizione 11.11**

Sia  $q : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  una forma quadratica, se  $q$  è definita positiva  $\Rightarrow \exists m > 0 : \forall x \in \mathbb{R}^n, q(x) \geq m \|x\|^2$

*Dimostrazione.* Noto che  $q(\lambda x) = \lambda^2 q(x)$

$q(x) = q \left( \frac{1}{\|x\|} x \|x\|^2 \right) \geq \min_{\|x\|=1} q(\lambda) \|x\|^2$   $\square$

Ora dobbiamo cercare di capire se  $q$  è definita positiva

Ad esempio:  $Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$  è facile capire che è semidefinita positiva poiché è in diagonale, quindi la prima cosa da fare è trovare una forma diagonale per  $Q$   
 un procedimento pratico e veloce è il seguente:

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & \dots \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & \dots \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \lambda_2 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \lambda_3 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

$$\lambda = q_{11}, \quad \lambda_2 = \frac{\det Q_2}{q_{11}}, \quad \lambda_3 = \frac{\det Q_3}{\det Q_2} \quad \dots \quad \lambda_i = \frac{\det Q_i}{\det Q_{i-1}}$$

Questo perché se dobbiamo valutare il segno dell'incremento della  $f$  ci servono le variazioni sulle quadriche. Se  $f$  è  $\mathbf{C}^2$  scrivo lo sviluppo di Taylor al secondo ordine:

$$f(x) - f(x_0) = \nabla f(x_0)(x - x_0) + \frac{1}{2}(x - x_0)^T H_f(x_0)(x - x_0) + o(\|x - x_0\|^2)$$

max e min dove  $\nabla f(x_0) = 0$  per Fermat, l'0 piccolo è trascurabile, allora il segno della derivata dipende dalla forma quadratica al secondo membro.

**Proposizione 11.12**

sia  $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  e  $x_0 \in \overset{\circ}{A}$ .

$f \in \mathbf{C}^2(A; \mathbb{R})$  e  $x_0$  punto di massimo locale per  $f$  su  $A \Rightarrow \nabla f(x_0) = 0$  e  $H_f(x_0)$  è semidefinita negativa.

*Dimostrazione.*  $f(x) - f(x_0) = \frac{1}{2}(x - x_0)^T H_f(x_0)(x - x_0) + o(\|x - x_0\|^2)$  poiché  $f \in \mathbf{C}^2$   
 il primo termine è negativo poiché per ipotesi  $x_0$  è punto di massimo locale, ne segue che il termine  $(x - x_0)^T H_f(x_0)(x - x_0)$  non può essere positivo.  $\square$

### Proposizione 11.13

sia  $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  e  $x_0 \in \overset{\circ}{A}$ .

$f \in \mathbf{C}^2(A; \mathbb{R})$  e  $x_0$  punto di minimo locale per  $f$  su  $A \Rightarrow \nabla f(x_0) = 0$  e  $H_f(x_0)$  è semidefinita positiva.

*Dimostrazione.*  $f(x) - f(x_0) = \frac{1}{2}(x - x_0)^T H_f(x_0)(x - x_0) + o(\|x - x_0\|^2)$  poiché  $f \in \mathbf{C}^2$   
 il primo termine è positivo poiché per ipotesi  $x_0$  è punto di minimo locale, ne segue che il termine  $(x - x_0)^T H_f(x_0)(x - x_0)$  non può essere negativo.  $\square$

## 11.2 Condizioni Sufficienti

### Proposizione 11.14

sia  $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  e  $x_0 \in \overset{\circ}{A}$ .

$f \in \mathbf{C}^2(A; \mathbb{R})$ ,  $\nabla f(x_0) = 0$ ,  $H_f(x_0)$  è definita negativa  $\Rightarrow x_0$  è un punto di massimo locale per  $f$

*Dimostrazione.*  $f \in \mathbf{C}^2$  quindi possiamo scrivere:

$$f(x_0 + h) - f(x_0) = \nabla f(x_0)h + \frac{1}{2}h^T H_f(x_0)h + o(\|h\|^2) \text{ per } h \rightarrow 0$$

$$f(x_0 + h) - f(x_0) = \frac{1}{2}h^T H_f(x_0)h + o(\|h\|^2) \text{ per } h \rightarrow 0$$

Sappiamo che  $H_f$  è definita negativa per ipotesi, allora  $h^T H_f(x_0)h \leq -m\|h\|$  allora  $f(x_0 + h) - f(x_0) < 0$  e quindi  $x_0$  è punto di massimo locale per  $f$ .  $\square$

### Proposizione 11.15

sia  $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  e  $x_0 \in \overset{\circ}{A}$ .

$f \in \mathbf{C}^2(A; \mathbb{R})$ ,  $\nabla f(x_0) = 0$ ,  $H_f(x_0)$  è definita positiva  $\Rightarrow x_0$  è un punto di minimo locale per  $f$

*Dimostrazione.*  $f \in \mathbf{C}^2$  quindi possiamo scrivere:

$$f(x_0 + h) - f(x_0) = \nabla f(x_0)h + \frac{1}{2}h^T H_f(x_0)h + o(\|h\|^2) \text{ per } h \rightarrow 0$$

.....

.....

$\square$

QUALCHE DISEGNO E SPIEGAZIONE.....

## 11.3 Il Significato Geometrico del Gradiente n=2 m=1

### Definizione 11.16

Sia  $A \subseteq \mathbb{R}^2$  e  $f : A \rightarrow \mathbb{R}$

La superficie  $z = f(x, y)$  è il grafico di  $f$ , è un sottoinsieme di  $\mathbb{R}^3$

Se  $c \in \mathbb{R}$ , la curva di livello  $c$  di  $f$  è l'insieme  $f^{-1}(c) = \{(x, y) \in A : f(x, y) = c\}$

Se  $f$  è differenziabile in  $(x_0, y_0) \in \overset{\circ}{A}$  il piano tangente alla superficie  $z = f(x, y)$  in  $(x_0, y_0)$  ha equazione:

$$z = f(x_0, y_0) + \nabla f(x_0, y_0) \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \end{bmatrix}$$

$$z = f(x_0, y_0) + \partial_x f(x_0, y_0)(x - x_0) + \partial_y f(x_0, y_0)(y - y_0)$$

### Osservazione 11.17

geometricamente, il gradiente di una funzione indica la direzione di  $\mathbb{R}^n$  in cui si ha la massima variazione del valore di  $f$ , nel verso di incremento positivo di  $f$ ,

### Osservazione 11.18

osservazione col grafico che al momento non faccio.

**Proposizione 11.19**

Siano  $A \subseteq \mathbb{R}^n$ ,  $f : A \rightarrow \mathbb{R}$  differenziabile in  $(x_0, y_0) \in \overset{\circ}{A}$ , l'incremento di  $f(x_0 + h, y_0 + k) - f(x_0, y_0)$  è massimo quando  $[hk] = \lambda \nabla f(x_0, y_0)$  con  $\lambda > 0$  ed è minimo con  $[hk] = \lambda \nabla f(x_0, y_0)$  con  $\lambda < 0$

*Dimostrazione.* so che posso approssimare la funzione quindi posso scrivere:

$$f(x_0 + h, y_0 + k) - f(x_0, y_0) = \nabla f(x_0, y_0) \begin{bmatrix} h \\ k \end{bmatrix} + o(\sqrt{h^2 + k^2}) = \|\nabla f(x_0, y_0)\| \| [hk] \| \cos(\theta) + o(\sqrt{h^2 + k^2})$$

dove  $\theta$  è l'angolo tra  $\nabla f(x_0, y_0)$  e  $[hk]$  per  $\| [hk] \|$  sufficientemente piccola, l'incremento  $f(x_0 + h, y_0 + k) - f(x_0, y_0)$  è massimo se  $\cos(\theta) = 1$  ed è minimo se  $\cos(\theta) = -1$ , da cui la tesi.  $\square$

**Proposizione 11.20**

siano  $f \in \mathbf{C}^1(A; \mathbb{R})$  con  $A \subseteq \mathbb{R}^2$  e  $(x_0, y_0) \in \overset{\circ}{A}$  e  $\nabla f(x_0, y_0) \neq 0$  [cioè stazionario]. Allora  $\nabla f(x_0, y_0)$  è perpendicolare alla curva di livello passante per .....

**Osservazione 11.21**

un vettore  $\mathbf{v}$  è perpendicolare a una curva se è perpendicolare alla retta o al vettore tangente alla curva in quel punto.

*Dimostrazione.* La curva di livello è  $f(x, y) = f(x_0, y_0)$  cioè  $f(x, y) - f(x_0, y_0) = 0$ , per trovare la tangente a questa curva è più facile se si ha  $y = \varphi(x)$

Usiamo quindi il teorema della funzione implicita, mi serve che  $\partial_y f(x_0, y_0) \neq 0$ , questa condizione non è assicurata dalle ipotesi, per ipotesi il gradiente è non nulla quindi almeno una delle due componenti è non nulla.

Inizio con il caso  $\partial_y f(x_0, y_0) \neq 0$ .

Il T.F.IMPL. assicura che :

$\exists \mathcal{X}, \mathcal{Y}$  con  $x_0 \in \mathcal{X}, y_0 \in \mathcal{Y}, \exists \varphi : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$  t.c.:

$f(x, y) = f(x_0, y_0), x \in \mathcal{X}, y \in \mathcal{Y} \iff y = \varphi(x)$

La retta tangente in  $x_0$  a  $y = \varphi(x)$  è  $y = y_0 + \varphi'(x_0)(x - x_0)$

questo vuole dire che un vettore tangente a  $y = \varphi(x)$  in  $(x_0, y_0)$  è  $\begin{bmatrix} 1 \\ \varphi'(x_0) \end{bmatrix}$ .

... calcolo il prodotto scalare

$$\begin{aligned} \nabla f(x_0, y_0) \begin{bmatrix} 1 \\ \varphi'(x_0) \end{bmatrix} &= [\partial_x f(x_0, y_0) \quad \partial_y f(x_0, y_0)] \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{\partial_x f(x_0, y_0)}{\partial_y f(x_0, y_0)} \end{bmatrix} = \\ &= \partial_x f(x_0, y_0) - \partial_y f(x_0, y_0) \frac{\partial_x f(x_0, y_0)}{\partial_y f(x_0, y_0)} = 0 \end{aligned}$$

Allora il gradiente è perpendicolare alla curva di livello.

Guardiamo ora al caso in cui  $\partial_y f(x_0, y_0) = 0$  e  $\partial_x f(x_0, y_0) \neq 0$  quindi il gradiente è non nullo.

Applicando lo stesso ragionamento id sopra, solo esplicitando la  $x$  in funzione della  $y$ . Quindi  $x = \psi(y)$  e

$$\psi'(y_0) = -\frac{\partial_y f(x_0, y_0)}{\partial_x f(x_0, y_0)} \quad \square$$

## 12 Massimi e Minimi Vincolati

Spesso la ricerca di punti di massimo o minimo di una funzione  $f : A \rightarrow \mathbb{R}, A \subseteq \mathbb{R}^n$  deve essere ristretta ad un sottoinsieme  $B \subseteq A$  a causa di eventuali vincoli a cui le variabili indipendenti devono soddisfare. L'insieme  $B$  può essere generalmente descritto da una funzione  $\varphi : A \rightarrow \mathbb{R}^p$ , nel senso che  $B = \{x \in A : \varphi(x) \leq 0\}$

NOTA::: direi  $n > 1$  poiché se ho una sola variabile e la vincolo ...??????? booooo .

Questo problema è usualmente abbreviato in:

$$\max_{\varphi \leq 0} \quad o \quad \min_{\varphi \leq 0}$$

può essere affrontato in due passi:

1. ricerca dei punti di estremo di  $f$  interni a  $B$ , problema già affrontato.
2. ricerca dei punti di estremo di  $f$  sul bordo di  $B$ , affrontiamo ora.

Sotto opportune condizioni su  $\varphi$ , infatti,  $\mathring{B} = \{x \in A : \varphi(x) < 0\}$  e  $\partial B \setminus \{x \in A : \varphi(x) = 0\}$

### Proposizione 12.1

Teorema dei Moltiplicatori di Lagrange Siano  $f, g : A \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $(x_0, y_0) \in \mathring{A}$ ,  $g(x_0, y_0) = 0$ ,  $f, g \in \mathbf{C}^1(A; \mathbb{R})$ ,  $\nabla g(x_0, y_0) \neq 0$

Se  $(x_0, y_0)$  è di max(o min) locale per  $f$  su  $g = 0 \Rightarrow \exists \lambda \in \mathbb{R}$  t.c.:  $\nabla f(x_0, y_0) = \lambda \nabla g(x_0, y_0)$  (all fin fine posso dire che sono paralleli).

### Osservazione 12.2

$\lambda$  si chiama "moltiplicatore di lagrange"

### Osservazione 12.3

Se abbiamo un problema del tipo  $\max_{g(x,y)=0} f$  cioè il massimo di  $f$  sul vincolo  $g(x, y) = 0$ , ci dobbiamo ricondurre

$$\text{ad un sistema del tipo } \begin{cases} \nabla f(x_0, y_0) = \lambda \nabla g(x_0, y_0) \\ g(x_0, y_0) = 0 \end{cases} = \begin{cases} \partial_x f(x_0, y_0) = \lambda \partial_x g(x_0, y_0) \\ \partial_y f(x_0, y_0) = \lambda \partial_y g(x_0, y_0) \\ g(x_0, y_0) = 0 \end{cases}$$

3 equazioni in 3 incognite  $(x, y, \lambda)$

In certi casi si introduce una funzione  $\mathcal{L}(x, y, \lambda) = f(x, y) - \lambda g(x, y)$  detta Lagrangiana, i punti stazionari vincolati di  $f$  sono punti stazionari liberi della Lagrangiana.

*Dimostrazione.* Sappiamo che  $\nabla g(x_0, y_0) \neq 0$  quindi  $[\partial_x g(x_0, y_0) \quad \partial_y g(x_0, y_0)] \neq [0 \quad 0]$  quindi o  $\partial_x g(x_0, y_0) \neq 0$  o  $\partial_y g(x_0, y_0) \neq 0$ . Mettiamoci nel caso in cui  $\partial_y g(x_0, y_0) \neq 0$ ,

Per il teorema della funzione implicita ho che :

$\exists \mathcal{X}, \mathcal{Y}$  con  $x_0 \in \mathcal{X}, y_0 \in \mathcal{Y}, \exists \varphi : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$  t.c.:

$$g(x, y) = f(x_0, y_0), x \in \mathcal{X}, y \in \mathcal{Y} \iff y = \varphi(x)$$

Osserviamo che dire  $(x_0, y_0)$  di massimo o minimo per  $f$  ristretta a  $g(x, y) = 0 \iff x_0$  è di massimo o di minimo per la funzione  $x \rightarrow f(x, \varphi(x))$ .

Per il teorema di Fermat  $\left. \frac{d}{dx} (f(x, \varphi(x))) \right|_{x=x_0} = 0$ , punto stazionario ha derivata nulla, e la derivata di quella funzione in  $x_0$  è:

$$\partial_x f(x_0, \varphi(x_0)) + \partial_y f(x_0, \varphi(x_0)) \cdot \varphi'(x_0)$$

allora

$$\begin{aligned} 0 &= \partial_x f(x_0, \varphi(x_0)) + \partial_y f(x_0, \varphi(x_0)) \cdot \varphi'(x_0) = \\ &= \partial_x f(x_0, \varphi(x_0)) - \partial_y f(x_0, \varphi(x_0)) \frac{\partial_x g(x_0, \varphi(x_0))}{\partial_y g(x_0, \varphi(x_0))} = \end{aligned}$$

$$= \partial_x f(x_0, \varphi(x_0)) \partial_y g(x_0, \varphi(x_0)) - \partial_y f(x_0, \varphi(x_0)) \partial_x g(x_0, \varphi(x_0)) = \det \begin{pmatrix} \partial_x f(x_0, y_0) & \partial_y f(x_0, y_0) \\ \partial_x g(x_0, y_0) & \partial_y g(x_0, y_0) \end{pmatrix} = 0$$

questo equivale a dire che i vettori riga della matrice sono paralleli quindi  $\exists \alpha \in \mathbb{R} : \nabla f(x_0, y_0) = \lambda \nabla g(x_0, y_0)$ .

Non è uguale scrivere  $\exists \alpha \in \mathbb{R} : \nabla g(x_0, y_0) = \lambda \nabla f(x_0, y_0)$  poiché non c'è certezza sul valore di  $\nabla f(x_0, y_0)$  che se nullo negherebbe l'ipotesi di  $\nabla g(x_0, y_0) \neq 0$

Se guardiamo ora il caso in cui  $\partial_y g(x_0, y_0) = 0$  e  $\partial_x g(x_0, y_0) \neq 0$ .

Seguendo un ragionamento analogo si esplicita  $x = \psi(y)$  così che cercare max(o min) di  $f$  ristretta a  $g(x, y) = 0$  porti a  $y \rightarrow f(\psi(y), y)$   $\square$

### Proposizione 12.4

Teorema dei Moltiplicatori di Lagrange caso generale Sia  $A \in \mathbb{R}^n$ ,  $f \in \mathbf{C}^1(A; \mathbb{R})$ ,  $g \in \mathbf{C}^1(A; \mathbb{R}^p)$  con  $p < n$  (n.vincoli < n.variabili), sia poi  $x_0 \in \mathring{A}$ ,  $g(x_0) = 0$ ,  $Dg(x_0, y_0)$  di rango  $p$ .



Se  $x_0$  è di max(o min) locale per  $f$  su  $g = 0 \Rightarrow \exists \lambda_1, \dots, \lambda_p \text{ in } \mathbb{R} \text{ t.c. } \nabla f(x_0, y_0) = \sum_{i=1}^p \lambda_i \nabla g(x_0, y_0)$

## 13 Il caso $n = 2, m = 1$

## 14 Derivate e Integrali

**Proposizione 14.1** (Teorema Fondamentale del Calcolo Integrale)

Sia  $I \subseteq \mathbb{R}$  un intervallo e sia  $x_0 \in I$ . Data  $f \in C^0(I; \mathbb{R})$  la funzione:

$$\begin{aligned} F : I &\rightarrow \mathbb{R} \\ x &\rightarrow \int_{x_0}^x f(t) dt \end{aligned}$$

Si ha  $F \in C^1(I; \mathbb{R})$  e  $F'(x) = f(x) \forall x \in I$

□

**Proposizione 14.2**

Sia  $A \subseteq \mathbb{R}^n$  un aperto, data  $f \in C^0(A \times \mathbb{R}; \mathbb{R})$  la funzione

$$\begin{aligned} F : \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times A &\rightarrow \mathbb{R} \\ (\alpha, \beta, x) &\rightarrow \int_{\alpha}^{\beta} f(x, t) dt \end{aligned}$$

è di classe  $C^0(\mathbb{R} \times \mathbb{R} \times A; \mathbb{R})$

**Proposizione 14.3**

Sia  $A \subseteq \mathbb{R}^n$  un aperto, data  $f \in C^1(A \times \mathbb{R}; \mathbb{R})$  la funzione

$$\begin{aligned} F : \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times A &\rightarrow \mathbb{R} \\ (\alpha, \beta, x) &\rightarrow \int_{\alpha}^{\beta} f(x, t) dt \end{aligned}$$

è di classe  $C^1(\mathbb{R} \times \mathbb{R} \times A; \mathbb{R})$  ed inoltre,  $\forall (\alpha, \beta, x) \in \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times A$  e  $\forall i = 1, \dots, n$

$$\frac{\partial F}{\partial \alpha} = -f(x, \alpha)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \beta} = f(x, \beta)$$

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} = \int_{\alpha}^{\beta} \frac{\partial f}{\partial x_i}(x, t) dt$$

$$\nabla F = \int_{\alpha}^{\beta} \nabla f(x, t) dt$$

**Corollario 14.4**

Sia  $A \subseteq \mathbb{R}^n$  un aperto, date le funzioni  $\alpha : x \rightarrow \mathbb{R}, \beta : x \rightarrow \mathbb{R}, f : x \rightarrow \mathbb{R}$ , di classe  $C^1$ , la funzione

$$\begin{aligned} F : A &\rightarrow \mathbb{R} \\ (x) &\rightarrow \int_{\alpha(x)}^{\beta(x)} f(x, t) dt \end{aligned}$$

è di classe  $C^1(\mathbb{R} \times \mathbb{R} \times A; \mathbb{R})$  ed inoltre,  $\forall x_0 \in A$ :

$$\nabla F(x_0, y_0) = f(x_0, \beta) \nabla \beta(x_0) - f(x_0, \alpha) \nabla \alpha(x_0) + \int_{\alpha(x_0)}^{\beta(x_0)} \nabla f(x, t) dt$$

## 15 Funzioni a Valori in $\mathbb{C}$

Sia  $A \subseteq \mathbb{R}^n$  non vuoto. Ogni funzione  $A \mapsto \mathbb{C}$  può essere identificata in modo naturale con una funzione  $A \mapsto \mathbb{R}^2$  e viceversa.ù

**Nota.** Quindi è possibile rappresentare una funzione  $A \mapsto \mathbb{C}$  in un piano, detto **piano complesso** o **piano di Gauss**

**Esercizio 15.1**

Utilizzando questa identificazione, estendere al caso di funzioni  $A \mapsto \mathbb{C}$  le definizioni di continuità, derivabilità, differenziabilità e degli spazi  $\mathbf{C}^k$  date per funzioni  $A \mapsto \mathbb{R}$

**Proposizione 15.2**

Sia  $A \subseteq \mathbb{R}$  e sia  $t_0 \in \overset{\circ}{A}$ . Allora

- Se due funzioni  $f, g : A \mapsto \mathbb{C}$  sono differenziabili in  $t_0$ , anche le funzioni  $f + g$  e  $f \cdot g$  sono differenziabili in  $t_0$ . Inoltre

$$(f + g)'(t_0) = f'(t_0) + g'(t_0) \quad \text{e} \quad (f \cdot g)'(t_0) = f'(t_0)g(t_0) + f(t_0)g'(t_0)$$

- Per ogni  $\lambda \in \mathbb{C}$ , anche  $\lambda f$  è differenziabile e

$$(\lambda f)'(t_0) = \lambda f'(t_0)$$

- Se  $g(t_0) \neq 0$ , anche  $1/g$  e  $f/g$  sono differenziabili in  $t_0$  e

$$(1/g)'(t_0) = -\frac{g'(t_0)}{g^2(t_0)} \quad \text{e} \quad (f/g)'(t_0) = \frac{f'(t_0)g(t_0) - f(t_0)g'(t_0)}{g^2(t_0)}$$

*Dimostrazione.* Omessa □

**Esercizio 15.3**

Dimostrare la [Proposizione 15.2](#)

**Definizione 15.4** (Funzione Esponenziale con Esponente Complesso)

La Funzione Esponenziale con Esponente Complesso è così definita:

$$e^{x+iy} = e^x \cdot (\cos y + i \sin y)$$

**Proposizione 15.5**

Qualunque sia  $\lambda \in \mathbb{C}$ ,

$$\frac{d}{dt} e^{\lambda t} = \lambda e^{\lambda t}$$

*Dimostrazione.* Omessa □

**Esercizio 15.6**

Dimostrare la [Proposizione 15.5](#), direttamente o attraverso l'[Esercizio 20.24](#)

**Esercizio 15.7**

In questa sezione sulle funzioni a valori complessi non son stati considerati i problemi di massimo/minimo, perché?

*Soluzione.* Perché  $\mathbb{C}$  non è ordinato, dunque non è possibile trovare massimi o minimi. ■

## Capitolo 3

# Integrali Doppi

### Preliminari

Questo capitolo non è trattato in maniera approfondita poiché:

- a** tanti e lunghi teoremi fuori contesto per poter introdurre rigorosamente la teoria di Riemann
- b** tale teoria è "superata" da tempo

Il primo è più grosso problema di tale teoria è che non permette il passaggio del limite sotto il segno di integrale, cioè per poter scrivere

$$\int \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \int f_n(x)$$

sono necessarie tante ipotesi molto restrittive.

Si è passati così alla teoria dell'integrale secondo Lebesgue, molto diversa e piuttosto complicata.

ESEMPIO.....

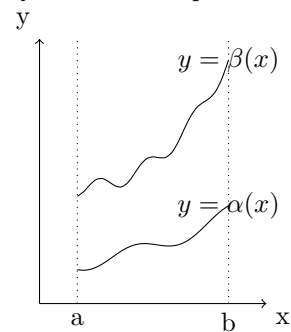
disegni.....

.....

Il concetto di integrale è quindi molto legato al concetto di area e anche di volume. La teoria di Lebesgue riparte da assiomi come questi definendoli e caratterizzandoli in modo da definire una volta per tutte in maniera sistematica e rigorosa cosa si può e cosa non si può integrare, e dove ha senso parlare di superfici, volumi, ipervolumi, ...

## 16 Regole di Calcolo

Queste formule permettono di ricondurre il calcolo di integrali doppi a quello di integrali semplici.



Se:

$a, b \in \mathbb{R}$  con  $a < b$

$\alpha, \beta \in \mathbf{C}^0([a, b]; \mathbb{R}), \forall x \in [a, b] \alpha(x) \leq \beta(x)$

$A = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x \in [a, b] \text{ e } y \in [\alpha(x), \beta(x)]\}$

$f \in \mathbf{C}^0(A; R)$

Allora

$$\iint_A f(x, y) \, dx \, dy = \int_a^b \left( \int_{\alpha(x)}^{\beta(x)} f(x, y) \, dy \right) \, dx$$

Analogamente.

ALTRO GRAFICO....

Se:

$c, d \in \mathbb{R}$  con  $c < d$

$\gamma, \delta \in \mathbf{C}^0([a, b]; R), \forall y \in [c, d] \gamma(y) \leq \delta(y)$

$A = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x \in [c, d] \text{ e } y \in [\gamma(y), \delta(y)]\}$

$f \in \mathbf{C}^0(A; R)$

Allora

$$\iint_A f(x, y) \, dx \, dy = \int_c^d \left( \int_{\gamma(y)}^{\delta(y)} f(x, y) \, dx \right) \, dy$$

## 17 Cambiamento di Variabili

Se:

$A \subseteq \mathbb{R}^2$

$\Phi \in \mathbf{C}^1(A; R^2)$   $\Phi$  è invertibile  $\Phi^{-1} \in \mathbf{C}^1(\Phi(A); R^2)$

$\det(D\Phi) \neq 0$  su  $A$

$f \in \mathbf{C}^0(\Phi(A); R^2)$

Allora:

$$\iint_{\Phi(A)} f(x, y) \, dx \, dy = \iint_A ((f \circ \Phi)(u, v)) |\det(D\Phi(u, v))| \, du \, dv$$

La quantità  $\det(D\Phi)$  è spesso chiamato DETERMINANTE JACOBIANO (o semplicemente JACOBIANO) della trasformazione  $\Phi$

Adesso spieghiamo perché il determinante JACOBIANO, ricordando A1:

$$\int_g (A) f(x) \, dx = \int_A f(g(t)) \, dt$$

vari casi

...

...

...

## Capitolo 4

# Successioni e Serie di Funzioni

### 18 Preliminari

#### Definizione 18.1

Sia  $f_n : A \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  una successione ( $n \in \mathbb{N}$ ), la serie  $\sum_{n=0}^{+\infty} f_n$  indica la successione delle somme parziali

$$S_n = \sum_{i=0}^n f_i$$

#### Osservazione 18.2

Qualunque affermazione fatta in riferimento ad una serie va quindi intesa riferita alla successione delle somme parziali

- La serie è limitata  $\Leftrightarrow$  la successione delle somme parziali è limitata
- La serie è illimitata  $\Leftrightarrow$  la successione delle somme parziali è illimitata
- La serie è convergente  $\Leftrightarrow$  la successione delle somme parziali è convergente

#### Osservazione 18.3

Successioni e serie di funzioni possono essere viste:

1. come successioni e serie dipendenti da un parametro
2. come un mezzo per approssimare funzioni
3. come un primo passo verso lo studio di funzioni (a volte dette operatori o funzionali) che a funzioni associano o numeri o altre funzioni.

### 19 Tipi Di Convergenza

#### 19.1 Convergenza Puntuale

##### Definizione 19.1

Sia  $A \subseteq \mathbb{R}$  e  $\{f_n : n \in \mathbb{N}\}$  una successione di funzioni definite su  $A$  a valori in  $\mathbb{R}$ . Sia  $B \subseteq A$

- la successione  $\{f_n : n \in \mathbb{N}\}$  è puntualmente convergente su  $B$  se  $\forall x \in B$ , esiste finito il limite  $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$ . In tal caso la funzione  $f : B \rightarrow \mathbb{R}$  definito da  $f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$
- la serie  $\sum_{n=0}^{\infty} f_n$  è puntualmente convergente su  $B$  se  $\forall x \in B$ , la serie  $\sum_{n=0}^{\infty} f_n(x)$  ammette somma finita. In tal caso la funzione  $F : B \rightarrow \mathbb{R}$  definito da  $F(x) = \sum_{n=0}^{\infty} f_n(x)$  è la somma della serie la serie  $\sum_{n=0}^{\infty} f_n$

**Osservazione 19.2**

La convergenza puntuale su  $A$  della successione  $f_n$  verso  $f$  è indicata con

$$f_n \xrightarrow{p} f \quad \text{su } A$$

**Proposizione 19.3**

METAPROPOSIZIONE:

Sia  $f_n : A \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $B \subseteq A$ ,  $A \subseteq \mathbb{R}$ ,  $f : B \rightarrow A$

Se  $f_n \xrightarrow{p} f$  su  $B$  e se  $f_n$  ha la proprietà  $P$  allora il limite  $f$  ha la proprietà  $P$ .

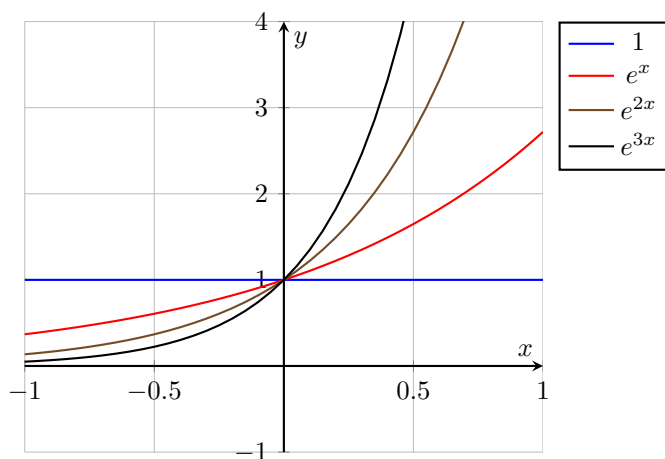
**Esempio 19.4**

$f_n(x) = \frac{1}{n} \sin(x)$  con  $A \equiv \mathbb{R}$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sin(x) = 0 \quad \forall x \in A \Rightarrow f_n \xrightarrow{p} 0 \text{ su } A.$$

**Esempio 19.5**

$f_n(x) = e^{nx}$  con  $A \equiv \mathbb{R}$



$$\lim_{n \rightarrow \infty} e^{nx} = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 1 & x = 0 \\ \infty & x > 0 \end{cases}$$

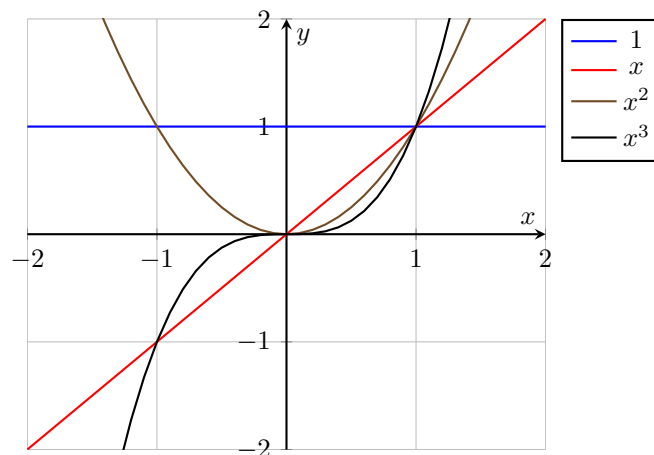
$$f_n \xrightarrow{p} f \quad \text{su } B = ]-\infty, 0]$$

**Osservazione 19.6**

La continuità non passa al limite come proprietà  $P$

**Esempio 19.7**

$f_n(x) = x^n$  con  $A \equiv \mathbb{R}$



$$\lim_{n \rightarrow \infty} x^n = \begin{cases} +\infty & x \in ]1, +\infty[ \\ 1 & x \in \{1\} \\ 0 & x \in ]-1, 1[ \\ \nexists & x \in ]-\infty, -1] \end{cases}$$

$$f_n \xrightarrow{p} f \quad \text{su } B = ]-1, 1]$$

**Proposizione 19.8**

## PROPRIETÀ P: MONOTONIA

Sia  $f_n : A \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $B \subseteq A$ ,  $A \subseteq \mathbb{R}$ ,  $f : B \rightarrow \mathbb{R}$

Se  $f_n \xrightarrow{p} f$  su  $B$  e se  $f_n$  è debolmente crescente su  $B$  allora il limite  $f$  è debolmente crescente su  $B$ .

*Dimostrazione.* Dire che  $f_n$  è debolmente crescente su  $B$  significa che

$$\forall x_1, x_2 \in B \quad x_1 \leq x_2 \Rightarrow f_n(x_1) \leq f_n(x_2)$$

se si fa tendere  $n \rightarrow \infty$  si ha che  $f(x_1) \leq f(x_2)$ , e questo nell'insieme  $B$  dove i limiti puntuali delle funzioni esistono per ipotesi  $\square$

**Osservazione 19.9**

Questo vale anche nel caso di funzioni debolmente decrescenti

**Osservazione 19.10**

se  $f_n$  è strettamente crescente/decrescente con le stesse ipotesi non possiamo concludere che il limite puntuale mantenga la stessa proprietà

**Esempio 19.11**

$x^n$  con  $x \in [0, 1[$  è strettamente crescente ma il limite puntuale è costante uguale a zero.

**Proposizione 19.12**

## PROPRIETÀ P: NON NEGATIVA

Sia  $f_n : A \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $B \subseteq A$ ,  $A \subseteq \mathbb{R}$ ,  $f : B \rightarrow \mathbb{R}$

Se  $f_n \xrightarrow{p} f$  su  $B$  e se  $f_n$  è non negativa,  $f_n \geq 0$ , su  $B$  allora il limite  $f$  è non negativo,  $f \geq 0$ , su  $B$ .

*Dimostrazione.* Sappiamo che  $f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) \forall x \in B$ . Ma  $f_n$  è una successione di valori non negativi quindi il limite esiste ed è non negativo.  $\square$

**Osservazione 19.13**

Questo vale anche nel caso di funzioni non positive

**Osservazione 19.14**

Questa proposizione non può essere estesa al caso di funzioni strettamente positive/negative.

**Esempio 19.15**

$-\frac{e^x}{n}$  con  $x \in [0, 1[$  è strettamente negativa ma il limite è costante uguale a zero.

**Proposizione 19.16**

Siano  $A \subseteq \mathbb{R}, B \subseteq A, \{f_n : n \in \mathbb{N}\}$  una successione di funzioni definite su  $A$  con valori in  $\mathbb{R}$ . sia  $f : B \rightarrow \mathbb{R}$  una funzione

$$f_n \xrightarrow{p} f \text{ su } B \text{ per } n \rightarrow \infty \iff \forall x \in B, \forall \epsilon > 0, \exists \nu \in \mathbb{N} : \forall n > \nu \quad |f_n(x) - f(x)| \leq \epsilon$$

*Dimostrazione.* direttamene dalla definizione... □

**Proposizione 19.17**

Siano  $A \subseteq \mathbb{R}, B \subseteq A, \{f_n : n \in \mathbb{N}\}$  una successione di funzioni definite su  $A$  con valori in  $\mathbb{R}$ . Sia  $F : B \rightarrow \mathbb{R}$  una funzione

$$\sum_{n=0}^{\infty} f_n \xrightarrow{p} F \text{ su } B \text{ per } n \rightarrow \infty \iff \forall x \in B, \forall \epsilon > 0, \exists \nu \in \mathbb{N} : \forall n > \nu \quad \left| \sum_{k=0}^{\infty} f_k(x) - F(x) \right| \leq \epsilon$$

*Dimostrazione.* direttamene dalla definizione... □

**19.2 Convergenza Uniforme****Definizione 19.18** (Convergenza Uniforme)

Siano  $A \subseteq \mathbb{R}, B \subseteq A$  e  $\{f_n : n \in \mathbb{N}\}$  una successione di funzioni definite su  $A$  a valori in  $\mathbb{R}$ .

- La **successione**  $\{f_n : n \in \mathbb{N}\}$  è uniformemente convergente su  $B$  se esiste una funzione  $f : B \mapsto \mathbb{R}$  tale che:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \sup_{x \in B} |f_n(x) - f(x)| = 0$$

La funzione  $f$  è il **limite uniforme della successione**  $f_n$

- La **serie**  $\sum_{n=0}^{+\infty} f_n$  è uniformemente convergente su  $B$  se esiste una funzione  $F : B \mapsto \mathbb{R}$  tale che:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \sup_{x \in B} \left| F(x) - \sum_{k=0}^n f_k(x) \right| = 0$$

la funzione  $F$  è il **limite uniforme della serie**  $\sum_{n=0}^{\infty} f_n$

La convergenza uniforme su  $B$  della successione  $f_n$  verso  $f$  è indicata con " $f_n \xrightarrow{u} f$  su  $B$ ".

**Osservazione 19.19**

la convergenza uniforme equivale alla convergenza rispetto alla distanza  $d_{C^0}(f, g) = \sup_{x \in A} |g(x) - f(x)|$  ogniqualvolta questa distanza sia definita.

La  $d_{C^0}(f, g)$  può essere definita attraverso la norma  $\|k\|_{C^0} = \sup_{x \in A} |k|$  con  $k = f - g$

**Proposizione 19.20**

sia  $f_n : n \in \mathbb{N}$  con  $f : A \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  e  $f : B \subseteq A \rightarrow \mathbb{R}$

$$f_n \xrightarrow{u} f \text{ su } B \text{ per } n \rightarrow \infty \iff \forall \epsilon > 0, \exists \nu \in \mathbb{N} \text{ t.c.: } \forall n > \nu, \forall x \in B \text{ vale che } |f_n(x) - f(x)| \leq \epsilon$$

**Proposizione 19.21**

sia  $f_n : n \in \mathbb{N}$  con  $f : A \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  e  $F : B \subseteq A \rightarrow \mathbb{R}$

$$\sum_{n=0}^{\infty} f_n \xrightarrow{u} F \text{ su } B \iff \forall \epsilon > 0, \exists \nu \in \mathbb{N} \text{ t.c.: } \forall n > \nu, \forall x \in B \text{ vale che } \left| F(x) - \sum_{k=0}^n f_k(x) \right| \leq \epsilon$$



**Osservazione 19.22**

La differenza tra queste due proposizioni e le due proposizioni analoghe nel caso di convergenza puntuale giustifica il fatto che la continuità non passa al limite puntuale. Infatti qui  $\nu$  dipende solo dalla scelta di  $\epsilon$  e le  $x$  si guardano tutte insieme, prima invece  $\nu$  dipendeva oltre che alla  $\epsilon$  anche dalla  $x$  questo porta a osservare le  $x$  una alla volta.

**Proposizione 19.23**

Relazione tra convergenza uniforme e puntuale.

Sia  $f_n : A \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  e  $f : B \subseteq A \rightarrow \mathbb{R}$

Se  $f_n \xrightarrow{u} f$  su  $B$  allora  $f_n \xrightarrow{p} f$  su  $B$ .

*Dimostrazione.* se  $f_n \xrightarrow{u} f$  su  $B$  allora vale che:  $\forall \epsilon, \exists \nu : \forall n > \nu, \forall x \in B$  vale  $|f_n(x) - f(x)| \leq \epsilon$  in questo modo si trova un  $\nu$  che soddisfa la condizione  $\forall x \in B$  quindi  $\forall x \in B, \forall \epsilon, \exists \nu : \forall n > \nu$  vale  $|f_n(x) - f(x)| \leq \epsilon$  quindi  $f_n \xrightarrow{p} f$  su  $B$   $\square$

**Proposizione 19.24**

Sia  $f_n : A \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  e  $\bar{f}, f : B \subseteq A \rightarrow \mathbb{R}$

se  $f_n \xrightarrow{u} f$  su  $B$  e  $f_n \xrightarrow{u} \bar{f}$  su  $B$  allora  $f = \bar{f}$

*Dimostrazione.*  $f_n \xrightarrow{u} f$  e  $f_n \xrightarrow{u} \bar{f}$ , quindi è anche vero che  $f_n \xrightarrow{p} f$  e  $f_n \xrightarrow{p} \bar{f}$  ma il limite puntuale è unico poichè è il limite di una successione. Allora  $f = \bar{f}$   $\square$

**Esempio 19.25**

$f_n(x) = \frac{1}{n} \sin(x)$  con  $A \equiv \mathbb{R}$

Abbiamo già calcolato che  $f_n \xrightarrow{p} 0$  su  $A$ .

Sia ha anche convergenza uniforme :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sup_{\mathbb{R}} |f_n(x) - 0| = \lim_{n \rightarrow \infty} \sup_{\mathbb{R}} \left| \frac{1}{n} \sin(x) \right|$$

Osservo che  $|\sin(x)| \leq |1|$  quindi

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sup_{\mathbb{R}} \left| \frac{1}{n} \sin(x) \right| \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} = 0$$

Allora  $f_n \xrightarrow{u} f$  su  $A$

**Esempio 19.26**

$f_n(x) = \sin\left(\frac{1}{n}x\right)$  con  $A \equiv \mathbb{R}$  .....

.....

**Proposizione 19.27**

Siano  $A \subseteq \mathbb{R}$ ,  $\{f_n : A \rightarrow \mathbb{R} : n \in \mathbb{N}\}$  una successione di funzioni e  $f : A \rightarrow \mathbb{R}$

$f_n \xrightarrow{u} f$  su  $A$  e  $f_n \in \mathbf{C}^0(A; \mathbb{R}) \forall n \in \mathbb{N}$  allora  $f \in \mathbf{C}^0(A; \mathbb{R})$

*Dimostrazione.* DISEGNO

DISEGNO

DISEGNO

DISEGNO

GIURO CHE LA FARÒ (a distanza di tre anni non son sicurissimo che lo farò)  $\square$

**Esempio 19.28**

$f_n(x) = \sqrt{x^2 + \frac{1}{n}}$  con  $A \equiv \mathbb{R}$

.....

.....

**Definizione 19.29**

Siano  $A \subseteq \mathbb{R}$ ,  $B \subseteq A$  e  $\{f_n : A \rightarrow \mathbb{R} : n \in \mathbb{N}\}$  una successione di funzioni.

La successione  $\{f_n : n \in \mathbb{N}\}$  soddisfa alla condizione di Cauchy per la convergenza uniforme su  $B \Leftrightarrow \forall \epsilon > 0, \exists \nu \in \mathbb{N} : \forall n, m > \nu, \forall x \in B$  vale  $|f_n(x) - f_m(x)| < \epsilon$

**Proposizione 19.30**

(Una successione di Cauchy per la convergenza uniforme è uniformemente convergente).

Siano  $A \subseteq \mathbb{R}$ ,  $B \subseteq A$  e  $\{f_n : A \rightarrow \mathbb{R} : n \in \mathbb{N}\}$  una successione di funzioni.

La successione  $\{f_n : n \in \mathbb{N}\}$  soddisfa alla condizione di Cauchy per la convergenza uniforme su  $B$  allora  $\exists$  una funzione  $f : B \rightarrow \mathbb{R}$  t.c.:  $f_n \xrightarrow{u} f$  su  $B$

*Dimostrazione.* La successione  $\{f_n : n \in \mathbb{N}\}$  soddisfa alla condizione di Cauchy per la convergenza uniforme su  $B$  allora  $\forall x \in B$  la successione  $\{f_n(x) : n \in \mathbb{N}\}$  è di Cauchy in  $\mathbb{R}$  allora  $\forall x \in B$  la successione  $\{f_n(x) : n \in \mathbb{N}\}$  ha limite in  $\mathbb{R}$  (cioè c'è il limite puntuale).

Sia  $f(x)$  questo limite,  $f$  è anche il limite uniforme della successione  $\{f_n : n \in \mathbb{N}\}$ , infatti:

$$\forall \epsilon > 0, \exists \nu \in \mathbb{N} : \forall h, k > \nu \forall x \in B \quad |f_h - f_k| < \epsilon$$

$$\sup_B |f_h(x) - f_k(x)|, \forall h, k > \nu$$

$$\Rightarrow |f_h(x) - f_k(x)| < \epsilon, \forall h, k > \nu, \forall x \in B$$

a questo punto si passa al limite e la disuguaglianza diventa debole.

$$\Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} |f_h(x) - f_k(x)| \leq \epsilon, \forall h > \nu, \forall x \in B$$

$$\Rightarrow |f_h(x) - f(x)| \leq \epsilon, \forall h > \nu, \forall x \in B$$

$$\Rightarrow \sup_B |f_h - f| \leq \epsilon, \forall h > \nu$$

$$\Rightarrow f_n \xrightarrow{u} f \quad \text{su } B$$

□

**Proposizione 19.31**

Sia  $A$  un compatto in  $\mathbb{R}$ . In  $\mathbf{C}^0(A; \mathbb{R})$  sia  $d_{\mathbf{C}^0} = \sup_A |g(x) - f(x)|$ . Allora  $(\mathbf{C}^0(A; \mathbb{R}); d_{\mathbf{C}^0})$  è uno spazio metrico completo.

*Dimostrazione.* prendo  $f_n \in \mathbf{C}^0(A; \mathbb{R})$  successione di Cauchy in  $\mathbf{C}^0(A; \mathbb{R})$   $f_n$  sono di Cauchy rispetto alla convergenza uniforme su  $A \Rightarrow f_n : A \rightarrow \mathbb{R}$  e  $f_n \xrightarrow{u} f$  su  $A$  e  $f$  è continua

$$\Rightarrow (f \in \mathbf{C}^0(A; \mathbb{R}))$$

$$\Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} f_n = f \text{ in } \mathbf{C}^0(A; \mathbb{R})$$

$$\Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} d_{\infty}(f_n, f) = 0 \quad \Rightarrow f_n \rightarrow f \in \mathbf{C}^0(A; \mathbb{R})$$

□

**Corollario 19.32**

ESEMPIO:: In dimensione finita non vi è differenza tra "chiuso e limitato" e "compatto", in dimensione infinita cambiamo molte cose. Prendiamo un insieme chiuso e limitato ma non compatto.

In  $\mathbf{C}^0([0, 1]; \mathbb{R})$  con  $d_{\infty}(f, g) = \sup_{[0, 1]} |g(x) - f(x)|$ , prendiamo l'insieme  $C = \overline{B(0, 1)} = \{f \in \mathbf{C}^0([0, 1]; \mathbb{R}) : |f(x)| \leq 1, \forall x \in [0, 1]\}$

**1**  $C$  è limitato: ha diametro finito.

**2**  $C$  è chiuso: contiene tutti i suoi punti di accumulazione

Se c'è una successione  $f_n \xrightarrow{u} f$  su  $[0, 1]$  allora voglio mostrare che  $f \in C$

Se  $f_n \xrightarrow{u} f$  su  $[0, 1]$  allora  $f_n \xrightarrow{p} f$  su  $[0, 1]$ . Sappiamo che  $\forall n \in \mathbb{N}$  e  $\forall x \in [0, 1]$  vale che  $-1 \leq f_n(x) \leq 1$ .

Mandando  $n$  al limite si ha che  $-1 \leq f(x) \leq 1$ .

Inoltre  $f$  è continua perché limite uniforme di una successione di funzioni continue allora  $f \in C$  poiché è una funzione continua compresa tra  $-1$  e  $1$

**3**  $C$  non è compatto, cioè esiste almeno una successione dalla quale non è possibile estrarre una sottosuccessione convergente nello stesso spazio.

Se ad esempio  $f_n(x) = x^n$

so che  $f_n \xrightarrow{p} f$  su  $[0, 1]$  e  $f(x) = \begin{cases} 0 & x \in [0, 1] \\ 1 & x \in \{1\} \end{cases}$

Tutta la successione di funzioni  $f_n$  converge puntualmente a  $f$  quindi se estraggo una sottosuccessione comunque venga scelta questa sottosuccessione converge ancora a  $f$  puntualmente. Ma la  $f$  non è continua mentre il limite uniforme di funzioni continue è una funzione continua allora nessuna sottosuccessione ammette limite uniforme.

ESEMPIO:: OPERATORE DERIVATA 0

$D$

ESEMPIO:: OPERATORE DERIVATA 1

$D$

ESEMPIO:: OPERATORE INTEGRALE

$I$

### Proposizione 19.33

fissati  $a, b \in \mathbb{R}$  con  $a < b$  se la successione  $\{f_n : n \in \mathbb{N}\}$  in  $\mathbf{C}^0([a, b], \mathbb{R}) \xrightarrow{u} f$  su  $[a, b]$   $f_n$  e  $f$  sono integrabili secondo Rimmmmmmmn allora la successione  $\left\{ \int_a^b f_n(x) dx : n \in \mathbb{N} \right\}$  converge a  $\int_a^b f(x) dx$

### Osservazione 19.34

La convergenza uniforme passa sotto il segno di integrale

$$\int_a^b \left( \lim_{n \rightarrow \infty} f_n \right) (x) dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \int_a^b f_n(x) dx \right)$$

### Proposizione 19.35

convergono le derivate allora convergono le funzioni

Fissati  $a, b \in \mathbb{R}$  con  $a < b$ , si consideri una successione di funzioni  $\{f_n : n \in \mathbb{N}\}$  con  $f_n : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$

1.  $\forall n \in \mathbb{N}, f_n \in \mathbf{C}^1([a, b]; \mathbb{R})$
2.  $\exists x_0 \in [a, b] : \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x_0) = l \in \mathbb{R}$
3.  $\exists g \in \mathbf{C}^0([a, b]; \mathbb{R}) : f'_n \xrightarrow{u} g$  su  $[a, b]$

Allora

1.  $\exists f \in \mathbf{C}^1([a, b]; \mathbb{R})$
2.  $f_n \xrightarrow{u} f$  su  $[a, b]$
3.  $f'(x) = g(x) \forall x \in [a, b]$

*Dimostrazione.* Per il teorema fondamentale del calcolo integrale

$$f_n(x) = f_n(x_0) + \int_{x_0}^x f'_n(t) dt$$

per  $n \rightarrow \infty$

$$f(x) = l + \int_{x_0}^x g(t) dt$$

Quindi le  $f_n$  convergono puntualmente alla funzione  $f(x)$ , per la convergenza uniforme calcolo:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \sup_{[a,b]} |f_n(x) - f(x)| \leq \lim_{n \rightarrow +\infty} (|f_n(x_0) - f(x_0)| + \left| \int_{x_0}^x |f'_n(t) - g(t)| dt \right|) \leq$$

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \left[ |f_n(x_0) - f(x_0)| + |b - a| \sup_{[a,b]} |f'_n(x) - g(x)| \right] =$$

Questo perché per ipotesi  $f'_n = g$  e il limite fa 0. Allora  $f_n \xrightarrow{u} f$  su  $[a, b]$

Inoltre si sa che  $f_n \in \mathbf{C}^1$  allora  $f'_n \in \mathbf{C}^0$  allora il limite uniforme di funzioni continue è una funzione continua allora  $g$  è una funzione continua.

La  $f$  è l'integrale di una funzione continua allora la  $f$  è derivabile con derivata continua quindi  $f' = g$   $\square$

### Osservazione 19.36

Necessaria l'ipotesi  $f_n(x_0) \rightarrow l, \dots$

### Osservazione 19.37

Serve  $[a, b]$  limitato  $\dots$

.....  
.....

### Corollario 19.38

Fissati  $a, b \in \mathbb{R}$  con  $a < b$ , si consideri una successione di funzioni  $\{f_n : n \in \mathbb{N}\}$  con  $f_n : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$

1.  $\forall n \in \mathbb{N}, f_n \in \mathbf{C}^1([a, b]; \mathbb{R})$
2.  $\exists x_0 \in [a, b] : \sum_{n=0}^{+\infty} f_n(x_0) = L \in \mathbb{R}$
3.  $\exists g \in \mathbf{C}^0([a, b]; \mathbb{R}) : \sum_{n=0}^{+\infty} f'_n \xrightarrow{u} g$  su  $[a, b]$

Allora

1.  $\exists f \in \mathbf{C}^1([a, b]; \mathbb{R})$
2.  $\sum_{n=0}^{+\infty} f_n \xrightarrow{u} f$  su  $[a, b]$
3.  $f'(x) = g(x) \forall x \in [a, b]$

### Osservazione 19.39

In altre parole questa proposizione afferma che sotto opportune ipotesi

$$\left( \sum_{n=0}^{+\infty} f_n \right)' = \sum_{n=0}^{+\infty} f'_n$$

### Definizione 19.40

Siano  $A \subseteq \mathbb{R}$  e  $\{f_n : n \in \mathbb{N}\}$  una successione di funzioni con  $f_n : A \rightarrow \mathbb{R}$

$\sum_{n=0}^{+\infty} f_n$  converge totalmente su  $A \iff \sum_{n=0}^{+\infty} \sup_A |f_n(x)| < +\infty$  (è convergente)

### Osservazione 19.41

la  $\sum_{n=0}^{+\infty} \sup_A |f_n(x)|$  è una serie numerica

**Proposizione 19.42**

Siano  $A \subseteq \mathbb{R}$  e  $\{f_n : n \in \mathbb{N}\}$  una successione di funzioni con  $f_n : A \rightarrow \mathbb{R}$

$\sum_{n=0}^{+\infty} f_n$  converge totalmente su  $A \Rightarrow \sum_{n=0}^{+\infty} f_n$  converge uniformemente su  $A$

*Dimostrazione.*  $\sum_{n=0}^{+\infty} f_n$  converge totalmente su  $A$

$$\Rightarrow \sum_{n=0}^{+\infty} \sup_{x \in A} |f_n(x)| < +\infty$$

$$\Rightarrow \forall \epsilon > 0, \exists \nu \in \mathbb{N} : \forall n, m \in \mathbb{N} \text{ con } m > n > \nu \text{ vale } \sum_{n=0}^{+\infty} \sup_{x \in A} |f_n| < \epsilon$$

$$\Rightarrow \forall \epsilon > 0, \exists \nu \in \mathbb{N} : \forall n, m \in \mathbb{N} \text{ con } m > n > \nu \text{ vale } \sup_{x \in A} \sum_{n=0}^{+\infty} |f_n| < \epsilon$$

$$\Rightarrow \forall \epsilon > 0, \exists \nu \in \mathbb{N} : \forall n, m \in \mathbb{N} \text{ con } m > n > \nu \text{ vale } \sup_{x \in A} \left| \sum_{n=0}^{+\infty} f_n \right| < \epsilon$$

$$\Rightarrow \sum_{n=0}^{+\infty} f_n \text{ soddisfa la condizione di Cauchy per la convergenza uniforme su } A.$$

□

**Osservazione 19.43**

Per le serie:

Convergenza Totale  $\Rightarrow$  Convergenza Uniforme  $\Rightarrow$  Convergenza Puntuale.

## 20 Serie di Funzioni Particolari

Questa sezione è dedicata ad alcune tecniche di approssimazione basate su serie di funzioni particolari. In generale, un'approssimazione si riconduce ad una formula del tipo

$$[\text{quantità da calcolare}] = [\text{quantità approssimante}] + \text{errore}$$

La qualità dell'approssimazione è descritta dal senso in cui l'errore è piccolo.

### 20.1 Serie di Potenze

**Definizione 20.1**

Siano  $\{a_n : n \in \mathbb{N}\}$  una successione con  $a_n : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{C}$  e  $z_0 \in \mathbb{C}$ .

Si dice serie di potenze centrata in  $z_0 \Leftrightarrow \sum_{n=0}^{+\infty} a_n (z - z_0)^n$

**Osservazione 20.2**

è ovvio che in  $z = z_0$  si ha convergenza....???? (dire a zero)

**Osservazione 20.3**

Per semplicità verrà considerato il caso  $z_0 = 0$  ESEMPIO::  $\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{x^n}{n!} = 1 + x + \frac{1}{2}x^2 + \dots + \frac{1}{n!}x^n = e^x$  ESEMPIO::  $\sum_{n=0}^{+\infty} x^n =$   
 $1 + x + x^2 + \dots + x^n = \frac{1}{1-x}$

**Proposizione 20.4**

Siano  $\{a_n : n \in \mathbb{N}\}$  una successione in  $\mathbb{C}$  e  $w \in \mathbb{C}$ .

La serie di potenze  $\sum_{n=0}^{+\infty} a_n z^n$  converge in  $w$  (cioè  $\sum_{n=0}^{+\infty} a_n w^n$  converge) quando abbiamo la convergenza nella sfera aperta di centro l'origine e raggio  $|w|$

Allora  $\forall r$  con  $0 < r < |w|$ , la serie di potenze  $\sum_{n=0}^{+\infty} a_n z^n$  converge totalmente in  $B(0, r)$

*Dimostrazione.* TIKZPICTURE:::::

devo dimostrare che  $\sum_{n=0}^{+\infty} \sup_{B(0,r)} |a_n z^n| < +\infty$ .

È facile vedere che  $a_n z^n = a_n w^n \left(\frac{z}{w}\right)^n$ .

Quindi passando al modulo e poi al sup si ottiene.

$$\sup_{B(0,r)} |a_n z^n| = \sup_{B(0,r)} |a_n w^n| \left| \frac{z}{w} \right|^n \leq$$

Siccome  $\sum_{n=0}^{+\infty} a_n w^n$  converge quindi il suo termine generale tende a 0.

$$\leq \sup_{B(0,r)} \left| \frac{z}{w} \right|^n \leq \left( \frac{r}{|w|} \right)^n$$

per ipotesi  $r < |w|$  e questo è il termine generale di una serie geometrica convergente.

Ne segue che  $\sum_{n=0}^{+\infty} \sup_{B(0,r)} |a_n z^n|$  è maggiorato da  $\left(\frac{r}{|w|}\right)^n$  e quindi la serie converge totalmente.  $\square$

### Osservazione 20.5

Una volta che abbiamo la convergenza totale abbiamo anche quella uniforme.

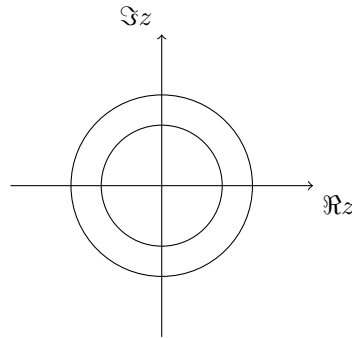
### Proposizione 20.6

la non convergenza in un punto implica la non convergenza fuori dal cerchio

Sia  $a_n : n \in \mathbb{N}$  una successione a valori in  $\mathbb{C}$

La serie  $\sum_{n=0}^{+\infty} a_n z^n$  non converge in  $w$

Allora  $\forall z \in \mathbb{C}$  con  $|z| > |w|$  la serie di potenze  $\sum_{n=0}^{+\infty}$  non converge in  $z$



*Dimostrazione.*

Se per assurdo la serie converge in  $z \Rightarrow$  per il teorema precedente avremmo convergenza in ogni sfera con raggio minore di  $\left|\frac{1}{z}\right|$ , e quindi anche in  $w$  questo nega l'ipotesi. ASSURDO.  $\square$

### Osservazione 20.7

Come è fatto l'insieme su cui si ha convergenza??

segue da queste due ultime proposizioni che se  $\{a_n : n \in \mathbb{N}\}$  è una successione in  $\mathbb{C}$  allora l'insieme  $\left\{ z \in \mathbb{C} : \sum_{n=0}^{+\infty} a_n z^n \text{ converge} \right\}$  è un cerchio.

Sulla circonferenza non ci soffermiamo a capire cosa accade poiché tutto può accadere.

### Definizione 20.8

Raggio di convergenza della serie  $\sum_{n=0}^{+\infty} a_n z^n \Leftrightarrow \rho = \sup \left\{ r \geq 0 : \sum_{n=0}^{+\infty} a_n z^n \text{ converge su } B(0, r) \right\}$

### Osservazione 20.9

Il raggio di convergenza di una serie di potenze può essere 0, un numero reale positivo o  $+\infty$ .

**Osservazione 20.10**

una definizione come  $\rho = \inf \left\{ r \geq 0 : \sum_{n=0}^{+\infty} a_n z^n \text{ non converge su } B(0, r) \right\}$  non sta in piedi poiché questo insieme potrebbe essere vuoto, mentre quello sopra non è mai vuoto, poichè  $r = 0$  c'è sempre poichè in 0 si ha sempre convergenza. Il secondo potrebbe essere vuoto perché ci sono serie che convergono su tutto il piano complesso e quindi non si avrebbe nessun  $r$  fuori da quale non si ha convergenza.

**Proposizione 20.11**

CRITERIO DELLA RADICE.

Data la serie di potenze  $\sum_{n=0}^{+\infty} a_n z^n$ , sia  $l = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt[n]{|a_n|}$ .

Se questo limite esiste, allora il raggio di convergenza è  $\rho = \begin{cases} 0 & \text{se } l = +\infty \\ \frac{1}{l} & \text{se } l \in ]0, +\infty[ \\ +\infty & \text{se } l = 0 \end{cases}$

**Proposizione 20.12**

CRITERIO DEL RAPPORTO.

Data la serie di potenze  $\sum_{n=0}^{+\infty} a_n z^n$ , sia  $l = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_{n+1}}{a_n}$ .

Se questo limite esiste, allora il raggio di convergenza è  $\rho = \begin{cases} 0 & \text{se } l = +\infty \\ \frac{1}{l} & \text{se } l \in ]0, +\infty[ \\ +\infty & \text{se } l = 0 \end{cases}$  ESEMPIO::  $e^z = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{n!} z^n$

$$a_n = \frac{1}{n!} \dots \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = \frac{\frac{1}{(n+1)!}}{\frac{1}{n!}} = \frac{n!}{(n+1)!} = \frac{1}{n+1} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0 \Rightarrow \rho = +\infty$$

$$\text{ESEMPIO}:: \sin(z) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n z^{2n+1}}{(2n+1)!} \text{ quindi } a_n = \begin{cases} 0 & \text{se } n \text{ è pari} \\ \dots & \text{se } n \text{ è dispari} \end{cases}$$

...

...

...

$$\text{ESEMPIO}:: \sin(z) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n z^{2n}}{(2n)!} \text{ quindi } a_n = \begin{cases} \dots & \text{se } n \text{ è pari} \\ 0 & \text{se } n \text{ è dispari} \end{cases}$$

...

...

...

ESEMPIO::  $e^{iy}$  con  $y \in \mathbb{R}$ 

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

$$1. \ i^{2n} = (i^2)^n = (-1)^n$$

$$2. \ i^{2n+1} = i (i^2)^n = i(-1)^n$$

$$\text{ESEMPIO}:: e^{i\pi} + 1 = \cos(\pi) + i \cdot \sin(\pi) = 0$$

$$\text{ESEMPIO}:: \sum_{n=0}^{+\infty} z^n = \frac{1}{1-z} \text{ con } \rho = 1 \text{ ESEMPIO}:: \text{ Sia } f(x) = \frac{1}{1+x^2} = \frac{1}{1-(-x^2)} = \sum_{n=0}^{+\infty} (-x^2)^n = \sum_{n=0}^{+\infty} (-1)^n x^{2n}$$

QUI GRAFICO .....

.....

Questa serie converge esclusivamente per  $|x| < 1$ , mentre la funzione  $f$  è definita su tutto  $\mathbb{R}$ ,  $f \in C^\infty(\mathbb{R}; \mathbb{R})$

In  $\mathbb{C}$ , la funzione  $f(z) = \frac{1}{1+z^2}$  è la somma della serie  $\sum_{n=0}^{+\infty} (-1)^n z^{2n}$  che ha raggio di convergenza  $\rho = 1$ . Infatti,

$f(z)$  è singolare sia in  $z = i$  sia in  $z = -i$ .

ALTRO GRAFICO:::

.....

## 20.2 Serie di Taylor

ESEMPIO::  $\ln(1+z)$ . Calcolare la Serie di Taylor.

$$D[\ln(1+z)] = \frac{1}{1+z} = \sum_{n=0}^{+\infty} (-1)^n z^n$$

$$\int \sum_{n=0}^{+\infty} (-1)^n z^n dz = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{n+1} z^{n+1} = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n} z^n$$

### Lemma 20.13

Sia  $\{a_n : n \in \mathbb{N}\}$  una successione a valori in  $\mathbb{C}$ . Le serie:

$$\sum_{n=0}^{+\infty} a_n z^n, \quad \sum_{n=1}^{+\infty} n a_n z^{n-1} \quad \text{e} \quad \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{a_n}{n+1} z^{n+1}$$

hanno lo stesso raggio di convergenza

*Dimostrazione.* Omissa □

### Definizione 20.14

Sia  $r \in \mathbb{R}$  con  $r > 0$ . La funzione  $f$  si dice analitica su  $] -r, r[ \Leftrightarrow f(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n x^n \quad \forall x \in ] -r, r[$  per opportuni  $a_n \in \mathbb{R}$

### Osservazione 20.15

In altre parole chiamiamo analitica una funzione che può essere scritta come somma di una serie di potenze convergente su  $] -r, r[$

ESEMPIO::  $x \rightarrow e^x$  è analitica su  $\mathbb{R}$

ESEMPIO::  $x \rightarrow \frac{1}{1+x^2}$  è analitica su  $] -1, 1[$

### Proposizione 20.16

Se  $f$  è analitica su  $] -r, r[$  per  $r \in \mathbb{R}$  e  $r > 0 \Rightarrow f \in \mathbf{C}^0(]-r, r[; \mathbb{R})$

*Dimostrazione.*  $f$  è analitica allora posso scriverla come  $f = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n x^n$  cioè la funzione è limite di una serie, se la serie converge totalmente allora converge uniformemente. Il limite uniforme di funzioni continue (in questo caso polinomi) è una funzione continua. cioè la  $f$  è continua. □

### Proposizione 20.17

PROP+PROOF

Sia  $f : ] -r, r[ \rightarrow \mathbb{R}$  e  $f$  analitica su  $] -r, r[ \Leftrightarrow f(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n x^n \Rightarrow$  ho convergenza totale  $\Rightarrow$  ho convergenza uniforme di funzioni continue

$$\Rightarrow f \in \mathbf{C}^0(]-r, r[; \mathbb{R}), \quad a_0 = f(0)$$

La serie delle derivate  $\sum_{n=0}^{+\infty} n a_n x^{n-1}$  converge totalmente su  $] -r, r[$  cioè

$$\sum_{n=0}^{+\infty} f'(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} n a_n x^{n-1} \xrightarrow{u} g$$



$$\sum_{n=0}^{+\infty} f^{(n)}(0) \rightarrow f(0), f_n \in \text{????????????}$$

Allora la serie delle derivate converge alla derivata della serie

$$\Rightarrow \in \mathbf{C}^1(]-r, r[; \mathbb{R}), \quad a_1 = f'(0)$$

Questo ragionamento può essere ripetuto:

$$\Rightarrow \forall k \in \mathbb{N}, \quad f \in \mathbf{C}^k(]-r, r[; \mathbb{R}), \quad a_k = k! f^{(k)}(0)$$

e analogamente

$$f \in \mathbf{C}^\infty(]-r, r[; \mathbb{R}), \quad f(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{n!} f^{(n)}(0) x^n$$

### Osservazione 20.18

Qui abbiamo detto se  $f$  è analitica  $\Rightarrow \dots$ , vorrei fare un qualche tipo di viceversa per poter capire se  $f$  è analitica o no.

### Proposizione 20.19

Sia  $f : ]-r, r[ \rightarrow \mathbb{R}$

$$\left. \begin{array}{l} f \in \mathbf{C}^\infty(]-r, r[; \mathbb{R}) \\ \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{n!} f^{(n)}(0) x^n \text{ converge totalmente su } ]-r, r[ \end{array} \right\} \Rightarrow f \text{ è analitica } \dots$$

Per avere  $f$  analitica necessariamente come ipotesi deve esserci  $f \in \mathbf{C}^\infty$  e  $f$  che si può scrivere come sviluppo in serie di Taylor, dalla proposizione precedente. Questo basta? NO

$$\text{ESEMPIO: } f(x) = \begin{cases} 0 & x = 0 \\ e^{-\frac{1}{x^2}} & x \neq 0 \end{cases}$$

$$1. f \in \mathbf{C}^\infty(\mathbb{R}; \mathbb{R})$$

$$2. \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{n!} f^{(n)}(0) x^n \text{ converge totalmente su } \mathbb{R}$$

$$3. f(x) \neq \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{n!} f^{(n)}(0) x^n$$

$$1. \text{ Vediamo se è } \mathbf{C}^0, \text{ quindi calcolo } \lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) = \lim_{x \rightarrow 0^-} f(x) = 0 = f(0) \Rightarrow f \in \mathbf{C}^0(\mathbb{R}; \mathbb{R}).$$

Ora calcoliamo la derivata fuori dallo zero, ne facciamo il limite per  $x \rightarrow 0$  da destra e da sinistra e vediamo cosa succede.

$$\text{Se } x \neq 0, f'(x) = \frac{2}{x^3} e^{-\frac{1}{x^3}} \text{ e } \lim_{x \rightarrow 0^+} f'(x) = \lim_{x \rightarrow 0^-} f'(x) = 0 \Rightarrow f \in \mathbf{C}^1(\mathbb{R}; \mathbb{R})$$

.....

ancora una derivata.....

.....

Continuando a derivare avremmo sempre un rapporto di polinomi che moltiplica un esponenziale, e l'esponenziale vince sempre. quindi fa 0. itero il ragionamento.....

.....

2. In (1) abbiamo visto che tutte le derivate nello zero si annullavano, cioè

$$\forall n \in \mathbb{N}, f^{(n)}(0) = 0 \Rightarrow \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{n!} f^{(n)}(0) x^n$$

è la serie identicamente nulla che banalmente converge totalmente su tutto  $\mathbb{R}$

3. Anche osservando il grafico è chiaro che la  $f$  non è la funzione identicamente nulla cioè è diversa dal suo sviluppo in serie

$$f(x) \neq \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{n!} f^{(n)}(0) x^n$$

Il Problema nasce dall' $o(x^n)$  che scriviamo alla fine dello sviluppo  $n$ -esimo di questa funzione, perché l'intorno in cui si ha  $o(x^n)$  diventa sempre più piccolo. GRAFICO...

GRAFICO...

Mandando l'ordine  $n$  all'infinito, l'intervallo su cui si ha l' $o$  piccolo tende a diventare un punto (lo zero). Quindi abbiamo l'uguaglianza tra la funzione e il suo sviluppo solo nell'origine.???????NON COMPRESA????

???????NON COMPRESA????

???????NON COMPRESA????

???????NON COMPRESA????

Completiamo le ipotesi con la prossima proposizione:

### Proposizione 20.20

Sia  $f : ]-r, r[ \rightarrow \mathbb{R}$

$$\left. \begin{array}{l} f \in C^\infty(]-r, r[; \mathbb{R}) \\ \exists H, K > 0 : \forall n \in \mathbb{N} \sup_{]-r, r[} |f^{(n)}(x)| \leq HK^n \end{array} \right\} \Rightarrow f(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{n!} f^{(n)}(0) x^n$$

### Osservazione 20.21

L'ipotesi centrale ..... qui non c'è

### Osservazione 20.22

Sia  $\sum_{n=0}^{+\infty} (z, w)^n$  una serie di potenze in due variabili.

Quando abbiamo due variabili, non si può parlare di raggio di convergenza. Questa serie è una serie geometrica che converge sse  $|zw| < 1$ . È difficile parlare di raggio di convergenza perché essendo  $z, w \in \mathbb{C}$ , se per una variabile servono due dimensioni per due variabili servono quattro dimensioni, e anche se non riusciamo a fare il disegno è evidente che l'insieme su cui la serie converge non è un cerchio(sfera).

**Esempio 20.23** (Esempi di Sviluppi in serie di Taylor)  $e^x = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{n!} x^n$

$$\sin(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)!} x^{(2n+1)}$$

$$\sinh(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{(2n+1)!} x^{(2n+1)}$$

$$\cos(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{(2n)!} x^{(2n)}$$

$$\cosh(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{(2n)!} x^{(2n)}$$

$$\frac{1}{1-x} = \sum_{n=0}^{+\infty} x^n$$

$$\ln(1+x) = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} x^n$$

$$\arctan(1+x) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} x^{(2n+1)}$$

$$\frac{1}{1+x^2} = \sum_{n=0}^{+\infty} (-1)^n x^{2n}$$

$$\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{n^\lambda} = \begin{cases} \text{converge sse } \lambda > 1 \\ \text{diverge sse } \lambda \leq 1 \end{cases}$$

$$\sum_{n=0}^{+\infty} q^n = \begin{cases} \text{converge sse } |q| < 1, S = \frac{1}{1-q} \\ \text{diverge sse } |q| > 1 \text{ o } q = 1 \\ \quad \quad \quad \nexists \text{ sse } q = -1 \end{cases}$$

**Esercizio 20.24**

Determinare le derivate delle funzioni

- $x \rightarrow \sin x$
- $x \rightarrow \cos x$
- $x \rightarrow e^x$

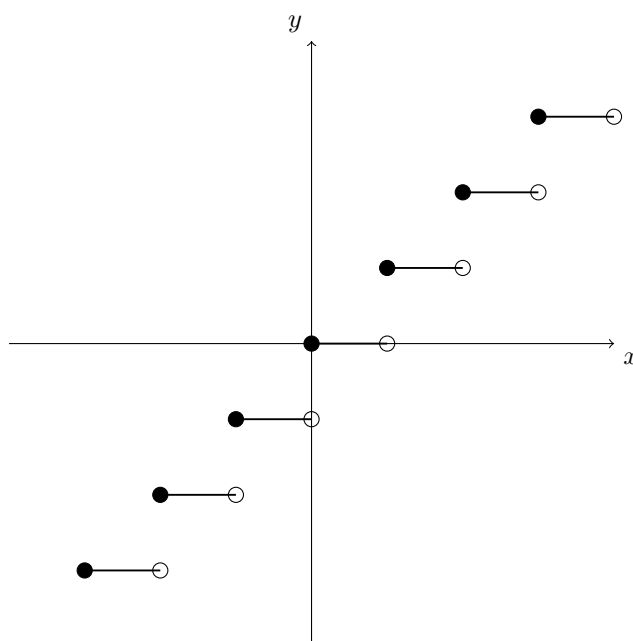
utilizzando [Esempio 20.23 \(Esempi di Sviluppi in serie di Taylor\)](#), il [Lemma 20.13](#) ed il [Corollario 19.38](#).

**20.3 Serie di Fourier****Definizione 20.25**

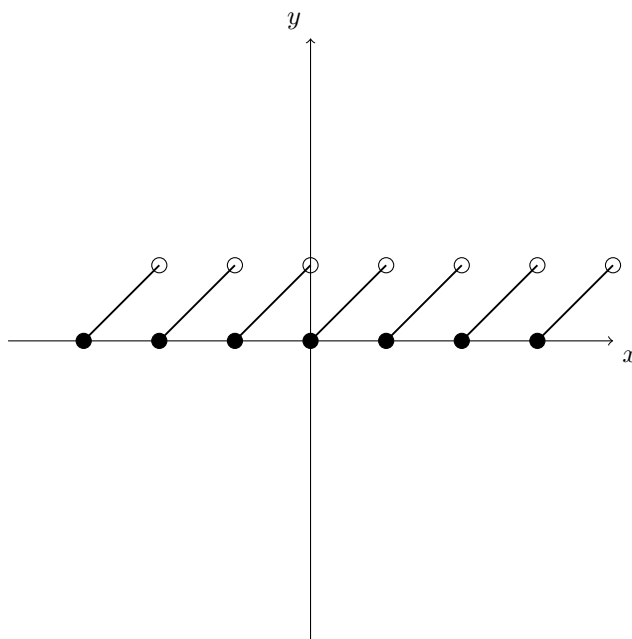
Siano  $A \subseteq \mathbb{R}$ ,  $f : A \rightarrow \mathbb{R}$  e  $T > 0$ ,  $f$  è  $T$ -periodica  $\Leftrightarrow \forall x \in A \begin{cases} x + T \in A \\ f(x + T) = f(x) \end{cases}$

ESEMPIO::  $[x] = \text{parte intera} = \max \{k \in \mathbb{Z} : k \leq x\}$

$$[\pi] = 3, \quad [\sqrt{2}] = 1 \quad [-e] = -3$$



è 1-periodica. ESEMPIO::  $\text{mant}(x) = \text{mantissa di } x = x - [x]$



è 1-periodica.

**Osservazione 20.26**

La funzione costante è  $T$ -periodica  $\forall T > 0$ , ma non ha un periodo minimo, per questo motivo non la consideriamo.

**Osservazione 20.27**

Sia  $f : A \rightarrow \mathbb{R}$   $T$ -periodica. Allora possiamo definire  $\bar{f} : \bar{A} \rightarrow \mathbb{R}$  che sia  $2\pi$ -periodica data da:

$$x \rightarrow f\left(\frac{T}{2\pi}x\right), \quad \bar{A} = \frac{2\pi}{T}A$$

**Proposizione 20.28**

Siano  $A \subseteq \mathbb{R}$ ,  $f : A \rightarrow \mathbb{R}$  e  $T > 0$

$f$  è  $T$ -periodica  $\Rightarrow \forall n \in \mathbb{N}$ ,  $f$  è  $nT$ -periodica.

**Proposizione 20.29**

Sia  $f : [0, 2\pi[ \rightarrow \mathbb{R} \Rightarrow \exists! \hat{f} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  t.c.:  $\begin{cases} \hat{f} \text{ } 2\pi\text{-periodica} \\ \hat{f}|_{[0, 2\pi]} = f \end{cases}$

*Dimostrazione.*  $\forall x \in \mathbb{R}. \exists! \hat{x} \in [0, 2\pi[$  t.c.:  $x = 2\pi \cdot k + \hat{x}$  con  $k \in \mathbb{Z}$  e  $k = [?????]$

$$\hat{f}(x) = f(\hat{x})$$

□

cioè se noi estendiamo una funzione definita su  $[0, 2\pi[$  a tutto  $\mathbb{R}$  otteniamo una funzione unica e periodica.

**Osservazione 20.30**

Con i polinomi di Taylor .....

.....

.....

.....

.....

.....

**Definizione 20.31**

Dati  $2n+1$  numeri reali  $a_0, a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n$  si dice polinomio trigonometrico di coefficienti  $a_0, a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n$  la funzione:

$$\begin{aligned} p : [-\pi, \pi] &\rightarrow \mathbb{R} \\ x &\rightarrow \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^N (a_k \cos(kx) + b_k \sin(kx)) \end{aligned}$$

**Osservazione 20.32**

Essendo un'approssimazione, si deve aggiungere l'errore. Come è fatto?. Per far uscire conti giusti e comodi andrebbe usata la distanza quadratica, ma questo prevede una lunga parte introduttiva, noi allora lo stimiamo con la distanza infinita.

**Definizione 20.33**

Date due successioni di numeri reali  $\{a_n : n \in \mathbb{N}\}, \{b_n : n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}\}$ , si definisce serie trigonometrica di coefficienti  $\{a_n : n \in \mathbb{N}\}, \{b_n : n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}\}$  la serie

$$\begin{aligned} \mathfrak{F} : [-\pi, \pi] &\rightarrow \mathbb{R} \\ x &\rightarrow \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{+\infty} (a_k \cos(kx) + b_k \sin(kx)) \end{aligned}$$

LEMMA::

Se  $h, k \in \mathbb{N}$  valgono le seguenti uguaglianze:

$$\begin{aligned} * \int_{-\pi}^{\pi} \cos(hx) \cos(kx) &= \begin{cases} 0 & h \neq k \\ \pi & 0 \neq h = k \\ 2\pi & 0 = h = k \end{cases} \\ * \int_{-\pi}^{\pi} \cos(hx) \sin(kx) &= 0 \\ * \int_{-\pi}^{\pi} \sin(hx) \sin(kx) &= \begin{cases} 0 & h \neq k \text{ oppure } h = k = 0 \\ \pi & 0 \neq h = k \end{cases} \end{aligned}$$

ESERCIZIO:: IL POLINOMIO DI FOURIER FORNISCE LA MIGLIORE APPROSSIMAZIONE NEL SENSO DELLA DISTANZA QUADRATICA.

Sia  $f : [-\pi, \pi] \mapsto \mathbb{R}$ , quale è la funzione a lei più vicina nel senso della distanza quadratica?

Fisso  $N \in \mathbb{N}$  e prendo il polinomio trigonometrico di grado  $N$

$$p_N(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^N a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)$$

con  $a_0, a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n \in \mathbb{R}$ , il problema è quello di minimizzare  $d_2(f, p_n)$  quindi un problema di minimo.

Stiamo cercando i coefficienti del polinomio trigonometrico quindi studiamo una funzione  $\varphi(a_0, a_1, \dots, a_N, b_1, \dots, b_N) =$

$$\sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} [f(x) - p_n(x)]^2 dx}.$$

Essendo la funzione radice quadrata monotona crescente ne studiamo solo il radicando:

$$\varphi(a_0, a_1, \dots, a_N, b_1, \dots, b_N) = \int_{-\pi}^{\pi} \left[ \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^N a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx) - f(x) \right]^2 dx$$

**Osservazione 20.34**

con  $f \in C^1$ :

$$F(\alpha, \beta, x) = \int_{\alpha}^{\beta} f(x, t) dt$$

$$\partial_{\alpha} F(\alpha, \beta, x) = -f(x, \alpha)$$

$$\partial_{\beta} F(\alpha, \beta, x) = f(x, \beta)$$

$$\nabla_x F(\alpha, \beta, x) = \int_{\alpha}^{\beta} \nabla_x f(x, t) dt$$

Quindi applicando al nostro caso otteniamo

$$\begin{aligned} \partial_{a_0} \varphi &= \int_{-\pi}^{\pi} \partial_{a_0} \left( \left[ \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^N a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx) - f(x) \right]^2 \right) dx = \\ &= \int_{-\pi}^{\pi} \frac{1}{2} 2 \left( \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^N a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx) - f(x) \right) dx = \\ &= \int_{-\pi}^{\pi} \frac{a_0}{2} dx + \\ &\quad \int_{-\pi}^{\pi} a_1 \cos(x) dx + \dots + \int_{-\pi}^{\pi} a_N \cos(Nx) dx + \\ &\quad \int_{-\pi}^{\pi} b_1 \sin(x) dx + \dots + \int_{-\pi}^{\pi} b_N \sin(Nx) dx - \\ &\quad \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx = \end{aligned}$$

L'integrale di una senoide su un multiplo intero del periodo è 0 quindi

$$= \pi a_0 - \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx$$

Calcolando direttamente anche le derivate seconde si ottiene che

$$\partial_{a_0 a_0}^2 = \pi \quad \partial_{a_0 a_n}^2 = 0 \quad \partial_{a_0 b_n}^2 = 0 \quad \forall n = 1, \dots, N$$

$$\begin{aligned} \partial_{a_k} \varphi &= \int_{-\pi}^{\pi} \partial_{a_k} \left( \left[ \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^N a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx) - f(x) \right]^2 \right) dx = \\ &= \int_{-\pi}^{\pi} 2 \cos(kx) \left[ \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^N a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx) - f(x) \right] dx = \\ &= \int_{-\pi}^{\pi} \cancel{a_0 \cos(kx)} dx + \\ &\quad \int_{-\pi}^{\pi} \cancel{2a_1 \cos(x) \cos(kx)} dx + \dots + \int_{-\pi}^{\pi} 2a_k \cos(kx) \cos(kx) dx \dots + \int_{-\pi}^{\pi} \cancel{2a_N \cos(Nx) \cos(kx)} dx + \\ &\quad \int_{-\pi}^{\pi} \cancel{2b_1 \sin(x) \cos(kx)} dx + \dots + \int_{-\pi}^{\pi} \cancel{2b_k \sin(kx) \cos(kx)} dx \dots + \int_{-\pi}^{\pi} \cancel{2b_N \sin(Nx) \cos(kx)} dx - \\ &\quad \int_{-\pi}^{\pi} 2f(x) \cos(kx) dx = \end{aligned}$$

E anche applicando il lemma

$$= 2\pi \left[ a_k - \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(kx) dx \right]$$

Calcolando direttamente anche le derivate seconde si ottiene che

$$\partial_{a_k a_0}^2 = \pi \quad \partial_{a_k a_n}^2 = \begin{cases} 0 & n \neq k \\ 2\pi & n = k \end{cases} \quad \partial_{a_k b_n}^2 = 0 \quad \forall n = 1, \dots, N$$

$$\begin{aligned}
\partial_{b_k} \varphi &= \int_{-\pi}^{\pi} \partial_{b_k} \left( \left[ \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^N a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx) - f(x) \right]^2 \right) dx = \\
&= \int_{-\pi}^{\pi} 2 \sin(kx) \left[ \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^N a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx) - f(x) \right] dx = \\
&= \int_{-\pi}^{\pi} \cancel{a_0 \sin(kx)} dx + \\
&\quad \int_{-\pi}^{\pi} \cancel{2a_1 \cos(x) \sin(kx)} dx + \dots + \int_{-\pi}^{\pi} \cancel{2a_k \cos(kx) \sin(kx)} dx \dots + \int_{-\pi}^{\pi} \cancel{2a_N \cos(Nx) \sin(kx)} dx + \\
&\quad \int_{-\pi}^{\pi} \cancel{2b_1 \sin(x) \sin(kx)} dx + \dots + \int_{-\pi}^{\pi} 2b_k \sin(kx) \sin(kx) dx \dots + \int_{-\pi}^{\pi} \cancel{2b_N \sin(Nx) \sin(kx)} dx - \\
&\quad \int_{-\pi}^{\pi} 2f(x) \sin(kx) dx =
\end{aligned}$$

E anche applicando il lemma

$$= 2\pi \left[ b_k - \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(kx) dx \right]$$

Calcolando direttamente anche le derivate seconde si ottiene che

$$\partial_{b_k a_0}^2 = \pi \quad \partial_{b_k a_n}^2 = \begin{cases} 0 & n \neq k \\ 2\pi & n = k \end{cases} \quad \partial_{b_k b_n}^2 = 0 \quad \forall n = 1, \dots, N$$

Si verifica la condizione  $\nabla \varphi = 0$  con

$$* a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx$$

$$* a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(kx) dx$$

$$* b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(kx) dx$$

La matrice Hessiana di  $\varphi$  risulta

$$H_{\varphi} = \begin{bmatrix} \pi & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 2\pi & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 2\pi & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 \dots & 2\pi \end{bmatrix}$$

è una matrice diagonale quindi si leggono direttamente tutti gli autovalori che sono strettamente positivi quindi la forma quadratica è definita positiva ed il punto in questione è un punto di minimo assoluto.

### Definizione 20.35

Sia  $f : [-\pi, \pi] \mapsto \mathbb{R}$ , i coefficienti di Fourier di  $f$  sono (ovviamente  $f$  deve essere tale da ammetterli finiti):

$$\begin{aligned}
a_0 &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx \\
a_k &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(kx) dx \quad k \in \mathbb{N} \setminus \{0\} \\
b_k &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(kx) dx \quad k \in \mathbb{N} \setminus \{0\}
\end{aligned}$$

La serie di Fourier di  $f$  è

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{+\infty} a_k \cos(kx) + b_k \sin(kx)$$

**Proposizione 20.36**

Sia  $F : [-\pi, \pi] \mapsto \mathbb{R}$  la somma della serie trigono metrica definita dai coefficienti  $\{a_n : n \in \mathbb{N}\}$  e  $\{a_n : n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}\}$  e la serie trigonometrica converge uniformemente allora  $F$  è una funzione continua e

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} F(x) \cos(kx) dx \quad k \in \mathbb{N}$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} F(x) \sin(kx) dx \quad k \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$$

ESEMPIO+DIMOSTRAZIONE::

sia  $f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{+\infty} a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)$ . Allora:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{+\infty} a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx) dx = \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{a_0}{2} + \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left( \sum_{n=1}^{+\infty} a_n \cos(nx) \right) dx + \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left( \sum_{n=1}^{+\infty} b_n \cos(nx) \right) dx \end{aligned}$$

Poiché si ha convergenza uniforme si può portare l'integrale dentro la sommatoria.

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{a_0}{2} + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{+\infty} \int_{-\pi}^{\pi} a_n \cos(nx) dx + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{+\infty} \int_{-\pi}^{\pi} b_n \cos(nx) dx = \\ &= \frac{1}{\pi} \frac{a_0}{2} (\pi - (-\pi)) = a_0 \end{aligned}$$

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(kx) dx =$$

$$\begin{aligned} &\frac{1}{\pi} \left[ \int_{-\pi}^{\pi} \frac{a_0}{2} \cos(kx) dx + \int_{-\pi}^{\pi} \left( \sum_{n=1}^{+\infty} a_n \cos(nx) \cos(kx) \right) dx + \int_{-\pi}^{\pi} \left( \sum_{n=1}^{+\infty} b_n \sin(nx) \cos(kx) \right) dx \right] = \\ &\frac{1}{\pi} \left[ \int_{-\pi}^{\pi} \left( \sum_{n=1}^{k-1} a_n \cos(nx) \cos(kx) \right) dx + \int_{-\pi}^{\pi} a_k \cos(kx) \cos(kx) dx + \int_{-\pi}^{\pi} \left( \sum_{n=k+1}^{+\infty} a_n \cos(nx) \cos(kx) \right) dx \right] = \\ &= \frac{1}{\pi} \pi a_k = a_k \end{aligned}$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(kx) dx =$$

$$\begin{aligned} &\frac{1}{\pi} \left[ \int_{-\pi}^{\pi} \frac{a_0}{2} \sin(kx) dx + \int_{-\pi}^{\pi} \left( \sum_{n=1}^{+\infty} a_n \cos(nx) \sin(kx) \right) dx + \int_{-\pi}^{\pi} \left( \sum_{n=1}^{+\infty} b_n \sin(nx) \sin(kx) \right) dx \right] = \\ &\frac{1}{\pi} \left[ \int_{-\pi}^{\pi} \left( \sum_{n=1}^{k-1} a_n \cos(nx) \sin(kx) \right) dx + \int_{-\pi}^{\pi} a_k \cos(kx) \sin(kx) dx + \int_{-\pi}^{\pi} \left( \sum_{n=k+1}^{+\infty} a_n \cos(nx) \sin(kx) \right) dx \right] = \\ &= \frac{1}{\pi} \pi b_k = b_k \end{aligned}$$

**Osservazione 20.37**

Se  $d_2(f, \text{polinomio di Fourier})$  è minima  $\Rightarrow$  il polinomio di Fourier è costruito con i coefficienti di Fourier di  $f$ .

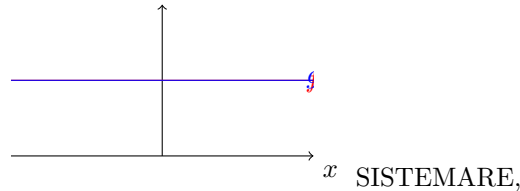


**Osservazione 20.38**

Se  $f$  è somma di una serie di funzioni  $\Rightarrow$  i coefficienti della serie sono i coefficienti di Fourier.

**Osservazione 20.39**

Funzioni diverse possono avere gli stessi coefficienti di Fourier, cioè  $\exists f, g$  con  $f \neq g$  ma  $f$  e  $g$  hanno gli stessi coefficienti di Fourier. ESEMPIO::

**Osservazione 20.40**

I coefficienti di Fourier non possono identificare univocamente puntualmente una funzione.

**Punto Di Vista Geometrico**

In  $\mathbb{R}^2$  Ci sono 2 vettori  $\hat{i}, \hat{j}$  della base, se  $\underline{v} \in \mathbb{R}^2 \Rightarrow \underline{v} = v_1 \cdot \hat{i} + v_2 \cdot \hat{j}$  con  $v_1, v_2$  componenti di  $\underline{v}$   
Calcolo delle componenti:

$$\begin{aligned}\underline{v} \cdot \hat{i} &= v_1 \cdot \hat{i} \cdot \hat{i} + v_2 \cdot \hat{j} \cdot \hat{i} = v_1 \\ \underline{v} \cdot \hat{j} &= v_1 \cdot \hat{i} \cdot \hat{j} + v_2 \cdot \hat{j} \cdot \hat{j} = v_2\end{aligned}$$

Questo vale perché  $\hat{i}, \hat{j}$  è una base ortonormale. In  $\mathbb{R}^3$  Ci sono 3 vettori  $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$  della base, se  $\underline{v} \in \mathbb{R}^3 \Rightarrow \underline{v} = v_1 \hat{i} + v_2 \hat{j} + v_3 \hat{k}$  con  $v_1, v_2, v_3$  componenti di  $\underline{v}$

Calcolo delle componenti:

$$v_1 = \underline{v} \cdot \hat{i} \quad v_2 = \underline{v} \cdot \hat{j} \quad v_3 = \underline{v} \cdot \hat{k}$$

In  $\mathbb{R}^n$  Ci sono  $n$  vettori  $e_1, e_2, \dots, e_n$  della base, se  $\underline{v} \in \mathbb{R}^n \Rightarrow \underline{v} = v_1 \cdot e_1 + v_2 \cdot e_2 + \dots + v_n \cdot e_n = \sum_{k=1}^n v_k \cdot e_k$  con  $v_1, v_2, \dots, v_n$  componenti di  $\underline{v}$

Calcolo delle componenti:

$$v_k = \underline{v} \cdot e_k$$

Con le Serie di Fourier si esegue la stessa operazione sullo spazi  $\mathbf{C}^0([-\pi, \pi]; \mathbb{R})$ . Come elementi di base si ha un insieme di funzioni:

1.  $c_0 : x \rightarrow 1$
2.  $c_1 : x \rightarrow \cos(x)$
3.  $c_2 : x \rightarrow \cos(2x)$
4.  $\dots$
5.  $c_n : x \rightarrow \cos(nx)$
6.  $s_1 : x \rightarrow \sin(x)$
7.  $s_2 : x \rightarrow \sin(2x)$
8.  $\dots$
9.  $s_n : x \rightarrow \sin(nx)$

Si possono osservare due cose:

1. Sono tutte funzioni linearmente indipendenti, poiché l'unica combinazione lineare di questi elementi che da l'elemento nullo è quella a coefficienti tutti nulli.

**Definizione 20.41**

Il prodotto scalare in  $\mathbf{C}^0 \Rightarrow \langle f, g \rangle = \int_{-\pi}^{\pi} f(x)g(x) dx$  Altre simbologie usate sono:  $f \bullet g, (f|g)$

**Osservazione 20.42**

linearità

$$\begin{aligned} \langle (\alpha \cdot f + \beta \cdot g), h \rangle &= \int_{-\pi}^{\pi} (\alpha \cdot f(x) + \beta \cdot g(x)) \cdot h(x) dx = \\ &= \int_{-\pi}^{\pi} [\alpha \cdot f(x) \cdot h(x) + \beta \cdot g(x) \cdot h(x)] dx = \\ &= \alpha \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot h(x) dx + \beta \int_{-\pi}^{\pi} g(x) \cdot h(x) dx = \\ &\quad \alpha \langle f, h \rangle + \beta \langle g, h \rangle \end{aligned}$$

Ripetiamo lo stesso ragionamento applicato in  $\mathbb{R}^2, \mathbb{R}^3$ , e  $\mathbb{R}^n$  per ricavare le componenti, possiamo fare questo perché abbiamo una base e abbiamo definito un prodotto scalare.

Se  $f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{+\infty} a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx) \Rightarrow$

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx = \frac{1}{\pi} \langle f, c_0 \rangle \\ a_k &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(kx) dx = \frac{1}{\pi} \langle f, c_k \rangle \\ b_k &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(kx) dx = \frac{1}{\pi} \langle f, s_k \rangle \end{aligned}$$

Quindi come prima le componenti di un vettore si ottengono moltiplicando (prodotto scalare) il vettore per gli elementi della base.

PER IL LEMMA:

$$\begin{aligned} \langle c_h, c_k \rangle &= \begin{cases} 0 & h \neq k \\ 2\pi & 0 = h = k \\ \pi & 0 \neq h = k \end{cases} \\ \langle c_h, s_k \rangle &= 0 \\ \langle s_h, s_k \rangle &= \begin{cases} 0 & h \neq k \\ \pi & 0 \neq h = k \end{cases} \end{aligned}$$

Il prodotto scalare di elementi diversi è nullo quindi la base è ortogonale, ma non è ortonormale in quanto il prodotto scalare tra due elementi diversi della base non è unitario. (ecco perché gli  $\frac{1}{\pi}$  e  $\frac{a_0}{2}$ )

In generale in geometria non è difficile normalizzare una base, è sufficiente dividere tutti gli elementi per la loro norma. In questo caso decidiamo di non applicare questo ragionamento poiché la norma vale  $\sqrt{\pi}$  e se normalizziamo dobbiamo aggiungere questi termini .....

Il prodotto scalare in  $\mathbf{C}^0$  è molto legato alla  $d_2$  infatti:

$$\|f\|_2 = \sqrt{\langle f, f \rangle} = \sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot f(x) dx} = \sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} [f(x)]^2 dx}$$

Continuano le analogie:

In  $\mathbb{R}^2$  .....

In  $\mathbb{R}^3$  .....

.....

.....

.....

.....

Passando in dimensione infinita, abbiamo una funzione  $f$  (come vettore  $\underline{v}$ ) nello spazio, e fare il polinomio di Fourier vuole dire proiettare la funzione  $f$  in uno spazio fatto dai primi  $2n + 1$  elementi della base che è uno spazio di dimensione finita.

Esempio::: Non ogni funzione ammette coefficienti di Fourier finiti. La funzione

$$\begin{aligned} f : [-\pi, \pi] &\rightarrow \mathbb{R} \\ x &\rightarrow \begin{cases} 0 & x = 0 \\ \frac{1}{x^2} & x \neq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

non ammette coefficienti di Fourier finiti.

Esempio::: Una funzione può ammettere tutti i coefficienti di Fourier finiti ed una serie di Fourier convergente, ma ad un limite diverso da  $f$ . La funzione.

$$\begin{aligned} f : [-\pi, \pi] &\rightarrow \mathbb{R} \\ x &\rightarrow \begin{cases} -1 & x < 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases} \end{aligned}$$

ha coefficienti di Fourier

$$a_k = 0 \quad \forall k, \quad \begin{cases} 0 & k \text{ dispari} \\ \frac{4}{k\pi} & k \text{ pari} \end{cases}$$

e serie di Fourier

$$F_f(x) = \frac{4}{\pi} \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{\sin(2h+1)x}{2h+1}$$

questa serie converge puntualmente in 0 ma  $F_f(0) \neq f(0)$

ESEMPIO:: Due funzioni diverse possono avere gli stessi coefficienti di Fourier:

$$\begin{aligned} f : [-\pi, \pi] &\rightarrow \mathbb{R} \\ x &\rightarrow \begin{cases} -1 & x < 0 \\ 0 & x = 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} g : [-\pi, \pi] &\rightarrow \mathbb{R} \\ x &\rightarrow \begin{cases} -1 & x < 0 \\ \pi & x = 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases} \end{aligned}$$

### Osservazione 20.43

Sia  $f$  una funzione pari  $\Rightarrow b_n = 0 \forall n = 1, 2, \dots, +\infty$

### Osservazione 20.44

Sia  $f$  una funzione dispari  $\Rightarrow a_n = 0 \forall n = 0, 1, \dots, +\infty$

### Osservazione 20.45

Siano

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{+\infty} (a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx))$$

$$\varphi(x) = \frac{\alpha_0}{2} + \sum_{n=1}^{+\infty} (\alpha_n \cos(nx) + \beta_n \sin(nx))$$

Allora

$$F(x) = (f + \varphi)(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{+\infty} (A_n \cos(nx) + B_n \sin(nx))$$

con  $A_n = a_n + \alpha_n$ .  $B_n = b_n + \beta_n$ . cioè i coefficienti di Fourier dipendono linearmente dalla funzione.

Esempio:::  $B_3 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} F(x) \sin(3x) dx = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} (f(x) + \varphi(x)) \sin(3x) dx =$

$$\frac{1}{\pi} \left[ \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(3x) dx + \int_{-\pi}^{\pi} \varphi(x) \sin(3x) dx \right] = b_3 + \beta_3$$

Sia  $f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum \liminf_{n=1}^{+\infty} (a_n \cos(nx) + b_n \cos(nx))$  allora  $F = 4f = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{+\infty} (A_n \cos(nx) + B_n \cos(nx))$  con

$$A_n = 4a_n, B_n = 4b_n$$

$$\text{ESEMPIO Esempio:::} B_3 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} F(x) \sin(3x) dx = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} 4f(x) \sin(3x) dx = 4b_3$$

#### Definizione 20.46 (Funzione Continua a Tratti)

Siano  $a, b \in \mathbb{R}$  con  $a < b$ , una funzione  $f : [a, b] \mapsto \mathbb{R}$ . Allora  $f$  è **continua a tratti** se esiste un numero finito di punti  $x_1, x_2, \dots, x_n$  tali che:

1. In ogni punto di  $[a, b] \setminus \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$   $f$  è continua
2.  $i = 1, 2, \dots, n$  esistono finiti entrambi i limiti:

$$\lim_{x \rightarrow x_i^-} f(x) \quad \lim_{x \rightarrow x_i^+} f(x)$$

#### Osservazione 20.47

Dato  $A \subseteq \mathbb{R}$  e data una funzione  $f : A \mapsto \mathbb{R}$ , se  $x_0$  è punto interno ad  $A$ , è comoda la notazione

$$f(x-) = \lim_{\xi \rightarrow x^-} f(\xi) \quad f(x+) = \lim_{\xi \rightarrow x^+} f(\xi)$$

Ovviamente se  $f$  è continua in  $x$  allora  $f(x-) = f(x) = f(x+)$  ESEMPIO:::

GRAFICO:::

GRAFICO:::

.....

.....

.....

.....

#### Proposizione 20.48

Sia  $f : [-\pi, \pi] \mapsto \mathbb{R}$ ,  $f$  è continua a tratti  $\Rightarrow$  esistono finiti tutti i coefficienti di Fourier di  $f$

#### Proposizione 20.49

Sia  $f : [-\pi, \pi] \mapsto \mathbb{R}$ ,

-  $f$  è continua a tratti

-  $\forall \bar{x} \in [-\pi, \pi]$ , esistono finiti:

$$\lim_{x \rightarrow \bar{x}^-} = \frac{f(x) - f(\bar{x}-)}{x - \bar{x}}$$

$$\lim_{x \rightarrow \bar{x}^+} = \frac{f(x) - f(\bar{x}+)}{x - \bar{x}}$$

Allora:

La serie di Fourier di  $f$  converge puntualmente in  $\bar{x}$  e  $F_f(\bar{x}) = \frac{f(\bar{x}-) + f(\bar{x}+)}{2}$  (che è il punto medio del salto.)

#### Osservazione 20.50

NIENTE CUSPIDI E NIENTE TANGENZE VERTICALI.

#### Corollario 20.51

Sia  $f : [-\pi, \pi] \mapsto \mathbb{R}$ ,

$f$  è continua a tratti.

Sia  $\bar{x} \in [-\pi, \pi]$  un punto in cui  $f$  è derivabile. Allora la serie di Fourier  $F_f$  di  $f$  converge in  $\bar{x}$  e  $F_f(\bar{x}) = f(\bar{x})$

**Proposizione 20.52**

Sia  $f : [-\pi, \pi] \mapsto \mathbb{R}$ . Se:

$$* f \in \mathbf{C}^0([-\pi, \pi]; \mathbb{R})$$

$$* \exists x_1, x_2, \dots, x_n \in [-\pi, \pi] \text{ t.c.:}$$

-  $f$  è derivabile in  $x$

-  $f'$  continua in  $x$

$$* \forall i = 1, 2, \dots, n \text{ e } \forall x \in [-\pi, \pi] \text{ esistono finiti}$$

$$\lim_{x \rightarrow x_i^-} \frac{f(x) - f(x_i-)}{x - x_i} \quad \lim_{x \rightarrow x_i^+} \frac{f(x) - f(x_i+)}{x - x_i}$$

Allora

La serie di Fourier  $F_f$  di  $f$  converge a  $f$  uniformemente su  $[-\pi, \pi]$

**Corollario 20.53**

Sia  $f : [-\pi, \pi] \mapsto \mathbb{R}$ , e  $f \in \mathbf{C}^1([-\pi, \pi]; \mathbb{R})$ .

Allora la serie di Fourier di  $F_f$  di  $f$  converge uniformemente a  $f$  su  $[-\pi, \pi]$ .



## Capitolo 5

# Equazioni Differenziali

### 21 Preliminari

Equazione è un'uguaglianza in cui c'è almeno una incognita.

Equazione **Funzionale** è un'equazione le cui incognite sono funzioni.

**Nota.** In un'equazione funzionale si cerca l'uguaglianza di: insieme di arrivo, insieme di partenza, corrispondenza.

Equazione **Differenziale** è un particolare tipo di equazione (funzionale) che stabilisce una relazione tra la funzione incognita e le sue derivate.

**Definizione 21.1** (Equazione Differenziale Ordinaria)

Si dice **Equazione Differenziale Ordinaria** (*Ordinary Differential Equation, ODE*) di **ordine**  $n$  nella funzione incognita  $x \in \mathbb{R}^k$  un'espressione del tipo:

$$f(t, x, x', \dots, x^{(n)}) = 0 \quad (21.1)$$

**Nota.** La dipendenza delle  $x$  dalla  $t$  non è indicata esplicitamente, ma si potrebbe scrivere  $x(t)$ , rigorosamente nella stessa variabile  $t$  per tutte le  $x^{(i)}$ .

Nella Eq. (21.1):

- $A \subseteq \mathbb{R}^{1+(1+n)k}$
- $t \in I$  con  $I$  intervallo  $I \subseteq \mathbb{R}$
- $f : A \mapsto \mathbb{R}^m$

Dimensionalmente, si può osservare che  $m$  e  $k$  caratterizzano il problema e sono dunque libere. La dimensione di partenza  $1 + (1+n)k$  del problema è obbligata e dovuta alla somma di:

- $1 = \dim(t)$
- $(1+n)k$ 
  - $(1+n)$  il numero totale delle funzioni:  $n$  derivate ed  $x$  stessa
  - $k$  la dimensione dell'insieme **di arrivo** di ogni funzione incognita  $x^{(i)}$

**Nota.** Alternativamente si può indicare  $f$  come  $f : I \times A \mapsto \mathbb{R}^m$  a patto di considerare  $A \subseteq \mathbb{R}^{(1+n)k}$

**Soluzione** di questa equazione differenziale è una qualunque funzione  $x : I \rightarrow \mathbb{R}^k$  (in quanto la  $x$  è funzione di  $t \in I$ ) definita sull'intervallo  $I$ , derivabile  $n$  volte in  $I$  (e dunque continua in  $I$ ) e tale che  $\forall t \in I$

$$(t, x, x', \dots, x^{(n)}) \in A$$

$$f(t, x, x', \dots, x^{(n)}) = 0$$

**Soluzione massimale** di un'equazione differenziale ordinaria è una soluzione  $x_m : I_m \rightarrow \mathbb{R}^k$  tale che nessuna soluzione possa essere definita in un intervallo  $I$  con  $I_m \subseteq I$ . Cioè è la soluzione definita sull'intervallo maggiore possibile.

**Nota.** Dalla definizione segue che  $x(t) \in \mathring{A}$ , in quanto se non fosse in  $\mathring{A}$  sarebbe di frontiera, ma un punto di frontiera non può essere derivabile.

**Nota.** Un'equazione differenziale ammette, in generale, infinite soluzioni, come verificato in [Esempio 21.2](#)

**Nota.** La soluzione di un'equazione differenziale può, analiticamente, essere definita su un intervallo  $J \supset I$  ( $I$  intervallo di definizione della funz. differenziale  $f$ ). Non ha però senso considerare il suo comportamento al di fuori di  $I$ , in quanto non ha valore dal punto di vista del sistema. Per questo motivo  $J$  sarà sempre considerato  $J \subseteq I$

**Nota.** dalla [Definizione 21.1 \(Equazione Differenziale Ordinaria\)](#) segue che l'insieme di definizione della soluzione di un'equazione differenziale può essere solo un intervallo

### Esempio 21.2

Un'equazione differenziale ammette in generale infinite soluzioni. Ad esempio,  $x' = 1$  è risolta da  $x(t) = t + \alpha$  per qualunque  $\alpha \in \mathbb{R}$

### Esercizio 21.3

La soluzione di un'equazione differenziale ordinaria non può avere 3 asintoti.

*Soluzione.* La soluzione  $x$  è funzione continua. In quanto continua non può avere più di 2 asintoti verticali e in quanto funzione non può avere più di 2 asintoti orizzontali. ■

### Definizione 21.4 (Equazione Differenziale Ordinaria in Forma Normale)

Un'equazione differenziale è in **Forma Normale** se e solo se si presenta nella forma

$$x^{(n)} = g(t, x, x', \dots, x^{(n-1)})$$

Cioè se la derivata di ordine più alto è isolata al primo membro.

### Osservazione 21.5

Lo studio di un'equazione differenziale ordinaria in forma non normale inizia generalmente con l'utilizzo del [Teorema 10.4 \(Teorema della Funzione Implicita\)](#) insieme ai teoremi sulle equazioni differenziali ordinarie in forma normale

**Nota.** Nel seguito saranno considerate **solo** Equazioni Differenziali Ordinarie in Forma Normale.

### Proposizione 21.6

ogni equazione differenziale ordinaria in forma normale di ordine  $n$  è equivalente a una equazione differenziale ordinaria in forma normale di ordine 1, cioè in cui compaiono solamente derivate prime.

*Dimostrazione.* Data l'equazione

$$x^{(n)} = g(t, x, x', x'', \dots, x^{(n-1)})$$

sia  $y$  il vettore  $y = [x \quad x' \quad x'' \quad \dots \quad x^{(n-1)}]$ . Abbiamo ora che le componenti del vettore sono

$$y_1 = x \quad y_2 = x' \quad y_3 = x'' \quad \dots \quad y_n = x^{(n-1)}$$

ed al contempo

$$y'_1 = x' = y_2 \quad y'_2 = x'' = y_3 \quad y'_3 = x''' = y_4 \quad \dots \quad y'_{n-1} = x^{(n-1)} = y_n$$

Cioè, differenziando l' $i$ -esimo elemento (funzione) del vettore  $y$ , mi "sposto" all'elemento (funzione)  $i + 1$  di  $y$ . A questo punto tutti gli elementi di  $y$  sono equazioni differenziali del primo ordine.

Quindi l'equazione può essere scritta come il seguente sistema del primo ordine

$$\begin{cases} y'_1 &= y_2 \\ y'_2 &= y_3 \\ \vdots & \\ y'_n &= g(t, y_1, y_2, \dots, y_n) \end{cases}$$

□



**Esempio 21.7**

Posto  $n = 2$ , si ha  $x'' = f(t, x, x')$ . Come nella dimostrazione della [Proposizione 21.6](#), si pongono  $X' = \begin{bmatrix} x' \\ x'' \end{bmatrix}$  e

$$X = \begin{bmatrix} x \\ x' \end{bmatrix}$$

Da cui  $X' = f(t, X)$

**Definizione 21.8** (Problema di Cauchy del Primo Ordine)

Si dice Problema di Cauchy del Primo Ordine il problema di determinare una soluzione di un'equazione differenziale ordinaria del primo ordine, soddisfacente ad una condizione iniziale.

$$\begin{cases} x' = f(t, x) \\ x(t_0) = x_0 \end{cases}$$

Dove  $f : I \times A \rightarrow \mathbb{R}^n$ ,  $I \subseteq \mathbb{R}$  è un intervallo,  $t_0 \in \overset{\circ}{I}$ ,  $A \subseteq \mathbb{R}^n$ ,  $x_0 \in \overset{\circ}{A}$ .

Soluzione di un problema di Cauchy è una funzione  $x : J \rightarrow \mathbb{R}^n$ , definita in un intervallo  $J$  contenente  $t_0$  nella sua parte interna, quindi  $t_0 \in J \subseteq I$ .

La funzione  $x$  è soluzione dell'equazione differenziale  $x' = f(t, x)$  ed è tale che:

1.  $x(t_0) = x_0$
2.  $x(J) \subseteq A$
3.  $x$  derivabile (in quanto soluzione equazione differenziale)

Quindi il problema di Cauchy aggiunge un vincolo ad un'equazione differenziale, così da isolare una singola soluzione.

**Nota.** Si considera un intervallo perché l'idea è di studiare l'andamento nel tempo e sarebbe difficile far previsioni con "buchi" di tempo

**Nota.** La condizione  $x(t_0) = x_0$  viene spesso definita condizione iniziale, malgrado la [Definizione 21.8 \(Problema di Cauchy del Primo Ordine\)](#) indichi che  $t_0 \in \overset{\circ}{I}$ , dunque a rigore non dovrebbe essere sulla frontiera di  $I$ . Questo è dovuto al fatto che, spesso,  $t_0$  è proprio all'inizio dell'intervallo in cui si cerca la soluzione dell'equazione.

Comunque i risultati esposti continuano a valere con piccole modifiche alle dimostrazioni.

**Definizione 21.9** (Problema di Cauchy di Ordine  $n$ )

Si dice problema di Cauchy di ordine  $n$  il seguente problema:

Determinare una soluzione di un'equazione differenziale ordinaria di ordine  $n$  soddisfacente a  $n$  condizioni iniziali:

$$\begin{cases} x^{(n)} = f(t, x, x', \dots, x^{(n-1)}) \\ x(t_0) = \alpha_0 \\ x'(t_0) = \alpha_1 \\ \vdots \\ x^{(n-1)}(t_0) = \alpha_{n-1} \end{cases}$$

**Nota.** Le condizioni iniziali devono essere assegnate tutte nello stesso istante.

**Esempio 21.10**

il problema di Cauchy

$$\begin{cases} x' = x \\ x(0) = 1 \end{cases}$$

ammette, tra le altre, anche le seguenti soluzioni, tecnicamente distinte tra loro

$$\begin{array}{lll} f_1 & : & [-1, 1] \rightarrow \mathbb{R} \\ & t & \mapsto e^t \end{array} \quad \begin{array}{lll} f_2 & : & [-2, 10] \rightarrow \mathbb{R} \\ & t & \mapsto e^t \end{array}$$

La soluzione massimale è

$$\begin{array}{ccc} f_M & : & \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \\ & & t \mapsto e^t \end{array}$$

con intervallo di partenza  $\mathbb{R}$ , avente evidentemente diametro maggiore possibile.

**Proposizione 21.11**

Ogni problema di Cauchy di ordine  $n$  è equivalente ad un problema di Cauchy del primo ordine

*Dimostrazione.* Dalla [Proposizione 21.6](#)

□

**Proposizione 21.12**

Ogni problema di Cauchy del primo ordine con secondo membro continuo

$$\begin{cases} x' = f(t, x) \\ x(t_0) = x_0 \end{cases}$$

è equivalente ad un'equazione integrale del tipo

$$x(t) = x_0 + \int_{t_0}^t (f(\tau, x(\tau))) d\tau \quad (21.2)$$

*Dimostrazione.* Integrando ambo i membri della prima equazione del problema si ottiene:

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^t (x') d\tau &= \int_{t_0}^t (f(\tau, x(\tau))) d\tau \\ x(t) - x(t_0) &= \int_{t_0}^t (f(\tau, x(\tau))) d\tau \\ x(t) &= x_0 + \int_{t_0}^t (f(\tau, x(\tau))) d\tau \end{aligned}$$

□

**Definizione 21.13** (Equazione di Volterra)

La Eq. (21.2) viene denominata **equazione integrale di Volterra**.

**Nota.** Questa equazione ha senso anche per alcune funzioni  $f$  non continue, ma solo misurabili nel primo argomento. Ne consegue che nei Teoremi di esistenza ed unicità (locali/globali) l'ipotesi “ $f$  continua” può essere sostituita da “ $f$  continua a tratti in  $t, \forall x$ , continua in  $x$  e limitata”.

**Esempio 21.14** (Un Problema di Cauchy senza soluzione)

Sia

$$\begin{array}{ccc} f & : & \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \\ & & x \mapsto \begin{cases} +1 & \text{se } x < 0 \\ -1 & \text{se } x \geq 0 \end{cases} \end{array}$$

Allora il Problema di Cauchy

$$\begin{cases} x' = f(x) \\ x(0) = 0 \end{cases}$$

Non ammette soluzioni perché la condizione  $x(0) = 0$  non è mai verificata.

**Esempio 21.15** (Un Problema di Cauchy con infinite soluzioni)

Vedere [Esempio 22.6](#) (Il Baffo/Pennello di Peano)

**Esercizio 21.16**

Sia  $s : \mathbb{R} \mapsto \mathbb{R}$  data da

$$s(t) = \begin{cases} 1 & \text{se } t \geq 0 \\ 0 & \text{se } t < 0 \end{cases}$$

Risolvere i seguenti Problemi di Cauchy, al variare di  $t_0$  (si supponga  $t_0 \neq 0, 1$ ):

$$\begin{cases} x' = s(t) \\ x(t_0) = 1 \end{cases} \quad \begin{cases} x' + x = s(t) \\ x(t_0) = 1 \end{cases} \\ \begin{cases} x' = s(t) \cdot s(1-t) \\ x(t_0) = 1 \end{cases} \quad \begin{cases} x' - x = s(t) \cdot s(1-t) \\ x(t_0) = 1 \end{cases}$$

**Esempio 21.17** (Un Problema non di Cauchy)

Il seguente è un **Problema ai Valori al Contorno**.

$$\begin{cases} x'' + x = 0 \\ x(0) = 0 \\ x(\pi) = 0 \end{cases} \quad (21.3)$$

Questo problema ammette le infinite soluzioni  $x(t) = \alpha \cdot \sin t$ , al variare di  $\alpha \in \mathbb{R}$ .

Sostituendo le condizioni  $x(0) = x(\frac{\pi}{2}) = 1$  a quelle nella Eq. (21.3), si ottiene l'unica soluzione  $x(t) = \sin t + \cos t$ . Con  $x(0) = x(\pi) = 1$  non ci sono soluzioni.

**Osservazione 21.18** (Problema ben posto nel senso di Hadamard)

in generale un problema si dice **ben posto** o **ben posto nel senso di Hadamard** ogniqualvolta la soluzione:

1. esiste
2. è unica
3. dipende con continuità dai dati

## 22 Teoria Locale

**Definizione 22.1** (Funzione Localmente Lipschitziana)

Una funzione  $f : I \times A \rightarrow \mathbb{R}^n$ , con  $I$  intervallo in  $\mathbb{R}$  e  $A$  aperto in  $\mathbb{R}^n$ , si dice **Localmente lipschitziana** in  $x \in A$  **uniformemente** rispetto a  $t \in I$  se

$$\forall x_0 \in A, \exists r > 0 \exists L > 0 : \forall x_1, x_2 \in (B(x_0, r) \cap A), \forall t \in I$$

vale che

$$\|f(t, x_2) - f(t, x_1)\| \leq L \cdot \|x_2 - x_1\| \quad o, ugualmente \quad \frac{\|f(t, x_2) - f(t, x_1)\|}{\|x_2 - x_1\|} \leq L$$

Una funzione è uniformemente lipschitziana (**unif. lips.**) in un'intervallo  $I$  se, in parole povere, è possibile individuare per ogni punto di  $I$  una sfera  $B$  di raggio  $r$  in cui la funzione è lipschitziana.

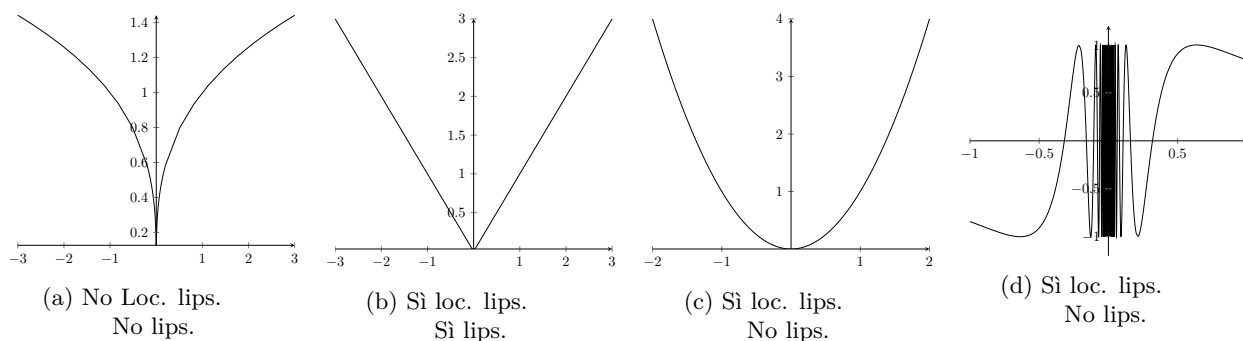
**Nota.** I termini *localmente* e *uniformemente* son giustificati dal fatto che:

- La località è data dalla limitazione di  $x_1, x_2$  all'interno di  $(B(x_0, r) \cap A)$
- L'uniformità è data da  $\forall t \in I$

Quindi la  $f$  rimane lips. indipendentemente dalla variazione di  $t$  (quindi  $\forall t \in I$ ), ma solo per  $x_1, x_2 \in (B(x_0, r) \cap A)$  **non**  $\forall x \in A$ .

**Nota.** Se  $f$  lips su  $A \implies f$  loc. lips. su  $A$ .

Concettualmente ci si porta nel caso della sfera  $B$  con  $r$  pari al raggio di  $I \times A$  su cui è definita  $f$

**Esempio 22.2****Proposizione 22.3**

Siano  $I \subseteq \mathbb{R}$  un intervallo aperto e  $A \subseteq \mathbb{R}^n$  un aperto. Ogni funzione  $f \in \mathbf{C}^1(I \times A; \mathbb{R}^n)$  è loc. lips. in  $x \in A$  uniformemente rispetto a  $t \in I$

*Dimostrazione.* Il prodotto cartesiano  $I \times A$ , essendo prodotto cartesiano di aperti in  $\mathbb{R}^n$  con metrica euclidea (si suppone sia in uso questa metrica), è a sua volta un aperto. Questo risultato è dovuto alla definizione stessa del prodotto cartesiano di  $\mathbb{R}$  con metrica euclidea.

Chiamiamo ora  $S = I \times A$  l'insieme di partenza della  $f$ . Grazie alla ?? sappiamo che esiste una poligonale interamente contenuta in  $S$  congiungente due qualunque punti dell'aperto  $S$ .

È ora possibile applicare il [Teorema 8.16 \(Formula degli accrescimenti finiti\)](#) ad uno qualunque dei segmenti formanti la poligonale appena individuata. Vale quindi la

$$\|f(x_1) - f(x_0)\| \leq \sup_{x \in S} \|Df(x)\| \|x_1 - x_0\|$$

che è direttamente comparabile alla [Definizione 22.1 \(Funzione Localmente Lipschitziana\)](#) della funzione in ciascuno dei segmenti della poligonale, da cui la tesi.  $\square$

**Esempio 22.4**

La funzione  $f : \mathbb{R} \mapsto \mathbb{R}$  data da  $f(x) = x^2$  è **loc. lips.** su  $\mathbb{R}$  ma non è **globalmente lips.** su  $\mathbb{R}$ . Vedasi [Definizione 3.8 \(Funzione Lipschitziana\)](#)

**22.1 Esistenza e Unicità****Proposizione 22.5** (Teorema di Peano)

Si consideri il seguente problema di Cauchy:

$$\begin{cases} x' = f(t, x) \\ x(t_0) = x_0 \end{cases}$$

con  $f : I \times A \in \mathbb{R}^n$  soddisfacente alle ipotesi:

1.  $t_0 \in \overset{\circ}{I}, x_0 \in \overset{\circ}{A}$
2.  $f \in \mathbf{C}^0(I \times A; \mathbb{R}^n)$

inoltre  $I \subseteq \mathbb{R}$  intervallo e  $A \subseteq \mathbb{R}^n$ , per [Definizione 21.8 \(Problema di Cauchy del Primo Ordine\)](#).

Allora esiste un  $\delta > 0$  tale che esiste soluzione  $x : J \mapsto A$  del problema di Cauchy con  $J = [t_0 - \delta, t_0 + \delta]$ .

**Nota.**  $\delta$  è un valore arbitrario che serve ad identificare l'intervallo  $I$  a cui appartiene  $t_0$

Inoltre:

- $J \subseteq I$  da [nota definizione 47](#), dunque  $\varphi(J) \subseteq A$
- $\varphi(t_0) = x_0$

- $\varphi$  derivabile e  $\varphi'(t) = f(t, \varphi(t))$

*Dimostrazione.* Non richiesta

□

**Esempio 22.6** (Il Baffo/Pennello di Peano)

Sia

$$\begin{aligned} f &: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \\ x &\mapsto \sqrt{|x|} \end{aligned}$$

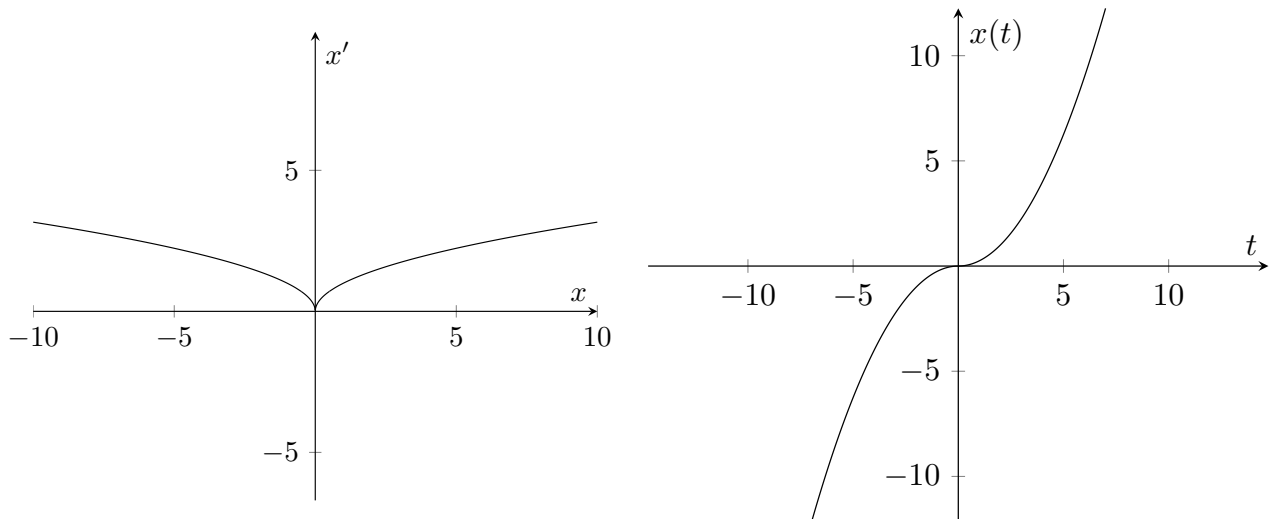
Allora il Problema di Cauchy

$$\begin{cases} x' = f(x) \\ x(0) = 0 \end{cases}$$

ammette le infinite soluzioni

$$x_{a,b}(t) = \begin{cases} -\frac{1}{4}(t-a)^2 & \text{se } t \in ]-\infty, a] \\ 0 & \text{se } t \in [a, b] \\ \frac{1}{4}(t-b)^2 & \text{se } t \in [b, +\infty[ \end{cases}$$

dove  $-\infty \leq a \leq 0 \leq b \leq +\infty$



*Soluzione.* Se  $x_0 = 0$  ho che  $\varphi(t) = 0$  è soluzione  $\forall t$

Ma  $x' = \sqrt{|x|}$  è anche un'equazione a variabili separabili, quindi risolvibile.

$$\frac{x}{\sqrt{|x|}} = 1 \Rightarrow \int_0^t \frac{x'}{\sqrt{|x|}} dt = t$$

$$\int_{x(0)=0}^{x(t)} \frac{1}{\sqrt{|x|}} dx = t$$

valuto ora il caso  $x \geq 0$ , quindi  $|x| = x$

$$\int_{x(0)=0}^{x(t)} \frac{1}{\sqrt{x}} dx = 2\sqrt{x} = t$$

La soluzione cercata è quindi  $x(t) = \frac{1}{4}t^2$ , estendendo il ragionamento ai tempi negativi si trova che la soluzione cercata è:

$$\varphi(x) = \begin{cases} +\frac{1}{4}t^2 & t > 0, \\ 0 & t = 0 \\ -\frac{1}{4}t^2 & t < 0 \end{cases}$$

Abbiamo trovato che per la condizione iniziale  $x_0 = 0$  il sistema ammette due soluzioni, si riesce estendere la soluzione a infinite funzioni.

$$\varphi(x) = \begin{cases} -\frac{1}{4}(t-a)^2 & t < a, \\ 0 & t \in [a, b] \\ +\frac{1}{4}(t-b)^2 & t > b \end{cases}$$

infatti:

$$\varphi'(t) = \begin{cases} -\frac{1}{8}(t-a) & t < a, \\ 0 & t \in [a, b] \\ +\frac{1}{8}(t-b) & t > b \end{cases}$$

$$\begin{cases} -\frac{1}{8}(t-a) = \frac{-\frac{1}{4}(t-a)^2}{\sqrt{-\frac{1}{4}(t-a)^2}} & t < a, \\ 0 = 0 & t \in [a, b] \\ +\frac{1}{8}(t-b) = \frac{\frac{1}{4}(t-b)^2}{\sqrt{\frac{1}{4}(t-b)^2}} & t > b \end{cases} \quad t \in [a, b] = \dots????? \text{ sistema}$$

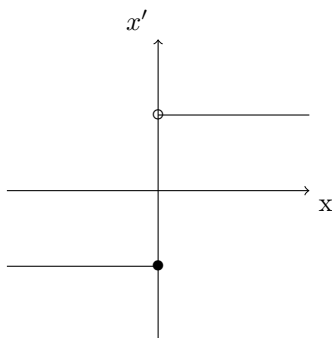
Abbiamo quindi trovato infinite soluzioni.

Questo esempio per sottolineare che il teorema di Peano non garantisce l'unicità della soluzione ■

**Esempio 22.7** (Continuità ed ipotesi necessaria)

Questo esempio mostra che se non c'è continuità, può essere la soluzione.

Dato il seguente problema di Cauchy: 
$$\begin{cases} x' = \begin{cases} 1 & x < 0 \\ -1 & x \geq 0 \end{cases} \\ x(0) = 0 \end{cases}$$



$x(t) = 0$  soddisfa la condizione iniziale ma ovviamente non può essere soluzione del problema poiché per  $x \neq 0$  si ha che  $x' = \pm 1$  che non è la derivata della funzione nulla.

partendo sempre dalla condizione iniziale si può ipotizzare per esempio che la soluzione cresca, solo che questo contraddice  $x'(0) = -1$

se invece si ipotizza che decresce da 0 si ottiene che la funzione assume valori negativi, anche questo è un assurdo poiché la derivata per valori negativi della funzione è positiva.

Precisiamo che se il problema fosse stato 
$$\begin{cases} x' = \begin{cases} 1 & x < 0 \\ -1 & x \geq 0 \end{cases} \\ x(0) = -3 \end{cases}$$
 allora la funzione  $\varphi(x) = -x + 3$  sarebbe stata

soluzione nell'intervallo  $J = ]-\infty, 0[$

**Teorema 22.8** (Teorema di Cauchy Locale - Prima Parte)

Si consideri il problema di Cauchy:

$$\begin{cases} x' = f(t, x) \\ x(t_0) = x_0 \end{cases}$$

con  $f : I \times A \rightarrow \mathbb{R}^n$  soddisfacente le ipotesi:

1.  $t_0 \in \overset{\circ}{I}$ ,  $x_0 \in \overset{\circ}{A}$ . Inoltre da [Definizione 21.1 \(Equazione Differenziale Ordinaria\)](#) e note successive:  $I$  intervallo e  $I \subseteq \mathbb{R}^n$ , inoltre  $A \subseteq \mathbb{R}^n$

2.  $f \in \mathbf{C}^0(I \times A; \mathbb{R}^n)$
3.  $f$  è localmente Lipschitziana in  $x \in A$  uniformemente rispetto a  $t \in I$

**Nota.** Le prime due ipotesi garantiscono l'esistenza, grazie al [Proposizione 22.5 \(Teorema di Peano\)](#). La terza ipotesi rende il teorema più restrittivo, ma permette anche di giungere ad una conclusione più forte (ed utile).

**Nota.** Per verificare l'ultima ipotesi si ricorrendo [Proposizione 22.3](#) e se  $f$  lips.  $\implies f$  loc. lips.  
Allora ho i seguenti risultati:

1. **Esistenza:**

da [Proposizione 22.5 \(Teorema di Peano\)](#)  $\exists \delta > 0$ , con cui si identifica un  $J = [t_0 - \delta, t_0 + \delta]$ . Inoltre  $\exists \varphi : J \rightarrow \mathbb{R}^n$  è soluzione con le proprietà date da Peano:

- $J \subseteq I$  da [nota definizione 47](#), dunque  $\varphi(J) \subseteq A$
- $\varphi(t_0) = x_0$
- $\varphi$  derivabile e  $\varphi'(t) = f(t, \varphi(t))$

2. **Unicità**

Se  $\exists J_1, J_2$  intervalli con  $J_1 \subseteq I, J_2 \subseteq I$  e  $\exists \varphi_1 : J_1 \rightarrow \mathbb{R}^n, \varphi_2 : J_2 \rightarrow \mathbb{R}^n$  soluzioni con le seguenti proprietà

- $J_1 \subseteq I, J_2 \subseteq I$  da [nota definizione 47](#), dunque  $\varphi_1(J_1) \subseteq A$  e  $\varphi_2(J_2) \subseteq A$
- $\varphi_1(t_0) = x_0, \varphi_2(t_0) = x_0$
- $\varphi_1, \varphi_2$  derivabili e  $\begin{cases} \varphi_1'(t) = f(t, \varphi_1(t)) \forall t \in J_1 \\ \varphi_2'(t) = f(t, \varphi_2(t)) \forall t \in J_2 \end{cases}$  NB. Non è effettivamente sistema

**Nota.** Si può osservare che, sicuramente,  $J_1 \cap J_2 \neq \emptyset$ , poiché entrambi gli insiemi contengono almeno  $t_0$  nella loro parte interna.

Allora  $\varphi_1(t) = \varphi_2(t) \quad \forall t \in (J_1 \cap J_2)$

Cioè, se esistono due soluzioni, allora esse coincidono ovunque siano entrambe definite.

3. **Dipendenza continua dai dati**

Questa tesi verrà esposta successivamente in [Teorema 22.14 \(Teorema di Cauchy Locale - Seconda Parte\)](#)

*Dimostrazione. (Tesi 2)*

**Nota.** L'idea alla base della dimostrazione è che vogliamo riuscire a trasformare il problema di Cauchy in un problema di punto fisso mediante una funzione avente come parametro  $x$  stesso.

Da [Definizione 21.13 \(Equazione di Volterra\)](#) sappiamo che la prima equazione del problema in ipotesi corrisponde all'integrale

$$x(t) = x_0 + \int_{t_0}^t (f(\tau, x(\tau))) \, d\tau$$

Definiamo quindi  $T$ , funzione del tipo

$$\begin{array}{ccc} T & : & X \rightarrow X \\ & & (T(x))(t) \mapsto x_0 + \int_{t_0}^t f(\tau, x(\tau)) \, d\tau \end{array} \quad (22.1)$$

Abbiamo così ottenuto un problema di punto fisso ( $x = T(x)$ ). Ora bisogna determinare l'insieme di partenza e l'insieme di arrivo in maniera utile per la dimostrazione. Per poter applicare il [Teorema 4.4 \(Teorema delle Contrazioni\)](#) serve che lo spazio di partenza e di arrivo corrispondano.

Prendiamo:

- $\delta_1 > 0$  tale che  $[t_0 - \delta_1, t_0 + \delta_1] \subseteq I$
- $\rho > 0$  tale che  $\overline{B(x_0, \rho)} \subseteq A$
- $L$  costante di Lipschitz di  $f$  in  $[t_0 - \delta_1, t_0 + \delta_1] \times \overline{B(x_0, \rho)}$ . È possibile individuare  $L$  in quanto  $f$  loc. lips. per ipotesi in  $I \times A$ , e dunque **loc. lips. in sottointervalli/insiemi**

Sia ora

$$V = \sup \left\{ \|f(t, x)\| : t \in [t_0 - \delta_1, t_0 + \delta_1], x \in \overline{B(x_0, \rho)} \right\}$$

**Nota.**  $V$  è il maggiore tra i valori assunti dalla derivata prima ( $x' = f(t, x)$ ) di una qualsiasi delle soluzioni  $x$  contenute nella sfera  $\overline{B(x_0, \rho)}$ . È massimo di funzione continua (per ipotesi 2) in un compatto (per ipotesi 1, essendo in  $\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n$  e per ??).

Definiamo dunque un generico  $\delta > 0$

$$\delta < \min \left\{ \delta_1, \frac{\rho}{V}, \frac{1}{L} \right\} \quad (22.2)$$

**Nota.**  $\delta$  è strettamente minore del min perché poi servirà a trovare una contrazione, dunque dovrò avere sicuramente  $\delta L < 1$

- $\delta_1$  è raggio di un generico intervallo incluso in  $I$  di partenza.  $\delta$  deve essere minore di  $\delta_1$  in quanto non è possibile uscire dall'intervallo  $I$
- $\frac{\rho}{V}$  è rapporto tra il raggio di  $\overline{B(x_0, \rho)}$ , sfera interamente contenuta in  $A$ , e  $V$ , valore massimo di  $f$  ridotta all'intervallo di cui sopra e alla sfera  $\overline{B}$ .  
Considerando il reciproco  $\frac{V}{\rho}$ , possiamo vederlo come una sorta di nuova costante di lips., riportata ad un intervallo più piccolo, non dipendente però da  $\Delta f(x)$ , ma dal valore di  $f(x)$  stessa.
- $1/L = \frac{\|x_2 - x_1\|}{\|f(t, x_2) - f(t, x_1)\|}$  dalla [Definizione 22.1 \(Funzione Localmente Lipschitziana\)](#), perché  $f$  loc. lips. per ipotesi. Dà un'idea di quanto vari la  $x$  rispetto alla variazione della  $f(x)$

Questo  $\delta$ , dunque, rappresenta, dal punto di vista concettuale, quale sia la più restrittiva (min) tra tutte le possibili variazioni della  $f(x)$  rispetto alla  $x$ .

A questo punto, usando  $\delta$ , definiamo lo spazio  $X$ , generato da tutte le funzioni continue sul nuovo intervallo a valori entro una sfera centrata in  $x_0$  con lo stesso raggio di  $\overline{B}$

$$X = \{g \in \mathbf{C}^0([t_0 - \delta, t_0 + \delta]; \mathbb{R}^n) : \forall t \|g(t) - x_0\| \leq \rho\}$$

**Nota.** Si scelgono le funzioni continue ( $\in \mathbf{C}^0$ ) perché serve  $x$  continua per rendere valida l'equivalenza della funzione di Volterra con il problema di Cauchy. Stando alla [nota alla definizione di equazione di Volterra](#) sarebbe possibile sceglierla non continua, ma non si considera il caso.

Possiamo passare al punto chiave della dimostrazione, verifichiamo le ipotesi del [Teorema 4.4 \(Teorema delle Contrazioni\)](#):

- $(X, d)$  è **spazio metrico completo**  
 $(X, d_X)$  è spazio metrico completo se considerato con la distanza della convergenza uniforme  $d_X = d_{\mathbf{C}^0}$  per il [Corollario 19.32](#). □
- $T$  è **definita** (è possibile calcolarla)  
L'abbiamo definita all'inizio dall'equazione di Volterra □
- $T$  è  $\mathbf{X} \mapsto \mathbf{X}$   
L'insieme di partenza è valido in quanto sottoinsieme dell'insieme su cui  $f(t, x)$  era definita.  
Per verificare che  $y = T(x)$ , bisogna verificare che  $y \in \mathbf{C}^0([t_0 - \delta, t_0 + \delta]; \mathbb{R}^n)$  e che  $y(t) \in \overline{B(x_0, \rho)} \quad \forall t \in [t_0 - \delta, t_0 + \delta]$

*Dimostrazione.*  $y \in \mathbf{C}^0$  nell'intervallo specificato per il Teorema Fondamentale del Calcolo Integrale.

La seconda condizione si verifica prendendo la Eq. (22.1) e calcolando la norma di entrambi i termini

$$\|y(t) - x_0\| = \left\| \int_{t_0}^t f(\tau, x(\tau)) d\tau \right\|$$



posso ora minorare con il valore assoluto della norma dell'argomento (spiegazione in [Esercizio 22.9](#))

$$\leq \left| \int_{t_0}^t \|f(\tau, x(\tau))\| \, d\tau \right| \quad (22.3)$$

$\|f(\tau, x(\tau))\|$  è sicuramente minorato da  $V$  per definizione di quest'ultimo, dunque si ha integrale di costante

$$\leq V \cdot |t - t_0|$$

$|t - t_0| \leq \delta$  per definizione di  $\delta$

$$\leq V \cdot \delta$$

nel caso in cui  $\min \left\{ \delta_1, \frac{\rho}{V}, \frac{1}{L} \right\} = \frac{\rho}{V}$ , allora minorato strettamente da  $\rho$  per definizione di  $\delta$ , altrimenti sicuramente minore per  $\min$

$$< \rho$$

□

•  **$T$  è contrazione**

Occorre verificare la Eq. (4.1)

*Dimostrazione.* Per definizione della  $T$  e per la proprietà addittiva degli integrali

$$(T(x_2))(t) - (T(x_1))(t) = \int_{t_0}^t \left( f(\tau, x_2(\tau)) - f(\tau, x_1(\tau)) \right) d\tau$$

Dunque, passando alla norma di quanto calcolato sopra

$$\| (T(x_2))(t) - (T(x_1))(t) \| \quad (22.4)$$

È sicuramente minorata da

$$\leq \left| \int_{t_0}^t \|f(\tau, x_2(\tau)) - f(\tau, x_1(\tau))\| \, d\tau \right|$$

Per [Definizione 22.1 \(Funzione Localmente Lipschitziana\)](#) passo alle funzioni incognite  $x_i$  di  $f$  (che son le soluzioni dell'equazione differenziale), minorando

$$\leq \left| \int_{t_0}^t L \cdot \|x_2(\tau) - x_1(\tau)\| \, d\tau \right|$$

Dalla [Osservazione 19.19](#),  $\|f - g\|_{\mathbf{Co}} = \sup_A |f - g| = d_{\mathbf{Co}}(f, g)$

$$\begin{aligned} &= \left| \int_{t_0}^t L \cdot d_X(x_2, x_1) \, d\tau \right| \\ &= L \cdot |t - t_0| \cdot d_X(x_2, x_1) \end{aligned} \quad (22.5)$$

Quindi, concludendo, possiamo passare dalla Eq. (22.4) alla distanza  $d_X$ , semplicemente per definizione della distanza, cioè

$$\| (T(x_2))(t) - (T(x_1))(t) \| = d_X(T(x_2), T(x_1))$$

Minoriamo questa distanza con la forma appena trovata Eq. (22.5). Per quanto riguarda  $|t - t_0|$ , passiamo al sup di  $t$  nell'intervallo  $[t_0 - \delta, t_0 + \delta]$ , cioè  $\delta$  stesso

$$d_X(T(x_2), T(x_1)) \leq (\delta \cdot L) \cdot d_X(x_2, x_1)$$

Essendo, per definizione,  $\delta$  al più pari ad  $\frac{1}{L} \implies \delta \cdot L < 1 \implies T$  è contrazione per [Definizione 4.1 \(Contrazione\)](#). □

È ora possibile applicare il [Teorema 4.4 \(Teorema delle Contrazioni\)](#) che garantisce l'**unicità** del punto fisso  $x_* \in X$  per la  $x = T(x)$ , questo implica ovviamente che  $T(x)$  abbia un'unica soluzione. Si ha dunque l'unicità della soluzione  $x$  del problema di Cauchy in ipotesi sull'intervallo  $[t_0 - \delta, t_0 + \delta]$ , al quale  $T$  è equivalente per definizione in quanto  $T$  è [Definizione 21.13 \(Equazione di Volterra\)](#).

Tornando ai  $J_1, J_2$  della *Tesi 2*:

- Se  $(J_1 \cap J_2) \subseteq [t_0 - \delta, t_0 + \delta]$ , allora  $x_1 = x_2$  in quanto esiste unico punto fisso, come dimostrato sopra.
- Se  $(J_1 \cap J_2) \supset [t_0 - \delta, t_0 + \delta]$ , allora poniamo

$$t_M = \sup \{t \in (J_1 \cap J_2) : \forall \tau \in [t_0, t], x_1(\tau) = x_2(\tau)\} \quad (22.6)$$

$$x_M = x_1(t_M) = x_2(t_M)$$

Quindi  $t_M$  è l'*ultimo istante* in cui  $x_1$  e  $x_2$  coincidono.

Essendo

- $t_M \in \overset{\circ}{J}_1, t_M \in \overset{\circ}{J}_2 \implies t_M \in \overset{\circ}{I}$  da [nota definizione 47](#)
- $x_M \in \overset{\circ}{A}$  per [nota definizione equazione differenziale](#)

ci ritroviamo nelle ipotesi di quanto appena dimostrato, solo che con dei nuovi  $t$  ed  $x$ . Possiamo dunque giungere alla conclusione che il problema di Cauchy

$$\begin{cases} x' = f(t, x) \\ x(t_M) = x_M \end{cases}$$

ammetta unica soluzione definita in un intorno di  $t_M$  del tipo  $[t_M - \delta, t_M + \delta]$ , cioè  $x_1$  e  $x_2$  coincidono in un intorno di  $t_M$ . Il fatto che esista un'unica soluzione oltre  $t_M$  (vedere parte in grassetto dell'intorno sopra) contraddice la Eq. (22.6), perché non dovrebbe essere possibile trovare una soluzione in comune *oltre*  $t_M$  per come è definito. Ripetendo iterativamente questo procedimento si può semplificare la definizione di  $t_M$  a

$$t_M = \min \{\sup J_1, \sup J_2\}$$

Ripetendo quanto fatto con il *primo istante*  $t_m$  in cui  $x_1$  e  $x_2$  coincidono, si ottiene

$$t_m = \max \{\inf J_1, \inf J_2\}$$

Quindi, prendendo  $[t_m, t_M]$ , abbiamo identificato  $J_1 \cap J_2$  stessa.

Dunque  $x_1$  e  $x_2$  coincidono in  $J_1 \cap J_2$ , indipendente dalla relazione tra intersezione e intervallo.  $\square$

**Nota.** La scelta di  $\delta$  in Eq. (22.2) potrebbe essere migliorata utilizzando il [Teorema 4.6 \(Teorema dell'Iterata Contrazione\)](#) e scegliendo  $\delta < \min \{\delta_1, \frac{\rho}{L}\}$ , indipendentemente dalla costante di lips. della  $f$

### Esercizio 22.9

È necessario il modulo in Eq. (22.3)?

*Soluzione.* Consideriamo, ad esempio

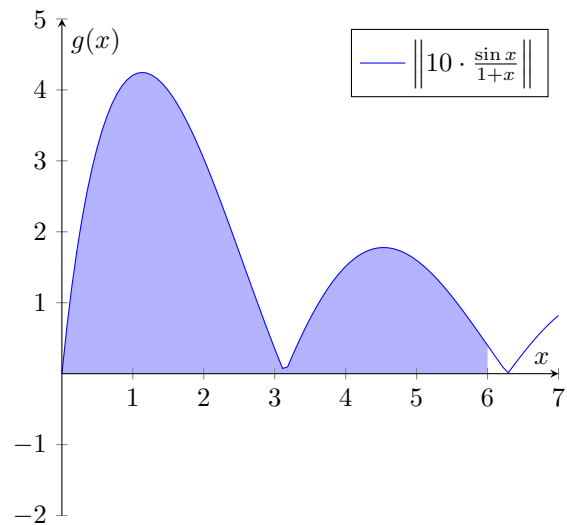
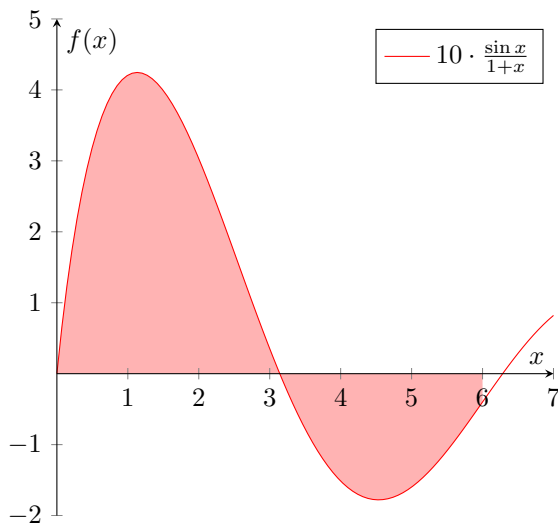
$$f(x) = \left\| \int_0^6 10 \cdot \frac{\sin x}{1+x} dx \right\| = 4,9413 \quad (\text{sinistra})$$

$$g(x) = \left| \int_0^6 \left\| 10 \cdot \frac{\sin x}{1+x} \right\| dx \right| = 11,935 \quad (\text{destra})$$

Nella  $f$ , viene calcolata la norma del risultato dell'integrazione definita.

Nella  $g$  si ha invece la norma della funzione, cioè la parte "sotto l'asse  $x$ " della funzione viene ribaltata sopra l'asse dall'operatore norma, come si può vedere dal grafico. Questo implica che il valore della  $g$  sarà sicuramente  $\geq$  rispetto alla  $f$ , in quanto l'integrale è somma di soli infinitesimi positivi.

Infine, il valore assoluto nella Eq. (22.3) è necessario per evitare che, scambiando gli estremi d'integrazione, si ottenga un valore negativo, che non potrebbe mai essere risultato del primo integrale

**Esercizio 22.10**

Perché il [Teorema 22.8 \(Teorema di Cauchy Locale - Prima Parte\)](#) è chiamato Teorema di Cauchy **locale**?

*Soluzione.* È dovuto al fatto che il teorema fornisce informazioni solo in un intorno della condizione iniziale  $t_0$ , non è assicurata l'esistenza di un'unica funzione risolvibile in un intervallo arbitrario. ■

**Esercizio 22.11**

Confrontare l'**unicità** della soluzione di un'equazione differenziale ([Teorema 22.8 \(Teorema di Cauchy Locale - Prima Parte\)](#)) con l'**unicità** della funzione implicita ([Teorema 10.4 \(Teorema della Funzione Implicita\)](#))

**22.2 Dipendenza Continua**

Nelle applicazioni fisiche, il ruolo della condizione iniziale di un problema di Cauchy è quello del valore assunto da una determinata grandezza fisica, diciamo  $u_0$ , misurata al tempo  $t = t_0$ . Poiché la misura di una grandezza fisica comporta inevitabilmente un errore di rilevazione (per quanto piccolo), è importante caratterizzare quei problemi di Cauchy tali che a fronte di piccole discrepanze  $u_0 \neq v_0$  producano soluzioni  $(I, u)$   $(J, v)$  che differiscano "poco" in  $I \cap J$ .

**Lemma 22.12** (Lemma di Gronwall)

Dati  $a, b \in \mathbb{R}$  con  $a < b$ , siano:

- $\delta_0 \in [0, +\infty[$
- $\left. \begin{array}{l} k, \delta : [a, b] \mapsto \mathbb{R} \\ k(t) \geq 0, \delta(t) \geq 0 \text{ funzioni continue } \forall t \in [a, b] \end{array} \right\} \text{ cioè } k, \delta \in \mathbf{C}^0([a, b], \mathbb{R}^+)$

con:

$$\delta(t) \leq \delta_0 + \int_a^t k(\tau) \delta(\tau) \, d\tau$$

Allora

$$\delta(t) \leq \delta_0 e^{\int_a^t k(\tau) \, d\tau} \quad \forall t \in [a, b]$$

Questo lemma permette di limitare una funzione che soddisfa una disuguaglianza integrale con la soluzione della corrispondente equazione. Ci si porta da una stima implicita di  $\delta$  (sotto il segno di integrale) ad una stima esplicita.

*Dimostrazione.* Dividiamo in due casi

- Se  $\delta_0 > 0$

Sia  $\Delta(t) = \delta_0 + \int_a^t k(\tau)\delta(\tau) d\tau$ . Prendiamo ora il logaritmo di  $\Delta(t)$ , cioè  $\ln(\Delta(t))$ , e deriviamolo con le regole classiche

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt} \ln(\Delta(t)) &= \frac{\Delta'(t)}{\Delta(t)} \\ &= \frac{\frac{d}{dt}\delta_0 + \frac{d}{dt} \int_a^t k(\tau)\delta(\tau) d\tau}{\Delta(t)}\end{aligned}$$

Il primo addendo è derivata di costante, il secondo corrisponde all'argomento dell'integrale per teorema fondamentale del calcolo integrale

$$= \frac{0 + k(t)\delta(t)}{\Delta(t)} = k(t) \frac{\delta(t)}{\Delta(t)}$$

Essendo poi, per ipotesi,  $\delta(t) \leq \Delta(t) \implies \frac{\delta(t)}{\Delta(t)} \leq 1$

$$\leq k(t)$$

Integrando il primo e l'ultimo termine

$$\begin{aligned}\int_a^t \left( \frac{d}{d\tau} \ln(\Delta(\tau)) \right) d\tau &\leq \int_a^t k(\tau) d\tau \\ \ln(\Delta(t)) - \ln(\Delta(a)) &\leq \int_a^t k(\tau) d\tau\end{aligned}$$

da definizione di  $\Delta(t)$ ,  $\Delta(a) = \delta_0$

$$\ln(\Delta(t)) \leq \ln(\delta_0) + \int_a^t k(\tau) d\tau$$

Passando all'esponenziale

$$\begin{aligned}e^{\ln(\Delta(t))} &\leq e^{(\ln(\delta_0) + \int_a^t k(\tau) d\tau)} \\ \Delta(t) &\leq e^{\ln(\delta_0)} \cdot e^{\int_a^t k(\tau) d\tau} \\ \Delta(t) &\leq \delta_0 e^{\int_a^t k(\tau) d\tau}\end{aligned}$$

Da cui la tesi

- Se  $\delta_0 = 0$

Minoriamo, poiché  $\delta_0 = 0$ , con un  $\epsilon > 0$

$$\delta(t) \leq 0 + \int_a^t k(\tau)\delta(\tau) d\tau \leq \epsilon + \int_a^t k(\tau)\delta(\tau) d\tau \quad \forall \epsilon > 0$$

Essendo  $\epsilon > 0$ , mi trovo con una forma analoga al caso precedente, dunque

$$\delta(t) \leq \epsilon \cdot e^{\int_a^t k(\tau) d\tau} \quad \forall \epsilon > 0$$

Dovendo essere  $\delta(t) \leq \epsilon \quad \forall \epsilon > 0$ , posso concludere che

$$\delta(t) \leq 0$$

Ma, per ipotesi,  $\delta(t) \geq 0 \implies \delta(t) = 0$

□

**Esercizio 22.13**

Verificare che la funzione  $\Delta$  nella dimostrazione del [Lemma 22.12 \(Lemma di Gronwall\)](#) è derivabile

*Soluzione.* È possibile derivare la  $\Delta$  perché, da [Esercizio 7.8](#), la somma di funzioni derivabili resta derivabile ed il secondo addendo è derivabile per [Proposizione 14.1 \(Teorema Fondamentale del Calcolo Integrale\)](#) ■

**Teorema 22.14** (Teorema di Cauchy Locale - Seconda Parte)

Si considerino i seguenti problemi di Cauchy con condizione iniziale individuata nello stesso istante:

$$(1) \begin{cases} x' = f(t, x) \\ x(t_0) = x_0 \end{cases} \quad (2) \begin{cases} y' = g(t, y) \\ y(t_0) = y_0 \end{cases} \quad (22.7)$$

con  $f, g : I \times A \rightarrow \mathbb{R}^n$  e soddisfacenti le ipotesi di [Teorema 22.8 \(Teorema di Cauchy Locale - Prima Parte\)](#), cioè:

1.  $t_0 \in \overset{\circ}{I}$ ,  $x_0, y_0 \in \overset{\circ}{A}$ . Inoltre da [Definizione 21.1 \(Equazione Differenziale Ordinaria\)](#) e note successive:  $I$  intervallo e  $I \subseteq \mathbb{R}^n$ , inoltre  $A \subseteq \mathbb{R}^n$
2.  $f, g \in \mathbf{C}^0(I \times A; \mathbb{R}^n)$
3.  $f, g$  sono localmente Lipschitziane in  $x \in A$  uniformemente rispetto a  $t \in I$

Allora esiste un  $\delta > 0$  tale che sull'intervallo  $[t_0 - \delta, t_0 + \delta]$  sono definite una soluzione  $\varphi$  di (1) ed una soluzione  $\psi$  di (2). Inoltre esiste  $L > 0$  t.c.  $\forall t \in [t_0 - \delta, t_0 + \delta]$  vale:

$$\|\varphi(t) - \psi(t)\| \leq (\|x_0 - y_0\| + \delta \|f - g\|_{\mathbf{C}^0}) e^{L|t-t_0|}$$

dove  $\|f - g\|_{\mathbf{C}^0} = \sup_{I \times A} \|f(t, x) - g(t, x)\|$

**Nota.** Questo significa che, con problemi diversi tra loro, se  $(x_0$  e  $y_0)$ ,  $(f$  e  $g)$  sono vicine tra loro ("a coppie"), allora sono vicine anche le soluzioni, ma per  $t$  vicine. Pensando  $t$  come tempo, cioè una delle applicazioni più classiche, questo implica che non si possano fare previsioni a lungo termine con sistemi diversi.

*Dimostrazione.* Sia  $f$  che  $g$  soddisfano le ipotesi del [Teorema 22.8 \(Teorema di Cauchy Locale - Prima Parte\)](#), quindi esistono due soluzioni:

- $\varphi : [t_0 - \delta_f, t_0 + \delta_f] \mapsto \mathbb{R}$  del problema (1)
- $\psi : [t_0 - \delta_g, t_0 + \delta_g] \mapsto \mathbb{R}$  del problema (2)

Sia dunque  $\delta = \min\{\delta_f, \delta_g\}$ , da cui  $J = [t_0 - \delta, t_0 + \delta]$  e, d'ora in poi,  $t \in J$ .

Gli insiemi  $\varphi(J)$  e  $\psi(J)$  sono compatti perché per [Teorema 3.4 \(Teorema generale di Weierstrass\)](#), essendo  $J$  compatto. La loro unione è dunque un compatto, come da [Esercizio 2.6](#).

Utilizzando [Definizione 21.13 \(Equazione di Volterra\)](#), passiamo alle equazioni integrali delle Eq. (22.7)

$$(1) \varphi(t) = x_0 + \int_{t_0}^t (f(\tau, \varphi(\tau))) d\tau \quad (2) \psi(t) = y_0 + \int_{t_0}^t (g(\tau, \psi(\tau))) d\tau \quad (22.8)$$

Sottraiamo ora la (1) alla (2) (in norma)

$$\begin{aligned} \|\varphi(t) - \psi(t)\| &= \left\| x_0 - y_0 + \int_{t_0}^t (f(\tau, \varphi(\tau))) d\tau - \int_{t_0}^t (g(\tau, \psi(\tau))) d\tau \right\| \\ &= \left\| x_0 - y_0 + \int_{t_0}^t (f(\tau, \varphi(\tau)) - g(\tau, \psi(\tau))) d\tau \right\| \end{aligned} \quad (22.9)$$

Minoriamo ora con la proprietà 3 da [Definizione 1.27 \(Norma\)](#)

$$\leq \|x_0 - y_0\| + \left\| \int_{t_0}^t (f(\tau, \varphi(\tau)) - g(\tau, \psi(\tau))) d\tau \right\|$$

Minoriamo ulteriormente come da [Esercizio 22.9](#)

$$\leq \|x_0 - y_0\| + \left| \int_{t_0}^t \|f(\tau, \varphi(\tau)) - g(\tau, \psi(\tau))\| \, d\tau \right|$$

Sommo e sottraggo nell'integrale la quantità  $f(\tau, \psi(\tau))$  (Si sarebbe potuto fare lo stesso con  $g$ )

$$\begin{aligned} &= \|x_0 - y_0\| + \\ &\quad \left| \int_{t_0}^t \|f(\tau, \varphi(\tau)) + f(\tau, \psi(\tau)) - f(\tau, \psi(\tau)) - g(\tau, \psi(\tau))\| \, d\tau \right| \\ &\leq \|x_0 - y_0\| + \\ &\quad \left| \int_{t_0}^t \|f(\tau, \varphi(\tau)) - f(\tau, \psi(\tau))\| \, d\tau \right| + \left| \int_{t_0}^t \|f(\tau, \psi(\tau)) - g(\tau, \psi(\tau))\| \, d\tau \right| \end{aligned}$$

Possiamo minorare l'argomento del secondo integrale con il  $\sup_{I \times A} \|f(t, x) - g(t, x)\|$ , dunque può anche essere estratto in quanto  $\sup$  è costante

$$\begin{aligned} &\leq \|x_0 - y_0\| + \\ &\quad \left| \int_{t_0}^t \|f(\tau, \varphi(\tau)) - f(\tau, \psi(\tau))\| \, d\tau \right| + \left| \sup_{I \times A} \|f(t, \psi(\tau)) - g(t, \psi(\tau))\| \int_{t_0}^t d\tau \right| \\ &= \|x_0 - y_0\| + \\ &\quad \left| \int_{t_0}^t \|f(\tau, \varphi(\tau)) - f(\tau, \psi(\tau))\| \, d\tau \right| + \left| \sup_{I \times A} \|f(t, \psi(\tau)) - g(t, \psi(\tau))\| (t - t_0) \right| \end{aligned}$$

Essendo sicuramente  $t - t_0 \leq \delta$  per definizione di quest'ultimo, minoriamo ulteriormente

$$\begin{aligned} &\leq \|x_0 - y_0\| + \\ &\quad \left| \int_{t_0}^t \|f(\tau, \varphi(\tau)) - f(\tau, \psi(\tau))\| \, d\tau \right| + \left| \sup_{I \times A} \|f(t, \psi(\tau)) - g(t, \psi(\tau))\| \delta \right| \end{aligned}$$

Ricordando la [Osservazione 19.19](#), sappiamo che  $\|f - g\|_{\mathbf{C}^0} = \sup_{I \times A} \|f(t, x) - g(t, x)\|$ , dunque passiamo alla distanza su  $\mathbf{C}^0$  e togliamo il valore assoluto, in quanto tutti i valori in esso contenuti sono positivi per definizione

$$\begin{aligned} &= \|x_0 - y_0\| + \\ &\quad \left| \int_{t_0}^t \|f(\tau, \varphi(\tau)) - f(\tau, \psi(\tau))\| \, d\tau \right| + \delta \|f - g\|_{\mathbf{C}^0} \end{aligned}$$

Sia quindi  $L$  costante di Lipshitz di  $f$  su  $J \times (\varphi(J) \cup \psi(J))$ , possiamo minorare con

$$\leq \|x_0 - y_0\| + \left| \int_{t_0}^t L \|\varphi(\tau) - \psi(\tau)\| \, d\tau \right| + \delta \|f - g\|_{\mathbf{C}^0}$$

Riordinando

$$= \|x_0 - y_0\| + \delta \|f - g\|_{\mathbf{C}^0} + \left| \int_{t_0}^t L \|\varphi(\tau) - \psi(\tau)\| \, d\tau \right|$$

Applichiamo alla forma ottenuta il [Lemma 22.12 \(Lemma di Gronwall\)](#). Per ipotesi del Lemma è necessario avere  $t \in [a, b]$  con  $a < b$ . Nell'ultimo integrale rimasto abbiamo  $a = t_0$ , dunque imponiamo  $t \geq t_0$  e procediamo.

**Nota.** Il procedimento è analogo nel caso opposto e verrà integrato sotto.

Applichiamo le seguenti sostituzioni nella formula del [Lemma 22.12 \(Lemma di Gronwall\)](#):

- $k(\tau) = L$

- $\delta(\tau) = \|\varphi(\tau) - \psi(\tau)\|$
- $\delta_0 = \|x_0 - y_0\| + \delta \|f - g\|_{\mathbf{Co}}$  (tutti gli altri addendi)

Possiamo dunque minorare ulteriormente la formula precedente con

$$\begin{aligned} &\leq (\|x_0 - y_0\| + \delta \|f - g\|_{\mathbf{Co}}) e^{\int_{t_0}^t L \, d\tau} \\ &= (\|x_0 - y_0\| + \delta \|f - g\|_{\mathbf{Co}}) e^{L(t-t_0)} \end{aligned}$$

Riprendendo il primo elemento del treno di disuguaglianze Eq. (22.9), si ottiene infine

$$\|\varphi(t) - \psi(t)\| \leq (\|x_0 - y_0\| + \delta \|f - g\|_{\mathbf{Co}}) e^{L(t-t_0)}$$

Inseriamo ora il valore assoluto all'esponente per tener in considerazione anche il caso in cui  $t \leq t_0$

$$\|\varphi(t) - \psi(t)\| \leq (\|x_0 - y_0\| + \delta \|f - g\|_{\mathbf{Co}}) e^{L|t-t_0|}$$

□

**Nota.** Con il Teorema 22.8 (Teorema di Cauchy Locale - Prima Parte) ed il Teorema 22.14 (Teorema di Cauchy Locale - Seconda Parte) si verifica se un Problema di Cauchy rispetta la Osservazione 21.18 (Problema ben posto nel senso di Hadamard).

### Esercizio 22.15

Esibire una dimostrazione dell'unicità della soluzione di un Problema di Cauchy alternativa al Teorema 22.8 (Teorema di Cauchy Locale - Prima Parte) e basata sul Teorema 22.14 (Teorema di Cauchy Locale - Seconda Parte).

### Esercizio 22.16

Enunciare il Teorema 22.14 (Teorema di Cauchy Locale - Seconda Parte) come risultato sulla continuità dell'operatore di soluzione di un Problema di Cauchy.

### Esempio 22.17

Al variare di  $p \in \mathbb{R}$ , il Problema di Cauchy

$$\begin{cases} x' = x \\ x(0) = p \end{cases}$$

ha soluzione  $x_p(t) = p \cdot e^t$ .

- Se  $t \rightarrow T \in \mathbb{R}$ :

$$\lim_{p \rightarrow 0} \left( \lim_{t \rightarrow T} (p \cdot e^t) \right) = 0 \quad \text{e} \quad \lim_{t \rightarrow T} \left( \lim_{p \rightarrow 0} (p \cdot e^t) \right) = 0$$

I risultati coincidono, quindi c'è continuità nel parametro.

- Se  $T \rightarrow +\infty$ :

$$\lim_{p \rightarrow 0} \left( \lim_{t \rightarrow +\infty} (p \cdot e^t) \right) = 0 \quad \text{e} \quad \lim_{t \rightarrow +\infty} \left( \lim_{p \rightarrow 0} (p \cdot e^t) \right) = 0$$

I risultati son differenti, ma non solo, infatti stimando con parametri diversi mi troverei in questa situazione:

$$|x_{p_1}(t) - x_{p_2}(t)| = |p_1 - p_2| e^t \quad (22.10)$$

Cioè una distanza "esponenziale" tra le due soluzioni.

**Nota.** In questo esempio abbiamo  $f(t, x) = x$ , quindi  $L = 1$ , infatti  $L$  stessa non appare nella Eq. (22.10).

### Esempio 22.18

Al variare di  $p \in \mathbb{R}$ , il Problema di Cauchy

$$\begin{cases} x' = p \\ x(0) = 0 \end{cases}$$

ha soluzione  $x_p(t) = p \cdot t$ , cioè parametri  $p$  diversi danno rette con inclinazioni diverse.

- Se  $t \rightarrow T \in \mathbb{R}$ :

$$\lim_{p \rightarrow 0} \left( \lim_{t \rightarrow T} x_p(t) \right) = 0 \quad \text{e} \quad \lim_{t \rightarrow T} \left( \lim_{p \rightarrow 0} x_p(t) \right) = 0$$

I risultati coincidono, quindi c'è continuità nel parametro.

- Se  $T \rightarrow +\infty$ :

$$\lim_{p \rightarrow 0} \left( \lim_{t \rightarrow +\infty} x_p(t) \right) = +\infty \quad \text{e} \quad \lim_{t \rightarrow +\infty} \left( \lim_{p \rightarrow 0} x_p(t) \right) = 0$$

Essendo diversi, non c'è continuità.

**Nota.** Questo esempio evidenzia come la dipendenza continua sussista solo su intervalli finiti.

## 23 Teoria Globale

**Esempio 23.1** (Un Problema di Cauchy senza soluzione globale)

Si trovi la soluzione del Problema di Cauchy

$$\begin{cases} x' = x^2 \\ x(0) = 1 \end{cases} \quad (23.1)$$

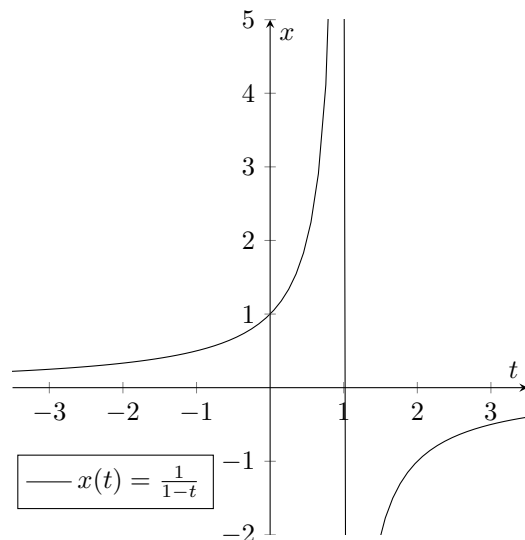
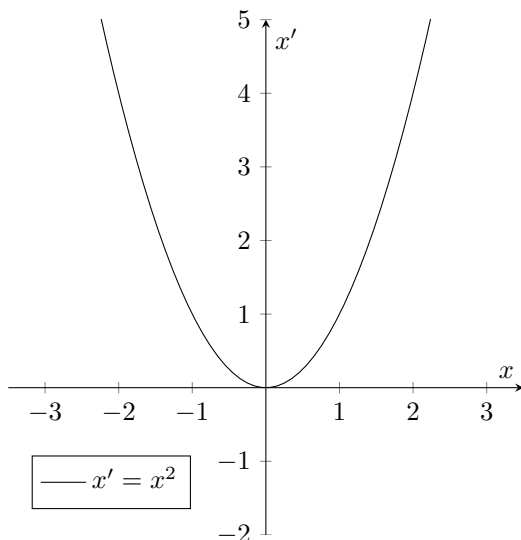
Essendo a variabili separabili, procediamo

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= x^2(t) \\ \frac{dx}{x^2(t)} &= dt \\ \int_0^t \frac{dx}{x^2(\tau)} d\tau &= \int_0^t d\tau \end{aligned}$$

Applicando al primo membro le normali regole d'integrazione delle funzioni composte otteniamo

$$-\frac{1}{x(t)} + 1 = t$$

Da cui si ricava  $x(t) = \frac{1}{1-t}$ , che è unica soluzione del Problema di Cauchy ed ha asintoto verticale in  $t = 1$ .





Per via dell'asintoto, nonostante la  $x(t)$  abbia come dominio  $\mathbb{R} \setminus \{1\}$ , la soluzione del Problema di Cauchy così definito si ferma a  $t = 1$ . Ciò perché la condizione iniziale del Problema è  $t = 0 \in ]-\infty, 1]$  e non avrebbe dunque senso considerare la situazione altrove. In questo intervallo di validità potrò applicare localmente il Teorema di Cauchy, ma non è possibile applicarlo globalmente.

**Nota.** L'argomento di questo capitolo sarà quindi capire quando un modello sia valido globalmente.

**Esempio 23.2** (Un Problema di Cauchy con soluzione globale)

Il Problema di Cauchy

$$\begin{cases} x' = \sin(x^2) \\ x(0) = x_0 \end{cases} \quad (23.2)$$

ammette soluzione globale  $\forall x_0 \in \mathbb{R}$ , pur non soddisfacendo alle ipotesi del [Teorema 23.4](#) ([Teorema di Cauchy Globale per Lipschitziane](#))

**Esempio 23.3**

Il Problema di Cauchy

$$\begin{cases} x' = x^2 - 1 \\ x(0) = x_0 \end{cases} \quad (23.3)$$

ammette soluzione globale per  $x \in [-1, 1]$ , ma non per  $x \in \mathbb{R} \setminus [-1, 1]$

### 23.1 Il Caso Lipschitziano

**Teorema 23.4** (Teorema di Cauchy Globale per Lipschitziane)

Data la funzione  $f : I \times \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}^n$ , se:

- $I \subset \mathbb{R}$  è **intervallo compatto**
- $f$  è **continua** su  $I \times \mathbb{R}^n$
- $f$  è (globalmente) **Lipschitziana** in  $x \in \mathbb{R}^n$  **uniformemente** rispetto a  $t \in I$

Allora il Problema di Cauchy

$$\begin{cases} x' = f(x, t) \\ x(t_0) = x_0 \end{cases} \quad (23.4)$$

ammette un'unica soluzione definita in tutto l'intervallo  $I$

*Dimostrazione.* Analogamente a quanto fatto nel [Teorema 22.8](#) ([Teorema di Cauchy Locale - Prima Parte](#)), siano:

- $X = \mathbf{C}^0(I, \mathbb{R}^n)$
- $T$  definita come la Eq. [\(22.1\)](#), cioè

$$\begin{array}{lll} T & : & X \rightarrow X \\ & & (T(x))(t) \mapsto x_0 + \int_{t_0}^t f(\tau, x(\tau)) \, d\tau \end{array}$$

I punti fissi di  $T$  sono tutte e sole le soluzioni di Eq. [\(23.4\)](#). Grazie al [Teorema 4.6](#) ([Teorema dell'Iterata Contrazione](#)), per dimostrare l'esistenza di un unico punto fisso, basta dimostrare che un'iterata di  $T$  ([Definizione 4.5](#) ([Funzione Iterata](#))) è contrazione.

Nel dettaglio andremo a dimostrare per induzione la seguente forma:

$$\|(T^m(x_2))(t) - (T^m(x_1))(t)\| \leq \frac{(L \cdot |t - t_0|)^m}{m!} \cdot d_X(x_2, x_1) \quad (23.5)$$

Dove  $L$  è costante di Lipschitzianità di  $f$

- $m = 1$ : Come in dalla Eq. (22.5), sappiamo che

$$\|(T(x_2))(t) - (T(x_1))(t)\| \leq (L \cdot |t - t_0|) \cdot d_X(x_2, x_1)$$

- $m > 1$ : Con un procedimento analogo a quello usato per giungere alla Eq. (22.5), possiamo ottenere  
**Nota.** Le spiegazioni dei passaggi invariati possono essere viste dal Teorema 22.8 (Teorema di Cauchy Locale - Prima Parte)

$$\|(T^{m+1}(x_2))(t) - (T^{m+1}(x_1))(t)\| =$$

Per Definizione 21.13 (Equazione di Volterra)

$$\begin{aligned} &= \left\| \int_{t_0}^t \left( f\left(\tau, (T^m(x_2))(\tau)\right) - f\left(\tau, (T^m(x_1))(\tau)\right) \right) d\tau \right\| \\ &\leq \left| \int_{t_0}^t \left\| f\left(\tau, (T^m(x_2))(\tau)\right) - f\left(\tau, (T^m(x_1))(\tau)\right) \right\| d\tau \right| \\ &\leq \left| \int_{t_0}^t L \cdot \|(T^m(x_2))(\tau) - (T^m(x_1))(\tau)\| d\tau \right| \end{aligned}$$

Grazie alla Lips. di  $f$ , dalla Definizione 22.1 (Funzione Localmente Lipschitziana),  $\|(T(x_2))(\tau) - (T(x_1))(\tau)\| \leq L \cdot d_X(x_2, x_1)$ , dunque essendo  $T^m$  iterata di  $T$ , si moltiplica  $L$  per sé stesso  $m$  volte, da cui  $L^m$ .

In modo analogo (penso) si ottiene  $\frac{|\tau - t_0|^m}{m!}$ . Non lo so...

$$= \left| \int_{t_0}^t L \cdot \frac{(L \cdot |\tau - t_0|)^m}{m!} \cdot d_X(x_2, x_1) d\tau \right|$$

Riordinando i termini

$$= \left| \int_{t_0}^t \frac{L^{m+1}}{m!} \cdot d_X(x_2, x_1) \cdot |\tau - t_0|^m d\tau \right|$$

Essendo però i primi due fattori costanti moltiplicative non legate a  $\tau$

$$\begin{aligned} &= \frac{L^{m+1}}{m!} \cdot d_X(x_2, x_1) \cdot \left| \int_{t_0}^t |\tau - t_0|^m d\tau \right| \\ &= \frac{L^{m+1}}{m!} \cdot d_X(x_2, x_1) \cdot \frac{1}{m+1} \cdot \left| \left[ |\tau - t_0|^{m+1} \right]_{t_0}^t \right| \\ &= \frac{L^{m+1}}{m!} \cdot d_X(x_2, x_1) \cdot \frac{1}{m+1} \cdot \left| |t - t_0|^{m+1} - |t_0 - t_0|^{m+1} \right| \\ &= \frac{L^{m+1}}{m!} \cdot d_X(x_2, x_1) \cdot \frac{1}{m+1} \cdot |t - t_0|^{m+1} \\ &= \frac{(L \cdot |t - t_0|)^{m+1}}{m!} \cdot \frac{1}{m+1} \cdot d_X(x_2, x_1) \\ &= \frac{(L \cdot |t - t_0|)^{m+1}}{(m+1)!} \cdot d_X(x_2, x_1) \end{aligned}$$

Avendo dimostrato che la minorazione vale per  $m$  e per  $m+1$ , la dimostrazione per induzione è conclusa.  $\square$

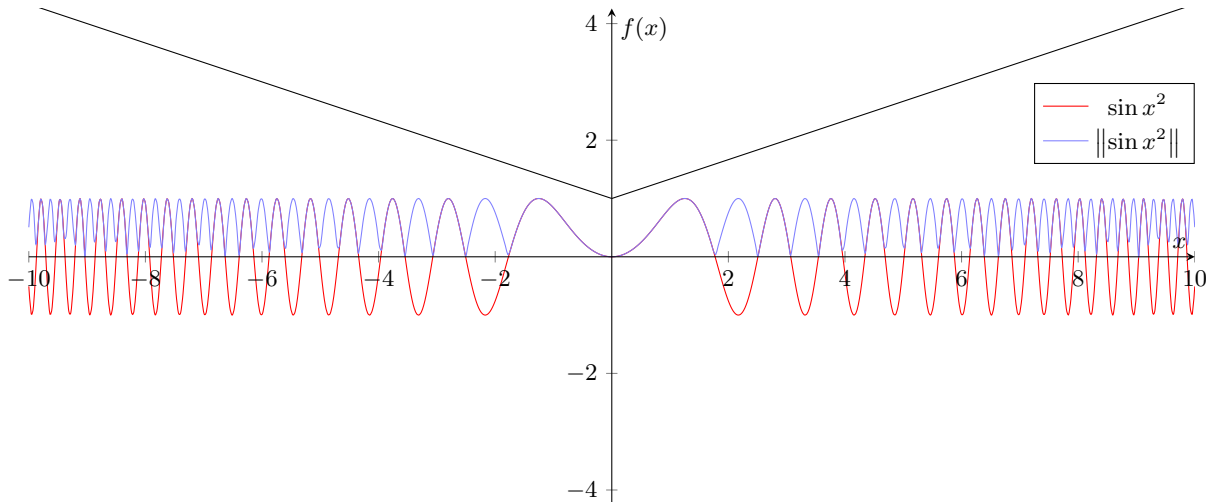
## 23.2 Il Caso Sublineare

### Definizione 23.5 (Funzione Sublineare)

Una funzione  $f : I \times \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}^n$  con  $I$  intervallo in  $\mathbb{R}$ , si dice **sublineare** se esistono due costanti  $A, B : \forall t \in I, \forall x \in \mathbb{R}^n$  vale:

$$\|f(t, x)\| \leq A + B \|x\|$$

**Nota.** In sostanza una funzione è sublineare se esiste una retta tale per cui il grafico della funzione è tutto nella regione di piano delimitata da questa retta, cioè il suo grafico "non si impenna".



### Esempio 23.6

Le seguenti funzioni sono:

- $x \cdot \sin(x)$ : Sublineare
- $\sin(x^2)$ : Sublineare
- $\frac{\arctan x^{12}}{x}$ : Sublineare
- $x^2 \cdot \sin(x)$ : Non sublineare
- $x^2$ : Non sublineare
- $e^x$ : Non sublineare

### Esercizio 23.7

Dimostrare che se una funzione  $f : \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}^n$  è **(globalmente) Lipschitziana**, allora è **sublineare**

*Soluzione.*

$$\begin{aligned} \|f(x)\| &= \\ &= \|f(0) + f(x) - f(0)\| \\ &\leq \|f(0)\| + \|f(x) - f(0)\| \end{aligned}$$

Per [Definizione 3.8 \(Funzione Lipschitziana\)](#) minoriamo

$$\leq \|f(0)\| + L \|x\|$$

Ponendo ora  $A = \|f(0)\|$  e  $B = L$ , si ottiene

$$= A + B \|x\|$$

■

### Esercizio 23.8

Esibire un esempio di [Definizione 22.1 \(Funzione Localmente Lipschitziana\)](#), ma non **sublineare**

*Soluzione.*  $f(x) = x^2$  è loc. lips. ma non sublineare.

■

**Teorema 23.9** (Teorema di Cauchy Globale per Sublineari)

Data la funzione  $f : I \times \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}^n$ , se

1.  $I \subseteq \mathbb{R}$  è un **intervallo**
2.  $f$  è **continua** su  $I \times \mathbb{R}^n$
3.  $f$  è **loc. lips.** in  $x \in \mathbb{R}^n$  **uniformemente** rispetto a  $t \in I$
4.  $f$  è **sublineare**

Allora il Problema di Cauchy

$$\begin{cases} x' = f(t, x) \\ x(t_0) = x_0 \end{cases} \quad (23.6)$$

Ammette un'unica soluzione definita in tutto l'intervallo  $I$

**Nota.** Non è necessario dimostrare l'unicità in quanto la soluzione sarà localmente unica in ogni intorno di un punto e quindi si può espandere ad ogni intorno di ogni punto della soluzione.

È inoltre garantita anche la dipendenza continua, dunque è possibile scegliere un  $\delta$  (dalla [Teorema 22.14 \(Teorema di Cauchy Locale - Seconda Parte\)](#)) grande a piacere

*Dimostrazione.* Il [Teorema 22.8 \(Teorema di Cauchy Locale - Prima Parte\)](#) assicura esistenza ed unicità della soluzione su un intervallo centrato nell'istante iniziale. È necessario dimostrare che la soluzione può essere estesa a tutto l'intervallo  $I$  in questione. Come già parzialmente anticipato in [Esempio 23.1 \(Un Problema di Cauchy senza soluzione globale\)](#), questo non è possibile in due casi:

1. La soluzione ha asintoto verticale
2. La soluzione oscilla intorno ad un punto e non continua oltre

Quindi i casi in cui la soluzione non si può estendere su tutto l'intervallo sono quelli in cui non esiste il limite della soluzione. Si devono dunque evitare tali comportamenti.

Sia  $\varphi : J \mapsto \mathbb{R}^n$  la soluzione di Eq. (23.6) e sia

$$T_M = \sup \{ \overline{t_M} \in I : \varphi \text{ risolve Eq. (23.6) su } [t_0, \overline{t_M}[ \} \quad (23.7)$$

**Nota.**  $T_M$  è, dunque, l'ultimo tempo fino a cui posso definire una soluzione e la  $t$  utilizzata in seguito è  $t \in [t_0, \overline{t_M}[$

$$\varphi(t) = x_0 + \int_{t_0}^t f(\tau, \varphi(\tau)) \, d\tau$$

Da cui, passando alle norme e minorando per proprietà 3 della [Definizione 1.27 \(Norma\)](#)

$$\|\varphi(t)\| \leq \|x_0\| + \left\| \int_{t_0}^t f(\tau, \varphi(\tau)) \, d\tau \right\|$$

Grazie all'[Esercizio 22.9](#)

$$\leq \|x_0\| + \left| \int_{t_0}^t \|f(\tau, \varphi(\tau))\| \, d\tau \right|$$

Si può poi togliere il valore assoluto, in quanto sicuramente  $t \geq t_0$  per definizione e, utilizzando la [Definizione 23.5 \(Funzione Sublineare\)](#)

$$\leq \|x_0\| + \int_{t_0}^t (A + B \|\varphi(\tau)\|) \, d\tau$$

Separando l'integrale ed essendo il primo addendo indipendente dalla variabile d'integrazione  $\tau$

$$\leq \|x_0\| + A(t - t_0) + \int_{t_0}^t B \|\varphi(\tau)\| \, d\tau$$

Si minora ulteriormente, passando a  $T_M$

$$\leq \|x_0\| + A(T_M - t_0) + \int_{t_0}^t B \|\varphi(\tau)\| \, d\tau$$

Dunque, applicando il [Lemma 22.12 \(Lemma di Gronwall\)](#) con

- $\delta_0 = \|x_0\| + A(T_M - t_0)$
- $\delta(t) = \|\varphi(t)\|$
- $\kappa(t) = B$
- $a = t_0$

$$\|\varphi(t)\| \leq (\|x_0\| + A(T_M - t_0)) e^{\int_{t_0}^t B \, d\tau}$$

Da cui, minorando ulteriormente con  $T_M$

$$\|\varphi(t)\| \leq (\|x_0\| + A(T_M - t_0)) e^{B(T_M - t_0)} \quad (23.8)$$

La  $\varphi(t)$  è quindi limitata sull'intervallo  $[t_0, T_M[$ , dunque non è possibile abbia comportamento asintotico come quello di [Esempio 23.1 \(Un Problema di Cauchy senza soluzione globale\)](#). Ricordando che  $\varphi(t)$  è soluzione della Eq. (23.6), otteniamo

$$\begin{aligned} \|\varphi'(t)\| &= \|f(t, \varphi(t))\| \\ &\leq \sup_{t \in [t_0, T_M[} \|f(t, x)\| \end{aligned} \quad (23.9)$$

Quindi sia  $\varphi(t)$  che  $\varphi'(t)$  sono limitate, dunque la  $\varphi$  è **uniformemente continua** su  $[t_0, T_M[$ , come da [Proposizione 8.1](#). Da [Proposizione 3.7](#), se la  $\varphi(t)$  è uniformemente continua, allora è **continua**, cioè implica che  $\lim_{t \rightarrow T_M^-} \varphi(t) = \varphi(T_M)$ .

Essendo  $\varphi(T_M) \in \mathbb{R}^n$ , posso usare questo punto come condizione iniziale del seguente Problema di Cauchy

$$\begin{cases} x' = f(t, x) \\ x(T_M) = \varphi(T_M) \end{cases} \quad (23.10)$$

Se  $T_M < \sup I$ , Eq. (23.10) soddisfa le ipotesi del [Teorema 22.8 \(Teorema di Cauchy Locale - Prima Parte\)](#), dunque  $\varphi$  può essere estesa oltre  $T_M$  ad una funzione definita almeno su  $[t_0, T_M + \delta[$  con  $\delta > 0$  scelto opportunamente. Questa possibilità di estendere la  $\varphi$  è però in contraddizione con la definizione di  $T_M$  in Eq. (23.7), dunque si deve concludere che

$$T_M = \sup I$$

Procedimento analogo si può svolgere per

$$T_m = \inf \{ \overline{t_m} \in I : \varphi \text{ risolve Eq. (23.6) su } ]\overline{t_m}, t_0] \}$$

I passaggi rimangono uguali fino a Eq. (23.8) che diventa

$$\|\varphi(t)\| \leq (\|x_0\| + A(T_M - t_0)) e^{B(t_0 - T_m)}$$

E, a sua volta, Eq. (23.9) diventa

$$\begin{aligned} \|\varphi'(t)\| &= \|f(t, \varphi(t))\| \\ &\geq \min_{t \in ]T_m, t_0]} \|f(t, x)\| \end{aligned}$$

Dunque

$$T_m = \inf I$$

Grazie a come sono definiti  $T_M$  e  $T_m$ , è stata quindi trovata una soluzione sull'intervallo  $I$  che si può dire **globale** per quanto appena dimostrato.  $\square$

**Esempio 23.10** (Esempio critico al [Teorema 23.9 \(Teorema di Cauchy Globale per Sublineari\)](#))

Dato il Problema di Cauchy

$$\begin{cases} x' = (1 - \cos x)x^2 \\ x(0) = x_0 \end{cases}$$

**Esempio 23.11**

Per ogni  $x_0 \in \mathbb{R}$ , il Problema di Cauchy

$$\begin{cases} x' = x^2 \cdot \sin x \\ x(0) = x_0 \end{cases}$$

soddisfa le ipotesi 1., 2. e 3. del [Teorema 23.9 \(Teorema di Cauchy Globale per Sublineari\)](#), ma  $f(x) = x^2 \cdot \sin x$  non è né **globalmente lipschitziana**, né **sublineare** su  $\mathbb{R}$ . tuttavia, per ogni  $x_0 \in \mathbb{R}$ , questo problema ammette soluzioni globali definite su tutto  $\mathbb{R}$

**Esercizio 23.12**

Sono date le funzioni  $f_n : \mathbb{R} \mapsto \mathbb{R}$ , ciascuna soddisfacente alle ipotesi del [Teorema 23.9 \(Teorema di Cauchy Globale per Sublineari\)](#). Per un fissato  $\bar{x}$  in  $\mathbb{R}^n$ , sia  $\varphi_n$  per ogni  $n \in \mathbb{N}$  la soluzione del Problema di Cauchy

$$\begin{cases} x' = f_n(x) \\ x(0) = \bar{x} \end{cases}$$

Verificare che se le  $f_n$  convergono uniformemente (ricordando [Definizione 19.18 \(Convergenza Uniforme\)](#)), allora anche le  $\varphi_n$  convergono uniformemente.

## 24 Equazioni Autonome

**Definizione 24.1** (Equazione Autonoma)

Un'**equazione differenziale ordinaria** si dice **autonoma** se e solo se la variabile indipendente (solitamente il tempo) non vi compare esplicitamente.

**Nota.** L'assenza della variabile indipendente significa, concettualmente, che l'istante iniziale non è importante ai fini dello studio dell'equazione, ma essa dipende solo dalla lunghezza dell'intervallo.

**Nota.** In fisica le equazioni differenziali autonome spesso modellizzano sistemi isolati

**Proposizione 24.2** (Invarianza per Traslazione Temporale)

Se la funzione  $\varphi : [a, b] \mapsto \mathbb{R}^n$  risolve il Problema di Cauchy

$$\begin{cases} x' = f(x) \\ x(t_0) = x_0 \end{cases}$$

Allora, qualunque sia  $T \in \mathbb{R}$ , la funzione  $\psi : [a - T, b - T] \mapsto \mathbb{R}^n$  data da  $\psi(t) = \varphi(t + T)$  è soluzione del Problema di Cauchy

$$\begin{cases} x' = f(x) \\ x(t_0 - T) = x_0 \end{cases}$$

*Dimostrazione.* Posta la  $\psi(t) = \varphi(t + T)$

$$\begin{aligned} \psi'(t_0) &= \varphi'(t_0 + T) = f(\varphi(t_0 + T)) = f(\psi(t_0)) \\ \psi(0) &= \varphi(t_0) = x_0 \end{aligned}$$

□

**Proposizione 24.3**

Ogni equazione differenziale ordinaria in forma normale con secondo membro continuo è equivalente ad un'equazione autonoma.

*Dimostrazione.*

$$x' = f(t, x) \quad \text{equivale a} \quad \begin{cases} x' = f(t, x) \\ t' = 1 \end{cases}$$

□

**Proposizione 24.4** (Teorema dell'Energia Cinetica)

Un punto materiale non vincolato  $P$  di massa  $m$ , si muove sotto l'azione di una forza  $F$  che dipende solo dalla posizione di  $P$ .

Allora la variazione di Energia Cinetica di  $P$  è uguale al lavoro compiuto su  $P$  da questa forza.

*Dimostrazione.* Sia  $\mathbf{x} = (x, y, z)$  la terna di coordinate di  $P$ . Per il Secondo Principio della Dinamica e per quanto assunto sulla forza  $F$ , il moto di  $P$  è descritto dalla seguente equazione differenziale ordinaria vettoriale del secondo ordine

$$m\mathbf{x}'' = F(\mathbf{x})$$

Dunque, moltiplicando ambo i membri

$$m\mathbf{x}'' \cdot \mathbf{x}' = F(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{x}'$$

Integrando a sinistra con la  $\int [f(x)]^n f'(x) dx = \frac{[f(x)]^{n+1}}{n+1} + c$  posto  $f(x) = \mathbf{x}'$

$$\frac{1}{2}m \frac{d}{dt}(\mathbf{x}')^2 = F(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{x}'$$

Applicando ora integrazione definita tra 0 e  $t$

$$\frac{1}{2}m(\mathbf{x}'(t))^2 - \frac{1}{2}m(\mathbf{x}'(0))^2 = \int_0^t F(\mathbf{x}(\tau)) \cdot \mathbf{x}'(\tau) d\tau$$

Passando alla soluzione  $x$  ed alla  $\xi$ , traiettoria di  $P$

$$\frac{1}{2}m(\mathbf{x}'(t))^2 - \frac{1}{2}m(\mathbf{x}'(0))^2 = \int_{x(0)}^{x(t)} F(\xi) d\xi$$

□

**Esercizio 24.5**

Estendere la dimostrazione della [Proposizione 24.4 \(Teorema dell'Energia Cinetica\)](#) nel caso di  $n$  punti soggetti a forze dipendenti unicamente dalle posizioni dei punti.

**Esercizio 24.6**

Dedurre il Principio di Conservazione dell'Energia nel caso in cui  $F$  ammetta un potenziale

**Esercizio 24.7**

Come viene modificata la [Proposizione 24.4 \(Teorema dell'Energia Cinetica\)](#) se la forza  $F$  dipende anche dalla velocità  $\mathbf{x}'$ ?

**Esercizio 24.8**

È possibile scrivere un'equazione differenziale ordinaria autonoma del primo ordine avente come soluzione la funzione  $x(t) = \sin t$  per  $t \in [0, \pi]$ ?

E la funzione  $x(t) = t^3$  per  $t \in [-1, 1]$ ?

## 25 Equazioni Differenziali Lineari

Di seguito verranno utilizzati l'identificazione ed i risultati della [sezione 15 \(Funzioni a Valori in  \$\mathbb{C}\$ \)](#), in particolare [Esercizio 15.1](#)

**Definizione 25.1** (Equazione Differenziale Ordinaria Lineare)

Sia  $I \subseteq \mathbb{R}$  un intervallo e  $n \in \mathbb{N}$ . Date le  $n + 1$  funzioni  $a_0, a_1, \dots, a_{n-1}, f : I \mapsto \mathbb{C}$ , si dice **Equazione Differenziale Ordinaria Lineare di ordine  $n$**  l'equazione differenziale

$$x^{(n)} + a_{n-1}(t) \cdot x^{(n-1)} + \dots + a_1(t) \cdot x' + a_0(t) \cdot x = f(t)$$

Se  $f = 0$  l'equazione si dice **Omogenea**.

**Proposizione 25.2** (Estensione in  $\mathbb{C}$  del Teorema di Cauchy Globale per Lipschitziane)

Sia  $I$  un intervallo compatto tale che  $\mathring{I} \neq \emptyset$ , siano  $a_0, a_1, \dots, a_{n-1}, f \in \mathbf{C}^0(I; \mathbb{C})$ .

Allora per ogni  $t_0 \in \mathring{I}$  e  $c_0, c_1, \dots, c_{n-1} \in \mathbb{C}$  il Problema di Cauchy

$$\begin{cases} x^{(n)} &= -\sum_{k=1}^{n-1} a_k(t) \cdot x^{(k)} + f(t) \\ x(t_0) &= c_0 \\ x'(t_0) &= c_1 \\ &\vdots \\ x^{(n-2)}(t_0) &= c_{n-2} \\ x^{(n-1)}(t_0) &= c_{n-1} \end{cases} \quad (25.1)$$

soddisfa alle ipotesi del [Teorema 23.4 \(Teorema di Cauchy Globale per Lipschitziane\)](#)

*Dimostrazione.* Introducendo la variable  $X \in \mathbb{C}^n$  ed il dato  $C \in \mathbb{C}^n$  definiti da

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_{n-1} \\ X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ x' \\ \vdots \\ x^{(n-2)} \\ x^{(n-1)} \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_{n-1} \\ C_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \vdots \\ c_{n-2} \\ c_{n-1} \end{bmatrix}$$

Come da [Proposizione 21.6](#), un'equazione differenziale lineare di ordine  $n$  può essere trasformata in un sistema di  $n$  equazioni del primo ordine, dunque la prima equazione di Eq. (25.1), può diventare

$$\begin{cases} X'_1 = X_2 \\ X'_2 = X_3 \\ \vdots \\ X'_{n-1} = X_n \\ X'_n = -\sum_{k=1}^{n-1} (a_k(t) \cdot X_{k+1}) + f(t) \end{cases} \quad (25.2)$$

Passando dalle singole equazioni del nuovo sistema Eq. (25.2) alla variabile unica  $X$  in  $n$  coordinate, tutta la Eq. (25.1) è

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} X'_1 \\ X'_2 \\ \vdots \\ X'_{n-1} \\ X'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_n \\ -\sum_{k=1}^{n-1} (a_k(t) \cdot X_{k+1}) + f(t) \end{bmatrix} \\ X(t_0) = C \end{cases}$$



Infine la funzione

$$\begin{aligned} F &: I \times \mathbb{C}^n \rightarrow \mathbb{C}^n \\ (t, X) &\mapsto \begin{bmatrix} X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_n \\ -\sum_{k=1}^{n-1} (a_k(t)x^k) + f(t) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

è lineare in  $X$  (compaiono solo elementi di grado 1) e globalmente lipschitziana in  $X$  uniformemente in  $t$ , infatti per ogni  $X, Y \in \mathbb{C}^n$

$$\|F(t, X) - F(t, Y)\| \leq \sqrt{1 + \left( \max_k \sup_I \|a_k\| \right)^2} \cdot \|X - Y\|$$

Sono quindi soddisfatte le ipotesi di [Teorema 23.4 \(Teorema di Cauchy Globale per Lipschitziane\)](#) e si ha la tesi.  $\square$

La locuzione **Lineare**, attribuita alle equazioni differenziali analizzate in questo capitolo, è giustificata dalla proposizione seguente.

### Proposizione 25.3

Sia  $I \subseteq \mathbb{R}$  un intervallo e  $n \in \mathbb{N}$ . Date le  $n + 1$  funzioni  $a_0, a_1, \dots, a_{n-1}, f : I \rightarrow \mathbb{C}$ , l'operatore

$$\begin{aligned} L &: \mathbf{C}^n(I; \mathbb{C}) \rightarrow \mathbf{C}^0(I; \mathbb{C}) \\ x &\mapsto x^{(n)} + \sum_{k=1}^{n-1} a_k(t) \cdot x^{(k)} \end{aligned}$$

è lineare

*Dimostrazione.* La linearità di  $L$  equivale a:

$$\begin{aligned} L(x_1 + x_2) &= L(x_1) + L(x_2) \quad \forall x_1, x_2 \in \mathbf{C}^n(I; \mathbb{C}) \\ L(\lambda \cdot x) &= \lambda \cdot L(x) \quad \forall \lambda \in \mathbb{C}, \forall x \in \mathbf{C}^n(I; \mathbb{C}) \end{aligned}$$

Entrambe le condizioni seguono dalle regole di derivazione, come da [sezione 15 \(Funzioni a Valori in  \$\mathbb{C}\$ \)](#).  $\square$

### Proposizione 25.4

L'insieme delle soluzioni dell'equazione lineare omogenea

$$x^{(n)} + a_{n-1}(t) \cdot x^{(n-1)} + \dots + a_1(t) \cdot x' + a_0(t) \cdot x = 0 \quad (25.3)$$

è un sottospazio vettoriale di  $\mathbf{C}^n(I; \mathbb{C})$  di dimensione  $n$

*Dimostrazione.* Se  $x_1, x_2$  sono soluzioni e se  $\lambda, \mu \in \mathbb{C}$ , allora anche  $\lambda x_1 + \mu x_2$  è soluzione, infatti, per la [Proposizione 25.3](#)

$$L(x_1 + x_2) = L(x_1) + L(x_2) \quad \forall x_1, x_2 \in \mathbf{C}^n(I; \mathbb{C}) = 0$$

Ciò permette, grazie alla [Proposizione 1.5](#), di concludere che l'insieme delle soluzioni è sottospazio di  $\mathbf{C}^n(I; \mathbb{C})$

Fissato  $t_0 \in \overset{\circ}{I}$  e scelta una base  $(E_1, \dots, E_n)$  di  $\mathbb{C}^n$ , sia  $x_k$ , per  $k = 1, \dots, n$  la soluzione del seguente Problema di Cauchy

$$\begin{cases} x^{(n)} = -\sum_{k=1}^{n-1} a_k(t) \cdot x^{(k)} \\ x(t_0) = (E_k)_1 \\ x'(t_0) = (E_k)_2 \\ \vdots \\ x^{(n-2)}(t_0) = (E_k)_{n-1} \\ x^{(n-1)}(t_0) = (E_k)_n \end{cases}$$

Si può concludere che  $(x_1, \dots, x_n)$  sia una base dello spazio delle soluzioni dell'equazione omogenea Eq. (25.3).

Infatti se  $\bar{x}$  è una soluzione della Eq. (25.3), allora esistono coefficienti  $a_1, \dots, a_n$  tali che  $\bar{x}(t_0) = \sum_{k=1}^n a_k E_k$ .

Quindi  $\bar{x}$  risolve anche il Problema di Cauchy

$$\begin{cases} x^{(n)} = -\sum_{k=1}^{n-1} a_k(t) \cdot x^{(k)} \\ x(t_0) = \sum_{k=1}^n a_k \cdot (E_k)_1 \\ x'(t_0) = \sum_{k=1}^n a_k \cdot (E_k)_2 \\ \vdots \\ x^{(n-2)}(t_0) = \sum_{k=1}^n a_k \cdot (E_k)_{n-2} \\ x^{(n-1)}(t_0) = \sum_{k=1}^n a_k \cdot (E_k)_{n-1} \end{cases}$$

Per costruzione anche la funzione  $\sum_{k=1}^n a_k \cdot x_k$  risolve lo stesso Problema di Cauchy. Quindi, per la [Proposizione 25.2 \(Estensione in  \$\mathbb{C}\$  del Teorema di Cauchy Globale per Lipschitziane\)](#) ed il [Teorema 23.4 \(Teorema di Cauchy Globale per Lipschitziane\)](#),  $\bar{x}(t) = \sum_{k=1}^n a_k \cdot x_k(t)$  per ogni  $t \in I$ .

Se per opportuni scalari  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  si ha

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^n \lambda_k \cdot x_k = 0 \\ \implies & \sum_{k=1}^n \lambda_k \cdot x_k(t) = 0 \quad \forall t \in I \\ \implies & \sum_{k=1}^n \lambda_k \cdot x_k^{(h)}(t) = 0 \quad \begin{cases} \forall t \in I \\ \forall h = 0, \dots, n-1 \end{cases} \\ \implies & \sum_{k=1}^n \lambda_k \cdot x_k^{(h)}(t) = 0 \quad \forall h = 0, \dots, n-1 \\ \implies & \sum_{k=1}^n \lambda_k \cdot E_k = 0 \\ \implies & \lambda_k = 0 \quad \forall k = 1, \dots, n \end{aligned}$$

□

**Nota.** Utilizzando la notazione tipica dell'Algebra Lineare, l'insieme delle soluzioni è  $\ker L$ , il *nucleo (kernel)* dell'operatore lineare  $L$

**Definizione 25.5** (Sistema Fondamentale di Soluzioni)

Dato  $\ker L$ , lo spazio vettoriale delle soluzioni, una base di  $\ker L$  è **Sistema Fondamentale di Soluzioni** dell'equazione omogenea

$$x^{(n)} + a_{n-1}(t) \cdot x^{(n-1)} + \dots + a_1(t) \cdot x' + a_0(t) \cdot x = 0$$

**Definizione 25.6** (Soluzione Particolare)

**Soluzione Particolare** dell'equazione lineare non omogenea

$$x^{(n)} + a_{n-1}(t) \cdot x^{(n-1)} + \dots + a_1(t) \cdot x' + a_0(t) \cdot x = f(t)$$

è una qualunque soluzione di questa equazione.

**Proposizione 25.7**

Nota una soluzione particolare  $\bar{x}$  dell'equazione non omogenea

$$x^{(n)} + a_{n-1}(t) \cdot x^{(n-1)} + \dots + a_1(t) \cdot x' + a_0(t) \cdot x = f(t)$$

e noto un sistema fondamentale di soluzioni  $(x_1, \dots, x_n)$  dell'equazione omogenea

$$x^{(n)} + a_{n-1}(t) \cdot x^{(n-1)} + \dots + a_1(t) \cdot x' + a_0(t) \cdot x = 0$$

ogni soluzione  $x$  dell'equazione non omogenea può essere scritta come

$$x = \bar{x} + \sum_{k=1}^n \alpha_k x_k$$

per opportune costanti  $\alpha_1, \dots, \alpha_n \in \mathbb{C}$

*Dimostrazione.*

□

### Esercizio 25.8

Risolvere il Problema di Cauchy per una generica equazione lineare del primo ordine

$$\begin{cases} x' + p(t) \cdot x = q(t) \\ x(t_0) = x_0 \end{cases}$$

con  $p, q \in \mathbf{C}^0(R; R)$ .

*Soluzione.* Suggerimento: moltiplicare ambo i membri dell'equazione per  $e^{\int_{t_0}^t p(\tau) d\tau}$  ed integrare

■

## 26 Equazioni Lineari a Coefficienti Costanti

**Definizione 26.1** (Equazione Differenziale Ordinaria Lineare a Coefficienti Costanti)

Dati i coefficienti  $a_0, a_1, \dots, a_{n-1}, b \in \mathbb{C}$  si dice **Equazione Differenziale Ordinaria Lineare di ordine  $n$  a Coefficienti Costanti** l'equazione differenziale

$$x^{(n)} + a_{n-1} \cdot x^{(n-1)} + \dots + a_1 \cdot x' + a_0 \cdot x = b$$

Se  $b = 0$ , l'equazione si dice **omogenea**.

La sua **Equazione Caratteristica** è l'equazione algebrica

$$\lambda^n + a_{n-1}\lambda^{n-1} + \dots + a_1\lambda + a_0 = 0$$

### Osservazione 26.2

Nella risoluzione di equazioni differenziali lineari la funzione esponenziale  $t \mapsto e^{\lambda t}$  riveste un ruolo molto particolare. Questa funzione è un *autovalore* dell'operatore di derivazione  $D$  relativo all'*autovalore*  $\lambda$ , risolve infatti  $Dx = \lambda \cdot x$ , come da [Proposizione 15.5](#).

### Proposizione 26.3

Data l'equazione

$$x^{(n)} + a_{n-1} \cdot x^{(n-1)} + \dots + a_1 \cdot x' + a_0 \cdot x = b$$

allora

$$x(t) = e^{\lambda t} \text{ risolve l'equazione omogenea } \iff \lambda \text{ è soluzione dell'equazione caratteristica.}$$

*Dimostrazione.* Sia  $L$  l'operatore definito dal membro sinistro dell'equazione come nella [Proposizione 25.3](#). Allora se  $x(t) = e^{\lambda t}$ , si ha che

$$(L(x))(t) = (\lambda^n + a_{n-1}\lambda^{n-1} + \dots + a_1\lambda + a_0)e^{\lambda t}$$

□

**Lemma 26.4**

Sia  $x(t) = t \cdot e^{\lambda t}$ . Allora, per ogni  $n \in \mathbb{N}$ ,  $n \geq 1$  si ha

$$x^{(n)}(t) = (\lambda^n t + n\lambda^{n-1}) e^{\lambda t}$$

*Dimostrazione.* Per induzione su  $n$ .

Se  $n = 0$ , allora  $x^{(0)} = x$ . Supposto vero che

$$x^{(n-1)}(t) = (\lambda^{n-1} t + (n-1)\lambda^{n-2}) e^{\lambda t}$$

Da cui, derivando rispetto a  $t$ , si ottiene la tesi. □

**Proposizione 26.5**

Data l'equazione

$$x^{(n)} + a_{n-1} \cdot x^{(n-1)} + \dots + a_1 \cdot x' + a_0 \cdot x = b$$

allora

$$x(t) = t \cdot e^{\lambda t} \text{ risolve l'equazione omogenea}$$

$$\Longleftrightarrow$$

$\lambda$  è soluzione dell'equazione caratteristica con molteplicità almeno 2

*Dimostrazione.* Sia  $P(\lambda) = \lambda^n + \sum_{k=0}^{n-1} a_k \lambda^k$ . Sia ha

$$\begin{aligned} (L(x))(t) &= x^{(n)}(t) + \sum_{k=0}^{n-1} a_k x^{(k)}(t) \\ &= (\lambda^n t + n\lambda^{n-1}) e^{\lambda t} + \left( \sum_{k=1}^{n-1} a_k (\lambda^k t + k\lambda^{k-1}) + a_0 t \right) e^{\lambda t} \\ &= \left( \lambda^n + \sum_{k=0}^{n-1} a_k \lambda^k \right) t e^{\lambda t} + \left( n\lambda^{n-1} + \sum_{k=1}^{n-1} a_k k \lambda^{k-1} \right) e^{\lambda t} \\ &= \left( P(\lambda) t + \frac{dP}{d\lambda}(\lambda) \right) e^{\lambda t} \end{aligned}$$

□

**Proposizione 26.6**

Sia  $m \in \mathbb{N}$ . Data l'equazione

$$x^{(n)} + a_{n-1} \cdot x^{(n-1)} + \dots + a_1 \cdot x' + a_0 \cdot x = b$$

allora

$$x(t) = t^m \cdot e^{\lambda t} \text{ risolve l'equazione omogenea}$$

$$\Longleftrightarrow$$

$\lambda$  è soluzione dell'equazione caratteristica con molteplicità almeno  $m$

*Dimostrazione.* Omessa □

**Esempio 26.7**

L'equazione lineare del secondo ordine a coefficienti costanti

$$x'' - 2x' + x = 0$$

ha equazione caratteristica

$$\lambda^2 - 2\lambda + 1 = 0$$

ed integrale generale

$$(x_1(t) = e^t, x_2(t) = te^t)$$

## 27 Esempi

### 27.1 La Legge di Malthus

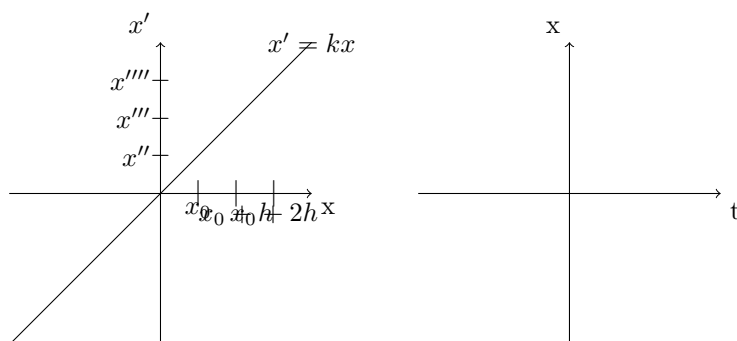
Una popolazione, dotata di tutto il necessario per vivere e riprodursi, cresce secondo la legge di Malthus: la velocità di crescita della popolazione è proporzionale alla popolazione stessa.

$$x' = k \cdot x$$

dove  $x$  è il numero di membri della popolazione e  $k$  è una costante positiva legata alla prolificità della specie in esame, generalmente calcolata come differenza tra i tassi di natalità e di mortalità.

Il problema di Cauchy è quindi

$$\begin{cases} x' = k \cdot x \\ x(t_0) = x_0 \end{cases} \quad \text{con } x \in \mathbb{R}, k > 0 \text{ e } x_0 > 0$$



blablabla ....

.....

Limiti di questo modello:

- la variabile  $x$  dovrebbe variare in  $\mathbb{N}$ , poiché una popolazione ha un numero intero di elementi.
- In molte specie è verosimile che il numero di nati al tempo  $t$  dipenda dalla popolazione presente ad un tempo precedente  $x(t - T)$ ,  $T > 0$
- Supporre che una popolazione abbia per sempre a disposizione risorse sufficienti può non essere realistico
- Questo modello va bene quando si considerano intervalli di tempo molto lunghi.



## Capitolo 6

# Calcolo delle Variazioni

### 28 Preliminari

Il calcolo delle variazioni si occupa dell'ottimizzazione di funzioni  $F : X \mapsto \mathbb{R}$ , dove  $X$  è un insieme di funzioni. In questo capitolo verranno considerati univocamente funzionali integrali del tipo

$$\begin{aligned} F : X &\rightarrow \mathbb{R} \\ x &\rightarrow \int_a^b f(t, x(t), x'(t)) dt \end{aligned}$$

eventualmente soggetti a vincoli sui valori  $x(a)$  e  $x(b)$  o sul valore di un integrale del tipo  $\int_a^b \varphi(x(t)) dt$ .  
Dove:

$$\begin{aligned} f : [a, b] \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n &\mapsto \mathbb{R} \\ X = \{x \in \mathbf{C}^1([a, b]); \mathbb{R}^n \text{ t.c.: } x(a) = x_a, x(b) = x_b\}, &\text{ con } x_a, x_b \in \mathbb{R}^n \end{aligned}$$

#### Proposizione 28.1

Sia  $f \in \mathbf{C}^1(A \times \mathbb{R}; \mathbb{R})$  con  $a \subseteq \mathbb{R}^n$

Se 
$$\begin{aligned} F : \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times A &\rightarrow \mathbb{R} \\ x &\rightarrow \int_\alpha^\beta f(x, t) dt \end{aligned}$$
 Allora:

$$\begin{aligned} F &\in \mathbf{C}^1 \\ \partial_\alpha F(\alpha, \beta, x) &= -f(x, \alpha) \\ \partial_\beta F(\alpha, \beta, x) &= f(x, \beta) \\ \nabla_x F(\alpha, \beta, x) &= \int_\alpha^\beta \nabla_x f(x, t) dt \end{aligned}$$

#### Definizione 28.2

????????????? R OPPURE RN

Sia  $I \in \mathbb{R}$  un intervallo. Curva su  $I \in \mathbb{R} \Rightarrow$  una funzione  $\gamma : I \subseteq \mathbb{R}^n$  che sia continua.

#### Osservazione 28.3

$\gamma(I)$  si chiama supporto della curva, ed è certamente connesso. (una funzione continua manda intervalli connessi in connessi)

#### Definizione 28.4

Sia  $\gamma : [a, b] \mapsto \mathbb{R}^n$  una curva, lunghezza della curva  $\Rightarrow l(\gamma) = \sup \left\{ \sum_{i=1}^N \|\gamma(t_i) - \gamma(t_{i-1})\| : N \in \mathbb{N}, N > 1, t_0 = a, t_N = b, t_{i-1} < t_i \right\}$   
cioè prendo una curva e la approssimo con una spezzata, la più lunga di tutte le poligonali è la lunghezza della curva.

DISEGNO

DISEGNO

**Definizione 28.5**

Una curva  $\gamma : [a, b] \mapsto \mathbb{R}^n$  si dice rettificabile  $\Leftrightarrow f(\gamma) < +\infty$

**Osservazione 28.6**

$$\sum_{i=1}^N \|\gamma(t_i) - \gamma(t_{i-1})\|$$

per il teorema del valore medio differenziale (accrescimenti finiti)

$$\sum_{i=1}^N \|\gamma'(t_i)(t_i - t_{i-1})\| = ??$$

$$\int_a^b \|\gamma'(t)\| dt$$

**Proposizione 28.7**

Se  $\gamma \in \mathbf{C}^1([a, b]; \mathbb{R}^n) \Rightarrow l(\gamma) = \int_a^b \|\gamma'(t)\| dt$

**Osservazione 28.8**

Se  $\gamma$  è la traiettoria di un punto materiale, allora  $\|\gamma\|$  è la norma della velocità istantanea, e quindi  $l(\gamma)$  è lo spazio che si percorre, cioè l'integrale della velocità valutato tra  $t_{i-1}$  e  $t_i$  due istanti di tempo entro i quali si mantiene tale velocità.

**Osservazione 28.9**

Nel caso specifico sarà:

$$X = \{x \in \mathbf{C}^1([a, b]; \mathbb{R}^2) : x(a) = A, x(b) = B\}$$

$$\begin{aligned} F : X &\rightarrow \mathbb{R} \\ x &\rightarrow \int_a^b \|x'(t)\| dt \end{aligned}$$

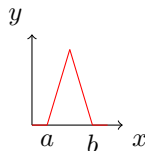
$$\begin{aligned} f : [a, b] \times \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^2 &\rightarrow \mathbb{R} \\ (t, x, x') &\rightarrow \|x'(t)\| \end{aligned}$$

**29 L'Equazione di Eulero**

LEMMA:::LEMMA FONDAMENTALE DEL CALCOLO DELLE VARIAZIONI

Sia  $f \in \mathbf{C}^0([0, 1]; \mathbb{R})$  t.c.:  $\forall v \in \mathbf{C}^0([0, 1]; \mathbb{R})$  con  $v(0) = v(1) = 0$  si abbia  $\int_0^1 f(x)v(x) dx = 0$

Allora  $f(x) \equiv 0 \forall x \in [0, 1]$



*Dimostrazione.*

Per Assurdo, se  $f \not\equiv 0$ , allora  $\exists [0, 1]$  t.c.  $f(x_0) \neq 0$ .

Osservo che se  $x_0 = 0$  allora  $\exists \bar{x}_0 \in ]0, 1[$  t.c.  $f(\bar{x}_0) \neq 0$ .

Osservo che se  $x_0 = 1$  allora  $\exists \bar{x}_0 \in ]0, 1[$  t.c.  $f(\bar{x}_0) \neq 0$

Entrambe le osservazioni per la continuità di  $f$ , significa che se  $x_0$  è un punto in cui la  $f > 0$  allora per la continuità della funzione anche lì vicino si hanno valori maggiori di zero.

Quindi si può pensare  $x_0 \in ]0, 1[$ .

Allora  $\exists a, b \in ]0, 1[$  t.c.  $x_0 \in ]a, b[$  e  $\forall x \in ]a, b[$  vale che  $|f(x)| \geq |f(x_0)|$  sempre per la continuità di  $f$ .

Pensiamo  $f(x_0) > 0$  in questo modo  $|f(x_0)| = f(x_0)$  e scegliamo la funzione  $v(x)$  come disegnata:  $v(x) =$



$$\begin{cases} 0 & x \leq x_0 - \delta \\ \frac{x}{\delta} - \frac{x_0 - \delta}{\delta} & x_0 - \delta < x < x_0 \\ 1 & x = x_0 \\ -\frac{x}{\delta} + \frac{x_0 + \delta}{\delta} & x_0 < x < x_0 + \delta \\ 0 & x \geq x_0 + \delta \end{cases} \quad \text{POSSIBILIPLAUSIBILIERRORI}$$

Se calcoliamo

$$\int_0^1 f(x)v(x) dx = \int_a^b f(x)v(x) dx \geq \frac{1}{2}f(x_0) \int_a^b v(x) dx = \frac{1}{2}f(x_0) \frac{b-a}{2} > 0$$

Se avessi preso  $f(x_0) < 0$  prendo  $v = -v$  e il resto segue...  $\square$

### Osservazione 29.1

Questo lemma è concettualmente analogo al Teorema di Fermat nel capitolo delle derivate.

### Corollario 29.2

LEMMA CASO VETTORIALE.

Sia  $f \in \mathbf{C}^0([a, b]; \mathbb{R}^n)$  tale che  $\forall v \in \mathbf{C}^0([a, b]; \mathbb{R}^n)$  con  $v(0) = v(1) = 0$  si abbia  $\int_0^1 f(x) \bullet v(x) dx = 0$  allora  $f(x) \equiv 0 \forall x \in [0, 1]$ .

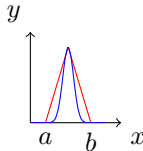
*Dimostrazione.* Per questa dimostrazione si osservano componente per componente.

$$\forall i = 1, 2, \dots, n \text{ scelgo } v_j(x) = \begin{cases} 0 & j \neq i \\ v_i(x) & j = i \end{cases}$$

A questo punto applico il lemma fondamentale alla componente  $i$ -esima  $f_i$  di  $f$ .  $\square$

### Corollario 29.3

Sia  $f \in \mathbf{C}^0([a, b]; \mathbb{R})$  e  $k \in \mathbb{N}$  tale che  $\forall v \in \mathbf{C}^k([a, b]; \mathbb{R}^n)$  con  $v(0) = v(1) = 0$  si abbia  $\int_0^1 f(x)v(x) dx = 0$  allora  $f(x) \equiv 0 \forall x \in [0, 1]$ .



*Dimostrazione.* É sempre lo stesso lemma con l'aggiunta che la funzione  $v$  sia di classe  $\mathbf{C}^k$ . Se si chiama  $u$  la funzione blu e  $v$  la funzione rossa abbiamo:

$$\int_0^1 f(x)u(x) dx > 0$$

Se  $v$  è un po più regolare, prendiamo  $v = u^{(k+1)}(x)$ . cioè se vogliamo  $v \in \mathbf{C}^k$  prendiamo.....

LA DIMOSTRAZIONE È A ME INCOMPRESIBILE.  $\square$

### Teorema 29.4

EQUAZIONE DI EULERO.

Sia  $f \in \mathbf{C}^2([a, b] \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n; \mathbb{R})$  con  $a, b \in \mathbb{R}$  e  $a < b$ .

Sia  $X = \{x \in \mathbf{C}^2([a, b]; \mathbb{R}^n) : x(a) = A, x(b) = B\}$  con  $A, B \in \mathbb{R}^n$ .

$$\begin{aligned} F: X &\rightarrow \mathbb{R} \\ x &\rightarrow \int_a^b f(t, x(t), x'(t)) dt \end{aligned}$$

Se la funzione  $x_* \in X$  è t.c.  $F(x_*) = \max \{F(x) : x \in X\}$  [o min]

Allora  $\partial_x f(t, x_*(t), x'_*(t)) - \frac{d}{dt} \partial_{x'} f(t, x_*(t), x'_*(t)) = 0$ .

Questa ultima equazione è l'equazione di Eulero-Lagrange del Funzionale  $F$  o a volte detta variazione prima del funzionale  $F$ . È un sistema di  $n$  equazioni differenziali ordinarie del secondo ordine nella funzione incognita  $x_*$ .

*Dimostrazione.* Sia  $\varphi(h) = F(x_* + hv)$ , dove  $x_* \in X$  e  $x_* + hv \in X$ , con  $h$  piccolo.

L'equazione di Eulero-Lagrange in apparenza complicata è analoga ad un'equazione di analisi del tipo  $f' = 0$  oppure in analisi due a  $\nabla f = 0$ . solo che ora sono cavoli amari.

Come si sceglie la variazione  $v$  in modo che  $x_* + hv \in X$ , con  $h$  piccolo.

$X$  è l'insieme delle funzioni di  $\mathbf{C}^2$ , si sa che  $x_* \in \mathbf{C}^2$ , una scelta opportuna di  $v$  è  $v \in \mathbf{C}^2([a, b]; \mathbb{R}^n)$ .

Inoltre deve essere che  $x_*(a) + hv(a) = A$  e  $x_*(b) + hv(b) = B$  per restare dentro l'insieme  $X$ . Quindi  $v(a) = v(b) = 0$ .  $h$  è uno scalare e per ipotesi si sa che  $F(x_*)$  è punto di massimo, quindi si conclude che  $h = 0$  è punto di massimo per la funzione  $\varphi$ .

.....

□

e qui finiscono gli appunti almeno per conto mio.

**Parte I**

**Temi Esame**



## Capitolo 7

### T.E. 2012/2013 scritto n.1

#### 30 Esercizio

Sia  $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$  data da  $f(x, y) = e^{-|4 \cdot \arctan(x \cdot y^2)|}$

**A** Nessuna delle altre affermazioni è esatta

**B**  $f$  ammette almeno un punto di minimo assoluto

**C**  $\inf_R^2 f = 0$

**D**  $f$  ha infiniti punti di massimo

L'esponente è una funzione monotona crescente quindi la ricerca di massimi a minimi si sposta alla ricerca dei massimi e minimi dell'esponente.

L'esponente assume sempre valori negativi. Inoltre risulta essere una quantità limitata tra  $[0; 4\frac{\pi}{0}[$ , quindi  $\sup_R^2 f = e^0 = 1$  e  $\inf_R^2 f = e^{-2\pi}$

Sono quindi punti di massimo tutti i punti che rendono nullo l'esponente:  $\arctan(xy^2) = 0 \Rightarrow x = 0, \forall y$  or  $y = 0, \forall x$  che sono i due assi. Essendo questi punti del dominio allora si può dire  $\sup_R^2 f = \max_R^2 f = 0$

I punti di minimo si hanno per  $|\arctan(xy^2)| = \frac{\pi}{2}$  quindi per  $x \rightarrow \pm\infty$  or  $y \rightarrow \pm\infty$  essendo questi valori al limite il valore  $e^{-2\pi}$  è  $\inf$  per  $f$

La risposta vera è quindi la D.

#### 31 Esercizio

Sia  $(X, d)$  uno spazio metrico e siano  $A, B$  sottoinsiemi di  $X$ . Quale/i delle seguenti affermazioni è/sono certamente vera/e?

**1**  $A \subseteq B \Rightarrow \partial A \subseteq \partial B$

**2**  $A \subseteq B \Rightarrow \bar{A} \subseteq \bar{B}$

**A** Entrambe

**B** Solo la seconda

**C** Nessuna delle affermazioni è esatta

**D** Solo la prima

La prima affermazione è certamente falsa poiché se scelto come spazio metrico  $\mathbb{R}^2$  con distanza quella euclidea. Scelgo  $A = B((0,0), 2)$ ,  $B = B((0,0), 1)$  allora si ha che  $\partial A = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : d((x, y), (0,0)) = 2\}$  e  $\partial B = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : d((x, y), (0,0)) = 1\}$  e questi due insiemi sono disgiunti.

la seconda è vera ma devo pensarci un po...

