

Appunti di analisi 1

Giacomo Simonetto

autunno 2023

Sommario

Appunti del corso di Analisi 1 della facoltà di Ingegneria Informatica dell'Università di Padova.

Indice

1	Cenni di teoria degli insiemi	4
1.1	Notazioni e definizioni di base	4
1.2	Operazioni	4
1.3	Quantificatori	4
1.4	Negazione di una proposizione	4
2	Sommatorie	5
2.1	Definizione	5
2.2	Proprietà	5
2.3	Principio di induzione	5
3	Fattoriali	6
3.1	Definizione	6
3.2	Proprietà	6
4	Coefficienti binomiali	6
4.1	Proprietà	6
4.2	Dimostrazione binomio di Newton	6
5	Numeri razionali	7
5.1	Definizione	7
5.2	Proprietà di campo	7
5.3	Relazione d'ordine	7
5.4	Discrezione dei numeri razionali	7
6	Numeri reali	8
6.1	Definizione	8
6.2	Proprietà	8
6.3	Teorema di completezza pt.1	8
6.4	Intervalli	8
7	Modulo	9
7.1	Definizione	9
7.2	Proprietà	9
7.3	Disuguaglianza triangolare pt.1	9
8	Insiemi limitati e illimitati	10
8.1	Insiemi limitati e illimitati	10
8.2	Maggioranti e minoranti	10
8.3	Massimi e minimi	10
8.4	Estremi superiori e inferiori	10
8.5	Teorema di unicità dell'esistenza di max, min, sup, inf	10
8.6	Corrispondenza tra sup e max, inf e min	10
8.7	Teorema di completezza pt.2	10
9	Potenze, radici, logaritmi	11
9.1	Potenze intere	11
9.2	Esistenza e unicità delle radici intere	11
9.3	Potenze razionali (o radici)	11
9.4	Potenze reali (o esponenziali)	11
9.5	Logaritmi	11
9.6	Proprietà dei logaritmi	11

10 Numeri complessi	12
10.1 Definizione e forma algebrica	12
10.2 Proprietà	12
10.3 Coniugato e proprietà	12
10.4 Piano di Gauss	12
10.5 Modulo e proprietà	13
10.6 Disuguaglianza triangolare pt.2	13
10.7 Forma trigonometrica	13
10.8 Forma esponenziale	14
11 Equazioni e disequazioni in \mathbb{C}	15
11.1 Teorema fondamentale dell'algebra	15
11.2 Teorema di decomposizione di polinomi	16
11.3 Radici n-esime	16
12 Funzioni	17
13 Funzioni iperboliche	19
13.1 Coseno iperbolico	19
13.2 Seno iperbolico	19
13.3 Relazione fondamentale	19
13.4 Tangente iperbolica	20
14 Limiti	21
14.1 Intorni	21
14.2 Punti di accumulazione	21
14.3 Punti isolati	21
14.4 Intorni e proprietà vere definitivamente	22
14.5 Limite di una funzione	22
14.6 Teorema di unicità del limite	23
14.7 Limite finito implica locale limitatezza	23
14.8 Limite destro e limite sinistro	23
14.9 Relazione tra limite e modulo	24
14.10 Teorema di permanenza del segno	25
14.11 Teorema dei due carabinieri	26
14.12 Teorema sull'algebra dei limiti	27
14.13 Teorema del confronto	27
14.14 Limiti delle funzioni composte	27
14.15 Limiti delle funzioni monotone	27
14.16 Funzioni continue e continuità	27
14.17 Gerarchie degli infiniti	27

1 Cenni di teoria degli insiemi

1.1 Notazioni e definizioni di base

$$\begin{aligned}\mathbb{N} &= \{ \text{numeri naturali} \} = \{ 0, 1, 2, 3, \dots \} \\ \mathbb{Z} &= \{ \text{numeri interi} \} = \{ 0, +1, -1, +2, -2, \dots \} \\ \mathbb{Q} &= \{ \text{numeri razionali} \} = \left\{ \frac{p}{q} \text{ t.c. } p, q \in \mathbb{N}, q \neq 0 \right\} \\ \mathbb{R} &= \{ \text{numeri reali} \} \\ \mathbb{C} &= \{ \text{numeri complessi} \}\end{aligned}$$

$$\begin{array}{lcl} a \in A & \text{a (elemento) appartiene ad A (insieme)} & \\ \hline A \subseteq B & \text{A è un sottoinsieme di B} & \\ \hline A = B & \begin{array}{l} \text{gli insiemi A e B hanno gli stessi elementi} \\ A = B \Leftrightarrow A \subseteq B \wedge B \subseteq A \end{array} & \end{array}$$

1.2 Operazioni

unione	$A \cup B$	insieme costituito dagli elementi di A e dagli elementi di B
intersezione	$A \cap B$	insieme costituito dagli elementi che appartengono sia ad A che a B
differenza	$A \setminus B$	insieme costituito dagli elementi di A che non appartengono anche a B
prodotto cartesiano	$A \times B$	insieme delle coppie ordinate di elementi formate da un elemento di A e da un elemento di B $A \times B = \{(a, b) \text{ t.c. } a \in A \wedge b \in B\}$

1.3 Quantificatori

quantificatore universale	\forall	per ogni
quantificatore esistenziale	\exists	esiste
quantificatore esistenziale unico	$\exists!$	esiste ed è unico

1.4 Negazione di una proposizione

Data una proposizione R , la sua negazione $\neg R$ è una proposizione Q che è vera se e solo se R è falsa.

proposizione R	proposizione $Q = \neg R$
$\forall x \in A : P(x)$	$\exists x \in A : \neg P(x)$
$\exists x \in A : P(x)$	$\forall x \in A : \neg P(x)$

2 Sommatorie

2.1 Definizione

$$\sum_{i=n_0}^n x_i := x_{n_0} + x_{n_0+1} + x_{n_0+2} + \cdots + x_n$$

per $n_0, n \in \mathbb{Z}$ con $n_0 \leq n$

2.2 Proprietà

proprietà 1 (distributiva) $c \cdot \sum_{i=n_0}^n x_i = \sum_{i=n_0}^n c \cdot x_i \quad \forall c \in \mathbb{R}$

proprietà 2 $\sum_{i=n_0}^n x_i + y_i = \sum_{i=n_0}^n x_i + \sum_{i=n_0}^n y_i$

proprietà 3.1 $\sum_{i=n_0}^{n+m} x_i = \sum_{i=n_0}^n x_i + \sum_{i=n+1}^{n+m} x_i$

proprietà 3.2 per $m = 0$ $\sum_{i=n_0}^n x_i = \sum_{i=n_0}^{n-1} x_i + x_n$

proprietà 4 (sostituzione del pedice) $\sum_{i=n_0}^n x_i = \sum_{j=n_0+m}^{n+m} x_j$

proprietà 5 (variable muta) $\sum_{i=n_0}^n x_i = \sum_{j=n_0}^n x_j = \sum_{k=n_0}^n x_k$

2.3 Principio di induzione

P: Siano:

- $n, n_0 \in \mathbb{N}$ t.c. $n \geq n_0$
- $P(n)$ una proposizione ben definita

H: supponiamo che:

- $P(n_0)$ sia vera
- $\forall n \geq n_0$, se $P(n)$ è vera, allora lo è anche $P(n+1)$

T: allora $P(n)$ è vera $\forall n \geq n_0$

Dim: Dimostrazione per assurdo

Supponiamo che la tesi sia falsa: $\exists \bar{n} \geq n_0$ t.c. $P(\bar{n})$ è falsa

- Se $\bar{n} = n_0$, per cui $P(n_0)$ è falsa
- Se $\bar{n} > n_0$, per ipotesi anche $P(\bar{n}-1), P(\bar{n}-2), P(\bar{n}-3), \dots, P(n_0)$ sono false

Questo va contro l'ipotesi iniziale che $P(n_0)$ sia vera.

Per cui $\nexists \bar{n} \geq n_0$ t.c. $P(\bar{n})$ sia falsa e $P(n)$ è vera $\forall n \geq n_0$

□

3 Fattoriali

3.1 Definizione

$$n! := \begin{cases} 1 & n = 0 \\ n \cdot (n-1) \cdot (n-2) \cdot \dots \cdot 1 & n > 0 \end{cases}$$

per $n \in \mathbb{N}$ e $n \geq 0$

Numero di riordinamenti di una famiglia di n elementi

3.2 Proprietà

$$(n+1)! = n! \cdot (n+1)$$

4 Coefficienti binomiali

$$\binom{n}{k} := \frac{n!}{k! \cdot (n-k)!}$$

per $n, k \in \mathbb{R}$

Significato geometrico ...

4.1 Proprietà

$$\text{proprietà 1.1} \quad \binom{n}{n} = 1$$

$$\text{proprietà 1.2} \quad \binom{n}{0} = 1$$

$$\text{proprietà 2} \quad \binom{n}{k} = \binom{n}{n-k}$$

$$\text{proprietà 3} \quad \binom{n}{k} + \binom{n}{k+1} = \binom{n+1}{k+1}$$

$$\text{proprietà 4 (binomio di Newton)} \quad (a+b)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \cdot a^k \cdot b^{n-k}$$

4.2 Dimostrazione binomio di Newton

...

5 Numeri razionali

5.1 Definizione

$$\mathbb{Q} = \{ \text{numeri razionali} \} = \left\{ \frac{p}{q} \text{ t.c. } p, q \in \mathbb{N}, q \neq 0 \right\}$$

5.2 Proprietà di campo

Quando un insieme soddisfa le seguenti proprietà, è detto campo. L'insieme \mathbb{Q} è un campo.

Proprietà della somma

- S1 proprietà commutativa $a + b = b + a$
- S2 proprietà associativa $(a + b) + c = a + (b + c)$
- S3 $\exists!$ elemento neutro indicato con 0 t.c. $a + 0 = a$
- S4 \exists elemento opposto indicato con $-a$ t.c. $a + (-a) = 0$

Proprietà del prodotto

- P1 proprietà commutativa $a \cdot b = b \cdot a$
- P2 proprietà associativa $(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$
- P3 proprietà distributiva $(a + b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c$
- P4 $\exists!$ elemento neutro indicato con 1 t.c. $a \cdot 1 = a$
- P5 $\exists!$ elemento reciproco indicato con $\frac{1}{a}$ o a^{-1} t.c. $a \cdot \frac{1}{a} = 1$

5.3 Relazione d'ordine

Dato un insieme A , una relazione d'ordine (a, b) (es. $a \leq b$) su A è un sottoinsieme $R = A \times A$ tale che:

- O1 $(a, a') \in R, \forall a \in A$
- O2 Se $(a, a') \in R$ e $(a', a'') \in R$ allora $(a, a'') \in R$
- O3 Se $(a, a') \in R$ e $(a', a) \in R$ allora $a = a'$
- O4 Se $\forall a, a' \in A$ vale $(a, a') \in R$ o $(a', a) \in R$, ovvero quando presi due elementi è sempre possibile stabilire una relazione d'ordine valida

Quando un campo soddisfa le prime tre condizioni, allora viene detto ordinato. Quando un campo soddisfa anche la quarta condizione, allora viene detto totalmente ordinato.

L'insieme \mathbb{Q} è un campo totalmente ordinato, per cui è possibile rappresentarne gli elementi in una retta.

5.4 Discrezione dei numeri razionali

L'insieme \mathbb{Q} è discreto: data una retta, non tutti i punti di tale retta appartengono a \mathbb{Q} . Ad esempio il punto $\sqrt{2} \notin \mathbb{Q}$: $\nexists x \in \mathbb{Q}$ t.c. $x^2 = 2$.

H: $x \in \mathbb{Q}$ e \mathbb{Q} è l'insieme dei numeri razionali

T: $\nexists x$ t.c. $x^2 = 2$

Dim: supponiamo per assurdo che $\exists x \in \mathbb{Q}$ t.c. $x^2 = 2$ per cui $x = \frac{p}{q}$, $p, q \in \mathbb{Z}, q \neq 0$ e p, q primi tra loro

per cui $x^2 = 2 \Rightarrow \frac{p^2}{q^2} = 2 \Rightarrow p^2 = 2 \cdot q^2 \Rightarrow p$ è pari $\Rightarrow \exists \bar{p}$ t.c. $p = 2 \cdot \bar{p}$

per cui $2 = \frac{p^2}{q^2} = \frac{(2 \cdot \bar{p})^2}{q^2} = 4 \cdot \frac{\bar{p}^2}{q^2} \Rightarrow q^2 = 2 \cdot \bar{p}^2 \Rightarrow q$ è pari

ma p e q sono stati assunti primi tra loro, per cui l'ipotesi che $\exists x \in \mathbb{Q}$ t.c. $x^2 = 2$ è errata \square

6 Numeri reali

6.1 Definizione

L'insieme \mathbb{R} è composto da elementi (detti numeri reali) definiti come allineamenti decimali che possono essere:

- limitati es. $5,347$
- illimitati periodici es. $6,\overline{2}$
- illimitati non periodici es. π o $\sqrt{2}$

Questa estensione dell'insieme \mathbb{Q} serve per poter risolvere $x^2 = 2$.

6.2 Proprietà

Su \mathbb{R} si possono estendere le proprietà di somma, prodotto e ordinamento di \mathbb{Q} , per cui anche \mathbb{R} è un insieme totalmente ordinato.

6.3 Teorema di completezza pt.1

H: Dati $A, B \subseteq \mathbb{R}$ tali che $\forall a \in A$ e $\forall b \in B$, $a \leq b$

T: $\exists c \in \mathbb{R}$ t.c. $a \leq c \leq b, \forall a \in A$ e $\forall b \in B$ dove c è detto elemento separatore di A e B

In altre parole, presi $A, B \subseteq \mathbb{R}$ tali che $\forall a \in A$ e $\forall b \in B$, $a \leq b$ è sempre possibile trovare l'elemento separatore tra i due insiemi.

Questo teorema vale solo in \mathbb{R} e non in \mathbb{Q} :

dati $A = \{x \geq 0 \text{ t.c. } x^2 \leq 2\}$ e $B = \{x \geq 0 \text{ t.c. } x^2 \geq 2\}$, $\exists c = \sqrt{2} \in \mathbb{R}$

6.4 Intervalli

Dato che \mathbb{R} è un sistema completo, si può parlare di intervalli.

- intervalli limitati

$$(a, b) =]a, b[= \{x \in \mathbb{R}, a < x < b\}$$

$$(a, b] =]a, b] = \{x \in \mathbb{R}, a < x \leq b\}$$

$$[a, b) = [a, b[= \{x \in \mathbb{R}, a \leq x < b\}$$

$$[a, b] = [a, b] = \{x \in \mathbb{R}, a \leq x \leq b\}$$

- intervalli illimitati

$$(a, +\infty) =]a, +\infty[= \{x \in \mathbb{R}, x > a\}$$

$$[a, +\infty) = [a, +\infty[= \{x \in \mathbb{R}, x \geq a\}$$

$$(-\infty, b) =]-\infty, b[= \{x \in \mathbb{R}, x < b\}$$

$$(-\infty, b] =]-\infty, b] = \{x \in \mathbb{R}, x \leq b\}$$

Da notare che $+\infty, -\infty \notin \mathbb{R}$, per cui è stato definito $\mathbb{R}^* \text{ o } \overline{\mathbb{R}} = \mathbb{R} \cup \{-\infty, +\infty\}$

7 Modulo

7.1 Definizione

$$|a| := \begin{cases} a & a \geq 0 \\ -a & a < 0 \end{cases}$$

per $a \in \mathbb{R}$

7.2 Proprietà

1. $|a| \leq M \Leftrightarrow -M \leq a \leq M$ per $M \geq 0$
2. $|a| \geq M \Leftrightarrow a \leq -M$ o $a \geq M$ per $M \geq 0$
3. $-|a| \leq a \leq |a|$

7.3 Disuguaglianza triangolare pt.1

1. $|a + b| \leq |a| + |b|$
2. $||a| - |b|| \leq |a - b|$, cioè $-|a - b| \leq |a| - |b| \leq |a - b|$

blablabla

8 Insiemi limitati e illimitati

8.1 Insiemi limitati e illimitati

Sia $A \subseteq \mathbb{R}, A \neq \emptyset$:

A è **limitato superiormente** se $\exists M \in \mathbb{R}$ t.c. $a \leq M, \forall a \in A$.

A è **illimitato superiormente** se $\nexists M \in \mathbb{R}$ t.c. $a \leq M, \forall a \in A$.

A è **limitato inferiormente** se $\exists N \in \mathbb{R}$ t.c. $a \geq N, \forall a \in A$.

A è **illimitato inferiormente** se $\nexists n \in \mathbb{R}$ t.c. $a \geq n, \forall a \in A$.

A è un insieme limitato se è limitato superiormente e inferiormente, cioè se $\exists N \in \mathbb{R}$ t.c. $a \leq |N|, \forall a \in A$.

8.2 Maggioranti e minoranti

Un tale numero M che limita A superiormente è detto **maggiorante** di A .

Se A non è limitato superiormente, non ha maggioranti.

Un tale numero N che limita A inferiormente è detto **minorante** di A .

Se A non è limitato inferiormente, non ha minoranti.

8.3 Massimi e minimi

Sia m un maggiorante di A , se $m \in A$ allora m è detto **massimo** di A .

Sia n un minorante di A , se $n \in A$ allora n è detto **minimo** di A .

8.4 Estremi superiori e inferiori

Sia $A \subset \mathbb{R}, A \neq \emptyset$ e A è superiormente limitato, un numero S detto $\sup A$ è detto **estremo superiore** di A quando è il minimo dei maggioranti di A .

$S = \sup A$ se $S = \min \{ \text{maggioranti di } A \}$ (definizione)

$S = \sup A$ se $\begin{cases} S \text{ è maggiorante di } A \\ \forall \varepsilon > 0, \exists a \in A \text{ t.c. } a < S - \varepsilon \end{cases}$ (\nexists maggiorante più piccolo) (caratterizzazione)

Sia $A \subset \mathbb{R}, A \neq \emptyset$ e A è inferiormente limitato, un numero I detto $\inf A$ è detto **estremo inferiore** di A quando è il massimo dei minoranti di A .

$I = \inf A$ se $I = \max \{ \text{minoranti di } A \}$ (definizione)

$I = \inf A$ se $\begin{cases} I \text{ è minorante di } A \\ \forall \varepsilon > 0, \exists a \in A \text{ t.c. } a < I + \varepsilon \end{cases}$ (\nexists minorante più grande) (caratterizzazione)

8.5 Teorema di unicità dell'esistenza di max, min, sup, inf

Se $\max A$ esiste, allora è unico. (dim. per assurdo)

Se $\min A$ esiste, allora è unico. (dim. per assurdo)

Se $\sup A$ esiste, allora è unico. (dim. unicità del minimo dei maggioranti)

Se $\inf A$ esiste, allora è unico. (dim. unicità del massimo dei minoranti)

8.6 Corrispondenza tra sup e max, inf e min

Se $\exists \sup A$ e $\sup A \in A$, allora $\exists \max A$ e $\sup A = \max A$.

Se $\exists \inf A$ e $\inf A \in A$, allora $\exists \min A$ e $\inf A = \min A$.

8.7 Teorema di completezza pt.2

Se A è superiormente limitato, allora A ammette un estremo superiore in \mathbb{R} . Se A è inferiormente limitato, allora A ammette un estremo inferiore in \mathbb{R} .

9 Potenze, radici, logaritmi

9.1 Potenze intere

Sia $\alpha \in \mathbb{R}, p \in \mathbb{Z}$:

$$\alpha^p := \begin{cases} \alpha \cdot \alpha \cdot \dots \cdot \alpha \text{ (per } p \text{ volte)} & p > 0 \\ 1 & p = 0, \alpha \neq 0 \\ \frac{1}{\alpha \cdot \alpha \cdot \dots \cdot \alpha \text{ (per } -p \text{ volte)}} & p < 0, \alpha \neq 0 \end{cases}$$

9.2 Esistenza e unicità delle radici intere

Sia $y \in \mathbb{R}, y \geq 0, n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$, allora $\exists! r \in \mathbb{R}$ t.c. $r^n = y$.
 $r = \sqrt[n]{y}$ è chiamata radice ennesima di y

9.3 Potenze razionali (o radici)

Sia $a \in \mathbb{R}, p, q \in \mathbb{Z}, q > 0$:

$$a^{\frac{p}{q}} := \begin{cases} \sqrt[q]{a^p} = (a^p)^{\frac{1}{q}} & a \neq 0 \text{ o } p \neq 0 \\ 1 & a \neq 0, p = 0 \\ 0 & a = 0, p > 0 \end{cases}$$

9.4 Potenze reali (o esponenziali)

Sia $a, r \in \mathbb{R}, a \geq 0$:

$$a^r := \begin{cases} \sup \{a^s \text{ t.c. } s \leq r, s \in \mathbb{Q}\} & a \neq 0, r > 0 \\ \frac{1}{a^{-r}} & a \neq 0, r < 0 \\ 1 & a \neq 0, r = 0 \\ 0 & a = 0, r \neq 0 \end{cases}$$

9.5 Logaritmi

Siano $a, b \in \mathbb{R}, a > 0, a \neq 1, b > 0$, allora $\exists! x \in \mathbb{R}$ t.c. $a^x = b$ con

$$x = \log_a b = \begin{cases} \sup \{r \in \mathbb{R} \text{ t.c. } a^r \leq b\} & a > 1 \\ \sup \{r \in \mathbb{R} \text{ t.c. } a^r \geq b\} & 0 < a < 1 \end{cases}$$

9.6 Proprietà dei logaritmi

proprietà 1	$\log_a a = 1$
proprietà 2	$\log_a 1 = 0$
proprietà 3	$\log_a a^c = c$
proprietà 4	$\log_a x \cdot y = \log_a x + \log_a y$
proprietà 5.1 (potenza)	$\log_a x^\alpha = \alpha \cdot \log_a x$
proprietà 5.2 (caso $\alpha = -1$)	$\log_a \frac{1}{x} = -\log_a x$
proprietà 6	$\log_a \frac{x}{y} = \log_a x - \log_a y$
proprietà 7.1 (cambio di base)	$\log_a b = \log_a c \cdot \log_c b$
proprietà 7.2 (caso $c = \frac{1}{a}$)	$\log_a b = -\log_{\frac{1}{a}} b$

10 Numeri complessi

10.1 Definizione e forma algebrica

Per risolvere equazioni del tipo $x^2 + 1 = 0$ è necessario introdurre un nuovo insieme definito con \mathbb{C} definito come

$$\mathbb{C} = \{x + iy \text{ t.c. } x, y \in \mathbb{R} \text{ con } i = \text{unità immaginaria}\}$$

Sia $z \in \mathbb{C}$:

$$z = x + iy \quad \text{forma algebrica di } z \in \mathbb{C}$$

$$x = \Re(z) \quad \text{parte reale di } z$$

$$y = \Im(z) \quad \text{parte immaginaria di } z$$

Si osserva che se $\Im(z) = 0 \Leftrightarrow y = 0 \Leftrightarrow z = x \Leftrightarrow z \in \mathbb{R}$
per cui $\mathbb{R} \subset \mathbb{C}$ e $\mathbb{R} = \{z \in \mathbb{C} \text{ t.c. } \Im(z) = 0\}$

10.2 Proprietà

$$z_1 + z_2 = (x_1 + x_2) + i(y_1 + y_2)$$

$$z_1 \cdot z_2 = (x_1 \cdot x_2 - y_1 \cdot y_2) + i(x_1 \cdot y_2 + x_2 \cdot y_1)$$

$$0 + i0 = 0 \text{ è l'elemento neutro della somma}$$

$$1 + i0 = 1 \text{ è l'elemento unitario (neutro del prodotto)}$$

$$-z = (-x) + i(-y) \text{ opposto di } z = x + iy$$

$$z^{-1} = \frac{1}{z} = \frac{x}{x^2 + y^2} - i \cdot \frac{y}{x^2 + y^2} \text{ inverso di } z$$

Definite queste proprietà, l'insieme \mathbb{C} è un campo. Dato che non è possibile stabilire una relazione d'ordine \mathbb{C} non è un campo ordinato e tantomeno totalmente ordinato.

10.3 Coniugato e proprietà

Sia $z \in \mathbb{C}$, $z = x + iy$ con $x, y \in \mathbb{R}$, il suo coniugato è $\bar{z} = x - iy$.

$$\text{parte reale} \quad \Re(\bar{z}) = \Re(z)$$

$$\text{parte immaginaria} \quad \Im(\bar{z}) = -\Im(z)$$

$$\text{coniugato in } \mathbb{R} \quad z = \bar{z} \Leftrightarrow z \in \mathbb{R}$$

$$\text{somma} \quad z_1 + \bar{z}_1 = 2x_1$$

$$\text{differenza} \quad z_1 - \bar{z}_1 = 2iy_1$$

$$\text{somma} \quad \overline{z_1 + z_2} = \bar{z}_1 + \bar{z}_2$$

$$\text{prodotto} \quad \overline{z_1 \cdot z_2} = \bar{z}_1 \cdot \bar{z}_2$$

$$\text{quoziente} \quad \overline{\left(\frac{z_1}{z_2}\right)} = \frac{\bar{z}_1}{\bar{z}_2}$$

$$\text{doppio coniugato} \quad \overline{(\bar{z})} = z$$

10.4 Piano di Gauss

I numeri complessi possono essere rappresentati in un piano cartesiano, chiamato piano di Gauss, secondo le loro coordinate $(x; y) = (\Re(z); \Im(z))$.

Se $z \in \mathbb{R}$ il punto corrispondente sul piano giace sull'asse x .

Inoltre due numeri complessi coniugati sono simmetrici rispetto all'asse x .

10.5 Modulo e proprietà

Il modulo di un numero complesso è la distanza del punto dall'origine sul piano di Gauss.

$$|z| = \sqrt{x^2 + y^2}$$

modulo in \mathbb{R}	$ z = \sqrt{x^2 + 0^2} = x $
rel. d'ordine	$ z \geq 0$
coniugato	$ z = \bar{z} $
prodotto	$ z_1 \cdot z_2 = z_1 \cdot z_2 $
inverso	$\left \frac{1}{z} \right = \frac{1}{ z }$
quoziente	$\left \frac{z_1}{z_2} \right = \frac{ z_1 }{ z_2 }$

10.6 Disuguaglianza triangolare pt.2

$$|z_1 + z_2| \leq |z_1| + |z_2|$$

$$||z_1| - |z_2|| \leq |z_1 - z_2|$$

$|z_1 + z_2|$ corrisponde al "vettore" ottenuto dalla somma tra del "vettore" $|z_1|$ e il "vettore" $|z_2|$. Graficamente si forma un triangolo con lati z_1 , z_2 e $z_1 + z_2$, per cui la prima disuguaglianza "garantisce" che il triangolo non sia degenere.

Analogamente per la seconda disuguaglianza, dove al posto della somma, c'è la differenza.

Dimostrazione ... si quadra e si sviluppa il modulo ... per la seconda si impiega la prima ...

10.7 Forma trigonometrica

Un numero complesso z può essere rappresentato secondo sue coordinate polari:

$$z := \rho \cdot (\cos \vartheta + i \sin \vartheta)$$

con

$$\rho = \text{modulo di } z, \text{ ovvero la distanza tra } z \text{ e l'origine}$$

$$= |z| = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\vartheta = \text{argomento di } z, \text{ ovvero l'angolo tra l'asse } x \text{ e il modulo di } z$$

$$= \arg(z) = \begin{cases} \cos \vartheta = \frac{x}{\rho} \\ \sin \vartheta = \frac{y}{\rho} \end{cases}$$

Si nota che l'argomento di un numero complesso è determinato anche per multipli di 2π , per cui è definito argomento principale di z : $\text{Arg}(z)$ l'unico valore per $\arg(z)$ nell'intervallo $(-\pi; \pi]$.

Inoltre $\arg(z)$ non è definito per $z = 0$.

Il coniugato di $z = \rho(\cos \vartheta + i \sin \vartheta)$ è $\bar{z} = \rho(\cos \vartheta - i \sin \vartheta)$

Proprietà dell'argomento

Siano $z_1, z_2 \in \mathbb{C} \setminus \{0\}$:

$$\arg(z_1 \cdot z_2) = \arg(z_1) + \arg(z_2)$$

$$\arg\left(\frac{z_1}{z_2}\right) = \arg(z_1) - \arg(z_2)$$

Formule di De Moivre e potenze con la forma trigonometrica

Siano $z, z_1, z_2 \in \mathbb{C} \setminus \{0\}$:

$$\begin{aligned} z_1 \cdot z_2 &= \begin{cases} \text{modulo} &= |z_1| \cdot |z_2| = \rho_1 \cdot \rho_2 \\ \text{argomento} &= \arg(z_1) + \arg(z_2) = \vartheta_1 + \vartheta_2 \end{cases} \\ \frac{z_1}{z_2} &= \begin{cases} \text{modulo} &= \frac{|z_1|}{|z_2|} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \\ \text{argomento} &= \arg(z_1) - \arg(z_2) = \vartheta_1 - \vartheta_2 \end{cases} \\ z^n &= \begin{cases} \text{modulo} &= |z|^n = \rho^n \\ \text{argomento} &= \arg(z) \cdot n = n\vartheta \end{cases} \end{aligned}$$

10.8 Forma esponenziale

Un numero complesso z può essere rappresentato in forma esponenziale:

$$z := \rho \cdot e^{i\vartheta}$$

con

$$\begin{aligned} \rho &= \text{modulo di } z \\ e^{i\vartheta} &= \cos \vartheta + i \sin \vartheta \quad (\text{Formula di Eulero}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cos \vartheta &= \frac{e^{i\vartheta} + e^{-i\vartheta}}{2} \\ \sin \vartheta &= \frac{e^{i\vartheta} - e^{-i\vartheta}}{2i} \end{aligned}$$

Il coniugato di $z = \rho e^{i\vartheta}$ è $\bar{z} = \rho e^{-i\vartheta}$

Se $\vartheta = 0 \rightarrow e^i = 1$

Se $\vartheta = \pi \rightarrow e^{i\pi} = -1$

Proprietà di $e^{i\vartheta}$

Siano $z, z_1, z_2 \in \mathbb{C}$

$$\begin{aligned} e^z &= \begin{cases} \text{modulo} & e^x \\ \text{argomento} & y \end{cases} \\ e^z &\neq 0 \quad \forall z \in \mathbb{C} \\ e^{z_1} \cdot e^{z_2} &= e^{z_1+z_2} \\ \frac{e^{z_1}}{e^{z_2}} &= e^{z_1-z_2} \end{aligned}$$

Prodotti, quozienti e potenze con la forma esponenziale

Siano $z, z_1, z_2 \in \mathbb{C} \setminus \{0\}$:

$$\begin{aligned} z_1 \cdot z_2 &= \rho_1 \rho_2 \cdot e^{i(\vartheta_1+\vartheta_2)} \\ \frac{z_1}{z_2} &= \frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot e^{i(\vartheta_1-\vartheta_2)} \\ z^n &= \rho^n \cdot e^{in\vartheta} \end{aligned}$$

11 Equazioni e disequazioni in \mathbb{C}

11.1 Teorema fondamentale dell'algebra

Teorema fondamentale dell'algebra

H: Sia $n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ e $P(z) = a_n z^n + a_{n-1} z^{n-1} + a_{n-2} z^{n-2} + \dots + a_0$
con $a_n \neq 0$, $a_j \in \mathbb{C} \forall j \in [0; n]$

T: Allora esiste almeno una radice di P , cioè una soluzione dell'equazione $P(z) = 0$, con $z \in \mathbb{C}$. La soluzione z è chiamata zero di P .

Molteplicità di una soluzione

H: Sia $P(z)$ come sopra e $z_0 \in \mathbb{C}$ t.c. $P(z_0) = 0$

T: z_0 è uno zero con molteplicità $k \in \mathbb{N}$ se $\exists Q(x)$ di grado $n - k$ t.c.
 $P(z) = (z - z_0)^k \cdot Q(z)$ e $Q(z_0) \neq 0$

Numero di soluzioni di un polinomio di grado n

H: Sia $P(z)$ come sopra (di grado n)

T: $P(z) = 0$ ha esattamente n soluzioni se contate con la propria molteplicità

Dim: applicando il teorema fondamentale dell'algebra a $P(z)$ si ottiene che
 $\exists z_0 \in \mathbb{C}$ t.c. $P(z_0) = 0$, per cui $\exists Q(z)$ t.c. $P(z) = (z - z_0) \cdot Q(z)$
riapplicando il teorema n volte si ottiene che
 $P(z) = (z - z_0) \cdot (z - z_1) \cdot (z - z_2) \cdot \dots \cdot (z - z_n)$
sono state, così, trovate n soluzioni z_0, z_1, \dots, z_n di molteplicità 1 □

Soluzioni complesse coniugate per polinomi reali

P: Sia $P(x)$ un polinomio di grado n a coefficienti reali

H: se $z_0 \in \mathbb{C}$ una soluzione di $P(x)$

T: allora anche $\overline{z_0}$ è una soluzione di $P(x)$

Dim: Sia $P(z_0) = 0$ con $z_0 \in \mathbb{C}$

$$\begin{aligned} P(\overline{z_0}) &= a_n \overline{z_0}^n + a_{n-1} \overline{z_0}^{n-1} + a_{n-2} \overline{z_0}^{n-2} + \dots + a_0 \\ &= a_n \overline{z_0}^n + a_{n-1} \overline{z_0}^{n-1} + a_{n-2} \overline{z_0}^{n-2} + \dots + a_0 \\ &= \overline{a_n z_0^n} + \overline{a_{n-1} z_0^{n-1}} + \overline{a_{n-2} z_0^{n-2}} + \dots + \overline{a_0} \\ &= \overline{a_n z_0^n + a_{n-1} z_0^{n-1} + a_{n-2} z_0^{n-2} + \dots + a_0} \\ &= \overline{a_n z_0^n + a_{n-1} z_0^{n-1} + a_{n-2} z_0^{n-2} + \dots + a_0} \\ &= \overline{P(z_0)} \\ &= \overline{0} \\ &= 0 \end{aligned}$$

□

Numero di soluzioni complesse e reali

H₁: Sia $P(x)$ un polinomio di grado n a coefficienti reali

T₁: Le radici con parte immaginaria non nulla sono pari e a due a due l'una coniugata dell'altra

H₂: Sia $P(x)$ un polinomio di grado dispari a coefficienti reali

T₂: Il polinomio $P(x)$ ha almeno una soluzione reale

11.2 Teorema di decomposizione di polinomi

H: Sia $P(x)$ un polinomio di grado n a coefficienti reali

T: P può essere scomposto in:

$$P(z) = (z - x_1)^{k_1} \cdot (z - x_2)^{k_2} \cdot \dots \cdot (z - x_l)^{k_l} \cdot (z^2 + A_1z + B_1)^{j_1} \cdot (z^2 + A_2z + B_2)^{j_2} \cdot \dots \cdot (z^2 + A_mz + B_m)^{j_m} \cdot C$$

con:

- $x_1, x_2, \dots, x_l \in \mathbb{R}$ radici reali del polinomio
- $k_1, k_2, \dots, k_l \in \mathbb{N}$ molteplicità delle radici reali
- $(z^2 + A_mz + B_m) = (z - z_m) \cdot (z - \overline{z_m})$ radici complesse coniugate
- $j_1, j_2, \dots, j_l \in \mathbb{N}$ molteplicità delle radici complesse coniugate
- $A_1, A_2, \dots, A_m, B_1, B_2, \dots, B_m, C \in \mathbb{R}$

11.3 Radici n-esime

Siano $z, w \in \mathbb{C}$ e $n \in \mathbb{N}$ tali che $z^n = w$

$$\begin{aligned} z^n = w &\Leftrightarrow (\rho e^{i\vartheta})^n = r e^{i\varphi} \\ &\Leftrightarrow \rho^n e^{in\vartheta} = r e^{i\varphi} \\ &\Leftrightarrow \begin{cases} \rho^n = r \\ n\vartheta = \varphi + 2k\pi \quad \text{con } k \in \{0, 1, \dots, n-1\} \end{cases} \\ &\Leftrightarrow \begin{cases} \rho = \sqrt[n]{r} \\ \vartheta = \frac{\varphi + 2k\pi}{n} \quad \text{con } k \in \{0, 1, \dots, n-1\} \end{cases} \end{aligned}$$

In questo modo si ottengono n valori di ϑ al variare di k , ovvero n soluzioni come previsto dal teorema fondamentale dell'algebra.

Le soluzioni rappresentate nel piano di Gauss vengono disposte in una circonferenza di raggio pari al modulo $\rho = \sqrt[n]{r}$ distribuite a distanza angolare pari a $\frac{2\pi}{n}$ con un angolo di sfasamento rispetto all'asse x di $\frac{\varphi}{n}$. Congiungendo le soluzioni si ottiene un poligono regolare (es. 6 soluzioni \rightarrow esagono regolare).

12 Funzioni

funzione	dati due insiemi X, Y t.c. $X, Y \neq \emptyset$, una funzione $y = f(x)$ è una relazione che associa ad ogni elemento $x \in X$ un unico elemento $y \in Y$
dominio	insieme X
codominio	insieme Y
immagine	sottoinsieme di Y definito come $Im(f) = f(A)$ $f(A) = \{y \in Y \text{ t.c. } \exists x \in A \text{ con } f(x) = y, A \subseteq X\}$
controimmagine	sottoinsieme di X definito come $f(B)^{-1} = \{x \in X \text{ t.c. } \exists y \in B \text{ con } f(x) = y, B \subseteq Y\}$
grafico	sottoinsieme di $X \times Y$ definito come $G(f) = \{(x; y) \in X \times Y \text{ t.c. } y = f(x)\}$
f a variabili reali	se il dominio $X \subseteq \mathbb{R}$
f a valori reali	se il codominio $Y \subseteq \mathbb{R}$
f parte intera	$f(x) = [x]$ definita in \mathbb{R} come il più grande numero intero $\leq x$
f parte frazionaria	$f(x) = x - [x]$
funzione di Dirichlet	$f(x) = \begin{cases} 1 & x \in \mathbb{Q} \\ 0 & x \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q} \end{cases}$
f pari	f è pari se $\forall x \in \text{dom} f$ e $-x \in \text{dom} f$, allora $f(x) = f(-x)$
f dispari	f è dispari se $\forall x \in \text{dom} f$ e $-x \in \text{dom} f$, allora $-f(x) = f(-x)$
f iniettiva	$f : X \rightarrow Y$ è iniettiva se $\forall y \in Y \exists$ al più un $x \in X$ t.c. $f(x) = y$, equivalentemente: $x_1 \neq x_2 \Rightarrow f(x_1) \neq f(x_2)$ e $f(x_1) = f(x_2) \Rightarrow x_1 = x_2$
f suriettiva	$f : X \rightarrow Y$ è suriettiva se $\forall y \in Y \exists x \in X$ t.c. $f(x) = y$
f bigettiva	$f : X \rightarrow Y$ è bigettiva se è sia iniettiva che suriettiva
f invertibile	$f : X \rightarrow Y$ è invertibile se è bigettiva
f inversa	$f^{-1} : f(X) \subseteq Y \rightarrow X$ t.c. $y \mapsto f^{-1}$ ovvero l'unico $x \in X$ t.c. $f(x) = y$ alcune funzioni inverse ... proprietà pari dispari delle inverse ...
f composta	siano $f : X \rightarrow Y, g : V \rightarrow Z$ con $f(X) \cap V \neq \emptyset$ e $\overline{X} \subseteq X$ t.c. $\overline{X} := \{x \in X \text{ t.c. } f(x) \in V\}$, la funzione composta di f con g è definita come $g \circ f : \overline{X} \rightarrow Z; x \mapsto g(f(x))$
f ristretta	$f _A = A \subseteq X \rightarrow Y$ t.c. $x \mapsto f(x)$
f periodica	f è periodica se $f(x + T) = f(x), \forall x \in \text{dom} f$ per $T \in \mathbb{R}, T > 0, x + T \in \text{dom} f$

f monotona crescente	se $\forall x_1, x_2 \in \text{dom}f, x_1 < x_2$ si ha $f(x_1) \leq f(x_2)$
f monotona decrescente	se $\forall x_1, x_2 \in \text{dom}f, x_1 < x_2$ si ha $f(x_1) \geq f(x_2)$
f strett. crescente	se $\forall x_1, x_2 \in \text{dom}f, x_1 < x_2$ si ha $f(x_1) < f(x_2)$
f strett. decrescente	se $\forall x_1, x_2 \in \text{dom}f, x_1 < x_2$ si ha $f(x_1) > f(x_2)$
f limitata superiormente	se Imf è limitata superiormente, ovvero se $\exists M \in \mathbb{R}$ t.c. $f(x) \leq M, \forall x \in \text{dom}f$
f limitata inferiormente	se Imf è limitata inferiormente, ovvero se $\exists m \in \mathbb{R}$ t.c. $f(x) \geq m, \forall x \in \text{dom}f$
f limitata	se Imf è limitata superiormente e inferiormente: $\exists m, M \in \mathbb{R}$ t.c. $m \leq f(x) \leq M, \forall x \in \text{dom}f$
maggioranti, minoranti massimi, minimi, estremi sup. e inf. di f	un maggiorante, minorante, massimo, minimo, estremo inferiore, estremo superiore di f è definito come magg. . . di Imf

13 Funzioni iperboliche

13.1 Coseno iperbolico

Definizione

Il coseno iperbolico è una unzione definita come:

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{R} & \rightarrow & \mathbb{R} \\ \cosh : & x & \mapsto \frac{e^x + e^{-x}}{2} \end{array}$$

Proprietà

Il coseno iperbolico è pari, decrescente in $(-\infty, 0]$ e decrescente in $[0, +\infty)$. Non è una funzione iniettiva.

Somma: $\cosh(x + y) = \cosh x \cosh y + \sinh x \sinh y$

Differenza: $\cosh(x - y) = \cosh x \cosh y - \sinh x \sinh y$

Funzione inversa

La funzione inversa del coseno iperbolico, definita come settore coseno iperbolico, è definita come:

$$\begin{array}{ccc} [1, +\infty) & \rightarrow & [0, +\infty) \\ \text{settcosh} : & x & \mapsto \ln(x + \sqrt{x^2 - 1}) \end{array}$$

Da notare che siccome il cosh non è invertibile, è necessario restringere la funzione a $\cosh|_{[0, +\infty)}$ che ha come dominio $\text{dom} = [0, +\infty)$ e come immagine $\text{Im} = \cosh([0, +\infty)) = [1, +\infty)$.

13.2 Seno iperbolico

Definizione

Il seno iperbolico è una unzione definita come:

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{R} & \rightarrow & \mathbb{R} \\ \sinh : & x & \mapsto \frac{e^x - e^{-x}}{2} \end{array}$$

Proprietà

Il seno iperbolico è dispari, sempre crescente, inoltre è una funzione iniettiva e suriettiva.

Somma: $\sinh(x + y) = \sinh x \cosh y + \cosh x \sinh y$

Differenza: $\sinh(x - y) = \sinh x \cosh y - \cosh x \sinh y$

Funzione inversa

La funzione inversa del seno iperbolico, definita come settore seno iperbolico, è definita come:

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{R} & \rightarrow & \mathbb{R} \\ \text{settsinh} : & x & \mapsto \ln(x + \sqrt{x^2 + 1}) \end{array}$$

13.3 Relazione fondamentale

$$\cosh^2 x - \sinh^2 x = 1$$

13.4 Tangente iperbolica

Definizione

Il coseno iperbolico è una unzione definita come

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{R} & \rightarrow & \mathbb{R} \\ \tanh : & & \\ x & \mapsto & \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \end{array}$$

Proprietà

La tangente iperbolica è dispari, sempre crescente, inoltre è sia iniettiva che suriettiva, con immagine $(-1, 1)$.

Funzione inversa

La funzione inversa del coseno iperbolico, definita come settore coseno iperbolico, è definita come:

$$\begin{array}{ccc} (-1, 1) & \rightarrow & \mathbb{R} \\ \text{setttanh} : & & \\ x & \mapsto & \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+x}{1-x} \right) \end{array}$$

14 Limiti

14.1 Intorni

Definizione

Sia $r \in \mathbb{R}^*$, allora un intorno "sferico" centrato in r è un intervallo aperto definito come:

$$\begin{aligned}(r - \varepsilon, r + \varepsilon) & \quad \text{se } r \in \mathbb{R} \\ (M, +\infty) & \quad \text{se } r = +\infty \\ (-\infty, N) & \quad \text{se } r = -\infty\end{aligned}$$

Proprietà

P₁: Sia $r \in \mathbb{R}^*$ e siano U_1 e U_2 due intorni di r , allora $U_1 \cap U_2$ è ancora un intorno di r .

Dim₁: consideriamo solo il caso per cui $r \in \mathbb{R}$ (con $r \neq \pm\infty$)
Siano $U_1 = (r - \varepsilon_1, r + \varepsilon_1)$ con $\varepsilon_1 > 0$ oppure $U_1 = \mathbb{R}$
e $U_2 = (r - \varepsilon_2, r + \varepsilon_2)$ con $\varepsilon_2 > 0$ oppure $U_2 = \mathbb{R}$
Prendiamo $\varepsilon = \min\{\varepsilon_1, \varepsilon_2\}$ e abbiamo che $U_1 \cap U_2 = (r - \varepsilon, r + \varepsilon)$ che è un intorno di r . \square

P₂: **Proprietà di separazione:** $\forall r_1, r_2 \in \mathbb{R}^*$ con $r_1 \neq r_2$ esistono U_1 e U_2 intorni rispettivamente di r_1 e r_2 tali che $U_1 \cap U_2 = \emptyset$.

Dim₂: consideriamo solo il caso per cui $r_1, r_2 \in \mathbb{R}$ (con $r_1, r_2 \neq \pm\infty$)
Assumiamo $r_1 < r_2$ senza perdita di generalità (possono essere invertiti) e vogliamo dimostrare che esistono due intorni U_1, U_2 t.c. $U_1 \cap U_2 = \emptyset$
Scegliamo $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \frac{r_2 - r_1}{2}$
per cui $\forall x_1 \in (r_1 - \varepsilon_1, r_1 + \varepsilon_1)$ e $\forall x_2 \in (r_2 - \varepsilon_2, r_2 + \varepsilon_2)$
per cui $x_1 < r_1 + \frac{r_2 - r_1}{2} = \frac{r_2 + r_1}{2} = r_2 - \frac{r_2 - r_1}{2} < x_2$
per cui $(r_1 - \varepsilon_1, r_1 + \varepsilon_1) \cap (r_2 - \varepsilon_2, r_2 + \varepsilon_2) = \emptyset$ \square

14.2 Punti di accumulazione

Sia $A \subseteq \mathbb{R}$ con $A \neq \emptyset$, $r \in \mathbb{R}^*$ è punto di accumulazione di A quando:

$$\forall \text{ intorno } U \text{ di } r \text{ si ha che } A \cap U \setminus \{r\} \neq \emptyset$$

In altre parole ogni intorno di r deve contenere (almeno) un elemento di A che non sia r stesso. Un punto di accumulazione di A può non appartenere all'insieme A .

$$\begin{aligned}\text{se } r \in \mathbb{R} \quad & \forall \varepsilon > 0 \exists x \in A, x \neq r \text{ t.c. } |x - r| < \varepsilon \text{ ovvero } x \in (r - \varepsilon, r + \varepsilon) \\ \text{se } r = +\infty \quad & \forall M \in \mathbb{R} \exists x \in A \text{ t.c. } x > M \text{ ovvero che } A \text{ non è limitato superiormente} \\ \text{se } r = -\infty \quad & \forall N \in \mathbb{R} \exists x \in A \text{ t.c. } x < N \text{ ovvero che } A \text{ non è limitato inferiormente}\end{aligned}$$

14.3 Punti isolati

Sia $A \subseteq \mathbb{R}$ con $A \neq \emptyset$, $r \in \mathbb{R}^*$ è punto isolato di A se non è un punto di accumulazione, ovvero se \exists un intorno U di r t.c. $U \cap A = \{r\}$.

Un punto isolato di A deve necessariamente appartenere all'insieme A , inoltre $\pm\infty$ non possono essere punti isolati, ma soltanto punti di accumulazione.

14.4 Intorni e proprietà vere definitivamente

Sia $f : \text{dom}f \rightarrow \mathbb{R}$, $x_0 \in \mathbb{R}^*$ punto di accumulazione di $\text{dom}f$ e P proprietà definita sul $\text{dom}f$, allora f soddisfa P definitivamente per $x \rightarrow x_0$ se $\exists U$ intorno di x_0 t.c. $\forall x \in \text{dom}f \cap U \setminus \{x_0\}$ $f(x)$ verifica P .

Osservazioni

O1: Non è detto che P sia verificata in x_0 (infatti x_0 potrebbe $\notin \text{dom}f$).

O2: Basta che esista un intorno per cui P sia verificata, altrimenti se P è verificata per ogni intorno, ovvero P vale $\forall x \in \text{dom}f \setminus \{x_0\}$, non significa che P sia verificata vicino a x_0 .

14.5 Limite di una funzione

Definizione

Sia $f : \text{dom}f \rightarrow \mathbb{R}$, $x_0 \in \mathbb{R}^*$ punto di accumulazione di $\text{dom}f$ e $l \in \mathbb{R}^*$, allora:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l \quad \text{quando}$$

I: $\forall U$ intorno di l $\exists V$ intorno di x_0 t.c. $f(x) \in U, \forall x \in \text{dom}f \cap V \setminus \{x_0\}$

II: $\forall U$ intorno di l $\exists V$ intorno di x_0 t.c. $\forall x \in \text{dom}f \cap V \setminus \{x_0\} \Rightarrow f(x) \in U$

III: $\forall U$ intorno di l $f(x) \in U$ è verificata definitivamente per $x \rightarrow x_0$

Usando la definizione di intorno si ottiene che:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 \text{ t.c. } |f(x) - l| < \varepsilon \quad \forall x \in \text{dom}f \cap (x_0 - \delta, x_0 + \delta) \setminus \{x_0\} \quad x_0, l \in \mathbb{R}$$

$$\forall M \in \mathbb{R} \exists \delta > 0 \text{ t.c. } f(x) > M \quad \forall x \in \text{dom}f \cap (x_0 - \delta, x_0 + \delta) \setminus \{x_0\} \quad x_0 \in \mathbb{R}, l = +\infty$$

$$\forall N \in \mathbb{R} \exists \delta > 0 \text{ t.c. } f(x) < N \quad \forall x \in \text{dom}f \cap (x_0 - \delta, x_0 + \delta) \setminus \{x_0\} \quad x_0 \in \mathbb{R}, l = -\infty$$

$$\forall \varepsilon > 0 \exists M \text{ t.c. } |f(x) - l| < \varepsilon \quad \forall x \in \text{dom}f \cap (M, +\infty) \setminus \{x_0\} \quad x_0 = +\infty, l \in \mathbb{R}$$

$$\forall M \in \mathbb{R} \exists \overline{M} \text{ t.c. } f(x) > M \quad \forall x \in \text{dom}f \cap (\overline{M}, +\infty) \setminus \{x_0\} \quad x_0 = +\infty, l = +\infty$$

$$\forall N \in \mathbb{R} \exists \overline{M} \text{ t.c. } f(x) < N \quad \forall x \in \text{dom}f \cap (M, +\infty) \setminus \{x_0\} \quad x_0 = +\infty, l = -\infty$$

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \text{ t.c. } |f(x) - l| < \varepsilon \quad \forall x \in \text{dom}f \cap (-\infty, N) \setminus \{x_0\} \quad x_0 = -\infty, l \in \mathbb{R}$$

$$\forall M \in \mathbb{R} \exists N \text{ t.c. } f(x) > M \quad \forall x \in \text{dom}f \cap (-\infty, N) \setminus \{x_0\} \quad x_0 = -\infty, l = +\infty$$

$$\forall N \in \mathbb{R} \exists \overline{N} \text{ t.c. } f(x) < N \quad \forall x \in \text{dom}f \cap (-\infty, \overline{N}) \setminus \{x_0\} \quad x_0 = -\infty, l = -\infty$$

Limiti definiti e indefiniti

Per $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l$:

se $l \in \mathbb{R}$	il limite esiste ed è finito
se $l = \pm\infty$	il limite esiste ed è infinito
se $l = 0$	la funzione è infinitesima
se l non è definibile univocamente	il limite non esiste ed è indefinito

Osservazioni

x_0 punto di accumulazione di $\text{dom}f$ non assicura che $x_0 \in \text{dom}f$, infatti se $x_0 \notin \text{dom}f$ non ha senso $f(x_0)$ e se $x_0 \in \text{dom}f$ il valore di $f(x_0)$ non influenza il limite, in quanto si esclude il valore di x_0 .

Graficamente, la definizione di limite significa scegliere un certo "errore" ε lungo l'asse y e trovare un intorno di x_0 lungo l'asse x per cui preso qualsiasi punto nell'intervallo (escluso x_0), si ha che i valori assunti dalla funzione differiscono da un valore l al più di ε .

14.6 Teorema di unicità del limite

Se il limite esiste, è unico.

P: Dati $f : \text{dom} f \rightarrow \mathbb{R}$ e x_0 punto di accumulazione di $\text{dom} f$,

H: se valgono $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l_1$ e $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l_2$,

T: allora $l_1 = l_2$.

Dim: Per assurdo supponiamo che $l_1 \neq l_2$

dalla proprietà di separazione degli interni $\exists V_1$ e V_2 interni di l_1 e l_2 tali che $V_1 \cap V_2 = \emptyset$

dalle definizioni: $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l_1 \Rightarrow \exists U_1$ intorno di x_0 t.c. $f(x) \in V_1 \forall x \in U_1 \cap \text{dom} f \setminus \{x_0\}$

$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l_2 \Rightarrow \exists U_2$ intorno di x_0 t.c. $f(x) \in V_2 \forall x \in U_2 \cap \text{dom} f \setminus \{x_0\}$

si considera $U = U_1 \cap U_2$ per cui $\forall x \in U \cap \text{dom} f \setminus \{x_0\}$ vale $f(x) \in V_1 \cap V_2 = \emptyset$

cioè $\nexists x \in U \cap \text{dom} f \setminus \{x_0\}$ che è in contraddizione con il fatto che x_0 è un punto di accumulazione di $\text{dom} f$, per cui l'ipotesi che $l_1 \neq l_2$ è sbagliata. \square

14.7 Limite finito implica locale limitatezza

H: Se $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l \in \mathbb{R}$, cioè $l \neq \pm\infty$,

T: allora $\exists U$ intorno di x_0 e $N \in \mathbb{R}$ t.c. $\forall x \in U \cap \text{dom} f \setminus \{x_0\}$ vale $|f(x) - l| \leq N$.

Dim: Dalla definizione di limite con $\varepsilon = 1$ abbiamo che $\exists U$ intorno di x_0 t.c. $\forall x \in U \cap \text{dom} f \setminus \{x_0\}$ vale: $|f(x) - l| < 1 \Rightarrow |f(x)| < |l| + 1$. Scegliendo $N = |l| + 1$ si ottiene la tesi. \square

14.8 Limite destro e limite sinistro

Punti di accumulazione destro e sinistro

Sia $A \subset \mathbb{R}$, $A \neq \emptyset$, un punto $r \in \mathbb{R}$ è **punto di accumulazione destro** di A quando r è punto di accumulazione di $A \cap (r, +\infty)$.

Sia $A \subset \mathbb{R}$, $A \neq \emptyset$, un punto $r \in \mathbb{R}$ è **punto di accumulazione sinistro** di A quando r è punto di accumulazione di $A \cap (-\infty, r)$.

Un punto di accumulazione destro o sinistro è necessariamente anche un punto di accumulazione, un punto di accumulazione è anche punto di accumulazione destro oppure sinistro, non è detto che sia entrambi.

Interni destro e sinistro

Un **intorno destro** di $r \in \mathbb{R}$ è un insieme della forma $(r, r + \delta)$.

Un **intorno sinistro** di $r \in \mathbb{R}$ è un insieme della forma $(r - \delta, r)$.

Limiti destro e sinistro

Sia $f : \text{dom} f \rightarrow \mathbb{R}$, $x_0 \in \mathbb{R}^*$ punto di accumulazione destro di $\text{dom} f$ e $l \in \mathbb{R}^*$, allora il **limite destro** è definito come:

$$\lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) = l \Leftrightarrow \lim_{x \rightarrow x_0} f(x)|_{(x_0, +\infty)} = l \quad \text{cioè quando:}$$

I: $\forall U$ intorno di $l \exists V$ intorno destro di x_0 t.c. $f(x) \in U, \forall x \in \text{dom} f \cap V$

II: $\forall U$ intorno di $l \exists \delta > 0$ t.c. $\forall x \in \text{dom} f \cap (x_0, x_0 + \delta) \Rightarrow f(x) \in U$

Sia $f : \text{dom} f \rightarrow \mathbb{R}$, $x_0 \in \mathbb{R}^*$ punto di accumulazione sinistro di $\text{dom} f$ e $l \in \mathbb{R}^*$, allora il **limite sinistro** è definito come:

$$\lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) = l \Leftrightarrow \lim_{x \rightarrow x_0} f(x)|_{(-\infty, x_0)} = l \quad \text{cioè quando:}$$

I: $\forall U$ intorno di $l \exists V$ intorno sinistro di x_0 t.c. $f(x) \in U, \forall x \in \text{dom} f \cap V$

II: $\forall U$ intorno di $l \exists \delta > 0$ t.c. $\forall x \in \text{dom} f \cap (x_0 - \delta, x_0) \Rightarrow f(x) \in U$

Teorema di unicità del limite destro e sinistro

Se il limite destro esiste, è unico.

Se il limite sinistro esiste, è unico.

I due teoremi si dimostrano in quando limite destro e limite sinistro sono limiti di funzioni ristrette e in quanto limiti, se esistono sono unici. \square

Teorema della relazione tra limite e limiti destro e sinistro

P: Sia x_0 punto di accumulazione sia destro che sinistro di $\text{dom} f$,

$$H \Leftrightarrow T: \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l \in \mathbb{R}^* \Leftrightarrow \begin{cases} \lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) = l \\ \lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) = l \end{cases}$$

Dim \Rightarrow : Dall'ipotesi si ha che $\forall U$ intorno di $l \exists V$ intorno di x_0 t.c. $\forall x \in V \cap \text{dom} f \setminus \{x_0\} \Rightarrow |f(x) - l| < \varepsilon$
 Considero come intorno destro $V^+ = V \cap (x_0, +\infty)$ e come intorno sinistro $V^- = V \cap (-\infty, x_0)$,
 per cui $\forall U \exists V^+$ t.c. $\forall x \in V^+ \cap \text{dom} f \Rightarrow |f(x) - l| < \varepsilon$ è valida in quanto $V^+ \subset V$ e anche
 $\forall U \exists V^-$ t.c. $\forall x \in V^- \cap \text{dom} f \Rightarrow |f(x) - l| < \varepsilon$ è valida in quanto $V^- \subset V$,
 ovvero $\lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) = l$ e $\lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) = l$

Dim \Leftarrow : Dall'ipotesi si ha che $\forall U$ intorno di $l \exists \delta_1 > 0$ t.c. $\forall x \in (x_0, x_0 + \delta_1) \cap \text{dom} f \Rightarrow |f(x) - l| < \varepsilon$
 e che $\forall U$ intorno di $l \exists \delta_2 > 0$ t.c. $\forall x \in (x_0 - \delta_2, x_0) \cap \text{dom} f \Rightarrow |f(x) - l| < \varepsilon$
 scelgo $\delta = \min \{\delta_1, \delta_2\}$ per cui $\forall U \exists \delta > 0$ t.c. $\forall x \in (x_0 - \delta, x_0 + \delta) \cap \text{dom} f \setminus \{x_0\} \Rightarrow |f(x) - l| < \varepsilon$,
 ovvero $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l$ \square

Il teorema della relazione di unicità del limite destro e sinistro si utilizza per:

I: dimostrare l'inesistenza di un limite, se $\lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) \neq \lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x)$

II: semplificare il calcolo del limite dove f , funzione definita per casi, cambia forma

14.9 Relazione tra limite e modulo

P: Sia x_0 punto di accumulazione di $\text{dom} f$

$$H_1 \Leftrightarrow T_1: \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = 0 \Leftrightarrow \lim_{x \rightarrow x_0} |f(x)| = 0$$

Dim₁: osservando che $|f(x) - 0| = |f(x)| = ||f(x)| - 0|$ e che $\text{dom} |f| = \text{dom} f$

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = 0 &\Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0 \exists U \text{ intorno di } x_0 \text{ t.c. } |f(x) - 0| < \varepsilon \forall x \in \text{dom} f \cap U \setminus \{x_0\} \\ &\Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0 \exists U \text{ intorno di } x_0 \text{ t.c. } ||f(x)| - 0| < \varepsilon \forall x \in \text{dom} |f| \cap U \setminus \{x_0\} \\ &\Leftrightarrow \lim_{x \rightarrow x_0} |f(x)| = 0 \end{aligned}$$

\square

$$H_2 \Rightarrow - T_2: \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l \Rightarrow \lim_{x \rightarrow x_0} |f(x)| = |l|$$

Dim₂: Considerando il caso per cui $l \in \mathbb{R}$

Dall'ipotesi si ottiene che $\forall \varepsilon > 0 \exists V$ intorno di x_0 t.c. $|f(x) - l| < \varepsilon \forall x \in \text{dom} f \cap V \setminus \{x_0\}$
 si osserva che $||f(x)| - |l|| \leq |f(x) - l| < \varepsilon$ per la disuguaglianza triangolare
 per cui per proprietà transitiva $||f(x)| - |l|| < \varepsilon$, inoltre $\text{dom} |f| = \text{dom} f$
 per cui vale che $\forall \varepsilon > 0 \exists \bar{V}$ intorno di x_0 t.c. $||f(x)| - |l|| < \varepsilon \forall x \in \text{dom} |f| \cap \bar{V} \setminus \{x_0\}$
 ovvero $\lim_{x \rightarrow x_0} |f(x)| = |l|$ \square

Si osserva che nel secondo teorema vale solo \Rightarrow e non anche \Leftarrow , come nel primo (\Leftrightarrow).

14.10 Teorema di permanenza del segno

P: Sia $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l$ con $x_0, l \in \mathbb{R}^*$

H₁: se $l \in (0, +\infty)$

T₁: allora f è definitivamente strettamente positiva per $x \rightarrow x_0$

Dim₁: Nel caso in cui $l = +\infty$ si ottiene che $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = +\infty$

Dalla def. di limite si ottiene che $\forall M \in \mathbb{R} \exists U$ intorno di x_0 t.c. $f(x) > M \forall x \in \text{dom} f \cap U \setminus \{x_0\}$
scegliendo $M = 0$ si ottiene che $f(x) > 0 \forall x \in \text{dom} f \cap U \setminus \{x_0\}$

Nel caso in cui $l = (0, +\infty)$ si ottiene che $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l$ con $l > 0$

Dalla def. di limite si ottiene che $\forall \varepsilon > 0 \exists U$ intorno di x_0 t.c. $|f(x) - l| < \varepsilon \forall x \in \text{dom} f \cap U \setminus \{x_0\}$
scegliendo $\varepsilon = l$ si ottiene che $|f(x) - l| < l \Leftrightarrow -l < f(x) - l < l \Leftrightarrow 0 < f(x) < 2l \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow f(x) > 0 \forall x \in \text{dom} f \cap U \setminus \{x_0\}$, ovvero la tesi. \square

H₂: se $l \in (-\infty, 0)$

T₂: allora f è definitivamente strettamente negativa per $x \rightarrow x_0$

Dim₂: analogamente alla Dim₁. \square

Corollario o II versione del teorema di permanenza del segno

P: Sia $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l$ con $x_0, l \in \mathbb{R}^*$

H₁: se f è definitivamente positiva (≥ 0) per $x \rightarrow x_0$

T₁: allora $l \geq 0$

Dim₁: Supponiamo per assurdo che $l < 0$

Per il teorema di permanenza del segno $f(x) < 0$ definitivamente per $x \rightarrow x_0$, ma questo è in contraddizione con l'ipotesi, per cui l deve necessariamente essere ≥ 0 . \square

H₂: se f è definitivamente negativa (≤ 0) per $x \rightarrow x_0$

T₂: allora $l \leq 0$

Dim₂: analogamente alla Dim₁. \square

Da osservare che il teorema diventa falso se si sostituisce \geq o \leq al posto di $>$ o $<$, dato che quando se $l = 0$ non è possibile dedurre nessuna delle due conclusioni del teorema.

Inoltre il corollario diventa falso quando si sostituisce $>$ o $<$ al posto di \geq o \leq , per esempio $f(x) = x^2 > 0$ definitivamente per $x \rightarrow x_0 = 0$, ma $\lim_{x \rightarrow 0} f(x) = l = 0 \not> 0$.

14.11 Teorema dei due carabinieri

Caso limitato con $l \in \mathbb{R}$

P: Siano f, g, h , tre funzioni definite in $X \subset \mathbb{R}$ e sia x_0 punto di accumulazione di X ,

H: se $f(x) \leq g(x) \leq h(x)$ definitivamente per $x \rightarrow x_0$ e $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} h(x) = l \in \mathbb{R}$

T: allora $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = l$

Dim: Scelto un $\varepsilon > 0$ arbitrario, applicato alle definizioni dei seguenti limiti $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l$ e $\lim_{x \rightarrow x_0} h(x) = l$

si ottengono due intorni U_f e U_h per cui $|f(x) - l| < \varepsilon \quad \forall x \in U_f \cap X \setminus \{x_0\}$
 $|h(x) - l| < \varepsilon \quad \forall x \in U_h \cap X \setminus \{x_0\}$,

mentre dalla prima ipotesi si ottiene che $f(x) \leq g(x) \leq h(x) \quad \forall x \in V$ intorno di x_0 con $V \subseteq X$

Scelto un intorno $U = U_f \cap U_h \cap V$ si ha che $\forall x \in U \cap X \setminus \{x_0\}$ valgono

$l - \varepsilon < f(x) \leq g(x) \leq h(x) < l + \varepsilon$, ovvero $l - \varepsilon < g(x) < l + \varepsilon \Leftrightarrow |g(x) - l| < \varepsilon \quad \forall x \in U \cap X \setminus \{x_0\}$
 cioè la definizione di $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = l$ □

Caso illimitato con $l = \pm\infty$

P: Siano f, g , due funzioni definite in $X \subset \mathbb{R}$ e sia x_0 punto di accumulazione di X ,

H₁: se $f(x) \leq g(x)$ definitivamente per $x \rightarrow x_0$ e $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = +\infty$

T₁: allora $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = +\infty$

H₂: se $f(x) \geq g(x)$ definitivamente per $x \rightarrow x_0$ e $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = -\infty$

T₂: allora $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = -\infty$

Dim: Analoga a quella per il caso limitato □

Sia la dimostrazione per il caso limitato, sia quella per i casi illimitati, valgono anche per il limite destro e sinistro

Disuguaglianze di funzioni trigonometriche

H₁: per $x \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$

T₁: $0 < \sin x \leq x \leq \tan x$

Dim₁: Disegnando un arco di circonferenza di raggio $r = 1$ con centro sull'origine O e chiamando P un punto sulla circonferenza, H la sua proiezione sull'asse x , Q il punto di intersezione del semiasse positivo x con la circonferenza e R , l'intersezione tra la perpendicolare a x per Q e la retta OP :

Si osserva che il tr. $\triangle OPH$ è contenuto nel settore circolare \widehat{OPQ} che è contenuto nel tr. $\triangle ORQ$, per cui $0 < A_{\triangle OPH} \leq A_{\widehat{OPQ}} \leq A_{\triangle ORQ} \Leftrightarrow 0 < \frac{r \cdot \sin x}{2} \leq \frac{r^2 \cdot x}{2} \leq \frac{r \cdot \tan x}{2} \Leftrightarrow 0 < \sin x \leq x \leq \tan x$ □

H₂: per $x \in \left(-\frac{\pi}{2}, 0\right)$

T₂: $0 > \sin x \geq x \geq \tan x$

Dim₂: si parte dalla disuguaglianza precedente, dove al posto di $x \in \left(-\frac{\pi}{2}, 0\right)$ viene posto $-x = \left(0, +\frac{\pi}{2}\right)$:
 $0 < \sin(-x) \leq -x \leq \tan(-x) \Leftrightarrow 0 < -\sin x \leq -x \leq -\tan x \Leftrightarrow 0 > \sin x \geq x \geq \tan x$ □

14.12 Teorema sull'algebra dei limiti

Caso limitato

premesse, ipotesi, tesi, dimostrazioni ...

Caso illimitato

premesse, ipotesi, tesi, dimostrazioni ...

14.13 Teorema del confronto

premesse, ipotesi, tesi, dimostrazioni ...

14.14 Limiti delle funzioni composte

premesse, ipotesi, tesi, dimostrazioni ...

14.15 Limiti delle funzioni monotone

premesse, ipotesi, tesi, dimostrazioni ...

14.16 Funzioni continue e continuità

premesse, ipotesi, tesi, dimostrazioni ...

14.17 Gerarchie degli infiniti

premesse, ipotesi, tesi, dimostrazioni ...