

Analisi Matematica 1

Anno Accademico 2014-2015

Roberto Monti

Versione del 10 Ottobre 2014

Contents

Chapter 1. Numeri naturali e reali	5
1. Numeri naturali e principio di induzione	5
2. Numeri reali	7
3. \mathbb{R} come spazio metrico	10
4. Esercizi	10
Chapter 2. Numeri complessi	11
1. Introduzione	11
2. Operazioni sui numeri complessi	11
3. Coniugato, modulo e argomento	12
4. Rappresentazione trigonometrica ed esponenziale	13
5. Radici di un numero complesso	14
6. Numeri complessi come spazio metrico	15
7. Polinomi complessi	16
8. Esercizi svolti sui numeri complessi	17

Numeri naturali e reali

1. Numeri naturali e principio di induzione

Dal modo stesso in cui i numeri naturali vengono costruiti o definiti, discende la validità del *Principio d'induzione*.

Principio d'induzione. Sia $A(n)$ un'affermazione che riguarda il numero naturale $n \in \mathbb{N}$. Supponiamo che:

- i) $A(0)$ (oppure $A(1)$ se \mathbb{N} inizia da 1) è vera (*base induttiva*);
- ii) $A(n) \Rightarrow A(n+1)$ per ogni $n \in \mathbb{N}$ (*passo induttivo*).

Allora $A(n)$ è vera per ogni $n \in \mathbb{N}$.

1.1. Formula per la somma geometrica. Per ogni numero reale $x \in \mathbb{R}$, $x \neq 1$ e per ogni $n \in \mathbb{N}$ si ha

$$(1.1) \quad 1 + x + x^2 + \dots + x^n = \frac{1 - x^{n+1}}{1 - x}.$$

La formula vale anche se $x \in \mathbb{C}$ è un numero complesso $x \neq 1$. La prova è per induzione su $n \geq 1$. Per $n = 1$ si ha

$$\frac{1 - x^2}{1 - x} = \frac{(1 + x)(1 - x)}{1 - x} = 1 + x.$$

Supponiamo vera la formula (1.1) per $n \in \mathbb{N}$. Allora si ha

$$\begin{aligned} 1 + x + x^2 + \dots + x^{n+1} &= 1 + x + x^2 + \dots + x^n + x^{n+1} = \frac{1 - x^{n+1}}{1 - x} + x^{n+1} \\ &= \frac{1 - x^{n+1} + (1 - x)x^{n+1}}{1 - x} = \frac{1 - x^{n+2}}{1 - x}. \end{aligned}$$

1.2. Disuguaglianza di Bernoulli. Sia $x \in \mathbb{R}$ un numero reale tale che $x > -1$. Allora per ogni $n \in \mathbb{N}$ si ha:

$$(1.2) \quad (1 + x)^n \geq 1 + nx.$$

La prova è per induzione su $n \geq 1$. Per $n = 1$ si ha un'identità. Supponiamo vera le (1.2) per un certo $n \in \mathbb{N}$ e proviamola per $n + 1$:

$$(1 + x)^{n+1} = (1 + x)^n(1 + x) \geq (1 + nx)(1 + x) = 1 + nx + x + nx^2 \geq 1 + (n + 1)x.$$

1.3. Formula del Binomio di Newton. Il *fattoriale* $n!$ si definisce per induzione nel seguente modo:

- i) $0! = 1$ e $1! = 1$;
- ii) $(n + 1)! = (n + 1) \cdot n!$.

Dati $n, k \in \mathbb{N}$ con $k \leq n$, si definiscono i *coefficienti binomiali*

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

Siano $x, y \in \mathbb{R}$ e $n \in \mathbb{N}$. Verifichiamo per induzione la formula per il Binomio di Newton:

$$(x + y)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^{n-k} y^k.$$

Quando $n = 1$ la verifica è elementare:

$$\sum_{k=0}^1 \binom{1}{k} x^{1-k} y^k = \binom{1}{0} x + \binom{1}{1} y = x + y.$$

Supponiamo vera la formula per n e proviamola per $n + 1$:

$$\begin{aligned} (x + y)^{n+1} &= (x + y)(x + y)^n = (x + y) \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^{n-k} y^k \\ &= \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^{n-k+1} y^k + \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^{n-k} y^{k+1} \\ &= \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^{n-k+1} y^k + \sum_{k=1}^{n+1} \binom{n}{k-1} x^{n-k+1} y^k \\ &= \binom{n}{0} x^{n+1} + \sum_{k=1}^n \left[\binom{n}{k-1} + \binom{n}{k} \right] x^{n+1-k} y^k + \binom{n}{n} y^{n+1}. \end{aligned}$$

Ora utilizziamo la formula di Stiefel, la cui verifica è un facile esercizio. Per ogni $n, k \in \mathbb{N}$ con $k \leq n$ vale l'identità

$$\binom{n+1}{k} = \binom{n}{k-1} + \binom{n}{k}.$$

Si trova allora

$$\begin{aligned} (x + y)^{n+1} &= \binom{n+1}{0} x^{n+1} + \sum_{k=1}^n \binom{n+1}{k} x^{n+1-k} y^k + \binom{n+1}{n+1} y^{n+1} \\ &= \sum_{k=0}^{n+1} \binom{n+1}{k} x^{n+1-k} y^k. \end{aligned}$$

2. Numeri reali

2.1. Relazioni d'ordine. Premettiamo la definizione di ordine totale.

DEFINIZIONE 2.1 (Ordine totale). Una relazione \leq su un insieme X è una relazione di *ordine totale* se per ogni $x, y, z \in X$ si ha:

- i) $x \leq x$ (proprietà riflessiva);
- ii) $x \leq y$ oppure $y \leq x$ (confrontabilità);
- iii) Se $x \leq y$ e $y \leq x$ allora $x = y$ (proprietà antisimmetrica);
- iv) Se $x \leq y$ e $y \leq z$ allora $x \leq z$ (proprietà transitiva).

2.2. Introduzione assiomatica dei numeri reali. Introduciamo in modo assiomatico i numeri reali come *campo ordinato completo*.

DEFINIZIONE 2.2. I numeri reali sono un insieme \mathbb{R} munito di due operazioni $+$: $\mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ e \cdot : $\mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ e di una relazione di ordine totale \leq che verificano, per ogni $x, y, z \in \mathbb{R}$, la seguente lista di assiomi.

Assiomi della somma:

- (S1) $x + y = y + x$ (proprietà commutativa);
- (S2) $x + (y + z) = (x + y) + z$ (proprietà associativa);
- (S3) esiste $0 \in \mathbb{R}$ tale che $x + 0 = x$ per ogni $x \in \mathbb{R}$ (esiste l'elemento neutro);
- (S4) per ogni $x \in \mathbb{R}$ esiste $-x \in \mathbb{R}$ tale che $x + (-x) = 0$ (esiste l'opposto).

Assiomi del prodotto (o moltiplicazione):

- (P1) $x \cdot y = y \cdot x$ (proprietà commutativa);
- (P2) $x \cdot (y \cdot z) = (x \cdot y) \cdot z$ (proprietà associativa);
- (P3) esiste $1 \in \mathbb{R}$, $1 \neq 0$, tale che $1 \cdot x = x$ per ogni $x \in \mathbb{R}$ (esiste l'elemento neutro);
- (P4) per ogni $x \in \mathbb{R}$, $x \neq 0$, esiste $x^{-1} \in \mathbb{R}$ tale che $x \cdot x^{-1} = 1$ (esiste il reciproco).

Proprietà distributiva:

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

Assiomi dell'ordine:

- (O1) se $x \leq y$ allora $x + z \leq y + z$;
- (O2) se $x \leq y$ e $z \geq 0$, allora $x \cdot z \leq y \cdot z$.

Assioma di completezza:

- (AC) Ogni insieme non vuoto $A \subset \mathbb{R}$ superiormente limitato ha estremo superiore.

Chiariremo l'assioma di completezza fra breve. Gli insiemi \mathbb{N} , \mathbb{Z} , \mathbb{Q} sono in modo naturale sottoinsiemi di \mathbb{R} . I numeri razionali \mathbb{Q} con le usuali operazioni e relazione d'ordine formano un campo ordinato che verifica tutti gli assiomi precedenti, ad eccezione dell'Assioma di completezza.

DEFINIZIONE 2.3 (Maggiorante, estremo superiore, massimo). Sia $A \subset \mathbb{R}$ un sottoinsieme di \mathbb{R} .

- i) Un elemento $y \in \mathbb{R}$ è un *maggiorante* di A se $x \leq y$ per ogni $x \in A$.
- ii) L'insieme A si dice *superiormente limitato* se ha un maggiorante.

- iii) Un elemento $x \in \mathbb{R}$ si dice *estremo superiore* di A se è un maggiorante di A e se $x \leq z$ per ogni altro maggiorante z di A (ovvero x è il minimo dei maggioranti). Se $x \in \mathbb{R}$ è l'estremo superiore di A porremo

$$\sup A = x.$$

- iv) Se A non è superiormente limitato porremo

$$\sup A = \infty.$$

La convenzione naturale per l'insieme vuoto è di porre $\sup \emptyset = -\infty$.

- v) Un numero $x \in \mathbb{R}$ si dice *massimo* di A se $x = \sup A$ ed $x \in A$. Scriveremo in questo caso

$$\max A = x.$$

L'estremo superiore e il massimo, se esistono, sono unici. La definizione di estremo superiore può essere riformulata nei seguenti termini. Un numero $x \in \mathbb{R}$ è l'estremo superiore di un insieme $A \subset \mathbb{R}$ se e solo se:

- i) $y \leq x$ per ogni $y \in A$;
- ii) Per ogni $\varepsilon > 0$ esiste $y \in A$ tale che $y > x - \varepsilon$.

DEFINIZIONE 2.4 (Minorante, estremo inferiore, minimo). Sia $A \subset \mathbb{R}$ un sottoinsieme di \mathbb{R} .

- i) Un elemento $y \in \mathbb{R}$ è un *minorante* di A se $y \leq x$ per ogni $x \in A$.
- ii) L'insieme A si dice *inferiormente limitato* se ha un minorante.
- iii) Un elemento $x \in \mathbb{R}$ si dice *estremo inferiore* di A se è un minorante di A e se $x \leq z$ per ogni altro minorante z di A (ovvero x è il massimo dei minoranti). Se $x \in \mathbb{R}$ è l'estremo inferiore di A porremo

$$\inf A = x.$$

- iv) Se A non è inferiormente limitato porremo

$$\inf A = -\infty.$$

La convenzione naturale per l'insieme vuoto è di porre $\inf \emptyset = \infty$.

- v) Un numero $x \in \mathbb{R}$ si dice *minimo* di A se $x = \inf A$ ed $x \in A$. Scriveremo in questo caso

$$\min A = x.$$

Un numero $x \in \mathbb{R}$ è l'estremo inferiore di un insieme $A \subset \mathbb{R}$ se e solo se:

- i) $y \geq x$ per ogni $y \in A$;
- ii) Per ogni $\varepsilon > 0$ esiste $y \in A$ tale che $y < x + \varepsilon$.

2.3. Conseguenze della completezza.

PROPOSIZIONE 2.5 (Proprietà di Archimede). Per ogni coppia di numeri reali $x, y \in \mathbb{R}$, $x, y > 0$, esiste un numero naturale $n \in \mathbb{N}$ tale che $nx > y$.

DIM. Supponiamo per assurdo che esistano numeri reali $x, y \in \mathbb{R}$ con $x, y > 0$ tali che $nx \leq y$ per ogni $n \in \mathbb{N}$. Allora l'insieme

$$A = \{nx \in \mathbb{R} : n \in \mathbb{N}\}$$

è superiormente limitato, in quanto y ne è un maggiorante. Per l'Assioma di completezza esiste l'estremo superiore $\bar{x} = \sup A$. Il numero $\bar{x} \in \mathbb{R}$ è caratterizzato dalle seguenti due proprietà:

- 1) $nx \leq \bar{x}$ per ogni $n \in \mathbb{N}$, ovvero \bar{x} è un maggiorante di A ;
- 2) Per ogni $\varepsilon > 0$ esiste $n \in \mathbb{N}$ tale che $nx > \bar{x} - \varepsilon$, ovvero \bar{x} è il minimo dei maggioranti.

Scegliamo $\varepsilon = x > 0$ nella proprietà 2) e sia $n \in \mathbb{N}$ il corrispondente numero naturale, ovvero $nx > \bar{x} - x$. Allora da 1) e 2) si ottiene:

$$\bar{x} \geq (n+1)x = nx + x > \bar{x} - x + x = \bar{x},$$

che è una contraddizione. □

DEFINIZIONE 2.6 (Parte intera e frazionaria). Sia $x \in \mathbb{R}$ un numero reale e si consideri l'insieme

$$A_x = \{p \in \mathbb{Z} : p \leq x\}.$$

A_x è un insieme di numeri interi superiormente limitato che ha dunque estremo superiore. Poiché A_x è un sottoinsieme di \mathbb{Z} questo estremo superiore è un massimo. Definiamo la *parte intera di x*

$$[x] = \max \{p \in \mathbb{Z} : p \leq x\} \in \mathbb{Z}.$$

Il numero $[x] \in \mathbb{Z}$ è il più grande intero minore o uguale ad x . La *parte frazionaria di x* è il numero $\{x\} = x - [x]$.

Parte intera e parte frazionaria verificano le seguenti disuguaglianze:

$$[x] \leq x < [x] + 1, \quad 0 \leq \{x\} < 1.$$

Proviamo ora che i numeri razionali \mathbb{Q} sono densi in \mathbb{R} .

PROPOSIZIONE 2.7 (Densità di \mathbb{Q} in \mathbb{R}). Per ogni $x, y \in \mathbb{R}$, $x < y$, esiste $q \in \mathbb{Q}$ tale che $x < q < y$.

DIM. ¹ Siccome $y - x > 0$, per la proprietà di Archimede esiste $n \in \mathbb{N}$ tale che $n(y - x) > 1$, ovvero $ny - nx > 1$. Segue che

$$nx < ny - 1 < [ny] \leq ny.$$

Il numero $\bar{q} = [ny]/n \in \mathbb{Q}$ verifica dunque $x < \bar{q} \leq y$. Per avere una disuguaglianza stretta anche a destra argomentiamo nel seguente modo. Esiste $m \in \mathbb{N}$ tale che $m(\bar{q} - x) > 1$ e quindi

$$x < \bar{q} - \frac{1}{m} < \bar{q} \leq y.$$

Il numero $q = \bar{q} - \frac{1}{m} \in \mathbb{Q}$ verifica quindi la tesi. □

¹Dimostrazione omessa.

3. \mathbb{R} come spazio metrico

La funzione *modulo* o *valore assoluto* su \mathbb{R} è la funzione $|\cdot| : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ definita, per ogni $x \in \mathbb{R}$, nel seguente modo

$$|x| = \max\{x, -x\} = \begin{cases} x & \text{se } x \geq 0; \\ -x & \text{se } x \leq 0. \end{cases}$$

Valgono le disuguaglianze elementari $x \leq |x|$ e $-x \leq |x|$, ed inoltre:

- i) $|x| \geq 0$ per ogni $x \in \mathbb{R}$ e $|x| = 0$ se e solo se $x = 0$;
- ii) $|x| = |-x|$;
- iii) $|x + y| \leq |x| + |y|$ per ogni $x, y \in \mathbb{R}$ (subadittività).

La verifica di iii) segue dalle disuguaglianze

$$x + y \leq |x| + |y| \quad \text{e} \quad -(x + y) = -x - y \leq |x| + |y|.$$

Una conseguenza di iii) è la *disuguaglianza triangolare*

$$|x - y| \leq |x - z| + |z - y| \quad \text{per ogni } x, y, z \in \mathbb{R}.$$

Infatti, $|x - y| = |x - z + z - y| \leq |x - z| + |z - y|$. Dalla iii) segue anche $|x| = |x - y + y| \leq |x - y| + |y|$ che riordinata fornisce $|x| - |y| \leq |x - y|$. Siccome i ruoli di x, y si possono scambiare, si ottiene la disuguaglianza

$$||x| - |y|| \leq |x - y|.$$

Definiamo la *funzione distanza* $d : \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow [0, \infty)$, $d(x, y) = |x - y|$. Questa funzione verifica le seguenti proprietà:

- i) $d(x, y) \geq 0$ per ogni $x, y \in \mathbb{R}$ e $d(x, y) = 0$ se e solo se $x = y$;
- ii) $d(x, y) = d(y, x)$ per ogni $x, y \in \mathbb{R}$;
- iii) $d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y)$ per ogni $x, y, z \in \mathbb{R}$ (disuguaglianza triangolare).

La coppia (\mathbb{R}, d) è allora uno *spazio metrico*. La funzione $d(x, y) = |x - y|$ si dice *distanza standard* o *Euclidea* su \mathbb{R} .

4. Esercizi

ESERCIZIO 4.1. Sia $A \subset \mathbb{R}$ il seguente insieme

$$A := \left\{ \frac{xy}{x+y} \in \mathbb{R} : 0 < x, y < 1 \right\}.$$

- 1) Calcolare $\sup A$ e dire se esiste $\max A$.
- 2) Calcolare $\inf A$ e dire se esiste $\min A$.

ESERCIZIO 4.2. Sia $A \subset \mathbb{R}$ il seguente insieme

$$A := \{n - \sqrt{n^2 - 1} \in \mathbb{R} : n \in \mathbb{N}, n \geq 1\}.$$

- 1) Calcolare $\sup A$ e dire se esiste $\max A$.
- 2) Calcolare $\inf A$ e dire se esiste $\min A$.

ESERCIZIO 4.3. Sia $A \subset \mathbb{R}$ il seguente insieme

$$A := \left\{ \frac{n \log(1/n)}{n+1} \in \mathbb{R} : n \in \mathbb{N}, n \geq 1 \right\}.$$

Provare che $\inf A = -\infty$.

CHAPTER 2

Numeri complessi

1. Introduzione

Introduciamo il simbolo $i = \sqrt{-1}$ che ubbidisce alla regola $i^2 = -1$. Il numero i si chiama *unità immaginaria*. I numeri complessi sono l'insieme

$$\mathbb{C} = \{z = x + iy : x, y \in \mathbb{R}\},$$

ovvero l'insieme di tutte le "espressioni" della forma $x + iy$ dove x e y sono numeri reali. Il numero complesso $z = x + iy$ può essere identificato con il punto del piano Cartesiano \mathbb{R}^2 di coordinate (x, y) :

Disegno.

PER I DISEGNI FARE RIFERIMENTO AI PDF DELLE LEZIONI

Definiamo la *parte reale* e la *parte immaginaria* del numero complesso $z = x + iy$:

$$x = \operatorname{Re}(z) = \operatorname{Re}(x + iy) \quad \text{Parte reale di } z$$

$$y = \operatorname{Im}(z) = \operatorname{Im}(x + iy) \quad \text{Parte immaginaria di } z.$$

Le parti reale e immaginaria di un numero complesso sono numeri reali.

2. Operazioni sui numeri complessi

Introduciamo le operazioni di somma, prodotto e reciproco di numeri complessi.

2.1. Somma. Dati due numeri complessi $z = x + iy$ e $w = \xi + i\eta$ in \mathbb{C} , definiamo la loro somma:

$$z + w = (x + iy) + (\xi + i\eta) = (x + \xi) + i(y + \eta).$$

Nel piano complesso, la somma è semplicemente la somma vettoriale:

Disegno

2.2. Prodotto. Dati due numeri complessi $z = x + iy$ e $w = \xi + i\eta$ in \mathbb{C} , definiamo il loro prodotto:

$$z \cdot w = (x + iy) \cdot (\xi + i\eta) = x\xi + ix\eta + iy\xi + i^2y\eta = (x\xi - y\eta) + i(x\eta + y\xi).$$

Abbiamo usato la regola $i^2 = -1$. Vedremo in seguito l'interpretazione geometrica del prodotto di numeri complessi. Il simbolo \cdot per indicare il prodotto viene spesso omissivo.

2.3. Reciproco e quoziente. Calcoliamo formalmente il reciproco di un numero complesso $z \neq 0$:

$$\frac{1}{z} = \frac{1}{x+iy} = \frac{1}{x+iy} \cdot \frac{x-iy}{x-iy} = \frac{x-iy}{x^2-i^2y^2} = \frac{x-iy}{x^2+y^2} = \frac{x}{x^2+y^2} - i \frac{y}{x^2+y^2}.$$

Usiamo questo calcolo formale per *definire* il reciproco di $z = x+iy \neq 0$ nel seguente modo

$$\frac{1}{z} := \frac{x}{x^2+y^2} - i \frac{y}{x^2+y^2}.$$

Con un calcolo che ripercorre a ritroso il precedente si verifica ora che per ogni $z \in \mathbb{C}$ con $z \neq 0$ si ha

$$z \cdot \frac{1}{z} = 1.$$

Definito il reciproco di un numero complesso, è immediato definire anche il quoziente fra due numeri complessi $z, w \in \mathbb{C}$ con $w \neq 0$:

$$\frac{z}{w} = z \cdot \frac{1}{w}.$$

2.4. Campo dei numeri complessi. L'operazione di somma verifica gli assiomi (S1)-(S4). L'operazione di prodotto verifica gli assiomi (P1)-(P4). Inoltre somma e prodotto sono legati dalla proprietà distributiva:

$$z \cdot (w + \zeta) = z \cdot w + z \cdot \zeta, \quad z, w, \zeta \in \mathbb{C}.$$

Questi fatti si riassumono dicendo che \mathbb{C} è un *campo*.

Osservazione importante. Nel campo complesso \mathbb{C} non c'è alcuna relazione d'ordine \leq . Dunque, scrivere

$$z \leq w \quad \text{con } z, w \in \mathbb{C} \quad \text{NON ha senso.}$$

3. Coniugato, modulo e argomento

3.1. Coniugato. Definiamo il *coniugato* del numero complesso $z = x+iy$ come il numero complesso

$$\bar{z} = x - iy.$$

Chiaramente, nel piano complesso \bar{z} è il punto simmetrico a z rispetto all'asse delle x :

Disegno

L'operazione di coniugazione verifica le proprietà descritte nel seguente teorema, la cui dimostrazione è elementare e viene omessa.

PROPOSIZIONE 3.1. Dati numeri complessi $z, w \in \mathbb{C}$, si ha:

- 1) $\overline{z+w} = \bar{z} + \bar{w}$;
- 2) $\overline{z \cdot w} = \bar{z} \cdot \bar{w}$;
- 3) $\overline{\bar{z}} = z$;
- 4) $\overline{\left(\frac{z}{w}\right)} = \frac{\bar{z}}{\bar{w}}$.

La dimostrazione è elementare e viene omessa. Sono anche utili le seguenti formule per le parti reale e immaginaria di $z = x + iy$:

$$\operatorname{Re}(z) = \frac{z + \bar{z}}{2} \quad \text{e} \quad \operatorname{Im}(z) = \frac{z - \bar{z}}{2i}.$$

3.2. Modulo. Il modulo del numero complesso $z = x + iy$ è

$$|z| = \sqrt{z\bar{z}} = \sqrt{(x + iy)(x - iy)} = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Il modulo è sempre un numero reale non negativo. Se $z = x \in \mathbb{R}$ è un numero reale, allora si ha $|z| = \sqrt{x^2} = |x|$ e si trova il valore assoluto di x . Dunque il modulo è l'estensione del valore assoluto.

Per il Teorema di Pitagora, il modulo $|z|$ è la lunghezza del vettore z :

Disegno

3.3. Argomento. Sia $\vartheta \in [0, 2\pi)$ l'angolo formato in senso antiorario dal punto $z \in \mathbb{C}$, $z \neq 0$, a partire dal semiasse positivo delle x . Definiamo l'*argomento* di z

$$\arg(z) = \vartheta.$$

Dalla trigonometria sappiamo che si hanno le relazioni

$$x = |z| \cos \vartheta \quad \text{e} \quad y = |z| \sin \vartheta.$$

Supponendo $x \neq 0$ e formando il quoziente si trova

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{\sin \vartheta}{\cos \vartheta} = \frac{y}{x}.$$

Quando $x = 0$ allora l'argomento sarà $\pi/2$ quando $y > 0$ e $3\pi/2$ quando $y < 0$. Quando $\vartheta \in [0, \pi/2)$, ovvero quando z è nel primo quadrante, possiamo invertire la relazione precedente e trovare la formula per l'argomento

$$\arg(z) = \vartheta = \operatorname{arctg}\left(\frac{y}{x}\right).$$

ESERCIZIO 3.1. Dato $z = x + iy \in \mathbb{C}$, provare che:

- 1) $\arg(z) = \pi + \operatorname{arctg}(y/x)$ quando z è nel secondo e terzo quadrante.
- 2) $\arg(z) = 2\pi + \operatorname{arctg}(y/x)$ quando z è nel quarto quadrante.

4. Rappresentazione trigonometrica ed esponenziale

4.1. Rappresentazione trigonometrica. Sia $r = |z| \geq 0$ il modulo di $z \in \mathbb{C}$, e sia $\vartheta = \arg(z) \in [0, 2\pi)$ il suo argomento. Allora avremo

$$\begin{aligned} z &= x + iy = r \cos \vartheta + ir \sin \vartheta \\ &= r(\cos \vartheta + i \sin \vartheta). \end{aligned}$$

Questa è la *rappresentazione trigonometrica* di z .

Usiamo la rappresentazione trigonometrica per interpretare geometricamente il prodotto di numeri complessi. Siano $z = r(\cos \vartheta + i \sin \vartheta)$ e $w = \varrho(\cos \varphi + i \sin \varphi)$ con $r, \varrho \geq 0$ e $\vartheta, \varphi \in [0, 2\pi)$. Allora si ha:

$$\begin{aligned} (4.3) \quad z \cdot w &= r\varrho [\cos \vartheta \cos \varphi - \sin \vartheta \sin \varphi + i(\cos \vartheta \sin \varphi + \sin \vartheta \cos \varphi)] \\ &= r\varrho (\cos(\vartheta + \varphi) + i \sin(\vartheta + \varphi)). \end{aligned}$$

Abbiamo usato le formule di addizione per seno e coseno.

Le conclusioni sono interessanti:

- 1) Il modulo del prodotto è il prodotto dei moduli: $|zw| = |z||w|$;
- 2) l'argomento del prodotto è la somma degli argomenti: $\arg(zw) = \arg(z) + \arg(w)$.

Disegno

4.2. Rappresentazione esponenziale. Passiamo alla rappresentazione esponenziale di un numero complesso. Poniamo

$$(4.4) \quad e^{i\vartheta} := \cos \vartheta + i \sin \vartheta.$$

Questa formula si chiama *identità di Eulero*. Per il momento la accettiamo come definizione. Alla fine del corso ne daremo anche una dimostrazione basata sugli sviluppi di Taylor.

PROPOSIZIONE 4.1. L'esponenziale complesso ha le seguenti proprietà:

- 1) $|e^{i\vartheta}| = 1$ per ogni $\vartheta \in \mathbb{R}$;
- 2) $e^{i\vartheta} \cdot e^{i\varphi} = e^{i(\vartheta+\varphi)}$ (formula di addizione).
- 3) $(e^{i\vartheta})^n = e^{in\vartheta}$ per ogni $n \in \mathbb{N}$ (formula di de Moivre).

DIM. La 1) segue dalla definizione (4.4). La 2) è una riformulazione di (4.3). La formula 3) segue iterando la 2). \square

Un numero complesso $z \in \mathbb{C}$ si può scrivere nel seguente modo

$$z = re^{i\vartheta},$$

dove $r = |z| \geq 0$ è il modulo di z e $\vartheta = \arg(z)$ è il suo argomento. Questa è la *rappresentazione esponenziale* di un numero complesso.

5. Radici di un numero complesso

Sia $w = Re^{i\varphi}$, con $R = |w| \geq 0$ e $\varphi = \arg(w) \in [0, 2\pi)$, un numero complesso fissato e sia $n \in \mathbb{N}$. Vogliamo risolvere l'equazione

$$z^n = w$$

nell'incognita $z \in \mathbb{C}$. In altri termini, vogliamo trovare (tutte) le radici n -esime del numero complesso $w \in \mathbb{C}$. Per il Teorema Fondamentale dell'Algebra, che vedremo fra breve, ci sono esattamente n soluzioni.

Cerchiamo soluzioni in forma esponenziale $z = re^{i\vartheta}$ con $r \geq 0$ e $\vartheta \in [0, 2\pi)$ da determinare. Usando la formula di de Moivre, avremo

$$z^n = (re^{i\vartheta})^n = r^n (e^{i\vartheta})^n = r^n e^{in\vartheta}.$$

L'equazione $z^n = w$ diventa allora

$$r^n e^{in\vartheta} = Re^{i\varphi}.$$

Uguagliando i moduli si ottiene l'equazione

$$r^n = R \quad \Leftrightarrow \quad r = \sqrt[n]{R}.$$

D'altra parte, si ha

$$e^{in\vartheta} = e^{i\varphi} \quad \Leftrightarrow \quad n\vartheta = \varphi + 2k\pi, \quad k \in \mathbb{Z},$$

e quindi si trovano gli argomenti

$$\vartheta_k = \frac{\varphi}{n} + \frac{2k\pi}{n}, \quad k \in \mathbb{Z}.$$

Basta considerare gli indici $k = 0, 1, \dots, n-1$, perchè gli altri k danno delle ripetizioni. In conclusione, si ottengono n radici distinte

$$z_k = \sqrt[n]{R} e^{i\vartheta_k}, \quad k = 0, 1, \dots, n-1.$$

Le radici si dispongono sui vertici di un poligono regolare di n lati inscritto in una circonferenza centrata in 0 di raggio $\sqrt[n]{R}$.

ESEMPIO 5.1. Vogliamo calcolare tutte le soluzioni $z \in \mathbb{C}$ dell'equazione $z^4 = -1$. In primo luogo si scrive il numero complesso $w = -1$ in forma esponenziale: $R = |w| = 1$ mentre $\varphi = \arg(w) = \pi$. Dunque si ha $-1 = e^{i\pi}$. Si trovano le quattro radici

$$z_k = e^{i\left(\frac{\pi}{4} + \frac{k}{2}\pi\right)}, \quad k = 0, 1, 2, 3.$$

Le soluzioni si dispongono sui vertici di un quadrato:

Disegno

6. Numeri complessi come spazio metrico

Definiamo la distanza fra due numeri complessi $z, w \in \mathbb{C}$ nel seguente modo:

$$d(z, w) = |z - w|.$$

Si tratta della lunghezza del segmento che congiunge z e w :

Disegno

Osserviamo che, con $z = x + iy$ e $w = \xi + i\eta$, si ha

$$\begin{aligned} |z - w| &= |x + iy - (\xi + i\eta)| = |x + iy - \xi - i\eta| \\ &= |(x - \xi) + i(y - \eta)| \\ &= \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}. \end{aligned}$$

La distanza d verifica le seguenti proprietà:

- (1) $d(z, w) = 0 \Leftrightarrow |z - w| = 0 \Leftrightarrow z - w = 0 \Leftrightarrow z = w$.
- (2) $d(z, w) = |z - w| = |w - z| = d(w, z)$.
- (3) $d(z, w) \leq d(z, \zeta) + d(\zeta, w)$ (Disuguaglianza triangolare).

La verifica della disuguaglianza triangolare è omessa.

ESEMPIO 6.1. Fissati un punto $z_0 \in \mathbb{C}$ ed un numero reale $r \geq 0$, l'insieme

$$A = \{z \in \mathbb{C} : |z - z_0| = r\}$$

è la circonferenza di raggio r e centro z_0 .

ESEMPIO 6.2. Fissati un punto $z_0 \in \mathbb{C}$ ed un numero reale $r \geq 0$, l'insieme

$$B = \{z \in \mathbb{C} : |z - z_0| \leq r\}$$

è tutto il cerchio (bordo incluso).

Disegno

ESEMPIO 6.3. L'insieme

$$E = \{z \in \mathbb{C} : |z - i| + |z + i| = 4\}$$

è un'ellisse di fuochi i e $-i$.

7. Polinomi complessi

DEFINIZIONE 7.1. Siano $a_0, a_1, \dots, a_n \in \mathbb{C}$ numeri complessi. Un'espressione della forma

$$P(z) = a_0 + a_1z + \dots + a_nz^n = \sum_{k=0}^n a_kz^k$$

si dice *polinomio complesso* della variabile $z \in \mathbb{C}$. Se $a_n \neq 0$ diremo che $P(z)$ ha grado $n \in \mathbb{N}$.

Un numero complesso $z_0 \in \mathbb{C}$ si dice *radice* di un polinomio complesso $P(z)$ se $P(z_0) = 0$, ovvero se $P(z)$ calcolato in $z = z_0$ si annulla. Il vantaggio di lavorare con polinomi complessi è che hanno sempre un numero di radici pari al grado del polinomio.

TEOREMA 7.2 (Fondamentale dell'Algebra). Sia $P(z)$ un polinomio complesso di grado $n \in \mathbb{N}$, $n \geq 1$. Allora l'equazione

$$P(z) = 0$$

ha esattamente n soluzioni (contate con la loro molteplicità), dette radici del polinomio.

La dimostrazione del Teorema è fuori dalla nostra portata ed è omessa.

ESEMPIO 7.3. Il polinomio $P(x) = 1 + x^2$ della variabile reale $x \in \mathbb{R}$ non ha radici reali. Il polinomio complesso $P(z) = 1 + z^2$ ha invece esattamente due radici in campo complesso che sono $z = \pm i$.

OSSERVAZIONE 7.4. Sia $P(z)$ un polinomio complesso di grado $n \geq 1$ con $a_n = 1$. Siano $z_1, z_2, \dots, z_n \in \mathbb{C}$ le sue radici. Allora il polinomio può essere fattorizzato nel seguente modo

$$P(z) = (z - z_1)(z - z_2) \cdot \dots \cdot (z - z_n).$$

OSSERVAZIONE 7.5. Supponiamo che il polinomio complesso

$$P(z) = \sum_{k=0}^n a_kz^k$$

abbia coefficienti reali: $a_0, a_1, \dots, a_n \in \mathbb{R}$. Allora

$$P(z) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad P(\bar{z}) = 0.$$

Dunque, nota una radice $z \in \mathbb{C}$ se ne conosce automaticamente una seconda $\bar{z} \in \mathbb{C}$.

DIM. Osserviamo preliminarmente che

$$P(z) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \overline{P(z)} = 0.$$

Inoltre, si ha

$$\overline{P(z)} = \overline{\sum_{k=0}^n a_kz^k} = \sum_{k=0}^n \overline{a_kz^k} = \sum_{k=0}^n \bar{a}_k\bar{z}^k = \sum_{k=0}^n a_k\bar{z}^k = P(\bar{z}).$$

Abbiamo usato il fatto che i coefficienti sono reali: $\bar{a}_k = a_k$. L'affermazione segue. \square

8. Esercizi svolti sui numeri complessi

ESERCIZIO 8.1. Calcolare le soluzioni $z \in \mathbb{C}$ dell'equazione

$$z^3 = 8i.$$

Ovvero: calcolare le radici terze di $8i$

Soluzione. Scriviamo $8i$ in forma esponenziale:

$$\begin{aligned} R &= |8i| = 8 && \text{modulo} \\ \varphi &= \arg(8i) = \frac{\pi}{2} && \text{argomento.} \end{aligned}$$

Disegno

Cerchiamo soluzioni della forma $z = re^{i\vartheta}$ con $r \geq 0$ e $\vartheta \in [0, 2\pi)$ da determinare. Abbiamo l'equazione

$$8i = 8e^{i\frac{\pi}{2}} = z^3 = r^3 e^{3i\vartheta}.$$

Otteniamo

$$r^3 = 8 \quad \Leftrightarrow \quad r = 2.$$

E poi

$$3\vartheta = \frac{\pi}{2} + 2k\pi, \quad k = 0, 1, 2,$$

ovvero

$$\vartheta_k = \frac{\pi}{6} + \frac{2k}{3}\pi, \quad k = 0, 1, 2.$$

Precisamente: $\vartheta_0 = \pi/6$, $\vartheta_1 = \frac{5}{6}\pi$, $\vartheta_2 = \frac{3}{2}\pi$. Le soluzioni in forma algebrica sono:

$$\begin{aligned} z_0 &= 2e^{i\frac{\pi}{6}} = 2\left(\cos\frac{\pi}{6} + i\sin\frac{\pi}{6}\right) = 2\left(\frac{\sqrt{3}}{2} + i\frac{1}{2}\right) = \sqrt{3} + i, \\ z_1 &= 2e^{i\frac{5}{6}\pi} = 2\left(\cos\frac{5}{6}\pi + i\sin\frac{5}{6}\pi\right) = 2\left(-\frac{\sqrt{3}}{2} + i\frac{1}{2}\right) = -\sqrt{3} + i, \\ z_2 &= 2e^{i\frac{3}{2}\pi} = 2\left(\cos\frac{3}{2}\pi + i\sin\frac{3}{2}\pi\right) = -2i. \end{aligned}$$

Nel piano di Gauss:

Disegno

ESERCIZIO 8.2. Calcolare tutte le soluzioni $z \in \mathbb{C}$ dell'equazione

$$z^4 - 2i\sqrt{3}z^2 - 4 = 0$$

e rappresentarle nel piano di Gauss.

Soluzione. Ponendo $w = z^2$ l'equazione diviene

$$w^2 - 2i\sqrt{3}w - 4 = 0.$$

Usiamo la formula risolutiva per le equazioni di secondo grado:

$$\begin{aligned} w_{\pm} &= \frac{2i\sqrt{3} \pm \sqrt{4i^2 \cdot 3 + 16}}{2} \\ &= \frac{2i\sqrt{3} \pm 2}{2} = \pm 1 + i\sqrt{3}. \end{aligned}$$

Dobbiamo risolvere le due equazioni

$$\begin{aligned} z^2 &= w_+ = 1 + i\sqrt{3} \\ z^2 &= w_- = -1 + i\sqrt{3}. \end{aligned}$$

Risolviamo la prima equazione. Scriviamo w_+ in forma esponenziale. Modulo e argomento sono (osserviamo che w_+ è nel primo quadrante):

$$\begin{aligned} R &= |w_+| = \sqrt{1^2 + (\sqrt{3})^2} = 2 \\ \varphi &= \arg(w_+) = \arctg\left(\frac{\sqrt{3}}{1}\right) = \arctg(\sqrt{3}) = \frac{\pi}{3}. \end{aligned}$$

Dunque, si ha

$$w_+ = 2e^{i\frac{\pi}{3}} = 2\left(\cos\frac{\pi}{3} + i\sin\frac{\pi}{3}\right).$$

Otteniamo l'equazione per l'incognita $z = re^{i\vartheta}$, con $r \geq 0$ e $\vartheta \in [0, 2\pi)$:

$$r^2 e^{i2\vartheta} = z^2 = w_+ = 2e^{i\frac{\pi}{3}}.$$

Si ottengono le due equazioni:

$$\begin{aligned} r^2 &= 2 \quad \Leftrightarrow \quad r = \sqrt{2} \\ 2\vartheta &= \frac{\pi}{3} + 2k\pi, \quad k = 0, 1. \end{aligned}$$

Gli argomenti sono

$$\vartheta_0 = \frac{\pi}{6} \quad \text{e} \quad \vartheta_1 = \frac{7}{6}\pi.$$

Si trovano le prime due soluzioni in forma algebrica:

$$\begin{aligned} z_0 &= \sqrt{2}e^{i\vartheta_0} = \sqrt{\frac{3}{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}}i \\ z_1 &= \sqrt{2}e^{i\vartheta_1} = -\sqrt{\frac{3}{2}} - \frac{1}{\sqrt{2}}i \end{aligned}$$

In modo analogo si risolve l'equazione $z^2 = w_- = -1 + i\sqrt{3}$. Si trovano le soluzioni:

$$\begin{aligned} z_2 &= \sqrt{2}\left(\frac{1}{2} + i\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \\ z_3 &= \sqrt{2}\left(-\frac{1}{2} - i\frac{\sqrt{3}}{2}\right). \end{aligned}$$

ESERCIZIO 8.3. Calcolare tutte le soluzioni $z \in \mathbb{C}$ dell'equazione

$$z^3 = 9\bar{z}.$$

Soluzioni. Certamente $z = 0$ è una soluzione. Cerchiamo soluzioni in forma esponenziale $z = re^{i\vartheta}$ con $r \geq 0$ e $\vartheta \in [0, 2\pi)$. Osserviamo che

$$\begin{aligned} \bar{z} &= \overline{re^{i\vartheta}} = r\overline{e^{i\vartheta}} \\ &= r(\overline{\cos\vartheta + i\sin\vartheta}) = r(\cos\vartheta - i\sin\vartheta) \\ &= r(\cos(-\vartheta) + i\sin(-\vartheta)) = re^{-i\vartheta}. \end{aligned}$$

Dunque, si trova l'equazione

$$z^3 = 9\bar{z} \quad \Leftrightarrow \quad r^3 e^{3i\vartheta} = 9r e^{-i\vartheta},$$

e deduciamo che

$$r^3 = 9r \quad \Leftrightarrow \quad r = 0 \quad \text{oppure} \quad r = 3,$$

e poi

$$3\vartheta = -\vartheta + 2k\pi, \quad k \in \mathbb{Z},$$

ovvero

$$\vartheta_k = \frac{k}{2}\pi, \quad k = 0, 1, 2, 3.$$

Troviamo le soluzioni

$$z_1 = 3e^{i \cdot 0} = 3, \quad z_2 = 3e^{i\frac{\pi}{2}} = 3i, \quad z_3 = 3e^{i\pi} = -3, \quad z_4 = 3e^{i\frac{3}{2}\pi} = -3i,$$

cui va aggiunta la soluzione $z_0 = 0$.

ESERCIZIO 8.4. Calcolare tutte le soluzioni $z \in \mathbb{C}$ dell'equazione

$$z^3 \bar{z} + 3z^2 - 4 = 0.$$

Soluzione. Riscriviamo l'equazione in questo modo

$$(8.5) \quad z^2(z\bar{z} + 3) = 4 \quad \Leftrightarrow \quad z^2(|z|^2 + 3) = 4.$$

Eguagliamo i moduli a destra e sinistra

$$|z^2|(|z|^2 + 3) = |z^2|(|z|^2 + 3) = |4| = 4,$$

e osserviamo che $|z^2| = |z|^2$. Si ottiene dunque l'equazione per l'incognita $t = |z|^2 \geq 0$

$$t^2 + 3t - 4 = 0.$$

Le soluzioni sono $t = -4$, che è da scartare, e $t = 1$, che è accettabile. Dunque, deve essere $|z|^2 = 1$ e quindi $|z| = 1$. e sostituendo tale valore nell'equazione (8.5) si ottiene $z^2 = 1$ che ha le soluzioni $z = \pm 1$. Queste sono tutte e sole le soluzioni dell'equazione.

ESERCIZIO 8.5. Disegnare nel piano di Gauss l'insieme dei numeri complessi $z \in \mathbb{C}$ tali che

$$\begin{cases} \operatorname{Re}(iz^2 - i\bar{z}^2) \geq -4 \\ \left| z - \frac{\sqrt{2}}{2} - i\sqrt{2} \right| \leq \sqrt{2}. \end{cases}$$

Soluzione. L'insieme

$$C = \left\{ z \in \mathbb{C} : \left| z - \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + i\sqrt{2} \right) \right| \leq \sqrt{2} \right\}$$

è un cerchio di centro $z_0 = \frac{\sqrt{2}}{2} + i\sqrt{2}$ e raggio $r = \sqrt{2}$ (circonferenza inclusa):

Disegno

Studiamo la prima disequazione. Poniamo $z = x + iy$:

$$\begin{aligned} iz^2 - i\bar{z}^2 &= i(x + iy)^2 - i(x - iy)^2 \\ &= i(x^2 + 2ixy - y^2) - i(x^2 - 2ixy - y^2) \\ &= -2xy - 2xy + i(x^2 - x^2 - y^2 + y^2) = -4xy. \end{aligned}$$

Dunque, si ha

$$\operatorname{Re}(iz^2 - i\bar{z}^2) \geq -4 \Leftrightarrow -4xy \geq -4 \Leftrightarrow xy \leq 1.$$

L'insieme

$$A = \{z = x + iy \in \mathbb{C} : xy \leq 1\}$$

è la regione del piano delimitata dai due rami di iperbole $xy = 1$ (iperbole inclusa):

Disegno

In conclusione, le soluzioni sono date dall'intersezione $A \cap C$:

Disegno

ESERCIZIO 8.6. Sia $\alpha \in \mathbb{R}$ un parametro fissato. Disegnare nel piano complesso il seguente insieme

$$S_\alpha = \left\{ z \in \mathbb{C} : \frac{\bar{z} + 1 - i\alpha}{z + 1} \in \mathbb{R} \right\}$$

Soluzione. In primo luogo deve essere $z + 1 \neq 0$, ovvero:

$$z \neq -1.$$

L'insieme S_α è formato dai punti $z \neq -1$ tali che

$$\operatorname{Im}\left(\frac{\bar{z} + 1 - i\alpha}{z + 1}\right) = 0.$$

Calcoliamo il quoziente, ponendo $z = x + iy$:

$$\begin{aligned} \frac{\bar{z} + 1 - i\alpha}{z + 1} &= \frac{\bar{z} + 1 - i\alpha}{z + 1} \frac{\bar{z} + 1}{\bar{z} + 1} \\ &= \frac{\bar{z}^2 + \bar{z} + \bar{z} + 1 - i\alpha\bar{z} - i\alpha}{|z|^2 + z + \bar{z} + 1} \\ &= \frac{(x - iy)^2 + 2(x - iy) + 1 - i\alpha(x - iy) - i\alpha}{x^2 + y^2 + 2x + 1} \\ &= \frac{x^2 - 2ixy - y^2 + 2x - 2iy + 1 - i\alpha x - \alpha y - i\alpha}{x^2 + y^2 + 2x + 1}. \end{aligned}$$

Annulliamo la parte immaginaria:

$$\begin{aligned} -2xy - 2y - \alpha x - \alpha &= 0 \Leftrightarrow 2y(x + 1) + \alpha(x + 1) = 0 \\ &\Leftrightarrow (x + 1)(2y + \alpha) = 0. \end{aligned}$$

Quindi deve essere $x + 1 = 0$ oppure $2y + \alpha = 0$. Nel primo caso si ha la retta $x = -1$ (ma il punto $z = -1$ è escluso).

Disegno

Nel secondo caso si ha la retta $y = -\frac{\alpha}{2}$.

ESERCIZIO 8.7. Determinare $\lambda \in \mathbb{C}$ tale che $z_0 = i$ sia radice del polinomio

$$P(z) = z^4 - 2z^3 + \lambda z^2 - 2z + 2.$$

Calcolare quindi tutte le radici.

Soluzione. Il numero complesso $z_0 = i$ è radice del polinomio se

$$0 = P(i) = i^4 - 2i^3 + \lambda i^2 - 2i + 2 = 3 - \lambda.$$

Quindi $\lambda = 3$. Il polinomio è

$$P(z) = z^4 - 2z^3 + 3z^2 - 2z + 2.$$

Osserviamo che i coefficienti del polinomio sono reali. Due radici del polinomio sono dunque $z_0 = i$ e $\bar{z}_0 = -i$. Le altre due radici sono $z_1 \in \mathbb{C}$ e $\bar{z}_1 \in \mathbb{C}$, da determinare. Il polinomio si fattorizza nel seguente modo:

$$\begin{aligned} P(z) &= (z - i)(z + i)(z - z_1)(z - \bar{z}_1) \\ &= (z^2 + 1)(z^2 - z\bar{z}_1 - z_1z + |z_1|^2) \\ &= z^4 - (z_1 + \bar{z}_1)z^3 + (1 + |z_1|^2)z^2 - (z_1 + \bar{z}_1)z + |z_1|^2. \end{aligned}$$

Eguagliando i coefficienti del polinomio si ottiene il sistema di equazioni nell'incognita z_1 :

$$\begin{cases} -2 = -(z_1 + \bar{z}_1) \\ 3 = |z_1|^2 + 1 \\ -2 = -(z_1 + \bar{z}_1) \\ 2 = |z_1|^2. \end{cases}$$

Le ultime due equazioni sono doppiate delle prime due. Dunque si ha il sistema

$$\begin{cases} z_1 + \bar{z}_1 = 2 \\ |z_1|^2 = 2 \end{cases}$$

Se $z_1 = x_1 + iy_1$, la prima equazione fornisce $x_1 = 1$ e quindi la seconda diventa

$$2 = |z_1|^2 = x_1^2 + y_1^2 = 1 + y_1^2,$$

da cui si deduce che $y_1^2 = 1$, ovvero $y_1 = \pm 1$. Scegliendo il segno $+$ si trova la coppia di soluzioni

$$z_1 = 1 + i, \quad \bar{z}_1 = 1 - i.$$

Scegliendo il segno $-$ si trovano le stesse soluzioni, scambiate fra loro.

In conclusione, le quattro soluzioni sono $\pm i$ e $1 \pm i$.

ESERCIZIO 8.8. Disegnare nel piano complesso l'insieme delle $z \in \mathbb{C}$ tali che

$$(8.6) \quad \frac{\sqrt{4 - |z - 4|}}{\sqrt{4 - |z + 4i|}} > 1.$$

Soluzione. Abbiamo le restrizioni:

$$(8.7) \quad 4 - |z - 4| \geq 0 \quad \Leftrightarrow \quad |z - 4| \leq 4,$$

$$(8.8) \quad 4 - |z + 4i| > 0 \quad \Leftrightarrow \quad |z + 4i| < 4.$$

Rappresentiamo il dominio di esistenza nel seguente disegno:

Disegno

Con tali restrizioni, possiamo elevare al quadrato la disuguaglianza (8.6) e ottenere

$$\begin{aligned} \frac{4 - |z - 4|}{4 - |z + 4i|} > 1 &\Leftrightarrow 4 - |z - 4| > 4 - |z + 4i| \\ &\Leftrightarrow |z + 4i| > |z - 4| \\ &\Leftrightarrow |z + 4i|^2 > |z - 4|^2. \end{aligned}$$

Ponendo $z = x + iy$ si ottiene la disuguaglianza equivalente:

$$\begin{aligned} |x + iy + 4i|^2 > |x + iy - 4|^2 &\Leftrightarrow x^2 + (y + 4)^2 > (x - 4)^2 + y^2 \\ &\Leftrightarrow x^2 + y^2 + 8y + 16 > x^2 - 8x + 16 + y^2, \end{aligned}$$

ovvero $y > -x$:

Disegno

In definitiva, le soluzioni sono:

Disegno