

Compllessificazione

In questo capitolo si mostra come sia possibile includere uno spazio affine reale in uno spazio affine complesso della stessa dimensione. I casi di dimensione 1, 2, 3 sono ripresi nei complementi al capitolo, ove sono introdotti attraverso lo studio delle coordinate, in modo non intrinseco ma efficace per la comprensione.

1.1 Compllessificazione di uno spazio vettoriale reale

Sia \mathbf{V} uno spazio vettoriale sul campo dei numeri reali e si indichi con i una radice quadrata primitiva di -1 in \mathbb{C} . Allo spazio vettoriale \mathbf{V} è associato in modo naturale uno spazio vettoriale sul campo dei numeri complessi, indicato con

$$\mathbf{V}_{\mathbb{C}}$$

e detto *compllessificazione dello spazio vettoriale \mathbf{V}* , o *compllessificato* di \mathbf{V} . Per definizione, i vettori dello spazio $\mathbf{V}_{\mathbb{C}}$ sono gli elementi di $\mathbf{V} \times \mathbf{V}$, che conviene indicare con una nuova notazione: l'elemento $\mathbf{v} = (\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) \in \mathbf{V}_{\mathbb{C}} = \mathbf{V} \times \mathbf{V}$ viene indicato con

$$\mathbf{v} = \mathbf{a} + i\mathbf{b}.$$

La struttura di spazio vettoriale complesso è definita su $\mathbf{V}_{\mathbb{C}}$ mediante la seguente definizione di somma di vettori:

$$(\mathbf{a} + i\mathbf{b}) + (\mathbf{a}' + i\mathbf{b}') := (\mathbf{a} + \mathbf{b}') + i(\mathbf{b} + \mathbf{b}') \quad \forall \mathbf{a} + i\mathbf{b}, \mathbf{a}' + i\mathbf{b}' \in \mathbf{V}_{\mathbb{C}}$$

e la moltiplicazione per uno scalare $\lambda = a + ib \in \mathbb{C}$ definita da:

$$\lambda(\mathbf{a} + i\mathbf{b}) = (a + ib)(\mathbf{a} + i\mathbf{b}) := (a\mathbf{a} - b\mathbf{b}) + i(a\mathbf{b} + b\mathbf{a}).$$

Ogni vettore \mathbf{v} di $\mathbf{V}_{\mathbb{C}}$ si scrive in modo unico come somma $\mathbf{a} + i\mathbf{b}$, con $\mathbf{a}, \mathbf{b} \in \mathbf{V}$. Diremo che la *componente reale* o la *parte reale* di $\mathbf{v} = \mathbf{a} + i\mathbf{b}$ è $Re \mathbf{v} = \mathbf{a} \in \mathbf{V}$ mentre la *componente immaginaria* o *parte immaginaria* di \mathbf{v} è $Im \mathbf{v} = \mathbf{b} \in \mathbf{V}$.

Il *coniugio* è una applicazione che viene definita in modo naturale¹ in $\mathbf{V}_{\mathbb{C}}$, mediante la posizione:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{\mathbb{C}} &\rightarrow \mathbf{V}_{\mathbb{C}} \\ \mathbf{v} = \mathbf{a} + i\mathbf{b} &\mapsto \bar{\mathbf{v}} := \mathbf{a} - i\mathbf{b}. \end{aligned}$$

Il vettore $\bar{\mathbf{v}} := \mathbf{a} - i\mathbf{b}$ si dice *vettore coniugato* (o più semplicemente *coniugato*) di $\mathbf{v} = \mathbf{a} + i\mathbf{b}$. Applicando nuovamente il coniugio a $\bar{\mathbf{v}}$ si ritrova \mathbf{v} :

$$\overline{(\bar{\mathbf{v}})} = \mathbf{v};$$

l'applicazione coniugio è quindi una involuzione. Osserviamo che *l'applicazione coniugio non è lineare rispetto alla struttura di spazio vettoriale complesso di $\mathbf{V}_{\mathbb{C}}$* (ma è lineare rispetto alla struttura di \mathbb{R} -spazio vettoriale indotta dall'inclusione $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$).

Dato un sottospazio S di $\mathbf{V}_{\mathbb{C}}$, il sottoinsieme $\bar{S} = \{\bar{\mathbf{v}} \mid \mathbf{v} \in S\}$ è detto il *coniugato* di S .

Definizione 1.1.1. Un sottoinsieme S di $\mathbf{V}_{\mathbb{C}}$ si dice *reale* se $\bar{S} = S$. Altrimenti, S si dice *immaginario*.

Il coniugato $\bar{\mathbf{W}}$ di un sotto- \mathbb{C} -spazio vettoriale \mathbf{W} di $\mathbf{V}_{\mathbb{C}}$ è ancora un sotto- \mathbb{C} -spazio vettoriale. Se \mathbf{W} ha dimensione finita, lo spazio $\bar{\mathbf{W}}$ ha la stessa dimensione, e una sua base si ottiene considerando i vettori coniugati di una base di \mathbf{W} .

Poichè ogni vettore reale coincide con la propria parte reale, i vettori reali in $\mathbf{V}_{\mathbb{C}}$ costituiscono una copia di \mathbf{V} canonicamente immersa in $\mathbf{V}_{\mathbb{C}}$.

Definizione 1.1.2. Un *riferimento reale* di $\mathbf{V}_{\mathbb{C}}$ è un riferimento $(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n)$ di \mathbf{V} (e dunque è un riferimento di $\mathbf{V}_{\mathbb{C}}$ (come \mathbb{C} -spazio vettoriale) in cui i vettori $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n$ siano tutti reali).

Esempio 1.1.3. Dato $\mathbf{v} \in \mathbf{V}_{\mathbb{C}}$, il sotto- \mathbb{C} -spazio vettoriale \mathbf{W} generato da \mathbf{v} e dal suo coniugato $\bar{\mathbf{v}}$ è sicuramente reale. Tale sottospazio ha dimensione 2 se e solo se \mathbf{v} e $\bar{\mathbf{v}}$ sono linearmente indipendenti; in tal caso, un riferimento reale di \mathbf{W} è dato da $(\operatorname{Re} \mathbf{v}, \operatorname{Im} \mathbf{v})$.

Per ogni applicazione \mathbb{R} -lineare $f : \mathbf{V} \rightarrow \mathbf{V}$ tra \mathbb{R} -spazi vettoriali, resta definita una e una sola applicazione \mathbb{C} -lineare $f_{\mathbb{C}} : \mathbf{V}_{\mathbb{C}} \rightarrow \mathbf{V}'_{\mathbb{C}}$ la cui restrizione a \mathbf{V} coincida con f : risulta che $f_{\mathbb{C}}(\mathbf{a} + i\mathbf{b}) = f(\mathbf{a}) + if(\mathbf{b})$ per ogni $\mathbf{a}, \mathbf{b} \in \mathbf{V}$.

Supponiamo che sullo spazio vettoriale reale \mathbf{V} sia assegnato un *prodotto scalare*

$$\begin{aligned} \mathbf{V} \times \mathbf{V} &\rightarrow \mathbb{R} \\ (\mathbf{a}, \mathbf{b}) &\mapsto \langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle, \quad \forall \mathbf{a}, \mathbf{b} \in \mathbf{V}, \end{aligned} \tag{1.1}$$

¹ cioè definito in modo intrinseco, senza fare riferimento alla scelta di particolari dati (ad esempio, di basi, di sistemi di coordinate, etc....)

cioè una applicazione bilineare² e simmetrica³. Sullo spazio complessificato restano definite due forme bilineari sul campo complesso

$$\mathbf{V}_{\mathbb{C}} \times \mathbf{V}_{\mathbb{C}} \rightarrow \mathbb{C} :$$

a) una forma bilineare simmetrica, detta *complessificazione del prodotto scalare* (o *prodotto scalare complessificato*) e definita da:

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{a} + i\mathbf{b}, \mathbf{a}' + i\mathbf{b}' \rangle_S &:= \langle \mathbf{a}, \mathbf{a}' \rangle + i \langle \mathbf{a}, \mathbf{b}' \rangle + i \langle \mathbf{b}, \mathbf{a}' \rangle - \langle \mathbf{b}, \mathbf{b}' \rangle \\ &= \langle \mathbf{a}, \mathbf{a}' \rangle - \langle \mathbf{b}, \mathbf{b}' \rangle + i(\langle \mathbf{a}, \mathbf{b}' \rangle + \langle \mathbf{a}', \mathbf{b} \rangle) \end{aligned}$$

b) una forma hermitiana antisimmetrica:

$$\langle \mathbf{a} + i\mathbf{b}, \mathbf{a}' + i\mathbf{b}' \rangle_H := \langle \mathbf{a}, \mathbf{a}' \rangle + \langle \mathbf{b}, \mathbf{b}' \rangle - i(\langle \mathbf{a}, \mathbf{b}' \rangle - \langle \mathbf{b}, \mathbf{a}' \rangle).$$

Concentreremo le nostre attenzioni sul prodotto scalare complessificato, che verrà denotato più semplicemente con il simbolo

$$\langle -, - \rangle .$$

Mettiamo in evidenza due differenze sostanziali tra il prodotto scalare di partenza e il suo complessificato. Innanzitutto, anche se il prodotto scalare in V è definito positivo⁴, in $\mathbf{V}_{\mathbb{C}}$ ci sono *vettori isotropi* per il prodotto scalare complessificato, cioè vettori non nulli \mathbf{v} tali che $\langle \mathbf{v}, \mathbf{v} \rangle = 0$.

Inoltre, anche se il prodotto scalare in \mathbf{V} è definito positivo, il prodotto scalare complessificato non permette di estendere la usuale nozione di *lunghezza* a tutti i vettori di $\mathbf{V}_{\mathbb{C}}$: ad ogni vettore $\mathbf{v} \in \mathbf{V}_{\mathbb{C}}$ è possibile associare solo il numero complesso $\langle \mathbf{v}, \mathbf{v} \rangle$ che non ammette, in generale una unica radice quadrata. Di conseguenza, la nozione di lunghezza viene modificata come segue:

Definizione 1.1.4. La *lunghezza* di un vettore complesso \mathbf{v} (rispetto al prodotto scalare complessificato) è

$$\pm \sqrt{\langle \mathbf{v}, \mathbf{v} \rangle},$$

denotando con $\sqrt{\langle \mathbf{v}, \mathbf{v} \rangle}$ una qualsiasi radice quadrata. Se \mathbf{v} è isotropo, e dunque $\langle \mathbf{v}, \mathbf{v} \rangle = 0$, diciamo che \mathbf{v} ha *lunghezza nulla* (o modulo nullo).

Se \mathbf{v} e \mathbf{w} sono vettori di lunghezza non nulla si definisce, a meno del segno, il numero complesso

² L'applicazione (1.1) è bilineare se è lineare in entrambe le entrate :

$$\begin{aligned} \langle \lambda \mathbf{a} + \mu \mathbf{a}', \mathbf{b} \rangle &= \lambda \langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle + \mu \langle \mathbf{a}', \mathbf{b} \rangle, \\ \langle \mathbf{a}, \lambda \mathbf{b} + \mu \mathbf{b}' \rangle &= \lambda \langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle + \mu \langle \mathbf{a}, \mathbf{b}' \rangle \end{aligned} \quad \forall \mathbf{a}, \mathbf{a}', \mathbf{b}, \mathbf{b}' \in \mathbf{V}, \lambda, \mu \in \mathbb{R}$$

³ L'applicazione (1.1) è simmetrica se $\langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle = \langle \mathbf{b}, \mathbf{a} \rangle \quad \forall \mathbf{a}, \mathbf{b} \in \mathbf{V}$.

⁴ cioè $\langle \mathbf{v}, \mathbf{v} \rangle \geq 0$ per ogni \mathbf{v} e, inoltre, accade che $\langle \mathbf{v}, \mathbf{v} \rangle = 0$ se e solo se $\mathbf{v} = 0$

$$\cos(\hat{\mathbf{v}}\hat{\mathbf{w}}) = \pm \frac{\langle \mathbf{v}, \mathbf{w} \rangle}{\sqrt{\langle \mathbf{v}, \mathbf{v} \rangle} \sqrt{\langle \mathbf{w}, \mathbf{w} \rangle}}$$

che si interpreta come il *coseno dell'angolo formato dai due vettori*. Analogamente, si definisce $\text{sen}(\hat{\mathbf{v}}\hat{\mathbf{w}})$ a meno del segno, tramite la relazione

$$\text{sen}^2(\hat{\mathbf{v}}\hat{\mathbf{w}}) = 1 - \cos^2(\hat{\mathbf{v}}\hat{\mathbf{w}}).$$

Definizione 1.1.5. Due vettori non nulli \mathbf{v} e \mathbf{w} di $\mathbf{V}_{\mathbb{C}}$ si dicono *ortogonali* se

$$\langle \mathbf{v}, \mathbf{w} \rangle = 0.$$

Osservazione 1.1.6. Poichè ogni vettore reale coincide con la propria parte reale, i vettori reali in $\mathbf{V}_{\mathbb{C}}$ costituiscono una copia di \mathbf{V} canonicamente immersa in $\mathbf{V}_{\mathbb{C}}$. Il coniugio è la simmetria di $\mathbf{V}_{\mathbb{C}}$ rispetto al sotto- \mathbb{R} -spazio dei vettori reali (cioè alla copia di \mathbf{V} canonicamente immersa) e nella direzione del sottospazio $i\mathbf{V}$ dei vettori immaginari puri. Sarebbe possibile fare riferimento ad una differente copia di \mathbf{V} canonicamente immersa, utilizzando l'immersione diagonale: $\mathbf{V} \rightarrow \mathbf{V}_{\mathbb{C}} = \mathbf{V} \times \mathbf{V}$, $\mathbf{v} \mapsto (\mathbf{v}, \mathbf{v})$. Il complessificato $\mathbf{V}_{\mathbb{C}}$ di uno spazio vettoriale \mathbf{V} viene in tal caso descritto mediante la biezione:

$$\begin{aligned} \psi : \mathbf{V} \times \mathbf{V} &\rightarrow \mathbf{V}_{\mathbb{C}} \\ (\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) &\mapsto \mathbf{v}_1 + i(\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1) \end{aligned}$$

Attraverso tale biezione, il vettore $\mathbf{v}_1 + i\mathbf{v}_2$ viene identificato con la coppia $(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2 + \mathbf{v}_1)$: i vettori con parte immaginaria nulla sono dunque identificati con le coppie $(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_1)$ ($\mathbf{v}_1 \in \mathbf{V}$) sulla diagonale.

Il coniugio in $\mathbf{V}_{\mathbb{C}}$ corrisponde alla trasformazione

$$\begin{aligned} \psi : \mathbf{V} \times \mathbf{V} &\rightarrow \mathbf{V} \times \mathbf{V} \\ (\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) &\mapsto (\mathbf{v}_1, -\mathbf{v}_2 + 2\mathbf{v}_1) \end{aligned}$$

che associa alla coppia $(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)$ la coppia simmetrica $(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}'_2)$ rispetto all'elemento $(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_1)$ della diagonale; la coppia simmetrica $(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}'_2)$ è la coppia avente la stessa prima componente e tale che la semisomma appartenga alla diagonale:

$$\frac{1}{2}[(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) + (\mathbf{v}_1, \mathbf{v}'_2)] = (\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_1).$$

1.2 Complessificazione di uno spazio affine reale

Sia \mathbb{A} uno spazio affine reale, con spazio vettoriale associato $\mathbf{V} = V(\mathbb{A})$. Si consideri l'insieme $\mathbb{A}_{\mathbb{C}} = \mathbb{A} \times \mathbb{A}$: i suoi elementi sono coppie di punti $P(p, p')$ con $p, p' \in \mathbb{A}$ e su esso viene assegnata una struttura di spazio affine complesso, mediante la posizione:

$$\begin{aligned} \mathbb{A}_{\mathbb{C}} \times \mathbb{A}_{\mathbb{C}} &\rightarrow \mathbf{V}_{\mathbb{C}} \\ (P = (p, p'), Q = (q, q')) &\mapsto \mathbf{P}\mathbf{S} \stackrel{def}{=} \mathbf{p}\mathbf{q} + i(\mathbf{p}'\mathbf{p} + \mathbf{q}\mathbf{q}') = \mathbf{p}\mathbf{q} + i(\mathbf{p}'\mathbf{q}' - \mathbf{p}\mathbf{q}). \end{aligned}$$

Infatti:

- per ogni punto $P = (p, p')$ di $\mathbb{A}_{\mathbb{C}}$ e per ogni vettore $\mathbf{v} \in \mathbf{V}_{\mathbb{C}}$ esiste un unico punto S di $\mathbb{A}_{\mathbb{C}}$ tale che $\mathbf{PS} = \mathbf{v}$: infatti, posto $\mathbf{v} = \mathbf{a} + i\mathbf{b}$ con $\mathbf{a}, \mathbf{b} \in \mathbf{V}$, occorre e basta scegliere $S = (s, s')$ con $s = p + \mathbf{a}$, $s' = p' + \mathbf{b}$.
- per ogni terna $(P = (p, p'), Q = (q, q'), R = (r, r'))$ di punti di $\mathbb{A}_{\mathbb{C}}$ si ha:

$$\mathbf{PQ} + \mathbf{QR} = \mathbf{PR}, \quad (1.2)$$

poiché $\mathbf{PR} = \mathbf{pr} + i(-\mathbf{pr} + \mathbf{p}'\mathbf{r}') = (\mathbf{pq} + \mathbf{qr}, -\mathbf{pq} - \mathbf{qr} + \mathbf{p}'\mathbf{q}' + \mathbf{q}'\mathbf{r}') = (\mathbf{pq} + \mathbf{qr}, (-\mathbf{pq} + \mathbf{p}'\mathbf{q}') + (-\mathbf{qr} + \mathbf{q}'\mathbf{r}')) = \mathbf{PQ} + \mathbf{QR}$.

Si osservi che l'applicazione di traslazione per un vettore risulta data da:

$$\begin{aligned} \mathbb{A}_{\mathbb{C}} \times \mathbf{V}_{\mathbb{C}} &\rightarrow \mathbb{A}_{\mathbb{C}} \\ (P = (p, p'), \mathbf{v}(v_1, v_2)) &\mapsto P + \mathbf{v} \stackrel{def}{=} (p + v_1, p' + v_2). \end{aligned}$$

Nello spazio affine complessificato $\mathbb{A}_{\mathbb{C}}$ risulta inoltre definita la seguente involuzione, detta *coniugio*:

$$\begin{aligned} c : \mathbb{A}_{\mathbb{C}} &\rightarrow \mathbb{A}_{\mathbb{C}} \\ P(p, p') &\mapsto c(p, p') = \overline{P} = \overline{(p, p')} := (p, p'') \end{aligned}$$

ove con $p'' = p + \mathbf{p}'\mathbf{p}$ si denota il simmetrico di p' rispetto a p , cioè l'unico punto di \mathbb{A} tale che $\mathbf{pp}' = \mathbf{p}''\mathbf{p}$. In particolare, il coniugato del vettore di estremi P e Q è il vettore avente per estremi i punti coniugati \overline{P} e \overline{Q} :

$$\overline{\mathbf{PQ}} = \overline{\mathbf{P}} \overline{\mathbf{Q}}.$$

In $\mathbb{A}_{\mathbb{C}}$ vengono detti *punti reali* i punti fissi del coniugio, cioè i punti (p, p) , $p \in \mathbb{A}$, che ne formano la diagonale.

Il complessificato di ogni sottospazio affine reale di \mathbb{A} è un sottospazio affine di $\mathbf{V}_{\mathbb{C}}$. Un sottospazio affine H di $\mathbb{A}_{\mathbb{C}}$ si dice un *sottospazio reale* se coincide con il proprio coniugato, cioè $H = \overline{H}$.

Ogni affinità $\varphi : \mathbb{A} \rightarrow \mathbb{A}'$ tra spazi affini reali induce una corrispondente affinità $\varphi_{\mathbb{C}} : \mathbb{A}_{\mathbb{C}} \rightarrow \mathbb{A}'_{\mathbb{C}}$ che la estende; tale estensione è definita dalla posizione $\varphi_{\mathbb{C}}(p, q) = (\varphi(p), \varphi(q))$. Un *referimento reale* di $\mathbb{A}_{\mathbb{C}}$ è una coppia $(O, (\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n))$, ove O è un punto reale di $\mathbb{A}_{\mathbb{C}}$, mentre $(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n)$ è un referimento reale di $\mathbf{V}_{\mathbb{C}}$ (nel senso della Def. 1.1.2). È fondamentale il seguente:

Lemma 1.2.1. *In $\mathbb{A}_{\mathbb{C}}$, sia fissato un referimento reale $(O, (\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n))$.*

- I punti reali sono tutti e soli i punti che hanno coordinate reali.*
- Il coniugato di $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ è $\overline{P}(\overline{x}_1, \overline{x}_2, \dots, \overline{x}_n)$.*

Raccogliamo alcune proprietà dei sottospazi affini di $\mathbb{A}_{\mathbb{C}}$:

Proposizione 1.2.2. *Sia H un sottospazio affine dello spazio affine complessificato $\mathbb{A}_{\mathbb{C}}$. Valgono le seguenti affermazioni:*

- H è reale $\Leftrightarrow H$ contiene almeno un punto reale e la sua giacitura è un sottospazio reale di $\mathbf{V}_{\mathbb{C}}$;*

2) H è reale \Leftrightarrow in un riferimento reale ammette equazioni a coefficienti reali.

DM.

- 1) \Leftarrow) Supponiamo che $H = P + \mathbf{W}$, ove P è un punto reale di $\mathbb{A}_{\mathbb{C}}$, mentre \mathbf{W} è un sottospazio vettoriale reale di $\mathbf{V}_{\mathbb{C}}$. Ma allora

$$\overline{H} = \overline{P + \mathbf{W}} = \overline{P} + \overline{\mathbf{W}} = P + \mathbf{W} = H,$$

come si voleva.

\Rightarrow) Se $H = \overline{H}$, per ogni $P \in H$ si deve avere che anche $\overline{P} \in \overline{H} = H$. Anche il punto medio M del segmento $P\overline{P}$ deve quindi appartenere a H , che è un sottospazio affine. Ma \overline{M} è punto medio dello stesso segmento, e quindi $M = \overline{M}$ è un punto reale di H . Se \mathbf{W} è la giacitura di H , si ha che $H = M + \mathbf{W}$ e $\overline{H} = \overline{M} + \overline{\mathbf{W}} = M + \overline{\mathbf{W}}$; per l'unicità della giacitura, segue che $\mathbf{W} = \overline{\mathbf{W}}$ e il sottospazio \mathbf{W} è reale.

- 2) \Rightarrow) Supponiamo che H ammetta un sistema di equazioni a coefficienti reali $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$. Il sottospazio coniugato \overline{H} ha equazioni $\overline{\mathbf{Ax}} = \overline{\mathbf{b}}$ che coincidono con le equazioni di H , perché i coefficienti sono reali. Dunque $H = \overline{H}$.

\Leftarrow) Poiché H è reale, può essere scritto nella forma $H = P + \mathbf{W}$ con P punto reale e \mathbf{W} sottospazio reale. In un sistema di riferimento reale, il punto P ha coordinate reali $P(p_1, \dots, p_n)$ ($p_i \in \mathbf{R}$) e i vettori $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_m$ di una base reale di \mathbf{W} hanno componenti reali: $\mathbf{v}_i = (v_{i1}, \dots, v_{in})$, con $v_{ij} \in \mathbf{R}$. Un punto $X = (x_1, \dots, x_n)$ appartiene ad H se e solo se $X - P \in \mathbf{W}$; ma questo accade se e solo se il vettore $(x_1 - p_1, \dots, x_n - p_n)$ è linearmente dipendente da $(v_{11}, \dots, v_{1n}), \dots, (v_{m1}, \dots, v_{mn})$, cioè se e solo se

$$rg \begin{pmatrix} x_1 - p_1 & \dots & x_n - p_n \\ v_{11} & \dots & v_{1n} \\ & \dots & \\ v_{n1} & \dots & v_{nn} \end{pmatrix} = n.$$

Per il teorema degli orlati, ciò equivale all'annullarsi degli orlati di un minore non nullo di rango m contenuto nella sottomatrice ottenuta eliminando la prima riga. Ma l'annullarsi di ciascun orlato fornisce una equazione reale soddisfatta dai punti di H . Dunque H ammette un sistema di equazioni a coefficienti reali. \triangle

Esempio 1.2.3. Rette Per definizione, una retta r di $\mathbb{A}_{\mathbb{C}}$ è reale se $r = \bar{r}$. Si osservi che ogni retta reale ha infiniti punti reali, ma contiene, sempre, anche punti immaginari. Se $P \neq \overline{P}$, la retta $\langle P, \overline{P} \rangle$ è una retta reale.

Per cercare una equazione cartesiana a coefficienti reali di una retta reale, si può procedere come segue. Supponiamo $\mathbb{A}_{\mathbb{C}}$ sia un piano e che, in un qualunque riferimento reale, la retta r sia definita dall'equazione $ax + by + c = 0$. La retta \bar{r} è allora definita dall'equazione $\bar{a}x + \bar{b}y + \bar{c} = 0$. La retta r è reale se e solo se la terna (a, b, c) dei coefficienti è proporzionale (con coefficiente di proporzionalità complesso non nullo) ad una terna di numeri reali, cioè:

$$r = \bar{r} \quad \Leftrightarrow \quad rg \begin{pmatrix} a & b & c \\ \bar{a} & \bar{b} & \bar{c} \end{pmatrix} = 1.$$

Ora basta osservare che

$$rg \begin{pmatrix} a & b & c \\ \bar{a} & \bar{b} & \bar{c} \end{pmatrix} = rg \begin{pmatrix} (a + \bar{a}) & (b + \bar{b}) & (c + \bar{c}) \\ (a - \bar{a}) & (b - \bar{b}) & (c - \bar{c}) \end{pmatrix} = rg \begin{pmatrix} Re(a) & Re(b) & Re(c) \\ Im(a) & Im(b) & Im(c) \end{pmatrix}.$$

Se tale rango è 1, significa che la terna (a, b, c) è proporzionale (con coefficiente di proporzionalità un numero complesso non nullo) ad una terna reale e la retta r è reale, cioè $r = \bar{r}$. Altrimenti, se la retta r non è reale, cioè $r \neq \bar{r}$, allora l'intersezione $r \cap \bar{r}$ è vuota o è data da un punto P : nel primo caso le due rette sono parallele, prive di punti reali e la loro direzione è reale; nel secondo caso, il punto P di intersezione è necessariamente reale, ma le direzioni di r e \bar{r} non sono reali.

Se $\dim \mathbb{A} > 2$ e una retta r non è reale, le rette r e \bar{r} sono o complanari o sghembe. Se r e \bar{r} sono complanari, diciamo che la retta r è di *prima specie*; in tal caso, se le due rette sono incidenti, il punto di incidenza è necessariamente un punto reale, e la loro giacitura non è reale; se, invece, r e \bar{r} sono parallele, esse non hanno punti reali, ma la loro giacitura è reale. Nel secondo caso, invece, r e \bar{r} sono sghembe e diciamo che la retta r è di *seconda specie*: esse sono prive di punti reali e le loro giaciture non sono reali. In particolare, una retta non reale è priva di punti reali, oppure ne contiene uno solo.

1.3 Complessificazione di uno spazio euclideo: estensione del prodotto scalare

Si consideri la complessificazione $\mathbb{E}_{\mathbb{C}}$ di uno spazio affine euclideo \mathbb{E} . Ricordiamo che, nello spazio euclideo \mathbb{E} , è definito il prodotto scalare tra vettori liberi. Se \mathbf{v} e \mathbf{w} sono due vettori liberi in \mathcal{V} , denotiamo con $\langle \mathbf{v}, \mathbf{w} \rangle$ il loro prodotto scalare e manteniamo la stessa definizione per il prodotto scalare indotto su $\mathcal{V}_{\mathbb{C}}$, che ne è il complessificato.

Definizione 1.3.1. Due vettori complessi non nulli \mathbf{v} e \mathbf{w} si dicono *ortogonali* se

$$\langle \mathbf{v}, \mathbf{w} \rangle = 0.$$

Se (a_1, a_2, a_3) e (b_1, b_2, b_3) sono le componenti di \mathbf{a} e \mathbf{b} in un riferimento reale ortonormale rispetto al prodotto scalare euclideo, allora

$$\langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle = a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3;$$

in particolare, \mathbf{a} e \mathbf{b} sono ortogonali se e solo se

$$a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3 = 0.$$

Due vettori reali non possono essere contemporaneamente paralleli e ortogonali.

Presi due punti P e $Q \in \mathbb{E}_{\mathbb{C}}$, la *distanza* tra P e Q è per definizione il modulo del vettore \mathbf{PQ} , definito da:

$$|\mathbf{PQ}| = \pm \sqrt{\langle \mathbf{PQ}, \mathbf{PQ} \rangle}$$

ove il simbolo \pm può essere omissso se si interpreta la radice quadrata in senso complesso. Tale posizione è ben posta, ma non coincide con quella usuale nel caso di vettori reali.

Definizione 1.3.2. Se $|\mathbf{PQ}| = 0$, cioè se il vettore \mathbf{PQ} è isotropo, diciamo che i punti P e Q sono a *distanza nulla*, e la retta per P e Q è detta retta isotropa: una retta si dice *isotropa* se è parallela ad un vettore isotropo.

Si verifica facilmente che, in tal caso, ogni coppia di punti della retta ha distanza nulla (cf. esercizio svolto 1.19).

Per le proprietà del prodotto scalare complessificato, esistono sempre una coppia di punti distinti P e $Q \in \mathbb{E}_{\mathbb{C}}$ a distanza nulla.

a) Complessificazione del piano euclideo

Supponiamo che il piano π sia euclideo. E' possibile introdurre in $\pi_{\mathbb{C}}$ un riferimento reale ortonormale $(O, \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)$. Presi due punti $P(p_1, p_2)$ e $Q(q_1, q_2)$, la distanza tra P e Q è per definizione il modulo del vettore \mathbf{PQ} ; se il vettore \mathbf{PQ} è isotropo, i punti P e Q sono a distanza nulla, e la retta per P e Q è detta retta isotropa: una retta si dice *isotropa* se è parallela ad un vettore isotropo; nel piano, una retta isotropa è una qualsiasi retta parallela a $(1, i)$ o $(1, -i)$. Esistono dunque due fasci impropri di rette isotrope: il fascio dato dalle equazioni $-ix_1 + x_2 + c = 0$ e il fascio dato dalle equazioni $ix_1 + x_2 + c = 0$. In particolare, per ogni punto reale P passano due rette isotrope; esse costituiscono il luogo dei punti a distanza nulla da P , cioè la circonferenza di centro P e raggio 0. Se $P(p_1, p_2)$ è un punto, le rette isotrope per P hanno equazione $(x_1 - p) + i(x_2 - p) = 0$ e $(x_1 - p) - i(x_2 - p) = 0$ rispettivamente. La circonferenza di centro P e raggio 0 è data dalla loro unione $(x_1 - p)^2 + (x_2 - p)^2 = 0$.

b) Complessificazione dello spazio euclideo 3-dimensionale

Sia fissato un sistema monometrico ortonormale reale. Una retta i cui numeri direttori sono (λ, μ, ν) è isotropa se e solo se $\lambda^2 + \mu^2 + \nu^2 = 0$. L'insieme dei vettori che soddisfano l'equazione $\lambda^2 + \mu^2 + \nu^2 = 0$ è detto *cono isotropo*. Un piano π di equazione $ax + by + cz + d = 0$ contiene una retta isotropa se e solo se esistono (λ, μ, ν) tali che:

$$\begin{cases} a\lambda + b\mu + c\nu = 0 \\ \lambda^2 + \mu^2 + \nu^2 = 0 \end{cases}$$

In un opportuno riferimento, è possibile supporre che $a \neq 0$ e ricavare che $\lambda = -\frac{b\mu + \nu c}{a}$. Sostituendo tale relazione nell'equazione del cono isotropo si ottiene che:

$$\begin{aligned} \left(\frac{b\mu + \nu c}{a}\right)^2 + \mu^2 + \nu^2 &= 0 \\ b^2 \mu^2 + c^2 \nu^2 + 2bc\mu\nu + a^2 \mu^2 + a^2 \nu^2 &= 0 \\ (a^2 + b^2) \mu^2 + 2bc\mu\nu + (a^2 + c^2) \nu^2 &= 0 \end{aligned}$$

Il discriminante dell'equazione di secondo grado così ottenuta è:

$$\Delta = b^2 c^2 - (a^2 + b^2)(a^2 + c^2) = a^2 (a^2 + b^2 + c^2);$$

in particolare, si hanno due soluzioni distinte se $a^2 + b^2 + c^2 \neq 0$, mentre si ha una unica soluzione altrimenti. Un piano di equazione $ax_1 + bx_2 + cx_3 + d = 0$ tale che $a^2 + b^2 + c^2 = 0$ si dice *piano isotropo* e contiene un solo fascio di rette isotrope (che sono tutte parallele al vettore di componenti (a, b, c)).

- Osservazione 1.3.3.* a) Ogni piano reale contiene due fasci di rette isotrope.
 b) Per una retta isotropa passa un unico piano isotropo. (si dimostra in modo analogo)
 c) Più in generale: se \mathbf{v} è un vettore isotropo non nullo in $\mathcal{V}_{\mathbb{C}}$, ogni vettore isotropo e ortogonale a \mathbf{v} è necessariamente un multiplo di \mathbf{v} .

Esempio 1.3.4. Sia fissato un riferimento ortonormale reale in $\mathbb{E}_{\mathbb{C}}$.

- 1) Verificare che la retta $r = \begin{cases} 4x_1 - 3x_2 + 3 = 0 \\ x_1 + 3x_2 - 3ix_3 + 3 = 0 \end{cases}$ è isotropa e determinare l'unico piano isotropo che contiene r .

Calcolando il prodotto vettoriale dei vettori ortogonali ai due piani, osserviamo che un vettore parallelo alla retta r è $\mathbf{v} = (3i, 4i, 5)$. La retta r è isotropa perchè $-9 - 16 + 25 = 0$. Il piano isotropo che contiene r , avrà equazione $ax_1 + bx_2 + cx_3 + d = 0$, con (a, b, c) isotropo, non nullo e ortogonale a \mathbf{v} . Per l'osservazione precedente, posso supporre $(a, b, c) = (3i, 4i, 5)$. Ora è sufficiente determinare d tale che il piano contenga r , imponendo ad esempio il passaggio del piano per un punto P di r . In particolare, è possibile scegliere $P(3/4, 0, -i3/4)$ e ricavare l'equazione $3ix_1 + 4ix_2 + 5x_3 - i3/2 = 0$.

- 2) Trovare le rette isotrope nel piano $3x_1 + 2x_2 + x_3 = 0$ passanti per l'origine. I coefficienti direttori (λ, μ, ν) delle rette cercate r soddisfano il sistema

$$\begin{cases} 3\lambda + 2\mu + \nu = 0 \\ \lambda^2 + \mu^2 + \nu^2 = 0 \end{cases}.$$

Il sistema è equivalente al sistema:

$$\begin{cases} \nu = -(3\lambda + 2\mu) \\ \lambda^2 + \mu^2 + (3\lambda + 2\mu)^2 = 10\lambda^2 + 6\lambda\mu + 5\mu^2 = 0 \end{cases}.$$

È possibile assumere $\mu \neq 0$, perchè siamo interessati a soluzioni non nulle del sistema; in particolare, si può richiedere che $\mu = 1$, perchè i coefficienti direttori sono individuati a meno di proporzionalità per una costante non nulla. Occorre dunque risolvere il sistema

$$\begin{cases} \mu = 1 \\ \nu = -(3\lambda + 2) \\ 10\lambda^2 + 6\lambda + 5 = 0 \end{cases},$$

che ammette per soluzioni indipendenti i vettori $\mathbf{u}_1 = \left(\frac{-3+i\sqrt{41}}{10}, 1, \frac{29-i3\sqrt{41}}{10}\right)$ e $\mathbf{u}_2 = \left(\frac{-3-i\sqrt{41}}{10}, 1, \frac{29+i3\sqrt{41}}{10}\right)$. Poiché il piano $3x_1 + 2x_2 + x_3 = 0$ contiene l'origine, le rette isotrope in esso contenute e passanti per l'origine sono le rette di equazioni parametriche vettoriali: $\mathbf{x} = t\mathbf{u}_1$ e $\mathbf{x} = t\mathbf{u}_2$, rispettivamente.

Esercizi svolti

Si consideri lo spazio affine tridimensionale complessificato, nel quale sia fissato un riferimento reale.

Problema 1.1. *Determina le componenti del vettore libero \mathbf{v} individuato dalla coppia ordinata (A, B) , ove $A(3 + i, 2, i - 1)$ e $B(1 + i, 3, 6i)$. Determina parte reale e parte immaginaria di \mathbf{v} . Determina, inoltre, le componenti del vettore coniugato $\bar{\mathbf{v}}$.*

Soluzione. Come indicato nel paragrafo 1.5, il vettore complesso $\mathbf{v} = \mathbf{AB}$ ha componenti $(1 + i - (3 + i), 3 - 2, 6i - (i - 1)) = (-2, 1, 1 + 5i)$ e il coniugato $\bar{\mathbf{v}}$ ha componenti $(-2, 1, 1 - 5i)$. La parte reale $Re \mathbf{v}$ ha componenti $(-2, 1, 1)$, mentre la parte immaginaria $Im \mathbf{v}$ ha componenti $(0, 0, 5)$.

Problema 1.2. *Considera l'inclusione naturale ι dell'insieme \mathcal{V} dei vettori liberi dello spazio euclideo nell'insieme $\mathcal{V}_{\mathbb{C}}$ dei vettori liberi dello spazio complesso. La coppia ordinata (A, D) , ove $A(2 + 3i, 7 + 4i, 2 - i)$ e $D(7 + 3i, 6 + 4i, 4 - i)$, rappresenta un vettore appartenente all'immagine di ι ?*

Soluzione. \mathbf{AD} ha componenti $(7 + 3i - (2 + 3i), 6 + 4i - (7 + 4i), 4 - i - (2 - i)) = (5, -1, 2)$; poichè tali componenti sono reali, \mathbf{AD} appartiene all'immagine di ι : ad esempio, è l'immagine del vettore libero ordinario di estremi O e $P(5, -1, 2)$.

Problema 1.3. *Controlla se sono allineati i punti $A(3 + i, 2, i - 1)$, $B(1 + i, 3, 6i)$, $C(14i - 1, 26 - 12i, 25i - 8)$.*

Soluzione. I tre punti sono allineati se e solo se i vettori \mathbf{AB} e \mathbf{AC} sono paralleli. Il vettore \mathbf{AB} ha componenti $(-2, 1, 7)$, mentre il vettore \mathbf{AC} ha componenti $(-2 + 13i, 24 - 12i, -8 + 19i)$. Osserviamo che i due vettori non sono paralleli, perchè le componenti non sono proporzionali (con fattore di proporzionalità in \mathbb{C}); infatti, se fosse $\lambda \mathbf{AB} = \mathbf{AC}$ con $\lambda \in \mathbb{C}$, uguagliando le prime componenti si avrebbe $\lambda = (-2 + 13i)/2$, mentre, uguagliando le seconde componenti, $\lambda = 24 - 12i$. Poiché tali richieste sono incompatibili, concludiamo che i tre punti non sono allineati.

Problema 1.4. *Determina equazioni cartesiane e parametriche per la retta passante per $A(3 - i, 2 + i, i)$ e $B(1 + i, 3i, 6)$.*

Soluzione. I due punti sono distinti, e quindi individuano una unica retta. Come in (1.13), poichè il vettore \mathbf{AB} ha componenti $(-2 + 2i, -2 + 2i, 6 - i)$, equazioni parametriche per la retta sono date da $x_1 = 3 - i + t(-2 + 2i)$, $x_2 = 2 + i + t(-2 + 2i)$, $x_3 = i + t(6 - i)$, al variare di $t \in \mathbb{C}$. Equazioni cartesiane si trovano o eliminando il parametro t dalle equazioni parametriche, o procedendo come nell'Osservazione 1.7.8 e imponendo che $\frac{x_1 - (3 - i)}{-2 + 2i} = \frac{x_2 - (2 + i)}{-2 + 2i}$, $\frac{x_1 - (3 - i)}{-2 + 2i} = \frac{x_3 - i}{6 - i}$.

Problema 1.5. *a) I punti $A(1, 2, 3)$, $B(4 + i, 7 - i, 3 + i)$, $C(5 + i, 7 - 2i, 3 + i)$ e $D(3, 2 - 2i, 3)$ sono complanari?*

b) Determina una equazione cartesiana ed equazioni parametriche per un piano α passante per A, B, D . Tale piano è unico?

Soluzione. a) I quattro punti sono complanari se e solo se i vettori \mathbf{AB} , \mathbf{AC} e \mathbf{CD} sono linearmente dipendenti. Il vettore \mathbf{AB} ha componenti $(3+i, 5-i, i)$, il vettore \mathbf{AC} ha componenti $(4+i, 5-2i, i)$, mentre il vettore \mathbf{AD} ha componenti $(2, -2i, 0)$.

Osserviamo che, poiché $\text{rg} \begin{pmatrix} 3+i & 5-i & i \\ 4+i & 5-2i & i \\ 2 & -2i & 0 \end{pmatrix} = 3$, i tre vettori sono linearmente indipendenti, e i 4 punti non sono complanari.

b) Per quanto osservato, i vettori \mathbf{AB} e \mathbf{AD} sono linearmente indipendenti, e quindi il piano cercato è unico e coincide con il piano di equazione parametrica vettoriale $\mathbf{x} = \lambda \mathbf{AB} + \mu \mathbf{AD}$. Dunque, le equazioni parametriche sono: $x_1 = \lambda(3+i) + 2\mu$, $x_2 = \lambda(5-i) - 2i\mu$, $x_3 = i\lambda$; una equazione cartesiana è data da $x_2 = -ix_1 + x_3(-4i+2)$.

Problema 1.6. Nel piano complesso, sia assegnato un riferimento \mathcal{R} . Sia r la retta passante per $A(1, 3i)$ e $B(i, 2-i)$.

- Determina una equazione cartesiana di r .
- Discuti se la retta r è reale e determinare $r \cap \bar{r}$.
- Determina l'equazione cartesiana della retta s passante per $S(-1, 1)$ e parallela al vettore $\mathbf{w} = (1+i, -i)$.
- Discuti se l'intersezione tra r e s è reale.

Soluzione. a) La retta r è parallela al vettore \mathbf{AB} , di componenti $(i, 2-i) - (1, 3i) = (i-1, 4i-2)$ e quindi ha una equazione cartesiana della forma $(4i-2)x_1 - (i-1)x_2 + c = 0$ (per un opportuno $c \in \mathbb{C}$). Il valore di c può essere individuato imponendo il passaggio per il punto A , cioè sostituendo nell'equazione le coordinate di A e imponendo l'annullamento: $(4i-2) - (i-1)3i + c = 0$ da cui $c = -1 - 7i$. L'equazione $(4i-2)x_1 - (i-1)x_2 - 1 - 7i = 0$ è dunque una equazione cartesiana per la retta r . b) Per il punto a), la retta r ha equazione cartesiana $(4i-2)x_1 - (i-1)x_2 - 1 - 7i = 0$, e dunque la retta coniugata \bar{r} ha equazione $(-4i-2)x_1 - (-i-1)x_2 - 1 + 7i = 0$. Poiché

$$\text{rg} \begin{pmatrix} i-1 & 4i-2 & -1-7i \\ -i-1 & -4i-2 & -1+7i \end{pmatrix} = \text{rg} \begin{pmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 1 & 4 & -7 \end{pmatrix} = 2, \quad (1.3)$$

la retta r non coincide con la coniugata \bar{r} e quindi non è reale. Poiché le prime due colonne della matrice a destra in 1.3 sono proporzionali, le rette r e \bar{r} sono parallele. Poiché r e \bar{r} non coincidono, non possono avere punti in comune, e quindi $r \cap \bar{r} = \emptyset$.

c) La retta s , essendo parallela al vettore $\mathbf{w} = (1+i, -i)$, ammette una equazione cartesiana della forma $ix_1 + (1+i)x_2 + c = 0$ per un opportuno $c \in \mathbb{C}$. Imponendo il passaggio per S , si ricava che una equazione cartesiana per s è data da $ix_1 + (1+i)x_2 + 1 = 0$.

d) La retta r è parallela e disgiunta dalla retta coniugata \bar{r} e dunque non è reale e non contiene punti reali. L'intersezione tra r e s non è quindi reale.

Problema 1.7. Nel piano complessificato, considera un punto immaginario $A(x_0, y_0)$.

- Mostra che esiste una e una sola retta reale passante per A .
- Determina una equazione cartesiana reale della retta reale r per $B(1-i, -3+i)$. Determina, inoltre, l'equazione del fascio di rette parallele ad r .

Soluzione. a) 1.6.3 Ogni retta reale che contiene A deve contenere anche il punto coniugato $\bar{A}((1+i, -3-i))$. Poiché A e \bar{A} sono due punti distinti, la retta per A

$$\text{b) } \lambda[x_1 - (1-i)] + \mu[x_2 - (-3+i)] = 0.$$

Problema 1.8. Determina le equazioni parametriche del piano α passante per il punto $P(p_1, p_2, p_3)$ e la cui giacitura sia generata da $\mathbf{a} = (a_1, a_2, a_3)$ e $\mathbf{b} = (b_1, b_2, b_3)$. Ad esempio, fissare $P(3i, 2, 0)$, $\mathbf{a} = (1, 1 + i, 2)$ e $\mathbf{b} = (0, 1, 4i)$.

Soluzione. Un punto $Q(x, y, z)$ appartiene al piano π se e solo se risulta $\overline{OP} = \lambda\mathbf{a} + \mu\mathbf{b}$, cioè se e solo se

$$\begin{pmatrix} x_1 - p_1 \\ x_2 - p_2 \\ x_3 - p_3 \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} + \mu \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} \quad \text{cioè} \quad \begin{cases} x_1 = p_1 + \lambda a_1 + \mu b_1 \\ x_2 = p_2 + \lambda a_2 + \mu b_2 \\ x_3 = p_3 + \lambda a_3 + \mu b_3 \end{cases} \quad \lambda, \mu \in \mathbf{C}.$$

Nell'esempio numerico, si trova il piano:

$$\begin{cases} x_1 = 3i + \lambda \\ x_2 = 2 + (1 + i)\lambda + \mu \\ x_3 = 2\lambda + 4i\mu \end{cases}$$

PUNTI E SOTTOSPAZI REALI

Problema 1.9. Punto medio Nello spazio complesso, sia assegnato un riferimento \mathcal{R} . Il punto medio del segmento avente per estremi due punti X e Y è il punto M tale che $\mathbf{XM} + \mathbf{YM} = \mathbf{0}$.

- Note le coordinate $X(x_1, x_2, x_3)$ e $Y(y_1, y_2, y_3)$ dei due punti nel riferimento \mathcal{R} , determina le coordinate del punto medio $M(m_1, m_2, m_3)$. In particolare, mostrare che il punto medio esiste sempre, ed è univocamente individuato.
- Mostra che il punto medio dei punti coniugati $\overline{X}, \overline{Y}$ è il punto \overline{M} . In particolare il punto medio di due punti reali è anche esso reale. Inoltre il punto medio di due punti tra loro coniugati X e $Y = \overline{X}$ è sempre reale.
- Mostra che il punto medio M di due punti X e Y è reale se e solo se $\mathbf{X}\overline{\mathbf{X}} + \mathbf{Y}\overline{\mathbf{Y}} = \mathbf{0}$.
- Determina il punto medio di $X(1, i + 1, 2i)$ e $Y(i - 1, 1, 3)$.

Soluzione. a) Le coordinate di M devono soddisfare la condizione:

$$\begin{aligned} \mathbf{XM} + \mathbf{YM} &= (m_1 - x_1, m_2 - x_2, m_3 - x_3) + (m_1 - y_1, m_2 - y_2, m_3 - y_3) \\ &= (2m_1 - x_1 - y_1, 2m_2 - x_2 - y_2, 2m_3 - x_3 - y_3) = (0, 0, 0) \end{aligned}$$

e sono dunque date da

$$\begin{cases} m_1 = \frac{x_1 + y_1}{2} \\ m_2 = \frac{x_2 + y_2}{2} \\ m_3 = \frac{x_3 + y_3}{2} \end{cases} \quad (1.4)$$

b) Segue immediatamente dalle equazioni (1.4). In particolare, il punto medio M del segmento $X\overline{X}$ ha coordinate

$$M(\operatorname{Re}(x_1), \operatorname{Re}(x_2), \operatorname{Re}(x_3)).$$

c) Per definizione di punto medio si ha che: $\mathbf{XM} + \mathbf{YM} = \mathbf{0}$. Se il punto medio M di X e Y è reale, si ha che, contemporaneamente, $\overline{\mathbf{X}}\mathbf{M} + \overline{\mathbf{Y}}\mathbf{M} = \mathbf{0}$. Sottraendo la seconda equazione dalla prima, si ricava che

$$\mathbf{XM} - \overline{\mathbf{X}}\mathbf{M} + \mathbf{YM} - \overline{\mathbf{Y}}\mathbf{M} = \mathbf{0}$$

cioè

$$\mathbf{XM} + \mathbf{M}\bar{\mathbf{X}} + \mathbf{YM} + \mathbf{M}\bar{\mathbf{Y}} = \mathbf{0}$$

e dunque $\mathbf{X}\bar{\mathbf{X}} + \mathbf{Y}\bar{\mathbf{Y}} = \mathbf{0}$ come si voleva.

Viceversa, supponiamo che $\mathbf{X}\bar{\mathbf{X}} + \mathbf{Y}\bar{\mathbf{Y}} = \mathbf{0}$. Per definizione, il punto medio M di X e Y è l'unico punto tale che $\mathbf{XM} + \mathbf{YM} = \mathbf{0}$. Per dedurre che M risulta reale sotto le ipotesi assunte, verifichiamo che anche \bar{M} verifica la stessa equazione. Infatti

$$\begin{aligned} \mathbf{X}\bar{\mathbf{M}} + \mathbf{Y}\bar{\mathbf{M}} &= \mathbf{X}\bar{\mathbf{X}} + \mathbf{X}\bar{\mathbf{M}} + \mathbf{Y}\bar{\mathbf{Y}} + \mathbf{Y}\bar{\mathbf{M}} \\ &= \mathbf{X}\bar{\mathbf{M}} + \mathbf{Y}\bar{\mathbf{M}} = \mathbf{0} \end{aligned}$$

perché \bar{M} è sicuramente il punto medio di \bar{X} e \bar{Y} . Dunque M è reale.

d) Risulta $M(\frac{i}{2}, \frac{i}{2} + 1, \frac{3+2i}{2})$.

Problema 1.10. *Determina l'unica retta reale passante per il punto $P(2, i, i + 1)$.*

Soluzione. Si procede come nell'Esempio 1.7.13, 1). Considero il punto coniugato $\bar{P}(2, -i, -i + 1)$: la retta cercata r è la retta congiungente P e \bar{P} . Considero il punto medio $M(2, 0, 1)$ del segmento $P\bar{P}$. Ora calcolo i numeri direttori: $(2 - 2, i - (-i), (i + 1) - (-i + 1)) = (0, 2i, 2i)$; la retta cercata r è la retta per M di direzione $(0, 2, 2)$ ed ha equazioni parametriche: $x_1 = 2, x_2 = t, x_3 = 1 + t$ ed equazioni cartesiane $x_1 = 2, x_3 = 1 + x_2$.

Problema 1.11. *Sia π il piano definito da $(1 + 3i)x + (2 - i)y - (5 - 7i)z - 2 = 0$. Verifica se π è reale. In caso contrario, determina l'intersezione tra π e il piano coniugato $\bar{\pi}$; se tale intersezione è una retta reale, determinane equazioni reali.*

Soluzione. Si procede come nell'esempio 1.7.13, 4). Il piano π è reale se e solo se coincide con il proprio coniugato $\bar{\pi}$, cioè se e solo se l'equazione di π è proporzionale all'equazione $(1 - 3i)x + (2 + i)y - (5 + 7i)z - 2 = 0$ di $\bar{\pi}$. Per l'Osservazione 1.7.4, poiché

$$rg \begin{pmatrix} (1 + 3i) & (2 - i) & -(5 - 7i) & -2 \\ (1 - 3i) & (2 + i) & -(5 + 7i) & -2 \end{pmatrix} = rg \begin{pmatrix} 1 & 2 & -5 & -2 \\ 3 & -1 & 7 & 0 \end{pmatrix} = 2,$$

il piano π non è reale. Poiché anche $rg \begin{pmatrix} 1 & 2 & -5 \\ 3 & -1 & 7 \end{pmatrix} = 2$ per l'Osservazione 1.7.6 l'intersezione tra π e $\bar{\pi}$ è una retta, necessariamente reale. Per determinare equazioni reali, è sufficiente considerare le equazioni reali ottenute dall'equazione cartesiana di π , prendendone la semisomma e il prodotto di i per la semidifferenza; separando la parte reale e la parte immaginaria dei coefficienti dell'equazione di π , si ottengono le seguenti equazioni per r : $x + 2y - 5z - 2 = 0, 3x - y + 7z = 0$.

Problema 1.12. *Dimostra che la retta r , di equazioni $\frac{x_1 - 1 - 2i}{2} = x_2 - i = \frac{x_3 - 2 - 2i}{2}$, è reale.*

Soluzione. La retta r passa per il punto immaginario $P(1 + 2i, i, 2 + 2i)$. Poiché il vettore $P\bar{P}$ è parallelo al vettore direttore $\mathbf{v} = (2, 1, 2)$ di r , anche il punto coniugato \bar{P} appartiene ad r , che dunque è una retta reale per la Proposizione 1.7.12.

Problema 1.13. *Considera la retta di equazioni $(2 + i)x_1 - x_2 - ix_3 - 2 - i = 0, (1 + i)x_1 - ix_2 - (1 - i)x_3 + 1 - 3i = 0$. Dimostra che la retta r è reale.*

Soluzione. Cerco un punto di r intersecandola con il piano $x_1 = 0$; in questo modo determino il punto $P(0, -2, 1)$ che risulta essere un punto reale sulla retta r . Ora cerco un altro punto Q su r intersecandola con il piano $x_2 = 0$: ricavo in tal modo un altro punto reale $Q(1, 0, 2)$. Concludo che la retta r è sicuramente reale, perché contiene due punti reali tra loro distinti.

Problema 1.14. *Mostra che una retta immaginaria r nello spazio contiene al più un punto reale.*

Soluzione. Se r è di prima specie, allora r è complanare con la sua coniugata: se, in tal caso, le due rette sono incidenti, la loro intersezione è un punto reale. Se r è di seconda specie, allora r e \bar{r} sono sghembe e r è priva di punti reali.

Problema 1.15. *Nel piano, determina i punti reali della retta r di equazione $r : (1+i)x_1 + ix_2 + 2 - i = 0$.*

Soluzione. La coniugata di r ha equazione $\bar{r} : (1-i)x_1 - ix_2 + 2 + i = 0$. Se le due rette coniugate sono parallele, non possono avere punti reali. Se invece risultano parallele, hanno in comune il loro unico punto reale. Poiché

$$rg \begin{pmatrix} (1+i) & i \\ (1-i) & i \end{pmatrix} = rg \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} = 2$$

le due rette non sono parallele ed esiste un unico punto reale P in esse. Le equazioni reali del punto P si ottengono separando le parti reale e immaginaria nella equazione di r : si ricava che $P(-2, 3)$.

RETTE DI PRIMA E SECONDA SPECIE

Problema 1.16. *Dimostra che la retta r di equazioni*

$$r : \begin{cases} (1+i)x_1 + (1+2i)x_2 + (1-i)x_3 + 2i = 0 \\ (1+2i)x_1 + 2(1+i)x_2 - (1-2i)x_3 - 1 = 0 \end{cases}$$

è di prima specie e determina una equazione reale di un piano reale α che contiene la retta r e la sua coniugata \bar{r} .

Soluzione. Come nell'Esempio 1.7.13, occorre controllare che sia nullo il determinante della matrice

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & -1 & 2 \\ 1 & 2 & -1 & -1 \\ 2 & 2 & 2 & 0 \end{pmatrix}$$

ottenuta separando parte reale e parte immaginaria dei coefficienti delle equazioni dei due piani.

Problema 1.17. *Mostra che la retta r di equazioni*

$$r : \begin{cases} x_1 - x_2 + ix_3 + 1 = 0 \\ 2ix_1 - x_2 + x_3 - i = 0 \end{cases}$$

è di seconda specie e determina equazioni cartesiane dell'unica retta s passante per l'origine $O(0, 0, 0)$ e incidente sia r che \bar{r} .

Soluzione. Come nell'Esempio 1.7.13, occorre controllare che sia non nullo il determinante della matrice

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

ottenuta separando parte reale e parte immaginaria dei coefficienti delle equazioni dei due piani.

RETTE ISOTROPE NEL PIANO

Si consideri fissato un riferimento reale ortonormale nel piano euclideo complessificato.

Problema 1.18. Considera il punto $P(3+i, 4-i)$.

- Determina equazioni parametriche e equazioni cartesiane per la retta reale r passante per il punto $P(3+i, 4-i)$.
- Determina equazioni parametriche per ciascuna delle rette isotrope passanti per il punto $P(3+i, 4-i)$. Tali rette sono tra loro coniugate?
- Determina l'intersezione tra la retta per l'origine parallela ad r e le rette isotrope per P . Calcola la distanza di P da ciascuno di tali punti di intersezione.

Soluzione. a) Poichè il punto P è immaginario, il suo coniugato \bar{P} è distinto da P . Ogni retta reale per P (se esiste) deve contenere anche \bar{P} , e dunque deve coincidere con l'unica retta per P e \bar{P} . Poichè tale retta è effettivamente reale (avendo vettore direttore $\mathbf{P}\bar{\mathbf{P}}$ proporzionale ad un vettore reale e passando per il punto medio di P e \bar{P} , che è reale), la retta $\mathbf{x} = P + t\mathbf{P}\bar{\mathbf{P}}$ è la retta cercata. Se ne ricavano le equazioni parametriche $x_1 = 3 + i - t, x_2 = 4 - i + t$, al variare del numero complesso t , e l'equazione cartesiana $x_1 + x_2 + 7 = 0$.

b) Una retta è isotropa se e solo se un suo vettore direttore è isotropo. Nel piano, i vettori isotropi sono tutti e soli i multipli non nulli di (i, i) e di $(1, -i)$. Poiché tali vettori sono linearmente indipendenti, ci sono esattamente due rette isotrope per P , di equazioni parametriche, rispettivamente:

$$r_1 : \begin{cases} x_1 = 3 + i + t \\ x_2 = 4 - i + it \end{cases} \quad t \in \mathbb{C} \quad r_2 : \begin{cases} x_1 = 3 + i + s \\ x_2 = 4 - i - is \end{cases} \quad s \in \mathbb{C}$$

Le giaciture delle due rette sono tra loro coniugate: ma r_1 non contiene \bar{P} , e le rette non possono essere coniugate.

c) La retta per l'origine e parallela alla retta reale r passante per P è la retta di equazione cartesiana $x_1 + x_2 = 0$. Intersecando con r_1 si trova l'equazione $3 + i + t + 4 - i + it = 0$: l'intersezione è il punto $A()$.

RETTE E PIANI ISOTROPI NELLO SPAZIO

Si consideri fissato un riferimento reale ortonormale nello spazio complesso.

Problema 1.19. Mostra che una retta è isotropa se e solo se due qualsiasi suoi punti hanno distanza tra loro nulla.

Soluzione. Siano P, Q due punti della retta isotropa r che si sta considerando. Per definizione di isotropia, la retta r è parallela ad un vettore isotropo \mathbf{v} . Per concludere, basta osservare che necessariamente $\mathbf{PQ} = \lambda\mathbf{v}$ (per un opportuno $\lambda \in \mathbb{C}$) e dunque anche \mathbf{PQ} è isotropo.

Problema 1.20. *Mostra che ogni piano isotropo contiene esattamente una retta reale.*

Soluzione. Sia $ax_1 + bx_2 + cx_3 + d = 0$ una equazione cartesiana di un piano isotropo π . Ogni retta reale contenuta in π deve anche essere contenuta nel piano coniugato $\bar{\pi}$ di π , e dunque nell'intersezione $\pi \cap \bar{\pi}$. Poiché π non è reale, tale intersezione sicuramente non coincide con π . Basta dimostrare che $\pi \cap \bar{\pi}$ è non vuota, perché in tal caso è sicuramente una retta. Per la teoria dei sistemi lineari, basta dimostrare che

$$\operatorname{rg} \begin{pmatrix} a & b & c \\ \bar{a} & \bar{b} & \bar{c} \end{pmatrix} = \operatorname{rg} \begin{pmatrix} \operatorname{Re}(a) & \operatorname{Re}(b) & \operatorname{Re}(c) \\ \operatorname{Im}(a) & \operatorname{Im}(b) & \operatorname{Im}(c) \end{pmatrix} = 2.$$

Se ciò non fosse, esisterebbe numero reale λ tale che

$$(\operatorname{Re}(a), \operatorname{Re}(b), \operatorname{Re}(c)) = \lambda (\operatorname{Im}(a), \operatorname{Im}(b), \operatorname{Im}(c))$$

e $a^2 + b^2 + c^2 = [(\operatorname{Re}(a))^2 + (\operatorname{Re}(b))^2 + (\operatorname{Re}(c))^2] (1 + i\lambda)^2$ non potrebbe annullarsi, contraddicendo l'ipotesi che π sia isotropo.

Problema 1.21. *Si consideri la complessificazione dello spazio affine euclideo e , in esso, sia fissato un sistema di riferimento reale.*

- a) *Determina una retta reale passante per $P(2i, 3 + i, i)$.*
 b) *Decidi se è reale la retta r di equazioni:*

$$\begin{cases} 2x_1 - (i-1)x_2 + 1 = 0 \\ (-1+i)x_1 + 2ix_2 - (i+1)x_3 - i = 0 \end{cases}$$

- c) *La retta r definita al punto precedente è complanare con la sua coniugata?*

- d) *Determina le rette isotrope passanti per $Q(1, 1, 1)$ e contenute nel piano $x_1 + x_2 + x_3 = 3$.*

Soluzione. a) Poiché il punto $P(2i, 3 + i, i)$ non è reale, esiste una unica retta reale s passante per esso, cioè la retta congiungente P con il suo coniugato $\bar{P}(-2i, 3 - i, -i)$. In particolare s passa per il punto medio $M(0, 3, 0)$ di P e \bar{P} , ed è parallela al vettore $\overrightarrow{P\bar{P}}(-4i, -2i, -2i)$ e dunque al vettore reale $(2, 1, 1)$. La retta s ha dunque equazioni parametriche:

$$\begin{cases} x_1 = 2t \\ x_2 = 3 + t \\ x_3 = t \end{cases}$$

- b) La retta r è reale se e solo coincide con la sua coniugata \bar{r} , cioè se e solo se il fascio di piani che definisce r coincide col fascio di piani che definisce \bar{r} , cioè se e solo se

$$\operatorname{rg} \begin{pmatrix} 2 & -(i-1) & 0 & 1 \\ (-1+i) & 2i & -(i+1) & -i \\ 2 & i+1 & 0 & 1 \\ (-1-i) & -2i & i-1 & i \end{pmatrix} = 2.$$

Conviene separare parte reale e parte immaginaria e controllare

$$\operatorname{rg} \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & 1 & 1 \end{pmatrix}; \quad (1.5)$$

poichè tale matrice ha almeno rango 3 (le prime 3 righe sono indipendenti), segue immediatamente che r non è reale.

c) Si riprendono i conti svolti nel punto precedente. Poiché il rango della matrice in (9.22) è 4, le due rette non sono complanari.

d) Le rette isotrope cercate hanno coefficienti direttori (λ, μ, ν) tali che :

$$\begin{cases} \lambda^2 + \mu^2 + \nu^2 = 0 \\ \lambda + \mu + \nu = 0 \end{cases} ;$$

Risolviendo il sistema, si trova:

$$\begin{cases} (\mu + \nu)^2 + \mu^2 + \nu^2 = 2\mu^2 + 2\nu^2 + 2\mu\nu = 0 \\ \lambda = -\mu - \nu \end{cases} ;$$

Le soluzioni cercate hanno $\mu \neq 0$ (perché altrimenti la soluzione sarebbe nulla). Poichè il coefficiente direttore è individuato solo a meno di una costante non nulla, posso imporre $\mu = 1$. Il sistema diventa

$$\begin{cases} 1 + \nu^2 + \nu = 0 \\ \lambda = -1 - \nu \end{cases} ;$$

esso ammette due soluzioni $(\frac{-1-i\sqrt{3}}{2}, 1, \frac{-1+i\sqrt{3}}{2})$ e $(\frac{-1+i\sqrt{3}}{2}, 1, \frac{-1-i\sqrt{3}}{2})$. Le rette cercate hanno equazioni parametriche:

$$\begin{cases} x_1 = 1 + t \frac{-1-i\sqrt{3}}{2} \\ x_2 = 1 + t \\ x_3 = 1 + t \frac{-1+i\sqrt{3}}{2} \end{cases} \text{ e } \begin{cases} x_1 = 1 + t \frac{-1+i\sqrt{3}}{2} \\ x_2 = 1 + t \\ x_3 = 1 + t \frac{-1-i\sqrt{3}}{2} \end{cases} .$$

Problema 1.22. Si consideri lo spazio complesso con un riferimento ortonormale fissato. Sia fissata la retta r di equazioni $(2i-1)x_1 + x_2 - ix_3 - 6i + 3 = 0$, $x_1 - x_2 + i - 3 = 0$. Si consideri inoltre la retta s che passa per i punti $P(1, 1, 1)$ e $Q(0, 0, 0)$.

a) Dopo aver controllato se la retta r è reale, verifica se esiste un piano α che contiene sia r che la retta coniugata \bar{r} e, in caso positivo, determinane l'equazione cartesiana.

b) Determina, se esistono, i piani isotropi passanti per s .

Soluzione. a) Per controllare se la retta r è reale e contemporaneamente se la retta r e la sua coniugata sono complanari, controllo il rango delle matrici completa e incompleta del sistema lineare dato dalle equazioni di r e dalle loro coniugate. Equivalentemente, studio il sistema dato dalla parte reale e immaginaria delle due equazioni di r :

$$\begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & 3 \\ 2 & 0 & -1 & -3 \\ 1 & -1 & 0 & -3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

La prima e la terza riga della matrice completa sono proporzionali. Si deduce facilmente che la matrice dei coefficienti ha rango due, mentre la matrice completa ha rango 3: le rette r e \bar{r} sono dunque parallele e distinte, e r è di seconda specie. L'equazione cartesiana di un piano α che contiene r e \bar{r} si ottiene imponendo il passaggio per un punto P di \bar{r} al piano generico del fascio di asse r :

$$\begin{aligned} & \lambda[(2i-1)x_1 + x_2 - ix_3 - 6i + 3] + \mu[x_1 - x_2 + i - 3] = \\ & = [\lambda(2i-1) + \mu]x_1 + [\lambda - \mu]x_2 - \lambda ix_3 + [\mu - \lambda 6]i + 3[\lambda - \mu] = 0. \end{aligned}$$

Imponendo il passaggio per il punto $P(0, -i - 3, -5) (\in \bar{r})$, si ricava la relazione:

$$\begin{aligned} & [\lambda - \mu](-i - 3) + \lambda i 5 + [\mu - \lambda 6]i + 3[\lambda - \mu] = \\ & = (-i - 3 + 5i - 6i + 3)\lambda + (i + 3 + i - 3)\mu = -2i\lambda + 2i\mu = 0. \end{aligned}$$

Imponendo $\lambda = 1 = \mu$ nell'equazione del piano generico per s , si trova l'equazione cartesiana di α :

$$2ix_1 - ix_3 - 5i = 0.$$

b) La retta s è reale. Sappiamo dunque, a priori, che ci sono due piani isotropi che passano per essa. Considerare l'equazione del piano generico passante per s : $\mu x_1 + (-\mu - 1)x_2 + zx_3 = 0$ e imponiamo la condizione di isotropia:

$$0 = \mu^2 + \mu + 1 = \left(\mu - \frac{-1 + i\sqrt{3}}{2}\right)\left(\mu - \frac{-1 - i\sqrt{3}}{2}\right)$$

Sostituendo i valori ottenuti del parametro μ , si ricavano le equazioni dei due piani:

$$\left(\frac{-1 + i\sqrt{3}}{2}\right)x_1 + \left(\frac{-3 + i\sqrt{3}}{2}\right)x_2 + x_3 = 0; \quad \left(\frac{-1 - i\sqrt{3}}{2}\right)x_1 + \left(\frac{-3 - i\sqrt{3}}{2}\right)x_2 + x_3 = 0;$$

Alternativamente, detta $ax_1 + bx_2 + cx_3 + d = 0$ l'equazione cartesiana di un piano isotropo passante per s , si deve avere $d = 0$ perché s contiene l'origine e i coefficienti devono sicuramente soddisfare le condizioni:

$$\begin{cases} a + b + c = 0 & (\text{condizione di parallelismo con } s) \\ a^2 + b^2 + c^2 = 0 & (\text{condizione di isotropia}) \end{cases}$$

Risolvendo il sistema, si ritrovano i piani indicati.

Problema 1.23. Si consideri lo spazio complesso con un riferimento ortonormale fissato. Sia fissata la retta r di equazioni $x_1 - 2ix_2 - 1 = 0, ix_1 - 2x_3 + 2 - i = 0$.

a) Determina un piano reale α contenente la retta r e discutere se tale piano è unico. La retta r è reale?

b) Determina, se esistono, i piani isotropi passanti per r .

Soluzione.

Esercizi

Nello spazio complessificato, sia assegnato un riferimento \mathcal{R} .

1.1. Mostra che il punto medio M di due punti X_1 e X_2 è reale se e solo se $\mathbf{X}_1 \bar{\mathbf{X}}_1 + \mathbf{X}_2 \bar{\mathbf{X}}_2 = \mathbf{0}$.

1.2. Mostra che, nel piano complessificato, le coppie di punti $X_1(x_1, y_2)$ e $X_2(x_1, y_2)$ tali che il punto medio del segmento X_1X_2 sia reale sono caratterizzate dalla condizione:

$$(Im x_1, Im y_1) = -(Im x_2, Im y_2)$$

In particolare, tali coppie sono infinite.

1.3. Controlla se i vettori $\mathbf{v}_1(2+i, 1+i, -1+3i)$ e $\mathbf{v}_2(1+3i, 5i, -2+2i)$ sono paralleli. Analoga domanda per \mathbf{v}_1 e $\mathbf{v}_3(3+4i, 1+3i, -5+5i)$.

1.4. Determina equazioni parametriche e cartesiane per la retta r passante per $P(2, 0, 1)$ e parallela a $\mathbf{v}_1(1-i, 1+2i, 2-3i)$. Qual è l'intersezione tra r e l'immagine \bar{r} di r rispetto al coniugio?

1.5. Determina un vettore parallelo alla retta s di equazioni: $(2-i)x_1 - ix_2 + 3x_3 = 0$, $2x_1 - 2ix_3 + i = 0$.

1.6. Determina equazioni cartesiane a coefficienti reali di una retta reale r passante per il punto $P(2-i, 1+i, 2i)$.

1.7. Sia r la retta di equazioni cartesiane:

$$x_1 - 3ix_2 - 11 = 0, 2ix_2 + x_3 - 4 + 4i = 0.$$

- Determina un vettore direttore della retta r .
- Discuti la posizione relativa della retta r e della sua coniugata \bar{r} , cioè determinare se la retta r è complanare o sghemba a \bar{r} .

1.8. Discuti se il piano π di equazione cartesiana $2x_1 - x_2 + 4x_3 + 2i = 0$ ha punti reali.

1.9. Sia π il piano di equazione cartesiana $(2+i)x_1 - ix_2 + 2x_3 + 1 = 0$.

- Determina una base della giacitura e equazioni parametriche per π .
- Determina una descrizione parametrica di $\pi \cap \bar{\pi}$, discutendo, in particolare, se il piano π è reale.

1.10. Sia r la retta di equazioni cartesiane:

$$x_1 + x_2 - 1 - 2i = 0, 2x_1 - x_3 + 2 = 0.$$

- Discuti la posizione relativa di r e della sua coniugata.
- Discuti se r ha punti reali.

1.11. a) Determina una equazione cartesiana reale per la retta reale passante per il punto $P(2i+1, 1-i)$.

b) Determina il fascio di rette per $P(2i+1, 1-i)$, fornendo l'equazione cartesiana di ogni suo elemento.

1.12. Determina il fascio di rette parallele al vettore $(1-i, 3i)$, fornendo l'equazione cartesiana di ogni suo elemento.

1.13. Determina il vettore parallelo alla coniugata della retta r di equazione $2ix + (1-i)y + 5 - 3i = 0$. Discutere inoltre se r è reale e quale sia l'intersezione tra r e la sua coniugata.

1.14. Costruisci un esempio di retta che non interseca la propria coniugata.

1.15. Determina una retta che interseca la propria coniugata solo nel punto $A(2, -3)$. E' possibile determinare una retta che interseca la propria coniugata solo nel punto $B(2+2i, i+1)$?

1.16. Nello spazio euclideo complessificato sia fissato un riferimento reale \mathcal{R} . Siano fissati inoltre il punto $P(1+i, 2+i, 3)$ e i piani α e β di equazione cartesiana, rispettivamente,

$$\alpha : (2i-1)x_1 - ix_2 + 3x_3 - i + 1 = 0, \quad \beta : ix_1 - ix_3 + 1 = 0.$$

- Determina equazioni cartesiane reali di una retta reale s passante per P , se essa esiste.
- Determina equazioni cartesiane reali di un piano reale che contiene la retta $r = \alpha \cap \beta$. Se tale piano non esiste, motivare la risposta.
- Determina l'equazione del fascio di piani paralleli a α .
- Discuti se il piano α è reale e determinare un vettore parallelo sia ad α che ad $\bar{\alpha}$.
- Discuti se la giacitura di β è reale. Qual'è l'intersezione tra β e il coniugato $\bar{\beta}$?

1.17. Sia r la retta di equazioni parametriche $x_1 = 2+3it, x_2 = -1-(1-i)t, x_3 = 1$.

- Discuti se la retta r è reale e la mutua posizione con \bar{r} .
- Discuti l'esistenza di un piano reale contenente r .

1.18. Siano α (risp. β) i piani di equazione cartesiana $ix_1 + x_2 + 2x_3 - 3 = 0$ (risp. $x_1 + x_2 + ix_3 + 1 = 0$).

- Usando i minori, determina un vettore direttore per la retta $r = \alpha \cap \beta$.
- Determina la posizione relativa tra r e la coniugata \bar{r} .

1.19. Mostra che la retta r del piano di equazione $ix_1 + ix_2 - 2 = 0$ non ha punti reali.

1.20. Mostra che la retta r di equazioni $x_1 + ix_2 + x_3 + i = 0, x_1 - ix_2 - x_3 - i = 0$ è di prima specie.

1.21. Determina l'equazione cartesiana del piano α passante per il punto $P(i, 1, 2)$ e parallelo alle rette r e s di equazioni cartesiane, rispettivamente, $r : x_1 = i, 2x_2 - x_3 = 0$, $s : x_3 = 2ix_2, x_1 - 3x_2 + x_3 = 1$.

1.22.

Fissato un riferimento monometrico ortogonale nello spazio euclideo reale complessificato, considera i piani β di equazione $ix_1 + (3i+7)x_2 + (-1-i)x_3 + 2 = 0$ e α di equazione $x_2 = 3$. Verifica se è reale la retta r ottenuta intersecando α e β .

1.23. Si consideri fissato un sistema di riferimento nello spazio affine reale complessificato.

- Determina se la retta r di equazioni: $ix_1 - i + 1 = \frac{x_2 - 2i}{2} = 3x_3 - 6 + 6i$ è reale.
- Determina le rette isotrope passanti per $P(1, 0, 0)$ e contenute nel piano α di equazione $3x_1 - x_2 + 7x_3 = 3$.

1.24. Fissato un riferimento monometrico ortogonale nello spazio euclideo reale complessificato, considera i piani α di equazione $2x_1 - 2x_2 + 2x_3 = -2$ e β di equazione $(i-1)x_1 + (7i-1)x_2 + (-1+i)x_3 + 5 - 5i = 0$. a) Verifica se è reale la retta r ottenuta intersecando α e β .

- Determina le rette isotrope contenute nel piano β .

1.25. Nello spazio affine reale complessificato sia fissato un riferimento reale ortonormale. Sia r la retta ottenuta intersecando i piani α e β di equazioni:

$$\alpha : -ix_1 - x_2 + (2 - 3i)x_3 + 2i + 1 = 0, \quad \beta : (1 + i)x_1 + (1 + 2i)x_2 + (1 - i)x_3 + 2i = 0.$$

- Determina, se esiste, l'equazione cartesiana di un piano reale π che contiene r e discutere se r ha punti reali.
- Determina le rette isotrope contenute nel piano α e passanti per il punto $P(0, 2i + 1, 0)$, se esistono.

1.26. Nello spazio affine reale complessificato sia fissato un riferimento reale ortonormale. Sia r la retta di equazioni $(2 - 4i)x_1 + (6 + 3i)x_2 - 6ix_3 + 6 - 3i = 0$, $5x_1 - 3ix_3 - 6 = 0$ e sia fissato il punto $P(0, 0, 0)$.

- Determina, se esiste, l'equazione cartesiana di un piano reale α che contiene r e discutere se r ha punti reali.
- Determina l'equazione cartesiana dei piani isotropi passanti per r , se esistono.

1.27. Nello spazio complesso sia fissato un riferimento ortonormale fissato. Sia r la retta di equazioni $2ix_1 + 2x_3 - 2 - 4i = 0$, $-3x_2 + 6ix_3 - 6i = 0$.

- Determina, se esiste, l'equazione cartesiana di un piano α che contiene sia r che la retta coniugata \bar{r} e discutere se la retta r è reale.
- Determina l'equazione cartesiana dei piani isotropi passanti per r , se esistono.
- Determina la dimensione ed una base del sottospazio complesso U dei vettori ortogonali alla retta r . Determinare inoltre la dimensione dell'intersezione $U \cap U^\perp$, ove con U^\perp si denoti lo spazio vettoriale dei vettori ortogonali a U .

1.28. Si consideri r la retta di equazioni cartesiane $ix - (5 + 6i)y + z + 4 = 0$, $(5 + 5i)y - (1 + i)z = -1 - i$. Determina equazioni cartesiane reali di un piano reale passante per r , se tale piano esiste.

1.29. Nel piano complessificato, sia assegnato un riferimento \mathcal{R} reale ortonormale e sia fissato il punto $Q(i, -1)$.

- Determina la distanza tra $P(2 - i, 3)$ e Q .
- Determina l'equazione parametrica per ogni retta isotropa passante per Q .
- Sia r una retta isotropa passante per Q . Tale retta ha punti reali?
- Determina equazioni cartesiane per la retta s per Q e ortogonale alla retta $2x - (2 + 7i)y + 5 = 0$.

1.30. Determina i vettori isotropi paralleli al piano π di equazione $3x_1 - x_2 = 0$.

1.31. Determinare le rette isotrope per $P(0, -5i, 0)$ e contenute nel piano π di equazione cartesiana $2ix_1 + 2x_3 = 0$.

1.32. Determinare i piani isotropi passanti per la retta r di equazioni

$$\frac{x_1 - 3}{2i} = \frac{x_2 - (3 + 2i)}{-1} = \frac{x_3 - (45 + 5i)}{\sqrt{3}}.$$

Determinare inoltre l'equazione del fascio di piani per r .

1.33. Determinare i piani isotropi per la retta r passante per $A(1, -12i, 5)$ e parallela al vettore di componenti $(2, 0, 7i)$.

Definizione 1.5.3. Un vettore $\bar{\mathbf{a}}$ si dice *coniugato* del vettore \mathbf{a} se le componenti di $\bar{\mathbf{a}}$, in un qualsiasi riferimento reale, sono complesse coniugate delle componenti di \mathbf{a} .

Si osservi che, se $\mathbf{a} = \mathbf{PQ}$ per opportuni punti complessi P e Q , allora il vettore coniugato $\bar{\mathbf{a}}$ è individuato dai punti coniugati:

$$\bar{\mathbf{a}} = \overline{\mathbf{PQ}}.$$

Ogni vettore complesso può essere decomposto nelle sue parti reale e immaginaria.

1.6 Complessificazione della retta e del piano

In modo analogo a quanto svolto per lo spazio, si possono costruire la complessificazione della retta e del piano.

a) Complessificazione della retta

Si consideri la retta r ed il suo complessificato $r_{\mathbb{C}}$. Un punto P è reale se e solo se è reale la sua terna di coordinate rispetto ad un riferimento reale. Il punto generico della retta ha coordinata complessa non reale.

b) Complessificazione del piano

Si considerino il piano π ed il suo complessificato $\pi_{\mathbb{C}}$.

Definizione 1.6.1. Una *retta (complessa)* r di π è l'insieme dei punti P le cui coordinate $(x_1, x_2) \in \mathbb{C}^2$ soddisfano una equazione della forma $ax_1 + bx_2 + c = 0$ per opportuni numeri complessi a, b, c , con a e b non tutti nulli. L'equazione $ax_1 + bx_2 + c = 0$ è detta equazione cartesiana della retta r .

Osserviamo che la definizione di retta è ben posta, non dipendendo dalla scelta del riferimento cartesiano utilizzato. L'equazione cartesiana è individuata da r solo a meno di multiplo per una costante complessa non nulla.

Definizione 1.6.2. Sia fissato un riferimento cartesiano reale $\mathcal{R} = (O, R)$ nel piano complessificato. Sia r la retta di equazione cartesiana $ax_1 + bx_2 + c = 0$. La *giacitura* della retta r è l'insieme dei vettori \mathbf{v} le cui componenti (l, m) nel riferimento R di $\mathcal{V}_{\mathbb{C}}$ soddisfano l'equazione:

$$al + bm = 0.$$

Un vettore complesso è parallelo alla retta r se e solo se appartiene alla giacitura di r . Ogni vettore non nullo che appartiene alla giacitura di r si dice *vettore direttore* di r , mentre le sue componenti sono dette *numeri direttori* di r .

Si osservi che la definizione di giacitura è ben posta e non dipende dalla scelta del riferimento cartesiano.

Dimostrare, per esercizio, che un vettore libero appartiene alla giacitura di una retta r se e solo se ammette un rappresentante \mathbf{PQ} con $P, Q \in r$: dunque, la giacitura di una retta r è lo spazio vettoriale dei vettori liberi \mathbf{PQ} , con $P, Q \in r$.

Si consideri fissato un riferimento reale \mathcal{R} di $\pi_{\mathbb{C}}$. Se \mathbf{v} è un vettore direttore di una retta r e $P(p_1, p_2) \in r$ è un punto complesso, allora ogni punto $X(x_1, x_2)$ della retta è della forma

$$\begin{aligned} x_1 &= p_1 + t l \\ x_2 &= p_2 + t m \end{aligned} \tag{1.10}$$

ove (l, m) sono le componenti di \mathbf{v} nel riferimento assegnato e $t \in \mathbb{C}$ è un opportuno numero complesso. Viceversa, ogni punto avente coordinate della forma (1.10) appartiene alla retta. Le equazioni (1.10) sono dette *equazioni parametriche della retta*, e possono esser scritte in forma vettoriale:

$$\mathbf{x} = \mathbf{p} + t\mathbf{v} \quad t \in \mathbb{C}$$

Si osservi, in particolare, che i punti di una retta sono parametrizzati da un parametro complesso.

Osservazione 1.6.3. Per definizione, una retta r di $\pi_{\mathbb{C}}$ è *reale* se $r = \bar{r}$. Si osservi che ogni retta reale ha infiniti punti reali, ma contiene, sempre, anche punti immaginari. Se $P \neq \bar{P}$, la retta $\langle P, \bar{P} \rangle$ è una retta reale.

Osservazione 1.6.4. Una retta r è reale se e solo se, in un qualunque riferimento reale, r ammette una equazione cartesiana a coefficienti reali. In un riferimento reale, sia $ax + by + c = 0$ l'equazione di una retta r . La retta \bar{r} è allora definita dall'equazione $\bar{a}x + \bar{b}y + \bar{c} = 0$. La retta r è reale se e solo se la terna (a, b, c) dei coefficienti è proporzionale (con coefficiente di proporzionalità complesso non nullo) ad una terna di numeri reali, cioè:

$$r = \bar{r} \quad \Leftrightarrow \quad rg \begin{pmatrix} a & b & c \\ \bar{a} & \bar{b} & \bar{c} \end{pmatrix} = 1.$$

Ora basta osservare che

$$rg \begin{pmatrix} a & b & c \\ \bar{a} & \bar{b} & \bar{c} \end{pmatrix} = rg \begin{pmatrix} (a + \bar{a}) & (b + \bar{b}) & (c + \bar{c}) \\ (a - \bar{a}) & (b - \bar{b}) & (c - \bar{c}) \end{pmatrix} = rg \begin{pmatrix} Re(a) & Re(b) & Re(c) \\ Im(a) & Im(b) & Im(c) \end{pmatrix}.$$

Se tale rango è 1, significa che la terna (a, b, c) è proporzionale (con coefficiente di proporzionalità un numero complesso non nullo) ad una terna reale.

Osservazione 1.6.5. Se una retta r non è reale, cioè $r \neq \bar{r}$, allora l'intersezione $r \cap \bar{r}$ è vuota o è data da un punto P : nel primo caso le due rette sono parallele, prive di punti reali e la loro direzione è reale; nel secondo caso, il punto P di intersezione è necessariamente reale, ma le direzioni di r e \bar{r} non sono reali.

Per provarlo, manteniamo le notazioni dell'osservazione precedente e supponiamo che la retta non sia reale, cioè $rg \begin{pmatrix} a & b & c \\ \bar{a} & \bar{b} & \bar{c} \end{pmatrix} = 2$. Se $rg \begin{pmatrix} a & b \\ \bar{a} & \bar{b} \end{pmatrix} = 2$, allora il sistema delle equazioni cartesiane di r e \bar{r} è un sistema di Cramer, e le due rette si intersecano in un punto P . Altrimenti, il sistema non è compatibile, e le rette r e \bar{r} sono parallele e distinte. In quest'ultimo caso, si ha che $rg \begin{pmatrix} a & b \\ \bar{a} & \bar{b} \end{pmatrix} = 1$; ragionando come nell'osservazione precedente, si ricava che la coppia (a, b) è proporzionale ad una coppia di numeri reali, con coefficiente di proporzionalità un numero complesso non nullo. La retta ammette dunque un vettore direttore con componenti reali.

Esempio 1.6.6. Sia fissato un riferimento reale.

- 1) Sia r la retta di equazione $2(i+1)x + (3i+3)y + 5i + 5 = 0$. Dividendo per il coefficiente di x , ottengo l'equazione reale $x + \frac{3}{2}y + \frac{5}{2} = 0$; dunque la retta r è reale.
- 2) Si consideri la retta r di equazione $7x - iy + 2 = 0$; la retta \bar{r} ha dunque equazione $7x + iy + 2 = 0$. La retta r non è reale: mettendo infatti a sistema le equazioni di r e \bar{r} si ottiene un sistema di Cramer. Considerando la differenza delle equazioni di r e \bar{r} si vede subito che il loro punto di intersezione è $P(-\frac{2}{7}, 0)$; P è l'unico punto reale di r , visto che r è parallela al vettore non reale $(i, 7)$.
- 3) Le rette $r : 3x + 2y - i = 0$ e $\bar{r} : 3x + 2y + i = 0$ sono parallele entrambe alla direzione reale $(-2, 3)$ e non hanno punti reali.

Raccogliendole osservazioni precedenti, si ricava la seguente proposizione:

Proposizione 1.6.7. *Una retta è reale se e solo se contiene un punto reale P e ha un vettore direttore reale.*

1.7 Sottospazi della complessificazione dello spazio affine 3-dimensionale

Sia \mathbb{A} lo spazio euclideo di dimensione 3 reale e sia $\mathbb{A}_{\mathbb{C}}$ la sua complessificazione, nella quale si consideri fissato un riferimento reale.

Definizione 1.7.1. Un piano (complesso) π di $\mathbb{A}_{\mathbb{C}}$ è l'insieme dei punti P le cui coordinate $(x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{C}^3$ soddisfano una equazione della forma $ax_1 + bx_2 + cx_3 + d = 0$ per opportuni numeri complessi a, b, c, d , con a, b e c non tutti nulli. L'equazione $ax_1 + bx_2 + cx_3 + d = 0$ è detta equazione cartesiana del piano π .

Osserviamo che la definizione di piano è ben posta, non dipendendo dalla scelta del riferimento cartesiano utilizzato. Fissato il riferimento, l'equazione cartesiana è individuata dal piano solo a meno di multiplo per una costante complessa non nulla.

Definizione 1.7.2. Sia fissato un riferimento cartesiano reale $\mathcal{R} = (O, R)$ nello spazio complesso. Sia π il piano di equazione cartesiana $ax_1 + bx_2 + cx_3 + d = 0$. La *giacitura* del piano π è l'insieme dei vettori \mathbf{v} le cui componenti (l, m, n) nel riferimento R di $\mathcal{V}_{\mathbb{C}}$ soddisfano l'equazione:

$$al + bm + cn = 0. \quad (1.11)$$

La giacitura di un piano forma un sottospazio vettoriale di dimensione complessa 2 dello spazio vettoriale dei vettori complessi liberi $\mathcal{V}_{\mathbb{C}}$. Un vettore complesso è *parallelo al piano* π se e solo se appartiene alla giacitura di π .

Si osservi che la definizione di giacitura è ben posta e non dipende dalla scelta del riferimento cartesiano. Dimostrare, per esercizio, che un vettore libero appartiene alla giacitura di un piano π se e solo se ammette un rappresentante \mathbf{PQ} con $P, Q \in \pi$: dunque, *la giacitura di un piano π è lo spazio vettoriale dei vettori liberi \mathbf{PQ} , con $P, Q \in \pi$.*

Si consideri fissato un riferimento reale $\mathcal{R} = (O, R)$ di $\mathbb{A}_{\mathbb{C}}$. Se (\mathbf{v}, \mathbf{w}) è un riferimento della giacitura di π e $P(p_1, p_2, p_3) \in \pi$ è un punto complesso, allora ogni punto $X(x_1, x_2, x_3)$ del piano è della forma

$$\begin{cases} x_1 = p_1 + t v_1 + s w_1 \\ x_2 = p_2 + t v_2 + s w_2 \\ x_3 = p_3 + t v_3 + s w_3 \end{cases} \quad (1.12)$$

ove (v_1, v_2, v_3) e (w_1, w_2, w_3) sono, rispettivamente, le componenti di \mathbf{v} e \mathbf{w} nel riferimento assegnato e $t, s \in \mathbb{C}$ sono opportuni numeri complessi. Viceversa, ogni punto avente coordinate della forma (1.12) appartiene al piano. Le equazioni (1.12) sono dette *equazioni parametriche del piano*, e possono essere scritte in forma vettoriale:

$$\mathbf{x} = \mathbf{p} + t\mathbf{v} + s\mathbf{w} \quad t, s \in \mathbb{C}$$

Si osservi, in particolare, che i punti di un piano sono parametrizzati da (almeno) due parametri complessi.

Diciamo che i punti $A_1, A_2, \dots, A_n \in \mathbb{A}_{\mathbb{C}}$ sono *complanari* se esiste un piano che li contiene tutti.

Osservazione 1.7.3. Se π è un piano, l'insieme coniugato $\bar{\pi}$ è ancora un piano, detto *piano coniugato*. Fissato un riferimento reale \mathcal{R} di $\mathbb{A}_{\mathbb{C}}$, sia $ax_1 + bx_2 + cx_3 + d = 0$ l'equazione di un piano π . Allora il piano coniugato $\bar{\pi}$ ha equazione $\bar{a}x_1 + \bar{b}x_2 + \bar{c}x_3 + \bar{d} = 0$

Osservazione 1.7.4. Un piano π di equazione cartesiana $ax_1 + bx_2 + cx_3 + d = 0$ è *reale* se e solo se $\pi = \bar{\pi}$, cioè se e solo se

$$\text{rg} \begin{pmatrix} a & b & c & d \\ \bar{a} & \bar{b} & \bar{c} & \bar{d} \end{pmatrix} = 1,$$

cioè *se e solo se ammette una equazione cartesiana a coefficienti reali*. In tal caso, per determinare esplicitamente una equazione reale è sufficiente prendere l'equazione $Re(a)x_1 + Re(b)x_2 + Re(c)x_3 + Re(d) = 0$, ottenuta come semisomma dell'equazione iniziale e della sua coniugata. Alternativamente, si divide l'equazione per una costante, in modo che uno dei suoi coefficienti diventi 1.

Per studiare la relazione tra un piano e il suo coniugato, introduciamo la nozione di retta, perfettamente simile a quella già nota:

Definizione 1.7.5. Una *retta* r è l'insieme dei punti di intersezione tra due piani complessi distinti α e β , qualora tale insieme risulti non vuoto. La *giacitura* di r è il sottospazio di dimensione complessa 1, formato dai vettori complessi liberi paralleli sia ad α che a β . Un vettore che genera la giacitura di r viene detto *vettore direttore* di r e le sue componenti in un sistema di riferimento \mathcal{R} sono detti *numeri direttori*.

Si osservi che tale definizione corrisponde a quella di retta in un piano complessificato.

Osservazione 1.7.6. Se due piani distinti α e β hanno rispettivamente equazione cartesiana $ax_1 + bx_2 + cx_3 + d = 0$ e $a'x_1 + b'x_2 + c'x_3 + d' = 0$, la loro intersezione è una retta (cioè è non vuota) se e solo se

$$rg \begin{pmatrix} a & b & c \\ a' & b' & c' \end{pmatrix} = 2.$$

In tal caso, un vettore direttore \mathbf{v} della retta intersezione si ricava facilmente considerando i minori di ordine con segno della matrice:

$$\mathbf{v} = \left(\det \begin{pmatrix} b & c \\ b' & c' \end{pmatrix}, -\det \begin{pmatrix} a & c \\ a' & c' \end{pmatrix}, \det \begin{pmatrix} a & b \\ a' & b' \end{pmatrix} \right).$$

Osservazione 1.7.7. Si consideri fissato un riferimento reale \mathcal{R} di $\mathbb{A}_{\mathbb{C}}$. Se \mathbf{v} è un vettore direttore di una retta r e $P(p_1, p_2, p_3) \in r$ è un punto complesso, allora ogni punto $X(x_1, x_2, x_3)$ della retta è della forma

$$\begin{cases} x_1 = p_1 + tl \\ x_2 = p_2 + tm \\ x_3 = p_3 + tn \end{cases} \quad (1.13)$$

ove (l, m, n) sono le componenti di \mathbf{v} nel riferimento assegnato e $t \in \mathbb{C}$ è un opportuno numero complesso. Viceversa, ogni punto avente coordinate della forma (1.13) appartiene alla retta. Le equazioni (1.13) sono dette *equazioni parametriche della retta*, e possono esser scritte in forma vettoriale:

$$\mathbf{x} = \mathbf{p} + t\mathbf{v} \quad t \in \mathbb{C}$$

Si osservi, in particolare, che i punti di una retta sono parametrizzati da un parametro complesso.

Diciamo che i punti $A_1, A_2, \dots, A_n \in \mathbb{A}_\mathbb{C}$ sono *allineati* se esiste una retta che li contiene tutti.

Osservazione 1.7.8. Se i numeri direttori l, m, n sono non nulli, la retta parametrizzata dall'equazione (1.13) è descritta dalle equazioni nella forma dei rapporti uguali :

$$\frac{x_1 - p_1}{l} = \frac{x_2 - p_2}{m} = \frac{x_3 - p_3}{n},$$

equivalenti, ad esempio alla coppia di equazioni cartesiane $\frac{x_1 - p_1}{l} - \frac{x_2 - p_2}{m} = 0$, $\frac{x_1 - p_1}{l} - \frac{x_3 - p_3}{n} = 0$

Osservazione 1.7.9. L'insieme coniugato \bar{r} di una retta r è ancora una retta, detta *retta coniugata*. Le equazioni cartesiane di \bar{r} si ottengono da quelle di r coniugando i coefficienti. Un vettore direttore di \bar{r} si ottiene prendendo il coniugato di un vettore direttore di r .

Torniamo allo studio della posizione relativa tra un piano π e il suo coniugato. Se $\pi \neq \bar{\pi}$, si dice che il piano π è *immaginario*. In tal caso, si verificano due possibilità, a seconda che

$$\text{rg} \begin{pmatrix} a & b & c \\ \bar{a} & \bar{b} & \bar{c} \end{pmatrix} = 2 \text{ oppure } 1;$$

nel primo caso, $\pi \cap \bar{\pi}$ è una retta reale e la giacitura di π non è reale, mentre nel secondo caso $\pi \cap \bar{\pi} = \emptyset$ cosicché i piani π e $\bar{\pi}$ sono paralleli tra loro, e la loro giacitura è un sottospazio reale.

Osservazione 1.7.10. Una retta r è reale se e solo se $r = \bar{r}$, o, equivalentemente, se essa ammette un sistema di equazioni reali

$$\begin{cases} a x_1 + b x_2 + c x_3 + d = 0 \\ a' x_1 + b' x_2 + c' x_3 + d' = 0 \end{cases}.$$

Per determinare un tale sistema di equazioni per una retta r assegnata, si consideri un punto $P \in r$. Anche \bar{P} risulta appartenere a r , che è reale, come anche il punto medio M tra P e \bar{P} . Dunque, M è un punto reale di r . Se il punto P non è reale, la direzione di r è individuata dal vettore $P - \bar{P}$; denotate con $P(\alpha, \beta, \gamma)$ le coordinate di P e con $\bar{P}(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \bar{\gamma})$ le coordinate di \bar{P} , le componenti del vettore $P - \bar{P}$ sono date da:

$$P - \bar{P} = (\alpha - \bar{\alpha}, \beta - \bar{\beta}, \gamma - \bar{\gamma}) = (2i \text{Im}(\alpha), 2i \text{Im}(\beta), 2i \text{Im}(\gamma)).$$

Dunque la retta r contiene il punto reale M ed è parallela al vettore reale $(\text{Im}(\alpha), \text{Im}(\beta), \text{Im}(\gamma))$; ora è facile determinarne equazioni reali, utilizzando il teorema degli orlati.

Se, invece, il punto P di partenza era reale, si considera un nuovo punto $Q \in r$: se anche tale punto è reale, allora $P - Q$ è già un vettore reale non nullo parallelo a r . Se invece Q non è reale, ci si riconduce al caso precedente.

Osservazione 1.7.11. Supponiamo ora che la retta r non sia reale, cioè $r \neq \bar{r}$; le rette r e \bar{r} sono o complanari o sghembe. Se r e \bar{r} sono complanari, diciamo che la retta r è di *prima specie*; in tal caso, se le due rette sono incidenti, il punto di incidenza è necessariamente un punto reale, e la loro giacitura non è reale; se, invece, r e \bar{r} sono parallele, esse non hanno punti reali, ma la loro giacitura è reale. Nel secondo caso, invece, r e \bar{r} sono sghembe e diciamo che la retta r è di *seconda specie*: esse sono prive di punti reali e le loro giaciture non sono reali. In particolare, una retta non reale è priva di punti reali, oppure ne contiene uno solo.

Riassumendo quanto abbiamo dimostrato:

Proposizione 1.7.12. *Un piano (risp., una retta) dello spazio complesso è reale se e solo se contiene un punto reale e la sua giacitura è reale.*

Esempio 1.7.13. Sia fissato un riferimento reale in $\mathbb{A}_{\mathbb{C}}$.

1) **Retta reale per un punto immaginario** Per un punto immaginario passa una unica retta reale. Ad esempio, sia $P(i, -2i, 3 + 4i)$. Una retta reale r che passi per P deve contenere anche \bar{P} . Ma allora r coincide con la retta per P e \bar{P} , che è reale perché passa per il punto medio $M(0, 0, 3)$ di P e \bar{P} , che è reale, ed ha giacitura reale, generata dal vettore $\mathbf{PP} = (0, 0, 6)$. La retta ottenuta è reale in base alla Proposizione 1.7.12.

2) **Equazioni reali per una retta reale** Sia assegnata la retta r di equazioni: $x_1 - 1 - i = \frac{x_2 - 2i}{2} = x_3 - 2 + i$. La retta r è reale perché contiene sia il punto $A(1 + i, 2i, 2 - i)$ che il suo coniugato $\bar{A}(1 - i, -2i, 2 + i)$. Per determinare un sistema di equazioni reali per r , considero il punto medio $M(1, 0, 2)$ di A e \bar{A} , e, come numeri direttori, $A - \bar{A}$ o, equivalentemente, $(1, 2, 1)$. Le equazioni reali si trovano imponendo che

$$\text{rg} \begin{pmatrix} x_1 - 1 & x_2 & x_3 - 2 \\ 1 & 2 & -1 \end{pmatrix} = 1;$$

dunque r ha equazioni $2x_1 - 2 - x_2 = 0, x_1 + x_3 - 3 = 0$.

3) **Rette reali in un piano** Per la Proposizione 1.7.12, ogni piano reale α contiene infinite rette reali (basta intesecarlo con un qualsiasi altro piano reale non parallelo ad α). Un piano immaginario α contiene al più una retta reale: se $\alpha \cap \bar{\alpha}$ non è una retta (cioè se α e $\bar{\alpha}$ sono paralleli), allora α non contiene rette reali. Se, invece, $\alpha \cap \bar{\alpha}$ è una retta r , allora la retta r è reale ed è l'unica retta reale contenuta nel piano α .

Ad esempio, sia α il piano di equazione $3ix_1 + 2x_2 + (4 + 2i)x_3 + i = 0$. Il piano coniugato $\bar{\alpha}$ ha equazione $-3ix_1 + 2x_2 + (4 - 2i)x_3 - i = 0$. Poiché

$$\text{rg} \begin{pmatrix} 3i & 2 & 4 + 2i \\ -3i & 2 & 4 - 2i \end{pmatrix} = \text{rg} \begin{pmatrix} 0 & 2 & 4 \\ 3 & 0 & 2 \end{pmatrix} = 2$$

i piani α e $\bar{\alpha}$ si intersecano lungo una retta reale r , che è l'unica retta reale contenuta in α . Per cercare equazioni reali di r basta separare le parti reali e immaginaria dell'equazione di α : la retta r ha equazioni cartesiane reali $2x_2 + 4x_3 = 0, 3x_1 + 2x_3 + 1 = 0$.

4) **Equazioni reali di una retta intersezione tra un piano e il coniugato**

Per scrivere le equazioni reali di una retta reale di equazioni:

$$\begin{cases} ax_1 + bx_2 + cx_3 + d = 0 \\ \bar{a}x_1 + \bar{b}x_2 + \bar{c}x_3 + \bar{d} = 0 \end{cases}$$

Basta utilizzare le seguenti equazioni reali:

$$\begin{cases} Re(a)x_1 + Re(b)x_2 + Re(c)x_3 + Re(d) = 0 \\ Im(a)x_1 + Im(b)x_2 + Im(c)x_3 + Im(d) = 0 \end{cases}$$

Ad esempio, è possibile applicare questa procedura nell'esempio

$$r : \begin{cases} (1 + 2i)x_1 + (2 - i)x_2 + (1 - i)x_3 + 1 = 0 \\ (1 - 2i)x_1 + (2 + i)x_2 + (1 + i)x_3 + 1 = 0 \end{cases} ,$$

ottenendo le equazioni reali:

$$r : \begin{cases} 1x_1 + 2x_2 + 1x_3 + 1 = 0 \\ -2x_1 + 1x_2 + 1x_3 = 0 \end{cases} .$$

5) **Equazioni reali di una retta reale assegnata tramite equazioni cartesiane**

Si considerino i piani α di equazione $ax_1 + bx_2 + cx_3 + d = 0$ e β di equazione $a'x_1 + b'x_2 + c'x_3 + d' = 0$, e si supponga che l'intersezione $\alpha \cap \beta$ sia una retta r . Si vuole stabilire se la retta $r = \alpha \cap \beta$ sia reale:

$$r : \begin{cases} ax_1 + bx_2 + cx_3 + d = 0 \\ a'x_1 + b'x_2 + c'x_3 + d' = 0 \end{cases}$$

La condizione affinché r sia reale è che $r \subset \bar{\alpha}$ e $r \subset \bar{\beta}$, cioè che

$$rg \begin{pmatrix} a & b & c & d \\ \bar{a} & \bar{b} & \bar{c} & \bar{d} \\ a' & b' & c' & d' \\ \bar{a}' & \bar{b}' & \bar{c}' & \bar{d}' \end{pmatrix} = rg \begin{pmatrix} Re(a) & Re(b) & Re(c) & Re(d) \\ Im(a) & Im(b) & Im(c) & Im(d) \\ Re(a') & Re(b') & Re(c') & Re(d') \\ Im(a') & Im(b') & Im(c') & Im(d') \end{pmatrix} = 2$$

In tal caso, per ottenere equazioni reali per la retta r , basta utilizzare due righe indipendenti dell'ultima matrice scritta come matrice completa del sistema di equazioni.

Se il piano α è immaginario, per affermare che r è reale è sufficiente mostrare che $r \subset \bar{\alpha}$, cioè è sufficiente mostrare che

$$rg \begin{pmatrix} a & b & c & d \\ \bar{a} & \bar{b} & \bar{c} & \bar{d} \\ a' & b' & c' & d' \end{pmatrix} = 2$$

perché, in tal caso, la retta r coincide con l'intersezione $\alpha \cap \bar{\alpha}$. In tal caso, si rientra nel caso dell'esempio precedente ed è possibile utilizzare le seguenti equazioni reali di r :

$$\begin{cases} Re(a)x_1 + Re(b)x_2 + Re(c)x_3 + Re(d) = 0 \\ Im(a)x_1 + Im(b)x_2 + Im(c)x_3 + Im(d) = 0 \end{cases}$$

Analogo ragionamento può essere adottato se il piano β è immaginario.

Se sia α che β sono reali, anche r è reale, e per trovarne equazioni reali è sufficiente determinare una equazione reale per ciascuno dei due piani.

6) **Una retta reale** Siano α di equazione $(1-i)x_1 + (2-i)x_2 - (1+2i)x_3 = -1$ e β di equazione $(i+1)x_1 + (1+2i)x_2 + (2-i)x_3 = -i$ due piani assegnati. Sotto l'ipotesi che $r = \alpha \cap \beta$ sia una retta, si vuole stabilire se la retta $r = \alpha \cap \beta$ sia reale.

Il piano coniugato di α è $\bar{\alpha} : (1+i)x_1 + (2+i)x_2 + (1-2i)x_3 + 1 = 0$. Poiché il piano α non è reale, la retta r è reale se e solo se $r \subset \bar{\alpha}$, cioè se e solo se $\bar{\alpha}$ appartiene al fascio di piani per r . Dunque:

$$r \text{ è reale} \Leftrightarrow \operatorname{rg} \begin{pmatrix} (1-i) & (2-i) & (-1-2i) & 1 \\ (i+1) & (1+2i) & (2-i) & i \\ (1+i) & (2+i) & (1-2i) & 1 \end{pmatrix} = 2.$$

Ora,

$$\operatorname{rg} \begin{pmatrix} 1-i & 2-i & -1-2i & 1 \\ i+1 & 1+2i & 2-i & i \\ 1+i & 2+i & 1-2i & 1 \end{pmatrix} = \operatorname{rg} \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 & 1 \\ i+1 & 1+2i & 2-i & i \\ 1 & 1 & 2 & 0 \end{pmatrix} = 2$$

Dunque la retta r è reale.

Per determinare equazioni reali per la retta r , basta osservare dalle matrici precedenti che i piani α e $\bar{\alpha}$ sono distinti: dunque $r = \alpha \cap \bar{\alpha}$ e per trovare equazioni reali di r basta separare parte reale e parte immaginaria nei coefficienti dell'equazione di α , come nel punto precedente, ottenendo $r : x + 2y - z + 1 = 0, x + y + 2z = 0$.

7) **Una retta non reale** Siano α e β i piani di equazione, rispettivamente, $(1-i)x_1 + (2-i)x_2 + (1+2i)x_3 = -1$ e $(i+1)x_1 + (1+2i)x_2 + (2-i)x_3 = -i$. Si vuole stabilire se la retta $r = \alpha \cap \beta$ sia reale.

Il piano coniugato di α è $\bar{\alpha} : (1+i)x_1 + (2+i)x_2 + (1-2i)x_3 + 1 = 0$. Poiché il piano α non è reale, la retta r è reale se e solo se $r \subset \bar{\alpha}$, cioè se e solo se $\bar{\alpha}$ appartiene al fascio di piani per r . Dunque:

$$r \text{ è reale} \Leftrightarrow \operatorname{rg} \begin{pmatrix} (1-i) & (2-i) & (1+2i) & 1 \\ (i+1) & (1+2i) & (2-i) & i \\ (1+i) & (2+i) & (1-2i) & 1 \end{pmatrix} = 2.$$

Ora,

$$\begin{aligned} \operatorname{rg} \begin{pmatrix} 1-i & 2-i & 1+2i & 1 \\ i+1 & 1+2i & 2-i & i \\ 1+i & 2+i & 1-2i & 1 \end{pmatrix} &= \operatorname{rg} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 & 1 \\ i+1 & 1+2i & 2-i & i \\ 1 & 1 & -2 & 0 \end{pmatrix} = \\ &= \operatorname{rg} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 & 1 \\ i & 2i & 4-i & i \\ 1 & 1 & -2 & 0 \end{pmatrix} = \operatorname{rg} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 4i+2 & 0 \\ -1 & -2 & 4i+1 & -1 \\ 1 & 1 & -2 & 0 \end{pmatrix} = 3. \end{aligned}$$

Dunque la retta r non è reale.

8) **Condizione di complanarità tra una retta e la coniugata** La condizione affinché le rette

$$r = \begin{cases} ax_1 + bx_2 + cx_3 + d = 0 \\ a'x_1 + b'x_2 + c'x_3 + d' = 0 \end{cases} \quad \text{e} \quad \bar{r} = \begin{cases} \bar{a}x_1 + \bar{b}x_2 + \bar{c}x_3 + \bar{d} = 0 \\ \bar{a}'x_1 + \bar{b}'x_2 + \bar{c}'x_3 + \bar{d}' = 0 \end{cases}$$

siano complanari è che

$$\det \begin{pmatrix} a & b & c & d \\ a' & b' & c' & d' \\ \bar{a} & \bar{b} & \bar{c} & \bar{d} \\ \bar{a}' & \bar{b}' & \bar{c}' & \bar{d}' \end{pmatrix} = 0.$$

Ciò accade se r è reale o di prima specie.

9) **Una retta di prima specie** Ad esempio, se

$$r = \begin{cases} (1+i)x_1 + 2x_2 - (1-i)x_3 - 1 = 0 \\ 2ix_1 + (1+i)x_2 - 1 = 0 \end{cases}$$

occorre studiare

$$\begin{aligned} \det \begin{pmatrix} 1+i & 2 & i-1 & -1 \\ 2i & 1+i & 0 & -1 \\ 1-i & 2 & -i-1 & -1 \\ -2i & 1-i & 0 & -1 \end{pmatrix} &= \det \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \det \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ &= -\det \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 0 \end{pmatrix} = -\det \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 2 & 1 & 0 \\ 2 & 1 & 0 \end{pmatrix} = 0. \end{aligned}$$

La retta r è dunque complanare con la sua coniugata. Più precisamente, la retta r non è reale perché la matrice dei coefficienti ha rango 3, e quindi r è di prima specie ed interseca propriamente la coniugata.

Il piano α che contenga r e \bar{r} è necessariamente reale, perché contiene il punto reale $P = r \cap \bar{r}$ ed ha giacitura reale (generata dal vettore direttore di r e dal suo coniugato). Si vogliono determinare equazioni reali per α .

Primo modo: Si consideri l'equazione del fascio di piani per r , con $\lambda, \mu \in \mathbb{C}$, $(\lambda, \mu) \neq (0, 0)$

$$\begin{aligned} &\lambda[(1+i)x_1 + 2x_2 - (1-i)x_3 - 1] + \mu[2ix_1 + (1+i)x_2 - 1] = \\ &\{(1+i)\lambda + 2i\mu\}x_1 + \{2\lambda + (1+i)\mu\}x_2 + (-1+i)\lambda x_3 - \lambda - \mu = 0 \quad . \end{aligned}$$

Si scelga un punto $Q \in r$: ad esempio il punto $Q(0, (1-i)/2, (1-i)/2)$. Poiché r non è reale e Q è immaginario, sicuramente $\bar{Q} \in \bar{r}$ ma $\bar{Q} \notin r$. Imponendo il passaggio per $\bar{Q} = (0, (1+i)/2, (1+i)/2)$ nel fascio di piani di asse r , si ricavano la condizione $\lambda + \mu = 0$ da cui, per $\lambda = 1, \mu = -1$, una equazione del piano cercato: $(1-i)x_1 + (1-i)x_2 + (-1+i)x_3 = 0$. Dividendo per $(1-i)$, o procedendo come nell'Osservazione 1.7.4, si ricava l'equazione reale di α : $x_1 + x_2 - x_3 = 0$.

Secondo modo: Controllo se r e \bar{r} sono parallele. Inizio determinando i numeri direttori di r , studiando i minori della matrice

$$\begin{pmatrix} i+1 & 2 & i-1 \\ 2i & 1+i & 0 \end{pmatrix}.$$

Ricavo che i numeri direttori di r sono $(-1, i+1, i)$ e i numeri direttori di \bar{r} sono $(-1, 1-i, -i)$: le due rette coniugate non sono quindi tra loro parallele, perché i loro numeri direttori non sono proporzionali.

Le rette r e \bar{r} si intersecano dunque in un punto reale P , le cui coordinate si trovano facilmente separando le parti reale e immaginaria delle equazioni di r e risolvendo il sistema:

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 - x_3 - 1 = 0 \\ x_1 + x_3 = 0 \\ x_2 - 1 = 0 \end{cases}.$$

Risulta $P(-1/2, 1, 1/2)$. So che il piano α passa per P e la sua giacitura è generata dai numeri direttori di r e \bar{r} . Il piano α ha dunque equazione cartesiana della forma $x_1 + x_2 - x_3 + d = 0$ e il coefficiente d viene calcolato imponendo il passaggio per il punto P (quindi $d = 0$). L'equazione cartesiana del piano α è $x_1 - x_2 - x_3 = 0$.

10) **Una retta di seconda specie** Se

$$r : \begin{cases} (1+i)x_1 + 2x_2 - (1-i)x_3 - 1 = 0 \\ 2ix_1 + (1-i)x_2 - 1 = 0 \end{cases}$$

per determinare di quale specie è r occorre studiare

$$\operatorname{rg} \begin{pmatrix} 1+i & 2 & i-1 & -1 \\ 2i & 1-i & 0 & -1 \\ 1-i & 2 & -i-1 & -1 \\ -2i & 1+i & 0 & -1 \end{pmatrix} = \operatorname{rg} \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \operatorname{rg} \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Ma

$$\det \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} = -\det \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 2 & -1 & 0 \end{pmatrix} = -\det \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 2 & 1 & 0 \\ 2 & -1 & 0 \end{pmatrix} \neq 0.$$

Le rette coniugate non sono complanari e r è di seconda specie.

11) Se r è una retta di seconda specie e P è un punto reale, allora esiste una unica retta s reale per P complanare con r e complanare con \bar{r} . La retta s è l'intersezione tra l'unico piano α per r e per P ed il suo coniugato $\bar{\alpha}$ (che contiene P e \bar{r}). Si osservi che $\alpha \cap \bar{\alpha}$ è necessariamente non vuoto, perché contiene P , e dunque è una retta reale, che risulta essere incidente sia r che \bar{r} .

Per $P(1, 0, 0)$ e $r : (1+i)x_1 + 2x_2 - (1-i)x_3 - 1 = 0, 2ix_1 + (1-i)x_2 - 1 = 0$ come nel punto precedente, risulta $s : (1+i)x_1 + 3(1+i)x_2 + (-3+i)x_3 - 1 - i = 0, (1-i)x_1 + 3(1-i)x_2 + (-3-i)x_3 - 1 + i = 0$.