Lezione 3 Geometria I

Federico De Sisti

2024-03-21

1 Nella lezione precedente...

Abbiamo introdotto i sottospazi affini di (A, V) come i sottospazi del tipo

$$p + W \quad W \subseteq V \text{ sottospazio vettoriale.}$$

Ricordiamo anche che $p + W = q + W \Leftrightarrow \overrightarrow{PQ} \in W$

2 Nuova lezione

Osservazione
Se $\Sigma_1 = p_1 + W_1$, $_2 = p_2 + W_2$ sono sottospazi affini , la loro intersezione, se non vuota, è un sottospazio affine. Infatti $p \in \Sigma_1 \cap \Sigma_2$

$$\Sigma_1 \cap \Sigma_2 = p + W_{12}.$$

Lemma 1
$\emptyset \neq S \subset A \quad p, q \in S$
$H_p = \{\overrightarrow{px} \mid x \in S\}$ $H_q = \{\overrightarrow{qy} \mid y \in S\}$
Allora $< H_p >=< H_q >$ *e* $p+ < H_p >= q+ < H_q >$
(sottospazio generato da S*)*

Dimostrazione
$v_0 = \overrightarrow{pq}$ $v_0 \in H_p$ $-v_0 = \overrightarrow{qp} \in H_q$
$H_p \ni \overrightarrow{px} = \overrightarrow{pq} + \overrightarrow{qx} = v_0 + \overrightarrow{qx} \in < H_q >$
$H_p \subseteq < H_q > \Rightarrow < H_p > \subseteq < H_q >$
$H_q \ni \overrightarrow{qy} = \overrightarrow{qp} + \overrightarrow{py} \in < H_q > \Rightarrow < H_q > \subseteq < H_p >$
Quindi ¡$H_p >=< H_q >$
$\overrightarrow{pq} \in < H_p >=< H_q >$
$p+ < H_p >= q+ < H_q >$ $\square$

Nomenclatura 1
Σ_1, Σ_2 *sottospazi affini*

$$\Sigma_1 \vee \Sigma_2 := \textit{sottospazio generato da } \Sigma_1 \cup \Sigma_2.$$

Lemma 2
Siano $\Sigma_i = p_i + W_i, \quad i = 1,2$ *sottospazi affini. Allora*
(a) $\Sigma_1 \cap \Sigma_2 \neq \emptyset \Leftrightarrow \overrightarrow{p_1p_2} \in W_1 + W_2$
(b) $\Sigma_1 \vee \Sigma_2 = p_1 + (W_1 + W_2 + < \overrightarrow{p_1p_2} >)$

Dimostrazione
(a) $p_0 \in \Sigma_1 \cap \Sigma_2$ *allora* $\Sigma_1 = p_0 + W_1 \quad _2 = p_0 + W_2$
$\exists w_i \in W_i, \quad i = 1,2 \quad t.c$
$p_1 = p_0 + W_1, p_2 = p_0 + W_2$
$\overrightarrow{p_1p_2} = w_2 - w_1 \in W_1 + W_2$
Viceversa, se $\overrightarrow{p_1p_2} = w_1 + w_2, w_1 \in W_1, w_2 \in W_2$
$p_2 = p_1 + \overrightarrow{p_1p_2} = p_1 + w_1 + w_2$
$p_2 - w_2 = p_1 + w_1 \in \Sigma_1 \cap \Sigma_2$
(2) Dato $x \in \Sigma_1 \cup \Sigma_2$*, risulta*
$\overrightarrow{p_1x} \in W_1$ *se* $x \in \Sigma_1$
oppure

$$\overrightarrow{p_1x} \in \overrightarrow{p_1p_2} + W_2 \quad (\overrightarrow{p_1x} = \overrightarrow{p_1p_2} + \overrightarrow{p_2x}).$$

Dunque la giacitura di $\Sigma_1 \vee \Sigma_2$ *è*

$$W_1 + W_2 + < \overrightarrow{p_1p_2} > .$$

□

3 Posizioni Reciproche di sottospazi affini

Definizione 1
Siano Σ_1, Σ_2 *sottospazi affini di* (A, V) *di giacitura rispettivamente* W_1, W_2
Diciamo che
1) Σ_1, Σ_2 *sono **incidenti**, se* $\Sigma_1 \cap \Sigma_2 \neq \emptyset$
2)Σ_1, Σ_2 *sono **paralleli** se* $W_1 \subseteq W_2$ *p* $W_2 \subseteq W_1$
3) Σ_1, Σ_2 *sono **sghembi** se* $\Sigma_1 \cap \Sigma_2 = \emptyset$ *e* $W_1 \cap W_2 = \{0\}$

Osservazione
Queste posizioni non sono mutuamente esclusive e non costituiscono tutte le possibilità

4 Esercizi Elementari

Esercizio 1
Dire se $p = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix}$ appartiene alla retta per $\begin{pmatrix} 1 \\ 5 \\ 4 \end{pmatrix}$ e direzione $\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ **Svolgimento**
Scriviamo l'equazione parametrica della retta

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 5 \\ 4 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 5 \\ 4 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \qquad \begin{cases} t = 0 \\ t = -5 \end{cases} .$$

alternativamente avrei potuto cercare le coordinate cartesiane

---

Esercizio 2
Scrivere le equazioni parametriche e cartesiane per il piano contenente

$$A = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

$P = A + t\overrightarrow{AB} + s\overrightarrow{AC}$
$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + t \left(\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right) + s \left(\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right)$
$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + s \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$
$\begin{pmatrix} x_1 - 1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \in < \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} >$
$det \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ x_1 - 1 & x_2 & x_3 \end{pmatrix} = 0 \quad \Rightarrow \quad x_1 = 1$

Esercizio 3
Scrivere equazioni per il piano identificato dalla retta
$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ e dal punto $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$

Svolgimento
modo 1, scelgo due punti distinti sulla retta e riduco al punto precedente
modo 2, sia $q = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$, $v = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ e $O = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$
considero il piano $P = q + tv + s\overrightarrow{Oq}$
$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + s \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$
$det \begin{pmatrix} x_1 - 1 & x_2 - 2 & x_3 - 3 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix} = 0$
$3(x_1 - 1) - (x_3 - 3) = 0$
$3x_1 - x_3 = 0$
Fascio di piani di asse una retta r è l'insieme dei piani che contengono r

$$r = \begin{cases} a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 = 0 \\ b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 = 0 \end{cases} .$$

Equazione del fascio

$$\lambda(a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4) + \mu(b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4) = 0 \quad \lambda, \mu \in \mathbb{K}.$$

Ogni piano del fascio si ottiene con una coppia $(\lambda, \mu) \in \mathbb{K}^2$. Coppie proporzioneali per un fattore non nulla invidiano lo stesso piano

Lezione 4 Geometria I

Federico De Sisti

2024-03-16

1 Formula di Grassmann affine

Richiami dalla scorsa lezione
Dati $\Sigma_i = p_i + W_i, \quad i = 1, 2$ sottospazi affini (di $(A, V, +)$) allora:

$$\Sigma_1 \cap \Sigma_2 \neq \emptyset \Leftrightarrow \quad \overrightarrow{p_1p_2} \in W_1 + W_2.$$

$$\Sigma_1 \vee \Sigma_2 = p_1 + (W_1 + W_2 + < \overrightarrow{p_1p_2} >).$$

Inoltre Σ_1, Σ_2 si dicono:
incidenti se $\Sigma_1 \cap \Sigma_2 \neq \emptyset$
paralleli se $W_1 \subseteq W_2$ o $W_2 \subseteq W_1$
sghembi se $\Sigma_1 \cap \Sigma_2 = \emptyset$ e $W_1 \cap W_2 = \{0\}$

Proposizione 1 (Fromula Grassmann per spazi affini)
Siano Σ_1, Σ_2 sottospazi affini di A, Allora

$$dim(\Sigma_1 \vee \Sigma_2) \leq dim\Sigma_1 + dim\Sigma_2 - dim(\Sigma_1 \cap \Sigma_2).$$

e vale l'uguaglianza se Σ_1, Σ_2 sono incidenti o sghembi
si usa la notazione $dim(\emptyset) = -1$

Dimostrazione
- Supponiamo Σ_1, Σ_2 incidenti, allora esiste

$$p_0 \in \Sigma_1 \cap \Sigma_2$$
$$\Sigma_1 = p_0 + W_1, \Sigma_2 = p_0 + W_2$$
$$\Sigma_1 \cap \Sigma_2 = p_0 + W_1 \cap W_2, \Sigma_1 \vee \Sigma_2 = p_0 + W_1 + W_2$$

dunque vale l'uguaglianza per Grassman vettoriale
- Sia ora $\Sigma_1 \cap \Sigma_2 = \emptyset$ allora $\Sigma_i = p_i + W_i \quad i = 1, 2$
risulta $\overrightarrow{p_1p_2} \notin W_1 + W_2$ (per lemma)

$$dim(\Sigma_1 \vee \Sigma_2) = dim(W_1 + W_2 + < \overrightarrow{p_1p_2}) = dim(W_1 + W_2) + 1 \leq$$
$$\leq dim(W_1) + dim(W_2) - (-1) = dim(W_1) + dim(W_2) + dim(\Sigma_1 \cap \Sigma_2)$$

e vale l'uguaglianza se e solo se $dim(W_1) + dim(W_2) = dim(W_1 + W_2)$ ovvero $W_1 \cap W_2 = 0$ ovvero se Σ_1, Σ_2 sono sghembi □ □

Proposizione 2
siano Σ_1, Σ_2 sottospazi affini di $\mathbb{A}^n(\mathbb{K})$ definiti dai sistemi lineari

$$A_i X = b_i \ \ i = 1, 2.$$

Allora:
(a) Σ_1, Σ_2 sono incidenti se e solo se

$$rk\begin{pmatrix} A_1 & b_1 \\ A_2 & b_2 \end{pmatrix} = rk\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix}.$$

detto r tale rango, $dim(\Sigma_1 \cap \Sigma_2) = n - r$
(b) Σ_1, Σ_2 sono sghembi se e solo se

$$rk\begin{pmatrix} A_1 & b_1 \\ A_2 & b_2 \end{pmatrix} \geq rk\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} = n.$$

(c) Se

$$rk\begin{pmatrix} A_1 & b_1 \\ A_2 & b_2 \end{pmatrix} \geq rk\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} = r < n.$$

allora Σ_1 (rispetto a Σ_2) contiene un sottospazio affine di dimensione $n - r$ parallelo a Σ_2 (rispetto a Σ_1)

Dimostrazione
(a) $\Sigma_1 \cap \Sigma_2 \neq \emptyset \Leftrightarrow$ il sistema è compatibile quindi tutto segue da Rochè-Capelli

(b) la disuguaglianza tra i ranghi dice che $\Sigma_1 \cap \Sigma_2 = \emptyset$;
il fatto che $rk\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} = n$ implica che $W_1 \cap W_2 = 0$
(c) Di nuovo la disuguaglianza dei ranghi implica $\Sigma_1 \cap \Sigma_2 = \emptyset$;
Se ora $W_1 \cap W_2 = W$ allora $dim(W_1 \cap W_2) = n - r$
Scelto $p_1 \in \Sigma_1$ risulta
$p_1 + W \subset \Sigma_1$ ($W_1 \cap W_2 = W$ sottospazio di W_1)
e $W \subset W_2 \Rightarrow p_1 + W$ è parallelo a Σ_2 e $dim(p_1 + W) = dim(W) = n - r$ $\square$ $\square$

Esempio
$\mathbb{A}$ π_1, π_2 piani distinti
A_1, A_2 vettori riga ($A_1 = (a_{11} \ a_{12} \ a_{13})$
$C = \begin{pmatrix} A_1 & b_1 \\ A_2 & b_2 \end{pmatrix} \in M_{2,4}(\mathbb{R})$
piani distinti $\Rightarrow$ $rk(C) = 2$
$rg\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} = 2 \ \Rightarrow \pi_1 \cap \pi_2$ *è una retta*
$rg\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} = 1 \ \Rightarrow \pi_1 \cap \pi_2 = \emptyset$ *piani paralleli poiché $W_1 = W_2$*

$\mathbb{A}^4, \pi_1 \pi_2$ piani distinti tali che $rk(A_i|b_i) = 2$

$$C = \left(\begin{array}{c|c} A_1 & b_1 \\ \hline A_2 & b_2 \end{array}\right) \in M_{45} \quad rk(C) \leq 4.$$

rk $\binom{A_1}{A_2}$	rk(C)	$\pi_1 \cap \pi_2$
4	4	{p}
3	4	$\emptyset$ e W_1, W_2 hanno una direzione in comune
3	3	r
2	3	$\emptyset$

Lezione 5 Geometria I

ebbene sì, sta accadendo davvero

Federico De Sisti

2024-03-17

V, V' spazi vettoriali su $\mathbb{K}, (A, V, +), (A', V', +)$ spazi affini

Definizione 1
$f : A \to A'$ è un'applicazione affine se esiste un'applicazione lineare $\phi : V \to V'$ tale che:

$$f(p + v) = f(p) + \phi(v) \quad \forall p \in A, \forall v \in V.$$

$$\left(\textit{ovvero} \quad \begin{array}{ll} f(Q) = f(P) + \phi(\overrightarrow{PQ}) & \forall P, Q \in A \\ \overrightarrow{f(P)f(Q)} = \phi(\overrightarrow{PQ}) & \forall P, Q \in A \end{array} \right)$$

Nomenclatura
Se f è biunivoca, f è detto isomorfismo affine
Un isomorfismo affine $A \to A$ è detto affinità. **Oss**
vedremo che le affinità formano un gruppo rispetto alla composizione di applicazione che denoteremo come $\text{Aff}(A)$

Esempio
$Ov_1...vn$ rifermento affine in A

$$f : \mathbb{A} \to \mathbb{A}^n \quad f(p) = \begin{pmatrix} x_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{pmatrix} \quad e \quad \overrightarrow{OP} = \sum_{i=1}^{n} x_i v_i.$$

Dico che f è un isomorfismo affine con associato isomorfismo lineare
$\varphi(\sum_{i=1}^{n} x_i v_0) = \begin{pmatrix} x_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{pmatrix}$
Verifichiamo che $\overrightarrow{f(P)f(Q)} = \varphi(\overrightarrow{PQ})$
$\overrightarrow{OQ} = \sum_{i=1}^{n} y_i v_i \quad f(Q) = \begin{pmatrix} y_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n \end{pmatrix} \overrightarrow{f(P)f(Q)} = \begin{pmatrix} y_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 - x_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n - x_n \end{pmatrix} =$
$\varphi(\sum_{i=1}^{n}(y_i - x_i)v_i) = \varphi(\overrightarrow{OQ} - \overrightarrow{OP}) = \varphi(\overrightarrow{PQ})$

3 Esempi di affinità
I Transazioni
Fissato $v \in V$ definiamo
$t_v : A \to A, \quad t_v(P) = p + v$ Dico che t_v è un'affinità con assoviato isomorfismo Id_V dato che:
$t_V(p + w) = (p + w) + v = p + (w + v) = p + (v + w) = (p + v) + w =$
$= t_V(p) + w = t_V(p) + \varphi(w) \leftarrow Id_V$
la biunicità segue dagli assiomi per A

II Simmetria rispetto ad un punto
$\sigma_C(p) = C - \overrightarrow{CP}$
Dico che σ_C è un'affinità con parte lineare $\varphi = -Id$
$\sigma_C(p+v) = c - \overrightarrow{CQ} \ \ Q = p + v \ \ v = \overrightarrow{PQ}$
$\sigma_C(p) + \phi(v) = c - \overrightarrow{CP} - v = c - \overrightarrow{CP} - \overrightarrow{PQ} = c - \overrightarrow{CQ}$
III Otetia di centro O e fattore $\gamma \in R\backslash\{0\}$

$$\omega_{O,\gamma}(p) = O + \gamma\overrightarrow{OP}.$$

è un'affinità con parte lineare $\phi = \gamma Id_V$
$\omega_{O,\gamma}(p+v) = O+\gamma\overrightarrow{OQ} = O+\gamma(\overrightarrow{OP}+\overrightarrow{PQ}) = (O+\gamma\overrightarrow{OP})+\gamma\overrightarrow{PQ} = \omega_{O,\gamma}(p) = \varphi(v)$

Lemma 1
Fissato $O \in \mathbb{A}$, per ogni $O' \in \mathbb{A}$ e per ogni $\varphi \in GL(V)$ esiste un'unica affinità tale che $f(O) = O'$ e che ha φ come isomorfismo associato

Dimostrazione
esistenza
Pongo $f(P) = O' + \varphi(\overrightarrow{OP} \quad f(O) = O' + \varphi(\overrightarrow{OQ}) = O' + O = O'$
$f(p+v) = O'+\varphi(\overrightarrow{OQ}) = O'+\varphi(\overrightarrow{OP}+\overrightarrow{PQ}) = O'+\varphi(\overrightarrow{OP})+\varphi(\overrightarrow{PQ}) = f(p)+\varphi(v)$
dove abbiamo usato $Q = p + v \quad v = \overrightarrow{PQ}$
unicità
Supponiamo che g abbia le stesse proprietà di f, allora
$\overrightarrow{f(O)f(p)} = \varphi(\overrightarrow{OP}) = \overrightarrow{g(O)g(p)} = \overrightarrow{O'f(p)} = \overrightarrow{f(O)g(p)} \Rightarrow f(p) = g(p)$
$\Rightarrow f = g$ □ □

Definizione 2
Definiamo $Aff_O(A) = \{f \in Aff(A) | f(O) = O\} \leq Aff(A)$
tale gruppo è anche isomorfo a $GL(V)$

Lemma 2
Sia $O \in A, f \in Aff(A)$ Esistono $v, v' \in V$ e $g \in Aff_O(A)$, univocamente determinate da f tale che

$$f = g \circ t_v = t_{v'} \circ g.$$

Dimostrazione

poniamo $v = -\overrightarrow{Of^{-1}}, \quad v' = \overrightarrow{Of(O)}, \quad g = f \circ t_{-v'}, \quad g' = t_{-v} \circ f$
Allora

$$(g \circ t_v) = (f \circ t_{-v})t_v = f \circ (t_{-v} \circ t_v) = f.$$

quindi vale $f = g \circ t_v$

$$t_{v'} \circ g' = t_{v'} \circ (t_{-v'} \circ f) = (t_{v'} \circ t_{-v'}) \circ f = f.$$

Vedremo che $g = g'$, per cui ho dimostrato anche $f = t_{v'} \circ g$

$$g(O) = (f \circ t_{-v})(O) = f(O - v) = f(O + \overrightarrow{Of^{-1}(O)}) =$$
$$= f(O + f^{-1}(O) - O) = f(f^{-1}(O)) = f(O + f^{-1}(O)) = 0$$

$$g'(O) = t_{-v}(f(O)) = f(O) - v' = f(O) - \overrightarrow{Of(O)} = 0.$$

d'altra parte g, g' hanno lo stesso isomorfismo associato e mandano entrambi O in O, dunque coincidono $\square$ **Descrizione in coordinate delle affinità di $\mathbb{A}^n$**

$$\delta(x) = f(O) + L_A X = AX + b.$$

$$b = f(O) \quad \varphi = L_A \qquad \begin{aligned} L_A : \mathbb{K}^n &\to \mathbb{K}^n \\ X &\to AX \end{aligned}$$

con $det(A) \neq 0$ ovviamente
Viceversa, per $A \in GL(n, \mathbb{K}), b \in \mathbb{K}^n$

$$f_{A,b} = AX + b.$$

$f_{A,b}$ è un'affinità con parte lineare L_A

$$f_{A,b}(x + v) = f_{A,b}(x) + \varphi(v)$$
$$f_{A,b}(x + y)) = f_{A,b}(x) + L_A y$$

$$f_{A,b}(x+y) = A(x+y)+b = AX + AY + b = (AX + b) + AY = f_{A,b}(x) + L_A(y).$$

$$\text{Aff}(\mathbb{A}^n = \{f_{A,b} | A \in GL(n, \mathbb{K}), b \in \mathbb{K}^n\}.$$

Osservazione
Aff $\mathbb{A}^n$ è un gruppo per composizione

$$\begin{aligned} (f_{A,b} \circ f_{C,d})(x) &= f_{A,b}(f_{C,d}(x)) = \\ &= f_{A,b}(CX + d) = \\ &= A(CX + d) + b = \\ &= ACX + Ad + b = f_{AC,Ad+b}(x) \end{aligned}$$

Osservo che $f_{I,O}$ è l'elemento neutro

$$(f_{A,b} \circ f_{I,O})(x) = f_{A,b}(Ix + O) = f_{A,b}(x)$$
$$(f_{I,O} \circ f_{A,b})(x) = f_{A,b}(x)$$

Manca solo dimostrare l'esistenza dell'inverso di $f_{A,b}$,
ovvero che esiste $f_{C,d}$ tale che $f_{A,b} \circ f_{C,d} = f_{C,d} \circ f_{A,b} = f_{I,O}$

$$\begin{aligned}
(f_{A,b} \circ f_{C,d}(x) = f_{I,O}(x) = x \\
ACX + Ad + b + X \quad \forall\ X \in \mathbb{K}^n \\
\Rightarrow AC = Id \quad Ad + b = 0 \\
C = A^{-1} \quad d = -A^{-1}b \\
(f_{A,b})^{-1} = f_{A^{-1},-A^{-1}b}
\end{aligned}$$

Lezione 6 Geometria I

Federico De Sisti

2024-03-13

1 Equivalenza per affinità

Definizione 1
Equivalenza per affinità Due sottoinsiemi $F, F' \subseteq A$ spazio affine, si dicono affinamente equivalenti se esiste $f \in Aff(A)$ tale che $f(F) = F'$
Definiamo anche una proprietà ***affine*** *se è equivalente per affinità*

Proposizione 1
Se $f \in Aff\,(A)$ e F un sottospazio affine di A di dimensione k, allora $f(F)$ è un sottospazio affine di dimensione k

Dimostrazione
$F = p + W \quad dim(W) = k$ Sia φ la parte lineare di f, che è un omomorfismo $\varphi : V \to V$.
Poniamo $F' = f(p) + W'$ dove $W' = \varphi(W)$
Chiaramente, $dim(W') = dim(\varphi(W)) = k$
risulta $f(F) = F'$

$$Q \in F \qquad \overrightarrow{f(P)f(Q)} = \varphi(\overrightarrow{PQ}) \in \varphi(W) = W'.$$

e dato che $\overrightarrow{PQ} \in W \ \Rightarrow f(F) \subseteq F'$ Viceversa, dato $R \in F$

$$\overrightarrow{Pf^{-1}(R)} = \varphi^{-1}(\overrightarrow{f(P)R}) \in W \Rightarrow f^{-1}(R) \in F, R \in f(F).$$

dunque F'$\subseteq f(F)$ $\square$

Teorema 1
Sia $(A, V, +)$ uno spazio affine di dimensione n e siano $\{p_0, \dots, p_n\}$, $\{a_0, \dots, a_n\}$ due $(n+1)$-ple di punti indipendenti. Allora esiste un'unica affinità $f \in Aff(A)$ tale che $f(p_i) = q_i, \quad 0 \le i \le n$

Dimostrazione
Per ipotesi $\{\overrightarrow{p_0p_1}, \dots, \overrightarrow{p_0p_n}\}, \{\overrightarrow{q_0q_1}, \dots, \overrightarrow{q_0q_n}$ Sono basi di V, dunque esiste un unico operatore lineare $\varphi \in GL(V)$ tale che $\varphi(\overrightarrow{p_0p_i} = \overrightarrow{q_0q_i}) \quad 1 \le i \le n$
Pongo $f(p) = q_0 + \varphi(\overrightarrow{p_0p})$
$f(p_i) = q_0 + \varphi(\overrightarrow{p_0p_i} = q_0 + \overrightarrow{q_0q_i} = q_i$
f è chiaramente biettiva $\overrightarrow{f(p)f(p')} = \overrightarrow{q_0f(p)} - \overrightarrow{q_0f(p')} = \varphi(\overrightarrow{p_0p'}) - \varphi(\overrightarrow{p_0p}) =$
$= \varphi(\overrightarrow{p_0p'} - \overrightarrow{p_0p}) = \varphi(pp')$
L'unicità di f segue da quella di φ e dal fatto che $f(p_0) = q_0$ (un'affinità è determinata dalla parte lineare e dall'immagine di un punto. $\square$

Esempio
Determino $f \in Aff(\mathbb{A}^2)$ *t.c.*

$$f\begin{pmatrix}2\\1\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}1\\2\end{pmatrix}, \quad f\begin{pmatrix}-1\\-1\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}1\\1\end{pmatrix}, \quad f\begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}2\\-1\end{pmatrix}.$$

$$\{\overrightarrow{p_0p_1}, \overrightarrow{p_0p_2}\} \to \{\overrightarrow{q_0q_1}, \overrightarrow{q_0q_2}\}$$

Cercherò quindi $\varphi \in GL(V)$ *tale che*

$$\varphi(\overrightarrow{p_0p_1}) = \overrightarrow{q_0q_1}, \varphi(\overrightarrow{p_0p_2}) = \overrightarrow{q_0q_2}$$

$$\varphi\begin{pmatrix}-3\\-2\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}0\\-1\end{pmatrix}, \quad \varphi\begin{pmatrix}2\\0\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}1\\-3\end{pmatrix}$$

$$P = \{\begin{pmatrix}-3\\-1\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}-2\\0\end{pmatrix}\} \quad \varepsilon\{\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}\}$$

$$[\varphi]^{\varepsilon}_{B} = \begin{pmatrix}0 & 1\\-1 & -3\end{pmatrix} \qquad [Id]^{\varepsilon}_{B} = \begin{pmatrix}-3 & -2\\-2 & 0\end{pmatrix}$$

$$[\varphi]^{\varepsilon}_{\varepsilon} = [\varphi]^{\varepsilon}_{B}[Id]^{B}_{\varepsilon} = [\varphi]^{\varepsilon}_{B}[Id]^{\varepsilon}_{B}{}^{-1} =$$

$$= \begin{pmatrix}0 & 1\\-1 & -3\end{pmatrix}\begin{pmatrix}0 & -\frac{1}{2}\\-\frac{1}{2} & \frac{3}{4}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}-\frac{1}{2} & \frac{3}{4}\\\frac{3}{2} & -\frac{7}{4}\end{pmatrix}$$

$$f\begin{pmatrix}x_1\\x_2\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}1\\2\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}-\frac{1}{2} & \frac{3}{4}\\\frac{3}{2} & -\frac{7}{4}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x_1-2\\x_2-1\end{pmatrix}$$

$$f(p) = q_0 + \varphi(\overrightarrow{p_0p})$$

$$f\begin{pmatrix}x_1\\x_2\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\frac{9}{4}\\\frac{11}{4}\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}-\frac{1}{2} & \frac{3}{4}\\\frac{3}{2} & -\frac{7}{4}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x_1\\x_2\end{pmatrix} = (t_V \circ L_A)\begin{pmatrix}x_1\\x_2\end{pmatrix} \quad v = \begin{pmatrix}\frac{9}{4}\\\frac{11}{4}\end{pmatrix}$$

Corollario
$(A, V, +)$ *spazio affine di dimensione* n
1. per ogni $1 \leq k \leq n+1$ *due qualsiasi* k*-uple di punti sono affinamente equivalenti*
2. Due sottospazi affini sono affinamente equivalenti se e solo se hanno al stessa dimensione

Dimostrazione
1. Se $\{p_0, \ldots, p_{k-1}\}, \{q_0, \ldots, q_{k-1}\}$ *sono le* k*-ple date, completiamole a* $(n+1)$*-ple di punti indipendenti* $\{p_0, \ldots, p_n\}, \{q_0, \ldots, q_n\}$ *e usiamo il teorema 2. Abbiamo già visto che un'affinità preserva la dimensione dei sottospazi.*
Viceversa, se S, S' *sono sottospazi affini della stessa dimensione* k*, possiamo trovare* $k+1$ *punti indipendenti in* S*, e* $k+1$ *punti indipendenti in* S' *tali che*

$$S = \overrightarrow{p_0, \ldots, p_k}, \quad S' = \overrightarrow{q_0, \ldots, q_n}.$$

Per la parte 1, esiste un'affinità che manda P_i *in* q_i*,* $0 \leq i \leq k$*, dunque*

$$f(S) = S'.$$

$\square$

2 Proiezioni e Simmetrie

Definizione 2 (Proiezioni e Simmetrie)
In $(A, V, +)$ *Sia* L *un sottospazio affine,* $L = P + W$
Sia U *un complementare di* W *in* V*, ovvero* $V = W \bigoplus U$

$$\begin{array}{rl} \pi_W^U(w+u) = w & \pi_W^U : V \to V \\ \sigma_W^U(w+u) = w-u & \sigma_W^U : V \to V \\ p_L^U(x) = p + \pi_W^U(\overrightarrow{px}) & \textit{proiezione su } L \textit{ parallela a } U \\ s_L^U(x) = p + \sigma_W^U(\overrightarrow{px}) & \textit{simmetria di asse } L \textit{ e direzione } U \end{array}$$

Lezione 7 Geometria I

Federico De Sisti

2024-03-14

1 Esercizi Vari

Piccola definizione per esercizio
$\mathbb{A}^n_{\mathbb{K}}$ $\text{Aff}(\mathbb{A}^n_{\mathbb{K}}) = \{f_{a,b} | A \in GL(n, \mathbb{K}), b \in \mathbb{K}^n\}$

$$f_{A,b}(X) = AX + b$$
$$\left(\begin{array}{c|c} 1 & 0 \\ \hline b & A \end{array}\right)$$

Esercizio 1

$$f : \mathbb{A}^3_{\mathbb{R}} \to \mathbb{A}^3_{\mathbb{R}}$$
$$f\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad f\begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$$
$$\varphi(e_1) = e_1 + e_3, \quad \varphi(e_2) = e_1 - e_2$$
e chiamiamo
$$p_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad q_0 = \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad p_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad q_1 = \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Dove φ è la parte lineare di f.
Trovare l'espressione di f in coordinate affini canoniche
e trovare i punti fissi di f.
Svolgimento

$$\varphi\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \varphi\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \varphi(\overrightarrow{p_0p_1}) = \overrightarrow{q_0q_1}$$
$$\varphi(\begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}) = \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$
$$\varphi\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$$
$$\varphi\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \varphi(\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}) = \varphi\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \varphi\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

Se $\varepsilon = \{e_1, e_2, e_3\}$ è la stessa base standard di $\mathbb{R}^3$

$$[\varphi]^{\varepsilon}_{\varepsilon} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

$$f\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x_1-1 \\ x_2-2 \\ x_3 \end{pmatrix}$$
$$f\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$
$$f\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1+x_2-1 \\ -x_2+x_3+1 \\ x_1-x_3 \end{pmatrix}$$

Dove abbiamo utilizzato il fatto che $F(p) = f(p_0) + \varphi(\overrightarrow{p_0p}) = q_0 + \varphi(\overrightarrow{p_0p})$
Cerchiamo ora i punti fissi

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

Esercizio 2
Dimostrare che un'affinità di piano affine che ha tre punti fissi non allineati è l'identità
Svolgimento
Osservo che in un piano affine tre punti p_0, p_1, p_2 sono non allineati se e solo se $\overrightarrow{p_0p_1}, \overrightarrow{p_0p_2}$ sono linearmente indipendenti, ovvero p_0, p_1, p_2 sono affinamente indipendenti. D'altra parte, un'affinità è univocamente determinatta dall'immagine di tre punti indipendenti. L'identità è un'affinità con (almeno) tre punti fissi. Per l'unicità si ha $f = Id$.

Esercizio 3
In $\mathbb{A}^2_{\mathbb{R}}$ consideriamo la retta $r : x + y = 1$
i. Determinare le affinità che fissano tutti i punti di r
ii. Tra le affinità determinate in (i), trovare quelle che mandano $\binom{1}{3}$ in $\binom{2}{-2}$
iii. Tra le affinità determinate in i, trovare le traslazioni
Svolgimento

$$f\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e & b \\ c & d \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} \quad ad - bc \neq 0.$$

Basta scegliere $f(p) = p$ per due punti distinti $p \in r$. Posso scegliere $\binom{1}{0}, \binom{0}{1}$

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \end{cases} \qquad \begin{cases} a + \alpha = 1 \\ c + \beta = 0 \\ d + \alpha = 0 \\ d + \beta = 1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} a = 1 - \alpha \\ b = -\alpha \\ c = -\beta \\ d = 1 - \beta \end{cases} \qquad f\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-\alpha & -\alpha \\ -\beta & 1-\beta \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$$

$(1-\alpha)(1-\beta)-\alpha\beta = 1-\alpha-\beta \neq 0 \quad \alpha+\beta \neq 1$

ii $\begin{pmatrix} 1-\alpha & -\alpha \\ -\beta & 1-\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ -2 \end{pmatrix}$

$\begin{cases} 1--3\alpha+\alpha = 2 \\ -\beta+3-3\beta+\beta = -2 \end{cases} \qquad \begin{cases} -3\alpha = 1 \\ -3\beta = -5 \end{cases} \qquad \begin{cases} \alpha = -\frac{1}{3} \\ \beta = \frac{5}{3} \end{cases}$

iii $\left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ \hline \alpha & 1-\alpha & -\alpha \\ \beta & -\beta & 1-\beta \end{array}\right) \to \begin{pmatrix} 1-\alpha & \alpha \\ -\beta & 1-\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow \alpha = \beta = 0$

e quindi l'unica traslazione è l'identità

Nota

$$f_{A,b} = AX + b \quad f_{A,b} \circ f_{C,b} = f_{AC,Ad+b}$$

$$\left(\begin{array}{c|c} 1 & 0 \\ \hline b & A \end{array}\right) \in M_{(n+1)\times(n+1)}(\mathbb{K}) \qquad A \in M_{n\times n}(\mathbb{K})$$

$$\left(\begin{array}{c|c} 1 & 0 \\ \hline b & A \end{array}\right)\left(\begin{array}{c|c} 1 & 0 \\ \hline d & C \end{array}\right) = \left(\begin{array}{c|c} 1 & 0 \\ \hline Ad+b & AC \end{array}\right)$$

$$\left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ \hline b_1 & a_{11} & a_{12} \\ b_2 & a_{21} & a_{22} \end{array}\right)\left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ \hline d_1 & c_{11} & c_{12} \\ d_2 & c_{21} & c_{22} \end{array}\right) =$$

$$= \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ \hline b_1 + a_{11}d_1 + a_{12}d_2 & a_{11}c_{11} + a_{12}c_{21} & a_{11}c_{12} + a_{12}c_{22} \\ b_2 + a_{21}d_1 + a_{22}d_2 & a_{21}c_{11} + a_{22}c_{22} & a_{21}c_{12} + a_{22}c_{22} \end{array}\right)$$

Esercizio 4

In $\mathbb{A}^4_{\mathbb{Q}} \quad L : \begin{cases} x_1 - 3x_3 = 2 \\ x_2 + x_4 = 1 \end{cases} \qquad W =< \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -2 \end{pmatrix} >$

Scrivere le matrici delle proiezioni su L parallela a W e la matrice della simmetria di asse L e direzione W

Svolgimento

$L = P + W_1 \quad V = W_1 \oplus W_2$

$p_L^{W_2}(X) = P + \pi_L^{W_2}(\overrightarrow{px}) \qquad$ Cerco ora l'equazione parametrica di L

$s_L^{W_2}(X) = P + \sigma_L^{W_2}(\overrightarrow{px})$

$$\begin{cases} x_1 - 3x_3 = 2 \\ x_2 = x_4 = 1 \end{cases} \quad \rightarrow \begin{cases} x_1 = 2 + 3t \\ x_2 = 1 - s \\ x_3 = t \\ x_4 s \end{cases} \quad \rightarrow \quad \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + s \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$V + W : \begin{pmatrix} x_1 - 2 \\ x_2 - 1 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -2 \end{pmatrix} + \gamma \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \delta \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Qui il professore utilizza la sacra formula di Antani per giungere al seguente risultato
$\gamma = -2 + x_1 - 2x_3$

$\delta = -2 + 2x_2 + x_4 \quad p_L^W \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \gamma \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \delta \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$

$$\begin{array}{c|cccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline -4 & 3 & 0 & -6 & 0 \\ -1 & 0 & 2 & 0 & 1 \\ -2 & 1 & 0 & -2 & 0 \\ 2 & 0 & -2 & - & -2 \end{array}$$

$$s_L^W \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - \alpha \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} - \beta \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -2 \end{pmatrix} + \gamma \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \delta \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$\left(\begin{array}{c|cccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -8 & 5 & 0 & -12 & 0 \\ -2 & 0 & 3 & 0 & 2 \\ -4 & 2 & 0 & -5 & 0 \\ 4 & 0 & -4 & 0 & -3 \end{array}\right)$$

Lezione 8 Geometria I

Federico De Sisti

2024-03-18

1 Complementi

$\mathbb{A}$ spazio affine reale con associato spazio vettoriale V

Definizione 1 (Semiretta)
Possiamo definire la semiretta di origine $Q \in \mathbb{A}$ *e direzione* $v \in V \setminus \{0\}$

$$P = Q + tv, t \geq 0 \quad (\overrightarrow{QP} = tv, t \geq 0).$$

Definizione 2 (Segmento)
Possiamo definire il segmento di estremi $A, B \in \mathbb{A}$ $(A \neq B)$

$$P = A + t\overrightarrow{AB} \qquad 0 \leq t \leq 1.$$

i punti $p_1, \ldots, p_t$ che dividono il segmento AB in t parti uguali sono dati, cioè

$$\overrightarrow{AP_1} = \overrightarrow{p_1p_2} = \overrightarrow{p_2p_3} = \ldots = \overrightarrow{p_{t-1}B}.$$

sono dati da

$$\overrightarrow{AP_i} = \frac{i}{t}\overrightarrow{AB} \quad 1 \leq i \leq t-1.$$

In un riferimento affine $Oe_1 \ldots, e_n$, in cui

$$A = \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} \quad P_i = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}.$$

$$\begin{pmatrix} x_1^i - a_1 \\ \vdots \\ x_n^i - a_n \end{pmatrix} = \frac{i}{t} \begin{pmatrix} b_1 - a_1 \\ \vdots \\ b_n = a_n \end{pmatrix}.$$

$$\begin{pmatrix} x_1^i \\ \vdots \\ x_n^i \end{pmatrix} = \frac{1}{t} \begin{pmatrix} ib_1 (t-i) a_1 \\ \vdots \end{pmatrix}.$$

in particolare, il punto medio del segmento AB ha coordinate

$$\begin{pmatrix} \frac{a_1+b_1}{2} \\ \vdots \\ \frac{a_n+b_n}{2} \end{pmatrix}.$$

A, B, C non allineati

$$\overrightarrow{AP} = t\overrightarrow{AB} + k\overrightarrow{AC}.$$

se $t, n \geq 0$ e $t + n \leq 1$ allora abbiamo un triangolo ABC
se $0 \leq t, n \leq 1$ abbiamo il parallelogramma individuato da A, B, C

Osservazione

Questo procedimento funziona in ogni dimensione, Ad esempio se A,B,C,D sono quattro punti indipendenti

$$\overrightarrow{AP} = t\overrightarrow{AB} + k\overrightarrow{AC} + v\overrightarrow{AD}.$$

se $0 \leq, t, n, v \leq 1$ tetraedro di vertici ABCD
se $n, t, v \geq 0$ e $n + t + v \leq 1$ si ha un parallelogramma
in generale dati $p_0, \dots, p_k$ punti indipendenti:

$$\overrightarrow{p_0 p} = \sum_{i=1}^{k} t_i p_0 p_i, \quad \sum_{i=1}^{k} t_i \leq 1.$$

definisce il **k-simplesso di vertici** $p_0, \dots, p_k$

Definizione 3 (Sottosineime Convesso)
$S \subseteq \mathbb{A}$ si dice Convesso se per ogni $A, B \in S$ il segmento AB è contenuto in S

2 Cambiamenti di riferimento affine

Sia $(A, V, +)$ uno spazio affine n-dimensionale

$$R = Ee_1, \dots, e_n; \qquad R' = Ff_1, \dots, f_n \quad \text{due riferimenti affini.}$$

$$\varepsilon = \{e_1, \dots, e_n\}, \quad \Gamma = \{f_1, \dots, f_n\}$$

$$\overrightarrow{EP} = \sum_{i=1}^{n} x_i e_i \quad \overrightarrow{FE} = \sum_{i=1}^{n} b_i e_i \quad \overrightarrow{FP} = \sum_{i=1}^{n} y_i f_i.$$

$$A = (e_{ij}) = {}_{\varepsilon}(Id_V)_{\Gamma}.$$

$$\overrightarrow{FP} = \overrightarrow{FE} + \overrightarrow{EP} = -\overrightarrow{EF} + \overrightarrow{EP} = -\sum_{i=1}^{n} b_i e_i + \sum_{i=1}^{n} x_i e_i \tag{1}$$

$$\overrightarrow{FP} = \sum_{i=1}^{n} y_i f_i = \sum_{i=1, j=1}^{n} y_i a_{ij} - e_i \tag{2}$$

Comparando $(1), (2)$ troviamo

$$X = AY + b.$$

$$\begin{pmatrix} 1 \\ \hline X \end{pmatrix} = \left(\begin{array}{c|c} 1 & 0 \\ \hline b & A \end{array}\right) = \begin{pmatrix} 1 \\ \hline Y \end{pmatrix}.$$

$$Y = A^{-1}X - A^{-1}b.$$

3 Esercizi

Trovare l'affinità $F : \mathbb{A}^2 \to \mathbb{A}^2$ tale che

$$f\left(\begin{smallmatrix} 1 \\ 3 \end{smallmatrix}\right) = \left(\begin{smallmatrix} 1 \\ 1 \end{smallmatrix}\right) \quad f(r) = r', \quad f(s) = s.$$

dove $r : x = 0, \quad s : 2x - y = 0 \quad r' : x - 2y = 1$

---

f è del tipo $f\left(\begin{smallmatrix} x_1 \\ x_2 \end{smallmatrix}\right) = \left(\begin{smallmatrix} e & b \\ c & d \end{smallmatrix}\right)\left(\begin{smallmatrix} x_1 \\ x_2 \end{smallmatrix}\right) + \left(\begin{smallmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{smallmatrix}\right)$ con $ad + bc \neq 0$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \alpha_1 & a & b \\ \alpha_2 & c & d \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} \dfrac{1}{f\left(\begin{smallmatrix} x_1 \\ x_2 \end{smallmatrix}\right)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \alpha_1 & a & b \\ \alpha_2 & c & d \end{pmatrix} \left(\begin{smallmatrix} 1 \\ x_1 \\ x_2 \end{smallmatrix}\right).$$

Imponiamo le condizioni del testo

$$f\left(\begin{smallmatrix} 1 \\ 3 \end{smallmatrix}\right) = \left(\begin{smallmatrix} 1 \\ 1 \end{smallmatrix}\right) \to \begin{cases} a + \alpha_1 + 3b = 1 \\ \alpha_2 + c + 3d = 1 \end{cases}.$$

Un punto in $r(x_1 = 0)$ è del tipo $\left(\begin{smallmatrix} 0 \\ t \end{smallmatrix}\right) \Rightarrow f\left(\begin{smallmatrix} 0 \\ t \end{smallmatrix}\right) \in r \quad \forall t \in$

$$\left(\begin{smallmatrix} 1+bt \\ \alpha_2+dt \end{smallmatrix}\right) \in v'.$$

$$x_1 - 2x_2 = 1 \Leftrightarrow \alpha_1 + bt - 2)\alpha_2 + dt) = 1 \quad \forall t.$$

$$\Rightarrow \alpha_1 - 2\alpha_2 = 1.$$

$$b - 2d = 0.$$

Sicuramente il punto di S ha coordinate

$$\left(\begin{smallmatrix} t \\ 2t \end{smallmatrix}\right), \quad \text{e imponiamo} \quad f\left(\begin{smallmatrix} t \\ 2t \end{smallmatrix}\right) \in s$$

$$f\left(\begin{smallmatrix} t \\ 2t \end{smallmatrix}\right) = \left(\begin{smallmatrix} \alpha_1+at+2bt \\ \alpha_2+ct+2dt \end{smallmatrix}\right)$$

$$2(\alpha_1 + at + 2bt) = \alpha_2 + ct + 2dt$$

$$\Rightarrow \begin{cases} 2\alpha_1 - alpha_2 = 0 \\ 2a + 4b - c - 2d = 0 \end{cases}$$

$$a = -\frac{2}{3} \quad b = \frac{2}{3} = c \quad d = \frac{1}{3} \quad \alpha_1 = -\frac{1}{3} \quad \alpha_2 = -\frac{2}{3}$$

$$f\left(\begin{smallmatrix} x_1 \\ x_2 \end{smallmatrix}\right) = \left(\begin{smallmatrix} -\frac{1}{3} - \frac{2}{3}x_1 + \frac{2}{3}x_2 \\ -\frac{2}{3} + \frac{2}{3}x_1 + \frac{1}{3}c_2 \end{smallmatrix}\right)$$

$$\pi_1 = \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{smallmatrix}\right) + < \left(\begin{smallmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{smallmatrix}\right) > \quad \pi_2 : \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{smallmatrix}\right) + < \left(\begin{smallmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{smallmatrix}\right), \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{smallmatrix}\right) > .$$

Dire se sono incidenti, paralleli o sghembi

$\pi_1 : \begin{cases} x_3 = 0 \\ x_4 = 0 \end{cases} \qquad \pi_2 : \begin{cases} x_2 = 0 \\ x_3 = 1 \end{cases}$
Dalle equazioni cartesiane è chiaro che $pi_1 \cap pi_2 = \emptyset$, quindi $\pi_1 \pi_2$ non sono incidenti la giacitura di π_1, π_2 sono $W_1 = e_1 + e_2, \quad W_2 = e_1 + e_2$
dunque **APPUNTI DA RECUPERARE**

$$\begin{aligned} f : A &\to A \\ R_1 \quad & R_1' \\ R_2 \quad & R_2' \end{aligned}$$

$$[f]_{R_1}^{R_1'} = \left(\begin{array}{c|c} 1 & 0 \\ \hline b & A \end{array}\right).$$

$$[f]'^{R_2}_{R_2} = [Id]^{R_2}_{R_1'} [f]^{R_1'}_{R_1} [Id]^{R_1}_{R_2}.$$

Troviamo l'affinità che manda ordinatamente A, B, C in A', B', C' ove

$$A = \left(\begin{smallmatrix} 1 \\ 1 \end{smallmatrix}\right) \quad B = \left(\begin{smallmatrix} 3 \\ a \end{smallmatrix}\right) \quad C = \left(\begin{smallmatrix} 4 \\ 4 \end{smallmatrix}\right).$$

$$A \;= \left(\begin{smallmatrix} -1 \\ 0 \end{smallmatrix}\right) \quad B' \left(\begin{smallmatrix} -3 \\ 2 \end{smallmatrix}\right) \quad C' = \left(\begin{smallmatrix} 1 \\ 4 \end{smallmatrix}\right).$$

$R_1 = \{A, \{\overrightarrow{AB}, \overrightarrow{AC}\}\}$ è un riferimento affine
$R_2 = \{A', \{\overrightarrow{A'B'}, \overrightarrow{A'C'}\}\}$ è un riferimento affine

$$[F]^{R_2}_{R_1} = \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{array}\right).$$

$$f(\overrightarrow{AB}) = \alpha \overrightarrow{A'B'} + \beta \overrightarrow{B'C'}.$$

$$R = \{\left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 0 \end{smallmatrix}\right), \left(\begin{smallmatrix} 1 \\ 0 \end{smallmatrix}\right), \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 1 \end{smallmatrix}\right)\}.$$

$$[f]^R_R = [Id]^R_{R_2} [f]^{R_2}_{R_1} [Id]^{R_1}_R.$$

$$R_2 = \{A', \{\overrightarrow{AB}, \overrightarrow{A'C'}\}\} = \{\left(\begin{smallmatrix} -1 \\ 0 \end{smallmatrix}\right), \{\left(\begin{smallmatrix} -4 \\ 2 \end{smallmatrix}\right), \left(\begin{smallmatrix} 8 \\ 4 \end{smallmatrix}\right)\}\}.$$

Quindi la matrice del cambio di base da R a R_2 è

$$[Id]^R_{R_2} = \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ -1 & -4 & 8 \\ 0 & 2 & 4 \end{array}\right).$$

Analogamente si fa con $R_1 = \{\left(\begin{smallmatrix} 1 \\ 1 \end{smallmatrix}\right), \{\left(\begin{smallmatrix} 2 \\ 1 \end{smallmatrix}\right), \left(\begin{smallmatrix} 3 \\ 3 \end{smallmatrix}\right)\}\}$

---

4 Forme Bilineari e Simmetriche

V Spazio vettoriale su $\mathbb{K}$

Definizione 4
*Una funzione $g : VxV \to \mathbb{K}$ Si dice **Forma bilineare** se è lineare in ciascuna variabile fissata l'altra*

in altre parole:

$$g(\alpha v_1 + v_2, v_3) = \alpha g(v_1, v_3) + \beta g(v_2, v_3) \quad \forall \alpha, \beta \in \mathbb{K} \quad \forall \alpha, \beta \in V \quad \forall v_1, v_2, v_3 \in V.$$

Definizione 5
*g si dice **simmetrica** se*

$$g(v_1, v_2) = g(v_2, v_1) \quad \forall v_1, v_2 \in V.$$

Esempio
Sia A una atrice quadrata nxn

$$\text{Allora} \quad g_A(x, y) = X^t AY.$$

è una forma bilineare su K^n
Esempio
g_A è bilineare con

$$A = \left(\begin{smallmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 3 \end{smallmatrix}\right)$$

$$f\left(\left(\begin{smallmatrix} x_1 \\ x_2 \end{smallmatrix}\right), \left(\begin{smallmatrix} y_1 \\ y_2 \end{smallmatrix}\right)\right) = \left(\begin{smallmatrix} x_1 & x_2 \end{smallmatrix}\right)\left(\begin{smallmatrix} 2y_1+y_2 \\ -y_1+3y_2 \end{smallmatrix}\right) = x_1(2y_1 + y_2) + x_2(-y_1 + ey_2) =$$
$$= 2x_1y_1 + x_1y_2 - x_2y_1 + 3x_2y_2$$

Osservazione
g_A è simmetrica se e solo se A è simmetrica

Esempio (Importante)
in $\mathbb{K}^n$ prendiamo $A = I_n$

$$g_{I_m}(X, Y) = X^t Y = \sum_{i=1}^{n} x_i y_i.$$

Se g è una forma bilineare simmetrica su V e $B = \{v_1, \dots, v_n\}$ è una base di V, definisco la matrice di g rispetto a B come

$$[g]_B \to a_{ij} = g(v_i, v_j) \qquad 1 \leq i, j \leq n.$$

$$g(v, w) = g(\sum_{i=1}^{n} x_i v_i, \quad \sum_{i=1}^{n} y_i v_i) = \sum_{i,j=1}^{n} x_i y_i g(v_i, v_j) = \sum_{i,j=1}^{n} x_i y_i a_{ij} = X^t AY.$$

Ricorda: X^t è la matrice trasposta di X

5 Prodotto Scalare

V spazio vettoriale Reale

Definizione 6 (Prodotto Scalare)
Un prodotto scalare su V *è una forma bilineare simmetrica*
$<,>: V \bigtimes V \to \mathbb{R}$ *tale che*

$$< v, v > \geq 0 \quad \forall v \in V$$
$$< v, v >= 0 \Leftrightarrow v = 0$$

Nomenclatura 1. $1. v, w \in V$ *si dicono* ***ortogonali*** *se*

$$< v, w >= 0.$$

2. $||v|| = \sqrt{< v, v >}$ *è la norma di* v
3. *In* $\mathbb{R}^n$, $< \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} >= \sum_{i=1}^n x_i y_i$ *è detto* ***prodotto scalare standard***

$$|| \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} || = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}.$$

Proposizione 1 (Disuguaglianza di Schwarz)

$$v, w \in V \qquad < v, w >^2 \leq < v, V >< w, w > .$$

e vale l'uguaglianza se e solo se v,w sono dipendenti

Dimostrazione
Se w=0 la disuguaglianza è ovvia, quindi possiamo assumere $w \neq 0$. *Per* $v, w, a, b \in$

$$0 \leq < av + bw, av + bw > = a < v, av + bw > + b < w, av + bw > =$$
$$= a(a < v, v > + b < v, w >) + b(a < w, v > + b < w, w >)i =$$
$$= a^2 < v, v > + 2ab < v, w > + b^2 < w, w >$$

Dove abbiamo utilizzato la simmetria del prodotto scalare $< v, w > = < w, v >$
Notiamo che vale l'uguaglianza solo se $av + bw = 0$, *cioè* v, w *sono paralleli.*
La relazione

$$a^2 < v, v > + 2ab < v, w > + b^2 < w, w > \geq 0.$$

vale per ogni scelta di a, b.
Prendo $a = < w, w >$ *e* $b = - < v, w >$

$$0 \leq < w, w >^2 < v, v > - 2 < w, w > < v, w >^2 + < v, w >^2 < w, w > .$$

Poiché $W \neq 0$, $< w, w >> 0$ *quindi posso dividere la relazione precedente per* $< w, w >$, *per altro senza cambiare verso dato che il prodotto scalare è definito positivo*

$$0 \leq < w, w > < v, w > - < v, w >^2 .$$

ovvero

$$< v, w >^2 \leq < v, v > < w, w > .$$

$\square$

Osservazione
$| < v, w > | \leq ||v|| ||w||$
Proprietà della lunghezza
1. $\forall v \in V \quad ||v|| \geq 0$ e $||v|| = 0 \Leftrightarrow v = 0$
2. $||\alpha v|| = |\alpha| ||v|| \quad \forall \alpha \in, \quad \forall v \in V$
3. $||v + w|| \leq ||v|| + ||w|| \quad \forall v, w \in V$

Lezione 9 Geometria I

Federico De Sisti

2024-03-20

1 Rimembranze dalla scorsa lezione

V spazio vettoriale. Un prodotto scalare su V è una funzione bilineare simetirca $< \cdot\ ,\ \cdot >: V \times V \to \mathbb{R}$ tale che:

$$< v, v > \geq 0 \quad \forall v.$$

$$< v, v >= 0 \Leftrightarrow v = 0.$$

2 Nuova effettiva lezione

Dimostriamo alcune proprietà del prodotto scalare:

Lemma 1

$$1.\ \ ||v|| \geq 0 \ e \ ||v|| = 0 \ se \ e \ solo \ se \ v = 0..$$

$$2.\ \ ||\alpha v|| = |\alpha| \cdot ||v|| \quad \alpha \in \mathbb{R}, v \in V.$$

$$3.\ \ ||v + w|| \leq ||v|| + ||w|| \quad \forall v, w \in V.$$

Dimostrazione
1. segue dalla definizione
2. $||\alpha v|| = \sqrt{< \alpha v, \alpha v >} = \sqrt{\alpha^2 < v, v >} = |\alpha| \cdot ||v||$
3. $||v + w||^2 =< v + w, v + w >=$
$=< v, v > + < w, v > + < v, w > + < w, w >=$
$= ||v||^2 + 2 < v, w > + ||w||^2 \leq ||v||^2 + 2||v||w|| + ||w||^2 = (||v|| + ||w||)^2$
Ci basta ora prendere le radici quadrate del primo e del secondo termine (possiamo farlo poiché sono entrambi positivi □

Nomenclatura 1
$\cdot v, w' \in V$ *si dicono ortogonali se* $< v, v' >= 0$
$\cdot$ *Un insieme S di vettori è detto ortogonale se*

$$0 \in S \ e \ < s_1, s_2 >= 0 \quad \forall s_1, s_2 \in S.$$

$\cdot$ *Una base di V si dice ortogonale se è un insieme ortogonale* $\cdot$ *Una base* $\{vi\}_{i \in I}$ *si dice ortonormale se* $< v_i, v_j >= \delta_{i,j} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$

Definizione 1 (Versore)
Sia $v \in V$ tale che $||v|| = 1$ allora v è un versore

Oss
Dat $u \neq 0$, $\frac{u}{||u||}$ è un versore

$$\left|\left|\frac{u}{||u||}\right|\right| = \frac{1}{||u||} \cdot ||u|| = 1.$$

Proposizione 1
Sia $\{v_1, \ldots, v_k\}$ *un insieme ortogonale allora* $v_1, \ldots, v_k$ *sono linearmente indipendenti. In particolare se* $dim(V) = n$*, un insieme ortogonale di* n *vettori è una base*

Dimostrazione
Supponiamo $\alpha_1 v_1 + \ldots \alpha_k v_k = 0$
$< \alpha_1 v_1 + \ldots + \alpha_k v_k, v_i >=< 0, v_i >= 0$
$= \alpha_1 < v_1, v_i > + \ldots + \alpha_k < v_k, v_i >$
$= \alpha_i < v_i, v_i >$
Dato che $< v_i, v_i >> 0$ *poiché* $v_i \neq 0$ *per ipotesi, dunque* $\alpha_i = 0$*,*
dato che posso scegliere qualunque v_i $\square$

Osservazioni
1. La base standard di $\mathbb{R}^n$ è ortonormale rispetto al prodotto scalare standard
2. Sia $g =<,>$ un prodotto scalare su V, Se $B = \{v_1, \ldots, v_n\}$ è una base g-ortonormale allora $[g]_B = Id_n$ ovvero $g(v_i, v_j) = \delta_{i,j}$

Inoltre, se $X = [v]_B, \quad Y = [Id]_B$
$g(v, w) = X^t [g]_B Y = X^t Y$ (sempre con B ortonormale)

Proposizione 2
Se $\{v_1, \ldots, v_n\}$ *è una base ortonormale, per ogni* $v \in V$ *risulta*

$$v = \sum_{i=1}^{n} < v, v_i > v_i.$$

Dimostrazione
(1) *Sia* $\quad v = \sum_{j=1}^{n} a_j v_j$

$$< v, v_i >=< \sum_{j=1}^{n} a_j v_j, v_i >= \sum_{j=1}^{n} a_j < v_j, v_i >= \sum_{j=1}^{n} a_j \delta_{ij} = a_i$$

Basta poi sostituire in (1) a_j *con* $< v, v_j >$ $\square$

Nomenclatura 2
Dato $v \neq 0$ *viene detto coefficiente di Fourier di* $w \in V$ *risptto a* v

$$a_v(w) = \frac{< v, w >}{< v, v >}.$$

Nota
In sostanza il coefficiente di Fourier è il modulo della proiezione di w rispetto a v (moltiplicato quindi per il versore di v otteniamo il vettore della proiezione)
Abbiamo quindi una definizione canonica della proiezione.
$< w - a_v(w) v, v >=< w - \frac{< v, w >}{< v, v >} v, v >=< w, v > - \frac{< v, w >}{\cancel{< v, v >}} \cdot \cancel{< v, v >}$

3 Procedimento di ortogonalizzazione di Gram-Schmidt

Lemma 2
Sia $v_1, v_2, \dots$ *una successione di vettori in* V *spazio vettoriale euclideo. Allora:*
1. Esiste una successione $w_1, w_2, \dots$ *in* V *tale che per ogni* $k \geq 1$

$$a) \quad < v_1, \dots, v_K > = < w_1, \dots, w_k > .$$

$$b) \quad < w_i, w_j > = 0 \; se \; i \neq j.$$

2. Se $u_1, u_2, \dots$ *è un'altra successione che verifica le proprietà a e b, allora esistono non nulli* $\gamma_1, \gamma_2, \dots$ *tali che*

$$u_k = \gamma_k w_k, \quad k = 1, 2, \dots .$$

Dimostrazione
Costruiamo i w_i *per induzione su* k.
Base $k = 1$

$$v_1 \to w_1 = v_1 \; verifica \; a, b.$$

Supponiamo per induzione di aver costruito $w_1, \dots w_t, \quad t > 1$ *verificanti a e b e costruiamo* w_{t+1}

$$\text{ø} w_{t+1} = v_{t+1} - \sum_{i=1}^{t} a_{w_i}(v_{t+1}) w_i .$$

Verifichiamo a

$$v_{t+1} = w_{t+1} + \sum_{i=1}^{t} a_{w_i}(v_{t+1}) w_i .$$

per induzione $v_i \in < w_1, \dots, w_t > \subseteq < w_1, \dots, w_{t+1} > \quad 1 \leq i \leq t$
dunque

$$< v_1, \dots, v_{t+1} > \; \subseteq \; < w_1, \dots, w_{t+1} > .$$

D'altra parte $w_{t+1} \; \in < w_{1,t}, v_{t+1} \; > = < \; v_1, \dots, v_{t+1} \; >$ *perché per induzione* $w_i \in < v_1, \dots, v_t > \quad 1 \leq i \leq t$
Quindi $< w_1, \dots, w_{t+1} > \; \subseteq \; < v_1, \dots, v_{t+1} >$ *e quindi le proprietà a è verificata.*
Verifichiamo ora b, sia $w_i \neq 0$

$$< w_{t+1}, w_i > = < v_{t+1} - \sum_{j=1}^{t} a_{w_j}(v_{t+1}) w_j, w_i > =$$

$$= < v_{t+1}, w_i > - a_{w_j} < (v_{t+1}) w_j, w_j > =$$

$$= < v_{t+1}, w_i > - \frac{< v_{t+1}, w_i >}{\cancel{< w_i, w_i >}} \cancel{< w_i, w_i >} = 0$$

2. Di nuovo procedo per induzione su k, con base ovvia $k = 1$
Supponiamo $t > 1$ e apponiamo che esistano $\gamma_1, \ldots, \gamma_t$ con $u_k = \delta_k w_k$ per ogni $k \leq t$. per (a)

$$u_{t+1} = z + \gamma_{t+1} w_{t+1} \qquad z \in < w_1, \ldots, w_t > = < u_1, \ldots, u_t > .$$

D'altra parte, $< u_{t+1}, z > = < w_{t+1}, z > == 0$
Quindi $< u_{t+1} - \gamma_{t+1} w_{t+1}, w > = 0$ ovvero $< z, z >$
$\Rightarrow z = 0$ e $u_{t+1} = \gamma_{t+1} w_{t+1}$ $\square$

Lezione 10 Geometria

Federico De Sisti

2024-03-21

1 Utilizzo del procedimento di Gram Schmidt

$\{v_1, \dots, v_n\} \subset V$, V spazio euclideo
$w_1 = v_1$

$$w_{t+1} = v_{t+1} - \sum_{i=1, w_i \neq 0}^{t} \frac{< v_{t+1}, w_i >}{< w_i, w_i >} w_i$$

$< w_1, \dots, w_n > = < v_1, , v_n >$ e i w_i sono a due a due ortogonali

---

Esercizio 1
Applicare il procedimento di $G.S$ ai vettori di $\mathbb{R}^4$

$$v_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, v_2 = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, v_3 = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, v_4 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Scrivere le corrispondente base ortonormale
Svolgimento
$w_1 = v_1$

$$w_2 = v_2 - \frac{< v_2, v_1 >}{< v_1, v_1 >} v_1 = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} - \frac{< \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} >}{< \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} >} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} - \frac{2}{2} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$w_3 = v_3 - \frac{< v_3, w_1 >}{< w_1, w_1 >} w_1 - \frac{< v_3, w_2 >}{< w_2, w_2 >} w_2 =$$

$$= \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} - \frac{< \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} >}{< \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} >} - \frac{< \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} >}{< \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} >} \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{-1}{2} \\ 0 \\ \frac{1}{2} \end{pmatrix}$$

Il procedimento è analogo e banale per w_4.
I vettori della alla fine dello svolgimento sono:

$$\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{1}{2} \\ 0 \\ \frac{1}{2} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right)$$

Vanno solo normalizzare (fatto dal professore ma non da me)

Eserczio 2
Ortogonalizzare la base standard di $\mathbb{R}^4$ rispetto al prodotto scalare

$$\langle\begin{pmatrix} x_1\\ x_2\\ x_3\\ x_4\end{pmatrix},\begin{pmatrix} y_1\\ y_2\\ y_3\\ y_4\end{pmatrix}\rangle = 2x_1y_1 + x_1y_2 + x_2y_1 + 2x_2y_2 + 2x_3y_3 + x_3y_4 + y_4x_3 + 2x_4y_4.$$

ε base standard i $\mathbb{R}^4$

$$\langle\ ,\ \rangle_\varepsilon = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 & 0\\ 1 & 2 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 2 & 1\\ 0 & 0 & 1 & 2\end{pmatrix}.$$

Svolgimento
Notare come a_{ij} sia il coefficiente di x_iy_j
w$_1 = v_1$

$$w_2 = v_2 - \frac{\langle v_2, w_1\rangle}{\langle w_1, w_1\rangle} w_1 = v_2 - \frac{v_2^t A w_1}{w_1^t A w_1} w_1 = \begin{pmatrix} 0\\ 1\\ 0\\ 0\end{pmatrix} - \frac{(0\ 1\ 0\ 0)\begin{pmatrix} 2&1&0&0\\ 1&2&0&0\\ 0&0&2&1\\ 0&0&1&2\end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1\\ 0\\ 0\\ 0\end{pmatrix}}{(1\ 0\ 0\ 0)\begin{pmatrix} 2&1&0&0\\ 1&2&0&0\\ 0&0&2&1\\ 0&0&1&2\end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1\\ 0\\ 0\\ 0\end{pmatrix}} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2}\\ 1\\ 0\\ 0\end{pmatrix}$$

Il procedimento continua, ma non è niente di che.

Foglio 2
Esercizio 2

$$p_1, \ldots, p_n \in A, \quad c_1, \ldots, c_n \in \mathbb{K}, \quad \sum_{i=1}^n c_i = 1.$$

Dimostrare che dato qualunque $q \in A$

$$p = q + \sum_{i=1}^n c_i \overrightarrow{op_i}.$$

non dipende da q
$\sum_{i=1}^n c_i p_i$ combinazione baricentrica dei punti p_i con coefficienti c_i
Dobbiamo dimostrare che se $q' \in A$

$$q + \sum_{i=1}^n c_i \overrightarrow{qp_i} = q' + \sum_{i=1}^n c_i \overrightarrow{q'p_i}.$$

q = q' + $\overrightarrow{q'q}$
$q + \sum_{i=1}^n c_i \overrightarrow{qp_i} = q' - \overrightarrow{q'q} + \sum_{i=1}^n c_i \overrightarrow{qp_i} = q' - \sum_{i=1}^n c_i \overrightarrow{something}$

non sono riuscito a finire l'esericizo in tempo pene pene pene TODO

Punto b dell'esercizio 3
$f : A \to A', \varphi : V \to V'$ parte lineare
Devo vedere che $f(\sum_{i=1}^n c_i p_i) = \sum_{i=1}^n c_i f(p_i) \quad \sum_{i=1}^n c_i = 1$

$$f(p_0 + \sum_{i=1}^n c_i \overrightarrow{p_0 p_i}) = f(p_i) + \sum_{i=1}^n c_i \varphi(\overrightarrow{p_0 pi}) =$$

$$= f(p_0) + \sum_{i=1}^n c_i \overrightarrow{f(p_0) f(p_i)} = \sum_{i=1}^n c_i f(p_i)$$

$$= (1 - \sum_{i=1}^n c_i) f(p_0) + \sum_{i=1}^n c_i \overrightarrow{f(p_0) f(p_i)}$$

Dove nell'ultimo passaggio si spezza la somma
Viceversa supponiamo che $f : A \to A'$ rispetti le combinazioni baricentriche; verifichiamo che $\varphi : V \to V'$

$$p_0 \in A \quad \varphi(v) = \overrightarrow{f(p_0) f(p_0 + v)}.$$

è lineare
$v_1, v_2 \in V \ \alpha_1, \alpha_2 \in \mathbb{K} \ \ p_1 = p_0 + v_1 \ \ p_2 = p_0 + v_2$
$v_1 = \overrightarrow{p_0 p_1} \quad v_2 = \overrightarrow{p_0 p_2}$

$\varphi(\alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2) = \overrightarrow{f(p_0) f(p_0 + \alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2)} =$
$\overrightarrow{f(p_0) f(p_0 + \alpha_1 \overrightarrow{p_0 p_1} + \alpha_2 \overrightarrow{p_1 p_2}} =$
$\overrightarrow{f(p_0) f(\alpha_0 p_0 + \alpha_1 p_1 + \alpha_2 p_2} =$
$= \alpha_0 \overrightarrow{f(p_0) f(p_0)} + \alpha_1 \overrightarrow{f(p_0) f(p_1)} + \alpha_2 \overrightarrow{f(p_0) f(p_2)} = \alpha_2 \varphi(v_1) + \alpha_2 \varphi(v_2)$

infatti $f(p_1) = f(p_0 + v_1), \overrightarrow{f(p_0) f(p_1)} = \overrightarrow{f(p_0) f(p_0 + v_1)} = \varphi(v_1)$

Lezione 11 Geometria I

Federico De Sisti

2024-03-27

1 Varie robe su basi ortonormali

Proposizione 1
Sia $B = \{v_1, \dots, v_n\}$ *una base ortonormale dello spazio euclideo* V*, la base* $L = \{w_1, \dots, w_n\}$ *è ortonormale se e solo se* $M = [Id_V]_L^B$ *è ortogonale* $(MM^t = Id_v)$

Dimostrazione
Sia $M = (m_{ij})$ *per definizione di* M $w_i = \sum_{j=1}^{n} m_{ji} v_j \quad 1 \leq i \leq n$

$$\langle w_i, w_j \rangle = \langle \sum_{k=1}^{n} m_{ki} v_k, \sum_{h=1}^{n} m_{hj} v_h \rangle = \sum_{k,h=1}^{n} m_{ki} m_{kj} \langle v_k, v_h \rangle = \sum_{k=1}^{n} m_{ki} m_{kj} = (M^t M)_{i,j}.$$

$\square$ **Osservazione**
Sia $V = \mathbb{R}[x]$ $\langle p(x), q(x) \rangle = \int_{-1}^{1} p(x) q(x) dx$ è un prodotto scalare

Definizione 1 (Angolo non orientato tra vettori)
$|\langle v, w \rangle| \leq ||v|| ||w|| \Rightarrow -1 \leq \frac{\langle v, w \rangle}{||v|| ||w||} \leq 1 \qquad (v, w \neq 0)$
allora
$\exists! \in [0, \pi] : \cos = \frac{\langle v, w \rangle}{||v|| ||w||}$
è detto angolo non orientato tra v, w

Definizione 2
Sia $S \subseteq V$ *con* V *spazio euclideo,* $S^\perp := \{v \in V | \langle v, s \rangle = 0 \quad \forall s \in S\}$

Osservazione
$S^\perp$ è un sottospazio vettoriale di V.
Siano $v_1, v_2 \in S^\perp$ e $\alpha_{1,2} \in \mathbb{K}$
$\Rightarrow \langle \alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2, s \rangle = \alpha_1 \langle v, s \rangle + \alpha_2 \langle v_2, s \rangle = 0 \quad \forall s \in S$

Proposizione 2
Sia V uno spazio vettoriale euclideo e W un sottospazio di V allora

$$V = W + W^{\perp}$$

Dimostrazione
Sia $\{w_1, \ldots, w_k\}$ una base ortogonale di W
consideriamo $\pi : V \to W$ con $\pi(v) = \sum_{i=1}^{n} \frac{\langle v, w_i \rangle}{\langle w_i, w_i \rangle} w_i$, dobbiamo mostrare che $V = W + W^{\perp}$ e che $W \cap W^{\perp} = \{0\}$ ma la seconda è ovvia poiché se $w \in W \cap W^t$ è ortogonale a se stesso $\Rightarrow \langle w, w \rangle = 0 \Leftrightarrow w = 0$
Osserviamo inoltre che se $v \in V \Rightarrow v = \pi(v) + (v - \pi(v))$ la richiesta è dunque $v - \pi(v) \in W^{\perp}$. Basta verificare che $\langle v - \pi(v), w_i \rangle = 0 \quad \forall i$

$$\langle v - \sum_{j=1}^{n} \frac{\langle v, w_j \rangle}{\langle w_j, w_j \rangle} w_j \rangle = \langle v, w_i \rangle - \sum_{j=1}^{n} \frac{\langle v, w_j \rangle}{\langle w_j, w_j \rangle} \langle w_j, w_i \rangle = \langle v, w_i \rangle - \frac{\langle v, w_i \rangle}{\cancel{\langle w_j, w_j \rangle}} \cancel{\langle w_j, w_j \rangle} = 0.$$

$\square$ **Osservazione**

1- Se V è spazio euclideo e W è sottospazio di V,
$(W, \langle , \rangle|_{W \times W})$ è uno spazio euclideo
2- Se $\{w_1, \ldots, w_k\}$ è base ortogonale di W risulta:
$||v - \sum_{h=1}^{n} a_h w_|| \geq ||v - \sum_{h=1}^{n} \frac{\langle v, w_h \rangle}{\langle w_h, w_h \rangle} w_h||$
e vale l'uguaglianza se se solo se $a_h = \frac{\langle v, w_h \rangle}{\langle w_h, w_h \rangle}$

Dimostrazione (Punto 2)
$||v - \sum_{h=1}^{n} a_h w_k|| \geq ||v - \sum_{h=1}^{n} \frac{\langle v, w_h \rangle}{\langle w_h, w_h \rangle} w_h||$;
$||v - w||^2 = \langle v - u, v - u \rangle =$
$= \langle v - w + w - u, v - w + w - u \rangle = \langle v - w, v - w \rangle + \langle w - u, w - u \rangle \geq ||v - w||^2$
$\square$ La lezione prosegue con lo svolgimento di alcuni esercizi

2 Prodotto vettoriale

Sia V uno spazio vettoriale euclideo per cui $dim(V) = 3$ sia $\{v, j, k\}$ una base ortonormale di V

Definizione 3 (Prodotto vettoriale)
Dati $v = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}$ $\quad w = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix}$ pongo $v \wedge w = \begin{pmatrix} y_1 z_2 - y_2 z_1 \\ x_2 z_1 - x_1 z_2 \\ x_1 y_2 - x_2 y_1 \end{pmatrix}$

B_1, B_2 si dicono concordemente orientate se $det([Id]_{B_1}^{B_2}) > 0$, questa è inoltre una relazione di equivalenza.
Di fatti se $B_1 \sim B_2,\ B_2 \sim B_3\ \ det([Id]_{B_1}^{B_3}) = det([Id]_{B_2}^{B_3}[Id]_{B_1}^{B_2}) =$
$= det([Id]_{B_2}^{B_3}) det([Id]_{B_1}^{B_2}) > 0 \Rightarrow B_1 \sim B_2$

Lezione 12 Geometira

Federico De Sisti

2024-03-27

1 Operatori Lineari Unitari

Sia V uno spazio vettoriale euclideo

Definizione 1
Un operatore lineare $T : V \to V$ *si dice unitario se*
$\langle T(u), T(v)\rangle = \langle u, v\rangle \quad \forall u, v \in V$

Proposizione 1
Sia V *spazio vettoriale euclideo* $n-$ *dimensionale e sia* $T : V \to V$ *un applicazione, TFAE (The Following Are Equivalent)*
1. T *è unitario*
2. T *è lineare e*$||T(w)|| = ||v|| \quad \forall v \in V$
3. $T(O) = O, ||T(v) - T(w)|| = ||v - w|| \quad \forall v, w \in V$
4. T *è lineare e manda basi ortonormali in basi ortonormali*
5. T *è lineare ed esiste una base* $\{v_1, \ldots, v_n\}$ *ortonormale di* V *tale che* $\{T(v_1), \ldots, T(v_n)\}$ *è una base ortonormale*

Dimostrazione
$1 \Rightarrow 2$. *Unitario* $\Rightarrow \langle T_(v), T(v)\rangle = ||T(v)||^2 = \langle v, v\rangle = ||v||^2$

$2 \Rightarrow 3$ T *lineare* $\Rightarrow T(O) = O \quad ||T(v) - T(w)|| = ||T(v - w)|| = ||v - w||$

$3 \Rightarrow 1 ||T(v)|| = ||T(v) - O|| = ||T(v) - T(O)|| = ||v - O|| = ||v||$
Esplicitiamo $||T(v) - T(w)||^2 = ||v - w||^2$
$\langle T(v) - T(w), T(v) - T(w)\rangle = \langle v - w, v - w\rangle$
$\Rightarrow \cancel{||T(v)||^2} - 2\langle T(v), T(w)\rangle + \cancel{||T(w)||^2} = \cancel{||v||^2} - 2\langle v, w\rangle + \cancel{||w||^2}$
Dunque $\langle T(v), T(w)\rangle = \langle v, w\rangle$
Resta da vedere che T *è lineare.*
Sia $\{e_1, \ldots, e_n\}$ *una base ortonormale di* V *allora* $\{T(e_1), \ldots, T(e_n)\}$ *è una base ortonormale per quanto dimostrato prima.*

$$\langle T(e_j), T(e_i)\rangle = \langle e_j, e_i\rangle = \delta_{ij}.$$

$v = \sum_{i=1}^{n} x_i e_i \quad (\Rightarrow x_i = \langle v, e_i\rangle)$

$T(v) = \sum_{i=1}^{n} \langle T(v), T(e_i)\rangle T(e_i) = \sum_{i=1}^{n} \langle v, e_i\rangle T(e_i) = \sum_{i=1}^{n} x_i T(e_j)$

Dunque $T(\sum_{i=1}^{n} x_i e_i) = \sum_{i=1}^{n} x_i T(e_i)$ *quindi* T *è lineare*

$1 \Rightarrow 4 \{e_1, \ldots, e_n\}$ *è una base ortonormale*

$$\langle T(e_i), T(e_j)\rangle = \langle e_i, e_j\rangle = \delta_{ij}.$$

$4 \Rightarrow 5$ *Ovvio*

$5 \Rightarrow 1$ *Sia $e_1, \dots, e_n$ la base ortonormale dell'enunciato. Considero $u, v \in V$*

$$u = \sum_{i=1}^{n} x_i e_i, \quad w = \sum_{i=1}^{n} y_i e_i.$$

$$\begin{aligned}
\langle T(u), T(w) \rangle &= \langle T(\sum_{i=1}^{n} x_i e_i, T(\sum_{j=1}^{n} y_i e_i)\rangle = \\
&= \langle \sum_{i=1}^{n} x_i T(e_i), \sum_{j=1}^{n} y_i T(e_i)\rangle = \\
&= \sum_{i,j=1}^{n} x_i y_i \langle T(e_i), T(e_j)\rangle \\
&= \sum_{i=1}^{n} x_i y_i = \langle u, w\rangle
\end{aligned}$$

Dove abbiamo usato $\langle T(e_i), T(e_j)\rangle = \delta_{ij}$ □

$\alpha \in V\{0\}$ $\quad S_\alpha = v - 2\dfrac{\langle v, \alpha\rangle}{\langle \alpha, \alpha\rangle}\alpha$ riflessione rispetto ad α^2

1. S_α è unitaria
2. $S_\alpha^2 = Id$
3. Esiste una base B di V tale che $(S_\alpha)_B = diag(1, \dots, 1, -1)$

Dimostrazione

1. $\langle S_\alpha(v), S_\alpha(w)\rangle = \langle v, w\rangle$

$\langle v - 2\frac{\langle v,\alpha\rangle}{\langle\alpha,\alpha\rangle}\alpha, w - 2\frac{\langle w,\alpha\rangle}{\langle\alpha,\alpha\rangle}\alpha\rangle =$

$\langle v, w\rangle - 2\frac{\langle v,\alpha\rangle\langle\alpha,w\rangle}{\langle\alpha,\alpha\rangle} - 2\frac{\langle v,\alpha\rangle\langle w,\alpha\rangle}{\langle\alpha,\alpha\rangle} + 4\frac{\langle v,\alpha\rangle\langle w,\alpha\rangle}{\langle\alpha,\alpha\rangle\cancel{\langle\alpha,\alpha\rangle}}\cancel{\langle\alpha,\alpha\rangle} = \langle v, w\rangle$

$$V = \mathbb{R}\alpha \oplus \alpha^\perp.$$

Quindi presa una base $\{w_1, \dots, w_{n-1}\}$ di $\alpha^\perp$,
$B = \{w_1, \dots, w_{n-1}, \alpha\}$ è una base di V e
$S_\alpha(w_i) = w_i, i = 1, \dots, n-1$

$S_\alpha(\alpha) = -\alpha$

$$(S_\alpha)_B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots \\ 0 & \ddots & 0 \\ \dots & 0 & -1 \end{pmatrix} = M$$

In particolare $S_\alpha = Id$ poiché $M^2 = Id$ □

2 Osservazioni sugli operatori unitari

1. Se T è unitario, e $v \in Ker(T)$, allora

$$0 = ||T(v)|| = ||v|| \Rightarrow v = 0.$$

Dunque T è invertibile.
È facile vedere che se T_1, T_2 sono unitarie, lo è anche $T_1 T_2^{-1}$, quindi, posto

$$O(V) = \{T \in End(V) | T \text{ è unitario}\}.$$

$$O(V) \leq GL(V).$$

e $O(V)$ viene chiamato gruppo ortogonale di V.

2. Se fissiamo in V una base ortonormale B, e $T \in O(V), [T]_B^B$ è ortogonale.
Infatti sia $A = [T]_B^B,\ B = \{e_1, \ldots, e_n\}$. Le colonne di A sono le coordinate di $T(e_i)$ rispetto a B, quindi T è unitario se e solo se

$$\langle A^i, A^j \rangle = \delta_{ij}.$$

dove A^i, A^j rappresentano la riga i-esima e j-esima della matrice A

3. Se $T \in O(V)$ e $\lambda \in \mathbb{R}$ è un autovalore di T, allora $\lambda = \pm 1$
Se λ è autovalore, esiste $v \neq 0$ tale che $T(v) = \lambda v$

$$||v|| = ||T(v)|| = ||\lambda v|| = |\lambda| ||v||.$$

Poiché $v \neq 0, ||v|| \neq 0$ quindi $|\lambda| = 1$, cioè $\lambda = \pm 1$

4. Se V è uno spazio euclideo di dimensione n, ogni $T \in O(V)$ è composizione di al più n riflessioni S_n

Dimostrazione
per induzione su n, con base ovvia $n = 1$.
Supponiamo il teorema valga per ogni spazio euclideo di dimensione $n - 1$ e dimostriamo per uno spazio euclideo di dimensione n. Sia $f \in O(V)$
Primo caso
f ha un punto fisso non nullo

$$v \in V, \quad v \neq 0, \quad f(v) = v.$$

$$V = \mathbb{R}v \oplus v^\perp.$$

$W = v^\perp, \quad (W, \langle, \rangle|_{W \times W})$ *è euclideo di dimensione* $n - 1$
$F|_W : W \to W$, *infatti, se* $u \in W$

$$\langle f(u), v \rangle = \langle f(u), f(v) \rangle = \langle u, v \rangle = 0.$$

Per induzione $f|_W = S_{\alpha_1} \circ \ldots \circ S_{\alpha_r}, \quad r \leq n - 1$
e quindi $f = S_{\alpha_1} \circ \ldots \circ S_{\alpha_r}, \quad r \leq n - 1$

Secondo caso
Sia $v \neq 0$ *tale che* $f(v) \neq v$*. Allora*

$$S_{f(v)-v}(f(v)) = v.$$

Infatti $S_{f(v)-v}(f(v)) = f(v) - 2\dfrac{\langle f(v), f(v)-v\rangle}{\langle f(v)-v, f(v)-v\rangle}(f(v)-v)$

Ma $\qquad = f(w) = +2\dfrac{\langle f(v), f(v)-v\rangle}{\langle f(v)-v, f(v)-v\rangle}(v-f(v))$

Ora $\langle f(v), f(v)-v\rangle = ||v||^2 - \langle f(v), v\rangle$
$\langle f(v)-v, f(v)-v\rangle = 2||v||^2 - 2\langle f(v), v\rangle.$
Dunque $(S_{f(v)-v} \circ f)$ *ha un punto fisso. Per il primo caso* $S_{f(v)-v} \circ f = S_{\alpha_1} \circ \ldots \circ S_{\alpha_r} \quad r \leq n-1$
Dunque $S_{f(v)-v} \circ S_{f(v)-v} \circ f = S_{f(v)-v} \circ S_{\alpha_1} \ldots \circ S_{\alpha_r}$
$\Rightarrow f = S_{f(v)-v} \circ S_{\alpha_1} \circ \ldots \circ S_{\alpha_r}$
quindi f *è composizione di al più* n *riflessioni* □

3 Spazi affini euclidei

Uno spazio affine euclideo è uno spazio affine $(E, V, +)$ dove V è uno spazio euclideo.
Si può definire una distanza tra punti di E

$$d(P, Q) = ||\overrightarrow{PQ}||.$$

Un riferimento cartesiano per uno spazio affine euclideo è il dato $Oe_1 \ldots e_n$ di un punto e di una base ortonormale di V
In particolare se $P = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, \quad Q = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}$ allora

$$d(P, Q) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2} \qquad \overrightarrow{PQ} = \begin{pmatrix} y_1 - x_1 \\ \vdots \\ y_n - x_n \end{pmatrix}.$$

Definizione 2
Due sottospazi affini si dicono ortogonali se le loro giaciture sono ortogonali

$$(\textit{cioè se } S = P + U, \quad T = Q + W, \langle u, w\rangle = 0 \quad \forall u \in U, \quad \forall w \in W).$$

Lezione 14 Geometria 1

Federico De Sisti

2024-04-04

1 Precisazione

Siano S, T sottospazi affini in uno spazio euclideo δ di dimensione n. Diciamo che S, T sono ortogonali se, posto $S = p + U, \quad T = q + W, \quad p \in S, q \in T$
U, W sottospazi vettoriali di V,

$$\langle U, W \rangle = 0 \quad \text{se } dim(S) + dim(T) < n.$$

$$\langle U^{\perp}, W^{\perp} \rangle = 0 \quad \text{se } dim(S) + dim(T) \geq n.$$

Esempi
1. Due rette r, s in $\mathbb{E}^3$ con vettori direttori v_s, v_r
COMPLETARE CON DISEGNI
2. retta e piano in $\mathbb{E}^3$
COMPLETARE CON DISEGNI
3. due piani in $\mathbb{E}^3$
COMPLETARE CON DISEGNI
sarò sincero, non si capisce un cazzo

2 Esercizi foglio 4

es 3

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

Posizione reciproca
La direzione di r è $\mathbb{R}\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$, quella di $r' = \mathbb{R}\begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$
Essendo tali vettori indipendenti, le rette non sono parallele
$p' = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix} \in r', \quad O \in r$
$\overrightarrow{Op'} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix} \langle \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \rangle$
quindi r, r' sono sghembi
$S = \pi \cap \pi' \quad \pi$ piano per r parallelo a $v \wedge v'$
π' piano per r' parallelo a $v \wedge v'$

$$v \wedge v' \quad \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad v \wedge v' = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix}.$$

$$\pi : \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = t\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + s\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix}.$$

$$\pi' : \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} + t\begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} + s\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix}.$$

trasformiamo in coordinate cartesiane
$\pi \to det\begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{pmatrix} = 0 \to x_1 - x_2 = 0$

analogo per π'

es 4

proiezione ortogonale su π

simmetria ortogonale di asse π

$$\pi : 2x_1 + x_2 - x_3 + 2 = 0.$$

vettore normale a π $\quad P_0 \in \pi$

$p(P) = P_0 + \widetilde{p}(\overrightarrow{p_0 p})$

$\sigma(P) = P_0 + \widetilde{\sigma}(\overrightarrow{p_0 p})$

scelgo $p_0 \in \pi$ $\qquad P_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix}$

W giacitura di $\pi = \langle \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \rangle \quad \mathbb{R}^3 = W \oplus W^\perp$

Dobbiamo decomporre $\overrightarrow{P_0 P}$ rispetto a $W \oplus W^\perp \quad W^\perp = \mathbb{R} \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$

$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 - 2 \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 0 \end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + \gamma \begin{pmatrix} -2 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$

Questo poi è solo un sistema noioso da risolvere

$$p \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = (\text{ guarda le lavagnate, è un super vettore}).$$

sulle lavagnate trovi anche il risultato della simmetria ma non lo svoglimento

es 5

Lezione 15 Geometria

Federico De Sisti

2024-04-08

1 Definizioni su operatori

Definizione 1
$T \in End(V)$ è
· Simmetrico o Autoaggiunto se

$$T = T^t.$$

· Antisimmetrico se

$$T = -T^t.$$

Proposizione 1
T è unitario se e solo se $T^t \circ T = Id_V$

Definizione 2
Sia E uno spazio euclideo. Un'affinità $f : E \to E$ si dice Isometria se la sua parte lineare $\varphi : V \to V$ è un operatore unitario

Osservazione
Le isometrie formano un gruppo denotato con $Isom(E)$ (difatti, $Isom(E) \leq Aff(E)$)
Infatti la composizione di isometrie è un isometria.
se φ_1, φ_2 sono le parti lineari di $f_1, f_2 \in Isom(E)$
Per ipotesi $\varphi_1 \circ \varphi_1 = Id, \quad \varphi_2^t \circ \varphi_2 = Id$

$$(\varphi_1 \circ \varphi_2)^t \circ (\varphi_1 \circ \varphi_2) = \varphi_2^t \circ \varphi_1^t \circ \varphi_1 \circ \varphi_2 = \varphi_2^t \circ \varphi_2 = Id.$$

Inoltre, dalla definizione, l'inversa di un operatore unitario è unitario.
In effetti, ho dimostrato che

$$O(V) = \{f \in End(V) | f^t \circ f = Id\}.$$

è un gruppo, e un sottogruppo di $GL(V)$

Data $f \in Isom(E)$ diciamo che:
f è diretta se $det(\varphi) = 1$
f è inversa se $det(\varphi) = -1$

Le isometrie dirette formano un sottogruppo

$$Isom^+(E) \leq Isom(E).$$

Osservazione
1. Sia $O \in E$

$$Isom^+(E)_O \leq Isom(E)_O = \{f \in Isom(E) | f(O) = O\} \leq Isom(E).$$

Dove $Isom^{+}(E)_O$ sono le rotazioni di centro O

2. Se nello spazio euclideo E è assegnato con riferimento cartesiano $R = Oe_1, \dots, e_n$, ogni isometria $f \in Isom(E)$ con parte lineare $\varphi \in O(V)$ si scrive in coordinate rispetto al riferimento nella forma

$$Y + AX + c \qquad A \in O(n).$$

dove $p \in E, \quad X = [P]_R, \quad Y + [f(P)]_R$
$A = [\varphi]_{\{e_1,\dots,e_n\}}^{\{e_1,\dots,e_n\}}, \quad c = [f(O)]_R$

Teorema 1
Sia E uno spazio euclideo, Un'applicazione $f : E \to E$ è un isometria se e solo se

$$\circledast d(P,Q) = d(f(P), f(Q)) \qquad \forall P, Q \in E.$$

Dimostrazione
supponiamo che f sia un'isometria, con parte lineare φ

$$d(f(P), f(Q)) = ||\overrightarrow{f(P)f(Q)}|| = ||\varphi(\overrightarrow{PQ})|| = ||\overrightarrow{PQ}|| = d(P,Q).$$

Viceversa se $f : E \to E$ un'affinità verificante l'equazione $\circledast$, fissiamo $O \in E$ e definiamo $\varphi : V \to V$ ponendo

$$\varphi(\overrightarrow{OP}) = \overrightarrow{f(O)f(P)}.$$

Poiché ogni vettore $v \in V$ è del tipo $\overrightarrow{OP}$ per qualche $P \in E$, φ è definita, e tale che se $\underline{O}$ è il vettore nullo in V

$$\varphi(\underline{O}) = \varphi(\overrightarrow{OO}) = \overrightarrow{f(O)f(O)} = \underline{O}.$$

Inoltre se $v = \overrightarrow{OP}, w = \overrightarrow{OQ}$
$||\varphi(v) - \varphi(w)|| = ||\varphi(\overrightarrow{OP}) - \varphi(\overrightarrow{OQ})|| =$
$= ||\overrightarrow{f(O)f(P)} - \overrightarrow{f(O)f(q)}|| = ||\overrightarrow{f(Q)f(P)}|| =$
$= d(f(Q), f(P)) = d(Q,P) = ||\overrightarrow{PQ}|| = ||v - w||$
Quindi, per una delle caratterizzazioni già dimostrati, φ è un operatore unitario.
Dimostro ora che f è un'affinità con parte lineare φ

$$\varphi(\overrightarrow{PQ}) = \varphi(\overrightarrow{OQ} - \overrightarrow{OP}) = \varphi(\overrightarrow{OQ}) - \varphi(\overrightarrow{OP}) = \overrightarrow{f(O)f(P)} - \overrightarrow{f(O) - f(Q)} = \overrightarrow{f(P)f(Q)}.$$

$\square$

2 Isometrie di piani e spazi euclidei di dimensione 3

$$A \in SO(2) \quad \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \text{ tale che: } \quad \begin{aligned} &a^2 + c^2 = 1 \\ &b^2 + d^2 = 1 \\ &ab + cd = 0 \\ &ad - bc = 1 \end{aligned}$$

$a^2 + c^2 = 1 \quad \rightsquigarrow \quad a = \cos\theta, \quad c = \sin\theta$
altre condizioni $\rightsquigarrow \quad b = -\sin\theta, \quad d = \cos\theta$
Dunque

$$SO(2) = \{R_\theta = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} | \theta \in \mathbb{R}\}.$$

Osserviamo che se $det(A) = det(B) = -1$ allora $det(AB) = 1$, quindi se $A \in O(2) \setminus SO(2)$

$$A = (AB)B^{-1} = (AB)B^t.$$

con $B \in O(2) \setminus SO(2)$ fissato.
Scegliendo $B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$, tutti gli elementi di $O(2) \setminus SO(2)$ sono del tipo

$$A_\theta = R_\theta \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ \sin\theta & -\cos\theta \end{pmatrix}.$$

Lemma 1
1) $A_\theta = R_\theta A_O = A_O R_{-\theta}$
2) $A_\varphi \circ A_\theta = R_{\varphi-\theta}$
3) A_θ ha autovalori 1 e -1 con autospazi ortogonali

Dimostrazione
1. ovvio
2. $A_\varphi A_\theta = R_\varphi A_O R_\theta A_O = R_\varphi A_O A_O R_{-\theta} = R_\varphi R_{-\theta} = R_{\varphi-\theta}$
3. Calcoliamo il polinomio caratteristico di A_φ:

$$det \begin{pmatrix} T - \cos\theta & -\sin\theta \\ -\sin\theta & T + \cos\theta \end{pmatrix} = (T - \cos\theta)(T + \cos\theta) - \sin^2\theta = T^2 - 1.$$

quindi A_θ ha autovalori 1. Si capisce direttamente che gli autospazi sono ortogonali. In realtà

$$V_1 = \mathbb{R}\left(\begin{smallmatrix} \cos\theta - 1 \\ \sin\theta \end{smallmatrix}\right), \quad V_{-1} - \left(\begin{smallmatrix} \cos\theta + 1 \\ \sin\theta \end{smallmatrix}\right).$$

$\square$

Sia $c \in E \quad \sigma : E \to E$ rotazione di centro c.
La parte lineare di σ appartiene a $SO(2)$, quindi è del tipo R_θ. Se Oe_1e_2 è un riferimento cartesiano

$$R_{c,\theta} = t_{\overrightarrow{OP}} \circ R_{O,\theta} \circ t_{-\overrightarrow{OC}}.$$

riflessione: isometria diretta che fissa tutti i punti di una retta, detta asse di riflessione

Osservazione
Riflessioni per $O \Leftrightarrow O(w) \setminus SO(2)$

Lemma 2
1. $r \subset E$ retta, $C \in r$, $\quad R_{C,\theta}$ rotazione di centro C. Esistono rette s, t contenenti C tali che

$$R_{C,\theta} = \rho_r \circ \rho_s = \rho_t \circ \rho_r.$$

Viceversa, per ogni coppia di rette r, s passanti per C $\rho_r \circ \rho_s$ è una rotazione di centro C e

$$\rho_r \circ \rho_s = Id \Leftrightarrow r = s.$$

2. $R_{C,\theta} \circ R_{D,\varphi}$ è una rotazione di angolo $\theta + \varphi$ a meno che $\theta + \varphi = 2k\pi, \quad k \in \mathbb{Z}$, in tal caso è una traslazione che è diversa dall'identità se e solo se $C \neq D$
3. Se $C, D \in E$, $C \neq D$ e r è la retta per C e D. Se $R_{C,\theta}, R_{D,\varphi}$ sono non banali e $\theta + \varphi \neq 2k\pi, \quad k \in \mathbb{Z}$, allora $R_{C,\theta} \circ R_{D,\varphi}$ e $R_{C,-\theta} \circ R_{D,-\varphi}$ hanno centri destini e simmetrici rispetto ad r.

Lezione 15 Geometria I

Federico De Sisti

2024-04-10

1 Ultima Parte teorica prima del compito

$O(2) = SO(2) \cup O(2) \setminus SO(2)$

$$R_\theta = \begin{pmatrix} cos\theta & -sin\theta \\ sin\theta & cos\theta \end{pmatrix} \quad A_\theta = R_\theta A_\theta = \begin{pmatrix} cos\theta & sin\theta \\ sin\theta & -cos\theta \end{pmatrix}.$$

$$R_\theta R_\varphi = R_{\theta+\varphi}.$$

$$A_\theta A_\varphi = R_{\theta-\varphi}.$$

Definizione 1 (Riflessione)
Isometria che fissa puntualmente una retta (detta asse della riflessione)

E piano euclideo $C \in E, r \subset E$ retta $\exists s, t$ rette passanti per C tali che

$$R_{c,\theta} = \rho_r \circ \rho_s = \rho_t \circ \rho_r.$$

”e viceversa”
Possiamo fissare $c = 0$ $p_r = A_{o,\alpha}$. Allora

$$R_\theta = A_\alpha \circ A_{\alpha-\theta} = A_{\theta+\alpha} \circ A_\alpha.$$

dove $\rho_r = A_\alpha$ e $A_{\alpha-\theta} \equiv \rho_s$
Il viceversa segue, sostituendo $c \equiv 0$, da $A_\alpha \circ A_\beta = R_{\alpha-\beta}$

$$R_{C,\theta} \circ R_{D,\varphi} \quad \rightarrow \quad \text{rotazione di angolo } \theta + \varphi \text{ Se } \theta + \varphi \neq 2k\pi, \quad k \in \mathbb{Z}.$$

altrimenti è una traslazione (che è l'identità $= D$)
Se $C = D$ chiaramente $R_{C,\theta} \circ R_{C,\varphi} = R_{C,\theta+\varphi}$
Se $C \neq D$ sia r la retta per C e D Per la parte precedente possiamo scrivere

$$R_{C,\theta} = \rho_t \circ \rho_r, \qquad R_{D,\varphi} = \rho_r \circ \rho_s.$$

per certe rette s, t

$$T = R_{C,\theta} \circ R_{D,\varphi} = \rho_t \circ \rho_r \circ \rho_r \circ \rho_s.$$

Se s, t sono incidenti allora per la parte precedente T è una rotazione, altrimenti $s \parallel t$
TODO disegno
In coordinate rispetto ad un riferimetno cartesiano Oe_1e_2 Se $P \equiv \binom{x_1}{x_2}$

$$(R_{C,\theta} \circ R_{D,\varphi})(P) \qquad \text{ha coordinate.}$$

$$R_\rho(R(x-d) + d - x) + x.$$

dove c, d sono i vettori delle coordinate di C, D rispettivamente
$\underbrace{R_{\theta+\varphi}(x-d)}_{\text{parte lineare}} + R_\theta(d-c) + c$

T T è una translazione se e solo se $\theta + \varphi = 2k\pi, k \in \mathbb{Z}$ e in tal caso

$$T(x) = x + R_\theta(d-c) = (d-c).$$

che è l'identità se e solo se $d = c$ cioè $D = C$

Definizione 2 (Glissoriflessione)
Una glissoriflessione è un'isometria di un piano euclideo ottenuta come composizione $t_v \circ \rho_r$ di una riflessione di asse r con una traslazione $t_v \neq Id$ con $v \neq 0, v \parallel r$

TODO disegno

Teorema 1 (Charles, 1831)
Un'isometria di un piano euclideo che fissa un punto è una rotazione o una riflessione a seconda che sia diretta o inversa. Un'isometria senza punti fissi è una traslazione o una glissoriflessione a seconda che sia diretta o inversa

Dimostrazione
Sia $f \in Isom(E)$
Se f ha un punto fisso abbiamo già visto che f è una rotazione se è diretta o una riflessione se f è inversa
se f diretta priva di punti fissi. Allora anche f^2 non ha punti fissi, perché se $f^2(p) = p$
Disegno TODO
Dunque $f(M) = M$ escluso.
DIco che $p, f(p), f^2(p)$ che sono distinti per quanto abbiamo visto, sono allineati, Altrimneti ***Disegno TODO***

$$d(P, f(p)) = d(f(p), f^2(p))(\text{ poichè } f \text{ è un'isometria}).$$
$$d(Q, P) = d(Q, f(P)) = d(Q, f^2(P)).$$

Poiché f preserva l'orientazione, il triangolo $QPf(P)$ viene trasformato in $Q, f(P), f^2(P)$ da cui $f(Q) = Q$
Dunque tutti i punti $f^i(P), \quad i \geq 0$ sono allineati, quindi se r è la retta che li contiene, f agisce su r come una traslazione.
Poiché f è diretta, f agisce su tutto il piano come una traslazione.

Sia ora f inversa senza punti fissi,
Allora f^2 è diretta e come prima $f^2 = t_v$ per qualche v
Sia $P \in E$ un punto $r_0 = \overrightarrow{Pf^2(P)}, \quad r_1 = \overrightarrow{f(P)f^2(P)}$
sono rette parallele che sono scambiate tra loro da f
Disegno TODO
Sia r la retta equidistante da r_0 e r_1.
Allora $f(r) \subseteq r$ Ma $f^2 = t_v \;\; f|_r = t_{v/2}$
Se ora consideriamo $t_{-v/2} \circ f$
questa è un'isometria inversa che fissa puntualmente r,
quindi è una riflessione che indichiamo con ρ. Dunque

$$f = t_{v/2} \circ t_{-v/2} \circ f = t_{v/2} \circ \rho.$$

□

2 Diagonalizzazione di operatori simmetrici

Ricorda
$f \in End(V)$ diagonalizzabile se esiste una base di V di autovettori di f
$\Leftrightarrow A = [f]_B^B$ B base $\exists N \in GL(n, \mathbb{K}) : N^{-1}AN$ è diagonale

Lemma 1
Il polinomio caratteristico di $A \in M_n(\mathbb{R})$ simmetrica ha solo radici reali

Dimostrazione
$A \in M_n(\mathbb{R}) \subseteq (\mathbb{C}) \quad L_A : \mathbb{C}^n \to \mathbb{C}^n.$
Sia $\lambda \in \mathbb{C}$ un autovalore e $x \neq 0$ un corrispondente autovettore

$$Ax = \lambda x.$$

$$\overline{Ax} = \overline{\lambda x}.$$

$$A\overline{x} = \overline{\lambda}\overline{x}.$$

$\overline{x}^t Ax = \overline{x}^t(Ax) = \overline{x}^t(\lambda x) = \lambda \overline{x}^t x$
$\overline{x}^t Ax = \overline{x}^t A^t x = (A\overline{x})^t x = (\overline{\lambda}\overline{x})^t x = \overline{\lambda}\overline{x}^t x$
$\overline{x}^t x = \sum_{i=1}^n \overline{x}_i x_i \leftarrow$ *è un numero reale positivo poiché $x \neq 0$*

$$\lambda \overline{x}^t x = \overline{\lambda} x^t x \quad \Rightarrow \quad \lambda = \lambda.$$

□

Teorema 2 (Teorema Spettrale)
Sia V uno spazio euclideo di dimensione finita e $T \in End(V)$ un operatore simmetrico, esiste una bas ortonormale di autovettori per T

Corollario 1
Per ogni matrice reale simmetrica $A \in M_n(\mathbb{R})$ esiste una matrice ortogonale $N \in O(n)$ tale che

$$N^{-1}AM = N^t AN \qquad \text{è ortogonale.}$$

Dimostrazione (Teorema)
Per induzione su $n = dim(V)$. Base $n = 1$ ovvia
Supponiamo $n = dim(v) \geq 2$. Poichè T è simmetrico il polinomio caratteristico ha radici reali (per il lemma precedente) quindi T ammette un autovalore λ d sia e_1 il suo corrispondente autovettore di lunghezza 1

$$V = \mathbb{R}e_1 \oplus (\mathbb{R}e_1)^\perp.$$

Chiamo $U \equiv (\mathbb{R}e_1)^\perp$
Dico che $T|_U : U \to$, per cui $T|_U \in End(U)$
Infatti, dimostro che $u \in U \to T(u) \in U$

ipotesi: $\langle u, e_1 \rangle = 0$
Tesi: $\langle Tu, e_1 \rangle = \langle u, T^t e_1 \rangle = \langle u, Te_1 \rangle = \langle u, \lambda e_1 \rangle = \lambda \langle u, e_1 \rangle = 0$
dove abbiamo usato la simmetria di T
Chiaramente $T|_U$ *è simmetrico, quindi per induzione* U *ha una base ortonormale di autovettori* $\{e_2, \ldots, d_n\}$.
Ne segue che $\{e_1, \ldots, e_n\}$ *è una base ortonormale di* V *formata da autovettori per* T $\square$

Lezione 17 Geometria I

Federico De Sisti

2024-04-17

1 Prodotto Hermitiano

V spazio vettoriale complesso

Definizione 1 (Funzione sesquilineare)
Una funzione sesquilineare su V è un'applicazione $h : V \times V \to \mathbb{C}$ che è lineare nella prima variabile e antilineare nella seconda, cioè

$$\begin{aligned} &h(v+v', w) = h(v,w) + g(v', w) \\ &h(\alpha v, w) = \alpha h(v,w) \\ &h(v, w+w') = h(v,w) + h(v,w') \\ &h(v, \alpha w) = \overline{\alpha} h(v,w) \end{aligned}$$

per ogni scelta di $v, w, v', w' \in V$ e $\alpha \in \mathbb{C}$

Definizione 2 (Forma hermitiana)
Una forma sesquilineare si dice hermitiana se

$$h(v,w) = \overline{h(w,v)}.$$

Osservazione
Se h è hermitiana, $h(v,v) \in \mathbb{R}$, infatti deve risultare $h(v,v) = \overline{h(v,v)}$

Definizione 3 (Forma antihermitiana)
Una forma sesquilineare si dice antihermitiana se

$$g(v,w) = -\overline{h(v,w)}.$$

Osservazione
In questo caso $h(v,v) \in \sqrt{1}\mathbb{R}$

Definizione 4
Una forma hermitiana si dice semidefinita positiva se

$$h(v,v) \geq 0 \quad \forall v \in V.$$

Definizione 5
Una forma hermitiana si dice definita positiva se

$$h(v,v) > 0 \quad \forall v \neq 0.$$

ovvero

$$(h(v,v) \geq 0 \text{ e } h(v,v) = 0 \Rightarrow v = 0).$$

Esempio
$V = \mathbb{C}^n$

$$h(\begin{pmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_n \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix}) = \sum_{i=1}^{n} z_i \overline{w_i}.$$

questo viene chiamato prodotto hermitiano standard su $\mathbb{C}^n$

$$h(\begin{pmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_n \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_n \end{pmatrix}) = \sum_{i=1}^{n} z_i \overline{z_i} = \sum_{i=1}^{n} |z_i|^2$$

Dato V, consideriamo una base $B = \{v_1, \ldots, v_n\}$ di V Se h è una forma heritiana, diciamo che $(h_{ij}) = h(v_i, v_j)$ è la matrice che rappresenta h nella base B e la denoto come $(h)_B$
se $v = \sum_{i=1}^n x_i v_i, \quad w = \sum_{i=1}^n y_i v_i$

$$\begin{aligned} h(v,w) &= h(\sum_{i=1}^{n} x_i v_i, \sum_{i=1}^{n} y_i v_i) = \\ &= \sum_{i=1}^{n} x_i h_i(v_i, \sum_{i=1}^{n} y_i v_i) = \\ &= \sum_{i=1}^{n} x_i \overline{y_i} h(v_i, v_i) = \\ &= x^t H \overline{y} \end{aligned}$$

Poiché h è hermitiana, $h(v,w) = \overline{h(w,v)}$

$$\begin{aligned} X^t H Y &= \overline{Y^t H X} \\ &= \overline{Y}^t \overline{H X} \\ &= (\overline{Y}^t \overline{H X})^t \\ &= \overline{X}^t \overline{H}^t \overline{Y} \quad \Rightarrow \quad H = \overline{H}^t \end{aligned}$$

Definizione 6
Una matrice $M \in M_n(\mathbb{C})$ si dice hermitiana se

$$H = \overline{H}^t.$$

Esercizio
le matrici hermitiane 2×2 sono un $\mathbb{R}$-sottospazio di $M_2(\mathbb{C})$ di dimensione 4

$$\begin{pmatrix} a_1 + ib_1 & a_2 + ib_2 \\ a_3 + ib_3 & a_4 + ib_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 - ib_1 & a_3 - ib_3 \\ a_2 - ib_2 & a_4 - ib_4 \end{pmatrix}.$$

$$\Rightarrow \quad \begin{aligned} &a_1 + ib_1 = a_1 - ib_1 \Rightarrow b_1 = 0 \\ &a_2 + ib_2 = a_3 - ib_3 \Rightarrow a_2 = a_3 \quad b_2 = -b_3 \\ &a_3 + ib_3 = a_2 - ib_2 \Rightarrow a_2 = a_3 \quad b_2 = -b_3 \\ &a_4 + ib_4 = a_4 - ib_4 \Rightarrow b_4 = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} a_1 & a_2 + ib_2 \\ a_2 - ib_2 & a_4 \end{pmatrix}$$

$\mathrm{M}_2 = \mathbb{R} \left(\begin{smallmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{smallmatrix}\right) \oplus \mathbb{R} \left(\begin{smallmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{smallmatrix}\right) \oplus \mathbb{R} \left(\begin{smallmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{smallmatrix}\right) \oplus \mathbb{R} \left(\begin{smallmatrix} 0 & i \\ -i & 0 \end{smallmatrix}\right)$
il professore qui lascia un esercizio, non penso che realisticamente qualcuno lo farà

Si definiscano allo stesso modo del caso reale simmetrico S^t
coefficiente di Fourier

$$|\langle v, w \rangle| \leq ||v||||w||.$$

disuguaglianza triangolare $||v + w|| \leq ||v|| + ||w||$
Operatore unitario: $T \in End_{\mathbb{C}}(V)$ t.c.

$$\langle T(u), T(v) \rangle = \langle u, v \rangle \quad \forall u, v \in V.$$

Verifichiamo le caratteristiche degli operatori unitari dati nel caso reale
Gram Schmidt
$T \in End(V)$ operatore unitario
1. Gli autovalori hanno modulo 1
2. Autospazi relativi ad autovalori distinti sono ortogonali
1. Sia v un autovettore di autovalore λ

$$\langle v, v \rangle = \langle Tv, Tv \rangle = \langle tv, tv \rangle = \lambda \overline{\lambda} \langle v, v \rangle = |\lambda|^2 \langle v, v \rangle.$$

$$v \neq 0 \Rightarrow \quad |\lambda|^2 = 1 \quad \Rightarrow \quad |\lambda| = 1.$$

2. Sia $v \in V_\lambda$, $w \in V_\mu \quad \lambda \neq \mu$

$$\langle v, w \rangle = \langle Tv, Tw \rangle = \langle \lambda v, \mu w \rangle = \lambda \overline{\mu} \langle v, w \rangle.$$

Se $\langle v, w \rangle \neq 0 \neq 0 \Rightarrow \lambda \overline{\mu} = 1. Perilpunto 1$
$\lambda \overline{\lambda} \quad \Rightarrow \quad \overline{\lambda} = \overline{\mu} \quad \Rightarrow \quad \lambda = \mu \quad$ assurdo.

Definizione 7
Diciamo che $U \in M_n(\mathbb{C})$ *è unitaria se*

$$U\overline{U}^t = Id.$$

Proposizione 1
$T \in End(V)$ *è unitario se e solo se la sua matrice in una base ortonormale è unitaria*

Dimostrazione
Sia $B = \{v_1, \ldots, v_n\}$ *una base ortonormale di* V

$$\delta_{ij} = \langle v_i, v_j \rangle = \langle Tv_i, Tv_j \rangle = \langle Ae_i, Ae_j \rangle = e_i^t A^t \overline{A} e_j = A_i^t \overline{A}_j$$

dove abbiamo posto $A = (T)_B$ *e* $\{e_i\}$ *è una base di* $\mathbb{C}^n$
TODO *dimostrazione da finire*

□

Come nel caso reale si dimostra

Teorema 1
Sia $T \in End(V)$ *un operatore unitario Esiste una base standard di autovettori per* T

In particolare, per ogni matrice unitaria $A \in U(n)$ esiste $M \in U(n)$ tale che $M^{-1}AM$ è diagonale a volte si pone

$$A^* = \overline{A}^t.$$

A unitario $AA^* = Id$
A hermitiano $A = A*$
A antihermitiano $A = -A*$

Definizione 8 (Operatore Aggiunto)
Dato $T \in End(V)$*, esiste unico* $S \in End(V)$ *tale che*

$$\langle Tu, w \rangle = \langle u, Sw \rangle \quad \forall u, w \in V.$$

Tale operatore è detto aggiunto hermitiano di T *e denotato con* T^*

Definizione 9
Sia V *uno spazio vettoriale complesso dotato di prodotto hermitiano (forma hermitiana definita positiva), un operatore* $L \in End(V)$ *è normale se*

$$L \circ L^* = L^* \circ L.$$

Osservazione
L unitario, hermitiano, antihermitiano $\Rightarrow$ L diagonale

Teorema 2
Sono equivalenti le seguenti affermazioni:
1) L *è normale*
2) *esiste una base ortonormale di* V *formata da autovettori di* L

Lezione 19 Geometria I

Federico De Sisti

2024-04-18

1 Esercizi vari

Esercizio 1 Foglio 6
$f : A \to A$ affinità ha un unico punto fisso se e solo se la sua parte lineare (φ) non ha l'autovalore 1
Svolgimento
Sia $F = \{x \in A | f(x) = x\}$
Supponiamo $F \neq \emptyset$ e $P \in F$ dico che

$$\star \quad F = P + \ker(\varphi - Id).$$

dove $\ker(\varphi - Id)$ è l'autospazio di autovalore 1 di φ
$u \in V \quad P + u \in F \Leftrightarrow P + u = f(P + u) = f(P) + \varphi(u) = P + \varphi(u) \Leftrightarrow \varphi(u) = u$
ovvero $u \in \ker(\varphi - Id)$
Se ora F ha un unico punto fisso $\star$ implica che

$$ker(\varphi - Id) = \{0\}.$$

cioè 1 non è autovalore di φ
Viceversa facciamo vedere che se $\ker(\varphi - Id) = \{0\}$ allora $F \neq \emptyset$ Cerchiamo $Q + v$ tale che
$f(Q + v) = Q + v$
$f(Q) + \varphi(v)$
$f(Q) - P = v - \varphi(v)$
$\overrightarrow{Qf(Q)} = -(\varphi - Id)(v)$
Quindi, poiché $(\varphi - Id)$ è invertibile (per ipotesi), dato Q trovo un unico $v = -(\varphi - Id)^{-1}(\overrightarrow{Qf(Q)})$
per cui $Q + v$ è un punto fisso

Esercizio 5 Foglio 6
$f(x) = Ax + b$ in $\mathbb{E}^2$
$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$
$A = \begin{pmatrix} 1/2 & -\sqrt{3}/2 \\ \sqrt{3}/2 & 1/2 \end{pmatrix} \quad b = 0$
1
$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \end{pmatrix}$
SvolgimentoA
1. è una traslazione quindi non ha punti fissi
2. $\det A = 1$ e A ortogonale

$AX + b = X$
$(A - I)X = -b$
$\begin{pmatrix} 1/2 & -\sqrt{3}/2 \\ \sqrt{3}/2 & 1/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix}$
$x_1 = \det \begin{pmatrix} 0 & -\sqrt{3}/2 \\ -1 & -1/2 \end{pmatrix} = -\frac{\sqrt{3}}{2} \qquad x_2 = \det \begin{pmatrix} -1/2 & 0 \\ \sqrt{3}/2 & -1 \end{pmatrix} = \frac{1}{2}$
3. $\begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \in SO(2)$ rotazione di $\frac{\pi}{2}$
Esercizio da finire

---

2 Diangonalizzazione unitaria di operatori normali

($\mathbb{C}^n$, prodotto hermitiano standard) $M^\star = \overline{M}^t$
M è normale se $MM^\star = M^\star M$
siano normali le matrici

unitarie	$MM^\star = Id$
hermitiane	$M = M^\star$
antihermitiane	$M = -M^\star$

Teorema 1 (Spettrale)
M è normale se e solo se $\exists U \in U(n): \; U^t M U$ è ortogonale

nota
$U(n)$ spazio delle matrici unitarie

$L = \begin{pmatrix} 1 & i \\ -i & 1 \end{pmatrix} \quad L^\star = \begin{pmatrix} 1 & i \\ -i & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow L$ matrice hermitiana
Trovo ora il polinomio caratteristico
$t^2 - 2t = 0$ che ha quindi autovalori $t = 0, t = 2$
$v_0 = \mathbb{C} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} \quad v_2 = \mathbb{C} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$
$\langle \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} \rangle = 1 \cdot 2 + i \cdot i = 0$
$\langle \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} \rangle = 1 \cdot 1 + i \cdot (-i) = 1 - i^2 = 2$

$$U = \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ i/\sqrt{2} & -i/\sqrt{2} \end{pmatrix} \qquad U^-1LU = 0002.$$

Dove il prodotto scalare standard è stato fatto per verificare che siano ortogonali, il secondo mi serve per normalizzare la matrice (di fatti divido per la radice del risultato)

Esempio 2
$L = \begin{pmatrix} \sqrt{3}/2 & -1/2 \\ 1/2 & \sqrt{3}/2 \end{pmatrix}$ matrice ortogonale con determinante 1, quindi rotazione
il polinomio caratteristico è $t^2 - \sqrt{3}t + 1$ gli autovalori sono quindi $t = \frac{\sqrt{3} \pm i}{2}$
$v_{\frac{\sqrt{3} \pm i}{2}} = \mathbb{C} \begin{pmatrix} i \\ \pm 1 \end{pmatrix}$

$$U = \begin{pmatrix} i/\sqrt{2} & i/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \end{pmatrix}.$$

Ultimo esempio

$L = \begin{pmatrix} 1+i & i \\ -i & 1+i \end{pmatrix} \quad L^\star = \begin{pmatrix} 1-i & i \\ -i & 1-i \end{pmatrix}$

$$LL^\star = \begin{pmatrix} 3 & 2i \\ -2i & 3 \end{pmatrix} = L^\star L.$$

$t^2 - 2(i+1) + 2i - 1 = 0 \ \ t_1, t_2$
$v_{t_1} = \mathbb{C} \begin{pmatrix} i \\ 1 \end{pmatrix} \quad v_{t_2} = \mathbb{C} \begin{pmatrix} i \\ -1 \end{pmatrix}$
U come nell'esercizio precedente

3 Cenni sulla classificazione delle isometrie

Nomenclatura 1
· *rotazioni*
· *riflessioni*
· *traslazioni*
· *glissoriflessione* $= t_v \circ s_\alpha$ *con* $v \parallel \alpha^t$ *(disegno de li mortacci sua)*
· *glissorotazioni* $= t \circ R$ *dove* $v \parallel a$, a *asse di* R *(altro disegno)*
· *riflessioni rotatorie* $s_a \circ R$ R *rotazione di asse* $\underline{a}$, $s_{\underline{a}}$ *è una riflessione rispetto ad una retta parallela ad* $\underline{a}$

Teorema 2 (Eulero 1776)
Ogni isometria di $\mathbb{E}^3$ *è di uno dei sei tipi sopra descritti*

Lezione 20 Geometria I

Federico De Sisti

2024-04-22

1 Teoremi vari su spazi Hermitiani e company

Lemma 1
Sia V uno spazio vettoriale su un campo $\mathbb{R}$
Siano $P, Q \in End(V)$ tali che $PQ = QP$. Allora, se V_λ è l'autospazio di autovalore λ su P, risulta
$$Q(V_\lambda) \subseteq V_\lambda.$$

Dimostrazione
Sia $v \in V_\lambda$ (cioè $P(v) = \lambda v$). Dobbiamo vedere che $Qv \in V_\lambda$.

$$P(Q(v)) = (P \circ Q)(v) = (Q \circ P)(v) = Q(\lambda v) = \lambda Q(v).$$

□

(V, h) spazio Hermitiano (Spazio vettoriale complesso h forma hermitiana definita positiva in V)
$\dim(V) < +\infty$

Teorema 1
Sia (V, h) uno spazio hermitiano, $L \in End(V)$ operatore, sono equivalenti

- *L è normale (rispetto ad h)*
- *esiste una base ortonormale B di V composta da autovettori per L*

Lemma 2
(V, h) spazio hermitiano, $L \in End(V)$ normale
sono equivalenti

- *$Lv = \lambda v$*
- *$L^\star v = \overline{\lambda} v$*

In particolare λ è l'autovalore per L se e solo se $\overline{\lambda}$ è autovalore per $L^\star$

$$V_\lambda(L) = V_{\overline{\lambda}}(L^\star).$$

Dimostrazione
Se $v = 0$ non c'è niente da dimostrare.
Se $v \neq 0$ basta far vedere che se $v \in V_\lambda(L)$ allora $v \in V_{\overline{\lambda}}(L^\star)$. L'inclusione contraria segue da $L^{\star t} = L$

$$w \in V_\lambda(L), \quad v \in V_\lambda(L).$$

$$\begin{aligned} h(L^\star(v), w) &= h(v, L(w)) = h(v, \lambda w) \\ &= \overline{\lambda} h(v, w) = h(\overline{\lambda} v, w) \\ h(L^\star(v) - \overline{\lambda} v, w) &= 0 \quad \circledast \end{aligned}$$

Per il lemma, siccome per ipotesi L è normale,

$$L^\star(v) \in V_\lambda(L), \quad \overline{\lambda}v \in V_\lambda(L)$$

$$\Rightarrow \quad L^\star(v) - \overline{\lambda}v \in V_\lambda(L)$$

Quindi nella $\circledast$ *posso prendere* $w = L^\star(v) - \overline{\lambda}v$*, ottenendo*

$$h(L^\star(v) - \overline{\lambda}v, L^\star(v) - \overline{\lambda}v) = 0.$$

Poiché h è definito positivo, segue

$$L^\star(v) - \overline{\lambda}v = 0$$

cioè $\qquad L^\star(v) = \overline{\lambda}v$

$\square$

Osservazione

Dal lemma segue $V_\lambda(L) \perp V_\mu(L)$ se $\lambda \neq \mu$

$$v \in V_\lambda, \quad w \in V_\mu$$

$$\lambda h(v,w) = h(\lambda v, w) = h(Lv, w) = h(v, L^\star w) = h(v, \overline{\mu}w) = \mu h(v,w) \Rightarrow h(v,w) = 0$$

Dato che $\lambda \neq \mu$

Dimostrazione (Teorema Spettrale)

1) $\Rightarrow$ 2) *Procediamo per induzione su* $\dim V$*,con base ovvia* $\dim V = 1$

Supponiamo il teorema vero per gli spazi hermitiani di dimensione $\leq n-1$ *e sia* $\dim_{\mathbb{C}} V = n$

Sia $v_1 \in V$ un autovettore per L, che possiamo assumere di norma 1. Sia $V_1 = \mathbb{C}v_1, W = v_1^perp$*.*

Allora $V = V_1 \oplus W$*.*

Poiché V_1 è L-invariante (per costruzione) e $L^\star$-invariante per il lemma precedente, lo stesso accade per W.

Inoltre $L|_W \in End(V)$ è normale.

Per induzione, esiste una base $h|_W$-ortonormale formata da autovettori per $L|_W$, sia $\{v_2, \ldots, v_n\}$. Allora $\{v_1, \ldots, v_n\}$ è una base h-ortonormale di V formata da autovettori per L.

2) $\Rightarrow$ 1). *Sia $B = \{v_1, \ldots, v_n\}$ una base h-ortonormale di autovettori per L. Allora*

$$[L]_B^B = \bigwedge = \begin{pmatrix} \lambda_1 & \ldots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \ldots & \lambda_n \end{pmatrix}$$

$$[L^\star]_B^B = \overline{[L]_B^B}^t = \overline{\bigwedge}$$

$$[L \circ L^\star]_B^B = [L]_B^B [L^\star]_B^B = \bigwedge \overline{\bigwedge} = \overline{\bigwedge} \bigwedge = [L^\star]_B^B [L]_B^B = [L^\star \circ L]_B^B$$

Poiché la mappa $A \to [A]_B^B$ è un isomorfismo tra $End(V)$ e $M_{nn}(\mathbb{C})$, segue

$$L \circ L^\star = L^\star \circ L.$$

cioè L è normale $\square$

Osservazioni

1. È essenziale che h sia definita positiva.

$$h(x,y) = x^t H\overline{y} \quad M = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

non è definita positiva $h(\left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 1 \end{smallmatrix}\right), \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ 1 \end{smallmatrix}\right)) = -1$

$$L_A : \mathbb{C}^2 \to \mathbb{C}^2 \;\; A = \begin{pmatrix} 0 & i \\ i & -2 \end{pmatrix}.$$

Dico che L_A è autoaggiunto, quindi normale

$$h(L_A X, Y) = h(X, L_A Y)$$
$$(L_A X)^t H\overline{Y} = X^t H\overline{L_A Y}$$
$$X^t A^t H\overline{Y} = X^t H\overline{AY} \;\; \forall X, Y$$
$$A^t H = H\overline{A}$$
$$\begin{pmatrix} 0 & u \\ i & -2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 0 & -i \\ -i & -2 \end{pmatrix}$$
$$\begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 2 \end{pmatrix}$$

Calcolo il polinomio caratteristico di A

$$\det\begin{pmatrix} t & -i \\ -i & t+2 \end{pmatrix} = t(t+2) + 1 = (t+1)^2.$$

Ma $A \neq \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$, in particolare non è diagonalizzabile

2. Vediamo in dettaglio il fatto che $L|_W$ è normale

Ritornando alla dimostrazione del teorema spettrlae, osserviamo che se W è L-invariante è anche $L^\star$-invariante.

Infatti, se $V = \bigoplus_\lambda V_\lambda(L)$ (per esercizio da dimostrare)

$W = \bigoplus_\lambda (V_\lambda(L) \cap W)$

$=\bigoplus_\lambda (V_{\overline{\lambda}}(L^\star) \cap W)$

$=> W$ è $L^\star$-invariante

Adesso osservo che $(L|_W)^\star = (L^\star)|_W$

(L$\big|_{W)} \circ (L\big|_W)^\star = (L|_W) \circ (L^s tar|_W) =$

$(L \circ L^\star)|_W = (L^\star \circ L)|_W = (L^\star|_W) \circ L|_W = (L|_W)^\star \circ L|_W$

2 Richiami su spazi vettoriali duali

V spazio vettoriale su $\mathbb{K}$ di dimensione finita

$$V^V = V^{\acute{s}tar = Hom(V, \mathbb{K}).}$$

sia $A \leq V$

$$Ann(A) = A^{\#} = \{f \in V^{\star} | f(a) = 0 \ \ \forall a \in A\}.$$

Osservazioni

1) $A^{\#}$ è un sottospazio

2) $A^{\#\#} =< A >$

$$i : V \to V^{\star\star}$$
$$v \in V, \quad f \in V^{\star}$$
$$i(v)(f) = f(v)$$

V, W spazi vettoriali di dimensione finita $f \in Hom_{\mathbb{K}}(V, W)$, $f^{\star} \in Hom_{\mathbb{K}}(W^{\star}, V^{\star})$, la trasposta di f è definita con $\phi \in W^{\star}$

$f^{\star}(\phi) = \phi \circ f$

$$\begin{tikzcd} V \arrow[r, "f"] \arrow[d, dashed, "f^{\#}(\phi)"'] & W \arrow[dl, "\phi"] \\ \mathbb{K} & \end{tikzcd}$$

Definizione 1

Definisco la dualità standard su V come

$$\langle \ , \ \rangle : V^{\star} \times V \to \mathbb{K}.$$

$\langle v, f \rangle = \langle f, v \rangle = f(v)$

con questa proprietà

$$\langle f(v), w^{\star} \rangle = \langle v, f^{\star}(w^{\star}) \rangle.$$

Ricordo che se $B = \{v_1, \ldots, v_n\}$ è una base di V allora i funzionali $v_i^{\star}$ definiti da

$$\langle v_i^{\star}, v_j \rangle = \delta_{ij}.$$

per $1 \leq i \leq n$ formano una base $B^{\star}$ di $V^{\star}$ detta base duale di B

Sia $f : V \to W$ un'applicazione lineare, siano $B = \{v_1, \ldots, v_n\}, L = \{w_1, \ldots, w_m\}$ basi di V, W consideriamo $f^{\star} : W^{\star} \to V^{\star}$ Allora:

$$\begin{array}{cc} [f]_B^B = & [f^{\star}]_{L^{\star}}^{B^{\star}\,t} \\ \| & \| \\ (a_{ij}) & (a_{ij}^{\star}) \end{array}$$

Tesi $\quad a_{ih} = a_{hi}^{\star}$

$f^{\star}(w_i^{\star}) = \sum_{i=1}^{n} a_{ij}^{\overset{\star}{i}}$

$f^{\star}(w_i^{\star})(v_h) = \sum_{i=1}^{n} a_{ij}^{\star} v_i^{\star}(v_h) = \sum_{i=1}^{n} a_{ij}^{\star} \delta_{ih} = a_{hi}^{\star}$

$\|$

$w_i^{\star}(f(w_h)) = w_i^{\star}(\sum_{i=1}^{n} a_{ih} w_i) = \sum_{i=1}^{n} a_{ih} w_i^{\star}(w_i) =$

$= \sum_{i=1}^{n} a_{ih} \delta_{ij} = a_{ih}$

Teorema 2 (Qualche proprietà importante)
$f : V \to W$ *lineare* $\quad f^\star : W^\star \to V^\star$
$1)(Imf)^{\#} = \ker f^\star$
$2)(\ker f)^{\#} = Imf^\star$
$3)(\lambda f + \mu g)^\star = \lambda f^\star + \mu g^\star \qquad (\lambda, \mu \in \mathbb{K}, g \in Hom(V, W))$
$4)(h \circ f)^\star = f^\star \circ h^\star \qquad h : W \Rightarrow U$ *lineare*

Dimostrazione (Il punto 2, 3 e 4 vengono lasciati per esercizio)
1) $\emptyset \in (Imf)^{\#}$
$\Leftrightarrow \forall w \in Imf \quad \emptyset(w) = 0$
$\Leftrightarrow \forall v \in V \emptyset(f(v)) = 0$
$\Leftrightarrow \emptyset \circ f = 0$
$\Leftrightarrow \emptyset \in ker f^\star$
Quindi abbiamo visto che $(Imf)^{\#} = \ker F^\star$ □

Proposizione 1
Sia V uno spazio vettoriale di dimensione n su $\mathbb{K}$ e W un sottospazio. Allora
$$\dim(W) + \dim W^{\#} = n.$$

Dimostrazione
Da quanto visto, la mappa
$$Hom(V_1, V_2) \to Hom(V^s tar_2, V^s tar_1)$$
$$f \quad \to \quad f^t$$
è un isomorfismo di spazi vettoriali. Inoltre f è iniettiva (rispettivamente suriettiva) se e solo se $f^\star$ è suriettiva (rispettivamente iniettiva)
Consideriamo la proiezione $\pi : V \to V|_W := U$
Poiché π è suriettiva $\pi^\star : U^\star \to V^\star$ è iniettiva e
$$W^{\#} = (\ker \pi)^{\#} = Im\pi^\star.$$
per cui
$$\dim W^{\#} = \dim(Im\pi^\star) = \dim U^\star = \dim V - \dim W.$$
□

Lezione 21 Geometria 1

Federico De Sisti

2024-04-24

1 Nuove informazioni sulle forme bilineari

V spazio vettoriale su $\mathbb{R}$
Ricordiamo che una forma bilineare è un'applicazione

$$b : V \times V \to \mathbb{R}.$$

Abbiamo già osservato che se $A = [b]_B$
$X = [v]_B, \;\; Y = [w]_B$

$$b(v, w) = X^t AY.$$

Come cambia $[b]_B$ se cambio B
$B = \{v_1, \dots, v_n\}$ X=[v]$_B$ $X' = [v]'_B$
B' = {v$'_1, \dots, v'_n\}$ Y = [w]$_B$ $Y' = [w]'_B$
A = [b]$_B$ $A' = [b]_{B'}$

$$b(v, w) = X^t AY = X'^T A'Y'$$

$X = MX', \;\; Y = MY' \quad M = [Id_V]^B_B$
(MX')$^t A(MY') = X'^t A'Y'$
$X' M^t AMY' = X'^t A'Y'$
$A' = M^t AM$

Definizione 1
Diciamo che due matrici A, B sono congruenti se esiste una matrice invertibile M tale che $B = M^t AM$

Proposizione 1
Due matrici rappresentano la stessa forma bilineare in basi diversi se e solo se sono congruenti

Osservazione
1. La congruenza è una relazione di equivalenza
2. Il rango è invariante per la congruenza
3. Per matrici reali invertibili, il segno del determinante è invariante
4. Se M è ortogonale

$$M^t AM = M^{-1} AM.$$

Se ho una forma bilineare $b : V \times V \to \mathbb{K}$ posso definire due applicazioni $V \to V^\star$ nel modo seguente.

Fissato $v \in V$, prendo $\begin{array}{l} b_v(w) = b(v, w) \\ b'_v(w) = b(w, v) \end{array}$

È chiaro che $b_v, b'_v \in V^\star$ (usiamo il fatto che b è bilineare)
Dunque ho due applicazioni $V \to V^\star$

$$\delta_b(v) = b_v \quad \delta'_b(v) = b'_v.$$

Definizione 2
Il rango di una funzione bilineare è il rango di una qualsiasi matrice che la rappresenta

Definizione 3
Una forma bilineare è non degenere se ha rango (massimo) $\dim V$

Proposizione 2
Sia V uno spazio vettoriale di dimensione finita,

$$b : V \times V \to \mathbb{K} \textit{ una forma bilineare.}$$

Sono equivalenti

- b *è non degenere ovvero* $b(v, v) = 0 \Leftrightarrow v = 0$
- $\forall v \in V, v \neq 0 \;\; \exists w \in V : \quad b(v, w) \neq 0$
- $\forall w \in V, \; w \neq 0 \;\; \exists v \in V : b(v, w) \neq 0$
- $\delta_b : V \to V^\star$ *è un isomorfismo*
- $\delta'_b : V \to V^*$ *è un isomorfismo*

Dimostrazione
Sia $B = \{v_1, \ldots, v_n\}$ *una base di* V *e sia* $A = [b]_B$
1) $\Rightarrow$ 2) *per ipotesi* $\det A \neq 0$ *se* $X = [v]_B \quad X \neq 0 \Rightarrow X^t A \neq 0$
quindi esiste $Y \in \mathbb{K}^n : X^t AY \neq 0$.
Se $w \in V$ *è tale che* $[w]_B = Y$ *ho dimostrato che* $b(v, w) = X^t AY \neq 0$
2) $\Rightarrow$ 1) *Riscrivendo l'ipotesi in coordinate abbiamo*

$$\forall X \neq 0 \; \exists Y : \quad X^t AY \neq 0$$

$$\Rightarrow X^t A \neq 0 \quad \forall X \neq 0 \Rightarrow A \textit{ è invertibile}$$

1) $\Leftrightarrow$ 3) *è come sopra*
2) $\Rightarrow$ 4) *Poiché* $\dim V = \dim V^\star$ *basta vedere che* δ_b *è iniettava, cioè* $\ker \delta_b = \{0\}$
$v \in \ker \delta_b \quad \Rightarrow \quad \delta_b(v) = b_v$ *è il funzionale nullo, cioè*
$b_v(w) = 0 \quad \forall w \in V$
$b_v(w) = b(v, w) \Rightarrow v = 0$
4) $\Rightarrow$ 2) *Dato* $v \neq 0$, $\delta_b(v) = b_v \neq 0$ *perché* δ_b *è un isomorfismo,*
quindi esiste $w \in V$:

$$b(v, w) = b_v(w) \neq 0$$

3) $\Leftrightarrow$ 5) *è simile a* 2) $\Leftrightarrow$ 4) $\square$

2 Caso Simmetrico

$$b(v, w) = b(w, v).$$

Osservazione
b è simmetrica se e solo se lo è qualsiasi matrice che la rappresenta. **Dato** $S \subset V$ definiamo

$$S^{\perp} = \{v \in V | b(v, s) = 0 \quad \forall s \in S\}.$$

Esercizio $S^{\perp}$ è un sottogruppo e, $S^{\perp} =< s >^{\perp}$

Definizione 4
Due sottospazi U, W si dicono ortogonali se

$$Y \subseteq W^{p}erp \Leftrightarrow W \subset U^{\perp})$$

Definizione 5
$v \in V$ *si dice isotropo se* $b(v, v) = 0$

Definizione 6
$\ker b = \{v \in V | b(v, w) = 0 \quad \forall w \in V\} = V^{\perp}$

Osservazione
b è non degenere se e solo se $\ker b = \{0\}$

Proposizione 3
Sia b non degenere, $W \subseteq V$ sottospazio,
Allora, se $\delta_b : V \to V^{\star}$ è l'isomorfismo canonico indotto da b, $\delta_b(W^t) = W^{\star}$. In particolare risulta sempre $\dim W + \dim W^{\perp} = \dim V$

Nota
Non è vero, anche nel caso non degenere, che $V = W \oplus W^{\perp}$

Dimostrazione
$w \in W^{\perp} \quad \delta_b(w) = b_w$ *Voglio vedere che*
$b_w \in W^{\#} \quad b_w(w') = b(w, w') = 0 \quad \forall w' \in W$
Quindi $\delta_b(W^{\perp}) \subseteq W^{\#}$
Prendo ora $f \in W^{\#}$; poiché b è non degenere, δ_b è un isomorfismo, quindi esiste $v \in V$

$$f = \delta_b(v) = b_v \quad b(v, w) = b_v(w) = 0 \quad \forall w \Rightarrow v \in W^{\perp}.$$

quindi $f = \delta(b_v)$ con $v \in W^{\perp}$ □

Proposizione 4
Sia V spazio vettoriale, $W \subset V$ sottospazio, $b \in Bi(V)$. Sono equivalenti:

- $V = W \oplus W^\perp$
- $b|_W$ *è non degenere*

Lemma 1
$\ker b|_W = W \cap W^\perp$

Dimostrazione (lemma)
$w \in \ker b|_W \Leftrightarrow b(w, w') = 0 \quad \forall w' \in W \Leftrightarrow w \in W \cap W'$ □

Dimostrazione (proposizione)
1) $\Rightarrow$ 2)*segue dal lemma perché dall'ipotesi $W \cap W^\perp = \{0\}$*
2) $\Rightarrow$ 1) *Sia $\{w_1, \dots, w_s\}$ una base di W*
Per ipotesi $A = (b(w_i, w_j))$ è invertibile, in particolare dato $v \in V$, il sistema lineare

$$* \quad A \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b(v, w_1) \\ \vdots \\ b(v, w_s) \end{pmatrix}$$

ha soluzione unica. Poniamo

$$w = v - \sum_{h=1}^{s} x_j w_j.$$

*Notiamo che * significa*

$$\sum_{h=1}^{s} b(v_h, w_j) x_h = b(v, w_j) \quad 1 \le j \le s.$$

Calcoliamo

$b(w, w_i) = b(v - \sum_{h=1}^{s} x_h w_h, w_j) = b(v, w_j) - \sum_{h=1}^{s} x_h b(w_h, w_j) = b(v, w_j) =$
$= b(v, w_i) - b(v, w_i) = 0$

Poiché i $\{w_i\}$ sono una base di W, risulta $b(w, u) = 0 \quad \forall u \in W$, cioè $w \in W^\perp$
Allora

$$v = w + \sum_{h=1}^{s} x_h w_h.$$

Pertanto $V = W + W^\perp$, per ipotesi $W \cap W^\perp = \ker b|_W = \{0\}$, quindi $V = W \oplus W^\perp$ □

Lezione 22 Geometria I

Federico De Sisti

2024-04-29

1 Boh non ero a lezione

$W \subseteq V$ sottospazio $g \in Bi(V)$
$g|_W$ è non degenere $\Leftrightarrow V = W \oplus W^\perp$
Cosa dimostreremo oggi
Sia V spazio vettoriale di dimensione finita e $g \in Bi_s(V)$ (forma bilineare simmetrica
$\mathbb{K}$ qualsiasi, esiste una base $g-$*ortogonale*
$\mathbb{K}$ algebricamente chiuso ($\mathbb{K} \cong \mathbb{C}$), esiste una base di V rispetto alla quale la matrice di g è $\begin{pmatrix} I_r & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ $\quad r = rg(g)$
$\mathbb{K} = \mathbb{R}$ esiste una base di V rispetto alla quale la matrice di g è $\begin{pmatrix} I_r & 0 & 0 \\ 0 & -I_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ $\quad r+s = rg(g) \quad n-r-s$ indice di nullità, ker della forma
V spazio vettoriale $(\dim(V) < +\infty), g \in Bi_s(V)$

Definizione 1
la forma quadrativi associata a V è l'applicazione $q : V \to \mathbb{K}$ definita da $q(v) = g(v, v)$ e questa è una funzione omogenea di grado 2

Esempio
$V \cong \mathbb{K}^n, g =$ prodotto scalare standard
$g\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^n x_i^2$
Osservazione
Valgono:
1) $q(kv) = k^2 q(v)$
2) $2g(v, w) = q(v + w) - q(v) - q(w)$
dove $g(v, w)$ è la forma polare di q
Dimostrazione
1.$q(kv) = g(kv, kv) = k^2 g(v, v) = k^2 q(v)$
2.$q(v + w) - q(v) - q(w) = g(v + w, v + w) - g(v, v) - g(w, w) =$
$= \cancel{g(v, v)} + 2g(w, v) + \cancel{g(w, w)} - \cancel{g(v, v)} - \cancel{g(w, w)} = 2g(w, v)$ $\square$
Osservazione
$V = \mathbb{R}^4$ e sia $q\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = x_1^2 + 2x_2^2 - x_4^2 + x_1x_4 + 6x_2x_3 - 2x_1x_2$
Voglio trovare la matrice della forma polare di q rispetto alla base canonica
$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 1/2 \\ -1 & 2 & 3 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 0 \\ 1/2 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$
Sulla diagonale ci sono i coefficienti delle componenti al quadrato $(x_i)^2$ gli altri li ottieni dividendo per 2 ogni altro coefficiente

Teorema 1 ((Caratteristica di $\mathbb{K}$) $\neq 2$)
Dato V spazio vettoriale di dimensione $n \geq 1$ e g forma bilineare simmetrica su V, allora esiste una base g-ortogonale.

Dimostrazione
Per induzione su $\dim V = n$. *Se $n = 1$ non c'è nulla da dimostrare.*
se g è la forma bilineare nulla ($g(v, w) = 0 \ \forall v, w \in V$) ogni base è $g-$ortogonale.
Altrimenti esistono, $v, w \in V$ con $g(v, w) \neq 0$.
Assumo che almeno uno tra $v, w, v + w$ è non isotropo. Infatti se v, w sono isotropi

$$g(v + w, v + w) = g(v, v) + g(v, w) + g(w, w) = 2g(v, w) \neq 0).$$

quindi $\exists v_1 \in V$ t.c $g(v_1, v_1) \neq 0$. Allora $g|_{\mathbb{K}v_1}$ è non degenere quindi $V = \mathbb{K}v_1 \oplus W$ con $W = (\mathbb{K}v_1)^\perp$
$\dim(W) = n - 1$, *per induzione $\exists$ una base $\{v_2, \ldots, v_n\}$ di W con $g(v_1, v_j) = 0$ se $2 \leq j \leq n$, $\{v_1, \ldots, v_n\}$ è una base g-ortogonale di V* $\square$

Teorema 2
Supponiamo $\mathbb{K}$ algebricamente chiuso. Sia V spazio vettoriale dimensione $n \geq 1$ e g forma bilineare simmetrica su V, esiste una base di V rispetto alla quale la matrice di g è $D = \begin{pmatrix} I_r & 0 \\ 0 & O_{n-r} \end{pmatrix}$ $r = rg(D)$
In modo equivalente, ogni matrice simmetrica a coefficienti in $\mathbb{K}$ è congruente a D

Dimostrazione
Per il teorema precedente, esiste una base $B = \{v'_1, \ldots, v'_n\}$ di V rispetto alla quale $(g)_{B'} = \begin{pmatrix} a_{11} & \ldots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \ldots & a_{nn} \end{pmatrix}$
Possiamo assumere che $a_{11}, \ldots, a_{rr}$ siano non nulli e che $a_{r+i,r+i} = 0$ con $1 \leq i \leq n - r$.
Poiché $\mathbb{K}$ è algebricamente chiuso, esistono $\alpha_1, \ldots, \alpha_r \in \mathbb{K}$ t.c. $\alpha_i^2 = a_{ii}, \ \ 1 \leq i \leq r$ poniamo.
$v_i = \begin{cases} \frac{1}{\alpha_i} v'_i, & 1 \leq i \leq r \\ v'_i & r + 1 \leq i \leq n \end{cases}$
è chiaro che $\{v_1, \ldots, v_n\}$ è una base. Risulta
$g(v_i, v_i) = \begin{cases} g(\frac{v'_i}{\alpha_i}, \frac{v'_i}{\alpha_i} = 1\alpha_i^2 g(v'_i, v'_i) = \frac{a_{ii}}{\alpha_i^2} = 1 & 1 \leq i \leq r \\ g(v'_i, v'_i) = 0 & r + 1 \leq i \leq n \end{cases}$ $\square$

Osservazione
Se g è non degenere, esiste una base B rispetto alla quale $(g)_B = Id_n$
Caso Reale $\mathbb{K} = \mathbb{R}$
V spazio vettoriale reale $(\dim V = n \geq 1)$
$g \in Bi_s(V)$
Sia B una base g-ortogonale. Definiamo

Definizione 2
Chiamiamo $i_+(g), i_-(g), i_0(g)$ indice di positività, negatività e nullità di g, e sono rispettivamente
$i_+(g) = \{v \in B | g(v,v) > 0\}$
$i_-(g) = \{v \in B | g(v,v) < 0\}$
$i_0(g) = \{v \in B | g(v,v) = 0\}$

Teorema 3 (Sylvester)
*Gli indici non dipendono dalla scelta di B. Posto $p = i_+(g), q = i_-(g)$ allora $1 + q = n - r \quad (r = rg(g))$
ed esiste una base di V rispetto alla quale la matrice E di g è tale che*

$$E = \begin{pmatrix} Id_p & \dots & 0 \\ \vdots & -Id_q & \vdots \\ 0 & \dots & O_{n-r} \end{pmatrix}.$$

equivalentemente, ogni matrice simmetrica reale A è congruente ad una matrice della forma E in cui $r = rg(A)$ e p dipende solo da A

Dimostrazione
Dal teorema di esistenza di una base g-ortogonale deduciamo che esiste una base $\{f_1, \dots, f_n\}$ di V rispetto alla quale, se $v = \sum_{i=1}^n y_i f_i$
$q(v) = a_{11}y_1^2 + a_{22}y_2^2 + \dots + a_{nn}y_n^2$
con esattamente n coefficienti diversi da 0, che possiamo supporre essere $a_{11}, \dots, a_{rr}$
Siano $a_{11}, \dots, a_{pp} > 0, \quad a_{p+1,p+1}, \dots, a_{rr} < 0$
$\exists \alpha_1, \dots, \alpha_p, \alpha_{p+1}, \dots, \alpha_r \in \mathbb{R}$ *t.c.*
$\alpha_i^2 = a_{ii} \quad 1 \leq i \leq p \qquad \alpha_i^2 = -a_{ii} \quad p+1 \leq i \leq r$
Allora posto $e_i = \begin{cases} \frac{1}{\alpha_i} f_i & 1 \leq i \leq r \\ f_i & r+1 \leq i \leq n \end{cases}$
la matrice di g rispetto a $\{e_1, \dots, e_n\}$ è $\begin{pmatrix} Id_p & \dots & 0 \\ \vdots & -Id_q & \vdots \\ 0 & \dots & O_{n-r} \end{pmatrix}$
Resta da dimostrare che p dipende solo da g e non dalla base B usata per definirlo
Supponiamo che rispetto ad un'altra base g-ortogonale $\{b_1, \dots, b_n\}$, risulti, per

$v = \sum_{i=1}^{n} z_i b_i$

$$q(v) = z_1^2 + \ldots + z_t^2 - z_{t+1}^2 - \ldots - z_r^2.$$

mostriamo che $p = t$
se per assurdo $p \neq t$ *assumo* $t \leq p$ *considero quindi i sottospazi* $S =< e_1, \ldots, e_n >$
$T =< b_{t+1}, \ldots, b_n >$
Poiché $\dim S + \dim T = p + n - t > n$ *perché* $t < p$ *per Grassman vettoriale* $S \cap T \neq \{0\}$ *sia* $0 \neq v \in S \cap T$
allora $r = x_1 e_1 + \ldots + x_p e_p = z_{t+1} b_{t+1} + \ldots, z_n b_n$
contraddizione:

$$q(v) = \sum_{i=1}^{p} x_i^2 > 0.$$

$$q(v) = -\sum_{i=1}^{r} z_i^2 + z_{r+1}^2 + \ldots + z_n^2 < 0.$$

□

Osservazioni
1. Esiste una definizione più intrinseca degli indici. Ricordiamo che $g \in Bil_S(V), V$ spazio vettoriale su $/R$ è definita positiva se $g(v,v) > 0, \ \forall v \in V \backslash \{0\}$ e che g è definita negativa se $-g$ è definita positiva.
2.Il teorema di Sylvester si estende, con la stessa dimostrazione alla forma hermitiana.
In particolare ogni matrice hermitiana è congruente a una matrice diagonale del del tipo

$$\begin{pmatrix} I_p & \ldots & 0 \\ \vdots & I_{r-p} & \vdots \\ 0 & \ldots & O_{n-r} \end{pmatrix}$$

Proposizione 1
Sia (V, g) *uno spazio vettoriale su* $\mathbb{R}$ *dotati di una forma bilineare simmetrica* g
Siano dati un prodotto scalare h *e una forma bilineare simmetrica* k
Allora esiste una base di V *che sia* h*-ortonormale e* k*-ortogonale*

Dimostrazione
(V, h) *è uno spazio euclideo, quindi per il teorema di rappresentazione delle forme bilineari, esiste un operatore* $L \in End(V)$ *tale che*

$$h(L(v), w) = k(v, w).$$

Poiché k *è simmetrica,* L *è simmetrica, per il teorema spettrale siste una base* h*-ortonormale costituita da autovettori per* L.
Sia $\{v_1, \ldots, v_n\}$ *tale base. Voglio dimostrare che* $\{v_1, \ldots, v_n\}$ *è* k*-ortogonale*

$$k(v_r, v_s) = h(L(v_r), v_s) = h(\lambda_r v_r, v_s) = \lambda_r h(v_r, v_s) = \lambda_r \delta_{rs}.$$

$\square$

Corollario 1
Sia (V, h) uno spazio euclideo, e k una forma bilineare simmetrica su V. Allora $i_+(k), i_-(k), i_0(k)$ corrispondono al numero di autovalori positivi, negativi, nulli, dell'endomorfismo di V che rappresenta k rispetto ad h

Dimostrazione
Sia come nella proposizione, $\{v_1, \ldots, v_n\}$ una h-ortonormale e k-ortogonale, per il teorema di Sylvester

$$i_+(k) = |\{v_i | k(v_i, v_i) > 0\}|.$$

Ma abbiamo visto che $k(v_i, v_i) = \lambda_i$
quindi $i_+(k) = |\{\lambda_i > 0\}|$. La dimostrazione non è terminata. $\square$

Definizione 3
Una matrice simmetrica reale si dice definita positiva se tutti gli autovalori sono positivi

Definizione 4
Data una matrice quadrata $n \times n$, i minori principali leading, sono quelli ottenuti estraendo righe e colonne come segue

$$\{1\}, \{1, 2\}, \{1, 2, 3\}, \ldots, \{1, 2, 3, \ldots, n\}.$$

Esempio
$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
$|1| = 1$
$\det \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} = -2$

$\det \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \det \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} + \det \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} = 1 - 1 - 1 = -1$

Teorema 4
A è definita positiva se e solo se tutti i suoi autovalori principali leading sono positivi

$q\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = 3x_1^2 + 4x_1x_2 + 8x_1x_3 + 4x_2x_3 + 3x_3^2$

1. Determinare gli indici
2. Calcolare $W\perp$ se $W = \mathbb{R}\begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$

Scriviamo la matrice della forma bilineare associata rispetto alla base standard

$$A = \begin{pmatrix} 3 & 2 & 4 \\ 2 & 0 & 2 \\ 4 & 2 & 3 \end{pmatrix}.$$

$$\det\begin{pmatrix} \lambda - 3 & -2 & -4 \\ -2 & \lambda & -2 \\ -4 & -2 & \lambda - 3 \end{pmatrix} = 0 \qquad i_- = 2$$

Lezione 23 Geometria I

Federico De Sisti

2024-05-02

1 In questa lezione il signorino ha semplciemente riportato gli esoneri e fatto esercizi della scherda 7, nnon è roba mia

Lezione 24 Geometria I

Federico De Sisti

2024-05-06

1 Spazi proiettivi e Antani

Servirebbe un'introduzione per tutto ciò, ma non sarà il Posta a darcela, la motivazione matematica è che la formula di Grassmann vale sempre (antani)

Definizione 1 (Spazio Proiettivo)
*Sia V uno spazio vettoriale di dimensione finita sul campo $\mathbb{K}$. Lo **spazio proiettivo** associato a V denominato con $\mathbb{P}(V)$ è l'insieme dei sottospazi* 1*-dimensionali di V*

$$\mathbb{K}v \leftrightarrow [v] \leftrightsquigarrow \textit{punto di } \mathbb{P}(v).$$

$\dim V = 0 \quad \mathbb{P}(V) = \emptyset$
$\dim V = 1 \quad \mathbb{P}(V) = \{pt\}$
$\dim V = 2 \quad \mathbb{P}(V)$ *retta proiettiva*
$\dim V = 2 \quad \mathbb{P}(V)$ *piano proiettivo*
Quindi $\dim \mathbb{P}(V) = \dim V - 1$
Caso importante $V = \mathbb{K}^{n+1}$

$$\mathbb{P}(V) = \mathbb{P}^n (= \mathbb{P}^n(K)).$$

Osservazione
1. Dati $v \in V \setminus \{0\}$, $\mathbb{K}v$ è un sottospazio 1-dimensionale, quindi esso dà luogo a un punto nello spazio proiettivo che denotiamo $[v]$
2. La nozione di spazio proiettivo di V può introdursi in modo equivalente tramite la seguente relazione d'equivalenza su $V \setminus \{0\}$

$$v \sim w \Leftrightarrow \exists \lambda \in \mathbb{K} \setminus \{0\} \text{ t.c. } v = \lambda w.$$

Allora
$$\mathbb{P}(v) = V \setminus \{0\} / INSERISCIQUOTIENTSPACE.$$

Riprendendo l'osservazione 1, nel caso $V = \mathbb{K}^{n+1}$

$$(x_0, \ldots, x_n) \in \mathbb{K}^n + 1 \setminus \{0\} \rightsquigarrow [x_0 \ldots, x_n] \in \mathbb{P}^n.$$

$$[x_0, \ldots, x_n] = [y_0, \ldots, y_n].$$

$\Leftrightarrow \exists \lambda \in \mathbb{K} \setminus \{0\} : \quad y_i = \lambda x_i, \quad 0 \leq i \leq n$

Definizione 2
Sia $\mathbb{P} = \mathbb{P}(V)$ ed $\{e_1, \ldots, e_n\}$ una base di V.
Diciamo che $\{e_1, \ldots, e_n\}$ definisce un sistema di coordinate omogenee (o riferimento proiettivo) su V, denotato con $e_0 \ldots e_n$

Dato $v \in V\{0\}$
$$v = x_0 e_0 + \ldots + x_n e_n.$$

$\rightsquigarrow (x_0, \dots, x_n) \in \mathbb{K}^{\{}n+1\} \setminus \{0\}$

$$P[x_1, \dots, x_n] \leftrightarrow P = [v].$$

$x_0, \dots, x_n$ si dicono coordinate omogenee di v
Ad esempio, fissata la base $\{e_0, e_1, e_2$ in $\mathbb{P}^2$,
$P[1, 2, 3]$ è il sottospazio 1-dim di V generato da $e_0 + 2e_1 + 3e_2$

Nomenclatura 1
Fissato $e_0 \dots e_n$, i punti

$$F_0[1, 0, \dots, 0] = [e_0], \dots, F_n[0, \dots, 1] = [e_n].$$

sono i punti fondamentali del riferimento
$U[1, \dots, 1]$ *punto unità del riferimento*
Nota Bene
Poichè $[v] = [\lambda v]$ risulta

$$\lambda v = \lambda x_0 e_0 + \dots + \lambda x_n e_n.$$

quindi le coordinate omogenee sono determinate solo a meno di un fattore di proporzionalità non nullo

Osservazione
se $e_0 \dots e_n$ è un riferimento proiettivo, anche $(\mu e_0) \dots (\mu e_n)$, $\quad \mu \in \mathbb{K} \setminus \{0\}$ è un riferimento proiettivo e i punti hanno le stesse coordinate omogenee rispetto ai due riferimenti.
Quindi
consideriamo identici due riferimenti se definiti da basi proporzionali

$$e_0, \dots, e_n = (\mu e_0), \dots, (\mu e_n).$$

Un riferimento in $\mathbb{P}^n$ determinato dalla base canonica di $\mathbb{K}^{n+1}$ si dice riferimento standard.
i punti fondamentali sono

$$[1, 0, \dots, 0], [0, 1, \dots, 0], \dots, [0, \dots, 0, 1].$$

Dato $W \subset V$ sottospazio vettoriale possiamo considerare $\mathbb{P}(W) \leq \mathbb{P}(V)$
$\mathbb{P}(W)$ è detto sottospazio proiettivo di $\mathbb{P}(V)$

$$\dim \mathbb{P}(V) - \dim \mathbb{P}(W) = (\dim V - 1) - (\dim W - 1) = \dim V - \dim W.$$

Definizione 3
Un iperpiano in $\mathbb{P}^n$ è un sottospazio proiettivo di codimensione 1

Supponiamo che in $\mathbb{P}^n$ sia dissato un riferimento $e_0, \ldots, e_n$ con coordinate omogenee $x_0, \ldots, x_n$

$$\circledast \quad a_0x_0 + a_1x_1 + \ldots + a_nx_n = 0 \quad \begin{pmatrix} a_0 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} \neq \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Se leggiamo quest'equazione in V è l'equazione cartesiana di un iperpiano vettoriale $H \subset V$
I punti di $P = [v] \in \mathbb{P}$ le cui coordinate omogenee verificano $\circledast$ sono quelli tali che $v \in H, \quad v \neq 0$ quindi sono i punti di $\mathbb{P}(H)$
Nota bene
Se $[x_0, \ldots, x_{n2}] = [y_0, \ldots, y_n]$ e

$$a_0x_0 + \ldots_{a\ n} + x_n = 0.$$

allora anche $a_0y_0 + \ldots + a_ny_n = 0$ perché $[x_0, \ldots, x_n] = [y_0, \ldots, y_n]$ significa $y_i = \mu x_i \quad \mu \in \mathbb{K}\{0\}$ e

$$a_0y_0 + \ldots + a_ny_n = a_0\mu x_0 + \ldots + a_n\mu x_n = \mu(a_0x_0 + \ldots_{a\ n}x_n) = 0.$$

Iperpiano coordinati su $\mathbb{P}^n$ (rispetto al riferimento standard)

$$H_i = \{[x_0, \ldots, x_n] \in \mathbb{P}^n | x_i = 0\} \quad 0 \leq i \leq n.$$

Ad esmpio, in $\mathbb{P}^2$, $\mathrm{H}_0 = \{x_0 = 0\}$
$H_1 = \{x_1 = 0\}$
$H_2 = \{x_2 = 0\}$ Più in generale consideriamo un sistema di t equazioni omogenee

$$\begin{cases} a_{10}x_0 + \ldots a_{1n}x_n = 0 \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ a_{t0}x_0 + \ldots + a_{tn}x_n = 0 \end{cases}$$

Se $W \subset V$ è il sottospazio definito dal sistema precedente, l'insieme di punti $P \in \mathbb{P}$ le cui coordinate verificano il sistema è $\mathbb{P}(W)$
Sia $A = (a_{ij}) \quad 1 \leq i \leq t, 0 \leq j \leq n$ e sia $r = rk(A)$ $\dim \mathbb{P}(V) = \dim W - 1 = \dim V - r - 1 = \dim \mathbb{P}(V) - r$ Quindi $\mathbb{P}(W)$ ha condimensione r su $\mathbb{P}$
Intersezione
$A_1x = 0 \ \ \mathbb{P}(W_1)$
$A_2x = 0 \ \ \mathbb{P}(W_2)$

$$\begin{cases} A_1x = 0 \\ A_2x = 0 \end{cases} \quad \mathbb{P}(W_1) \cap \mathbb{P}(W_2) = \mathbb{P}(W_1 \cap W_2)$$

In particolare $\mathbb{P}(W_1) \cap \mathbb{P}(W_2) \neq 0 \Leftrightarrow W_1 \cap W_2 = \{0\}$

Definizione 4
$\mathbb{P}(W_1), \mathbb{P}(W_2)$ *si dicono*
Incidenti se $\mathbb{P}(W_1) \cap \mathbb{P}(W_2) \neq \emptyset$ *Sghembi se* $\mathbb{P}(W_1) \cap \mathbb{P}(W_2) =$

Osservazion
La formula si generalizza in

$$\bigcap_{i \in I} \mathbb{P}(W_i) = \mathbb{P}\left(\bigcap_{i \in I} W_i\right).$$

Definizione 5
Se $\emptyset \neq J \subset \mathbb{P}$*, il sottospazio proiettivo generato da* J *è*

$$L(J) = \bigcap_{\mathbb{P}(W) \supseteq J} \mathbb{P}(W).$$

con W *sottospazio di* V

Caso speciale
$J = \{p_{1,t}\}$. Scriveremo in tal caso $L(p_1, \ldots, p_y)$ Notiamo che se

$$p_1 = [v_1], \ldots, p_t = [v_t].$$

$$L(p_1, \ldots, p_t) = \mathbb{P}(< v_1, \ldots, v_t >).$$

In particolare
$\dim(L(p_1, \ldots, p_t)) \leq t - 1$

Definizione 6
$p_1, \ldots, p_t$ *si dicono linearmente indipendenti se*

$$\dim(L(p_{1,t})) = t - 1.$$

Esempio
p_1, p_2 sono indipendenti $\Leftrightarrow$ sono distinti
p_1, p_2, p_3 sono indipendenti $\Leftrightarrow$ non sono allineati

Definizione 7
$p_1, \ldots, p_t$ *in* $\mathbb{P} = \mathbb{P}(V)$, $\dim(V) = n + 1$ *si dicono in posizione generale se*
◦ *sono linearmente indipendenti* $(t \leq < n + 1)$
◦ *se* $t > n + 1$ *e* $n + 1$ *tra essi, comunque scelti, sono linearmente indipendenti*

AGGIUGNI ESMEPIO SU POSIZIONE GENERALE

2 Equazioni parametriche di un sottospazio

$k+1$ punti linearmente indipendenti $[v_0], \dots, [v_n]$ in un sottospazio proiettivo S di dimensione k.
Per ogni $P \in S$,

$$P = [\lambda_0 v_0 + \lambda_1 v_1 + \ldots + \lambda_k v_k].$$

Fissiamo ora un riferimento $e_0, \dots, e_n$ du $\mathbb{P}$
Allora se v_i ha coordinate $(p_{i0}, \dots, p_{in})^t$ rispetto a $_0, \dots, e_n\}$ e $P = P[x_0, \dots, x_n]$ si ha

$$\begin{cases} x_0 = \lambda_0 p_{00} + \lambda_1 p_{10} + \ldots + \lambda_k p_{k0} \\ x_1 = \lambda_0 p_{01} + \lambda_1 p_{11} + \ldots + \lambda_k p_{k1} \\ \vdots \\ x_n = \lambda_0 p_{0n} + \lambda_1 p_{1n} + \ldots + \lambda_k p_{kn} \end{cases}$$

Caso importante: rette $[v_0], [v_1]$

$$\begin{cases} x_0 = \lambda_0 p_{00} + \lambda_1 p_{10} \\ x_0 = \lambda_0 p_{01} + \lambda_1 p_{11} \\ \vdots \\ x_0 = \lambda_0 p_{0n} + \lambda_1 p_{1n} \end{cases}$$

$\mathbb{P}$ piano proiettivo, r retta per $P[p_0, p_1, 2], Q[q_0, q_1, q_2]$ r è un iperpiano in $\mathbb{P}$

$$\det \begin{pmatrix} x_0 & x_1 & x_2 \\ p_0 & p_1 & p_2 \\ q_0 & q_1 & q_2 \end{pmatrix} = 0.$$

Esercizio Se in $\mathbb{P}^3$ sono dati punti non allineati

$$P[p_0, p_1, p_2, p_3], Q[q_0, q_1, q_2, q_3], R[r_0, r_1, r_2, r_3].$$

l'equazione del piano per P, Q, E è

$$\det \begin{pmatrix} x_0 & x_1 & x_2 & x_3 \\ p_0 & p_1 & p_2 & p_3 \\ q_0 & q_1 & q_2 & q_3 \\ r_0 & r_1 & r_2 & r_3 \end{pmatrix} = 0.$$

Esempio Retta in $\mathbb{P}^2(\mathbb{C})$ per $[-1, 1, 1], [1, 3, 2i]$

$$\det \begin{pmatrix} x_0 & x_1 & x_2 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & 3 & 2i \end{pmatrix} = 0.$$

∘ C'eradicare che i punti $A = [1, 2, 2], B = [3, 1, 4], C = [\ldots]$ di $\mathbb{P}^2(\mathbb{R})$ sono allineati e scrivere un'equazione ella retta che li contiene

$$\det \begin{pmatrix} x_0 & x_1 & x_2 \\ 1 & 2 & 2 \\ 3 & 1 & 4 \end{pmatrix} = 0.$$

∘ Verificare che le rette per $\mathbb{P}(\mathbb{C})$
$ix_1 - x_2 + 3ix_0 = 0$

$x_0 + x_1 - ix_2 = 0$

$5 \dots$
hanno intersezione non vuota (basta verificare che il determinante sia no nullo)

$$A = \begin{pmatrix} 3i & i & -1 \\ 1 & 1 & -i \\ 5 & 1 & 3i \end{pmatrix}.$$

$\det A = 0$

Siano $S_1 = \mathbb{P}(W_1), S_2 = \mathbb{P}(W_2)$ due sottospazi proiettivi

$$L(S_1 \cup S_2) \text{ è detto sottospazio somma.}$$

$$L(S_1, S_2) = P(W_1 + W_2).$$

Infatti, se $\mathbb{P}(W) \supset S_1 \cup S_2$, allora contiene $\mathbb{P}(W_1 + W_2)$ perché W deve contenere sia W_1 che W_2
D'altra parte, $W_1 + W_2 \supseteq W_1, \quad W_1 + W_2 \supseteq W_2$
quindi $\qquad \mathbb{P}(W_1 + W_2) \supseteq P(W_1) = S_1$
$\mathbb{P}(W_1 + W_2) \supseteq P(W_2) = S_2 \Rightarrow \supseteq L(S_1, S_2)$

Teorema 1 (Forumla di Grassmann proiettiva)

$$\dim L(S_1, S_2) = \dim S_1 + \dim S_2 - \dim S_1 \cap S_2.$$

($S1, S_2$ sottospazi proiettivi di $\mathbb{P}(V)$)

Dimostrazione
La dimostrazione segue subito dalla formula di Grassmann vettoriale

$$\dim(W_1 + W_2) = \dim W_1 + \dim W_2 - \dim W_1 \cap W_2.$$

$\dim L(S_1, S_2) - 1 = \dim S + 1 + \dim S_2 + 1 - (\dim S1 \cap S_2 + 2)$ □
Osservazione
Poiché $\dim L(S_1, S_2) \leq \dim \mathbb{P}$, risulta dalla formula di Grassmann

$$\dim S_1 \cap S_2 \geq \dim S_1 + \dim S_2 - \dim \mathbb{P}.$$

In particolare

$$\dim S_1 + \dim S_2 \geq \dim \mathbb{P} \Rightarrow S_1, S_2 \text{ sono incidenti.}$$

(Infatti $\dim S_1 \cap S_2 \geq 0 \Leftrightarrow S_1 \geq S_2 \neq \emptyset$)

Corollario 1 (Antani[2])
1. In un piano proiettivo due rette si intersecano
2. In uno spazio proiettivo di dimensione 3 una retta e un piano si intersecano e due piani distinti si intersecano in una retta